

질산성 질소 기저유출이 지표수 수질에 미치는 영향

Impacts of Nitrate in Base Flow Discharge on Surface Water Quality

김건하* · 이호식**
Kim, Geonha · Lee, Hosik

Abstract

It is a well known fact that baseflow discharge of rainfall runoff impacts on water quality of surface water significantly. In this paper, impacts of nitrate discharged as base flow on stream water quality were studied by using a software, PULSE from USGS to calculate monthly ground water discharge from hydrograph. We used water quality and flow rate data for Ghapcheon2 site in Daejeon city for year 2005 as well as ground water quality data in the watershed acquired from government agencies. Agricultural and forestry land use are dominant for upstream of Ghapcheon2 in the watershed. Base flow contributes about 85~95% of stream flows during spring and fall while 25~38% of stream flow was induced by base flow during summer and winter. Monthly nitrate loading discharged as base flow for Ghapcheon2 was estimated by using averaged nitrate concentration of groundwater in the watershed. Nitrate loading induced by base flow at Ghapcheon2 was estimated as 5.4 ton of $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{km}^2$, which is about 60% of nitrate loading of surface water, 9.2 ton of $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{km}^2$. Seasonal variation of nitrate concentration of base flow was estimated by dividing monthly nitrate loading by monthly base flow discharge. Nitrate concentration of groundwater was increasing from rainy season. From this study, it can be understood that ground water quality monitoring is important for the proper manage of surface water quality.

Keywords : base flow, groundwater, hydrograph separation, nitrate, water quality

요 지

강우유출수의 기저유출(base flow)이 지표수 수질에 영향을 미치는 것은 잘 알려져 있다. 이 논문에서는 기저유출로 발생하는 질산성 질소가 수질에 미치는 영향을 USGS의 PULSE 소프트웨어를 사용하여 월별 지하수 유출량을 수문 분리하였다. 2005년도 금강유역의 갑천2 지점의 지표수 수질 및 유량자료를 사용하였으며, 지하수 수질자료는 정부기관 측정자료를 사용하였다. 갑천2 지점의 상류는 농지 및 임야가 대부분이다. 수문분리 결과, 봄과 가을에는 하천유량의 85~95%가 기저유출 기여량이며 여름과 겨울에는 25~38%가 기저유출 기여량으로 나타났다. 갑천2 지점에서 질산성 질소의 월별 기저유출 부하량은 유역내 지하수의 평균 질산성질소 농도를 이용하여 산정하였다. 갑천2 지점에서 기저유출되는 질산성질소 부하량은 5.4 ton of $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{km}^2$ 로 추정되었는데, 이는 갑천2 지점의 지표수 질산성 질소 부하량인 9.2 ton of $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{km}^2$ 의 59%에 해당하는 값이다. 기저유출되는 질산성질소의 계절변화는 월별 질산성질소 부하량을 월별기저유출량으로 나누어 구하였는데, 우기시 질산성 질소의 기저유출농도가 높은 것으로 나타났다. 이 연구를 통하여 지하수 수질 모니터링이 지표수 수질 관리에 필요함을 알 수 있다.

핵심용어 : 기저유출, 지하수, 수문분리, 질산성질소, 수질

1. 서 론

유역에서 발생하는 오염물질의 유달과정은 수질관리에 있어 매우 중요한 요소이다. 최근 비점원 오염물질에 대한 관심이 많아지고 있는데, 비점원은 지표수를 통한 직접유출과 지하수를 통한 기저유출로 나눌 수 있을 것이다(이재수, 2006).

전통적으로 수자원 관리는 지표수 또는 지하수 관리 등으로 분리되어 있다. 그러나 지표수 수질은 지하수와 관련되어 있으며, 지하수 오염은 지표수의 수질에 영향을 미친다. 지

하수는 지표수에 비하여 수질이 양호하다고 여기지만 오염된 하천 주위의 지하수 오염이 심각할 수 있다. 이러한 오염은 단기적 영향과 그 대상기간이 수년에 걸치는 장기적 영향으로 나눌 수 있다. 단기적 영향은 중간류(interflow)로 비교적 짧은 시간동안 유출되며, 장기적 영향은 기저유출(base flow)로서 장기간 유출된다(Freeze and Cherry, 1979).

