

대관령 지역의 산림 소유역과 농경지 소유역의 수질 비교

신 영 규*

Comparison of Water Quality between Forested and Agricultural Subcatchments in Daegwallyong Area

Young-Kyu Shin*

요약 : 본 연구에서는 대관령 지역의 산림 및 농경지 소유역을 대상으로 주 1회의 유량 및 수질 조사를 실시하고 유량 및 수질 항목간의 상관관계를 분석하였다. 산림 소유역의 수질 변화는 적었던 반면 농경지 소유역에서는 화학비료 및 가축분 퇴비의 시용과 토양 유실로 인해 큰 폭의 수질 변화를 보였다. 용존산소량(DO)은 두 소유역에서 유량보다는 수온과 매우 뚜렷한 음의 상관관계를 나타냈다. 산림 소유역에서는 농경지 소유역에 비해 유량과 총질소(T-N) 및 K^+ 의 양의 상관관계가 뚜렷하게 나타났다. 반면, 농경지 소유역에서는 부유물질 총량(TSS), 총인(T-P) 및 화학적 산소요구량(COD)이 유량과 높은 상관성을 보였다. 대관령 지역에서는 도암호의 수질 오염, 특히 T-P의 증가가 심각하다는 점에 비추어 볼 때 수질 개선을 위해서는 농경지의 토양 유실 방지가 매우 중요하다. 특히 고랭지 채소 파종기에 해당하는 6월말에서 7월초에 이르는 기간의 토양 및 양분유실이 가장 심각한 것으로 나타나 이를 줄이기 위한 친환경농법 도입이 요구된다.

주요어 : 수질, 토지이용, 고랭지농업, 대관령, 도암호

Abstract : Weekly monitoring of discharge and water quality in forested and agricultural subcatchments were performed to understand the difference of water quality caused by land uses in Daegwallyong area. Correlations between water quality variables including discharge were analyzed for the same purpose. There was little variation of water quality in forested subcatchment. On the other hand, the range of water quality variation in agricultural subcatchment was wide due to soil loss and the application of chemical fertilizers and livestock manure. Dissolved oxygen(DO) had strong negative correlation with discharge in both subcatchments. Total nitrogen(T-N) and potassium ion(K^+) had stronger positive correlation with discharge in forested subcatchment than in agricultural one. On the other hand, total suspended sediments(TSS), total phosphorus(T-P), and chemical oxygen demand(COD) had stronger correlation with discharge in agricultural subcatchment than in forested one. As water pollution of the Doam Lake, especially the increase of T-P is serious, soil conservation is very important to improve water quality. In particular, the loss of soil and nutrients from late June till early July were more serious than any other seasons, therefore it is necessary to apply environmentally sustainable methods of cultivation.

Key Words : water quality, land use, highland agriculture, Daegwallyong, Doam Lake

1. 서론

강원도 평창군 도암면 황계리 일대의 대관령 지역은 냉량습윤한 기후를 이용한 대규모 목축과 고랭지 농업이 성행하여 1970년대 이래로 독특한 농촌 경관을 보여온 곳이다. 최근 십여 년 동안 이 지

역에서는 목축업이 위축된 반면, 배추 등 고랭지 채소 재배는 꾸준히 증가하였다(평창군, 1970~2002). 그럼에도 불구하고 농경지의 토양 보전을 위한 노력이 부족하여 토양유실이 증가하였고 그에 따라 양분 유실 및 수질 오염이 심화되었다(조병옥, 1999; 박철수, 2002). 이로 인해 이 지역 하류에 위

* 국립환경연구원 책임연구원(Research Fellow, National Institute of Environmental Research), soilmania@hanmail.net

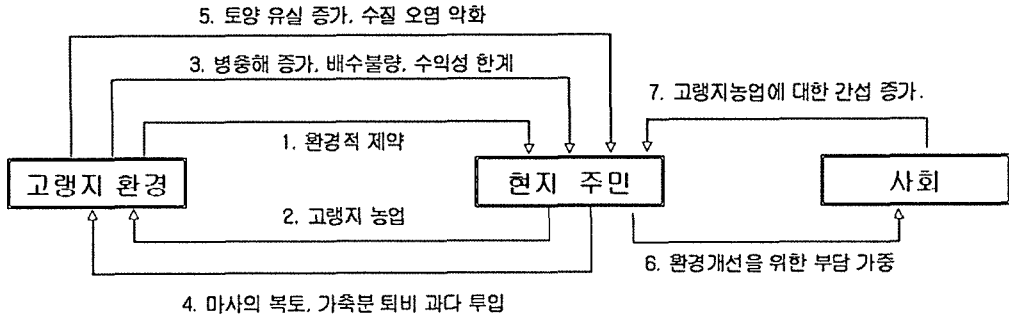


그림 1. 고령지에서의 자연, 인간 및 사회의 상호 관계

치한 도암호의 방류 문제를 둘러싼 발전소와 하류 지역 주민들의 갈등이 심화되어 왔다(한동준, 2003).

이 지역의 토양 유실과 수질 오염이 심각함에도 불구하고 지금까지 대관령 지역에서 이루어진 연구들에서는 주로 월 1회 이하의 수질 조사만이 이루어졌기 때문에, 짧은 경작 기간 동안 다량의 비료를 여러 차례 투입하는 고령지농업으로 인한 수질 변화를 파악하는 데 한계가 있었다(전방욱·박광하, 1991, 1992; 허인량 등, 1995, 2001). 또한, 기존 연구에서는 유량 측정을 하지 않았거나 수질 해석에 있어 유량 자료를 활용하지 않음으로써 유량 증감에 따른 수질 변화를 구체적으로 다루지 못하였다.

최근 10여 년 동안 고령지 채소 재배의 증가로 인해 발생하는 환경문제, 즉 토양유실과 수질 오염에 초점을 맞춘 자연지리학 분야의 연구물은 찾기 힘든 실정이다. 이러한 주제가 단지 농학이나 환경공학 분야에 국한되지 않고 지리학적 주제가 될 수 있는 것은 고령지 채소를 재배하는 데 있어 닥쳐오는 여러 위협 요소들, 예를 들면 병충해 증가에 대해 농민들이 어떻게 인식하고 주어진 자연환경의 제약 속에서 어떻게 대처하는가와도 관련이 있기 때문이다(그림 1).

본 연구에서는 대관령 지역의 산림 및 농경지 소유역을 대상으로 주 1회의 유량 및 수질 조사를 실시하여 토지 이용에 따른 수질 특성, 특히 수질 항목간의 상관 관계와 유량 증감에 따른 수질 변화가 산림 소유역과 농경지 소유역에서 각각 어떻게 나타나는지 살피고자 한다. 본 연구에서는 고령지농업에 따른 수질 변화를 짧은 시간 간격에서 밝힘으로써 수질 오염 저감을 위한 친환경 농법 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 단순한 토지 이용을

보이는 소유역을 대상으로 한 유량 및 수질 조사는 향후 고령지를 대상으로 한 수질오염 모델링에 있어서 유용한 실측 자료로 활용될 것으로 전망된다.

2. 연구지역 개관

1) 소유역 개관

본 연구가 이루어진 산림 및 농경지 소유역은 강원도 평창군 도암면에 위치한 송천 유역, 이른바 대관령 지역에 속해 있다(그림 2). 대관령 지역은 해발 700m 이상의 고지대에 위치해 있으며 냉량습윤하고 강설량이 많은 것이 특징이다. 이 일대에는 고위평탄면과 산록완사면이 잘 발달되어 있으며, 화강암의 심층풍화층이 두껍게 나타난다(장재훈, 1996; 기근도, 1999).

산림 및 농경지 소유역은 향후 오염물 부하량 계산까지 고려해서 자동 유량 측정이 용이하도록 하천이 직사각형 단면의 구조물(다리 혹은 수로)을 통과하는 곳으로 선정하였다. 산림 소유역은 횡계리 왕산골 계곡의 상류이며 능경봉과 고루포기산을 잇는 능선의 북쪽에 위치해 있다. 농경지 소유역은 횡계 시가지 남서쪽인 수하리 삼현동 부근이며 소하천은 동쪽으로 흘러 송천에 유입한다. 산림 소유역은 면적이 0.775km²로 0.523km²인 농경지 소유역에 비해 크다(표 1).

고령지 채소의 높은 수익성으로 인해 대관령 지역에서는 웬만한 고도와 경사를 가진 곳은 대부분 농경지로 이용된다. 이로 인해 산림 소유역은 농경지 소유역보다 고도가 더 높고 경사가 보다 급한

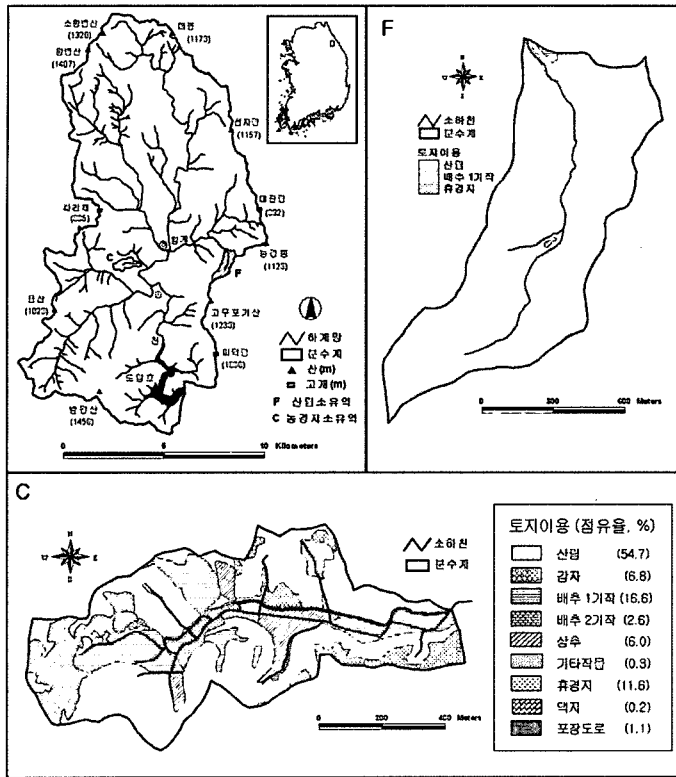


그림 2. 연구 지역 개관

표 1. 소유역별 지형 특성 및 토양 분포

	면적(km ²)	평균고도(m)	평균경사(%)	방향	기반암	토양
산림 소유역	0.775	917.7	22.1	북	화강암 퇴적암	월정통, 무이통, 신불통
농경지 소유역	0.523	774.7	15.6	동	화강암	월정통, 차항통, 무이통, 이목통

