creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

단순개념모형을 활용한 기후변화 유량전망에 관한 연구

A Study on Runoff Projections Considering Climate Change Using Simple Conceptual Models

2015년 02월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

정 차 미

단순개념모형을 활용한
기후변화 유량전망에 관한 연구

A Study on Runoff Projections Considering Climate Change Using Simple Conceptual Models

지도교수 김 영 오
이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2014년 10월

서울대학교 대학원
건설환경공학부
정 차 미

정차미의 석사학위논문을 인준함
2014년 12월

위 원 장 서 일원 (인)
부 위 원 장 김 영 오 (인)
위 원 황 진 환 (인)

초 록

국내의 기후변화에 의한 수자원 영향평가는 2000년대부터 활발히 진행되고 있다. 특히 금강유역을 대상으로 한 수자원 영향평가 사례가 많으나 동일 유역인데도 불구하고 매우 다른 결과들을 제시하고 있다. 이와 같이 기후변화 영향평가의 상이한 결과로 인해 관련 정책에 적용되지 못하고 연구에만 그치고 있는 실정이다. 따라서 수자원 영향평가의 가장 기본적인 유량 전망에 대해 유역 차원의 표준화된 시나리오를 산출하기 위해 노력해야 한다. 표준화된 유량 시나리오를 산출하기 위한 중요한 요소에는 강우-유출모형의 선정이 있다. 각 모형은 서로 다른 장·단점을 가지고 있기 때문에 연구 목적에 맞는 강우-유출 모형을 선정하는 과정은 매우 중요하다. 하지만 대부분 기후변화 특이성을 고려하지 않고, 편의성과 가용성을 기준으로 강우-유출모형을 선정하여 사용해왔다. 따라서 신뢰성 있고 표준화된 기후변화 영향평가를 위해 기후변화에 적합한 강우-유출모형의 적용성 검토 및 개선 연구가 필요하다.

기후변화 연구에서는 실시간 운영(real-time operations)이 아닌 유역수자원의 평가 및 장기 계획(planning)에 초점이 맞추어져 있어 변화 총량이 중요하며, 다양한 시나리오를 사용하여 입력자료에 이미 불확실성이 존재한다. 따라서 기후변화 연구에서는 불확실성이 적은 가능한 단순한 강우-유출모형이 적합할 수 있다. 이에, 본 연구에서는 단순개념모형을 기후변화 연구에 적합한 모형으로 제시하고 기후변화 연구가 활발히 진행된 용담댐 유역을 대상으로 RCP 시나리오 기반의 미래 유량을 전망하였다. 이를 위해 구조적 복잡성이 다른 준분포모형인 SWAT 모형과 단순개념모형인 IHACRES 모형과 GR4J 모형을 이용하여 각각 미래 유량을 전망하고 결과를 분석하였다. 각 모형은 동일한 기상입력자료로 검·보정을 실시하였는데, 제한된 자료를 k-fold cross validation 기법을 이용하여 보정기간을 늘려 신뢰성을 높였다.

SWAT 모형을 이용하여 용담댐 유역의 유량을 전망한 결과를 선행

연구와 비교해 본 결과 자료 및 모형 구축 과정이 복잡하여 같은 모형이여도 상이한 결과를 나타내었다. 반면, 단순개념모형들의 경우 유량 전망 결과의 차이가 적었다. 기후변화를 고려한 유량 전망에서는 기후변화 시나리오를 사용함에 있어서 이미 불확실성이 존재하므로 모형의 모의능력이 비슷하다면 가능한 불확실성이 적은 구조적으로 단순한 모형을 사용하는 것이 적합하다. 연구 결과, 용담댐 유역에 대한 단순개념모형들의 *NSE*가 0.8 정도로 매우 높게 나와 유출모의에 집중한다면 기후변화 연구에 단순개념모형을 활용하는 것이 추천된다.

SWAT, IHACRES, GR4J 모형을 이용하여 용담댐 유역에 대해 과거기간 대비 미래 기간(2040s, 2080s)의 유량 변화는 비슷하게 전망되었다. RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 2040s, 2080s에 평균적으로 22.2%, 44.0% 증가할 것으로 전망되었으며, RCP8.5 시나리오를 적용한 경우에는 2040s, 2080s에 평균적으로 각각 16.4%, 22.3% 증가할 것으로 전망되었다. 모든 모형의 결과에서 RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 경우보다 총유출량 증가율이 컸는데, 이는 RCP4.5 시나리오의 경우 RCP8.5 시나리오에 비해 강수량이 더 크게 증가하여 유효강수량이 크지만 기온은 더 적게 상승하여 증발산량이 더 적기 때문인 것으로 추정된다. 또한 계절별 유량을 분석하였을 때, 과거기간 대비 겨울철 유량 증가율이 큰 것으로 나타났다.

주요어: 기후변화, 유량 전망, 강우-유출모형, 단순개념모형, GR4J, IHACRES, SWAT

학 번: 2013-20939

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구목적 ····· 3

1.3 논문의 구성 ····· 4

제 2 장 연구 동향 ····· 5

2.1 한반도 수자원 분야 기후변화 영향평가 ····· 5

2.2 기후변화 영향평가를 위한 강우-유출모형 ····· 7

2.2.1 전 세계 사례 ····· 8

2.2.2 금강유역 사례 ····· 9

제 3 장 이론적 배경 ····· 12

3.1 RCP 온실가스 배출 시나리오 ····· 12

3.1.1 RCP 온실가스 배출 시나리오 개요 ····· 12

3.1.2 SRES와 RCP의 비교 ····· 15

3.1.3 RCP 시나리오를 따른 한반도 기후변화 시나리오 ····· 19

3.2 기후변화 영향평가를 위한 대표적 강우-유출모형 ····· 21

3.2.1 강우-유출모형의 일반적 분류 ····· 21

3.2.2 기후변화 연구에 적합한 강우-유출모형 특성 ····· 24

3.2.3 단순개념모형: IHACRES 및 GR4J 모형 ····· 26

3.2.4 준분포모형: SWAT ····· 35

제 4 장 적용 및 결과 ····· 38
4.1 적용 개요 ····· 38
4.1.1 대상유역 ····· 38
4.1.2 적용방법 ····· 41
4.1.3 수문기상자료 ····· 43
4.2 SWAT 모형을 이용한 유량 전망 ····· 46
4.2.1 적용성 평가 ····· 46
4.2.2 유량 전망 ····· 55
4.2.3 과거 연구와 비교·분석 ····· 71
4.3 단순개념모형을 이용한 유량 전망 ····· 82
4.3.1 적용성 평가 ····· 82
4.3.2 유량 전망 ····· 91
4.3.3 강우-유출모형 간의 유량 전망 결과 비교 ····· 116

제 5 장 결론 및 향후 연구 ····· 124
5.1 요약 및 결론 ····· 124
5.2 향후 연구 ····· 126

참 고 문 헌 ····· 128

Abstract ····· 136

표 목차

표 2.1 금강유역 사례 ····· 11
표 3.1 RCP의 종류와 그에 상응하는 복사강제력 및 CO2 농도(국립기상연구소, 2011) ····· 14
표 3.2 SRES, RCP 시나리오의 비교(국립기상연구소, 2011) ····· 17
표 3.3 집중형 모형과 분포형 모형의 비교 ····· 23
표 3.4 GR4J 모형의 매개변수 ····· 34
표 4.1 연평균 수문기상자료 ····· 45
표 4.2 본 연구(SW-P)에서 추정된 매개변수 및 보정 결과 ····· 48
표 4.3 박종윤 등(2014)과 본 연구(SW-P)의 모의 결과 비교 ····· 49
표 4.4 k-fold cross validation을 이용한 매개변수 검·보정 case ····· 52
표 4.5 k-fold cross validation을 이용한 검·보정 결과(SW-K) ····· 53
표 4.6 연평균 기후변화 시나리오(RCP4.5, 8.5) ····· 58
표 4.7 SWAT 모형을 이용한 연평균 유량 전망 결과(SW-K) ····· 58
표 4.8 RCP 시나리오별 과거기간 대비 미래기간의 유역 평균 수문 변화율(SW-K) ····· 61
표 4.9 RCP4.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(SW-K) ····· 67
표 4.10 RCP8.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(SW-K) ····· 68
표 4.11 SWAT 모형을 이용한 유량전망 연구 ····· 72
표 4.12 연구별 검·보정 기간 ····· 72
표 4.13 박종윤 등(2014)과 SW-P의 유량 전망 결과 비교 ····· 74
표 4.14 박종윤 등(2014)과 SW-P의 입력자료 비교 ····· 75
표 4.15 SW-P와 SW-K의 유량 전망 결과 비교 ····· 77
표 4.16 SW-K와 국토교통부(2013)의 유량 전망 결과 비교 ····· 78
표 4.17 SWAT모형을 이용한 연평균 유량 결과 비교 ····· 80
표 4.18 연구 결과 간의 차이 (기준: SW-K) ····· 80

표 4.19 IHACRES 모형의 모의능력 평가 ····· 83
표 4.20 IHACRES 모형의 매개변수 및 보정 결과 ····· 83
표 4.21 GR4J 모형의 모의능력 평가 ····· 85
표 4.22 GR4J 모형의 매개변수 및 보정 결과 ····· 85
표 4.23 모형 간 모의능력 및 효율성 비교 ····· 90
표 4.24 IHACRES 모형을 이용한 연평균 유량 전망 결과 ····· 92
표 4.25 RCP4.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(IHACRES) ····· 100
표 4.26 RCP8.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(IHACRES) ····· 101
표 4.27 GR4J 모형을 이용한 연평균 유량 전망 결과 ····· 104
표 4.28 RCP4.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(GR4J) ····· 112
표 4.29 RCP8.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(GR4J) ····· 113
표 4.30 모형별 연평균 유량 전망 결과 비교 ····· 119

그림 목차

그림 3.1 전 지구 기후변화 연구의 흐름 변화(IPCC, 2007) ····· 18
그림 3.2 RCP 시나리오(좌)와 SRES(우) 시나리오의 온실가스 농도 비교(기상청) ····· 18
그림 3.3 RCP 활용 한반도 기후변화 시나리오 산출방법(기상청) ····· 20
그림 3.4 GR4J 모형의 구성(Perrin et al., 2003) ····· 34
그림 3.5 SWAT 모형의 개념도(Arnold et al., 2002) ····· 37
그림 4.1 유역도 ····· 40
그림 4.2 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간의 유출량(SW-P) ····· 50
그림 4.3 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간의 유출량(SW-K) ····· 54
그림 4.4 RCP4.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(SW-K) ····· 59
그림 4.5 RCP8.5 시나리오를 따른 물수지 분석(SW-K) ····· 60
그림 4.6 RCP4.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(SW-K) ·· 63
그림 4.7 RCP8.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(SW-K) ·· 63
그림 4.8 RCP4.5 시나리오를 적용한 월별 변화(SW-K) ····· 64
그림 4.9 RCP8.5 시나리오를 적용한 월별 변화(SW-K) ····· 65
그림 4.10 강수량의 계절별 변화(RCP4.5) ····· 69
그림 4.11 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP4.5) ····· 69
그림 4.12 총유출량의 계절별 변화(RCP4.5, SW-K) ····· 69
그림 4.13 강수량의 계절별 변화(RCP8.5) ····· 70
그림 4.14 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP8.5) ····· 70
그림 4.15 총유출량의 계절별 변화(RCP8.5, SW-K) ····· 70
그림 4.16 SWAT모형을 이용한 연평균 유량 결과 비교(RCP4.5) ····· 81
그림 4.17 SWAT모형을 이용한 연평균 유량 결과 비교(RCP8.5) ····· 81
그림 4.18 IHACRES 모형의 검·보정 결과 ····· 84
그림 4.19 GR4J 모형의 검·보정 결과 ····· 86

그림 4.20 모형별 용담댐 유역에 대한 유량 모의능력 (a) NSE ····· 88
그림 4.21 모형별 용담댐 유역에 대한 유량 모의능력 (b) R^2 ····· 89
그림 4.22 RCP4.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(IHACRES) ····· 93
그림 4.23 RCP8.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(IHACRES) ····· 94
그림 4.24 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(RCP 4.5, IHACRES) ····· 96
그림 4.25 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(RCP8.5, IHACRES) ····· 96
그림 4.26 RCP4.5 시나리오를 적용한 월별 변화(IHACRES) ····· 97
그림 4.27 RCP8.5 시나리오를 적용한 월별 변화(IHACRES) ····· 98
그림 4.28 강수량의 계절별 변화(RCP4.5) ····· 102
그림 4.29 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP4.5) ····· 102
그림 4.30 총유출량의 계절별 변화(RCP4.5, IHACRES) ····· 102
그림 4.31 강수량의 계절별 변화(RCP8.5) ····· 103
그림 4.32 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP8.5) ····· 103
그림 4.33 총유출량의 계절별 변화(RCP8.5, IHACRES) ····· 103
그림 4.34 RCP4.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(GR4J) ····· 105
그림 4.35 RCP8.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(GR4J) ····· 106
그림 4.36 RCP4.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(GR4J) 108
그림 4.37 RCP8.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(GR4J) 108
그림 4.38 RCP4.5 시나리오를 적용한 월별 변화(GR4J) ····· 109
그림 4.39 RCP8.5 시나리오를 적용한 월별 변화(GR4J) ····· 110
그림 4.40 강수량의 계절별 변화(RCP4.5) ····· 114
그림 4.41 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP4.5) ····· 114
그림 4.42 총유출량의 계절별 변화(RCP4.5, GR4J) ····· 114
그림 4.43 강수량의 계절별 변화(RCP8.5) ····· 115
그림 4.44 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP8.5) ····· 115
그림 4.45 총유출량의 계절별 변화(RCP8.5, GR4J) ····· 115
그림 4.46 모형별 연평균 유량 전망치 비교(RCP4.5) ····· 120
그림 4.47 모형별 연평균 유량 전망치 비교(RCP8.5) ····· 120

그림 4.48 모형별 과거기간 대비 연평균 유량 전망 변화율(RCP4.5) ····· 121
그림 4.49 모형별 과거기간 대비 연평균 유량 전망 변화율(RCP8.5) ····· 121
그림 4.50 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP4.5, 2040s) ··· 122
그림 4.51 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP4.5, 2080s) ····· 122
그림 4.52 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP8.5, 2040s) ··· 123
그림 4.53 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP8.5, 2080s) ····· 123

기 호

Latin Uppercase

E	증발산량(evapotranspiration)
E_a	i일 동안의 증발산량(evapotranspiration for i day)
E_n	순증발산량(net evapotranspiration)
E_s	저류조로부터 증발량(evaporation from the store)
E_T	잠재증발산량 손실(evapotranspiration loss)
F	기저유량 변환값
M_f	CMD(catchment moistrue deficit)의 잠정적인 값 (interim value of CMD)
M_k	CMD
M_{k-1}	전 시간의 CMD 값(CMD value for the previous timestep)
$\overline{O}$	관측유량평균(average observed flow)
O_i	관측유량(observed flow)
P	강수량(precipitation)
$\overline{P}$	모의유량평균(average simulated flow)
$Perc$	침루량(percolation)
P_i	모의유량(simulated flow)
P_n	순강우량(net rainfall)
P_r	선형홍수추적량(linear routing quantity)
P_s	순강우량의 일부(part of P_n)

Q	유출량(discharge)
Q_d	지표유출량(surface runoff)
Q_{gw}	i일 동안의 회귀수량(return flow for i day)
Q_k	총유출량(total flow)
Q^q	직접유출(quick flow)
Q_r	기저유출량(base flow)
Q^s	기저유출(slow flow)
Q_{surf}	i일 동안의 표면유출량(surface runoff for i day)
R	홍수추적저류지의 수위(level in the routing store)
R_{day}	i일 동안의 강수량(precipitation for i day)
S	토양수분저류고(level in the store)
SH	S-Curve
SW_0	i일 동안의 초기토양수분량 (initial soil water content for i day)
SW_t	최종토양수분량(final soil water content)
T	온도 또는 PET의 입력자료 (temperature or PET input data)
U	유효강수량(effective rainfall)
UH	단위유량도(unit hydrograph)
W_{seep}	i일 동안의 침루량(percolation for i day)
$X1$	최대토양수분저류량 (maximum capacity of the production store)
$X2$	기저유량 변수(groundwater exchange coefficient)
$X3$	홍수추적 저류량 (ond day ahead maximum capacity of the routing store)

X4	우상주량도의 시간변수 (time base of unit hydrograph *UH1*)

Latin Lowercase

d	흐름 한계 매개변수(flow threshold parameter)
e	온도를 잠재증발산량으로 변환해주는 매개변수 (Temperature to potential evapotranspiration conversion factor)
f	plant stress threshold, CMD stress threshold as a proportion of d
k	시간(time)
n	시간 간격개수(time step)

Greek Uppercase

α_q	parameters for the recession rate of quick flow
α_s	parameters for the recession rate of slow flow
β_q	parameters for the peak response of quick flow
β_s	parameters for the peak response of slow flow
τ_q	recession time constant for quick flow
τ_s	time constant for slow flow store
v_q	총유출량에 대한 직접유출의 비율 (fractional volume for quick flow)
ν_s	총유출량에 대한 기저유출의 비율 (fractional volume for slow flow)

제 1 장 서론

1.1 연구배경

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서에 따르면 지난 133년간(1880~2012년) 지구 평균기온은 0.85°C 상승하였으며, 그 증가 추세는 현재도 지속되고 있다(기상청, 2014). 이러한 지구온난화로 인한 이상기후 현상의 발생빈도, 강도, 지속기간, 공간분포가 점차 변하고 있으며, 매해 막대한 인명과 재산 피해로 이어진다. 특히, 우리나라가 위치한 동아시아 지역은 복잡한 지리적 특성 으로 인해 기후 변동성이 크기 때문에 기후변화로 인한 이상기후 발생 피해가 심각하다. 소방방재청의 조사에 따르면 우리나라의 경우 2012년도에 자연재해로 16명의 인명 피해와 1조 892억 원의 재산 피해를 입었다. 최근 10년간의 43명의 인명피해와 1조 1,556억 원의 재산피해와 비교해볼 때 점차 피해가 가속화되는 것을 알 수 있다(기상청, 2014).

특히, 기후변화는 물 순환의 특성을 변화시키는데, 이는 미래 수자원 확보에 대한 불확실성을 가중시킨다. 기후변화에 따라 강수 발생 시기와 패턴의 변화로 인해 홍수 및 가뭄의 빈도와 규모가 증가하면서 물관리가 매우 어려워 질 것으로 전망된다. 특히 우리나라는 협소한 국토면적과 과다한 인구로 토지나 수자원 등 자원 이용의 강도가 높아 기후변화로 인한 물 문제가 심각하게 발생할 수 있다. 이러한 상황 하에서 향후 안정적이고 지속적인 물관리를 하려면 수문순환 변화에 대한 정확한 파악이 필요하며 더 나아가 과학적 근거에 기반을 둔 미래 수자원 전망 및 영향평가 연구가 수행되어야 한다. 이를 위해서는 기후변화와 수문순환과의 관계가 지역(유역)규

모 차원에서 예측되고 평가되기 위한 시스템이 구축되어야 하며, 장기적인 국가 수자원계획을 위해서는 기후변화에 의한 한반도 및 유역 규모의 수자원에 미치는 영향 예측 및 평가가 필요하다(국토교통부, 2013). 국내의 기후변화에 의한 수자원 영향평가는 2000년대부터 활발히 진행되고 있다. 특히 금강유역을 대상으로 한 수자원 영향평가 사례가 많으나 동일 유역인데도 불구하고 매우 다른 결과들을 제시하고 있다(과학기술부, 2004; 환경부, 2006; 과학기술부, 2007; 교육과학기술부, 2010; 박진혁 등, 2011; 노선희 등, 2013; 국토교통부, 2013; 박종윤 등, 2014). 이와 같이 기후변화 영향평가에 대한 불확실성이 크고 상이한 결과로 인해 관련 정책에 적용되지 못하고 연구에만 그치고 있는 실정이다(노선희 등, 2013). 이러한 불확실성을 줄이는 데 중요한 요소로 강우-유출모형의 선정이 있다. 신뢰성 있고 표준화된 기후변화 영향평가를 위해 기후변화에 적합한 강우-유출모형의 적용성 검토 및 개선 연구가 필요하다. 기후변화 연구에서는 실시간 운영(real-time operations)이 아닌 유역수자원의 평가 및 장기 계획(planning)에 초점이 맞추어져 있기 때문에 모형의 불확실성을 고려했을 때 단순개념모형을 사용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

기후변화에 따른 수자원 연구는 크게 이수 및 치수로 구분될 수 있다. 이수 및 치수의 영향평가를 위해서는 수문순환의 핵심요소인 하천유출량 산정이 선행되어야 한다. 미래 유량 산정은 일반적으로 GCM(General Circulation Model)을 이용해 산출한 기후시나리오를 입력 자료로 사용하는데 이는 일련의 인위적 강제력 시나리오를 기반으로 한다. 여기서, 인위적 강제력 시나리오는 온실가스 배출 시나리오라고 부르는데, IPCC 제 4차 평가보고서에서는 SRES(Special Report on Emission Scenarios) 시나리오가 사용되었다. 하지만 SRES 시나리오는 산출과정의 시간 지연과 자료의 노후화 및 해상

도 문제로 인해 정확성과 다양성을 필요로 하는 새로운 시나리오의 필요성을 증대시켰다. 결국, IPCC 제 5차 평가보고서를 위한 새로운 온실가스 배출 시나리오, RCP(Representative Concentration Pathways)가 제시되었다. SRES에서는 미래의 사회·경제 형태가 가장 먼저 결정되고 이에 따른 배출량 시나리오로 온실가스 농도가 정해진 반면, RCP에서는 복사강제력을 먼저 설정하여 최신 온실가스 농도 변화 경향을 반영할 수 있다. 따라서 각국에서는 새로운 RCP 시나리오를 따른 기후변화 전망 및 영향평가가 진행되고 있으며 우리나라도 예외는 아니다. 그러므로 본 연구에서는 기후변화 연구에 적합한 강우-유출모형으로 단순개념모형을 제시하고 이를 이용하여 RCP 온실가스 배출 시나리오 기반의 개선된 유량 시나리오를 제공하고자 한다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 우리나라 기후변화 연구에서 가장 많이 적용된 금강유역의 용담댐 유역을 대상으로 단순개념모형부터 물리적 기반 준분포모형까지 각 구조의 복잡성이 다른 강우-유출모형을 활용하여 RCP 시나리오 기반의 유량시나리오를 제시하고, 불확실성이 적은 단순개념모형이 기후변화 연구에 적합한 강우-유출모형임을 확인하고자 한다. 이를 달성하기 위한 세부적인 목적은 다음과 같다.

(1) RCP 시나리오 기반의 기후변화 시나리오를 이용한다. 본 연구에서 새롭게 발표된 RCP 기반의 기후변화 시나리오를 활용하여 유량 전망을 새롭게 생성하는데 의의가 있다.

(2) 과거 용담댐 유역에서 가장 많이 사용된 SWAT 모형을 이용

하여 유량 전망을 실시하고 이를 과거 연구와 비교하여 SWAT 모형을 이용한 기후변화 유량 전망 결과의 상이성의 요인에 대해 살펴본다.

(3) 기후변화 연구 목적에 적합한 강우-유출모형으로 단순개념모형의 사용을 제안하여 유량 전망을 수행한다. 단순개념모형과 준분포모형(SWAT)의 결과를 비교· 분석하여 단순개념모형의 기후변화 연구에 대한 적합성을 확인한다.

1.3 논문의 구성

본 논문의 2장에서는 한반도 수자원 분야 기후변화 영향평가에 관한 연구와 기후변화 영향평가를 위한 강우-유출모형의 국내·외 사례를 서술하였다. 3장에서는 RCP 온실가스 배출 시나리오의 개요와 SRES 온실가스 배출 시나리오와의 비교를 통해 개선된 점을 파악하였다. 또한 기후변화 영향평가를 위한 대표적 강우-유출모형의 특성과 함께 단순개념모형의 기후변화 연구에 적합성에 관한 근거에 대해 제시하였다. 4장에서는 SWAT 모형을 이용한 미래 유량 전망 결과를 제시하고 이를 과거 연구와 비교하여 차이를 분석하였다. 또한 단순개념모형(IHACRES 모형, GR4J 모형)을 이용한 미래 유량 전망 결과를 제시하였으며 이를 SWAT 모형 결과와 비교하여 기후변화 연구에서 단순개념모형의 적합성을 확인하였다. 마지막으로, 5장에서는 용담댐 유역 유량 전망 결과를 요약하고 결론을 기술하였으며 향후 연구에 대해서 정리하였다.

제 2 장 연구 동향

전 세계적으로 지구온난화와 기상이변으로 인한 인명과 재산의 피해는 해마다 증가하고 있으며 최근 한반도의 기후와 기온은 지구 평균치보다 큰 변화가 일어나고 있다. 이러한 기후변화는 “기후 양극화 현상”을 야기하는데 건조한 지역의 강수량은 더욱 줄어들게 하여 가뭄의 빈도를 증가시키고, 다우지역의 경우는 강수량이 더욱 늘어나 홍수의 규모와 빈도를 증가시킨다(기상청, 2014). 이러한 극한 홍수 및 가뭄 발생에 대한 대응정책을 세우기 위해 수자원 분야 기후변화 영향평가는 활발히 이루어지고 있으며 좀 더 정확한 수문현상 예측을 위해 기후변화 연구의 특성을 고려한 강우-유출모형 선정의 필요성 또한 제기되고 있다.

따라서 2.1절에서는 한반도 수자원 분야 기후변화 영향평가에 관한 연구를 살펴보고 2.2절에서는 기후변화 영향평가를 위한 강우-유출모형의 국내·외 사례를 살펴보았다.

2.1 한반도 수자원 분야 기후변화 영향평가

1990년대 중반까지 국내의 수자원분야 기후변화 영향에 대한 연구는 상대적으로 미비한 실정이었다. 하지만 2000년에 접어들면서 대한민국 정부를 중심으로 다수의 프로젝트가 발주되면서 활발하게 진행되고 있다. 수자원 분야의 기후변화 영향평가는 크게 유출, 홍수, 가뭄으로 분류할 수 있다. 유출의 경우 지표수 유출과 지하수 유출로 구분 지을 수 있는데, 지표수 유출 연구는 댐 유입량 및 하천 유출량과 관련되어 수문모형의 개발, 홍수와 관련된 유출량 산정, 빈도 분석 등에 초점이 맞추어져 있다. 이 중 대부분은 비교적 정확한 자료를 얻을 수 있는 댐 유출량에 초점이 맞추어져 있다. 반

면, 지하수 연구는 수가 상대적으로 매우 적으며, 지하수 함양량을 추정하는 연구에 편중되어 있는 실정이다. 홍수에 관한 영향평가 연구를 보면 홍수의 빈도와 규모가 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있으며, 국내 가뭄 연구들은 대부분 가뭄지수를 국내에 맞게 수정하거나 개발하는 연구들이 대부분이다.

서용원 등(2000)은 한국과학기술연구원(KIST)에서 제공한 GCM 자료를 이용하여 대청댐 유역의 저수지 운영모의를 실시하였으며, 이동률 등(2004)은 기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 환경부(2006)는 기후변화에 의한 물 순환의 예측 및 영향을 평가하고자 기후모형인 SNURCM을 개발하였다. 과학기술부(2007)는 21세기 프론티어 연구개발사업을 통해 기후변화에 의한 수자원 영향평가체계를 구축하였다. 황준식 등(2007)은 금강유역을 대상으로 기후변화 영향평가를 위한 물수지 모형을 검토하여 *abcd* 모형의 적용성을 확인하였으며 안소라 등(2008)은 기후변화와 미래 토지이용변화를 함께 고려하여 유출분석을 실시하였다. 손태석 등(2010)은 낙동강 유역을 대상으로 강우의 경향성 분석을 통한 기후변화 영향을 규명하고 강우와 유출 탄성도 분석을 통한 기후변화의 수문학적 영향을 평가하였다. 김병식 등(2010)은 한강유역을 대상으로 CA-Markov Chain기법과 SLURP 모형을 사용하여 미래토지이용변화를 고려한 유출량 분석을 실시하였다. 이명진 등(2010)은 경상북도 칠곡군과 그에 인접한 다소 넓은 유역을 연구지역으로 삼았고, 기존의 기후변화와 지하수 함양량의 불명확한 관계를 정량적으로 분석하였다. 손경환 등(2010)은 SRES A2 배출시나리오에 13개 GCMs를 적용하여 기후시나리오를 생성하고 미래 확률강우량을 산정하여 홍수특성변화를 평가하였다. 김호성 등(2010)은 A1B 배출시나리오와 SAD 곡선을 이용하여 극한 가뭄에 대한 기후변화의 영향을 분석하였다. 김수전 등(2010)은 한강 유역을 대상으로 A2 기후

변화 시나리오와 SLURP 모형, K-WEAP 모형을 이용해 미래 물 부족 정도를 평가하였다. 박진혁 등(2011)은 금강유역 내 대청댐 및 용담댐유역을 대상으로 2011~2090년 까지 SWAT 모형을 이용하여 미래 유출량 전망을 분석하였다. 이아연과 김상단(2011)은 낙동강 유역을 대상으로 환경유량의 개념을 도입하고 TANK 모형을 이용하여 유출량 전망 분석을 하였다. 이종문 등(2012)은 2011년부터 2100년까지 낙동강 수계의 남강댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유출량 변화를 예측하였다.

2.2 기후변화 영향평가를 위한 강우-유출모형

기후변화로 인한 수자원 시스템의 변화를 평가하고 미래 상태를 전망하기 위해서는 강수, 잠재증발산 등 수문기상 변수의 변동 파악과 더불어 이러한 변동으로 인한 유출량의 증감을 예측하고 평가하는 과정이 매우 중요하다. 이를 위해서 기후변화 시나리오를 이용한 고해상도 기상자료를 강우-유출 모형(rainfall-runoff model)에 적용하여 유역별 유량 시나리오를 생성하는 방법이 일반적이다.

강우-유출모형은 각기 장·단점을 가지고 있으며 모의결과에 대한 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 모형 매개변수의 불확실성, 입력자료의 불확실성 및 시스템의 초기상태 등으로 인해 발생하는 모형의 불확실성을 최소화하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 우선 연구목적에 가장 잘 부합되는 모형의 선정과 대상유역에 대한 적용성 문제, 매개변수 추정방법의 정확성과 모형별 제한사항들을 신중하게 고려하여야 한다(배덕효 등, 2007). 즉, 기후변화 연구에 적합한 강우-유출모형 특성을 정의하고, 그에 맞는 강우-유출모형을 선정하여 연구에 적용시킴으로써 신뢰성을 높일 수 있다(Leavesley, 1994; Xu, 1999a; 배덕효 등, 2007; 국토교통부, 2013). 따라서 국내·외 기

후변화 영향평가에 어떤 강우-유출모형이 적용되었는지 살펴보았다.

2.2.1 전 세계 사례

국외에서는 다양한 장기 강우-유출모형들이 기후변화 영향평가에 적용되어 왔다.

단순개념모형은 총 수량 개념의 거시적인 관점에서 모의되는 모형으로 세부적인 토지이용, 식생과 같은 물리적인 요소를 고려하지 못한다. 하지만 비교적 적은 자료로 모의가 가능하며 다양한 수문조건에 적용이 가능한 측면에서 유연하다는(flexible) 특징이 있어 월 단위 이상의 기후변화 영향평가에 많이 사용되었다(Gleick, 1987; Arnell, 1992; Xu, 1999b; Guo et al., 2002). Vaze et al.(2010)은 4개의 단순개념모형(SIHHYD, Sacramento, SMARG, IHACRES)을 사용하였고, Tian et al.(2013)은 준분포모형과 함께 GR4J 모형을 사용하여 기후변화영향평가를 실시하였다.

극한사상의 변동성 평가 또는 토지피복 및 식생의 변화를 고려한 영향평가를 위해 격자형 준분포형 또는 분포형 강우-유출모형 또한 활발히 적용되고 있다. Legesse et al.(2003)은 열대 아프리카지역에서 PRMS 모형을 적용하여 토지이용 변화와 기후변화에 대한 수문학적 영향을 분석하였고, Jha et al.(2004)은 미시시피강 상류유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 기후변화가 유출량에 미치는 영향을 분석하였다. Fujihara et al.(2008)은 수자원에 미치는 기후변화의 잠재적 영향을 융설효과를 고려하여 살펴보았고, Franczyk and Chang(2009)는 토지이용변화와 기후변화의 영향을 유출량에 대해 평가하였다. Prudhomme et al.(2011)은 수문순환에 대한 기후변화 영향은 주로 대규모 격자형 모형이 사용된다고 하였는데 3가지 대규모 격자형 모형(Joint U.K. Land Environment Simulator(JULES);

Water Global Assessment and Prognosis(WaterGAP); Max Planck Institute Hydrological Model(MPI-HM))을 이용하여 유럽의 수문극치 현상을 모의해봄으로써 각 모형의 성능을 비교해 보았다. 특히 미국에서는 VIC 모형을 많이 사용하고 있었다(Liang et al., 1994; Nijssen et al., 1997; Hamlet et al., 1999; Elsner et al., 2010; Cayan et al., 2010; Das et al., 2011). 이 모형은 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 Water 및 Energy Flux를 모의하는 대규모 모형(macro-scale model)이다(Liang et al., 1994).

2.2.2 금강유역 사례

금강유역에 적용된 기후변화 시나리오를 이용한 강우-유출모형의 사례는 다음과 같다.

