

# 저관리형 옥상 녹화 시스템의 수분 변동 및 양분 이동

어양준\* · 김성기\* · 김동엽\*\* · 김동욱\*\*\* · 장성완\*\*\*

\*성균관대학교 대학원 조경학과 · \*\*성균관대학교 조경학과 · \*\*\*에코앤바이오(주)

## I. 서론

도시의 녹지 부족 현상은 우리나라를 포함하여 산업이 발달한 국가에서 발생하는 공통적이고도 고질적이며 현재까지도 지속적으로 대두되는 문제라고 할 수 있다. 녹지문제뿐 아니라 도심지의 온난화 현상으로 인한 지속적인 온도 상승도 문제가 되고 있으며, 서울시 평균 기온은 2020년에 현재보다 0.5℃ 상승할 것으로 예상된다(서울특별시 환경백서, 2005). 이러한 도시 환경 문제의 해결책으로 도시 지역에 다양한 녹지를 도입하려는 노력이 이루어지고 있으며, 국가적 사업으로 추진하고 있다(김귀곤, 2000). 국내 옥상 녹화에 관한 연구는 1990년대 후반부터 다양하고 세부적인 주제의 연구들이 꾸준히 증가하고 있으며 옥상 녹화의 식재 기반, 식생층, 구성 기법, 기상 요소에 따른 연구등 현재에도 여러 연구자들에 의해 다각적으로 활발하게 진행되고 있다.

우리나라의 기후는 온대온순기후에 속하는 특성을 나타내며 연강우량이 여름에 집중되는 현상이 나타난다. 옥상녹화시스템에서 식재모듈에 나타나는 수분변화와 함께 건조기간에 나타나는 토양 수분 변화는 옥상 녹화의 성패를 결정하는 중요한 요인이 된다. 국내에서도 이에 착안하여 경량형 옥상녹화시스템의 우수 유출저감효과에 관한 실험연구(김현수 외, 2001), 우수 유출량 및 수질에 미치는 영향 및 우수 이용의 활용 방안(한무영 외, 2003), 옥상녹화의 우수유출량 저감효과에 관한 연구(이동근 외, 2006) 등과 같이 기후조건과 옥상녹화의 관련성을 연구, 보고한 사례가 있었다. 이러한 연구들은 기존의 단열효과 측면에 국한되어 있던 옥상녹화의 장점에 대해 새로운 시각으로 접근하여 옥상 녹화에서 창출되는 부가적 효과에 대해 보다 과학적이고 실용적으로 그 활용성을 높이는데 기여한 연구라고 할 수 있다. 그러나 기후요소, 식재기반이나 식생층, 또는 특정한 현상등 단일적인 측면에 집중되어 있고 옥상

녹화의 각 구성요소들간의 유기적인 관계의 종합적인 고찰 및 연구가 부족하다고 판단된다.

따라서 본 연구는 저관리형 옥상 녹화 시스템에서 강우, 식물체 및 토양간의 수분의 변동 과정과 이에 수반된 각 요소내 양분의 양(量)적 변화를 살펴 구성 요소들간의 관계를 분석하고 이를 통해 저관리형 옥상 녹화 시스템의 연구 기반으로 활용하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 수분 변동

