

해설

도심지 가로수 식재를 위한 토양구조의 구성

김 석 진 · M. Krieter · 정 재 춘* · 정 형 근*

독일 브레멘대학교 환경생태학 및 지질환경학과

*연세대학교 보건과학대학 환경과학과

(1994년 9월 28일 접수)

Evaluation of Soil Structure for Planting Street Tree in Urban Area

Seak-Jin Kim, M. Krieter, Jae-Chun Chung* and Hyung-Keun Chung*

Institute of Ecosystem Research and Soil Science

FVG M 0160 Bremen University, F. R. Germany

**Dept. of Environmental Science, College of Health Science*

Yonsei University, 222-701, Korea

(Manuscript received 28 September 1994)

1. 서론

도심지의 가로수들은 우리에게 쾌적한 환경을 제공해 주고 주거지 녹지 조성에도 크게 이바지하고 있으나, 자연적인 환경 조건이 아닌 도심지의 악조건에서 성장하기 때문에 그들의 생육과 수명에 위협을 주는 많은 스트레스 요인들에 의해 시달리고 있다. 이러한 가로수들의 정상적인 성장을 위해서는 주 역할을 담당하는 토양 구조의 개선이 우선적으로 이루어져야 한다. 자연 환경의 심한 오염으로 삼림뿐만 아니라 도시림과 가로수들도 많은 피해를 입고 있는데, 도시림과 가로수들은 삼림에 비해 피해가 더 큰 것이 현 실정이다. 1989년 전독일 연방국의 조경 관리 연구소(GALK) 대표자들은 도심지 가로수 피해 복구 대책 회의에서 가로수의 1/3 만이 정상이고 나머지 2/3는 병이 들었거나 심한 피해를 받고 있다고 발표하였다(병든 나무 중 1/2은 중병). 도시림과 가로수가 삼림에 비해 성장률 저하 현상이 뚜렷한

것은 고온 건조한 도시 기후, 오염 물질의 방출, 토양 표면의 포장과 토양의 높은 경도에 의한 수분과 산소의 부족 등에 기인한다(Meyer, 1982; Ulrich and Matzner, 1983).

도시림과 가로수가 우리의 복지 안녕에 주는 영향은 매우 다양하다. 이들은 먼지 여과와 소음 저하의 기능을 하고, 풍속을 감속시키며, 공기의 건조 현상과 지면의 다량 유수 현상을 방지하고, 아울러 미학적인 기능으로 우리의 정신 생활을 풍요롭게 한다. 그러므로 도시의 환경 개선과 주거지의 녹지 조성을 위해 이들이 차지하는 비중은 매우 중요하다. 오래되고 피해를 받은 수목과 재활의 기회가 적은 새로 식재한 수목들은 환경 생태학적 문제를 야기하는 것 이외에 경제학적인 면에서도 큰 손해를 가져다준다. 예를 들면, 30년생 도심지 가로수 한 그루의 물질적 가치는 약 7,500,000원에 달한다(나무 가격, 관리 비용과 이자 포함). 도시림과 가로수의 성장을 보호하고, 그 기능의 활성화를 돕는 것은 생태학적인 면과 경제

학적인 면에서 모두 중요한 일이다. 따라서, 이런 귀중한 자연적인 재산을 어떤 방법으로 보전할 수 있는지가 최근 중요한 문제로 대두되고 있다. 그럼에도 불구하고, 현재 유럽에서는 도시림과 가로수의 보호와 보전을 위해 임시 방편적인 간단한 치료 정도를 할 뿐이다. 이러한 단기적인 치료 방법으로는 도시림과 가로수의 피해 원인을 근본적으로 해결할 수 없음을 물론이다(Leh, 1991).

도시림과 가로수에 피해를 주는 여러 가지 스트레스는 장기간의 노력을 통해서만 효과적으로 해소시킬 수가 있다. 토양은 산소와 물 그리고 영양 염류를 나무에게 원활히 공급하며, 또 나무 뿌리가 왕성한 성장을 하도록 하는 매개체 역할을 담당한다. 조경 관리 연구자들도 토양이 나무 전체의 발육에 가장 중요한 역할을 담당하고 있음을 확신하고 있다. 특히, 새로운 가로수를 식재할 때 우선적으로 고려되어야 할 사항들은 나무를 심는 구덩이의 구조 상태, 토양 합성 물질, 토양층 구조의 선택 등으로, 장기적이고 효과적인 방법이 전제되어야 나무의 정상적인 성장 발육을 보장할 수 있다(Liesecke, 1991).

독일의 경우, 1980년 중반까지 조경 관리 연구소에는 가로수 토양의 상태 개선과 배식 기능의 효율을 극대화하기 위한 학문적인 연구 자료가 거의 없었다. 이에 1987년 독일 14개 도시(Aschffenburg, Bremen, Darmstadt, Düren, EBlingen, Frankfurt/Main, Kalsruhe, Mainz, Mannheim, Marl, München, Stuttgart, Wiesbaden and Wolfsburg)의 조경 개발 계획 연구소(FLL)와 녹지 관리 연구소는 직접 조경 식재에 응용할 수 있는 학문적인 전문 지식과 방법론을 체계화하기 위한 공동 연구에 합의하였다(Schroeder, 1991). 공동 연구가 진행되는 동안 학자들과 조경 관리 연구자들 사이에 긴밀한 협조가 이루어졌으며, 학문적인 연구 실험과 조경 관리 연구소의 실제 경험을 바탕으로 하여 미래의 새로운 도시림과 가로수 식재를 위한 새로운 방법을 모색하였다.

본 총설에서는 도시의 가로수들의 성장에 적절한 토양의 성분 및 구조에 관하여 실증적인 예를 들어 논의하고, 효율적인 식재 방법 및 그 관리에 대한 유용한 정보를 제공하고자 한다. 특히, 독일

에서 새로이 시범적으로 수행된 식재법을 전통적으로 널리 쓰이고 있는 식재법과 비교·평가하여, 가로수가 올바르게 성장하기 위한 가장 기본적인 서도 핵심적인 토양의 인자들을 살펴보고자 한다.

