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

공학석사 학위논문

자연하천에서 전기전도도 추적을 통한 2차원 혼합에 관한 실험적, 수치적 연구

Experimental and Numerical Study of Two-dimensional Mixing Based on the Conductivity Tracing in Natural Streams

2015년 2월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

정 성 현

초록

본 연구에서는 수질오염사고에 대응하기 위해 하천에서의 오염물질의 2차원 혼합 거동을 연구하기 위해 낙동강의 강정고령보 ~ 달성보 구간을 대상으로 추적자 실험 수행 및 수치모델 보·검증을 수행하였다. 실험 구간에는 금호강 및 진천천이 좌안쪽으로부터 합류되는 구간이 있으며 이외에도 여러 작은 지류가 유입되어 들어온다.

기존 국내외에서 진행된 추적자 실험들은 대체적으로 형광물질, 방사성 물질, 소금 용액 등 인공적인 추적자물질을 주입하여 실험을 진행하였으나 본 실험에서는 실험 대상 하천 인근 도시 및 공단의 하폐수처리장으로부터 유입되는 오염물질을 자연추적자로 이용하여 전기전도도(EC)를 측정하는 자연 추적자 실험 기법을 제안하였다. 이와 같은 실험방법은 경제적, 환경적, 수행가능성, 수질분석인자인 EC와의 연계 등 다양한 장점을 가지고 있으며 특히 하폭이 넓은 하천에서도 추적자 실험이 수행 가능하다.

이를 위해 ADCP를 이용한 수리량 측정, 전극센서를 이용한 전기전도도 측정을 수행하였으며 총 4번의 실험을 금호강 합류부를 포함하는 낙동강의 강정고령보 ~ 달성보 구간에서 수행하였다.

실험결과로부터 계산된 농도곡선을 이용하여 유관모멘트법(Streamtube Moment Method)을 이용하여 무차원 횡분산계수 D_T / HU^* 를 계산한 결과 0.49 ~ 1.39로 계산되어 Rutherford(1994)가 제안한 사행수로에서의 횡분산계수 범위 0.3 ~ 3.0를 만족하는 값을 보였다. Deng 등(2001)과 Jeon 등(2007)이 제안한 경험식에 의해 산정한 계산결과와 비교한 결과, Deng 등(2001)의 경험식은 D_T / HU^* 를 과대 예측하고 있으며 Jeon 등

(2007) 식은 과소 예측하는 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 2차원 이송-확산 모형 RAMS에 적용하여 오염물의 혼합거동을 모의하였다. HDM-2D의 경우 실험 구간내에서 만곡부에서는 우안쪽에서, 직선부에서는 중앙에서 최대 유속이 발생함을 확인하였으며 실측된 수리량 값과 흐름 특성이 유사한 경향을 보였으며 유속의 RMSE의 범위는 10^{-2} 차수 정도의 값을 보였다. 확산모델 CTM-2D의 경우 D_T / HU^* 값이 2.0 ~ 3.0을 입력값으로 넣었을 경우 무차원 분산계수의 값이 0.5 ~ 1.5일 때보다 실제 농도분포를 잘 재현하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 : 2 차원 혼합, 현장 추적자 실험, 합류부, 사행하천, 자연 추적자, 횡분산계수, RAMS, 전기전도도

학번 : 2013-20938

목 차

목차 iii
표 목차 v
그림 목차 vii
기호 정의 x

I. 서론 1
1.1 연구의 배경 및 필요성 1
1.2 연구의 목적 및 내용 2
1.3 연구 동향 3

II. 이론적 연구 8
2.1 하천의 혼합 과정 8
2.2 2 차원 수치모형 20
2.3 2 차원 수치모형 29
2.3.1 HDM-2D 30
2.3.2 CTM-2D 31

III. 추적자 실험 26
3.1 실험 대상 하천 26
3.2 수리량 측정 32
3.3 농도추적 실험 35
3.4 실험 조건 42

IV. 실험결과 및 분석 50
4.1 수리량 분석 50

4.2 농도 분석 71
4.3 분산계수 산정 98

V. 수치모형 적용 106
5.1 모의조건 및 수행방법 106
5.2 HDM-2D 적용 110
5.3 CTM-2D 적용 129

VI. 요약 및 결론 143
6.1 요약 143
6.2 결론 및 향후 연구 144

참고문헌 146

표 목차

표 2.1.1 관측법의 분류 및 장단점 15
표 3.1.1 낙동강 및 금호강 유황 28
표 3.3.1 기존 추적자 실험의 종류 및 특성 37
표 4.1.1 Case ND-EC1 수리량 자료 51
표 4.1.2 Case ND-EC2 수리량 자료 54
표 4.1.3 Case ND-EC3 수리량 자료 61
표 4.1.4 Case ND-EC4 수리량 자료 66
표 4.2.1 Case ND-EC1 연직혼합 분포 73
표 4.2.2 Case ND-EC1 진천천 EC 연속측정 결과 75
표 4.2.3 Case ND-EC1 EC 횡 혼합측정 결과 75
표 4.2.4 Case ND-EC2 진천천의 EC 연속측정 결과 79
표 4.2.5 Case ND-EC2 EC 횡 혼합측정 결과 82
표 4.2.6 Case ND-EC3 연직혼합 분포 86
표 4.2.7 Case ND-EC3 EC 횡 혼합측정 결과 90
표 4.2.8 ND-EC4 전기전도도 및 온도 연직혼합 분포 93
표 4.2.9 Case ND-EC4 EC 횡 혼합측정 결과 97
표 4.3.1 낙동강 본류 구간 횡 분산계수 산정 결과 101
표 4.3.2 하천 사행도에 따른 횡 분산계수의 범위 101
표 5.1.1 HDM-2D 모의 입력 값 109
표 5.1.2 CTM-2D 모의 입력 값 109
표 5.2.1 와동점계수에 따른 민감도분석 RMSE 결과 111
표 5.2.2 매닝계수에 따른 민감도분석 RMSE 결과 116
표 5.2.3 Case ND-EC3 유속 모의 결과 RMSE 122
표 5.2.4 Case ND-EC4 유속 모의 결과 RMSE 125

표 5.3.1 Time step에 따른 민감도 분석 RMSE 결과..... 130
표 5.3.2 Case ND-EC3 CTM-2D 모의 RMSE 결과 135
표 5.3.3 Case ND-EC4 CTM-2D 모의 RMSE 결과 139

그림 목차

그림 1.3.1 분산계수 산정법 중 관측법의 분류 7
그림 2.1.1 하천에서 오염물질 혼합과정 9
그림 2.1.2 연속주입과 순간주입 개요도(Seo, 2014) 10
그림 2.1.3 유관모멘트법 개념도 19
그림 2.2.1 RAMS 의 모델링 프로세스(국토교통부, 2009) 21
그림 3.1.1 실험 대상 지역 27
그림 3.1.2 합류부 구간 Heli-Cam 사진 27
그림 3.1.3 자동수질 측정소 온도, pH, 전기전도도 자료 30
그림 3.1.4 ARCWQ 온도, pH, 전기전도도 자료 31
그림 3.2.1 Workhorse Sentinel ADCP 33
그림 3.2.2 보조보트와 연결한 ADCP 33
그림 3.3.3 보트를 이용한 ADCP 측정 개요도(USGS, 2009) 34
그림 3.3.1 연직혼합 분석을 위한 채수 38
그림 3.3.2 농도추적 실험 개요도 38
그림 3.3.3 용존 물질의 농도 값과 전기전도율의 관계(Hem, 1985) 41
그림 3.3.4 YSI-600 OMS, YSI-600 XML 센서 41
그림 3.4.1 Case ND-EC1 측정 지점 44
그림 3.4.2 Case ND-EC2 측정 지점 46
그림 3.4.3 Case ND-EC3 측정 지점 47
그림 3.4.4 Case ND-EC4 측정 지점 47
그림 4.1.1 Case ND-EC1 단면 별 유속 및 수심 그래프 52
그림 4.1.2 Case ND-EC2 단면 별 유속 및 수심 그래프 55
그림 4.1.3 Case ND-EC3 단면 별 유속 및 수심 그래프 62

그림 4.1.4 Case ND-EC4 단면 별 유속 및 수심 그래프 67
그림 4.2.1 Case ND-EC1 전기전도도 연직혼합 분포 72
그림 4.2.2 Case ND-EC1 진천천의 EC 연속측정 결과 76
그림 4.2.3 Case ND-EC1 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과..... 77
그림 4.2.4 Case ND-EC2 의 진천천의 EC 연속측정 결과..... 80
그림 4.2.5 Case ND-EC2 낙동강 본류 및 금호강의 하폭방향 EC 연속측정 결과..... 83
그림 4.2.6 Case ND-EC3 전기전도도 연직혼합 분포 85
그림 4.2.7 Case ND-EC3 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과..... 88
그림 4.2.8 Case ND-EC4 전기전도도 및 온도 연직혼합 분포 ... 92
그림 4.2.9 Case ND-EC4 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과..... 95
그림 4.3.1 횡 분산계수 산정을 위한 무차원 농도곡선 99
그림 4.3.2 유관모멘트법을 이용한 횡 분산계수 산정..... 100
그림 4.3.3 선행연구 횡분산계수 정리 103
그림 4.3.4 경험식을 통해 산정한 횡분산계수 비교 104
그림 5.1.1 RAMS 를 이용해 생성한 격자망 107
그림 5.2.1 와동점성계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석 112
그림 5.2.2 매닝계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석 117
그림 5.2.3 Case ND-EC4 유속 분포도 120
그림 5.2.4 Case ND-EC3 HDM-2D 모의 결과 123
그림 5.2.5 Case ND-EC4 HDM-2D 모의 결과 126
그림 5.3.1 Time step 에 따른 민감도 분석 결과 131
그림 5.3.2 Case ND-EC4 전기전도도 분포도..... 133
그림 5.3.3 Case ND-EC3 CTM-2D 모의 결과..... 136

그림 5.3.4 Case ND-EC4 CTM-2D 모의 결과..... 140

기호 정의

Latin Uppercase

C	수심-평균 농도(depth-averaged concentration)
C'	무차원 수심-평균농도(dimensionless depth-averaged concentration)
C_h	Chezy계수(Chezy coefficient)
D_{ij}	분산텐서(dispersion tensor)
D_L	종분산계수(longitudinal dispersion coefficient)
D_T	횡분산계수 (transverse dispersion coefficient)
E_y	확산인자(diffusion factor)
F	생성 및 소멸함수(function of creation, dissipation)
$F(x)$	함수(function associated with STMM)
H	단면 평균 수심(cross-sectional depth)
K	도전율(specific conductance)
Q	단면-평균 유량(cross-sectional mean discharge)
R^2	상관계수(correlation coefficient)
$RMSE$	평균 제곱근 오차(root mean square error)
S	용존된 고형물질의 농도(concentration of dissolved solid)
S_n	사행도(sinuosity)
T	시간(time)
$Temp$	온도(temperature)
U	단면-평균 유속(cross-sectional mean velocity)
U_a	합유속 벡터의 크기(size of sum of velocity vector)

U^* 단면 평균 마찰유속(shear velocity)

W 하천 폭(width of river)

Latin Lowercase

a 비례상수(proportional factor)

c 시간-평균 농도(time-averaged concentration)

c' 농도 편차(concentration deviation about depth-averaged velocity)

$f(x)$ 함수(function associated with STMM)

h 수심(water depth)

k 감쇠계수(damping coefficient)

n 매닝계수(Manning's coefficient of roughness)

q 횡방향 누적 유량(transverse cumulative discharge)

u 수심-평균 종방향 유속(depth-averaged longitudinal velocity)

u_i i값에 따른 x,y,z방향 수심 평균 유속 (x,y,z direction depth-averaged depend on i value)

u_n 횡 방향 연직유속분포(vertical distribution of transverse velocity)

$(u_n)_s$ 횡 방향 수표면 유속(transverse surface velocity)

u_s 종 방향 연직유속분포(vertical distribution of longitudinal velocity)

u_x 종방향 시간-평균 유속(time-averaged longitudinal velocity)

u_x' 수심 평균 유속에 대한 종방향 유속편차(longitudinal velocity deviation about depth-averaged velocity)

u_y 횡방향 시간-평균 유속(time-averaged transverse velocity)

u_y'	횡방향 유속편차(transverse veloicty deviation about depth-averaged velocity)
u_z	수심방향 시간-평균 유속(time-averaged vertical velocity)
v	수심-평균 횡방향유속(depth-averaged transverse velocity)
x	주흐름 방향 거리(longitudinal distance from injection point)
y	횡방향 거리(transverse distance from the left bank)
z	수심 방향 거리(vertical distance from the channel bottom)

Greek Lowercase

δ	Dirac 델타 함수(Dirac delta function)
ε_x	종확산계수(longitudinal turbulent diffusion coefficient)
ε_y	횡확산계수(transverse turbulent diffusion coefficient)
ε_z	연직확산계수(vertical turbulent diffusion coefficient)
η	무차원 누가 유량(dimensionless cumulative discharge)
κ	von Karman 상수(von Karman coefficient)
ν_{ij}	난류점성계수 텐서(eddy viscosity tensor)
ν_t	와동점성계수(eddy viscosity)
σ_y^2	농도의 횡방향 분산(variance of concentration profile of y-direction)
ψ	무차원 유속형상계수(dimensionless “shape-velocity” factor)
ζ	무차원 연직방향 거리(dimensionless vertical distance)

Greek Uppercase

Δ	델타(delta)
Δt	시간편차(time step)

I. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

최근 정부에 의해 시행된 한강, 금강, 영산강, 낙동강을 대상으로 한 4대강 정비 사업이 완료됨에 따라 이로 인한 하도 준설 및 다기능 친환경 보 설치로 인하여 하천의 흐름 및 유사 특성 등의 다양한 수리학적 특성의 변화가 있었다. 또한 이러한 사업 이후, 하천에 대한 시민들의 관심과 접근성이 높아지면서 하천과 하천 주변지역에서의 레크레이션 등과 같은 친수활동의 증가로 인하여 예전보다 사람들이 직접적으로 물에 접촉할 기회도 더 많아졌다.

그러나 최근 하천 부근에서의 사고나 누수로 인한 유류나 화학적 오염물질이 유출되는 수질오염사고가 매년 꾸준히 발생하고 있으며 수질사고 발생 시 오염물질의 정확한 도달시간과 확산범위 등에 대한 정확한 예보를 통해 주민들을 보호할 수 있어야 한다.

오염물이 하천으로 유입되었을 때 혼합은 주로 분산에 의해 이루어지며 이것은 종방향과 횡방향에 대한 유속편차에 의해 발생한다. 따라서 하천의 유속구조와 분산의 특성을 규명하는 일은 자연하천 및 수자원의 오염문제를 다루거나 이해하는데 필수적이라고 할 수 있다. 특히 오염물이 하폭방향으로 완전히 혼합되기 전까지의 2차원적인 혼합 과정은 하천의 수질관리 측면에서 매우 중요하기 때문에 횡혼합에 대한 이해는 다른 방향에 대한 혼합보다 더욱 중요하다고 할 수 있다. 이러한 수질오염 사고에 대응하기 위하여 4대강 정비 사업에 따른 하상준설과 가동

보 건설 등과 같은 공사로 인해 변화된 하천 지형환경에 대한 오염물질의 혼합특성에 대한 검토 및 연구가 필요하나 이와 관련된 조사 및 연구들이 충분히 진행되고 있지 않다. 특히 이러한 오염물질의 혼합특성에 대한 연구를 위하여 자연하천에서의 추적자 실험이 필요하나 국내의 경우 거의 수행되고 있지 않고 있는 실정이다.

나아가서 중·대규모 이상의 하천의 경우 기존에 수행해오던 인공추적자를 주입하는 추적자실험을 수행하기에는 비용, 환경문제 등 여러 가지 문제로 인하여 국내에서는 수행된 바가 없다. 이러한 경우 전기전도도(Electric Conductivity)를 이용한 자연 추적자 실험을 통해 횡분산계수를 산정하고 용존성 오염물질의 2차원적인 혼합 거동을 해석하는 것이 필요하다. 횡분산계수는 값에 따라 오염물질의 혼합 정도를 파악할 수 있는 대표적인 인자로서 오염물질의 혼합 거동을 이해하는데 있어서 매우 중요하다.

1.2 연구의 목적 및 내용

본 연구의 목적은 하천에서 자연추적자 실험을 통하여 오염물질의 횡방향 혼합 거동을 규명하는 것이다. 본 연구에서는 자연추적자 실험을 수행하여 현장에서 측정한 수리량 자료 및 전기전도도의 농도 분포를 분석하여 용존성 오염물질의 횡방향 혼합특성을 밝히고, 유관모멘트법을 적용하여 농도분포로부터 횡분산계수를 계산하였다. 나아가서 2차원 하천해석 모형인 HDM-2D 및 CTM-2D를 본 실험구간에 적용하여 수리모형을 보·검증하였다.

본 연구의 주요 내용은 다음과 같다. 낙동강의 중류부인 강정고령보 ~ 달성보 구간을 대상으로 추적자 실험 및 수치모의를 수행하였다. 본 실험에서는 기존에 사용되던 인공추적자 대신 하천 인근에서 유입되는 오염물질 중 전기전도도(Electric Conductivity)를 자연추적자로 이용하였다. 현장 데이터 취득을 위해 ADCP를 이용한 수리량 측정과 전극센서를 이용한 전기전도도 측정을 수행하였다.

취득한 농도 데이터를 이용하여 횡분산계수를 산정하였고, 이를 Deng 등(2001), Jeon 등(2007)의 선행연구에서 제안한 경험식과 비교하였으며 수리학적 특성이 횡분산계수에 미치는 영향을 확인하였다.

수치모델로서 HDM-2D 및 CTM-2D를 선택하여 이 모형들을 실험구간에 적용하여 이용하여 2차원 혼합에 관한 수치모의를 수행하였다. 수치모형의 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하고, 수치모형에 적합한 횡분산 계수의 범위를 제안하였다.

1.3 연구동향

하천에서 오염물질을 혼합특성을 파악하기 위하여 예전부터 다양한 연구가 진행되어왔으며 그 중 추적자 실험에 관한 연구는 크게 실험수로를 이용한 연구와 자연하천에서의 연구가 있다. 우선 실험수로에서 실험을 진행한 경우 직선수로와 만곡수로로 나눌 수 있다.

먼저, 직선수로에서 실험을 수행한 연구자들은 Miller와 Richardson (1974), Lau와 Krishnappan (1977), Webel과 Schatzman (1984) 등이 있다. 이들 중 횡분산계수를 추정한 대표적인 연구로서 Lau와 Krishnappan

(1977)과 Webel과 Schtzmann (1984)의 연구를 보면 Lau와 Krishnappan (1977)은 하폭 대 수심비를 바꿔가면서 직선수로에서 연구를 진행하였는데 그 결과 횡분산에 영향을 미치는 중요한 인자는 이차류라 결론을 내렸으며 일반화된 모멘트법(generalized moment method, GMM)과 단순모멘트법(simple moment method, SMM)을 이용하여 산정한 직선수로에 대한 무차원 횡분산계수의 범위는 0.11~0.26이라고 제시했다. 반면 Webel과 Schtzmann(1984)는 단순모멘트법을 통해 계산한 횡분산계수가 0.13~0.18로 비슷한 범위의 값을 가졌으나, 횡분산에 영향을 미치는 주요한 인자를 난류로 간주하였다. 이들은 Lau와 Krishnappan (1977)의 실험 조건이 수심 3cm이하로 표면장력의 영향을 받는 수심이므로 실험 결과의 신빙성과 하폭 대 수심비가 이차류를 대표할 수 있는 요소인지에 대하여 의문을 제기하였다.

만곡수로에서 2차원 확산 실험실 실험을 수행한 연구자들은 Fischer(1969), Chang(1971), Krishnappan과 lau(1977), Almquist와 Holley(1985), Boxall과 Guymer(2003)등이 있다. 먼저 Fischer (1969)는 하나의 만곡부를 갖는 실험수로에서 확산실험을 실시하여 이론적으로 도출한 횡분산계수식을 검증하였다. Chang(1971)은 하폭이 큰 S자형 곡선수로와 하폭은 좁지만 만곡부가 13개인 두 가지 수로에서 확산실험을 수행하였다. 하폭이 큰 수로에서는 이차류의 영향을 중심으로, 하폭이 작은 수로에서는 유량조건 변화를 중심으로 횡혼합의 특성변화를 관찰하였다. Krishnappan과 Lau(1977)는 3개의 만곡부를 갖는 곡선수로에서 확산실험을 수행하였는데 곡률반경과 파장을 달리하는 여러 개의 수로를 제작하였다. 이를 통해 만곡의 지형학적 특징에 따른 횡혼합의 특성을 분석하였다. 또한 취득한 농도와 수리량 자료를 이용하여

횡분산계수에 대한 경험식을 제안하였다. Almquist와 Holley(1985)는 S자형 수로에서 단면형상이 직사각형과 자연형의 두 가지 경우에 대해 비교 실험을 수행하여 같은 만곡형태일지라도 단면형상에 따라 상이한 횡혼합이 발생됨을 보여주었다. 최근에는 Boxall과 Guymer(2003), Boxall 등(2003)이 자연형 단면을 갖는 S형 사행수로에서 추적자 실험을 실시하여 구간별로 횡분산계수를 산정한 결과 이차류가 크게 발생하는 구간에서 횡분산계수가 커지는 것을 확인하였다.

현장 추적자 실험으로서는 Yotsukura 등(1970), Yotsukura와 Cobb(1972), Sayre와 Yeh(1973), McQuivey와 Keefer(1976), Sayre(1979), Beltaos(1980), Lau와 Krishnappan(1981), Demetracopoulos와 Stefan(1983) Holley와 Nerat(1983), Mossman 등(1991), 서일원 외(2005), Seo 등(2006), Baek과 Seo(2010)과 같은 연구자들이 수행하였다.

해외의 경우 대부분의 현장 추적자 실험 연구들은 1970~1980년도부터 활발하게 이루어졌으며 주로 온배수 문제나 하·폐수처리장 문제 해결을 위한 오염물질의 횡방향 및 종방향 혼합 특성 분석을 위해 시행되었다. Yotsukura 등(1970)은 기존 1차원 위주로 진행되었던 현장실험과는 다르게 2차원 횡방향 혼합거동에 대하여도 추가적으로 Rhodamine 염료 이용하여 Missouri River에서 수행한 결과 $D_T = 0.7U^*H$ 의 경험식을 제안하였다. Beltaos(1980)는 Athabasca River에서 유관추적법을 이용하여 분산계수를 산정한 결과 단순 모멘트법보다 더 일관된 값을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

국내 추적자 실험은 많이 수행되지 않았으나 2000년도부터 점차 수행하기 시작하였으며 오염물질의 거동특성 연구를 비롯하여 새로운 분산계수 산정방법 개발 등이 진행되어 왔다. 서일원 외(2005)는 방사성 동위 원소를 이용하여 취득한 데이터를 통하여

다양한 방법으로 분산계수를 산정하였다. Baek과 Seo(2010)는 새롭게 제안한 2차원 유관추적법을 이용하여 국내 지류에서 수행한 실험 데이터를 이용하여 분산계수를 산정하였다.

하천에서 오염물의 혼합 특성을 파악하는데 있어 가장 중요한 특성 인자로 분산계수가 있다. 과거에 많은 연구자들은 횡분산계수를 결정하는 방법으로 쉽고 계산과정이 간단한 SMM을 가장 많이 이용하였다. SMM은 Sayre와 Chang(1968)에 의해 제안되었으며 그 후 Lau와 Krishnappan(1977), Fischer(1979), Webel과 Schatzmann(1984), Nokes와 Wood(1988), Rutherford(1994)가 횡분산계수를 산정하는데 이용하였다. Holley(1971)는 횡방향 유속의 영향을 고려하기 위하여 GMM을 제안하였으며 최근에 Boxall과 Guymer(2003)등이 이용하였다. Yotsukura와 Cobb(1972)는 횡방향 분산계수를 연구하는데 있어 STMM을 사용하였으며 이 후 Yotsukura와 Sayre(1976), Sayre(1979), Beltaos(1980) 등이 자연하천에서 횡분산계수를 산정하는데 사용하였다. Yotsukura와 Sayre(1976)에 의해 제안된 CMM(curvilinear moment method)는 횡방향 유속뿐만 아니라 만곡의 효과도 고려할 수 있는 방법으로 유관모형(streamtube)으로 유도되어 수치모델링에 많이 사용되고 있다. 그러나 기존 CMM을 통한 분산계수 산정의 경우 횡방향 유속을 직접 측정한 것이 아니라 연속방정식을 이용해 계산하였으며, 종방향 유속도 정확한 측정이 이루어지지 못해 실험조건에 따라 크게 오차가 발생하였다. 그림1.1은 횡분산계수 산정법들의 분류를 나타낸다.

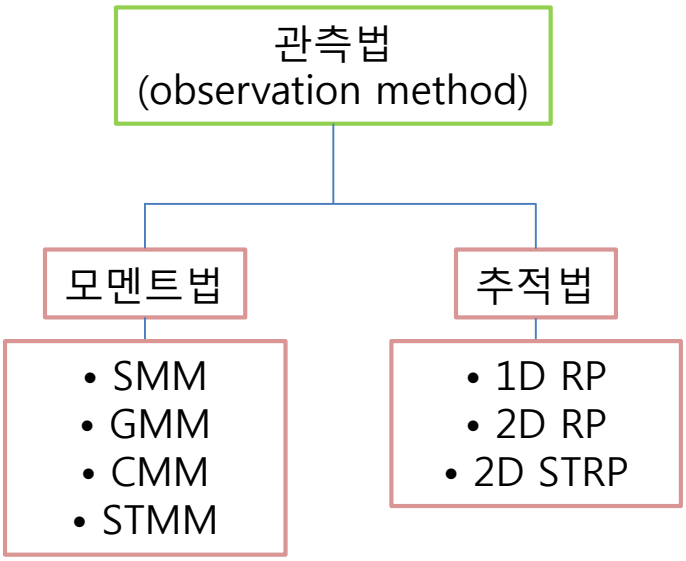


그림 1.3.1 분산계수 산정법 중 관측법의 분류

II. 이론적 연구

2.1 하천의 혼합 과정

하천에 오염물질이 유입되었을 경우 시간이 경과함에 따라 오염물질의 농도가 서서히 감소한다. 이는 크게 두 가지 원인에 의하여 나눠지는데 첫째는 하천에 흐름에 의한 이송이며 다른 한 가지는 메커니즘에 따른 분산과 확산에 의한 혼합에 영향을 받는다(Rutherford, 1994).

오염물의 하천에서의 혼합은 크게 세 단계로 구분할 수 있다(Fischer, 1979). 첫 번째 단계에서는 주로 오염물질의 유입지점 부근에서 발생되며, 초기 운동력과 부력이 하천과의 혼합 정도를 결정하며 진행방향, 연직방향, 횡방향의 3차원적 해석이 요구된다. 두 번째 단계에서는 흐름이 진행됨에 따라 연직방향의 혼합이 완료된 다음 난류 흐름에 의한 영향을 받아 횡방향, 흐름방향의 2차원적 해석이 요구된다. 세 번째 단계에서는 연직방향과 횡방향 혼합이 완료됨에 따라서 흐름방향의 1차원적 종분산 해석이 요구된다.

오염물질이 주입되는 방법에 따라 크게 그림 2.1.2와 같이 순간 주입과 연속 주입 두 가지로 분류할 수 있다. 연속 주입의 경우 주입이 시작된 후 일정 시간이 지나면 농도장이 정상상태가 된다. 따라서 시간의 변화에 따른 농도장의 변화가 없으므로 정상상태에 대한 분석이 필요하다. 순간 주입의 경우 연속 주입과는 다르게

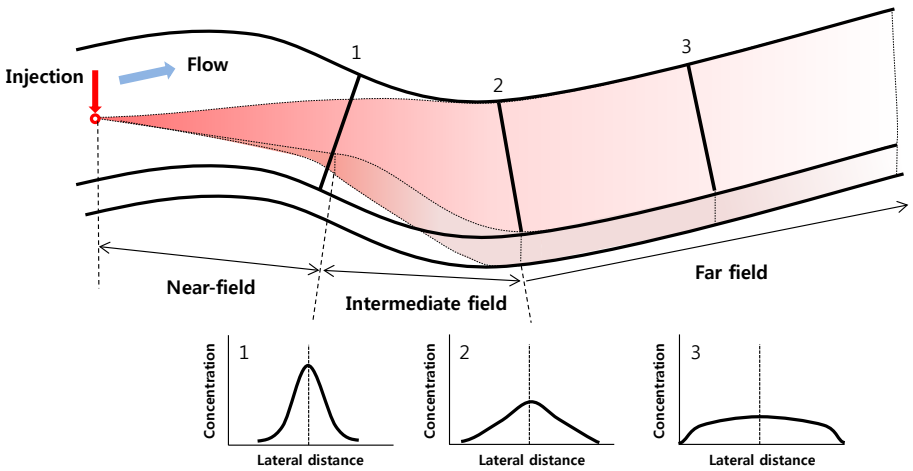
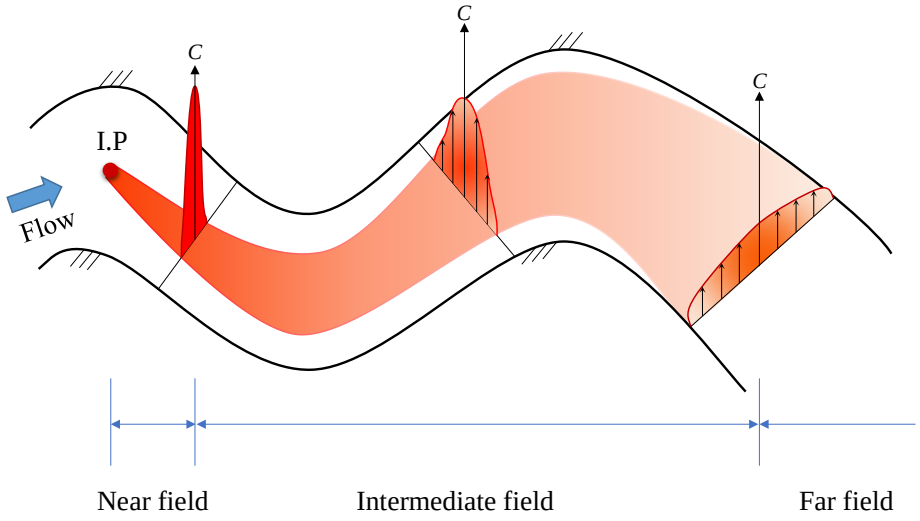


그림 2.1.1 하천에서 오염물질 혼합과정

a) Continuous Source



b) Instantaneous Source

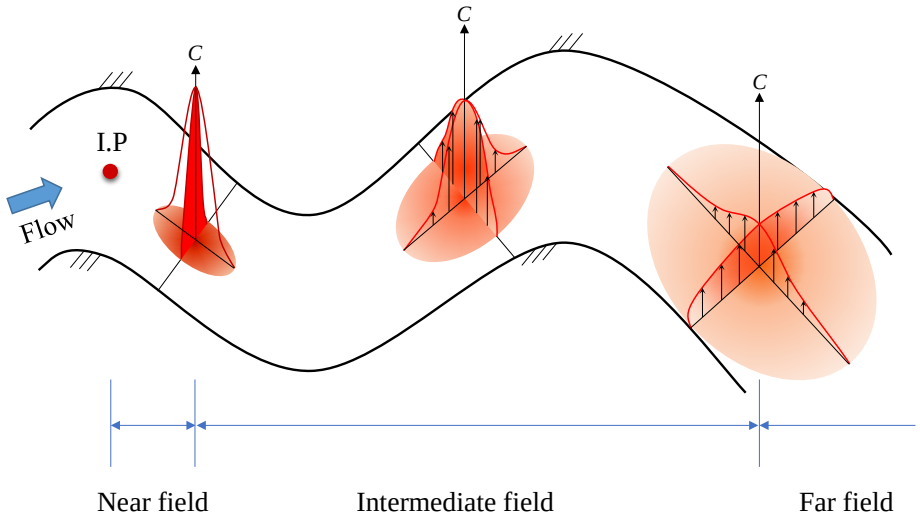


그림 2.1.2 연속주입과 순간주입 개요도(Seo, 2014)

농도장이 시간에 따라 변화하며 진행하므로 비정상상태에 대한 분석이 필요하다.

2.1.1 지배방정식과 적용

(1) 2차원 이송-분산 방정식

하천에서의 오염물질의 혼합과정은 이송(advection)과 확산(diffusion) 또는 분산(dispersion) 등의 과정으로 설명된다. 혼합을 나타내는 혼합계수는 흐름의 특성에 의한 난류확산계수와 수심방향 전단 유속에 의한 분산계수로 나눌 수 있다. 실제 자연하천에 적용시킬 경우 분산에 의한 혼합이 난류에 의한 혼합과 비교하여 상대적으로 매우 큰 영향을 주기 때문에 이 둘을 엄밀히 구분하는 것은 어려우며 일반적으로는 혼합계수를 분산계수로 대표하여 사용한다(Fischer, 1979). 3차원 확산방정식을 수심방향으로 적분하여 2차원 이송-확산 방정식으로 유도한다.

$$\frac{\delta c}{\delta t}+u_x\frac{\delta c}{\delta x}+u_y\frac{\delta c}{\delta y}+u_z\frac{\delta c}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta x}\left(\varepsilon_x\frac{\delta c}{\delta x}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(\varepsilon_y\frac{\delta c}{\delta y}\right)+\frac{\delta}{\delta z}\left(\varepsilon_z\frac{\delta c}{\delta z}\right) \tag{2.1.1}$$

식(2.1.1)은 3차원 이송-확산 방정식을 나타내며 이것을 바닥 z_b 에서 자유수면 z_s 까지 적분하고 Leibnitz법칙과 경계조건을 사용하면 식(2.1.2)와 같다.

$$\begin{aligned} & h\frac{\delta \overline{c}}{\delta t}+\frac{\delta}{\delta x}\left(\overline{hu_x c}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(\overline{hu_y c}\right)+\frac{\delta}{\delta z}\left(\overline{hu_z c}\right) \\ & =\frac{\delta}{\delta x}\left(\overline{h\varepsilon_x \frac{\delta c}{\delta x}}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(\overline{h\varepsilon_y \frac{\delta c}{\delta y}}\right) \end{aligned} \tag{2.1.2}$$

유속과 농도는 수심평균과 수직 편차의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} u_x &= u+u_x' \\ u_y &= v+u_y' \\ c &= C+c' \end{aligned} \tag{2.1.3}$$

여기서 u,v,C는 수심평균 속도와 농도이다.

식(2.1.3)을 식(2.1.2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & h\frac{\delta C}{\delta t}+\frac{\delta}{\delta x}\left(huC\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(hvC\right) \\ & =\frac{\delta}{\delta x}\left[h\varepsilon_x \frac{\delta C}{\delta x}-\overline{hu_x' c'}\right]+\frac{\delta}{\delta y}\left[h\varepsilon_y \frac{\delta C}{\delta y}-\overline{hu_y' c'}\right] \end{aligned} \tag{2.1.4}$$

식(2.1.4)에서 $-\overline{u_x'c'},\ -\overline{u_y'c'}$ 은 수심평균에 의한 불균등 성으로 발생된 추가 혼합을 의미하며 분산항이 된다. Taylor(1921)에 의하면 $-\overline{u_x'c'},\ -\overline{u_y'c'}$ 가 수심평균한 농도경사에 비례한다고 제시하였다. 즉

$$-\overline{u_x'c'} = D_L \frac{\delta C}{\delta x} \tag{2.1.5}$$

여기서 D_L 은 종분산계수이다. 이와 유사한 방법으로 횡방향 분산계수도 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\overline{u_y'c'} = D_T \frac{\delta C}{\delta x} \tag{2.1.6}$$

여기서 D_T 는 횡분산계수이다. 식(2.1.5)와 식(2.1.6)을 식(2.1.4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &h\frac{\delta C}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x}\left(huC\right) + \frac{\delta}{\delta y}\left(hvC\right) \\ &= \frac{\delta}{\delta x}\left[h\left(\varepsilon_x + D_L\right)\frac{\delta C}{\delta y}\right] + \frac{\delta}{\delta y}\left[h\left(\varepsilon_y + D_T\right)\frac{\delta C}{\delta y}\right] \end{aligned} \tag{2.1.7}$$

앞에서 설명했던 바와 같이 자연하천의 경우 분산계수가 확산계수보다 상대적으로 훨씬 더 크므로 분산계수와 확산계수의 합을 분산계수로 대표하여 사용할 수 있다. 따라서 식(2.1.7)은 다음과 같이 정리된다.

$$h\frac{\delta C}{\delta t}+\frac{\delta}{\delta x}(huC)+\frac{\delta}{\delta y}(hvC)$$
$$=\frac{\delta}{\delta x}\left[hD_L\frac{\delta C}{\delta y}\right]+\frac{\delta}{\delta y}\left[hD_T\frac{\delta C}{\delta y}\right] \quad (2.1.8)$$

2.1.2 분산 계수 산정

분산계수 산정 방법은 크게 관측법(method of observation)과 추정법(method of estimation) 2가지로 나눌 수 있으며 실험을 통한 실측자료가 있는 경우에는 관측법을 이용하여, 추적자 실험을 통한 실측자료가 없는 경우에는 추정법을 이용하여 분산계수를 산정한다. 본 연구에서는 실험을 통한 실측자료를 이용한 관측법을 사용하여 분산계수를 산정하였다.