실험구는 성균관대학교 자연과학캠퍼스 생명공학관 옥상에 조성되었으며, 자동 기상 측정 장치(Watchdog, Spectrum technologies社)를 설치하여 2006년 7월부터 11월에 걸쳐 강우량 및 기후 조건들을 측정하였다. 시간당 중량 변화를 기록할 수 있도록 제작된 기기인 야외용 저울과 중량을 시간별로 측정하는 자동 측정기를(CI- 5010A Indicator, CAS社) 이용하여 식재용 모듈내 토양에 흡수된 강우가 증발되면서 나타나는 모듈의 중량변화를 측정하였다. 실험에 사용된 모듈은 (주)에코앤바이오의 옥상 녹화용 모듈 (Ecotop, Ep-16, 50cm×50cm×10cm)을 사용하였으며 토양은 펄라이트와 혼합 유기물의 혼합 토양을 이용하였다. 펄라이트와 혼합 유기물의 배합 비율을 각각 7:0, 7:0.5, 7:1, 7:2, 7:3으로 구분하여 5개를 설치하고 7:2로 혼합된 것을 토심별(5cm, 10cm, 15cm, 20cm)로 구분하여 4개를 설치하여 총 9개의 식재모듈을 설치하였다. 식물은 자생초화류중 두메부추를 선정하여 1개의 모듈내에 9주씩 식재하였다. 측정된 식재 모듈의 중량과 강우량 및 토양 유출 수량을 비교하여 우수 저감 효과를 산출하였다.

### 2. 양분 이동

강우 이후 식재용 모듈 내 토양으로부터 나오는 유출수를 채취하기 위한 장치를 설치하여 강우 시마다 유출수의 양을 측정하였고 분석을 위하여 시료를 채취하고 강우시료를 분석하기 위하여 우수채취 장치를 3 반복으로 설치하여 강우시마다 수분 시료를 채취하였다. 또한 식재 초기와 식물 성장후의 각각 토양과 식물체의 시료를 채취하고 강우수, 토양 유출수, 토양 및 식물체의 성분을 분석하여 옥상 녹화 시스템의 양분 함량 변화를 분석하였다. 실험에 사용된 식재 모듈내 토양 및 식물은 수분 변동 실험과 동일하게 구성하였다.

채취된 각 요소별 시료들은 냉동 보관후 서울대학교 농업과학공동기기센터에서 N, P, K, Ca, Mg 성분을 분석하였다. 전질소는 단백질/질소 자동 분석기(Kjeltec auto 1035/1038 System, Tecator AB, Sweden)를 이용하여 micro Kjeldahl법으로 분석하였고, 총인은 유도결합플라즈마가 (ICP) 장착된 Optical Emission Spectrometer를 이용하여 정량하였다. 수분 시료의 Ca, Mg, K 농도는 유도결합 플라즈마 발광광도기(ICPS-1000 IV, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 수분 변동

식재 모듈에 수분이 포화하고 시간이 경과할 수록 수분변화는 토심별로 약간의 차이를 보였다(그림 1 참조). 강우가 시작되고 각 모듈이 포화된 후부터 강우가

