

## 활엽수림, 침엽수림 및 혼효림 지역의 강우시 비점오염물질 유출특성

신민환 · 신동석 · 이재운 · 최재완 · 원철희\* · 서지연\*\* · 최용훈\*\* · 최중대\*\*<sup>†</sup>

국립환경과학원 금강물환경연구소

\*강원대학교 환경연구소

\*\*강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과

## Runoff Characteristics of Non-point Source Pollutants from Different Forest Types During Rainfall Events

Minhwan Shin · Dongsuk Shin · Jaewoon Lee · Jaewan Choi · Chulhee Won\* · Jiyeon Seo\*\* · Yonghun Choi\*\* · Joongdae Choi\*\*<sup>†</sup>

Geum-River Environment Research Laboratory

\*Institute of Environmental Research, Kangwon National University

\*\*Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University

(Received 15 January 2010, Revised 6 April 2010, Accepted 13 April 2010)

### Abstract

Long-term monitoring was conducted to identify the runoff characteristics of non-point source according to the three forest types (deciduous forest, coniferous forest and mixed forest) in this study. Rainfall events of each deciduous forest, coniferous forest, and mixed forest were 10, 8, 12, respectively. Average runoff depth and coefficients of each forest type were founded to be coniferous forest and were followed by others in turns : deciduous forest, and mixed forest because various conditions (i.e., rainfall property, Antecedent Precipitation Index (API), soil property, slope, and forest management) could change runoff characteristics. In the analysis of the first flush phenomenon, it showed that SS and T-P were sensitive for the first flush phenomenon. The first flush phenomenon of them were showed differently by rainfall intensity, rainfall duration, and amount of rainfall. The research results indicated that range of the Event Mean Concentration (EMC) values in deciduous forest were 0.8~2.4 mg/L for BOD<sub>5</sub>, 2.0~13.4 mg/L for COD<sub>Mn</sub>, 1.3~2.9 mg/L for DOC, 1.150~3.913 mg/L for T-N, 0.010~0.350 mg/L for T-P and 3.1~291.8 mg/L for SS and in coniferous forest were 0.8~2.2 mg/L for BOD<sub>5</sub>, 1.9~3.6 mg/L for COD<sub>Mn</sub>, 1.0~2.0 mg/L for DOC, 1.025~2.957 mg/L for T-N, 0.002~0.084 mg/L for T-P and 0.8~5.4 mg/L for SS. Also, range of the EMC values in mixed forest were 1.3~2.3 mg/L for BOD<sub>5</sub>, 2.4~4.8 mg/L for COD<sub>Mn</sub>, 1.1~2.1 mg/L for DOC, 0.385~2.703 mg/L for T-N, 0.016~0.080 mg/L for T-P and 2.3~30.0 mg/L for SS.

**keywords** : Event Mean Concentration (EMC), First flush, Forest type, Runoff coefficient, Runoff depth

### 1. 서론

비점오염원은 오염원의 종류, 독성, 발생량 그리고 오염 물질이 인간과 동식물에게 미치는 영향을 명확하게 판단하기가 어려우며(최중대, 1997), 강우강도, 강우지속시간, 선행무강우일수, 유달거리, 개발지역의 유무 등에 따라 유역에 미치는 영향의 정도도 달라진다(최중대 등, 1999). 미국의 경우 비점오염원의 중요성을 인식하여 1970년대부터 비점오염원에 관한 연구를 해왔고, 자료도 많이 축적하였으며(USEPA, 1983) 현재도 지속적인 연구가 이루어지고 있다. 그러나 미국의 오염총량제도를 위한 자료는 부족한 점이 많아 추가적인 자료를 습득하기 위한 모니터링 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

국내의 경우 점오염원에 대한 처리 효율이 커지면서 강우시 발생하는 비점오염원에 대한 관심이 증가하고 있으며, 환경부에서는 우리나라에서의 비점오염원은 전체 수질오염원의 40% 이상으로서 2015년에는 약 65~70%로 증가할 것으로 예상하고 있다(환경부, 2006). 또한 4대강 수계 물관리 종합대책(정부합동, 1998~2000)에 따르면 영산강·섬진강 수계의 경우 전체오염원에서 비점오염원이 차지하는 비율이 BOD를 기준으로 37.4%에 이르며 금강수계 및 만경·동진강 수계는 21.7%에 이르고 있다. 이러한 비점오염원의 문제를 해결하기 위해 2007년에는 비점오염원의 비율이 상대적으로 높은 지역을 비점오염원 특별관리지역으로 지정하여 비점오염원 부하의 저감을 위한 전방위적인 노력을 수행하고 있다. 그러나 수질개선을 위해서는 비점오염원이 어디서 어떻게 얼마나 발생하는지에 대한 정량적인 연구와 이동경로 그리고 감축가능성에 대한 연구가 이루어져야 한다(이현동과 배철호, 2002; 최지용과 신은성, 1997).

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

jdchoi@kangwon.ac.kr

최근까지 우리나라에서 수행된 유역단위의 비점오염부하 산정 연구는 유역에서 발생하는 오염부하의 규모를 정량화하기에는 유용하지만, 중분류 지목별 토지이용에서 발생하는 비점오염부하와 원단위를 산정하기에는 비효과적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 토지분류체계의 지목별로 장기적인 모니터링을 통해 비점오염부하의 정량화가 이루어질 필요가 있으며(신민환 등, 2007; 원철희 등, 2009; Yoon et al., 2009), 환경부에서도 전국의 토지를 대분류, 중분류 그리고 세분류로 구분하고 지목별로 발생부하, 할당부하 및 삭감부하 등의 비점오염부하를 정량적으로 산정하여 오염총량제에 사용될 수 있도록 노력을 하고 있다(신동석, 2007).

한편 중분류 지목별 중 산림은 자연상태 하천의 배정능도를 결정하는 주요 비점오염원으로서(김건하 등, 2003), 활엽수림, 침엽수림, 혼효림으로 구분할 수 있다. 우리나라에서 산림의 임상분포는 침엽수림 2,687천 ha(42.1%), 활엽수림 1,662천 ha(26.0%), 혼효림 1,862천 ha(29.2%), 기타 173천 ha(2.7%)로서 침엽수림이 가장 많은 분포를 나타내고 있으며, 산림청(2008)에 따르면 침엽수림과 활엽수림의 면적은 매년 줄어들고 있으나 혼효림은 점차 증가하고 있다. 한편 우리나라 국토면적 9,972천 ha 중 산림의 면적이 6,382천 ha로 약 64%를 차지하고 있어 주요 용수공급원인 다목적 댐들의 경우 유역 내 산림의 점유율이 높아 적절한 수질관리 기준과 대책이 필요하다(산림청, 2008; 여중현과 김건하, 2005). 그러나 우리나라의 경우 산림에 대한 유역단위나 지목별 오염부하를 측정할 연구가 원활히 수행되지 못하였기 때문에 오염총량제의 합리적인 추진을 위하여 산림에서 발생하는 오염부하를 정량화 할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 오염총량제 및 정책제안에 있어서 합리적인 추진을 위해 토지피복분류별 중분류에 해당하는 산림을 임상별(활엽수림, 침엽수림, 혼효림)로 구분하고 강우 사상에 따른 비점오염물질의 유출특성을 조사함으로써 산림지역에 대한 임상별 원단위 설정과 비점오염물질 유출 특성에 대한 기초 자료를 수집하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 모니터링 지점 및 유역형상

활엽수림은 활엽수(상수리나무, 밤나무, 느티나무, 오동나무, 굴참나무, 신갈나무, 옻나무, 사시나무, 목련, 회양목, 보리수나무, 뽕나무 계수나무, 박달나무 등)가 75% 이상인 임지를 말하며, 침엽수림은 침엽수(가문비나무, 전나무, 개일갈나무, 리기다소나무, 은행나무, 측백나무, 향나무, 잎갈나무, 종비나무, 솔송나무, 눈잣나무, 분비나무, 주목, 구상나무 등)가 75% 이상인 임지를 말한다. 또한 혼효림은 침엽수나 활엽수가 25% 이상 75% 미만인 임지를 말한다. Weltz 등(1992)은 침엽수(Lime prickly와 Mesquite)와 활엽수(Texas persimmon와 Texas colubrina)의 엽면적과 엽면적율(엽면적/엽면적률)을 제시하였다. 침엽수의 평균 엽면적은 45,182 mm<sup>2</sup>와 55,358 mm<sup>2</sup>이라 하였고, 활엽수림은 50,312 mm<sup>2</sup>와 52,805 mm<sup>2</sup>라 하였다. 또한 엽면적은 침엽수와 활

