

고속도로변 산림지역(신갈, 서천) 강우의 화학적 조성

김영채 · 정동준 · 김홍률

경희대학교 생명과학부 생명자원과학연구원

(2002년 10월 11일 접수; 2002년 12월 3일 수락)

Chemical Compositions of the Observed Precipitation in Forest Area on the Border of Highway(Shingal, Seochun)

Young-Chai Kim Dong-Jun Chung and Hong-Ryul Kim

Department of Forestry/Institute of Life Science and Natural Resources, Kyunghee University,
Yongin 449-701, Korea

(Received October 11, 2002; Accepted December 3, 2002)

ABSTRACT

Air pollution by acid pollutants is problematic in the whole world. Water acidification has already been deteriorating the forest ecosystem. This study was conducted to analyze the acidity and chemical composition of the open precipitation and throughfall at forests with various geographic locations in Korea. The results of this study are as follows; The open precipitation pH was lowest in Seochun. The throughfall pH showed some buffering capacity in only *Quercus mongolica* stands. In *Pinus rigida*(Shingal and Seochun) stands, there was little difference from the open precipitation. Chemical composition of the open precipitation for each sampling site showed that Ca^{2+} , NH_4^+ and SO_4^{2-} concentrations had higher value than other ions, and except these ions, the small quantity of ions showed different properties to each site. Changes of ion concentrations in the throughfall showed a tendency to increase. Ion concentrations of the throughfall increased with washout and nutrient leaching from the trees. In conclusion, the influence was extended to the pure zone, and the frequency of acid rain is increasing. But, if the deposition of pollutants exceeds the capacity of purification, it would damage forest ecosystem. Further investigations are necessary to identify tolerant tree species to acid pollutants.

Key words : Chemical compositions, precipitation, acidity, highway

I. 서 론

자연 환경에 존재하는 깨끗한 공기, 맑은 물 그리고 기름진 토양은 생태계의 순환과 보전에 필요한 기본적인 환경 요소들이다. 그러나, 공업을 위시한 각종 산업화가 급속히 진전되고 있는 현대 문명 사회에서 이와 같은 자연 환경 요소들은 그 성질상 변화를 지속화하고, 자연환경의 오염이 극대화하기에 이르러 자연 생태계에 큰 위협을 가하고 있다.

산성우는 화석연료의 연소로부터 발생되는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 가스상의 염화수소 등이 주요 원인 물질이 되며, 주 공급원은 공장이나 자동차의 배기가스이다(Galloway and Likens, 1981). 산성우가 생태계에 미치는 영향은 토양과 식생에 양료를 공급한다는 유익한 측면도 보고 되었으나(Evans, 1984), 토양산도를 높이고(정용문, 1987; 이창근, 1988; 민일식과 이수욱, 1990), 식물체로부터의 양료 용탈(Cole and Johnson, 1977; Lee and Weber, 1979; Johnson *et al.*,

1983) 및 가시적 피해를 유발, 양료순환체계를 교란시키는 등의 유해한 측면도 보고(Kim, 1986; 이창근, 1988; 정용문, 1991)된 바 있다. 산성우의 성분이나 그 원인 및 기작에 관한 연구로 양이온과 음이온 중에서 산성우와 직접적으로 관련이 있는 것은 H^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- 등의 이온으로 추정된다고 하였으며, 이들은 1차 오염물질들이 구름 내부와 대기 중에서 여러 가지 복잡한 반응으로 형성된 것이라고 하였다(Seinfeld, 1986; Finlayson-Pitts and Pitts, 1986). 또한 대기 중에는 자연 발생원으로부터 방출되는 암모니아 $CaCO_3$ 등의 염기성 가스나 aerosol도 존재하는데, 이러한 염기성 물질들은 자연 상태의 강수 중에 존재하는 산의 일부를 중화하여 pH 값을 올린다고 하였다(Khemani *et al.*, 1987).

유럽에서는 지표수 측정망을 운영하여 산성강수의 원인이 대기오염물질의 장거리 이동이라는 것과, 강수의 주요 이온과 산성도가 계절에 따라 변화함을 밝혔다(Seinfeld, 1986). 일본에서도 1950년대 경제성장을 통한 공업개발로 대기의 오염이 심각한 문제로 대두되어 전국 각지의 공업도시 주변에서 피해가 발생하기 시작하였다. 또한 독일을 비롯한 선진공업국의 광범위한 지역에서 나타난 산림쇠퇴 현상은 대기오염에 의한 산성우와 산성연무에 의한 것이라고 하였다(Bins and Redfern, 1983). 그 외의 연구로는 산성우의 주된 요인이 급속한 산업발달에 따른 대기오염물질의 증가와 더불어 황산화물, 질소산화물 등이 대기 중에서 강우, 눈, 이슬, 안개, 서리, deposition 등에 모두 포함된 것이라 하였다(Bubenick, 1984; Cowling, 1982a, 1982b;

Fowler, 1978; Vermeulen, 1979).

대기오염물질의 배출 증대와 산성우의 발생과 같은 환경문제는 매우 복합적이어서 대기-수분-식생-토양 오염에 관련된 종합적인 환경 영향을 야기하고 있다. 산성우의 발생은 산림은 물론 여러 종류의 식물 성장과 결실에도 피해를 주고 있다. 이처럼 대기오염에 의한 산성강하물의 식물체 및 토양 내 유입으로 이루어지고 있는 산림생태계의 피해 현상은 세계 각 지역에 발생하고 있으며, 그 피해 범위는 점차 확산되고 있다(Georgii, 1986; Manion and Lahance, 1992).

본 연구는 최근 차량 통행량이 많은 고속도로변의 지역을 선정하여 고속도로와 활엽수림, 침엽수림지역에 강하하는 임외우와 임내우(수관통과우)를 채취하여 산성도와 그 화학적 조성을 분석하여, 강하 수질의 변화와 함께 산성강하물의 영향을 비교 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개황

조사지는 대기오염물질의 배출이 많은 경부고속도로 서울 기점 35 km 지점과 이와 인접한 산림지역을 선정하였다(Fig. 1, Table 1). 행정구역으로는 경기도 용인시 하갈리(위도 $37^{\circ}14'$, 경도 $127^{\circ}05'$)이며, 이 지역은 1960년대 건설된 경부고속도로가 남북으로 통과하는 농경지와 중소규모의 공업시설이 혼재한 해발 60~130 m의 완만한 구릉지대이다. 특히 조사지는 주변이 산림으로 둘러 쌓인 분지형태이며 연평균 기온 $11.1^{\circ}C$,