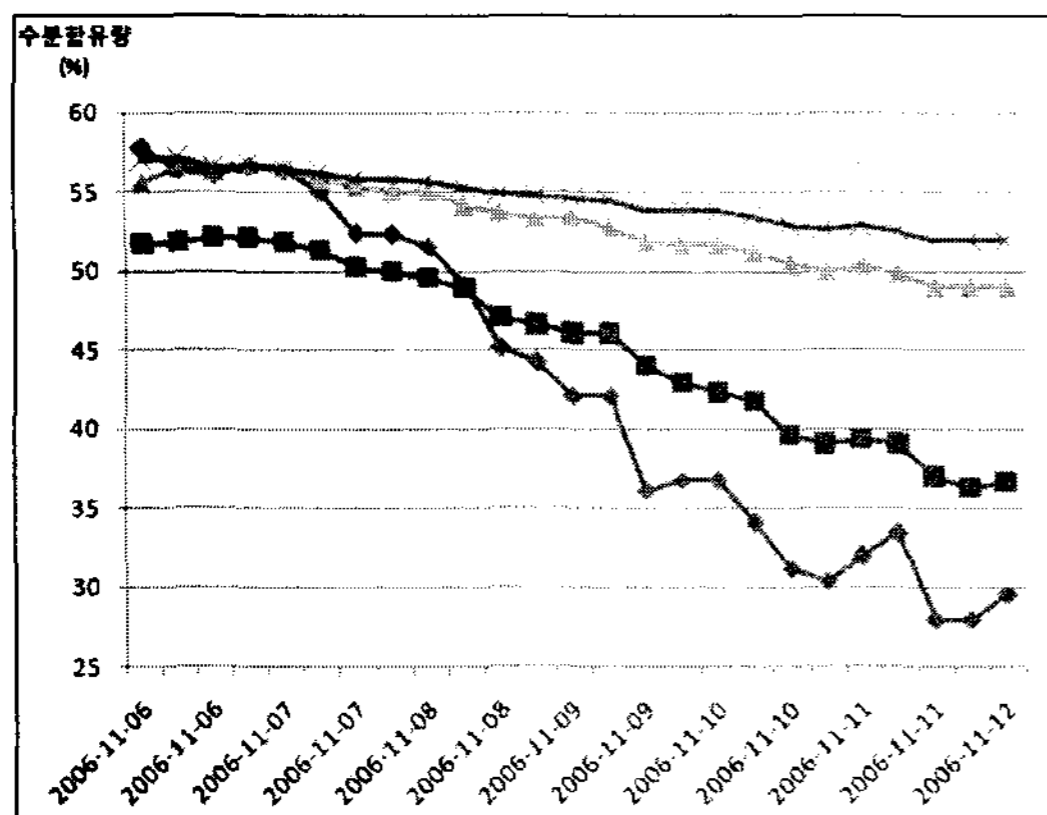


그림 1. 토심별 수분 함량 변화 (%)

범례: —●— 토심5cm —■— 토심10cm —◇— 토심15cm —○— 토심20cm

그치고 수분이 증발 될 때까지 토양내 수분 변화는 토심에 비례하여 변동 폭이 각각 달랐으며 이는 토심의 차이에 따른 수분 용적량에 따른 차이인 것으로 판단된다(표 1 참조). 강우 종료 이후 중력에 의해 수분이 유출된 이후 모듈내 유효 수분의 함유량은 토심에 따라 변화량이 폭이 각각 다른 것으로 나타났다. 토심 5cm는 시간당 약 0.18%, 토심 10cm는 0.1%, 토심 15cm는 0.056%, 토심 20cm는 0.035% 이 감소되는 것으로 측정되어 토심이 얇을수록 유효 수분의 지속 시간이 느리다는 결과를 보였다.

이는 토심이 얇을수록 토양의 수분 용적량이 적으므로 수분 함유량과 유효 수분의 지속시간이 보다 적다는 것을 보여준다. 단, 토양의 양이나 기후 조건에 따라 지속 시간은 변동되어 나타낼 수 있다.

강우 유입량과 모듈에서 배출되는 유출량을 통해 토심에 따른 우수 저감 효과를 산출하였다(그림 2 참조). 유출수는 강우 형태에 따라 우수 저감률이 다른 것으로 나타났다. 장마 기간에는 우수 저감률이 20~50%로 나

표 1. 토심별 토양 수분 함유 능력

구분	5cm	10cm	15cm	20cm
토양 용적 (g/cm <sup>3</sup> )	0.22	0.22	0.22	0.22
토양 최대 부피 (m <sup>3</sup> )	0.0077	0.0202	0.033	0.045
토양 최대 중량 (kg)	1.7	4.4	7.1	9.9
최대 수분 함유량 (g/cm <sup>3</sup> )	0.72	0.72	0.72	0.72
최대 수분 용적량 (kg)	5.54	14.54	23.54	32.54