곳에 위치해 있다. 또한, 자동 유량 측정이 용이하도록 단면이 일정한 지점을 선정하는 과정에서 불가피하게 계곡의 방향이 서로 다른 소유역이 선정되었다. 농경지 소유역의 기반암은 쥐라기에 관입한 화강암이며 풍화를 많이 받은 상태이다. 산림 소유역 역시 지질도에 화강암 분포지역으로 표시되어 있고 하상에 화강암이 드러나 있다. 그러나, 하상에 퇴적암으로 이루어진 자갈이 섞여있는 것으로 미루어 계곡 정상부는 소유역 남쪽에 분포하는 트라이아스기 녹암통 혹은 동고층의 퇴적암 분포지역과 연결된 것으로 보인다(국립지질조사소, 1975; 대한지질학회, 1999).

산림 소유역은 99%가 산림으로 구성되어 있으며, 하천 주위와 유량 측정 지점 부근의 농경지 및 휴경지를 제외하면 화강암 기반의 갈색삼림토양인 월정통(양토)으로 구성되어 있다(NIAST, 2000). 농경지 소유역은 2002년 필자의 현지 조사를 기준으로 하면 배추, 결구 상추, 감자 등 작물 재배 면적이 전체 유역면적의 32%를 차지한다(그림 2). 산지 및 구릉지는 산성의 갈색삼림토양인 월정통과 차항통(양토)으로 구성되어 있으며 하천 주위의 농경지는 주로 무이통(돌이 있는 양토)과 이목통(사양토)으로 이루어져 있다(NIAST, 2000)¹⁾. 농경지 소유역에서는 대관령 지역의 다른 농경지와

표 2. 농경지 소유역의 월강수량 및 월유출량 변화

	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	합계
강수량(mm)	204.5	138.8	366.5	1236.4	159.7	210.6	9.2	136.8	52.1	103.9	102.9	232.7	2954.1
유출량(mm)	103.8	35.6	83.1	783.4	233.8	83.9	56.2	48.8	27.1	21.4	100.8	260.3	1838.2
유출율(%)	50.7	25.7	22.7	63.4	146.4	39.9	611.3	35.7	52.0	20.0	98.0	111.8	62.2

* 대관령 기상대 강수량자료(2002년 5월 ~ 2003년 4월).

마찬가지로 감자와 채소를 윤작하는 2년 2작이 주로 이루어지고 있으며 화강암 풍화물인 '마사'를 다량으로 복토하고 있다²⁾.

대관령 기상대의 관측 자료에 따르면, 본 연구가 이루어진 2002년 5월부터 2003년 4월까지의 총강수량은 2954.1mm로 평년값(1717.1mm)에 비해 매우 높았다(표 2). 특히, 8월 31일 하루 동안 712.5mm가 내린 태풍 루사(4일간 총강수량 761.5mm)를 포함해 7.8월에 많은 강수가 집중된 점이 주목할 만하다. 두 소유역 가운데 결측 기간이 적고 겨울철에도 수위 실측이 이루어진 농경지 소유역에서는 총 2954.1mm의 강수 가운데 1838.2mm가 유출되어 62.2%의 유출율을 보였다(표 2)³⁾. 한편, 본 연구지역은 겨울철에 눈이 많이 내리고 오랜 기간 쌓여 있다가 이른 봄부터 녹기 때문에 3월말과 4월초에는 강수량에 비해 유량 및 퇴적물 농도가 높게 나타난다(신영규, 2004).

2) 대관령 지역 고랭지 농업의 특징

현재 대관령 지역에서는 고랭지 채소의 재배가 늘면서 화강암 풍화물인 '마사'의 복토가 널리 행해지고 있다. 평창군 일대의 채소재배 농가를 대상으로 한 조사에 따르면, 마사의 평균 복토량은 10a 당 220톤이었으며, 복토의 목적으로 병충해 방제를

돕는 농가가 70%를 넘었다(이춘수 등, 2002a). 그 밖의 요인으로 배수 조건을 개선하고 논을 밭으로 개량하기 위해서, 그리고 작업의 편의와 상품성 증가를 위해서 복토가 실시되고 있다.

윤작에 따른 병충해 방제는 마사의 복토 이외에도 2년 2작의 윤작(감자-배추, 감자-당근 등)을 하는 방법과 농약이나 천적을 이용한 방제를 들 수 있다. 그러나 이러한 방법은, 한번도 작물이 경작된 적이 없는 마사를 복토하는 것에 비해 방제효과가 낮고 일시적인 것으로 인식되고 있다. 대관령 일대에는 화강암의 심층풍화층이 두껍게 발달되어 있어(장재훈, 1996; 기근도, 1999), 현지에서 쉽게 마사를 구할 수 있는 조건을 갖추고 있다. 그리고 객토사업 지원을 위한 용자제도를 활용하면 1ha당 120만원까지 지원받을 수 있기 때문에 경제적 부담을 크게 느끼지 않게 된다⁴⁾.

농경지에 모래의 함량이 높은 마사를 복토함으로써 인해 수분 및 양분 보유력은 이 지역의 주요 토양종인 차항토, 월정토 및 오대토에 비해 떨어지는 것으로 나타났다(박철수, 2002; NIAST, 2002). 이러한 단점을 보완하기 위해 마사의 복토와 함께 다량의 퇴비(3.9톤/10a)와 화학비료(N-P-K 각각 23-18-19kg/10a)가 투입되고 있다(이춘수 등, 2002a). 그리고 연구 지역을 포함한 고랭지 배추

표 3. 농경지 소유역의 주요 작물 및 작형별 재배 방법

작물 및 작형	파종/이식 시기	수확 시기	시비 방법*	비고*
감자	5월 중순(파종)	9월 하순	전량 밀거름	생육기간 약 100일(수미)
배추 1기작	6월 하순(이식)	8월 하순	밀거름외에 이식후 15일마다 웃거름	육묘 15~20일 이식후 55~60일이면 수확가능
	6월 상순(이식)	8월 상순		
배추 2기작	8월 중순(이식)	10월 중순		
상추(결구상추)	7월 상순(이식)	8월 하순	밀거름외에 본잎 7매 및 10매, 결구기 등 웃거름 3회	육묘 25~30일

* 고령지농업시험장(1999), 고령지농업시험장(2002).

표 4. 작물별 표준시비량 단위: kg/10a

작물	비료성분	총량	밀거름	웃거름		
				1회	2회	3회
감자	질소(N)	15	15			
	인산(P)	15.8	15.8			
	가리(K)	13	13			
배추	질소(N)	32	11	7	7	7
	인산(P)	7.8	7.8			
	가리(K)	19.8	7.8	3	3	6
	퇴비	3000	3000			
	계분	200	200			
	석회	100~120	100~120			
	붕사	1~2	1~2			
겉구상추	질소(N)	20	12	3	3	2
	인산(P)	12	12			
	가리(K)	15	9	3	2	1
	퇴비	2000	2000			

농업과학기술원(1999), 고행지농업시험장(2002) 등을 토대로 재구성.

재배농가의 가축분 퇴비 사용량을 조사한 이춘수 등(2002b)에 의하면, 91.4%의 농가에서 평균 1ha당 9920kg의 가축분 퇴비를 사용한다.

고랭지 농업의 주요 작물이 감자에서 채소로 바뀌면서 비료의 투입량이 증가하였다. 일반적으로 감자는 고랭지 채소에 비해 재배 기간이 길지만 비료 소요량은 적다. 반면, 배추나 상추는 비료 소요량이 크고 밀거름 외에 보통 3회의 웃거름을 요한다(표 3, 표 4).

고랭지 채소의 재배 기간은 주로 6월 하순부터 8월 하순으로 다량의 비료가 투입되는 기간이면서 강우량이 많은 기간이기 때문에 농경지의 양분 유실의 위험이 높다. 게다가 복토된 마사는 양분 용탈이 용이하고 토양유실에 취약하기 때문에 강우 시 농경지로부터 다량의 오염물이 토양과 함께 하천으로 유입된다(박철수, 2002). 이 지역의 오염물 발생부하량의 대부분이 가축에서 비롯된다는 선행 연구에도 불구하고, 가축분뇨는 퇴비화되어 농경지에 투입됨으로 인해 수질 개선을 위한 노력은 농경지의 토양 및 양분유실 방지에 집중되어야 한다(허인량 등, 2001; 신영규·김종욱, 2004).