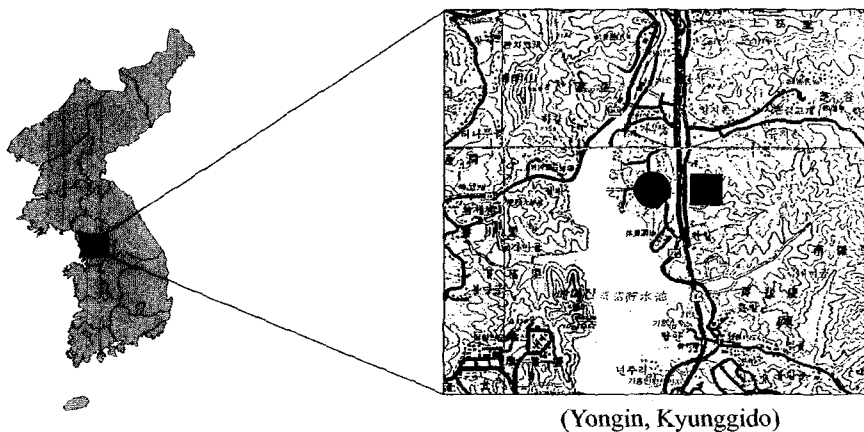


Fig. 1. Location map of sampling sites(● : Seochun, ■ : Shingal).

Table 1. General description of sampling sites

Location	Species	Age (yr)	DBH* (cm)	Height (m)	Density (trees/ha)	Altitude (m)	Aspect
Shingal, Yongin, Kyunggido	<i>Quercus mongolica</i>	24~36	25.8±8.7	13.4±3.1	376	55	SE
	<i>Pinus rigida</i>	30~35	20.7±2.9	8.5±1.6	1,239	80	SE
Seochun, Yongin, Kyunggido	<i>Quercus mongolica</i>	25~35	25.5±5.7	12.4±3.3	347	90	S
	<i>Pinus rigida</i>	26~36	20.8±3.4	9.6±2.1	1,331	95	S

* : Diameter at breast height

강수량 1,300 mm로 1일 평균 교통량이 180,000대를 상회하는 지점이다(한국도로공사, 1999). 이 지역은 30~35년생의 리기다 소나무 인공림과 24~36년생의 신갈나무 단순림으로 구성되어 있다. 리기다 소나무림은 평균 흉고직경 20.7±2.9 cm, 수고 8.5±1.6 m 이었으며, 신갈나무림은 평균 흉고직경 25.8±8.7 cm, 수고 13.4±3.1 m로 나타났다. 리기다 소나무의 생장은 신갈나무에 비해 불량하였는데, 이는 조립 시업 이후 간벌, 솎아내기, 가지치기 등의 보육시업이 이루어지지 않아 덜식 성장한 결과이다.

2.2. 강우의 채취

임외우의 채취는 산림과 인접한 나지에 poly-bucket (20 l) 용기를 지면으로부터 약 1.0 m 높이에 설치하여 빗물을 채수하였다. 임외우는 반경 30 m 이상 소개된 지역을 선택하였다.

임내우(수관통과우)의 채취는 조사대상지의 각 임종별(신갈 : 신갈나무림, 리기다소나무림, 서천 : 신갈나무림, 리기다소나무림)로 3개소씩 정하여 총 18개를 설치하였다. 채취 용기의 설치 시에는 빗물이 지면에 떨어지는 충격에 의한 이물질의 용기내 유입을 막기 위하여 지면에서 0.5 m 이상 높이로 설치하였다.

2.3. 화학적 특성의 분석

채취된 강우, 안개 그리고 이슬은 채취 즉시 실험실로 운반하여 산성도를 측정하였다. 이때 산성도를 측정하기 전 불순물질을 제거하기 위하여 filter paper (Toyo Roshi Kaisha, No. 5C-110 mm)로 1차 2회 여과 전처리한 후 pH meter(Bench top pH meter, HANNA Instrument Inc.)를 이용하여 3회 반복 측정하고 이를 산술평균하여 pH 값으로 취하였다.

pH를 측정된 시료는 냉동고에 보관하고, 1개월 단위로 수용성 이온을 분석하였으며, 분석직전 시료를 0.45 µm filter(Whatman)로 2차 여과하였다. Ca²⁺, Mg²⁺,

Na⁺, K⁺, Al³⁺ 등의 양이온은 Atomic absorption Spectrophotometer(Z8230, HITACHI)로, NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ 등의 음이온은 Ion Chromatography(DX-120, DIONEX)를 이용하여 측정 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. pH와 이온농도의 변화

고속도로로부터 4 km 떨어진 서천 지역의 임외우와 수관통과우를 조사기간별로 분류하여 pH의 변화에 대해 통계 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 임외우와 수관통과우의 조사 기간에 대해서는 통계적 유의차가 인정되지 않는 결과를 보였다. 조사 기간 중 서천 지역 임외우의 평균 pH는 5.47 이었으며, 수관통과우에서는 신갈나무림이 pH5.35, 리기다소나무림은 pH5.22로 임외우의 pH에 비하여 리기다소나무림에서 평균 pH가 0.25 낮은 값을 보였다. 이와 같은 결과는 산림지역내 강수가 수관층을 통과하면서 활엽수보다 침엽수에서 pH가 더 낮아진다는 연구 결과(Nakashima and Tanabe, 1991, 1992; 박재현과 우보명, 1997; 주영특 등, 1999)와 일치하였다.

2개 수종에서 측정된 수관통과우의 pH의 변화는 2000년 7월~9월에 신갈나무림 수관통과우가 pH가 0.11 증가한 것을 제외하고는 모든 기간에 걸쳐 수관통과우의 pH가 감소하였다. 특히, 2001년 7월~9월에는 두 수종의 수관통과우의 pH가 현저하게 감소한 결과를 보여 조사기간 중 가장 낮은 pH를 보였다.

Table 3은 고속도로와 인접한 산림지역에서 채취한 신갈 지역의 임외우와 수관통과우의 pH를 조사기간별로 분류하여 통계 분석한 결과이다. 신갈 지역의 임외우와 수관통과우간의 pH에서는 조사 기간 중 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 전체적인 평균 pH는 임외우가 pH5.30 이었으며, 신갈나무 수관통과우가 pH 5.35, 리기다소나무림 수관통과우는 pH 5.11로 리기다

Table 2. Average pH value of the open Precipitation and throughfall in Seochun, Yongin

	Apr. - Jun. 1998	Jul. - Sep. 1998	Apr. - Jun. 1999	Jul. - Sep. 1999	Mean
Precipitation	5.42	5.26	5.94	5.35	5.47
Throughfall (<i>Quercus mongolica</i>)	5.35	5.38	5.81	4.94	5.35
Throughfall (<i>Pinus rigida</i>)	5.27	5.22	5.67	4.77	5.22
F-values	0.12 ^{NS}	0.52 ^{NS}	1.74 ^{NS}	0.95 ^{NS}	1.32 ^{NS}

N.S means not significant at 5% significant level.