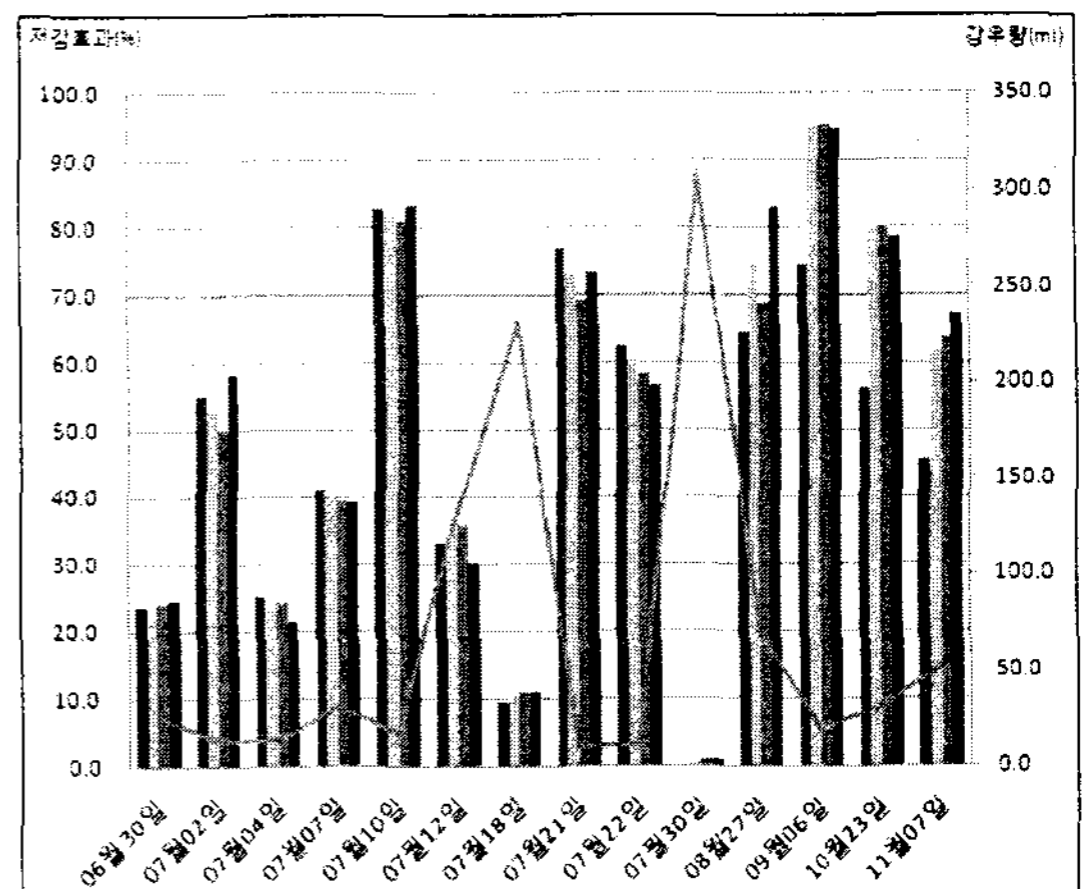


그림 2. 토심별 우수 저감 효과

범례: —■— 토심5cm —◇— 토심10cm —■— 토심15cm —■— 토심20cm —○— 강우량

타났고 비장마기간에는 60~90%의 값을 보였다. 장마 기간중 집중 호우가 내린 7월 18일과 30일에는 10% 이하의 낮은 우수 저감률을 보였다. 이는 장마 기간에는 단시간 동안 우수가 집중적으로 유입이 되어 토양에 저장되기 전에 유출수로 다량의 수분이 배출되고, 비장마 기간에는 토양에서 배출되는 시간이 보다 지속적이기 때문인 것으로 판단된다.

모들의 토심에 따른 우수 저감 효과는 장마 기간 중에는 강우량의 다소와는 상관없이 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 장마 이후의 우수 저감률은 토심 5cm에서 53.8%, 토심 10cm에서 73.8%, 토심 15cm에서 72.3%, 토심 20cm에서 78.6%로 나타났으며 토심 5cm의 우수 저감률이 다른 토심의 우수 저감률보다 낮은 것으로 나타났다. 이 또한 토심에 따른 수분 용적량의 차이인 것으로 판단된다. 실험 기간의 전체 우수 저감률을 산출한 결과 토심 5cm에서 23.2%, 토심 10cm에서 26.1%, 토심 15cm에서 26.2%, 토심 20cm에서 26.7%를 보였다. 이는 장마기간에 유입되는 높은 강우량 때문인 것으로 판단된다.