3. 연구 방법

본 연구에서는 산림 및 농경지 소유역을 대상으로 2002년 5월 2일부터 2003년 5월 3일까지 주 1회, 총 53회의 유량 및 수질 조사를 시도하였다. 농경지 소유역에서는 총 53회의 자료 획득에 성공하였으나 산림 소유역에서는 겨울철에 진입로에 눈이 많이 쌓여 접근이 곤란하였고 하도에 얼음이 얼어서 2002년 12월 14일부터 2003년 3월 29일까지 16주간 결측되어 총 37회의 자료를 얻었다. 매주 수질 시료 채취시 산림 및 농경지 소유역의 하폭을 각각 16개와 12개로 나누고 자를 이용하여 수위를 측정하였다. 그리고, 수위에 따라 부유물을 이용한 표면유속 측정과 프라이스식 유속계를 이용한 유속 측정을 실시하여 수위-유량 관계식(식 1, 식 2)을 작성하였고, 이를 토대로 수위를 유량으로 환산하였다.

$$Q_f = H_f^{1.6756} (R^2 = 0.9981) \quad (식 1)$$

$$Q_c = H_c^{1.6297} (R^2 = 0.9946) \quad (식 2)$$

여기서 Q_f 와 Q_c 는 각각 산림 및 농경지 소유역의 유량(m^3/sec)이며 H_f 와 H_c 는 각각 산림 및 농경지 소유역에서 측정된 수위(mm)를 나타낸다.

수질시료는 잎이나 나뭇가지 등의 부유물을 피해 플라스틱 컵으로 표면에서 떠서 플라스틱 병에 담은 방식으로 채취하였다. 시료의 수질 분석은 수질오염 공정시험방법(환경부, 1997)에 준하여 실시하였으며 분석 항목은 pH, 전기전도도(EC), 용존 산소량(DO), 생화학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물질 총량(TSS), 암모늄태 질소(NH_4-N), 질산태 질소(NO_3-N), 총질소(T-N), 인산염인(PO_4-P), 총인(T-P), 치환성 양이온(K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) 등이다.

유량 및 수질 조사 결과에 대해 상관분석을 실시하여 수질 항목간의 상관성과 유량에 따른 수질 변화가 토지이용에 따라 다르게 나타나는지 비교해 보았다. 일반적으로 유량과 부유토사 농도의 관계를 나타내는 sediment rating curve는 양대수(log-log) 그래프에 그려지고(Campbell and Bauder, 1940; Walling, 1974; 박종관, 1994), 수질 항목들은 유량이나 부유토사 농도와 관련이 깊을 것으로 예상되므로 왜도와 첨도의 절대값이 각각 1과 1.5를 넘는 항목에 대해서는 로그값을 취하여 상관분석을 실시하

였다. 단, 수소이온 농도의 로그값인 pH와 연중 일정 범위에서 오르내리는 수온은 예외로 하였으며, 산림 소유역에서는 겨울철 자료가 결측되었기 때문에 수온에 민감한 DO 역시 예외로 하였다.

농경지 소유역의 경우 유량과 수질의 상관성은 호우의 규모뿐만 아니라 작물의 재배 기간 중 어느 시기에 해당하느냐에 따라 달리 나타나게 된다.

이러한 차이를 밝히기 위해 총강수량 164mm의 중 규모 호우기이면서 배추의 본밭 이식 직후인 7월 6일의 수질 자료와 총강수량 761.5mm의 대규모 호우기이면서 고랭지 채소의 수확기인 8월 31일의 수질 자료를 서로 비교해 보았다⁵⁾.

표 5. 소유역의 항목별 기술통계량 비교

항목 ¹⁾	소유역	N ²⁾	최소값	최대값	평균	표준편차	왜도	첨도
유량	산림	36	0.009	7.706	0.305	1.272	5.95	35.55
	농경지	49	0.003	1.400	0.055	0.199	6.73	46.36
수온	산림	35	0.1	16.9	9.79	4.74	-0.91	-0.30
	농경지	51	1.2	18.7	8.99	5.82	0.07	-1.66
pH	산림	37	6.2	6.9	6.72	0.17	-1.22	1.64
	농경지	53	6.4	7.7	7.40	0.22	-1.86	6.79
EC	산림	37	15	35	26.4	3.8	-0.38	1.06
	농경지	53	82	292	199.3	32.5	-0.30	3.72
DO	산림	37	7.7	13.9	9.91	1.78	1.05	-0.01
	농경지	53	7.7	14.5	10.65	2.27	0.36	-1.46
BOD	산림	37	0.3	1.2	0.56	0.23	1.21	1.42
	농경지	53	0.3	2.6	0.81	0.36	2.53	11.10
COD	산림	37	0.5	6.2	2.61	1.28	0.85	0.79
	농경지	53	0.9	18.3	3.88	3.81	2.38	5.52
TSS	산림	37	0	1012	31.1	165.8	6.08	36.93
	농경지	53	0	2861	112.8	403.8	6.34	43.19
NH ₄ -N	산림	37	0.00	0.77	0.074	0.139	3.86	17.93
	농경지	53	0.00	1.14	0.097	0.192	3.63	16.69
NO ₃ -N	산림	37	0.1	0.8	0.45	0.20	0.12	-0.86
	농경지	53	3.3	14.1	7.40	1.72	0.91	3.86
T-N	산림	37	0.4	3.9	0.77	0.57	4.89	27.03
	농경지	53	5.1	18.5	8.26	2.03	2.68	11.76
PO ₄ -P	산림	37	0.000	0.011	0.0019	0.0022	2.75	9.19
	농경지	53	0.001	0.201	0.0217	0.0323	3.95	18.70
T-P	산림	37	0.002	0.070	0.0116	0.0113	3.95	19.94
	농경지	53	0.009	0.891	0.0925	0.1539	3.67	15.55
Ca ²⁺	산림	37	0.8	2.0	1.52	0.32	-0.80	-0.32
	농경지	53	12.1	28.5	18.47	3.03	0.48	1.49
Mg ²⁺	산림	37	0.2	0.6	0.44	0.12	-0.66	-0.38
	농경지	53	2.5	8.8	4.16	0.92	2.54	11.81
K ⁺	산림	37	0.1	0.7	0.27	0.12	1.75	4.14
	농경지	53	0.7	5.5	1.32	0.74	3.85	19.53
Na ⁺	산림	37	0.8	1.9	1.43	0.22	-0.25	1.06
	농경지	53	1.1	6.8	5.32	0.88	-2.23	9.52

1) 유량(m³/sec), 수온(°C), EC(μS/cm), pH를 제외한 나머지 항목의 단위는 mg/l임.

2) 산림 소유역은 2002년 5월 2일 ~ 12월 7일, 2003년 4월 4일 ~ 5월 3일 주 1회씩 총 37회 수질조사.

농경지 소유역은 2002년 5월 2일 ~ 2003년 5월 3일 주 1회씩 총 53회 수질조사.

4. 결과 및 고찰

산림 및 농경지 소유역에서 얻은 유량 및 수질 자료를 요약하면 표 5와 같다. DO와 BOD는 두 소유역의 값이 큰 차이가 없었으며 두 소유역에서 환경부(2003)의 하천수질환경기준으로 1등급에 해당하는 양호한 값을 나타냈다⁶⁾. 반면, COD, TSS, T-N, T-P, 치환성 양이온 등의 수질 오염 지표에서는 농경지 소유역의 값이 산림 소유역의 값에 비해 평균값이 월등히 높고 표준편차가 큰 것으로 나타났다.

1) 수질 항목간의 상관 관계

산림 및 농경지 소유역의 수질 변수간 상관관계를 요약하면 표 6 및 표 7과 같다. 유량을 제외한

수질 변수들간의 상관성 가운데 주목할 만한 것들을 정리하면 다음과 같다.

(1) 수온과 DO

DO는 수온과는 매우 강한 상관성을 보였으나 다른 수질 지표와의 상관성은 적었다(그림 3, 표 6, 표 7). 이는 미생물이나 하상퇴적층에서 소모하는 산소의 양은 적고 대기에서 하천으로 녹아드는 산소의 양은 많다는 점을 의미한다. 산림 소유역에서 겨울철 자료가 결측되어 두 소유역의 DO가 차이를 보이지만(표 5), 이는 수온과의 강한 상관성에서 비롯된 것이며 도암호 유역의 다른 곳에서도 산림 유역과 농경지 유역의 DO 차이는 크지 않은 것으로 나타난다(신영규, 2004).

일반적으로 대기중의 산소가 물에 녹아드는 양

표 6. 산림 소유역의 변수간 상관관계

	log(Q)	w_temp	pH	EC	DO	log(BOD)	log(COD)	log(TSS)	log(NH ₄ -N)	NO ₃ -N	log(T-N)	log(PO ₄ -P)	log(T-P)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	log(K ⁺)	Na ⁺
log(Q) ¹⁾	1.00																
w_temp ²⁾	.064	1.00															
pH	-.629**	-.364*	1.00														
EC	-.287	.213	.281	1.00													
DO	.013	-.975**	.264	-.215	1.00												
log(BOD)	.373*	.226	-.400*	.032	-.221	1.00											
log(COD)	.363*	.346*	-.229	.241	-.300	.539**	1.00										
log(TSS)	.662**	.137	-.582**	-.507*	-.077	.419*	.460*	1.00									
log(NH ₄ -N)	.416	.522*	-.629**	-.103	-.467*	.553*	.645**	.589*	1.00								
NO ₃ -N	.484**	.021	-.314	-.012	.031	-.046	.113	.344	.206	1.00							
log(T-N)	.858**	.185	-.700**	-.157	-.079	.409*	.341*	.664**	.629**	.585**	1.00						
log(PO ₄ -P)	-.024	-.065	.061	.044	.051	-.289	-.182	-.105	-.207	.397*	.133	1.00					
log(T-P)	.413*	.276	-.342*	.096	-.212	.247	.470**	.641**	.698**	.490**	.616**	.135	1.00				
Ca ²⁺	-.320	-.155	.395*	.740**	.149	.191	.339*	-.370	-.054	-.286	-.244	-.136	-.043	1.00			
Mg ²⁺	-.327	.195	.273	.787**	-.207	.210	.434**	-.393*	.136	-.102	-.186	-.085	.192	.845**	1.00		
log(K ⁺)	.610**	-.115	-.327*	-.125	.116	.184	.390*	.645**	.446*	.274	.515**	.088	.231	.020	.100	1.00	
Na ⁺	-.417*	.420*	.146	.697**	-.432**	-.140	.119	-.516*	-.082	-.143	-.233	.180	.066	.515**	.664**	-.167	1.00

1) Q: 유량(m³/sec)

2) w_temp: 수온(°C)

Q, w_temp, pH, EC를 제외한 나머지 변수의 단위는 mg/l임(EC의 단위는 μS/cm).