지표수 수질관리를 위하여 지표수 부하만 규제하고 있으나 지하수를 통한 기저유출 부하량 삭감없이 충분한 수질 향상을 못할 수도 있다. 특히, 우리나라 국토이용의 상당부분

*정회원 · 교신저자 · 한남대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (E-mail : kimgh@hnu.kr)
**충주대학교 공과대학 환경공학과 교수

을 차지하고 있는 농촌 및 임야구역에서는 기저유출의 영향이 크므로 기저유출에 의한 지표수의 영향이 클 것으로 생각된다.

지표수 유량 중 기저유출에 의한 기여분은 수문곡선을 직접유출과 기저유출로 분리하여 얻을 수 있는데 이를 수문곡선의 분리(hydrograph separation) 또는 수문곡선의 분석(hydrograph analysis)이라 한다. 임의의 순간에 하천에서의 직접유출과 기저유출간의 구분에 대한 기준이 명확하지 않으며, 또한 이 두 개념이 상대적인 임의성을 가지고 있으므로 수문곡선의 분리도 임의적이라 할 수 있다. 이와 같은 수문곡선의 분리 방법으로는 주 지하수 감수곡선법(master groundwater depletion curve method), 수평직선분리법(straight line method), N-day법, 수정 N-day법(fixed base method), 가변경사법(variable slope method) 등이 있다. 일반적으로 홍수시의 유출량에 비하면 기저유출량은 상대적으로 작기 때문에 어떤 방법을 사용하든지 큰 오차는 발생하지 않는다(이재수, 2006). 여러 방법을 이용하여 수문분리를 할 수 있는 소프트웨어는 PULSE, PART, RECESS, RORA, HYSEP, BFI 등(U.S.Geological Survey, 2008)이 있으며, 인터넷에서 무료로 내려받을 수 있다.

음용수 중의 질산성 질소는 청색증(Methemoglobinemia)과 암을 유발하는 원인이 되므로 미 EPA는 음용수 중의 질산성 질소 농도를 10 mg/L이하로 규제하고 있다. 질산성 질소는 주로 비료에 의하여 유출되는데, 김승현 등(1998)은 질소비료 사용량의 약 40%가 지하수면에 도달하여 지하수를 오염시킨다고 하였다. 지하수의 질산성 질소를 유발시키는 원인은 영농, 화학비료, 축산 농가 등이 주 원인이며, 강우, 시비, 영농 등에 의하여 그 농도가 변한다(어성욱 등, 2005).

Kim 등(2008)은 우리나라 전체에 대하여 질소항목에 대한 물질수지를 작성하여 수체로 유입되는 질소의 양을 추산한 결과, 강으로 유입되는 질소 중 66-71%가 비점원에서 발생하였다고 추산하였다. Schilling과 Zhang(2004)은 농업용도로 쓰이는 구역에서 기저유출에 의한 질산성 질소 부하량이 전체 하천부하의 2/3이라 하였다. 지하수 중 질산성 질소는 식물뿌리와 토양에 일부 흡착되나 대부분 하천으로 유출되며 심층보다는 천층의 농도가 높은 경향을 보인다(강운주 등, 2001).

농업지역에서 발생하는 질산성 질소는 지표수와 지하수를 통하여 유출되어 수질에 영향을 미치게 된다. 2007년도 환경부 지하수모니터링 측정결과, 전용 농업용수 사용지역 및 분뇨처리장 인근지역은 질산성질소 초과율이 높은 것으로 나타났다. 이와 같이, 지하수 수질에 대한 관심이 높아지고 있으나, 수계에서의 지하수-지표수간 연계에 대한 자료 및 연구결과가 충분하지 않다.

본 연구에서는 농지와 임야가 많이 포함되어 있는 중권역 규모 유역을 대상으로 하여 가용한 수질, 수량 자료를 이용하여 질산성 질소 기저유출이 수질에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