Letters in vertical columns indicate significant 5% level for DMRT

Table 3. Average pH value of the open precipitation and the throughfall in Shingal, Yongin

	Apr. - Jun. 1998	Jul. - Sep. 1998	Apr. - Jun. 1999	Jul. - Sep. 1999	Mean
Precipitation	5.32	5.14	5.86	4.98	5.30
Throughfall (<i>Quercus mongolica</i>)	5.29	5.17	5.75	5.28	5.35
Throughfall (<i>Pinus rigida</i>)	5.05	4.91	5.55	4.75	5.11
F-value	0.58 ^{NS}	1.71 ^{NS}	1.23 ^{NS}	0.64 ^{NS}	1.30 ^{NS}

N.S means not significant at 5% significant level.

Letters in vertical columns indicate significant at 5% level for DMRT.

소나무림의 수관통과우의 pH가 가장 낮았고, 임외우 그리고 신갈나무림의 순으로 나타났다. 이러한 결과는 박재현과 우보명(1997)의 연구에서 활엽수인 서어나무림과 뽕나무림 수관통과우의 pH가 임외우보다 높았다는 결과와 비슷하였다. 즉, 활엽수에서의 수관통과우는 임외우와 달리 잎에서 용출되는 Ca^{2+} , Mg^{2+} 등에 의하여 강우의 pH 값이 완화된 것으로 판단하였다 (Parker, 1990).

서천 지역의 임외우와 수관통과우에서 분석된 양이온과 음이온 농도의 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 먼저 양이온 농도를 분석한 결과를 보면, Ca^{2+} 이온농도는 조사 전기간 동안 5% 유의수준에서 통계적 유의차가 인정되었으나, Na^{+} 은 통계적 유의차가 인정되지 않았다. 서천 지역의 임외우와, 동일지역 수관통과우(신갈나무림, 리기다소나무림)의 이온농도를 분석한 결과, 양이온 농도는 임외우가 $Ca^{2+} > Na^{+} > NH_4^{+} \geq Mg^{2+} > K^{+}$, 신갈나무림 수관통과우에서는 $K^{+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+} > NH_4^{+}$ 의 순이었으며, 리기다소나무림 수관통과우는 $Ca^{2+} > K^{+} > NH_4^{+} \geq Mg^{2+} \geq Na^{+}$ 등의 순으로 나타나 수관통과우에서는 K^{+} 이온농도가 가장 크게 증가하고 있었다. 이와 같은 결과는 대도시 주변 지역 강수의 조성파 같은 결과(박국태 등, 1995)였다. 그 중

임외우에서 가장 낮은 농도를 보인 K^{+} (0.02 meq/L)의 변화가 신갈나무림(0.14 meq/L)에서 현저하게 증가하였으며, 시기적으로는 조사기간 모두 8, 9월에 급격히 증가하는 양상을 보였다. 이는 여름철 강수량의 증가로 강우가 수관층을 통과하면서 수목으로부터의 세탈(장관순과 이수옥, 1995)로 활엽수림에서 K^{+} 이온농도가 가장 크게 증가하였다(박영대 등, 1999)는 것과 일치하였다. 반면, 침엽수 임분의 임내우에서 용탈로 인한 K^{+} 이온농도가 급격하게 증가한 연구 결과(주영특 등, 1999)와는 수종과 시기에서 각기 그 차이가 있음을 알 수 있었다.

이상에서 각 양이온의 이온농도의 변화는 임외우보다 수관통과우에서 증가하는 경향을 보였으며, NH_4^{+} 이온을 제외한 다른 양이온에서는 침엽수인 리기다소나무림 수관통과우보다 활엽수인 신갈나무림 수관통과우의 이온농도가 더 높은 양상을 보였다.

동일한 지역의 음이온 농도에 대한 변화는 양이온과 달리 이온농도의 증가와 감소의 변이 폭이 임외우에 비해 수관통과우에서 모두 크게 나타났다. 이와 같은 결과에서 이온농도 변화의 차이는 있으나, 임외우 이온농도의 증감에 따라 수관통과우의 변화 경향이 같았는데, 이때 평균 이온농도는 $SO_4^{2-} > Cl^{-} > NO_3^{-}$ 의 순으

Table 4. Cations concentration of the open precipitation and the throughfall samples in Seochun, Yongin (unit : meq/L)

	Sites	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
98. Apr. - Jun.	PR	0.11 ^a	0.03 ^a	0.02 ^a	0.05	0.05	0.06 ^a	0.04 ^a	0.12
	TFQ	0.16 ^b	0.10 ^b	0.15 ^b	0.09	0.07	0.11 ^b	0.07 ^{ab}	0.17
	TFPr	0.13 ^a	0.10 ^b	0.10 ^b	0.08	0.07	0.13 ^b	0.10 ^b	0.18
	F-values	10.59 ^{**}	6.74 ^{**}	10.68 ^{**}	1.58 ^{N.S}	0.64 ^{N.S}	9.20 ^{**}	6.25 ^{**}	2.16 ^{N.S}
98. Jul. - Sep.	PR	0.11 ^a	0.03	0.02 ^a	0.03	0.03	0.09	0.04 ^a	0.09 ^a
	TFQ	0.14 ^b	0.04	0.18 ^b	0.04	0.06	0.09	0.08 ^b	0.11 ^b
	TFPr	0.13 ^b	0.03	0.03 ^a	0.04	0.05	0.06	0.07 ^b	0.13 ^c
	F-values	25.84 ^{**}	0.25 ^{N.S}	4.34 [*]	0.52 ^{N.S}	2.19 ^{N.S}	1.51 ^{N.S}	8.27 ^{**}	11.47 ^{**}
99. Apr. - Jun.	PR	0.10 ^a	0.04 ^a	0.02 ^a	0.05	0.05	0.05 ^a	0.04	0.08
	TFQ	0.15 ^b	0.10 ^b	0.14 ^b	0.08	0.05	0.13 ^b	0.09	0.18
	TFPr	0.15 ^b	0.08 ^{ab}	0.13 ^b	0.07	0.07	0.12 ^b	0.09	0.15
	F-values	5.77 [*]	3.88 [*]	8.89 ^{**}	0.97 ^{N.S}	0.45 ^{N.S}	5.99 [*]	3.11 ^{N.S}	2.58 ^{N.S}
99. Jul. - Sep.	PR	0.10 ^a	0.02	0.02	0.04	0.02 ^a	0.05 ^a	0.04 ^a	0.08
	TFQ	0.16 ^c	0.05	0.15	0.05	0.04 ^{ab}	0.11 ^b	0.06 ^b	0.12
	TFPr	0.14 ^b	0.04	0.04	0.04	0.06 ^b	0.08 ^{ab}	0.06 ^b	0.10
	F-values	43.72 ^{**}	1.55 ^{N.S}	3.25 ^{N.S}	0.18 ^{N.S}	5.28 [*]	3.92 [*]	5.97 [*]	2.25 ^{N.S}
Mean	PR	0.10 ^a	0.03 ^a	0.02 ^a	0.04	0.03 ^a	0.06 ^a	0.04 ^a	0.09 ^a
	TFQ	0.15 ^c	0.07 ^b	0.16 ^c	0.06	0.05 ^b	0.11 ^b	0.07 ^b	0.14 ^b
	TFPr	0.14 ^b	0.06 ^b	0.07 ^b	0.06	0.06 ^b	0.09 ^b	0.08 ^b	0.14 ^b
	F-values	45.96 ^{**}	7.15 ^{**}	16.22 ^{**}	2.60 ^{N.S}	5.27 ^{**}	7.58 ^{**}	18.41 ^{**}	7.75 ^{**}