왜도와 첨도의 절대값이 각각 1, 1.5를 초과하는 변수는 로그값으로 변환. 단, pH, w_temp, DO는 예외. log()는 괄호안 변수의 상용로그 값.

사례수(N): log(Q)는 36, w_temp는 35, log(TSS)는 28, log(NH₄-N)은 20, log(PO₄-P)는 31, 나머지 변수는 37.

수질조사는 2002년 5월 2일 ~ 12월 7일, 2003년 4월 4일 ~ 5월 3일 주 1회씩 총 37회 실시.

** : 유의수준 0.01에서 상관계수가 유의함(양측검정).

* : 유의수준 0.05에서 상관계수가 유의함(양측검정).

표 7. 농경지 소유역의 변수간 상관관계

	log(Q)	w_ temp	pH	log (EC)	DO	log (BOD)	log (COD)	log (TSS)	log (NH ₄ -N)	log (NO ₃ -N)	log (T-N)	log (PO ₄ -P)	log (T-P)	Ca ²⁺	log (Mg ²⁺)	log (K ⁺)	log (Na ⁺)
log(Q) ¹⁾	1.00																
w_temp ²⁾	.524**																
pH	-.651**	-.489**															
log(EC)	-.365**	-.021	.398**														
DO	-.580**	-.952**	.485**	.006													
log(BOD)	.395**	.371**	-.375**	-.024	-.371**												
log(COD)	.756**	.476**	-.608**	-.173	-.568**	.345*											
log(TSS)	.768**	.241	-.485**	-.329*	-.307*	.250	.847**										
log(NH ₄ -N)	.304	.419*	-.511**	-.028	-.431**	.246	.533**	.402*									
log(NO ₃ -N)	-.113	.034	.178	.801**	.018	.133	-.152	-.220	-.221								
log(T-N)	.267	.373**	-.295*	.597**	-.321*	.383**	.240	.054	.134	.816**							
log(PO ₄ -P)	.575**	.350*	-.405**	-.013	-.317*	.333*	.565**	.573**	.296	.083	.312*						
log(T-P)	.666**	.349*	-.426**	-.037	-.417**	.240	.859**	.879**	.404*	-.015	.217	.703**					
Ca ²⁺	-.023	.372**	-.037	.788**	-.348*	.265	.124	-.158	.196	.743**	.840**	.099	.067				
log(Mg ²⁺)	.004	.286*	-.020	.835**	-.255	.281*	.153	-.055	.159	.810**	.852**	.257	.185	.929**			
log(K ⁺)	.478**	.529**	-.363**	.393**	-.571**	.483**	.665**	.462**	.458*	.341*	.677**	.507**	.602**	.697**	.694**		
log(Na ⁺)	-.686**	-.216	.651**	.761**	.209	-.338*	-.488**	-.549**	-.235	.480**	.065	-.285*	-.270	.347*	.406**	-.140	

1) Q: 유량(m³/sec)

2) w_temp: 수온(°C)

Q, w_temp, pH, EC를 제외한 나머지 항목의 단위는 mg/l임(EC의 단위는 μS/cm).

왜도와 첨도의 절대값이 각각 1, 1.5를 초과하는 변수는 로그값으로 변환. 단, pH와 w_temp는 예외. log()는 괄호 안 변수의 상용로그 값.

사례수(N): log(Q)는 49, w_temp는 51, log(TSS)는 52, log(NH₄-N)은 26, 나머지 변수는 53.

수질조사는 2002년 5월 2일 ~ 2003년 5월 3일, 주 1회씩 총 53회 실시.

** : 유의수준 0.01에서 상관계수가 유의함(양측검정).

* : 유의수준 0.05에서 상관계수가 유의함(양측검정).

은 기온과 대기압에 의해서 좌우된다(Lee, 1980). 그 밖에 유속, 수심, 수면 경사 등이 DO와 관련이 있으나(O'Coner and Dobbins, 1958; Churchill et al., 1962), 본 연구지역의 경우 DO의 변이는 유량 변화 보다는 주로 수온 변화와 관련된 것이다(그림 3).

(2) EC, 치환성 양이온, NO₃-N 및 T-N

EC는 전해질이 많을수록 높은 값을 가지므로 두 소유역에서 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺와 높은 상관을 보인다(표 6, 표 7). K⁺의 경우 밀거름 및 웃거름으로 많은 양이 투입되는 농경지 소유역에서는 EC와의 상관성이 높은 반면, 산림 소유역에서는 낮은 것으로 나타났다. 산림 소유역의 경우 유량 증가시 K⁺는 증가하지만, 다른 치환성 양이온과 EC는 감소하기 때문에 EC와 K⁺의 상관성은 낮게 나타난다.

산림 소유역은 토양의 이온교환능력이 크기 때문에 연중 일정한 EC를 보이며(이현호·전재홍, 1996; 이현호, 1997; 박재현·우보명, 1997), NO₃-N 및 T-N의 변화가 작아 NO₃-N 또는 T-N과 EC의 상관성이 낮다(표 6, 그림 4). 반면, 농경지 소유역의 EC는 NO₃-N 및 T-N과 높은 상관성을 보인다(표 7, 그림 4).

일반적으로 토양 속의 질소는 미생물에 의한 질산화작용을 받아 질산태로 쉽게 전환된 후 물에 녹아 용탈된다(Brady & Weil, 2002; Schlesinger, 1997). 대관령 지역과 같이 대규모 시가지나 공장이 위치하지 않은 농경지 유역의 경우 T-N의 대부분이 NH₄-N 보다는 NO₃-N으로 존재하며, NO₃-N 및 T-N은 EC와 높은 상관을 보인다(신영규, 2004; Jung et al., 1999; 전방욱·박광하, 1991).

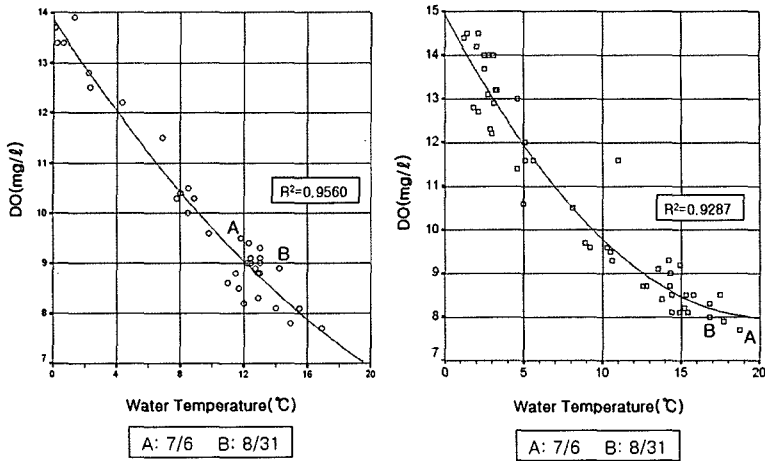


그림 3. 수온과 DO의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

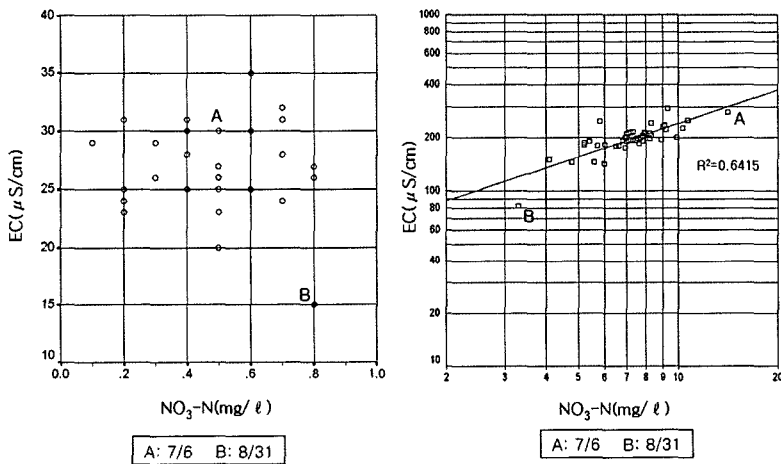


그림 4. NO₃-N과 EC의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

Jung et al.(1999)은 대관령 지역을 포함한 한강수계 농업지대의 수질 요인에 관한 연구에서 EC가 제1요인이었으며 치환성 양이온(Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) 및 SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻ 그리고 T-N이 높은 부하를 보였다고 밝혔다.

(3) TSS, T-P 및 COD

두 소유역에서 TSS와 T-P, 및 COD의 상관성이 높게 나타나는데, 산림 소유역보다 농경지 소유역에서의 상관성이 높게 나타난다(표 6, 표 7, 그림 5).

