

우리나라 농경지에서 질소의 수계유출에 의한 아산화질소 간접배출량 평가

김건엽* · 정현철 · 김민경 · 노기안 · 이덕배 · 강기경

농촌진흥청 국립농업과학원

Evaluation of indirect N₂O Emission from Nitrogen Leaching in the Ground-water in Korea

Gun-Yeob Kim*, Hyun-Cheol Jeong, Min-Kyeong Kim, Kee-An Roh,
Deog-Bae Lee, and Kee-Kyung Kang

National Academy of Agricultural Science (NAAS), RDA, 150 Suin-ro, Suwon 441-707, Republic of Korea

This experiment was conducted to measure concentration of dissolved N₂O in ground-water of 59 wells and to make emission factor for assessment of indirect N₂O emission at agricultural sector in agricultural areas of Gyeongnam province from 2007 to 2010. Concentrations of dissolved N₂O in ground-water of 59 wells were ranged trace to 196.6 $\mu\text{g-N L}^{-1}$. N₂O concentrations were positively related with NO₃-N suggesting that denitrification was the principal reason of N₂O production and NO₃-N concentration was the best predictor of indirect N₂O emission. The ratio of dissolved N₂O-N to NO₃-N in ground-water was very important to make emission factor for assessment of indirect N₂O emission at agricultural sector. The mean ratio of N₂O-N to NO₃-N was 0.0035. It was greatly lower than 0.015, the default value of currently using in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) methodology for assessing indirect N₂O emission in agro-ecosystems (IPCC, 1996). It means that the IPCC's present nitrogen indirect emission factor (EF_{5-g}, 0.015) and indirect N₂O emission estimated with IPCC's emission factor are too high to use adopt in Korea. So we recommend 0.0034 as national specific emission factor (EF_{5-g}) for assessment of indirect N₂O emission at agricultural sector. Using the estimated value of 0.0034 as the emission factor (EF_{5-g}) revised the indirect N₂O emission from agricultural sector in Korea decreased from 1,801,576 ton (CO₂-eq) to 964,645 ton (CO₂-eq) in 2008. The results of this study suggest that the indirect Emission of nitrous oxide from upland recommend 0.0034 as national specific emission factor (EF_{5-g}) for assessment of indirect N₂O emission at agricultural sector.

Key words: Indirect Emission factor, Ground-water, Nitrous oxide

서 언

기후변화 대응 기술개발, 온실가스 저감계획 수립과 정책개발 등 기후변화에 효율적으로 대응하려면 온실가스 발생량에 대한 정확한 자료 확보가 반드시 필요하며 온실가스 배출량의 정확한 평가는 모든 기후변화 대응 연구의 기본이다. 따라서 유엔 기후변화협약 당사국은 IPCC의 기후변화협약 제4조와 제12조에 따라 온실가스 배출량을 국제적으로 인정된 방법과 당사국총회에서 인정된 비교 가능한 방법에 기초하여 산정하여야 하며 산정된 결과를 CRF (Common Reporting Format)나 국가보고서 (National Inventory Report) 형태로 당사국 총회에 제출하여야 한다.

세계 여러 나라의 농업환경이나 작물의 재배방법은 매우 다양하며 결과적으로 온실가스 배출 특성도 큰 차이를 보여 온실가스 배출량 계산시 단위면적이나 단위조건에 동일한 배출량 계수를 적용할 수 없다. 따라서 IPCC는 각 국가의 자연환경 등을 고려한 국가고유 배출계수를 개발하여 온실가스 배출량 평가에 사용할 것을 권장하고 있으며 배출계수 개발을 위해 적용한 방법이나 배출계수에 대해서는 IPCC 전문가 그룹의 검증을 거치도록 하고 있다.

여러 가지 온실가스 중 아산화질소는 대부분이 농업에 사용된 질소비료의 질산화나 탈질과정을 통해서 배출되며, 질소가 사용된 농경지에서 바로 배출되는 직접배출과 다른 지역으로 이동하여 배출되는 간접배출로 구분된다 (Dowdell et al., 1979; Hiscock et al., 2003).