안재현 등(2001)은 GCM 결과로부터 대청댐 유역의 유출량 변화를 파악하기 위하여 물수지 모형을 적용하였고, 과학기술부(2004)는 용담댐 유역을 대상으로 YONU GCM에 의해 작성된 기후변화 시나리오를 SLURP 모형에 입력하여 기후변화가 용담댐 유역의 유출량과 수자원에 미치는 영향을 평가하였다. 환경부(2006)는 지면모형인 CLM을 RCM에 접합시킨 SNURCM을 개발하였으며 물수지모형과 연계하여 4대강 유역의 유출량 산정하였고, 강동현(2007)은 용담댐 유역을 대상으로 5개의 GCM을 이용하여 시나리오를 생성하고 abcd모형을 이용하여 기후변화가 유출에 미치는 영향을 평가하였다. 과학기술부(2007)은 A2, B2 시나리오를 이용하여 국내 5대강 139개 유역을 대상으로 PRMS 모형을 이용하여 장기유출분석을 수행하였고, 교육과학기술부(2010)는 국내 109개의 중권역을 대상으로 13개의 AOGCM을 사용하여 기후시나리오를 생성하였다. 강우-유출모

형의 선정에 따른 영향을 고려하기 위해 기존에 사용하였던 PRMS 외에 SWAT 및 SLURP 모형을 이용하여 강수량 및 유출량 분석을 실시하였다. 박진혁 등(2011)은 대청댐 및 용담댐유역을 대상으로 ECHO-G의 A1B 시나리오와 SWAT 모형을 이용하여 미래 유출량을 전망하였고, 노선희 등(2013)은 RCP 시나리오를 기반으로 ArcSWAT 모형을 이용하여 금강유역의 미래 유출량과 댐별 용수공급 변화량을 산정하였다. 국토교통부(2013)는 국내 9개의 댐유역을 대상으로 SWAT, PRMS, SLURP 모형과 RCP4.5, 8.5 시나리오를 사용하여 미래 유량을 전망하였고, 박종윤 등(2014)은 RCP4.5, 8.5시나리오와 SWAT 모형을 이용하여 용담댐유역의 미래 유량을 전망하였다. 기후변화로 인한 미래 유량변화에 관한 연구는 동일한 유역을 대상으로 하였어도 매우 다른 결과들을 산출하였다(표 2.1).

표 2.1 금강유역 사례

연구	대상지	온실가스 배출 시나리오	강우-유출모형	유출량 분석 결과
안재현 등(2001)	대청댐 상류유역	1CO2, 2CO2	물수지모형	3.4%
과학기술부(2004)	용담댐유역	1CO2, 2CO2	SLURP	7.6%
환경부(2006)	대청댐유역	B1	abcd 모형	2030~2049년: 8.5%
강동현(2007)	금강유역	B1	abcd 모형	-
과학기술부(2007)	국내 139개 단위유역	A2, B2	PRMS	2015s: -12~14% 2045s:-23~16% 2075s:-14~20%
교육과학기술부(2010)	국내 109개 중권역	A2, A1B, B1	PRMS, SWAT, SLURP	전체유역평균 2080s 14%
박진혁 등(2011)	용담댐 및 대청댐유역	A1B	SWAT	2020s: 6% 2050s: 14% 2080s: 18%
노선희 등(2013)	용담댐 및 대청댐유역	RCP4.5, 8.5	ArcSWAT	2020s: 40%, 28% 2050s: 48%, 50% 2080s: 54%, 32%
국토교통부(2013)	9개 댐 유역	RCP4.5, 8.5	PRMS, SWAT, SLURP	2040s: 13%, 13% 2080s: 31%, 23%
박종윤 등(2014)	용담댐유역	RCP4.5, 8.5	SWAT	2040s: 10%, 23% 2080s: 17%, 29%

제 3 장 이론적 배경

3.1 RCP 온실가스 배출 시나리오

기후변화가 심화됨에 따라 기후변화 대응 정책을 지원하기 위해 과학적 근거에 기반을 둔 미래 기후전망 자료 제시가 필요하다. 기후변화에 효율적으로 대처하기 위해서는 지역에 맞는 상세한 기후변화 정보가 필요하며 가장 중요한 요인 중 하나가 기상자료의 전망이다(노선희 등, 2013).

기후변화 시나리오는 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 미래 기후를 모의한다. 따라서 기후변화 시나리오는 앞으로 대기의 온실가스 농도가 현재 추세대로 지속적으로 증가할 것인지, 감축노력에 의해 어느 정도 현상유지를 할 것인지, 감소할 것인지 등 국제적으로 논의된 몇 가지 시나리오를 정해 기후변화 모형을 활용해 모의하여야 한다(국립기상연구소, 2011). 최근에는 IPCC 제 5차 기후변화 평가보고서 작성을 위하여 국제적인 온실가스 시나리오인 대표농도경로(RCP)를 선정하였다(국립기상연구소, 2012). 따라서 새로운 온실가스 배출 시나리오를 이용하여 기후변화 시나리오를 재생성하는 작업이 진행되고 있다.

3.1.1 RCP 온실가스 배출 시나리오 개요

IPCC 제 4차 기후변화 평가보고서에서 사용된 온실가스 배출 시나리오인 SRES는 산출과정의 시간지연과 자료의 노후화 및 해상도 문제에 대해 한계를 드러내고 있다. 이와 같은 문제를 보완하고 정확도를 향상함으로써 다양한 부문에 이용할 수 있는 새로운 시나리오의 도입 필요성이 증대되었다. 이에 국제사회는 IPCC 제 5차 기

후변화 평가보고서를 위한 새로운 온실가스 배출 시나리오로 RCP를 선정하였다(권원태 등, 2010). IPCC 제 5차 평가보고서에서는 2100년까지의 온실가스 농도 기준으로 4개의 RCP시나리오를 제시하였다. 새로운 온실가스 시나리오, RCP는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였다. RCP는 하나의 대표적인 복사 강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 '대표(Representative)'라는 표현을 사용한다. 또한 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 '경로(Pathway)'라는 의미를 포함한다(국립기상연구소, 2011). RCP 시나리오는 전 세계 온실가스 배출관련 모형(MESSAGE, AIM, GCAM, IMAGE)을 활용한 온실가스 배출량 산정을 기초로 온실가스, 에어로졸을 바탕으로 한 복사강제력 산출, 사회경제적 변화에 따른 토지이용변화 결과를 통합하여 최종적인 배출시나리오 4개(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)를 확정하였다. RCP 시나리오 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m^2이다. 각 RCP별 특징은 다음과 같다(표 3.1).

- RCP2.6 : 인간활동에 의한 영향을 지구 스스로 회복 가능한 경우
- RCP4.5 : 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우
- RCP6.0 : 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우
- RCP8.5 : 현재 추세(저감없이)로 온실가스가 배출되는 경우

표 3.1 RCP의 종류와 그에 상응하는 복사강제력 및 CO_2 농도(국립기상연구소, 2011)

구분	복사강제력 (Radiative forcing)[1]	CO_2 상당 농도[2] (CO_2 농도: ppm)[3]	경로형태
RCP8.5	2100년에 8.5 W/m^{2}로 상승	>1370 CO_2 eq. in 2100 (936 ppm)	상승
RCP6.0	2100년 이후 6.0 W/m^{2}로 안정화	~850 CO_2 eq. (2100년 이후 안정화) (670ppm)	안정
RCP4.5	2100년 이후 4.5 W/m^{2}로 안정	~650 CO_2 eq. (2100년 이후 안정화) (538 ppm)	안정
RCP2.6	2040년 최고조(3.0 W/m^2), 2100년 이후 2.6 W/m^{2}로 하강	2100년 이전에 ~490 CO_2 eq. 최고농도 및 이후 감소 (421 ppm)	상승 후 감소

1. 복사강제력은 ±5%로 정의되며, 모든 인위적인 온실기체와 다른 요소들의 순효과포함

2. CO_2 상당농도(equivalent concentrations, 이하 CO_2-eq)는 단순 계산식 Conc. = 278 × exp(forcing/5.325)로 계산한다. 2005년 수명이 긴 온실기체들에 대한 CO_2 상당농도의 최적추정치는 약 455ppm이지만 모든 인위적인 강제 요소들의 순효과에 상응하는 CO_2 상당농도 추정치는 375ppm 임.

3. PD = peak and decline.

3.1.2 SRES와 RCP의 비교

SRES는 AR4에서 사용된 온실가스 배출시나리오로 인구, 기술, 사회-경제학 등 미래 배출문제의 원동력이 되는 요소들을 광범위하게 다루며 4가지 시나리오 그룹(A1, A2, B1, B2)으로 구분 된다(국립기상연구소, 2011). SRES 시나리오가 인구, 경제 및 기술발전 등 온실가스 배출 유도요인에 초점을 맞추었다면, RCP 시나리오에서는 이런 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 규정하고자 한다(표 3.2, 그림 3.2).

SERS 시나리오와 비교해 볼 때, RCP 시나리오는 최근의 온실가스 농도 변화경향을 반영하였으며, 현재 활발하게 개발 및 연구되고 있는 기후예측 모형에 적합하도록 해상도 등이 업데이트 되었다. 또한 SRES시나리오는 인위적인 기후변화 요인 중에서 온실가스와 에어로졸의 영향에 의한 강제력만을 포함하였지만 RCP 시나리오는 토지이용변화에 따른 영향을 포함하여 통합적으로 미래기후현상을 모의하였다(국립기상연구소, 2011). AR4의 시나리오 SRES와, AR5의 시나리오 RCP 간의 구체적인 차이를 살펴보았다.

(1) 순차접근법(Sequential approach)과 병행접근법(Parallel approach)

시나리오 개발을 위한 연구 커뮤니티는 크게 기후 모델링(Climate Modeling: CM) 커뮤니티, 영향·적응·취약성(Impacts, Adaptation, Vulnerability: IAV) 커뮤니티, 통합평가모델링(Integrated Assessment Modeling: IAM) 커뮤니티로 나뉜다. IPCC AR4에서는 제일 먼저 IAM 커뮤니티가 사회-경제·온실가스 배출 시나리오를 개발하면, 이 배출 시나리오에 따라 CM 커뮤니티가 기후변화를 전망하게 되고, 이 기후변화 시나리오는 IAV 커뮤니티에

의해 기후변화 영향·취약성 평가 및 적응 정책에 사용되었다. 하지만 이러한 순차접근법은 분리된 각 시나리오 간의 정보 전달에 시간이 지연된다는 문제가 있었다. 이에 따라 IPCC AR5를 위해서는 병행적인 시나리오 개발 전략이 수립되었다(그림 3.1). 기후변화 전문가들이 회의를 통해 대표농도경로(RCP)를 확정하고, 이 새로운 온실가스 농도 시나리오인 RCP에 기반하여 CM 커뮤니티는 기후변화를 전망하며, 이와 동시에 IAM 커뮤니티는 사회-경제·온실가스 배출시나리오를 개발하게 된다. 이로부터 얻어진 자료는 IAV 커뮤니티에 의해서 기후변화 영향·취약성·적응 분야에 활용될 뿐 아니라 완화 분야에서도 활용된다(국립기상연구소, 2011).

이러한 병행적인 접근 방법의 장점은 시나리오의 불확실성이 단계마다 점차 커지는 순차적인 방법과는 달리 시나리오 불확실성이 분산되어 기후변화 대응을 위한 적응 및 완화 정책 수립에 더 나은 결과를 제시할 수 있다(IPCC, 2007). 또한 일관성 있는 시나리오를 확보하고, 각 커뮤니티 사이의 피드백을 고려할 수 있다. 뿐만 아니라, AR5를 위한 새로운 온실가스 배출시나리오로 복사강제력을 먼저 설정하여 기후변화 시나리오가 나오는 과정이 단순화되었고 상세하게 최신의 자료 반영이 가능하다(노선희 등, 2013).

(2) 복사강제력 비교

RCP8.5는 2100년에 복사강제력이 8.5 W/m^{2}를 초과하는 고농도 시나리오로서, 기존의 SRES A2와 A1FI(화석연료의 집중적, 효율적으로 사용할 경우의 A1 시나리오) 사이의 복사강제력값을 갖고 있다. RCP6.0은 2100년 후에 복사강제력 6 W/m^{2}에서 안정화되는 중간 농도 시나리오로서, SRES A1B 복사강제력 값과 매우 유사하다. RCP4.5는 2100년 후에 약 4.5 W/m^{2}에서 안정화되는 저농도 시나리오로서 SRES B1 복사강제력값보다 약간 크다. RCP2.6은 2100년 전

에 복사 강제력이 약 3 W/m^2에 도달하고 이후 하강하는 형태를 가진 최저농도 시나리오로서, 유사한 SRES 시나리오는 없지만, 극단적인 기후변화 대응 정책을 수립 및 적용에 유용한 시나리오라는 특징이 있다(국립기상연구소, 2011).

표 3.2 SRES, RCP 시나리오의 비교(국립기상연구소, 2011)

RCP 시나리오		SRES 시나리오	
기후변화 대응정책과 연계하여 선정		미래 사회구조를 중심으로 선정	
RCP2.6	인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우 (CO_2 농도: 421 ppm)	-	-
RCP4.5	온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우 (CO_2 농도: 538 ppm)	B1	지속발전형 사회: 지역 간 격차가 적고, 인구감소, 청정자원 절약기술 도입 (CO_2 농도: 550 ppm)
RCP6.0	온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우 (CO_2 농도: 670 ppm)	A1B	고성장 사회: 화석에너지와 비화석 에너지원 균형, 신기술, 고효율화 기술 도입 (CO_2 농도: 720 ppm)
RCP8.5	현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우(BAU 시나리오) (CO_2 농도: 936 ppm)	A2	다원화 사회: 인구증가, 경제성장은 낮고, 환경에 대한 관심도 상대적으로 낮음 (CO_2 농도: 830 ppm)

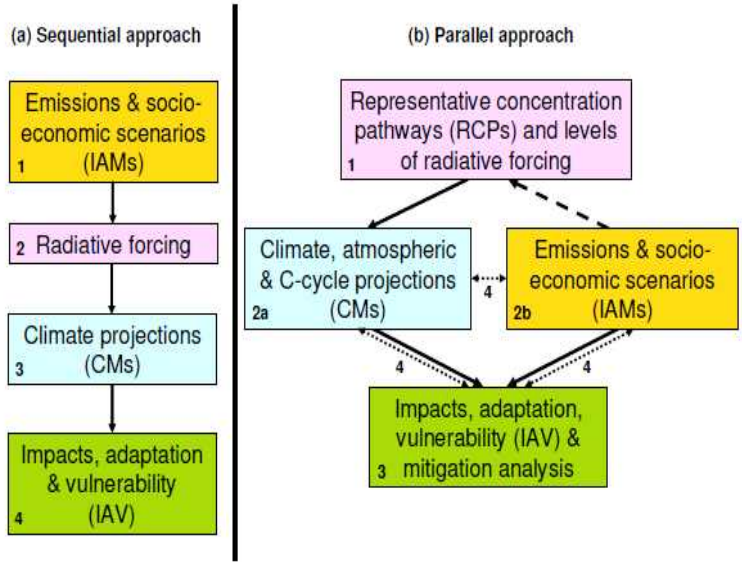


그림 3.1 전 지구 기후변화 연구의 흐름 변화(IPCC, 2007)

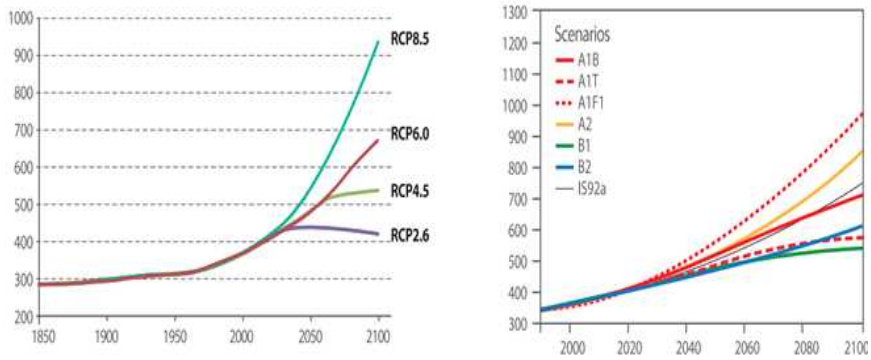


그림 3.2 RCP 시나리오(좌)와 SRES(우) 시나리오의 온실가스 농도 비교(기상청)

3.1.3 RCP 시나리오를 따른 한반도 기후변화 시나리오

기상청은 기후변화 대응을 위한 국가전략 수립 지원을 위하여 IPCC에서 5차 평가보고서 작성을 위하여 새롭게 권장하는 RCP 시나리오에 따른 전 지구 및 지역기후변화 시나리오를 산출하였다(국립기상연구소, 2011).

RCP 시나리오를 따른 한반도 기후변화 시나리오 산출 과정은 크게 3가지로 구분된다. 첫째, IPCC에서 제공하는 온실가스 배출 시나리오를 기반으로 GCM(General Circulation Model) 모의를 실시한다. 둘째, GCM, RCM(Regional Climate Model) 모형 간의 스케일 상이성을 보정한 후 GCM으로부터 RCM 모의를 위한 초기조건을 추출한다. 셋째, RCM 모형을 통한 지역적 기후변화 시나리오를 구축한다. 이에 대한 과정을 그림 3.3에 도시하였다.

(1) 전 지구 기후변화 시나리오

기후변화 시나리오를 산출하는 과정은 먼저 새로운 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 기초해 전 지구 대기-해양 결합모형인 HadGEM2-AO(The fully-coupled atmosphere-ocean version of the Hadley Centre Global Environment Model, version 2)로 약 135km 해상도의 전 지구 기후변화 시나리오를 산출한다.

(2) 한반도 기후변화 시나리오

전 지구 기후변화 시나리오 자료에 기초해 우리나라 지역에 대한 12.5km 해상도의 지역기후모형인 HadGEM3-Ra를 이용해 한반도 지역기후변화 시나리오를 산출한다.

(3) 남한 상세 시나리오

지역기후모형을 통해 생산된 한반도 기후변화 시나리오에서 각 격자점별로 계절 변동을 제거한 편차자료를 추출하여 PRIDE(PRISM based Downscaling Estimation Model)에 적용된 관측자료(2000~2010년)에서 얻은 기후 값에 지역기후모형의 편차를 더하면 모형 계통오차가 제거된 새로운 1km 격자형 남한상세 기후변화 시나리오가 생산된다(기상청).

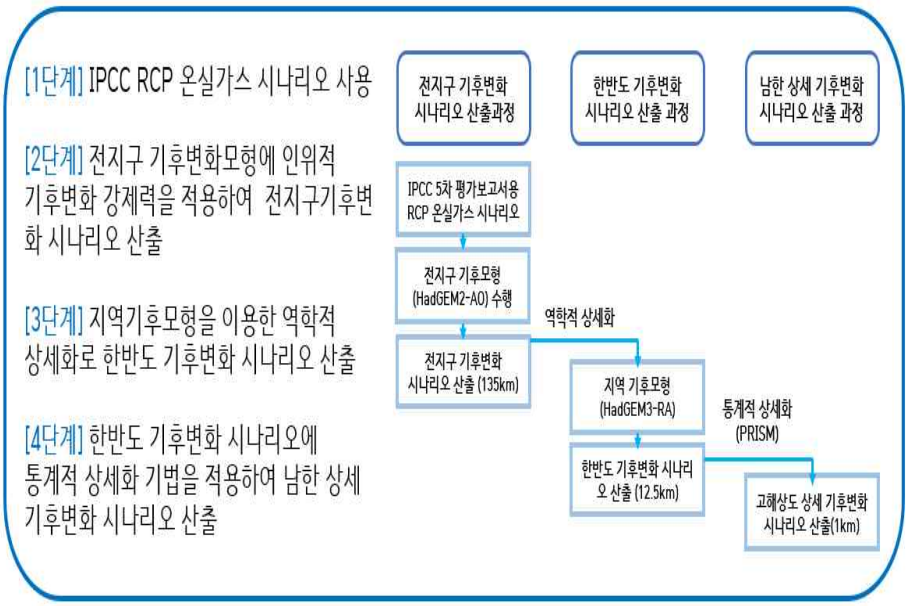


그림 3.3 RCP 활용 한반도 기후변화 시나리오 산출방법(기상청)

3.2 기후변화 영향평가를 위한 대표적 강우-유출모형

기후변화가 수문순환 및 수자원에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 기후변화로 예측되는 유량변화 시나리오가 필요하다.

본 항목에서는 강우-유출모형의 일반적인 종류를 분류하고 기후변화 연구 목적에 적합한 강우-유출 모형의 특성에 대해 살펴보기로 한다. 또한 기후변화 영향평가를 위한 대표적 강우-유출모형인 SWAT 모형, IHACRES 모형, GR4J 모형을 선정하여 기후변화에 적합한 강우-유출모형을 제시하고자 한다.

3.2.1 강우-유출모형의 일반적 분류

강우-유출모형은 실제의 강우-유출 시스템을 모방하기 위해 만들어진 일련의 방정식과 알고리즘으로 강우량은 입력 자료이며 유출량은 시스템의 출력 값이 된다(윤용남, 2007). 공학자들은 수자원 관리를 효율적으로 하기 위해 다양한 목적을 가지고 자연계의 수문순환의 물리적 과정을 모의하는 모형을 개발하였다.

강우-유출모형은 일반적으로 확정론적 수문모의모형(deterministic hydrologic simulation model)을 말한다. 물 순환과정에서 발생하는 현상들의 상호작용은 수학적인 관계로 표시되며 이는 확정적으로 발생하게 된다. 반면, 추계학적 모형은 수문시스템에서 강우-유출(입력-출력)관계 등에 대한 물리적 인과관계를 전혀 분석하지 않고 수집된 강우량과 유출량 등의 수문자료 계열의 특성을 통계학적 기법에 의해서 분석하고 모의한다.

확정론적 강우-유출모형은 여러 기준에 따라 다양하게 분류될 수 있다.

(1) 공간적 고려 유무

수문 시스템 내 공간적 변화 고려 유무에 따라 집중형 모형(lumped model), 분포형 모형(distributed model)으로 분류 가능하다(표 3.3).

집중형 모형(lumped model)은 수문 시스템을 지배하는 매개변수 값들의 공간적 변화를 고려하지 않는다. 즉, 전 유역은 공간적 변동성이 무시된 하나의 단위로 여겨진다(Leavesley, 1994). 따라서 다양한 매개변수 값은 유역의 평균으로 대표된다는 가정이 필요하게 된다. 시간에 따라 변화하는 물 순환과정을 개념적으로 표시한다.

분포형 모형(distributed model)은 수문시스템 내 공간적 유출특성 변화를 반영하기 위해 지형, 토지피복, 토양 특성자료 등을 고려한 흐름방정식을 풀이하는 물리기반모형(physics-based model)이다. 유역을 대상으로 작은 격자(grid) 단위를 기반으로 강우-유출관계를 분석한다.

(2) 시간 스케일 고려 (장, 단기 유출)

치수 목적으로 일 단위 이하의 단기유출 분석에 적용되는 단일사상모형(event model)과 이수 목적으로 일 단위 이상의 장기유출 분석에 적용되는 연속형 모형(continuous model)으로 구분할 수 있다.

단일사상 강우-유출 모형(single-event model)은 비교적 짧은 시간 동안 발생한 독립 호우로 인한 수문곡선의 모의 또는 단일사상을 시간 단위 이하의 시간구간으로 모의하기 위한 모형이다(윤용남, 2007). 이는 치수목적으로 강우사상의 발생기간 동안이나 종료 직후의 유출을 모의하기 위해 사용된다.

연속형 강우-유출 모형(continuous model)은 시간장경이 비교적

긴 일,월 혹은 연에 걸친 유출수문곡선을 모의하는 모형이다. 한 유역에 내린 강우와 그로 인한 직접 유출, 침투, 증발산, 중간유출, 지하수유출, 그리고 하천유출 등의 시간적 변화를 고려하여 연속적으로 각 수문성분과정을 양적으로 계산해나감으로써 하천유량을 추정할 수 있다.

표 3.3 집중형 모형과 분포형 모형의 비교

모형	Lumped model (집중형 모형)	Distributed model (분포형 모형)
공간적 변화고려	x	o
장점	매개변수 추정한 데이터의 기간에 대해 모의하면 비교적 정확, 쉽게 모의 가능.	공간적 변화를 고려하여 실제 자연계의 수문시스템을 더 실제에 가깝게 대표하여 모의함.
한계	공간적 유출특성 변화 고려 못함. 유역특성의 장래변화를 고려하기 위한 매개변수 결정이 쉽지 않음. 수문자료 부족으로 인한 모형검정에 어려움.	유출계산시스템이 대단히 복잡하고, 격자별로 많은 물리변수들의 적정한 결정이 쉽지 않음. 방대한 입력자료. 시간이 오래 걸림.

3.2.2 기후변화 연구에 적합한 강우-유출모형 특성

강우-유출모형을 이용한 유출 분석 과정에서는 입력자료, 모형 매개변수, 그리고 모형 구조로 인한 불확실성이 발생할 수 있다. 따라서 지구상의 물 순환과정을 완벽하게 모의할 수 있는 모형은 존재하지 않으며, 모의 결과에 대한 불확실성을 최소화하여야 한다. 각 모형은 서로 다른 장·단점을 가지고 있기 때문에 불확실성을 줄이기 위해서 연구 목적에 적합한 강우-유출 모형을 선정하는 과정은 매우 중요하다. Leavesley(1994)는 연구 목적별 많이 쓰인 모형을 정리하기도 하였다. 따라서 연구목적에 맞는 강우-유출모형을 선정하는 과정은 매우 중요하다. 하지만 국내 기후변화 연구의 대부분은 강우-유출모형은 기후변화 연구의 특이성을 고려하지 않고 편의성 및 가용성에 따라 기존 수자원 연구에서 많이 쓰인 강우-유출모형을 선정한 경향이 강하다. 따라서 본 연구에서는 기후변화 연구에 적합한 강우-유출모형에는 어떠한 특성이 있는지 파악하고 이를 고려한 강우-유출모형을 선정하고자 한다.

(1) 기후변화 연구의 특성

기후변화 연구에서는 실시간 운영(real-time operations)이 아닌 유역수자원의 평가 및 장기 계획(planning)에 초점이 맞추어져 있다. 또한 GCM 또는 RCM으로 모의된 기후시나리오를 이용한 장기간 전망(long-term projection) 및 변화 총량이 주요 이슈이다. 따라서 기후변화에 따른 수자원 영향평가에 주로 사용되는 강우-유출모형은 장기유출모형이되어야 하며 장기간의 기후자료와 공간자료 등의 입력 자료를 다루기에 편리하고 효율적인 모형이 선호된다. 더불어, 기후변화 연구에서는 불확실성을 고려한 강우-유출모형 선정이 필요하다.

(2) 불확실성이 적은 단순개념모형의 기후변화 연구에 대한 적합성

기후변화를 고려한 수자원 영향평가에서는 온실가스 시나리오 기반의 기후변화 시나리오를 이용하여 유량을 전망하게 된다. 하지만 이러한 기후변화 시나리오에는 불확실성이 존재한다. 미래 온실가스 배출 시나리오에 의한 불확실성과, GCM의 불확실성, GCM 자료를 상세화하는 과정에서의 불확실성 등 강우-유출모형을 선정하기 전에 이미 큰 불확실성이 존재한다. 따라서 기후변화 연구에서 사용되는 강우-유출모형은 가능한 불확실성이 적은 모형이 선정되어야 한다. Xu and Singh(2004)는 기후변화연구에서 사용될 강우-유출모형 선정 시 모형의 구조적 불확실성의 정량화에 대한 중요성을 강조하였으며, 단순개념모형은 상대적으로 모형의 불확실성이 적은 것으로 제시되었다(Shin et al., 2013, 2014). Gleick(1989)는 또한 추가적인 복잡성을 가진 모형이 정확성을 더 높이지는 않으며 오히려 모형의 적용성과 효율성을 떨어트린다고 하였다. 특히 입력 자료가 정확하지 않을 경우 복잡한 모형보다는 간단한 모형이 더 적합하다고 제시하였다. 그러므로 기후변화 연구에서는 강우-유출모형의 불확실성을 고려하여 가능한 단순한 모형을 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

(3) 기후변화 연구에 있어 준분포모형의 필요성

불확실성 및 효율성 등을 고려하였을 때 단순개념모형이 기후변화 연구에 적합하지만 경우에 따라서는 복잡한 모형이 요구된다. 연구 목적에 따라서 세부적으로 수량과 수질이 연계되어야 하거나 토지이용변화, 융설 등의 물리적 요인이 고려되어야 할 경우는 물리적 이론을 기반으로 한 격자형 준분포형 또는 분포형 모형(SWAT, SLURP, PRMS, HEC-HMS 등)이 필요하다. Legesse et al.(2003)과

Franczyk and Chang(2009)는 토지이용변화에 대한 기후변화 영향을 살펴보기 위해 PRMS와 SWAT 모형을 각각 사용하였다. 그리고 Fujihara et al.(2008)은 융설효과를 고려하기 위해 격자형 분포형 모형을 이용하여 유출량을 산정하였다.

3.2.3 단순개념모형: IHACRES 및 GR4J 모형

본 연구에서는 모형의 불확실성이 적어 기후변화 연구에 적합한 것으로 제시된 2개의 단순개념모형(IHACRES, GR4J)을 사용하여 미래 유량을 전망하고자 한다.

(1) IHACRES Model

①IHACRES Model 개요

IHACRES 모형은 1990년대 초반에 개발된(Jakeman et al., 1990; Jakeman and Hornberger, 1993) 후로 다양한 연구에 적용되었다(e.g. Viney et al., 2009; Vaze et al., 2010; Post et al., 2012). IHACRES 모형은 개념적 모형과 계량적 모형의 장점을 갖도록 만들어진 모형으로 유역의 기온 및 강우를 입력자료로 하여 유출을 모의한다. 이 모형은 크게 강우를 유효강우로 변환시키는 비선형 손실모듈(non-linear loss module)과 유효강우를 유출로 변환시키는 선형모듈(linear module)로 구성되어 있다. 비선형 손실모듈은 기후와 토양수분의 변화를 고려하여 유효우량을 계산한다. 선형모듈에서는 선형저수지 및 선형하천의 개념을 도입하고 이들의 배열을 병렬(parallel) 또는 직렬(series)로 구성하여 유출특성을 잘 구현하는 조합을 선택하도록 한다.

②IHACRES Model 구성

IHACRES 모형은 크게 두 개의 모듈로 구성되어 있다. 비선형 손실 모듈은 강우를 유효강우로 변화시키며 선형모듈은 유효강우를 유출로 변환시킨다. Mass balance equation은 다음 식 (3.1)와 같다.

$$M_k = M_{k-1} - P_k + E_{T,k} + U_k \tag{3.1}$$

여기서 M_k는 CMD(catchment moisture deficit), k는 시간, P는 강수량, E_T는 잠재증발산량 손실이며 U는 유효강수량을 나타낸다.

위 mass balance equation에 사용되는 drainage 방정식은 식 (3.2)과 같다.

$$\frac{dU}{dP} = 1 - \frac{M}{d},\ within\,(0,1) \tag{3.2}$$

위 식에서 d는 흐름 한계 매개변수이다.

결국, M_f는 다음 식 (3.3)로 나타낼 수 있다.

$$M_f = \begin{cases} M_{k-1}\exp(-P_k/d), & \text{if } M_{k-1} < d \\ dexp\left[-\left(P_k - \dfrac{(M_{k-1}-d)}{d}\right)\right], & \text{if } d \le M_{k-1} < d + P_k \\ M_{k-1} - P_{k,} & \text{if } M_{k-1} \ge d + P_k \end{cases} \tag{3.3}$$

위 식에서 M_f는 CMD의 잠정적인 값(증발산량 손실 전의 값)이다.

유효 강수량(U_k)은 다음 식 (3.4)와 같이 계산된다.

$$U_k = P_k - M_{k-1} + M_f \tag{3.4}$$

잠재증발산량(PET)는 식 (3.5)으로 계산된다.

$$E_{T,k}^{p} = e \times T_k \tag{3.5}$$

여기서 e는 온도를 PET로 변환해주는 매개변수이며, T는 온도 또는 PET의 입력자료이다. 만약 온도가 아닌 잠재증발산량이 입력자료로 사용된다면 e는 1로 고정된다.

실제증발산량은 다음 식 (3.6)과 같이 계산할 수 있다.

$$E_{T,k} = E_{T,k}^{p} \times \min\left\{1, \exp\left[1 - \frac{M_f}{d \times f}\right]\right\} \tag{3.6}$$

f는 plant stress threshold를 나타낸다. 이것은 실제증발산량을 조정하는 역할을 하며 유역의 건조정도와 관계가 있다. 만약 f가 클 경우, 식물의 뿌리는 깊고, 실제증발산량은 많아진다. 증발산량은 M_f에 기반하기 때문에 drainage function 후에 계산된다.

총 유출은 직접유출(빠른 흐름; quick flow)과 기저유출(느린 흐름; slow flow)로 구분되며, 각각은 당일 기여분의 합으로 표현된다.

$$Q_k = Q_k^q + Q_k^s \tag{3.7}$$

$$Q_k^q = -\alpha_q Q_{k-1}^q + \beta_q U_k \tag{3.8}$$

$$Q_k^s = -\alpha_s Q_{k-1}^s + \beta_s U_k \tag{3.9}$$

위 식에서 Q_k는 총유출량을 나타내고 Q^q와 Q^s는 각각 직접유출과 기저유출을 나타낸다. 매개변수 α와 β는 직접유출과 기저유출의

발생시간(당일 또는 익일) 조절을 위해 도입된 것으로 다음과 같은 관계를 갖는다. 여기서 △는 시간간격이다.

$$\tau_q = -\triangle / \ln(-\alpha_q) \quad (3.10)$$

$$\tau_s = -\triangle / \ln(-\alpha_s) \quad (3.11)$$

$$v_q = 1 - v_s = \frac{\beta_q}{1+\alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1+\alpha_s} \quad (3.12)$$

매개변수 α와 β는 직접유출과 기저유출의 상대체적을 구할 수 있다.

τ_q와 τ_s은 직접유출과 기저유출의 시간 상수(recession time)이며, v_q와 v_s는 각각 총유출량에 대한 직접유출과 기저유출의 비율을 나타낸다.

(2) GR4J Model

①GR4J Model 개요

GR4J 모형은 저류지 개념(reservoir concept)을 이용한 집중형 강우-유출모형이다. Duan et al.(2006)이 MOPEX(The Model Parameter Estimation Experiment)에서 수행한 결과를 보면 GR4J 모형의 결과가 비교적 우수한 것으로 검증되었다. 또한 GR4J 모형의 경우 다른 모형에 비하여 비교적 적은 4개의 매개변수를 사용하여 적용이 용이하다는 장점을 지닌다.

②GR4J Model 구성

GR4J 모형은 *X*1부터 *X*4까지 4개의 매개변수가 적용되며 차단(interception), 토양수분저류(production store), 홍수추적(routing store)의 3단계 과정을 거쳐 강우-유출과정을 계산한다(그림 3.4).

GR4J 모형은 연속적 일단위 계산을 수행하며 시간변수를 제외한 모든 단위는 mm로 표현된다. GR4J 모형의 매개변수 특성은 표 3.4와 같다.