일반적으로 인은 질소와는 달리 물에 쉽게 녹지 않고 Ca, Fe, Al 등과 결합하면 생물이 가용하기 힘

든 상태가 되기 때문에, 이동성이 낮고 주로 토양에 부착 혹은 흡착된 상태로 존재하다가 토양과 함께 유실된다⁷⁾. 또한, 토양 유기물에서 분해되는 속도 역시 질소에 비해서 느리다. McGill과 Cole(1981)에 의하면 토양 유기물의 질소나 황은 주로 탄소에 직접 연결된 상태(-C-NH₂)로 존재하는 반면, 인은 주로 산소를 거쳐 연결되는 에스테르 형태(-C-O-P)로 존재한다. 이러한 차이로 인해 질소는 탄소를 이산화탄소로 만들어버리는 과정, 즉 호흡으로 인해 쉽게 무기화되는 반면, 인의 경우 미생물의 양분 수요에 따라 분비되는 세포외효소에 의해 무기화되므로 인의 분해 속도는 질소에 비해 느리다

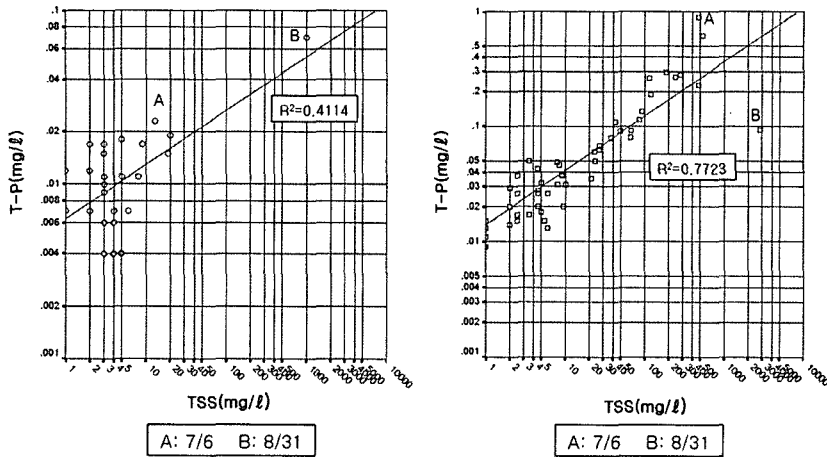


그림 5. TSS와 T-P의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

(McGill and Cole, 1981; Schlesinger, 1997).

그리고 농경지 소유역에는 분해가 빠른 가축분뇨에 나무껍질이나 톱밥과 같은 난분해성 유기물을 섞어 만든 가축분 퇴비를 다량으로 투입하고 있다(이춘수 등, 2002a; 2002b). 따라서 강우시 토양 유실이 증가하면 토양에 부착되어 있던 인과 유기물이 함께 유실되어 T-P와 COD가 증가하게 된다. 이러한 경향은 식생 피복이 불량하고 다량의 마사가 복토되어 토양 유실에 취약한 농경지 소유역에서 더욱 뚜렷하게 나타난다(그림 5).

도암호의 수질 오염에 있어서 호우시 토사 유입의 증가에 수반되는 T-P의 증가가 가장 심각하다는 선행연구에 비추어 볼 때(신영규, 2004), TSS와 T-P의 높은 상관성은 농경지의 토양 보전이 중요함을 시사한다.

4) 유량에 따른 수질 변화

(1) BOD

두 소유역에서 유량과 BOD의 상관성은 그리 높지 않다(표 6, 표 7). 두 소유역에서 유량이 적을 때에는 1.0mg/l 이하의 양호한 값을 유지하며 과상으로 분포하고 있다(그림 6). 중규모 내지는 대규모 호우시에는 양분 및 유기물 유입으로 BOD가 증가하는데 토지이용과 시기에 따라 다른 양상을 보인다. 산림 소유역에서는 총강수량 164mm의 호우기인 7월 6일의 시료와 총강수량 761.5mm의 호우기인 8월 31일의 시료가 차이를 보이지 않았다.

반면, 농경지 소유역에서는 강우량 및 유량이 적은 7월 6일에 오히려 더 높은 BOD를 보이고 있다.

이와 같은 차이는 고랭지 작물의 재배 방법을 고려해야만 해석할 수 있다. 고랭지 채소가 주로 재배되는 기간은 6월말에서 8월말이다(표 3). 6월말은 어린 묘를 본밭에 이식하는 시기로 경운을 하고 밀거름으로 다량의 퇴비와 화학비료를 투입한 직후이다. 따라서 이 때의 조건은 피복은 매우 불량하고 유실될 양분은 매우 많은 상태이다. 6월말은 또한 장마가 시작되는 기간이므로 강우량이 많아 토양유실이 급증함과 동시에 분해가 가능한 다량의 유기물(퇴비)과 미생물의 분해작용을 촉진할 양분이 다량으로 하천에 유입될 조건을 가지고 있다. 반면, 8월말은 작물의 생육으로 피복이 좋아지고 밀거름의 대부분이 작물에 흡수되거나 하천으로 용탈된 상태이다. 이 때는 이미 수확기에 접어들어 웃거름의 투입도 거의 없기 때문에 7월초에 비해 낮은 BOD를 보인다.

산지에 위치한 두 소유역의 하천은 하도경사가 급해 유속이 빠르고 하상이 주로 자갈과 모래로 이루어져 있으며 기온이 낮기 때문에 DO는 높고 BOD는 낮게 유지될 수 있는 조건을 갖추고 있다. 유속이 빠르고 하상이 모래나 자갈 등 흡착이 어려운 입자로 구성될수록 하상 퇴적물의 유기물 함량이 적어져 결국 하상 퇴적층 표면에서의 산소 소비량은 적어진다(Novotny and Olem, 1994, 769). 따라서 기저유출시에는 오염물과 이를 분해할 미

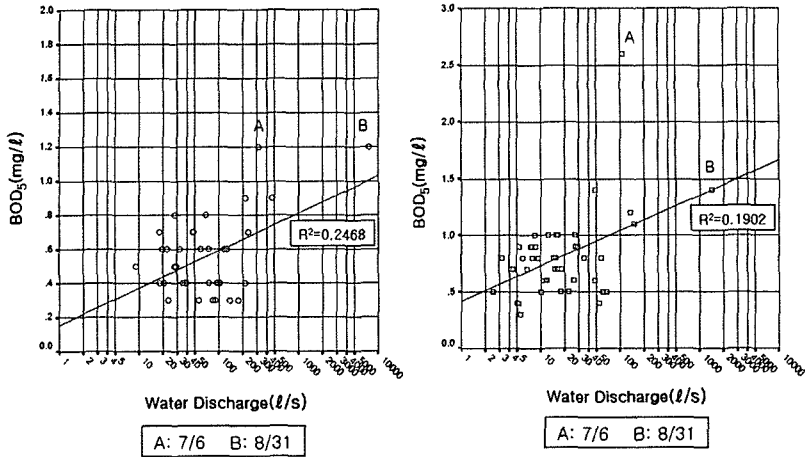


그림 6. 유량과 BOD의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

생물이 하상에 쉽게 부착되기 힘들어 BOD는 낮게 유지되지만 직접유출이 발생해 유기물이 많이 흡착된 세립질 토양의 유입이 발생하면 BOD는 증가한다. 그리고 호우가 지나간 후에는 세립질이 선택적으로 하류로 이동하면서 BOD는 다시 낮아진다. 이로 인해 두 소유역의 BOD는 기저유출시에는 큰 차이를 보이지 않지만, 산림에 비해 농경지의 토양 유실이 크게 나타나는 직접유출시에는 큰 차이를 보인다.

(2) COD

유량과 COD의 상관성은 산림 소유역에 비해 농경지 소유역에서 크게 나타난다(그림 7). 산림 소

유역에서는 두 변수간의 상관성이 높지 않았으며 농경지 소유역과는 달리 양대수(log-log) 그래프에서보다 반대수(semi-log) 그래프에서 결정계수(R^2)가 더 높게 나타났다. 이는 유량 증가에 따른 산림 소유역의 COD 증가율이 농경지 소유역의 증가율에 비해 훨씬 낮다는 것을 의미한다. 반면, 농경지 소유역에서는 유량 증가에 따른 TSS의 증가 경향이 뚜렷하며(표 7, 그림 8), 부유물에는 토사와 함께 많은 유기물을 포함되어 있기 때문에 유량, TSS, COD의 상관성은 높게 나타난다(표 7). 6월말 고랭지 채소 재배에 앞서 다량의 퇴비가 투입되기 때문에 7월 6일의 시료는 전반적인 경향치에 비해

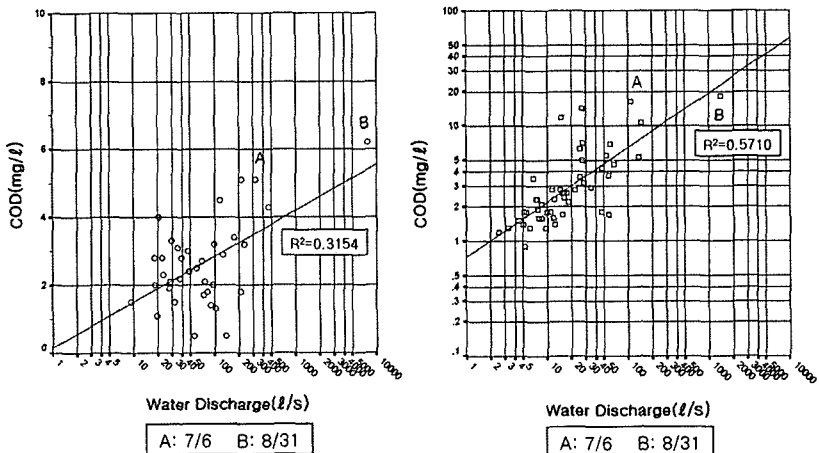


그림 7. 유량과 COD의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

높은 값을 보인다.

이러한 COD의 특성을 BOD와 비교해 보면, 농경지 소유역 유출수에 존재하는 유기물은 생물학적으로 분해되기 힘든 형태가 많은 것으로 보인다⁸⁾. 농경지에서 활용하는 가축분 퇴비에는 가축분뇨와 함께 나무껍질이나 톱밥과 같은 난분해성 물질들이 존재한다. 90년대 초 대관령 지역의 수질을 조사했던 전방욱과 박광하(1991)에 의하면 이 당시의 BOD는 TSS, COD 및 T-P와의 상관성이 높았다. 이들은 인을 함유한 분해가능한 오염물이 많기 때문이라고 하였는데 1990년대 초반은 가축분뇨의 퇴비화가 미흡했고 축산폐수에 의한 수질 오염이 현재보다 심각했었던 것으로 해석된다. 허인량 등(1995, 2001)도 1990년대 초반에 비해 2000년의 수질이 개선된 원인으로 가축분뇨의 퇴비화를 들고 있다. 현재 이 지역에서 널리 진행되고 있는 가축분뇨의 퇴비화는 BOD의 감소에 기여했으나, 농경지의 토양 유실 방지를 위한 노력이 부족한 현실을 고려할 때 다량의 유기물과 양분이 토양과 함께 도암호로 유입될 위험성은 여전히 높다고 판단된다.