엽수의 대소차이가 뚜렷하지 않았으나, 엽면적률은 침엽수(8,744 mm<sup>2</sup>/g와 8,923 mm<sup>2</sup>/g)보다 활엽수(10,752 mm<sup>2</sup>/g와 11,003 mm<sup>2</sup>/g)가 더 큰 것으로 나타났다고 하였다. 여기서, 엽면적률은 토양피복도와 밀접한 관계가 있기 때문에 강우 유출 및 오염물질 유출에 영향을 준다. 본 연구에서는 활엽수림과 침엽수림 그리고 혼효림 등 3종류의 임상에 대하여 2008년 4월부터 2009년 5월까지 강우유출수를 조사하였으며, 임상별 연구지점 및 유역형상은 Fig. 1과 같다. 활엽수림(Kong-Ju, KJ)은 충남 공주시 반포면 도남리 충남산림환경연구소 부지에 위치하며, 유역면적은 21.7 ha이고 5~36°의 경사로 이루어져 있으며, 활엽수가 지배적인 3영급 천연림에 속한다. 유역의 표고는 40~310 m이며 유역형상은 북서와 남동쪽으로 펼쳐진 모양이다. 토성은 사양토가 주를 이루고 있고, 모암은 화강암과 편마암으로 구성되어 있다. 침엽수림(Jin-An, JA)은 전북 진안군 진안읍 연장리에 위치하며, 유역면적은 37.73 ha이고 15~40°의 경사로 이루어져 있으며, 리기다 소나무가 주종인 3영급 인공림에 속한다. 유역의 표고는 340~550 m이며, 넓은 나뭇잎 모양의 유역형상을 하고 있다. 토성은 사양토가 주를 이루고 있고, 모암은 사암과 혈암으로 구성되어 있다. 혼효림(Cheong-Won, CW)은 청원군 미원면 미원리 충북산림환경연구소 부지에 위치하고 있으며 유역면적은 25.54 ha이고, 토성은 사양토와 양질사토가 주를 이루고 있으며, 유역의 표고는 300~510 m로 나타났다.

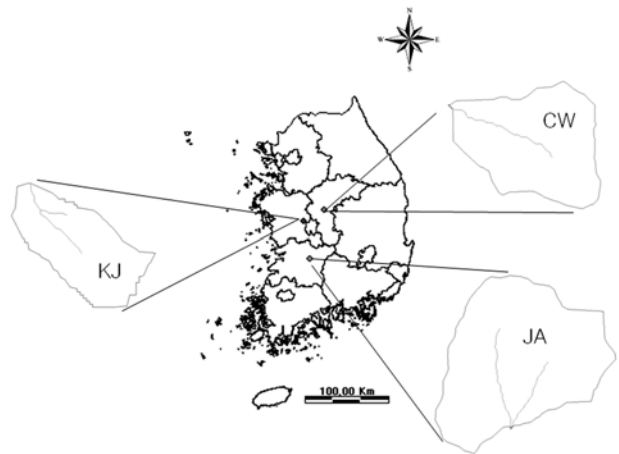


Fig. 1. Sketch of the monitoring location.

### 2.2. 모니터링 방법

최근에 빈번하게 발생하고 있는 국지적인 게릴라성 폭우의 증가는 부정확한 강수량 예보의 원인이 되며, 모니터링 지점에 측정망이 없을 경우 현장의 정확한 강수량을 측정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 각 연구지점마다 증량식 자기우량계(FLUVIO)를 설치하여 강수량을 실측하였다. 측정된 강수량 자료와 기상청의 날씨 데이터에 기초하여 선행무강우일수(Antecedent dry day, ADD), 총강우량, 강우강도 그리고 강우지속시간 등을 분석하였다. 임상에 따른 강우시 유출 특성은 유출고(식 (1))와 유출률(식 (2))을 비교·분석하였다. 유출고는 면적당 유거량(강우중 지표로 흘

러 없어진 물의 총량)을 면적대비 수위로 표시한 양이고, 유출률은 강우사상마다 발생한 강우대비 유출된 유출량의 비율로 나타낸다.

$$Depth\ of\ runoff(H_i) = \frac{Q_i}{Area} \times 1,000 \quad (1)$$

$$Coefficient\ of\ runoff(R_i) = \frac{H_i}{P_i} \quad (2)$$

여기서,  $H_i$ 는 유출고(mm),  $Q_i$ 는  $i$ 번째 강우사상의 총 유량( $m^3$ ),  $Area$ 는 입상별 면적( $m^2$ )이고,  $R_i$ 는 유출률,  $P_i$ 는  $i$ 번째 강우사상의 총 강우량(mm)이다.

유량은 국립산림과학원에서 수문분석을 위해 각 산림 지역의 경사도를 고려하여 유출부에 설치한 직사각형 저류조와 위어(Weir)를 이용하여 측정하였다(Fig. 2). 설치된 위어는 모두 V-notch 형태로서 직사각형 위어에 비해 유량변화에 따른 수위변화폭이 큰 장점이 있어 정밀한 수두(head)의 측정이 가능하다. 위어의 각도는 지점마다 평균 유량 대비 위어의 통수능(通水能) 등을 고려하여 활엽수림(KJ) 지점은  $90^\circ V$  위어, 침엽수림(JA)과 혼효림(CW) 지점은  $120^\circ V$  위어를 각각 설치하였고, Thalimedes 부자식 수위계와 ICSO 6712 Liquid Level Actuator(1640) 수위계를 이용하여 5~15분 간격으로 수위를 측정 후, Table 1의 위어 공식을 이용하여 유량으로 환산하였다.

**Table 1.** Weir formula applied in dam of water pumping

|            |  |
|------------|--|
| 90°V Weir  | $Q = (1.227 \times 10^{-3}) \times ((H \times 0.1 + 0.7529)^{2.6605}) \times 3600 / A$ |
| 120°V Weir | $Q = (1.485 \times 10^{-9}) \times ((H + 62.5868)^{3.0821}) \times 3600 / A$           |

여기서,  $Q$ 는 유출량( $m^3/ha/hour$ )이고,  $H$ 는 수위(mm) 그리고  $A(ha)$ 는 각 지점의 면적을 나타낸다.

산림에서 발생하는 강우유출수는 강우가 발생한 뒤 토양을 포화시킨 후 표면을 통해 유출되거나 토양으로 침투하여 기저로 유출되며, 투수층이 많은 지역의 경우 5 mm 이하의 적은 강우가 발생하였을 경우 수위의 변화가 뚜렷하지가 않다고 보고되고 있다(신민환 등, 2008). 따라서 본

연구에서는 수위의 변화가 뚜렷이 나타난 5 mm 이상을 대상으로 강우유출수를 조사하였다. 시료는 자동채수기(ISCO sampler 6712)를 이용하여 채수하였으며, 자동채수기는 수위계와 연동되어 설정된 수위에 이르면 채수가 시작된다. 강우시 기기의 오작동을 방지하기 위해 강우 전 현장에서 기기의 오작동 여부를 판단하고, 강우량과 수위의 변화를 관측하였으며, 강우가 발생한 후 수위의 변동이 발생하였을 때 자동채수기를 통해 ‘강우유출수 조사방법’에 따라 초기에는 5~15분 간격, 2시간 이후에는 1~2시간 간격으로 시료를 채취하였다(환경부, 2009). 채취된 시료는 강우유출이 끝날 때까지 냉장보관하였으며, 아이스박스를 이용하여 실험실로 이동하여 분석하였다. 수질분석은 수질공정시험법에 준하여 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, DOC, SS, T-N 그리고 T-P 항목을 분석하였다(환경부, 2005).

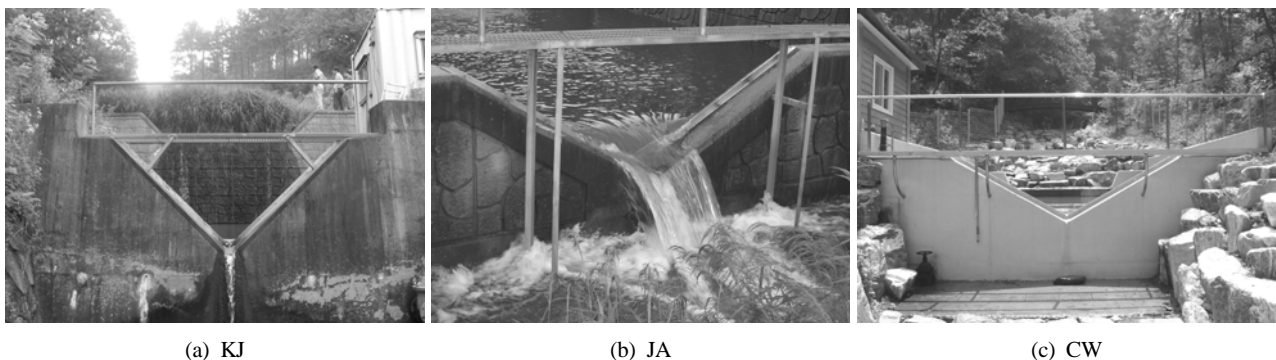
### 2.3. EMC, 오염부하 및 원단위

강우 유출수는 강우강도와 지속시간에 따라 시간대별로 급격히 변화하기 때문에 유량가중평균농도(Event Mean Concentration, EMC)를 산정한다(원철희 등, 2009; 이소영 등, 2007). EMC는 식 (3)의 방법을 이용하였다.

$$EMC(mg/L) = \frac{\int_0^n Q(i) \times C(i) di}{\int_0^n Q(i) di} \quad (3)$$

여기서,  $Q(i)$ 는  $i$ 번째의 구간별 유량( $m^3$ )이고,  $C(i)$ 는  $i$ 번째 분석된 수질항목 농도(mg/L),  $n$ 은 각 강우사상마다 분석된 시료의 개수이다.