·강우자료와 증발산량

GR4J 모형에서의 강우와 증발량 자료는 획득된 자료로부터 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$P_n = P - E \quad \text{and} \quad E_n = 0, \quad P \geq E \tag{3.13}$$

$$\text{otherwise} \quad P_n = 0, \quad E_n = E - P \tag{3.14}$$

여기서 P는 강우량(mm), P_n은 순강우량(mm), E는 증발산량(mm), E_n은 순증발산량(mm)이다.

·토양수분저류(Soil Moisture Accounting store)

위 과정에서 P_n이 0이 아닌 상황에서, P_n의 일부인 P_s는 토양수분저류고(S)에 따라 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$P_s = \frac{X_1\left(1-\left(\frac{S}{X1}\right)^2\right)\tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)}{1+\frac{S}{X1}\tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)} \tag{3.15}$$

여기서 X_1은 최대토양수분저류량(mm)이다. E_n이 0이 아니라면 토양수분저류량에 따라 증발량은 다음과 같이 산정된다.

$$E_s = \frac{S\left(2-\frac{S}{X1}\right)\tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)}{1+\left(1-\frac{S}{X1}\right)\tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)} \quad (3.16)$$

토양수분저류량은 식 (3.17)와 같이 나타낸다.

$$S = S - E_s + P_s \quad (3.17)$$

여기서 S는 토양수분저류량(mm)로 $X1$을 초과할 수 없는 값이며, 토양수분저류량에서 침투량인 $Perc$는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$Perc = S\left\{1-\left[1+\left(\frac{4}{9}\frac{S}{X1}\right)^4\right]^{-1/4}\right\} \quad (3.18)$$

$Perc$는 S를 초과할 수 없으며, 토양수분 저류량은 아래와 같이 결정된다.

$$S = S - Perc \quad (3.19)$$

·단위유량도를 이용한 선형홍수추적

선형홍수추적량(P_r)은 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (3.20)$$

여기서 선형홍수추적량의 90%는 단위유량도 $UH1$, 10%는 단위유량도 $UH2$로 홍수추적과정을 적용한다. 단위유량도 $UH1$과 $UH2$

는 시간변수인 *X4*(days)에 따라 결정된다. 두 단위유량도는 S-Curve인 *SH1*과 *SH2*에 의하여 산정된다.

*SH1*은 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$SH1(t) = 0, \quad t \le 0 \tag{3.21}$$

$$SH1(t) = \left(\frac{t}{X4}\right)^{5/2}, \quad 0 < t < X4 \tag{3.22}$$

$$SH1(t) = 1, \quad t \ge X4 \tag{3.23}$$

*SH2*는 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$SH2(t) = 0, \quad t \le 0 \tag{3.24}$$

$$SH2(t) = \frac{1}{2}\left(\frac{t}{X4}\right)^{5/2}, \quad 0 < t < X4 \tag{3.25}$$

$$SH2(t) = 1 - \frac{1}{2}\left(2 - \frac{t}{X4}\right)^{5/2}, \quad X4 < t < 2X4 \tag{3.26}$$

$$SH2(t) = 1, \quad t \ge 2X4 \tag{3.27}$$

위 산정된 S-Curve로부터 단위유량도는 아래와 같이 산정된다.

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \tag{3.28}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \tag{3.29}$$

·기저유량 산정과정

GR4J 모형은 홍수추적저류량(*X3*)과 기저유량변수(*X2*)에 의하여 기저유량 변환값(*F*)은 아래 식 (3.30)와 같이 산정된다.

$$F = X2\left(\frac{R}{X3}\right)^{7/2} \tag{3.30}$$

여기서 R은 홍수추적저류지의 수위(mm)이다.

·비선형 홍수추적

R은 $UH1$으로부터 산정된 유량인 $Q9$과 기저유량 변환값으로부터 아래 식 (3.31)와 같이 산정된다.

$$R = \max(0; R + Q9 + F) \tag{3.31}$$

기저유량으로부터 산정된 유출량(Q_r)은 아래 식 (3.32)와 같이 산정된다.

$$Q_r = R\left\{1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3}\right)^4\right]^{-1/4}\right\} \tag{3.32}$$

따라서 홍수추적저류지의 수위(R)은 아래와 같다.

$$R = R - Q_r \tag{3.33}$$

·최종유출량 산정

$UH2$를 적용하여 산정된 유량인 $Q1$과 F의 합으로 지표유출량 Q_d은 식 (3.34)와 같이 산정된다.

$$Q_d = \max(0; Q1 + F) \tag{3.34}$$

최종유출량은 Q_r과 Q_d의 합으로 아래와 같다.

$$Q = Q_r + Q_d \tag{3.35}$$

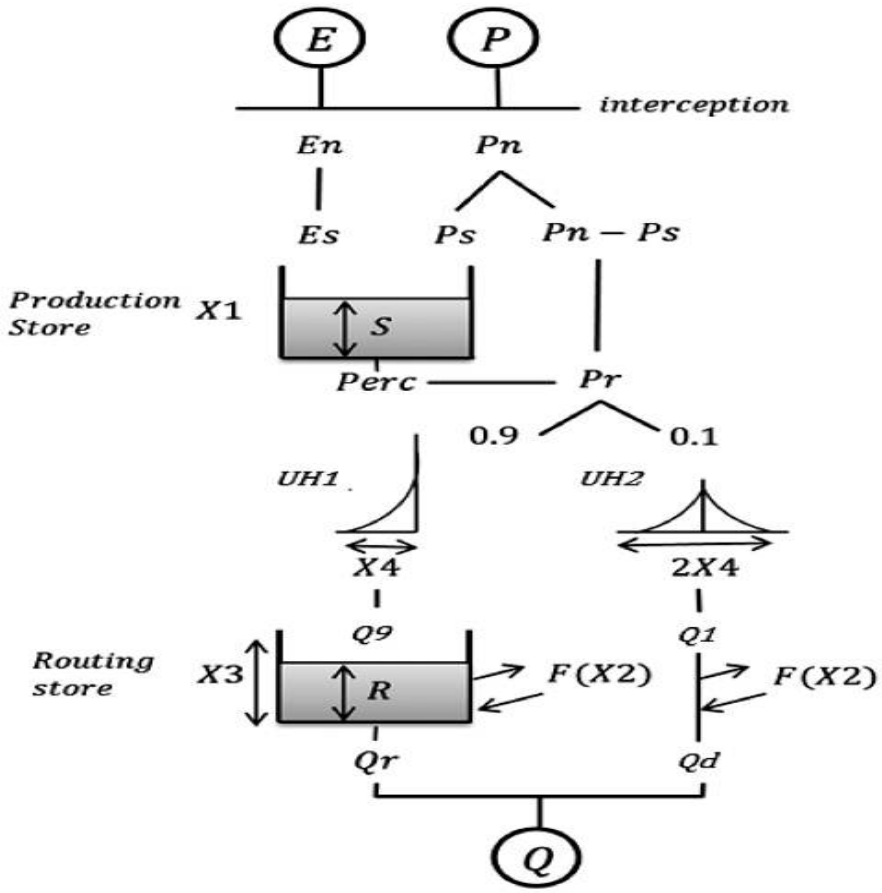


그림 3.4 GR4J 모형의 구성(Perrin et al., 2003)

표 3.4 GR4J 모형의 매개변수

Parameters	Definition
$X1$	저류량에 대한 물리적 변수 (mm)
$X2$	기저유량 변수 (mm)
$X3$	일단위의 홍수추적 저류량 (mm)
$X4$	우상주량도의 시간변수 (day)

3.2.4 준분포모형: SWAT

본 연구에서는 기후변화 연구와 수자원 연구에서 보편적으로 많이 사용되고 있는 준분포모형(SWAT)을 이용하여 유량을 전망하고자 한다.

(1) SWAT Model

①SWAT Model 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA ARS, Agricultural Research Service)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발된 유역모델(Arnold et al., 1998)로서 Soil and Water Assessment Tool의 약자이다. 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기강우-유출모형으로서 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형으로 구성되어 있다. 토지피복의 변화에 따른 유출분석이 가능하며 GUI기반으로 GIS 자료를 이용하여 매개변수를 결정할 수 있다. 또한 작물성장모형에 CO_2의 변화를 고려할 수 있으며, 한반도 기후변화 영향평가에 많이 적용된 모형이다. 입력 기상 자료로는 최고 기온(℃), 최저 기온(℃), 평균풍속(m/sec), 일사량(MJ/m^2), 상대습도, 강수량(mm)이 필요하다.

②SWAT Model 구성

유역은 지형특성을 반영하여 수 개의 소유역으로 구분되고 소유역내 토지피복 및 토양, 지형경사에 따라 소유역 내 최소단위로 집중화된 수문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)로 나뉘고 각 HRU에서 물수지식에 근거해 표면 유출량, 지하수로의 침투량, 증발산량을 산정한다.

SWAT 모형에서 모의되는 수문순환은 식 (3.36)의 물수지 방정

식에 기초한다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw} \quad (3.36)$$

여기에서 SW_t 는 최종 토양수분량(mm), SW_0 는 i 일 동안의 초기토양수분량(mm), t 는 시간(days), R_{day} 는 i 일 동안의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일 동안의 표면유출량(mm), E_a 는 i 일 동안의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i 일 동안의 침루량(mm), Q_{gw} 는 i 일 동안의 회귀수량(mm)을 나타낸다. HRU에서 모의되는 물 이동의 잠재적인 경로는 그림 3.5와 같다.

지표면 유출을 모의하기 위해 SCS 유출곡선법(Service, 1972)과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 사용한다. 또한 잠재증발산량 산정은 Penman Monteith 방법, Priestley Taylor 방법 및 Hargreaves 방법을 사용하고 있다.

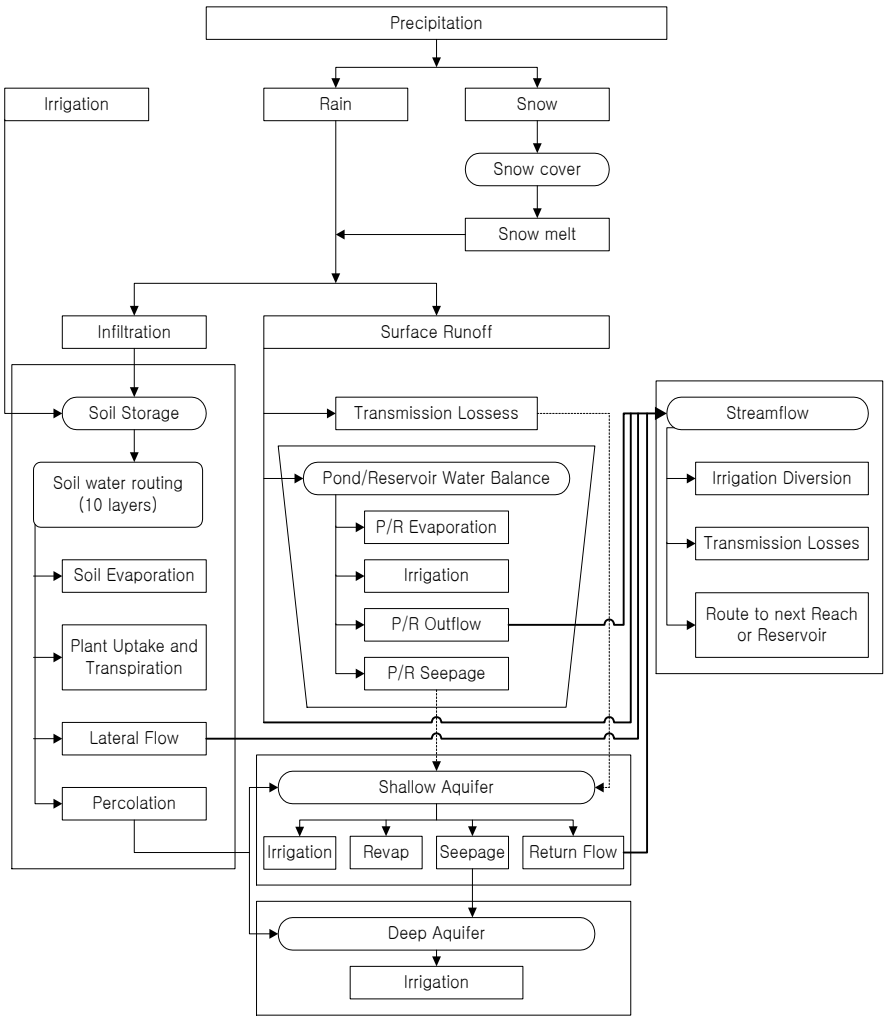


그림 3.5 SWAT 모형의 개념도(Arnold et al., 2002)

제 4 장 적용 및 결과

4.1 적용 개요

4.1.1 대상유역

(1) 금강유역

금강유역은 북위 35°35′~37°05′, 동경 126°41′~128°25′에 걸쳐 우리나라의 중앙부 서쪽에 위치하고 있고 유역면적은 9,914.013 km^2 유로연장은 388.45 km으로 한강, 낙동강에 이어 3번째로 큰 유역이다. 본 유역은 14개의 중권역으로 구성되어 있다.

금강유역의 연평균 강수량은 1,200~1,400 mm로 우리나라의 평균치 정도이나, 지형과 관련하여 지역적 차이가 크다. 대체로 하류지역은 1,100 mm 내외이나, 상류지역은 1,300 mm 내외로 다우지를 형성한다. 또한 여름철 강수 집중률이 60%가 넘고, 하천의 경사가 급하여 하천 유출량의 변동이 매우 심하다. 월별 강우량을 보면 7월에 252.3 mm로 최대이고 12월이 25.4 mm로 최소를 보이고 있으며, 6월에서 9월 사이의 4개월 동안에 연강우량의 60% 이상이 집중적으로 내린다. 연평균 기온은 11.5℃이며, 측후소별 증발량은 1,070~1,292 mm 정도이다. 연평균 유출량은 6627×106 m^3이고, 년 유출량 중 73%가 6월에서 9월에 집중되어있다(과학기술부, 2004).

금강유역 대상의 기후변화로 인한 수자원 영향평가 선행 연구(안재현 등, 2001; 과학기술부, 2004; 환경부, 2006; 강동현, 2007; 과학기술부, 2007; 교육과학기술부, 2010; 박진혁 등, 2011; 노선희 등, 2013; 국토교통부, 2013; 박종윤 등, 2014)가 2000년 이후로 많이 이루어져서 결과의 상호비교가 가능하다.

(2) 용담댐유역

본 연구의 대상유역은 금강 수계 상류에 위치하여 전주권과 댐 하류에 용수를 공급하고 있는 용담댐 유역이다. 북위 35°35′~36°0′, 동경 127°20~127°45′의 범위에 위치하며, 무주군, 진안군, 장수군을 포함한 충청남도, 전라북도, 경상남도의 경계에 걸쳐있다. 유로연장은 62.58 km이고 유역면적은 930.43 km^2로 금강 유역면적의 약 9.5%를 차지하고 있으며 대부분이 산지와 농업지역으로 각각 70%, 21%를 차지하고 있다. 유역의 연평균 기온은 11.6도이며, 연평균 강수량은 1362.3 mm이다.

금강유역과 용담댐 유역에 대한 유역도를 그림 4.1에 도시하였다.

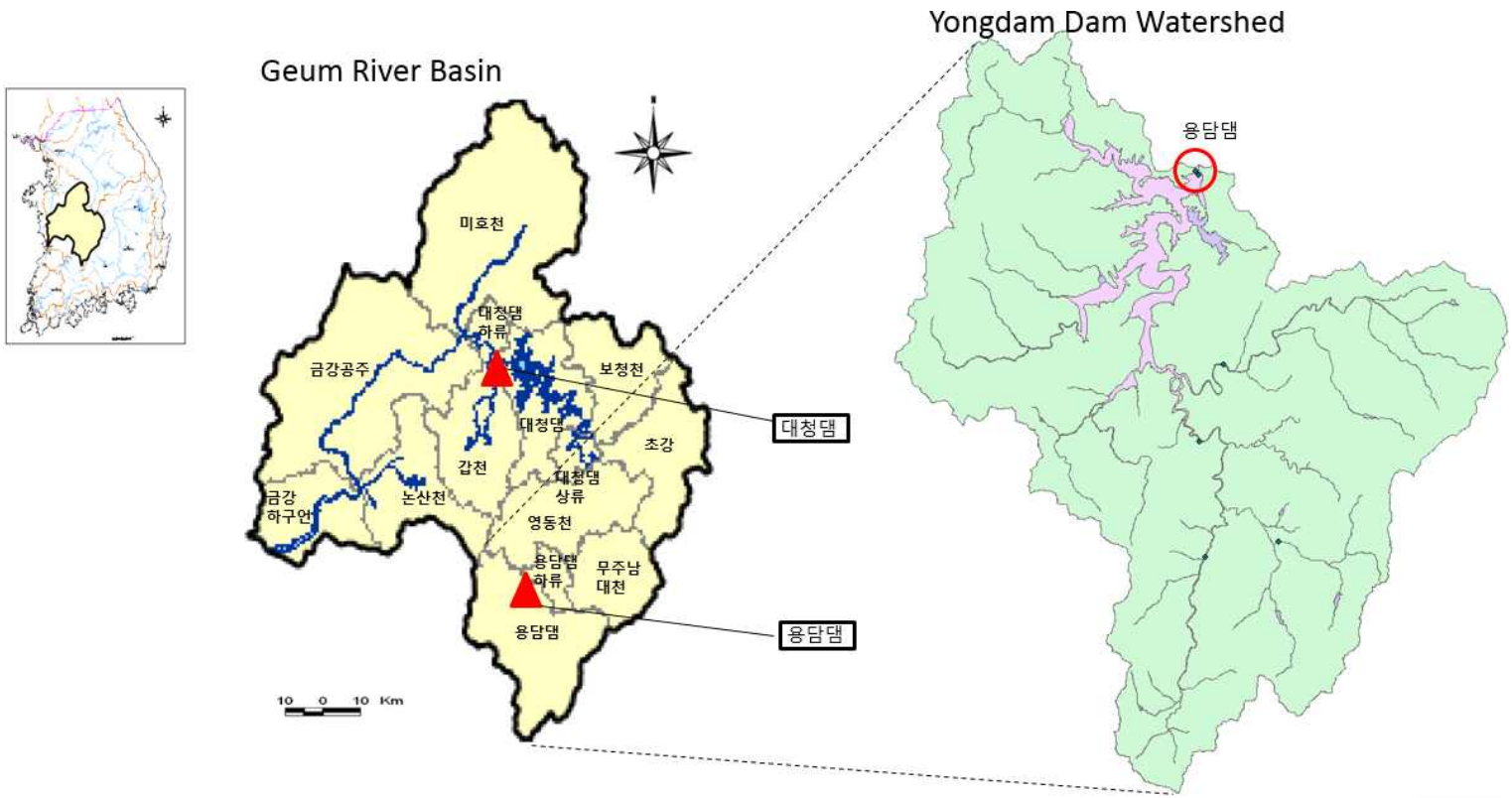

Geum River Basin
Yongdam Dam Watershed
미호천
대청댐 하류
금강공주
보청천
대청댐
초강
갑천
대청댐 상류
금강 하구언
논산천
영동천
용담댐 하류
무주남대천
용담댐
10 0 10 Km
대청댐
용담댐
용담댐

그림 4.1 유역도

4.1.2 적용방법

본 연구에서는 최근연구에서 모형의 불확실성이 적은 것으로 제시된 단순개념모형을 이용하여 미래 유량 전망을 실시하고 타당성을 확인하고자 한다. 이를 위해 3개의 강우-유출모형을 선정하였다. 준분포모형 SWAT 모형과 단순개념모형 IHACRES 모형과 GR4J 모형을 이용하여 각각 미래 유량을 전망하였다.

각 모형은 우선 과거기간 자료를 이용하여 검·보정을 실시하여 용담댐 유역에 대한 모형의 적용성을 평가하였다. 각 모형은 같은 기간에 대해 검·보정을 실시하였지만 SWAT모형에서는 시행착오법으로 보정을 실시하였고, IHACRES 모형과 GR4J 모형의 경우에는 자동보정기법을 사용하였다. 각 모형의 검·보정에는 Nash and Sutcliffe(1970)가 제안한 모형효율성계수(model efficiency coefficient) NSE와 피어슨의 결정계수(Pearson's coefficient of determination) R^2(Legates and McCabe, 1999)을 목적함수로 사용하였다. 각 목적함수는 식 (4.1)과 식(4.2)와 같다. 모형의 매개변수 검·보정은 각 목적함수를 최대화하는 방법으로 시행되었다.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \right) \tag{4.1}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (O - \overline{O})(P_i - \overline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_i - \overline{P})^2}} \right)^2 \tag{4.2}$$

여기서, P_i는 시간에서의 모의유량, Q_i는 시간에서의 관측유량,

$\overline{P}$는 전체모의시간의 모의유량평균, $\overline{O}$는 전체모의시간의 관측유량평균, n은 시간 간격개수이다.

또한 본 연구에서는 샘플을 k개의 집단으로 나누고 $k-1$개의 집합에 대해 보정을 하고 나머지 1개의 집합으로 검정을 실시하는 k-fold cross validation 기법을 이용하여 자료의 모든 기간에 대해서 검·보정을 실시하였다. 따라서 특정 기간의 특성만을 반영한 것이 아닌 가능한 다양한 자료의 특성을 반영하여 신뢰성을 높였다.

미래 유량을 전망하기 위해서 세 개의 모형에서 모두 똑같은 기후변화 시나리오를 사용하였으며 과거기간에 대하여 보정된 매개변수 값을 그대로 IPCC AR5에서 제시된 RCP4.5와 8.5에 기반한 기후변화 시나리오에 적용하여 미래 유량을 전망하였다. 이는 기후변화 연구에 있어서 과거에 대해 모형의 적용성이 높으면, 미래 유량도 모의를 잘 한다는 최근의 연구(Vaze et al., 2010; Chiew et al., 2009)에 기초한다. k-fold cross validation 방법에서 추정된 매개변수 중에서는 가장 최근의 기간에 대해 보정을 실시한 case1 값을 사용하였다.

미래 유량 전망 결과 분석은 과거기간은 baseline(1982~2011년), 미래기간은 2040s(2020~2059년), 2080s(2060~2099년)으로 지정하여 수행하였다.

(1) SWAT 모형을 이용한 미래 유량 전망

수자원 연구에서 가장 널리 사용되고, 본 연구의 대상유역에서도 가장 많이 사용된 SWAT 모형을 이용하여 미래 유량을 전망하였다. 적용성 평가에 있어서 보정기간을 늘리기 위해 k-fold cross validation 기법을 사용하여 모형의 모의능력의 신뢰성을 높였다. 또한 SWAT 모형을 이용한 용담댐 유역 대상의 선행 연구들(국토교통부, 2013; 박종윤 등, 2014)의 상이한 결과와 유량 전망 결과를 비

교하였다.

(2) 단순개념모형을 이용한 미래 유량 전망

본 연구에서는 최근 연구에서 불확실성이 적은 것으로 제시된 단순개념모형이 기후변화 연구 목적의 강우-유출모의에 적합한 것으로 제시하고 2개의 단순개념모형(IHACRES, GR4J 모형)을 이용하여 미래 유량을 전망하였다. 과거기간에 대해 모의능력을 SWAT 모형과 비교하여 기후변화 연구에서 단순개념모형을 사용하는 것이 타당한지 확인하였다. 이는 단순개념모형이 SWAT 모형과 대등한 또는 양호한 모의능력을 보일 경우 최근 연구에 기반하여 불확실성이 적은 단순개념모형이 기후변화 연구에 사용하는 것이 더 적합하다는 것을 보여줄 수 있다. 그리고 단순개념모형의 미래 유량 전망 결과를 SWAT 모형과 비교하여 모형별 유량 전망의 차이 또한 분석하였다.

4.1.3 수문기상자료

(1) 관측자료

SWAT 모형의 적용성 평가를 위한 과거기간의 수문기상 자료는 용담댐 유역의 5개의 기상관측소(전주, 금산, 임실, 거창, 장수)의 강수량(mm), 기온(℃), 풍속(m/sec), 상대습도 및 일사량(MJ/m^2) 자료를 2001~2013년까지 기간에 대해 기상청으로부터 제공받아 사용하였다. 단순개념모형의 경우 강수량(mm)과 잠재증발산량(mm)자료를 사용하였는데, 강수량의 경우 SWAT 모형과 같이 기상청에서 5개의 관측소에 대한 자료를 제공받아 사용하였으며 잠재증발산량의 경우는 SWAT 모형과 비교하기 위해 위 기상자료를 입력하여 SWAT 모형에서 생성된 잠재증발산량을 입력 자료로 사용하였다.

또한 모형의 적용성 평가를 위해 국가수자원관리정보시스템(http://www.wamis.go.kr)에서 제공하고 있는 2002~2013년의 용담댐 지점의 유출량 자료를 검·보정에 사용하였다.

(2) RCP 온실가스 배출 시나리오

RCP 온실가스 배출 시나리오 중 RCP4.5와 8.5 시나리오에 대해 12.5km 해상도의 일별 자료를 사용하였다. 이 시나리오는 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO를 통해 전지구 135km, 한반도 12.5km로 높인 시나리오로서 기상청에서 제공하고 있다. 국토교통부(2013)에서는 기상청의 HadGEM3-Ra 자료를 편이보정하였으며 본 연구에서는 이 자료를 세종대학교에서 제공받아 사용하였다. 과거기간에 대한 수문기상 자료와 동일하게 5개의 기상관측소(전주, 금산, 임실, 거창, 장수)의 강수량(mm), 기온(℃), 풍속(m/sec), 상대습도 및 일사량(MJ/m^2) 자료를 2020~2099년까지 기간에 대해 사용하였다(표 4.1).

온실가스 저감정책이 상당히 실현(RCP4.5 시나리오)될 경우, 21세기 말 용담댐 유역의 평균기온은 과거기간(1981~2011년)에 비해 2.5℃ 상승할 것이고 강수량은 25.2% 증가할 것으로 전망하고 있다. 한편, 현재 추세로 저감 없이 온실가스를 배출(RCP8.5 시나리오)한다면 기온은 과거기간 에 비해 4.7℃ 증가하고, 강수량은 19.8% 증가할 것으로 전망되었다. 정리하면, RCP4.5 시나리오의 경우 RCP8.5 시나리오에 비해 강수량 증가가 더 컸으나 온도는 더 적게 증가할 것으로 나타났다. 따라서 RCP8.5 시나리오의 경우 RCP4.5 시나리오에 비해 잠재증발산량의 증가가 더 클 것으로 전망된다(표 4.1).

표 4.1 연평균 수문기상자료

Scenario		PCP	T_{mean}	T_{max}	T_{min}	RH	WS	PET
Baseline		1363.0	12.1	18.6	6.7	73.9	1.5	1106.0
RCP4.5	2040s	1515.4 (11.2%)	13.7 (1.6℃)	20.4 (1.8℃)	8.5 (1.8℃)	74.4 (0.7%)	1.5 (-)	1157.7 (4.7%)
	2080s	1706.5 (25.2%)	14.6 (2.5℃)	21.4 (2.8℃)	9.5 (2.8℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)	1193.4 (7.9%)
RCP8.5	2040s	1515.6 (11.2%)	14.2 (2.1℃)	20.9 (2.3℃)	8.9 (2.2℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)	1186.3 (7.3%)
	2080s	1633.2 (19.8%)	16.8 (4.7℃)	23.8 (5.2℃)	11.7 (5.0℃)	75.0 (1.5%)	1.4 (-1 m/s)	1298.5 (17.4%)

PCP: Precipitation, T_{mean}: Mean Temperature, T_{max}: Maximum Temperature, T_{min}: Minimum Temperature,
RH: Relative Humidity, WS: Wind Speed, PET: Potential evapotranspiration, ( ) 안은 과거 대비 변화율 및 변화량

4.2 SWAT 모형을 이용한 유량 전망

4.2.1 적용성 평가

본 연구에서는 용담댐 유역의 출구지점에서의 유출량 자료를 사용하여 모형으로부터의 결과가 관측 기록 자료에 일치되도록 보정을 실시하였다. SWAT 모형의 경우 20개가 넘는 많은 매개변수가 존재하지만 모든 매개변수가 대상유역에 민감한 것은 아니며 유역마다 민감한 매개변수는 다르다(Van Griensven et al., 2006). 따라서 용담댐 유역 대상의 기존 연구를 참고하여 용담댐 유역에 민감한 매개변수를 선정하고 민감하지 않은 매개변수는 고정한 후 일부 매개변수만 보정을 실시하였다.

(1) 과거 연구와 비교를 통한 적용성 평가

대상유역에 대한 과거 연구의 검·보정 기간 및 매개변수를 참고하여 본 연구에서는 검·보정을 실시하였고 모의능력을 검증하였는데 이를 비교한 과거 연구는 박종윤 등(2014)이다. 과거 연구와 검·보정 기간 및 기상관측소 지점, 보정된 매개변수 값을 동일하게 하여 대등한 모의능력을 보이면 본 연구의 SWAT 모형의 세팅 및 용담댐 유역에 대한 적용성을 확인할 수 있다.

모형의 보정은 용담댐의 5개년(2002~2006)간의 일별 댐 유입량 자료를 이용하여 실시하였으며 모형의 검증은 보정된 매개변수를 적용하여 3개년(2007~2009)에 대하여 실시하였다. 2001년은 초기 안정화 기간으로 지정하였다.

박종윤 등(2014)은 SWAT Theoretical Documentation (Neitsch et al., 2002)에서 제시하고 있는 유출 및 토양수분 관련 매개변수를 이용하여 관측지점에 대해 공간적으로 최상류부터 순차적으로 시행

착오법으로 보정을 수행하였다. 총 6개의 매개변수를 보정에 사용했으며 유출에 관련된 매개변수 4개와 토양수분에 관련된 매개변수 2개를 사용하였다.

본 연구에서는 박종윤 등(2014)에서 사용한 검·보정 기간을 똑같이 사용하였고 출구지점에서의 일별 유출량을 기준으로 시행착오법으로 보정을 실시하고 총 4개의 매개변수를 사용하였다. SWAT 모형의 버전 차이로 2개의 매개변수는 보정을 실시하지 못하였지만 나머지 4개의 매개변수(유출에 관련된 매개변수 2개와 토양수분과 관련된 매개변수 2개)는 박종윤 등(2014)과 동일한 값을 사용하였다. 표 4.2는 박종윤 등(2014)과 본 연구에서 보정 시 사용한 매개변수 및 보정 결과를 정리한 것이다.

용담댐 지점의 모의된 유량과 관측유량을 비교한 결과는 표 4.3과 같다. 편의상 박종윤 등(2014)와 동일한 검·보정 기간을 사용한 본 연구의 SWAT 모형 결과를 SW-P라고 하였다. SW-P의 경우 보정기간의 R^2, NSE는 각각 0.63, 0.62, 검정기간의 R^2, NSE는 각각 0.69, 0.59로 분석되었다. 이는 과거 연구 박종윤 등(2014) 보다 더 높은 모의 능력을 나타내는 것으로 본 연구에 사용된 SWAT 모형의 기본적인 세팅은 용담댐 유역에 대해 유출을 모의하는데 적합하다고 할 수 있다. 그림 4.2에 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간에 대해 유출량을 모의한 결과를 도시하였다.

표 4.2 본 연구(SW-P)에서 추정된 매개변수 및 보정 결과

Parameter		Definition	Range		Estimated Value	
			Lower Bound	Upper Bound	박종윤 등(2014)	SW-P
Runoff	ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0	1	+0.52	+0.52
	GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge(days)	0	500	+17.3	-
	CH_K2	Effective hydraulic conductivity (mm/hr)	0	150	+27.7	+27.7
	SOL_K	Soil evaporation compensation coefficient	-25	25	*0.5	-
Soil Moisture	ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0	1	+0.28	+0.28
	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0	1	-0.06	-0.05

표 4.3 박종윤 등(2014)과 본 연구(SW-P)의 모의 결과 비교

	Static		Average during calibration	Average during validation
박종윤 등(2014)	Runoff(mm/yr)	observed	1064.6	668.7
		simulated	954.9	748.5
SW-P		observed	1069.7	646.4
		simulated	1010.6	818.4
박종윤 등(2014)	Evaluation criteria	R^2	0.44	0.55
		NSE	0.38	0.52
SW-P		R^2	0.63	0.69
		NSE	0.62	0.59

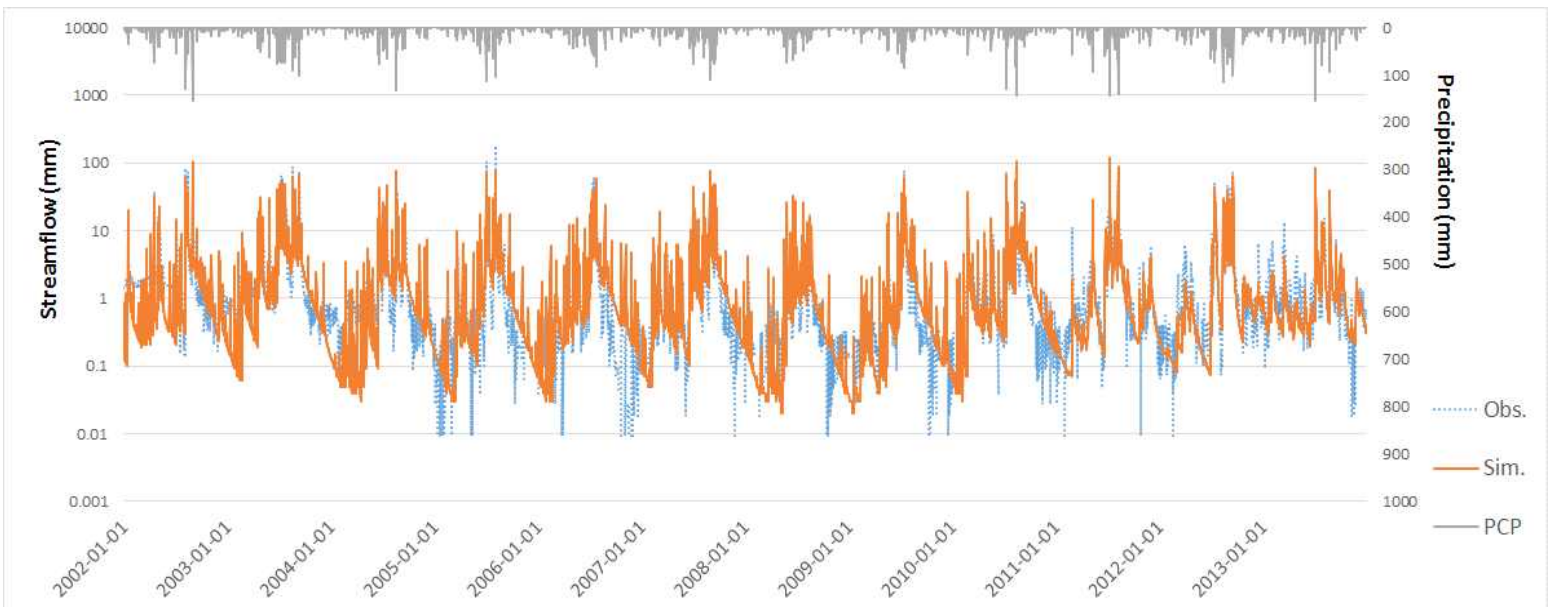


그림 4.2 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간의 유출량(SW-P)

(2) k-fold cross validation을 통한 보정 기간의 연장

용담댐은 2001년에 건설되었으므로 2002년 이후부터의 관측유량을 검·보정에 사용할 수 있다. 과거 연구, 박종윤 등(2014)에서도 2002~2006년(5년)만을 보정기간으로 지정하였다. 하지만 Chiew et al.(2009)과 Vaze et al.(2010)에서는 기후변화 영향평가에서는 최소 20년 이상의 충분한 기간의 과거 자료를 이용하여 모형의 보정(calibration)을 실시하여 우기(wet period) 또는 건기(dry period)의 유출량을 모두 추정할 수 있도록 하여야 한다고 제시하였다. 즉, 보정에 사용되는 자료는 대상 유역의 다양한 현상을 대표할 수 있어야 한다. 따라서 SW-P와 같이 5년만을 보정기간으로 수행한 적용성 평가 결과는 타당성이 떨어지게 된다.