관측법은 현장실험이나 실험수로에서의 실험을 통해 실측된 2차원 농도자료를 이용하여 다른 구간에 대한 농도자료를 예측하기 위한 분산계수의 산정방법으로 모멘트법(moment method)과 추적법(routing procedure)등이 연구되었다. 모멘트법은 단순모멘트법(SMM), 일반화된 모멘트법(GMM), 수정모멘트법(CMM), 유관모멘트법(STMM) 등이 있다. 추적법은 2차원 추적법(2D routing procedure)과 2차원 유관추적법(2D streamtube routing procedure)이 있다(정성진, 2005).

위의 관측법들에 관한 장단점은 표 2.1.1 에 표현하였다. 본 연구에서는 연속주입에 따른 정상상태의 농도 분포를 분석할 때 사용되는 모멘트법을 이용하여 횡분산계수를 산정하였다.

표 2.1.1 관측법의 분류 및 장단점

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th colspan="2">모멘트법
(Moment-base Method)</th><th colspan="2">추적법
(Routing Procedure)</th></tr>
<tr><th>S MM</th><th>ST MM</th><th>ST RP</th><th>2D ST RP</th></tr>
<tr><td>장점</td><td>•계산이 용이
•보편적으로 사용</td><td>•횡방향유속,
벽면 반사,
만곡 영향
고려 가능</td><td>•자연하천에 적용가능
•각 구간별 분산계수 산정
•벽면반사, 만곡의 영향 고려</td><td>•종·횡분산계수 산정 가능
•자연하천에 적용가능
• 각 구간별 분산계수 산정
•벽면반사, 만곡의
영향 고려</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단점</td><td>•횡방향유속, 벽면 반사, 만곡의 영향 고려할 수 없음</td><td>•계산이 복잡
•복잡한 지형에 적용이 어려움</td><td rowspan="2">•불규칙한 하상의 하천에 적용성이 떨어짐</td><td rowspan="2">•자료의 전처리(농도자료의 보간)로 인한 오차 발생 가능성</td></tr>
<tr><td colspan="2">•순간주입의 경우 정상상태로의 변환이 필요</td></tr>
</table>

(1) 단순 모멘트법(SMM: simple moment method)

단순 모멘트법은 임의의 지점에서 농도의 횡분포를 통해 얻을 수 있는 2차 모멘트의 종방향 변화율이 횡분산계수와 비례한다는 원리를 이용한 방법이다. 본 연구에서는 Sayre and Chang(1968)이 유도한 방법을 이용하였다. 2차원 이송-분산방정식은 정상상태 농도조건에 대해서 시간항은 사라지고 종분산은 무시될 수 있다. 유속과 수심 모두가 일정하다고 가정하고 횡방향 유속 역시 무시할 정도로 작다고 가정한다면 2차원 이송-분산방정식은 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$u\frac{\delta C}{\delta x} = D_T \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} \tag{2.1.9}$$

식(2.1.9)의 양변에 y^2 을 곱하고 횡방향 y에 대하여 적분하면 횡분산계수를 위한 단순모멘트법은 식(2.1.10)과 같이 정리된다.

$$D_T = \frac{u}{2}\frac{\delta}{\delta x}\left(\frac{\int_0^W Cy^2 dy}{\int_0^W C dy}\right) = \frac{u}{2}\frac{d\sigma_y{}^2}{dx} \tag{2.1.10}$$

여기서 σ_y^2 은 수심 적분된 횡방향 농도 분포의 횡방향 분산을 나타낸다.

(2) 유관 모멘트법(SMM: simple moment method)

단순모멘트법은 하폭이 변화하는 단면을 가진 하천이나 사행을 갖는 하천일 경우 분산을 산정하는데 있어서 그 결과가 정확하지 못한 단점을 갖고 있다. 이러한 단순모멘트법의 취약성을 극복하기 위하여 Beltaos(1980)는 유관 모멘트법을 제안하였다. 기존 모멘트법을 이용한 횡분산 계수 산정방법에 유관모형을 결합시켜 새로운 모멘트법을 제안하였으며 농도장이 정상상태일 때 유관모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dC}{dx} = E_y \frac{d^2C}{dq^2} \tag{2.1.11}$$

여기서 q는 좌안에서 횡방향으로 임의의 지점까지의 누적유량으로서 다음과 같이 표현된다.

$$q(y) = \int_0^y hudy \tag{2.1.12}$$

E_y 는 확산인자로(diffusion factor) 다음과 같이 표현된다.

$$E_y = \psi D_T UH^2 \tag{2.1.13}$$

여기서 U는 단면평균유속, H는 단면평균수심이다. 그리고, ψ 는 무차원 유속형상계수(dimensionless “shape-velocity” factor)로 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \frac{1}{Q}\int_0^Q h^2 u dq \tag{2.1.14}$$

식 (2.1.14)를 무차원화 시킨 후 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dC'}{dx} = \frac{E_y}{Q^2}\frac{d^2C'}{d\eta^2} \tag{2.1.15}$$

여기서 $\eta \equiv \frac{q}{Q}$, $C' \equiv \frac{C}{C_\infty}$, $C_\infty = \int_0^1 C d\eta$ 이다. 식 (2.1.15)에 2차 모멘트를 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma_\eta^{\,2}}{dx} = \frac{2E_y}{Q^2}\left[1-\left(1-\eta_0\right)C_1' - \eta_0 C_0'\right] \tag{2.1.16}$$

여기서 $\sigma_\eta^{\,2}$ 은 $C'-\eta$ 분포의 분산, $\eta_0 = \int_0^1 \eta C' d\eta$ 이다. 또한 C_0', C_1'는 각각 좌안과 우안에서의 무차원 농도이다. 식 (2.1.16)에서 $f(x) = 1-\left(1-\eta_0\right)C_1' - \eta_0 C_0'$ 로 정의하고 종방향에 대하여 적분을 취한다면 다음과 같은 최종 모멘트식이 도출된다.

$$\sigma_\eta^{\,2} = \frac{2E_y}{Q^2}\int_0^x f\left(x\right)dx \tag{2.1.17}$$

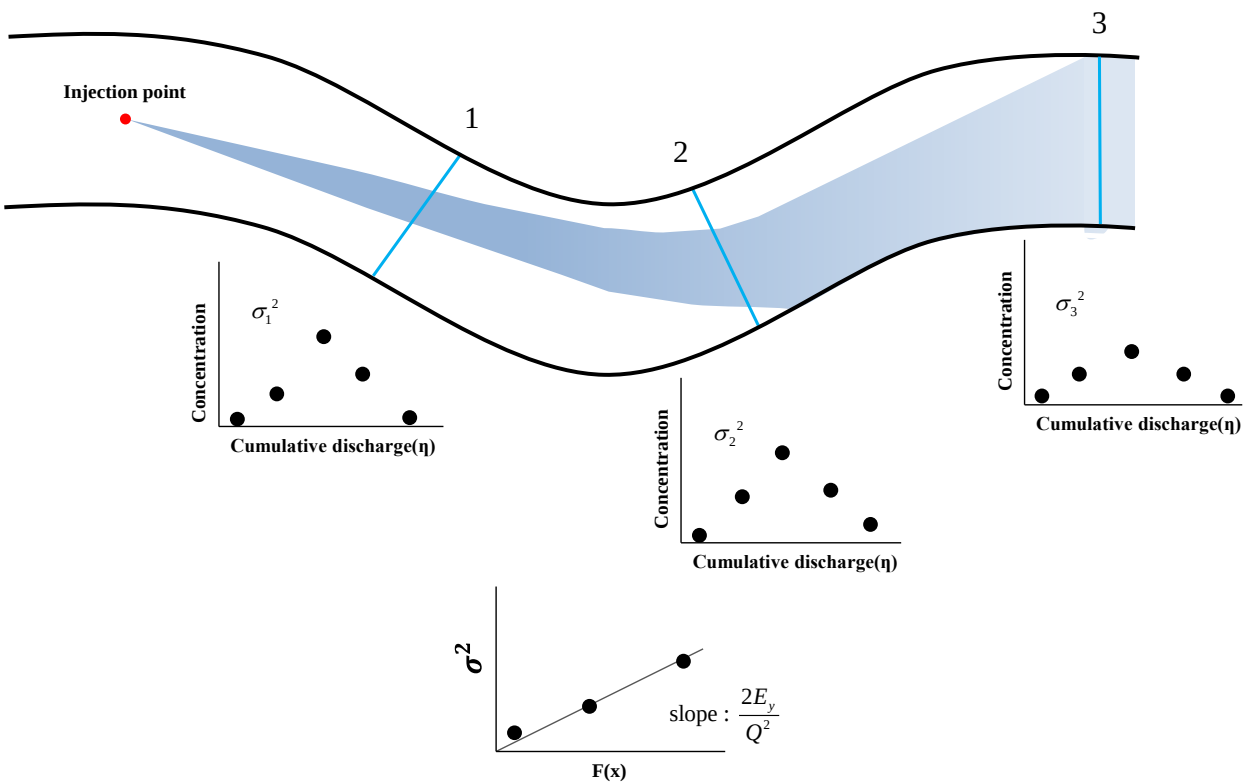


그림 2.1.3 유관모멘트법 개념도

식 (2.1.17)에서 $\sigma_\eta{}^2$ 과 $\int_0^x f(x)dx$ 는 1차 함수 관계이며 각 측선의 값을 도시한 그래프에서 기울기가 $\frac{2E_y}{Q^2}$ 이므로 여기서 E_y 를 구할 수 있다. 계산된 E_y 를 이용하면 식 (2.1.13)을 통해 횡분산계수(D_T)를 계산해 낼 수 있다.

2.2 2차원 수치모형

오염물질을 거동을 예측할 수 있는 2차원 수치모형 RAMS(River Analysis and Modeling System)를 적용하기 위하여 하천실험을 통해 취득한 데이터와의 비교를 통하여 수치모형을 검증하였다. RAMS는 복잡한 지형과 흐름 조건을 갖는 자연하천의 흐름, 오염물질의 이송확산을 모의할 수 있는 2차원 유한요소 수치해석 프로그램이다. 수리동역학적 흐름을 2차원으로 분석하는 HDM-2D와 오염물질 혼합을 2차원으로 분석하는 CTM-2D로 구성되어있으며 모델링 프로세스는 그림 2.2.1과 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전처리 과정의 격자 생성 모듈을 통해 생성된 지형 파일(rgo)을 개별 해석모형에서 공통적으로 사용하게 된다.

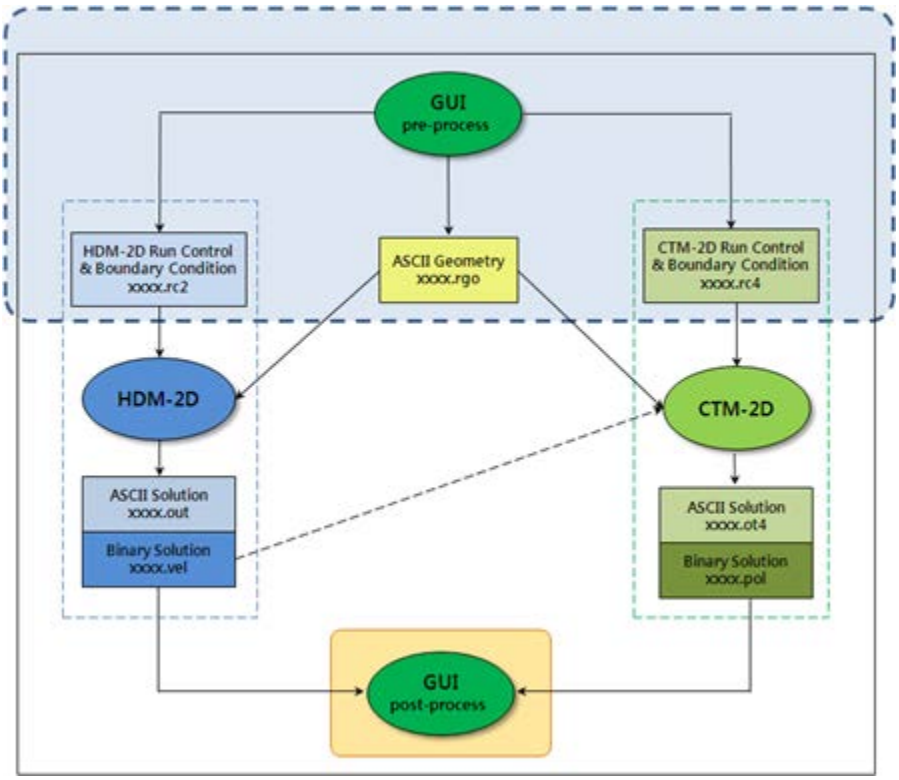


그림 2.2.1 RAMS의 모델링 프로세스(국토교통부, 2014)

2.2.1 **HDM-2D**

HDM-2D는 SU/PG기법을 이용한 2차원 수치모형으로 복잡한 지형 및 자연 하천구조의 동역학적인 흐름환경을 효과적으로 다루며 오염물질의 이송-확산 해석과 연계 가능하도록 개발된 하천 흐름특성의 해석 및 예측할 수 있는 효율적이고 정확한 유한요소모형이다. 사용되는 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} + u_j \frac{\delta u_i}{\delta x_j} = -g \frac{\delta (h_0 + h)}{\delta x_i} + \frac{\delta}{\delta x_j}\left(\nu_{ij} \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right) - g n^2 \frac{u_i \sqrt{\boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{u}}}{h^{4/3}} \tag{2.2.1}$$

위 식에서 u_i 는 i가 1인 경우에는 x방향 수심평균 유속, i가 2인 경우에는 y방향 수심평균 유속이다. g는 중력가속도, n은 조도계수를 의미하며 ν_{ij} 는 텐서 형태의 난류점성계수를 나타낸다. h_0 와 h는 기준선으로부터 하상까지의 거리와 수심을 나타낸다. 여기에 대응하는 질량보존방정식은 다음과 같은 식을 채택하였다.

$$\frac{\delta h}{\delta t} + h\frac{\delta u}{\delta x} + u\frac{\delta h}{\delta x} + v\frac{\delta h}{\delta y} + h\frac{\delta v}{\delta y} = 0 \tag{2.2.2}$$

2.2.2 CTM-2D

CTM-2D는 다음과 같은 수심 적분된 2차원 이송-확산 방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 하천과 같이 수심의 깊이가 흐름 방향 및 폭 방향의 길이에 비해 작은 영역을 모의하는데 있어서 대체로 이와 같은 수평 2차원 이송-분산 방정식이 사용된다(이명은, 2007).

$$\frac{\delta(hC)}{\delta t}+\frac{\delta\left(h\overline{u_i}C\right)}{\delta x_i}-khC-F=\frac{\delta}{\delta x_i}\left[h\left(D_{ij}\frac{\delta C}{\delta x_j}\right)\right] \qquad (2.2.3)$$

여기서 $i, j=1,2$, C 는 수심 적분된 농도로서 사용자가 구하고자 하는 값이다. $\overline{u_i}$ 는 수심 적분된 유속이고, h는 수심으로서 이 값들은 HDM-2D의 모의결과를 입력 값으로 한다. k는 반응성 오염물질의 감쇠계수이며, F는 생성 및 소멸 함수이고 는 D_{ij} 분산텐서의 요소이다.

D_{ij} 는 지표수에서 발생되는 전단흐름의 물리적 해석으로부터 유도된 Fischer식(Fischer 등, 1979)과 곡선좌표계(Curvlinear coordinate)에서 정의된 2차원 이송-분산 방정식을 직교좌표계(Cartesian coordinate)로 변환함에 따라 유도된 Alavaian식(Alavain, 1986)으로 결정된다. Fischer식은 흐름 및 하폭방향에 대해 공간적으로 불균일한 분포를 나타내 물리적으로 정확한 분석결과를 도출할 수 있는 반면 연직 유속 분포식을 이용하여 계산되기 때문에 2차원 흐름모형과 연계하여 사용하는데 한계점이 있다. Alavian식은 분산계수의 흐름방향 변화를 계산할 수

있지만 하폭방향으로의 변화는 Fischer식에 비해 정확히 잘 나타내지 못한다. 그러나 수심평균 유속분포를 이용하여 계산하기 때문에 2차원 흐름모의결과와 연계할 수 있는 장점이 있다.

Fischer식은 아래식과 같이 종, 횡 방향 유속의 연직편차의 삼중적분식으로 유도된다.

$$D_{ij} = \frac{1}{h}\int_0^h u_i' \int_0^z \frac{1}{\varepsilon_z}\int_0^z u_j' dzdzdz \tag{2.2.4}$$

여기서, ε_z 는 연직난류확산계수 u_i' , u_j' 는 종, 횡 방향유속의 연직편차이다. Fischer식의 계산을 위해 CTM-2D는 유속의 연직분포식을 이용하며 종 방향 유속분포식은 Rozovskii(1957)가 제안한 로그분포식(식 2.2.5)을, 횡 방향 유속분포식은 Odgaard(1986)가 제안한 선형분포식(식 2.2.6)을 이용했다.

$$\frac{u_s(\zeta)}{\overline{u_s}} = 1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C_h}(\ln\zeta) \tag{2.2.5}$$

$$u_n(\zeta) = \overline{u_n} + 2(u_n)_s(\ln\zeta) \tag{2.2.6}$$

여기서, u_s, u_n은 종, 횡 방향 연직유속분포, $\overline{u_s}$, $\overline{u_n}$은 수심평균 된 종, 횡 방향 유속, $\zeta = \frac{z}{h}$, κ는 von Karman 상수, C_h는 Chezy계수, $(u_n)_s$ 는 횡 방향 수표면 유속이다. 좌표변환에 의해 유도된 Alavian식은 식 2.2.7과 같다.

$$D_{xx} = D_L \frac{u^2}{U_a^{\,2}} + D_T \frac{v^2}{U_a^{\,2}}$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \left(D_L - D_T\right) \frac{uv}{U_a^{\,2}} \qquad (2.2.7)$$

$$D_{yy} = D_T \frac{u^2}{U_a^{\,2}} + D_L \frac{v^2}{U_a^{\,2}}$$

여기서, U_a는 합유속 벡터의 크기($\sqrt{u^2+v^2}$)이며 D_L은 종분산계수, D_T는 횡분산계수로 사용자에 의해 입력된 값으로 정의된다.

지배방정식에 유한요소법을 적용시켜 생성된 대수방정식을 풀어서 얻어낸 결과값이 모의 결과 $C(x,y,t)$가 된다.

III. 실험적 연구

3.1 실험 대상 하천

3.1.1 대상 지역

농도추적실험 대상 하천 선정기준은 하천 규모가 중규모 이상의 하천의 흐름을 방해하는 인공구조물의 수가 적은 자연하천이며 유량이 충분하고 지류부로부터 오염물질이 유입되면서 합류부에 의한 혼합현상을 검토할 수 있는 구간을 포함하는 하천으로 선정하였다. 또한 인공적인 추적자 물질의 주입이 필요 없는 자연 추적자를 이용한 농도추적 실험을 위하여 실험 구간 중 본류로 오염물질이 상시 유입되는 지류가 있어야 한다.

따라서 위와 같은 조건을 만족하는 지역으로 인근에 대구광역시가 있는 금호강과 성서공업단지가 있는 진천천이 하천의 좌안으로부터 합류되는 구간을 포함하는 낙동강 강정고령보 하류 구간을 실험 대상 지역으로 최종 선정하였다. 자세한 하천 유황은 표 3.1.1와 같으며 위치 및 현장 사진은 아래 그림과 같다.

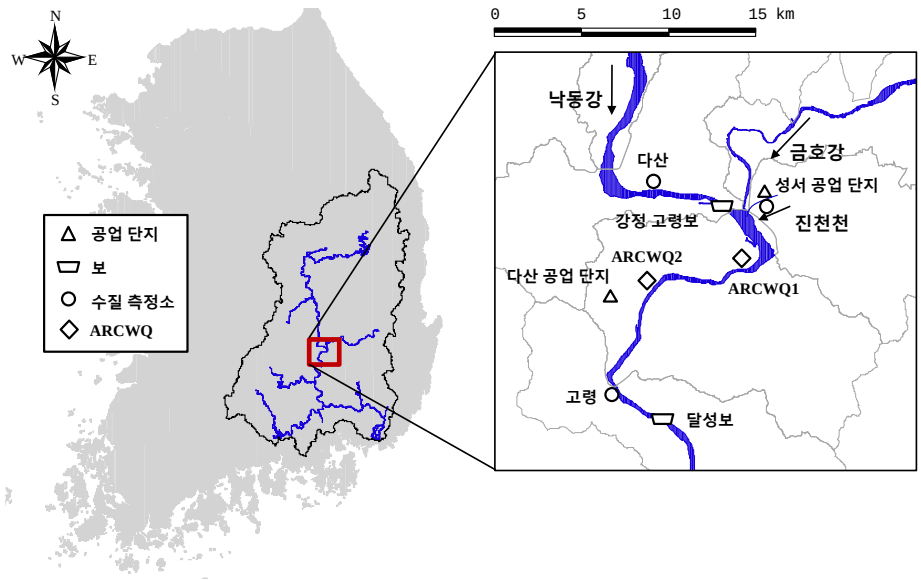


그림 3.1.1 실험 대상 지역

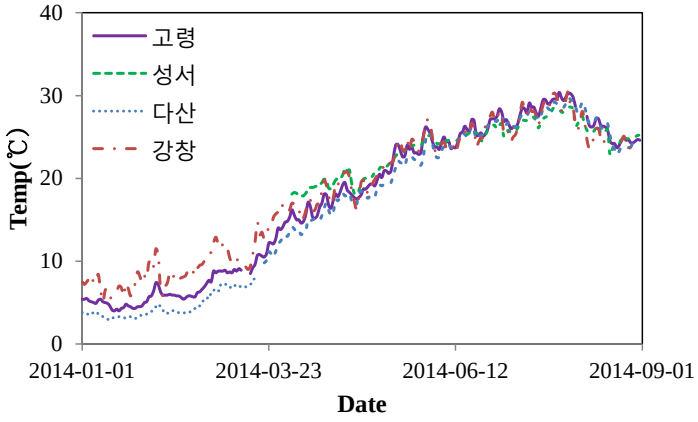
그림 3.1.2 합류부 구간 Heli-Cam 사진

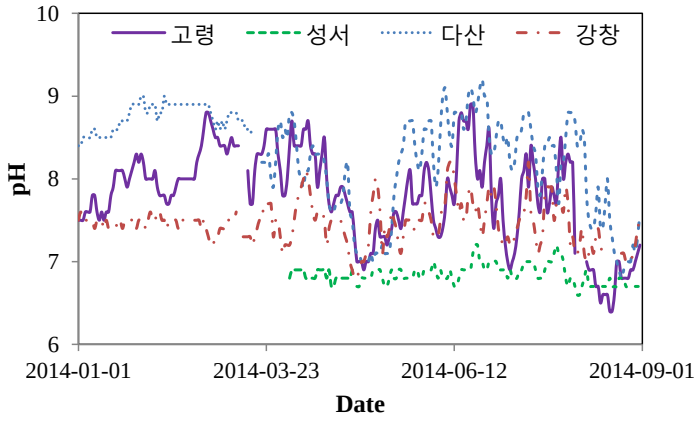
표 3.1.1 낙동강 및 금호강 유황

하천명	관측소명	갈수량 (m^3/s)	저수량 (m^3/s)	평수량 (m^3/s)	풍수량 (m^3/s)	연평균 유량 (m^3/s)
낙동강	진동	32.5	120.2	198	381.1	434.5
금호강	금호	2.04	5.5	6.7	8.8	16.1

3.1.2 수질 분석

선정된 지역 주변에는 연구를 위해 ARCROM(첨단기술 기반 하천 운영 및 관리 선진화 연구단)에서 설치한 자동 수질센서(ARCWQ1, ARCWQ2)가 두 곳에 설치되어 있으며 그 외에도 환경부에서 운영하고 데이터를 제공하는 자동수질측정소가 있다. 그 중 성서, 다산, 고령과 자체적으로 설치한 ARCWQ 수질센서의 2014년 1월 1일부터 8월 31일까지의 데이터를 분석하였다. 성서의 경우 결측값에 의하여 2014년 4월 2일부터의 데이터를 사용하였다. 먼저 수온의 경우에는 세 관측소의 값 모두 계절에 따라 변화하는 비슷한 경향을 나타냈다. pH의 경우 본류 에 위치한 다산과 고령의 경우 비슷한 경향을 보이며 6에서 9 사이에서 변화 하였으나 성서의 경우 6후반대의 값으로 일정한 경향을 보였다. 전기전도도 값의 경우 성서, 강창, 고령, 다산 순으로 높은 값을 나타냈으며 성서의 경우 인근 성서공업단지의 하폐수처리장에서 나오는 오염물질에 의하여 본류에 비해 400~600 $\mu S/cm$ 정도 높은 값을 나타내며 강창 역시 대구시로부터 유입되는 오염물질에 의하여 400~600 $\mu S/cm$ 정도 높은 전기전도도 값을 보였다. 실제 실험 구간에 해당하는 곳에 설치된 ARCWQ1과 ARCWQ2의 데이터를 보면 온도의 경우 앞선 세 곳의 측정소와 비슷한 계절에 따른 경향을 보였으며 pH의 값의 경우에도 앞선 다산과 고령 관측소와 비슷한 양상을 보였다. 전기전도도는 고령 관측소와 매우 유사한 경향을 보였다. 또한 ARCWQ1과 ARCWQ2간의 거리 차로 인하여 하루 정도의 위상차를 보였다.





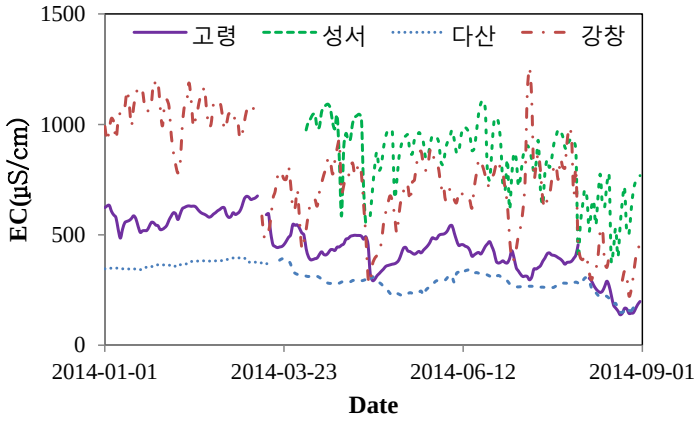
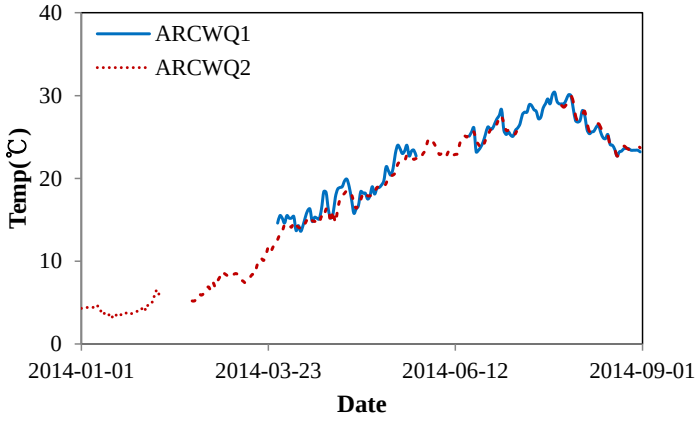
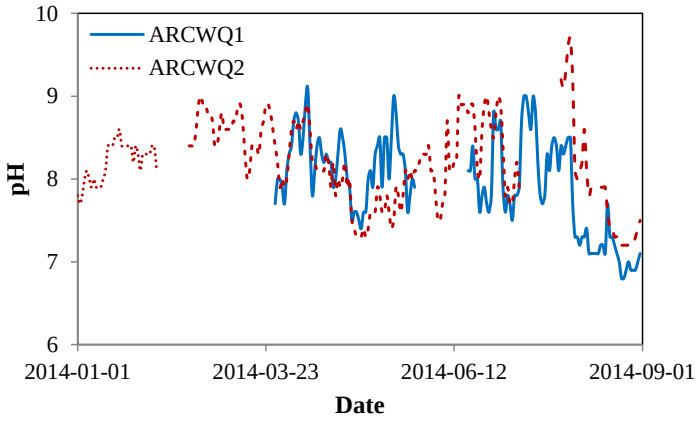


그림 3.1.3 자동수질 측정소 온도, pH, 전기전도도 자료





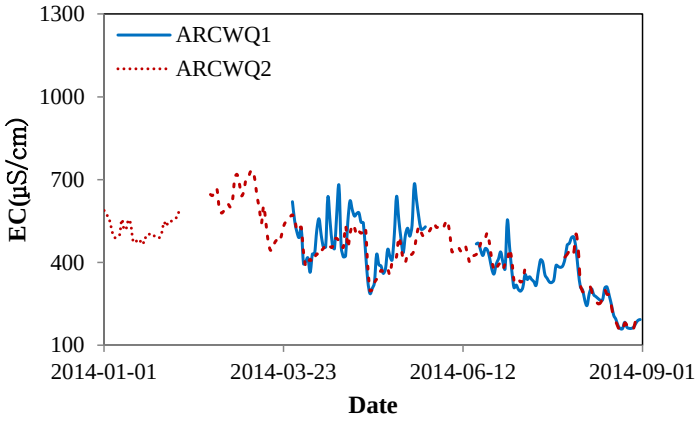


그림 3.1.4 ARCWQ 온도, pH, 전기전도도 자료

3.2 수리량 측정

본 연구에서는 수리량 측정을 위해서 RDI사의 Workhorse Sentinel ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)를 사용하였다. Workhorse Sentinel ADCP는 자체적으로 배터리 및 메모리를 내장하고 있어 취득한 유속자료를 내부메모리에 저장하는 형태로 사용되는 가장 보편적인 형태의 ADCP이다. 유속 측정 범위는 $\pm 20 m/s$ 이며 분해능은 $0.1 cm/s$, 정확도는 $\pm 0.5\%$ 이다. 현장 하천에서의 측정을 위하여 ADCP 및 주변기기를 연결할 수 있는 보조 보트에 장착시킨 후 주 보트와 함께 횡단면을 이동하면서 측정을 진행하였다.

ADCP는 유수의 흐름을 방해하지 않으면서 음파의 도플러 효과를 이용하여 수심에 따른 3차원 유속 분포를 수집하고 이를 이용하여 유량을 측정하는 장비이다(USGS, 2009). ADCP는 하천 횡단면 상에서 단시간에 유량을 측정할 수 있다는 장점으로 인해 각광받고 있을 뿐만 아니라 하천의 3차원적 흐름에 대한 정보를 제공함으로써 유사 이송, 확산 등의 수리적 현상을 연구하는데 도움을 주고 있다. 나아가 최근에는 ADCP를 이용하여 획득한 유속자료가 하천 흐름에 대한 수치 모의를 검증하는 기초적인 자료로도 사용되는 등 그 용도는 점차 확대되고 있다.

그림 3.2.1 Workhorse Sentinel ADCP

그림 3.2.2 보조보트와 연결한 ADCP

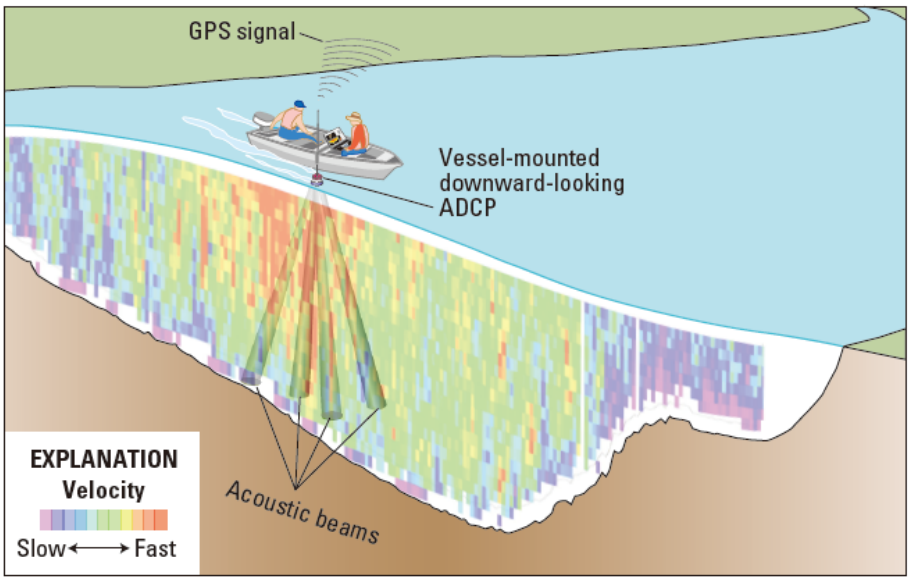


그림 3.3.3 보트를 이용한 ADCP 측정 개요도(USGS, 2009)

3.3 농도추적 실험

일반적으로 추적자 실험에 사용되는 추적자 물질은 크게 염료, 음이온, 기타 장비 등으로 구분할 수 있으며 각각의 특성은 표 3.3.1와 같다. 해외에서는 1960년대 초기부터 추적자(tracer)로서 형광색소(Fluorescein)가 광범위하게 사용되어 왔다(Feuerstein와 Sellek, 1963). 국내에서는 형광추적자를 주입하고 그 농도를 형광광도계(fluorometer)를 이용하여 분석하는 추적자시험 사례가 최근에 수행된 바 있다(환경부, 2013).

그러나 본 연구에서는 기존 추적자 실험과는 다르게 자연하천에 추적자 물질을 인공적으로 주입하는 것이 아닌 기존 도심지역과 공단의 하폐수처리장으로부터 하천으로 유입되는 오염물질을 자연추적자 물질로 이용하는 농도추적 실험을 제안하였다. 이러한 실험 방법은 기존 추적자 실험과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다.

첫째, 인공적으로 실험해 필요한 추적자 물질을 주입하지 않아 이를 수행하기 위한 장비나 추적 물질을 사용할 필요가 없어 경제적으로 실험을 하는데 필요한 비용이 절감되는 경제적인 효과를 갖는다. 둘째, 기존 추적자 실험들은 생태계에 영향을 미치는 영향이 적다고 알려져 있기는 하나 인공적으로 추적자 물질을 주입하므로 어느 정도는 생태계에 영향을 미친다고 할 수 있다. 특히 대형하천의 경우 인공적인 추적자를 주입하여 추적자 실행을 진행하는 것이 매우 어려운 실정이다. 그러나 본 연구에서는 인공적인 추적자의 주입 없이 일반적인 하천 상태에서 실험을 진행하므로 하천 생태계에 최소한의 영향을 미치게 된다. 셋째,

하폭과 유량이 작은 곳에서 수행되던 기존 추적자 실험들과는 다르게 하폭이 넓고 유량이 큰 중규모 이상의 하천에서도 추적자 실험을 수행할 수 있다. 마지막으로 실제 수질지표인자로 사용되는 전기전도도를 이용하여 실험을 진행함으로써 차후 수질연구에도 연계되어 사용될 가능성을 갖고 있다.