(3) TSS

두 소유역에서 유량과 TSS의 상관성이 높게 나타나며 농경지 소유역이 산림 소유역에 비해 높은 상관성을 보인다(그림 8). 농경지 소유역에서는 작물 재배 기간이 감자의 경우 약 3개월, 고랭지 채소의 경우 약 2개월에 불과하기 때문에 식생피복

이 불량하다. 또한, 주로 모래로 구성된 푸석푸석한 마사를 복토하기 때문에 토양 유실에 취약하다.

농경지 소유역에서는 전반적인 경향치에 비해서 7월 6일과 8월 31일의 자료가 크게 벗어나지 않는 반면, 산림 소유역에서는 8월 31일의 값에서 큰 편차를 보이는데 이는 유량 측정 지점 주변의 제방이 침식되어 부유토사의 농도가 급격히 증가했기 때문이다.

농경지 소유역에서 유량과 TSS의 상관성이 높고, TSS와 T-P의 상관성이 높다는 점(그림 5)을 이용하면 향후 고랭지 농경지에서 유량 증가에 의한 부유토사 농도의 증가와 그에 따른 T-P의 부하량 산정을 위한 모형 수립에 응용할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 단일 강우 사상에 대한 시간별 시료 채취 및 분석을 보다 많이 실시하여 이력효과(hysteresis)까지 고려한 보다 설명력 있는 sediment rating curve를 얻어야 한다.

(4) T-N

산림 소유역에서는 제방 침식과 산사태로 토사 유입이 많았던 8월 31을 비롯한 일부 호우기를 제외하면 T-N이 연중 1mg/l 이하의 낮은 값을 유지하였다(그림 9). 반면, 농경지 소유역에서는 고랭지 작물의 재배 단계에 따라 큰 변화를 보인다. 농경지 소유역에서는 T-N이 높게 나타나는 시기가 고랭지 채소의 재배 기간과 일치한다. 이 기간은 밭거름 외에도 웃거름으로 질소 비료가 주기적으로 투입된다.

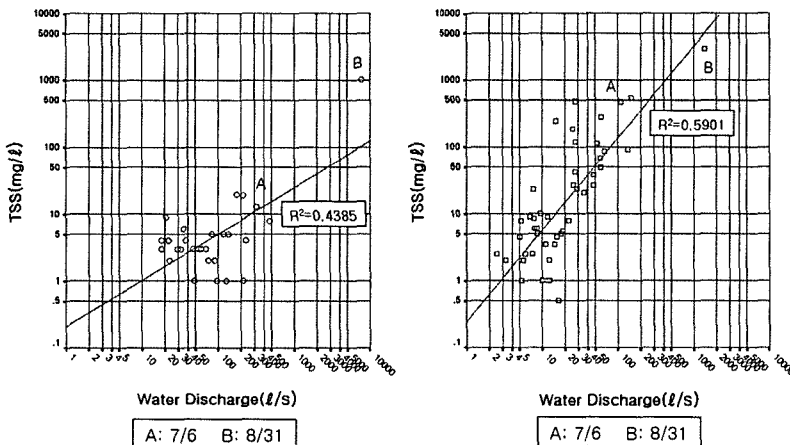


그림 8. 유량과 TSS의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

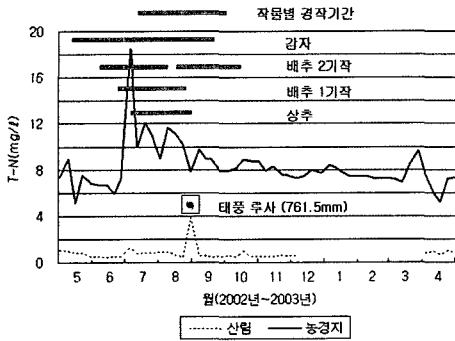


그림 9. 산림 및 농경지 소유역의 T-N 변화

유량과 T-N의 상관 관계를 살펴보면 산림 소유역에서는 뚜렷한 양의 상관성이 나타난다(그림 10). 산림 유역에 대한 선행연구에 의하면 강우시 지면이나 樹冠에 부착되어 있던 NOx 등의 건성강하물(dry deposition)의 용탈이 계류수 수질에 미치는 영향이 크다(이현호·전재홍, 1996; 이현호, 1997; 박재현·우보명, 1997). 또한 박재철(2000)은 산림 유역에서 유량 증가시 희석효과가 나타나는 다른 이온들과는 달리 NO₃⁻ 이온은 농도가 증가한다고 하였다. 하지만, T-N의 증가가 주로 가용성 무기태 질소의 증가에 기인하는 것은 아니다. 토사 유입이 많았던 8월 31일의 경우는 T-N은 3.9mg/l로 연중 최대값을 나타냈지만(표 5, 그림 9), 이 당시의 NH₄-N과 NO₃-N은 각각 0.77mg/l와 0.8mg/l에 불과했다. 이 당시의 T-N 증가는 주로 유기태

은 토사와 결합된 입자 상태의 질소 유입 증가에서 비롯된 것으로 보인다.

한편, 농경지 소유역에서는 작물 재배 기간 동안의 비료 투입으로 인해서 시기별 편차가 크기 때문에 상관성이 낮게 나타난다(그림 10). 고랭지 채소 재배를 위해 다량의 밀거름 투입과 파종을 마친 후 처음 맞이하는 호우기인 7월 6일의 T-N은 수확기인 8월 31일에 비해 높은 값을 보인다.

(5) T-P

TSS와 T-P의 상관성과 유량과 TSS의 상관성이 높은 농경지 소유역은 산림 소유역에 비해 유량과 T-P의 상관성이 뚜렷하게 나타난다(그림 5, 그림 8, 그림 11).

농경지 소유역에서는 시기별로 전반적인 경향에서 크게 벗어난 값들이 존재한다. 7월 6일의 시료가 유량과 TSS가 훨씬 큰 8월 31일의 시료보다 T-P 값이 월등히 높은 것은 6월말에 행해지는 고랭지 채소의 파종에 앞서 밀거름으로 가축분 퇴비와 함께 다량의 화학비료가 투입되었기 때문이다. 화학비료로 투입되는 인은 퇴비로 공급되는 인이나 자연 상태의 유기물에 비해 H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻, PO₄³⁻ 등 가용성 무기태로 전환되기 쉽다(Schlesinger, 1997; Brady and Weil, 2002). 7월 6일의 시료에서는 T-P가 0.891mg/l였으며 이 가운데 PO₄-P는 0.201mg/l로 나타났다.

부유물질의 구성 성분 또한 7월 6일과 8월 31일

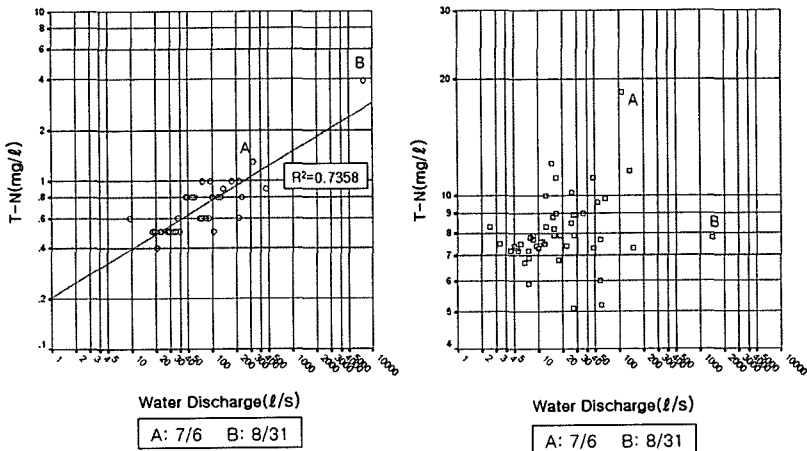


그림 10. 유량과 T-N의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

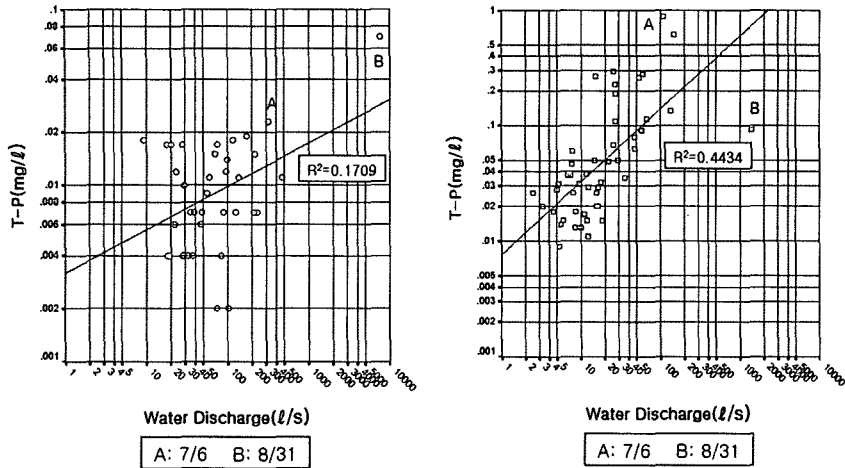


그림 11. 유량과 T-P의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

의 T-P 차이와 관련있을 것으로 보인다. 경작 초기인 7월 6일은 PO₄-P의 용탈이 많았으며, 부유물질 가운데 토양이 아닌 가축분 퇴비가 차지하는 비율이 높았을 것으로 예상된다. 반면, 수확기인 8월 31일은 부유물 가운데 가축분 퇴비의 비율이 낮았을 것으로 예상된다. 또한 8월 31일에는 농경지 소유역의 유량이 크게 증가하여 제방 침식이 많이 일어났는데, 이때 농경지 토양보다 인산 함량이 낮은 제방의 토사가 많이 유입되었다. 그림 4를 보면 TSS와 T-P는 매우 뚜렷한 양의 상관관계를 보여주는데 7월 6일은 전반적인 경향에 비해 T-P가 매우 높았으나, 8월 31일은 추세선에 비해 매우 낮은 T-P를 보였음을 알 수 있다.