이를 보완하기 위해서 본 연구에서는 자료의 양이 충분하지 않을 때 통계적 신뢰도를 높이기 위해 사용되는 기법 중의 하나인 k-fold cross validation 방법을 사용하고자 한다. k-fold cross validation 방법은 샘플을 *k*개의 집단으로 나누고 *k-1*개의 집합에 대해 보정을 하고 나머지 1개의 집합으로 검정을 실시한다. 따라서 자료의 모든 기간에 대해서 검·보정을 실시하여 특정 기간의 특성만을 반영한 것이 아닌 가능한 다양한 자료의 특성을 반영할 수 있게 된다. 즉, 보정기간을 자료가 가능한 범위에서 최대한으로 늘릴 수 있게 된다. 본 연구에서는 k-fold cross validation을 이용한 검·보정 기간은 표 4.4와 같이 총 6개의 case에 따라 나누어 검·보정을 시행하였다. 박종윤 등(2014)을 따라서 검·보정을 실시한 SW-P와 비교하면 보정기간이 5년에서 10년으로 2배로 늘어났으며 자료의 전 기간에 대해 검·보정을 실시하였다는 점에서 신뢰성을 높였다고 할 수 있다. 검·보정에 사용한 매개변수는 선행 연구들을 참고하여 민감한 매개변수 4개(ALPHA_BF, ESCO, SOL_AWC, CN2)를 선정하였으며 시행착오법으로 검·보정을 수행하였다. k-fold cross validation을

이용하여 보정기간을 늘려 보정을 실시한 모형은 편의상 SW-K라고 하였다.

보정과 검정을 통한 용담댐 지점의 모의된 유량을 관측유량과 비교한 결과 보정기간에는 NSE, R^2는 각각 0.62~0.65, 0.64~0.69로 나타났으며, 검정기간에는 NSE, R^2는 각각 0.48~0.70, 0.65~0.74로 분석되었다. 평균값의 경우 보정기간에는 NSE는 0.64, R^2는 0.67, 검정기간에는 NSE는 0.62, R^2는 0.68로 보정기간을 늘렸음에도 불구하고 SW-P의 모의능력보다 향상된 결과(표 4.5)를 보여주었으며 이 결과가 더 적절히 유량의 모의능력을 보여준다고 판단할 수 있다. 그림 4.3에 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간에 대해 SW-K로 유출량을 모의한 결과를 도시하였다.

표 4.4 k-fold cross validation을 이용한 매개변수 검·보정 case

case	Calibration (10 years)	Validation (2 years)
1	2004~2013	2002~2003
2	2002~2003, 2006~2013	2004~2005
3	2002~2005, 2008~2013	2006~2007
4	2002~2007, 2010~2013	2008~2009
5	2002~2009, 2012~2013	2010~2011
6	2002~2011	2012~2013

표 4.5 k-fold cross validation을 이용한 검·보정 결과(SW-K)

	Calibration		Validation	
Case	*NSE*	R^2	*NSE*	R^2
1	0.63	0.67	0.64	0.65
2	0.64	0.69	0.61	0.61
3	0.64	0.66	0.64	0.68
4	0.63	0.66	0.63	0.72
5	0.62	0.64	0.70	0.74
6	0.65	0.67	0.48	0.70
Average (SW-K)	**0.64**	**0.67**	**0.62**	**0.68**
Average (SW-P)	**0.62**	**0.63**	**0.59**	**0.69**

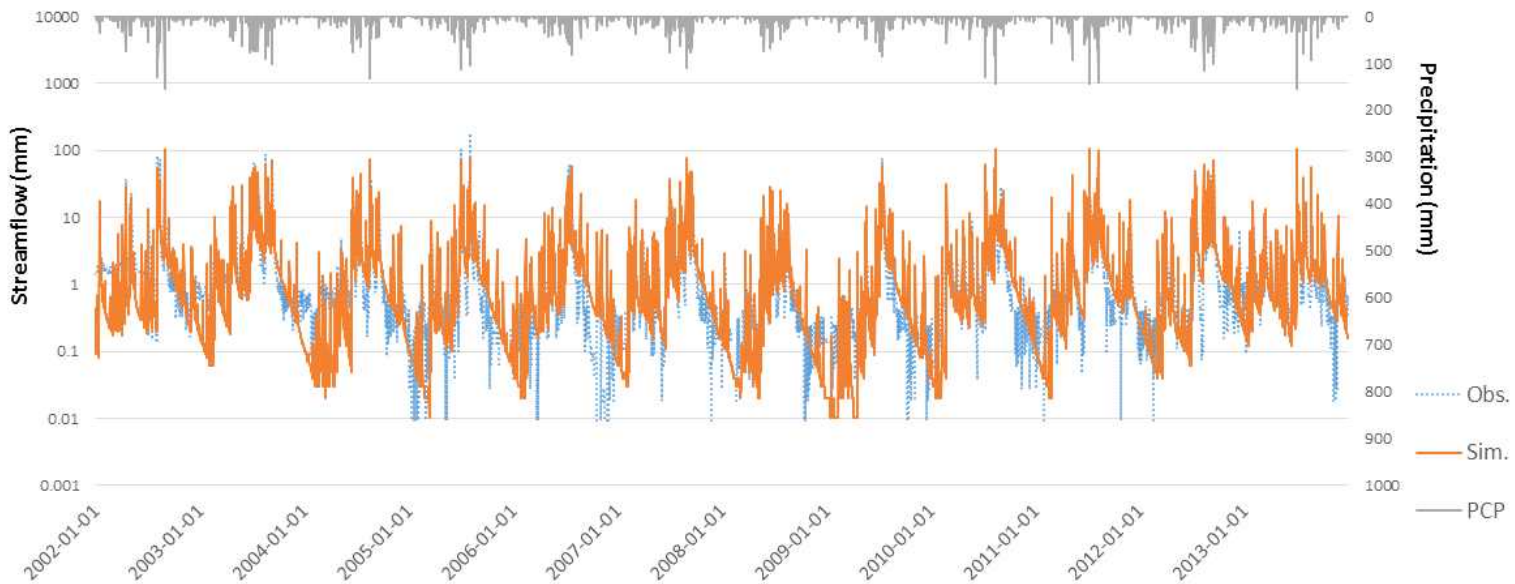


그림 4.3 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간의 유출량(SW-K)

4.2.2 유량 전망

유량 전망에는 k-fold cross validation 기법을 사용하여 추정한 6개 case의 매개변수 값 중에 case1의 값을 적용하였다(표 4.4 참고). 왜냐하면 기후변화 연구에서는 가장 최근의 자료의 사용이 의미가 있기 때문이다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 적용에 따른 용담댐 유역의 미래 유량을 분석하기 위해 과거기간(baseline)은 1982년부터 2011년까지를 기준으로 삼았으며, 미래기간은 2040s(2020~2059년), 2080s(2060~2099년)로 21세기를 2구간으로 나누었다.

(1) 연평균 유량 전망

가) 연평균 수문기상 자료 전망

표 4.6에 RCP 시나리오에 따른 연평균 수문기상 자료 전망에 대해 정리하였다. 용담댐 유역의 연평균 기온의 경우 과거기간 대비 2040s, 2080s 기간에 RCP8.5 시나리오는 2.1℃, 4.7℃, RCP4.5 시나리오의 경우는 1.6℃, 2.5℃ 상승하는 것으로 나타났다. 연평균 기온의 경우 RCP8.5 시나리오에서 증가폭이 더 컸다.

연평균 강수량의 경우 과거기간 대비 2040s, 2080s 기간에 RCP8.5 시나리오는 11.2%, 19.8%, RCP4.5 시나리오의 경우는 11.2%, 25.2% 증가하는 것으로 나타났다. 두 시나리오에서 2040s까지는 비슷하게 강수량이 증가하였으나 시간이 지날수록 RCP4.5 시나리오의 강수량 증가폭이 더 큰 것으로 나타났다.

용담댐 유역에 RCP4.5, 8.5 시나리오를 적용하여 미래 잠재증발산량을 전망한 결과, 과거기간 대비 2040s, 2080s 기간에 RCP8.5 시나리오에서는 7.3%, 17.4% 증가, RCP4.5 시나리오의 경우에는 4.7%, 7.9% 증가하였다.

나) 연평균 유량 전망 변화

용담댐 유역에 RCP4.5, 8.5 시나리오를 적용하여 미래 유량을 전망한 결과, 총유출량은 과거기간 대비 2040s, 2080s 기간에 RCP8.5 시나리오에서는 17.7%, 26.1% 증가, RCP4.5 시나리오의 경우에는 21.9%, 44.6% 증가하는 것으로 나타났다(표 4.7). RCP4.5 시나리오의 경우 총유출량 증가가 RCP8.5 시나리오의 경우보다 컸는데 이는 RCP8.5 시나리오를 적용할 때 강수량의 증가는 더 적게 일어나지만 기온의 상승이 더 커서 증발산이 더 활발히 일어나기 때문이라고 볼 수 있다. 이러한 양상은 먼 미래로 갈수록 심화된다.

다) 물수지 분석

연평균 유량을 수문순환 요소들에 대해 물수지 분석을 실시하였다.

RCP4.5 시나리오의 경우 강수량을 100%으로 했을 때 지표유출, 중간유출, 지하수유출, 그리고 총유출의 구성비율은 시간이 지날수록 증가하였다. 그 중, 지표유출이 가장 크게 증가하였다. 하지만 증발산량은 baseline 대비 증가했음에도 불구하고 강수량(100%)에 대한 수문순환에서 차지하는 비율은 시간이 지날수록 감소하였다(그림 4.4).

반면, RCP8.5 시나리오의 경우 강수량을 100%으로 했을 때 지표유출, 중간유출, 지하수유출, 그리고 총유출의 구성비율은 2040s까지는 증가하였으나 2080s에는 중간유출을 제외하고 지표유출, 지하수유출은 비율을 유지하거나 감소하였다. 증발산량의 경우도 2040s과 2080s에는 비슷한 구성비율을 유지하는 것으로 나타났다(그림 4.5). 전체적으로 유역 물수지의 변화는 있지만 구성비율의 변화는 크게 바뀌지 않을 것으로 전망되었다.

표 4.8에 RCP 시나리오별 과거기간 대비 미래기간의 유역 평균

수문 변화율(%)을 정리하였다. RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 2040s에는 강수량의 증가율이 비슷하지만 RCP8.5 시나리오가 상대적으로 증발산량이 크게 증가하여 유출량이 더 적게 증가하였다. 2080s에는 RCP4.5 시나리오의 강수량 증가율은 RCP8.5 시나리오보다 더 커지고, 증발산량의 증가율의 경우 RCP8.5 시나리오 적용의 경우보다 적게 증가하는데 이 경향은 2040s보다 더 강하다. 따라서 지표면 유출의 경우 2080s에는 RCP4.5 시나리오의 경우 RCP8.5 시나리오를 적용한 경우에 비해 2배 이상 크게 증가하고 있음을 볼 수 있으며, 총유출량의 경우도 시나리오별 차이가 크다. 또한 토양수분은 RCP4.5 시나리오의 경우 2040s, 2080s에 각각 baseline을 기준으로 3.2%, 4.5% 증가하였으며 RCP8.5의 경우 2040s, 2080s에는 각각 baseline을 기준으로 4.0%, 1.2% 증가하였다. 강수량의 증가량에 비해 증발산량의 증가량이 작아 토양수분이 증가하는 것으로 보인다. 하지만 상대적으로 RCP4.5 시나리오보다 증발산량이 더 많이 증가하고 강수량은 더 적게 증가하는 RCP8.5 시나리오에서는 토양수분의 증가율이 2080s에는 2040s에 비해 감소하였다.

2040s에는 RCP4.5 시나리오에서 지표유출, 중간유출과 지하수유출은 27.1%, 20.1%, 22.2% 증가하였으며, RCP8.5 시나리오에서는 20.4%, 17.1%, 17.3% 증가하였다. 2080s에는 RCP4.5 시나리오에서 지표유출, 중간유출과 지하수유출은 68.4%, 38.7%, 39.9% 증가하였고, RCP8.5 시나리오의 경우 29.7%, 27.1%, 19.8% 증가하였다. RCP4.5, 8.5 시나리오에서 모두 모든 유출요소들이 2040s에 비해 2080s에서 증가하고 있었는데 지표유출의 증가율이 가장 높았다.

표 4.6 연평균 기후변화 시나리오(RCP4.5, 8.5)

Scenario		PCP	T_{mean}	T_{max}	T_{min}	RH	WS
Baseline		1363.0	12.1	18.6	6.7	73.9	1.5
RCP4.5	2040s	1515.4 (11.2%)	13.7 (1.6℃)	20.4 (1.8℃)	8.5 (1.8℃)	74.4 (0.7%)	1.5 (-)
	2080s	1706.5 (25.2%)	14.6 (2.5℃)	21.4 (2.8℃)	9.5 (2.8℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)
RCP8.5	2040s	1515.6 (11.2%)	14.2 (2.1℃)	20.9 (2.3℃)	8.9 (2.2℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)
	2080s	1633.2 (19.8%)	16.8 (4.7℃)	23.8 (5.2℃)	11.7 (5.0℃)	75.0 (1.5%)	1.4 (-1 m/s)

PCP: Precipitation, T_{mean}: Mean Temperature, T_{max}: Maximum Temperature, T_{min}: Minimum Temperature, RH: Relative Humidity, WS: Wind Speed, ( ) 안은 과거 대비 변화율 및 변화량

표 4.7 SWAT 모형을 이용한 연평균 유량 전망 결과(SW-K)

	Baseline	RCP4.5		RCP8.5	
		2040s	2080s	2040s	2080s
PCP (mm)	1363.0	1515.4 (11.2%)	1706.5 (25.2%)	1515.6 (11.2%)	1633.2 (19.8%)
PET (mm)	1106.0	1157.7 (4.7%)	1193.4 (7.9%)	1186.3 (7.3%)	1298.5 (17.4%)
Q_{tot} (mm)	634.2	772.9 (21.9%)	917.2 (44.6%)	746.7 (17.7%)	799.8 (26.1%)

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total Runoff, ( ) 안은 과거 대비 변화율

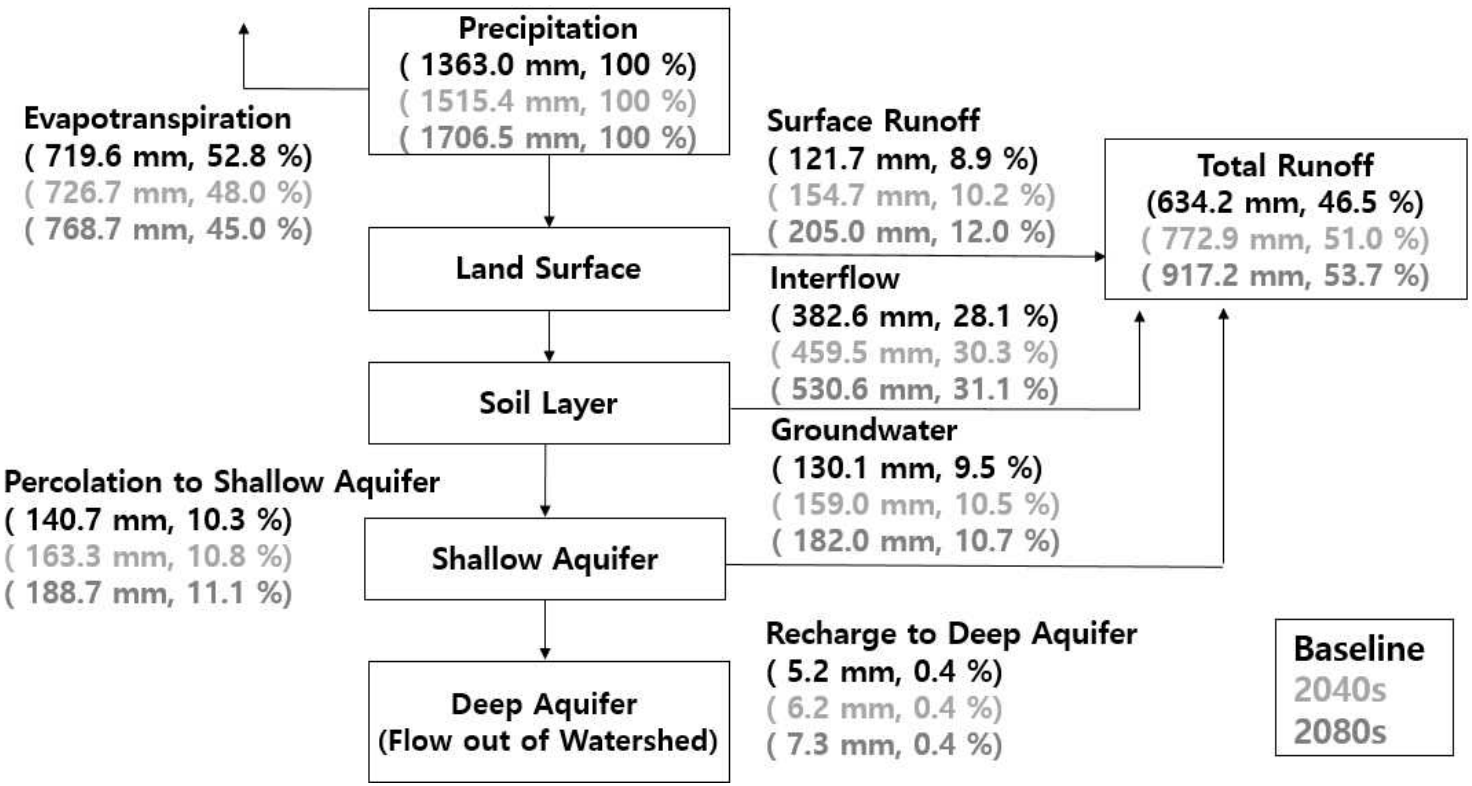


그림 4.4 RCP4.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(SW-K)

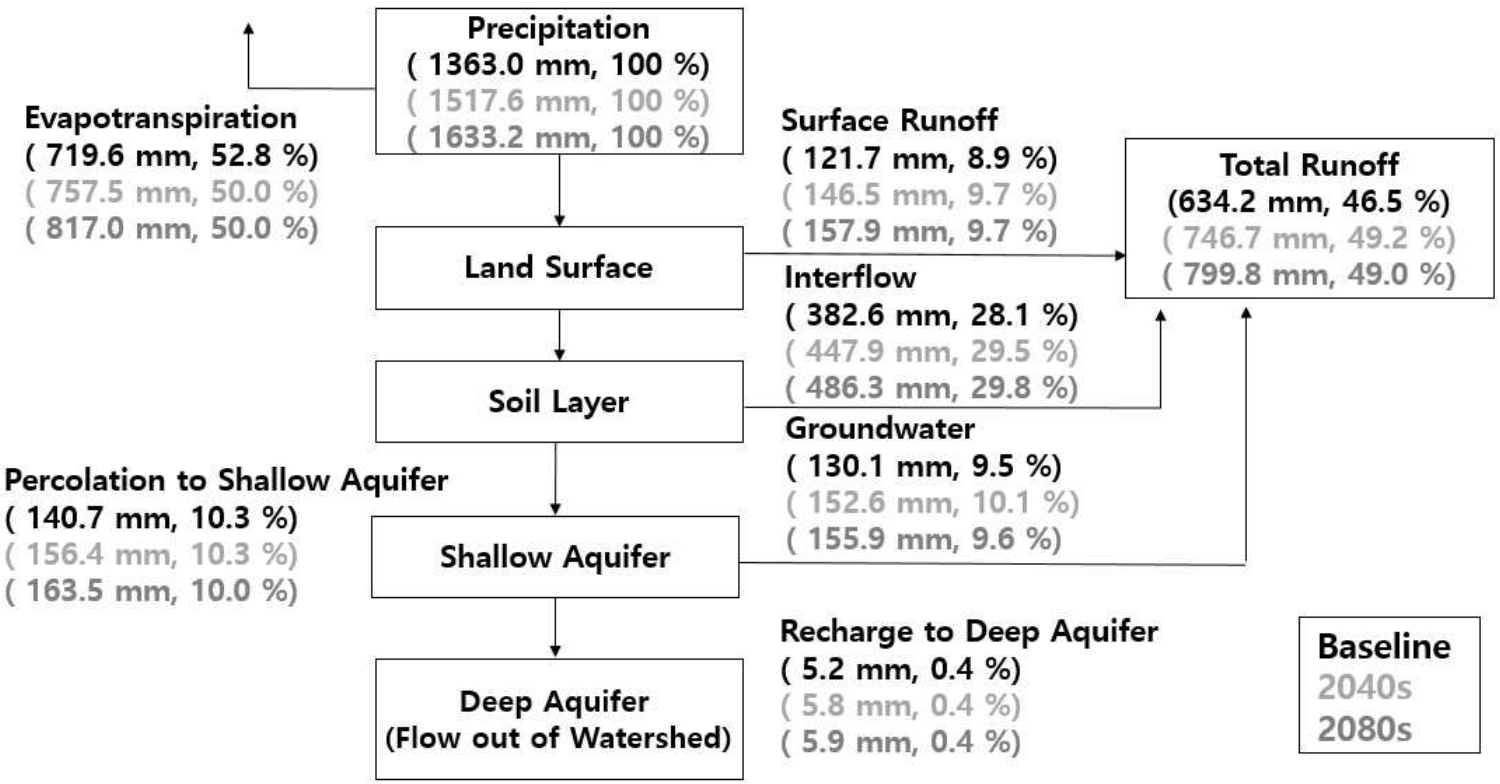


그림 4.5 RCP8.5 시나리오를 따른 물수지 분석(SW-K)

표 4.8 RCP 시나리오별 과거기간 대비 미래기간의 유역 평균 수문 변화율(SW-K)

% increase	RCP4.5		RCP8.5	
	2040s	2080s	2040s	2080s
PCP	11.2	25.2	11.2	19.8
PET	4.7	7.9	7.3	17.4
AET	1.0	6.8	5.3	13.5
Q_{tot}	21.9	44.6	17.7	26.1
Q_{surf}	27.1	68.4	20.4	29.7
Q_{lat}	20.1	38.7	17.1	27.1
Q_{gw}	22.2	39.9	17.3	19.8
SM	3.2	4.5	4.0	1.2

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, AET: Actural evapotranspiration,

Q_{tot}: Total runoff, Q_{surf}: Surface runoff, Q_{lat}: Lateral flow, Q_{gw}: Baseflow, SM: Soil moisture

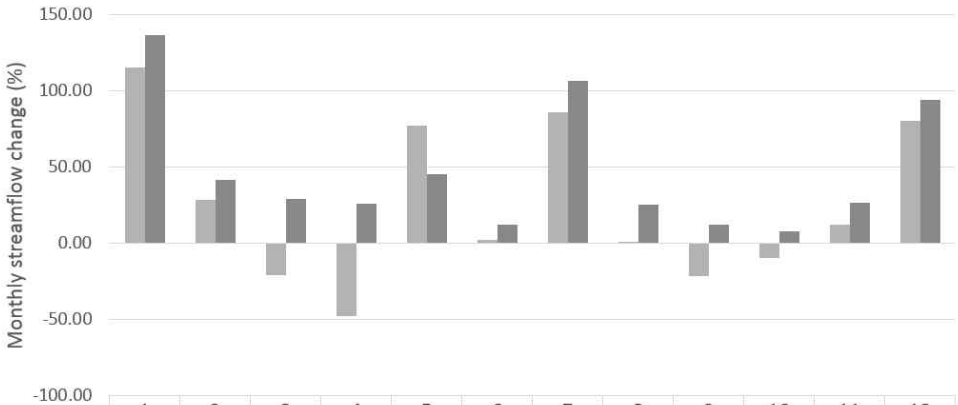
(2) 월평균 및 계절평균 유량 전망

가) 월별 유량 전망

그림 4.6과 4.7은 과거기간(1982~2011년) 대비 RCP4.5, 8.5 시나리오의 미래 유량의 월별 변화율을 살펴본 것이며, 그림 4.8과 4.9는 RCP4.5, 8.5 시나리오의 과거기간 대비 강수량, 잠재증발산량, 총유출량의 월별 변화를 나타낸 것이다.

RCP4.5 시나리오의 경우 2040s에는 3, 4, 9, 10월에는 총유출량이 감소할 것으로 전망되었으며 6, 8월의 경우도 총유출량 증가율이 매우 작았다. 하지만 2080s에는 모든 월에서 총유출량이 증가할 것으로 전망되었는데 특히 1, 7, 12월에 총유출량이 증가율이 매우 높았다.

RCP8.5 시나리오의 경우 2040s에는 4월을 제외한 모든 월에서 총유출량이 증가할 것으로 전망되었으며 특히 겨울철인 1월과 12월의 증가율이 높았다. 2080s의 경우 8월과 9월의 경우 유출량이 감소할 것으로 전망되었고, 특히 겨울철인 12, 1, 2월의 증가율이 높았는데 RCP4.5 시나리오와 비교해도 월등히 높은 것으로 나타났다. 이는 RCP8.5 시나리오의 경우 겨울철에 RCP4.5 시나리오에 비해 강수량 증가율이 높은 것에서 비롯된 것으로 판단된다.

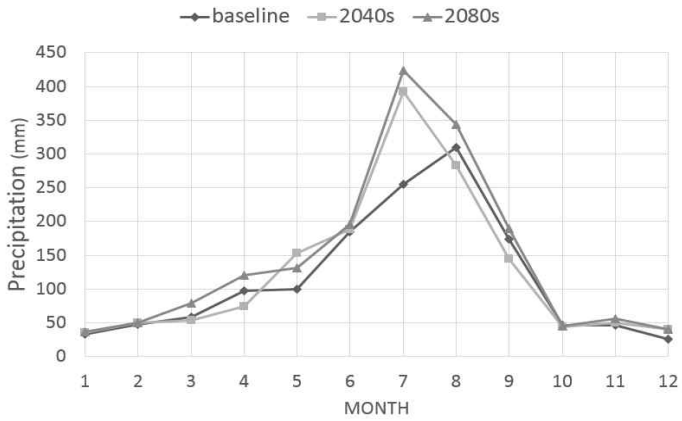


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2040s	115.31	28.41	-21.09	-47.44	77.47	2.06	85.96	1.14	-21.50	-9.51	12.39	80.61
2080s	136.43	41.46	28.89	26.06	45.27	12.48	106.48	25.10	12.19	7.62	26.68	94.39

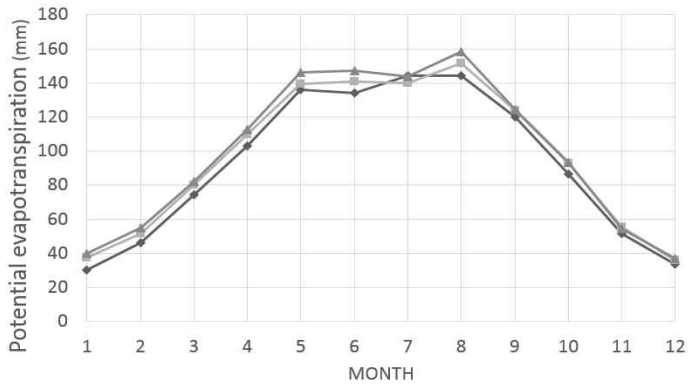
그림 4.6 RCP4.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(SW-K)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2040s	121.58	21.74	14.23	-4.85	26.78	31.51	23.88	3.75	-11.25	13.93	26.68	90.22
2080s	247.80	291.00	78.39	31.28	70.04	11.54	62.23	-16.01	-18.22	15.60	10.50	164.42

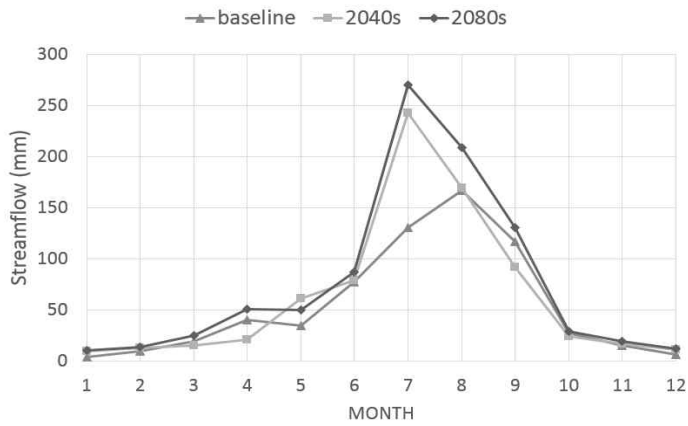
그림 4.7 RCP8.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(SW-K)



(a) Monthly Precipitation

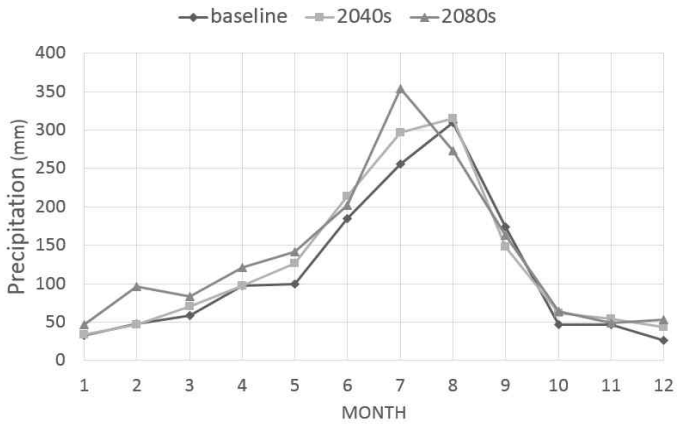


(b) Monthly Potential evapotranspiration

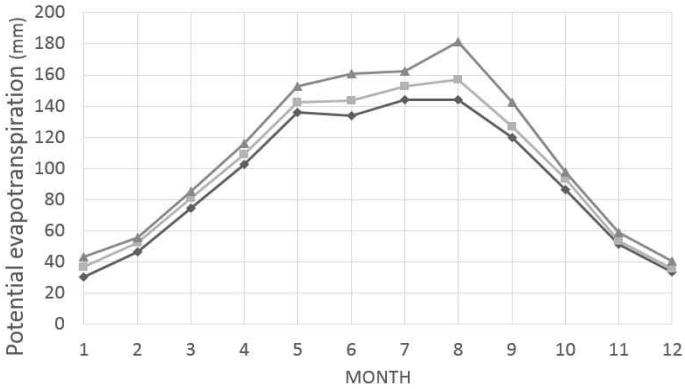


(c) Monthly Runoff

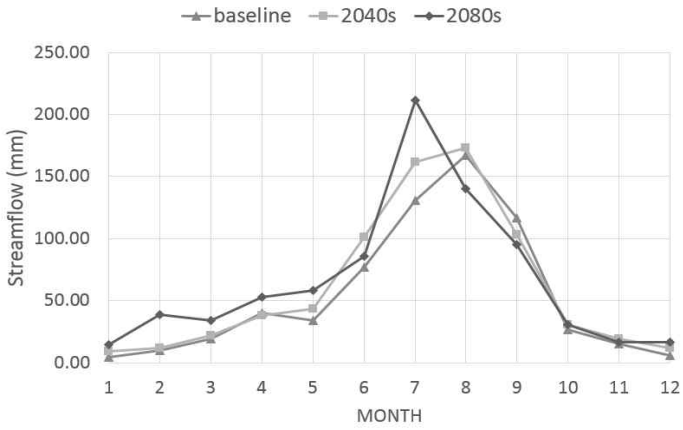
그림 4.8 RCP4.5 시나리오를 적용한 월별 변화(SW-K)



(a)Monthly Precipitation



(b)Monthly Potential evapotranspiration



(c)Monthly Runoff

그림 4.9 RCP8.5 시나리오를 적용한 월별 변화(SW-K)

나) 계절별 유량 전망

표 4.9, 4.10과 그림 4.10~4.15에 강수량, 잠재증발산량, 총유출량에 대한 계절별 변화에 대해 정리하였다. RCP4.5 시나리오에서는 2040s에는 가을을 제외한 모든 계절에서 강수량이 과거기간에 비해 증가하였다. 증가율은 겨울, 여름, 봄 순으로 컸다. RCP8.5 시나리오에서도 마찬가지로 2040s에는 가을을 제외하고 모든 계절에서 강수량이 증가하였으나 증가율은 겨울, 봄, 여름 순으로 차이를 보였다. 2080s에는 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 모든 계절에서 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 RCP4.5 시나리오의 경우 봄, 여름, 겨울, 가을 순으로 증가율이 컸으나 RCP8.5 시나리오의 경우 겨울, 봄, 여름, 가을 순으로 증가율이 큰 것으로 나타났다. 특히 RCP8.5 시나리오의 경우 겨울에 강수량이 과거기간을 기준으로 2080s에 84.3% 증가하는 것으로 나타나 매우 큰 변화율을 보였다.