2. 연구방법

연구대상 지점으로 대전시를 관통하는 하천인 갑천 상류의

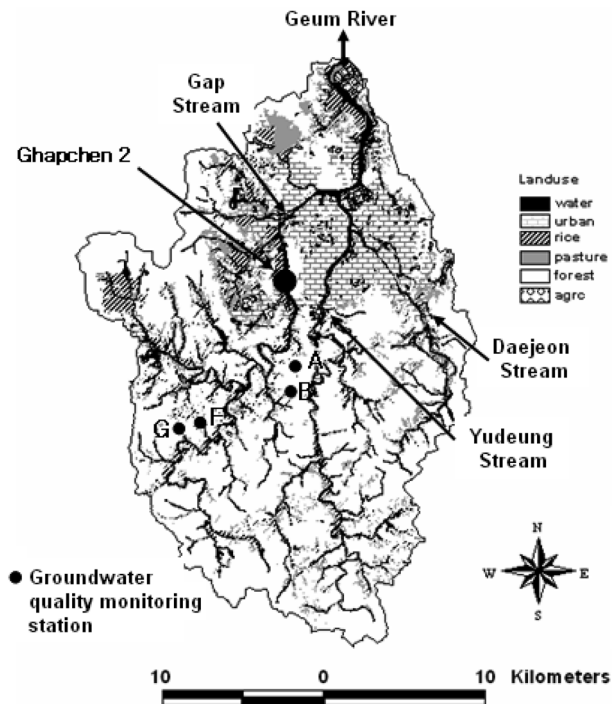


Fig. 1 Land use of the daejeon city, location of ghapchen2, and groundwater monitoring station for domestic use in daejeon city

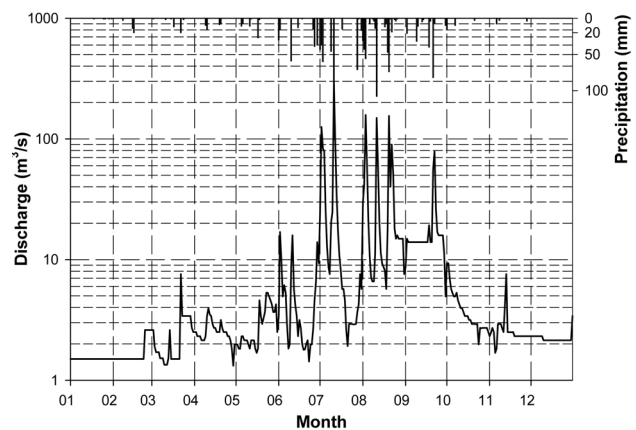


Fig. 2 Hydrograph and Hyetograph of the Monitoring Point, Ghapchen2 for Year 2005

한 지점을 선택하였다. 이는 환경부 수질지점으로는 갑천2 지점이며, 국토해양부의 수위측정 지점명은 유성이다. 갑천2 지점 상류 유역면적은 285.1 km²(대전발전연구원, 2006)이며, 이는 갑천A 중권역 유역면적 648.4 km²의 44%에 해당한다. Fig. 1은 대전시 토지이용도, 갑천2 지점의 유역도를 보이고 있다. 갑천2 지점은 도심을 통과하기 이전이며, 토지이용도는 농지와 임야를 상당히 많이 포함하고 있다. 따라서 도시하천유입에 따른 유량변화와 기저유출량 변화는 미미하다고 판단된다. 유역은 대전의 서남부, 호남고속도로 유성 톨게이트에서 가까우며 갑천의 지류인 성전천, 화산천, 진잠천을 형성하는 유역으로 구성되어 있다. 대상유역내 환경부 생활용도 지하수 수질 모니터링 지점은 4 지점이 있으며, Fig. 1에 그 위치를 보이고 있다. A 지점과 G 지점은 임야에 가까이 있으며, B 지점과 F 지점은 농지와 비교적 인접하고 있다.

지표수 수질자료는 물환경정보시스템(환경부, 2008)에서,

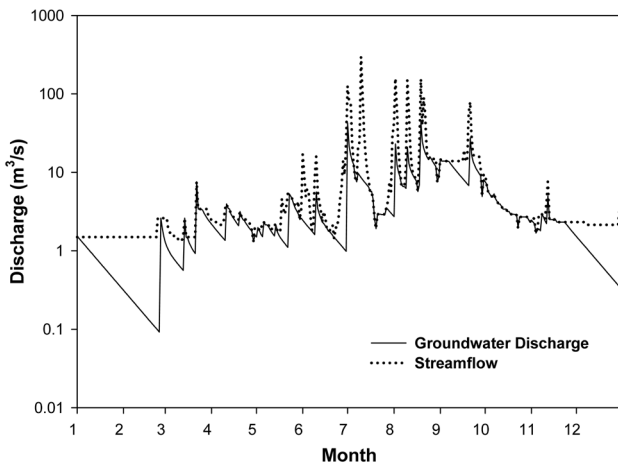


Fig. 3 Measured stream flow for ghapcheon2 and calculated base flow discharge by PULSE for Year 2005

지하수 수질자료는 국가지하수정보센터(한국수자원공사, 2008)에서, 수위자료는 국가수자원 관리종합정보 시스템(국토해양부, 2008)에서 구하였다. 수위-유량 관계곡선은 한국수문조사연보(국토해양부, 2008)의 자료를 사용하였다.