2. 수목 식재 방법의 평가

현재, 독일의 조경 관리 연구소가 적용하고 있는 수목 식재 방법에 대한 적합성 여부는 나무 성장에 알맞는 토양 성분과 토양 구조의 선택에 따라 판단된다. 새로운 가로수를 식재할 때 많이 적용되는 식재 방법은 “이중 토양 구조” 방법이다. 이 방법은 나무 식재 구덩이의 형태를 가로 1.5 m, 세로 1.5 m, 깊이 1 m의 크기로 작게 파내기 때문에, 식재 구덩이의 심층은 부식질과 광물질의 함량이 낮은 토양 물질(주로 모래와 점토)로 채워지게 된다. 어린 가로수를 새로 식재한 후, 유기 혼합물, 즉 부식질 함량이 약 4-10%인 퇴비를 식재 구덩이에 채우게 되면 토양 상층부의 부식질의 평균 두께는 약 50 cm에 달한다. 이와 같이 과량의 유기 물질을 식재 구덩이의 상층부에 시비하는 방법은 유기 물질의 순환이 잘 되고 부식질이 풍부한 삼림 토양을 근거로 수행되고 있다. 그러나 삼림 지역과 도심 지역은 토양의 조건이 서로 다르므로, 철저한 분석과 비교를 통해 토양 구조의 개선 방안을 마련해야 한다.

2.1 삼림 지역과 도심 지역에 대한 수목 성장지로서의 비교

삼림 지역과 도시 지역은 환경 생태학적인 면에서 볼 때, 영양 염류의 유입, 토양의 특수성, 그리고 토양의 생성 과정이 근본적으로 큰 차이가 있다(표 1). 삼림 지역에서는 대체로 삼림의 수관(canopy)에 의해 태양 광선이 차단되어 삼림 내부의 토양 표면이 쉽게 가열되는 것을 막아 준다. 도심지 가로수 토양은 삼림 토양보다 훨씬 더 많은 태양열을 받게 되는데, 그 이유는 가로수들이 개별적으로 식재되어 있기 때문에 직사 광선을 피

Table 1. Ecological charactersits of forest and urban tree locations

		FOREST	URBAN
Litter	[g/m ² ·yr]	300	< 10
Organic matter(soil)	[%]	3 - 10	> 1
Mineralization rate(actual)	[mg · m ² ·h]	100-400	< 10
Biogenic acid production	[kmol · ha ⁻¹ · y ⁻¹]	~ 1	< 0.01
Base leaching		high	very low
pH value	[H ₂ O]	5.0-6.0	7.5-9.0
Buffer range		Silicate buffer	Carbonate buffer
Ca ⁴² -coating(CEC _{eff})	[%]	< 35 ² (< 5) ³	> 90
Al ¹³ -coating(CEC _{eff})	[%]	< 50 ² (> 90) ³	< 5

¹the amount is expressed as CO₂

²in unloaded forest soils

³in forest soils acidified by air pollutants

할 수 없고, 대도시에서 전형적으로 나타나는 높은 확산 광선(예, 건물벽의 반사 광선)이 직접 지표면에 흡수되기 때문이다. 표층토의 기온은 토양 미생물의 활동 상태와 유기물이 분해되는 속도에 큰 영향을 준다. 또, 도심지 토양의 경우 잦은 도로 청소와 바람에 의해 유기물이 감소된다. 이와 같이, 삼림 토양과 도심지 토양은 서로 다른 조건에 있다. 활엽수림지에서 유기물(낙엽, 나뭇가지 등)이 토양에 유입되는 양은 연간 약 300-400 g·m⁻²인 것에 비해, 도심지 가로수 토양에서는 연간 약 10 g·m⁻² 정도가 유입될 뿐이다. 삼림 지역에서는 A₁-수평층의 유기물 함량이 약 2-8%에 달하는 것에 대하여, 도심지 가로수의 토양에서는 퇴비나 비료를 유입하지 않을 경우 유기물 함량은 대개 약 1%에도 미치지 못한다. 가로수의 토양에서는 유기 물질과 광물질이 서로 결합하여 생성되는 토양 합성 물질이 적기 때문에, 토양의 상층과 단층면이 점질화되고 견고하게 되어 가로수의 올바른 성장을 저해한다.

삼림 토양에서는 미생물의 대사 작용이 활발하여 비교적 이산화탄소의 생산량이 높다(평균 70-120 mg·m⁻²·h⁻¹). 토양 생물의 호흡에 의해 생성된 이산화탄소는 다시 탄산으로 변환되는데, 이것은 수소 이온의 자연적인 생산량(연간 약 50 mmol·m⁻²)과 거의 동일하다. 삼림 지역에서 자연적으로 생산되는 산성 물질은 토양이 포함하는 제 1 차 석회(예, CaCO₃)를 침출한다. 석회가 포함된

모재(parent material)에서 염기가 침출되거나 용해되면, 자연 생태계가 생산하는 자체 산성 물질에 의해 지속적으로 화학적 풍화 작용이 일어나 규산염 광물질의 분해 과정이 계속 이루어진다(Kauppi *et al.*, 1986). 가수 분해에 의한 규산염 광물질의 분해는 환경 생태학적인 면에서 살펴볼 때, 이중적 의미를 지닌다. 첫째, 규산염 풍화 작용에 의한 수소 이온의 소모가 일어난다. 규산염 풍화 작용은 토양과 나무에 중요한 영향을 미치는 완충 시스템과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 토양 pH 값을 5.0-6.2 범위로 유지하는 기능을 한다(James and Riha, 1986). 둘째, 수소 이온에 의해 영양 염류인 Ca²⁺, Mg²⁺ 등 양이온이 점토 광물질에서 치환되어 나무에 제공된다(Falkengren-Grerup and Tyler, 1993; Johnson *et al.*, 1985). 이에 반해, 가로수 토양에서 생산되는 산성 물질은 연간 약 1 mmol·m⁻² 정도로 매우 낮다. 이렇게 적은 산성 물질은 석회를 효과적으로 침출시킬 수 없으므로 외부에서 제공급을 받지 않을 경우, 토양 자체는 석회를 충분히 용해할 수 있는 기능을 잃게 된다. 따라서, 도심지 가로수 토양은 높은 토양 완충 용량을 가진다고 볼 수 있고, 또 토양의 pH 값이 7.5-8.5로 약한 알칼리성을 나타내는 것이 보통이다. 가로수 토양의 낮은 H⁺ 이온 생산량 이외에도, 건축 자재 등의 잔재가 토양에 유입됨으로써 일어나는 영향도 무시할 수 없다.