대상지역인 낙동강 금호강 합류부는 금호강 인근 도시인 대구로부터 유입되는 오염물질과 진천천의 성서공단으로부터 배출되는 오염물질로 인하여 낙동강 본류의 기저농도에 비하여 높은 전기전도도 값이 유입된다. 이와 같이 상시 유입되는 오염물질을 이용하여 추적자 물질이 연속적으로 주입된다고 가정하며 실험 절차를 요약하면 다음과 같다.

우선 하천의 혼합과정에 따라 수심방향으로 오염물질의 혼합이 완료됐다는 것을 확인하기 위하여 그림 3.3.1와 같이 합류부 이후 단면을 대상으로 하여 채수를 통한 연직혼합 분포를 확인한다. 연직혼합 분포 완료를 확인한 다음, 예비 실험을 통하여 전기전도도 및 수리량 측정을 진행할 단면을 결정한다. 그 다음 측선 설치 없이 결정된 단면을 따라 GPS가 설치된 보트를 통해 이동하며 수리량 및 전기전도도 값의 측정을 진행한다. 실험 개요도는 그림 3.3.2에 나타나 있다.

표 3.3.1 기존 추적자 실험의 종류 및 특성

	추적물질	특성
염료	Rhodamine WT	- 분홍빛 색, 보존이 잘되며 눈에 쉽게 띔 - 0.1 ppb까지 측정 가능 - 모래나 자갈 지형에 사용
	Fluorescein	- 기저농도 값이 높으며 녹색 형광색 - pH, salinity, oxidizing agent, and suspended solid 영향을 많이 줌
음이온	Cl-	- 기저농도값이 높아서 많은 양을 주입 - 물질에 대한 반응성이 낮다 - 측정 : EC, ion seletive electerode (ISE), IC
	I-	- 극소량으로도 측정이 가능 - 생물활동에 영향 - 측정 : EC, ion seletive electerode (ISE), IC
장비	GPS Float	- 장시간, 넓은 구간의 하천류에 대한 Lagrangean 거동 및 하천류의 분산특성을 산출 가능 - GPS 위치오차에 대한 보정필요 - 하천 폭에 따라 다수의 Float 필요, 기기 유실 가능성
	LSPIV	- 비교적 넓은 구간에 적용 가능 - 관측범위가 제한적(촬영 가능 구간이 제한적)

그림 3.3.1 연직혼합 분석을 위한 채수

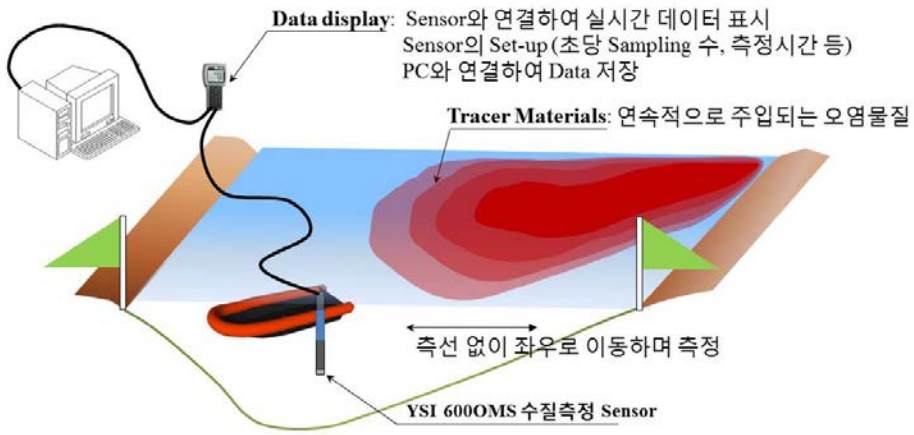


그림 3.3.2 농도추적 실험 개요도

3.3.1 전기전도도(EC)

전기전도도란 물속에서 전류가 통과할 수 있는 능력을 측정한 값을 의미한다. 전기전도도는 수질 측정을 위한 요인 중 한 가지이며 이러한 전기전도도 값의 변화를 통하여 특정 오염원이 하천에 유입되었음을 알 수 있다. 물 속에서의 전기전도도 값은 chloride, nitrate, sulfate, phosphate 등과 같은 무기물 음이온과 sodium, magnesium, calcium, iron, aluminum 등의 양이온의 용존 정도에 의해 영향을 받는다. 기름, 페놀, 알코올, 당분과 같은 유기물의 경우 물 속에서 전류 전달 능력이 높지 않아 미치는 영향이 작다. 전기전도도 값은 수온에 의해서도 영향을 받으며 수온이 높을수록 전도도가 더 커진다. 이로 인하여 일반적인 전기전도도의 경우 25℃ 실온 상태의 값을 사용한다.

전기전도도 측정 기본 단위는 mho또는 Siemens이며 주로 단위 길이당 단위인 micromhos per centimeter 또는 micro Siemens per centimeter를 사용한다. 일반적인 증류수의 경우 0.5~3 micromhos per centimeter의 값을 갖는다. USGS의 조사 결과에 따르면 자연하천의 경우 일반적으로 50에서 1500 micromhos per centimeter의 범위를 가지며 물고기가 생활할 수 있는 내륙지방의 깨끗한 물의 기준의 경우 150 ~ 500 micromhos per centimeter로 알려져있다.

자연 하천에 존재하는 물은 간단한 상태의 수용액이 아닌 다양한 이온들이 녹아있는 상태로 존재한다. 따라서 전기전도도와 물 속에 녹아있는 물질들의 관계를 파악하는 것은 중요하다. 선행연구에

따르면, 전기전도도 값과 용해된 물질의 양과 관계를 정리한 결과 다음과 같은 $a = 0.59$ 의 값을 갖는 선형관계를 만족하는 것을 확인할 수 있었다(Hem, 1985). 그림 3.3.3은 용존된 물질의 농도 값과 전기전도율의 관계를 나타낸다. 여기서 K는 도전율을, S는 용존된 고형물질의 농도를, a는 비례상수를 나타낸다.

$$K = \frac{1}{a}\mathrm{S} \quad \text{(for natural river, } 0.54<a<0.96\text{)} \tag{3.4.1}$$

3.3.2 측정기기 및 방법

본 연구에서는 전기전도도 및 수온 측정을 위해서 YSI사의 YSI 600OMS와 600XML를 사용하였다. YSI 600OMS와 YSI 600XML은 현장에서 사용하기 용이하도록 만들어진 제품으로 배터리 및 센서의 현장 교체가 편리하며 휴대가 간편하다. YSI 600 OMS의 경우 온도, 전기전도도, 수심 등을 기본으로 측정할 수 있으며 추가적인 광학 센서 연결을 통하여 Chl, Rhodamine, 탁도 등 다양한 수질 인자를 측정할 수 있다. YSI 600XML은 온도, 전기전도도, DO, pH 등을 측정할 수 있다. 전기전도도의 측정은 4개의 순수 니켈 전극을 통해 측정되며 2개의 전극은 전류를, 2개의 전극은 전압의 강하를 측정한다. 여기서 측정된 전압강하를

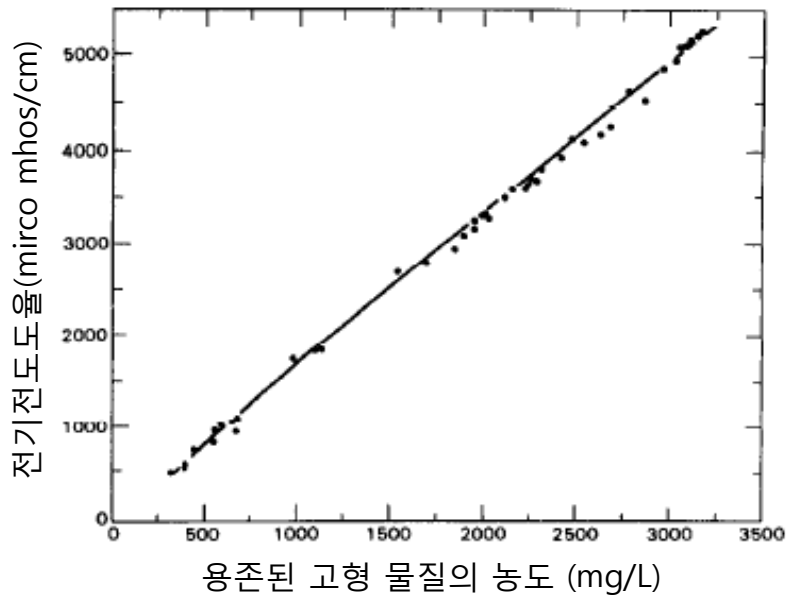


그림 3.3.3 용존 물질의 농도 값과 전기전도율의 관계(Hem, 1985)

그림 3.3.4 YSI-600 OMS, YSI-600 XML 센서

환산하여 전도도 값을 구해낸다. 측정 범위는 $0 \sim 100000 \mu S/cm$ 이며 분해능은 $1 \mu S/cm$, 정확도는 $\pm 0.5\%$ 이다. 수온측정은 온도 변화에 따른 저항의 변화를 이용하여 측정하는 온도센서(thermistor)를 사용한다. 하천에서의 측정을 위하여 보트와 함께 이동하며 수표면으로부터 약 40cm 부분에서 전기전도도 측정을 진행하였다. 측정된 데이터는 센서 내부 메모리에 저장되며 PC를 통하여 데이터를 불러온다.

3.4 실험 조건

총 4번의 실험이 진행되었으며 각각의 Case에 따라 측정단면이 변화하였다. 각 Case별 특징은 표 3.4.1에 정리하였다.

(1) Case ND-EC1

2014 년 6 월 27 일 실험을 진행하였다. 측정 단면의 위치는 그림 3.4.1 에 표시되었다. 수리량 측정은 Sec.2 부터 Sec.3-1 까지 총 4 개 단면에서 진행하였으며 본류에서의 농도 측정 단면은 Sec.-1 부터 Sec.3-1 까지 총 6 개의 단면에서 진행하였다. 지류 진천천에서의 유입을 알아보기 위하여 진천천 구간에 총 4 개의 센서를 설치하였다.

표 3.4.1 실험 Case 개요

Case	본류 농도측정 단면 수	본류 수리량 측정 단면 수	본류 측정 구간 길이 (m)	강정고령보 방류량 (m^3/s)	비고
ND-EC1	6	4	2100	221	
ND-EC2	4	4	2350	22	금호강 추가 측정
ND-EC3	10	4	6950	500	
ND-EC4	10	5	6950	701	

그림 3.4.1 Case ND-EC1 측정 지점

(2) Case ND-EC2

2014 년 7 월 16 일 실험을 진행하였다. 측정 단면의 위치는 그림 3.4.2 에 표시되었다. Case ND-EC2 에서는 금호강에서의 횡혼합 완료를 알아보기 위하여 디아크로부터 낙동강 합류부까지 2.9km 구간에서 K1~K4 총 4 개의 단면에 대하여 수리량과 농도측정을 진행하였다. 낙동강 본류에서의 수리량 측정은 Sec.1 부터 Sec.4 까지 총 4 개 단면에서 진행하였으며 본류에서의 농도 측정 단면은 Sec.-1 부터 Sec.4 까지 총 4 개의 단면에서 진행하였다. 지류인 진천천에서의 유입을 알아보기 위하여 진천천 구간에 총 6 개의 센서를 설치하였다.

(3) Case ND-EC3

2014 년 8 월 28 일 실험을 진행하였다. 측정 단면의 위치는 그림 3.4.3 에 표시되었다. Case ND-EC3 에서는 본류 측정 구간을 6.9km 로 확장하였으며 수리량 측정은 Sec.-1 부터 Sec.3 까지 총 4 개 단면에서, 농도측정은 Sec.-1 부터 Sec.9 까지 총 10 개 단면에서 진행하였다. 진천천과 금호강으로부터의 유입 농도를 알기 위하여 각각 J0, K0 단면에서 수리량 및 농도 측정을 진행하였다

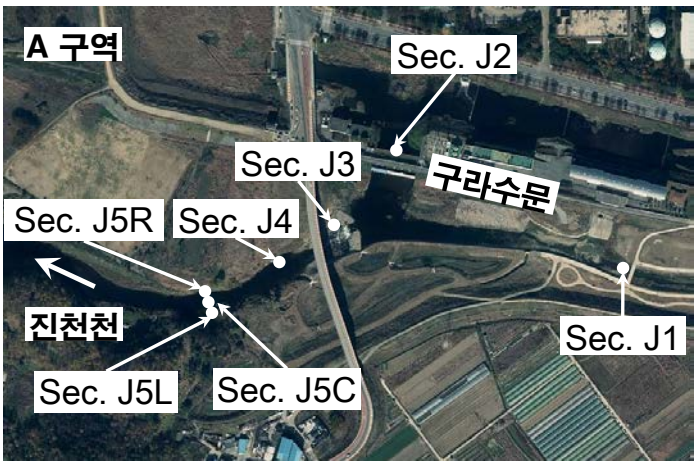


그림 3.4.2 Case ND-EC2 측정 지점

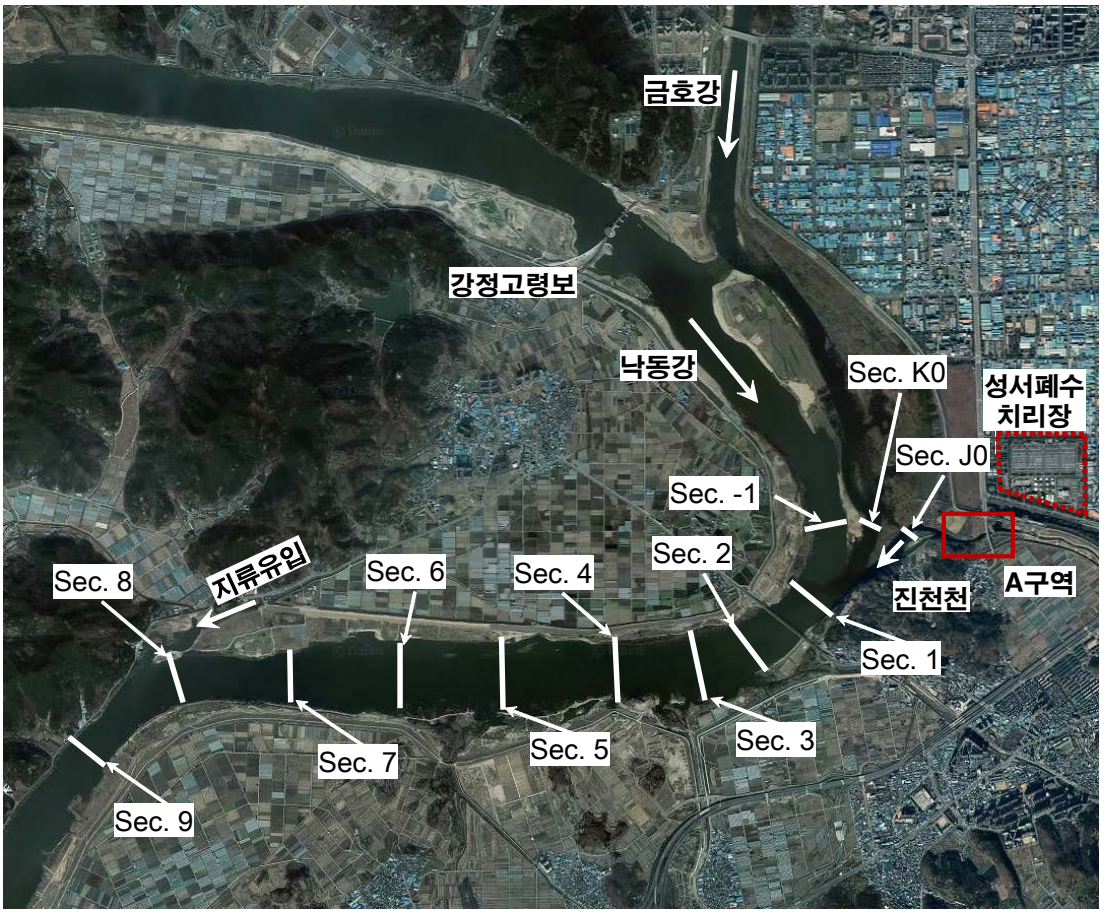


그림 3.4.3 Case ND-EC3 측정 지점

(4) Case ND-EC4

2014 년 10 월 23 일 실험을 진행하였다. 측정 단면의 위치는 그림 3.4.4 에 표시되었다. Case ND-EC4 에서는 본류 측정 구간을 Case ND-EC3 와 같게 하였으나 수리량 측정은 Sec.3 을 제외한 Sec.-1 부터 Sec.5 까지 총 5 개 단면에서, 농도측정은 Sec.-1 부터 Sec.9 까지 총 10 개 단면에서 진행하였다. 진천천과 금호강으로부터의 유입 농도를 알기 위하여 각각 J0, K0 단면에서 수리량 및 농도 측정을 진행하였다

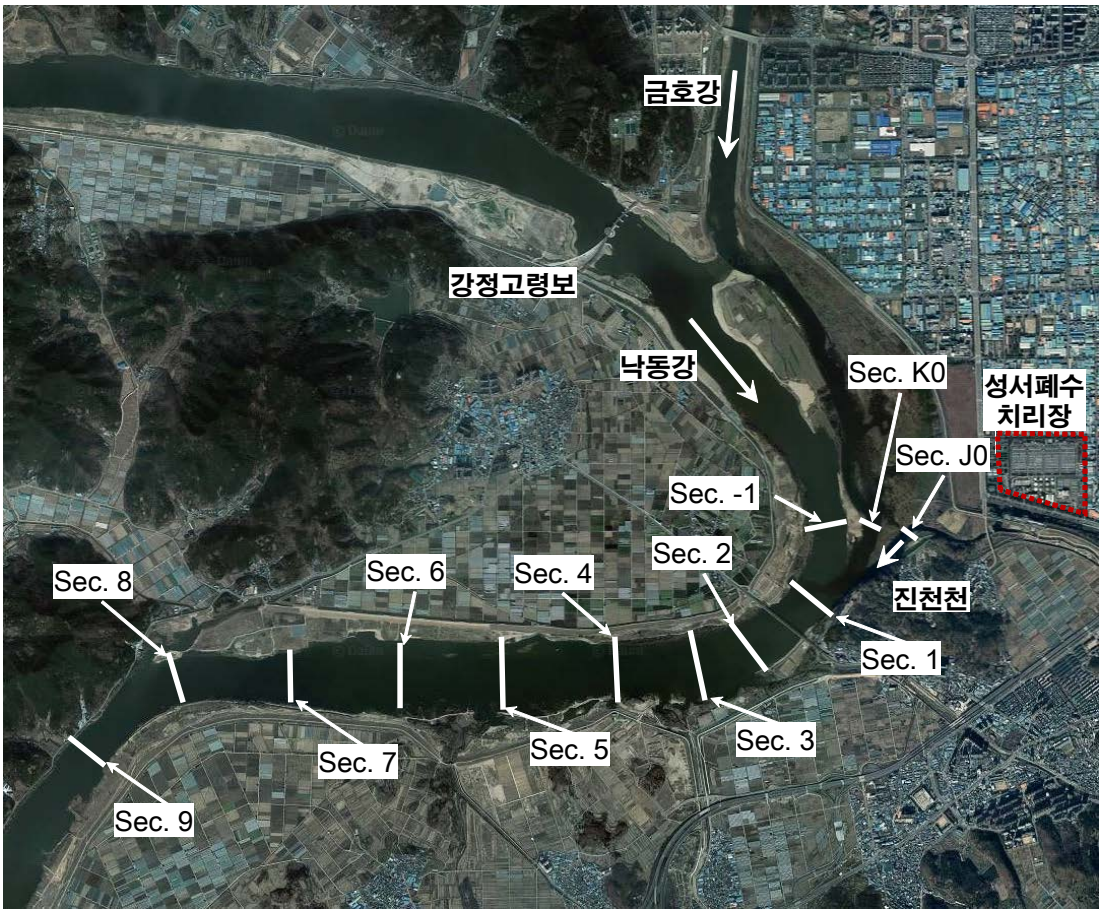


그림 3.4.4 Case ND-EC4 측정 지점

IV. 실험결과 및 분석

4.1 수리량 분석

(1) Case ND-EC1

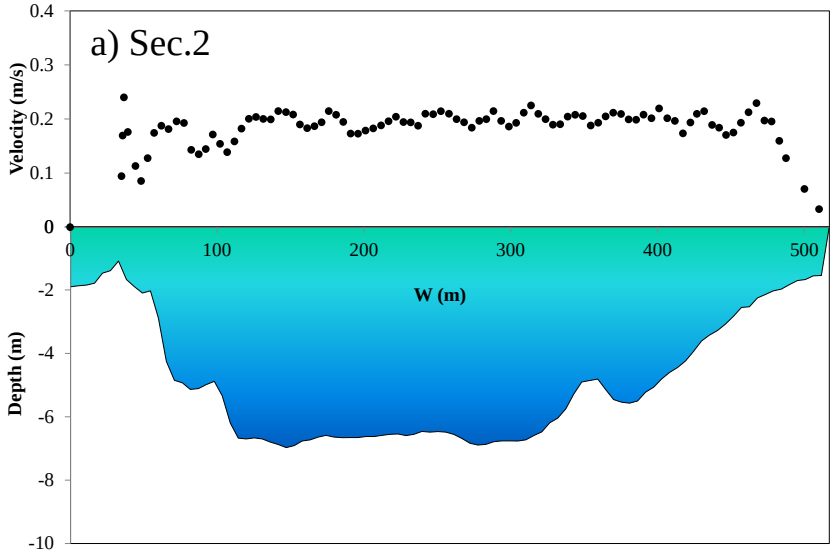
Case ND-EC1 실험에서 수리량은 낙동강 본류에서 총 4개의 단면에서 측정하였으며 수리량 측정결과는 표 4.1.1, 그림 4.1.1과 같다. 각 측선의 유량은 104 ~ 135 m^3/s의 값을 나타냈으며 평균 유량은 120 m^3/s이다. 구간 내 평균 수심은 4.57m, 평균 유속은 0.18m/s로 측정되었으며, 평균하폭은 505m이다. 실험구간의 평균 W/H는 111으로 수심에 비해 하폭이 넓은 형상을 나타내고 있다. 그리고 하상의 마찰영향을 나타내는 평균 U/U^*는 10.8로 나타났다.

(2) Case ND-EC2

Case ND-EC2 실험에서 수리량은 낙동강 본류에서 총 5개의 단면, 금호강 4개의 단면을 측정하였으며 수리량 측정결과는 표 4.1.2, 그림 4.1.2와 같다. 낙동강 본류에서의 유량은 27.7 ~ 80.7 m^3/s의 값을 나타냈으며 평균 유량은 64.4 m^3/s이다. 구간 내 평균 수심은 5.54m, 평균 유속은 0.19m/s로 측정되었으며, 평균하폭은 380m이다. 실험구간의 평균 W/H는 68.8으로 수심에 비해 하폭이 넓은

표 4.1.1 Case ND-EC1 수리량 자료

Case	측정 위치	Section	Q (m^3/s)	H (m)	U (m/s)	U^* (m/s)	W (m)	W/H	U/U^*
Case ND-EC1	낙동강 본류	2	104.3	4.59	0.17	0.016	517	113	10.8
		2-1	135.5	4.70	0.19	0.017	450	96	10.9
		3	125.5	4.58	0.18	0.017	445	97	10.8
		3-1	115.7	4.42	0.18	0.017	607	137	10.8
		평균	120.2	4.57	0.18	0.017	505	111	10.8



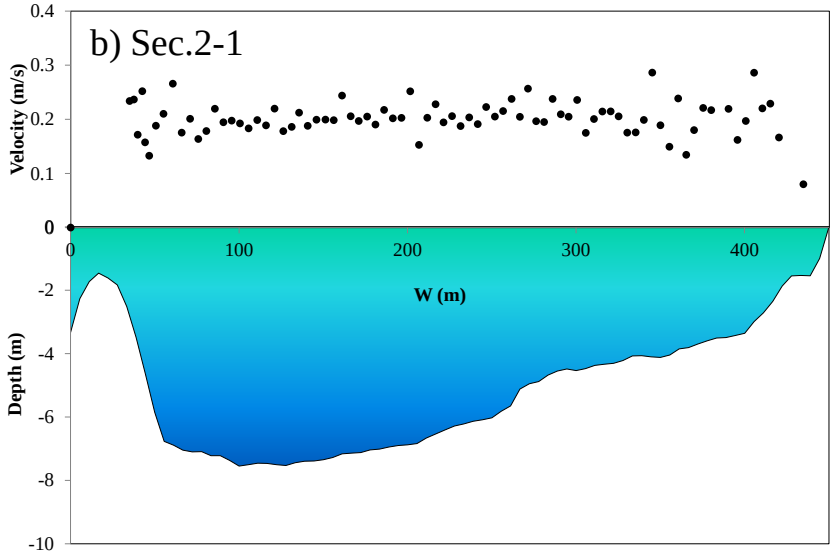
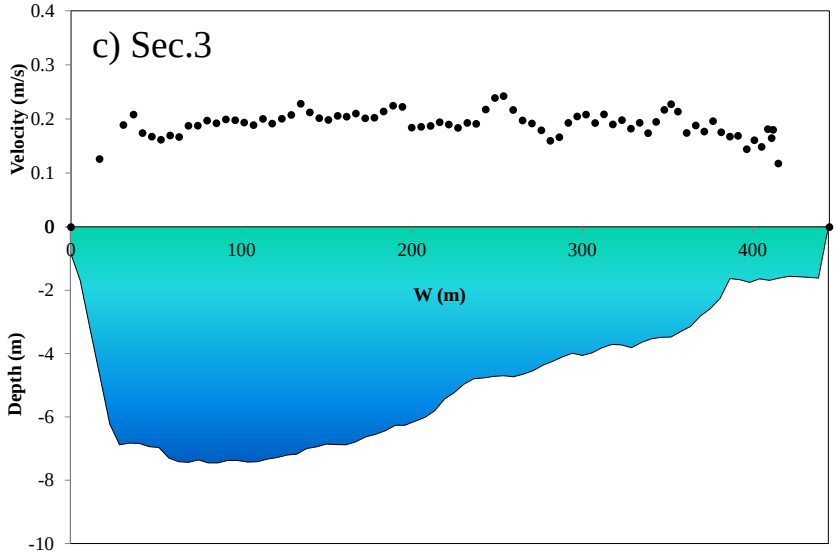


그림 4.1.1 Case ND-EC1 단면 별 유속 및 수심 그래프



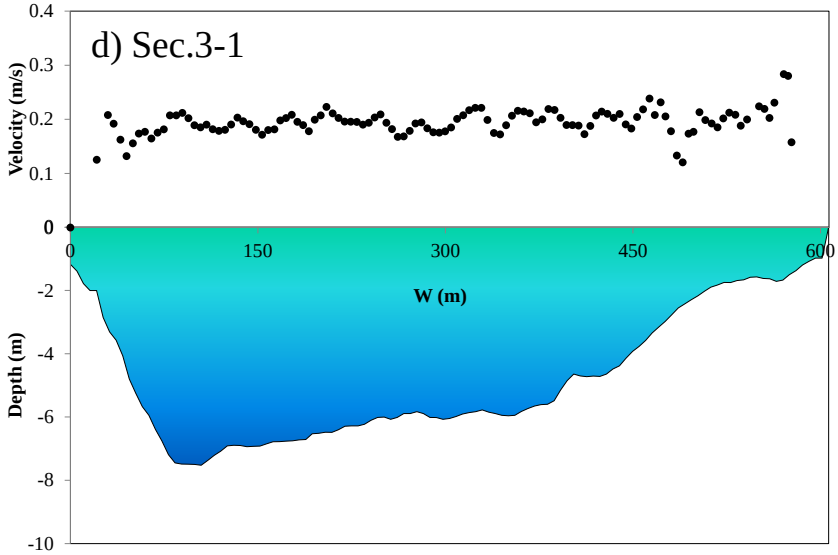


그림 4.1.1 Case ND-EC1 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

표 4.1.2 Case ND-EC2 수리량 자료

Case	측정 위치	Section	Q (m^3/s)	$H(m)$	U (m/s)	U^* (m/s)	$W(m)$	W/H	U/U^*
Case ND-EC2	낙동강 본류	-1	27.7	6.07	0.18	0.010	253	41.7	17.2
		1	61.1	5.65	0.18	0.011	291	51.6	17.0
		1-1	40.6	5.69	0.19	0.011	374	65.8	17.1
		2	75.3	5.40	0.19	0.011	451	83.4	16.9
		4	80.7	5.43	0.19	0.011	404	74.4	16.9
		평균	64.4	5.54	0.19	0.011	380	68.8	17.0
	금호강	K1	9.5	2.4	0.18	0.012	86	35.5	14.8
		K2	15.5	1.9	0.18	0.013	126	64.9	14.3
		K3	17.4	2.6	0.20	0.013	218	83.7	15.0
		K4	7.4	4.8	0.16	0.010	119	24.7	16.5
		평균	12.4	3.0	0.18	0.012	137	52.2	15.1

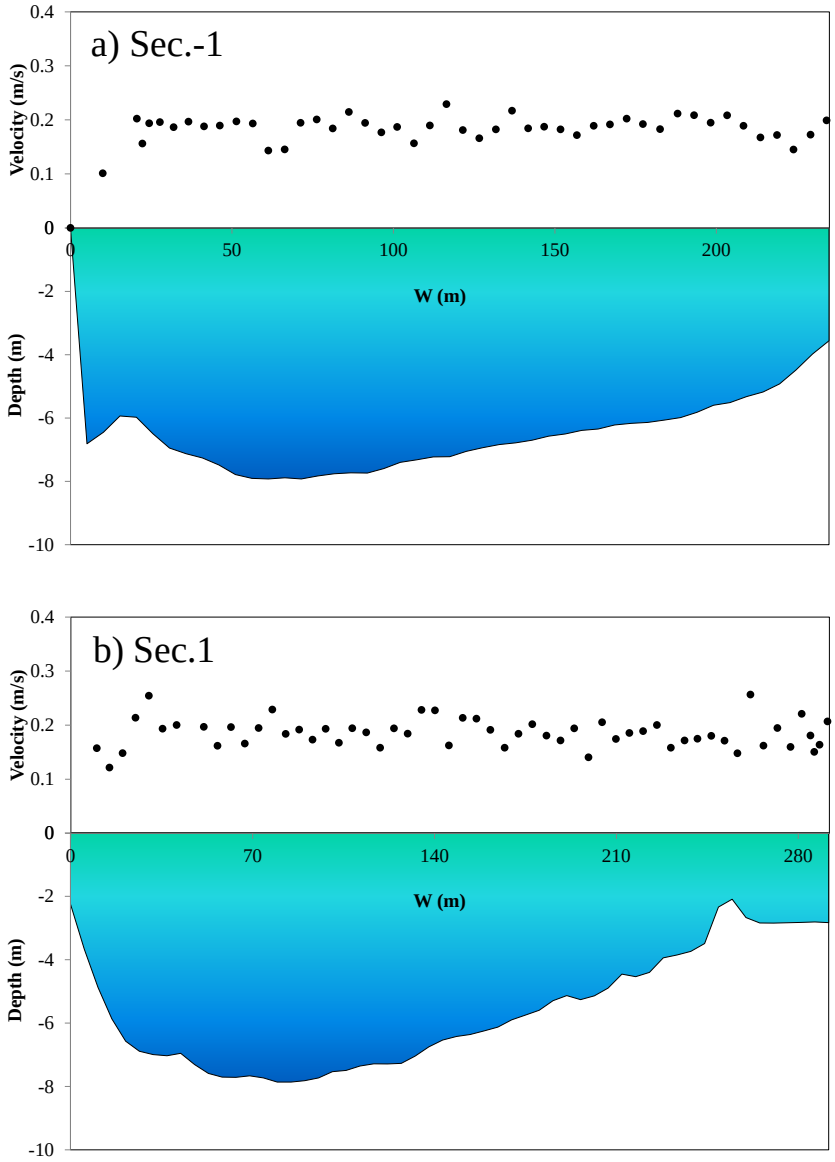


그림 4.1.2 Case ND-EC2 단면 별 유속 및 수심 그래프

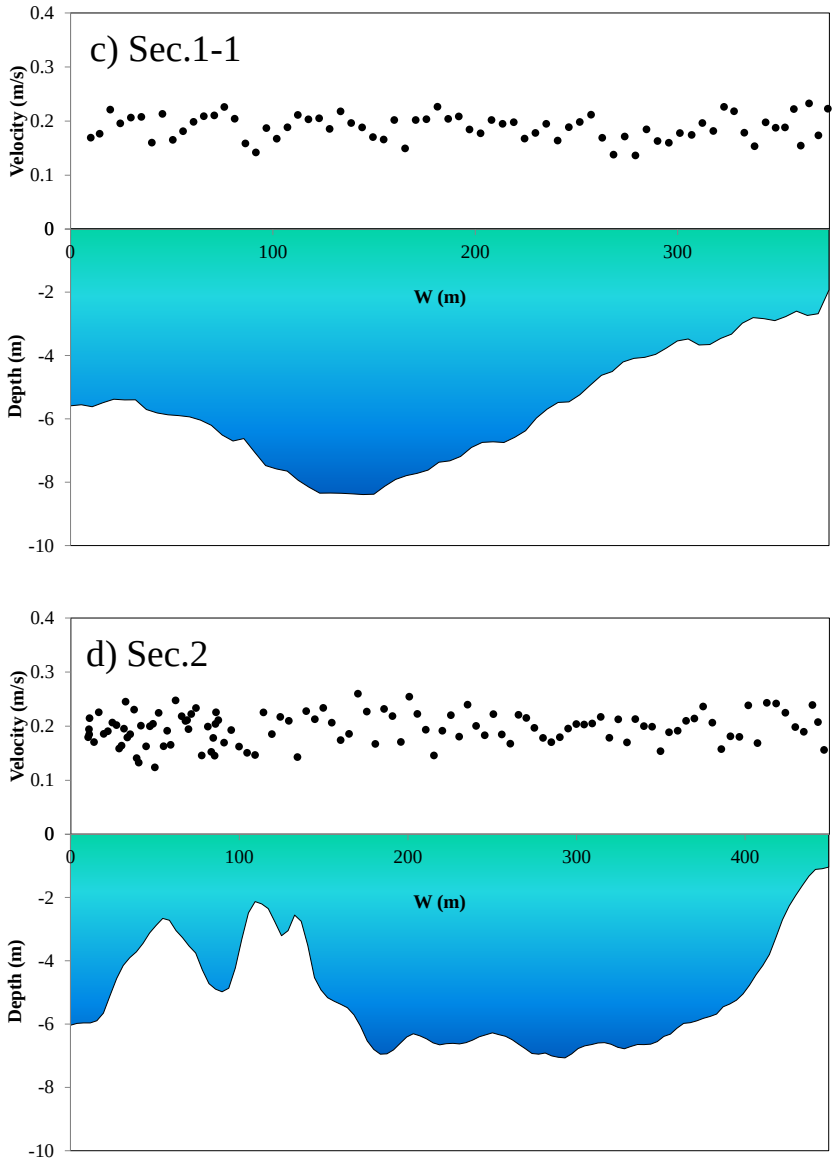


그림 4.1.2 Case ND-EC2 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

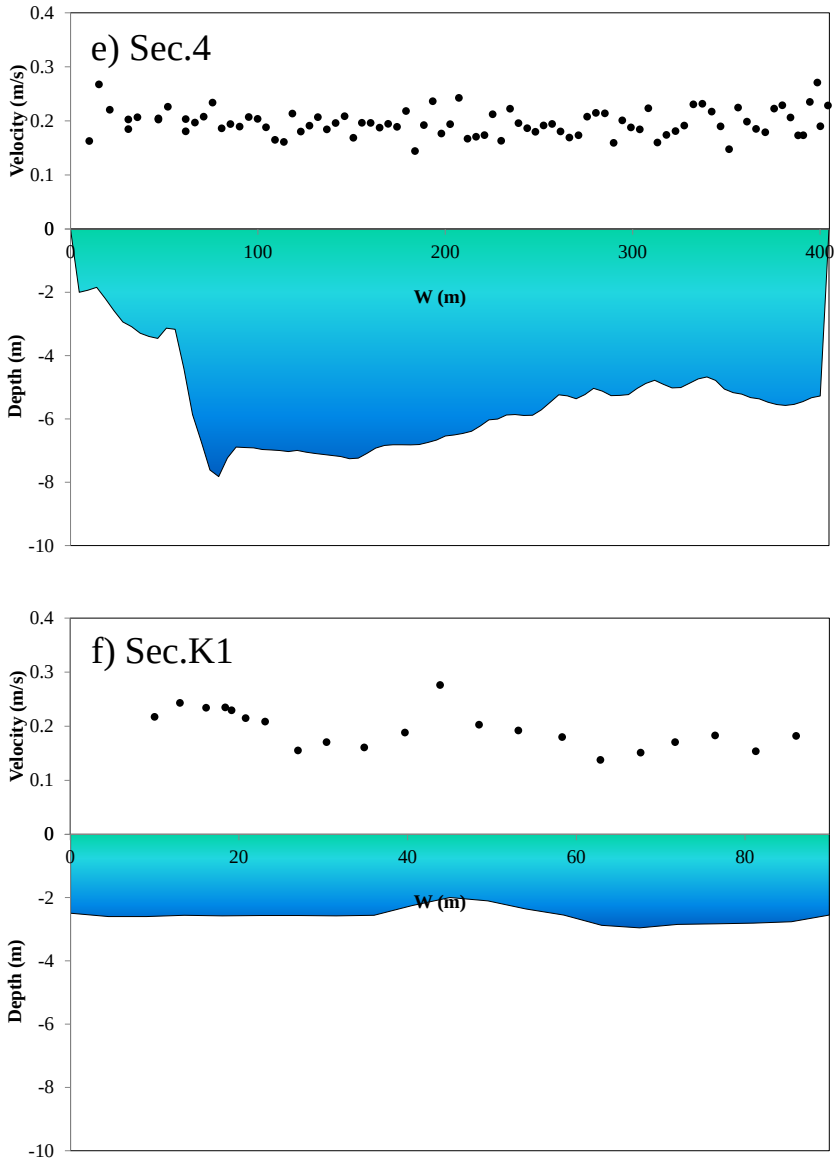
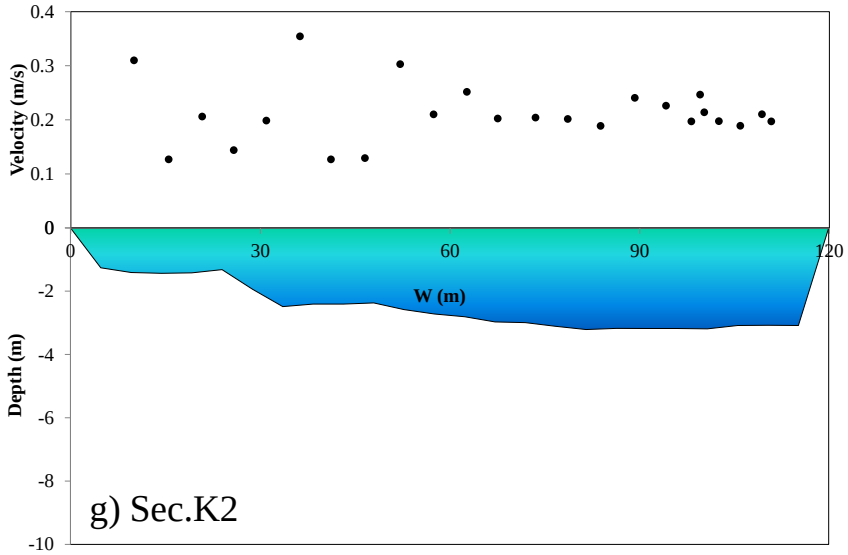