수문자료를 이용한 지하수량의 분리는 USGS의 PULSE를 사용하였다(USGS, 2002; Rutledge, 1997). PULSE는 지하수 감수곡선법을 기초로 하는데, 이는 연속된 수문곡선의 감수곡선만을 추출하여 크기별로 나열하여 주 지하수 감수곡선을 작성하는 방법이다(이재수, 2006). PULSE는 유역면적과 수문곡선을 이용하여 계산한 함양율, 감수값(recession index) 등을 인자로 하여 지하수 기저유량 및 함양율을 계산할 수 있으며 월별 지하수 유출량을 계산할 수 있으므로 본 연구목적에 적절한 소프트웨어이다.

3. 결과 및 토론

Fig. 2는 갑천2 지점의 2005년도 유량도 및 강우주상도를 보이고 있다. 수문곡선 분리를 하기 위하여는 결측치가 없어야 하는데 갑천2 지점의 수문자료는 불완전한 경우가 많기 때문에 비교적 완전한 자료인 2005년도를 대상으로 하여 수문곡선 분리를 하였다. 1966년부터 2000년까지 수문자료를 이용하여 산정한 갑천의 풍수량은 $10.35 \text{ m}^3/\text{s}$, 평수량은 $3.60 \text{ m}^3/\text{s}$, 저수량은 $1.55 \text{ m}^3/\text{s}$, 갈수량은 $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다(국토해양부, 2008). 강우와 유량은 밀접한 상관관계를 보이고 있으나, 1월과 2월의 유량자료와 9월 일부분의 유량자료는 일정한 값이거나 강우의 영향을 반영하고 있지 않은 등 실제 유황과 다르지만 이 논문의 목적은 가용한 자료를 이용하여 지표수와 기저유량을 분리하는 것이 목적이므로, 유량 자료를 그대로 사용하였다.

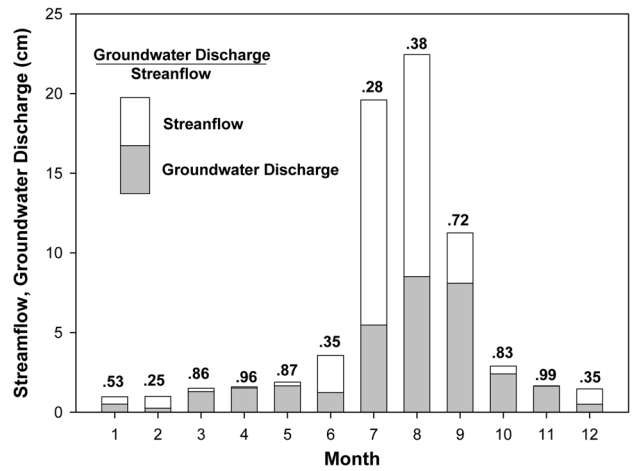


Fig. 4 Stream flow and groundwater discharge per unit area for ghapchen2 for Year 2005

Fig. 3은 2005년도 갑천2 지점의 하천유량과 PULSE로 계산한 지하수의 기저유량이다. 우선 하천유량의 상당부분이 지하수 유출로 인한 것임을 알 수 있으며, 1, 2, 12월과 같이 유량이 일정할 경우 기저유출의 기여분이 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 전술한 바와 같이 수문자료 신뢰도가 낮기 때문이다. 7월과 같이 연속된 강우사상이 있는 경우 기저유출의 기여분이 감소되는 경향을 보이고 있다. 특히 연속하여 유량증가가 있는 경우 후속 강우유출에 대한 기저유출 기여분이 작는데, 이는 지하수 함양이 충분한 상태에서 강우는 대부분 지표수를 통하여 유출됨을 의미한다.

Fig. 4는 Fig. 3의 자료를 이용하여 계산한 갑천2 지점의 단위면적당 지표수 유량과 기저유출량을 월별로 보이고 있다. 각 월당 기저유출량을 지표수 유량으로 나눈 기저유출량 기여분을 같이 보이고 있는데, 하천 유량이 적을 때 기저유출 기여분이 크고, 유량이 증가할 때 기저유출 기여분이 작음을 알 수 있다. 특히 4, 5월의 경우는 90% 내외의 하천 유량이 기저유출로 나타났으며, 하절기에도 30% 내외의 기저유출 기여분임을 알 수 있다.

