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

조경학석사 학위논문

수목의 건조 피해에 대응하는 토양 함수율 유지를 위한 관수 용량과 빈도 증가 효과 비교 연구

A Study on the Comparative Effect of Irrigation Capacity and Frequency for Maintaining Soil Moisture Content in response to Dry Damage of Plants

2023년 2월

서울대학교 환경대학원

환경조경학과

육 지 환

수목의 건조 피해에 대응하는 토양 함수율 유지를 위한 관수 용량과 빈도 증가 효과 비교 연구

지도교수 이 유 미

이 논문을 조경학석사 학위논문으로 제출함
2022년 10월

서울대학교 환경대학원
환경조경학과
육 지 환

육지환의 석사 학위논문을 인준함
2022년 12월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

수목의 건조 피해에 대응하는 토양 함수율 유지를 위한 관수 용량과 빈도 증가 효과 비교 연구

서울대학교 환경대학원 환경조경학과
육 지 환

위 논문은 서울대학교 및 환경대학원 환경조경학과 학위논문 관련 규정에 의거하여 심사위원의 지도과정을 충실히 이수하였음을 확인합니다.

2023년 2월

위 원 장 _____ (서울대학교 환경대학원 교수)

부위원장 _____ (서울대학교 환경대학원 교수)

위 원 _____ (서울대학교 환경대학원 교수)

국문초록

현재 한반도의 기온 상승과 가뭄으로 인한 토양수분 부족 현상은 수목의 건조 피해에 큰 영향을 미치고 있다. 특히 토양 내 수분 증발 현상은 수목의 생육 저하에 직접적인 영향을 미치며, 이에 따라 건조 피해에 대응하는 토양 함수율 유지를 위한 고민이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기후변화로 인한 수목의 건조 피해에 대응하기 위해 관수 용량과 빈도의 증가 효과를 비교하여 수목 관수법의 개선 방향에 대해 고찰하였으며, 실제 실험을 통해 일별 함수율 변화를 측정하고 이를 토양수분 스트레스 지수로 계산하였다. 토양수분 스트레스 지수는 $Day(K_S=1)$, $Day(K_S=0)$, $Day(K_S=0,1)$ 변화율로 계산하여 독립변수별 실험구를 비교 및 검증하였다.

본 실험에 앞서 실험 환경 설정을 위한 1차 선행실험을 진행하였으며, 선행실험을 통해 얻은 예외 변수 통제 대상을 파악하였다. 이후 고온과 가뭄 환경 구현을 위한 온실 환경을 설계하고, 가설 설정을 위한 2차 선행실험을 진행하여 본 실험의 목적을 구체화하였다.

본 실험을 위한 대상 수목으로는 자작나무 (*Betula platyphylla*)와 스트로브잣나무 (*Pinus strobus*)를 선정하였다. 토양 재료는 양토이며, 각 실험구는 길이와 높이가 300㎜인 정사각형의 플라스틱 포트를 활용하였다. 일별 함수율 변화 측정을 위해서는 정전용량 프로브 방법을 이용한 토양 수분 측정기를 활용하였다. 본 실험의 기준 관수량은 토양학에서 설명하는 토양 수분함량에 의한 관수량 산정식을 활용하여 5.60L/1회로 설정했다. 독립변수는 1회 관수 용량과 관수 빈도이며, 실험구는 각 독립변수에 따라 관수 용량에서는 목표 함수율을 5%씩 증가시킨 5.60L/1회 (A_1), 6.25L/1회 (A_2), 7.87L/1회 (A_3),

9.00L/1회 (A_4)로 구분하였으며, 관수 빈도에서는 기준 관수량을 횟수로 나눈 5.60L/1회 (C_1), 2.80L/2회 (C_2), 1.87L/3회 (C_3), 1.40L/4회 (C_4)로 구분하였다. 각 실험구는 자작나무와 스트로브 잣나무 1주씩 구성되며, 중복된 기준 실험구를 포함하여 총 14개의 실험구로 진행했다.

본 연구의 결과로 토양수분 스트레스 지수를 비교해보았을 때, 관수 용량 증가 실험구에 비해 관수 빈도 증가 실험구에서 토양수분 스트레스를 최소로 받는 것으로 확인된다. 특히 무관수 기간에도 토양수분 스트레스 지수가 최소인 상태를 더 오래 유지하는 것으로 보아 관수 빈도 증가 실험구가 건조에 대한 저항력이 더 높다고 판단된다. 이에 따라 기후변화에 따른 수목의 건조 피해에 대응하기 위해서는 1회 관수 용량 증가가 아닌 관수량이 적더라도 관수 빈도 증가가 필요하며, 특히 가을철 등 15일 이상의 무강우 기간으로 인해 건조 피해가 예상될 시에는 최소 3회 이상의 빈도로 나누어 관수를 진행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 고온과 가뭄에 의한 건조 피해에 대응하는 관수 용량과 빈도 증가의 효과 비교 연구를 진행하였으며, 측정된 일별 함수율을 활용한 토양수분 스트레스 지수를 도출하고 분석하여 건조 피해에 쉽게 노출되는 환경으로 변화할수록 1회 관수 용량보다는 관수의 빈도를 증가시키는 것이 훨씬 효과적이라는 사실을 실험을 통해 검증했다. 따라서 본 연구는 최근 국내외에서 연구가 활발히 진행되고 있는 스마트 자동관수 시스템 등의 도입 효율성에 대한 기초자료의 역할을 할 것으로 기대한다.

▌ 주요어 : 기후변화, 건조피해, 토양 함수율, 관수량, 관수빈도

▌ 학번 : 2019-20026

목 차

제1장 서론

1절. 연구의 배경 및 목적 ····· 01
1. 연구의 배경 ····· 01
2. 연구의 목적 ····· 05

2절. 연구 진행 절차 ····· 06

제2장 이론적 고찰 및 선행연구 분석

1절. 기후변화에 따른 수목의 생장 환경변화 분석 ····· 07

2절. 관수법 및 관련 연구 분석 ····· 09
1. 기관별 시방서 및 지침서 ····· 09
2. 실제 현장에서의 관수법 ····· 13
3. 관수법에 관한 국내외 연구 분석 ····· 15

3절. 토양 함수율과 수분 스트레스의 관계 분석 ····· 17
1. 수분 스트레스의 정의 ····· 17
2. 토양의 수분부족 현상 ····· 17
3. 수목의 건조 피해와 토양 함수율의 연관성 ····· 19
4. 토양의 유효 및 위조점 함수율 ····· 20

4절. 토양의 함수율을 활용한 수분 스트레스 지수 방정식 ····· 21

제3장 실험환경 및 방법

1절. 가설 설정을 위한 선행실험 ····· 23
1. 실험 환경 설정을 위한 선행실험 ····· 23
2. 관수 용량 증가에 따른 선행실험 ····· 25

2절. 실험환경 설정 ····· 26
1. 공간 및 시간적 범위 ····· 26
2. 토양 재료 ····· 27
3. 수목 재료 ····· 28

3절. 실험 방법 ····· 30
1. 실험구 조성 ····· 30
2. 측정 장비 및 방법 ····· 33
3. 독립변수별 토양수분 스트레스 지수 계산식 설정 ····· 34

제4장 실험결과 및 고찰

1절. 관수 용량 증가에 따른 함수율 및 토양수분 스트레스 지수 ····· 35
1. 관수 용량 증가에 따른 함수율 변화 ····· 35
2. 일별 함수율 및 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프 ····· 43

2절. 관수 빈도 증가에 따른 함수율 및 토양수분 스트레스 지수 ····· 54
1. 관수 빈도 증가에 따른 함수율 변화 ····· 54
2. 일별 함수율 및 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프 ····· 62

3절. 관수 용량과 빈도 증가에 따른 변화 비교 ····· 73
1. Day (Ks=1) / Day (Ks=0) / Day (Ks=0,1) 변화율을 통한 비교 ····· 73

제5장 결론

1절. 연구의 요약 ····· 75
2절. 연구의 한계 및 시사점 ····· 78

[참고문헌] ····· 79
[영문초록] ····· 87
[부록] ····· 90

표 차례

[표1] 한국의 최근 10년-과거 30년간 월 평균기온 차이 ····· 01
[표2] 조경수목 피해 원인 분석 설문조사 ····· 03
[표3] 기관별 조경 시공 시방서 상 관수 항목 ····· 10
[표4] 조경 시공 지침서 상 관수 항목 ····· 12
[표5] 연구 수행 기간 동안의 온실 내외부 기온 및 습도 ····· 27
[표6] 대상지 내 토양 성분 분석표 ····· 28
[표7] 토양의 함수율 측정을 위한 수분 측정기 ····· 33
[표8] 토양수분 스트레스 지수 일별 정리표 (관수 용량 증가) ····· 53
[표9] 토양수분 스트레스 지수 일별 정리표 (관수 빈도 증가) ····· 72
[표10] 토양수분 스트레스 지수 일별 비교표 ····· 73

그림 차례

[그림 1] 조경 실무자 설문조사 진행 사진 ····· 14
[그림 2] 토양의 이용 가능한 수분 범위 ····· 20
[그림 3] 변수와 토양수분 스트레스와의 관계 그래프 ····· 22
[그림 4] 실험 환경 설정을 위한 선행실험 과정 사진 ····· 23
[그림 5] 실험 대상지 및 온실 전경 사진 ····· 26
[그림 6] 대상 수목 식재 및 근권부 깊이 사진 ····· 29
[그림 7] 실제 실험 진행 사진 ····· 30
[그림 8] 본 실험의 실험구 구성도 ····· 32

부록

[부록 1] 실무자 대상 설문조사지 및 결과표 ····· 90
[부록 2] 본 실험 기록지 양식 ····· 91

실험구 결과 차례

[Table 0.1.1] 관수 용량 증가에 따른 선행 실험 그래프 ····· 25

관수 용량 증가(A)에 따른

[Table 1.1~4.1] 자작나무(A) 일별 함수율 변화표 ····· 35
[Table 1.5~8.1] 스트로브 잣나무(A) 일별 함수율 변화표 ····· 39
[Table 1.1~4.2] 자작나무(A) 일별 함수율 변화 그래프 ····· 45
[Table 1.5~8.2] 스트로브 잣나무(A) 일별 함수율 변화 그래프 ····· 49
[Table 1.1~4.3] 자작나무(A) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프 · ····· 45
[Table 1.5~8.3] 스트로브 잣나무(A) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프 ····· 49

관수 빈도 증가(C)에 따른

[Table 2.1~4.1] 자작나무(C) 일별 함수율 변화표 ····· 54
[Table 2.5~8.1] 스트로브 잣나무(C) 일별 함수율 변화표 ····· 58
[Table 2.1~4.2] 자작나무(C) 일별 함수율 변화 그래프 ····· 64
[Table 2.5~8.2] 스트로브 잣나무(C) 일별 함수율 변화 그래프 ····· 68
[Table 2.1~4.3] 자작나무(C) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프 · ····· 64
[Table 2.5~8.3] 스트로브 잣나무(C) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프 ····· 68

제1장 서론

1절. 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

1) 한반도의 기후변화

현재 전 세계는 지구온난화에 따른 기후변화의 문제로 기온 상승, 강수의 유형 변화 등 극한 기상 현상의 빈도가 높아지고 있다 (송우경・이보라・조낭현・정성철・김은숙・임종환, 2020). IPCC 보고서에 따르면, 전 세계 평균기온은 과거에 비해 약 0.74℃(1906~2005) 상승하였으며, 1990년대 이후에는 상승세가 급격하게 가속화됨에 따라 미래에도 더 가파르게 가속화될 것으로 판단하고 있다 (안소라・박근애・장철희・김성준, 2013).

한반도에서도 기후변화로 인해 과거 30년간 연평균 기온은 계속해서 증가하는 추세이다. 전국 62개 관측소 지점 평균치를 계산해보면 최근 10년(2011~2020) 연평균 기온은 12.9℃로 과거 30년(1981~2010) 평균값보다 0.6℃가 상승하였으며, 더 전의 과거 30년(1911~1940) 평균값과 기온 차는 0.8℃로 점점 더 가속화되어 상승하는 모습을 보인다 (기상청 기후정보포털, 2022).

[표 1] 한국의 최근 10년 – 과거 30년간 월 평균기온 차이 (기후정보포털(2022), 연구자 재작성)

평균 기온 (℃)	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2011 ~2020	-1.0	1.5	6.8	12.3	17.9	21.9	25.1	25.7	20.7	14.5	8.1	0.9	12.9
1981 ~2010	-1.3	0.9	5.7	11.9	17.0	21.1	24.3	24.9	20.2	14.0	7.2	1.2	12.3
차이값	0.3	0.6	1.1	0.4	0.9	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.9	-0.3	0.6

또한 기상청 자료에 따르면 가뭄 발생 역시 2000년 이후 빈도가 급증하는 추세이며, 미래에는 가뭄이 더욱 심해질 것으로 분석되고 있다 (이주헌・김창주・박민재・신정수, 2012). 특히 한반도에서는 조경공사 진행 비율이 가장 높은 가을에 연속 15일 이상 무강우 일수 발생이 많은 편이며, 더 심한 가뭄이 예상되는 미래에 대응하기 위해 LH에서는 더 오랜 일수의 가뭄 현상을 기준으로 대책을 마련해야 한다고 권고하였다. 기온 상승과 가뭄 발생 문제로 국립생태원에서는 2021년 '기후변화에 의한 생태계 피해 예측 자료집'에서 21세기 말까지 기존과 동일 추세로 온실가스가 배출되어 1880년 대비 한반도 기온 상승이 4.5℃ 이상 될 경우의 시나리오를 작성하였다. 그 결과 한반도는 빠른 속도로 아열대화될 것이며, 지역성 집중 강우 형태로 특성이 변화하여 다수 지역군에서 높은 빈도로 가뭄 피해가 발생할 것으로 우려된다고 밝혔다. 최근 3년간 기온 상승과 가뭄 발생으로 인해 수목의 건조 피해가 발생하는 빈도가 급증하였으며, 연구기관뿐만 아니라 시민들도 실질적으로 체감하는 단계까지 도달했다.

2) 수목 생장 환경변화에 따른 수목 건조 피해 발생

한반도의 기후변화로 인한 평균기온 상승과 가뭄 발생 빈도 증가로 수목의 생장 환경 또한 큰 변화를 겪고 있다. 특히 고온과 가뭄의 영향으로 토양수분 증발이 가속화되면서 발생하는 수목 수분 스트레스 현상은 수목의 건조 피해에 큰 영향을 준다. LH에서 전문가를 대상으로 진행한 조경 수목의 피해 원인 분석조사에서 알 수 있듯이 최근 수목 하자의 급증 원인에 대하여 기후변화를 선택한 비율이 44%로 1위를 기록했으며, 그 중 직접적인 원인으로는 건조 피해(27.2%)를 선택했다. 한마디로 기후변화가 가속화될 시에는 연중 대부분의 일수에서 국립산림과학원에서 제시하는 수목 생장을 위한 충분한 토양 함수율을 유지하지 못한다는 것이다.

그렇기에 전문가들은 건조 피해 대책 관리를 위해서는 관수 기준이 강화되어야 한다고 주장한다 (윤은주・이은엽・김미나・오승봉・이용주, 2017).

[표 2] 조경수목 피해 원인 분석 설문조사 (LH 보고서(2017), 연구자 재작성)

피해원인 비율 (%)			전체 (100%)	아파트	공원녹지
항목	설계	부적합수종	2.8	2.1	3.9
		부적합위치	0.3	0.5	-
		설계기타	0.3	0.5	-
	시공	심식	0.6	0.5	0.7
		토양불량	2.2	0.9	4.1
		관수불량	3.0	1.1	5.8
		분파손	1.2	0.5	2.4
		부적기식재	9.1	11.1	6.1
		배수불량	7.6	10.8	2.7
		시공기타	4.5	7.3	0.2
	관리	건조피해	27.2	32.0	19.9
		병충해	8.7	10.0	6.8
		피소	7.8	9.8	4.8
		동해	7.8	6.6	9.4
		답압	-	-	-
		염해	6.1	-	15.5
		훼손	0.8	0.9	0.5
		관리기타	10.1	5.5	17.2

수목은 대부분 뿌리를 통해 수분을 흡수하며, 토양이 아닌 대기 중 수분을 흡수하는 비율은 적기 때문에 토양 내 수분이 빠르게 증발하는 것은 수목이 흡수할 수 있는 대부분 수분이 부족해진다는 것과 같다 (이경준, 2021). 기온이 상승하여 고온 스트레스를 받으면 수목은 더 많은 기공을 확보하며 증산작용을 통해 엽온을 낮추려는 생리 메커니즘을 가지고 있으며, 이에 따라 증산량이 증가하기 때문에 실질적으로 토양 내 수분을 더 빠르게 증발시킴으로써 식물의 생육 저하를 가속한다 (김길남, 2014).

특히 조경공사 중 이식하는 수목은 뿌리돌림, 전지 및 전정 등의 작업이 수반된다. 따라서 정상적인 활착 전까지는 뿌리의 수세가 매우 약한 상태이기 때문에 이식 직후의 수세 회복을 위해 더 많은 수분이 필요하다. 이식 후 토양의 수분이 부족하면 다른 환경조건이 충분하더라도 원활한 생장이 불가하며, 심각한 경우에는 고사에 이른다 (김호준, 2009).

결과적으로 식물의 이식단계에서 수분 스트레스는 초기 생장에 매우 중요하게 작용하여 세포의 길이 생장과 비대 생장 모두에 영향을 미친다.

토양 내 함수율은 수목의 수고 및 흉고 직경의 생장에 결정적인 역할을 하는 중요 요인이기 때문에 이에 따라 건조 피해를 감소시킬 수 있는 대책이 필요하다 (Koch et al., 2004).

3) 기후변화에 대응하기 위한 수목 관수법 개선의 방향성 연구 필요

현재 표준 시방서 및 기관별 유지관리 시방서 등은 조경수목 관수법의 지침서 역할을 하고 있다. 현장에서는 위 기준을 토대로 관수를 진행하지만, 빠른 기후변화에서 나타나는 고온과 가뭄 현상에 대비하기 위한 시기적절한 개정이 이루어지지 않고 있다. 게다가 내용이 세부적이지 못하고 광범위하여 현장에서 충분한 관수를 위한 방법을 적용하는 것에 한계가 있다.

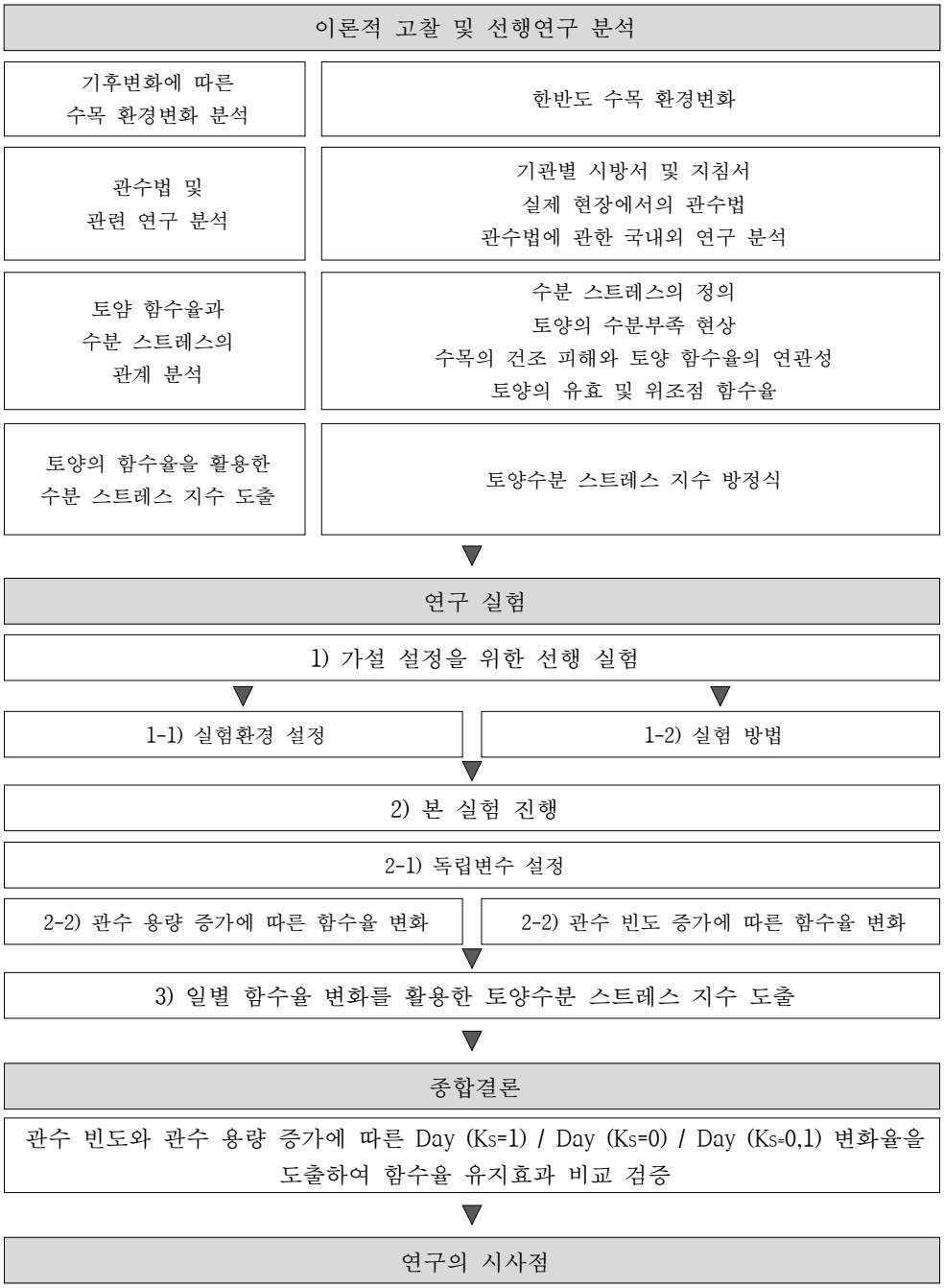
이에 따라 추후 기후변화에 대응하기 위해 적절한 관수법에 관해서 연구가 필요하지만, 고온과 가뭄 상태를 배제한 실험환경에서의 관수법 연구가 주를 이루며, 특히 관수 빈도와 관수 용량 증가에 따른 토양 함수율 유지효과 비교 연구는 없는 실정이다. 따라서 추후 기후변화 대응을 위한 관수 방법 개선 방향의 초기연구로 관수 빈도와 관수 용량 증가에 따른 함수율 유지효과 비교 연구가 필요하다.