## 2. 양분 이동

양분은 총 5가지 항목을 분석하였으며 각 유기물 함량비별로 각각 다른 결과가 나타났다(표 2). 강우시 유입되는 양분의 양은 많지 않았고 토양의 잔류 양분이 많았으며 유출수의 양분량은 유입량보다 수배~수십배 이상 큰 것으로 나타났다. Total N, Total P의 경우에는 가용성 N,P까지 전부 포함되어 측정되었기 때문에 다른 가용성 양분들(Mg,K,Ca)보다 토양에 포함되어 있는 양이 유출량이나 식물체의 양분량보다 많은 경향을 보였으며, 가용성 양분들의 경우에는 지속적으로 토양 내에서 분해가 이루어져 토양 외부로 유출되기 때문에 토양내 잔류량보다 유출량이 큰 값을 보인 것으로 판단된다. Ca의 경우 타 가용성 양분보다 양이 많은 것으로 측정되었는데, 이는 토양에 첨가된 혼합 유기물이 원인인 것으로 추정된다. 전체적으로 유기물 함량 비율이 적을수록 토양의 잔류 양분과 유출되는 양분의 양이 적었으며 유기물 함량비가 높은 경우에는 큰 것으로 나타났다.

토양유출수의 양분 농도는 주로 유기물 혼합 비율에 따른 차이가 나타났다(그림 4 참조). 전체적으로 유기물 함

표 2. 단위 면적당 양분 변화 (단위: g/m<sup>3</sup>)

양분	구분	강우 유입	토양	식물	토양 유출수
Total N	함량비 7:0	0.39	2.71	0.43	0.27
	함량비 7:0.5	0.39	16.29	0.87	0.45
	함량비 7:1	0.39	27.17	1.27	0.75
	함량비 7:2	0.39	41.44	2.04	1.14
	함량비 7:3	0.39	51.94	2.44	1.32
Total P	함량비 7:0	0.01	0.25	0.11	0.01
	함량비 7:0.5	0.01	4.34	0.22	0.07
	함량비 7:1	0.01	10.83	0.30	0.09
	함량비 7:2	0.01	14.44	0.46	0.10
	함량비 7:3	0.01	17.56	0.58	0.13
Mg	함량비 7:0	0.03	0.27	0.09	0.38
	함량비 7:0.5	0.03	0.73	0.10	1.08
	함량비 7:1	0.03	1.00	0.14	1.62
	함량비 7:2	0.03	1.07	0.23	2.28
	함량비 7:3	0.03	1.18	0.26	3.14
K	함량비 7:0	0.08	0.78	0.64	0.46
	함량비 7:0.5	0.08	1.75	0.73	1.74
	함량비 7:1	0.08	2.12	0.91	4.09
	함량비 7:2	0.08	2.68	1.51	8.31
	함량비 7:3	0.08	2.92	1.85	13.68
Ca	함량비 7:0	0.17	1.13	0.23	2.03
	함량비 7:0.5	0.17	47.83	0.72	12.15
	함량비 7:1	0.17	51.66	1.05	14.00
	함량비 7:2	0.17	59.33	1.70	15.10
	함량비 7:3	0.17	61.53	2.10	18.94

량이 많을수록 유출수의 양분 농도가 증가하는 경향을 보였다. 양분 농도는 펄라이트:유기물의 비율이 7:3인 토양에서 가장 높았고, 7:0.5부터 7:2까지의 토양은 차이가 많이 나타나지 않았으며, 7:0 토양에서는 아주 낮은 값을 나타냈다. 유기물 함량이 7:3인 토양은 장마 이후에 K를 제외한 대부분의 양분 농도가 다시 증가했고, 이후에도 높은 값을 나타냈다. 이것은 유기물함량이 7:3인 경우 유기물의 양이 과다하여 분해된 양분이 식물에 흡수되지 못하고 강우가 유출될때 유출수에 포함