식 (4)는 강우사상마다 강우에 의해 발생하는 유량과 수질농도의 값을 산정하고, 산정된 값들의 곱으로 오염부하량을 산정하는 식이다(신민환 등, 2009). Clement and Buzas (1999)과 Miller 등(2001)은 오염부하의 정확성을 위해서는 본 연구의 방법과 같이 연속적인 유량산정과 농도분석이 필요하다고 하였으며, Yaksich and Verhoff(1983)에 의하면 강우사상당 12개 이상의 수질시료가 필요하다고 하였다. 이는 유역특성과 강우지속시간에 따라 다소 차이가 발생할



**Fig. 2.** Shape of weir as monitoring site.

수 있지만, 본 연구에서는 강우로 인한 수위변화가 5시간 이상 지속될 경우 선행연구들보다 많은 수의 유량과 수질 시료를 분석하여 임상별 산림에서 발생하는 오염부하를 정량화하였다. 또한 산정된 오염부하를 이용하여 식 (5)와 같이 각 임상별 산림에서 발생하는 원단위를 산정하였다(원철희 등, 2009).

$$Load = \sum_{i=1}^n c_i q_i t_i \quad (4)$$

여기서,  $c_i$  는  $i$  번째의 농도이고,  $q_i$  는 구간유량,  $t_i$  는  $\frac{1}{2}(t_{i+1} - t_{i-1})$ 에 해당하는  $i$  번째 샘플로써 표현되는 시간 구간이다.

$$Unit \ loading(kg/ha/year) = pollutant \ load(kg) \times \frac{f}{A(ha)} \quad (5)$$

여기서,  $A$  (ha)는 각 산림의 면적이고,  $f$ 는 연간원단위 환산 인자(각 지점 기상청의 30년 연평균강수량/실측 기간 강우량)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수문분석 및 유출특성

연구기간동안 분석한 각 임상별 강우사상은 활엽수림(KJ) 10회, 침엽수림(JA) 8회 그리고 혼효림(CW)은 12회로 총 32회에 대한 강우사상에 대하여 분석하였다. 각 연구지점마다 5 mm 이하의 강우가 발생하였을 때는 불투수층에 덮여있는 식물의 흡수나 토양으로의 침투로 인해 수위변화가 거의 없고, 유출이 발생하지 않을 것으로 판단되어 강우사상 분석에서 제외하였다(신민환 등, 2008). 연구기간 동안 각 강우사상마다 4~44 hr의 강우지속시간과 0.4~10.7 mm/hr의 강우강도로 6~53.5 mm의 강우량을 나타냈다. 이때 발생한 유출량은 4~178 hr 시간동안 5.36~2,994 m<sup>3</sup> 범위의 유출량이 발생하였다(Table 2). 활엽수림(KJ)의 평균 유출고와 유출률은 각각 1.037 mm와 0.063로 조사되었으며, 침엽수림(JA)에서는 2.490 mm와 0.085 그리고 혼효림(CW) 0.674 mm와 0.024로 나타났다. 유출고는 침엽수림(JA)이 가장 크게 나타났고, 유출률은 활엽수림(KJ)과 침엽수림(JA)이 혼효림(CW)보다 큰 것으로 나타났다. 이는 김수진

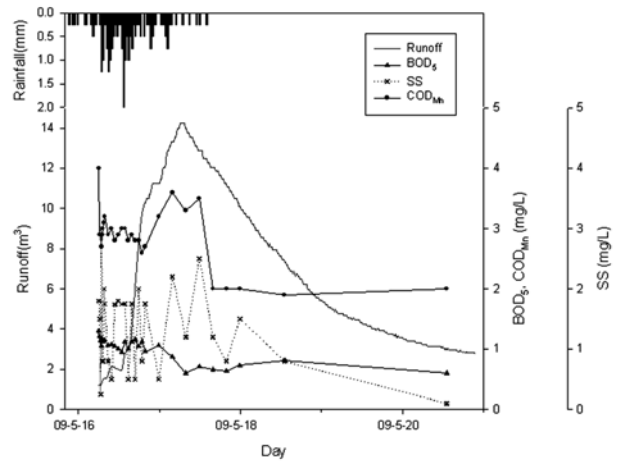
**Table 2.** Description of storm event each of the forest types

| Site             | Event | Total rainfall (mm) | Rainfall Intensity (mm/hr) | Rainfall duration (hr) | Total runoff (m <sup>3</sup> ) | Runoff duration (hr) | Runoff depth (mm) | Runoff coefficient |
|------------------|-------|---------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| Deciduous (K J)  | E-1   | 21.2                | 1.0                        | 21                     | 931.72                         | 77                   | 4.29              | 0.20               |
|                  | E-2   | 9.0                 | 0.7                        | 13                     | 95.89                          | 18                   | 0.44              | 0.05               |
|                  | E-3   | 42.7                | 10.7                       | 4                      | 142.58                         | 4                    | 0.66              | 0.15               |
|                  | E-4   | 14.4                | 2.4                        | 6                      | 82.59                          | 7                    | 0.38              | 0.03               |
|                  | E-5   | 7.3                 | 1.8                        | 4                      | 5.36                           | 5.5                  | 0.02              | 0.003              |
|                  | E-6   | 9.2                 | 0.4                        | 21                     | 52.9                           | 24                   | 0.24              | 0.03               |
|                  | E-7   | 22.0                | 1.6                        | 14                     | 177.34                         | 24                   | 0.82              | 0.037              |
|                  | E-8   | 6.0                 | 1.0                        | 5                      | 28.03                          | 10                   | 0.13              | 0.02               |
|                  | E-9   | 23.5                | 2.1                        | 11                     | 89.15                          | 9                    | 0.41              | 0.02               |
|                  | E-10  | 33.0                | 1.7                        | 20                     | 645.95                         | 12                   | 2.98              | 0.09               |
| Coniferous (J A) | E-1   | 14.0                | 0.7                        | 20                     | 560.23                         | 30                   | 1.49              | 0.11               |
|                  | E-2   | 9.0                 | 1.3                        | 7                      | 52.88                          | 6                    | 0.14              | 0.02               |
|                  | E-3   | 35.4                | 4.4                        | 8                      | 684.31                         | 24                   | 1.82              | 0.05               |
|                  | E-4   | 21.3                | 1.5                        | 14                     | 982.06                         | 22.5                 | 2.61              | 0.12               |
|                  | E-5   | 13.5                | 2.7                        | 5                      | 49.90                          | 10                   | 0.13              | 0.01               |
|                  | E-6   | 31.4                | 1.96                       | 16                     | 1,924.0                        | 178                  | 5.10              | 0.16               |
|                  | E-7   | 11.5                | 1.28                       | 9                      | 262.0                          | 49                   | 0.69              | 0.06               |
|                  | E-8   | 52.0                | 1.46                       | 42                     | 2,994.0                        | 121                  | 7.94              | 0.15               |
| Mixed (C W)      | E-1   | 40.5                | 5.06                       | 8                      | 67.82                          | 10.5                 | 0.27              | 0.007              |
|                  | E-2   | 13.5                | 1.93                       | 7                      | 39.15                          | 9.5                  | 0.15              | 0.011              |
|                  | E-3   | 21.5                | 5.38                       | 4                      | 59.45                          | 12                   | 0.23              | 0.011              |
|                  | E-4   | 29                  | 3.63                       | 8                      | 32.68                          | 5.5                  | 0.13              | 0.004              |
|                  | E-5   | 40.0                | 4.44                       | 9                      | 382.20                         | 52                   | 1.50              | 0.037              |
|                  | E-6   | 27.0                | 1.59                       | 17                     | 229.10                         | 46                   | 0.90              | 0.033              |
|                  | E-7   | 25.5                | 2.83                       | 9                      | 91.38                          | 16.2                 | 0.36              | 0.014              |
|                  | E-8   | 14.0                | 1.00                       | 14                     | 144.27                         | 35                   | 0.57              | 0.040              |
|                  | E-9   | 20.5                | 1.46                       | 14                     | 284.55                         | 61.8                 | 1.11              | 0.054              |
|                  | E-10  | 17.0                | 0.77                       | 22                     | 95.89                          | 25                   | 0.38              | 0.022              |
|                  | E-11  | 23.0                | 2.30                       | 10                     | 99.73                          | 26                   | 0.39              | 0.017              |
|                  | E-12  | 53.5                | 1.22                       | 44                     | 536.15                         | 65.3                 | 2.10              | 0.039              |