2. 연구의 목적

본 연구의 목적은 관수 용량 및 관수 빈도 증가에 따른 함수율 변화 실험을 통해 토양수분 스트레스 지수를 도출하고, 두 독립변수 간의 함수율 유지효과를 비교하여 수목 관수법 개선의 방향성에 대해 고찰하는 것이다. 건조 피해 발생을 예방하기 위한 수목의 수분 스트레스 대응 방안으로 가뭄기에 토양 내의 충분한 함수량을 유지할 필요가 있으며, 관수 용량과 관수 빈도 중 실험을 통해 함수율 유지효과가 높은 방법으로 진행하면 토양 내 적정 함수율을 유지하여 건조 피해를 감소시킬 수 있다는 관점으로 접근하였다.

기후변화에 따른 기온 상승 및 가뭄기의 실험환경을 설계하고, LH에서 제시하는 관수 기준인 15일 무강우 일수 동안의 함수율 변화 관찰과 수분 스트레스 지수 비교를 통해 관수법 개선 방향에 대해 고찰한다. 본 연구는 관수 용량과 관수 빈도 중 실험을 통해 함수율 유지효과가 높은 관수법을 제시해 줌으로써 향후 건조 피해에 대응하는 관수법 개선 방향의 초기 연구가 될 것이다.

2절. 연구 진행 절차


이론적 고찰 및 선행연구 분석
기후변화에 따른 수목 환경변화 분석
한반도 수목 환경변화
관수법 및 관련 연구 분석
기관별 시방서 및 지침서
실제 현장에서의 관수법
관수법에 관한 국내외 연구 분석
토양 함수율과 수분 스트레스의 관계 분석
수분 스트레스의 정의
토양의 수분부족 현상
수목의 건조 피해와 토양 함수율의 연관성
토양의 유효 및 위조점 함수율
토양의 함수율을 활용한 수분 스트레스 지수 도출
토양수분 스트레스 지수 방정식
연구 실험
1) 가설 설정을 위한 선행 실험
1-1) 실험환경 설정
1-2) 실험 방법
2) 본 실험 진행
2-1) 독립변수 설정
2-2) 관수 용량 증가에 따른 함수율 변화
2-2) 관수 빈도 증가에 따른 함수율 변화
3) 일별 함수율 변화를 활용한 토양수분 스트레스 지수 도출
종합결론
관수 빈도와 관수 용량 증가에 따른 Day (Ks=1) / Day (Ks=0) / Day (Ks=0,1) 변화율을 도출하여 함수율 유지효과 비교 검증
연구의 시사점

제2장 이론적 고찰 및 선행연구 분석

1절. 기후변화에 따른 수목의 생장 환경변화 분석

기후변화에 따른 수목의 생장 환경변화는 기온 상승과 집중 강우에 따른 건조 시기 증가로 나눌 수 있다.

이은주 외(2017)의 연구에서는 기후변화에 따른 지역별 적정 식재권역에 관해 최근 최저 및 최고 기온 발생과 연관하여 재설정하였다. LH의 식재권역 설정 지침에 따라 과거와 현재의 1월 평균 최저기온을 비교 분석하여 식재권역의 변화 정도를 파악해봤을 때, 중북부권역은 감소하고 남부권역은 크게 확장되는 경향을 보였다. 게다가 적정 식재 고도 또한 변화된 모습을 보이며 이는 기후변화로 인해 과거와는 다른 식재권역 양상을 보인다는 것을 알 수 있다.

공우석 외(2012)의 연구에서는 기후변화가 생태계에 미치는 취약성을 기후 노출, 민감도, 적응 능력으로 구분하여 분석하였다. 영향을 미치는 기후 변수는 1~3월 연평균 기온, 기온, 강수량, 6~8월 일 평균기온, 6~8월 일 최고 기온이며, 연구 대상 중 2000년대 기준 수목(침엽수) 생장과 분포의 기후 노출 취약성에서는 제주특별자치도, 전라북도 일부 지역, 경상남도 일부 지역, 부산광역시 등 남부지역에서 상대적으로 높은 취약성을 보였지만, 민감도의 경우에는 강원도와 경상북도, 충청남도 일부 지역이 높게 나타났으며 전국적인 편차는 상대적으로 크지 않다고 말한다. 적응 능력이 낮은 지역으로는 서울시, 인천시, 경기도 등 고도가 낮은 지역이 선정되었다.

김영규 외(2012)의 연구에서는 기후변화에 따른 ‘물 관리 취약성 평가’를 실시하였다. 전국을 대상으로 진행하였으며, 이수-지수 부문으로 나누어 취약한 지자체를 분석하였다.

치수에 대한 취약성은 강원도, 경기도, 경상남도 일부 지역이 높게 나타났으며, 이수에 대한 취약성은 전 지역 모두 높은 취약성을 보였다. 기후변화로 인한 집중 강우 형태는 물 관리의 취약성을 유발하며, 특히 동해안 지역의 물 관리 취약성이 높다는 것을 확인하였다.

김지연 외(2019)의 연구에서는 대표 수종 20종을 대상으로 수종 고유의 적합한 기후 범위를 규명하고, 기후변화에 따른 미래의 잠재적인 적합 기후 범위의 변화를 예측하고 적합한 식재권역을 제안하였다. 위 연구에서는 상록활엽수와 낙엽활엽수는 생육 적합 지역이 확대될 것으로 예측하였으며, 신규 수종 선정 시 현재보다 양호한 조건을 갖게 될 것이라고 말하였다. 반대로 상록침엽수종의 경우에는 관리요구도가 상승할 것이며 기후변화에 적용이 가능한 수종 발굴이 필요할 것으로 판단했다. 게다가 위 연구에서는 배롱나무와 같이 현재 적합 기후 지역에서도 높은 고사율을 나타낸 경우는 기후 적합성뿐만 아니라 높은 고사율을 유발하는 다른 변수에 관한 관리가 요구된다고 말하였다.

정창화 (2020)의 연구에서는 최적의 식재 시기를 분석하고 이를 통해 수목의 하자를 줄이는 연구를 진행하였다. 위 연구에서 수목의 주요 하자 원인은 시공상, 관리상, 기상재해로 구분하였으며, 식재 시기 오류는 시공상 하자로 분류하였다. 위 연구에서 분석한 최적 식재 시기는 조경 표준 시방서 상의 식재 적기 기간보다 전체적으로 짧아졌으며, 하자 비율 또한 상록교목, 낙엽교목, 관목마다 차이를 보이기 때문에 수목 성상별 구분된 기준 제시가 되어야 한다고 말한다. 위 연구에서는 수목 하자의 원인 중 식재 시기 요소를 중심으로 진행한 연구이며, 이번 연구에서 다른 하자 원인을 분석하고 제시한다면 수목 품질 확보 및 유지관리 비용을 줄일 수 있는 기본적 자료로서의 활용이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

위 선행연구 분석에 따라 현재 한반도에서는 기후변화로 인한 수목 환경변화가 진행되고 있다는 것을 확인하였다. 기온의 상승으로 인한 권장 식재권역 변화, 적합 수종의 변화가 발생했다는 것을 알 수 있으며, 집중 강우와 가뭄 시기의 발생으로 생태계 및 물 관리의 취약성을 확인할 수 있었다. 위 연구를 종합할 때, 과거와는 다른 방식의 수목 관리 방안이 필요하다는 것을 확인했다.

2절. 관수법 및 관련 연구 분석

1. 기관별 시방서 및 지침서

원활한 시공을 위해 제공되는 시방서는 공사에 필요한 원자재의 정보를 제공하고, 공사의 적용 범위, 적용기준, 시공조건, 시공 방법 등 도면에서 제공되지 못하는 사항이 작성되어 있다 (예스폼 서식사전, 2017). 특히 다양한 재료와 공법의 사용에 대한 기준서의 역할을 하며, 기술의 발전과 소비자 욕구의 증가에 따라서 오랜 세월 여러 차례 개정되어왔다 (이호금, 2010).

현장 실무자가 활용이 가능한 조경 시방서는 크게 LH에서 제공하는 조경 전문 시방서와 국토부에서 제공하는 조경 표준 시방서, 교육부에서 배포하는 국가직무능력표준 모듈의 ‘관수 및 기타 조경관리’ 지침서 총 3가지가 존재한다. 이 중 시공 과정에서의 관수법 관련 항목의 세부 내용은 [표 3]과 같으며, 현장에서 이식 직후의 물받이 관수에 관한 방법이 작성되어 있다. LH 전문 시방서 상에서는 물받이 관수를 위한 물집 제작 방법이 설명되어 있으며, 주기적인 관수와 건조 시 추가 관수 작업이 필요하다고 제시하고 있다. 국토부의 조경 표준 시방서 상에서도 관수법 및 주의 방법에 관한 내용이 수록되어 있다.

하지만 건조 피해를 예방하기 위한 세부적인 관수법은 작성되어 있지 않다. 이에 따라 현장에서는 임의의 관수법으로 진행하며, 관수 후 토양의 상태를 점검하지 못하고 있다.

[표 3] 기관별 조경 시공 시방서 상 관수 항목 (연구자 재작성)

구 분			주요 내용
조경 시공 시방서	LH 전문 시방서	3.3.7 관수	근원부를 중심으로 수관폭의 1/3정도 크기로 높이는 10 ~ 15 cm로 원형의 물받이를 만들고 식재 후에는 물받이가 손상되지 않도록 주의하여 충분히 관수하여야 한다.
			식재 후에는 물받이가 손상되지 않도록 주의하여 충분히 관수한다.
			다량의 강우로 인하여 토양에 충분한 수분이 함유되어 있을 때(습윤상태)를 제외하고 식재 완료 후 수목이 활착할 때까지 주기적으로 관수를 하며, 특히 가뭄이 들거나 건조하여 수목 생육에 지장 및 하자발생이 예상될 경우, 추가 관수 작업을 시행하여야 한다.
			여름의 관수는 정오 전후의 직사일광이 강한 시간대는 가능한 한 피하여 흐린 날을 제외하고는 일출 또는 일몰 시에 실시하며, 겨울에는 따뜻한 날에 관수하며 혹한기는 피하도록 한다.
			가뭄이 들거나 건조하여 수목 생육에 지장 및 하자발생이 예상될 경우, 추가 관수작업을 시행한다.
			발근촉진제는 식재 후 10일 간격으로 관수 작업과 같이 실시하며 식재한 수목의 활착 상태를 감안하여 조절하여야 한다.
	국토부 조경 표준 시방서	3.1.7 관수	(1) 식재 후에는 물받이가 손상되지 않도록 주의하여 관수한다.
			(2) 여름의 관수는 정오 전후의 직사일광이 강한 시간대는 가능한 한 피한다. 또 겨울에는 따뜻한 날에 관수하며 혹한기는 피하도록 한다.

실무자 교육을 위해 교육부에서 배포하는 국가직무능력표준 학습 모듈의 ‘관수 및 기타 조경관리’에서는 [표 4]와 같이 관수 시기와 관수량 결정, 관수법 결정 및 관수에 관한 내용이 타 시방서보다 세부적으로 수록되어 있다. 관수 시기 중 30℃ 이상으로 혹서기가 계속되는 여름 관수법은 고압 호스를 이용하여 수관부 전체까지 직접 관수를 진행하라고 설명하고 있다. 관수 시간은 하루 중 한낮을 피해 아침 10시 이전에 시행해야 하며, 관수 빈도는 수목의 뿌리가 활착될 때까지 교목은 1회/4일을 기준으로 한다. 관수 중지 기준은 20~30mm/일의 강우 시 4일간, 30mm/일 이상 강우 시 7일간 중지한다. 또한 관수 시 살수 강도는 토양의 수분 침투율보다 작아야 한다고 말한다. 하지만 본 지침서의 내용은 교육을 위한 내용으로 법적 효력이 없으며, 실제 현장에서 인력의 투입으로 진행하기에는 무리가 따른다. 현장 실무자 설문조사 결과에서 충분한 관수 용량이 충족된다고 하더라도, 관수 빈도는 총공사 기간 중 1회~2회로 1회 / 4일을 충족하지 못한다고 응답하였다.

[표 4] 조경 시공 지침서 상 관수 항목 (연구자 재작성)

구 분		주요 내용		현장 충족 여부
조경 시공 지침서	국가직무 능력표준 학습모듈 '관수 및 기타 조경관리'	기온 상승	30℃ 이상 시, 고압호스를 이용해 수관부 전체까지 직접 관수	관수 용량
				가능
				관수 빈도
				불가
		관수 시간	한낮을 피해 오전 10시 이전 시행	가능
		관수 빈도	교목 기준 1회/4일	불가
		관수 중지	20~30mm/일의 강우 시 4일간, 30mm/일 이상 강우 시 7일간 중지	가능
		관수 방법	살수 강도는 토양의 침투율보다 작아야 함	가능

유주은 외(2013)의 연구에서는 조경공사의 식재 공사를 중심으로 조경 표준 시방서의 분류체계, 기술 방식, 품질기준에 대한 변화 특성을 분석하여 표준 시방서의 개선 방향을 도출하고자 하였다. 위 연구에서는 기술 방식이 구체성이 떨어지는 애매한 표현과 용어로 작성되어 시방서의 현장 활용을 저해하고 있으며, 내용의 수정과 정보의 계량화가 필요하다고 말한다. 결론적으로 수목 재료의 품질 수준, 식재 적기, 굴취 시의 뿌리분 크기, 관수 기준 등을 개선해야 한다고 말한다.

임병을 외(2017)의 연구에서는 하자보수 대상이 되는 수목들의 표준시방서 준수 여부와 생존목 및 고사목 간의 식재 상 차이점을 분석하여 개선방안을 모색하고자 하였다. 위 연구에서 조경식재 공사 수행 시에 심식, 배수불량 등 시공자가 조경공사 표준시방서를 숙지하지 않거나 이를 무시하고 있음을 확인했으며, 고사목은 대부분 표준 시방서를 준수하지 않은 경우에서 발생하였다. 위 연구는 조경 식재 공사에서의 규정 및 생리적 특성의 간과로 인한 문제가 있음을 제시하는 것에 의미가 있다.

조경 시공 시방서에 대한 선행연구를 보면 구체성이 떨어지는 내용으로 현장 활용을 저해하고 있으며, 이에 따라 시공자가 시방서를 숙지하지 않거나 이를 무시하고 있음을 확인하였다. 지침서 또한 관수 빈도 등 현장에서 무리가 따르는 내용 등이 포함되어 있어 현재 기후변화에 대응하는 실질적 방법을 제시하지 못하고 있다.

2. 실제 현장에서의 관수법

이번 연구의 타당성 검증과 실험환경 설계를 위해 조경 실무자 10인에게 설문조사를 진행하였다. 설문조사를 진행한 실무자는 살수차 담당 기사 2인, 조경 현장 실무자 8인을 대상으로 진행하였으며, 설문 결과는 [부록 1]과 같다. 대상자는 모두 현재에도 조경공사 및 유지관리 현장에 15년 이상 근무 중인 실무 전문가이다. 장기간의 현장 경험으로 기후변화에 따른 수목 환경변화에 대해 이해하고 있었으며, 건조 피해로 인한 수목의 하자 문제를 경험해본 적이 있었다.

설문조사 결과로 현장에서 주로 활용하는 관수법은 90% 이상이 1회성 물받이 관수법이라 답하였으며, 점적 관수시스템 등은 10% 이하라고 답하였다.

1회 관수량에 대해서는 ‘매우 충분히 준다’라는 답이 80%로 가장 많았으며, ‘물을 적당히 준다’라는 비율도 20%로 대부분 1회 관수 시 충분한 양

의 관수를 진행하는 것으로 조사되었다.

관수 빈도에 대해서 식재 공사 시에는 1~2회 관수 비율이 90%로 가장 높았으며, 유지관리 시에는 연 3~4회 비율이 70%로 가장 높았다. 관수 빈도가 낮은 이유에 대해서는 인력 부족 및 비용 부담 등의 이유가 가장 크며, 15일 이상의 무강우 시에도 관수량과 빈도는 같다는 비율이 100%로 가장 높았다. 지침서상의 관수법과 빈도를 이행하는 비율은 20%로 매우 낮았으며, 그 이유로는 세부적이지 못한 내용으로 단순 참고용으로만 활용된다고 응답하였다.

기후변화에 대응하는 관수법의 변화로는 어떤 것이 필요한가라는 질문에 대해서는 관수 빈도의 증가 비율이 80%로 가장 높았다. 관수 빈도 증가를 위한 방법으로는 자동 점적관수 시스템의 설치가 가장 필요하다고 응답하였다.

위 설문조사 응답을 종합해보면 1회 관수 시 관수 용량은 충분하지만, 관수 빈도가 적다고 하였다. 또한 15일 이상의 무강우 시에도 관수 빈도는 1회로 긴급 처치 관수 수준이었으며, 지침서의 내용은 세부적이지 못해 단순 참고용으로 활용된다고 응답하였다. 마지막으로 기후변화에 대응하는 관수를 위해서는 관수 빈도가 높아야 하지만, 인력으로는 한계가 존재하기에 자동 점적관수 시스템의 설치 비율이 증가해야 한다고 답하였다.

[그림 1] 조경 실무자 설문조사 진행 사진

3. 관수법에 관한 국내외 연구 분석

관수 용량 조절에 따른 수목의 생장에 관해서는 여러 연구 환경에서 다양한 관수 용량 처리로 연구가 진행되고 있다.

김효진 (2021)의 연구에서는 관수량 조절에 따른 소나무와 느티나무의 생장 특성에 관해 연구하였다. 연구 환경은 평균온도 22.88℃, 상대습도는 69.02%인 유리 온실에 실험을 진행하였다. 위 연구에서는 실생 2년생의 묘목을 활용하였으며, 최대 0.5L/day의 관수량을 산정하여 평가하였다.

최수민 외(2012)의 연구에서는 먼나무, 구실잣밤나무, 후피향나무에 관해 연구를 진행하였다. 위 연구에서는 3년생 묘목을 활용했으며, 시설 온실에서 실험을 진행했다. 관수량은 100~140L/hr를 산정하여 평가하였다.

차영근 외(2017)의 연구에서는 관수량에 따른 소나무 용기묘 1년생의 생장 특성에 관해 연구하였다. 연구 환경은 평균온도 16.1~27.5℃로 외부 기온보다 낮았으며, 1년생 묘목을 활용하기 때문에 1본당 96.2mL의 관수량을 산정하여 평가하였다.

관수 주기 조절에 따른 수목의 생장에 관해서는 동일 용량으로 횟수를 조절하여 연구가 진행되고 있다.

조민석 외(2012)의 연구에서는 조경수인 백합나무 및 느티나무에 대한 용기양묘 시 최적의 수분 환경을 규명하고자 연구를 진행하였다. 2년생 묘목을 활용하여 실시하였으며, 1회 관수량은 ㎡당 20L로 진행하였다. 1회/1일, 1회/2일, 1회/3일을 비교해본 결과에서는 1회/1일의 관수 실험구에서 생장 처리가 가장 높은 모습을 보였다.

이수원 외(2010)의 연구에서는 활용도가 높은 해외 조림수인 유칼립투스와 아카시아 맹고지움을 대상으로 관수 빈도를 달리하여 최적의 수분 환경을 규명하고자 하였다. 1회 관수량은 ㎡당 20L이며, 두 수종 모두 1회/1일, 1회/2일, 1회/3일로 진행하였다. 연구 결과로는 1회/1일 관수가 가장 우수한 수분 조건이었으며, 주기가 짧을수록 높은 생장을 보인 것으로 확인되었다.

권계정 외(2017)의 연구에서는 실내 목본식물인 산호수, 클루시아, 팔손이, 인도고무나무를 대상으로 관수 주기에 따른 생육 상태를 측정하였다. 25℃의 온도를 유지하는 실험실에서 진행되었으며, 관수 주기는 2회/1주, 1회/1주, 1회/2주로 진행하였으며, 2회/1주 시에는 과습 스트레스가 나타났고 1회/1주 시에 4종 모두 가장 생육이 원활한 것으로 확인되었다.

국내의 선행연구를 분석한 결과 관수량 혹은 관수 주기에 따른 조경수의 생장 특성 차이에 관한 연구가 진행되었으나, 고온과 가뭄 상태를 배제한 실험환경에서의 관수 연구가 주를 이루었다. 또한 관수 주기에 대한 비교 연구에서는 주기별 관수의 총용량이 달라 주기별 효과 비교가 어려우며, 특히 관수 용량의 증가와 빈도 증가와의 효율성 비교 연구는 진행되지 않았다.

3절. 토양 함수율과 수목 수분 스트레스와의 관계 분석

1. 수목 수분 스트레스의 정의

이경준 (2021)의 수목 생리학 저서에서 정의한 수분 스트레스란 수목이 토양에서 흡수하는 수분량보다 더 많은 수분을 증산작용으로 잃어버림으로써 체내 함수량이 줄어들고 생장량이 감소하는 현상을 의미한다. 수목은 지상부 생장량에 대한 뿌리의 생장량 비율을 나타내는 T/R 비율을 1로 유지하기 위해 수분 흡수량과 증산량을 같게 맞추려는 생리적 메커니즘을 가지고 있기에 증산량이 흡수량보다 많을 시에는 건조 스트레스를 받게 된다. 수목 생리학 저서에 따르면 기온이 상승할수록 수목의 증산량은 증가하게 되며, 토양 온도가 25℃일 때의 증산량은 20℃일 때 증산량의 2배이다. 게다가 건조에 의한 수분 스트레스는 6시간이면 큰 수목의 수간까지 전달되며, 계속해서 밑으로 전달되어 뿌리까지 영향을 미친다고 말한다.

2. 토양의 수분부족 현상

이경준 (2021)의 수목 생리학 저서에서 뿌리는 수분 스트레스를 가장 늦게 받고, 가장 먼저 회복하는 곳으로 뿌리에서의 수분 스트레스가 지속되면 그 영향은 즉시 지상부로 전달되어 수목 전체 생장에 영향을 미치게 된다. 따라서 뿌리에서 수분을 흡수할 수 있도록 토양의 적정 함수량을 지속해서 유지하는 것이 중요하다고 말한다.

김길남 외(2014)의 연구에서는 기온과 강수량 변화에 따른 수목의 생장 및 생리 반응 변화를 예측하고자 했다. 소나무를 대상으로 기온 상승과 건조 스트레스에 따른 생장 및 생리적 특성 변화를 조사하였다. 위 연구 결과에서 기온의 상승과 건조 스트레스는 수목의 생장과 생리적 반응에 많은 영향을 미쳐 생장이 저하되는 것을 확인하였다. 특히 소나무는 온도 감소보다 상승에

더 많은 영향을 받았으며, 온도가 상승할 시 수분 증발량 또한 증가하는 연쇄 작용으로 인해 수목에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Koch et al. (2004)의 연구는 수분 스트레스와 수목의 수고 및 직경 생장 간의 관계에 대해 증명하였다. 수목은 수분 공급량이 일정하다면 수고 및 흉고 직경이 생장할수록 증산작용을 하는 잎까지 도달하는 동안 중력과 마찰력의 영향을 받기 때문에 생장 효과에 제한이 있다고 말하며, 이는 기후변화로 인한 건조 스트레스가 진행될 시에는 생장에 제한을 줄 것이라고 말한다.