(6) pH 및 EC

두 소유역에서 유량과 pH는 뚜렷한 음의 상관관계를 나타낸다(표 6, 표 7). 우선 산림 및 농경지 소유역의 연평균 pH는 각각 6.7과 7.4이지만(표 5), 강수의 경우 대기중의 이산화탄소가 녹아 탄산을 형성하므로 이보다 낮은 값을 갖는다는 점을 들 수 있다. 또한 지면이나 수관에 부착되어 있던 SO_x 나 NO_x 등 산성을 띠는 건성강하물이 녹아 들면서 pH가 낮아진다. 그밖에 식생에 의해 만들어지는 유기산의 용탈과 양분 증가로 인해 촉진되는 질산화과정의 영향도 존재한다. 국내의 산림유역을 대상으로 한 여러 연구에서 임외우(direct rainfall)보다는 林內雨, 그 가운데서도 수관통과우

(throughfall)보다는 수간류(stemflow)의 pH가 낮게 나타났는데 그 원인으로는 葉面 및 樹皮로부터 건성강하물 및 유기산이 용탈되기 때문이라고 해석되었다(이현호·전재홍, 1996; 이현호, 1997; 박재현·우보명, 1997)⁹⁾.

농경지 소유역에서도 같은 경향성을 보이지만 산림 소유역보다 높은 pH를 보이는 것은 EC가 높고 EC와 양이온의 상관성이 높다는 점(표 7)으로 미루어볼 때, 농경지 토양에서 KCl 등 비료로 투입된 많은 가용성 염류가 용탈되기 때문이다.

EC 역시 유량 증가시 감소하는 양상을 보이지만, 유량과의 상관성은 pH에 비해서 낮은 것으로 나타난다(표 6, 표 7). 산림 소유역의 EC는 표 5에서 보듯이 유량과 관계없이 15~35 μ S/cm으로 낮고 일정한 값을 보여, 여러 선행연구의 결과와 잘 부합된다(이현호·전재홍, 1996; 이현호, 1997; 박재현·우보명, 1997). 이 연구들에 의하면 건성강하물 및 유기산의 용탈 등으로 수관통과우와 수간류의 EC가 임외우에 비해 증가하지만 산림토양의 높은 이온교환능력으로 인해 실제 계류수의 수질에 미치는 영향은 크지 않았다. 한편 농경지 소유역의 EC는 시비가 이루어진 시기와 시비량의 영향을 크게 받기 때문에 유량과 EC의 상관성은 낮게 나타난다.

(7) 치환성 양이온

두 소유역에서 공통적으로 유량과 Ca²⁺ 및 Mg²⁺의 상관성은 낮은 것으로 나타났다(표 6, 표 7). 이

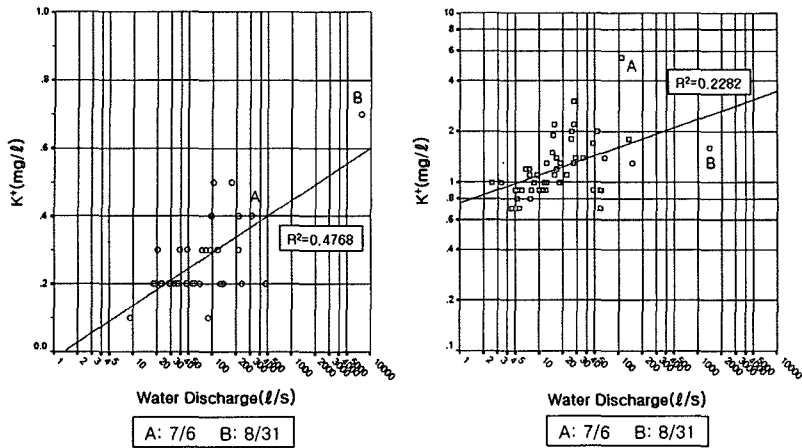


그림 12. 유량과 K⁺의 관계(左: 산림 소유역, 右: 농경지 소유역)

는 산림 토양의 높은 이온교환능력과 농경지에서
의 시비에 기인한 것이다. 석회(Ca)와 고토(Mg)가
토양 중화와 미량 원소 보충을 위해 비료로 농경
지에 많이 투입되는 반면, Na는 시비에 의해 공급
되는 양이 미미하기 때문에 강우시 희석효과가 크
다. 이로 인해 Na⁺와 유량의 상관성은 다른 양이
온의 경우보다 높게 나타난다.

유량과 음의 상관성을 갖는 다른 치환성 양이온
과는 달리 K⁺는 유량 증가시 증가하는 경향을 보
인다(그림 12). 유량과 K⁺의 관계는 시비에 의한
교란을 많이 받는 농경지 소유역보다는 산림 소유
역에서 뚜렷하게 나타난다. 배추와 상추 등 고랭지
채소는 감자에 비해 칼륨(K) 소요량이 많기 때문
에 밀거름 외에도 웃거름을 요한다. 이에 따라 고
랭지 채소의 재배 기간 동안 농경지 소유역의 K⁺
는 높은 값을 유지한다(그림 13)¹⁰⁾. 경작 초기인 7
월 6일은 수확기인 8월 31일에 비해 유량이 적었
음에도 불구하고 시료의 K⁺가 높게 나타났다.

연구 지역을 대표하는 차항동의 토양층 및 풍화
층의 치환성 양이온과 광물 조성을 보면 K나 Na
의 함량이 Ca나 Mg에 비해 적어 모암 혹은 토양
층에서 공급되는 K⁺와 Na⁺가 많지 않음을 시사한
다(NIAST, 2000). 이온화 경향이 큰 K⁺는 다른 치
환성 양이온에 비해 엽면에서 쉽게 용탈되며
(Schlesinger, 1997, 179-181), 수관 및 지면에서 세탈
된 건성강하물에서도 쉽게 용해될 수 있다.
Winston과 Criss(2002)는 대홍수시 다른 치환성 양
이온은 유량 증가와 함께 감소한 반면 K⁺는 증가

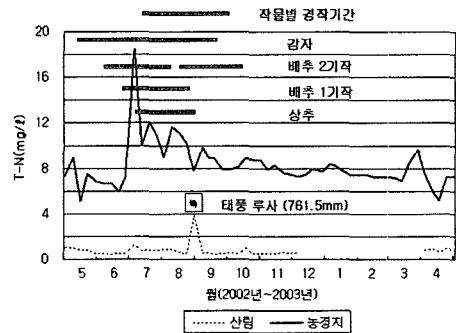


그림 13. 산림 및 농경지 소유역의 K⁺ 변화

하였다고 밝혔다. 이들은 산소동위원소($\delta^{18}O$)를 이
용한 기저유출량과 직접유출량 분리를 통해 다른
치환성 양이온들은 주로 기저유출에 의해 이동하
는 반면 K⁺는 직접유출시 이동한다고 하였다. 이러
한 점들을 종합해 볼 때, 유량 증가시 발생하는 K⁺
의 증가는 엽면 용탈이나 수관을 거치면서 일어나
는 이온 교환, 그리고 지면이나 수관에서 세탈된
후 용해되어 증가하는 것으로 보인다¹¹⁾.

5. 요약 및 결론

대관령 지역에서 최근 채소 재배를 중심으로 한
고랭지 농업이 성행하면서 토양유실과 함께 수질
오염이 심화되어 왔다. 이 지역 고랭지 농업에서
주목할 만한 것은 현지주민들이 병충해를 비롯한

재배상의 어려움을 화강암 풍화물인 '마사'의 복토로 극복하고자 하는 점이다. 마사의 복토는 수분 및 양분 보유력 보안을 위한 다량의 가축분 퇴비 및 화학비료의 투입을 초래하고, 토양 보전을 위한 노력이 부족하다는 점을 고려할 때, 양분 유실의 위험을 증가시키는 역기능을 가져온다.

이로 인해 자연 조건이 유사한 산림 소유역과 농경지 소유역의 수질 변화는 서로 다른 양상을 보인다. 산림 소유역에서는 수질 변화가 적었던 반면 농경지 소유역에서는 고령지 작물의 경작과 그에 따른 토양 유실로 인해 큰 폭의 수질 변화를 보였다. 용존산소량(DO)은 두 소유역에서 유량보다 수온과 매우 뚜렷한 음의 상관관계를 나타냈다.

산림 소유역에서는 농경지 소유역에 비해 유량 증가시 총질소(T-N) 및 K^+ 의 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 반면, 농경지 소유역에서는 유량과 부유물질 총량(TSS)이 뚜렷한 양의 상관관계를 나타냈으며, TSS와 총인(T-P) 및 COD의 상관성이 높기 때문에 T-P 및 COD 역시 유량과 뚜렷한 양의 상관관계를 나타냈다. 이는 대관령 지역에서는 도암호의 수질 오염, 특히 T-P의 증가가 심각하다는 점에 비추어 볼 때 수질 개선을 위해서는 농경지의 토양 유실 방지가 매우 중요함을 시사한다.