PR : Open precipitation, TFQ : Throughfall in *Quercus mongolica* stand, TFPr : Throughfall in *Pinus rigida* stand.

* and ** indicate significant at 5% and 1% level, and N.S means not significant at 5% level.

Differences in letters in vertical columns indicate significant difference at 5% level for DMRT.

로 나타났다. 음이온 농도는 임외우의 경우보다 수관 통과우가 상대적으로 높았으며, 특히 SO₄²⁻는 4~6월에 이온농도가 가장 높았다. 또한 음이온 중 SO₄²⁻의 임외우와 수관통과우에서 분석된 이온 변화 양상은 다른 음이온과 양이온의 변화와 차이가 있었다. 이는 서천 지역의 산림내에도 주변 환경의 변화에 따른 산성물질의 유입이 증대되었던 것으로 생각된다. 그 이유는 조사 연구 시작 이후 인접도로의 확장과 대규모 집단주거지의 건설 등으로 인한 차량통행의 증가와 에너지공급을 위한 화석연료 연소시설의 가동에 의한 영향(박국태 등, 1998)이 크게 작용되었을 것으로 생각된다.

서천 지역에서 나타난 임외우와 수관통과우의 이온농도의 변화는 전체적으로 양이온이 음이온보다 많이 증가되었다. 신갈나무림에서는 K⁺이 조사 1, 2차 년도에서 모두 가장 크게 증가하였으며, 리기다소나무림에서는 1998년 SO₄²⁻, 1999년에는 K⁺이 가장 크게 나타났다. K⁺의 변화가 크게 나타난 것은 수관층의 잎에서 다량의 용탈이 있었던 것으로 생각되었다(Lovett

et al., 1985; 주영특 등, 1999). 그리고, SO₄²⁻ 이온농도가 크게 증가한 것은 강우가 수관을 통과할 때 대기로부터 유입되어 수관에 침적되어 있던 건성강하물이 함께 씻겨 내려간 것으로 판단하였다. 이는 침엽수의 수관구조가 활엽수에 비해 복잡하고, 무강우 기간에 대기중의 부유물질을 건성강하물의 형태로 집적한 영향이 컸을 것으로 생각된다(박영대 등, 1999).

Table 5는 신갈 지역의 임외우와 수관통과우에서 분석된 양이온과 음이온 농도의 통계 분석 결과이다. 양이온 농도를 분석한 결과, Ca²⁺ 이온농도는 조사 전기간 동안 5%, 1%의 유의수준에서 통계적 유의차가 인정되어 수관을 통과하면서 수목으로부터 농도 변화에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나, Na⁺은 조사 전기간 동안 통계적 유의차가 인정되지 않았다. Mg²⁺과 NH₄⁺는 7월~9월의 기간에 통계적 유의차가 인정되는 계절적 특성을 보였다.

신갈 지역 임외우의 양이온 농도는 Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺>NH₄⁺>K⁺의 순이었으며, 이는 도시지역의 강수의 화

Table 5. Ion concentrations of the open precipitation and the throughfall samples in Shingal, Yongin (unit : meq/L)

	Sites	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
98. Apr. - Jun.	PR	0.11 ^a	0.05	0.02 ^a	0.05	0.05	0.12	0.07 ^a	0.15 ^a
	TFQ	0.15 ^{ab}	0.07	0.13 ^c	0.06	0.10	0.13	0.07 ^a	0.19 ^{ab}
	TFPr	0.18 ^b	0.06	0.07 ^b	0.07	0.10	0.14	0.15 ^b	0.24 ^b
	F-values	5.25*	0.67 ^{N.S}	21.89**	1.20 ^{N.S}	1.63 ^{N.S}	0.31 ^{N.S}	16.70**	5.12*
98. Jul. - Sep.	PR	0.13 ^a	0.04 ^a	0.02 ^a	0.05	0.02 ^a	0.15	0.09 ^a	0.13 ^a
	TFQ	0.18 ^b	0.08 ^b	0.10 ^b	0.06	0.05 ^b	0.21	0.12 ^{ab}	0.18 ^{ab}
	TFPr	0.18 ^b	0.06 ^{ab}	0.05 ^c	0.06	0.07 ^b	0.18	0.15 ^b	0.21 ^b
	F-values	6.19**	4.28*	10.68**	0.98 ^{N.S}	11.81**	1.84 ^{N.S}	3.74*	4.21*
99. Apr. - Jun.	PR	0.13 ^a	0.04	0.04 ^a	0.06	0.07	0.13 ^a	0.12	0.17
	TFQ	0.18 ^b	0.10	0.13 ^b	0.09	0.11	0.15 ^a	0.15	0.19
	TFPr	0.18 ^b	0.08	0.11 ^b	0.07	0.11	0.20 ^b	0.15	0.28
	F-values	11.95**	2.65 ^{N.S}	6.48**	1.58 ^{N.S}	0.97 ^{N.S}	6.60**	1.98 ^{N.S}	3.56 ^{N.S}
99. Jul. - Sep.	PR	0.13 ^a	0.03 ^a	0.05	0.05	0.02 ^a	0.11	0.12 ^a	0.09 ^a
	TFQ	0.18 ^b	0.07 ^b	0.10	0.06	0.05 ^b	0.11	0.16 ^a	0.15 ^a
	TFPr	0.20 ^b	0.05 ^b	0.06	0.05	0.07 ^b	0.16	0.21 ^b	0.28 ^b
	F-values	7.77**	36.96**	0.75 ^{N.S}	0.11 ^{N.S}	4.43*	1.09 ^{N.S}	6.29**	20.29**
Mean	PR	0.13 ^a	0.04 ^a	0.03 ^a	0.05	0.04 ^a	0.13	0.10 ^a	0.13 ^a
	TFQ	0.17 ^b	0.08 ^b	0.11 ^c	0.07	0.08 ^b	0.15	0.12 ^b	0.18 ^b
	TFPr	0.19 ^b	0.06 ^b	0.07 ^b	0.06	0.08 ^b	0.17	0.16 ^c	0.25 ^c
	F-values	25.50**	8.33**	19.04**	2.80 ^{N.S}	8.36**	2.82 ^{N.S}	14.72**	25.50**

PR : Open Precipitation, TFQ : Throughfall in *Quercus mongolica* stand, TFPr : Throughfall in *Pinus rigida* stand.