잠재증발산의 경우 RCP4.5, 8.5 시나리오에서 모두 전 계절에서 증가하는 것으로 나타났으며, 겨울철 잠재증발산량의 증가율이 가장 컸다.

총유출량은 RCP4.5, 8.5 시나리오에서는 2040s에는 가을을 제외하고 모두 증가하는 것으로 전망되었고 계절별로 과거 대비 유량의 증가량은 여름이 가장 컸으나 증가율은 겨울이 가장 컸다. 2080s에는 RCP4.5 시나리오의 경우에는 모든 계절에서 유출량이 증가하는 것으로 전망되었으며, 증가율의 순서는 겨울, 여름, 봄, 가을 순이었다. 반면 RCP8.5 시나리오의 경우에는 가을을 제외하고 전 계절에서 유량이 증가하는 것으로 전망되었으며, 증가율은 겨울, 봄, 여름 순이었다. 전반적으로 2040s보다 2080s에서 유량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

표 4.9 RCP4.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(SW-K)

RCP4.5	Season	PCP (mm)	PET (mm)	Q_{tot} (mm)
Baseline (1982~2011)	Winter	106.9	110.5	20.4
	Spring	256.2	313.3	93.7
	Summer	750.1	422.1	374.6
	Autumn	266.5	257.8	158.7
2040s (2020~2059)	Winter	126.3 (18.2%)	125.2 (13.4%)	33.3 (62.7%)
	Spring	281.4 (9.9%)	329.5 (5.1%)	97.2 (3.7%)
	Summer	863.2 (15.1%)	432.4 (2.4%)	490.3 (30.9%)
	Autumn	238.5 (-10.5%)	272.0 (5.5%)	133.0 (-16.2%)
2080s (2060~2099)	Winter	127.2 (19.0%)	132.0 (19.5%)	36.3 (77.6%)
	Spring	332.0 (29.6%)	341.3 (8.9%)	125.2 (33.7%)
	Summer	964.3 (28.5%)	449.1 (6.4%)	565.1 (50.9%)
	Autumn	290.7 (9.1%)	272.3 (5.6%)	179.1 (12.8%)

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff, ( ) 안은 과거 대비 변화율

표 4.10 RCP8.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(SW-K)

RCP8.5	Season	PCP (mm)	PET (mm)	Q_{tot} (mm)
Baseline (1982~2011)	Winter	106.9	110.5	20.4
	Spring	256.2	313.3	93.7
	Summer	750.1	422.1	374.6
	Autumn	266.5	257.8	158.7
2040s (2020~2059)	Winter	123.6 (15.6%)	125.3 (13.4%)	33.5 (63.7%)
	Spring	293.8 (14.8%)	332.9 (6.2%)	103.7 (10.6%)
	Summer	825.5 (10.1%)	453.5 (7.4%)	436.4 (16.5%)
	Autumn	264.0 (-0.9%)	274.1 (6.3%)	153.5 (-3.3%)
2080s (2060~2099)	Winter	197.1 (84.3%)	139.5 (26.3%)	70.2 (243.2%)
	Spring	347.2 (35.6%)	354.6 (13.2%)	145.3 (55.1%)
	Summer	828.9 (10.5%)	504.5 (19.5%)	438.0 (16.9%)
	Autumn	275.7 (3.4%)	299.6 (16.2%)	143.3 (-9.7%)

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff, ( ) 안은 과거 대비 변화율

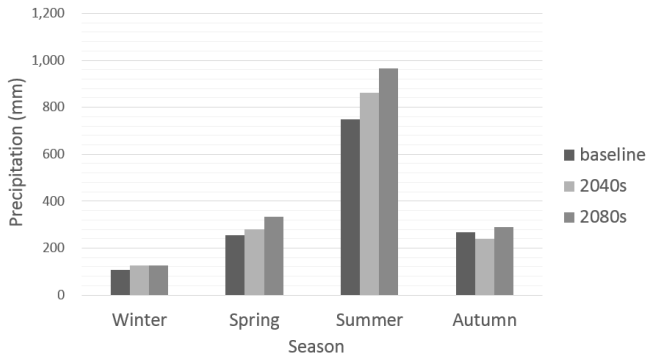


그림 4.10 강수량의 계절별 변화(RCP4.5)

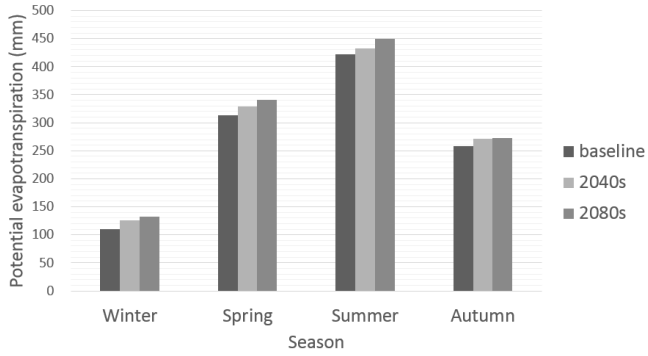


그림 4.11 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP4.5)

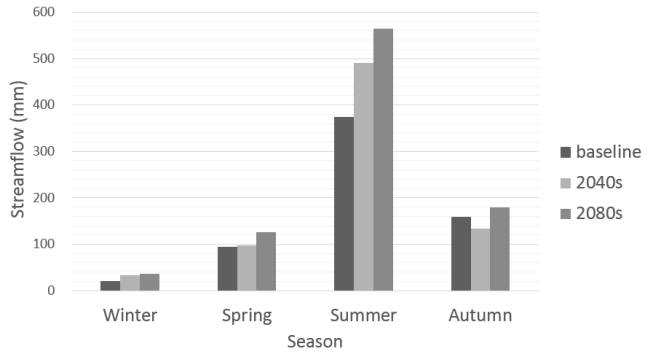


그림 4.12 총유출량의 계절별 변화(RCP4.5, SW-K)

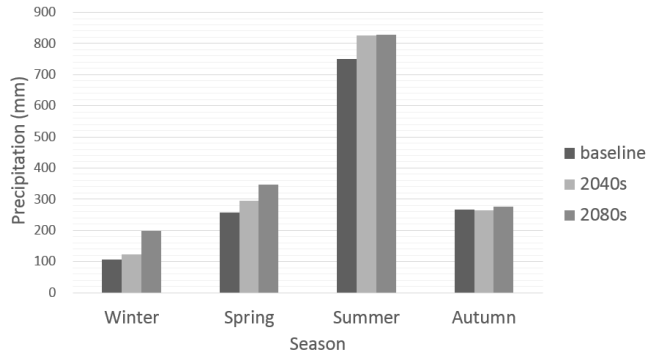


그림 4.13 강수량의 계절별 변화(RCP8.5)

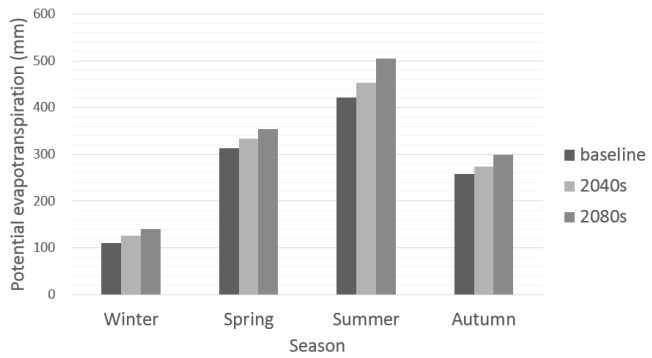


그림 4.14 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP8.5)

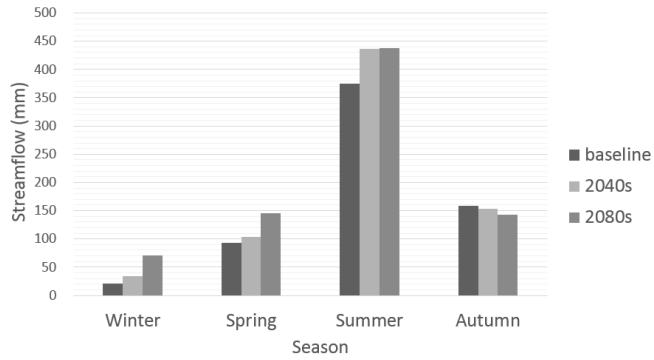


그림 4.15 총유출량의 계절별 변화(RCP8.5, SW-K)

4.2.3 과거 연구와 비교·분석

과거 금강유역을 대상으로 유량을 전망한 연구결과들은 매우 상이한 결과를 보여주었다. 결과 차이의 요인에는 사용된 자료의 차이는 물론 온실가스 배출시나리오, GCM, 상세화기법, 강우-유출모형의 차이 등이 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 금강유역에서 가장 많이 사용된 SWAT 모형을 이용하여 유량을 전망한 연구들의 결과와 본 연구의 결과와 비교·분석 해봄으로써 준분포모형인 SWAT 모형을 사용할 경우 결과에는 어떠한 요소로 인해 차이가 발생할 수 있는지, 그리고 결과는 어느 정도 차이가 발생하는지를 알아보고자 하였다. 따라서 용담댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 사용하여 유량을 전망한 과거 연구 2편의 결과와 본 연구에서 산출한 2개의 결과를 비교·분석해 보았다. 비교·분석은 SW-P, SW-K, 박종윤 등(2014)과 국토교통부(2013)에 대해 표 4.11과 같이 세부적으로 총 3가지 사례로 실시하였다.

첫 번째 사례는 박종윤 등(2014)과 SW-P를 비교한 것으로 이 두 결과는 검·보정 기간이 동일하다는 점에서 공통점이 있으나, 그 외 모형의 상세 세팅, 기후변화 시나리오 입력자료, 보정에 사용한 매개변수는 다르다(표 4.12 참고). 두 번째 사례는 SW-P와 SW-K를 비교하는데, 이 두 결과는 모형 세팅, 기후변화 시나리오 입력자료는 같지만 검·보정 기간과 보정에 사용한 매개변수가 다르다. 세 번째 사례는 SW-K와 국토교통부(2013)의 결과를 비교·분석을 하는데, 이 두 연구는 검·보정 기간, 모형 세팅, 보정에 사용된 매개변수는 다르나, 기후변화시나리오는 동일한 입력 자료로 사용하였다.

표 4.11 SWAT 모형을 이용한 유량전망 연구

Case	Study	Cal/Val Period	Estimated Parameters	Model setting	Climate change scenarios
1	박종윤 등(2014), SW-P	o	x	x	x
2	SW-P, SW-K	x	x	o	o
3	SW-K, 국토교통부(2013)	x	x	x	o

o: 일치, x: 불일치

표 4.12 연구별 검·보정 기간

	Calibration	Validation
박종윤 등(2014)	2002~2006 (5 years)	2007~2010 (4 years)
SW-P	2002~2006 (5 years)	2007~2010 (4 years)
SW-K	2004~2013 (10 years)	2002~2003 (2 years)
국토교통부(2013)	2001~2002 (2 years)	2003~2005 (3 years)

(1) 박종윤 등(2014)과 SW-P

표 4.13은 박종윤 등(2014)과 SW-P의 유량 전망 결과이다. 2개를 제외하고 똑같은 매개변수를 사용하여 같은 검·보정기간에 대해 검·보정을 수행하였지만, 같은 유역인데도 불구하고 유량전망 결과는 큰 차이를 보였다. 과거기간에 대해 모의한 유량 값은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 19.2% 정도의 차이를 보였다. RCP4.5 시나리오를 적용하였을 때 두 연구 결과의 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 10.5%, 0.1% 차이를 보였고 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 때 두 연구 결과의 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 29.6%, 22% 차이를 보였다. 이 비교 사례에서 결과의 차이 요인으로는 크게 3가지로 생각할 수 있다. 기상 입력 자료인 기후변화시나리오 편이보정 방법에 대한 차이, 매개변수 값 차이, 정밀토양도, 토지이용도와 같은 지형자료 및 모형 기본 세팅의 차이가 있을 수 있다. 결과의 차이의 원인에 대해 자세히 살펴보았다.

가) 기후변화시나리오 편이보정에 따른 차이

박종윤 등(2014)과 SW-P는 RCP4.5와 8.5 시나리오에 대해서 편이보정을 다른 방법으로 실시하여 표 4.14와 같이 기후변화 시나리오가 다르다.

강수량 변화를 보면 SW-P에서 사용한 RCP4.5 시나리오에서는 2040s, 2080s에 각각 11.2%, 25.2% 증가하는 것으로 전망되었으나, 박종윤 등(2014)의 경우는 2040s, 2080s에 각각 7.9%, 13.6% 증가하는 것으로 전망되었다. 또한 RCP8.5 시나리오의 경우에는 SW-P에서는 2040s, 2080s에 각각 11.2%, 19.8% 증가하는 것으로 나타났으나, 박종윤 등(2014)에서는 2040s, 2080s에 각각 16.2%, 22.5% 증가할 것으로 전망되었다. SW-P의 경우에는 2080s에 강수량이 RCP4.5 시나리오를 적용한 것이 RCP8.5 시나리오를 적용한 것보다 더 많이

증가하였는데, 박종윤 등(2014)에서는 이와 반대였다. 이를 보면 전혀 다른 양상의 기후변화 시나리오를 사용한 것과 다름이 없어 유량 전망 결과에서도 차이가 클 것으로 예상되었다. 기온의 경우에는 강수량의 변화에 비해 차이는 다소 적었다. 두 기후변화 시나리오에서 모두 RCP8.5 시나리오를 적용할 경우 기온의 증가가 더 클 것으로 전망되었다. 상대습도의 경우 RCP4.5 시나리오 적용 시 SW-P에서는 시간이 지날수록 증가할 것으로 전망되었으나 박종윤 등(2014)에서는 시간이 지날수록 상대습도가 감소할 것으로 전망되었다. 하지만 상대습도의 변화량이 크지 않아 영향은 작을 것으로 판단된다.

표 4.13 박종윤 등(2014)과 SW-P의 유량 전망 결과 비교

Scenario	Study	Baseline (mm/yr)	2040s		2080s	
			Runoff (mm/yr)	% change	Runoff (mm/yr)	% change
RCP4.5	SW-P	722.6	859.3	18.9	1013.0	40.2
	박종윤 등(2014)	861.5	949.2	10.2	1011.6	17.4
	Difference (기준: SW-P)	19.2 %	10.5 %	-8.9%	-0.1%	-22.8 %
RCP8.5	SW-P	722.6	821.9	13.7	912.22	26.2
	박종윤 등(2014)	861.5	1057.2	22.7	1112.8	29.2
	Difference (기준: SW-P)	19.2%	28.6%	9.0%	22.0%	3.0%

표 4.14 박종윤 등(2014)과 SW-P의 입력자료 비교

Scenario		Study	PCP	T_{mean}	T_{max}	T_{min}	RH	WS
Baseline		SW-P	1363.0	12.1	18.6	6.7	73.9	1.5
		박종윤 등(2014)	1443.3	11.6	18.0	6.0	71.5	1.3
RCP4.5	2040s	SW-P	1515.4 (11.2%)	13.7 (1.6℃)	20.4 (1.8℃)	8.5 (1.8℃)	74.4 (0.7%)	1.5 (-)
		박종윤 등(2014)	1557.9 (7.9%)	12.7 (1.1℃)	19.0 (1.0℃)	7.1 (1.1℃)	70.5 (-1.0%)	1.4 (0.1 m/s)
	2080s	SW-P	1706.5 (25.2%)	14.6 (2.5℃)	21.4 (2.8℃)	9.5 (2.8℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)
		박종윤 등(2014)	1639.3 (13.6%)	13.6 (2.0℃)	20.0 (2.0℃)	8.1 (2.1℃)	70.2 (-1.3%)	1.4 (0.1 m/s)
RCP8.5	2040s	SW-P	1515.6 (11.2%)	14.2 (2.1℃)	20.9 (2.3 ℃)	8.9 (2.2 ℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)
		박종윤 등(2014)	1677.8 (16.2%)	13.4 (1.8℃)	19.7 (1.7℃)	7.8 (1.8℃)	725. (1.0%)	1.4 (0.1 m/s)
	2080s	SW-P	1633.2 (19.8%)	16.8 (4.7℃)	23.8 (5.2 ℃)	11.7 (5.0 ℃)	75.0 (1.5%)	1.4 (-0.1 m/s)
		박종윤 등(2014)	1767.8 (22.5%)	16.3 (4.7℃)	22.7 (4.7℃)	10.7 (4.7℃)	71.6 (0.1%)	1.4 (0.1 m/s)

PCP: Precipitation, T_{mean}: Mean Temperature, T_{max}: Maximum Temperature, T_{min}: Minimum Temperature,

RH: Relative Humidity, WS: Wind Speed, ( ) 안은 과거 대비 변화율 및 변화량

나) 매개변수의 차이

두 연구 결과는 보정에 사용한 매개변수가 다르다. 박종윤 등(2014)은 ALPHA_BF, GW_DELAY, CH_K2, SOL_K, ESCO, SOL_AWC를 사용하였으나 SW-P는 6개의 매개변수 중 GW_DELAY와 SOL_K를 제외하여 보정을 실시하였다. SWAT 모형에서는 20개 이상의 매개변수가 존재하나 유량 모의에 민감한 매개변수는 일부이다. 따라서 시행착오법으로 매개변수 추정을 시행할 경우, 최적의 매개변수는 다양한 조합이 나올 수 있고 결과 또한 그만큼 상이하게 나올 가능성이 높다.

다) 모형 세팅

SWAT 모형에서는 정밀토양도, 토지이용도에 대한 자료를 입력하여 유역을 구성하고 세부적으로 모형 세팅을 시행하여야 한다. 이에 따른 유출량 결과 차이가 발생할 수 있다.

(2) SW-P와 SW-K

표 4.15는 두 연구 결과에 대한 유량 전망 결과이다. 과거기간(1982~2011년)에 대한 유량 값은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 13.9% 정도의 차이를 보였다. RCP4.5 시나리오를 적용하였을 때 두 모형에서 산출된 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 11.2%, 10.4% 차이를 보였고 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 때 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 10.1%, 14.1% 차이를 보였다. 두 모형은 기본적으로 같은 모형의 세팅, 기후변화시나리오를 사용하였기 때문에 매개변수 값의 차이가 결과의 차이의 주요 원인이라고 볼 수 있다.

즉, 기본적으로 모형의 검·보정 기간이 다르다. SW-P는 과거 5개년의 기간에 대해 보정을 실시하였지만 SW-K는 과거 10개년의 기간에 대해 보정을 실시하였다. 또한 SW-P는 ALPHA_BF,

CH_K2, ESCO, SOL_AWC에 대해 보정을 실시하였지만 SW-K는 ALPHA_BF, ESCO, SOL_AWC, CN2에 대해 보정을 실시하였다.

표 4.15 SW-P와 SW-K의 유량 전망 결과 비교

Scenario	Study	Baseline (mm/yr)	2040s		2080s	
			Runoff (mm/yr)	% change	Runoff (mm/yr)	% change
RCP4.5	SW-P	722.6	859.3	18.9	1013.0	40.2
	SW-K	634.2	772.9	21.9	917.2	44.6
	Difference (기준: SW-K)	13.9 %	11.2 %	-3.0%	10.4%	-4.4%
RCP8.5	SW-P	722.6	821.9	13.7	912.22	26.2
	SW-K	634.2	746.7	17.7	799.8	26.1
	Difference (기준: SW-K)	13.9%	10.1%	-4.0%	14.1%	0.1%

(3) SW-K와 국토교통부(2013)

표 4.16은 두 연구의 유량 전망 결과이다. 과거기간(1982~2011년)에 대한 유량 값은 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 53.2% 정도의 차이를 보였다. RCP4.5 시나리오를 적용하였을 때 유량 모의 값 차이는 2040s, 2080s에서는 41.5%, 38.4% 차이를 보였고 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 때 유량 모의 값 차이는 2040s, 2080s에서는 46.4%, 48.9% 차이를 보였다. 이러한 유량 모의 값의 차이의 원인에는 같은 기후변화 시나리오를 사용하였으나 모형의 기본적인 세팅 및 매개변수 검·보정에서의 차이점을 생각할 수 있다. 세 가지 사례 중 유량 값에 대해 가장 큰 차이를 보인 사례로 기후변화 시나리오로 인

한 영향보다는 SWAT 모형 내에서 민감한 매개변수를 선택하고 모형을 세팅하는 과정이 유량 값에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 하지만 과거기간 대비 미래 유량 값에 대한 증가율의 경우는 다른 기후변화 시나리오를 사용한 첫 번째 사례보다 차이가 적은 것으로 나타났다. 즉, 유량 값에는 SWAT 모형 내에서 발생하는 차이가 더 크게 영향을 미치나, 과거기간 대비 미래 유량 값의 변화율에는 기후변화 시나리오의 차이가 모형 내에서 발생할 수 있는 차이보다 더 크게 영향을 미치는 것으로 보인다.

표 4.16 SW-K와 국토교통부(2013)의 유량 전망 결과 비교

Scenario	Study	Baseline (mm/yr)	2040s		2080s	
			Runoff (mm/yr)	% change	Runoff (mm/yr)	% change
RCP4.5	SW-K	634.2	772.9	21.9	917.2	44.6
	국토교통부(2013)	971.8	1093.6	12.5	1269.7	30.7
	Difference (기준: SW-K)	53.2%	41.5%	-9.4%	38.4%	-13.9%
RCP8.5	SW-K	634.2	746.7	17.7	799.8	26.1
	국토교통부(2013)	971.8	1093.0	12.5	1190.7	22.5
	Difference (기준: SW-K)	53.2%	46.4%	-5.2%	48.9%	-3.6%

(4) 소결론

표 4.17은 네 가지 연구 결과(연평균 유량)에 대해 정리해본 것이며, 표 4.18는 SW-K를 기준으로 연구 결과의 차이를 산정해 본 것이다. 그림 4.16과 4.17은 네 가지 연구의 연평균 유량 전망 결과를 그림으로 도시해 보았다. 유량 전망 값에 대해서는 최저 10.3%에서 최대 53.2% 차이를 보였다. 또한 과거기간 대비 2040s, 2080s에 대한 증가율의 경우 최저 0.1%, 최대 27.2% 차이를 보였다. 같은 유역을 대상으로, 같은 모형으로 유량을 전망하여도 결과가 매우 상이하게 나올 수 있다는 것을 확인할 수 있다. SWAT 모형의 경우 물리적 기반의 준분포모형으로 정밀토양도, 토지이용도 등의 지형자료 및 상대습도, 일사량, 평균풍속, 최고온도, 최저온도, 강수량 등 많은 기상자료를 필요로 한다. 따라서 미래 유량을 전망하는 경우 SWAT 모형은 이미 불확실성이 큰 기후변화 시나리오 자료를 많이 사용하게 되어 결과의 차이가 크게 발생할 수 있으며 기본 모형 세팅에서도 차이가 발생할 수 있다. 그리고 SWAT 모형에는 20 여개의 많은 매개변수가 존재하여 사용자마다 검·보정하는 과정에서 발생하는 차이에 의해 결과가 상이하게 나올 가능성 또한 매우 크다. 따라서 다음 4.3절에서는 최근 연구에 의해 모형 내 불확실성이 적어 본 연구에서 기후변화 연구에 적합한 것으로 제시한 단순개념모형을 이용하여 유량을 전망하였다.

표 4.17 SWAT모형을 이용한 연평균 유량 결과 비교

		Baseline	2040s		2080s	
		Runoff (mm/yr)	Runoff (mm/yr)	% change	Runoff (mm/yr)	% change
RCP4.5	SW-P	722.6	859.3	18.9	1013.0	40.2
	박종윤 등(2014)	861.5	949.2	10.2	1011.6	17.4
	SW-K	634.2	772.9	21.9	917.2	44.6
	국토교통부(2013)	971.8	1093.6	12.5	1269.7	30.7
RCP8.5	SW-P	722.6	821.9	13.7	912.2	26.2
	박종윤 등(2014)	861.5	1057.2	22.7	1112.8	29.2
	SW-K	634.2	746.7	17.7	799.8	26.1
	국토교통부(2013)	971.8	1093.0	12.5	1190.7	22.5

표 4.18 연구 결과 간의 차이 (기준: SW-K)

		Baseline	2040s		2080s	
		Runoff difference(%)	Runoff difference(%)	변화율 difference(%)	Runoff difference(%)	변화율 difference(%)
RCP4.5	SW-P	13.9	11.2	-3.0	10.4	-4.4
	박종윤 등(2014)	35.8	22.8	-11.7	10.3	-27.2
	국토교통부(2013)	53.2	41.5	-9.4	38.4	-13.9
RCP8.5	SW-P	13.9	10.1	-4.0	14.1	0.1
	박종윤 등(2014)	35.8	41.6	5.0	39.1	3.1
	국토교통부(2013)	53.2	46.4	-5.2	48.9	3.6

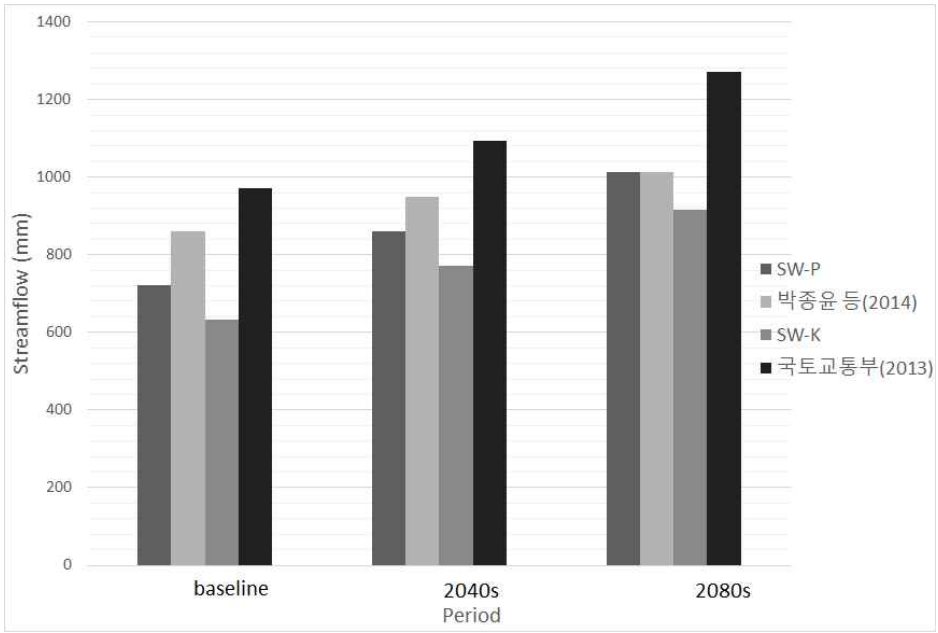


그림 4.16 SWAT모형을 이용한 연평균 유량 결과 비교(RCP4.5)

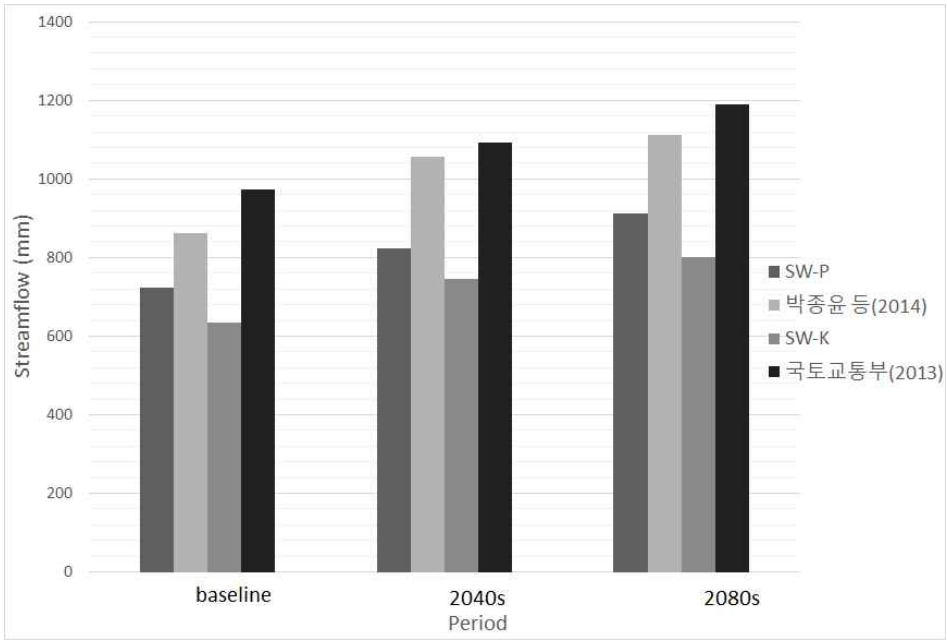


그림 4.17 SWAT모형을 이용한 연평균 유량 결과 비교(RCP8.5)

4.3 단순개념모형을 이용한 유량 전망

기후변화를 고려하여 유량 전망을 하는 경우 여러 단계를 거치게 되는데 여기서 각 단계에서는 불확실성이 존재하게 된다. 최근 연구들(Gleick, 1989; Xu and Singh, 2004; Shin et al., 2013, 2014)에 의하면 준분포모형이나, 분포형모형 보다 단순개념모형이 구조적 측면에서 불확실성이 적다고 하였다. 따라서 불확실성이 크게 존재하는 기후변화 연구에서는 모형 내 불확실성이 적은 단순개념모형을 쓰는 게 타당하다. 또한 본 연구의 4.2절의 결과처럼 물리적 기반의 준분포모형, SWAT과 같은 모형을 사용할 경우 동일한 모형을 사용했을지라도 사용하는 자료, 매개변수 선택, 매개변수 검·보정 기간 등에 의해서 결과가 크게 차이가 날 수가 있다. 따라서 불확실성이 적은 단순개념모형을 사용하여 유량을 전망해보고자 한다. 본 연구에서는 2개의 단순개념모형인, IHACRES 모형과 GR4J 모형을 사용하였다.

4.3.1 적용성 평가

단순개념모형이 용담댐유역의 유량을 모의하는데 적합한지를 평가하기 위해 모형으로부터의 결과가 용담댐 유역의 출구 지점의 관측 기록 자료에 최대한 일치되도록 보정을 실시하였다. SW-K에서 사용한 방법과 같이 k-fold cross validation을 이용하여 6개의 case로 구분하여(표 4.4 참고) 각각 4개의 매개변수에 대하여 Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) 최적화 방법을 사용하여 자동 검·보정을 수행하였다.

(1) IHACRES 모형의 유출량 검·보정

용담댐 지점의 모의된 유량을 관측 유량과 비교한 결과 보정기간에는 NSE, R^2는 0.74~0.82로 나타났으며 평균은 0.77이었다. 검정기간에는 NSE, R^2는 각각 0.60~0.90, 0.63~0.89였으며, 평균은 각각 0.77, 0.79로 분석되었다(표 4.19~20, 그림 4.18).

표 4.19 IHACRES 모형의 모의능력 평가

IHACRES	Calibration		Validation	
case	NSE	R^2	NSE	R^2
1	0.76	0.76	0.79	0.81
2	0.82	0.82	0.60	0.63
3	0.77	0.77	0.81	0.81
4	0.77	0.77	0.78	0.8
5	0.74	0.74	0.90	0.89
6	0.78	0.78	0.72	0.78
Average	0.77	0.77	0.77	0.79
Range	0.74-0.82	0.74-0.82	0.60-0.90	0.63-0.89

표 4.20 IHACRES 모형의 매개변수 및 보정 결과

	f	τ_s	τ_q	v_s
Definition	CMD stress threshold as a proportion of d	Time constant for slow flow store (day)	Time constant for quick flow store (day)	Fractional volume for slow flow
Range	0.5 - 1.3	10 - 1000	0 - 10	0 - 1
case1	0.82	1000.00	1.29	2.08E-02
case2	0.98	494.97	1.38	2.95E-08
case3	0.77	519.47	1.28	2.31E-07
case4	0.70	365.67	1.33	2.75E-09
case5	0.70	517.89	1.33	3.21E-09
case6	0.71	433.06	1.27	3.81E-09

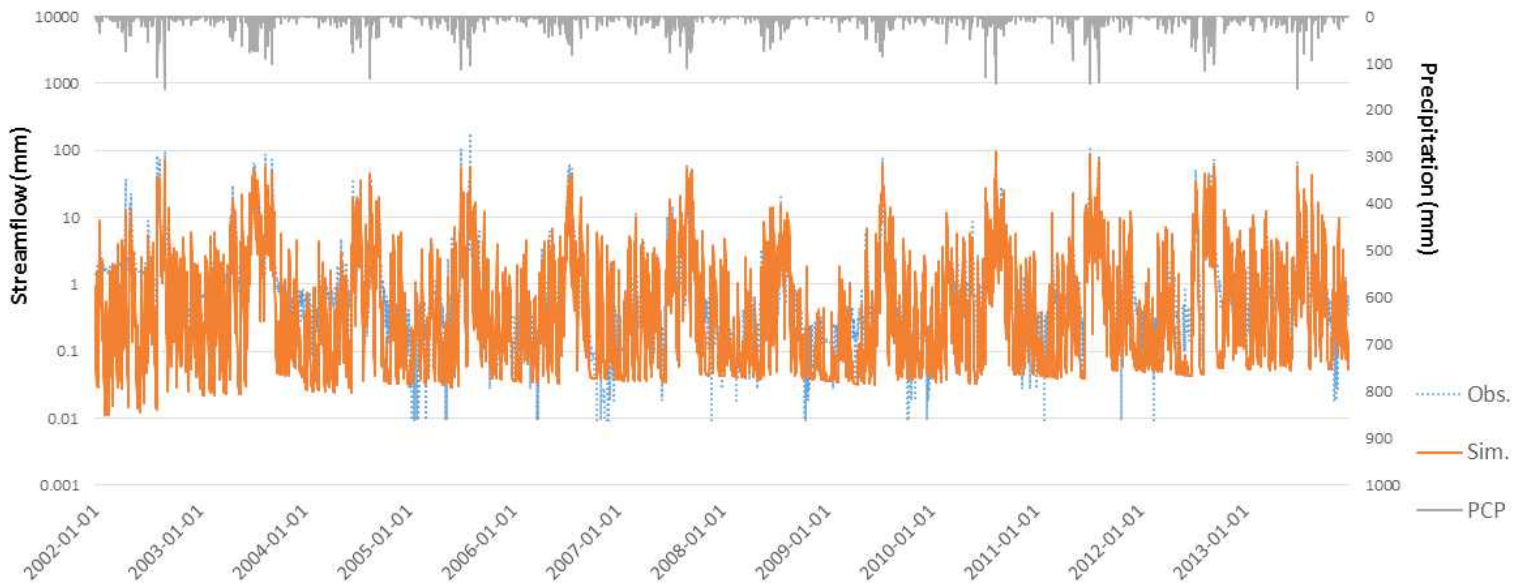


그림 4.18 IHACRES 모형의 검·보정 결과

(2) GR4J 모형의 유출량 검·보정

보정기간에는 NSE, R^2는 모두 0.81~0.87로 나타났으며 평균은 0.83이었다. 검정기간에는 NSE, R^2는 각각 0.68~0.90, 0.72~0.92였으며, 평균은 각각 0.82, 0.85로 분석되었다(표 4.21~22, 그림 4.19).