Lawlor et al. (2002)의 연구에서는 수목의 건조 스트레스로 발생하는 광합성의 변화에 대해 증명하였다. 수목은 토양으로부터 수분을 흡수하여 잎으로 증산하는 메커니즘을 가지고 있으며 토양의 수분이 부족할 시, 수목 내의 수분함량과 수분 포텐셜이 감소하고 광합성 작용 또한 줄어들게 되어 수목의 생장에 악영향을 미친다고 말한다. 따라서 건조 스트레스는 수목의 생산성을 제한하는 주된 요인이며, 토양의 수분량을 조절하여야 수목의 생장이 원활하게 이루어진다.

박진화 외 (2020)의 연구에서는 단수처리에 따른 내건성 측정을 통해 건조 조건에 따른 환경 적응성을 분석하고, 내건성 증진을 위한 적정시비량을 도출해내었다. 대상 수목은 소나무로 진행하였고 위 연구 결과로는 수분부족의 조건에서는 열악한 환경에서 자랐을 시에 나타나는 소나무의 뿌리 특징을 보였으며, 지속적인 건조 스트레스를 받았을 시 아브시스산 함량과 엽록소 감소의 차이가 크게 나타났다.

김민영 외(2019)의 논문에서는 수목의 정확한 관수 계획, 즉 관수 시기와 양을 정확히 결정하는 것이 중요하다 밝히며 관수량 수준을 다르게 하여 인위적으로 수목에 수분 스트레스를 발생시키는 연구를 하였으며, 실험을 통해 엽온의 변화를 측정하였다. 위 연구에서는 누적 증발산량을 기준으로 0~75% 양의 관수를 진행하여 관수량이 증가할수록 수목 스트레스 지수는 감소하는 결과를 보였다.

위 선행연구를 분석해보면 기후변화로 기온이 상승하게 됨에 따라 수목 수분 증산량이 증가하게 되고, 체내 수분량을 유지하기 위해 뿌리의 수분 흡수량도 증가하게 되면서 토양의 수분 또한 빨리 건조해지는 메커니즘을 보인다고 말한다. 만약 위 메커니즘에서 토양의 수분 부족 시 수목의 생장에 악영향을 끼치게 되며, 토양수분 부족 현상이 지속 시에는 급속도로 생장에 문제가 발생하게 되어 결국 고사에 이르게 됨을 확인하였다. 이에 따라 기온이 상승한 환경에서 수목의 원활한 활착과 생장을 위해서는 충분하고 올바른 관수 방법에 대한 계획이 필요하며, 이를 통해 건조 피해를 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

3. 수목의 건조 피해와 토양 함수율의 연관성

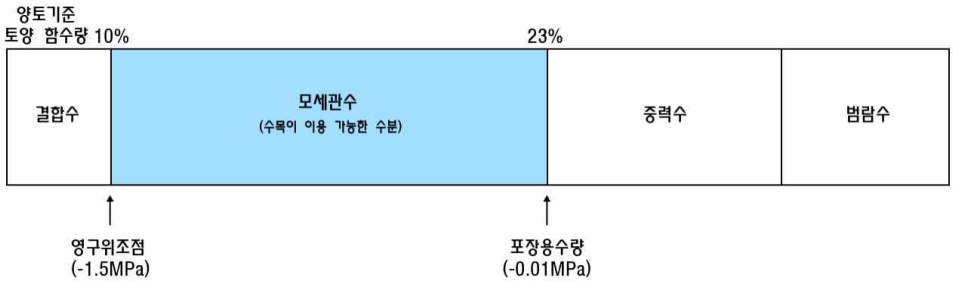
박종민 (2006)의 연구에서는 등나무를 대상으로 인위적으로 함수율을 조절하여 등나무의 내건성과 토양수분 조건에 따른 생장의 특성을 시험해보았다. 그 결과로는 토양 함수율 5% 수준에서 수분 스트레스를 받아 고사하였고, 10% 정도에서는 생장률에 큰 변화가 없다는 실험 결과를 바탕으로 토양 함수율 10%가 생장에 대한 임계 토양수분 범위라는 것을 알아내었다. 결과적으로 전반적인 토양 함수율이 높을수록 수목의 생장 요소들은 양호하였으며, 임계 토양수분 범위 이하로 함수율이 감소하는 경우는 건조 피해로 수목이 고사하였다.

김선희 외(2013)의 연구에서는 수분 환경에 따른 수목의 반응 특성을 규명하고 있다. 무관수 처리를 통한 토양 함수율 감소 그래프에서는 시작 시기 21%였으나, 처리 14일째 약 5% 수준까지 감소하였다. 이에 따라 무관수 기간이 길어짐에 따라 모든 수종에서 순 광합성량은 감소하였으며, 엽의 수분 포텐셜 또한 감소하며 지속적인 수분 스트레스를 받는 것으로 나타났다.

4. 토양의 유효 및 위조점 함수율

이경준 (2021)은 식물 뿌리가 수분을 흡수하기 위해서는 토양 속 함수율이 적정 수준이어야 한다고 설명하였다. 수분이 너무 포화상태이거나 혹은 너무 마르지 않은 상태를 의미하며, 토양의 수분 퍼텐셜이 식물 뿌리의 수분 퍼텐셜보다 높아야 수분이 토양에서 뿌리로 이동할 수 있다. 토양은 관수 직후 물이 토양의 모든 공간을 차지하여 포화상태에 놓이지만, 곧 중력에 의해 중력수가 빠져나가면서 토양은 모세관수만 가지게 된다. 토양이 모세관수만을 최대로 포함하고 있을 때 포장용수량에 달해 있다고 하며, 식물이 이용할 수 있는 물을 최대한으로 보유한 상태로 수분 퍼텐셜은 -0.01MPa이고 토양 함수율은 양토 기준 약 23%이다. 이후 지속적인 증발 작용과 식물의 이용으로 토양 수분은 감소하는데, 식물이 더 이상 수분을 흡수할 수 없게 되면서 시들기 시작하는 토양 함수율을 영구 위조점이라 하며, 이때의 수분 퍼텐셜은 보통 -1.5MPa 정도이고 함수율로는 양토 기준 10%이라고 말한다.

김계훈 외(2006)의 토양학 저서에서는 수분 퍼텐셜이 -0.033MPa, 양토 기준 토양 함수율은 21.5%가 포장용수량으로 정의하였으며, 영구 위조점은 10.2%로 정의하고 있다. 또한 토양에 염류가 집적되면 토양용액 중의 염류농도가 높아지고 동시에 수분 퍼텐셜도 낮아지기 때문에 결국 실물이 흡수할 수 있는 유효수분 함량이 줄어들어 염류의 비율이 토양 함수율에 영향을 준다고 말한다.



[그림 2] 토양의 이용 가능한 수분 범위 (수목 생리학 (2021), 연구자 재작성)

4절. 토양의 함수율을 활용한 수분 스트레스 지수 방정식

국제연합식량농업기구 (FAO, 2006)에서 설명하는 토양수분 스트레스 지수 K_s는 작물의 증발산량을 산정하기 위해 활용되는 지수식이다. 이는 토양 내의 수분량이 적어질 경우의 식물 증산 저감에 따른 식물 계수의 보정치로 활용되며, 전체 유효 수분량 (Total Available Soil Water, TAW)과 용이 증발 가능 수분량(Readily Available Soil Water, RAW)을 통해 산정된다 (홍민기, 2016). 토양수분 스트레스 지수 K_s의 산정식은 <1.1> ~ <1.3>과 같다.

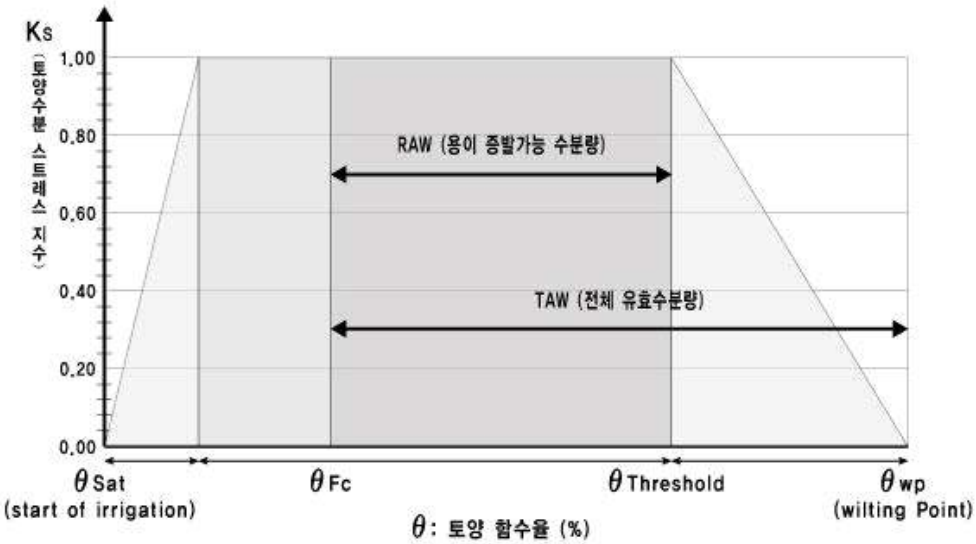
$$TAW = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times Z_\gamma \qquad \langle\ 1.1\ \rangle$$

$$RAW = P \times TAW \qquad \langle\ 1.2\ \rangle$$

$$K_S = \frac{TAW - D_\gamma}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1-P)TAW} \qquad \langle\ 1.3\ \rangle$$

θ_{FC}와 θ_{WP}는 각각 토양 성질에 따른 포장용수량 (m^3m^{-3})과 영구 위조점 (m^3m^{-3}), Z_γ은 근권부의 깊이 (m)를 뜻한다. P는 전체 유효 수분량 중 토양수분 스트레스가 발생하기 직전 수분량의 비율이며, 작물에 따라 달라지기 때문에 선행연구에 따라 통상적인 사용 값인 0.5를 적용한다 (Allen et al.,2006, 신용훈, 2018). D_γ은 포장용수량에 도달하기까지의 토양수분 미흡량(mm)을 뜻한다.

K_S의 범위는 0~1사이다. 만약 토양 속 수분이 포화상태인 $D_\gamma < RAW$ 이면 K_S = 1이며, 0에 가까워질수록 토양수분 스트레스 지수가 증가한다고 판단한다.



[그림 3] 변수와 토양수분 스트레스와의 관계 그래프 (RAES, Dirk, et al., 2005)

본 실험에서의 결과로 얻을 수 있는 변수는 D_γ이며, 범위는 $0 \le D_r \le TAW$ 이다. 계산식은 포장용수량 (m^3m^{-3})인 θ_{FC}에서 일별 측정 함수량 (m^3m^{-3})인 θ_I를 뺀 값으로 측정 함수량 (m^3m^{-3})은 기기로 측정된 함수율로 산정하며, 산정식은 <1.4>와 같다.

$$D_\gamma = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_I) \times Z_\gamma \qquad \langle\ 1.4\ \rangle$$

여기서 θ_I는 현재 함수량을 뜻하며, 만약 $(\theta_{FC} - \theta_I) \le 0$ 이면 $D_r = 0$이다.

정리하자면 토양의 수분이 포화상태일 때에는 $D_r = 0$, $K_S = 1$로 토양수분 스트레스가 없다고 판단되며, 시간에 따라 일별 함수량이 변화함에 따라 D_r이 증가할수록 K_S는 감소하는 반비례 관계식이다. 따라서 현재 함수량 값을 측정하면 토양수분 스트레스 지수 또한 도출할 수 있다.

제3장 실험환경 및 방법

1절. 가설 설정을 위한 선행실험

1. 실험 환경 설정을 위한 선행실험

실험 환경 설정을 위한 선행실험 (이하 1차 실험)은 5월 26일 ~ 5월 29일까지 4일간 진행되었다. 중대형 크기의 자작나무 (H4.0 X B5)를 활용하여 진행했으며, 실제 현장의 노지 환경에서 실험하였다. 위의 선행실험에서는 예외변수 분석 및 대상 수종 선정, 변수 설정 등이 수정할 필요가 있다고 판단되었다.

[그림 4] 실험 환경 설정을 위한 선행실험 과정 사진

선행실험을 통해 얻은 예외 변수 통제 대상은 기온 및 강우, 포장 면적이다. 기온의 경우에는 기후변화에 대응하는 관수법을 위해서 현재 기온보다 높아야 한다. LH 시방서 상 식재 부적기 기온은 36℃ 이상이지만, 현재 식재 부적기 기온 이상의 날씨는 연중 일부에 해당하기 때문에 현 기온보다 3℃ 이상 높은 실험환경을 설계하여야 한다. 게다가 강우 시에는 기온이 현저히 떨어지기 때문에 평균기온을 유지할 수 있는 밀폐된 온실을 제작하여야 한다. 또한 실험 수목에 강우로 인한 수분 침투는 유효하지 않은 결과를 가져오기 때문에 강우 또한 통제될 수 있는 온실이 필요하다. 포장 면적 또한 노지에서 실험 시에는 중력수가 빠져나가는 범위가 너무 넓어 유효한 함수율 데이터를 얻기 어렵기 때문에 포트를 제작하여 실험을 진행한다.

선행실험을 통해 얻은 대상 수종 선정 대상은 활엽수인 자작나무 (*Betula platyphylla*)와 침엽수인 스트로브 잣나무 (*Pinus strobus*)이다. 활엽수는 침엽수보다 단위 생엽 무게당 증산량이 많지만 임분 내 총 증산량은 침엽수가 많기에 유효한 연구 값을 위해서는 두 수종을 모두 활용하는 것이 필요하다고 판단되었다. 또한 실험의 편의성을 위해 소형 크기의 수목 (H1.5~2.0 X B3)으로 변경하였다.

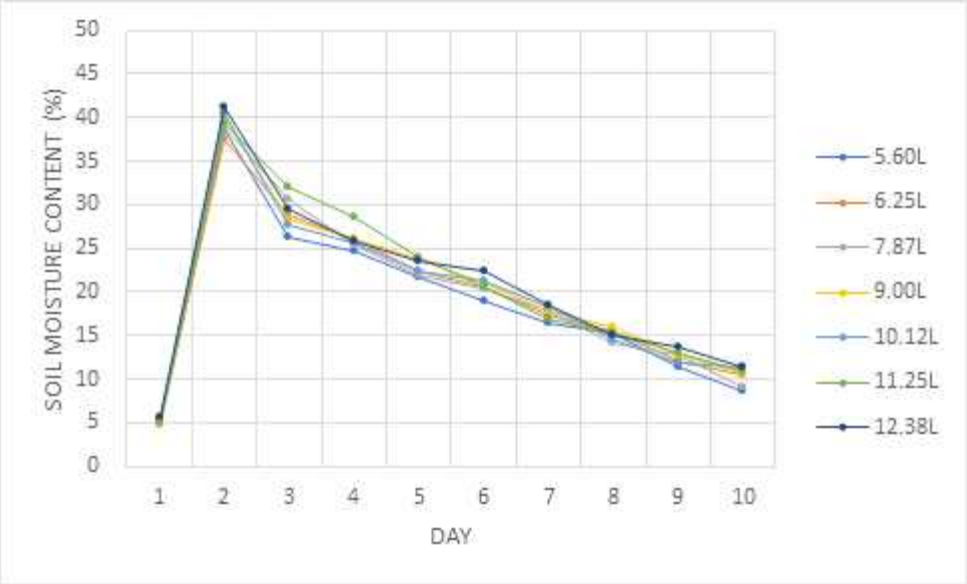
선행실험을 통해 얻은 변수값 설정 기준은 토양학에서 제시하는 토양 수분 함량에 의한 관수량 산정식을 활용한다. 선행실험에서 활용한 조경관리실무에서 제시하는 관수량은 실제 실험에서 활용할 때, 면적의 크기로 단순히 나누어 활용하는 것에는 무리가 있다고 판단하여 계산식이 존재하고 현장에서 제한된 정보로 간단히 계산이 가능한 관수량 산정식을 활용하였다.

2. 관수 용량 증가에 따른 선행실험

관수 용량 증가에 따른 선행실험 (이하 2차 실험)은 관수 용량의 증가가 함수율을 유지하는 것에 효과가 있을 것이라는 가설을 설정하고 9월 1일부터 2022년 9월 10일까지 진행되었다. 위 선행실험에서는 토양 함수량에 의한 관수량 산정식을 활용하였으며, 길이 및 높이가 300mm인 플라스틱 포트에서 진행되었다.

관수 전 함수율은 5%로 설정하여 진행했으며, 관수 후 함수율이 30%일 때부터 60%일 때까지 5% 단위의 관수 용량을 계산하여 진행했다. 위 선행실험 결과 관수량에 따라 2일 차까지 함수량 차이가 존재하지만 4일 차 급격한 감소로 모든 포트에서 함수율이 23±2% 이내에 근접했으며, 7~8일 차 두 번째 급격한 함수율 감소 후 모든 포트에서 9일 차에 영구 위조점(10±2%)에 도달했다. 선행실험 (2차 실험)을 통해 관수 용량이 많아져도 토양이 머금을 수 있는 수분 한계점이 존재하며, 관수 용량이 충분히 증가하여도 토양의 유효 함수율이 유지되지 않는다는 것을 파악했다. 실험 결과는 [Table 0.1.1]과 같다.

[Table 0.1.1] 관수 용량 증가에 따른 선행실험 그래프



2절. 실험환경 설정

1. 공간 및 시간적 범위

본 실험은 2022년 9월 13일부터 9월 28일까지 총 16일간 진행되었으며, 유효한 함수율 변화 평가를 위하여 일정한 시간대에 1일 1회 측정하였다. 대상지는 성남시 분당구 내 일조량이 확보되는 노지에 온실을 설치하여 연구를 진행하였다.

추후 기후변화가 가속화된다는 가정하에 고온과 가뭄 환경 구현을 위해 온실 환경을 설계하였다. 온실 내부 온도는 외부 기온보다 약 2~4℃ 높게 유지되도록 해 고온 환경을 설계하였고, 내부 습도는 외부보다 낮게 유지하면서 외부의 수분이 침투할 수 없도록 두께 0.15mm PO방수 필름을 활용하여 온실을 외부와 차단 및 밀폐시켜 가뭄 환경을 구현하였다.

따라서 연구를 수행한 기간의 온실 내외부의 환경은 [표 5]와 같다.

[그림 5] 실험 대상지 및 온실 전경 사진

[표 5] 연구 수행기간 동안의 온실 내외부 기온 및 습도

날짜	내부기온	외부기온	(-)	내부습도	외부습도	(-)
1일차	35.4℃	32.3℃	+ 3.1℃	46%	51%	- 5%
2일차	36.0℃	33.0℃	+ 3.0℃	39%	45%	- 6%
3일차	36.7℃	34.7℃	+ 2.0℃	42%	45%	- 3%
4일차	37.2℃	35.3℃	+ 1.9℃	45%	48%	- 3%
5일차	33.7℃	31.4℃	+ 2.3℃	62%	64%	- 2%
6일차	37.8℃	34.7℃	+ 3.1℃	46%	52%	- 6%
7일차	38.3℃	35.1℃	+ 3.2℃	42%	44%	- 2%
8일차	38.9℃	35.7℃	+ 3.2℃	40%	44%	- 4%
9일차	36.2℃	32.9℃	+ 3.3℃	39%	44%	- 5%
10일차	36.7℃	33.3℃	+ 3.8℃	38%	41%	- 3%
11일차	31.2℃	29.3℃	+ 1.9℃	41%	43%	- 2%
12일차	33.4℃	31.1℃	+ 2.3℃	31%	32%	- 1%
13일차	36.4℃	33.5℃	+ 2.9℃	36%	38%	- 2%
14일차	36.0℃	33.3℃	+ 2.7℃	37%	41%	- 4%
15일차	35.5℃	32.5℃	+ 3.0℃	36%	38%	- 2%
16일차	36.8℃	34.2℃	+ 2.6℃	37%	40%	- 3%

2. 토양 재료

토양 재료는 농업기술센터에서 농업종합분석 의뢰를 통해 분석을 진행하였다. 본 실험에서 사용하는 토양 재료는 양토이며, 배수 등급은 약간 양호로 수목 식재에 적합하다. 산도 또한 5.7~5.9pH로 적정범위 내에 있으며, 유기물, 유효인산 등 영양 요소 또한 동일 범주 내로 포함된다. 전기전도도는 0.1로 같으며, 토양 재료의 성분은 [표 6]과 같다.

[표 6] 대상지 내 토양 성분 분석표

구 분	토성	배수 등급	산도	유기물	유효 인산	칼륨	칼슘	마그네슘	전기 전도도
M.1	양토	약간 양호	5.7	2	15	0.08	2	0.4	0.1
M.2	양토	약간 양호	5.7	2	13	0.1	2	0.3	0.1
M.3	양토	약간 양호	5.9	2	8	0.06	2	0.2	0.1
M.4	양토	약간 양호	5.9	2	9	0.13	2.3	0.5	0.1
M.5	양토	약간 양호	5.8	2	14	0.07	2.2	0.3	0.1
단위	-	-	pH	g/kg	mg/kg	cmol+/kg	cmol+/kg	cmol+/kg	dS/m

3. 수목 재료

관수량 및 관수 주기에 따른 유효한 함수율 변화 측정을 위해 단위 생엽 무게당 증산량이 많은 활엽수인 자작나무 (*Betula platyphylla*)와 임분 내 총 증산량이 많은 침엽수인 스트로브 잣나무 (*Pinus strobus*)를 선정하였다. 이경준 (2021)의 저서에서 증산작용은 수종 간에 큰 차이가 있다고 말하기 때문에 증산작용이 활발할수록 토양 내 수분을 많이 필요로 하며, 이에 따라 본 실험 시에 유효한 토양 함수율 변화 값을 얻을 수 있다.

수목 크기는 실험의 용이성을 위해 LH에서 제시하는 규격 중 조경공사에서 약 80% 이상으로 대다수를 차지하는 R05s (R10미만 (B8미만) 또는 R,B 규격이 없는 경우)로 진행하였다.

두 수종은 조경수로의 활용도가 높은 수종이기에 재료 수급이 용이하며, 또한 두 수종 모두 속성수로 빠른 성장을 위한 수분 필요성이 높기에 단기로 진행되는 본 실험에 적합하다고 판단되어 선정하였다. 대상 수종은 포트 내에서 3주간의 순화 과정을 거치고 난 후에 진행되었다.

[그림 6] 대상 수목 식재 및 근권부 깊이 사진

3절. 실험 방법

1. 실험구 조성

본 실험에서 사용된 포트는 직경 300×300mm, 높이 300mm의 플라스틱 포트를 사용하였으며, 화분의 바닥은 일반 토양 환경처럼 중력수가 빠져나갈 수 있게 개방해놓았다. 급수 방법은 실무자 인터뷰를 통해 확인한 물받이 관수로 진행하며, 유효한 측정을 위해 급수 처리 후 익일부터 측정을 시작한다. 관수 시작 시점은 조경 시방서에서 권고하는 10시 이전에 토양의 함수율이 5% 내외일 때 진행한다.