* and ** indicate significances at 5% and 1% level, and N.S means not significant at 5% level.

Differences in letters in vertical columns indicate significant difference at 5% level for DMRT.

확조성과 관련한 연구(박국태 등, 1995)와는 약간 차이가 있었다. 수관통과우 중 신갈나무림은 Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺>NH₄⁺>Na⁺, 리기다소나무림은 Ca²⁺>NH₄⁺>K⁺>Na⁺>Mg²⁺으로 NH₄⁺ 농도가 증가한 결과를 보여 침엽수 임분의 수관통과우에서 NH₄⁺ 이온이 증가하였다는 연구(박영대 등, 1999)와 그 양상이 비슷하였다. 각 조사지점별 이온농도의 차는 리기다소나무림>신갈나무림>임외우의 순서로 나타났다. 이러한 결과는 조사지역(서천지역)이 갖는 지형이 동쪽 사면으로서 남동풍의 영향과, 리기다소나무 임분 주변이 완만한 구릉지의 형태로 개방되어 있는 외부적인 환경 영향이 크게 작용되었을 것으로 여겨진다. 대부분의 양이온에서는 임외우의 이온농도 변화와 수관통과우의 변화가 일치되는 경향을 보였다. 그러나, K⁺ 이온의 경우에는 이온농도의 증가 폭이 큰 것으로 나타났고, 이는 강우량의 다소에 의한 영향(주영특 등, 1999)이 작용된 것으로 판단할 수 있다. 또한 NH₄⁺ 이온농도는 봄과 가을철에 증가하였으며, Na⁺ 이온도 같은 경향을 나타내었다.

그러나, K⁺의 경우에는 조사 전기간 동안 증가와 감소 경향을 반복하였으며, 뚜렷한 계절적 특성은 나타나지 않았다.

신갈 지역의 임외우와 수관통과우의 음이온 농도의 변화를 보면, 이온농도의 증가와 감소의 폭이 침엽수인 리기다소나무림에서 크게 나타났다. 이온농도는 수관통과우 모두 SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻의 순으로, 임외우의 경우와 같은 양상을 보였다. 평균 음이온 농도는 리기다소나무림>신갈나무림>임외우의 순서를 나타내고 있었는데, 이는 활엽수림과 침엽수림으로 유입되는 임외우내 수용성 이온의 농도 비교 결과(장관순과 이수옥, 1995; 김종갑 등, 1998; 이종규와 김종갑, 1998; 박재현과 우보명, 1998; 주영특 등, 1999)에서 나타난 것과 유사한 경향이었다. 신갈나무림의 수관통과우에서 나타난 음이온의 시간적 변화는 임외우의 Cl⁻ 이온농도가 증가함에 따라 수관통과우에서도 증가하는 경향을 보이는 것이 대부분이었다.

리기다소나무림에서는 8~9월에 Cl⁻ 이온농도가 급격

히 증가하는 계절적 특성을 보였으며, 이때 임외우의 Cl^- 이온농도도 함께 증가하는 양상을 보였다. 리기다소나무림에서 Cl^- 이온농도의 증가 현상이 있었던 것은 수관통과시 K^+ 과 Mg^{2+} 이온이 식물체에서 함께 용탈된 결과(주영특 등, 1999)로 판단되었으며, Na^+ 이온의 영향은 비교적 적었던 것으로 생각된다.

또한 NO_3^- 이온의 경우는 리기다소나무림 수관통과우가 임외우에서 나타난 이온농도에 비하여 대체로 높은 농도를 유지하고 있었다. 특히 가을철에는 그 농도가 높게 나타났는데 이는 봄과 여름철보다 가을과 겨울철에 NO_3^- 이온농도가 증가한다(강공언 등, 1995; 박국태 등, 1998)는 바와 같은 계절적 영향을 받는 것으로 생각되었다. 이는 NO_3^- 가 산성원인물질로 수관을 통과하는 과정에서 활엽수와 침엽수의 수관층에 의해 차단되기 보다는 식물체에 흡착되어 있는 양이온과 함께 세탈 및 용탈되는 것(이현호, 1997)으로 판단할 수 있었다.

분석된 3개 음이온 중에서 가장 큰 변화를 보인 것은 SO_4^{2-} 이온농도로서, 다른 Cl^- 와 NO_3^- 이온농도의 변화와는 다른 경향을 보여주었는데, 수관통과우에서는 봄철의 임외우 변화양상과 같은 증감 현상이 반복되었다. 이와 같은 결과는 경기도 지역에서의 일반 임외우의 이온농도 중 SO_4^{2-} 의 농도가 계절적으로 봄에 가장 높게 나타났다는 것(강공언 등, 1995)과 그 변화 양상이 일치함을 알 수 있었다. 그러나, 수관통과우에서는 SO_4^{2-} 이온농도가 특이할만한 계절적 특성을 보이지 않았다. 조사기간 내내 증감 변화가 크게 나타나는 것은 신갈 지역이 고속도로와 인접한 지리적 조건에 의한 차량의 통행 및 배기가스 등 각종 인위적 원인에 의한 오염물질의 영향(조하만 등, 1998)이 컸을 것으로 생각된다.

임외우의 평균 이온농도에 대한 각 수관통과우의 평균 변화량은 신갈나무림에서 양이온이 $\text{K}^+ > \text{NH}_4^+ = \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$ 의 순이었고, 음이온은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- \geq \text{NO}_3^-$ 의 순으로 나타났다. 리기다소나무림에서는 양이온이 $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$, 음이온은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 의 순이었다. 두 수종의 양이온 중에서는 K^+ 과 Ca^{2+} 그리고 음이온 중에서는 SO_4^{2-} 이온농도가 가장 크게 증가한 것으로 나타났다. 이는 임내우의 이온농도 증가가 Ca^{2+} , K^+ 의 순으로 높게 나타나거나(김종갑 등, 1998), K^+ 의 증가량이 가장 컸다는 결과(장관순과 이수욱, 1995) 등과 유사한 경향이었다. 따라

서, K^+ 이온농도가 임외우에서는 비교적 낮은 농도였으나, 수관통과우에서는 가장 큰 증가의 변화를 보였던 것은 강우 발생시 수관층의 앞에서 용탈이 이루어진 것(Lovett et al., 1985)으로 생각되었다. 음이온에서는 두 수종 모두 SO_4^{2-} 이온농도가 가장 많이 증가하였는데, 리기다소나무림의 경우 그 증가가 현저하였다. 이는 소나무림의 수관통과우에서 SO_4^{2-} 이온농도의 증가가 다른 수종에 비해 높다는 것(Skeffington, 1981)과도 일치하였다.