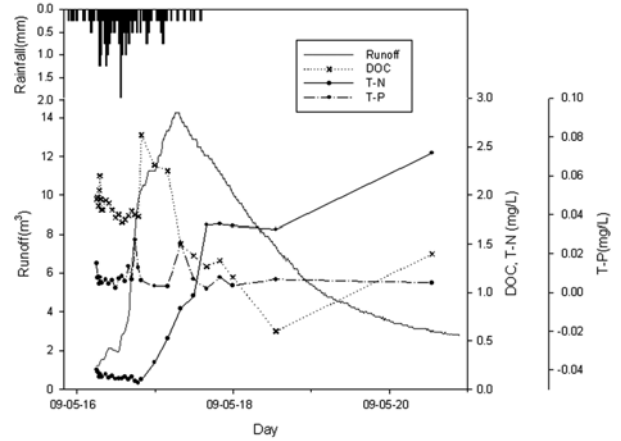
등(2005)이 48시간 동안 강우시 조사한 침엽수림과 활엽수림의 강우량 대비 유출량 크기를 비교한 결과 활엽수림의 유출량이 큰 결과와 상반되는 결과이다. 이는 경사도와 유역면적이 다른 지역에서 48시간 동안 한번의 조사로 나타난 결과로써 본 연구와는 많은 차이가 발생할 수 있다. 또한 산림에서 발생하는 유출량의 경우 강우의 특성, 선행무강우일수, 토양의 특성, 경사도 그리고 산림관리 등 다양한 조건에 따라 크게 변화하기 때문에 강우량과 강우패턴의 조건이 달라 상반되는 결과를 보인 것으로 판단된다. 따라서 환경부(2009)에서 제시하고 있는 ‘강우유출수 조사방법’에 의한 원단위 산정을 위해서 다양한 강우계급(0~10 mm, 10~20 mm ...)에 대한 모니터링 이외에 선행무강우일수, 토성, 경사도, 그리고 산림관리 등의 다양한 조건에 대해서도 지속적인 연구조사가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 침엽수림(JA) 지역의 2009년 5월 15일부터 5월 20일(JA, E-8)까지 52 mm의 강우로 인하여 2,994.0 m<sup>3</sup>의 유출이 발생한 강우사상의 수문그래프로서 강우시 발생 시간단위 강우량과 유출량 그리고 농도변화를 나타내었다. 5월 15일 21:00시부터 강우가 시작되어 5월 16일 06:00시까지 0.61 mm/hr의 강우강도로 5.5 mm의 강우가 발생 한 뒤에 수위의 변화가 시작되었다. DOC와 T-P 그리고 T-N 항목의 경우 유출량이 증가함에 따라 농도의 변화도 유사하게 증가하는 경향이 나타났음을 알 수 있다. 또한 SS 항목은 유출량의 증가와 상관없이 증가와 감소가 반복되었으나, 큰 차이 없이 농도가 산정된 것을 알 수 있다. 이는 산림의 경우 선행무강우일수와 강우강도의 영향으로 산사태 및 토사붕괴가 발생하지 않았기 때문에 SS 항목에 큰 변화가 없었고, 약간의 증·감되는 현상은 샘플채취 방법과 시료분석 방법에서 발생하는 오차로 판단된다. 한편 산림에서 발생하는 강우유출수는 강우가 종료된 이후에도 기저유출량의 증가로 인하여 상당기간 지속되기 때문에 유량과 시료의 채취시 이를 충분히 고려해야 한다. 본 연구에서는 강우가 발생하기 시작한 시작점 수위부터 강우가 끝난 뒤 수위가 시작점으로 돌아올 때까지의 수위변화를 한 번의 강우사상으로 보고 유출특성을 분석하였다.

강우시 유출되는 오염물질은 토지의 이용형태와 세부 오염항목에 따라 유출특성이 다르게 나타난다. 도시유역과 같은 불투수층이 지배하는 지역은 초기강우에 의해 초기유출(First flush)에서 초기세척효과가 발생하는데(Lee et al., 2002), Geiger(1987)는 표준화된 누적오염부하량 그래프를 표준화된 누적유출량과 비교하였을 때 그 기울기가 45도 이상일 경우 초기세척효과가 발생한다고 하였다. 또한 Bertrand-Krajewski 등(1998)은 오염부하량 증 적어도 80% 이상이 초기유출량의 30%에 포함될 경우에 초기세척효과가 나타난다고 하였다. 본 연구의 대상 지역인 산림은 불투수층이 지배하는 지역은 아니지만 초기세척효과와 발생 유·무를 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 누적오염부하량/누적유출량 그래프를 도식화하였다. 모든 임상에서 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, DOC 항목의 경우 초기세척효과가 나타나지 않았다. 그러나 SS 항목의 경우 임상별로 1번 이상의 뚜렷한



(a) BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, SS



(b) DOC, T-N, TP

Fig. 3. Variation graph of concentration from rainfall at coniferous forest (JA).

초기세척효과가 관측되었다. 침엽수림(KJ)에서 SS 항목이 초기세척효과가 나타났을 때의 강우량은 21.7 mm와 42.7 mm로 강우지속시간이 길거나 강우강도가 큰 경우에 발생하는 것으로 나타났다. 활엽수림(JA)에서는 SS와 T-N 그리고 T-P 항목이 초기세척효과가 나타났다. SS 항목의 경우는 35.4 mm의 강우량과 4.4 mm/hr의 강우강도가 발생하였을 때 초기세척 효과가 나타났고, T-N과 T-P 항목 또한 20 mm 이상의 강우가 발생하였을 때 초기세척효과가 나타났다. 또한 혼효림(CW) 지역에서 발생한 SS 항목의 초기세척효과는 40.0 mm와 53.5 mm의 강우가 발생하였을 때 나타났다. 산림과 같은 불투수층에서도 강우강도가 크거나 강우량이 많을 경우 초기세척효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 정성민 등(2009)이 복합토지인 농업지역에서 초기세척효과를 조사한 결과 SS와 T-P 항목이 초기세척효과가 나타난 결과와 유사한 결과이다. 그러나 원철휘 등(2009)이 본 연구와 유사한 독립된 산림에서 초기세척효과를 조사한 결과 SS 항목을 제외한 모든 항목(BOD, COD, TN, TP)에서 뚜렷한 초기세척효과가 나타나지 않았다고 하였다. 기존의 연구와 본 연구의 결과로 판단할 때, 산림의 경우 SS 항목에서 초기세척효과가 관측되나, 이는 강우강도가 현저