표 4.21 GR4J 모형의 모의능력 평가

GR4J	Calibration		Validation	
case	*NSE*	R^2	*NSE*	R^2
1	0.82	0.83	0.83	0.86
2	0.87	0.87	0.68	0.72
3	0.83	0.83	0.86	0.86
4	0.83	0.83	0.85	0.88
5	0.81	0.81	0.90	0.92
6	0.83	0.83	0.78	0.85
Average	0.83	0.83	0.82	0.85
Range	0.81-0.87	0.81-0.87	0.68-0.90	0.72-0.92

표 4.22 GR4J 모형의 매개변수 및 보정 결과

	*X*1	*X*2	*X*3	*X*4
Definition	Maximum capacity of the production store (mm)	Groundwater exchange coefficient (mm)	One day ahead maximum capacity of the routing store (mm)	Time base of unit hydrograph *UH1* (day)
Range	50 - 5000	-15 to 4	10 - 1300	0.5 - 5
case1	148.75	-2.88	75.86	1.11
case2	230.27	-1.30	61.23	1.14
case3	161.88	-1.70	66.70	1.13
case4	160.96	-1.35	69.27	1.13
case5	130.31	-1.53	80.85	1.09
case6	106.09	-1.82	69.48	1.13

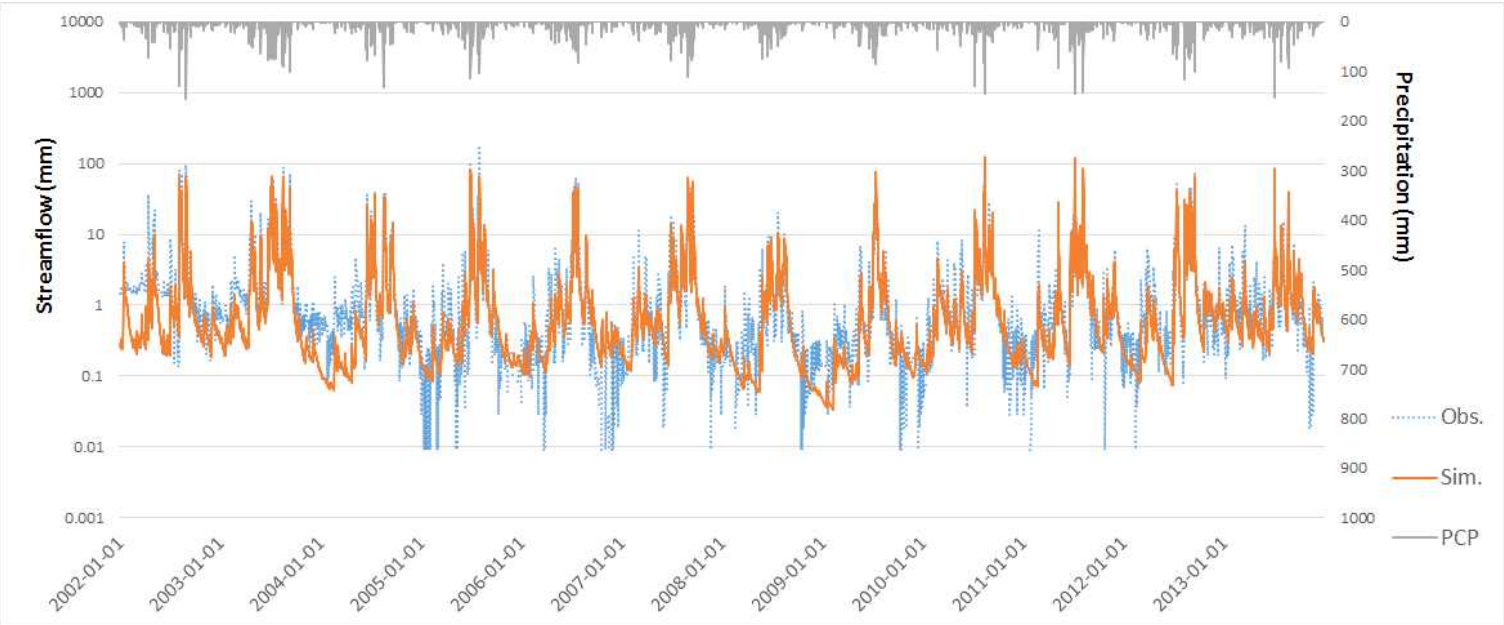


그림 4.19 GR4J 모형의 검·보정 결과

(3) 준분포모형과의 모의능력 비교

그림 4.20과 4.21은 SWAT, IHACRES, GR4J 모형의 모형별 *NSE*와 R^2를 도시한 것이다. GR4J 모형이 용담댐 유역에 대해서 모의능력이 가장 높은 것으로 나타났으며, SWAT 모형이 모의능력이 가장 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 IHACRES 모형과 GR4J 모형의 경우 자동보정기법을 사용하였으나 SWAT 모형은 시행착오법을 사용한 것에 기인한 것으로 보인다. 하지만 이를 고려하여도, 단순개념모형인 IHACRES 모형과 GR4J 모형의 모의능력은 일유출량에 대해 검·보정을 실시하였는데도 불구하고 *NSE* 값이 0.8정도로 매우 높은 모의능력을 보여주고 있다. 따라서 이와 같이 단순개념모형이 준분포모형(SWAT)과 비교할 때 대등한 또는 양호한 모의능력을 보여주므로, 모형의 불확실성에 중점을 두어 평가할 경우 최근 연구(Xu and Singh, 2004; Shin et al., 2013, 2014)에 의해서 구조적으로 불확실성이 적은 단순개념모형이 기후변화 연구에 더 적합하다고 할 수 있다. 단, 기본적으로 충분한 과거기간에 대해 모형의 적용성이 높을 경우, 미래기간에도 더 잘 모의한다는 Vaze et al.(2010)과 Chiew et al.(2009)의 연구결과를 토대로 한다. 또한 표 4.23에는 각 모형별 총 매개변수 및 사용된 매개변수의 개수, 모의에 필요한 입력자료, 모의 소요시간, 모형의 불확실성과 모의능력을 정리해보았다. 이를 보면 불확실성 및 모의능력 측면뿐만 아니라 SWAT 모형에 비해 상대적으로 입력자료가 적고, 계산이 빨라서 효율성 측면에서의 장점을 갖고 있는 단순개념모형이 기후변화 연구에 추천된다. 본 연구에서는 세 모형 중에 가장 모의능력이 우수한 것으로 나온 GR4J 모형이 용담댐 유역에 적용성이 가장 높은 것으로 판단되었다.

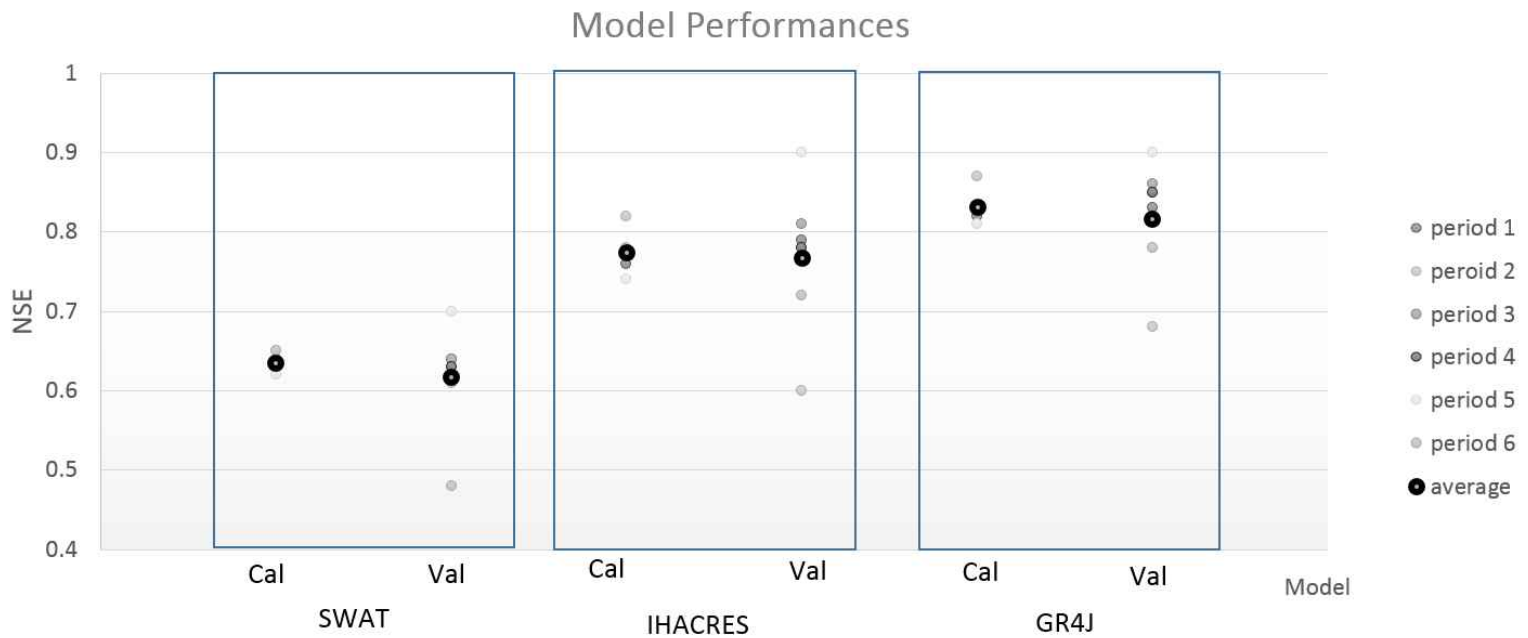


그림 4.20 모형별 용담댐 유역에 대한 유량 모의능력 (a) NSE

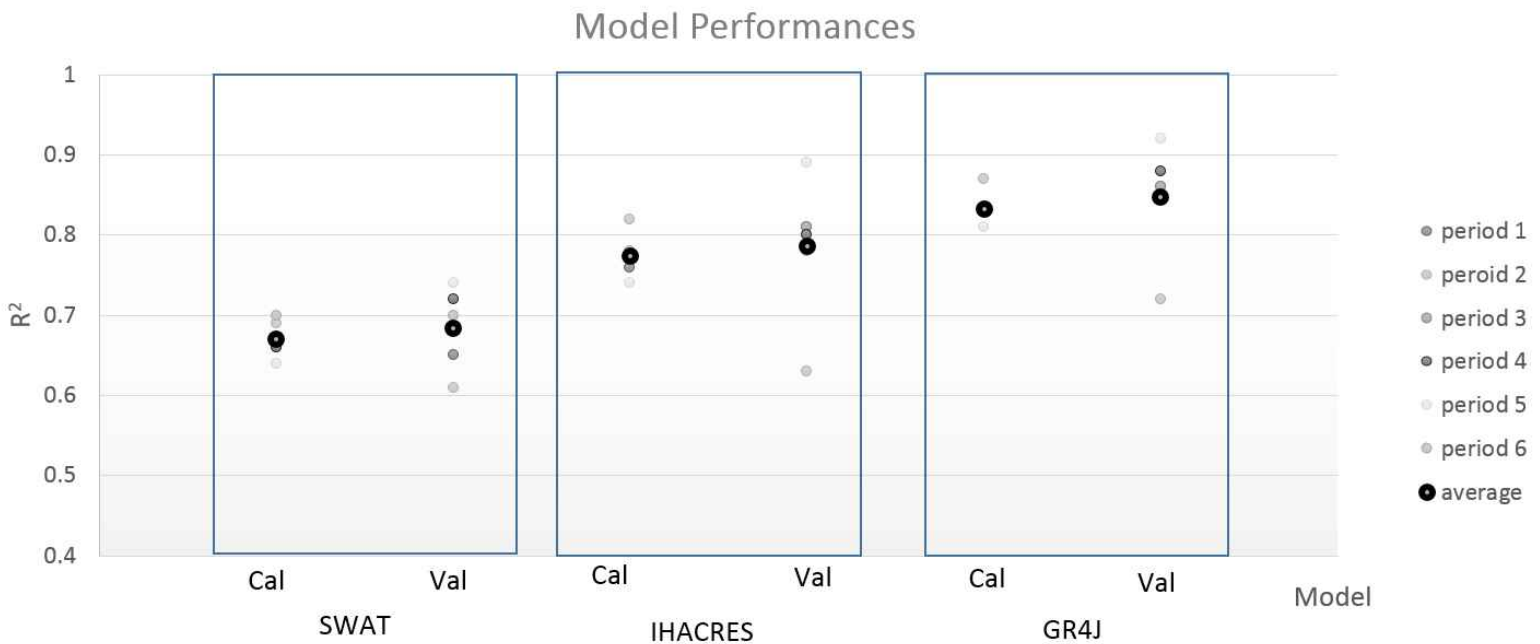


그림 4.21 모형별 용담댐 유역에 대한 유량 모의능력 (b) R^2

표 4.23 모형 간 모의능력 및 효율성 비교

Model	Input data	Parameters		Computation time	Model Uncertainty	Model Performance			
						Average *NSE*		Average R^2	
		used	total	1982~2011년 모의		calibration	valdation	calibration	validation
SWAT	강수량, 상대습도, 최고/최저 온도, 일사량, 평균풍속, 토지이용도, 정밀토양도	4개	27개	수 시간 소요	상대적으로 큼	0.64	0.62	0.67	0.68
IHACRES	강수량, 잠재증발산량 (온도)	4개	4개	수 분 소요	상대적으로 작음	0.77	0.77	0.77	0.79
GR4J	강수량, 잠재증발산량 (온도)	4개	4개	수 분 소요	상대적으로 작음	0.83	0.82	0.83	0.85

4.3.2 유량 전망

단순개념모형을 이용한 유량전망은 SWAT 모형을 이용한 유량 전망과 같이 1982년부터 2011년까지 30년간의 baseline을 기준으로 미래 2040s(2020~2059년), 2080s(2060~2099년)로 21세기를 2구간으로 나누어 분석하였다. 또한 SWAT 모형을 이용한 유량 전망과 동일한 RCP4.5, 8.5 시나리오를 사용하였다.

(1) IHACRES 모형의 유량 전망

가) 연평균 유량 전망 변화

용담댐 유역에 RCP4.5, 8.5 시나리오를 적용하여 미래 유량을 전망한 결과, 총유출량은 과거기간 대비 2040s, 2080s기간에 RCP8.5 시나리오에서는 16.2%, 19.9% 증가, RCP4.5 시나리오의 경우에는 23.4%, 47.3% 증가하는 것으로 나타났다(표 4.24). RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 경우보다 총유출량 증가율이 컸는데, 앞의 4.2.2에서 언급했듯이 이는 RCP4.5 시나리오의 경우 강수량의 증가율이 더 높지만 잠재증발산량의 증가율은 더 낮기 때문인 것으로 보인다.

총유출량은 IHACRES 모형에서는 지하수 등의 느린 유출(slow flow)과 홍수 등의 빠른 유출(quick flow)로 나뉘는데, 그림 4.22와 4.23을 보면 빠른 유출이 지배적으로 총유출량에 기여하는 것을 알 수 있다. 전체적인 구성 비율은 시간이 지나도 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

표 4.24 IHACRES 모형을 이용한 연평균 유량 전망 결과

	Baseline	RCP4.5				RCP8.5			
		2040s		2080s		2040s		2080s	
	(mm/yr)	(mm/yr)	%	(mm/yr)	%	(mm/yr)	%	(mm/yr)	%
PCP	1363.0	1515.4	11.2	1706.5	25.2	1515.6	11.2	1633.2	19.8
PET	1106.0	1157.7	4.7	1193.4	7.9	1186.3	7.3	1298.5	17.4
Q_{tot}	501.3	618.4	23.4	738.2	47.3	582.3	16.2	601.1	19.9

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff,
%: 과거기간 대비 변화율

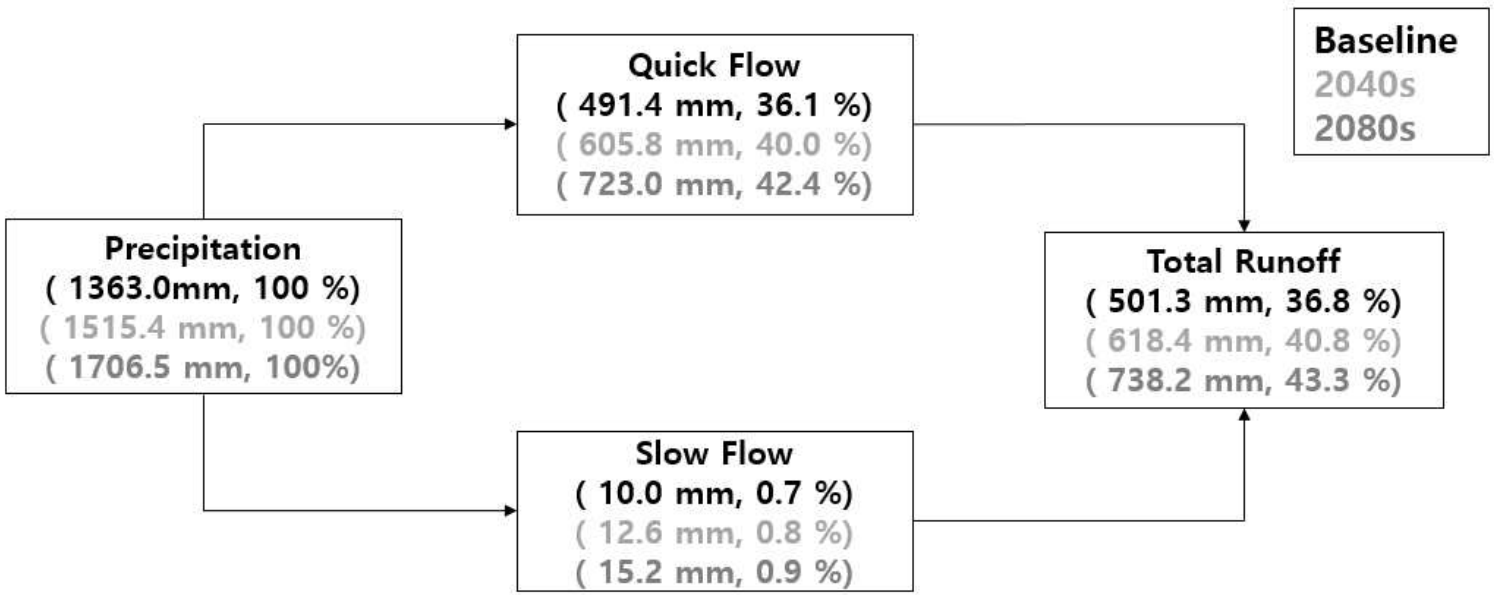


그림 4.22 RCP4.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(IHACRES)

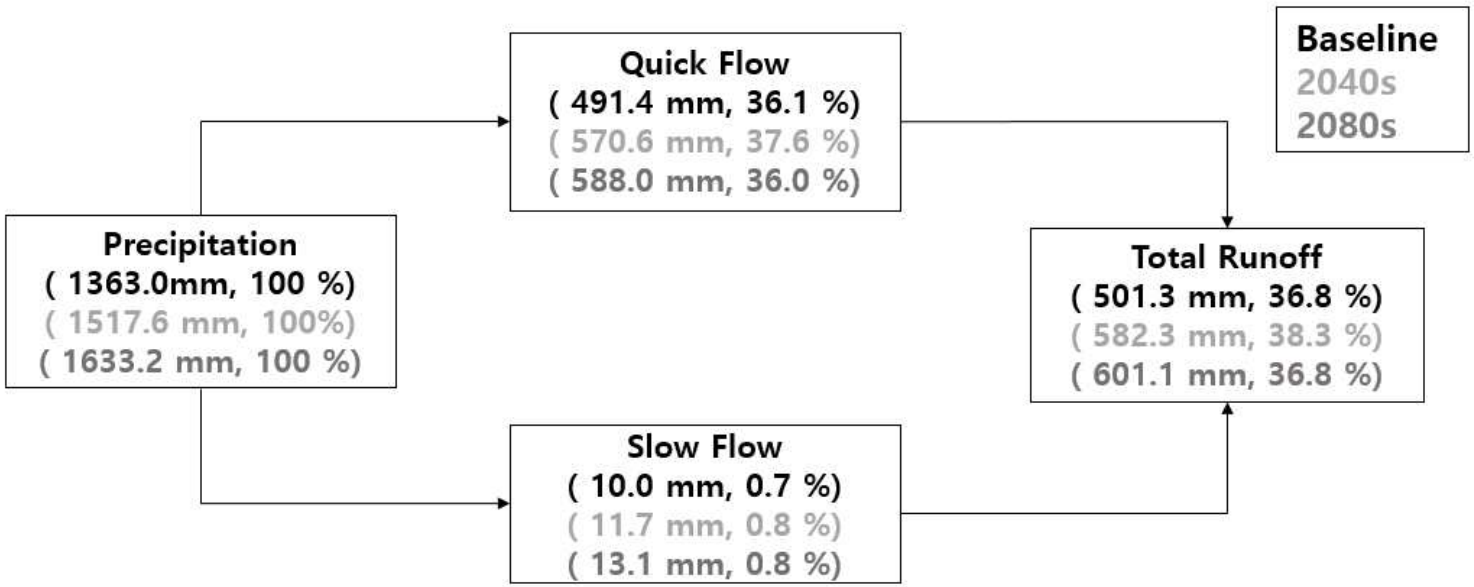


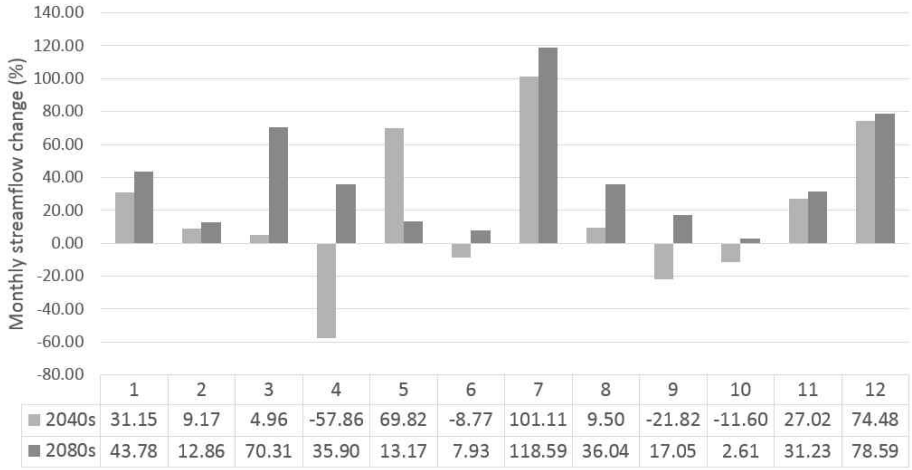
그림 4.23 RCP8.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(IHACRES)

나) 월별 유량 전망

그림 4.24와 4.25는 과거기간(1982~2011년) 대비 RCP4.5, 8.5 시나리오의 미래 유량 전망을 월별 변화율을 살펴본 것이며, 그림 4.26와 4.27은 RCP4.5, 8.5 시나리오의 과거기간 대비 강수량, 잠재증발산량, 총유출량의 월별 변화를 나타낸 것이다.

RCP4.5 시나리오의 경우 2040s에는 4, 6, 9, 10월에는 총유출량이 감소할 것으로 전망되었고 그 외의 다른 달에는 총유출량은 증가할 것으로 전망되었다. 하지만 2080s에는 모든 월에서 총유출량이 증가할 것으로 전망되었다.

RCP8.5 시나리오의 경우 2040s에는 9월을 제외한 모든 월에서 총유출량이 증가할 것으로 전망되었으며 특히 겨울철인 1월과 12월의 증가율이 높았다. 2080s의 경우 6, 8, 9월의 경우 유출량이 감소할 것으로 전망되었고, 특히 겨울철인 12월, 1월, 2월의 증가율이 높았는데 RCP4.5와 비교해도 월등히 높은 것으로 나타났다. 이는 RCP8.5 시나리오의 경우 겨울철에 RCP4.5 시나리오에 비해 강수량 증가율이 높은 것에서 비롯된 것으로 판단된다. 대체적으로 월별 유출량 변화에 대해서 SWAT 모형과 IHACRES 모형 모두 비슷한 경향을 보여주었다.

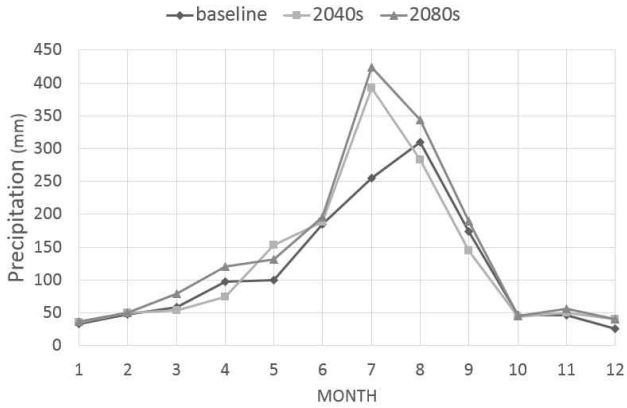


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2040s	31.15	9.17	4.96	-57.86	69.82	-8.77	101.11	9.50	-21.82	-11.60	27.02	74.48
2080s	43.78	12.86	70.31	35.90	13.17	7.93	118.59	36.04	17.05	2.61	31.23	78.59

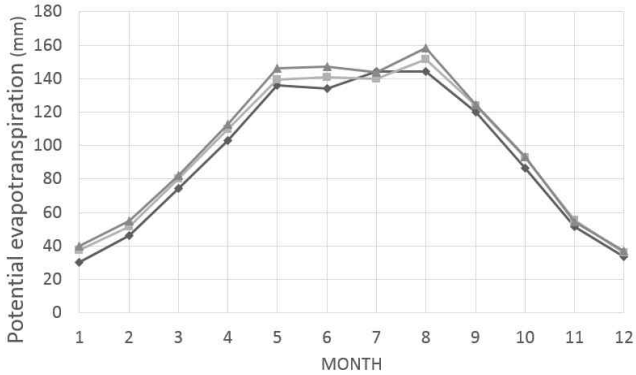
그림 4.24 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(RCP 4.5, IHACRES)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2040s	46.67	3.92	42.70	1.10	19.37	36.52	23.15	10.43	-5.84	23.90	47.97	101.96
2080s	94.54	206.80	159.64	39.39	59.00	-10.51	63.48	-15.39	-25.01	18.35	21.49	136.16

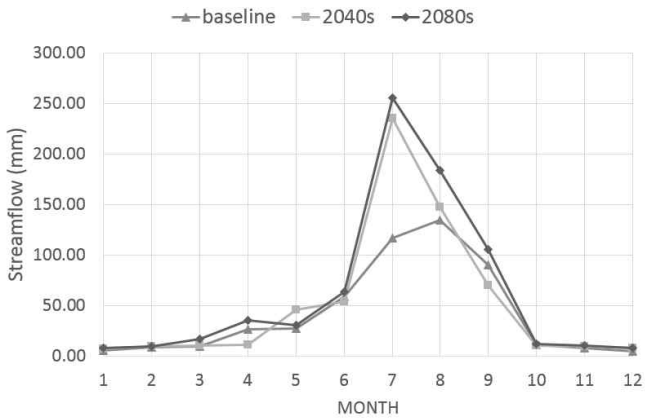
그림 4.25 과거 대비 월별 유량 전망 변화율(RCP8.5, IHACRES)



(a)Monthly Precipitation

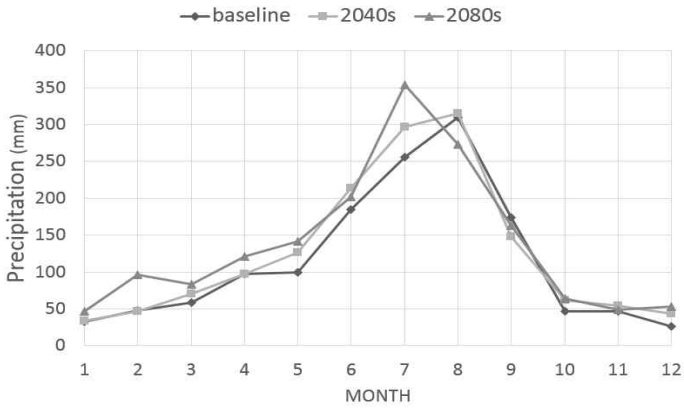


(b)Monthly Potential evapotranspiration

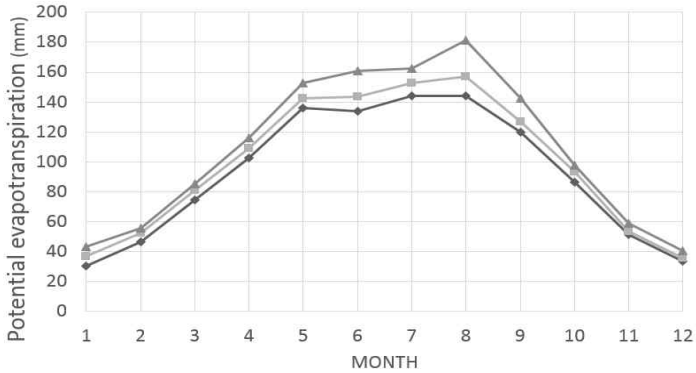


(c)Monthly Runoff

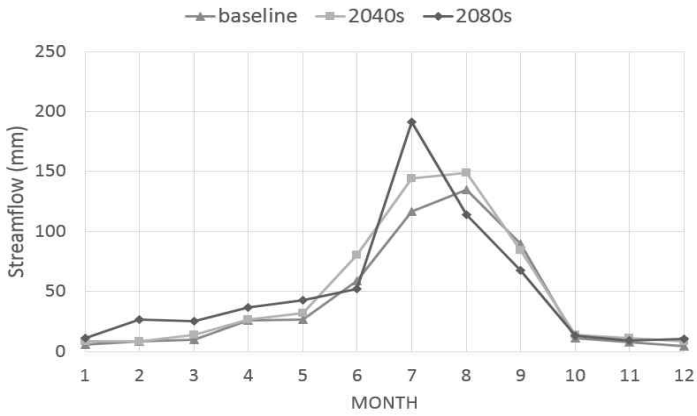
그림 4.26 RCP4.5 시나리오를 적용한 월별 변화(IHACRES)



(a)Monthly Precipitation



(b)Monthly Potential evapotranspiration



(c)Monthly Runoff

그림 4.27 RCP8.5 시나리오를 적용한 월별 변화(IHACRES)

나) 계절별 유량 전망

총유출량은 RCP4.5, 8.5 시나리오에서는 2040s에는 가을을 제외하고 모두 증가하는 것으로 전망되었고 계절별로 과거 대비 유량의 증가량 및 증가율 모두 여름이 가장 컸다. SWAT 모형에서 전망된 결과에서는 증가율의 경우 겨울이 가장 컸던 것과 차이가 난다. 2080s에는 RCP4.5 시나리오의 경우에는 모든 계절에서 유량이 증가하는 것으로 전망되었으며 증가율의 순서는 여름, 겨울, 봄, 가을 순이었다. 반면 RCP8.5 시나리오의 경우에는 2040s에는 모든 계절에서 유량이 증가하는 것으로 전망되었으며 증가율은 겨울, 여름, 봄, 가을 순이었다. RCP8.5 시나리오를 적용하였을 때 2080s에는 가을을 제외한 모든 계절에서 유량이 증가할 것으로 전망되었으며 겨울, 봄, 여름 순으로 증가율이 높았다. 전반적으로 2040s보다 2080s에서 과거대비 유량이 크게 증가하는 것으로 나타났으나 여름의 경우 2040s보다 2080s에 유량이 감소하였다. 이에 대한 내용은 표 4.25~26와 그림 4.28~33에 정리하였다. 강수량 및 잠재증발산의 계절별 분석은 4.2.2의 계절별 분석과 동일하므로 생략하였다.