그림 4.1.2 Case ND-EC2 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)



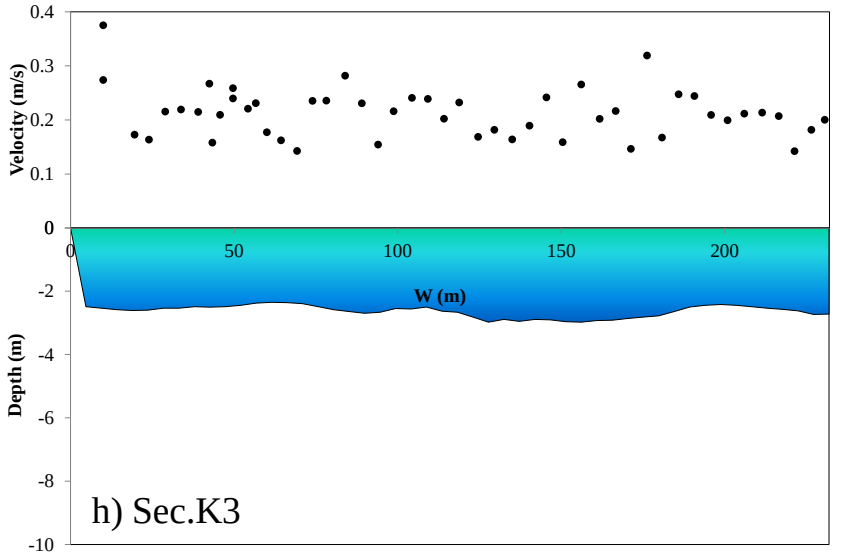


그림 4.1.2 Case ND-EC2 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

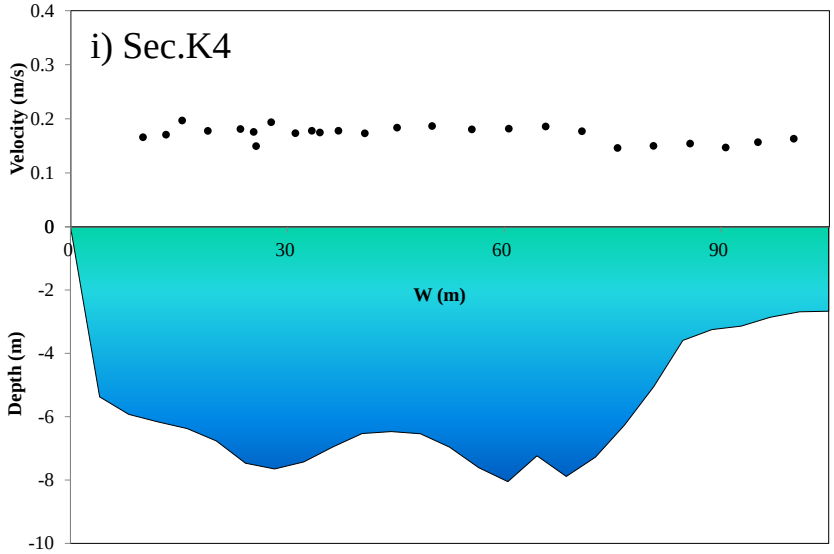


그림 4.1.2 Case ND-EC2 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

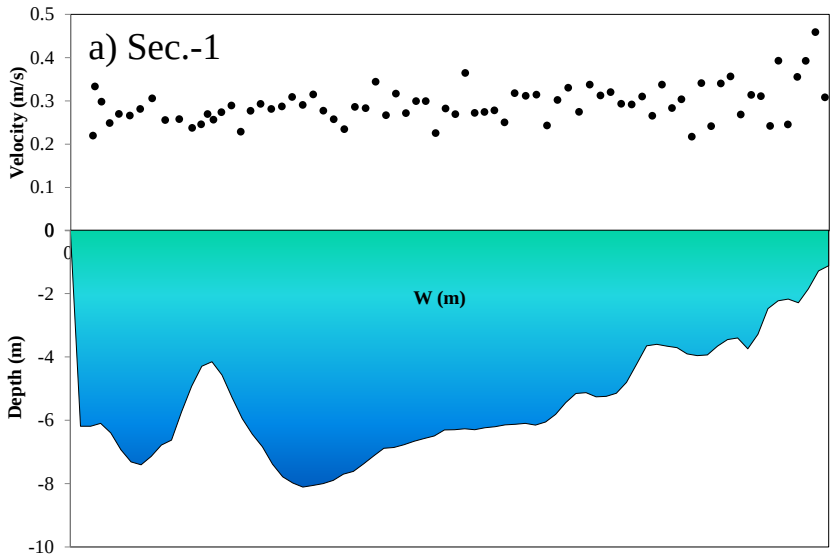
형상을 나타내고 있다. 그리고 하상의 마찰영향을 나타내는 평균 U/U^*는 17.0으로 나타났다. 금호강의 유량은 7.4 ~ 17.4 m^3/s, 평균유량은 12.4 m^3/s 평균수심은 3.0m 평균하폭은 137m로 측정되었으며 W/H는 52로 마찬가지로 수심에 비해 하폭이 넓은 형상을 나타내고 있다. U/U^*는 15.1로 나타났다.

(3) Case ND-EC3

Case ND-EC3 실험에서 수리량은 낙동강 본류에서 총 4개의 단면, 금호강 유입부 1개 단면, 진천천 유입부 1개 단면을 측정하였으며 수리량 측정결과는 표 4.1.3, 그림 4.1.3과 같다. 낙동강 본류에서의 유량은 312~476 m^3/s 의 값을 나타냈으며 평균 유량은 402.7 m^3/s 이다. 구간 내 평균 수심은 5.34m, 평균 유속은 0.25m/s로 측정되었으며, 평균하폭은 383m이다. 실험구간의 평균 W/H는 72.4로 수심에 비해 하폭이 넓은 형상을 나타내고 있다. 그리고 하상의 마찰영향을 나타내는 평균 U/U^*는 11.10으로 나타났다. 금호강 측선의 유량은 72 m^3/s이다. 구간 내 수심은 4.25 m, 유속은 0.23 m/s로 측정되었으며, 하폭은 141m이다. 실험구간의 W/H는 33.4로 수심에 비해 하폭이 넓은 형상을 나타내고 있으며 U/U^*는 10.68으로 계산되었다.

표 4.1.3 Case ND-EC3 수리량 자료

Case	측정 위치	Section	Q (m^3/s)	$H\,(m)$	U (m/s)	U^* (m/s)	$W\,(m)$	W/H	U/U^*
Case ND-EC3	낙동강 본류	-1	312.3	5.29	0.29	0.026	316.8	59.9	11.1
		1	445.7	5.93	0.27	0.024	376.0	63.4	11.3
		2	476.8	4.98	0.22	0.020	432.5	86.9	11.0
		3	467.4	5.17	0.22	0.020	410.3	79.4	11.0
		평균	463.3	5.36	0.24	0.021	406	76.6	11.1
	진천천	K0	71.7	4.25	0.23	0.021	141.4	33.4	10.7



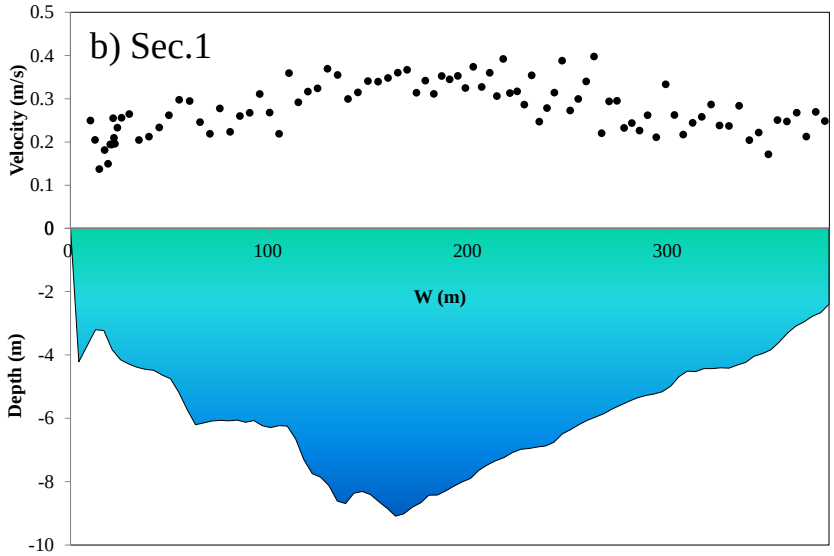
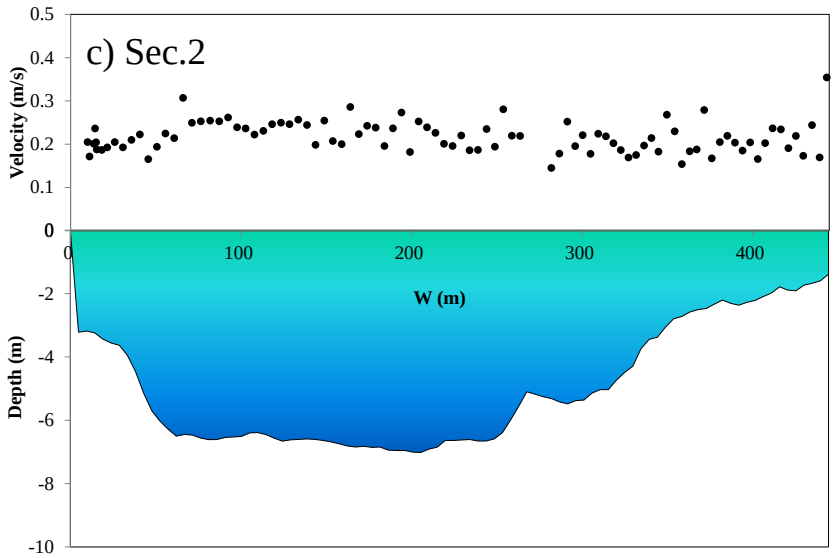


그림 4.1.3 Case ND-EC3 단면 별 유속 및 수심 그래프



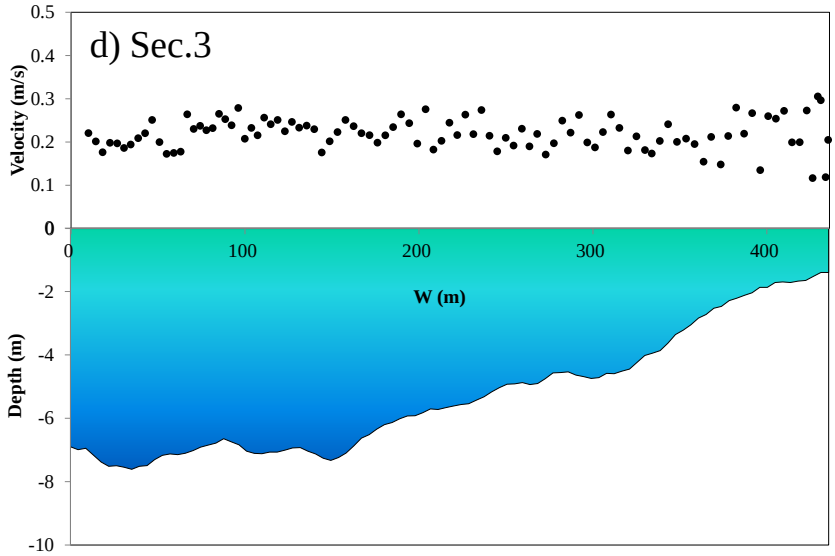


그림 4.1.3 Case ND-EC3 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

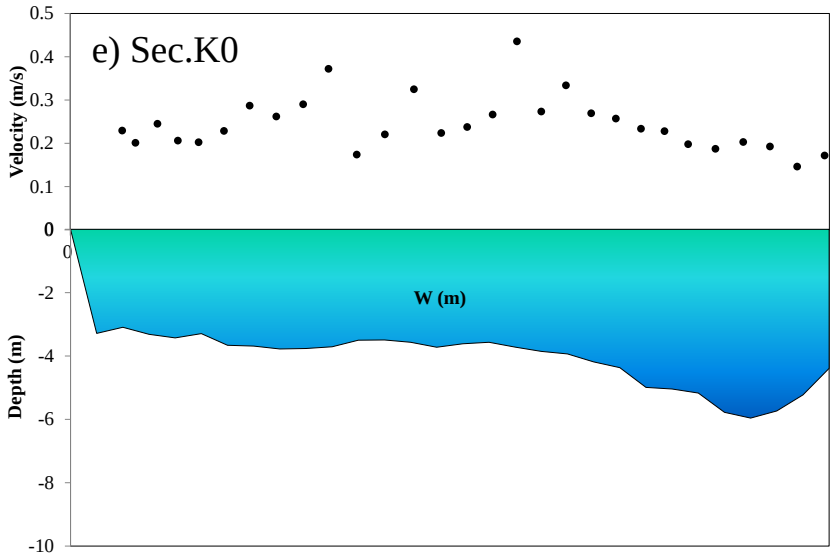


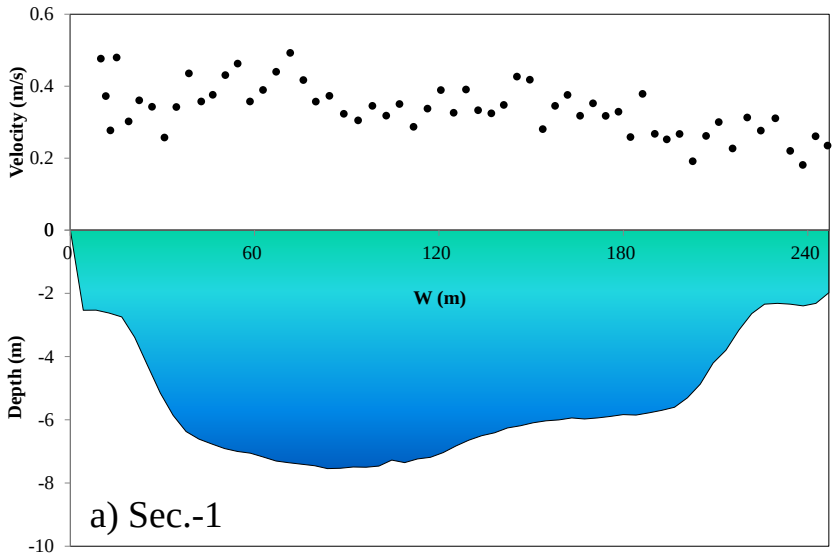
그림 4.1.3 Case ND-EC3 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

(4) Case ND-EC4

Case ND-EC4 실험에서 수리량은 낙동강 본류에서 총 5개의 단면, 금호강 유입부 1개 단면, 진천천 유입부 1개 단면을 측정하였으며 수리량 측정결과는 표 4.1.4, 그림 4.1.4와 같다. 낙동강 본류에서의 유량은 418~500 m^3/s 의 값을 나타냈으며 평균 유량은 444 m^3/s 이다. 구간 내 평균 수심은 5.69m, 평균 유속은 0.26m/s로 측정되었으며, 평균하폭은 390m이다. 실험구간의 평균 W/H 는 69으로 수심에 비해 하폭이 넓은 형상을 나타내고 있다. 그리고 하상의 마찰영향을 나타내는 평균 U/U^* 는 11.22으로 나타났다. 금호강 측선의 유량은 64 m^3/s 이다. 구간 내 수심은 4.11 m, 유속은 0.24 m/s로 측정되었으며, 하폭은 144m이다. 실험구간의 W/H 는 35로 수심에 비해 하폭이 넓은 형상을 나타내고 있으며 U/U^* 는 10.6으로 계산되었다. 진천천의 측선의 유량은 7 m^3/s 이다. 구간 내 수심은 2.2m, 유속은 0.20 m/s로 측정되었으며, 하폭은 78m이다. 실험구간의 W/H 는 37로 수심에 비해 하폭이 넓은 형상을 나타내고 있으며 U/U^* 는 9.5으로 측정되었다.

표 4.1.4 Case ND-EC4 수리량 자료

Case	측정 위치	Section	Q (m^3/s)	$H\,(m)$	U (m/s)	U^* (m/s)	$W\,(m)$	W/H	U/U^*
Case ND-EC4	낙동강 본류	-1	410.1	5.44	0.34	0.0302	252.4	46.4	11.10
		1	500.2	5.90	0.27	0.024	355.5	60.4	11.29
		2	430.6	5.11	0.19	0.017	404.2	79.2	11.05
		4	428.6	6.04	0.26	0.023	386.4	63.9	11.33
		5	418.5	5.69	0.24	0.022	414.6	73.1	11.21
		평균	444.5	5.69	0.24	0.022	390.2	69.2	11.22
	진천천	J0	6.9	2.16	0.20	0.021	78.1	36.9	9.53
	금호강	K0	64.4	4.11	0.24	0.023	144.1	35.1	10.6



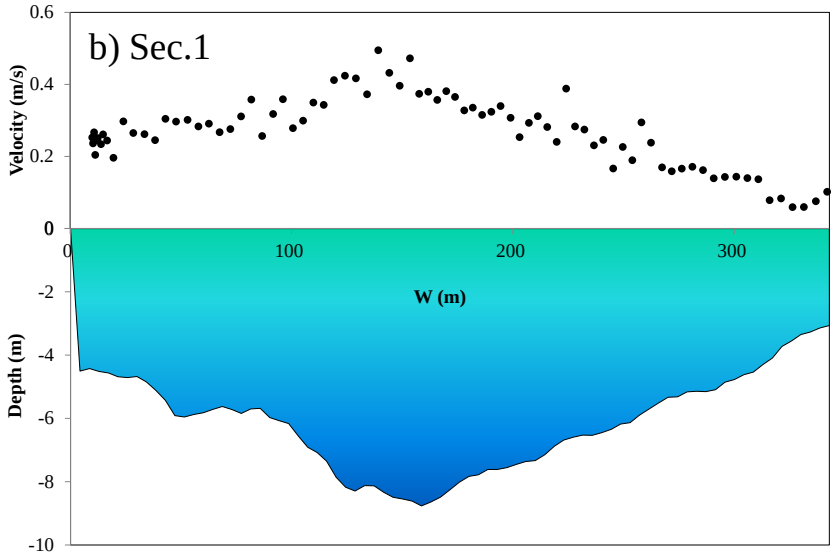
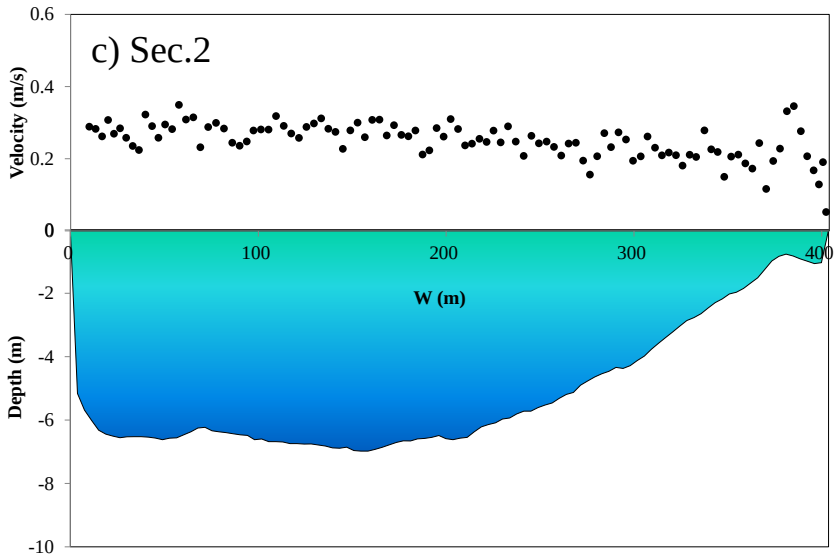


그림 4.1.4 Case ND-EC4 단면 별 유속 및 수심 그래프



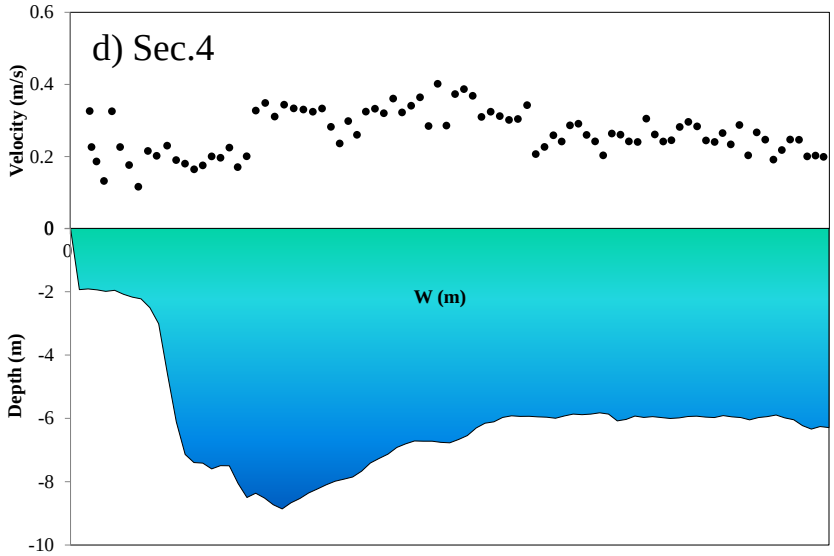


그림 4.1.4 Case ND-EC4 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

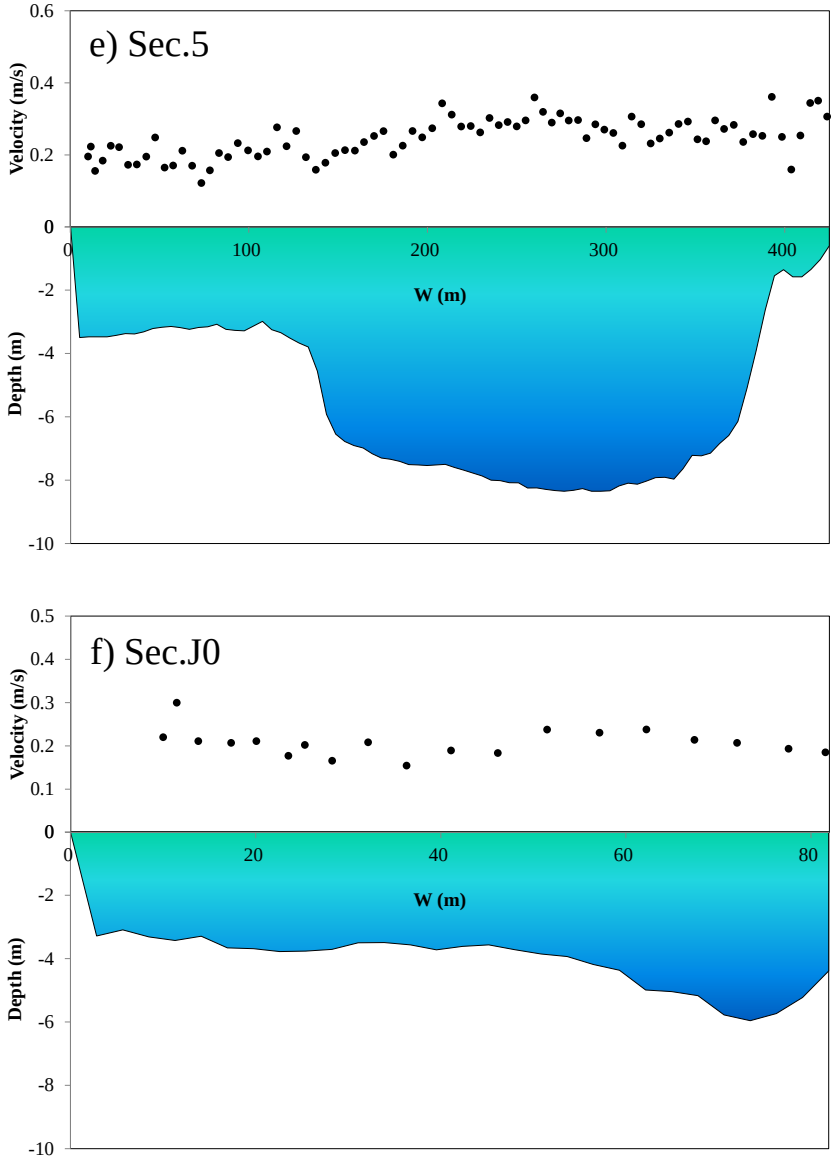


그림 4.1.4 Case ND-EC4 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

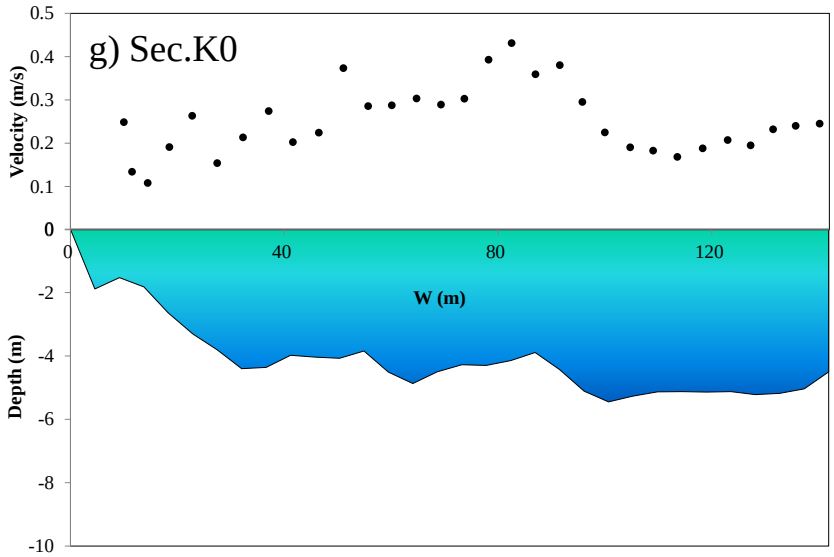


그림 4.1.4 Case ND-EC4 단면 별 유속 및 수심 그래프(계속)

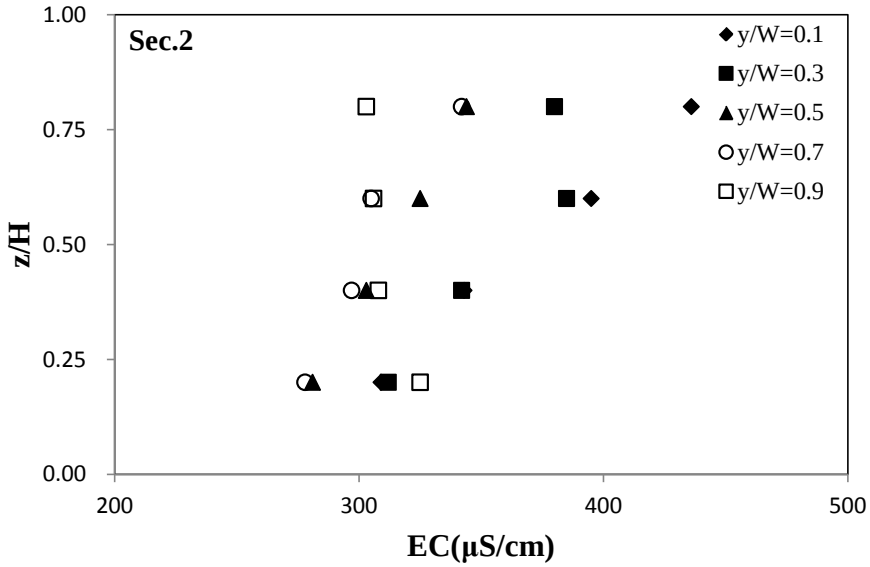
4.2 농도 분석

(1) Case ND-EC1

(가) EC의 연직혼합

진천천 및 금호강에서 유입된 EC의 수심방향 혼합을 검토하기 위하여 Sec.2과 Sec.3-1의 수심방향 4개 지점, 하폭방향 5개 지점에서 채수하여 연직혼합을 검토했다.

그림 4.2.1는 6월 26일 EC 측정결과를 도시한 그래프이다. 연직 EC 측정결과, Sec.2에서는 좌안에서 EC의 연직편차가 상대적으로 크게 나타났으며 우안으로 갈수록 연직편차가 감소했다. Sec.3-1에서는 Sec.2에 비해 좌안과 우안에서 EC의 연직편차가 크게 감소했다. 표 4.2.1는 횡 방향 측점에서 EC의 최대값과 최소값을 비교한 표이다. Sec. 2은 좌안에서 유입되는 EC로 인해 우안보다 좌안에서 높은 EC가 나타나며 연직편차 또한 높게 나타났다. 좌안에서 EC의 연직편차는 127 $\mu S/cm$ 이며 우안의 EC 연직편차는 22 $\mu S/cm$ 로 측정됐고 수표면보다 바닥면에서 EC가 더 높게 측정됐다. Sec.3-1에서는 좌안의 연직편차가 45 $\mu S/cm$ 로 감소됐고 중앙부에서 EC의 연직편차가 62 $\mu S/cm$ 로 가장 높게 측정됐다.



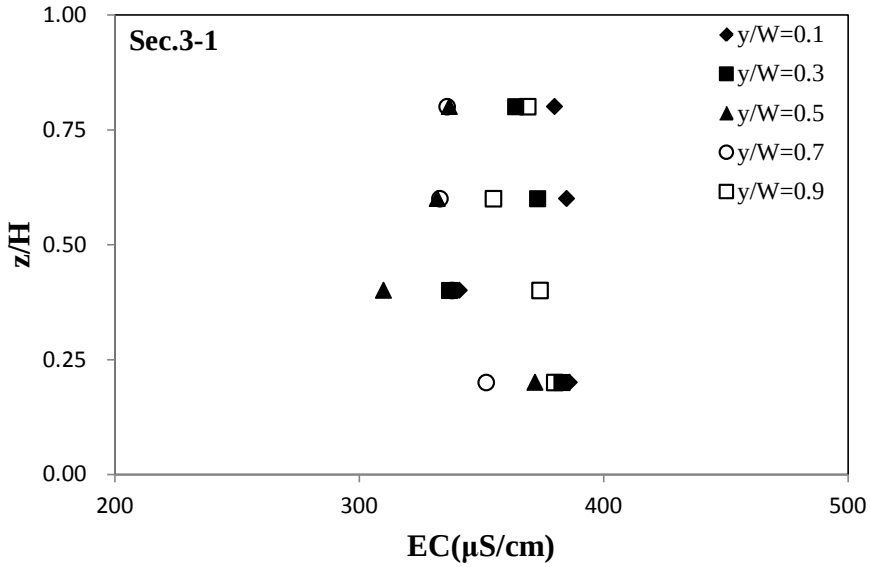


그림 4.2.1 Case ND-EC1 전기전도도 연직혼합 분포

표 4.2.1 Case ND-EC1 연직혼합 분포

y/W	Sec.2					Sec.3-1				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
EC_{max} ($\mu S/cm$)	436	385	344	342	325	386	383	372	352	380
EC_{min} ($\mu S/cm$)	309	312	281	278	303	341	337	310	333	355
ΔEC ($\mu S/cm$)	127	73	63	64	22	45	46	62	19	25

(나) EC의 횡혼합

그림 4.2.2은 진천천에서 유입되는 EC를 시간에 따라 도시한 결과이며 표 4.2.2는 각 측선의 EC 최대값과 최소값을 정리한 표이다. 낙동강 본류에서 EC를 측정하는 동안 진천천에서 연속 측정한 결과 약 2시간을 간격으로 약 30 ~ 40 $\mu S/cm$ 으로 EC가 사인파형을 이루며 변화했고 구라수문에서 유입되는 농도를 측정한 Sec.J3과 하류에서 측정된 Sec.J5C의 농도가 840 ~ 896 $\mu S/cm$ 로 측정됐다. 그리고 좌안과 우안에서는 약 40 ~ 50 $\mu S/cm$ 가 감소된 806 ~ 846 $\mu S/cm$ 의 농도가 측정됐다. 따라서 좌안에서 유입된 지류의 영향으로 Sec.1의 좌안 농도가 높게 측정되었으며 낙동강 본류의 혼합층이 발생되는 y/W 가 0.9인 지점에서 EC가 급격히 감소하여 지류 혼합의 영향을 받지 않는 우안에서 EC가 320 $\mu S/cm$ 로 측정됐다. 또한 성서자동수질측정망에서 측정된 EC값에 비하여 전체적으로 낮은 값을 나타냈다.