Fig. 5는 대상 모니터링 지점에서의 질산성 질소 농도와 BOD 농도 변화를 보이고 있다. 전반적으로 BOD의 농도는 봄, 여름에 높고 가을, 겨울에 낮게 나타났으며, 질산성질소의 농도는 갈수기에 높은 경향을 보이고 있다. 동절기에는 작물에 섭취되지 않고 농지의 관리가 적으므로 비료성분의 유출이 높다(강충관 등, 2001).

Table 1은 갑천2 지점 유역 내 위치하고 있는 생활용수 지하수의 질산성 질소 농도 측정치를 보이고 있다. 지하수 수질 측정치는 상하반기 각 1회씩 측정하여 일반 공개하고 있으나, 가용한 자료 수가 적고 측정시기와 기황 등의 자료 가 수반되지 않고 있다. 갑천2 지점 상류 지역에 대한 자료

Table 1. Nitrate Nitrogen Concentrations of Groundwater for the Domestic Use monitored by Korean Ministry of Environment in the studied watershed

Site	Location	2006		2005		2004		2003		2002		2001		Max	Min	Ave
A	Wolpyung-dong 535	1.44	0.30	0.97	0.80	0.37	0.12	0.20	0.14	0.21	0.19	0.13	0.21	1.44	0.12	0.42
B	Wolpyung-dong 19-3	0.34	2.80	2.56	4.09	2.87	3.22	2.17	8.04	2.10	2.04	2.15	1.79	8.04	0.34	2.85
F	Deokmyung-dong 215-7	0.81	1.00	8.15	1.52	1.25	1.32	0.84	1.08	0.94	0.94	0.51	0.87	8.15	0.51	1.60
G	Deokmyung-dong 124	1.19	1.60	0.95	2.39	1.69	2.09	1.69	0.95	1.56	1.75	1.76	1.63	2.39	0.95	1.60

는 2001년부터 2006년까지 연간 2회씩 자료가 가용한 상태이다. 임야지역에 있는 A 지점과 G 지점의 평균농도보다 농지와 인접한 B 지점과 F 지점의 농도가 전반적으로 높다. 평균값은 1.62 mg/L 이며 이는 생활용수 지하수 질산성 질소 수질기준인 20 mg/L이내이다. 갑천2 지점 상류는 수심이 얕으므로 탈질소화가 발생할 가능성이 작다고 판단되므로 지하수의 질산성 질소가 하천에 영향을 준 것으로 판단된다.

Diek (2002)은 측정치의 불확실성은 다음과 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

$$U_s = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

U_x = 변수의 불확실성, S_x = 표준편차, n = 측정수이다. Table 1의 자료의 불확실성을 계산하여 보면 0.12~0.60의 범위이다. 이에 비하여 지표수 수질자료의 불확실성은 0.09~0.10이므로 지하수 수질에 대한 농도자료의 확충이 필요하다.

Fig. 6은 Fig. 4에 보인 지표수 유량과 기저유출 유출고에 지표수의 농도는 Fig. 5의 질산성질소 농도를 사용하고 지하수 농도는 Table 1의 평균값인 1.62 mg/L를 이용하여 계산한 갑천2 지점의 단위면적당 유출 부하량이다. 4~5월, 9~11월의 경우 지표수 유출부하량 보다 기저유출부하량이 더 높은데, 이는 평균값의 농도가 너무 높기 때문이다. Fig. 6의

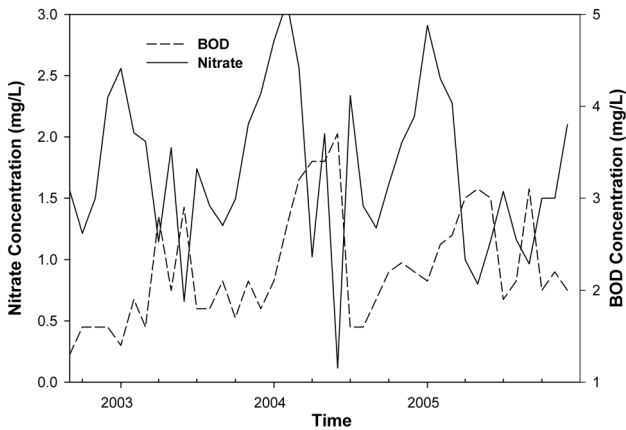


Fig. 5 Nitrate and BOD (Biochemical Oxygen Demand) Concentration variations at Ghapchen2 from September, 2002 to December, 2005