도심지 가로수의 식재 구멍이 내부에서 일어나

Table 2. Comparison of effective cation exchange capacities and their percentages condenser for Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , and Al^{3+} ions of forest and urban soils

	FOREST SOIL		URBAN SOIL
	Natural chemical states	Acidic chemical tate	Urban tree locations
Buffer range	Silicate buffer	Aluminium (iron)buffer	Carbonate buffer
pH-value(H_2O)	6.2-5.0	4.2-3.0	7.5-8.5
Cation exchange capacity (meq/100g)	5-10	3-8	5-20
Percent of coating on the CEC_{eff}			
Ca %	30-60	3-20	> 90
Mg %	5-10	1-5	1-10
K %	1-10	1-10	0.5-5
Na %	0.5-5	0.5-5	0.1-5
Al %	10-40	70-95	< 0.1

는 부족한 물의 순환 작용도 하나의 외형적인 스트레스로 나타난다. 토양 성분이 외부의 압력을 받아 토양이 견고해져 표층토의 투수성이 나빠지는 원인은 인위적으로 토양을 포장함으로써 표층토의 수분 흡수량이 감소되고, 하수도를 통해 물이 빨리 배수되기 때문이다. 건조하고 따뜻한 도심지의 기후로 인한 표층토의 높은 온도는 추가적으로 토양수가 표층토로 상승되는 것을 촉진시킬 뿐만 아니라, 물이 토양 내부에서 정체되는 결과를 나타내기도 한다. 토양수가 비교적 빠르게 침수되는 삼림 지역에서 토양수의 이동은 용해된 석회를 운반하는 매개체이지만, 건조한 도심지의 토양은 용해된 탄산수소 이온을 토양 심층까지 운반하지 못한다. 그러므로 도심지 가로수의 토양은 토양 생성학적인 면에서 볼 때, 알카리성을 가진 비성숙 토양이라고 말할 수 있다. 도심지 가로수의 토양에서는 규산염이 가수 분해되어 생성되는 영양 염류의 양은 삼림 토양에 비해 아주 소량이므로, 여러 가지 영양 염류(특히, K)의 결핍 현상이 일어난다. 이러한 결과로 인하여, 가로수 토양에서 연간 생성되는 점토 광물질량($0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 이하)은 삼림 토양에서 생성되는 양(평균 약 $0.2-0.7 \text{ kgm}^{-2}$)에 비하여 매우 낮다.

자연적 또는 광역적인 오염 물질에 의하여 주로 피해를 받는 삼림 토양은 국지적이면서 강도가

높은 인위적인 스트레스에 시달리는 가로수 토양에 비해, 치환성 양이온의 포화량 또한 비교적 적다(표 2 참조). 가로수 토양은 대부분 Ca^{2+} 이온이 과량 포화되어 있어 칼슘 과잉 현상이 일어나지만, 산성화된 삼림 토양에서는 Al^{3+} 이온이 다량 용해되므로 나무 성장에 필요한 칼슘과 마그네슘이 침출된다(Johnson *et al.*, 1987). 이러한 현상은 도심지 토양과 삼림 토양이 환경 화학적, 환경 독성학적인 측면에서 서로 다르다는 것을 말해 준다. 예를 들면, 삼림 지역에서 토양과 토양 용액 속의 $\text{Ca}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ 의 몰비율이 1보다 적은 경우를 흔히 볼 수가 있어 알루미늄의 독성에 의한 삼림의 피해가 대단히 크지만, 도심지 토양에서 침출되는 Al^{3+} 이온의 양은 극히 낮아 그 독성이 문제되지 않는다. 한편, 삼림 토양과는 달리, 도심지 토양에서는 칼슘 과잉 현상으로 말미암아 칼륨 등의 결핍 현상을 초래하게 된다. 특히, 한 종류의 치환성 물질, 즉 Ca^{2+} 이온(>95%)만이 용해되는 현상은 점토 광물질이 영양 염류 합성체로서의 기능을 제대로 할 수 없다는 것을 암시한다.

2.2 높은 부식질의 농도와 질산염의 과잉 공급

삼림 지역과 도심 지역간의 환경 생태학적인

차이점을 정확하게 구별하지 않으면, 가로수 식재 구덩이의 표층토에 고농도의 유기 물질(예, 퇴비)을 시비하는 방법이 자연 상태에 가까운 최적 조건으로 인식될 수도 있다. 그러나 두 가지 층으로 형성된 토양에서 가로수는 올바르게 성장할 수가 없으므로, 널리 적용되고 있는 식재 방법은 새로이 조명되어야 한다. 예를 들어, 가로수 식재 1년 후, 온도와 pH가 높은 가로수의 표층토에 분해가 용이하고 유기물 함량(10% 이상)이 높은 퇴비를 한번에 많이 시비하면, 토양은 많은 광물질의 용해와 유기 물질의 신속한 분해를 촉진시킨다.

촉진되므로 질산염의 과잉 공급 현상이 일어난다. 질산염의 과잉 현상은 나무를 식재할 때, NPK(질소, 인, 칼륨) 퇴비를 토양에 혼합함으로써 나타나기도 한다. 만일 그러한 토양수를 분석하면, 가로수를 식재한 지 1년 후 토양 용액의 질산 이온 농도는 약 $30-50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 정도를 나타내는데, 이는 삼림 토양($7-15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)에 비해 약 3배 이상 높게 나타난 것이다(그림 2). 일반적으로, 가로수 토양에서 질산염의 농도는 삼림 토양과는 달리, 농도의 변화가 심하여 최고 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 을 보이는 경우도 있다.

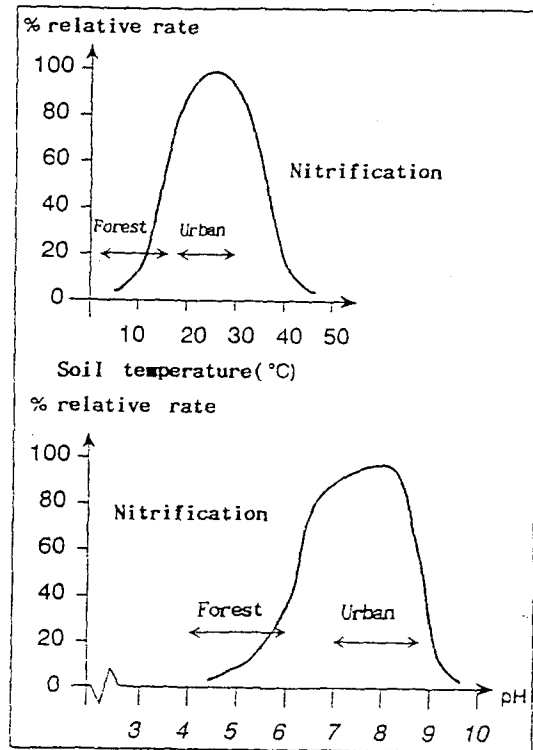


Fig. 1. Dependence of mineralization on the soil temperature and the pH-value.