[그림 7] 실제 실험 진행 사진

본 실험의 관수량 기준은 토양학 (김계훈 외, 2006)에서 설명하는 토양 수분함량에 의한 관수량 산정식을 활용한다. 산정식은 <2.1>과 같다.

$$R = ((F_C - W)/100) \times D \qquad \langle\ 2.1\ \rangle$$

R은 근권부를 목표함수율 상태로 보충할 1회 관수량(mm)이다. F_C는 목표 함수율(%)이며, W는 관수 직전의 토양 함수율(%)이다. 마지막으로 D는 근권부의 깊이(mm)이다. 1회 보충량(mm)을 리터 단위로 변환하기 위한 식으로는 <2.2>와 같다.

$$\text{관수량 (L)} = (\text{포장면적 } (\text{㎟}) \times R) \div E \qquad \langle\ 2.2\ \rangle$$

여기서 E는 관수효율을 나타내며, 물받이 관수 시에는 관수효율을 0.8로 계산한다 (농촌진흥원, 2011). 본 실험 수목 재료의 근권부 깊이는 모두 200mm이며, 관수 직선의 토양 함수율(%)인 W은 LH에서 관수 개시가 필요한 함수율로 제시하는 5%일 때이며, 목표 함수율(%)인 F_C 또한 LH에서 제시하는 관수 종료 함수율 시점인 30%로 진행하였다. 포장 면적은 포트의 크기(300x300mm)로 한정하여 계산하였다. 위에서 말한 W (5%), F_C (30%)의 수치를 공식에 대입하였을 때의 기준 관수량은 5.60L이며, 이에 따라 독립변수의 기준은 5.60L/1회로 설정하였다.

본 실험은 관수 빈도와 관수 용량 증가에 따른 토양 함수율 변화를 비교하는 실험이기에 독립변수는 관수 빈도와 관수 용량이며, 실험구는 각 독립변수에 따라 관수 용량에서는 F_C를 5%씩 증가시킨 5.60L/1회 (A_1), 6.25L/1회 (A_2), 7.87L/1회 (A_3), 9.00L/1회 (A_4)로 구분하였으며, 관수 빈도에서는 기준 관수량을 횟수로 나눈 5.60L/1회 (C_1), 2.80L/2회 (C_2), 1.87L/3회 (C_3), 1.40L/4회 (C_4)로 구분하였다. 본 실험의 타당성을 검증하기 위해 각 실험구는 자작나무와 스트로브 잣나무 1주씩 구성되며, 총 14실험구로 진행한다. 위의 실험구 구성은 <그림 8>과 같다.

[그림 8] 본 실험의 실험구 구성도

2. 측정 장비 및 방법

위 실험에서 토양의 함수율을 측정하기 위해 [표 7]과 같이 지점 규모 관측 기술 중 정전용량 프로브 방법을 이용한 토양 수분 측정기(PMS-710)를 활용한다. 위 방법은 토양 내 수분 변화에 따른 정전용량 변화를 검출하는 방법으로써 고주파 방식에서는 공진주파수 변화법이 이용되고 있다. 게다가 구조가 간단하고 가격이 저렴하다는 장점이 있으며, 실제 정확도가 가장 높은 TDR방법의 경우와 유사한 결과를 나타내면서 오차 내 정확한 토양 함수율 측정이 가능하다 (김기복, 2001). 정전용량 프로브 방법은 타 방식에 비해 기기 구매 비용이 낮아 쉽게 접근할 수 있으며, 직관적으로 함수율을 측정할 수 있어 관수 관련 연구 진행 시 활용도가 높아질 것으로 예측된다.

본 실험의 측정 방법으로는 지상의 줄기 돌출부에서 15cm 거리 및 깊이의 지점을 측정하며, 신뢰도를 높이기 위해 4분위 총 4개 지점의 평균값을 계산한다. 측정값 작성을 위해 제작 및 활용한 조사지는 [부록 2]와 같다.

함수율과 더불어 온·습도계를 통해 온실 내외부 온도 및 습도를 함께 측정하여 추후 토양수분 스트레스 지수 도출을 위한 자료를 수집한다.

[표 7] 토양의 함수율 측정을 위한 수분 측정기

토양측정기 방법	모델	토양 측정기 사진	
		토양 측정기 모습	실제 측정기 활용
정전용량 프로브 방법	PMS-710		

3. 독립변수별 토양수분 스트레스 지수 계산식 설정

본 실험에서 활용하는 토양은 양토이기 때문에 수목생리학 (이경준, 2021)에서 제시하는 포장용수량과 영구 위조점 기준 함수율을 대입하였을 시에는 $\theta_{FC} = 0.23(m^3m^{-3})$ / $\theta_{\wp} = 0.10(m^3m^{-3})$이다. 근권부 깊이는 $Z_\gamma = 0.2m$이며, 위의 계수를 대입하면 TAW 는 26(mm)이다. 선행연구 분석을 통해 얻은 값인 $P = 0.5$를 대입하였을 시에는 RAW는 13이며, 이에 따라 실험값에 따른 토양수분 스트레스 방정식은 <3.1>과 같이 정리할 수 있다.

$$K_S = \frac{TAW - D_\gamma}{TAW - RAW} = \frac{26(mm) - D_\gamma}{13(mm)} = 2 - \frac{D_\gamma}{13} \qquad \langle\ 3.1\ \rangle$$

위와 마찬가지로 D_γ에서도 동일한 θ_{FC} , Z_γ 값을 적용하며, 산정식은 <3.2>와 같이 정리할 수 있다.

$$D_\gamma = 1000 \times (0.23 - \theta_\gamma) \times 0.2 \qquad \langle\ 3.2\ \rangle$$

정리된 계산식을 활용하여 실험 기간동안 측정된 일별 함수율 변화 값을 대입한 토양수분 스트레스 지수를 그래프로 작성하고, 토양수분 스트레스가 최소일 때의 일수인 $Day(K_S = 1)$, 최대일 때의 일수인 $Day(K_S = 0)$, 최대/최소 일수의 변화율인 $Day(K_S = 0,1)$ 변화율을 계산한다. $Day(K_S = 1)$의 일수가 크고 $Day(K_S = 0)$가 작을수록 수목이 토양수분 스트레스를 적게 받는 것이며, $Day(K_S = 0,1)$ 변화율이 클수록 토양수분 스트레스에 대한 저항력과 관수 후 시간에 따른 적응력이 높다고 판단할 수 있다.

제4장 실험결과 및 고찰

1절. 관수 용량 증가에 따른 함수율 및 수분 스트레스 지수

1. 관수 용량 증가에 따른 함수율 변화

1-1) 자작나무 A1

[Table 1.1.1] 자작나무(A_1) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (A_1)	1회 관수용량에 따른	5.60L / 1회	0 day (관수)	5.5	3.6	4.65
			1 day	38.1	36.3	37.10
			2 day	24.6	22.3	23.33
			3 day	23.4	21.9	22.48
			4 day	23.6	20.4	22.45
			5 day	18.9	15.9	17.08
			6 day	17.3	12.8	14.38
			7 day	15.2	11.5	12.95
			8 day	9.8	7.5	8.43
			9 day	8.0	6.5	7.33
			10 day	7.3	6.0	6.88
			11 day	6.7	5.1	6.05
			12 day	6.0	5.4	5.65
			13 day	5.9	5.3	5.58
			14 day	5.7	4.9	5.18
			15 day	5.2	4.2	5.03

자작나무(A_1) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.1.1]과 같이 나타났다. 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 37.10%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소하며 2일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소하다 8일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달한다.

1-2) 자작나무 A2

[Table 1.2.1] 자작나무(A2) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (A2)	1회 관수용량에 따른	6.25L / 1회	0 day (관수)	5.3	3.9	4.48
			1 day	38.6	35.9	37.70
			2 day	26.5	21.6	23.75
			3 day	26.0	21.3	24.35
			4 day	23.6	20.3	22.00
			5 day	21.7	17.6	19.48
			6 day	18.2	15.3	16.50
			7 day	15.2	13.7	14.30
			8 day	12.1	9.3	10.73
			9 day	9.7	7.4	8.65
			10 day	8.3	6.7	7.60
			11 day	7.5	6.1	6.93
			12 day	6.5	5.9	6.23
			13 day	6.1	4.8	5.70
			14 day	5.5	5.1	5.25
			15 day	5.2	4.9	5.07

자작나무(A2) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.2.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 4.48%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 37.70%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소세를 보이며 2일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소를 지속하다 8일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보인다.

1-3) 자작나무 A3

[Table 1.3.1] 자작나무(A3) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (A3)	1회 관수용량에 따른	7.87L / 1회	0 day (관수)	5.6	3.1	4.25
			1 day	44.5	40.6	42.15
			2 day	31.1	26	28.13
			3 day	31.3	26.3	28.40
			4 day	25.1	21.6	23.28
			5 day	24.4	21.5	22.53
			6 day	21.1	18.6	19.68
			7 day	18.0	16.1	16.98
			8 day	14.2	12.5	13.28
			9 day	10.8	9.4	9.88
			10 day	9.4	8.0	8.68
			11 day	8.5	7.2	7.88
			12 day	6.8	5.3	5.90
			13 day	5.9	4.3	5.10
			14 day	5.1	3.4	4.45
			15 day	5.2	4.1	4.67

자작나무(A3) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.3.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 4.25%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 42.15%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소세를 보이며 4일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소를 지속하다 9일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보인다.

1-4) 자작나무 A4

[Table 1.4.1] 자작나무(A4) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (A4)	1회 관수용량에 따른	9.00L / 1회	0 day (관수)	6.1	4.3	5.13
			1 day	44.6	40.1	42.25
			2 day	34.3	25.7	28.40
			3 day	32.8	25.3	28.43
			4 day	27.0	21.6	24.80
			5 day	23.8	21.7	22.75
			6 day	20.8	18.9	19.80
			7 day	17.4	16.3	16.88
			8 day	14.2	10.3	12.10
			9 day	10.8	8.1	9.08
			10 day	8.4	7.6	8.10
			11 day	7.8	6.8	7.35
			12 day	6.8	5.4	6.33
			13 day	6.5	6.0	6.25
			14 day	5.9	5.1	5.43
			15 day	5.2	4.8	5.17

자작나무(A4) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.4.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.13%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 42.25%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소세를 보이며 4일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소를 지속하다 9일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보인다.

1-5) 스트로브 잣나무 A1

[Table 1.5.1] 스트로브 잣나무(A1) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (A1)	1회 관수용량에 따른	5.60L / 1회	0 day (관수)	5.3	4.3	5.08
			1 day	41.4	38.4	39.43
			2 day	24.1	19.6	21.63
			3 day	28.4	20.3	23.25
			4 day	27.8	19.8	23.43
			5 day	20.1	10.7	16.08
			6 day	16.6	12.1	13.78
			7 day	12.6	9.8	10.90
			8 day	10.0	8.5	9.20
			9 day	8.8	7.3	7.98
			10 day	8.2	7.0	7.55
			11 day	7.0	6.3	6.80
			12 day	6.1	5.4	5.83
			13 day	5.7	5.3	5.45
			14 day	5.4	4.8	5.08
			15 day	5.3	4.3	4.80

스트로브 잣나무(A1) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.5.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.08%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 39.43%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소세를 보이며 2일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소를 지속하다 7일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보인다.

1-6) 스트로브 잣나무 A2

[Table 1.6.1] 스트로브 잣나무(A2) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (A2)	1회 관수용량에 따른	6.25L / 1회	0 day (관수)	5.6	4.7	5.08
			1 day	39.0	36.4	38.13
			2 day	26.9	20.0	23.15
			3 day	24.1	21.1	22.53
			4 day	19.4	15.1	17.25
			5 day	17.1	11.3	15.45
			6 day	16.0	13.2	14.68
			7 day	14.0	12.5	13.08
			8 day	11.2	9.9	10.60
			9 day	9.1	7.5	8.45
			10 day	7.4	6.1	6.78
			11 day	6.7	5.3	6.03
			12 day	6.1	4.3	5.28
			13 day	5.4	4.3	4.95
			14 day	5.1	4.6	4.85
			15 day	5.0	4.5	4.57

스트로브 잣나무(A2) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.6.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.08%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 38.13%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소세를 보이며 2일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소를 지속하다 8일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보인다.

1-7) 스트로브 잣나무 A3

[Table 1.7.1] 스트로브 잣나무(A3) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (A3)	1회 관수용량에 따른	7.87L / 1회	0 day (관수)	5.6	3.9	4.70
			1 day	42.4	39.6	41.03
			2 day	30.6	26.4	27.88
			3 day	31.0	25.3	28.08
			4 day	21.3	16.8	19.85
			5 day	20.3	13.5	18.00
			6 day	18.8	16.0	17.08
			7 day	15.3	13.9	14.68
			8 day	12.7	10.3	11.58
			9 day	10.6	9.8	10.20
			10 day	8.4	7.3	7.90
			11 day	7.9	6.9	7.28
			12 day	7.3	5.3	6.50
			13 day	5.8	5.1	5.43
			14 day	5.5	4.7	5.20
			15 day	5.4	4.3	4.93

스트로브 잣나무(A3) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.7.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 4.70%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 41.03%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소세를 보이며 4일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소를 지속하다 8일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보인다.

1-8) 스트로브 잣나무 A4

[Table 1.8.1] 스트로브 잣나무(A4) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (A4)	1회 관수용량에 따른	9.00L / 1회	0 day (관수)	6.3	3.6	5.13
			1 day	46.3	38.6	43.05
			2 day	27.55	28.6	25.40
			3 day	32.0	22.3	28.08
			4 day	28.5	19.1	23.88
			5 day	26.5	20.4	22.48
			6 day	26.5	20.4	20.08
			7 day	18.3	16.4	17.03
			8 day	13.7	11.8	12.80
			9 day	11.8	9.6	10.80
			10 day	9.3	7.3	8.08
			11 day	8.6	6.4	7.40
			12 day	6.9	4.3	5.88
			13 day	6.1	4.8	5.53
			14 day	5.5	4.5	5.18
			15 day	5.1	4.3	4.80

스트로브 잣나무(A4) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 1.8.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.13%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 43.05%로 나타났지만, 이후 함수율이 감소세를 보이며 4일 차부터 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입한다. 이후 감소를 지속하다 9일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보인다.

2. 일별 함수율 및 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

관수 용량 증가에 따른 함수율 측정값을 토양수분 스트레스 지수로 도출해 본 결과로 자작나무(A1)의 경우에는 관수 후 5일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 6일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 8일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

자작나무(A2)의 경우에는 관수 후 6일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 7일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 9일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

자작나무(A3)의 경우에는 관수 후 7일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 8일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 9일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

자작나무(A4)의 경우에는 관수 후 7일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 8일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 9일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

스트로브 잣나무(A1)의 경우에는 관수 후 4일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 5일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 8일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

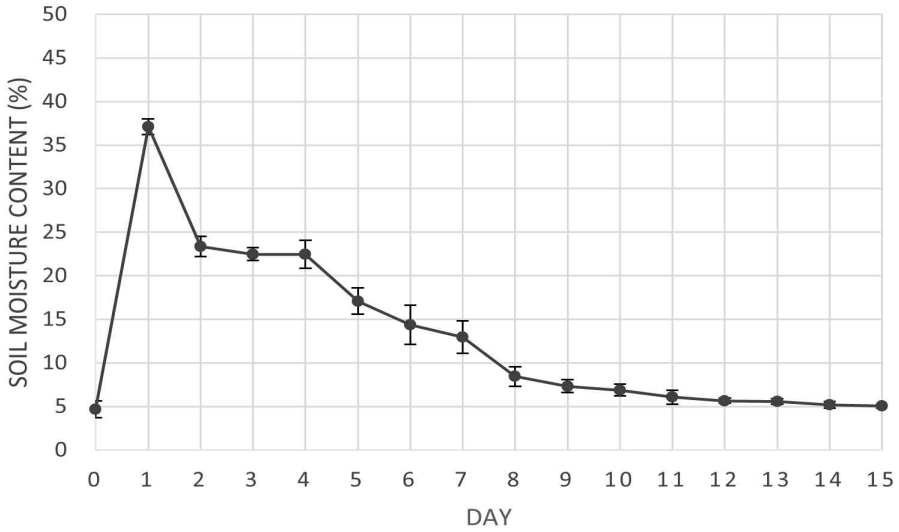
스트로브 잣나무(A2)의 경우에는 관수 후 4일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 5일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 9일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

스트로브 잣나무(A3)의 경우에는 관수 후 6일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 7일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 10일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

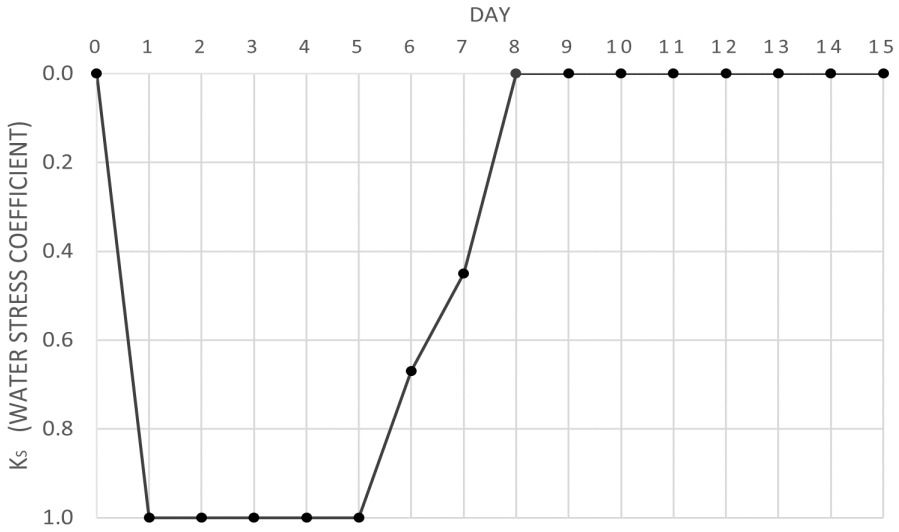
스트로브 잣나무(A4)의 경우에는 관수 후 7일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 그러나 이후 8일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하여 10일 차부터는 $K_S = 0$에 도달하며 15일 차까지 토양수분 스트레스 지수의 최고점을 유지하는 것으로 나타났다.

다음 [Table 1.1.2~1.7.3] 그래프는 앞서 설명한 관수 용량 증가에 따른 함수율과 스트레스 지수 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

1-1) 자작나무 A1

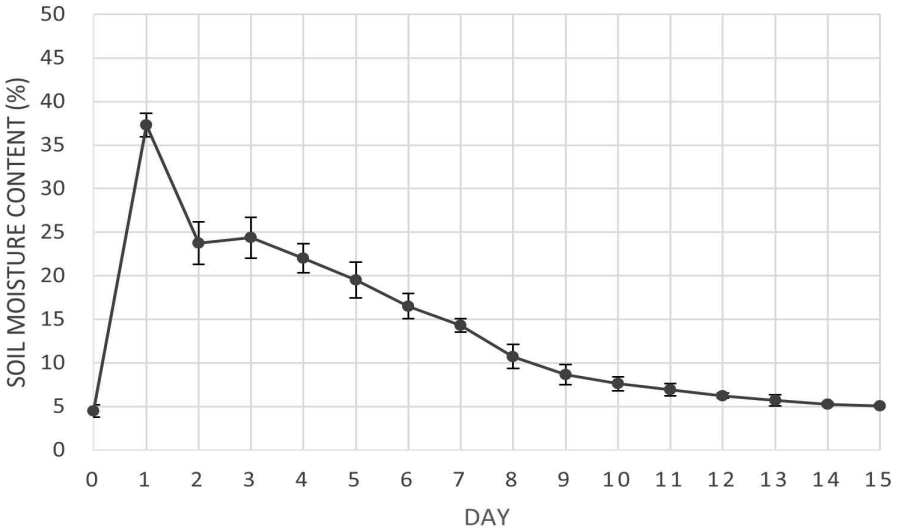


[Table 1.1.2] 자작나무(A_1) 일별 함수율 변화 그래프

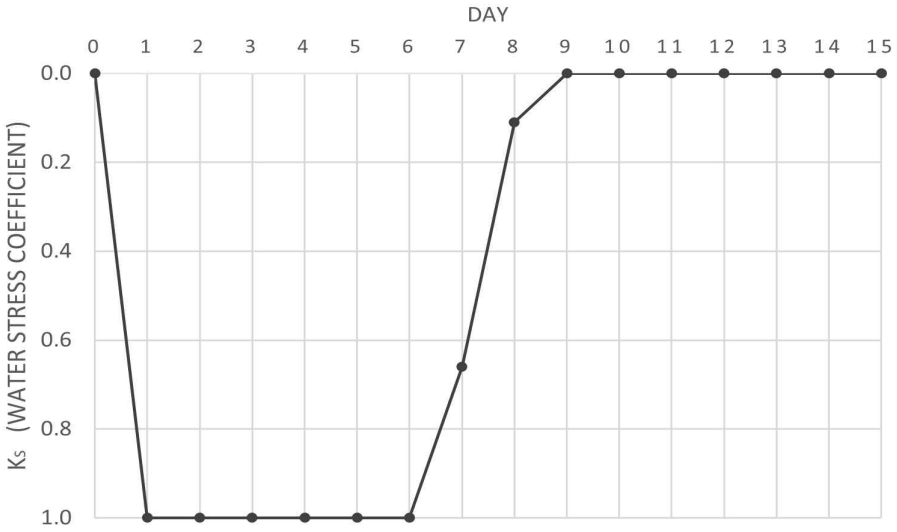


[Table 1.1.3] 자작나무(A_1) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-2) 자작나무 A2