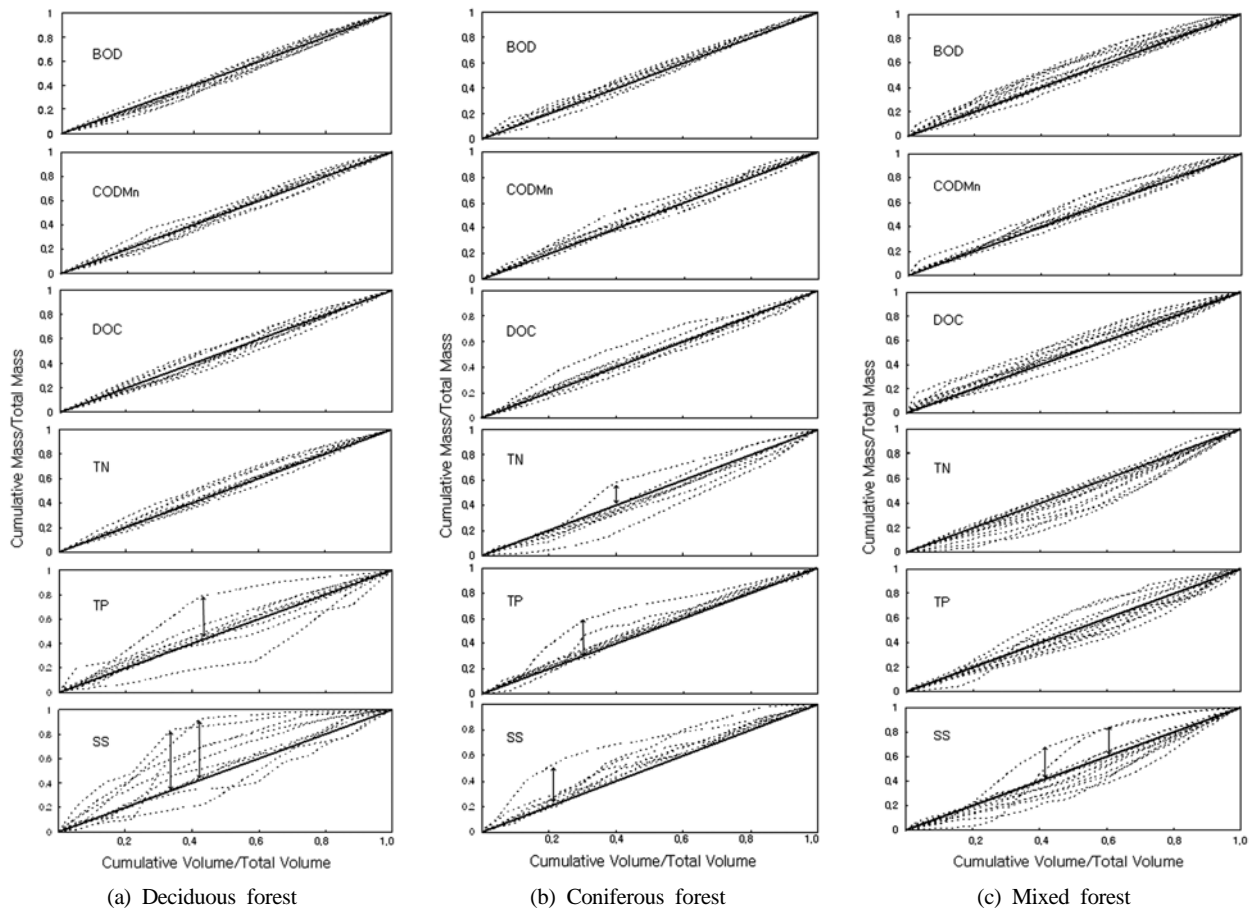


Fig. 4. Cumulative mass and volume curves as forest types.

히 크거나 산사태 또는 토양유실이 발생할 경우에 국한될 것으로 판단된다.

3.2. EMC, 오염부하량 및 원단위

산림의 임상별 오염물질의 EMC 산정 결과를 Table 3에 제시하였다. 활엽수림(KJ) 지역의 EMC는 BOD<sub>5</sub> 0.8~2.4 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 2.0~13.4 mg/L, DOC 1.3~2.9 mg/L, T-N 1.150~3.913 mg/L, T-P 0.010~0.350 mg/L, SS 3.1~291.8 mg/L의 범위로 나타났다. 침엽수림(JA)지역의 EMC는 BOD<sub>5</sub> 0.8~2.2 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 1.9~3.6 mg/L, DOC 1.0~2.0 mg/L, T-N 1.025~2.957 mg/L, T-P 0.002~0.084 mg/L, SS 0.8~5.4 mg/L의 범위로 나타났다. 또한 혼효림(CW) 지역 EMC는 BOD<sub>5</sub> 1.3~2.3 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 2.4~4.8 mg/L, DOC 1.1~2.1 mg/L, T-N 0.385~2.703 mg/L, T-P 0.016~0.080 mg/L, SS 2.3~30.0 mg/L의 범위로 나타났다. EMC 결과의 평균값은 BOD<sub>5</sub> 항목이 혼효림 지역에서 가장 높게 나타난 것을 제외하고 모든 항목에서 활엽수림이 가장 큰 것으로 나타났다. 임상별 EMC 농도의 범위는 원철희 등(2009)이 산림에서 강우유출수를 조사한 EMC 값들과 큰 차이를 보이지 않았지만, 활엽수림의 SS와 COD<sub>Mn</sub> 항목의 EMC는 최대 291.8 mg/L와 13.4 mg/L로 다른 강우사상보다 매우 높게 나타났다. 이는 상대적으로 큰 강우강도(10.7 mm/hr)시 발생한 토사유출에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 이처럼

같은 산림에서 조사된 경우라도 강우와 토양 그리고 임상별 특성에 따라 EMC의 크기가 크게 차이나는 것으로 나타났다. 따라서 산림에서 발생하는 오염물질을 정량화하기 위해서는 강우계급, 토양 특성, 그리고 경사도에 대한 세부 조건별 장기모니터링의 지속적인 추진이 요구된다.

Fig. 5에는 강우사상별 T-N과 T-P 그리고 SS 항목의 오염부하를 나타내었다. 오염부하는 강우사상별 유출량과 오염물질의 농도로 인하여 강우사상과 임상에 따라 큰 차이를 보였다. 활엽수림(KJ) 지역의 SS 오염부하량은 세 번째 강우사상에서 가장 큰 41.60 kg의 오염부하량을 보였으며, 침엽수림(JA) 지역은 여덟 번째 강우사상에서 T-N의 오염부하량이 4.05 kg으로 가장 크게 나타났다. 혼효림(CW) 지역의 경우 약 40 mm의 강수량을 보인 다섯 번째 강우사상의 SS 오염부하량은 8.89 kg으로서 첫 번째 강우사상의 SS 오염부하량 0.53 kg보다 15배 이상 크게 발생한 것으로 조사되었다. 이는 강우량과 강우강도 그리고 선행무강우일수의 차이로 여겨진다. 임상별로 산정된 항목별 평균 오염부하량은 SS 항목을 제외한 모든 항목에서 침엽수림(JA) 지역이 가장 크게 나타났는데, 이는 SS 항목의 경우 활엽수림 지역의 세 번째 강우사상 때 발생한 오염부하량 때문에 평균값에서도 높은 수치를 나타낸 것으로 판단된다.

오염부하량, EMC, 유역면적 그리고 30년 연평균강수량을 고려하여 원단위를 산정하였다. 환경부(1995)의 보고에 따

Table 3. EMC value each of the forest types

(Unit: mg/L)

| Site                | Event          | BOD <sub>5</sub> | COD <sub>Mn</sub> | DOC   | T-N   | T-P   | SS    |
|---------------------|----------------|------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| Deciduous<br>(K J)  | E-1            | 1.4              | 3.0               | 2.2   | 3.036 | 0.059 | 5.7   |
|                     | E-2            | 1.1              | 4.1               | 2.3   | 3.000 | 0.032 | 9.1   |
|                     | E-3            | 2.4              | 13.4              | 2.9   | 3.913 | 0.350 | 291.8 |
|                     | E-4            | 1.4              | 2.8               | 2.0   | 1.419 | 0.096 | 38.0  |
|                     | E-5            | 1.4              | 2.2               | 1.7   | 1.799 | 0.329 | 7.1   |
|                     | E-6            | 1.1              | 2.7               | 2.2   | 1.307 | 0.011 | 5.4   |
|                     | E-7            | 1.6              | 3.5               | 2.2   | 1.974 | 0.010 | 10.8  |
|                     | E-8            | 0.9              | 2.0               | 1.3   | 1.150 | 0.020 | 3.1   |
|                     | E-9            | 0.8              | 2.9               | 1.9   | 1.398 | 0.072 | 4.7   |
|                     | E-10           | 1.1              | 2.8               | 2.1   | 2.597 | 0.114 | 10.6  |
|                     | Max.           | 2.4              | 13.4              | 2.9   | 3.913 | 0.350 | 291.8 |
|                     | Min.           | 0.8              | 2.0               | 1.3   | 1.150 | 0.010 | 3.1   |
| Ave.                | 1.3            | 4.0              | 2.1               | 2.159 | 0.109 | 38.6  |       |
| Coniferous<br>(J A) | E-1            | 1.4              | 2.8               | 2.0   | 2.469 | 0.068 | 0.8   |
|                     | E-2            | 1.1              | 3.3               | 1.6   | 1.846 | 0.057 | 0.9   |
|                     | E-3            | 0.9              | 2.1               | 1.0   | 2.952 | 0.084 | 1.9   |
|                     | E-4            | 0.9              | 2.0               | 1.2   | 1.025 | 0.037 | 5.4   |
|                     | E-5            | 1.3              | 3.6               | 2.0   | 1.382 | 0.010 | 1.7   |
|                     | E-6            | 2.2              | 1.9               | 1.3   | 1.604 | 0.002 | 0.8   |
|                     | E-7            | 1.3              | 2.8               | 1.8   | 2.957 | 0.010 | 1.6   |
|                     | E-8            | 0.8              | 2.4               | 1.4   | 1.352 | 0.007 | 1.1   |
|                     | Max.           | 2.2              | 3.6               | 2.0   | 2.957 | 0.084 | 5.4   |
|                     | Min.           | 0.8              | 1.9               | 1.0   | 1.025 | 0.002 | 0.8   |
|                     | Ave.           | 1.2              | 2.6               | 1.5   | 1.948 | 0.034 | 1.8   |
|                     | Mixed<br>(C W) | E-1              | 1.8               | 3.7   | 1.3   | 0.484 | 0.055 |
| E-2                 |                | 1.5              | 2.4               | 1.1   | 0.450 | 0.016 | 2.3   |
| E-3                 |                | 2.2              | 3.1               | 1.1   | 0.385 | 0.080 | 7.2   |
| E-4                 |                | 2.1              | 3.3               | 1.2   | 0.608 | 0.025 | 12.3  |
| E-5                 |                | 1.7              | 4.8               | 2.1   | 2.703 | 0.045 | 30.0  |
| E-6                 |                | 1.8              | 3.4               | 1.4   | 0.963 | 0.037 | 7.1   |
| E-7                 |                | 1.7              | 3.9               | 2.0   | 0.530 | 0.030 | 11.8  |
| E-8                 |                | 1.3              | 3.1               | 1.4   | 0.502 | 0.022 | 5.7   |
| E-9                 |                | 1.6              | 4.0               | 1.1   | 0.899 | 0.025 | 9.2   |
| E-10                |                | 1.7              | 2.7               | 1.5   | 0.538 | 0.019 | 6.5   |
| E-11                |                | 2.3              | 4.0               | 1.7   | 0.528 | 0.019 | 7.6   |
| E-12                |                | 1.9              | 3.7               | 1.6   | 1.756 | 0.031 | 16.1  |
| Max.                |                | 2.3              | 4.8               | 2.1   | 2.703 | 0.080 | 30.0  |
| Min.                |                | 1.3              | 2.4               | 1.1   | 0.385 | 0.016 | 2.3   |
| Ave.                | 1.8            | 3.5              | 1.5               | 0.862 | 0.034 | 10.3  |       |