농경지 소유역에서는 고령지 채소 파종 직후인 7월 6일이 수확기인 8월 31일에 비해 유량이 적음에도 불구하고 BOD, T-N, T-P 등 오염물 농도가 높게 나타난다. 6월말에서 7월초에 이르는 기간은 밀거름으로 다량의 가축분 퇴비와 화학비료를 투입한 후 경운을 한 지 얼마 경과되지 않았고 식생 피복은 불량한 시기이다. 또한 기후적으로는 장마기에 해당되므로 토양 및 양분 유실 위험이 크다. 호밀이나 헤어리벳치 등 피복작물을 이용하여 지면을 덮어주는 방법처럼 경작 초기의 토양 및 양분 유실을 줄일 수 있는 친환경 농법의 도입이 요구된다.

註

- 1) 연구 지역의 토양은 미농무성의 형태적 분류에 의하면 토양 발달이 조금 밖에 진전되지 않은 Inceptisol에 속하며 습윤 토양인 Udepts 亞目으로 분류된다. 차항통, 월정통 및 무이통은 부식 함량이 높고 염기포화도가 낮은 Humic Dystrudepts 大群(greater group)에 속하는 반면

이목통은 염기포화도가 중간 정도인 Dystric Eutrudepts에 속한다(NIAST, 2000).

- 2) 연구지역의 고령지 농업에 이용되는 이른바 '마사'는 대부분 화강암의 saprolite층이 두껍게 발달한 구릉지를 절개해서 얻은 것으로 모래 위주의 조립질로 구성되어 있다. 지형 관련 연구에서는 '화강암 풍화물'로 기술하는 것이 바람직하지만, 본 연구에서는 농업과의 관련성이 높다는 점을 감안해 농업 분야에서 쓰이고 있는 '마사'라는 용어를 받아들여 기술하고자 한다.
- 3) 산림 소유역은 농경지 소유역에 비해 침투유량이 작고 직접유출이 서서히 진행될 것으로 기대되지만, 산림 소유역의 경사(22.1%)가 농경지 소유역의 것(15.6%)보다 급하여 두 소유역의 차이는 크지 않았던 것으로 보인다. 두 소유역의 유출 특성은 2004년 5월까지의 2개년 자료를 대상으로 분석을 거친 후에 별도의 연구물로 발표하고자 한다.
- 4) 고령지농업연구소의 미발표 조사자료.
- 5) 대관령 기상대의 관측자료에 따르면 일별 강수량은 다음과 같다. 7월 5일 143.0mm, 7월 6일 21.0mm, 8월 29일 1.5mm, 8월 30일 28.5mm, 8월 31일 712.5mm, 9월 1일 19.0mm. 한편, 산림 소유역과 농경지 소유역의 8월 31일자 수질 시료는 각각 16시 58분과 15시 57분에 채집된 것으로, 폭우가 계속되고 유량이 증가하는 증수기에 채집된 시료임을 밝혀둔다.
- 6) 환경부(2003)의 하천수질환경기준에 의하면 생활환경 1등급 기준은 DO가 7.5mg/l 이상, BOD는 1.0mg/l 이하이다.
- 7) Schlesinger, 1997, chapter 6; Brady and Weil, 2002, chapter 13~14.
- 8) BOD의 경우 20°C에서 5일간 배양함으로써 나타나는 DO의 감소량(BOD_5)으로 많이 표시하고 있으며 유기물 가운데 생물학적으로 분해 가능한 유기물의 양을 지시한다. 반면, COD는 생물학적으로 분해하기 힘든 유기물의 양까지도 가능하는 지표가 된다.
- 9) 이러한 경향은 특히 염전적지수가 크고 유기산 용탈이 많은 침엽수림의 임내우에서 강하게 나타나지만, 활엽수림의 경우 임내우의 pH가 임외우보다 높은 경우도 자주 나타난다. 특히 산성비가 내리는 때일수록 활엽수림의 pH 중화능력이 뛰어난 것으로 알려져 있다(박재현·우보명, 1997; 이현호, 1997; 이현호·전재홍, 1996).
- 10) 3월말은 TSS, T-N, T-P, K^+ 등 농경지 소유역의 모든 오염물 농도가 증가하는 모습을 보여주었다. 겨울철 이곳에 설치된 스키 연습 주로를 철거하고 경작을 준비하는 소규모 공사가 있었고 용설수에 의한 토양 유실이 있었기 때문으로 보인다.
- 11) 대관령 지역 강수의 화학성분에 대한 자료를 얻을 수 없어 본 연구에는 강수에 의해 공급되는 K^+ 의 양은 고려되지 않았으나, 그 양에 따라 달리 해석될 여지가 남아 있다.

文獻

고령지농업시험장, 1999, 감자총서, 농촌진흥청.

_____, 2000, 고령지 채소재배기술, 농촌진흥청.

국립지질조사소, 1975, 한국지질도 오대산 도엽.

기근도, 1999, 대관령 일대 지형·토양환경, 한국고원대학교 지리교육과 박사학위논문.

농업과학기술원, 1999, 작물별 시비처방 기술, 농촌진흥청.

대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스.

박재철, 2000, 물순환모델에 의한 산림소유역의 유출특성 및 계류수의 수질변화 분석, 영남대학교 대학원 석사학위논문.

박재현·우보명, 1997, "산림유역내 강수로부터 계류수질에 미치는 영향인자 분석 - pH, 용존산소, 전기전도도-", 한국임학회지, 86(4), 489-501.

박종관, 1994, "SRC Method에 의한 산지 소유역의 부유토사 유출량 산정," 한국지형학회지, 1(1), 17-31.

박철수, 2002, 고령지 농경지의 유실방지를 위한 토양 관리 방법, 강원대학교 대학원 박사학위논문.

신영규, 2004, 대관령 지역의 토지이용에 따른 수질 특성 및 오염물 유출부하량 비교, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

신영규·김종욱, 2004, "대관령 지역의 토지이용이 오염물 유출부하량에 미치는 영향 - USLE 계열 모형 및 CN법의 적용 -," 한국지형학회지, 11(2), 91-104.

이춘수·이계준·신영규·이정태·신관용·안재훈·박철수, 2002a, "고령지 토지이용형태가 소수계의 수질에 미치는 영향," 시험연구보고서, 농촌진흥청 고령지시험장, 579-582.

이춘수·이계준·이정태·신관용·안재훈·조현준, 2002b, "고령지 배추 재배농가의 시비실태 조사연구," 한국토양비료학회지, 35(5), 306-313.

이현호, 1997, "산지 물순환 素過程에 있어서 수질 변화의 추적분석에 의한 산림의 환경적 정화기능의 계량적 연구," 한국임학회지, 86(1), 56-68.

이현호·전재홍, 1996, "산지 물순환과정에 있어서 산도, 전기전도도 및 용존산소량의 변화,"

한국임학회지, 85(4), 634-646.

장재훈, 1996, "횡계-진부 지역의 침식면 지형발달에 관한 연구," 지리학연구, 28, 13-30.

전방욱·박광하, 1991, "횡계 송천수계의 수질상관," 동해안연구, 2(1), 강릉대학교, 1-5.

전방욱·박광하, 1992, "강릉수력발전소의 발전수방류가 강릉남대천의 수질에 미치는 영향," 동해안연구, 3(1), 강릉대학교, 1-7.

조병욱, 1999, 고령지 채소 재배지의 토양환경 특성과 비옥도 관리방안, 강원대학교 대학원 박사학위논문.

평창군, 1970~2002, 평창군 통계연보.

한동준, 2003, "강릉 남대천 살리기 운동의 추진현황과 향후방향," 강릉 남대천 관련 학술세미나, 강릉 남대천 살리기 범시민운동본부 & 동해안발전연구회, 3-18.

허인량·박상균·최규열·정의호, 1995, "송천상류수계의 수질 및 오염부하량분포에 관한 연구," 한국수질보전학회지, 11(3), 175-181.

허인량·신용건·이건호·최지용·김영진·정의호·정명선, 2001, "송천유역의 수질환경특성 및 효율적 유역관리," 한국환경위생학회지, 27(2), 51-59.

환경부, 1997, 수질오염공정시험방법, 성문기술.

환경부, 2003, 환경정책기본법 시행령, 대통령령 제 18041호.

Brady, N. C. and Weil, R. R., 2002, *The Nature and Properties of Soils(3rd ed.)*, Prentice-Hall.

Campbell, F. B. and Bauder, H. A., 1940, A rating-curve method for determining silt-discharge of streams, *Trans. American Geoph. Union*, 21, 603-607.

Churchill, M. A., Elmore, H. L., and Buckingham, R. A., 1962, The prediction of stream reaeration rate, in *Advances in Water Pollution Research*, Vol. 1, Proceedings, IAWPR International Conference, Pergamon

Jung, Y. S., Yang, J. E., Joo, J. H., Kim, J. J., Kim, H. J. and Ha, S. K., 1999, Factor analysis of soil and water quality indicators in different agricultural areas of the Han River basins, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*,

- 32(4), 398-404.
- Lee, R., 1980, *Forest Hydrology*, Columbia University Press.
- McGill, W. B. and Cole, C. V., 1981, Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter, *Geoderma*, 26, 267-286.
- National Institute of Agricultural Science and Technology, 2000, *Taxonomical Classification of Korean Soils*, Rural Development Administration.
- Novotny, V. and Olem, H., 1994, *Water Quality: Prevention, identification, and management of diffuse pollution*, Van Nostrand Reinhold.
- O'Conner, D. J. and Dobbins, W. E., 1958, Mechanism of reaeration in natural streams, *Transaction of Am. Soc. Civil Eng.*, 123, 641-666.
- Schlesinger, W. H., 1997, *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change (2nd ed.)*, Academic Press.
- Walling, D. E., 1974, Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization, in *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds*, Ins. British Geogr. Special Publ. No. 6, 169-192.
- Winston, W. E. and Criss, R. E., 2002, Geochemical variations during flash flooding, Meramec River basin, May 2000, *Journal of Hydrology*, 265, 149-163.

최초투고일 04. 04. 30

최종접수일 04. 09. 13