그림 1은 질산화 비율이 토양의 온도 및 pH에 따라 변화되는 현상을 보여 준다. 기온이 낮고 산성화된 삼림 토양에서는 질산염의 유출량이 자연 상태에서 나무가 질산염을 흡수하는 양과 거의 동일하지만, 도심지 토양에서는 유기 물질의 분해가

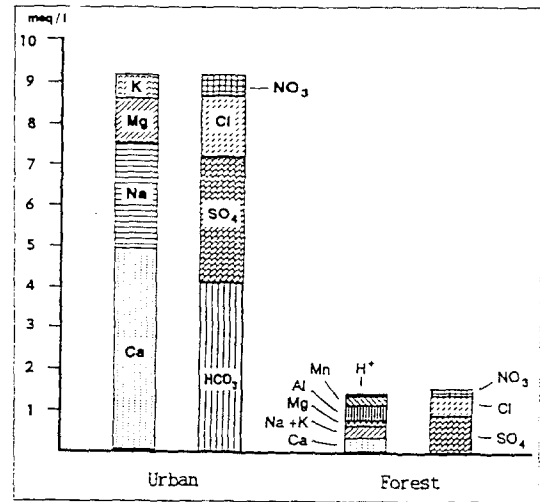


Fig. 2. Ion balances of the soil solution of urban soils and forest soils.

2.3 나무 수관의 성장과 질소의 생성

질소의 함량이 높은 도심지 토양에 어린 가로수를 새로이 식재하면, 유년기 성장 시기에는 나무 줄기, 나뭇가지, 나뭇잎이 집중적으로 과대 성장한다. 이러한 가시적인 관측 결과와는 달리, 식물 총생산량과 주요 영양 염류(예, P, K, Mg, Ca 등)간의 상관 관계는 분명하지 않다. 일반적으로, 나무의 증식도를 측정하기 위한 방법은 나무의 줄기와 가지의 성장 길이를 기준으로 하고 있다. 그러나 나무의 성장도만을 기준으로 하여 생산량을

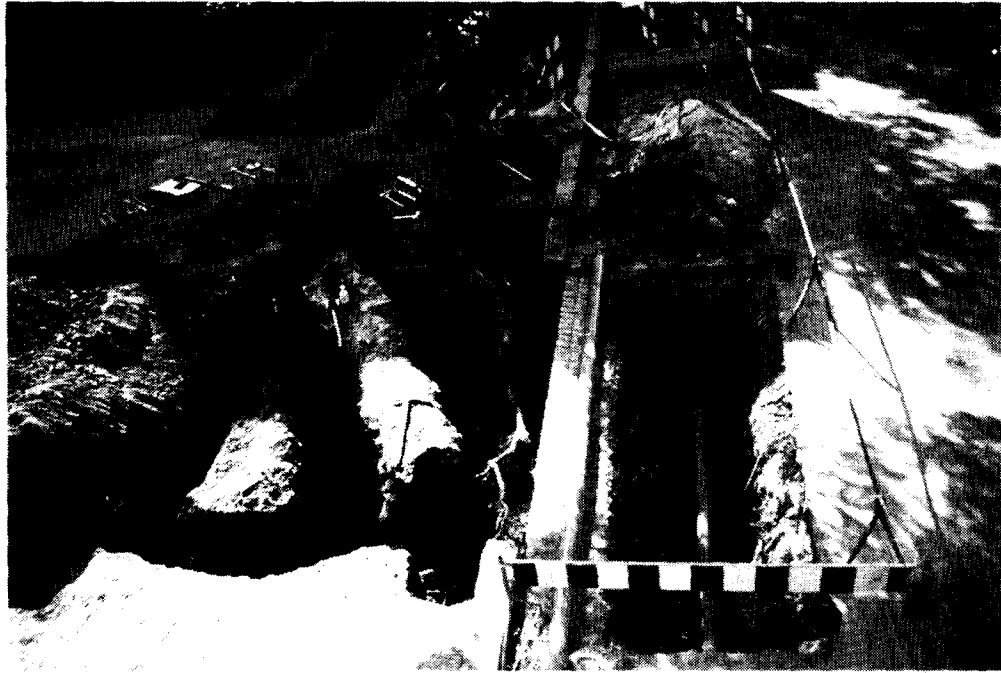


Fig. 3. Half sided digging of root system in the plant groove, sidewalk and street area.

평가하는 것은 합리적이지 못하는데, 그것은 나무의 활력도가 더욱 중요한 실제적 판단 요소이기 때문이다. 예를 들어, 토양에 질소가 과잉 공급될 경우, 나무 수관부의 성장이 두드러지게 왕성해지는 현상이 나타날 수도 있다. 가로수의 높은 수분 요구량도 중요한 인자이다. 만일 건조한 여름철에 인위적으로 물을 공급해 주지 않으면, 가로수들은 생존에 큰 위협을 받을 수 있다.

2.4 높은 부식질의 양과 뿌리의 발달

가로수 식재 구덩이의 표층토에서 대량의 유기 영양 염류가 용해될 때, 대부분의 나무 뿌리는 토양의 상층부에서 집중적인 성장을 하게 된다. 이러한 현상은 나무가 흡수할 수 있는 토양 수분의 함량이 높다는 전제하에서 가능하다. 토양이 외부의 압력에 의해 점점 견고해지면(나무 뿌리 자체의 무게도 포함), 무기 광물질이 많은 하층토에서는 항상 뿌리의 발달이 저해된다. 결국, 나무가 성

장함에 따라 잠재적인 나무 뿌리의 성장 범위가 표층토에만 한정되고 만다.