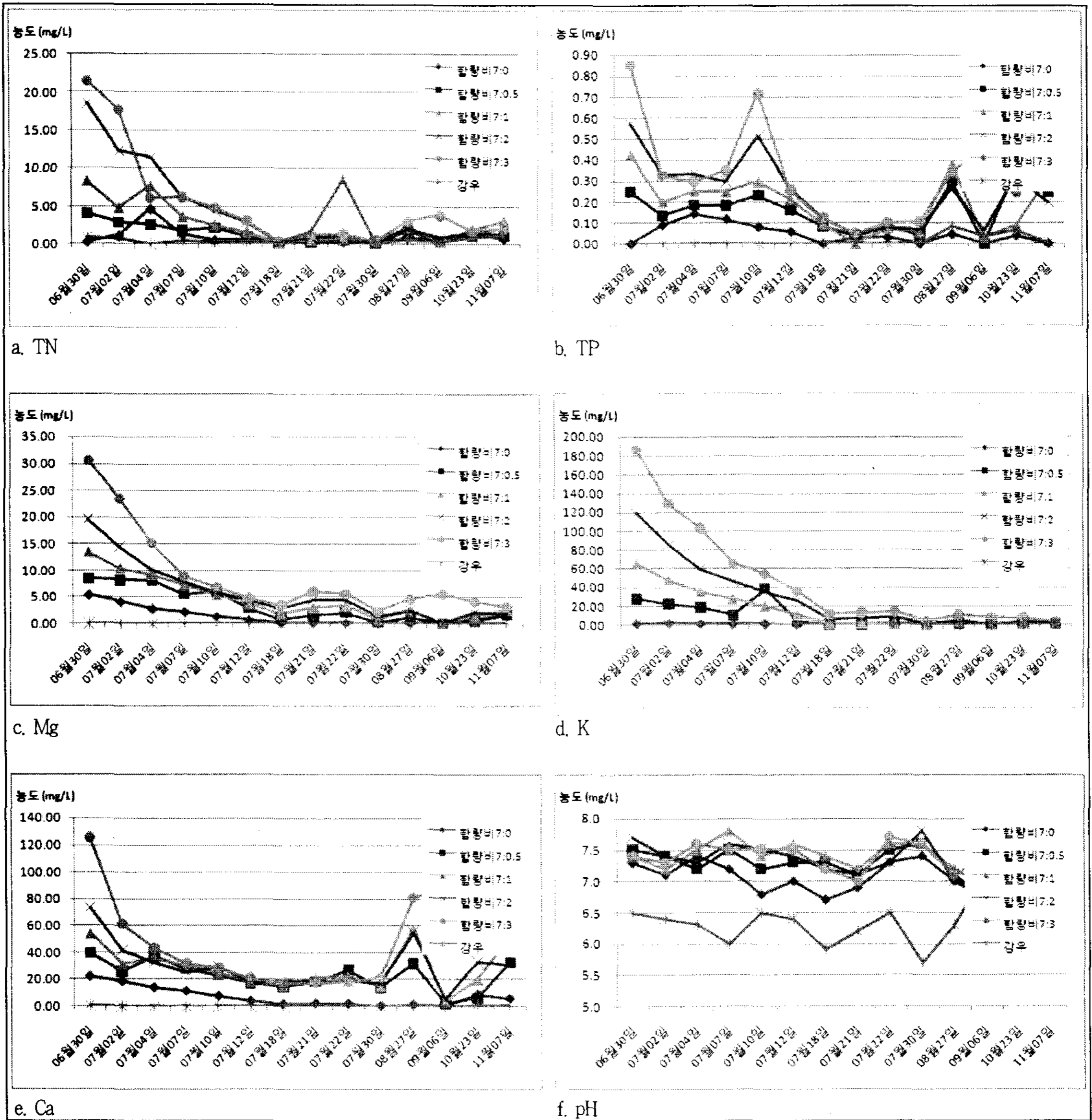


그림 3. 유기물 함량 비별 토양 유출수의 양분, pH 농도 추이(기간: 2006년 6월 30일~11월7일)