표 4.25 RCP4.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(IHACRES)

RCP4.5	Season	PCP (mm)	PET (mm)	Q_{tot} (mm)
Baseline (1982~2011)	Winter	106.9	110.5	18.7
	Spring	256.2	313.3	63.1
	Summer	750.1	422.1	310.4
	Autumn	266.5	257.8	109.1
2040s (2020~2059)	Winter	126.31 (18.2%)	125.2 (13.4%)	24.6 (31.3%)
	Spring	281.36 (9.9%)	329.5 (5.1%)	67.3 (6.6%)
	Summer	863.21 (15.1%)	432.4 (2.4%)	436.3 (40.6%)
	Autumn	238.52 (-10.5%)	272.0 (5.5%)	90.3 (-17.3%)
2080s (2060~2099)	Winter	127.17 (19.0%)	132.0 (19.5%)	25.8 (37.8%)
	Spring	331.97 (29.6%)	341.3 (8.9%)	83.0 (31.5%)
	Summer	964.3 (28.5%)	449.1 (6.4%)	502.3 (61.8%)
	Autumn	290.72 (9.1%)	272.3 (5.6%)	127.2 (16.6%)

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff, ( ) 안은 과거 대비 변화율

표 4.26 RCP8.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(IHACRES)

RCP8.5	Season	PCP (mm)	PET (mm)	Q_{tot} (mm)
Baseline (1982~2011)	Winter	106.9	110.5	18.7
	Spring	256.2	313.3	63.1
	Summer	750.1	422.1	310.4
	Autumn	266.5	257.8	109.1
2040s (2020~2059)	Winter	123.6 (15.6%)	125.3 (13.4%)	26.3 (40.1%)
	Spring	293.8 (14.8%)	332.9 (6.2%)	72.8 (15.4%)
	Summer	825.5 (10.1%)	453.5 (7.4%)	373.0 (20.2%)
	Autumn	264.0 (-0.9%)	274.1 (6.3%)	110.3 (1.1%)
2080s (2060~2099)	Winter	197.1 (84.3%)	139.5 (26.3%)	48.0 (156.0%)
	Spring	347.2 (35.6%)	354.6 (13.2%)	105.0 (66.5%)
	Summer	828.9 (10.5%)	504.5 (19.5%)	357.7 (15.3%)
	Autumn	275.7 (3.4%)	299.6 (16.2%)	90.3 (-17.2%)

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff, () 안은 과거 대비 변화율

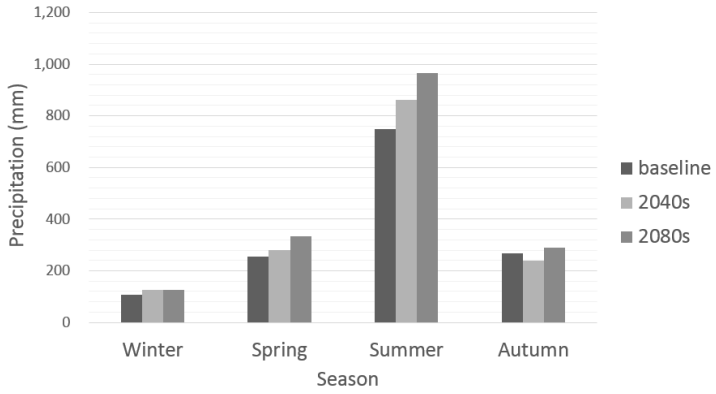


그림 4.28 강수량의 계절별 변화(RCP4.5)

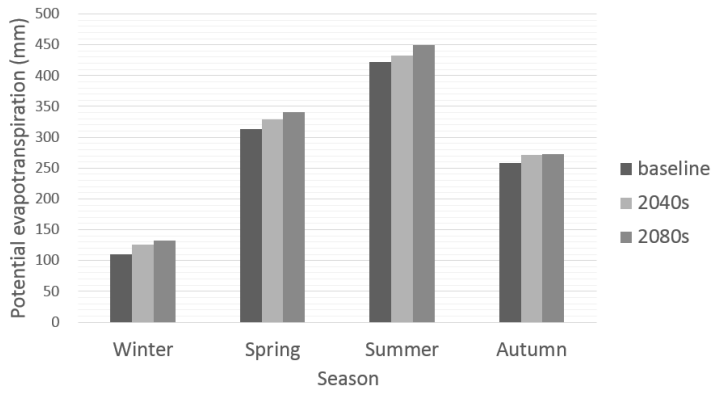


그림 4.29 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP4.5)

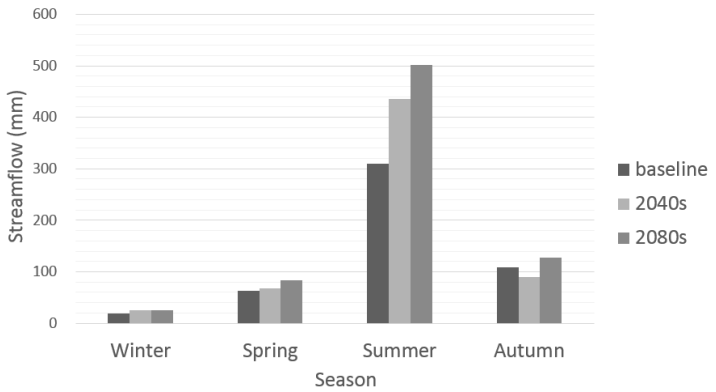


그림 4.30 총유출량의 계절별 변화(RCP4.5, IHACRES)

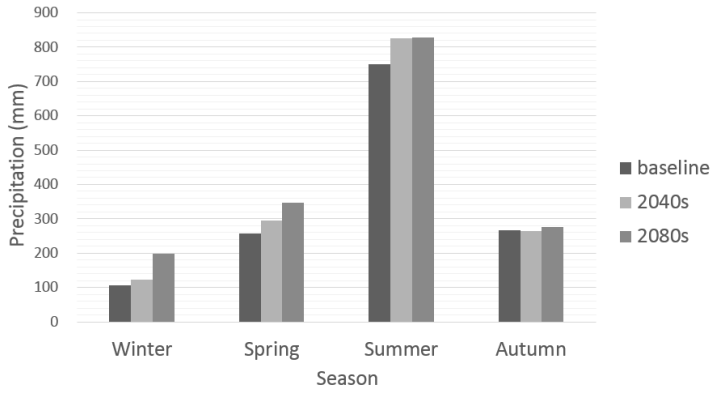


그림 4.31 강수량의 계절별 변화(RCP8.5)

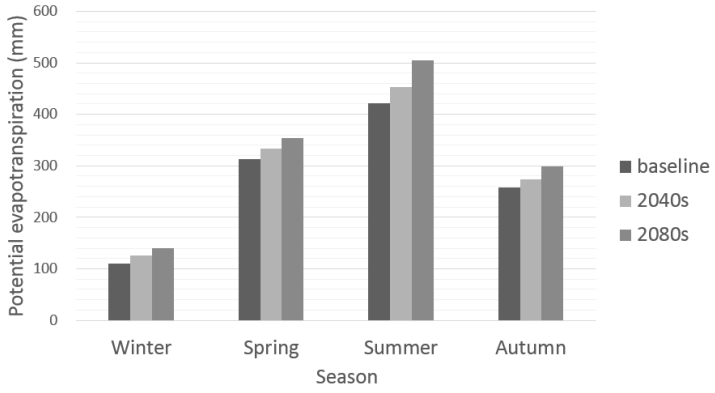


그림 4.32 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP8.5)

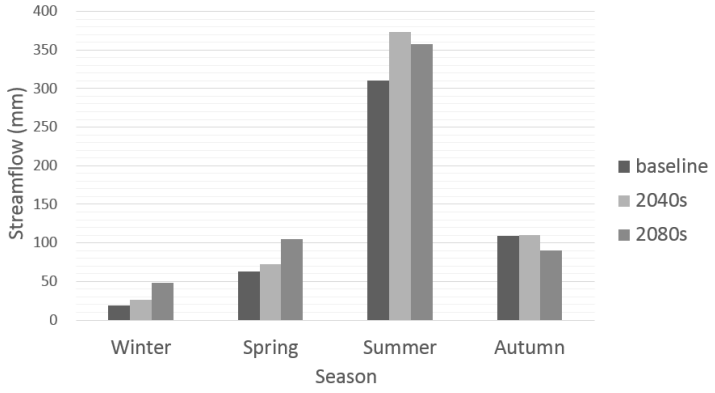


그림 4.33 총유출량의 계절별 변화(RCP8.5, IHACRES)

(2) GR4J 모형의 유량 전망

가) 연평균 유량 전망 변화

RCP4.5, 8.5 시나리오를 적용하여 GR4J 모형으로 미래 유량을 전망한 결과, 총유출량은 과거기간 대비 RCP8.5 시나리오에서는 2040s, 2080s 기간에 각각 15.3%, 21.0% 증가하였고 RCP4.5 시나리오의 경우에는 2040s, 2080s 기간에 각각 21.3%, 40.2% 증가하는 것으로 나타났다(표 4.27). RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 경우보다 총유출량 증가율이 컸다. 이는 앞서 SWAT 모형과 IHACRES 모형을 이용하여 유량을 전망한 결과와 동일하게 RCP4.5 시나리오의 경우 강수량의 증가율이 더 높지만 잠재증발산량의 증가율은 더 낮기 때문인 것으로 보인다.

총유출량은 GR4J 모형에서는 IHACRES 모형과 같이 지하수에 대한 느린 유출(slow flow)과 홍수에 대한 빠른 유출(quick flow)로 나뉘는데, 그림 4.34~35를 보면 빠른 유출이 압도적으로 총유출량에 기여하는 것을 알 수 있다. 2080s에 대한 수문요소의 구성 비율을 살펴보면 RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 RCP8.5 시나리오 적용한 경우보다 과거기간 대비 변화가 더 큰 것으로 전망되었다.

표 4.27 GR4J 모형을 이용한 연평균 유량 전망 결과

	Baseline	RCP4.5				RCP8.5			
		2040s		2080s		2040s		2080s	
	(mm)	(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%	(mm)	%
PCP	1363.0	1515.4	11.2	1706.5	25.2	1515.6	11.2	1633.2	19.8
PET	1106.0	1157.7	4.7	1193.4	7.9	1186.3	7.3	1298.5	17.4
Q_{tot}	485.2	588.5	21.3	709.3	40.2	559.6	15.3	586.9	21.0

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff,

%는 과거기간 대비 변화율

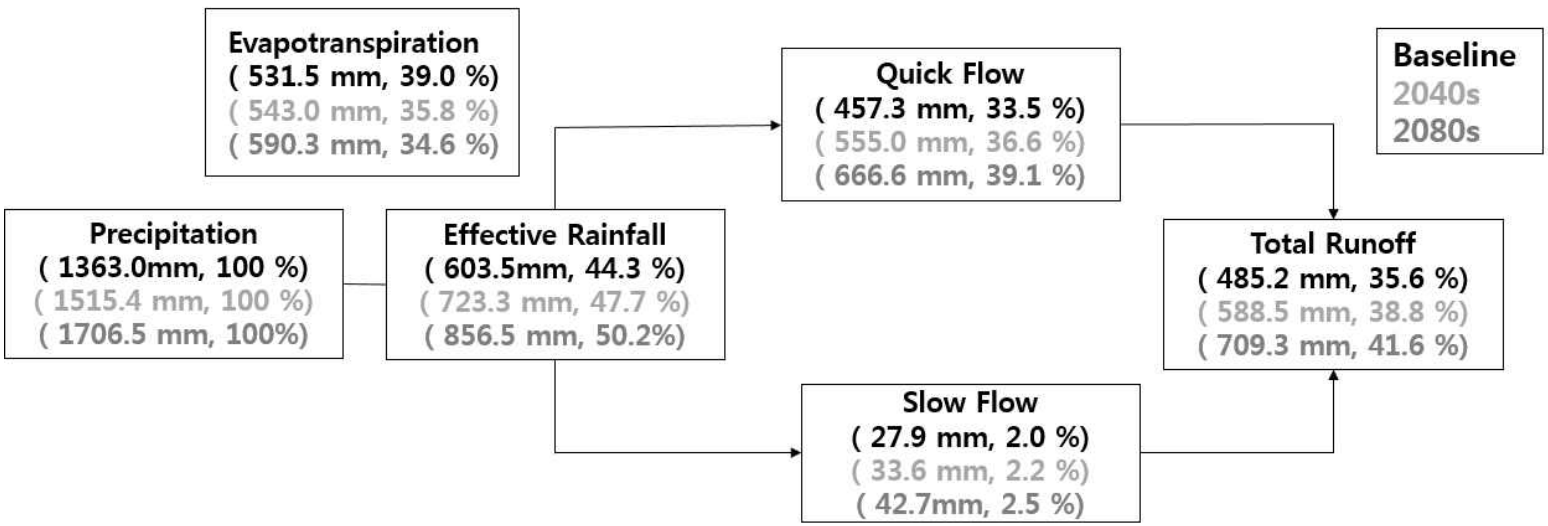


그림 4.34 RCP4.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(GR4J)

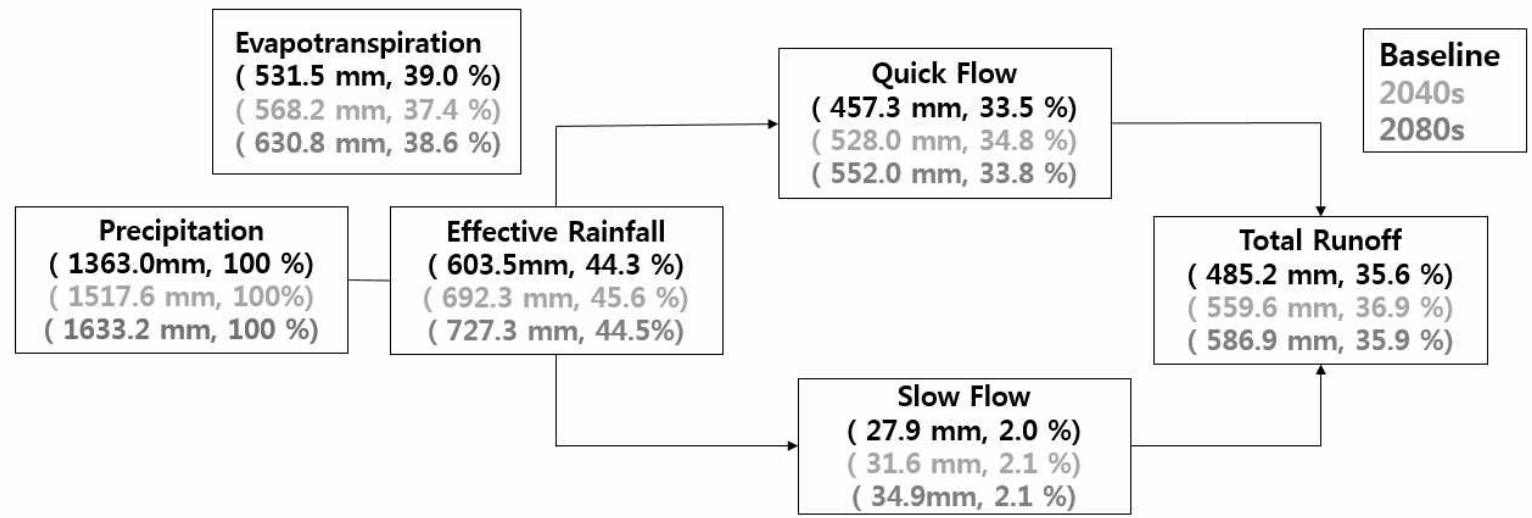


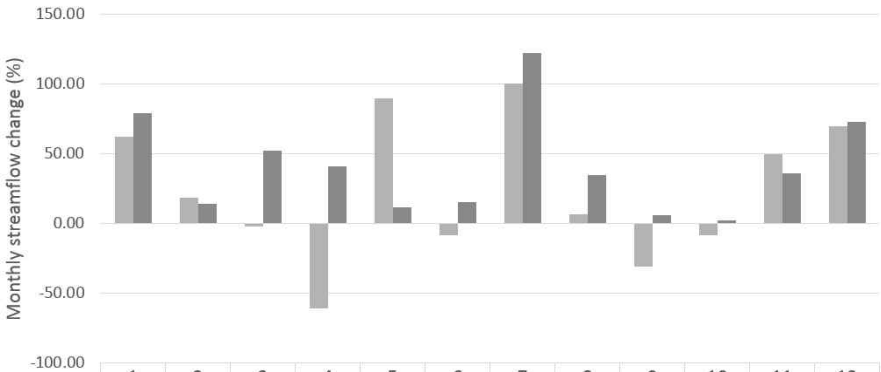
그림 4.35 RCP8.5 시나리오를 적용한 물수지 분석(GR4J)

나) 월별 유량 전망

그림 4.36과 4.37은 과거기간(1982~2011년) 대비 RCP4.5, 8.5 시나리오의 미래 유량 전망을 월별 변화율을 살펴본 것이며, 그림 4.38과 4.39는 RCP4.5, 8.5 시나리오의 과거기간 대비 강수량, 잠재증발산량, 총유출량의 월별 변화를 나타낸 것이다.

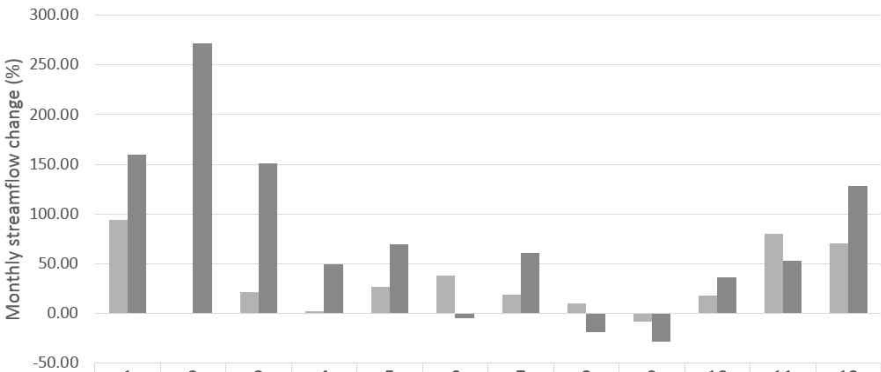
RCP4.5 시나리오의 경우 2040s에는 4, 6, 9, 10월에는 총유출량이 감소할 것으로 전망되었고 그 외의 다른 달에는 총유출량은 증가할 것으로 전망된다. 하지만 2080s에는 모든 월에서 총유출량이 증가할 것으로 전망되었다.

RCP8.5 시나리오의 경우 2040s에는 9월을 제외한 모든 월에서 총유출량이 증가할 것으로 전망되었다. 2080s의 경우 6, 8, 9월의 경우 유출량이 감소할 것으로 전망되었고, 특히 겨울철인 12, 1, 2월의 증가율이 높았는데 RCP4.5 시나리오와 비교해도 월등히 높은 것으로 나타났다. 이는 RCP8.5 시나리오의 경우 겨울철에 RCP4.5 시나리오에 비해 강수량 증가율이 높은 것에서 비롯된 것으로 판단된다. 대체적으로 월별 유출량 변화가 IHACRES 모형의 결과와 매우 비슷한 경향을 보여주었다.



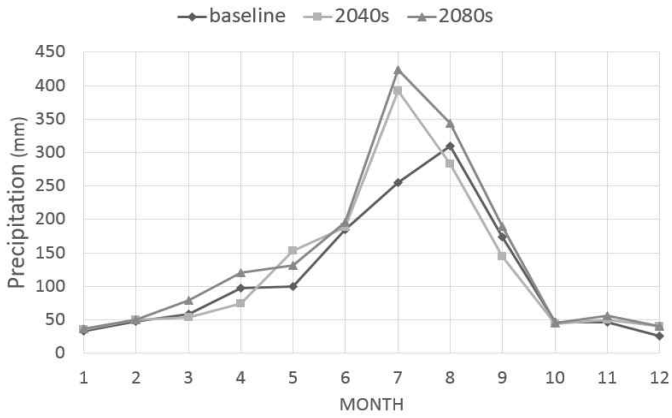
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2040s	61.98	18.52	-1.80	-60.60	90.04	-8.31	100.17	6.39	-30.64	-8.19	49.73	69.81
2080s	78.88	13.92	52.08	40.91	11.77	15.41	122.48	34.47	6.26	2.18	36.10	73.17

그림 4.36 RCP4.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율 (GR4J)

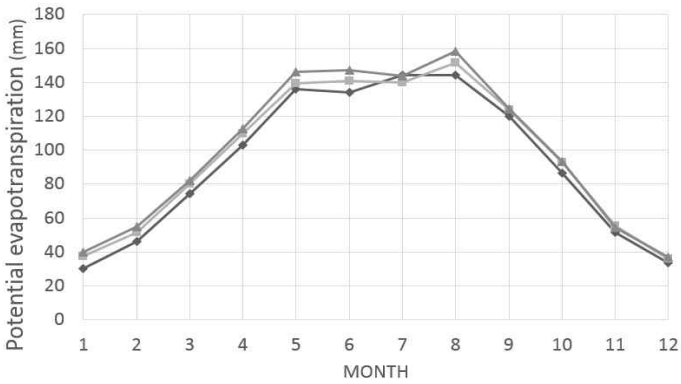


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2040s	94.09	0.41	21.66	2.52	26.55	38.08	18.62	10.16	-7.94	18.05	79.64	70.11
2080s	159.91	271.53	150.69	49.81	69.39	-4.96	61.06	-18.79	-28.16	36.17	53.20	128.58

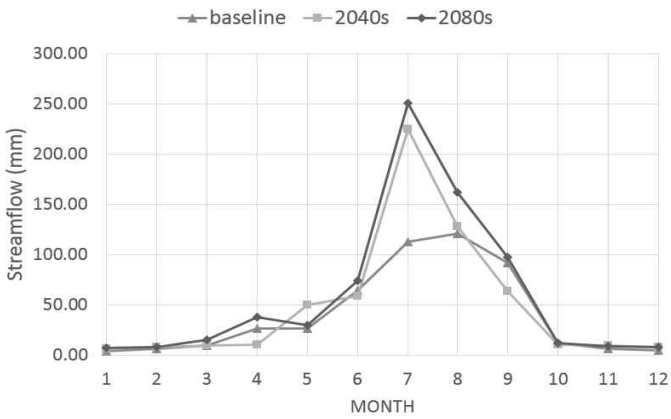
그림 4.37 RCP8.5 시나리오를 따른 과거 대비 월별 유량 전망 변화율 (GR4J)



(a) Monthly Precipitation

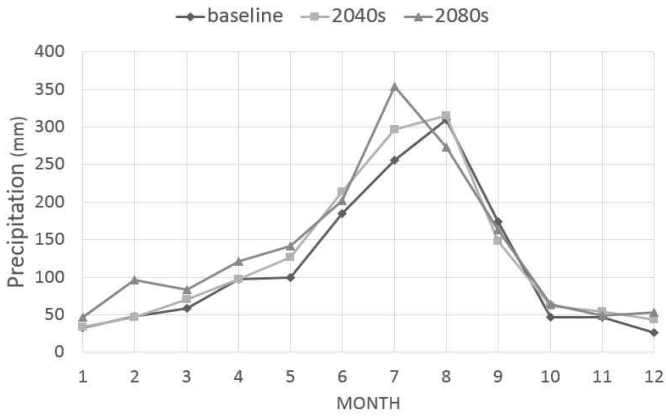


(b) Monthly Potential evapotranspiration

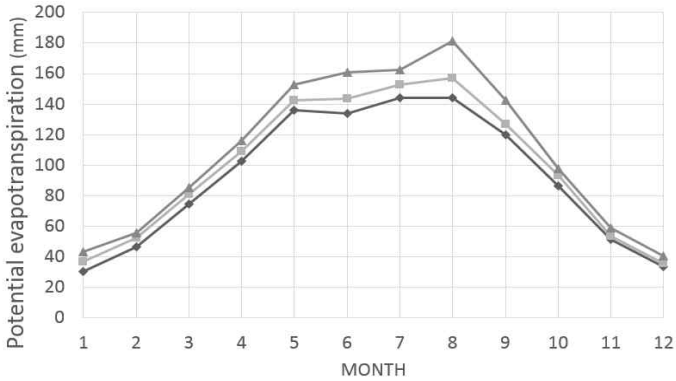


(c) Monthly Runoff

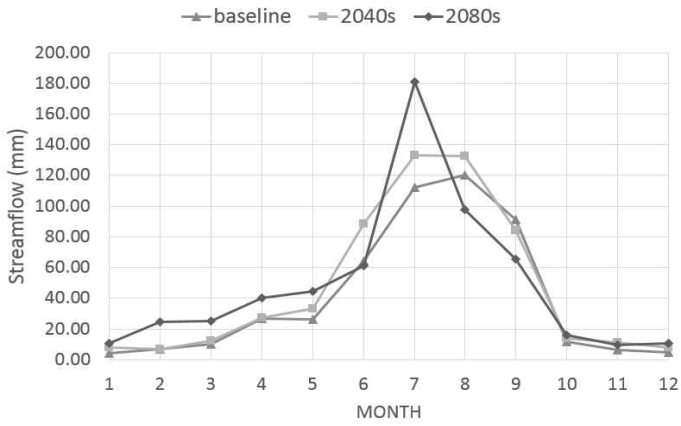
그림 4.38 RCP4.5 시나리오를 적용한 월별 변화(GR4J)



(a) Monthly Precipitation



(b) Monthly Potential evapotranspiration



(c) Monthly Runoff

그림 4.39 RCP8.5 시나리오를 적용한 월별 변화(GR4J)

다) 계절별 유량 전망

총유출량은 RCP4.5, 8.5 시나리오에서는 2040s에는 가을을 제외하고 모두 증가하는 것으로 전망되었고 계절별로 과거 대비 유량의 증가량은 여름이 가장 컸으나 증가율은 겨울이 가장 컸다. 2080s에는 RCP4.5 시나리오의 경우에는 모든 계절에서 유량이 증가하는 것으로 전망되었으며 증가율의 순서는 여름, 겨울, 봄, 가을 순이었다. 반면 RCP8.5 시나리오의 경우에는 2040s와 2080s 기간 모두에서 가을을 제외한 모든 계절에서 유량이 증가하는 것으로 전망되었다. 2040s에는 계절별 증가율은 겨울, 여름, 봄, 가을 순으로 높았고 2080s에는 겨울, 봄, 여름 순으로 증가율이 높았다. 전반적으로 2040s보다 2080s에서 과거 대비 유량이 크게 변화하는 것으로 나타났으나 여름의 경우 2040s보다 2080s에 과거 대비 변화가 적었다. 이에 대한 내용을 표 4.28~29과 그림 4.40~45에 정리하였다. 강수량 및 잠재증발산량의 계절별 분석은 4.2.2와 동일하므로 생략하였다.

표 4.28 RCP4.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(GR4J)

RCP4.5	Season	PCP (mm)	PET (mm)	Q_{tot} (mm)
Baseline (1982~2011)	Winter	106.9	110.5	15.3
	Spring	256.2	313.3	63.2
	Summer	750.1	422.1	297.2
	Autumn	266.5	257.8	109.5
2040s (2020~2059)	Winter	126.31 (18.2%)	125.2 (13.4%)	22.2 (45.4%)
	Spring	281.36 (9.9%)	329.5 (5.1%)	70.5 (11.6%)
	Summer	863.21 (15.1%)	432.4 (2.4%)	412.2 (38.7%)
	Autumn	238.52 (-10.5%)	272.0 (5.5%)	83.7 (-23.6%)
2080s (2060~2099)	Winter	127.17 (19.0%)	132.0 (19.5%)	22.7 (48.9%)
	Spring	331.97 (29.6%)	341.3 (8.9%)	82.4 (30.5%)
	Summer	964.3 (28.5%)	449.1 (6.4%)	486.4 (63.6%)
	Autumn	290.72 (9.1%)	272.3 (5.6%)	117.8 (7.5%)

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff, ( ) 안은 과거 대비 변화율

표 4.29 RCP8.5 시나리오를 적용한 계절별 수문 변화(GR4J)

RCP8.5	Season	PCP (mm)	PET (mm)	Q_{tot} (mm)
Baseline (1982~2011)	Winter	106.9	110.5	15.3
	Spring	256.2	313.3	63.2
	Summer	750.1	422.1	297.2
	Autumn	266.5	257.8	109.5
2040s (2020~2059)	Winter	123.6 (15.6%)	125.3 (13.4%)	22.3 (46.1%)
	Spring	293.8 (14.8%)	332.9 (6.2%)	73.0 (15.6%)
	Summer	825.5 (10.1%)	453.5 (7.4%)	354.9 (19.4%)
	Autumn	264.0 (-0.9%)	274.1 (6.3%)	109.4 (-0.1%)
2080s (2060~2099)	Winter	197.1 (84.3%)	139.5 (26.3%)	45.7 (199.2%)
	Spring	347.2 (35.6%)	354.6 (13.2%)	109.8 (73.9%)
	Summer	828.9 (10.5%)	504.5 (19.5%)	340.1 (14.4%)
	Autumn	275.7 (3.4%)	299.6 (16.2%)	91.4 (-16.6%)

PCP: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, Q_{tot}: Total runoff, ( ) 안은 과거 대비 변화율

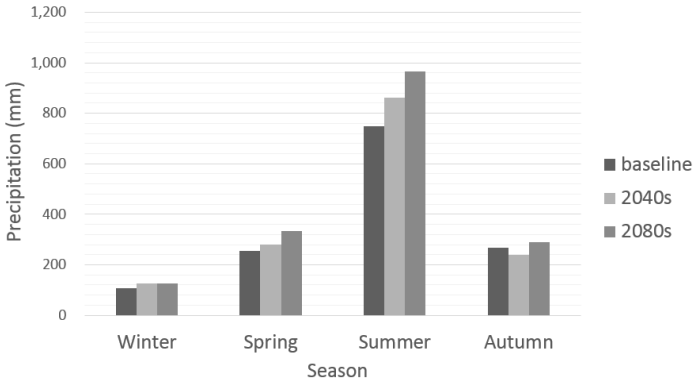


그림 4.40 강수량의 계절별 변화(RCP4.5)

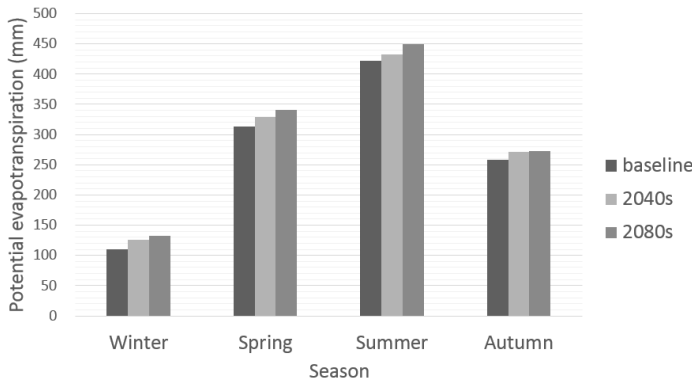


그림 4.41 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP4.5)

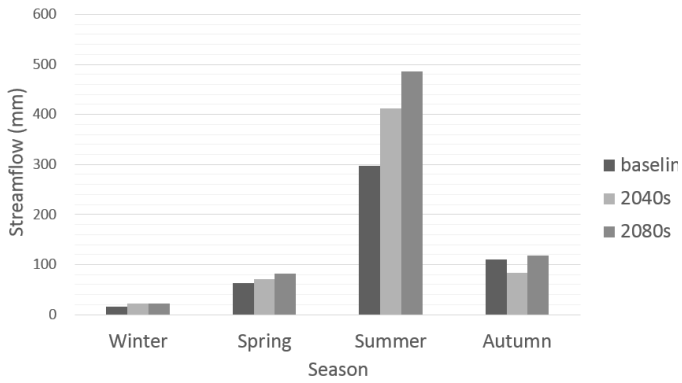


그림 4.42 총유출량의 계절별 변화(RCP4.5, GR4J)

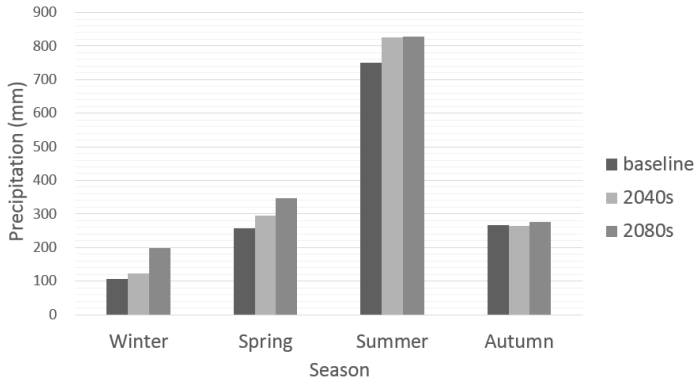


그림 4.43 강수량의 계절별 변화(RCP8.5)

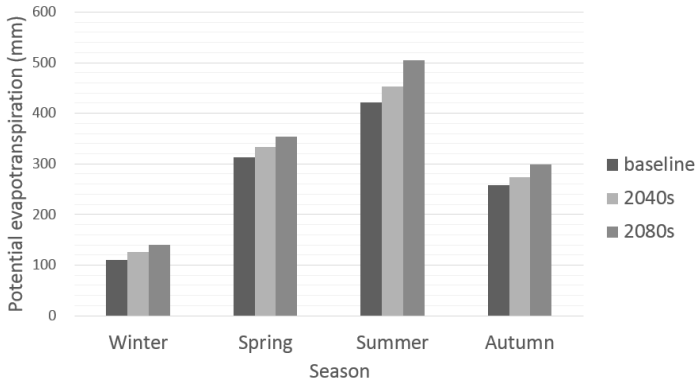


그림 4.44 잠재증발산량의 계절별 변화(RCP8.5)

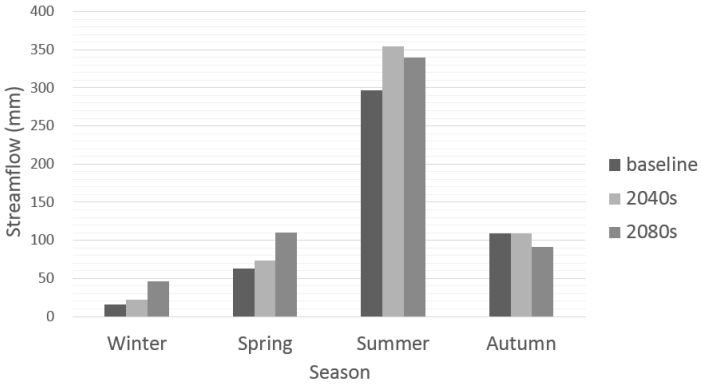


그림 4.45 총유출량의 계절별 변화(RCP8.5, GR4J)

4.3.3 강우-유출모형 간의 유량 전망 결과 비교

본 연구에서는 준분포모형인 SWAT 모형과 단순개념모형인 IHACRES 모형과 GR4J 모형을 이용하여 미래 유량을 전망하였다. 세 가지 모형에서 모두 동일한 기후시나리오를 사용하고 동일 기간에 대해 검·보정을 실시하였다. 하지만 SWAT 모형에서는 시행착오법으로 보정을 실시하였고, IHACRES 모형과 GR4J 모형의 경우에는 자동보정기법을 사용하였다.

(1) 연평균 유량 비교

각 강우-유출모형에 대한 과거와 미래기간(Baseline, 2040s, 2080s)에 대한 연평균유출량 결과는 표 4.30와 같다. GR4J 모형이 유출량 값을 가장 작게 모의하였고 SWAT 모형이 유출량 값을 가장 크게 모의하였다.