나무의 유년기에 무기질화된 유기 물질 또는 질소 퇴비를 시비하여 질소의 유입량을 높이면, 수관의 성장이 특히 왕성해진다. 이것은 뿌리가 계속 발달할 수 있는 잠재 지역이 일정하지 않기 때문에, 나무의 줄기와 뿌리 성장의 상관 관계가 일치하지 않는 결과(뿌리보다 줄기가 커짐)를 가져온다. 나무의 불균형적인 성장을 막을 수 있는 대책으로는 인위적인 관수 방법을 모색해야 한다. 건조한 가로수 토양에서는 나무 뿌리가 수분을 원활히 흡수하지 못하므로, 그 뿌리가 발달되는 토양의 깊이를 정확히 예측할 수가 없다. 이것은 나무 뿌리가 식재 구덩이에서 외부로 발달되는 과정에 여러 가지의 요인(예, 땅속 깊이 설치한 건물의 기초벽, 상수도관, 도로의 포장)들에 의해 제한을 받기 때문이다.

3. 가로수의 효율적인 성장을 위한 토양 구조의 개발

널리 적용되는 가로수 식재 방법에 따라 대량의 유기 물질을 표층토에 시비하면, 위에서 언급한 여러 가지의 인자들에 의해 표층토의 나무 뿌리는 하층토까지 성장하지 못한다. 따라서, 나무 성장에 효과적이고 적합한 토양의 성분과 구조를 개발하는 것은 매우 중요하다. 가로수 피해 복구를 위해 각기 다른 토양 성분에 시험 식재를 하기도 하고, 식중에 따라 체계적으로 연구하였으나, 그 성과가 아직도 부진한 편이다. 실제로 광범위한 가로수의 시험 식재를 위해서는 많은 경비가



Fig. 4. Numerous substrates change, caused by anthropogenic filling, is characteristic for urban street tree sites. The strong compaction prevents the root development in nutrient rich layers. The poor aeration of the soils causes the formation of a root system which is only close to the surface.

필요하고, 나무가 성장하고 토양이 발달함에 따른 실험 결과를 얻기 위해서는 장기간이 소요되므로 많은 어려움이 뒤따른다.

구체적이면서도 체계적인 방법의 하나는 이미 성장된 가로수의 토양을 파내어 각 토양층에서 자라는 뿌리의 발달 상태, 토양의 성분 및 토양의 물리 화학적인 특성을 조사 분석하는 것이다. 이를 위해, Krieter 연구팀(Krieter *et al.*, 1989; Krieter, 1991)은 독일의 7 개 도시를 선정하여, 각 도시마다 환경 오염에 민감한 20-40 년생의 보리수(lime tree, *tilia pallida*)의 성장 상태와 토양 성분을 조사하였다. 그림 3은 가로수의 뿌리 성장 상태를 보여주는 것으로, 토양의 성분이 표층, 심층, 중심부와 주위 부분에 따라 각기 다르지만, 뿌리가 토양에 적응하는 데에는 충분한 시간이 있었음을 알 수 있었다. 이와 같은 연구는 토양 성분과 토양 구조 간의 상호 작용, 그리고 뿌리의 성장과 나무 활력도 사이에 상호 작용을 연구하기 위한 바탕을 마련해 준다. 그림 4는 굵은 뿌리와 잔뿌리의 발육 상태를 통해 토양 성분의 변화를 추적할 수 있고, 그 성분이 나무의 성장에 적합한지를 규명할 수가 있다.

3.1 토양구조 개선을 위한 기준표

토양을 광범위하게 파내어 그 성분을 면밀히 분석하면, 가로수 식재 방법에 관한 새로운 방향을 제시해 줄 수 있다. 예를 들어, 점토와 미사의 함량이 낮고, 모래와 자갈의 함량이 높은 토양에서는 나무 뿌리의 성장이 왕성함은 물론, 깊은 하층토(2 m)까지 뿌리가 도달한다는 것을 알 수 있다(그림 5). 양토로 구성된 토양은 토양 입자들이 뿌리 성장에 필요한 많은 영양 염류를 포함하여도 뿌리의 성장은 부진하다(그림 4).

점토와 미사의 함량이 높은 토양 표면을 밟는 다든지 또는 차량 왕래로 인한 계속되는 진동은 토양을 견고하게 한다. 모래와 자갈 함량이 높은 토양은 양토의 함량이 높은 토양과는 달리 외부 압력에 대한 높은 저항성을 가지고 있다. 이와 같은 토양은 대공극을 많이 보유하고 있으므로 공기

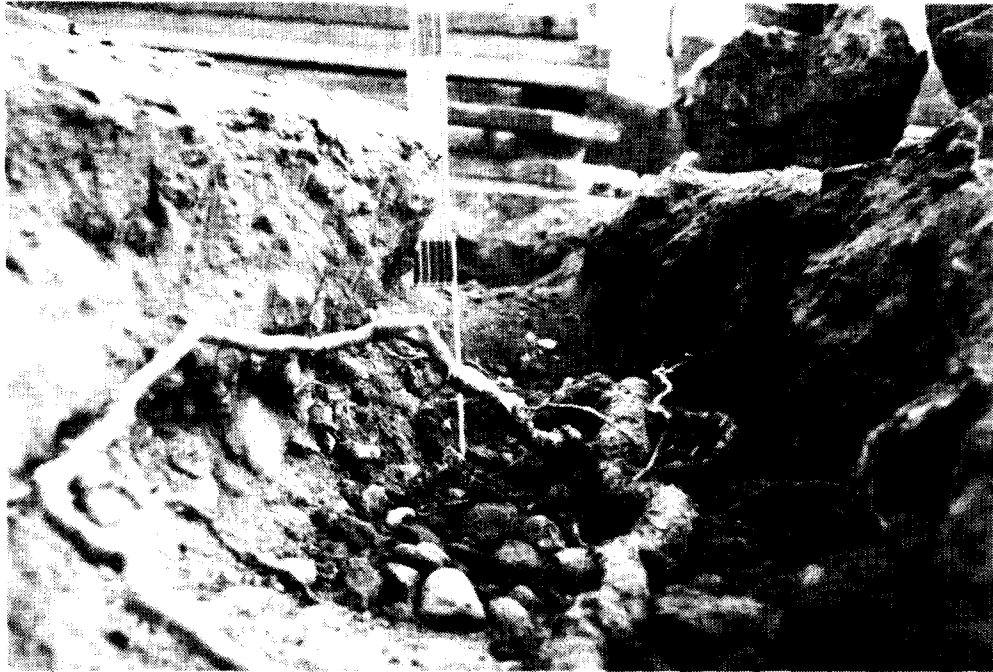


Fig. 5. Exclusive root development in the sandy and gravelly layer of a location where the rest of the soil material is compressed very strong.