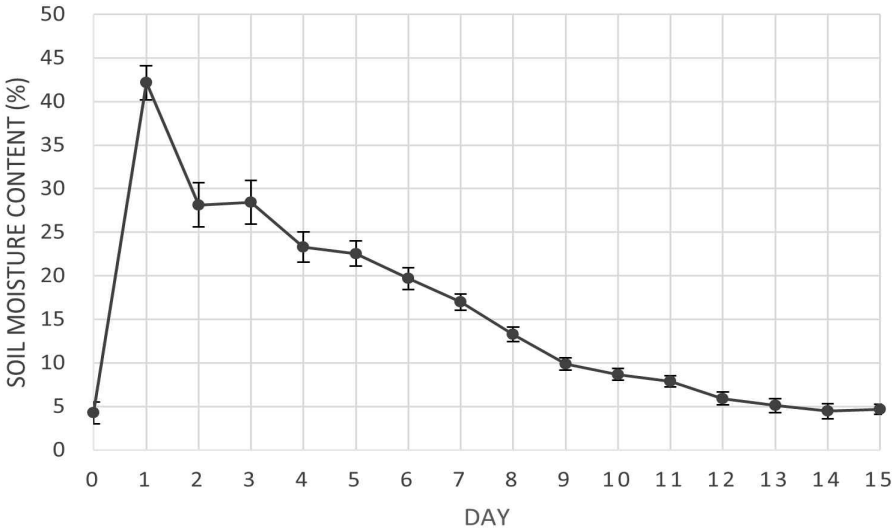


[Table 1.2.2] 자작나무(A2) 일별 함수율 변화 그래프

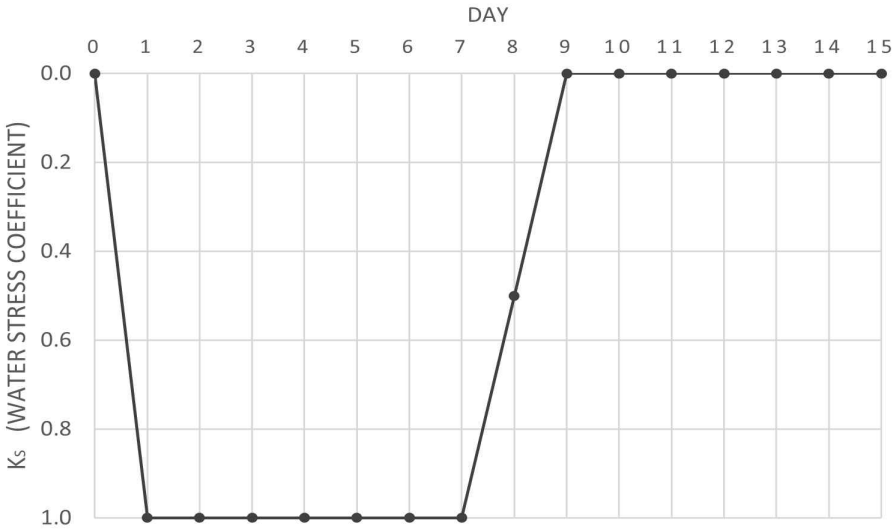


[Table 1.2.3] 자작나무(A2) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-3) 자작나무 A3

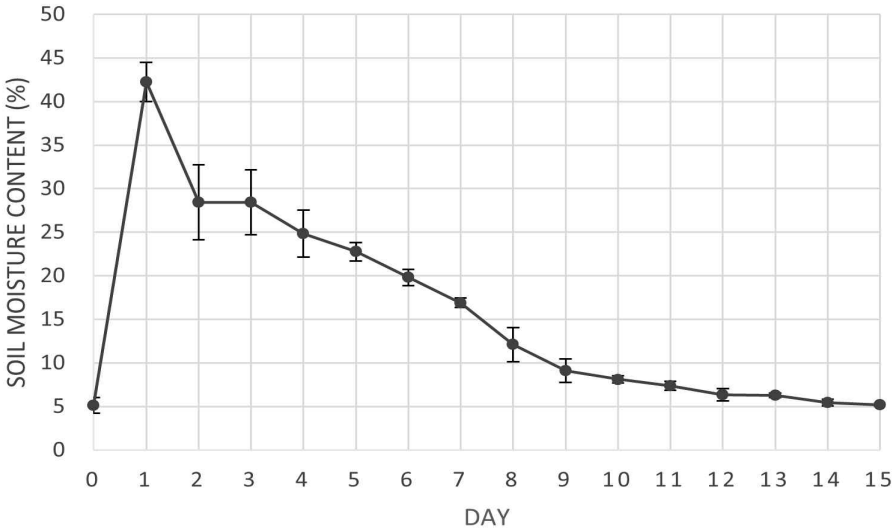


[Table 1.3.2] 자작나무(A3) 일별 함수율 변화 그래프

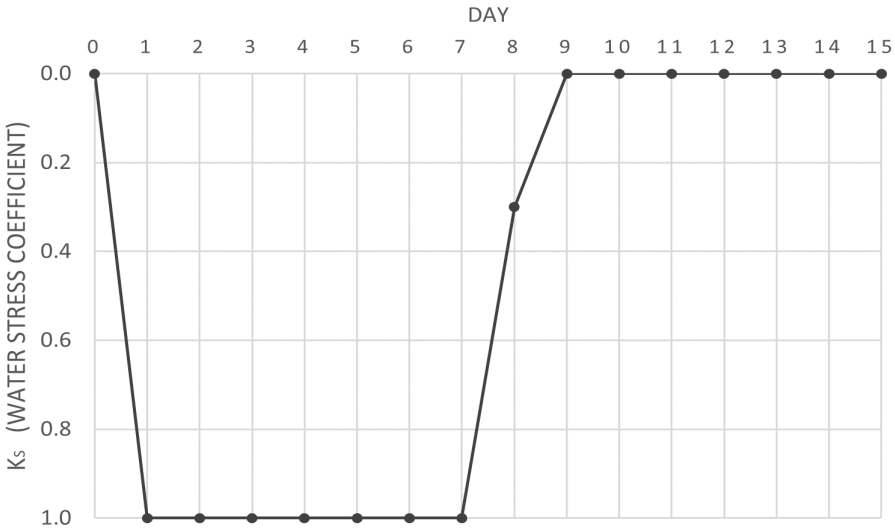


[Table 1.3.3] 자작나무(A3) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-4) 자작나무 A4

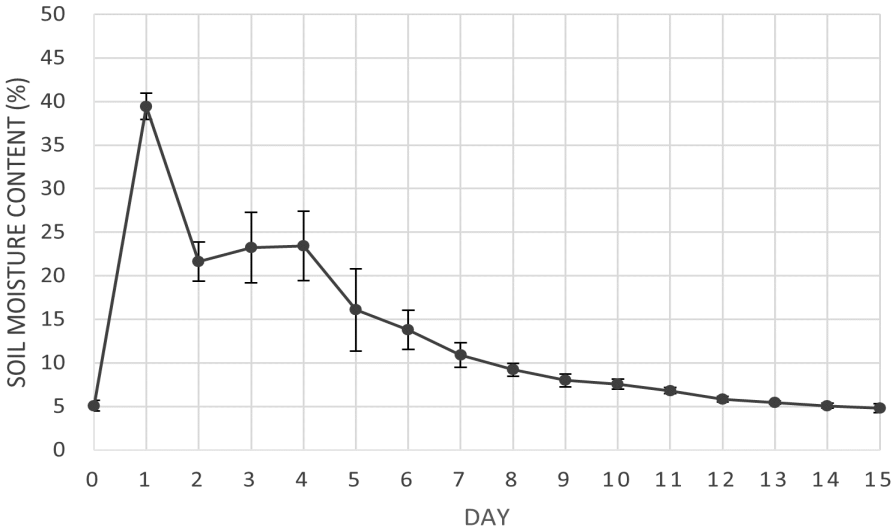


[Table 1.4.2] 자작나무(A4) 일별 함수율 변화 그래프

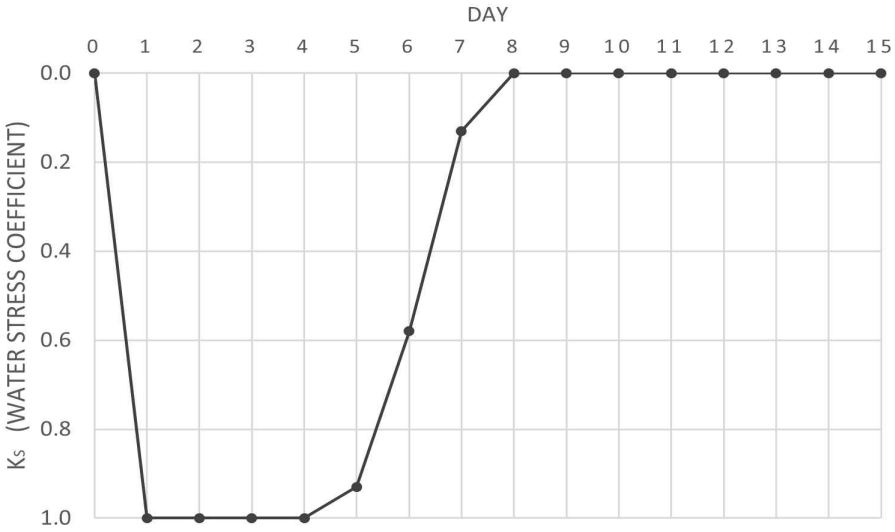


[Table 1.4.3] 자작나무(A4) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-5) 스트로브 잣나무 A1

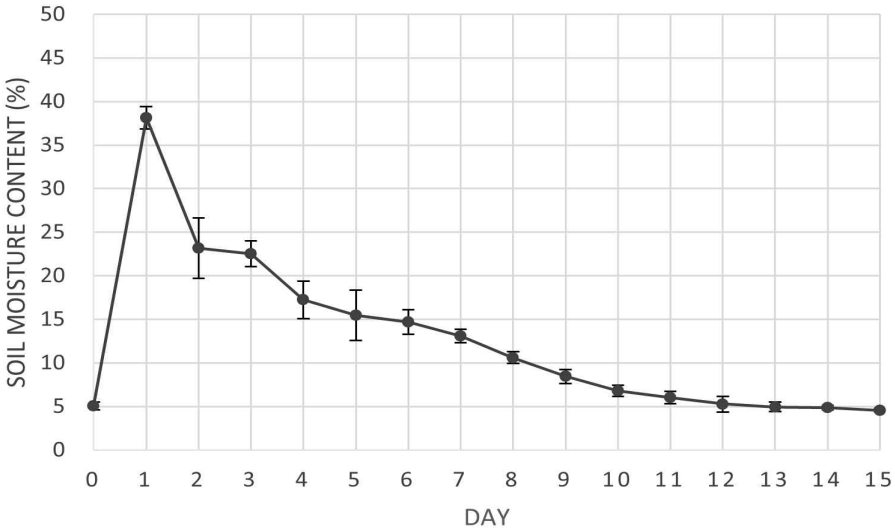


[Table 1.5.2] 스트로브 잣나무(A_1) 일별 함수율 변화 그래프

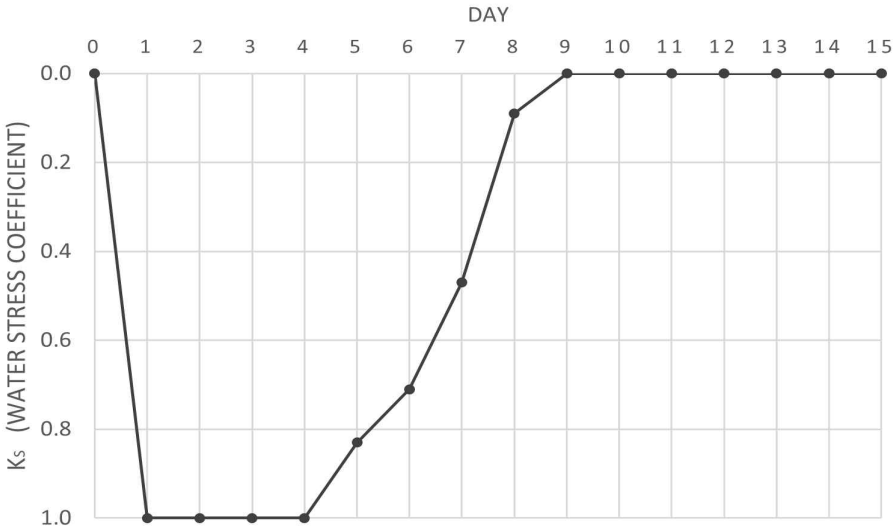


[Table 1.5.3] 스트로브 잣나무(A_1) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-6) 스트로브 잣나무 A2

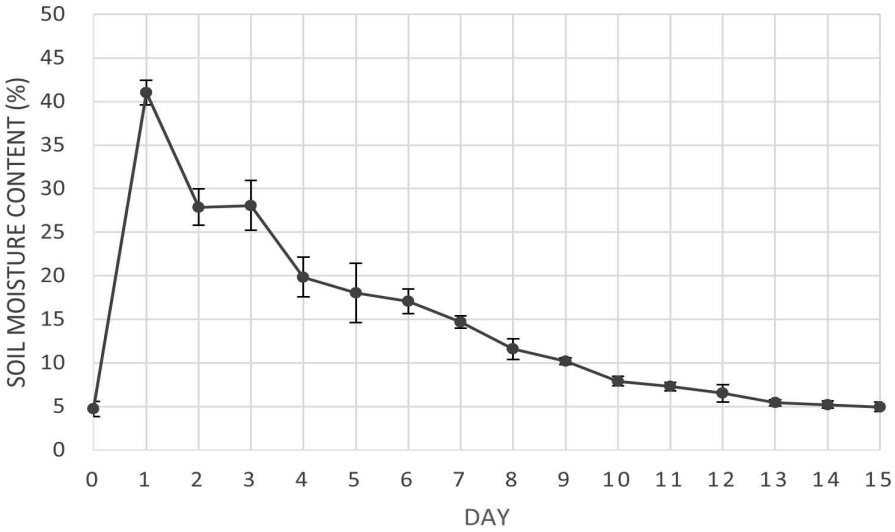


[Table 1.6.2] 스트로브 잣나무(A2) 일별 함수율 변화 그래프

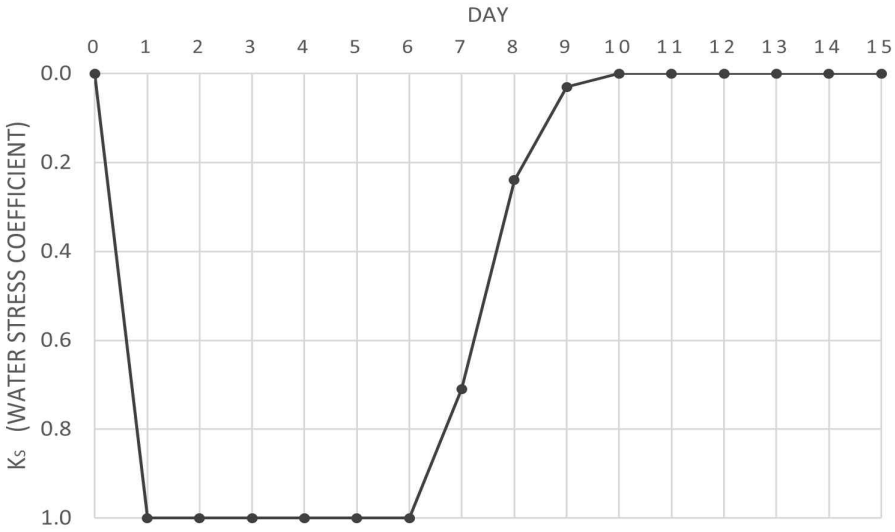


[Table 1.7.3] 스트로브 잣나무(A2) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-7) 스트로브 잣나무 A3

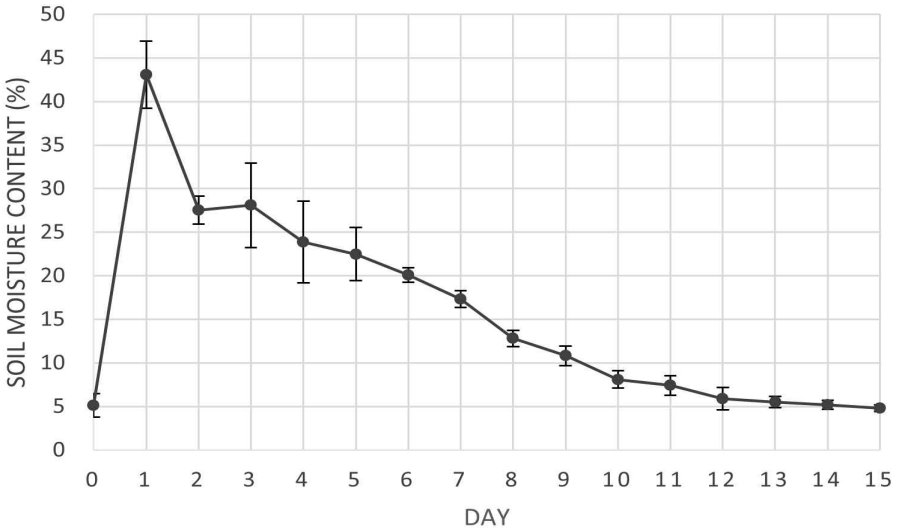


[Table 1.7.2] 스트로브 잣나무(A3) 일별 함수율 변화 그래프

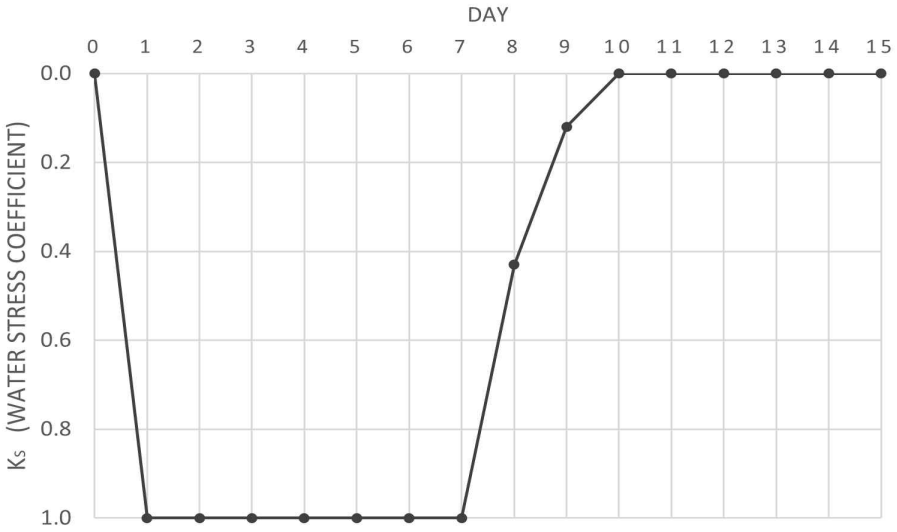


[Table 1.7.3] 스트로브 잣나무(A3) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-8) 스트로브 잣나무 A4



[Table 1.8.2] 스트로브 잣나무(A4) 일별 함수율 변화 그래프



[Table 1.8.3] 스트로브 잣나무(A4) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

계산된 토양수분 스트레스 지수를 $Day(K_S=1)$, $Day(K_S=0)$, $Day(K_S=0,1)$ 변화율로 계산하면 [표 8]과 같이 요약 및 정리할 수 있다.

[표 8] 토양수분 스트레스 지수 일별 정리표 (관수 용량 증가)

실험구 (관수 용량)	$Day(K_S=1)$	$Day(K_S=0)$
자작나무(A1)	5	8
자작나무(A2)	6	7
자작나무(A3)	7	7
자작나무(A4)	7	7
스트로브 잣나무(A1)	4	8
스트로브 잣나무(A2)	4	7
스트로브 잣나무(A3)	6	6
스트로브 잣나무(A4)	7	6
Day (K=0,1) 변화율	**57.5% 증가**	**18.75% 감소**

관수 용량 증가에 따른 실험구에서 $Day(K_S=1)$의 평균값은 5.75일이며, $Day(K_S=0)$의 평균값은 7일이다. 1회 관수 용량이 증가할수록 $Day(K_S=0)$의 값은 감소하지만, 모든 실험구에서 $Day(K_S=0)$은 6일 이상인 것으로 관찰되었다. 따라서 관수 용량이 증가하여도 최소 6일은 토양수분 스트레스 지수가 최대로 지속되며, 용량의 증가율에 비해 $Day(K_S=1)$ 변화율은 비례하여 증가하지 않았다. $Day(K_S=0)$ 변화율 또한 비례하여 감소하지 않았다.

2절. 관수 빈도 증가에 따른 함수율 및 수분 스트레스 지수

1. 관수 빈도 증가에 따른 함수율 변화

1-1) 자작나무 C_1

[Table 2.1.1] 자작나무(C_1) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (C_1)	1회 관수빈도에 따른	5.60L / 1회	0 day (관수)	5.5	3.6	4.65
			1 day	38.1	36.3	37.10
			2 day	24.6	22.3	23.33
			3 day	23.4	21.9	22.48
			4 day	23.6	20.4	22.45
			5 day	18.9	15.9	17.08
			6 day	17.3	12.8	14.38
			7 day	15.2	11.5	12.95
			8 day	9.8	7.5	8.43
			9 day	8.0	6.5	7.33
			10 day	7.3	6.0	6.88
			11 day	6.7	5.1	6.05
			12 day	6.0	5.4	5.65
			13 day	5.9	5.3	5.58
			14 day	5.7	4.9	5.18
			15 day	5.2	4.2	5.03

자작나무(C_1) 실험구의 일별 함수율 변화는 <Table 2.1.1>과 같이 나타났으며, 내용은 [Table 1.1.1]과 같다.

1-2) 자작나무 C2

[Table 2.2.1] 자작나무(C2) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (C2)	2회 관수빈도에 따른	2.80L / 2회	0 day (관수)	5.8	3.8	4.80
			1 day	33.9	28.3	30.63
			2 day	24.1	22.3	23.53
			3 day	22.4	20.0	21.28
			4 day	23.2	18.0	20.78
			5 day	24.5	13.2	18.05
			6 day	16.1	14.3	16.10
			7 day	14.2	11.5	12.80
			8 day (관수)	10.8	9.8	10.38
			9 day	38.3	32.7	35.23
			10 day	28.5	24.7	25.83
			11 day	25.3	21.6	23.33
			12 day	22.3	18.3	20.08
			13 day	16.5	14.2	15.43
			14 day	13.5	11.4	12.23
			15 day	11.3	8.4	9.77

자작나무(C2) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 2.2.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 4.80%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 30.63%로 나타났다. 2일 차 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내에 진입 이후 함수율이 감소세를 보이지만, 8일 1회차 재관수 시까지 10.38%로 영구 위조점에 도달하지 않고 유효 함수율을 유지한다. 이후 다시 감소를 지속하다 14일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점에 도달하는 모습을 보인다.

1-3) 자작나무 C3

[Table 2.3.1] 자작나무(C3) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (C3)	3회 관수빈도에 따른	1.87L / 3회	0 day (관수)	7.1	4.5	5.48
			1 day	33.8	25.6	25.60
			2 day	23.6	18.7	21.13
			3 day	21.0	17.3	18.90
			4 day	19.8	17.2	18.48
			5 day (관수)	15.9	13.5	14.73
			6 day	36.0	31.8	33.09
			7 day	28.0	25.1	26.28
			8 day	23.5	20.8	22.18
			9 day	18.9	17.4	18.13
			10 day(관수)	15.3	12.1	14.10
			11 day	39.1	34.8	37.18
			12 day	29.3	23.5	27.03
			13 day	23.9	20.6	22.50
			14 day	20.6	15.2	17.80
			15 day	17.6	14.3	14.67

자작나무(C3) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 2.3.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.48%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 25.60%로 나타났다. 2일 차 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내에 진입 이후 감소세를 보이지만, 5일 1회차 재관수 시까지 평균 함수율이 14.73%로 영구 위조점에 도달하지 않고 유효 함수율을 유지한다. 이후 다시 감소를 지속하지만 10일 2회차 재관수 시에도 평균 함수율이 14.10%로 영구 위조점에 도달하지 않고 유효 함수율을 유지한다. 그 후 15일 차까지 유효 함수율 범위를 유지하는 모습을 보인다.