반면, 이온농도의 변화량이 낮았던 것은 Na^+ 이었고, Cl^- 은 Na^+ 에 비해 상대적으로 큰 변화량을 보였다. 이와 같은 결과는 강우에서 NaCl 을 자연발생원인 해염물질(산성우조사법 연구회, 1996)로 보았을 때, Na^+ 과 Cl^- 의 비율이 일반적으로 0.86이라는 것(Brewer, 1975; 박국태 등, 1995)보다 낮아지는 결과였다. 즉, 신갈지역에서는 해염기원(NaCl)의 유입외에 CaCl_2 , KCl , MgCl_2 등이 임외우에 유입된 것으로 생각되었다. 그리고, 이는 Cl^- 이온농도가 수관통과우에서 증가한 것은 K^+ , Mg^{2+} 과 함께 식물체로부터 용탈의 영향인 것으로 생각된다.

3.2. 이온농도간의 상관관계

서천 지역의 각 이온 상호간의 이온농도의 상관분석 결과를 Table 6에 나타내었다. 임외우와 신갈나무림의 수관통과우에서 H^+ 와 각 이온간에는 부의 상관을 보였으며, 유의성은 인정되지 않았다. 그러나, 리기다소나무림의 수관통과우에서는 다른 결과를 나타내었다. 이는 서울지역과 같이 서천지역에서도 임외우의 pH 값은 여러 이온들 간의 상호 복합적 작용에 의해 결정된다는 것(Dikaiakos, 1990; William, 1990; 박국태 등, 1995)으로 생각할 수 있었다. 임외우의 각 이온 상호간의 상관관계는 Ca^{2+} 이 Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ 의 양이온과, Na^+ 이 NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 의 이온과의 상관에서 유의성이 인정되지 않았던 것을 제외하면 대부분 유의한 상관관계를 인정할 수 있었다. 그리고 Na^+ 이 Cl^- 보다 NO_3^- 과 유의한 상관을 보인 것은 서천 지역의 임외우에 NaNO_3 가 유입되어 영향을 주고 있는 것(박국태 등, 1995)으로 볼 수 있다. 그리고, 임외우의 Ca^{2+} 이온농도가 음이온인 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 와 유의성이 인정된 반면에 NH_4^+ 는 Cl^- , SO_4^{2-} 와 상관을 나타내고 있지 않았다. 이와 같은 결과는 강수의 산성화에 중화작용을 하는 Ca^{2+} 과 NH_4^+ 중(산성우조사법

Table 6. Correlation coefficients between the ion concentrations of the open precipitation and the throughfall in Seochun, Yongin

	H ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Open precipitation (n=28)								
Ca ²⁺	-0.177							
Mg ²⁺	-0.375*	0.321						
K ⁺	-0.181	-0.200	0.318					
Na ⁺	-0.278	0.331	0.306	0.454*				
NH ₄ ⁺	-0.116	0.163	0.335	0.251	0.297			
Cl ⁻	-0.210	0.469*	0.441*	0.352	0.111	0.119		
NO ₃ ⁻	-0.081	0.588**	0.511**	0.485**	0.593**	0.383*	0.695**	
SO ₄ ²⁻	-0.155	0.570**	0.239	0.213	0.359	0.368	0.381*	0.537**
Throughfall(<i>Quercus mongolica</i>) (n=27)								
Ca ²⁺	-0.175							
Mg ²⁺	-0.192	0.351						
K ⁺	-0.293	-0.017	0.454*					
Na ⁺	-0.195	0.124	0.403*	0.496**				
NH ₄ ⁺	-0.202	-0.139	0.246	0.232	0.549**			
Cl ⁻	-0.247	0.094	0.334	0.623**	0.418*	0.084		
NO ₃ ⁻	-0.157	0.129	0.229	0.591**	0.124	0.372	0.627**	
SO ₄ ²⁻	-0.140	0.358	0.657**	0.129	0.523**	0.508**	0.503**	0.473*
Throughfall(<i>Pinus rigida</i>) (n=27)								
Ca ²⁺	0.198							
Mg ²⁺	0.055	0.258						
K ⁺	-0.030	0.331	0.446*					
Na ⁺	-0.120	0.147	0.437*	0.507*				
NH ₄ ⁺	0.481*	0.028	0.183	0.300	0.003			
Cl ⁻	-0.144	0.029	0.665**	0.632**	0.772**	0.105		
NO ₃ ⁻	0.106	0.355	0.495**	0.726**	0.394*	0.410*	0.504**	
SO ₄ ²⁻	0.178	0.227	0.506**	0.592**	0.475*	0.746**	0.460*	0.741*

*: Significant at 5% level, **: Significant at 1% level.

연구회, 1996)에서 Ca²⁺ 이온에 의한 영향이 더 크게 작용되었을 것으로 생각되며, 또한 대기중의 CaCO₃에 의한 영향(이기호와 허철구, 1996)이 작용되었던 것으로 여겨진다. 또한 음이온의 경우, Cl⁻과 NO₃⁻ 이온농도는 대부분의 양이온과 유의한 상관관계를 보여 Cl⁻ 이온의 상당량이 NaCl 뿐만 아니라 KCl, MgCl₂, CaCl₂ 등의 형태로 유입되었음을 나타내는 것(박용남과 송기형, 1993)으로 보였다. SO₄²⁻는 Ca²⁺과 음이온들간에만 높은 상관관계를 보였다. 이는 SO₄²⁻가 대기 중에 CaSO₄의 형태로 존재하여 강우에 유입된 것(박국태 등, 1995)임을 알 수 있었다.