그림 4.2.3는 6월 27일 측정된 EC의 횡 방향 분포를 도시한 그래프이다. 그리고 표 4.2.3는 각 측선의 EC 최대값과 최소값을 정리한 표이다. Sec.-1은 지류 합류 전, 후 낙동강 본류의 EC를 비교하기 위해 지류 합류 전 EC를 측정한 결과이며 하폭방향의 농도편차가 9 $\mu S/cm$ 으로 완전혼합이 이뤄져서 유입하고 있으며 평균 EC농도는 322.6 $\mu S/cm$ 이다. Sec.1는 Sec.-1로부터 750 m 하류에서 측정한 결과이며 최대 농도가 772 $\mu S/cm$, 최소농도가 322 $\mu S/cm$ 으로 나타나 지류유입에 의한 농도상승이 두드러지게

표 4.2.2 Case ND-EC1 진천천 EC 연속측정 결과

측정 단면	J3	J5L	J5C	J5R
EC_{max} ($\mu S / cm$)	896	843	879	847
EC_{min} ($\mu S / cm$)	837	814	845	806

표 4.2.3 Case ND-EC1 EC 횡 혼합측정 결과

Section	-1	1	2	2-1	3	3-1
EC_{max} ($\mu S / cm$)	327	772	683	671	670	635
EC_{min} ($\mu S / cm$)	318	322	490	379	460	394
ΔEC ($\mu S / cm$)	9	450	193	292	210	241

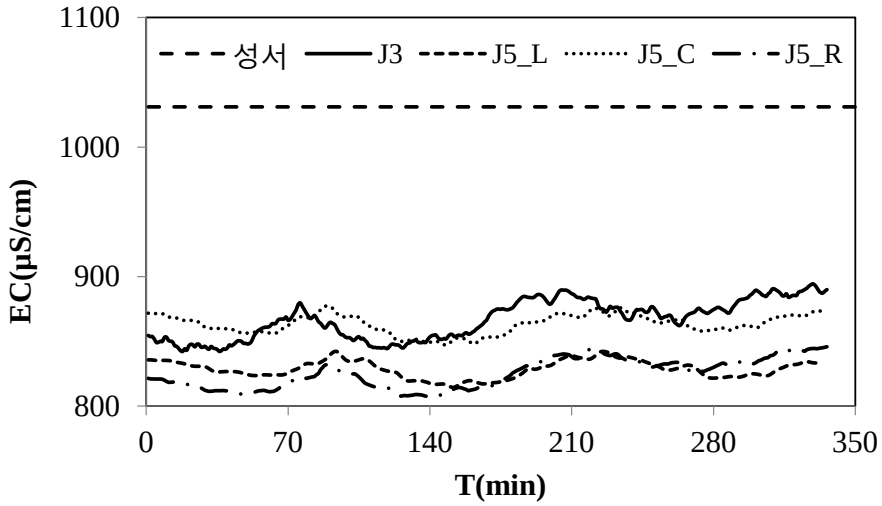


그림 4.2.2 Case ND-EC1 진천천으로 유입되는 EC 연속측정 결과

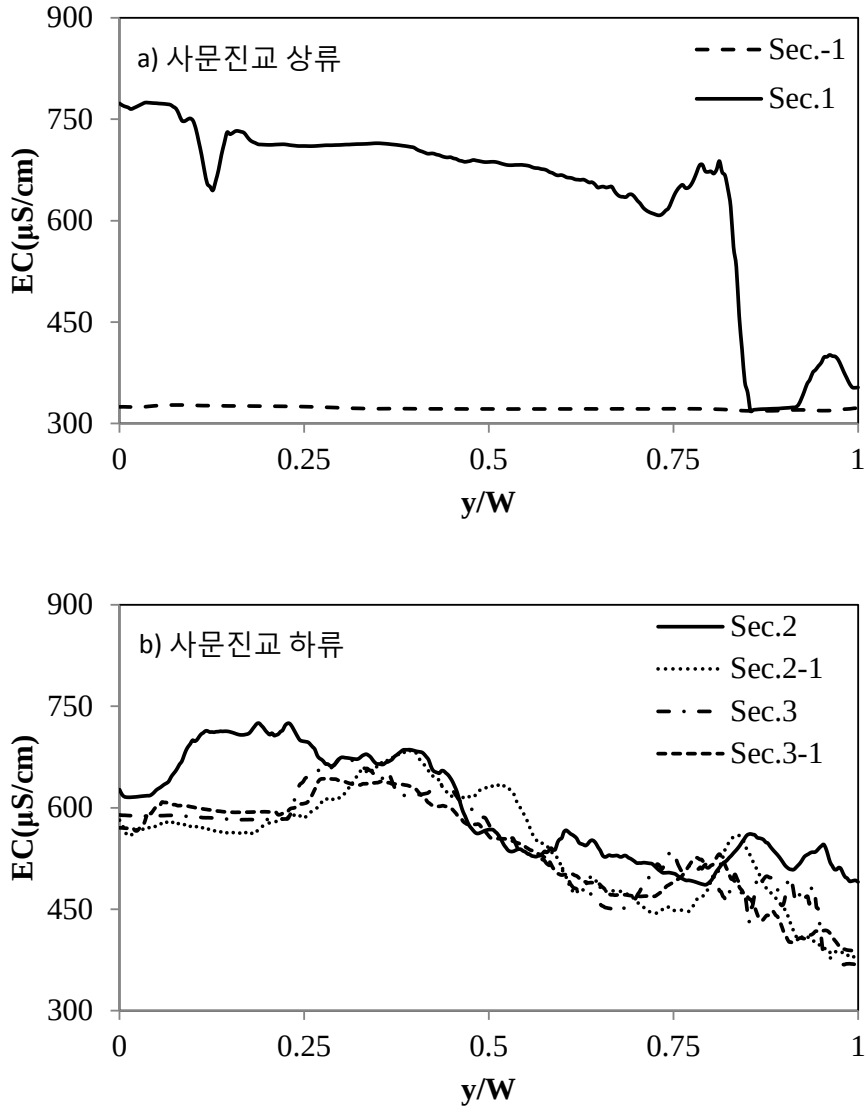


그림 4.2.3 Case ND-EC1 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과

나타나고 있다. 사문진교 하류에서는 Sec.2 ~ Sec.3-1에서 약 200 ~ 250 m 간격으로 EC의 하폭방향 변화를 측정했다. 그림 4.2.2로부터 Sec.2에서는 EC가 좌안에서 우안으로 이동하며 점차 감소했으며 EC의 최대값과 최소값의 편차가 193 $\mu S/cm$ 으로 Sec.1보다 하폭방향 편차가 약 257 $\mu S/cm$ 감소됐다. Sec.2-1 이후에는 높은 EC가 하천 좌안에서 중앙부로 이동하고 있으며 최대 농도가 서서히 감소했다.

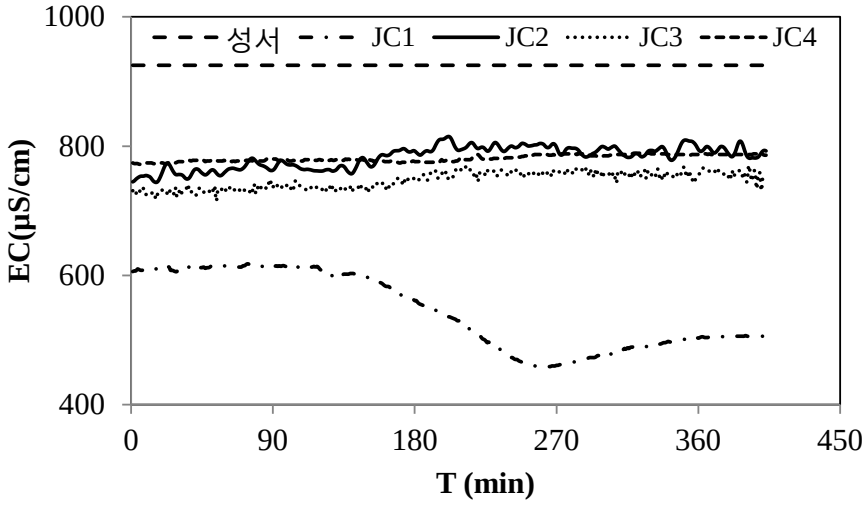
(2) Case ND-EC2

(가) EC의 횡 혼합

그림 4.2.4 은 진천천에서 유입되는 EC 의 농도를 측정한 결과이다. 성서폐수처리장의 처리수가 유입되기 전, Sec.J1 에서 진천천의 EC 는 458 ~ 616 $\mu S/cm$ 로 분포하며 처리수가 유입되는 구라수문 상류 Sec.J2 에서 EC 는 748 ~ 807 $\mu S/cm$ 로 측정됐다. 유입된 EC 는 진천천의 우안과 중앙으로 치우쳐 이동하여, 진천천의 중앙 부인 Sec.J5C 에서 EC 는 835 ~ 875 $\mu S/cm$ 로 측정됐고 Sec.J5R 에서는 719 ~ 788 $\mu S/cm$ 로 측정됐다. 하폭방향 별 측정단면에서는 EC 의 횡 방향 혼합이 완료되지 못하여 좌안(Sec.J5L)에서는 진천천 상류의 EC 분포와 유사하게 439 ~ 506 $\mu S/cm$ 로 측정됐다. 진천천의 EC 측정결과는 본류의 측정과 동시에 이뤄졌으나 Case ND-EC2 의 경우에는 700 $\mu S/cm$ 이상의 EC 를 포함한 진천천이 낙동강의 EC 상승에 영향을 미치지 못했다. 오히려 본류의 흐름정체로 인해 성서폐수처리장에서 유입된

표 4.2.4 Case ND-EC2 진천천의 EC 연속측정 결과

측정 단면	J1	J2	J4	J5L	J5C	J5R
EC_{max} ($\mu S/cm$)	616	807	789	506	875	788
EC_{min} ($\mu S/cm$)	458	748	773	439	835	719



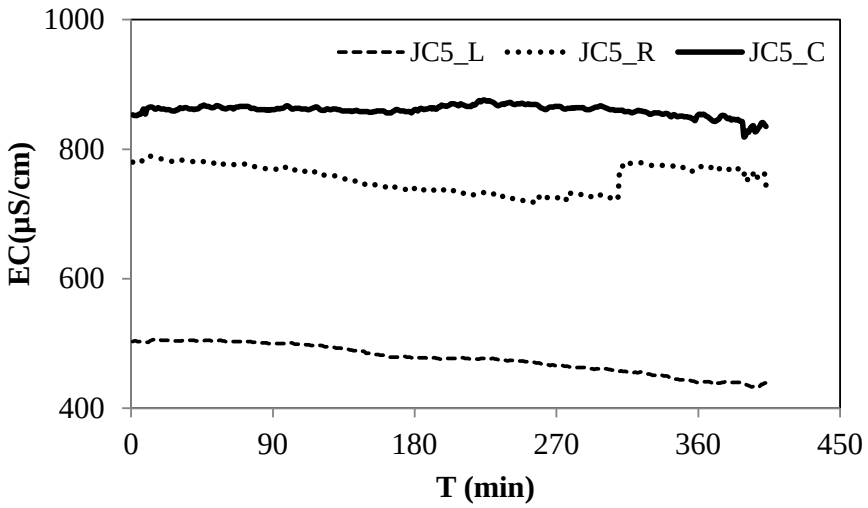


그림 4.2.4 Case ND-EC2의 진천천의 EC 연속측정 결과

처리수가 하류로 이동하지 못하여 진천천의 하류에서 EC가 축적되어 유입된 EC에 비해 더 높은 농도가 관측되었다.

그림 4.2.5은 7월 16일 측정된 EC의 횡 방향 분포를 도시한 그래프이며 표 4.2.5은 EC의 최대값과 최소값을 정리한 표이다. Sec.K2와 Sec.K3에서 하폭방향으로 EC의 편차는 41 ~ 56 $\mu S/cm$ 로 측정되어 횡 방향 혼합이 거의 완료된 것으로 측정되었으나 Sec.K3로부터 880 m 하류에 위치한 Sec.K4에서 좌안의 EC는 367 $\mu S/cm$, 우안의 EC는 643 $\mu S/cm$ 로 나타나 하폭방향으로의 EC 편차가 276 $\mu S/cm$ 로 측정됐다. EC 측정당일 낙동강의 유량은 약 80 m^3/s , 금호강의 유량은 20 m^3/s 으로 측정되어 Case ND-EC1에 비해 유량이 감소했다. 따라서 금호강에서 유입되는 EC가 낙동강 합류부까지 충분히 도달하지 못하여 Sec.K4에서 혼합층이 형성됐다. Sec.K4에서 낙동강 본류에서 유입된 물과 혼합되어 좌안에서 낙동강 본류와 유사한 EC가 측정됐고 우안에서 EC가 상승함을 볼 수 있다.

금호강 및 진천천이 합류하는 Sec.1의 EC 측정결과, 하천 중앙부에서 EC가 331 $\mu S/cm$ 까지 상승했으나 Sec.1-1에 비해 EC가 크게 상승하지 않았다. 좌안에 화원유원지가 위치하는 Sec.1-1에서는 지류 유입의 영향으로 좌안에서 EC의 농도가 364 $\mu S/cm$ 까지 상승했다. 지류 유입에 의한 EC 상승효과가 미미하기 때문에 낙동강 본류에서 EC의 횡단 변화가 크지 않으며 하폭방향 변화가 가장 큰 Sec.1에서도 농도편차가 49 $\mu S/cm$ 로 나타났다. 따라서 갈수기에 본류 및 지류의 유량이 낮아 흐름이 느린 경우, 금호강 및 진천천이 낙동강 본류로 유입되지 못하고 달성보의 관리수위로 인해 낙동강이 지천으로 유입됨을 알 수 있다. 따라서

표 4.2.5 Case ND-EC2 EC 횡 혼합측정 결과

Section	K2	K3	K4	-1	1	1-1	4
EC_{max} ($\mu S/cm$)	774	809	643	317	331	364	417
EC_{min} ($\mu S/cm$)	733	753	367	308	308	315	380
ΔEC ($\mu S/cm$)	41	56	276	9	23	49	37

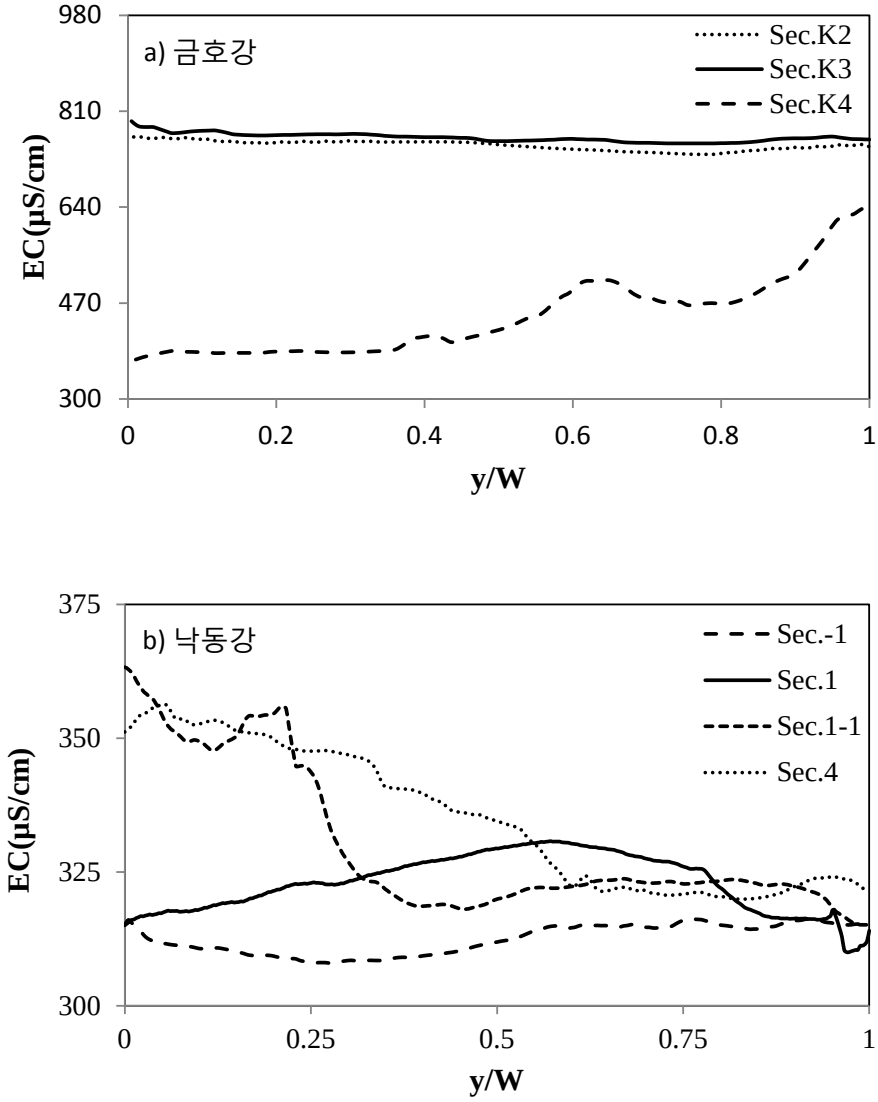


그림 4.2.5 Case ND-EC2 낙동강 본류 및 금호강의 하폭방향 EC 연속측정 결과

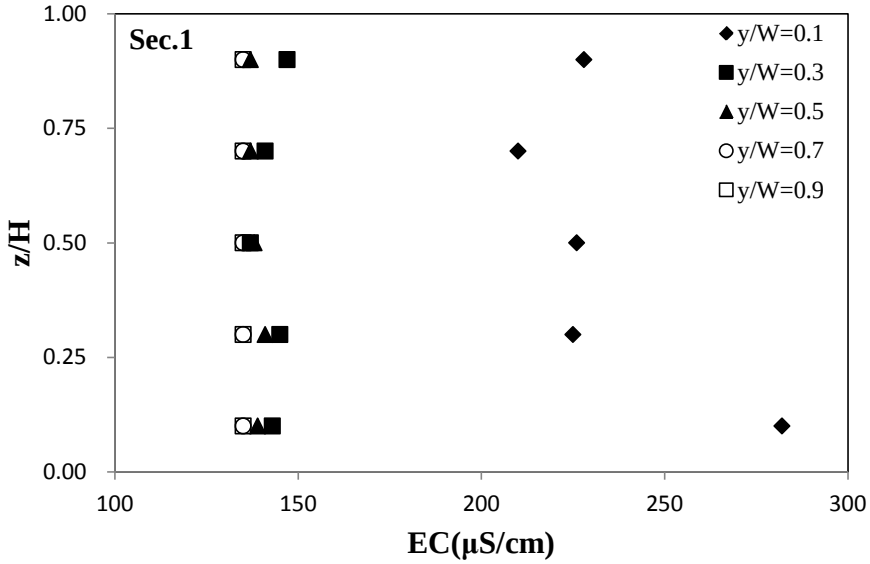
높은 EC 를 갖는 지류가 본류로 유입되지 못하기 때문에 갈수기에 낙동강 본류에서 EC 의 하폭변화가 크지 않음을 알 수 있다. Sec.4 에서는 EC 농도가 320 ~ 356 $\mu S/cm$ 로 측정됐다. 낙동강 홍수통제소의 통계자료에 의하면 EC 를 측정한 7 월 16 일 강정고령보의 방류량은 오전 0 시부터 10 시까지 3 m^3/s 이하로 나타났고 달성보로 유입되는 유량은 40 ~ 56 m^3/s 로 나타나, 강정고령보 ~ 달성보 구간에서 흐름이 매우 느리게 발생했음을 알 수 있다. 오전 10 시 이후 강정고령보에서 21 ~ 22 m^3/s 유량을 방류했으며 방류량이 매우 작기 때문에 사문진교 하류까지 방류량 증가에 의한 희석효과가 크게 나타나지 않을 것이라 판단된다.

(3) Case ND-EC3

(가) EC 의 연직혼합

진천천 및 금호강에서 유입된 EC 의 수심방향 혼합을 검토하기 위하여 Sec.1 과 Sec.2 의 수심방향 5 개 지점, 하폭방향 5 개 지점에서 연직혼합을 검토했다.

그림 4.2.6 은 8 월 28 일 EC 측정결과를 도시한 그래프이다. 연직 EC 측정결과, Sec.1 에서는 좌안에서 EC 의 연직편차가 조금 나타났으며 우안으로 갈수록 연직편차가 감소하면서 거의 연직혼합이 완료된 양상을 보였다. Sec.2 에서는 Sec.1 에 비해 좌안에서 EC 의 연직편차가 감소했다. 표 4.2.6 는 횡 방향 측점에



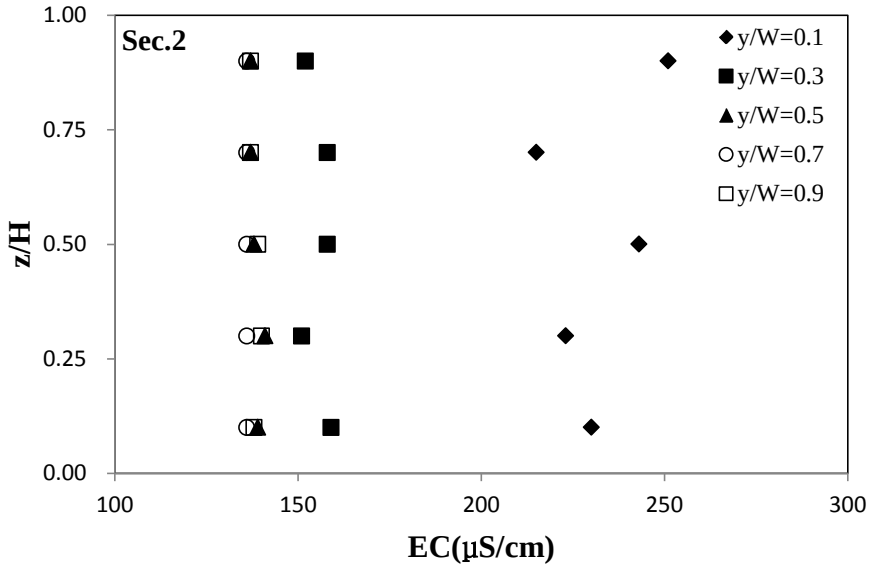


그림 4.2.6 Case ND-EC3 전기전도도 연직혼합 분포

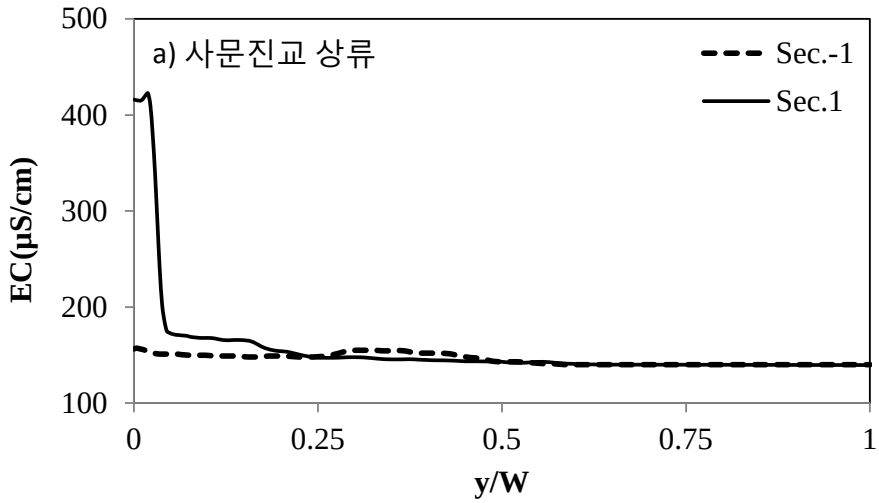
표 4.2.6 Case ND-EC3 연직혼합 분포

y/W	Sec. 1					Sec. 2				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
EC_{max} ($\mu S/cm$)	282	147	140	135	135	251	159	141	136	140
EC_{min} ($\mu S/cm$)	210	137	135	135	135	215	151	137	136	137
ΔEC ($\mu S/cm$)	72	10	5	0	0	36	8	4	0	3

서 EC 의 최대값과 최소값을 비교한 표이다. Sec.2 은 좌안에서 유입되는 EC 로 인해 우안보다 좌안에서 높은 EC 가 나타나며 연직편차 또한 높게 나타났다. Sec.1 의 좌안에서 EC 의 연직편차는 72 $\mu S/cm$ 이며 우안의 EC 연직편차는 0 $\mu S/cm$ 으로 측정됐다. Sec.2 에서는 좌안의 연직편차가 36 $\mu S/cm$ 으로 감소하였고 우안의 EC 연직편차는 3 $\mu S/cm$ 으로 측정됐다.

(나) EC 의 횡 혼합

낙동강 본류 외에 금호강 및 진천천에서 유입된 EC 의 횡 혼합을 측정했다. 그림 4.2.7 은 10 월 23 일 측정된 EC 의 횡 방향 분포를 도시한 그래프이며 표 4.2.7 은 EC 의 최대값과 최소값을 정리한 표이다. EC 측정당일 낙동강의 유량은 약 380 m^3/s , 금호강의 유량은 140 m^3/s 으로 측정되어 Case ND-EC1, Case ND-EC2 에 비해 유량이 증가했다. 금호강으로부터 약 242, 진천천으로부터 약 660 $\mu S/cm$ 의 농도값이 유입되었다. 금호강과 진천천이 합류되기 전인 Sec.-1 에서의 전기전도도 값은 158~140 $\mu S/cm$ 으로 횡방향 분포의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 금호강으로부터 약 392 $\mu S/cm$, 진천천으로부터 약 638 $\mu S/cm$ 의 농도값이 유입되었다. 금호강 및 진천천이 합류하는 Sec.1 의 EC 측정결과, 하천 좌안부에서 EC 가 431 $\mu S/cm$ 까지 상승하였다. 이후 Sec.2 에서 Sec.5 까지 점점 더 횡방향으로 EC 농도값이 분산되었다. Sec.6 부터는 농도 값의 분포가 점점 더 분산



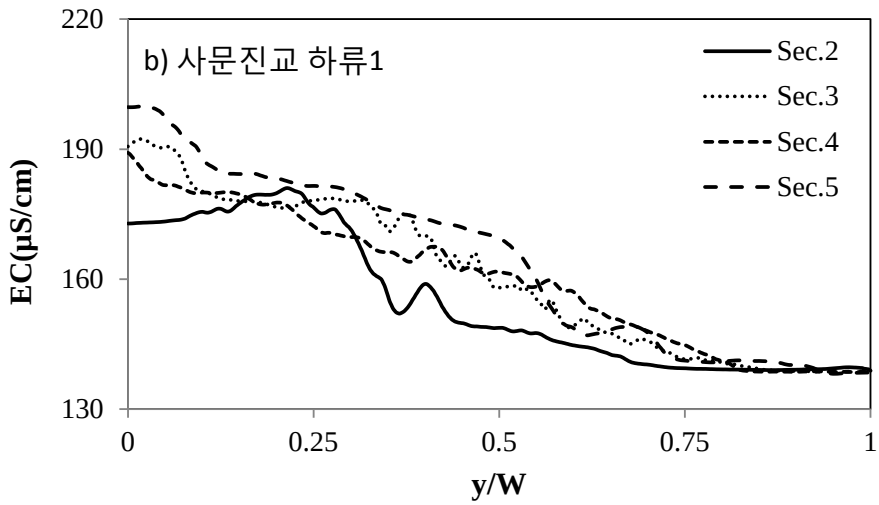


그림 4.2.7 Case ND-EC3 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과

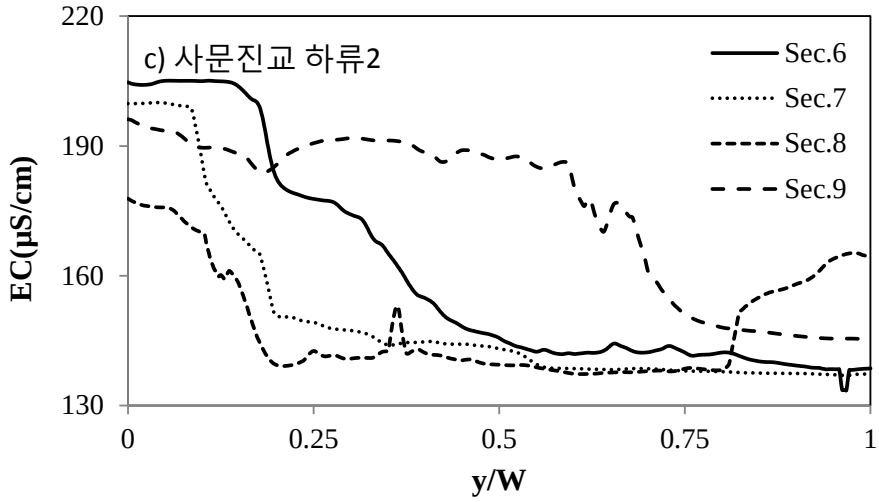


그림 4.2.7 Case ND-EC3 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과(계속)

표 4.2.7 Case ND-EC3 EC 횡 혼합측정 결과

Section	EC_{max} ($\mu S/cm$)	EC_{min} ($\mu S/cm$)	ΔEC ($\mu S/cm$)
-1	158	140	18
1	431	140	292
2	181	139	42
3	190	139	51
4	190	139	51
5	200	138	62
6	205	126	79
7	200	137	63
8	179	137	41
9	196	145	51
K0	245	238	7
J0	640	636	4

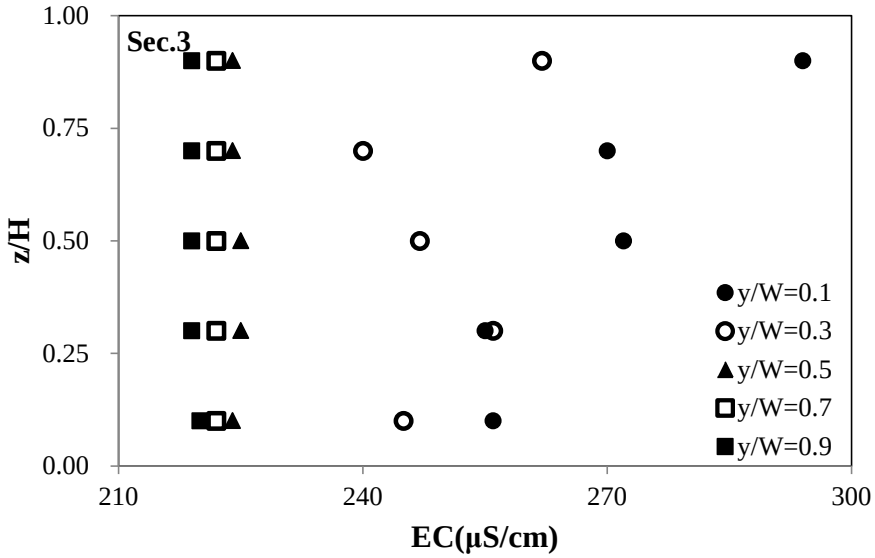
하는 형태가 아닌 불안정한 값을 보였는데 이는 좌안 및 우안에서 작은 지류가 유입되거나 물이 고이게 되는 공간이 있어 불안정한 관측 값을 보인 것으로 예측된다. 특히 Sec.9 의 경우에는 좌안이 아닌 우안에서 높은 EC 값이 측정되어 더욱 그러한 양상을 보였다. 가장 큰 편차가 발생한 단면은 Sec.1 으로 331 $\mu S/cm$ 의 차를 나타냈으며 합류 후 단면 중에서 가장 작은 편차가 발생한 단면은 Sec.2 와 Sec.4 로 42 $\mu S/cm$ 의 차이를 보였다.

(4) Case ND-EC4

(가) EC 의 연직혼합

진천천 및 금호강에서 유입된 EC 및 수온이 수심방향으로 완전혼합 되는지 알아보기 위해 Sec.3 에서의 수심방향 5 개 지점, 하폭방향 5 개 지점에서 채수하여 연직혼합을 검토했다.

그림 4.2.8 은 10 월 23 일 EC 측정결과를 도시한 그래프이다. 연직 EC 측정결과, Sec.3 에서 좌안에서 EC 의 연직편차가 39 $\mu S/cm$ 로 나타났으며 우안으로 갈수록 연직편차가 감소하면서 거의 연직혼합이 완료된 양상을 보였다. 온도의 분포양상은 좌안 및 우안 모두 0.3℃로 대체로 잘 혼합된 양상을 보였으며 전체적으로도 0.2~0.4℃의 고른 분포를 보였다. 표 4.2.8 는 Sec.3 에서 EC 와 온도의 최대값과 최소값을 비교한 표이다.



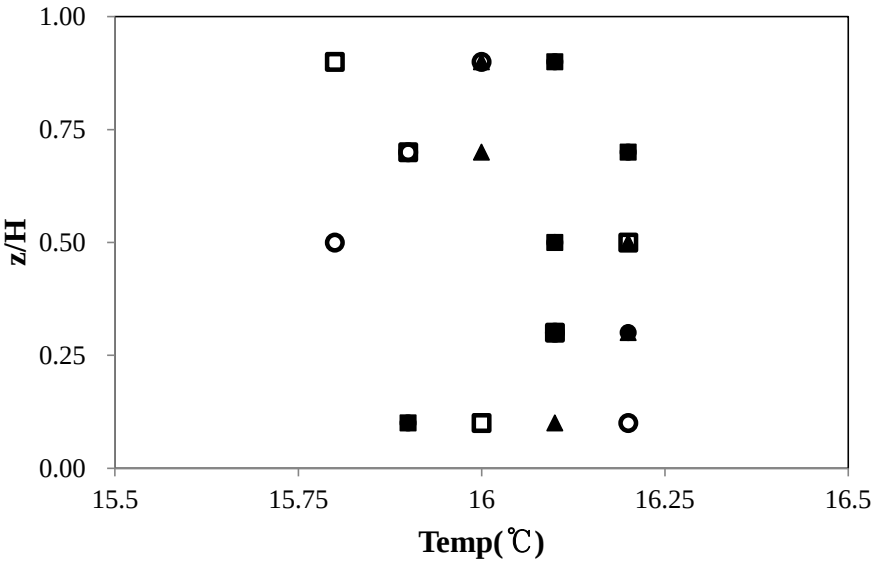


그림 4.2.8 Case ND-EC4 전기전도도 및 온도 연직혼합 분포

표 4.2.8 ND-EC4 전기전도도 및 온도 연직혼합 분포

y/W	EC						Temp				
	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
EC_{max} ($\mu S/cm$)	294	262	225	222	220	$Temp_{max}$ (℃)	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2
EC_{min} ($\mu S/cm$)	255	240	224	222	219	$Temp_{min}$ (℃)	15.9	15.8	16	15.8	15.9
ΔEC ($\mu S/cm$)	39	22	1	0	1	$\Delta Temp$ (℃)	0.3	0.4	0.2	0.4	0.3

(나) EC 의 횡 혼합

금호강 및 진천천에서 유입된 EC 의 횡 혼합을 측정했다. 그림 4.2.9 은 10 월 23 일 측정된 EC 의 횡 방향 분포를 도시한 그래프이며 표 4.2.9 는 EC 의 최대값과 최소값을 정리한 표이다. EC 측정당일 낙동강의 유량은 약 464 m^3/s, 금호강의 유량은 64 m^3/s 으로 측정되어 기존 3 개의 case 에 비하여 낙동강 본류의 유량이 가장 크게 나타났다. 금호강과 진천천이 합류되기 전인 Sec.-1 에서의 전기전도도 값은 223~235 $\mu S/cm$ 으로 횡방향 분포의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 금호강 및 진천천이 합류하는 Sec.1 의 EC 측정결과, 하천 좌안부에서 EC 가 459 $\mu S/cm$ 까지 상승하였다. 이후 Sec.2 에서 Sec.5 까지 점점 더 횡방향으로 EC 농도값이 분산되는 양상을 보였으나 Sec.4 의 전기전도도 확산 분포가 다른 단면에 비하여 약간 크게 나타났다. Sec.6 부터는 농도 값의 분포가 점점 더 분산하는 형태가 아닌 불안정한 값을 보였는데 이는 Sec.6 ~ Sec.9 구간에는 교향천, 본리천, 기세곡천과 같은 작은 지류들이 좌안으로부터 유입되고 지형적인 환경에 의하여 물이 고이게 되는 구간이 있어 불안정한 관측 값을 보인 것으로 예측된다. 가장 큰 편차가 발생한 단면은 Sec.1 으로 240 $\mu S/cm$ 의 차를 나타냈으며 합류 후 단면 중에서 가장 작은 편차가 발생한 단면은 Sec.2 로 80 $\mu S/cm$ 의 차이를 보였다.