와 물이 토양 심층까지 잘 이동된다. 즉, 공기와 물이 토양 사이로 잘 통하기 때문에, 나무 뿌리가 토양 심층까지 성장할 수 있도록 한다(그림 6).

가로수의 성장력을 유지하기 위해서는 토양 속에 영양 염류가 풍부해야 함은 물론, 대공극이 많아 물의 이동과 공기의 유통이 잘 되어야 한다. 효율적인 가로수 식재를 위한 토양 합성 물질의 기준표를 표 3에 나타내었다. 이 결과는 여러 조

사 지역의 토양 성분 분석과 물리·화학적인 실험 결과를 토대로 하여 얻을 수 있다.

3.2 압력에 저항성이 강하고 통기성과 투수성이 높은 토양의 구조

1차적으로 작성된 토양 합성 물질 기준표를 근거로 하여 가로수에 적합한 토양 합성 물질(soil

Table 3. Criteria Table for soil substrates for urban street trees

Structure and compression stability	Unconformable grade $U > 100$ Compactness $dB \sim 1.8$ (=soil density)
High parts of air conductive pore	$> 10\%$ of total soil volume
High water permeability	> 10 cm/ day
Middle usable field capacity	> 100 mm/m soil
Good nutrient provision	Disposition is essential as total content
Favorable cost and compensatory of locations	more than 50% utilization of excavated material to avoid "flower-pot effect", use lava, sand, and loess

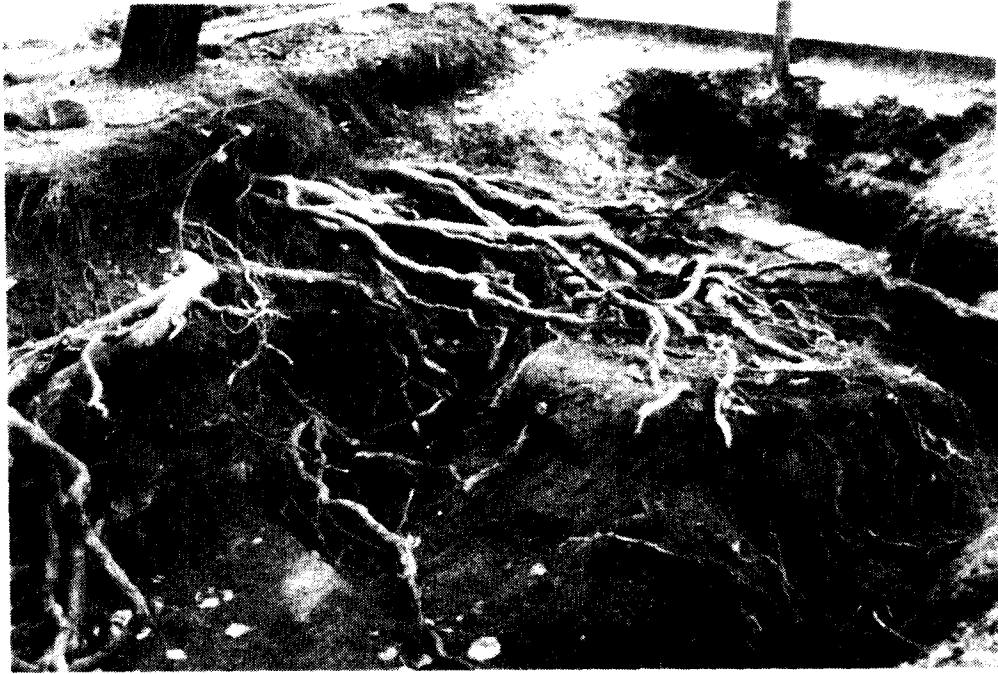


Fig. 6. Extensive and deep root development in soil substrates which contains debris and fragments from old buildings.

substrate)과 토성(texture)을 조사할 수 있다. 그림 7은 가로수 성장에 적합한 토양의 입자 크기에 따른 누적 백분율을 보여 준다. 여기서 토양의 입자 크기는 불규칙적인 분포를 나타냄을 주목할 수 있다. 토양 입자의 혼합체는 이들 입자가 지속적으로 서로 접촉되기 때문에, 토양의 구조를 계속 유지할 수 있도록 한다. 즉, 토양 입자들이 하나의 삼각형 형태로 서로 지지하는 법칙이다. 이 그래

프를 살펴보면, 시험 토양의 적절한 밀도는 약 $1.70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 이 된다. 이에 수반되는 토양의 중요한 성질은 표 4에 정리하였다.

Table 4. Physical and hydrological characterization of soil substrates for test variant

Test substrates (Property of all 14 cities)		
Soil density	$\text{g}\cdot\text{cm}^3$	1.70
Pore space	Vol %	35.57
Wide coarse pore	Vol %	12.28
Narrow coarse pore	Vol %	2.91
Middle pore	Vol %	13.55
Fine pore	Vol %	6.79
Field capacity	$\text{mm}\cdot\text{dm}^{-1}$	23.28
Usable field capacity	$\text{mm}\cdot\text{dm}^{-1}$	16.47

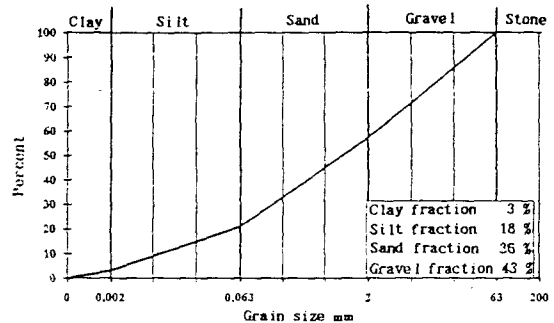


Fig. 7. Grain size distribution curve of test substrates.