신갈 지역의 이온농도 상호간의 상관분석의 결과는 Table 7과 같다. 이 지역 임외우에서는 일부 이온을 제외한 대부분의 이온간에 있어서 유의성이 인정되지 않았다. 그 중에서 Ca²⁺과 Mg²⁺(r=0.399), 그리고 Cl⁻과 Mg²⁺(r=0.561), K⁺(r=0.675)이, SO₄²⁻와 NH₄⁺(r=

0.638), NO₃⁻(r=0.404) 사이에는 유의성이 인정되었다. 음이온인 SO₄²⁻가 NH₄⁺와 높은 상관(r=0.638)을 보인 것은 강우의 산성화가 Ca²⁺과 NH₄⁺에 의해 중화된다(산성우조사법연구회, 1996)고 하였으므로, 신갈지역의 강우는 (NH₄)₂SO₄의 형태로 NH₄⁺가 중화 역할을 한 것(이수욱과 장관순, 1994)으로 판단된다.

수관통과우에서는 강우와 달리 각 이온간에 비교적 높은 수준의 유의성이 인정되고 있었다. 신갈나무림의 경우 NH₄⁺를 제외한 양이온 농도가 다른 양이온들과 음이온간의 관계에서도 대부분 유의성이 인정되었다. 리기다소나무림 수관통과우에서도 신갈나무림의 수관통과우와 같이 유사한 유의성이 인정되었으며, 상관성도 더 높게 나타났다. 이는 수관통과우의 이온농도가 임외우보다 증가하였다는 점에서 볼 때, 수목의 수관층이나 표면에 침적되어 있는 물질들이 수분과 접촉하면서 지표면으로 유하하면서 각종 이온의 세탈과 용탈

Table 7. Correlation coefficients between the ion concentrations of the open precipitation and the throughfall in Shingal, Yongin

	H ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Open precipitation (n=28)								
Ca ²⁺	-0.033							
Mg ²⁺	-0.179	0.399*						
K ⁺	-0.144	-0.141	0.105					
Na ⁺	0.121	0.206	0.085	0.032				
NH ₄ ⁺	-0.107	-0.055	-0.055	0.142	0.239			
Cl ⁻	-0.253	0.175	0.561**	0.675**	0.104	0.195		
NO ₃ ⁻	0.082	0.271	0.068	0.009	0.349	0.321	0.356	
SO ₄ ²⁻	-0.088	0.075	0.380	0.099	0.454*	0.698**	0.286	0.404*
Throughfall(<i>Quercus mongolica</i>) (n=28)								
Ca ²⁺	0.217							
Mg ²⁺	-0.238	0.189						
K ⁺	-0.078	0.170	0.200					
Na ⁺	-0.305	0.282	0.214	0.355				
NH ₄ ⁺	-0.140	-0.073	0.289	0.470*	0.229			
Cl ⁻	-0.198	0.437*	0.583**	0.482*	0.658**	0.362		
NO ₃ ⁻	0.079	0.571**	0.591**	0.370	0.267	0.209	0.470*	
SO ₄ ²⁻	-0.290	0.430*	0.474*	0.454*	0.443*	0.489*	0.313	0.442*
Throughfall(<i>Pinus rigida</i>) (n=26)								
Ca ²⁺	0.038							
Mg ²⁺	-0.319	0.355						
K ⁺	-0.334	0.226	0.280					
Na ⁺	-0.379	0.402*	0.268	0.462*				
NH ₄ ⁺	-0.159	0.309	0.030	0.214	0.119			
Cl ⁻	-0.274	0.164	0.437*	0.539**	0.580**	0.178		
NO ₃ ⁻	0.060	0.618**	0.467*	0.393*	0.462*	0.500**	0.477*	
SO ₄ ²⁻	-0.004	0.512**	0.450*	0.450*	0.541**	0.665**	0.292	0.749**

* : Significant at 5% level, ** : Significant at 1% level.

을 증가(김종갑 등, 1998; 이충규와 김종갑, 1998)시킨 것으로 판단된다.

IV. 결 론

최근 대기오염 문제는 지구환경적 차원에서 생태계 영향과 관련하여 매우 중요시되고 있다. 이러한 대기 수분의 산성화로 오염물질에 의한 피해 규모가 심화될 것이 예상된다. 이에 본 연구에서는 공업시설 및 고속도로의 인접지와 산림을 대상으로 임외우와 수관통과우 등에 대한 산성도와 화학적 조성을 분석 검토하여 대기환경에 대한 산림의 국지적인 규모의 산성화 가능성을 구명하고자 하였다. 조사를 통해 산림지역 내 수관통과우의 화학적 성분 농도 변화를 각 조사지역별 및 수종별로 비교 검토하여 얻어진 결과는 다음과 같았다.

1. 고속도로라는 오염원과의 거리를 달리한 본 연구의 경우 동일한 범위의 지역이라도 오염물질 배출 지점(고속도로)에 근접거리일수록 pH 값이 낮아지는 경향이였다.
2. 수관통과우의 pH 변화는 신갈나무림에서 임외우의 pH 값을 완화시키는 완충능이 보였으며, 리기다소나무림에서는 임외우의 pH 변화에 따라 수관통과우의 pH도 변화하는 것으로 나타나 수종간의 차이성을 보였다.
3. 각 임분별 임외우의 화학적 조성은 Ca²⁺과 NH₄⁺, 그리고 SO₄²⁻의 농도가 높았으며, 이 외의 소량 원소들은 채취지점별로 차이를 보이는 특성을 나타내었다.
4. 수관통과우에서 나타난 이온농도의 변화는 전체적으로 모든 지점에서 증가하였는데, 이러한 결과는 수관통과시 임목체 표면에 집적되어 있는 대

기 강하물이 수분과 함께 세탈되었거나, 엽내 양료의 용탈로 수관통과우의 화학적 성분 농도가 변화하는 것으로 파악되었다.

이상의 결과를 통해서 보면, 수관통과우 등의 강우는 수목에 흡착하고 있는 오염물질을 씻어내기도 하고 직접 제공한다는 의미도 포함하고 있어 산림 피해의 중요한 원인이 되리라 예상된다. 따라서 본 연구의 결과로 보면, 대기 수분의 산성도와 대기 수분이 갖고 있는 산성화의 가능성이 예측될 수 있으며, 이와 동시에 강우가 산림을 통과하면서 나타나는 산성도 및 화학적 조성의 농도 변화가 지역간, 수종간에 있어서 차이를 나타내고 있었다. 이와 같은 결과는 오염원-대기-산림으로 연계되는 대기오염물질의 이동특성에 대한 기초 연구자료로 이용될 수 있을 것으로 보며, 이는 환경변화에 대한 산림의 역할과 식생 보전 영역의 연구에 있어 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