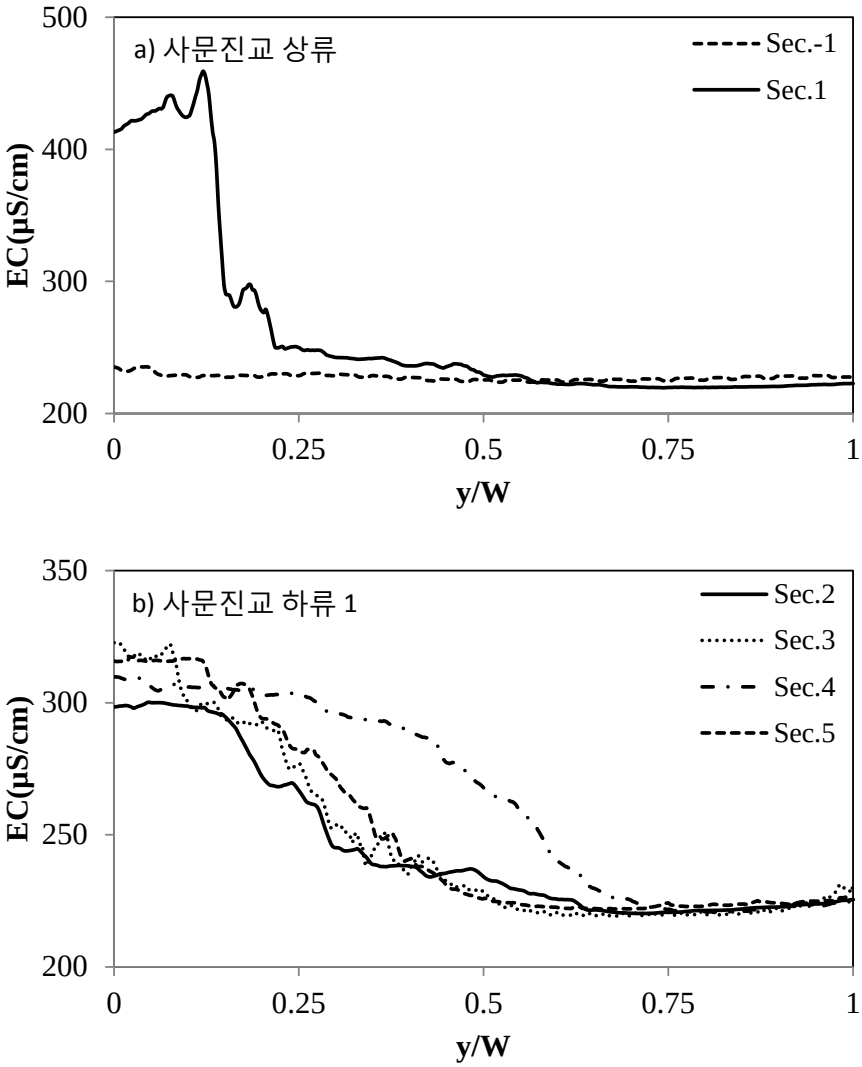


그림 4.2.9 Case ND-EC4 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과

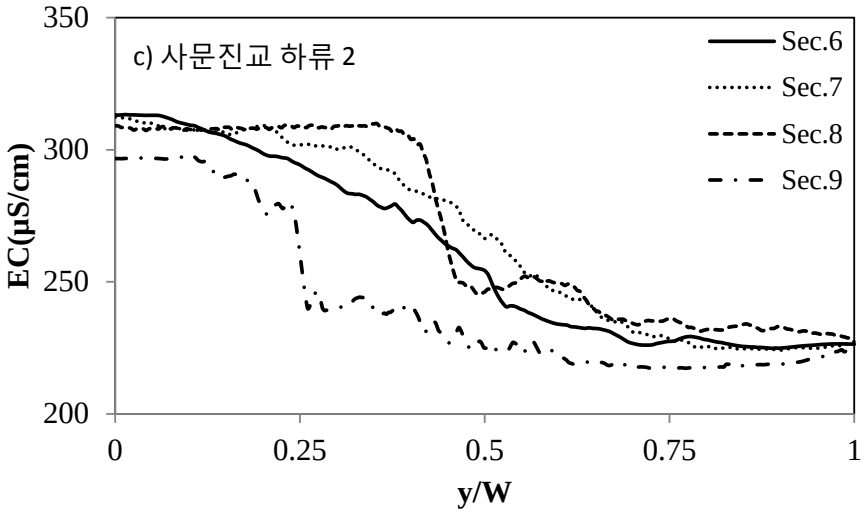


그림 4.2.9 Case ND-EC4 낙동강 본류의 하폭방향 EC 연속측정 결과(계속)

표 4.2.9 Case ND-EC4 EC 횡 혼합측정 결과

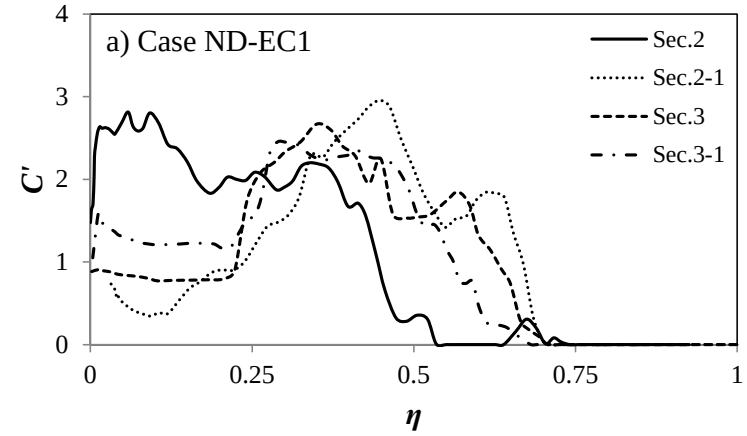
Section	EC_{max} ($\mu S / cm$)	EC_{min}($\mu S / cm$)	ΔEC($\mu S / cm$)
-1	235	223	12
1	459	219	240
2	300	220	80
3	322	219	103
4	310	219	91
5	317	221	96
6	313	224	89
7	312	224	88
8	309	228	81
9	298	217	81
K0	417	377	40
J0	674	637	37

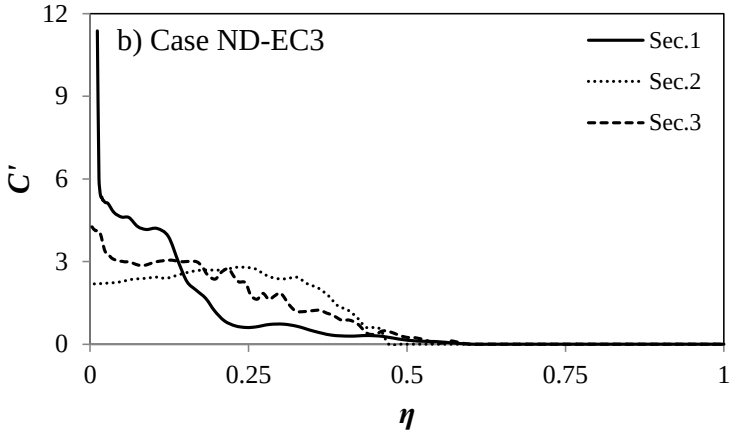
4.3 분산계수 산정

Beltaos(1980)이 제안한 유관모멘트법을 이용하여 본류 추적자 실험을 통해 측정한 농도값과 수리량값을 이용하여 3가지 Case(Case ND-EC1, ND-EC3, ND-EC4)에 대하여 횡 분산계수(D_T)를 계산했다. 유관 모멘트법을 사용하기 위해서는 반드시 수리량 자료가 필요하기 때문에 각각의 케이스 별로 수리량이 측정된 단면을 선택하여 횡 분산계수를 산정하였다.

그림 4.3.1은 유관모멘트법을 적용하기 위한 농도-단위유량 무차원 곡선이다. 무차원 농도를 단위유량에 따라 도시함으로써 본 실험의 합류부 구간과 같은 흐름방향을 따라 하폭이 변화하는 하천 및 흐름방향이 변화하는 만곡부에 모멘트법을 적용하는데 적합하다. 무차원곡선은 대체로 좌안에서 우안으로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며 Case ND-EC1의 경우에는 농도의 최고점(peak)이 중앙으로 이동하는 경향을 보였다. 그림 4.3.2은 그림 4.3.1의 분산(σ^2)과 $F(x)=\int_0^x f(x)\,dx$ 를 도시한 그래프이며 기울기는 $2\left(D_T\psi UH^2\right)/Q^2$ 를 뜻한다. 본류 추적실험 결과를 이용하여 σ^2 와 $F(x)$ 를 도시한 결과, R^2 가 0.61~0.97로 나타났으며 이를 통하여 유관모멘트법이 잘 적용됐음을 알 수 있다. 표 4.3.1은 그림 4.3.2으로부터 계산된 D_T 를 정리한 결과이다.

EC측정결과로부터 유관모멘트법을 사용하여 계산된 D_T / HU^* 는 Case ND-EC1에서 1.39, Case ND-EC3에서 0.68, Case ND-EC4에서 0.49로 계산되었다. 이는 표 4.3.2 같이





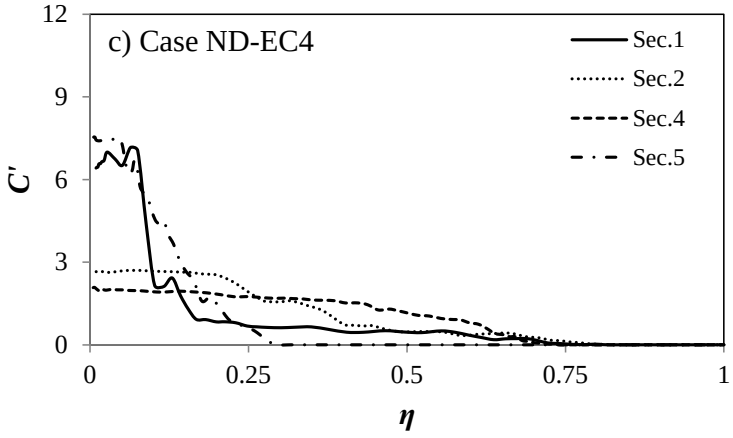


그림 4.3.1 횡 분산계수 산정을 위한 무차원 농도곡선

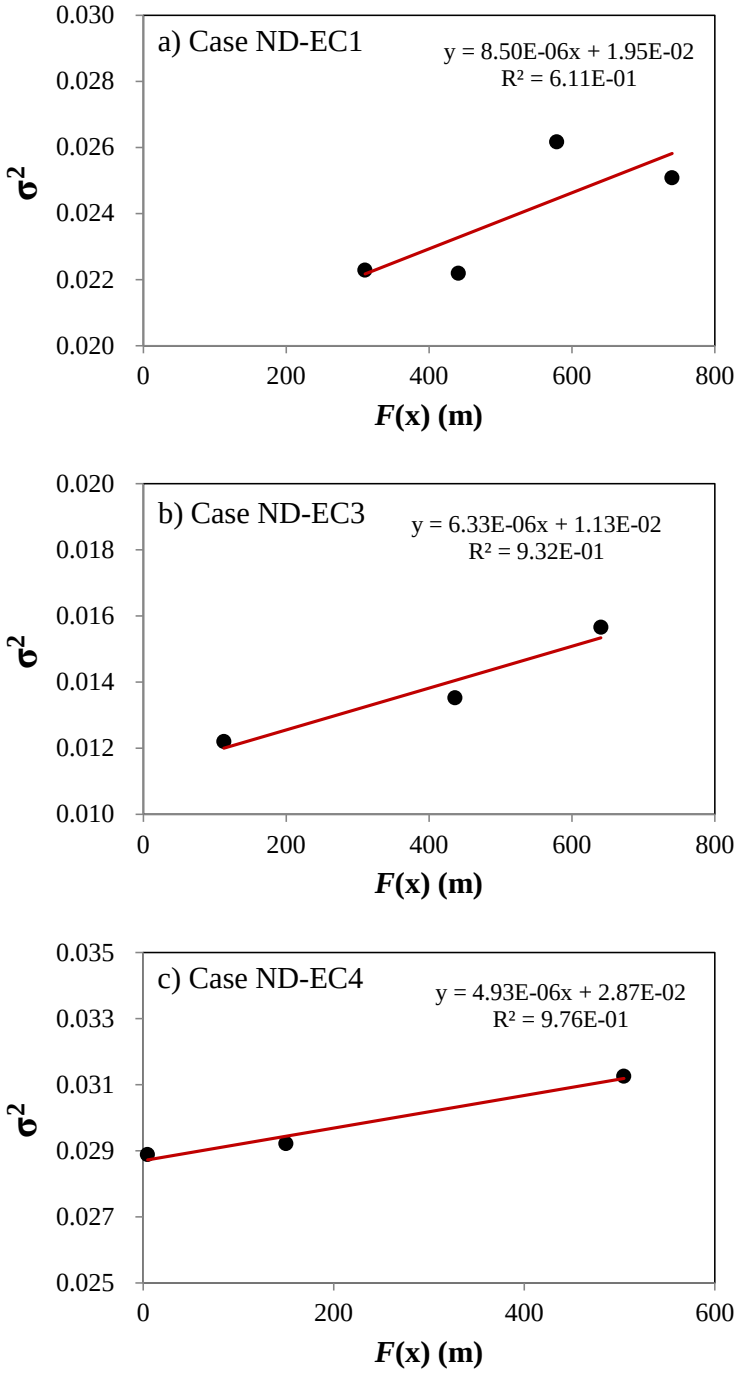


그림 4.3.2 유관모멘트법을 이용한 횡 분산계수 산정

표 4.3.1 낙동강 본류 구간 횡 분산계수 산정 결과

Case	Q (m^3/s)	$H(m)$	U (m/s)	W/H	U/U^*	S_n	$D_T\,(m^2/s)$			D_T/HU^*		
							This study	Deng et al	Jeon et al	This study	Deng et al	Jeon et al
ND-EC1	120.2	4.57	0.18	110.7	10.5	1.12	0.120	0.173	0.035	1.39	1.83	0.38
ND-EC3	396.9	5.36	0.24	76.6	11.0	1.09	0.077	0.160	0.044	0.68	1.28	0.35
ND-EC4	444.5	5.69	0.26	69.2	11.3	1.09	0.063	0.151	0.040	0.49	1.34	0.35

표 4.3.2 하천 사행도에 따른 횡 분산계수의 범위

하천 사행도	D_T/HU^*
직선 수로	0.15 ~ 0.3
만곡 수로	0.3 ~ 0.9
사행도가 큰 수로	1.0 ~ 3.0

Rutherford(1994)가 하천 형태에 따라 제안하고 있는 분산계수 범위 중 사행하천에 포함되는 결과를 나타내며 그림 4.3.3은 여러 해외 선행연구에서 산정한 무차원 횡분산계수와 비교한 그래프이다.

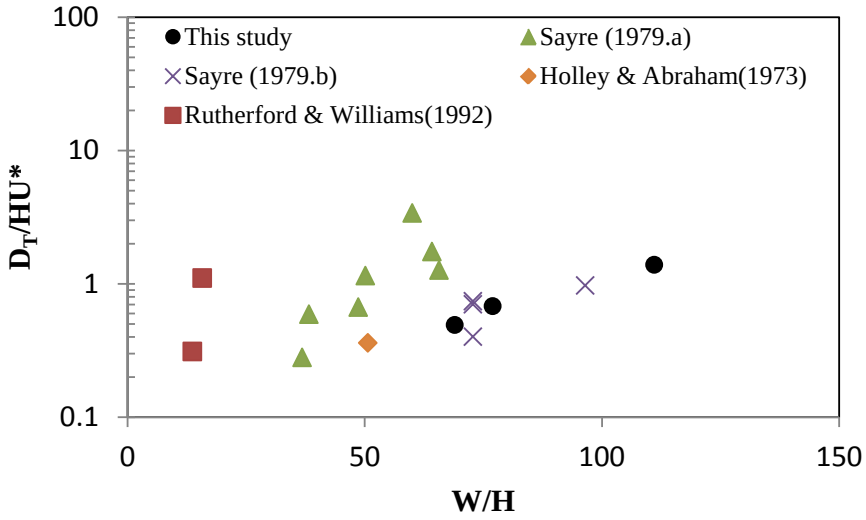
여러 연구에서 횡분산계수를 기본수리량을 통해 계산하는 방법을 제안하였으며 본 연구에서는 2000년 이후 최근에 제안된 식 (4.3.1)의 Deng 등(2001)이 제안한 경험식과 식 (4.3.2)의 Jeon 등(2007)이 제안한 경험식을 본 연구에서 산정한 계산결과와 비교하였다.

$$\frac{D_T}{HU^*} = 0.145 + \frac{1}{3520}\left(\frac{U}{U^*}\right)\left(\frac{W}{H}\right)^{1.38} \tag{4.3.1}$$

$$\frac{D_T}{HU^*} = 0.03\left(\frac{U}{U^*}\right)^{0.46}\left(\frac{W}{H}\right)^{0.3} S_n{}^{0.73} \tag{4.3.2}$$

Deng 등(2001)의 경험식으로부터 D_T / HU^*는 1.28 ~ 1.83으로 EC측정결과로부터 계산한 분산계수에 비해 다소 크게 나타났고 Jeon 등(2007)은 0.35 ~ 0.38로 계산되어 다소 낮게 산정되었다. Deng 등(2001)의 경험식은 W/H 에 높은 가중치를 주고 있고 낙동강의 W/H 가 크기 때문에 분산계수를 다소 과대 산정한 것으로 볼 수 있다. 그리고 Jeon 등(2007)의 경험식은 사행도에 높은 가중치를 주었으며 실험구간의 유속이 빠르지 않기 때문에 사행도에 의한 흐름영향이 분산에 큰 영향을 주지 못하여 다소 과소 산정한 것이라 볼 수 있다. 그림 4.3.3과 같이 하폭비와

사행도가 증가할수록 더 낮은 D_T / HU^* 가 나타냈으며 U / U^* 가 증가 함에 따라 D_T / HU^*가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.



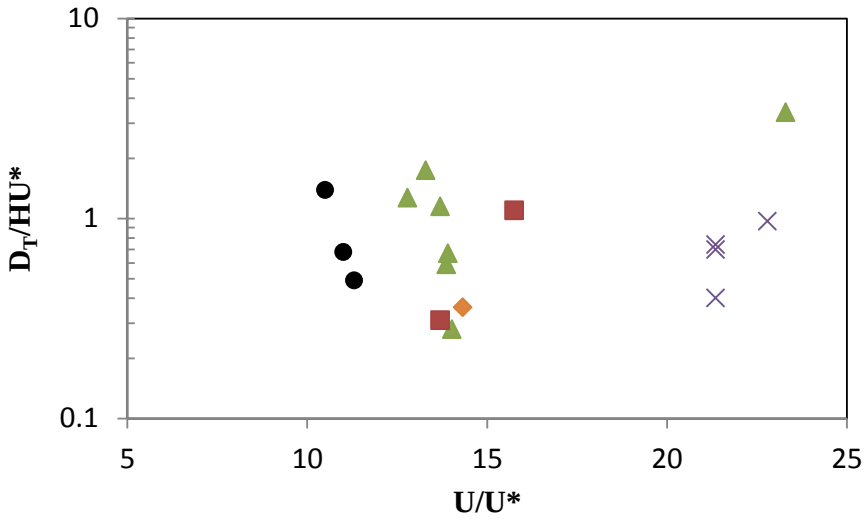


그림 4.3.3 선행연구 횡분산계수 정리

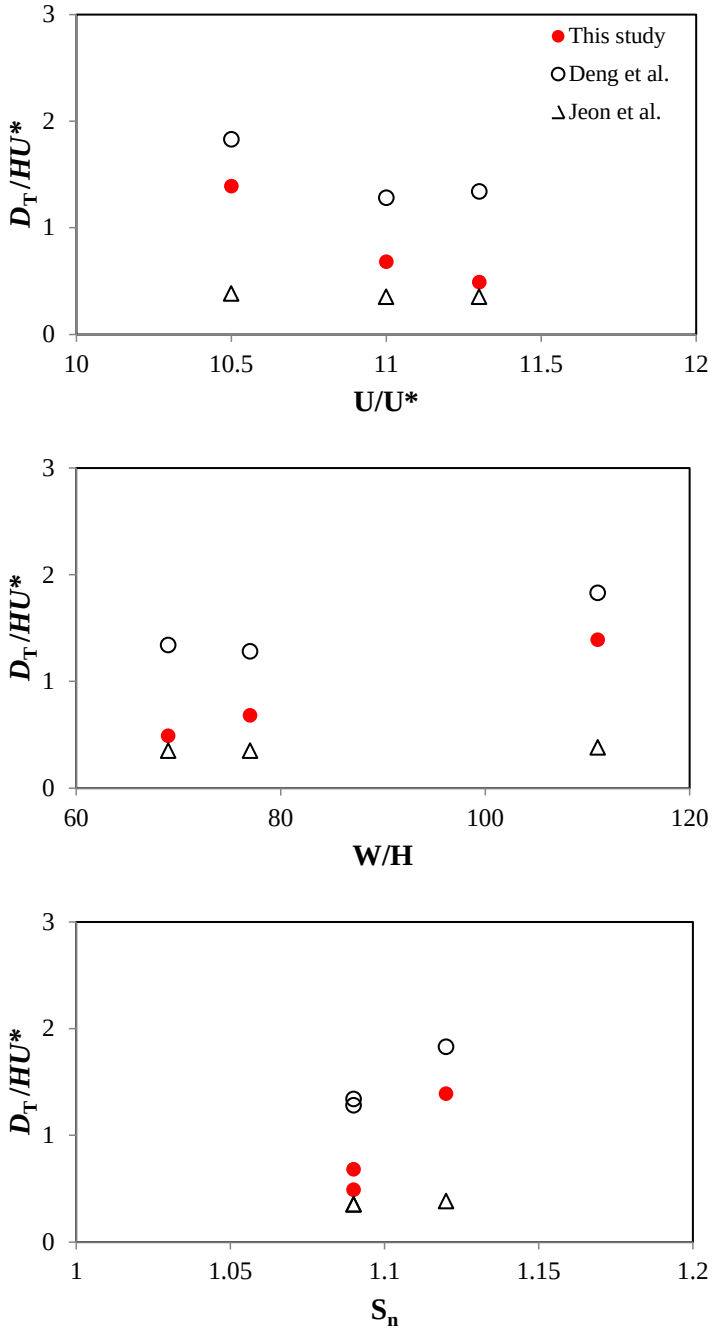


그림 4.3.4 경험식을 통해 산정한 횡분산계수 비교

V. 수치모형 적용

5.1 모의조건 및 수행방법

본 연구에서 진행한 Case ND-EC3, Case ND-EC4의 실험값과의 비교를 통하여 수치모델 HDM-2D 및 CTM-2D를 검증하였으며 이를 실험 구간보다 넓은 강정고령보 ~ 달성보 전체 구간에 대하여 적용하였다.

(1) HDM-2D

(가) 격자 생성

수치해석 모델에 사용될 격자망을 구성하기 위해서는 우선 적용지역에 대한 지형자료가 필요하다. 본 연구에서 사용된 지형자료는 국토해양부에서 지원하는 ARCROM에서 취득한 데이터를 이용하였다. 취득한 지형자료의 해상도는 40m x 40m이며 이를 이용하여 20m x 20m로 보간한 자료를 통해 낙동강 강정고령보에서 달성보 구간까지 RAMS 프로그램의 격자 생성 기능을 통해 삼각과 사각의 혼합 격자망을 구성하여 그림 5.1.1과 같은 19,902개의 노드와 18,777개의 격자로 격자망을 구성하였다. 합류전에는 하폭방향으로 11개의 노드로 구성되어 있으며 흐름이 복잡해지는 합류부에서는 25개의 노드, 합류부 이후로는 21개의 노드로 구성되어 있다.

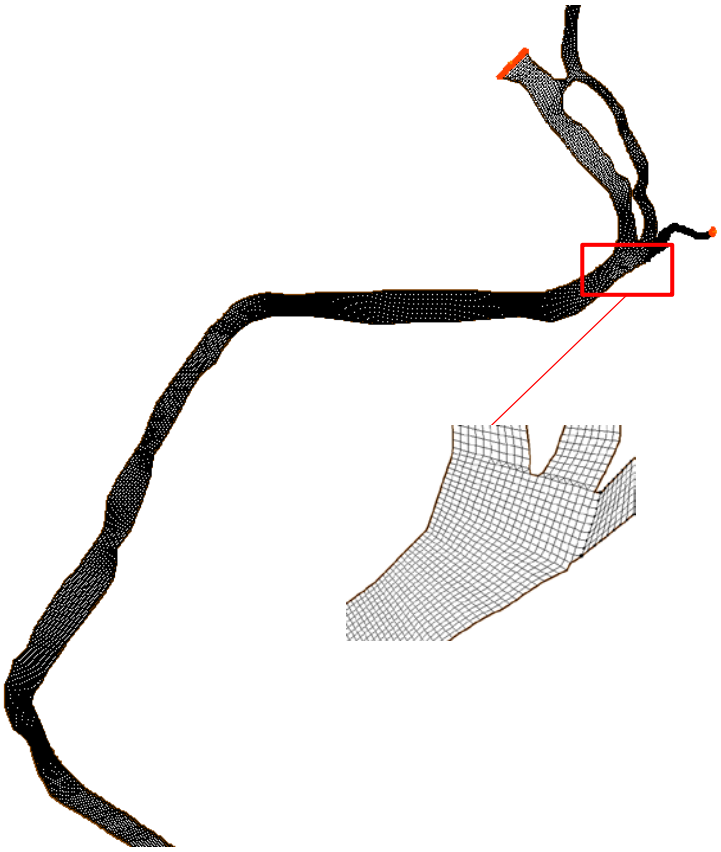


그림 5.1.1 RAMS를 이용해 생성한 격자망

(나) 모의조건

HDM-2D 모의를 위해서는 상류 부분의 경계조건인 낙동강 본류, 금호강 및 진천천의 유량을 입력해 주어야 하며 하류구간의 경계조건인 하류부 수위를 입력해 주어야 한다. 유량 데이터는 실험을 통해 실측한 데이터 값과 인근 수위-유량관측소 데이터를 이용하였으며 수위 조건은 달성보 상류 수위를 이용하여 표 5.1.1와 같이 모의를 진행하였다.

(다) 매개변수

HDM-2D을 통한 수리모의를 위해 우선 기본적으로 매닝계수(n)를 입력해 주어야 한다. 이후 사용되는 난류모형(단순 와동점성계수 입력을 통한 계산, 포물선형 와동점성계수 모형, Smagorinsky 모형)에 따라 와동점성계수(ν_t) 값을 입력하거나 Smagorinsky 계수 값을 입력해 주어야 하며 본 연구에서는 단순 와동점성계수 입력을 통한 계산을 이용하여 모의하였다. 사용된 매개변수 값은 표 5.1.1와 같다.

(2) CTM-2D

(가) 모의조건

CTM-2D 모의를 위해서는 유입부의 경계조건인 낙동강 본류, 금호강 및 진천천의 유입 전기전도도 값을 입력해 주어야 한다. 입력

표 5.1.1 HDM-2D 모의 입력 값

Case	$Q_n(m^3/s)$	$Q_k(m^3/s)$	$Q_j(m^3/s)$	$H_d(m)$	n	$\nu_t(m^2/s)$
ND-EC3	312.3	71.7	4.69	14.3	0.03	1.0
ND-EC4	410.1	64.4	6.89	14.1	0.03	1.0

표 5.1.2 CTM-2D 모의 입력 값

Case	$EC_n(\mu S/cm)$	$EC_k(\mu S/cm)$	$EC_j(\mu S/cm)$	$D_L(m^2/s)$	D_T / HU^* (m^2/s)	Δt(min)
ND-EC3	145	242	638	6.11	0.5~4.5	60
ND-EC4	227	392	660	5.01	0.5~4.5	60

값은 실측한 데이터 값을 이용하였으며 연속주입 상태로 모의하였다. 모의조건은 표 5.1.2와 같다

(나) 매개변수

CTM-2D 통한 2차원 이송 확산 모의를 위해서는 종 분산계수 및 횡 분산계수를 입력하여야 한다. 횡 분산계수는 실측 값을 통해 산정한 횡 분산계수값으로부터 연산 범위를 정했으며 종 분산계수의 값은 국내하천을 대상으로 하는 횡 분산계수값과 수리량을 통해 종 분산계수를 산정하는 경험식(환경부, 2014) 식(5.1.1) 을 이용하여 계산하였으며 그 값은 표 5.1.2와 같다.

$$\frac{D_L}{D_T} = 3.239\left(\frac{U}{U^*}\right)^{0.703}\left(\frac{W}{H}\right)^{0.354} \quad (5.1.1)$$

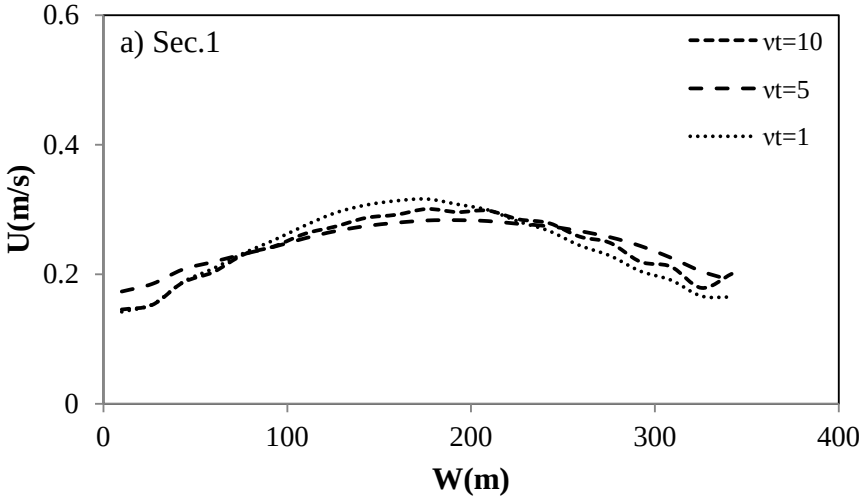
5.2 HDM-2D 적용

(1) 민감도 분석

와동점성계수(ν_t)와 매닝계수(n)에 따른 민감도 분석을 Case ND-EC4의 Sec.1 ,Sec.2, Sec.5에 대해서 진행하였다.

표 5.2.1 와동점계수에 따른 민감도분석 RMSE 결과

	RMSE(m/s)		
	Sec.1	Sec.2	Sec.5
$\nu_t = 0.6(m^2/s)$	0.0072	0.0063	0.0049
$\nu_t = 0.8(m^2/s)$	0.0030	0.0026	0.0030
$\nu_t = 1.0(m^2/s)$	-	-	-
$\nu_t = 5.0(m^2/s)$	0.0260	0.0201	0.0155
$\nu_t = 10.0(m^2/s)$	0.0285	0.0285	0.0210



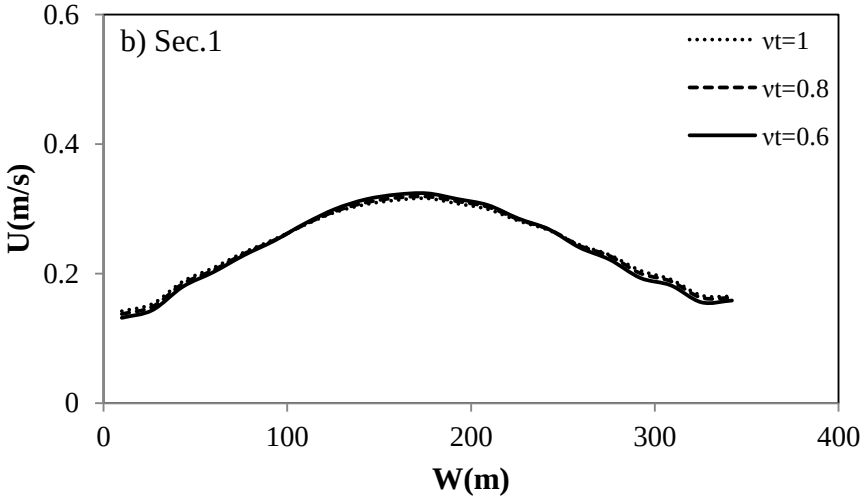
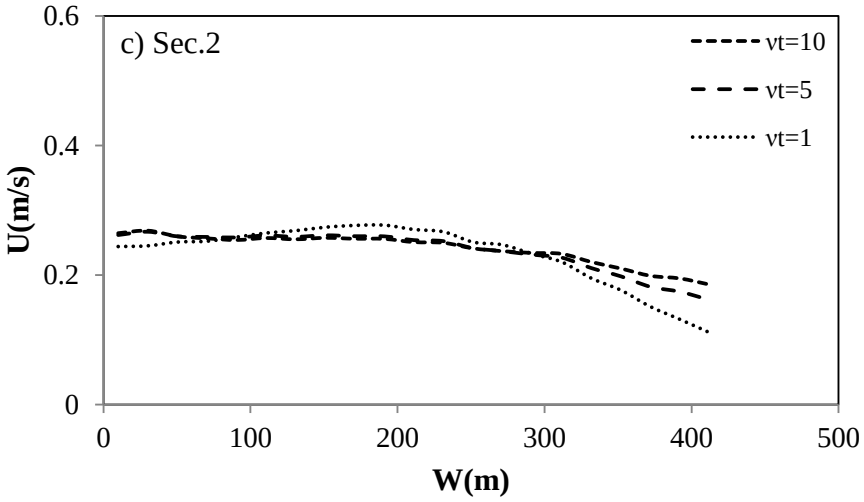


그림 5.2.1 와동점성계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석



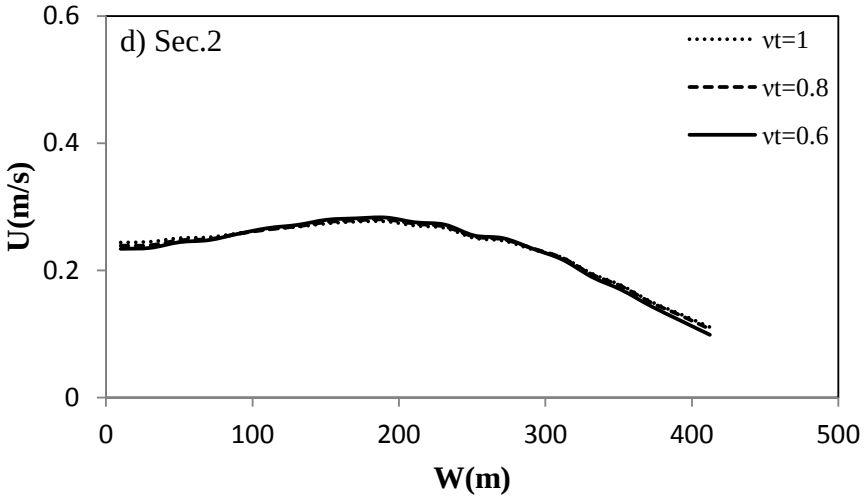


그림 5.2.1 와동점성계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석(계속)

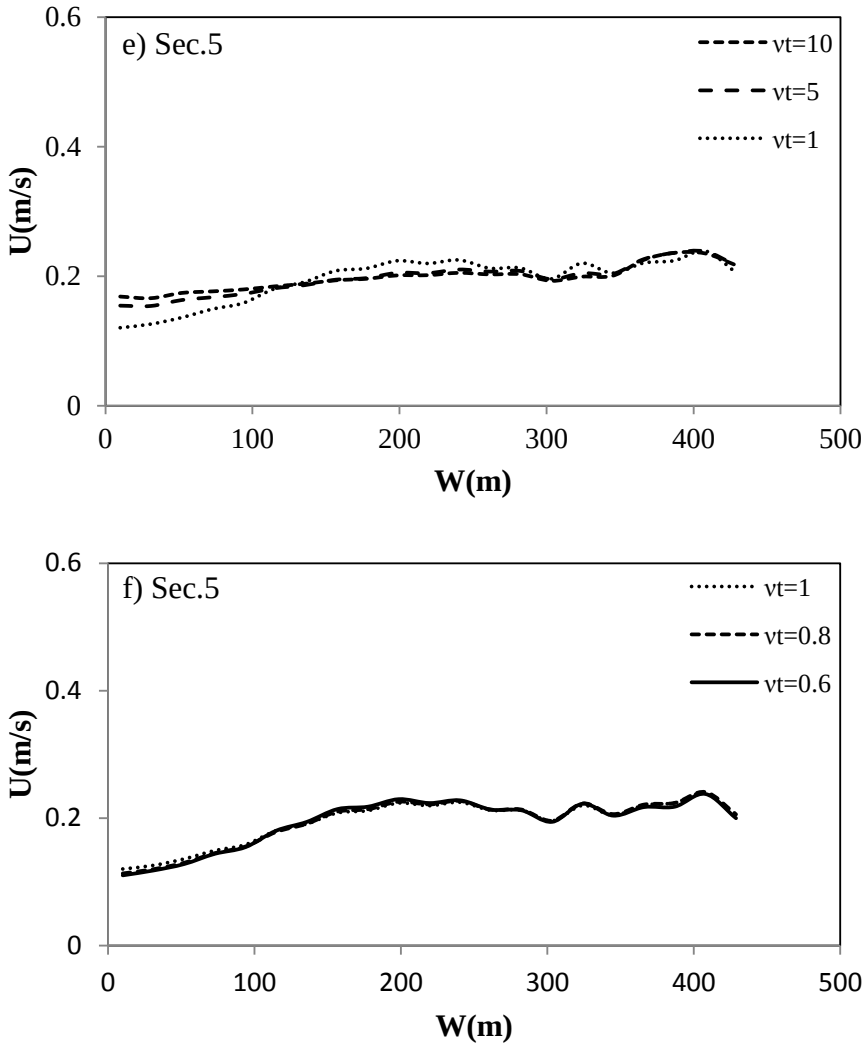


그림 5.2.1 와동점성계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석(계속)

(i) 와동점성계수(eddy viscosity)

와동점계수 $1\,m^2/s$ 을 기준으로 하여 $1\,m^2/s$ 보다 큰 $5,10\,m^2/s$ 과 $1\,m^2/s$ 보다 작은 0.8, $0.6\,m^2/s$ 에 대해서 n=0.03인 경우에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 $1.0\,m^2/s$ 이상인 경우 와동점성계수 값에 따라 유속 값의 변화가 상대적으로 크게 나타났으며 RMSE값의 경우 10^{-2} 의 차수를 갖는 값이 나타났다. $1\,m^2/s$ 이하인 경우에는 와동점계수 값에 따른 변화가 작았으며 RMSE 값의 경우 10^{-3} 의 차수를 갖는 값으로 나타났다. 전체적으로는 와동점성계수 값이 커짐에 따라 유속 분포의 분산 값이 더욱 커지는 경향을 보였다.