1-4) 자작나무 C_4

[Table 2.4.1] 자작나무(C_4) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
자작나무 (C_4)	4회 관수빈도에 따른	1.40L / 4회	0 day (관수)	6.5	5.0	5.40
			1 day	30.2	22.3	26.30
			2 day	23.4	21.3	22.00
			3 day	18.9	15.3	17.60
			4 day (관수)	19.0	15.9	16.98
			5 day	34.3	27.3	31.25
			6 day	26.3	23.1	24.48
			7 day	22.1	20.3	21.10
			8 day (관수)	18.5	16.0	17.00
			9 day	34.2	31.5	32.90
			10 day	26.9	25.3	26.25
			11 day	25.1	22.3	23.78
			12 day(관수)	22.3	18.5	20.18
			13 day	38.5	34.6	36.43
			14 day	31.1	25.3	27.68
			15 day	26.3	21.6	23.73

자작나무(C_4) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 2.4.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.40%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 26.30%로 나타났다. 2일 차 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내에 진입 이후 4일 1회차 재관수 시까지 16.98%로 영구 위조점에 도달하지 않고 유효 함수율을 유지한다. 이후 8일 2회차 재관수 시까지도 평균 함수율이 17.00%로 영구 위조점에 도달하지 않았다. 12일 3회차 재관수 시에도 평균 함수율이 20.18%로 영구 위조점에 도달하지 않았으며, 15일 차까지 유효 함수율 범위를 유지하는 모습을 보인다.

1-5) 스트로브 잣나무 C_1

[Table 2.5.1] 스트로브 잣나무(C_1) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (C_1)	1회 관수빈도에 따른	5.60L / 1회	0 day (관수)	5.3	4.3	5.08
			1 day	41.4	38.4	39.43
			2 day	24.1	19.6	21.63
			3 day	28.4	20.3	23.25
			4 day	27.8	19.8	23.43
			5 day	20.1	10.7	16.08
			6 day	16.6	12.1	13.78
			7 day	12.6	9.8	10.90
			8 day	10.0	8.5	9.20
			9 day	8.8	7.3	7.98
			10 day	8.2	7.0	7.55
			11 day	7.0	6.3	6.80
			12 day	6.1	5.4	5.83
			13 day	5.7	5.3	5.45
			14 day	5.4	4.8	5.08
			15 day	5.3	4.3	4.80

스트로브 잣나무(C_1) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 2.5.1]과 같이 나타났으며, 내용은 <Table 1.5.1>과 같다.

1-6) 스트로브 잣나무 C2

[Table 2.6.1] 스트로브 잣나무(C2) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (C2)	2회 관수빈도에 따른	2.80L / 2회	0 day (관수)	6.5	4.8	5.45
			1 day	33.1	27.4	30.53
			2 day	26.3	24.7	25.55
			3 day	25.2	22.6	23.75
			4 day	26.7	17.7	22.73
			5 day	24.1	15.8	18.58
			6 day	16.2	13.8	14.60
			7 day	13.6	10.5	12.33
			8 day (관수)	10.4	8.4	9.28
			9 day	41.1	33.8	36.73
			10 day	32.5	25.3	28.15
			11 day	28.3	22.8	24.68
			12 day	22.4	18.6	19.85
			13 day	16.3	13.8	14.95
			14 day	14.6	12.3	13.48
			15 day	11.9	10.3	11.13

스트로브 잣나무(C2) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 2.6.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.45%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 30.53%로 나타났다. 3일 차 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내에 진입 이후 함수율이 감소세를 보이며, 8일 1회차 재관수 전에 9.28%로 영구 위조점에 접근한다. 하지만 관수 후 9일 차 36.73%로 다시 상승하였으며, 이후 감소를 지속하다 15일 차부터 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점에 도달하는 모습을 보인다.

1-7) 스트로브 잣나무 C3

[Table 2.7.1] 스트로브 잣나무(C3) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (C3)	3회 관수빈도에 따른	1.87L / 3회	0 day (관수)	6.5	5.1	5.78
			1 day	33.6	28.5	31.05
			2 day	26.0	18.6	21.88
			3 day	21.8	18.1	19.83
			4 day	18.2	16.2	17.60
			5 day (관수)	15.5	11.4	13.38
			6 day	38.0	32.6	34.33
			7 day	28.5	25.3	26.58
			8 day	23.1	18.6	20.90
			9 day	21.6	17.0	18.60
			10 day(관수)	19.2	14.0	15.75
			11 day	37.5	33.9	35.95
			12 day	27.2	22.3	25.10
			13 day	22.4	18.9	20.18
			14 day	17.5	16.2	16.60
			15 day	14.8	13.6	14.37

스트로브 잣나무(C3) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 2.7.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 5.78%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 31.05%로 나타났다. 2일 차 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내에 진입 이후 함수율이 감소세를 보이지만, 5일 1회차 재관수 시까지 평균 함수율이 13.38%로 영구 위조점에 도달하지 않고 유효 함수율을 유지한다. 이후 다시 감소를 지속하지만 10일 2회차 재관수 시에도 평균 함수율이 15.75%로 영구 위조점에 도달하지 않고 유효 함수율을 유지한다. 그 후 15일 차까지 유효 함수율 범위를 유지하는 모습을 보인다.

1-8) 스트로브 잣나무 C_4

[Table 2.8.1] 스트로브 잣나무(C_4) 일별 함수율 변화표

Species	Irrigation Frequency		Date	Soil Moisture Content (%)		
				Max.	Min.	Avg.
스트로브 잣나무 (C_4)	4회 관수빈도에 따른	1.40L / 4회	0 day (관수)	6.1	4.2	4.20
			1 day	26.1	23.6	24.68
			2 day	26.4	20.6	22.63
			3 day	20.6	16.4	18.70
			4 day (관수)	17.8	14.7	15.90
			5 day	36.9	33.0	35.33
			6 day	26.1	22.4	23.83
			7 day	23.8	20.4	21.50
			8 day (관수)	20.6	16.9	18.63
			9 day	40.2	35.9	38.28
			10 day	30.3	24.6	27.60
			11 day	27.4	23.5	25.58
			12 day(관수)	22.1	18.6	20.43
			13 day	40.5	34.9	37.88
			14 day	29.6	25.4	27.35
			15 day	27.0	22.3	23.90

스트로브 잣나무(C_4) 실험구의 일별 함수율 변화는 [Table 2.8.1]과 같이 나타났다. 관수 전 0일 차에 평균 함수율이 4.20%이며, 관수 후 1일 차에서는 평균 함수율이 24.68%로 나타났다. 1일 차 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내에 진입 이후 4일 1회차 재관수 시까지 15.90%로 영구 위조점에 도달하지 않고 유효 함수율을 유지한다. 이후 8일 2회차 재관수 시까지도 평균 함수율이 18.63%로 영구 위조점에 도달하지 않았다. 12일 3회차 재관수 시에도 평균 함수율이 20.43%로 영구 위조점에 도달하지 않았으며, 15일 차까지 유효 함수율 범위를 유지하는 모습을 보인다.

2. 일별 함수율 및 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

관수 빈도 증가에 따른 함수율 측정값을 토양수분 스트레스 지수로 도출해 본 결과로 자작나무(C1)의 경우에는 자작나무(A1)의 결과와 같고, 자작나무(C2)의 경우에는 관수 후 5일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 이후 6일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하기 시작하지만 $K_S = 0$에 도달하지는 않았으며, 재관수 후에는 다시 $K_S = 1$인 모습을 보이다가 15일 차에 $K_S = 0$에 도달한다.

자작나무(C3)의 경우에는 관수 후 4일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 이후 5일 차에 지수가 소폭 상승하였으나, 재관수 후 다시 $K_S = 1$인 모습을 보였다. 이후에도 토양수분 스트레스 지수가 소폭 상승하다 10일 차 재관수 후에는 스트레스 지수가 다시 $K_S = 1$로 돌아오는 반복적인 모습을 보였다. 위 실험구에서는 $K_S = 0$에 도달하는 모습은 관찰되지 않았다.

자작나무(C4)의 경우에는 관수 후 모든 일차에서 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다.

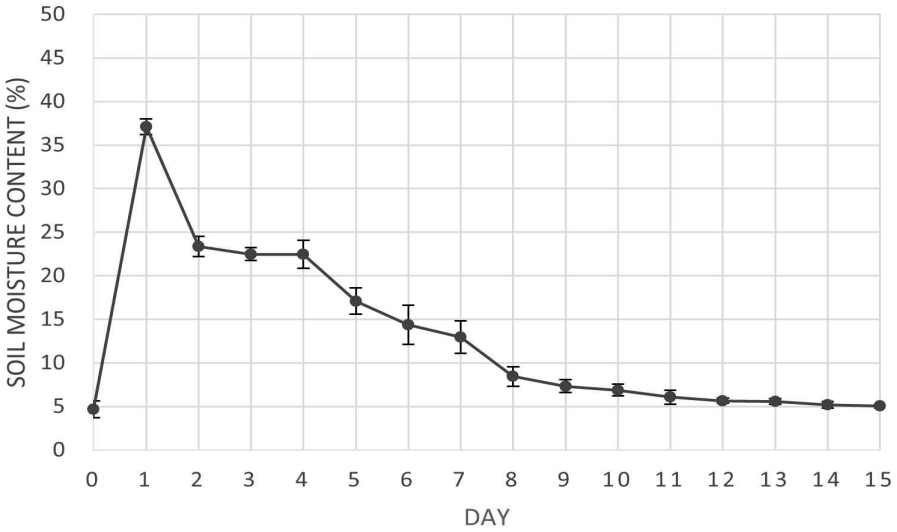
스트로브 잣나무(C1)의 경우에는 스트로브 잣나무(A1)의 결과와 같고, 스트로브 잣나무(C2)의 경우에는 관수 후 5일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 이후 6일 차부터는 토양수분 스트레스 지수가 상승하여 8일 차에 일시적으로 $K_S = 0$에 도달하지만, 재관수 후에는 다시 $K_S = 1$인 모습을 보이면서 15일 차까지 $K_S = 0$에 도달하지 않는 모습이 관찰되었다.

스트로브 잣나무(C3)의 경우에는 관수 후 4일 차까지 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다. 이후 5일 차에 지수가 상승하였으나 재관수 후 다시 $K_S = 1$인 모습을 보였으며, 이후 10일 차에 스트레스 지수가 소폭 오르나 10일 차 재관수 후에는 다시 $K_S = 1$로 돌아오는 반복적인 모습을 보였다. 위 실험구에서는 $K_S = 0$에 도달하는 모습은 관찰되지 않았다.

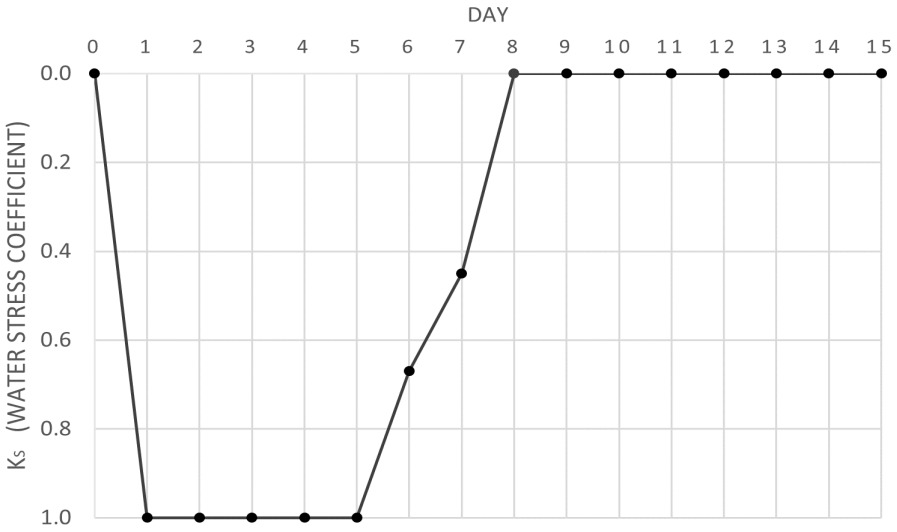
스트로브 잣나무(C4)의 경우에는 관수 후 모든 일차에서 $K_S = 1$인 모습을 보이며 토양수분 스트레스가 없는 모습을 보였다.

다음 [Table 2.1.2~2.7.3] 그래프는 앞서 설명한 관수 빈도 증가에 따른 함수율과 스트레스 지수 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

1-1) 자작나무 C_1

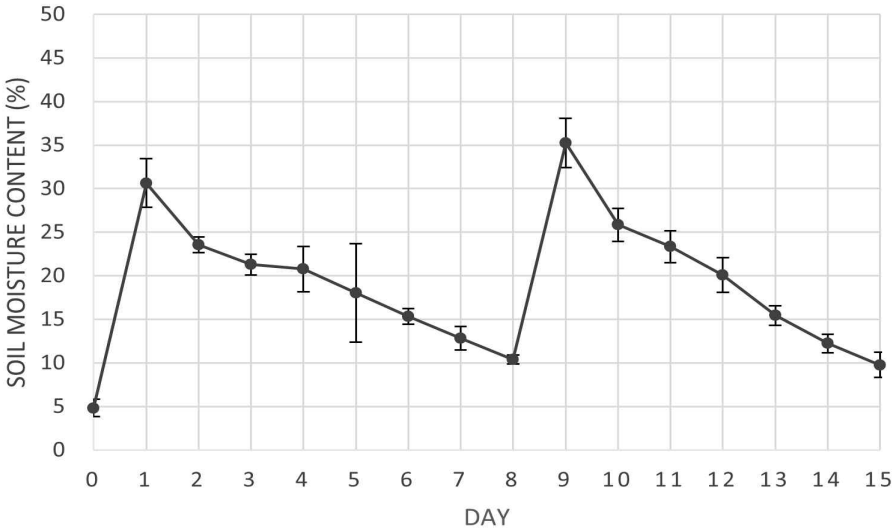


[Table 2.1.2] 자작나무(C_1) 일별 함수율 변화 그래프

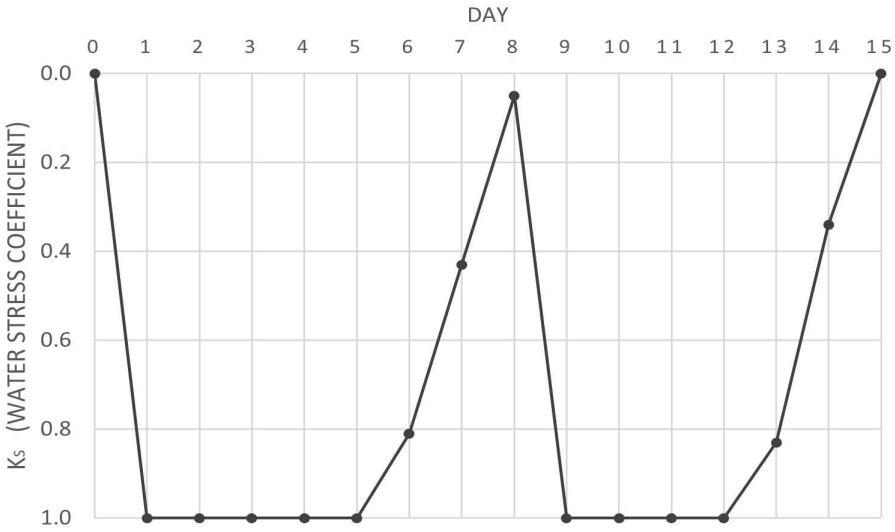


[Table 2.1.3] 자작나무(C_1) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-2) 자작나무 C2

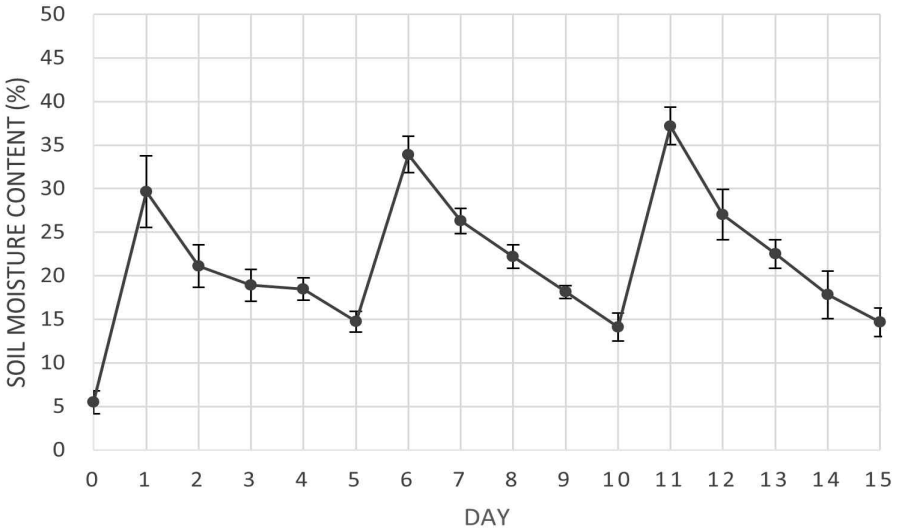


[Table 2.2.2] 자작나무(C2) 일별 함수율 변화 그래프

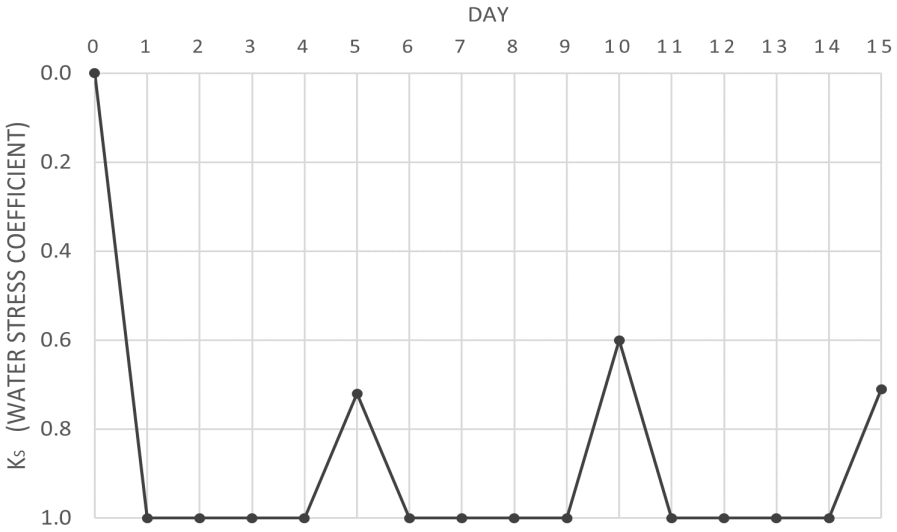


[Table 2.2.3] 자작나무(C2) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-3) 자작나무 C3

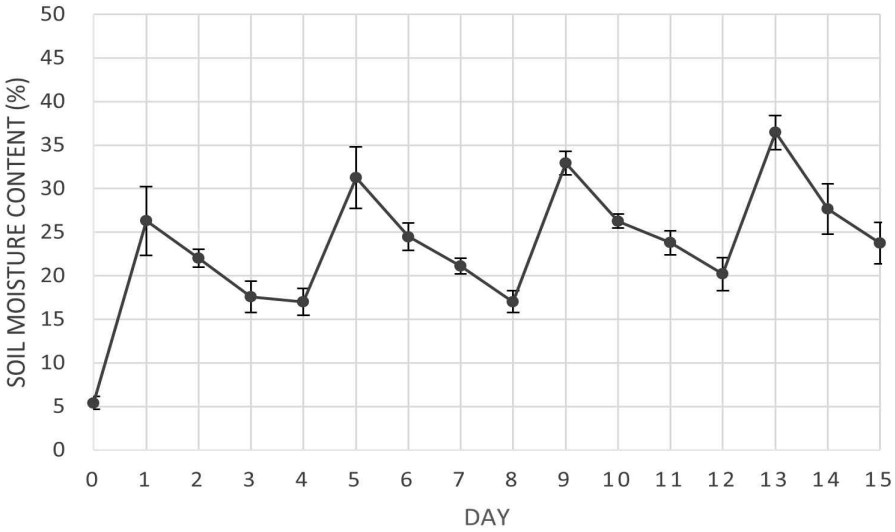


[Table 2.3.2] 자작나무(C3) 일별 함수율 변화 그래프

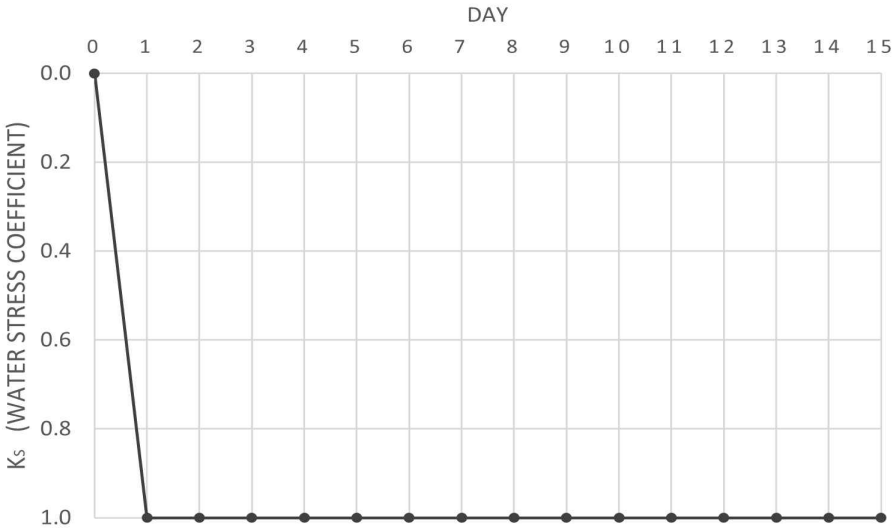


[Table 2.3.3] 자작나무(C3) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-4) 자작나무 C4