V. 인용문헌

- 강공언, 강병욱, 김희강, 1995: 江華地域 降水의 汚染度 評價에 關한 研究. 韓國大氣保全學會誌, 11(1), 57-68.
- 김종갑, 1992: 온산공단주변의 대기오염이 산림식생에 미치는 영향. 경상대학교 박사학위논문, pp.59.
- 김종갑, 田中淳一, 福岡義隆, 1998: 대기오염지역과 비오염지역의 강우의 이온 특성. 한국생태학회지, 21(3), 195-201.
- 민경택, 1971: 경부 고속도로상의 안개구역에서의 안개 발생에 관한 연구. 한국기상학회지, 12(1), 13-24.
- 민일식, 이수욱, 1990: 인공산성우가 산림토양의 완충능에 미치는 영향. 한국임학회지, 79(4), 376-387.
- 박국태, 문경언, 허정구, 홍현복, 1995: 경기도 성남시, 인천시, 강원도 강릉시, 충북 청원군 강수의 화학적 성분에 관한 비교 연구. 韓國環境科學會誌, 4(3), 285-294.
- 박국태, 김창호, 홍현복, 류오현, 양일호, 임광수, 민덕식, 1998: 비무장지대에 인접한 경기도 농촌지역 강수의 화학적 성분에 관한 기초 연구. 한국대기보전학회지, 7(2), 157-164.
- 朴榮大, 李敦求, 金東燁, 1999: 京畿道 廣州 地方 잣나무림, 落葉松林, 潤葉樹林에서 樹冠通過雨, 樹幹流, 土壤水內 養料動態. 韓國林學會誌, 88(4), 541-554.
- 박용남, 송기형, 1993: 충북 청원군의 강수중의 이온들간의 상관관계. 한국환경과학회지, 2(4), 337-346.
- 朴在鉉, 禹保命, 1997: 山林流域內 降水로부터 溪流水質에 미치는 影響因子 分析-pH, 溶存酸素, 電氣傳導度-. 韓國林學會誌, 86(4), 489-501.
- 朴在鉉, 禹保命, 1998: 山林流域內 降水, 樹冠通過雨, 土壤水 및 溪流水 水質의 化學的 特性. 韓國林學會誌, 87(1), 62-73.
- 산성우조사법연구회, 1996: 산성비 조사법. 도서출판 동화기술, pp.511.
- 이창근, 1988: 대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향. 과학기술처 연구보고서, pp.194.
- 이기호, 허철구, 1996: 제주도 강우의 화학적 조성 특성에 관하여. 한국환경과학회지, 5(6), 739-748.
- 이수욱, 장관순, 1994: 산성우에 대한 산림생태계의 민감도 및 자정기능(I)-강우의 산성도와 식생활력도(TVI)를 중심으로-. 한국임학회지, 83(4), 460-472.
- 이충규, 김종갑, 1998: 산림내 강우에 의한 산성강하물의 영향 평가. 한국생태학회지, 21(5-1), 449-456.
- 李憲浩, 1997: 山地 物循環 素過程에 있어서 水質變化의 追跡分析에 의한 山林의 環境的 淨化機能의 計量化 研究. 韓國林學會誌, 86(1), 56-68.
- 장관순, 이수욱, 1995: 산성우에 대한 산림생태계의 민감도 및 자정기능(II)-식생층과 토양층 용탈이온 분석을 중심으로-. 한국임학회지, 84(1), 103-113.
- 정용문, 1987: 인공산성우가 소나무 유묘 및 개나리 삼목묘의 생장, 식물체 내 함유성 성분 및 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 동국대학교 대학원 박사학위논문, pp.70.
- 조하만, 최재천, 김지영, 전영신, 김 산, 1998: 1994~1997년 중부지방에 내린 강수의 화학적 특성에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 14(6), 589-598.
- 朱榮特, 陳鉉五, 孫堯丸, 吳鍾敏, 鄭德永, 1999: 降雨와 植生の 相互作用이 樹冠通過雨 및 樹幹流의 化學的 性質變化에 미치는 影響. 韓國林學會誌, 88(2), 149-156.
- 한국도로공사, 1999. www.freeway.co.kr/frame7.html/고객지원실.
- Binns, W. O. and D. B. Redfern, 1983: *Acid rain and forest decline in West Germany*. Forestry Commission Research Development Paper, 131:13.
- Bubenick, D. V., 1984: *Acid Rain Information Book*.
- Brewer, P. G., 1975: Minor elements in sea water. In *Chemical Oceanography*. Academic Press, New York 1:417.
- Cole, D. W. and D. W. Johnson, 1977: Atmospheric sulfate additions and cation leaching in a Douglas-fir ecosystem. *Water Resource Research*, 13(2), 313-319.
- Dikaiakos J. G., 1990: Rainwater composition in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 27(13), 1993-2008.
- Evans, L. S., 1984: Botanical aspects of acidic precipitation. *Bot. Rev.*, 50, 449-490.
- Fowler, D., 1978: Wet and dry deposition of sulfur and nitrogen compounds from the atmosphere, effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems, 9-25.
- Finlayson-Pitts, B. J. and J. N. Pitts, 1986: *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. John Wiley, New York, U.S.A., p.1098.
- Galloway, J. N. and G. E. Likens, 1981: Acid precipitation: the importance of nitric acid. *Atmosphere Environ.*, 15(6), 1081-1085.
- Georgii, H. W., 1986: *Atmospheric pollutants in forest areas*. Reidel Publishing Co., Dordrecht. Holland,

- pp.287.
- Kim, G. T., 1986: Effects of simulated acid rain on growth and physiological characteristics of *Ginkgo biloba* L. seedlings and on chemical properties of the tested soil. Seoul Nat'l Univ. Ph. D. Dissertation, pp.46.
- Khemani, L. T., G. A. Momin, S. N. Medha, R. Prakasa, P. D. Safai and A. S. R. Murty, 1987: Influence of alkaline particulates on pH of cloud rain water in India. *Atmos. Environ.*, **21**(5), 1137-1145.
- Lovett, G. M., S. E. Lindberg, D. D. Ritcher and D. W. Johnson, 1985: The effects of acidic deposition on cation leaching from three deciduous forest canopies. *Can. J. For. Res.*, **15**, 1055-1060.
- Manion, P. D. and D. Lachance, 1992: *Forest decline concepts*. APS press. St. Paul. MN., pp.249.
- Parker, G. G., 1990: Evaluation of dry deposition pollutant damage, and forest health with throughfall studies. In mechanism of forest responses to acidic deposition. Luiser, A. A. and S. G. Haines(eds.). Springer-Verlag. New York. 10-61.
- Seinfeld, J. H., 1986: *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley, New York, U.S.A., 696-738.
- Skeffington, R. A., 1981: Soil properties under three species of tree in southern England in relation to acid deposition in throughfall. -B. Ulrich and J. Pankrath(eds.). *Effects of accumulation of air pollution in forest ecosystem*, 219-231.
- Vermeulen, A. J., 1979: *The acidic precipitation phenomenon, polluted rain*. 8-49.