토양 구조가 일정 시간이 경과된 후, 견고해지

는 것을 방지하기 위해 양토와 점토의 함량을 한 단계 낮게 조정하는 것이 필요하다. 이것은 토양이 수분의 흡수량과 영양 염류의 저장력을 높일 수 있기 때문이다. 또, 자갈을 혼합하는 대신 화산암재(lava scoria, 4-16 mm)를 토양에 혼합할 수도 있다. 화산암재는 내부에 중간 크기의 공극을 최대량 함유하고 있기 때문에, 나무가 이용할 수 있는 수분 함유량이 높은(약 16.5 mm water/dm) 매개체로 간주된다. 일반적으로, 토양이 갖는 중간 크기의 공극은 외부의 압력에 의해 미세한 공극으로 변형되지만, 화산암재의 공극은 영구적이며 변하지 않는다. 또, 화산암재의 대공극(>50 μ m)은 토양의 공기 용량과 동일하고, 토양 총 용적 밀도의 12.3% 를 차지한다. 이와 같은 특성과 함께 화산암재의 모래 성분은 다른 토양 물질에 쉽게 부착이 되므로, 화산암재는 토양 혼합 물질 가운데 가장 우수한 것으로 평가된다.

종합적으로, 가로수 토양은 환경 생태학적인 상호 관련성이 있고, 그에 따라 토양의 구조가 형성된다. 따라서, 토양 물질에 대한 연구는 매우 중요하며, 그 결과에 의해 도심지 가로수 식재에 새로운 방향을 제시하여야 한다.

4. 나무 식재를 통한 연구의 실례

위에서 논의한 토양 합성 기준표와 토양 합성 물질의 물리적 지표를 평가하기 위하여, 1987년 독일에서는 14개 도시를 선정 한 후, 실제로 나무를 식재함으로써 나무의 성장 특히 뿌리의 발달에 따른 토양의 성분 및 구조 변화를 연구하였다. 대상 수종은 나무 줄기의 폭 20-25 cm, 높이 3.0-3.5 m인 보리수들을 선택하였다. 실험 식재 구덩이(2x2x1.5 m)의 토양에는 대공극을 많이 포함하고, 토양의 구조가 균일한 시험 토양 합성 물질(3% 점토, 18% 미사, 36% 모래, 43% 자갈)을 사용하였으며, 나무 뿌리가 토양 심층까지 도달하고 좌우 각 방향으로 성장할 수 있도록 나무 식재 화분의 형태는 그림 8에서 보는 바와 같이, 양쪽 측면을 확장하였다. 나무 식재를 위한 시험 토양 합성 물질은 경제적, 환경·생태학적인 이유로 이

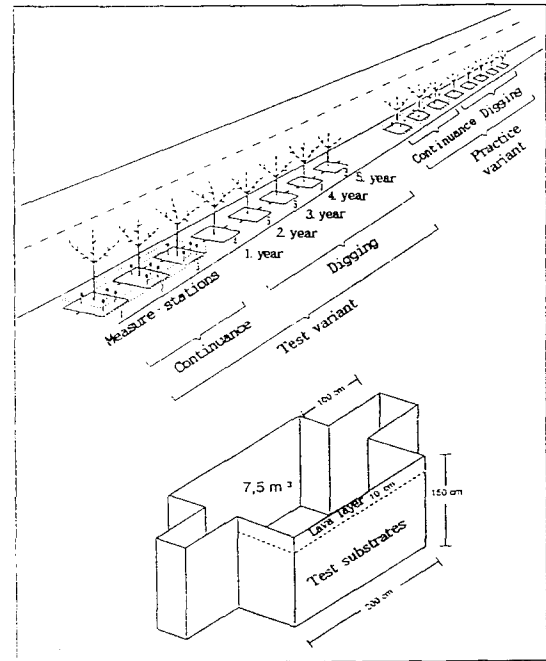


Fig. 8. Construction of test planting.

미 파낸 가로수 자체의 토양을 50% 이상 포함하였다. 미리 작성된 입경 분포도에서 누락된 나머지 토양 혼합 물질은 모래, 양토(예, loess) 그리고 자갈을 함께 혼합함으로써 구성하였다. 시험 토양 합성 물질로 구성된 토양과 조경 연구소가 현재 사용하고 있는 토양과의 비교하기 위해, 8 그루의 보리수를 추가로 식재하였다. 이 연구는 5년 동안 아래에 항목에 대하여 조사하였다.

- 토양의 물리·화학적 조사 연구.
- 수량계를 이용한 토양의 수분 함량 측정과 흡입 파이프로 채집한 토양수의 화학적 분석 (그림 8의 수목 1 번부터 3번까지).
- 수목의 성장력 측정을 위한 나무 가지와 나뭇잎의 분석.
- 나무 뿌리의 성장 상태 조사.

이와 같은 장기적이고 광범위한 연구에는 그 실험 결과의 처리에만 약 9 개월(1993년 1월-1993년 9월)이 소요되었는데, 연구의 결과 분석을 통해 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 가로수 식재