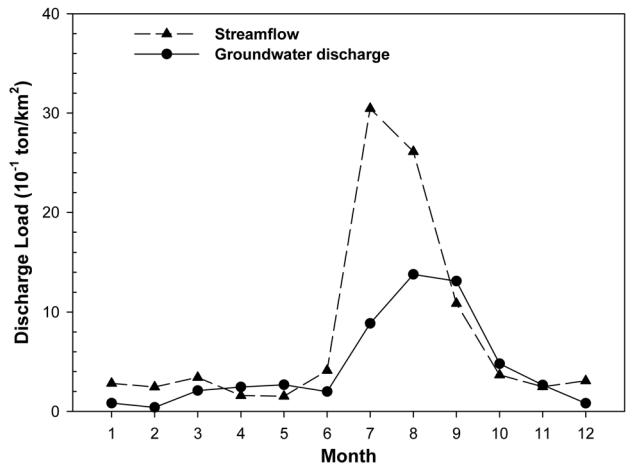


Fig. 6 Comparison of nitrate loads of streamflow and base flow discharge for the Ghapcheon2 for Year 2005 (nitrate concentration of ground water was assumed as 1.62 mg/L)

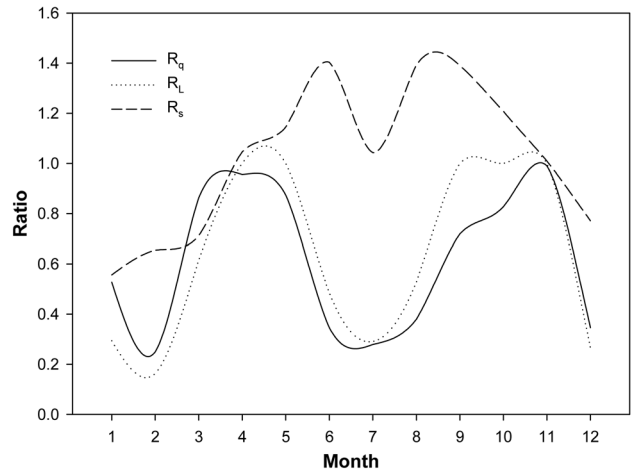


Fig. 7 Seasonal variation of ratio of base flow discharge to stream flow of nitrate nitrogen at Ghapcheon2 for Year 2005 (R_q is a ratio of ground flow to stream flow, R_L is a ratio of nitrate loading induced by groundwater discharged to that of stream flow and R_s is obtained by dividing R_L by R_q)

자료를 년단위 부하로 환산하면 지표수 유출은 9.2 ton of $\text{NO}_3^- \text{ N/km}^2 \cdot \text{yr}$ 이며 기저유출은 5.4 ton of $\text{NO}_3^- \text{ N/km}^2 \cdot \text{yr}$ 으로 기저유출이 59% 기여하고 있음을 알 수 있다.

기저유출되는 질산성질소의 농도의 계절변화는 식 (2)로 간편하게 나타낼 수 있을 것이다. 즉,

$$R_s = \frac{R_L}{R_q} \quad (2)$$

R_s = 질산성 질소의 상대유출비, R_q = 기저유출량과 지표유출량의 비율 = Q_b / Q_s , R_L = 기저유출부하와 지표유출부하의 비율 = L_b / L_s , Q_b = 기저유출량, Q_s = 하천유량, L_b = 기저유출되는 오염물질량, L_s = 하천의 오염물질량. R_q 는 Fig. 4에서, R_L 은 Fig. 6에서 구할 수 있다. Fig. 7은 식 (2)를 나타내고 있다. Fig. 7에서 지하수의 질산성 질소 농도는 여름에 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이는 영농활동에 의해 오염된 지하수가 유출된 것으로 생각된다(류순호 등, 1999). Fig. 6과 Fig. 7에 대한 해석에 있어서, 농지와 임야가 유역의 상당부분을 차지하면서, 도시하수 영향이 적은 중권역 규모 유역이라는 점과, 지하수 수질자료의 불확실성이 내재해 있다는 점을 주지해야 할 것이다.