(ii) 매닝 계수

매닝 계수는 0.02 ~ 0.05 까지 0.005 간격으로 와동점성계수 값이 $1\ m^2/s$ 인 조건에 대하여 n=0.03 을 기준으로 민감도 분석을 수행하였다. 매닝계수가 커질수록 유속 분포의 분산 값이 더 커지는 것을 확인할 수 있었으며 RMSE 값의 범위는 10^{-3} 의 차수를 갖는 값 안에서 나타났다.

(2) 모의 결과

유속분포를 나타내는 그림 5.2.3을 보면 전체적인 유속분포의 분포는 모의 구간내의 사행과 유입되는 유량에 의하여 만곡부의

표 5.2.2 매닝계수에 따른 민감도분석 RMSE 결과

	RMSE(m/s)		
	Sec.1	Sec.2	Sec.5
n=0.02	0.0042	0.0063	0.0094
n=0.025	0.0016	0.0031	0.0039
n=0.03	-	-	-
n=0.035	0.0017	0.0033	0.0035
n=0.04	0.0033	0.0058	0.0051
n=0.045	0.0053	0.0083	0.0061
n=0.05	0.0079	0.0089	0.0081

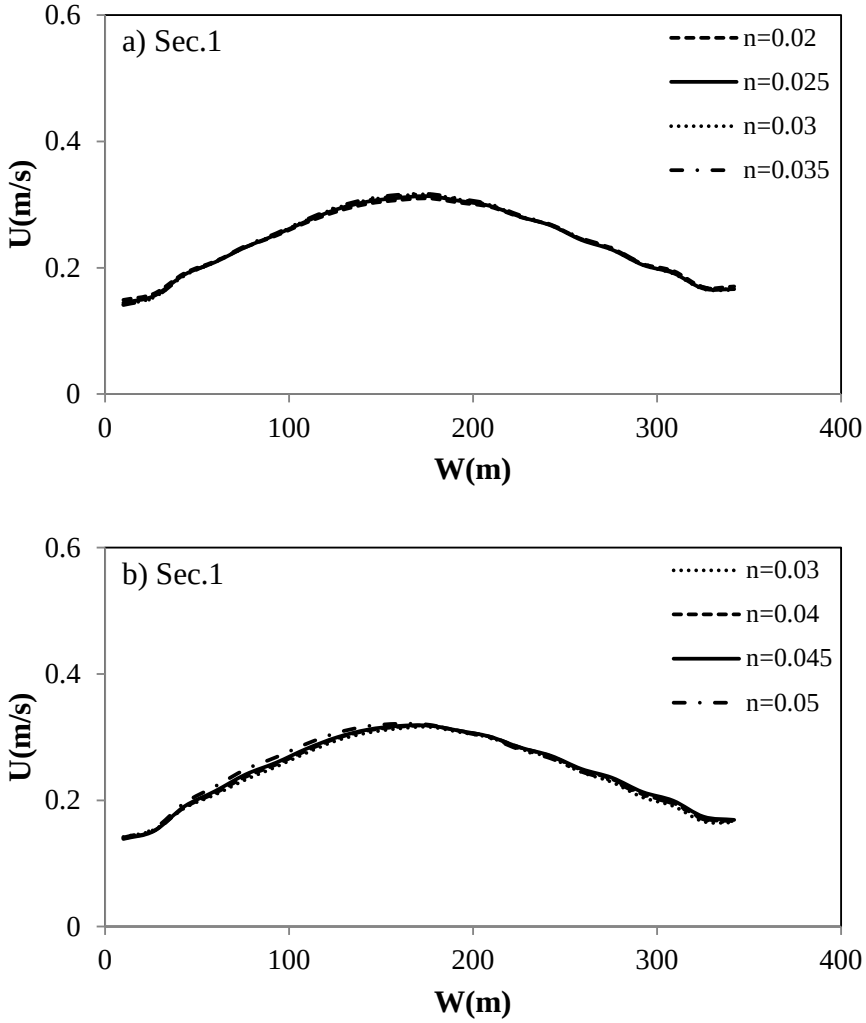
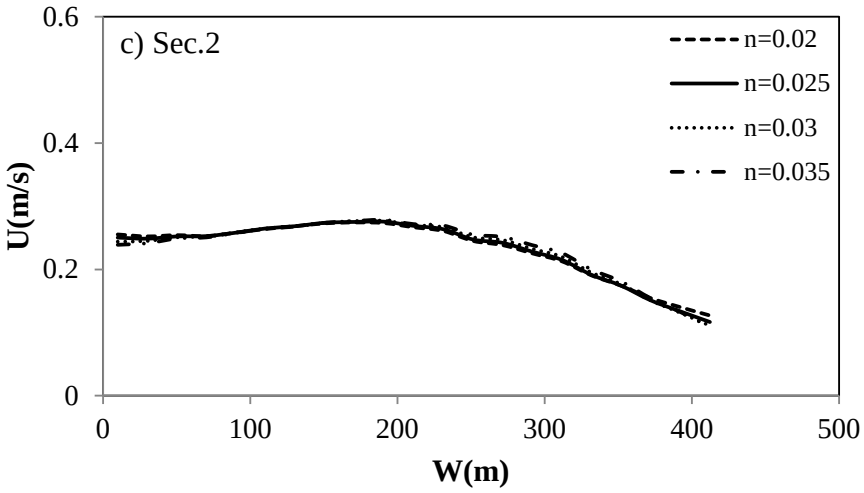


그림 5.2.2 매닝계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석



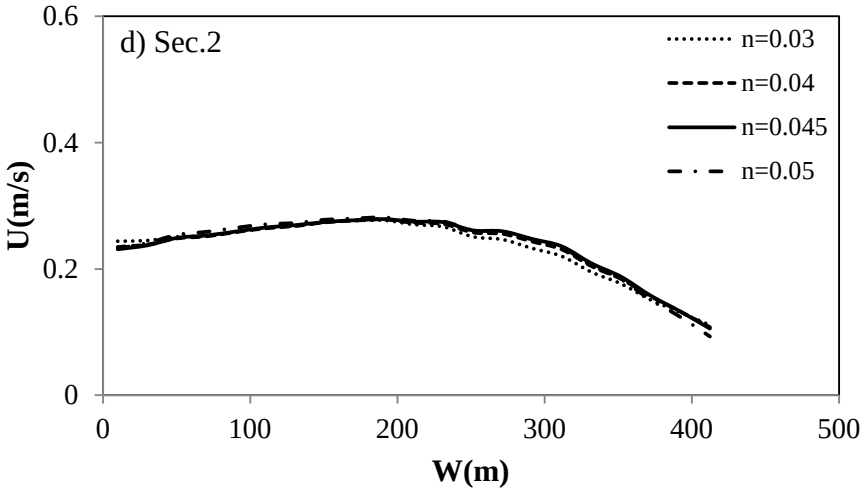
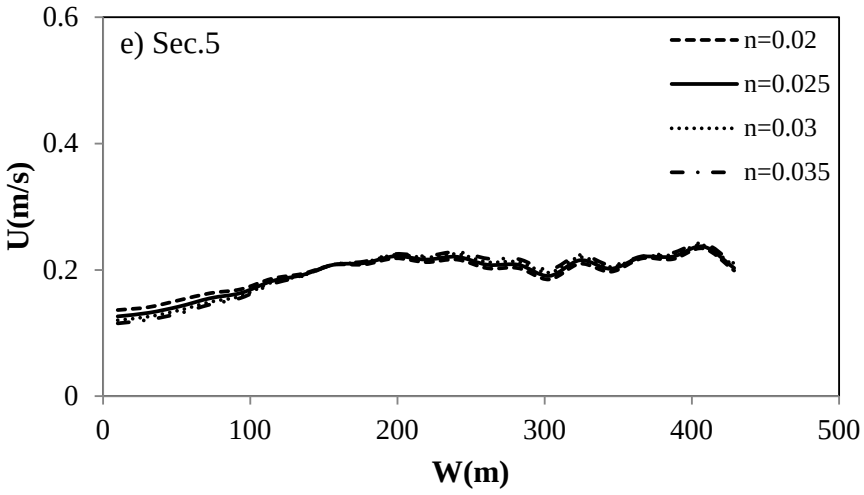


그림 5.2.2 매닝계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석(계속)



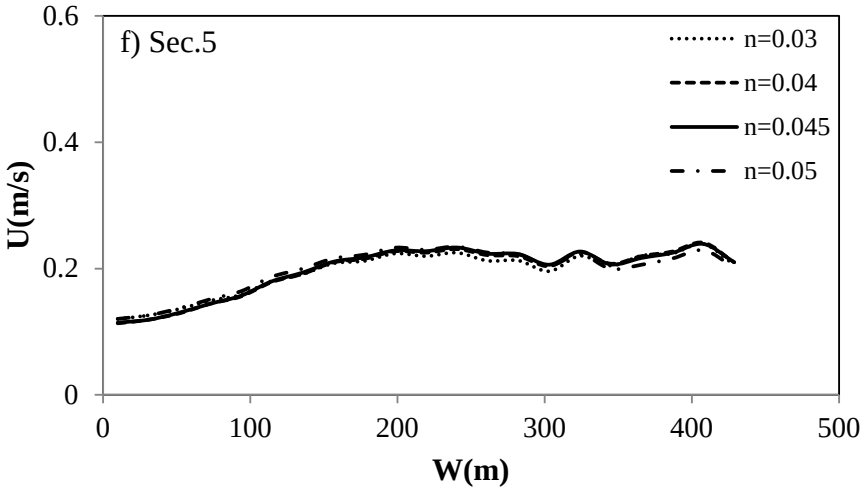


그림 5.2.2 매닝계수에 대한 HDM-2D 민감도 분석(계속)

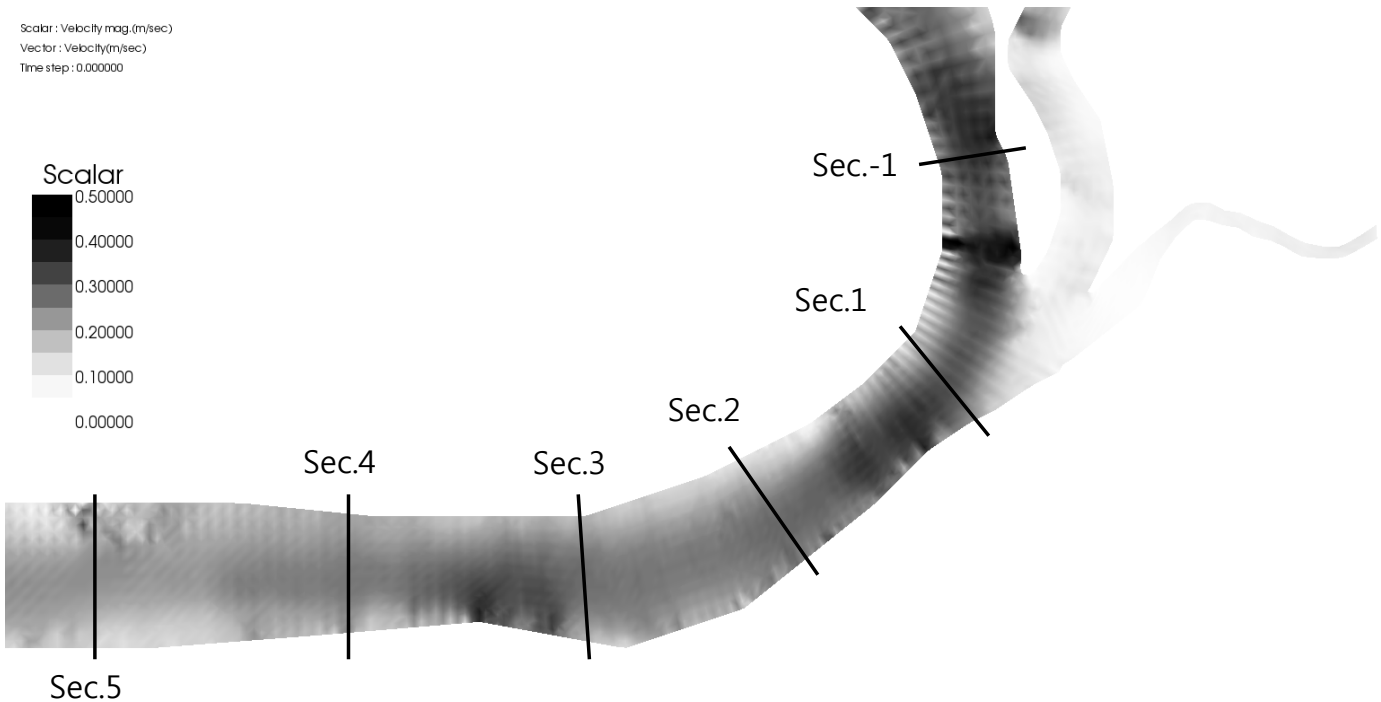


그림 5.2.3 Case ND-EC4 유속 분포도

우안쪽에서 최대 유속이 발생하였으며 다시 직선부로 접어들면서 최대 유속이 중심으로 다시 이동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 진천천 합류부의 경우 낙동강 본류에 의하여 수심이 급격히 깊어지면서 유속 값이 매우 작게 나타나는 것으로 계산되었다.

(i) Case ND-EC3

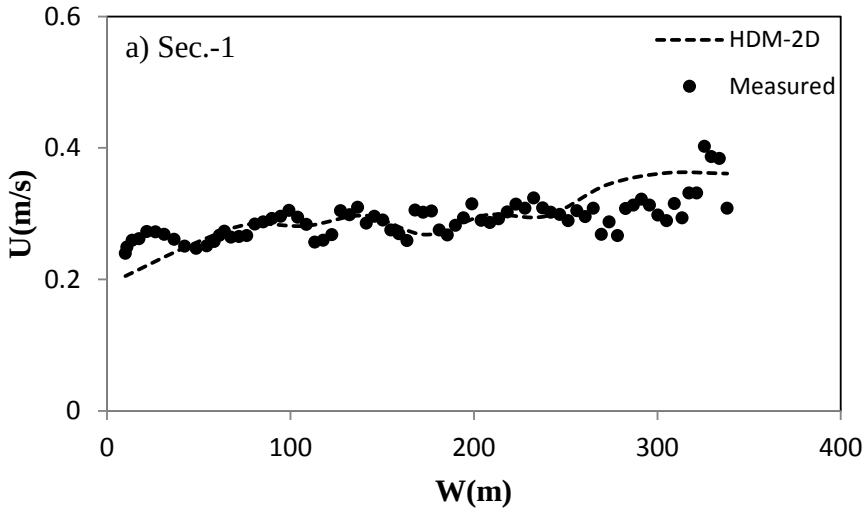
실측값이 존재하는 Sec.-1 ~ Sec.3까지의 4개 단면에 대해 이동평균한 유속 값과 수치모의 결과를 비교하였으며 그 결과는 그림 5.2.4, 표 5.2.3와 같다. 유속의 분포 및 크기는 대체로 실측값과 비슷한 양상을 보였으며 RMSE는 0.0320~0.061 m/s 정도로 나타났다.

(ii) Case ND-EC4

실측값이 존재하는 Sec.-1 ~ Sec.5까지의 5개 단면에 대해서 수치모의 결과를 이동평균한 유속 값과 비교하였으며 그 결과는 그림 5.2.5, 표 5.2.4와 같다. 유속의 분포 및 크기는 대체로 실측값과 비슷한 양상을 보였으며 RMSE는 0.0280~0.0765 m/s 정도로 나타났다.

표 5.2.3 Case ND-EC3 유속 모의 결과 RMSE

	RMSE(m/s)
Sec.-1	0.0371
Sec.1	0.0641
Sec.2	0.0320
Sec.3	0.0438



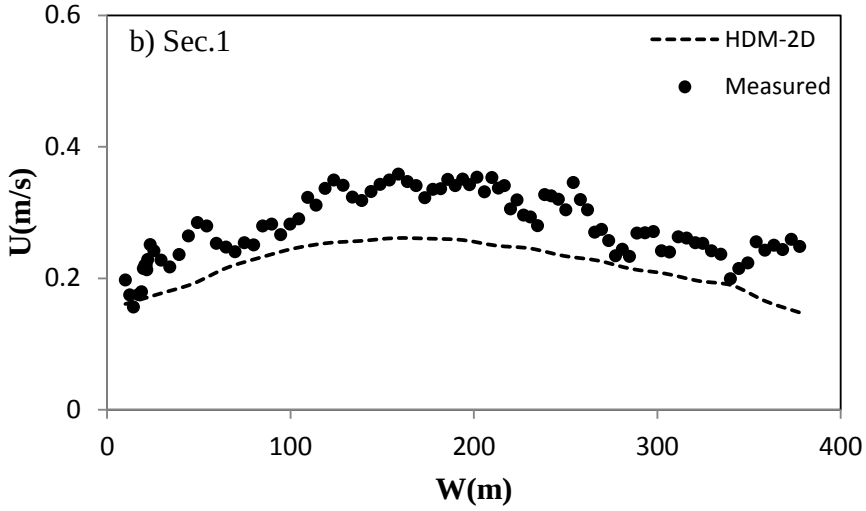
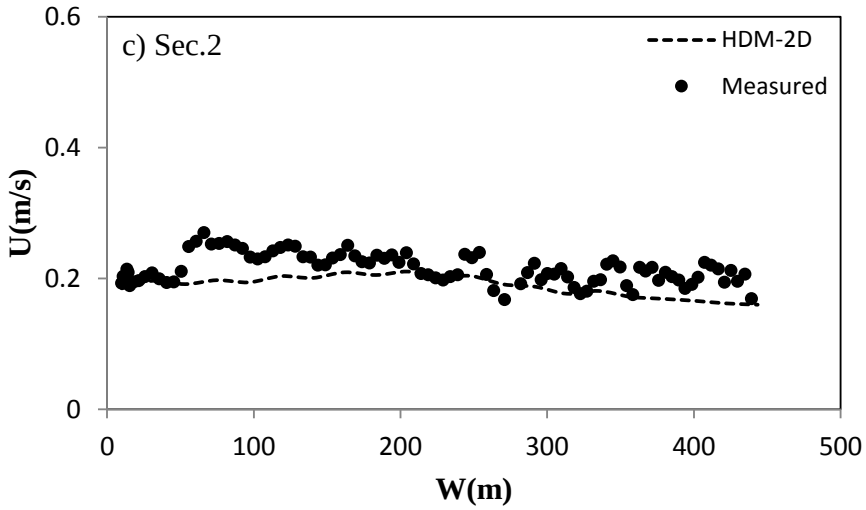


그림 5.2.4 Case ND-EC3 HDM-2D 모의 결과



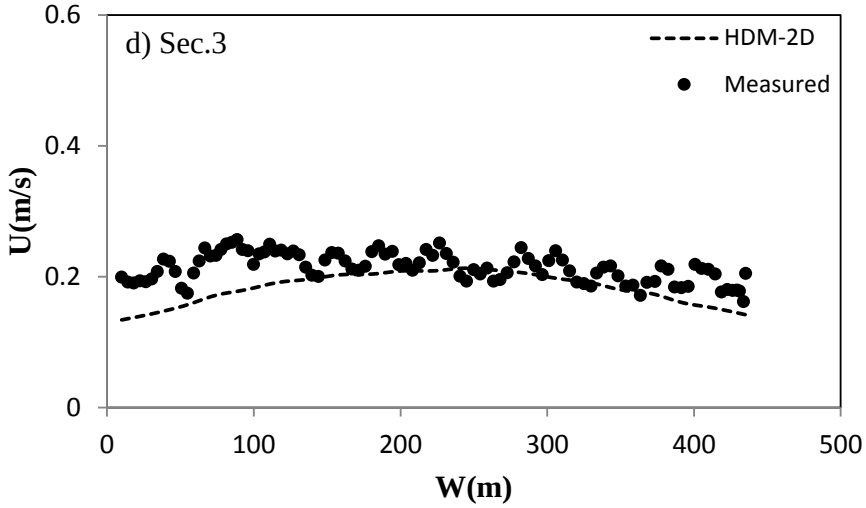
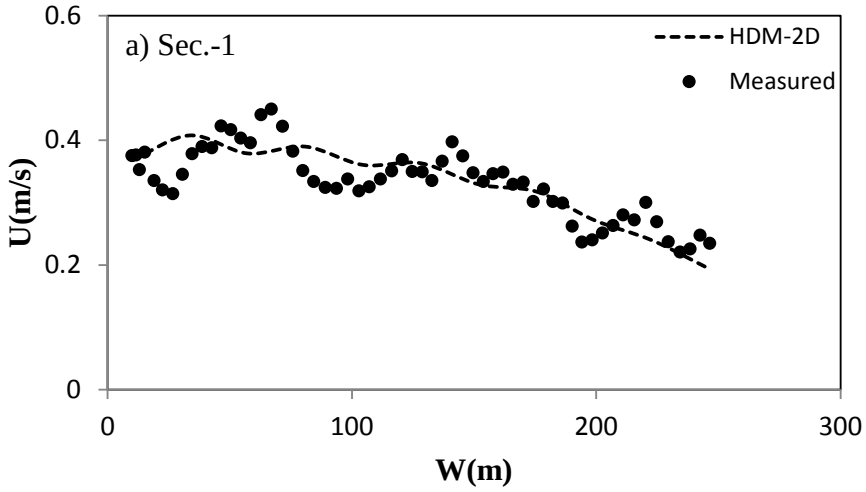


그림 5.2.4 Case ND-EC3 HDM-2D 모의 결과(계속)

표 5.2.4 Case ND-EC4 유속 모의 결과 RMSE

	RMSE(m/s)
Sec.-1	0.0610
Sec.1	0.0765
Sec.2	0.0280
Sec.4	0.0540
Sec.5	0.0577



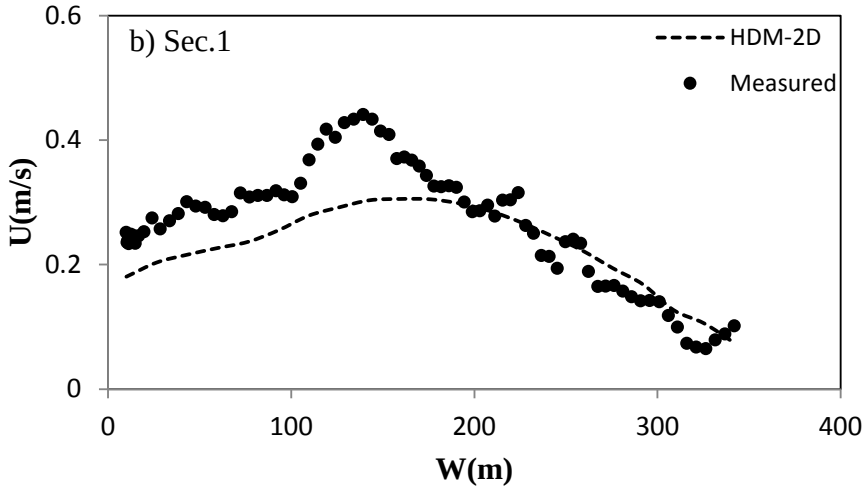
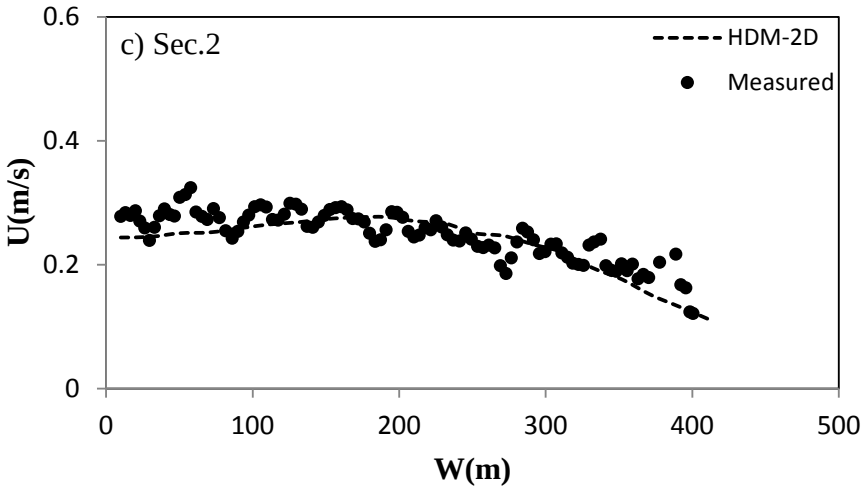


그림 5.2.5 Case ND-EC4 HDM-2D 모의 결과



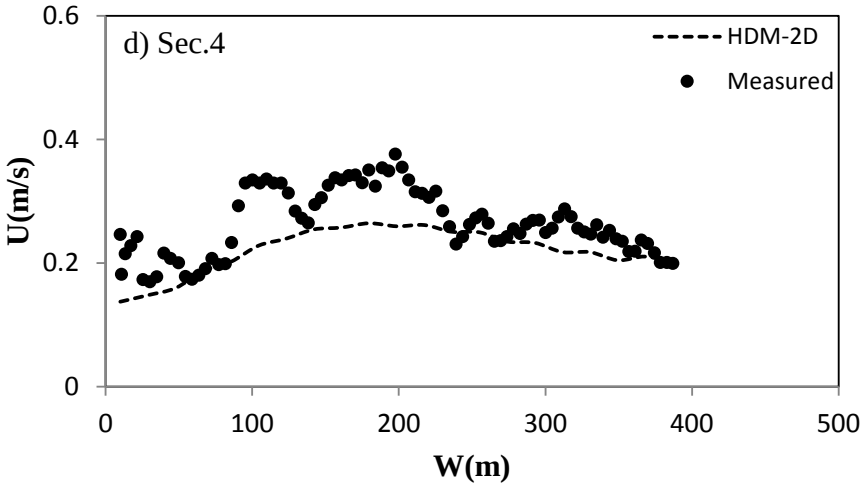


그림 5.2.5 Case ND-EC4 HDM-2D 모의 결과(계속)

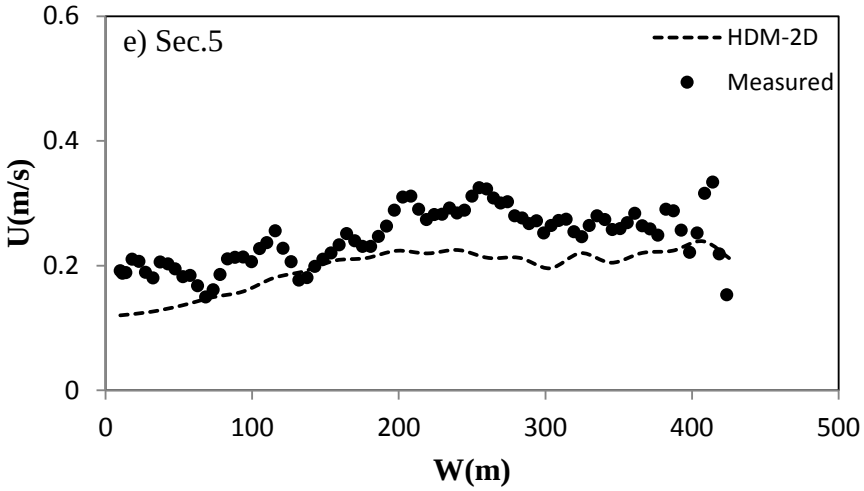


그림 5.2.5 Case ND-EC4 HDM-2D 모의 결과(계속)

5.3 CTM-2D 적용

(1) 민감도 분석

Time step에 대한 민감도 분석을 Case ND-EC4 Sec.1 ,Sec.2, Sec.4에 대해서 $dt = 1\min$ 부터 $dt = 1\text{hr}$ 의 범위에 대해서 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과는 표 5.3.1, 그림 5.3.1과 같다. 모의 조건이 정상상태 인만큼 time step 변화에 따른 해석 값의 차이는 거의 없었으며 RMSE는 0.001~0.363 $\mu S/cm$ 로 매우 낮은 값을 보였다.

(2) 모의 결과

농도분포를 나타내는 그림 5.3.2을 보면 전체적인 전기전도도 분포는 합류부 이후 본류 좌안으로부터 높은 전기전도도가 유입되는 형태를 보인다. 진천천으로부터 유입되는 전기전도도의 경우 진천천의 유량의 값이 본류와 금호강에 비하여 상대적으로 작아 본류의 먼 거리까지 영향을 끼치지 못하며 Sec.1까지 좌안에서 매우 높은 전기전도도 값이 나타나게 된다. 이후 금호강으로부터 유입되는 전기전도도로 인하여 좌안에서 금호강으로부터 유입되는 전기전도도 값이 Sec.2에서부터 나타나며 흐름 방향으로 진행될수록 그 전기전도도의 분포 값이 점점 넓어진다.