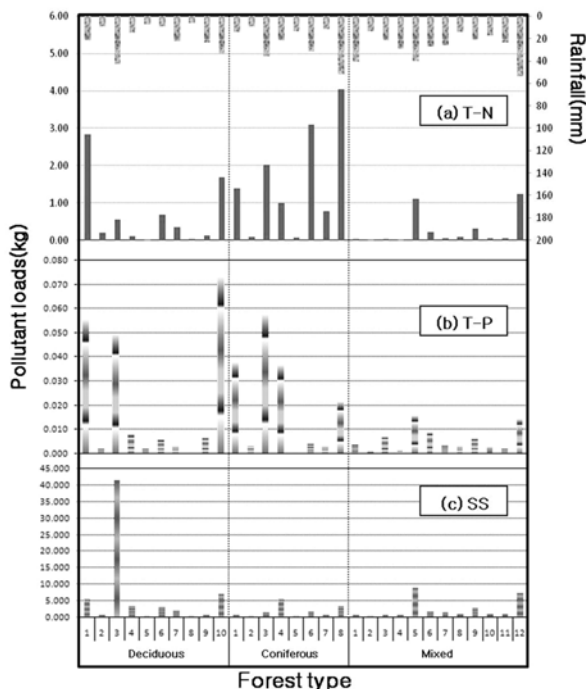


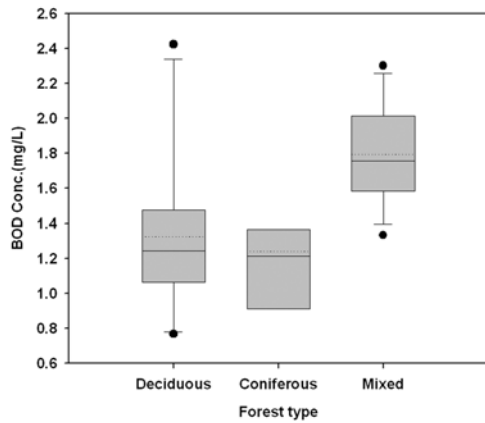
Fig. 5. Pollutant loads each of the Rainfall Event.

르면 산림의 전국평균 비점오염원 원단위는 BOD 3.5 kg/ha/year, COD 9.3 kg/ha/year, T-P 0.52 kg/ha/year, T-N 8.02 kg/ha/year이라 하였고, 환경부(2008)에서는 산림의 원단위를 BOD 0.93 kg/km<sup>2</sup>/일, T-N 2.20 kg/km<sup>2</sup>/일, T-P 0.14 kg/km<sup>2</sup>/일이라 하였다. 이처럼 선행연구에서 산정된 산림의 원단위 값은 매우 다양하기 때문에 임상별 및 강우계급별 원단위 산정을 위한 재검토가 필요함을 시사한다. 또한 Salvia-Castellvi 등(2005)에 의하면 순수한 산림지역에서의 인과 질소의 유출경향을 분석한 결과 다른 토지이용의 지역보다 상대적으로 적은 양이 나온다고 하였다. 본 연구에서 산정된 임상별 원단위는 기존의 연구와 많이 차이가 있었다. 활엽수림(KJ) 지역 BOD<sub>5</sub>의 평균 원단위는 1.225 kg/ha/year로 조사되었으며, COD<sub>Mn</sub>은 3.052 kg/ha/year, DOC는 2.094 kg/ha/year, T-N은 2.074 kg/ha/year, T-P는 0.028 kg/ha/year 그리고 SS는 13.513 kg/ha/year으로 나타났다. 침엽수림(JA) 지역 BOD<sub>5</sub>의 평균 원단위는 1.503 kg/ha/year, COD<sub>Mn</sub>은 2.680 kg/ha/year, DOC는 1.657 kg/ha/year, T-N은 2.076 kg/ha/year, T-P는 0.032 kg/ha/year 그리고 SS는 2.122 kg/ha/year으로 나타났다. 또한 혼효림(CW) 지역 BOD<sub>5</sub>의 평균 원단위는 0.470 kg/ha/year로 조사되었으며, COD<sub>Mn</sub>

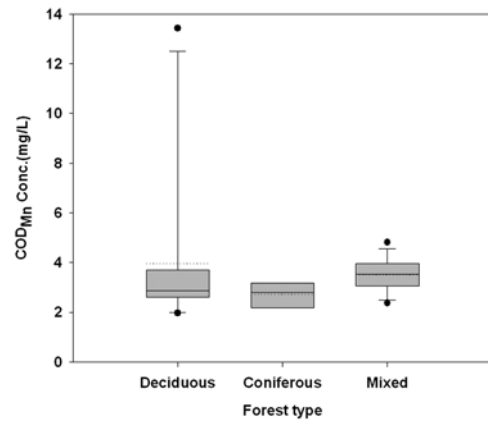
**Table 4.** Load as unit area

(unit: kg/ha/year)

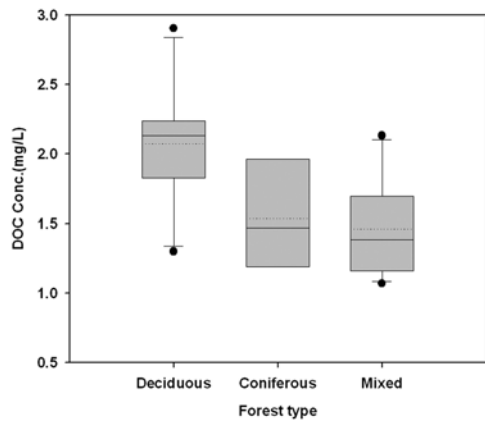
| Site                | Value | BOD <sub>5</sub> | COD <sub>Mn</sub> | DOC   | T-N   | T-P   | SS     |
|---------------------|-------|------------------|-------------------|-------|-------|-------|--------|
| Deciduous<br>(K J)  | MAX   | 4.056            | 9.891             | 7.772 | 8.369 | 0.112 | 61.105 |
|                     | MIN   | 0.062            | 0.102             | 0.080 | 0.083 | 0.000 | 0.325  |
|                     | AVE   | 1.225            | 3.052             | 2.094 | 2.074 | 0.028 | 13.513 |
| Coniferous<br>(J A) | MAX   | 4.804            | 5.045             | 2.935 | 3.548 | 0.097 | 8.874  |
|                     | MIN   | 0.172            | 0.476             | 0.266 | 0.183 | 0.001 | 0.193  |
|                     | AVE   | 1.503            | 2.680             | 1.657 | 2.076 | 0.032 | 2.122  |
| Mixed<br>(C W)      | MAX   | 0.848            | 2.510             | 0.869 | 1.375 | 0.019 | 10.933 |
|                     | MIN   | 0.118            | 0.194             | 0.072 | 0.033 | 0.002 | 0.334  |
|                     | AVE   | 0.470            | 1.032             | 0.412 | 0.384 | 0.009 | 3.213  |