4. 요약 및 결론

농지 임야가 많이 포함되어 있는 유역에서 지하수를 통하여 기저유출되는 질산성 질소가 하천 수질에 기여하는 정도를 파악하기 위하여 도시관통하천인 대전시 갑천 중상류 수질측정 지점인 갑천2 지점의 2005년도 유량 및 수질 자료를 이용하여 월별 기저유출량을 산정한 결과, 봄, 가을의 하천 유량의 85~95% 정도, 동절기 및 하절기 하천유량의 25~38%가 기저유출 기여분으로 산정되었다.

가용한 수질 및 지하수에 대한 질산성 질소 농도자료를 이용하여 갑천2 지점에 대한 질산성질소 기저유출 부하를 추정한 결과, 수질측정 지점에 대한 지표수 유출은 9.2 ton of $\text{NO}_3^- \text{ N/km}^2 \cdot \text{yr}$ 이며 기저유출은 5.4 ton of $\text{NO}_3^- \text{ N/km}^2 \cdot \text{yr}$ 으로 기저유출이 하천수 부하량에 대하여 59% 기여

하고 있는 것으로 나타났다.

갑천2 지점 상류에 위치한 지하수측정 지점의 질산성질소 평균농도를 이용하여 월별 기저유출 부하량을 산정하였으며, 이를 이용하여 월별 지하수 질산성 질소 유출 농도를 추정 한 결과 하절기에 높은 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 지표수 수질에 지하수 기저유출이 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었으나, 지하수 수질자료가 매우 부족하여 수계에서 오염물질 이동에 대한 해석이 어려웠다. 따라서, 지표수의 수질 관리를 위하여 체계적인 지하수 수질 모니터링이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.(2008A076)

참고문헌

강윤주, 서영진, 이동훈, 최충렬, 박만, 최정(2001) 논농사가 천층 지하수의 수질에 미치는 영향. **한국환경농학회지**, 한국환경농학회, 제20권 제4호, pp. 262-268.

강충관, 박주섭, 이상용, 김한명(2001) 토양특성에 따른 질소시용의 환경경제적 효과. **한토비지**, 제34권 제1호, pp. 42-54.

국토해양부(2008) 국가수자원관리종합정보 시스템. <http://wamis.go.kr>.

김승현, 권오익, 공인철, 김익재, 이철희, 박영규(1998) 강둑 여과지에서 지하수 함양율과 질소비료에 의한 지하수 오염량 산정 연구. **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제20권 제12호, pp. 1689-1703.

대전발전연구원(2006) 대전광역시 수질오염총량관리 시행계획. 대전광역시.

전광역시.

류순호, 최우정, 한광현(1999) 질소 동위 원소 분석을 이용한 경기도 지역 지하수 중 질산태 질소 오염원 규명. **한국토양비료학회지**, 한국토양비료학회, 제32권 제1호, pp. 47-56.

어성욱, 이윤희, 김건하, 김영(2005) 질산성 질소로 오염된 지하수의 생물복원을 위한 적정 전자공여체의 결정 및 반응속도 비교 연구. **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제21권 제6호, pp. 630-636.

이재수(2006) **수문학**, 구미서관.

한국수자원공사(2008) 국가지하수정보센터. <http://www.gims.go.kr>.

환경부(2008) 물환경정보시스템. <http://www.water.nier.go.kr/weis/>.

Diek, R.H. (2002) *Measurement uncertainty: Methods and applications*. 3rd ed., ISA, Research Triangle Park, NC.

Freeze, A.R. and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater*, Prentice Hall, London.

Kim, T., Kim, G., Kim, S., and Choi, E. (2008) Estimating riverine discharge of nitrogen from the South Korea by the mass balance approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 136, No. 1-3, pp. 371-378.

Rutledge, A.T. (1997) *Model-estimated ground-water recharge and hydrograph of ground-water discharge to a stream*. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 97-4253.

Schilling, K. and Zhang, Y.K. (2004) Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA. *Journal of Hydrology*, Vol. 295, pp. 305-316.

U.S. Geological Survey. (2002) *User guide for the PULSE program*. Open-File Report 02-455. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey.

U.S. Geological Survey. (2008) *USGS Groundwater Information*. <http://water.usgs.gov/ogw/gwsw.html>.

(접수일: 2008.11.5/심사일: 2008.12.12/심사완료일: 2008.12.12)