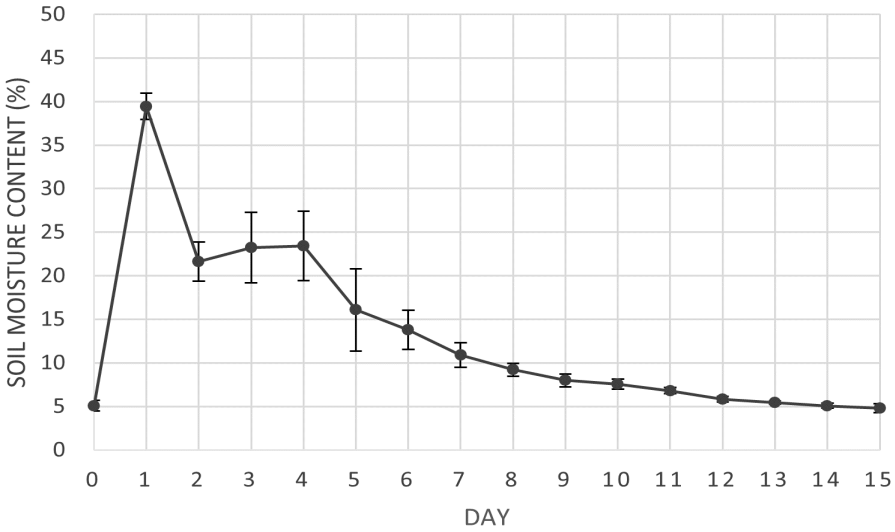


[Table 2.4.2] 자작나무(C4) 일별 함수율 변화 그래프

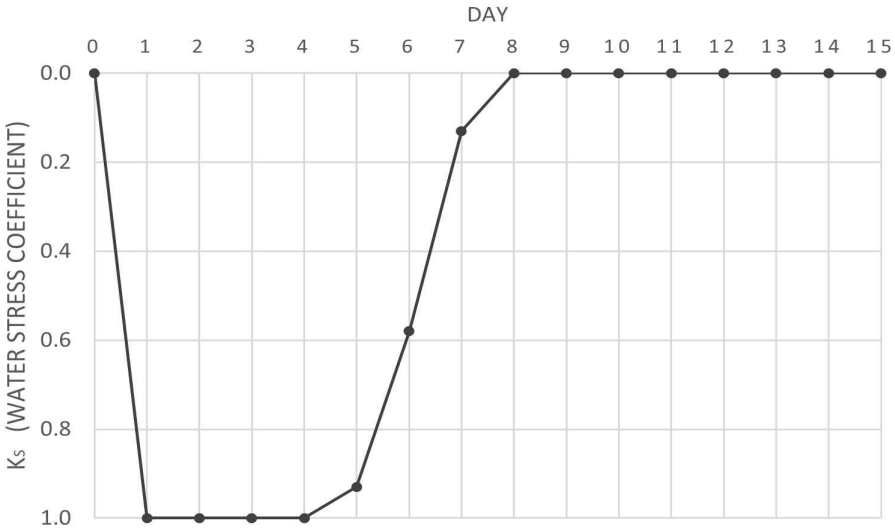


[Table 2.4.3] 자작나무(C4) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-5) 스트로브 잣나무 C_1

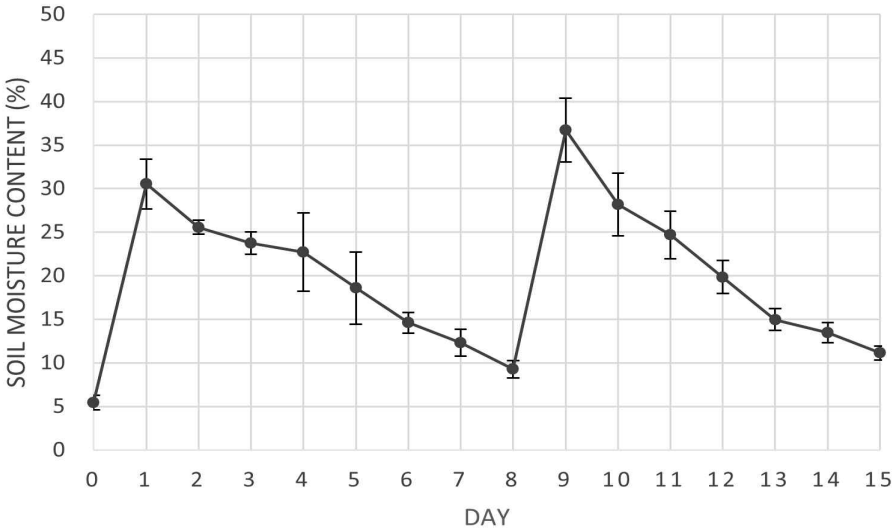


[Table 2.5.2] 스트로브 잣나무(C_1) 일별 함수율 변화 그래프

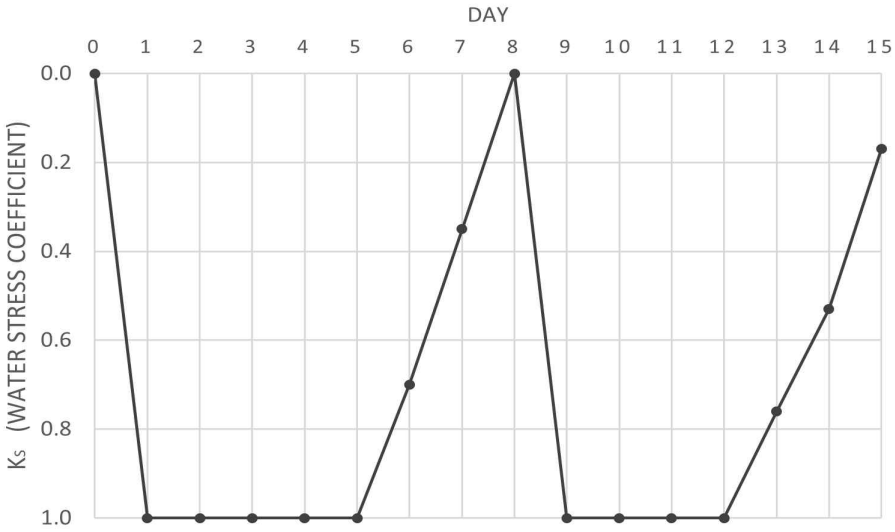


[Table 2.5.3] 스트로브 잣나무(C_1) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-6) 스트로브 잣나무 C2

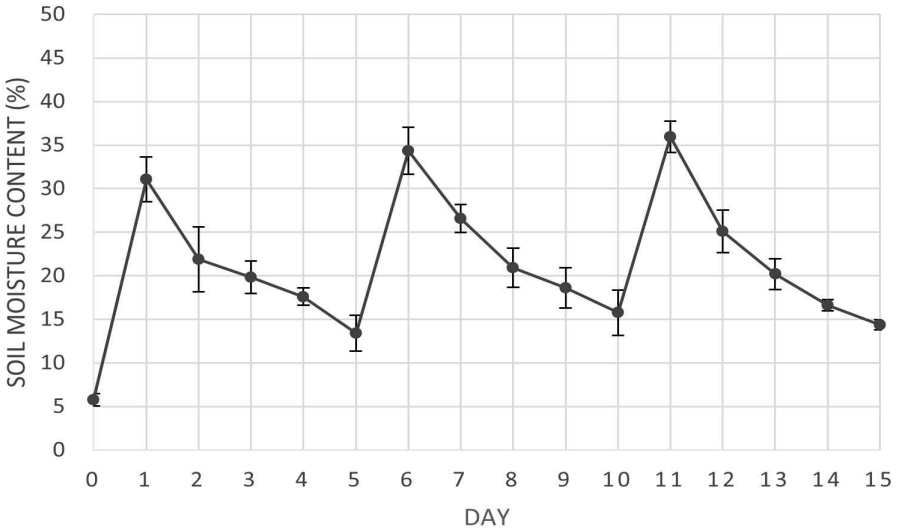


[Table 2.6.2] 스트로브 잣나무(C2) 일별 함수율 변화 그래프

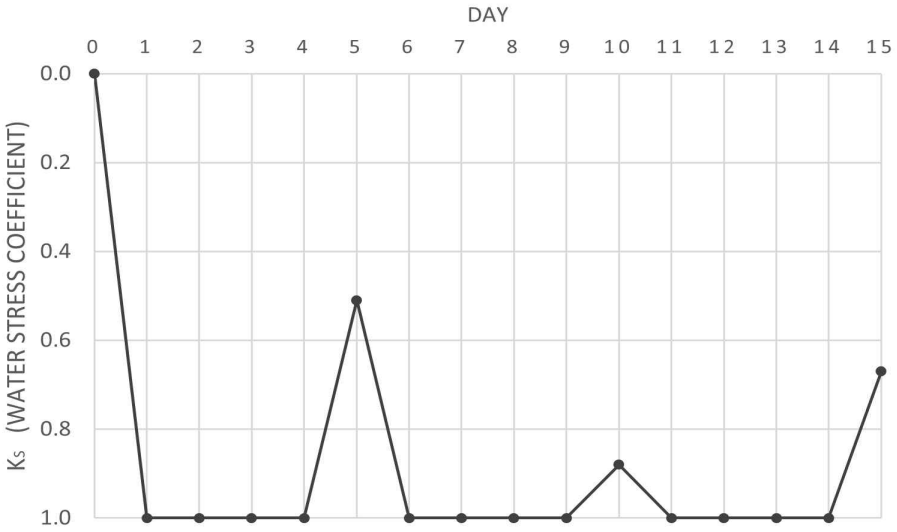


[Table 2.6.3] 스트로브 잣나무(C2) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-7) 스트로브 잣나무 C3

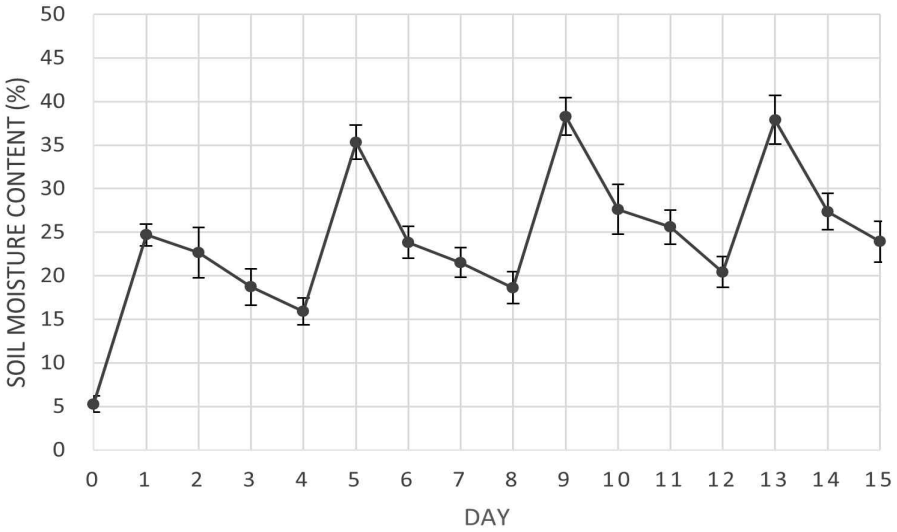


[Table 2.7.2] 스트로브 잣나무(C3) 일별 함수율 변화 그래프

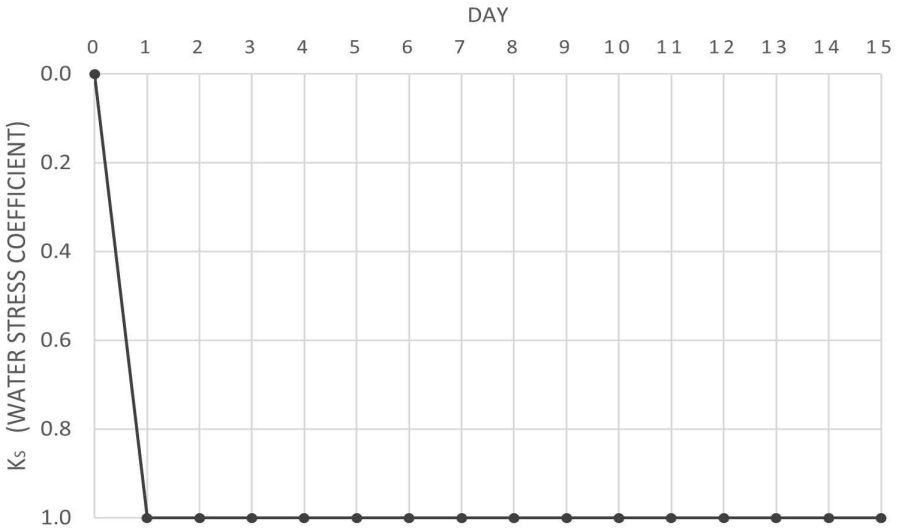


[Table 2.7.3] 스트로브 잣나무(C3) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

1-8) 스트로브 잣나무 C4



[Table 2.8.2] 스트로브 잣나무(C4) 일별 함수율 변화 그래프



[Table 2.8.3] 스트로브 잣나무(C4) 일별 토양수분 스트레스 지수 변화 그래프

계산된 토양수분 스트레스 지수를 $Day(K_S=1)$, $Day(K_S=0)$, $Day(K_S=0,1)$ 변화율로 계산하면 [표 9]와 같이 요약 및 정리할 수 있다.

[표 9] 토양수분 스트레스 지수 일별 정리표 (관수 빈도 증가)

실험구 (관수 빈도)	$Day(K_S=1)$	$Day(K_S=0)$
자작나무(C1)	5	8
자작나무(C2)	9	1
자작나무(C3)	12	0
자작나무(C4)	15	0
스트로브 잣나무(C1)	4	8
스트로브 잣나무(C2)	9	1
스트로브 잣나무(C3)	12	0
스트로브 잣나무(C4)	15	0
Day (K=0,1) 변화율	**237.5% 증가**	**100% 감소**

관수 용량 증가에 따른 실험구에서 $Day(K_S=1)$의 평균값은 9.75일이며, $Day(K_S=0)$의 평균값은 2.25일이다. 관수 빈도가 증가할수록 $Day(K_S=0)$의 값은 급격하게 감소하며, 3회 이상의 경우에는 0일로 나타났다. 따라서 관수 빈도가 증가할수록 토양수분 스트레스 지수는 급격히 낮아지며, 기준에 도달하면 토양수분 스트레스는 최소로 유지되는 것으로 나타났다. 또한 관수 빈도가 증가할수록 $Day(K_S=1)$ 변화율 또한 급격히 상승하며, $Day(K_S=0)$ 변화율은 100% 감소하는 모습을 확인했다.

3절. 관수 용량과 빈도 증가에 다른 변화 비교

1. Day (Ks=1) / Day (Ks=0) / Day (Ks=0,1) 변화율을 통한 비교

[표 10] 토양수분 스트레스 지수 일별 비교표

실험구 (관수 용량)	$Day(K_S=1)$		$Day(K_S=0)$	
	용량 증가 (Type A)	빈도 증가 (Type C)	용량 증가 (Type A)	빈도 증가 (Type C)
자작나무(1)	5	5	8	8
자작나무(2)	6	9	7	1
자작나무(3)	7	12	7	0
자작나무(4)	7	15	7	0
스트로브 잣나무(1)	4	4	8	8
스트로브 잣나무(2)	4	9	7	1
스트로브 잣나무(3)	6	12	6	0
스트로브 잣나무(4)	7	15	6	0
Day (K=0,1) 변화율	57.5% 증가	237.5% 증가	18.75% 감소	100% 감소

관수 용량과 빈도 증가에 따른 $Day(K_S=1)$을 비교해보면 관수 용량 증가 실험구의 경우에는 최대 7일이며 1회 관수 용량이 증가하여도 일수 변화가 크지 않은 반면, 관수 빈도 증가 실험구는 빈도가 증가할수록 일수가 크게 상승하며 심지어 실험 전체기간 동안 $Day(K_S=1)$을 유지하는 모습까지도 보였다.

관수 용량과 빈도 증가에 따른 $Day(K_S=0)$을 비교해봤을 시에도 관수 용량 증가 실험구의 경우에는 1회 관수 용량이 증가하여도 토양수분 스트레스가 최대인 일수는 크게 줄어들지 않는 반면에 관수 빈도 증가 실험구의 경우에는 빈도가 증가할수록 토양수분 스트레스가 최대인 일수 감소의 폭이 매우 크며 관수 횟수 3회 이상 실험구부터는 0일에 도달한다.

마지막으로 관수 용량과 빈도 증가에 따른 스트레스 $Day(K_S=0,1)$ 변화율을 비교해보면 관수 빈도 증가 실험구의 $Day(K_S=1)$ 변화율은 관수 용량 증가 실험구에 비해 약 4배 더 증가하였다. $Day(K_S=0)$ 변화율에서 보면 관수 용량 증가 실험구의 경우에는 단 18.75% 감소한 것에 반해, 빈도 증가 실험구에서는 100% 감소라는 결과를 보였다. 이는 재관수 주기가 짧을수록 관수 전에도 지속적으로 높은 토양 함수율을 유지하기 때문에 함수율이 감소하는 무강우 기간에도 토양수분 스트레스 저항력과 회복력이 높다고 해석할 수 있다.

제5장 결론

1절. 연구의 요약

본 연구에서는 기후변화로 인한 수목의 건조 피해에 대응하기 위해 관수 용량과 빈도의 증가 효과를 비교하고자 하였으며, 실제 실험을 통해 일별 함수율 변화를 측정하고 이를 토양수분 스트레스 지수로 도출하여 비교하였다. 토양수분 스트레스 지수는 $Day(K_S=1)$, $Day(K_S=0)$, $Day(K_S=0,1)$ 변화율을 계산하여 두 독립변수를 비교 및 검증하였다.

본 연구는 선행실험을 통해 본 실험의 연구 환경을 검증하였으며, 고온과 가뭄 환경 구현을 위해 온도와 수분이 통제되는 온실 환경을 설계하였다. 본 실험을 위한 대상 수목으로는 크기가 R05s (R10미만 (B8미만) 또는 R,B 규격이 없는 경우)의 자작나무 (Betula platyphylla)와 스트로브 잣나무 (Pinus strobus)를 선정하였다. 토양 재료는 양토이며, 각 실험구는 길이와 높이가 300mm인 정사각형의 플라스틱 포트를 활용하였다. 일별 함수율 변화 측정을 위해서는 정전용량 프로브 방법을 이용한 토양 수분 측정기를 활용하였다. 본 실험의 기준 관수량은 토양학에서 설명하는 토양 수분함량에 의한 관수량 산정식을 활용하여 5.60L/1회로 설정했다. 독립변수는 1회 관수 용량과 관수 빈도이며, 실험구는 각 독립변수에 따라 관수 용량에서는 F_C를 5%씩 증가시킨 5.60L/1회 (A_1), 6.25L/1회 (A_2), 7.87L/1회 (A_3), 9.00L/1회 (A_4)로 구분하였으며, 관수 빈도에서는 기준 관수량을 횟수로 나눈 5.60L/1회 (C_1), 2.80L/2회 (C_2), 1.87L/3회 (C_3), 1.40L/4회 (C_4)로 구분하였다. 각 실험구는 자작나무와 스트로브 잣나무 1주씩 구성되며, 중복된 기준 실험구를 포함하여 총 14개의 실험구로 진행했다.

관수 용량 증가에 따른 함수율 변화 결과로는 모든 실험구에서 관수 후 1일 차에 37% 이상의 토양 함수율을 나타냈지만, 이후 3일 내로 급격히 감소하며 유효 함수율 범위(10~23±2%) 내로 진입하였다. 이후 지속적인 감소세를 보였으며, 모든 실험구에서 9일 차 내에 유효 함수율 범위를 벗어나 영구 위조점(10±2%)에 도달하는 모습을 보였다. 따라서 15일간의 무강우 일수일 때, 9일 차부터는 모든 포트에서 강우시기까지 약 6일간 함수율이 영구 위조점을 유지한 상황과 같다.

이후 측정된 함수율을 활용하여 계산한 관수 용량 증가와 빈도 증가 실험구의 토양수분 스트레스 지수를 $Day(K_S=1)$, $Day(K_S=0)$, $Day(K_S=0,1)$ 변화율로 비교해보았다. 관수 용량과 빈도 증가에 따른 $Day(K_S=1)$을 비교해보면 관수 용량 증가 실험구의 경우에는 최대 7일이며 1회 관수 용량이 증가하여도 일수 변화가 크지 않은 반면에, 관수 빈도 증가 실험구는 빈도가 증가할수록 일수가 크게 증가하며 심지어 실험 전체기간 동안 $Day(K_S=1)$를 유지하는 모습까지도 보인다. 관수 용량과 빈도 증가에 따른 $Day(K_S=0)$을 비교해봤을 시에도 관수 용량 증가 실험구의 경우에는 1회 관수 용량이 증가하여도 토양수분 스트레스가 최대인 일수는 크게 줄어들지 않는 반면에, 관수 빈도 증가 실험구의 경우에는 빈도가 증가할수록 토양수분 스트레스가 최대인 일수 감소폭이 매우 크며 관수 횟수 3회 이상 실험구부터는 0일에 도달한다. 마지막으로 관수 용량과 빈도 증가에 따른 스트레스 $Day(K_S=0,1)$ 변화율을 비교해보면 관수 빈도 증가 실험구의 $Day(K_S=1)$ 변화율은 관수 용량 증가 실험구에 비해 약 4배 더 증가하였다. $Day(K_S=0)$ 변화율에서 보면 관수 용량 증가 실험구의 경우에는 단 18.75% 감소한 것에 반해, 빈도 증가 실험구에서는 100% 감소라는 결과를 보였다. 이는 재관수 주기가 짧을수록 관수 전에도 지속적으로 높은 토양 함수율을 유지하기 때문에 함수율이 감소하는 무강우 기간에도 토양수분 스트레스 저항력과 회복력이 높다고 해석할 수 있다.

토양수분 스트레스 지수 비교 결과를 분석해보면 관수 용량 증가 실험구에 비해 관수 빈도 증가 실험구에서 토양수분 스트레스를 최소로 받는 것으로 확인되며, 특히 무관수 기간에도 토양수분 스트레스 지수가 최소인 상태를 더 오래 유지하는 것으로 보아 관수 빈도 증가 실험구가 건조에 대한 저항력이 더 높다고 판단된다. 이에 따라 기후변화에 따른 수목의 건조 피해에 대응하기 위해서는 1회 관수 용량 증가가 아닌 관수량이 적더라도 관수 빈도 증가가 필요하며, 특히 가을철 등 15일 이상의 무강우 기간으로 인해 건조 피해가 예상될 시에는 최소 3회 이상의 빈도로 나누어 관수를 진행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

2절. 연구의 한계 및 시사점

본 연구에서는 고온과 가뭄 환경 구성을 위해 온도와 수분을 통제한 온실을 제작하여 진행하였으나, 추후 기후변화로 인해 변화한 외부 조경 공간을 정확히 모사하는 것에는 한계가 있었다. 본 연구에서 설정한 실험환경은 실제 식재 환경에서는 달라질 것이므로 세밀한 실험환경 설정을 위한 연구사례가 필요할 것으로 사료된다. 다양한 수종이 아닌 자작나무와 스트로브 잣나무 수종에 대해서만 실험을 진행했다는 것과 토양 환경 또한 다양한 성질의 토양을 활용하지 못한 점에 대해서도 한계가 있다. 낙엽수와 침엽수의 비교, 수목의 생장 혹은 적응 시기별 효과 비교 연구 등 세분화한 연구도 필요하다. 따라서 추후 실제 기후변화에 맞춰 세밀하게 조성된 실험환경에서 다양하고 세분화한 토양 및 수종 등을 활용한 관수 용량 및 빈도 증가 효과 비교 검증 연구가 필요할 것으로 본다.