되어 양분 농도를 증가시키는 결과를 가져온 것으로 판단된다. 각 토양의 pH는 약산성을 띠는 강우의 5.7~6.7보다 높으며 대체적으로 7.0~8.0의 값으로 나타났다.

#### IV. 결론

저관리형 옥상 녹화 시스템에서 토심별로 각 모듈의 수분들이 일정시간동안 기후 조건에 따라 유입되고 유출되는 양을 측정하여 모듈내 토양의 유효 수분의 지속

시간이 토심별로 각각 0.18~0.035%/kg까지 차이가 나타났으며 토심이 적을수록 지속 시간이 느리다는 결과를 보여주었다. 옥상 녹화의 우수 저감률은 보통 강우량의 50~90%인 것으로 보고되고 있는데, 본 연구에서는 장마 기간에는 이보다 낮은 20~50%을, 비장마 기간에는 비교적 높은 60~90%의 우수 저감률을 나타냈다. 따라서 옥상 녹화 시스템 조성시에는 일정 깊이 이상 토심을 유지해 주어야만 하며 만약 토심이 얇을 경우에는 증발이 용이한 기후 조건하에서 식물에게 일정

시간 수분이 공급되지 않는다면 수분 스트레스를 유발하여 식물 생장에 악영향을 끼칠 가능성이 높고 강우시 우수 저감 효과도 크게 기대할 수 없다고 판단된다.

또한 양분 이동 실험에서는 전체적으로 토양 유출수의 양분 농도가 유기물 함량이 많을수록 증가하는 경향을 보였다. 각 토심별, 유기물 함량비별의 양분들이 토심이 얇거나 적은 유기물 함량비에서는 식물 생장이 원활하지 못하였으며 유기물 함량비가 7:3인 토양의 경우에는 토양 유출수로 인한 가용되지 못한 잔여 양분이 함량비 7:2의 토양보다 대체적으로 2배 이상 유출되는 것으로 나타났다. 이후 토양 유출수의 양분 농도의 변화를 계속 관찰할 필요가 있으며, 사용되지 못하고 유출되는 양분 농도 감소를 위해 혼합되는 유기물의 양을 조절하는 등의 다양한 방안을 고려해야 할 것으로 판단된다.

본 연구를 바탕으로 저관리형 옥상 녹화 시스템 조

성시 인공 토양의 토심 및 유기물 함량을 조절하여 적절한 식재 기반을 마련해준다면 원활한 옥상 녹화 시스템의 운용이 가능하며 옥상 녹화로 인한 환경 개선 효과 또한 기대할 수 있을 것이다.

## 인용문헌

1. 김귀곤, 조동길(2000) 생물다양성 증진을 위한 옥상 소생태계 조성기술에 관한 이론적 고찰 및 사례적용연구. 한국환경복원녹화기술학회지, 3(1): 39-52.
2. 김현수, 강재식(2001) 경량형 옥상녹화시스템의 우수 유출 저감효과에 관한 실험연구. 대한건축학회논문집 152: 161-168.
3. 서울특별시(2005) 서울의 환경 :환경백서. 서울특별시 환경국 환경과, p. 57.
4. 이동근, 오승환, 윤소원, 장성완(2006) 옥상녹화의 우수유출량 저감효과에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지, 9(6): 117-122.
5. 한무영, 김준규, 박상철(2003) 장마기간 동안의 옥상녹화를 통한 빗물의 수량 및 수질 특성. 대한상하수도학회 2003년도 공동추계 학술 발표회 논문집, pp. 53-56.