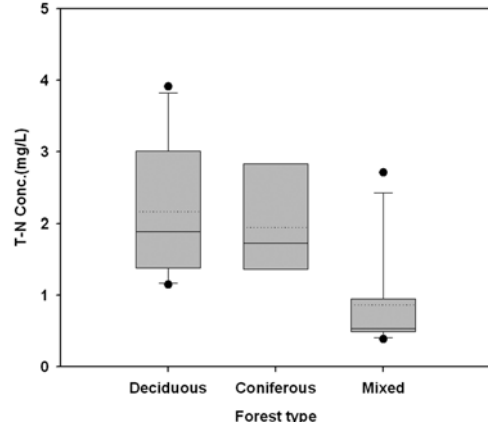
(a) BOD<sub>5</sub>



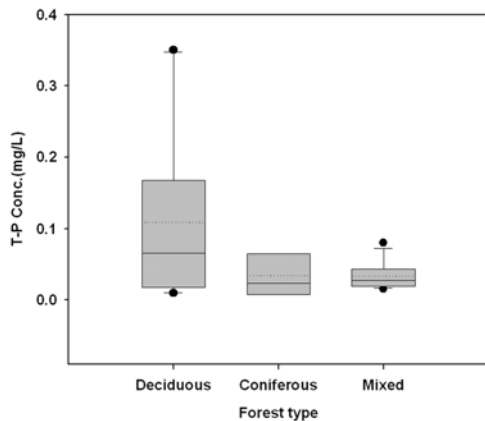
(b) COD<sub>Mn</sub>



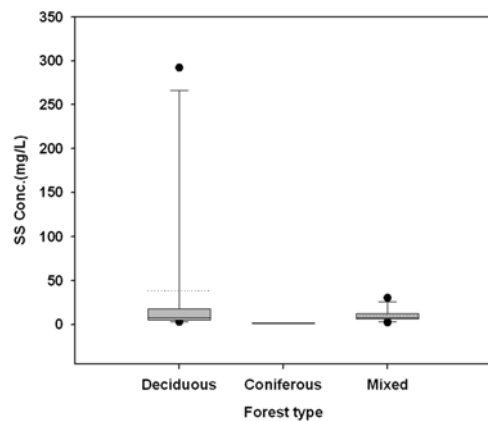
(c) DOC



(d) T-N



(e) T-P



(f) SS

**Fig. 6.** Statistical summaries of EMC each of the forest type.



은 1.032 kg/ha/year, DOC는 0.412 kg/ha/year, T-N은 0.384 kg/ha/year, T-P는 0.009 kg/ha/year 그리고 SS는 3.213 kg/ha/year으로 나타났다(Table 4). 본 연구에서 산정된 원단위는 비강우시의 조사결과를 제외하고 강우시만을 고려했기 때문에 선행연구에서 제시한 원단위보다 크게 산정될 수 있다. 따라서 정확한 원단위 산정을 위해서는 산림의 토성과 경사도 그리고 강우특성에 관한 연구와 강우시 뿐만 아니라 비강우시의 유량과 수질농도에 관한 추가적인 연구를 통하여 산림의 임상별 원단위를 산정해야 할 것으로 사료된다. 또한 활엽수림(KJ) 지역에서 10.7 mm/hr의 강우강도와 42.7 mm의 강우가 발생하였을 때 산정된 SS 항목의 원단위는 61.105 kg/ha/year로서 다른 강우사상에 비하여 매우 크게 산정되었다. 따라서 지속적인 모니터링으로 인한 자료의 축적 후 세부 강우계급과 강우강도에 대한 원단위의 구분도 필요할 것으로 판단된다.

3.3. 통계분석

Fig. 6은 임상별로 산림에서 산정된 EMC에 대하여 box plot을 이용한 통계 분석결과를 나타낸 것이다. Box 그래프는 최대값, 제3사분위수, 평균값과 중간값, 제1사분위수, 최소값을 그래프의 상단부터 하단방향으로 나타낸다. EMC의 값이 넓게 분포하면 사각형의 크기가 커지고 반대로 비슷한 값들로 구성되어 있으면 사각형의 크기가 작아진다. 활엽수림(KJ) 지역의 EMC<sub>BOD</sub>는 다른 산림보다 넓은 분포를 보였으며, EMC<sub>BOD</sub>의 평균값은 혼효림(CW) 지역이 1.8

mg/L로 가장 크게 나타났다. EMC<sub>BOD</sub>를 제외한 모든 항목의 EMC 농도의 평균값은 활엽수림(KJ)지역이 큰 것으로 나타났다. 특히 EMC<sub>SS</sub>의 경우 활엽수림(KJ) 지역에서 산정되었던 291.8 mg/L의 EMC 결과 때문에 평균값도 38.6 mg/L로 매우 높게 산정되었다. 산림의 임상별 EMC 농도의 95% 신뢰수준은 EMC<sub>BOD</sub> 0.2~0.5 mg/L, EMC<sub>CODMn</sub> 0.4~3.5 mg/L, EMC<sub>DOC</sub> 0.2~0.4 mg/L, EMC<sub>TN</sub> 0.439~0.955 mg/L, EMC<sub>TP</sub> 0.012~0.130 mg/L, EMC<sub>SS</sub> 4.6~92.0 mg/L로 나타났다.

Table 5에는 통계 프로그램인 SAS 9.1을 이용하여 분석한 유량과 수질 농도들 사이의 상관관계를 제시하였다. 상관계수는 -1에서 +1까지의 값을 갖는데, -1 또는 1의 관계를 갖는 경우 완전상관이라고 하며 0인 경우는 무상관이라고 한다. 원철희 등(2009)에 의하면 상관계수의 절대값이 0.6 이상일 경우 상관관계가 높다고 말하며 0.3 이하는 상관관계가 낮다고 하였다. 활엽수림(KJ) 지역은 T-P항목을 제외한 모든 항목이 유의수준 1%에서 양의 상관성을 나타냈다. Flow-COD<sub>Mn</sub>, Flow-SS, BOD<sub>5</sub>-COD<sub>Mn</sub>, 그리고 BOD<sub>5</sub>-DOC의 상관관계는 유의수준 1%에서 0.6 이상으로 나타나 수질 항목들 간 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 침엽수림(JA) 지역은 COD<sub>Mn</sub>과 DOC 항목의 상관관계가 0.636으로 가장 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, SS와 T-P 항목이 다른 항목들과 유의수준 1%에서 음의 상관관계가 있는 것으로 조사되었다. SS 항목은 다른 산림지역과 다르게 음의 상관관계가 나타났다. 혼효림(CW) 지역

Table 5. Pearson correlation coefficients

| Site                | Item              | Flow | BOD <sub>5</sub> | COD <sub>Mn</sub> | DOC     | SS       | T-N      | T-P      |
|---------------------|-------------------|------|------------------|-------------------|---------|----------|----------|----------|
| Deciduous<br>(K J)  | Flow              | 1    | 0.542**          | 0.768**           | 0.495** | 0.741**  | 0.496**  | 0.425**  |
|                     | BOD <sub>5</sub>  |      | 1                | 0.716**           | 0.624** | 0.338**  | 0.451**  | 0.298**  |
|                     | COD <sub>Mn</sub> |      |                  | 1                 | 0.570** | 0.479**  | 0.426**  | 0.265**  |
|                     | DOC               |      |                  |                   | 1       | 0.314**  | 0.401**  | 0.156*   |
|                     | SS                |      |                  |                   |         | 1        | 0.351**  | 0.496**  |
|                     | T-N               |      |                  |                   |         |          | 1        | 0.116    |
|                     | T-P               |      |                  |                   |         |          |          | 1        |
| Coniferous<br>(J A) | Flow              | 1    | -0.049           | -0.009            | 0.041   | -0.280** | 0.175*   | 0.163    |
|                     | BOD <sub>5</sub>  |      | 1                | 0.414**           | 0.317** | -0.467** | -0.005   | -0.397** |
|                     | COD <sub>Mn</sub> |      |                  | 1                 | 0.636** | -0.437** | -0.139   | -0.379** |
|                     | DOC               |      |                  |                   | 1       | -0.412** | -0.261** | -0.436** |
|                     | SS                |      |                  |                   |         | 1        | 0.023    | 0.374**  |
|                     | T-N               |      |                  |                   |         |          | 1        | 0.536**  |
|                     | T-P               |      |                  |                   |         |          |          | 1        |
| Mixed<br>(C W)      | Flow              | 1    | 0.049            | 0.289**           | 0.203** | 0.693**  | 0.524**  | 0.244**  |
|                     | BOD <sub>5</sub>  |      | 1                | 0.414**           | 0.201** | 0.157**  | -0.289** | 0.128*   |
|                     | COD <sub>Mn</sub> |      |                  | 1                 | 0.536** | 0.499**  | -0.002   | 0.170**  |
|                     | DOC               |      |                  |                   | 1       | 0.437**  | 0.012    | 0.048    |
|                     | SS                |      |                  |                   |         | 1        | 0.303**  | 0.255**  |
|                     | T-N               |      |                  |                   |         |          | 1        | -0.043   |
| T-P                 |                   |      |                  |                   |         |          | 1        |          |