표 5.3.1 Time step에 따른 민감도 분석 RMSE 결과

	RMSE($\mu S / cm$)		
	Sec.1	Sec.2	Sec.4
1min	-	-	-
10min	0.002	0.001	0.001
1hr	0.353	0.363	0.355

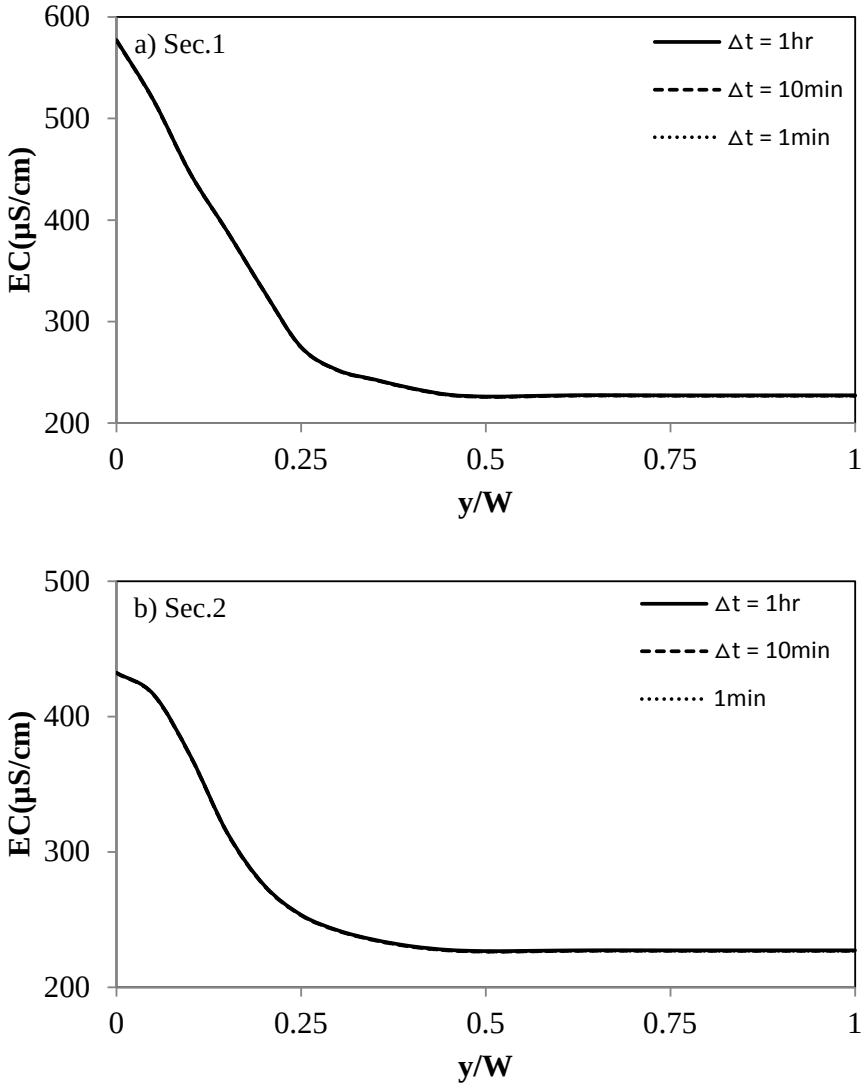


그림 5.3.1 Time step에 따른 민감도 분석 결과

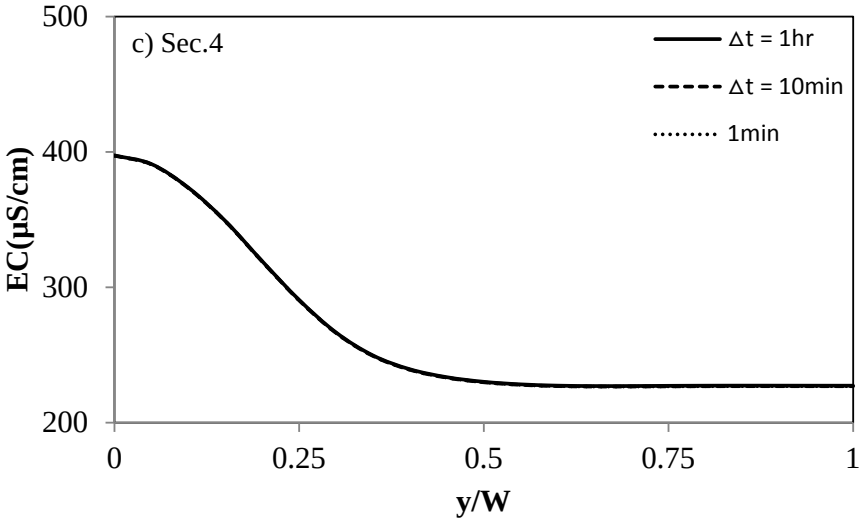


그림 5.3.1 Time step에 따른 민감도 분석 결과(계속)

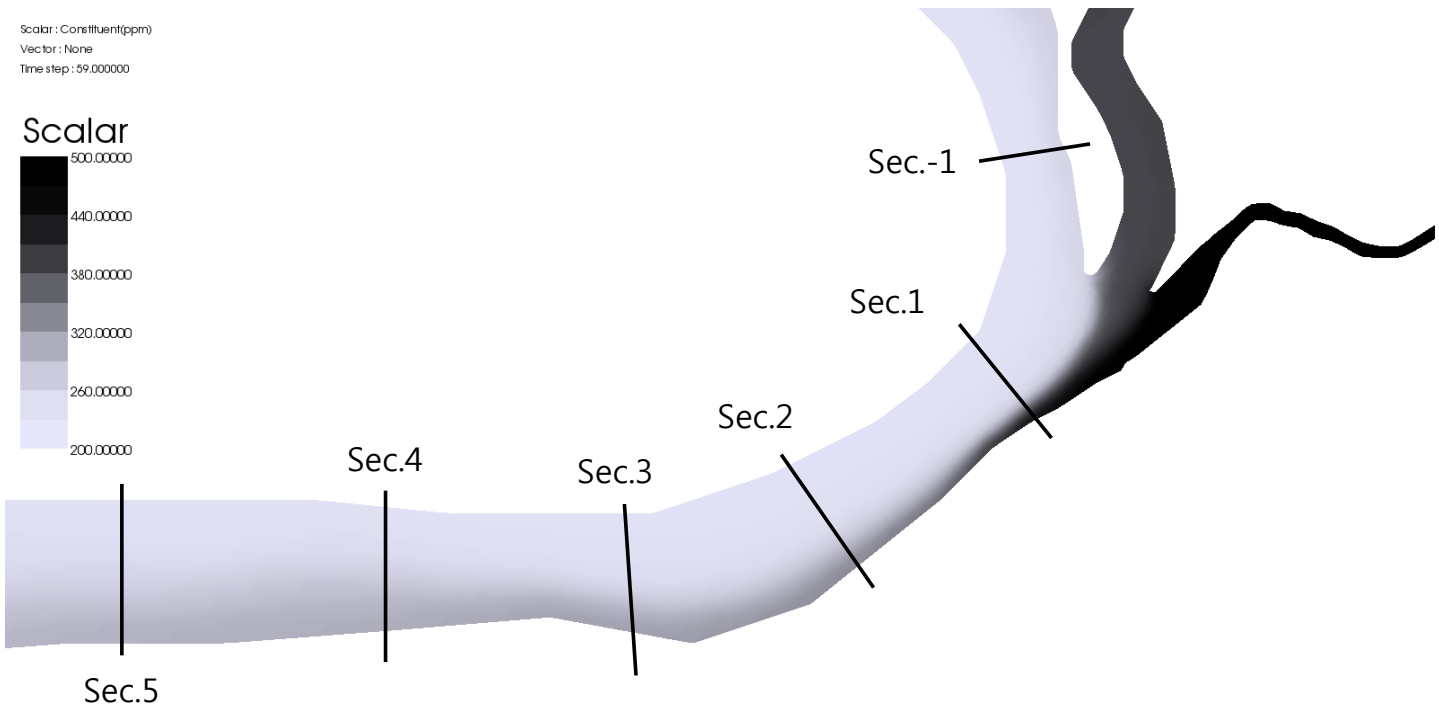


그림 5.3.2 Case ND-EC4 전기전도도 분포도

(i) Case ND-EC3

실측값이 존재하는 Sec.-1 ~ Sec.5까지의 6개 단면에 대해서 수치모의 결과를 비교하였으며 그 결과는 그림 5.3.3, 표 5.3.2와 같다. RMSE값의 범위는 4.527~62.238 $\mu S/cm$ 로 나타났으며 전체적으로 Sec.1에서 가장 큰 오차가 발생하였다. 흐름 방향으로 진행될수록 전체적인 오차 값이 감소하는 경향을 보였다. 오차 값이 적은 D_T/HU^* 의 범위는 2.0~3.0으로 0.5~2.0 범위에 비하여 상대적으로 RMSE 값이 약 1~4배 정도 차이가 났다.

(ii) Case ND-EC4

실측값이 존재하는 Sec.-1 ~ Sec.5 까지의 6 개 단면에 대해서 수치모의 결과를 비교하였으며 그 결과는 그림 5.3.4, 표 5.3.3 와 같다. RMSE 값의 범위는 1.414~48.324 $\mu S/cm$ 로 나타났으며 전체적으로 Sec.1 에서 가장 큰 오차가 발생하였다. Sec.3 을 경계로 이후 오히려 오차 값이 감소하는 것이 아닌 증가하는 경향을 보인다. 오차 값이 작은 D_T/HU^* 의 범위는 2.0~3.0 으로 0.5~2.0 범위에 비하여 상대적으로 RMSE 값이 1.1~4 배 정도 차이가 났다.

표 5.3.2 Case ND-EC3 CTM-2D 모의 RMSE 결과

D_T / HU^*	RMSE(μS / cm)					
	Sec.-1	Sec.1	Sec.2	Sec.3	Sec.4	Sec.5
0.5	6.689	62.238	39.811	35.474	32.607	28.759
1.0	5.862	57.325	31.012	25.581	22.827	18.036
2.0	5.862	53.339	22.045	15.918	14.127	9.053
3.0	4.527	51.344	17.494	11.212	10.808	7.592
3.5	4.525	50.683	16.054	9.840	10.187	8.251
4.0	51.637	36.672	35.989	36.719	37.222	37.980

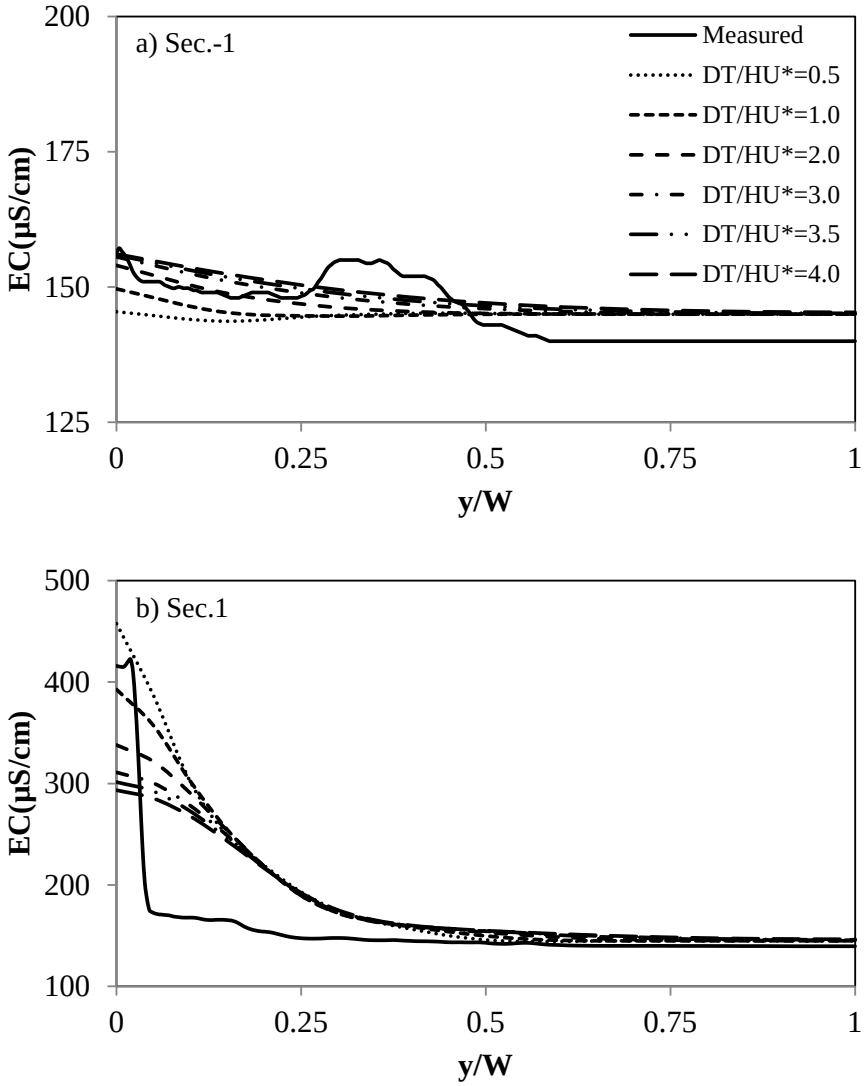
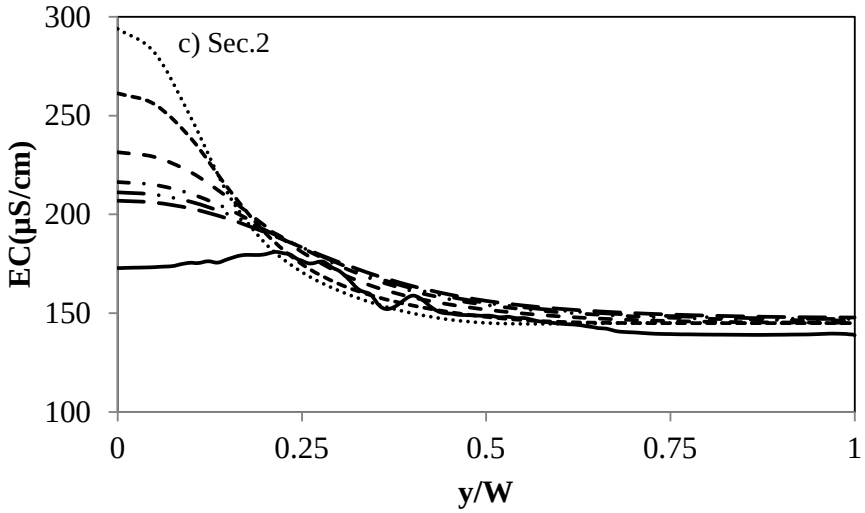


그림 5.3.3 Case ND-EC3 CTM-2D 모의 결과



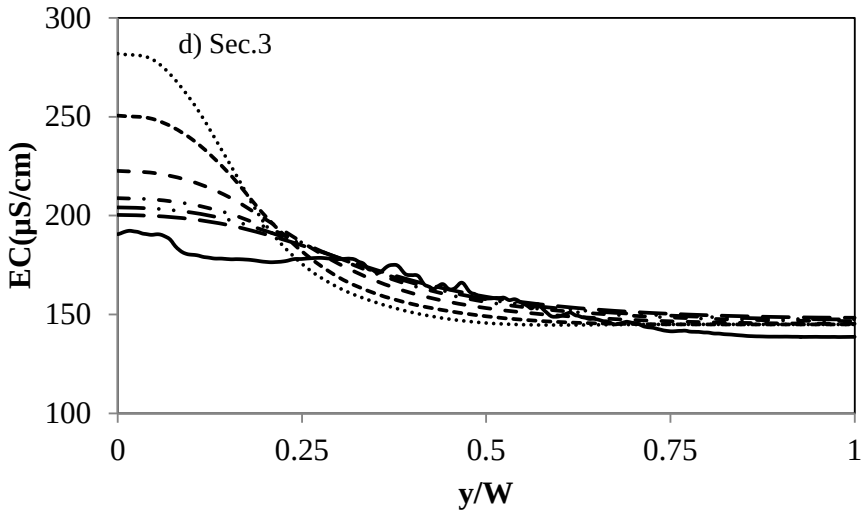
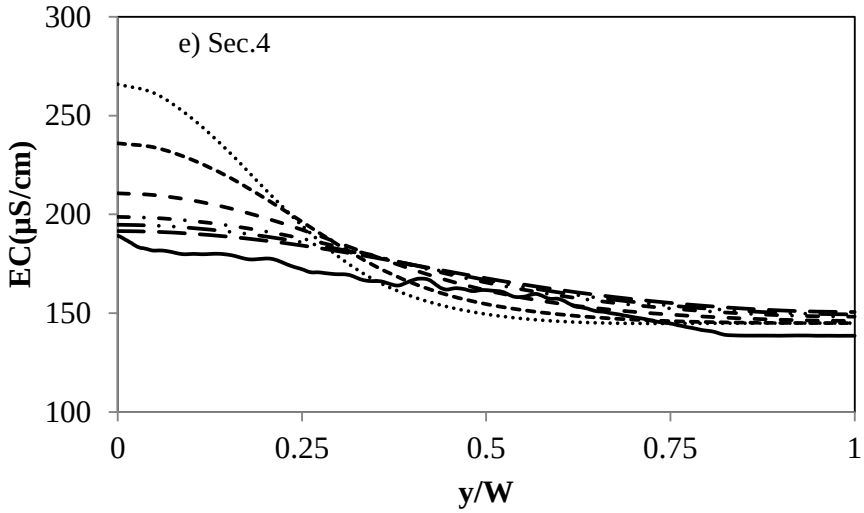


그림 5.3.3 Case ND-EC3 CTM-2D 모의 결과(계속)



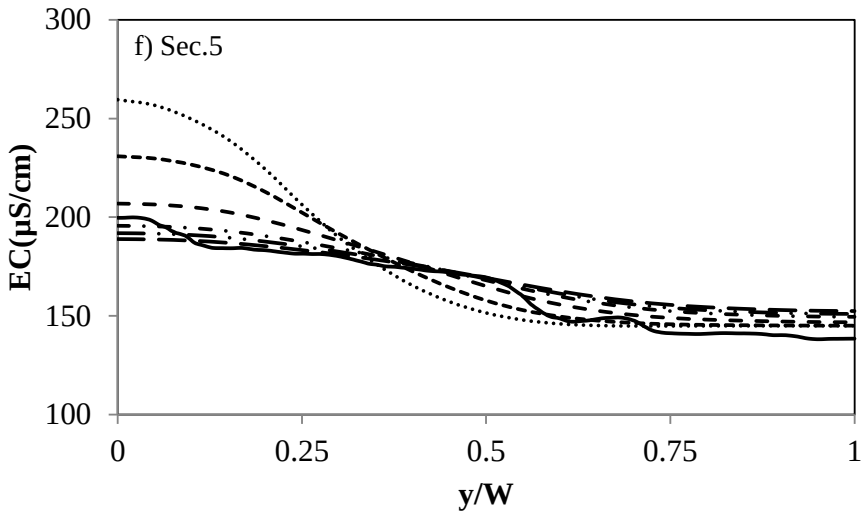


그림 5.3.3 Case ND-EC3 CTM-2D 모의 결과(계속)

표 5.3.3 Case ND-EC4 CTM-2D 모의 RMSE 결과

D_T / HU^*	RMSE(μS / cm)					
	Sec.-1	Sec.1	Sec.2	Sec.3	Sec.4	Sec.5
0.5	2.549	48.324	42.380	37.199	38.829	31.133
1.0	1.613	37.946	30.514	23.554	24.787	18.322
2.0	1.414	28.449	18.401	11.803	13.886	13.998
3.0	2.403	24.126	12.864	9.985	13.233	17.157
3.5	3.061	23.230	11.856	11.170	14.284	19.053
4.0	3.448	22.674	11.239	12.413	15.690	20.623

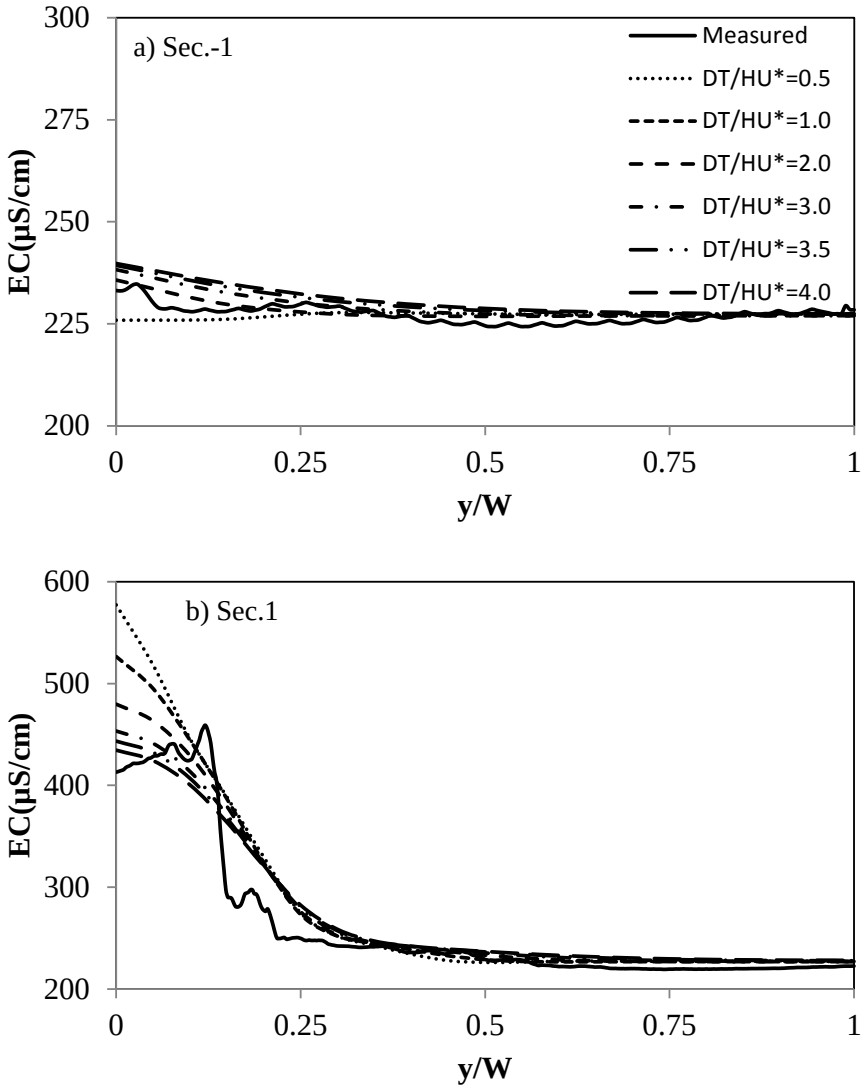
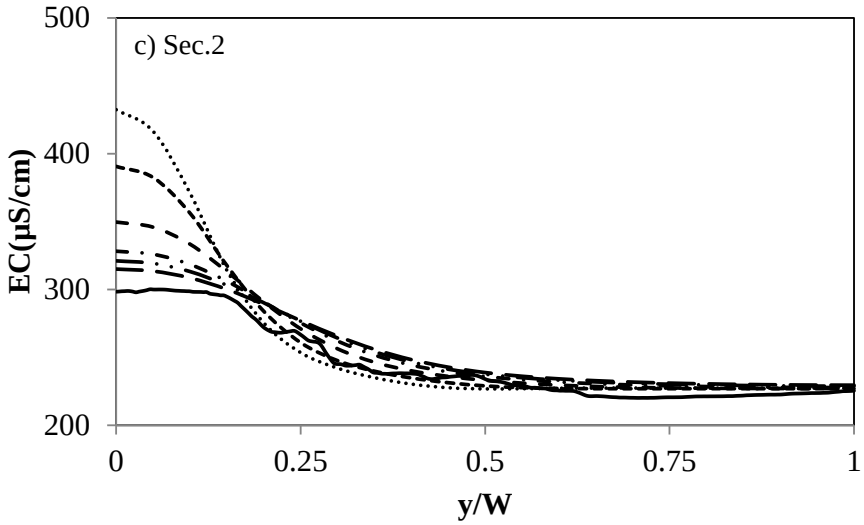


그림 5.3.4 Case ND-EC4 CTM-2D 모의 결과



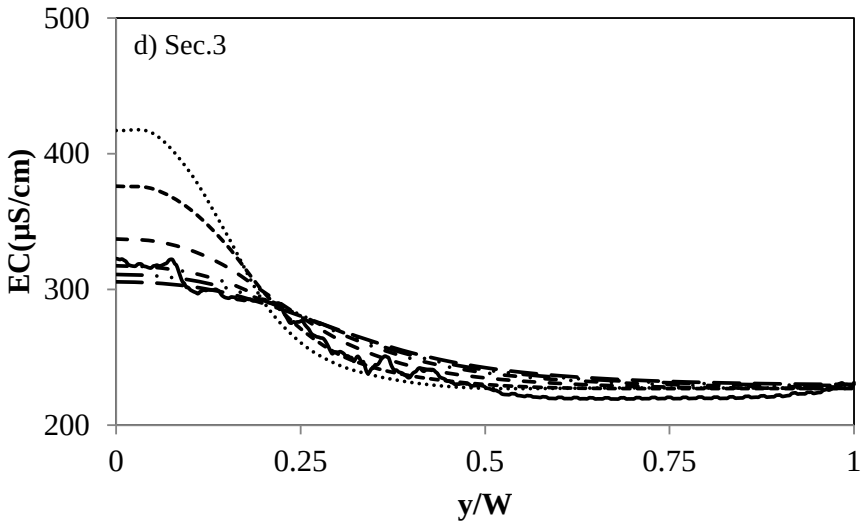
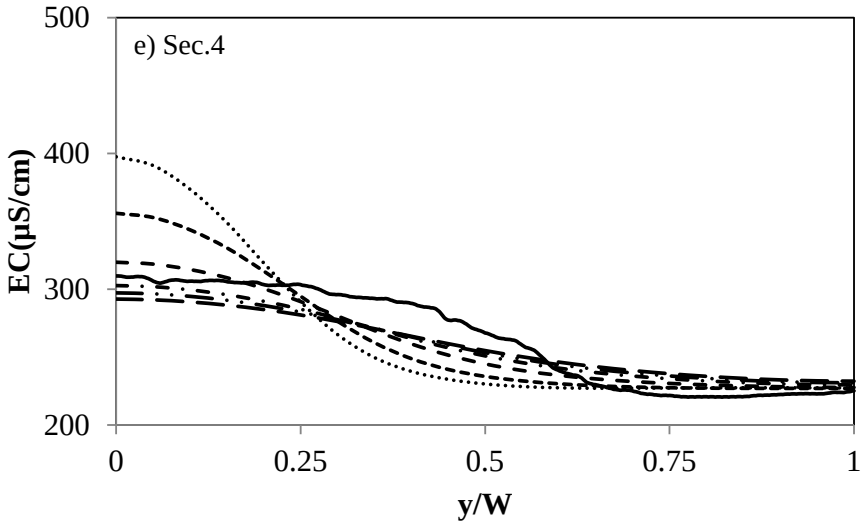


그림 5.3.4 Case ND-EC4 CTM-2D 모의 결과(계속)



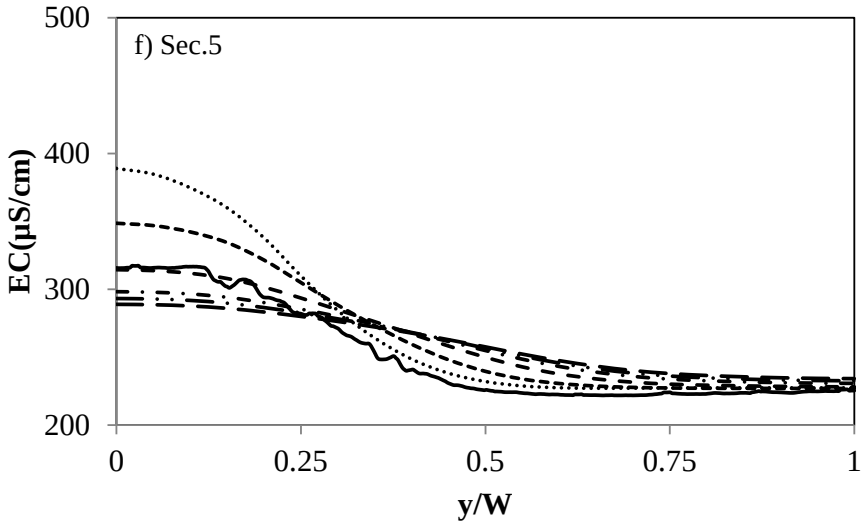


그림 5.3.4 Case ND-EC4 CTM-2D 모의 결과(계속)

VI. 요약 및 결론

6.1 요약

본 연구에서는 수질오염사고에 대응하기 위해 하천에서의 오염물질의 2차원 혼합 거동을 연구하였다. 이를 위해 낙동강 강정고령보 ~ 달성보 구간을 대상으로 추적자 실험 및 수치모의를 수행하였다. 본 연구를 통하여 대상 구간에서 합류하는 금호강 및 진천천의 영향을 분석하였다.

본 실험에서는 인공추적자 대신에 하천 인근의 도시 및 공단의 하폐수처리장으로부터 유입되는 오염물질을 자연추적자로 이용하였다. 자연추적자로서 중요 수질 자료중 하나인 전기전도도(Electric Conductivity)를 측정하여 혼합특성을 분석하였다. 본 연구에서는 ADCP를 이용한 수리량 측정, 전극센서를 이용한 전기전도도 측정을 진행하였으며 총 4번의 실험을 금호강 합류부를 포함하는 낙동강의 강정고령보 ~ 달성보 구간에서 수행하였다.

실험결과로부터 계산된 농도곡선을 이용하여 횡 분산계수(D_T)를 산정하였고 이를 기존 선행연구와 수리량을 이용하여 횡분산계수를 산정하는 Deng 등(2001), Jeon 등(2007)이 제안한 경험식과 비교하였으며 유량, 하폭비, U/U^*, 사행도와 같은 수리학적인 특성이 횡분산계수의 산정에 미치는 영향을 확인하였다.

실험 구간과 같은 구간을 대상으로 RAMS 수치모델인 HDM-2D 및 CTM-2D를 이용하여 2차원 이송-확산에 관한 수치모의를

진행하였다.

6.2 결론

본 연구에서 합류부를 갖는 사행하천에서 오염물질의 혼합특성을 규명하기 위하여 낙동강 중류부에 위치한 강정고령보 ~ 달성보 구간에서 추적자 실험을 수행한 결과, 하천의 사행과 좌안으로부터 합류되는 지천(금호강, 진천천)의 영향으로 인하여 본류의 하상단면 모양이 좌안 쪽의 수심이 깊게 나타나는 특성을 갖는 것을 알 수 있었다. 단면별 측정한 유속의 횡방향분포는 사행 및 합류구간에서는 하천의 좌안으로 편향되어 나타났으며 그 이후에는 균등한 분포를 가지고 있는 것으로 밝혀졌다

측정된 EC 농도의 분석 결과, 진천천 지류로부터 매우 높은 EC 값이 유입되고 있으며 금호강으로부터도 낙동강 본류에 비하여 상대적으로 높은 EC값이 유입됨을 확인할 수 있었다. 본류에서 EC의 횡방향 농도의 분포를 살펴본 결과, Case ND-EC1의 경우 Sec.1에서 지천으로부터 유입된 오염물에 의해 최대값이 좌안쪽에서 나타났으며 Sec.2 부터는 횡방향 혼합에 의해 농도의 분산 값이 증가하였다. 나머지 3가지 Case의 경우에는 농도의 최대값이 Sec.2 이후에서도 좌안쪽에 계속 위치하였으며 Sec.4 ~ Sec.5에 이르러서 횡방향 혼합이 점점 증가하는 경향을 보였으나 이후 Sec.6 ~ Sec.9에서는 작은 지류 유입 및 저수 효과로 인하여 불안정한 농도의 분포를 나타내었다.

유관모멘트법을 이용하여 D_T / HU^*를 계산한 결과, 0.49 ~ 1.39로 계산되어 Rutherford(1994)가 제안한 사행수로에서의 횡분산계수 범위 0.3 ~ 3.0에 들어가는 것으로 밝혀졌다. Deng 등(2001)과 Jeon 등(2007)이 제안한 경험식에 의해 산정한 계산결과와 비교한 결과, Deng 등(2001)의 경험식은 D_T / Hu^*를 과대 예측하고 있으며 Jeon 등(2007) 식은 과소 예측하는 것으로 밝혀졌다. 2차원 이송-확산 모형 RAMS를 본 연구 구간에 적용하여 오염물의 혼합거동을 모의하였다. HDM-2D의 경우 실험 구간내에서 만곡부에서는 우안에서, 직선부에서는 중앙에서 최대 유속값이 관측되어 실측된 수리량 값과 흐름 특성이 유사한 경향을 보였으며 RMSE의 범위는 10^{-2}차수 정도의 값을 보였다. 확산모델인 CTM-2D를 적용한 결과, D_T / HU^*값으로 2.0~3.0을 입력했을 경우 0.5~1.5일 때보다 실측 농도분포를 잘 재현하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 새롭게 제안한 자연 추적자 실험은 중대규모의 하천에서 보다 손 쉽게 추적자 실험을 수행할 수 있는 하나의 방안으로 제시될 수 있을 것이다. 보다 많은 하천에서 자연추적자 실험을 수행할 경우 중규모 이상의 국내 하천에 적용할 수 있는 횡분산계수 경험식을 도출할 수 있을 것으로 기대 된다.

참고문헌

서일원, 박성원(2008), “사행수로에서 유속구조가 추적물질의 혼합에 미치는 영향.” **대한토목학회논문집**. 제29권, 제1B호, pp 35-45..

서일원, 백경오, & 전태명. (2006). 방사성 동위원소를 이용한 자연하천의 2 차원 추적자 실험. *대한토목학회논문집 B, 26*(2B), 161-170.

서일원 외 3명(2010). **지표수 거동해석을 위한 RAMS의 사용자 설명서 및 튜토리얼.** 국토해양부

서일원, 전태명, & 백경오. (2005). 자연하천에서 2 차원 오염확산 예측을 위한 횡분산계수 추정식 개발. *대한토목학회논문집 B, 25*(4B), 247-255.

이명은. (2007). Two-Dimensional Finite Element Model for Pollutant Transport Analysis. *박사학위논문, 서울대학교.*

전태명(2005), **자연하천에서 오염물질의 횡분산 특성.** 석사학위논문, 서울대학교.

정성진(2005), **사행수로에서 오염물의 횡혼합에 관한 실험적연구.** 석사학위논문, 서울대학교.

Almquist, C. W., & Holley, E. R. (1985). Transverse mixing in meandering laboratory channels with rectangular and naturally varying cross sections. *Center for Research in Water Resources Technical Report-205 September 1985*.

Baek, K. O., & Seo, I. W. (2010). Routing procedures for observed dispersion coefficients in two-dimensional river mixing. *Advances in Water Resources*, *33*(12), 1551-1559.

Beltaos, S. (1980). Transverse mixing tests in natural streams. *Journal of the Hydraulics Division*, *106*(10), 1607-1625.

Boxall, J. B., Guymer, I., & Marion, A. (2003). Transverse mixing in sinuous natural open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, *41*(2), 153-165.

Boxall, J. B., & Guymer, I. (2003). Analysis and prediction of transverse mixing coefficients in natural channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, *129*(2), 129-139.

Chang, Y. C. (1971). Lateral mixing in meandering channels. In *River Meandering* (pp. 598-610). ASCE.

Deng, Z. Q., Singh, V. P., & Bengtsson, L. (2001). Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *127*(11), 919-927.

Fischer, H. B. (Ed.). (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic press.

Fischer, H. B. (1969). The effect of bends on dispersion in streams. *Water Resources Research*, *5*(2), 496-506.

Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.

Holley, E. R. (1971). *Transverse mixing in rivers*. Delft Hydraulics Laboratory.

Jeon, T. M., Baek, K. O., & Seo, I. W. (2007). Development of an empirical equation for the transverse dispersion coefficient in natural streams. *Environmental Fluid Mechanics*, *7*(4), 317-329.

Krishnappan, B. G. K., & Lau, Y. L. (1977). Transverse mixing in meandering channels with varying bottom topography. *Journal of Hydraulic Research*, *15*(4), 351-370.

Lau, Y. L., & Krishnappan, B. G. (1977). Transverse dispersion in rectangular channels. *Journal of the Hydraulics Division*, *103*(10), 1173-1189.

Mossman, D. J., Holly Jr, F. M., & Schnoor, J. L. (1991). Field observations of longitudinal dispersion in a run-of-the-river impoundment. *Water research*, *25*(11), 1405-1415.

Mueller, D. S., & Wagner, C. R. (2009). *Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat*. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Nokes, R. I., & Wood, I. R. (1988). Vertical and lateral turbulent dispersion: some experimental results. *Journal of Fluid Mechanics*, *187*, 373-394.

Rutherford, J. C. (1994). *River mixing* (p. 347). Chichester: Wiley.

Sayre, W. W., & Chang, F. M. (1968). A laboratory investigation of open-channel dispersion processes for dissolved, suspended, and floating dispersants. *U S GEOL SURV PROF PAP 433-E, PP E 1-E 71, 1968.*

Seo, I., Baek, K. O., & Jeon, T. M. (2006). Analysis of transverse mixing in natural streams under slug tests. *Journal of Hydraulic Research*, *44*(3), 350-362.

Webel, G., & Schatzmann, M. (1984). Transverse mixing in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, *110*(4), 423-435.

Yotsukura, N., Fischer, H. B., & Sayre, W. W. (1970). Measurement of mixing characteristics of the Missouri River between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska.

Yotsukura, N., & Cobb, E. D. (1972). Transverse diffusion of solutions in natural streams. *US Geo. Survey Paper*, (582).

Yotsukura, N., & Sayre, W. W. (1976). Transverse mixing in natural channels. *Water Resources Research*, *12*(4), 695-704.

Abstract

Experimental and Numerical Study of Two-dimensional Mixing Based on the Conductivity Tracing in Natural Streams

Sung Hyun Jung
Department of Civil and Environmental Engineering
Master of Engineering
Seoul National University

In this study, countermeasure to the water pollution and accident, field tracer test and numerical modeling was conducted for Nakdong River to study two-dimensional mixing of pollutant. In study area, two tributaries of Keumho River and Jincheon Creek is merging from the left side of Nakdong River.

Previous tracer test used artificial tracers such as fluorescence dye, radioactive materials, NaCl solute, and etc. Instead of using artificial tracers, natural tracers using pollutant input from sewage treatment plant and overland cities were suggested in this study. ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) was used for hydraulic data measurement and YSI electrodes conductivity sensor was used for conductivity measurement.

From the achieved data of EC(Electric Conductivity), high value of EC was incoming from Jincheon Creek and relatively high value of EC was also incoming from Keumho River. D_T / HU^* was estimated as 0.49 ~ 1.39 which were well fitted to range of dispersion coefficients suggested by Rutherford (1994) for curved and meandering channels. Comparing with

previous studies, Deng(2001) overestimated D_T / HU^* and Jeon(2007) underestimated D_T / HU^*. As discharge, aspect ratio and sinuosity increased, values of dispersion coefficients were increased. As U / U^* increased, values of dispersion coefficients were decreased.

Based on estimated dispersion coefficients, 2D mixing numerical model RAMS was applied. Result of HDM-2D showed maximum flux line occurred in left side of river in meandering part and moved to the center in straight part. General velocity aspect showed quiet similar with measured data and RMSE showed about 10^{-2} scale values. Result of CTM-2D showed lower RMSE when value of D_T / HU^* was 2.0~3.0 than value of D_T / HU^* was 0.5 ~ 1.5. So inputting D_T / HU^* as 2.0 ~ 3.0 showed general aspects and value of conductivity showing well fitted with experiment.

Keywords: 2D Mixing, Field Tracer Test, Confluence, Meandering Stream, Natural Tracer, Transverse Dispersion Coefficient, RAMS, Electric Conductivity(EC)

Student number: 2013-20938