가) 미래 유량 전망치에 대한 모형별 차이

과거기간에 대해 적용성을 평가하였을 때 검·보정 기간에 대하여 가장 높은 *NSE*와 R^2을 산출한 GR4J 모형이 가장 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 따라서 GR4J 모형을 기준으로 다른 모형들에 대해 유량 전망치의 차이를 보았을 때 IHACRES 모형 결과 값은 2~5% 정도의 차이로, 매우 비슷한 유량 전망치를 산출한 것을 알 수 있었다. 하지만 SWAT 모형의 경우에는 30% 이상의 큰 차이를 보여주었다(그림 4.46~47 참고). 이는 SWAT 모형의 경우 시행착오법으로 검·보정을 실시함으로써 과거기간에 대해 모의능력이 상대적으로 단순개념모형에 비해 떨어지게 되는 것에 기인한 것으로, SWAT 모형도 자동보정기법으로 모의능력을 단순개념모형 정도로 높이게 될 경우, 차이가 줄어들 수 있다.

나) 과거기간 대비 미래 유량의 변화에 대한 모형별 차이

과거기간 대비 2040s, 2080s의 연평균 유출량 변화의 경우에는 세 가지 강우-유출모형 모두 비슷한 경향을 보이는 것으로 분석되었다(그림 4.48~49). 세 가지 강우-유출모형의 과거기간 대비 2040s, 2080s의 연평균 유출량 변화의 평균은 RCP4.5 시나리오의 경우 각각 22.2%, 44% 증가하는 것으로 나타났으며, RCP8.5 시나리오의 경우 각각 16.4%, 22.3% 증가하는 것으로 전망되었다. RCP8.5 시나리오의 경우 연평균 유출량은 전 기간에 RCP4.5 시나리오 적용 결과보다 적게 증가하는 것으로 나타났으며 RCP4.5, 8.5 시나리오 모두 시간이 지날수록 과거기간 대비 유출량은 많이 증가할 것으로 전망되었다.

세 개의 강우-유출모형(SWAT, IHACRES, GR4J)의 각각의 연평균 유출량의 과거기간 대비 2040s, 2080s변화율을 평균한 값과 각 강우-유출모형의 변화율의 차이를 살펴보았을 때, 최소 0.2%, 최대 3.8% 차이가 발생하는 것으로 나타나 과거기간 대비 미래기간별 연평균 유출량 변화는 모형별 차이가 적은 것으로 분석되었다. 반면 기간별로 살펴보았을 때, 2040s보다 2080s기간의 경우 과거기간 대비 미래 유출량 변화는 모형별 차이가 상대적으로 더 컸다.

유량 전망치의 경우 강우-유출모형 간 차이가 컸으나, 변화율은 비슷한 것으로 분석된 것은 변화율의 경우 모형별 차이 요인보다 기후변화시나리오의 영향이 크게 작용하는 것으로 추정할 수 있다.

(2) 계절별 유량 비교

그림 4.50~53은 세 개의 강우-유출모형에 대해 미래 두 기간에 대한 계절별 유량 변화 결과를 도시한 것이다. 계절별 유량의 변화 경향은 대체적으로 비슷하게 나타났는데 상대적으로 겨울철에 모형별 차이가 컸다. 겨울철에는 모형 간 최소 23.6%에서 최대 87.2%

차이가 발생했으며, 이는 2080s에 더 크게 발생하였다.

(3) 소결론

단순개념모형(IHACRES 모형, GR4J 모형)의 용담댐 유역에 대한 적용성 평가 결과 *NSE*가 0.8 정도로 매우 높게 나왔기 때문에 불확실성(Xu and Singh, 2004; Shin et al., 2013, 2014)과 효율성을 고려하였을 때 총량개념의 전망이 중시되는 기후변화연구에는 단순개념모형을 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 세 모형 중 용담댐 유역에 대해 가장 적용성이 높은 모형은 GR4J 모형으로 나타났다. 단순개념모형(IHACRES 모형, GR4J 모형)과 준분포모형(SWAT 모형)으로 같은 기후변화 시나리오를 이용하여 용담댐 유역의 유량을 전망한 결과 모형별로 연평균 유량 전망치의 차이가 컸다. 특히 SWAT 모형과 단순개념모형 간 차이가 컸는데 이는 SWAT 모형의 경우 시행착오법으로 검·보정을 수행하여 상대적으로 단순개념모형보다 모의능력이 떨어지는 데 기인한 것으로 보인다. 반면, 과거기간 대비 미래기간의 유량 변화율의 경우 모형별 차이가 매우 적었다. 이는 모형 간 차이보다는 기후변화 시나리오의 차이로 인한 영향이 변화율에 영향을 많이 미치는 것으로 판단된다. RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 2040s, 2080s에 모형 결과를 평균하였을 때 22.2%, 44.0% 증가할 것으로 전망되었으며, RCP8.5 시나리오를 적용한 경우에는 2040s, 2080s에 각각 평균적으로 16.4%, 22.3% 증가할 것으로 전망되었다. 모든 모형의 결과에서 RCP8.5 시나리오보다 RCP 4.5 시나리오에서 총유출량 증가율이 컸는데, 이는 RCP4.5 시나리오의 경우 RCP8.5 시나리오에 비해 강수량이 더 크게 증가하여 유효강수량이 크지만 기온이 더 적게 상승하여 증발산량이 더 적기 때문인 것으로 추정된다.

표 4.30 모형별 연평균 유량 전망 결과 비교

		Baseline	2040s		2080s	
Scenario	Model	Runoff (mm)	Runoff (mm)	% change	Runoff (mm)	% change
RCP4.5	SWAT	634.2	772.9	21.9	917.2	44.6
	IHACRES	501.3	618.4	23.4	738.2	47.3
	GR4J	485.2	588.5	21.3	709.3	40.2
	Average	540.2	659.9	22.2	788.2	44.0
RCP8.5	SWAT	634.2	746.7	17.7	799.8	26.1
	IHACRES	501.3	582.3	16.2	601.1	19.9
	GR4J	485.2	559.6	15.3	586.9	21.0
	Average	540.2	629.5	16.4	662.6	22.3

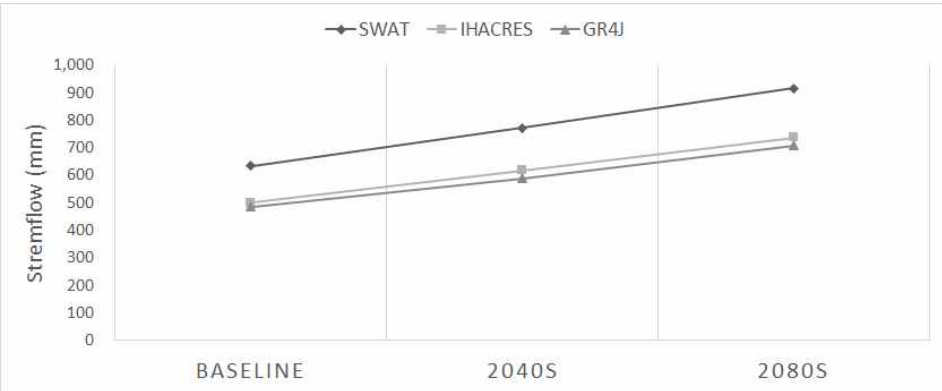


그림 4.46 모형별 연평균 유량 전망치 비교(RCP4.5)

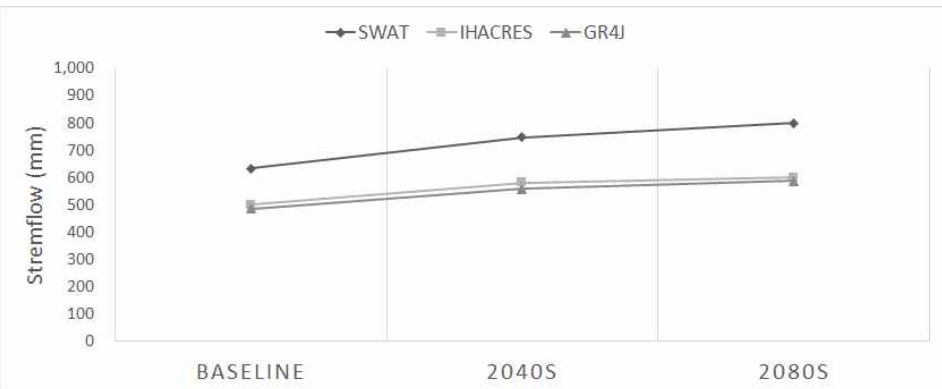


그림 4.47 모형별 연평균 유량 전망치 비교(RCP8.5)

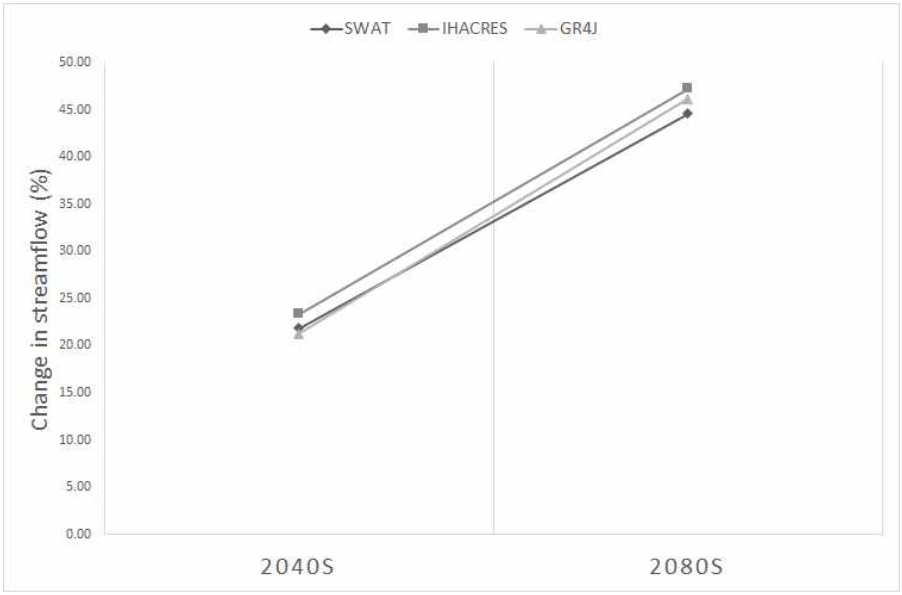


그림 4.48 모형별 과거기간 대비 연평균 유량 전망 변화율(RCP4.5)

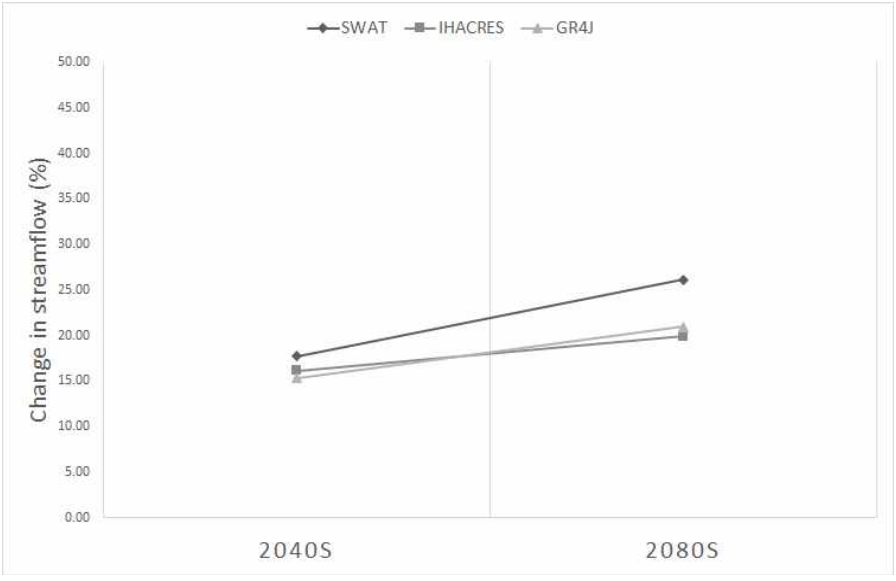


그림 4.49 모형별 과거기간 대비 연평균 유량 전망 변화율(RCP8.5)

그림 4.50 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP4.5, 2040s)

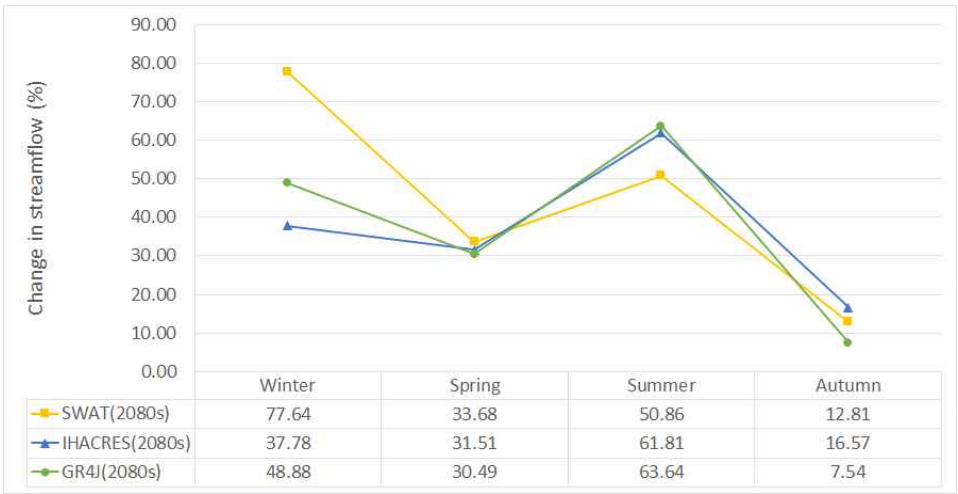


그림 4.51 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP4.5, 2080s)

	Winter	Spring	Summer	Autumn
SWAT(2040s)	63.70	10.64	16.49	-3.31
IHACRES(2040s)	40.06	15.39	20.16	1.10
GR4J(2040s)	46.12	15.57	19.40	-0.12

그림 4.52 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP8.5, 2040s)

	Winter	Spring	Summer	Autumn
SWAT(2080s)	243.25	55.10	16.93	-9.71
IHACRES(2080s)	156.03	66.47	15.25	-17.18
GR4J(2080s)	199.17	73.88	14.41	-16.59

그림 4.53 모형별 과거기간 대비 계절별 유량 전망 변화율(RCP8.5, 2080s)

제 5 장 결론 및 향후 연구

5.1 요약 및 결론

본 연구에서는 기후변화 연구에 적합한 강우-유출모형은 모형의 불확실성이 적은 단순개념모형임을 제시하고, 용담댐 유역을 대상으로 단순개념모형의 적용성을 검토한 후, RCP 시나리오를 이용하여 미래 유량을 전망하였다. 단순개념모형은 선행 연구에서 구조적 불확실성이 적은 모형으로 제시된 IHACRES 모형과 GR4J 모형(Shin et al., 2013, 2014)을 선정하였다. 또한 단순개념모형의 적합성을 검토하기 위해서 수자원 연구에서 널리 사용되며 금강유역에서 가장 많이 사용된 SWAT 모형을 이용하여 유량 전망을 실시하였으며 이를 단순개념모형의 결과와 비교하였다.

우선, 물리적 기반의 준분포모형으로 단순개념모형보다 구조적으로 복잡한 SWAT 모형을 이용하여 유량 전망을 수행하였다. 비교목적으로 선행연구와 같은 검·보정 기간을 사용하여 모형을 구축하여 유량을 전망함과 동시에, 신뢰성을 높이기 위하여 k-fold cross validation 기법을 이용하여 보정기간을 늘려 모형을 구축하여 유량을 전망하였다. SWAT 모형을 이용하여 용담댐 유역의 유량을 전망한 결과 값은 연구 별로 그 결과 값이 매우 상이하였다. 유량 전망치의 경우, 최저 10.3%에서 최대 53.2% 차이를 보였으며 과거기간 대비 유량 변화율은 최저 0.1%에서 최대 27.2% 차이를 보였다. SWAT 모형에는 지형자료 기반으로 모형을 구축하여야 하며, 20여 개의 많은 매개변수가 존재하여 사용자마다 모형을 구축하는 과정에서 차이가 많이 발생할 수 있다. 따라서 단순개념모형이 복잡한 모형과 대등한 모의능력을 보여줄 경우, 구조적으로 단순하여 모형

의 불확실성이 적고, 비교적 입력 자료를 적게 요구하며, 계산이 효율적인 단순개념모형을 기후변화 영향평가에 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 이는 기후변화 연구는 장기간 전망 및 변화 총량이 주요 이슈이며, 수문 입력자료에 이미 큰 불확실성이 존재한다는 특이성에 기인한다.

단순개념모형(IHACRES 모형, GR4J 모형)의 용담댐 유역에 대한 적용성 평가를 실시하고 이를 앞서 구축한 SWAT 모형의 적용성과 비교하였다. SWAT 모형의 경우 시행착오법으로 검·보정을 수행하였고 단순개념모형은 자동보정기법을 사용하였기 때문에 직접적인 비교에는 한계점이 있다. 하지만 용담댐 유역에 대한 단순개념모형의 *NSE*가 0.8 정도로 매우 높게 나왔기 때문에 불확실성(Gleick, 1989; Xu and Singh, 2004; Shin et al., 2013, 2014)과 효율성을 고려하였을 때 기후변화연구에는 단순개념모형을 이용하는 것이 타당하다. 특히 용담댐 유역에 대해서 세 모형의 적용성을 비교하였을 때 평균 *NSE,* R^2가 최소 0.82에서 최대 0.85로 우수한 모의능력을 보여준 GR4J가 가장 적합한 모형으로 추천된다. SWAT, IHACRES, GR4J 모형을 이용하여 과거기간 대비 미래 기간(2040s, 2080s)의 유량 변화는 비슷하게 전망되었다. RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 2040s, 2080s에 평균적으로 22.2%, 44.0% 증가할 것으로 전망되었으며, RCP8.5 시나리오를 적용한 경우에는 2040s, 2080s에 평균적으로 각각 16.4%, 22.3% 증가할 것으로 전망되었다. 모든 모형의 결과에서 RCP4.5 시나리오를 적용하였을 경우 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 경우보다 총유출량 증가율이 컸는데, 이는 RCP4.5 시나리오의 경우 RCP8.5 시나리오에 비해 강수량이 더 크게 증가하여 유효강수량이 크지만 기온이 더 적게 상승하여 증발산량이 더 적기 때문인 것으로 보인다. 또한 계절별 유량을 분석하였을 때, 과거기간 대비 겨울철 유량 증가율이 큰 것으로 나타났다.

단순개념모형인 IHACRES 모형과 GR4J 모형 간에 유량 전망치는 상당히 비슷하게 산출되었다. 같은 기후변화 시나리오를 사용하였지만 강우-유출모형의 구조가 다름에도 불구하고 전망치가 비슷하게 산출된 점을 미루어 볼 때, 만약 양질의 기후변화 시나리오가 준비되고, 단순개념모형이 대부분의 대상유역에 대해 신뢰성 높은 모의 능력을 지닐 경우 유량 전망에 단순개념모형을 활용한다면 정책에 활용될 수 있는 표준화된 수문 시나리오를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 향후 연구

본 연구에서 SWAT 모형의 적용성 평가 시 자동보정기법을 사용하지 않고 시행착오법으로 수행하였다. 따라서 SWAT 모형은 자동보정기법으로 검·보정을 수행한 단순개념모형보다 모의능력이 떨어질 수밖에 없었다. 현재 SWAT 모형의 경우 SWAT-CUP 모듈이 개발되어 다양한 최적화 방법을 이용하여 자동보정이 가능하다. 따라서 SWAT 모형에서도 단순개념모형과 똑같은 자동보정기법을 사용하여 모의능력 결과를 산출한다면 단순개념모형과 더 정확한 비교를 수행할 수 있을 것이다.

기후변화 시나리오에 대한 불확실성 평가에 비해 강우-유출모형으로 인한 불확실성 평가는 상대적으로 연구가 미진하다. 기후변화 시나리오로 인한 불확실성이 유량 전망 결과에 지배적인 영향을 미치긴 하지만 신뢰성 있는 유량 전망을 위해서는 강우-유출모형에 대한 불확실성 평가를 실시하고 이에 대한 요소를 분석하여 불확실성을 저감하려는 노력이 필요하다. Xu and Singh(2004)에서는 기후변화연구에서 사용될 강우-유출모형 선정 시 모형의 구조적 불확실성의 정량화에 대한 중요성을 강조하기도 하였다. 따라서 향후 분포

형 강우-유출모형의 구조적 불확실성의 정량화에 대한 연구가 필요할 것이다.

또한 본 연구에서는 모형의 불확실성을 고려할 때 단순개념모형이 기후변화 유량 전망에 적합한 강우-유출모형이라고 제시하고 용담댐 유역을 대상으로 단순개념모형의 적용성을 검토하였다. 향후 단순개념모형을 이용하여 전국을 대상으로 기후변화 유량 전망을 실시하여 기후변화 대응 정책의 기초자료를 제공할 필요가 있다.

참 고 문 헌

강동현. (2007). *기후변화에 따른 금강유역의 수자원 영향평가.* (석사학위 논문), 서울대학교.

과학기술부. (2004). 수자원의 지속적 확보기술개발사업: 지표수 수문성분 해석기술 개발: 21세기 프론티어 사업.

과학기술부. (2007). 수자원의 지속적 확보기술개발사업: 기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계구축: 21세기 프론티어 사업.

교육과학기술부. (2010). 기후변화에 의한 국가 수자원 영향분석 및 평가 체계 적용.

국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS). (http://www.wamis.go.kr)

국립기상연구소. (2011). IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011.

국립기상연구소. (2012). IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 전지구 기후변화 보고서 2012 RCP 2.6/4.5/6.0/8.5 따른 기후변화 전망.

국토교통부. (2013). 기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망.

권원태, 백희정, 변영화, 강현석, 이효신, 현유경, 간순영. (2010). 새로운 기후변화 시나리오 개발 계획. *한국기상학회 학술대회 논문집*, 325-325.

기상청. (2014). 2013년 이상기후 보고서.

기상청. (http://www.kma.go.kr)

기상청(기후변화정보센터). (http://www.climate.go.kr:8005/index.html)

김병식, 김수전, 김형수, 전환돈. (2010). 기후변화와 토지피복변화를 고려한 한강 유역의 수자원 영향 평가. *한국수자원학회 논문집, 43*(3), 309-323.

김수전, 김병식, 전환돈, 김형수. (2010). 고해상도 RCM 자료를 이용한 기후변화가 한강유역의 수자원 (이수적 측면) 에 미치는 영향 평가.

한국수자원학회 논문집, 43(3), 295-308.

김호성, 박진혁, 윤재영, 김상단. (2010). 극한가뭄의 시공간적 특성에 대한 기후변화의 영향을쩝가하기 위한 SAD 곡선의 적용.

노선희, 정관수, 박진혁, 류경식. (2013). RCP 기후변화 시나리오를 고려한 금강유역의 미래 용수공급 변화전망. *한국수자원학회논문집, 46*(5), 505-517.

박종윤, 정혁, 장철희, 김성준. (2014). RCP배출 시나리오와 SWAT모형을 이용한 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가. *한국농공학회논문집, 56*(3), 19-29.

박진혁, 권현한, 노선희. (2011). A1B기후변화시나리오 기반 RCM과 SWAT모형을 이용한 대청댐 및 용담댐 유역 유출량 전망. *한국수자원학회논문집, 44*(12), 929-940.

배덕효, 정일원, 권원태. (2007). 수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산 (I): 유역별 기후시나리오 구축. *한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 40*(3), 191-207.

서용원, 이승현, 김영오, 이동률. (2000). 대청댐 운영에 대한 기후변화 영향평가. 2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, *대한토목학회,* 3, 427-430.

손경환, 이병주, 배덕효. (2010). Multi-GCMs 의 기후시나리오를 이용한 홍수특성변화 평가. *한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 43*(9), 789-799.

손태석, 이상도, 김상단, 신현석. (2010). 유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천유량 영향분석. *한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 43*(10), 865-881.

안소라, 이용준, 박근애, 김성준. (2008). 미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석. *대한토목학회논문집, 대한토목학회, 28*(2), 215-224.

안재현, 유철상, 윤용남. (2001). GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석. *한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 34*(4), 335-345.

윤용남. (2007). *수문학 -기초와 응용-*. 청문각.

이동률, 김웅태, 유철상. (2004). 기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집, 37*(4), 315-328.

이명진, 이정호, 전성우, 홍현정. (2010). 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 정책방향 고찰. *환경정책연구, 9*(2), 157-184.

이아연, 김상단. (2011). 연구논문: 낙동강 유역 환경유량에 대한 기후변화의 영향 분석. *한국물환경학회지, 27*(3), 273-285.

이종문, 김영도, 강부식, 이혜숙. (2012). 남강댐 유역에서의 기후변화에 대한 유출 영향. *한국수자원학회 논문집, 45*(6), 517-529.

환경부. (2006). 국제환경현안 대응 • 해결기술: 기후변화에 의한 물순환의 예측 및 평가.

황준식, 정대일, 이재경, 김영오. (2007). 기후변화 영향평가를 위한 월 물수지 모형의 적용성 검토.

Arnell, N. W. (1992). Factors Controlling the Effects of Climate Change on River Flow Regimes in a Humid Temperate Environment. *Journal of Hydrology, 132*(1), 321-342.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. *Journal of the American Water Resources Association, 34*(1), 73-89.

Arnold, J. G., Neitsch, S. L., Kiniry, J. R., Williams, J. R., and King, K. W. (2002). *Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation Version 2000.* Texas Water Resources Institute, College Station, TX., TWRI Report TR - 191.

Cayan, D. R., Das, T., Pierce, D. W., Barnett, T. P., Tyree, M., & Gershunov, A. (2010). Future Dryness in the Southwest US and the Hydrology of the Early 21st Century Drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 107*(50), 21271-21276.

Chiew, F. H. S., Teng, J., Vaze, J., Post, D. A., Perraud, J. M., Kirono, D. G. C., & Viney, N. R. (2009). Estimating Climate Change Impact on Runoff Across Southeast Australia: Method, Results, and Implications of the Modeling Method. *Water Resources Research, 45*(10)

Das, T., Pierce, D. W., Cayan, D. R., Vano, J. A. & Lettenmaier, D. P. (2011). The Importance of Warm Season Warming to Western US Streamflow Changes. *Geophysical Research Letters, 38*(23).

Duan, Q., Schaake, J., Andreassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H., & Hay, L. (2006). Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An Overview of Science Strategy and Major Results from the Second and Third Workshops. *Journal of Hydrology, 320*(1), 3-17.

Elsner, M. M., Cuo, L., Voisin, N., Deems, J. S., Hamlet, A. F., Vano, J. A., Mickelson, K. E. B., Lee, S.-Y., & Lettenmaier, D. P. (2010). Implications of 21st Century Climate Change for the Hydrology of Washington State. *Climatic Change, 102*(1-2), 225-260.

Franczyk, J., & Chang, H. (2009). The Effects of Climate Change and Urbanization on the Runoff of the Rock Creek Basin in the Portland Metropolitan area, Oregon, USA. *Hydrological Processes, 23*(6), 805-815.

Fujihara, Y., Tanaka, K., Watanabe, T., Nagano, T., & Kojiri, T.

(2008). Assessing the Impacts of Climate Change on the Water Resources of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of Dynamically Downscaled Data for Hydrologic Simulations. *Journal of Hydrology, 353*(1), 33-48.

Gleick, P. H. (1987). The Development and Testing of a Water Balance Model for Climate Impact Assessment: Modeling the Sacramento Basin. *Water Resources Research, 23*(6), 1049-1061.

Gleick, P. H. (1989). Climate Change, Hydrology, and Water Resources. *Reviews of Geophysics, 27*(3), 329-344.

Guo, S., Wang, J., Xiong, L., Ying, A., & Li, D. (2002). A Macro-scale and Semi-distributed Monthly Water Balance Model to Predict Climate Change Impacts in China. *Journal of Hydrology, 268*(1), 1-15.

Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (1999). Effects of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Columbia River Basin1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 35*(6), 1597-1623.

IPCC. (2007). Guidance on Water and Adaptation to Climate Change.

Jakeman, A., Littlewood, I., & Whitehead, P. (1990). Computation of the Instantaneous Unit Hydrograph and Identifiable Component Flows with Application to Two Small Upland Catchments. *Journal of Hydrology, 117*(1), 275-300.

Jakeman, A., & Hornberger, G. (1993). How Much Complexity is Warranted in a Rainfall Runoff Model? *Water resources research, 29*(8), 2637-2649.

Jha, M., Pan, Z., Takle, E. S., & Gu, R. (2004). Impacts of Climate Change on Streamflow in the Upper Mississippi River Basin: A

Regional Climate Model Perspective. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 109*(D9).

Leavesley, G. H. (1994). Modeling the Effects of Climate Change on Water Resources-a Review. *Climatic Change, 28*(1-2), 159-177.

Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the Use of "Goodness-of Fit" Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. *Water Resources Research, 35*(1), 233-241

Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., & Gasse, F. (2003). Hydrological Response of a Catchment to Climate and Land use Changes in Tropical Africa: Case Study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology, 275*(1), 67-85.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A Simple Hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for General Circulation Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 99*(D7), 14415-14428.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Fore-casting of Principles. J*ournal of Hydrology*, *10*(3), 282-290

Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., & King, K. (2002). Soil And Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Version 2000. Texas Water Resources Institute, College Station: TR-191.

Nijssen, B., Lettenmaier, D. P., Liang, X., Wetzel, S. W., & Wood, E. F. (1997). Streamflow Simulation for Continental scale River Basins. *Water Resources Research, 33*(4), 711-724.

Perrin, C., Michel, C., & Andreassian, V. (2003). Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation. *Journal of*

Hydrology, 279(1-4), 275-289

Post, D., Chiew, F., Teng, J., Viney, N., Ling, F., Harrington, G., & McLoughlin, R. (2012). A Robust Methodology for Conducting Large-scale Assessments of Current and Future Water Availability and Use: a case study in Tasmania, Australia. *Journal of Hydrology, 412*, 233-245.

Prudhomme, C., Parry, S., Hannaford, J., Clark, D. B., Hagemann, S., & Voss, F. (2011). How Well Do Large-scale Models Reproduce Regional Hydrological Extremes in Europe? *Journal of Hydrometeorology, 12*(6).

Service, S. C. (1972). *Hydrology in National Engineering Handbook, SCS*.

Shin, M.-J., Guillaume, J. H., Croke, B. F., & Jakeman, A. J. (2013). Addressing Ten Questions about Conceptual Rainfall - runoff Models with Global Sensitivity Analyses in R. *Journal of Hydrology, 503*, 135-152.

Shin, M.-J., Guillaume, J. H., Croke, B. F., & Jakeman, A. J. (2014). A Review of Foundational Methods for Checking the Structural Identifiability of Models: Results for Rainfall-runoff. *Journal of Hydrology, 520,* 1-16.

Tian, Y., Xu, Y.-P., & Zhang, X.-J. (2013). Assessment of Climate Change Impacts on River High Flows through Comparative Use of GR4J, HBV and Xinanjiang Models. *Water Resources Management, 27*(8), 2871-2888

Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., & Srinivasan, R. (2006). A Global Sensitivity Analysis tool for the Parameters of Multi-variable Catchment Models. *Journal of*

Hydrology, 324(1), 10-23.

Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J. M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate Non-Stationarity - Validity of Calibrated Rainfall - Runoff Models for use in Climate Change Studies. J*ournal of Hydrology*, *394*(3), 447-457.

Viney, N. R., Bormann, H., Breuer, L., Bronstert, A., Croke, B., Frede, H., & Jakeman, A. (2009). Assessing the Impact of Land Use Change on Hydrology by Ensemble Modelling (LUCHEM) II: Ensemble Combinations and Predictions. *Advances in Water Resources, 32*(2), 147-158.

Xu, C.-Y. (1999a). Climate Change and Hydrologic Models: A Review of Existing Gaps and Recent Research Developments. *Water Resources Management, 13*(5), 369-382.

Xu, C.-Y. (1999b). Operational Testing of a Water Balance Model for Predicting Climate Change Impacts. *Agricultural and forest meteorology, 98*, 295-304.

Xu, C.-Y., & Singh, V. (2004). Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resources Management, 18*(6), 591-612.

Abstract

A Study on Runoff Projections Considering Climate Change Using Simple Conceptual Models

Cha Mi Jung
Department of Civil & Environmental Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Since the year 2000, climate change research on water resources in Korea has been actively conducted. There have been numerous researches for the Geum River basin. However, runoff projections, which are the foundation for flood and drought assessment, are very different for even the same basin; therefore, the results can't be applied to policy. Thus, standard hydrological scenarios at the basin scale should be provided. One of the problems for generating standard hydrological scenarios is that most of the studies have selected rainfall-runoff models by convenience and availability, without the consideration of specific characteristics of climate changes. Since each rainfall-runoff models has different features, careful approaches are necessary for selecting the appropriate rainfall-runoff models for climate change studies.

Climate change studies focus on water resources assessment and long-term planning, rather than real-time operations. Also, some of the previous studies have suggested that structural uncertainty of rainfall-runoff models should be considered when generating runoff projections. Therefore, this thesis suggested that simple conceptual models are adequate to climate change studies, and we generated runoff projections based on RCP scenarios for Yongdam dam

watershed in Geum River basin by using conceptual models. This thesis projected runoff for three periods (baseline:1981~2011, 2040s:2020~2059, 2080s:2060~2099) using three rainfall-runoff models of varying complexities: a semi-distributed model(SWAT) and two conceptual models(IHACRES, GR4J).

This thesis compared the results to the previous studies and found that SWAT model construction is too complex to generate similar results. However, simple conceptual models generated similar runoff projections, even though the structures of simple conceptual models are different. Considering the uncertainty of rainfall-runoff model, it is better to use the simple conceptual models if they can show good performances relative to the physically based model. Upon the results of this study, NSE of simple conceptual models for Yongdam dam watershed was as much as 0.8, which was in agreement with the observed data, so simpler conceptual models are preferable for climate change studies concerning the model uncertainty and efficiency.

The average changes in annual runoff relative to the simulated historical runoff (1982~2011) for Yongdam dam watershed were projected similarly by SWAT, IHACRES, and GR4J models. The average annual runoff would increase by 22.2%(2040s) and 44.0%(2080s) under RCP4.5 scenario, and by 16.4%(2040s) and 22.3%(2080s) under RCP8.5 scenario. The runoff projected under RCP4.5 scenario will increase more than the runoff projected under RCP8.5 scenario. This is because precipitation will show higher increase while temperature will show lower increase under RCP4.5 scenario, compared to RCP8.5 scenario. Also, a large increase in winter runoff was projected, in relative to the historical winter runoff.

Keywords: climate change, runoff projection, rainfall-runoff model, simple conceptual model, GR4J, IHACRES, SWAT
Student Number: 2013-20939