\* and \*\* are statistically significant at p<0.05(\*)and at p<0.01(\*\*), respectively

의 분석결과 T-N 항목을 제외한 모든 항목이 유의수준 1%에서 양의 상관성을 나타냈다. 유량과 SS 항목간 상관계수는 0.693으로 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 토지피복분류별 중분류에 해당하는 산림을 임상별(활엽수림, 침엽수림, 혼효림)로 구분하여 장기모니터링을 통해 강우사상별 오염부하 유출특성을 조사하였다.

- 1) 산림의 임상별 평균 유출고와 평균 유출률은 침엽수림 > 활엽수림 > 혼효림 순으로 나타났는데, 이는 강우특성, 선행무강우일수, 토양특성, 경사도 그리고 산림관리 등의 자연환경 조건의 차이에 기인한 것으로 판단되며, 동일한 자연조건에 대한 추가적인 연구가 요구된다.
- 2) 초기세척효과를 분석한 결과 모든 임상에서 BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, DOC 항목의 경우 초기세척효과가 나타나지 않았으나, SS와 T-P 항목에서 초기세척효과가 있는 것으로 나타났다.
- 3) 활엽수림(KJ)지역의 수질항목별 EMC는 BOD<sub>5</sub> 0.8~2.4 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 2.0~13.4 mg/L, DOC 1.3~2.9 mg/L, T-N 1.150~3.913 mg/L, T-P 0.010~0.350 mg/L, SS 3.1~291.8 mg/L의 범위로 나타났으며, 침엽수림(JA)지역의 EMC는 BOD<sub>5</sub> 0.8~2.2 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 1.9~3.6 mg/L, DOC 1.0~2.0 mg/L, T-N 1.025~2.957 mg/L, T-P 0.002~0.084 mg/L, SS 0.8~5.4 mg/L의 범위로 나타났다. 또한 혼효림(CW) 지역 EMC는 BOD<sub>5</sub> 1.3~2.3 mg/L, COD<sub>Mn</sub> 2.4~4.8 mg/L, DOC 1.1~2.1 mg/L, T-N 0.385~2.703 mg/L, T-P 0.016~0.080 mg/L, SS 2.3~30.0 mg/L의 범위로 나타났다. EMC 결과의 평균값은 BOD<sub>5</sub> 항목이 혼효림 지역에서 가장 높게 나타난 것을 제외하고 모든 항목에서 활엽수림이 가장 큰 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구에서 산정한 산림의 원단위는 비강우시를 제외하고 강우시만을 고려했기 때문에 선행연구보다 크게 산정될 수 있다. 따라서 정확한 원단위 산정을 위해서는 비강우시를 고려한 연구의 수행이 필요하다. 또한 본 연구에서 축적된 자료는 향후 산림지역의 정확한 원단위를 산정할 때 중요한 기초자료로 이용이 가능할 것으로 판단되며, 이를 위해서는 지속적인 모니터링이 요구된다.

#### 사 사

본 연구는 2007~2009년도 금강수계관리위원회에서 시행한 환경기초조사사업 연구결과 및 금강수계위원회에서 시행한 환경기초조사사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현(2003). 우리나라 농지-임야유역으로부터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정. *대한환경공학회지*, 25(6), pp. 760-770.

김수진, 정용호, 김경하, 유재윤, 정창기, 전재홍(2005). 산림유역내 강우 발생시 계류수질변화와 지중유출수의 기여도. *한국농림기상학회지*, 7(1), pp. 51-56.

산림청(2008). *임업통계연보*, 제38호.

신동석(2007). 비점오염원 원단위 개정을 위한 조사연구 방향. *수질보전 한국물환경학회지*, 23(4), pp. 429-433.

신민환, 서지연, 최용훈, 김종건, 신동석, 이열재, 정명숙, 임경재, 최중대(2009). 농촌유역의 비점원오염부하 산정을 위한 LOADEST 모델의 적용성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, 25(2), pp. 212-220.

신민환, 신용철, 허성구, 임경재, 최중대(2007). 농업 및 산림유역의 강우유출수 유량증평농도 분석. *한국농공학회지*, 49(6), pp. 3-9.

신민환, 신용철, 허성구, 임경재, 최중대(2008). 수질샘플빈도에 따른 산림유역의 비점원오염부하특성. *한국농공학회지*, 50(2), pp. 65-71.

여중현, 김건하(2005). 도시, 농촌 및 임야유역으로부터 배출되는 비점원 오염부하의 특성비교. *수질보전 한국물환경학회지*, 21(2), pp. 184-189.

원철희, 최용훈, 서지연, 김기철, 신민환, 최중대(2009). 산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, 25(4), pp. 615-623.

이소영, 이은주, 김철민, 손현근, Marla C. Maniquiz, 손영규, 강희만, 김지형, 김이형(2007). 고속도로 영업소지역의 강우유출수내 중금속 유출특성. *수질보전 한국물환경학회지*, 23(6), pp. 945-950.

이현동, 배철호(2002). 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안. *수질보전 한국물환경학회지*, 18(6), pp. 569-576.

정부합동(1998~2000). 4대강수계 물관리종합대책.

정성민, 장창원, 김재구, 김법철(2009). 한강상류 고령지 농업지역에서의 강우시 비점오염 유출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, 25(1), pp. 101-111.

최중대(1997). 농촌유역의 관리가 비점원 오염물질의 하천 유입에 미치는 영향. *농촌개발연구*, 1(1), pp. 91-107.

최중대, 이찬만, 최예환(1999). 토지이용이 농업소유역의 수질에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, 32(4), pp. 501-510.

최지용, 신은성(1997). 도시지역 비점오염원 관리방안 연구. *한국환경정책평가연구원*.

환경부(1995). *비점오염원 조사연구사업 보고서*.

환경부(2005). *수질오염공정시험법*.

환경부(2006). *물환경관리 기본계획*.

환경부(2008). *제2단계 수질오염총량관리기술지침*.

환경부(2009). *강우유출수 조사 방법*.

Bertrand-Krajewski, J., Chebbo, G., and Saget, A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Wat. Res.*, 32(8), pp. 2431-2356.

Clement, A. and Buzas, K. (1999). Use of ambient water quality data to refine emission estimates in the Danube basin. *Water Science Tech.*, 40(10), pp. 35-42.

Geiger, W. (1987). Flushing effects in combined sewer system. *In Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage, Lausanne, Switzerland*, pp. 40-46.

Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, L. H., Choe, J. S., and Yu, M. J. (2002). First flush analysis of urban storm runoff. *The Science of the Total Environment*, 293, pp. 163-175.

Miller, P. S., Engel, R. H., Mohtar, R. H., and Mitchell, J. K.

- (2001). Statistical assessment of historical water quality data and mass load time evolution. *ASAE Paper* No. 012247. St. Joseph, Mich: ASAE.
- Salvia-Castellvi, M., Francois Iffly, J., Vander Borgh, P., and Hoffmann, L. (2005). Dissolved and particulate nutrient export from rural catchments; A case study from Luxembourg. *Science of the Total Environment*, **344**, pp. 51-65.
- U. S. EPA. (1983). Result of the Nationwide Urban Runoff Program, Water Planning Division, U. S EPA. Washington DC. Vol. 1, Final Report.
- Weltz, M. A., Blackburn, W. H., and Simanton, J. R. (1992). Leaf Area Ratios for Selected Rangeland Plant Species. *Great Basin Naturalist*, **52**(3), pp. 237-244.
- Yaksich, S. M. and Verhoff, F. H. (1983). Sampling strategy for river pollutant transport. *Journal of Environment Engineer*, **109**, pp. 219-231.
- Yoon, S. W., Chung, S. W., Oh, D. G., and Lee, J. W. (2009). Monitoring of Non-point Source Pollutants Load from a Mixed Forest Landuse, *IWA-DIPCON*, 12-15, October, 2009, Seoul, pp. 129.