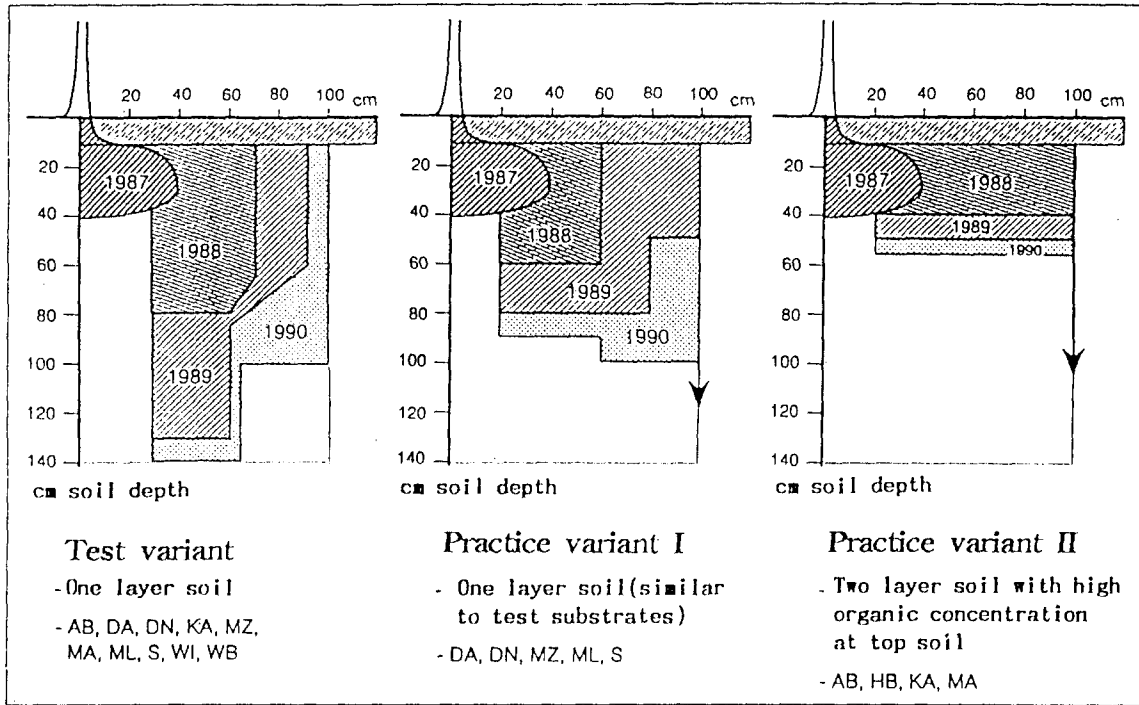


Fig. 9. Root development in the plant groove from November 1987 to November 1990 Hatched face: expansion zone of intensive rooting in the single years; 0-10 cm: Lava gravel-coping of plant groove as compressiv protection and evaporate protection.

(1987년 11월) 2년 후, 거의 모든 실험 측정 지역의 나무 뿌리는 식재 화분의 넓혀 놓은 양쪽 측면으로 많이 성장되었다. 그럼에도 불구하고, 이와 같은 뿌리 발달 경향이 과연 몇 십 년간 계속해서 지속될 수 있는지는 예측하기가 힘들다. 왜냐 하면, 현재 응용되는 식재 방법에 의한 식재 구덩이의 크기가 시험 식재 구덩이보다 작기 때문이다. 그림 9에서 보는 바와 같이, 나무 뿌리가 토양 심층으로 성장하는 현상은 각각의 식재 방법에 따라 큰 차이를 보여준다. 하나의 토양층과 대공극을 많이 포함하고 있는 시험 수목에서는 나무를 식재한 후 약 2년 내지 3년째 이미 뿌리의 발달이 식재 화분 내부뿐만 아니라 양쪽 측면 약 120-150 cm까지 잘 발달되었다. 이런 현상과는 달리, 기존의 방법으로 식재되었던 나무의 뿌리 발달은 유기물 함량이 높은 상층(0-60 cm)에서만 왕성하였고, 대공극의 함량이 적은 토양층

(100-150 cm)에서는 나무 뿌리의 성장이 일어나지 않았다. 이것은 유기물 함량이 높은 표층토와 토양 심층 사이에서 있는 토양의 물리·화학적 불연속성에 의해, 나무 뿌리의 성장이 유기 물질층에서만 왕성하다는 것을 의미한다. 무기 물질의 토양층에서는 공기와 물이 이동하는 대공극의 양이 적어 영양 염류의 함량이 적고, 그로 인해 뿌리가 제대로 발달되지 않는다.

5. 결론

미래의 도시림과 가로수의 올바른 식재를 위해 현재 독일에서 사용되고 있는 식재 방법에 대한 재고찰의 필요성을 제시해 주었다. 기존의 식재 방법에서는 토양을 충분히 깊게 파내지 않고 가로수를 심은 후 표층토에 유기물 및 무기물 함량이

높은 퇴비를 대량 시비하는데, 이것은 도심지 토양의 특성을 고려할 때 영양 염류의 편중된 분포를 의미한다. 결과적으로, 나무 뿌리가 땅속 깊숙이 성장하지 못하는 원인이 된다. 이와 같이 표층토에 머무르는 과잉 영양 염류는 환경 생태학적인 불균형을 초래할 것이며, 경제적인 손실도 가져올 것이다. 따라서, 올바른 가로수의 식재는 가로수에 필요한 영양 물질뿐만 아니라, 토양의 구조, 특히 통기성과 투수성을 고려하여야 한다. 일반적으로, 토양의 깊이는 2 m 이상 파내야 하며, 대공극을 많이 보유하도록 모래와 자갈의 함량이 많은 토양을 혼합하여 채워주는 것이 바람직하다. 또, 나무의 성장에 적합한 토양 합성 물질의 개선이 매우 중요하다.

참고문헌

- Falkengren-Grerup U. and G. Tyler, 1993, The importance of soil acidity, moisture, exchangeable cation pools and organic matter solubility to the cationic composition of beech forest (*Fagus sylvatica L.*) soil solution, 156, 365-370.
- James B.R. and S.J. Riha, 1986, pH buffering in forest soil organic horizons; Relevance to acid precipitation, J. Environ. Qual, 15, 229-234.
- Johnson D.W., D.D. Richter, G.M. Lovett, and S.K.E. Lindberg, 1985, The effects of atmospheric deposition on potassium, calcium, and magnesium cycling in two deciduous forests, Can. J. For. Res 15, 773-782.
- Johnson N.M., C.T. Driscoll, J.S. Eaton, G.E. Likens, and W.H. McDowell, 1981, Acid rain dissolved aluminum and chemical weathering at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, Geochim. Cosmochim. Acta, 45, 1421-1437.
- Kauppi, P., J. Kamari, J. M. Posch, L. Kauppi, E. Matzner, 1986, Acidification of forest soil: Model development and application for analyzing impacts of acidic deposition in Europe, Ecological Modeling, 33, 231-253.
- Krieter M., 1991, Das Forschungsprojekt "Standortoptimierung von Straßenbäumen", Neue Landschaft, H.9, 612-618pp.
- Krieter, M., A. Bill, A. Malkus, and G. Würdig, 1989, Standortoptimierung von Straenbaumen, Bonn.
- Leh, H.O., 1991, Innerstädtische Streßfaktoren und ihre Auswirkungen auf Straßenbäume, In H.-G. Brod(Hrsg.), Straßenbäume, Landsberg.
- Liesecke, H.J., 1991, Verbesserung des Wurzel- und Standraumes von Bäumen in Stadtstraßen, Das Gartenamt, H.10, 649-660pp.
- Meyer, F.H.(Hrsg.), 1992, Bäume in der Stadt, Stuttgart.
- Schroeder, K., 1991, Untersuchungen zum Einfluß standarsierter Substrate auf das Wachstum von Laumbäumen, 1987-1991, Hrsg. von der Stadt Osnabrück.
- Ulrich, B., and Matzner, E., 1983, Abiotische Folgewirkungen der weiträumigen Ausbreitung von Luftverunreinigungen, Bonn, Ufoplan BMI, Luftreinhaltung Forschungs-bericht, 10402 615.