본 연구는 고온과 가뭄에 의한 건조 피해에 대응하는 관수 용량과 빈도 증가의 효과 비교 연구를 진행하였으며, 측정된 일별 함수율을 활용한 토양수분 스트레스 지수를 도출하고 분석하여 건조 피해에 쉽게 노출되는 환경으로 변화할수록 1회 관수 용량보다는 관수의 빈도를 증가시키는 것이 훨씬 효과적이라는 사실을 실험을 통해 검증했다. 최근 국내외에서 연구가 활발히 진행되고 있는 스마트 자동관수 시스템 등의 도입 효율성에 대해 기초자료의 역할을 할 것으로 기대한다.

기후변화가 가속화되는 미래환경에서 조경 공간의 효율적인 관수에 관한 고민은 선택이 아닌 필수가 되어가고 있다. 조경 공간을 순간의 아름다움으로 꾸미는 것에 집중하기 보다는 은은한 아름다움을 지속해서 건강하게 유지하는 것 또한 우리가 마땅히 해야 할 역할일 것이다.

참고문헌

▌ 국내 문헌

(1) 학위논문

- 강성우. (2018). 도시 아파트단지 조경 공간을 활용한 그린인프라 체계 및 제도 구축 연구. 한양대학교 대학원.
- 김미선. (2011). 조경식재설계 도면의 문제점 및 개선방안: 설계 의도 전달 매체로써의 역할을 중심으로. 한양대학교 공학대학원.
- 김우식. (2014), 아파트 조경 변화에 따른 조경 수목 하자 경향 연구. 한양대학교 공과대학원.
- 김지연. (2019). 기후변화에 따른 조경수종의 기후 적합성 변화 예측. 서울대학교 대학원.
- 김효진. (2022). 관수량 조절에 따른 조경수목 생장 특성 및 평가. 건국대학교 대학원.
- 신용훈. (2018). 포화수분량을 고려한 토양 수분모의 및 밭작물 관개용수량 산정. 서울대학교 대학원.
- 이호금. (2010). 시방서 분류체계 비교 연구: 건축공사 표준시방서, 서울시 전문시방서 및 LH 공사 전문 시방서를 중심으로. 연세대학교 대학원.
- 정창화. (2020). 수목 식재 시기별 하자율 분석을 통한 최적 식재시기 도출 연구. 홍익대학교 스마트도시과학경영대학원.
- 홍민기. (2016). 고해상도 기상 모의 자료를 활용한 토양수분 모형의 개발과 적용. 서울대학교 대학원.

(2) 학술지

· 공우석, 이슬기, 박희나, 유정아. (2012). 기후변화에 따른 지자체의 생태계 취약성 평가. 한국기후변화학회지, 3(1), 51-69.

· 구경아, 박원규, 공우석. (2001). 한라산 구상나무의 연륜 연대학적 연구 : 기후변화에 따른 생장 변동 분석. 한국생태학회지, 24(5), 281-288.

· 김기복, 이종환, 남영현. (2001). 고주파 정전용량 탐침을 이용한 토양수분 측정. 한국농업기계학회 학술발표논문집, 267-272.

· 김길남, 한심희, 박관수. (2014). 온도 증가와 건조 스트레스에 따른 소나무 풍매차대묘의 가계간 생장, 광합성 및 광색소 함량 차이. 한국농림기상학회지, 16(4), 285-296.

· 김민영, 최용훈, 조정건, 윤석규, 박정훈, 김영진, 전종길, 이상봉. (2019). 관개 수준별 사과나무의 엽온 및 수분 스트레스 지수 변화 분석. 한국농공학회지, 61(5), 23-31.

· 김복영, 손용훈. (2014). BIM에 관한 조경 분야의 동향 및 LIM 활성화 방안. 한국조경학회지, 42(3), 50-63.

· 김상현, 김재준 (2018). 공동주택 하자보수 보증기간에 기초한 공종별 하자 위험 분석. 한국건설관리학회지, 19(4), 34-42.

· 김세진, 김문일, 임철희, 이우균, 김백조. (2017). 제한적인 기상자료 조건에서의 잠재증발산량 추정을 위한 FAO56 Penman-Monteith 방법의 적용성 분석: 안동댐 유역을 사례로. 한국기후변화학회지, 8(2), 125-143.

· 김영규, 유정아, 정은성. (2012). 기후변화에 따른 우리나라 물 관리의 취약성 평가. 한국기후변화학회지, 3(1), 1-12.

· 김정철 (2021). 공동주택 건설사업에서 조경 감리의 품질관리 현황과 개선방안 연구. 한국조경학회지, 49(1), 1~18.

· 권계정, 박봉주. (2017). 관수 주기에 따른 실내 녹화용 목본식물 4종의 초기 생육 반응. 한국조경학회지, 45(1), 28-34.

· 박상진, 조세환. (2015). 아파트단지 조경 공사비의 공종별 경년변화 특성 분석 : 공공기관 시행의 수도권 아파트단지를 중심으로. 한국조경학회지, 43(6), 150-159.
· 박상진, 조세환. (2016). 아파트단지 조경 요소별 입주민의 가치인지도 대비 공사비 측정의 상대적 적정성 분석. 한국조경학회지, 44(6), 177-187.
· 박종민. (2006). 절개지 토양에서 수분 조건과 근류균 접종이 등나무 유묘 생장에 미치는 영향. 한국환경생태학회지, 20(4), 425-435.
· 박진화, 이도형. (2020). 시비 처리에 따른 소나무의 내건성 반응 특성 연구. 농업생명과학연구지, 54(2), 48-58.
· 박재영, 조세환 (2014). 조경식재공사 설계변경 유형 및 변경 적합성에 대한 인식 분석. 한국조경학회지, 42(1), 18-26.
· 송우경, 이보라, 조낭현, 정성철, 김은숙, 임종환. (2020). 대기 중 온도 및 CO_2 농도 조절에 따른 건조 스트레스와 질소 시비가 소나무의 생장 및 생리적 특성에 미치는 영향. 한국농림기상학회지, 22(2), 57-67.
· 신용훈, 최진용, 이승재, 이성학. (2017). 고해상도 기상자료와 토양수분 모형을 이용한 고추의 관개량 산정. 한국농공학회논문집, 59(5), 31-40.
· 안소라, 박근애, 장철희, 김성준. (2013). SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 설마천 혼효림 유역의 증발산과 토양 수분에 미치는 영향 평가. 한국수자원학회지, 46(6), 569-583.
· 안웅산, 김대신, 윤영석, 고석형, 김권수, 조인숙. (2019). 한라산 구상나무 공간적 고사 패턴 분석을 통한 고사 원인 추정 : 기후변화에 따른 토양수분 과다 가능성 제안. 한국농림기상학회지, 21(1), 1-28.
· 오혜주, 윤상후. (2019). Inter-amount time 을 이용한 한반도 가뭄발생 위험성 평가. 한국데이터정보과학회지, 30(3), 563-571.
· 우경환, 심미옥, 박종일, 김민석, 서원세, 조현우, 권학철, 박종철, 이강노. (2016). 배롱나무의 항산화 활성 성분. 한국생약학회지, 47(3), 204-210.

· 유수진, 윤형권, 한승원, 김광진, 정나라. (2019). 아파트 조경 관리의 하자 저감을 위한 피드백 구조 분석. 시스템다이내믹스 연구, 20(3), 75-93.
· 유성녕, 박소현, 박청인, 김태진. (2015). 가로수의 이식 방법에 따른 수목 활착 평가. 한국조경학회지, 43(1), 132-138.
· 유주은, 이상석. (2013). 자연재해로 인한 조경수목 판례 및 제도분석 연구. 한국조경학회지, 41(4), 77~84.
· 유주은, 전진완, 이상석. (2013). 조경공사 표준 시방서 변화 특성과 개선 방향 연구: 식재공사를 중심으로. 한국조경학회지, 41(1), 60-70.
· 이상범, 김동찬, 최민정. (2012). 조경디자인과 시공의 불일치 유형에 관한 연구. 한국디자인문화학회지, 18(2), 32-41.
· 이수원, 조민석, 김길남. (2010). 관수 주기가 Eucalyptus pellita 와 Acacia mangium 용기묘의 광합성 및 생장에 미치는 영향. 한국산림과학회지, 99(3), 414-422.
· 이용준, 김기영, 이연길, 정재환, 최민하. (2020). 다양한 토양수분 측정 방법 소개와 발전 방향. 한국수자원학회지, 53(10), 126-134.
· 임종환, 우수영, 권미정, 천정화, 신준환. (2006). 한라산 구상나무 건전 개체와 쇠약 개체의 온도변화에 따른 광합성능력과 수분이용효율. 한국임학회지, 95(6), 705-710.
· 이주현, 김창주, 박민재, 신정수. (2012). 기후변화에 의한 한반도의 미래 가뭄발생 패턴 및 극한가뭄 전망. Water for future, 45(5), 39-45.
· 임병을, 박진영, 정용조. (2017). 공동주택 단지 내 고사 조경수목의 식재 특징 연구. 한국조경학회 학술발표논문집, Vol2017(1), 90-93.
· 전재홍, 김경하, 유재윤, 정용호, 정창기. (2005). 광릉 전나무인공림에서 수액 이동량, 토양수분장력 그리고 토양함수량의 변화와 상호작용. 한국산림과학회지, 94(6), 496-503.

· 정기열, 윤을수, 박창영, 황재복, 최영대, 박기도. (2011). 배수불량 경사지 논에서 배수 개선에 따른 콩의 수분 스트레스 반응해석. 한국토양비료학회지, 44(5), 702-708.
· 조민석, 이수원, 김재원. (2011). 관수 주기가 용기묘의 생리 및 생장 특성에 미치는 영향. 산림과학 공동학술발표논문집, 2011, 938-941.
· 차영근, 최규성, 송기선, 성환인, 김종진. (2017). 관수 수준에 따른 소나무 용기묘 1년생의 생장 특성. 시설원예· 식물공장, 26(3), 167-174.
· 최대규, 안재현, 조덕준, & 김상단. (2010). 토양수분 확률밀도함수로 살펴본 가뭄 발생에 대한 기후변화의 영향. 한국수자원학회논문집, 43(8), 709-720.
· 최수민, 신현철, 이광수, 정현종. (2012). 시설재배 시 상록활엽수의 적정 관수조건. 산림과학 공동학술발표논문집, 2012, 84-85.
· 최용훈, 김민영, 오우현, 조정건, 윤석규, 이상봉, 김영진, 전종길. (2019). 작물 수분 스트레스 지수 산정을 위한 최적의 관측 간격과 시간에 대한 통계적 분석. 한국농공학회지, 61(6), 73-79.
· 최용훈, 이상봉, 김민영, 김영진, 전종길, 박정훈. (2020). 엽온과 기온의 차이를 이용한 노지 과수의 작물 수분 스트레스 지수 산정 간편식 개발. 한국농공학회지, 62(5), 85-91.
· 허승오, 정강호, 박찬원, 하상건, 김정규. (2007). TDR, FDR 센서로 측정한 토양수분 함량의 정확성 검정. 한국수자원학회 학술발표회, 229-235.
· 허승오, 하상건, 김정규. (2009). 사양토에서의 용적 수분 함량 측정을 위한 TDR 및 FDR 센서의 검증. 한국토양비료학회지, 42(2), 110-116.
· 홍민기, 이상현, 최진용, 이성학, 이승재. (2015). WRF 기상자료의 토양수분 모형 적용을 통한 밭 토양수분 및 필요 수량 산정. 한국농공학회지, 57(6), 173~183.

(4) 보고서

· 교육부. (2022). NCS 국가직무능력표준 학습모듈<관수 및 기타 조경관리>.

· 김계훈. (2006). 토양학. 향문사.

· 김선미. (2013). ‘조경식재설계를 보는 시간’ 세미나 중 수목 생육 활성을 위한 식재 설계 방안. 한국조경학회 조경식재연구회 & 한국조경사회.

· 김선희. (2013). 광 및 수분 환경에 따른 주요 수종의 생장과 생리 반응 특성. 국립산림과학원.

· 김종열. (2011). 기획시리즈-조경수의 재배기술(배롱나무). 한국조경수협회.

· 윤은주, 송상훈, 임수현, 이경득. (2020). LH 조경공사 수행현황 및 개선방안 연구. 한국토지주택공사 토지주택연구원.

· 윤은주, 이은엽, 김미나, 김경모. (2020). 조경 수목 및 시설물 통합 유지관리시스템 마련 연구. 한국토지주택공사 토지주택연구원.

· 윤은주, 이은엽, 김미나, 오승봉, 이용주. (2017). 기후변화 대응 식재 환경 개선 기초 연구. 한국토지주택공사 토지주택연구원.

· 이경준. (2021). 수목생리학. 서울대학교 출판문화원.

· 이은엽, 윤은주, 김미나, 박병준. (2018). 조경 유지관리 최적화를 위한 관리기준 개선방안 연구. 한국토지주택공사 토지주택연구원.

· 조희래, 장용선, 정강호, 옥정훈, 황선아, 김동진, 이협성, 한경화, 김기선. (2020). 시설재배지 물 관리 기준 설정. 국립농업과학원.

· 황은경, 김수암, 채창우, 조동우, 이성욱, 문수영, 양현정, 윤요선. (2020). 주택품질 향상을 위한 공동주택 공사비 분석 및 관련 인증제도 통합방안 연구. 한국건설기술연구원.

(5) 웹페이지

· 국가건설기준센터 홈페이지. (2022). https://www.kcsc.re.kr/

· 국제연합식량농업기구 홈페이지. (2022). https://www.fao.org/home/en/

· 라펜트 홈페이지. (2022). https://www.lafent.com/

· 예스폼 서식사전 홈페이지. (2022). https://www.yesformdic.com/

· 한국 조경수협회 홈페이지. (2022). https://klta.or.kr:6016/

· 환경과 조경 홈페이지. (2022). https://lak.co.kr/

▌ 해외 문헌

· Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.

· Améglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F. A., Dayau, S., & Cruiziat, P. (1999). Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. Plant and Soil, 207(2), 155-167.

· Bodner, G., Loiskandl, W., & Kaul, H. P. (2007). Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. Agricultural water management, 93(3), 85-98.

· Gilman, E. F., Black, R. J., & Dehgan, B. (1998). Irrigation volume and frequency and tree size affect establishment rate. Journal of Arboriculture, 24, 1-9.

· Lawlor, D. W., & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. Plant, cell & environment, 25(2), 275-294.
· Raes, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellens, J., & Sahli, A. (2006). Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. Agricultural water management, 81(3), 335-357.
· Smith, M., Kivumbi, D., & Heng, L. K. (2002). Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. In Deficit irrigation practices.
· Koch, G. W., Sillett, S. C., Jennings, G. M., & Davis, S. D. (2004). The limits to tree height. Nature, 428(6985), 851-854.
· Vidal-Beaudet, L., Galopin, G., & Grosbellet, C. (2018). Effect of organic amendment for the construction of favourable urban soils for tree growth. European Journal of Horticultural Science, 83(3), 173-186.

Abstract

A Study on the Comparative Effect of Irrigation Capacity and Frequency for Maintaining Soil Moisture Content in response to Dry Damage of Plants

YOOK GIHWAN
Department of Landscape Architecture
Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

Currently, the rising temperature of the Korea and the lack of soil moisture due to drought have a great influence on the arid damage of plant. In particular, the evaporation of water from the soil has a direct effect on growth deterioration. Therefore, it is necessary to think about maintaining the soil moisture content in response to arid damage.

Therefore, in this study, to respond to the arid damage of plant due to climate change, the effect of increasing the irrigation capacity and frequency was compared and the direction of improvement of the plant irrigation method was considered. Through actual experiments, the daily moisture content change was measured and calculated as the soil moisture stress index. The soil moisture stress index was calculated as $Day(K_S = 1)$,

$Day(K_S = 0)$, $Day(K_S = 0,1)$ rate of change, and experimental plots for each independent variable were compared and verified. Prior to this experiment, the first preceding experiment was conducted to set up the experimental environment, and the exception variable control subjects obtained through the preceding experiment were identified. Afterwards, the purpose of this experiment was embodied by designing a greenhouse environment to realize a high temperature and drought environment, and conducting a second preceding experiment to establish a hypothesis.

Birch (*Betula platyphylla*) and strobe pine (*Pinus strobus*) were selected as the target trees for this experiment. The soil material was loam, and each experimental plot used a square plastic pot with a length and height of 300 mm. A soil moisture meter using the capacitance probe method was used to measure the daily moisture content change. The standard irrigation amount of this experiment was set at 5.60L/1 time using the irrigation calculation formula by soil moisture content explained in Soil Science. Independent variables were irrigation volume and irrigation frequency. The experimental group was divided into 5.60L/1 time (A_1), 6.25L/1 time (A_2), 7.87L/1 time (A_3), and 9.00L/1 time (A_4), which increased F_C by 5% in the irrigation capacity according to each independent variable. The frequency of irrigation was divided into 5.60L/1 time (C_1), 2.80L/2 time (C_2), 1.87L/3 time (C_3), and 1.40L/4 time (C_4) divided by the number of times. Each experimental group consisted of 1 birch and strobe pine, and a total of 14 experimental groups including overlapping standard experimental groups were conducted.

As a result of this study, when comparing the soil moisture stress indices, it was confirmed that the experimental plots with increased irrigation frequency received the least soil moisture stress compared to the

experimental plots with increased irrigation capacity. In particular, it is judged that the experimental plots with increased irrigation frequency have higher resistance to arid damage, considering that the minimum soil moisture stress index is maintained for a longer period even during the non-irrigated period. Accordingly, in order to respond to the arid damage of plant due to climate change, it is necessary to increase the frequency of irrigation even if the amount of irrigation is small, rather than increasing the irrigation capacity once. In particular, when arid damage is expected due to a period of no rainfall of more than 15 days, such as in autumn, it is judged that it is necessary to divide irrigation at least three times or more.

This study conducted a comparative study on the effect of increasing irrigation capacity and frequency in response to arid damage caused by high temperature and drought. By deriving and analyzing the soil moisture stress index using the measured daily water content, it was verified through experiments that increasing the frequency of irrigation is much more effective than one-time irrigation capacity as the environment changes to an environment easily exposed to arid damage. Therefore, it is expected that it will serve as basic data on the introduction efficiency of smart automatic irrigation systems, which have been actively researched.

▌ Keywords : Climate Change, Arid Damage, Soil Moisture, Irrigation Capacity, Irrigation Frequency

▌ Student Number : 2019-20026

부록

▌[부록 1] 실무자 대상 설문조사지 및 결과표

기후변화에 대응하는 관수법 개선 방향에 관한 전문가 설문조사지

안녕하십니까?
저는「기후변화에 대응하는 관수법 개선 방향」에 대해 연구를 수행하고 있습니다. 본 연구의 일환으로 기존 식재공사 시공 및 유지관리 방식에 대한 실무 전문가의 의견을 여쭙고자 합니다.

Q1. 실무 전문가 기본정보

DQ1. 귀하의 조경현장 실무 경력은 어떻게 되십니까?
(15년)

DQ2. 실제 조경 식재공사에 참여하면서 기후변화에 따른 식재환경 변화에 대해서 느낀적 있으십니까?
①예(100%) ②아니요

DQ3. 기후변화에 따른 수목의 건조 피해 하자문제를 경험해본 적이 있으십니까?
①예(100%) ②아니요

Q2. 기존 관수법

DQ1. 현장에서 주로 활용하는 관수법은 어떤 것입니까?
(1회성 물받이 관수(90%) / 관개관수 설치(10%))

DQ2. 1회 관수량은 어느 정도입니까?
①매우 충분히 준다(80%) ②충분히 준다(20%) ③적당히 준다 ④적게 준다 ⑤매우 적게 준다

DQ3. 식재공사 시 관수 횟수는 어느 정도입니까 (공사기간 내 기준)?
①0회(10%) ②1~2회(90%) ③3~4회 ④4회~5회 ⑤5회 이상

DQ4. 유지관리 시 관수 횟수는 어느 정도입니까 (1년 단위)?
①0회 ②1~2회(30%) ③3~4회(70%) ④4회~5회 ⑤5회 이상

DQ5. 15일 이상의 무강우 시에도 동일한 관수량 및 횟수를 유지하십니까?
①예(100%) ②아니요

DQ6. 현재 식재공사나 유지관리 시 관수량이나 횟수는 충분하다고 생각하십니까?
①예 ②아니요(100%)

DQ7. 만약 관수 빈도가 낮다고 생각했을 시에는 이유가 무엇이라 생각하십니까?
(인건비 부담 / 비용부담)

DQ8. 현재 조경 지침서 상의 관수법과 빈도를 지켜가며 이행하십니까?
①예(20%) ②아니요(80%)

DQ9. 지침서에 따라 이행되지 않는다면 그 이유는 무엇입니까?
(세부적이지 못한 내용)

Q3. 관수법의 변화

DQ1. 기후변화에 대응하기 위한 관수법의 변화는 어떤 것이 우선되어야 한다고 생각하십니까?
①관수량 증가(20%) ②관수빈도 증가(80%) ③기타( )

DQ2. 선택하신 관수법의 구체적인 변화 방법은 무엇입니까?
(관개관수 시스템 구축)

* 설문조사에 응해주셔서 감사합니다 *

▌ [부록 2] 본 실험 기록지 양식

실 험 일 지 (2022년 월 일 / 일차)

기온 (℉)		변환 (℃)	습도 (%)	
외부			외부	
내부			내부	

기준 실험값							
	포트 No.	실험조건	측정값(E)	측정값(W)	측정값(S)	측정값(N)	비고
자작나무	P1	5.60L / 1회					
스트로브잣나무	P1	5.60L / 1회					
용량에 따른 관수							
	포트 No.	실험조건	측정값(E)	측정값(W)	측정값(S)	측정값(N)	비고
자작나무	P2	6.25L / 1회					
	P3	7.87L / 1회					
	P4	9.00L / 1회					
스트로브잣나무	P2	6.25L / 1회					
	P3	7.87L / 1회					
	P4	9.00L / 1회					
주기에 따른 관수							
	포트 No.	실험조건	측정값(E)	측정값(W)	측정값(S)	측정값(N)	비고
자작나무	P2	2.80L / 2회					
	P3	1.87L / 3회					
	P4	1.40L / 4회					
스트로브잣나무	P2	2.80L / 2회					
	P3	1.87L / 3회					
	P4	1.40L / 4회					