아산화질소의 수계에 의한 간접배출은 농경지에 사용된 질소가 물을 따라 외부로 유출되어 배출되는 것으로 IPCC의 가이드라인에 의해 식 (1)과 같이 농경지에 사용된 전체

접수 : 2011. 11. 18 수리 : 2011. 12. 5

*연락처 : Phone: +82312900240

E-mail: gykim@rda.go.kr

Table 1. Studies on N₂O-N and NO₃-N ratio for assessment of IPCC indirect N₂O emission.

| Properties | Country | N ₂ O/NO ₃ | Pollution Source |
|-----------------------------|----------------|---|--|
| Drainage way | | | |
| Dowdell et al., 1979 | United Kingdom | 0.01(month after fertilization) 0.01-0.001(other months) | chemical Fertilizer |
| Minami and Oshawa, 1990 | Japan | 0.0005-0.001 | chemical Fertilizer |
| Groundwater | | | |
| Ronen et al., 1988 | Israel | 0.002-0.003 | chemical Fertilizer, Municipal sweage |
| Ueda et al., 1990 | Japan | 0.0002-0.0044 | Municipal sweage |
| Muehlherr and Hiscock, 1997 | United Kingdom | 0.0005-0.0025 | chemical Fertilizer |

질소 중 물을 따라 유출되는 질소량에 (N_{LEACH}) 질소가 유출되는 경로별로 유출수 중에 녹아있는 아산화질소와 질산태 질소의 비율을 곱해서 계산한다. 이때 질소가 유출되는 경로는 지하수 (EF_{5-g}, groundwater), 표면수 (EF_{5-r}, rivers), 강어귀 (EF_{5-e}, estuaries)의 3가지로 구분된다 (Beaulieu et al., 2008; Hasegawa et al., 2000; Hiscock et al., 2003).

$$\text{Indirect N}_2\text{O emission} = N_{\text{LEACH}} \times (\text{EF}_{5-g} + \text{EF}_{5-r} + \text{EF}_{5-e}) \quad (1)$$

우리나라의 경우 현재 농경지에 사용된 질소가 지하나 표면수 등 수계를 통해 외부로 배출되는 질소량 (N_{LEACH})에 관한 연구 자료가 부족해 수계에 의한 아산화질소의 간접배출량 평가를 위해 IPCC default 값인 30% (Fra_{CLEACH})를 적용하여 계산하고 있다. 또한, IPCC는 가이드라인에 따라 외부로 유출된 질소의 경로를 지하침출, 강물유출, 강어귀의 3개 영역으로 구분하여 아산화질소의 간접배출량으로 계산한다. 이때 지하침출 (EF_{5-g}), 지표수유출 (EF_{5-r}), 강어귀 (EF_{5-e})의 영역별 용존 아산화질소와 질산태질소의 비율은 Mosier 등 (1998a)의 연구결과를 바탕으로 하여 각각 0.015, 0.0075, 0.0025, 전체적으로는 이를 합한 0.025를 default 값으로 제시하고 있으며 우리나라도 이 값을 적용하여 배출량을 계산한다.

하지만 세계의 많은 연구들은 (Table 1) 수계에 의한 아산화질소 간접 배출계수들 중 가장 큰 비중을 차지하는 지하 침출에 의한 아산화질소 배출계수 (EF_{5-g})가 너무 높다는 결과들을 제시하고 있다 (Sawamoto et al., 2005). 따라서 본 연구는 이 세 가지 계수 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 지하 침출에 의한 우리나라 고유의 배출계수 (EF_{5-g})를 개발하고자 실시하였다.

재료 및 방법

지하수 시료채취 아산화질소 간접배출 평가용 수질시료는 벼 이앙 전인 4월, 이앙 후인 6월, 장마가 끝난 8월, 그리고 벼논의 관개가 끝난 시점인 10월에 경남지역의 59개 농업용 관정에서 지하수를 채취하였으며 (Table 2), 관정은 우리나라 농업용 지하수의 특성을 반영하기 위해 가능한한 넓은 지역에서 선정하였다.

수질 시료분석 지하수 중의 용존 아산화질소는 헤드스페이스 (headspace) 가스 분석법 (1999)을 사용하였다. 헬륨가스를 채운 후 고무마개로 밀봉한 용적 110 ml의 유리시료병에 20 ml 정도의 지하수 시료를 주사기로 넣은 후 밀봉하여 얼음을 채운용기에 담아 실험실로 운반하여 일정 온도에서 1시간 동안 진탕해 유리병내부 기상 (헤드스페이스)중의 아산화질소 가스와 액상중의 용존 아산화질소 농도간 평형이 이루어진 후 기상 중의 아산화질소 농도를 가스크로마토그래프 (GC-ECD Varian 3800)를 이용하여 분석하였다 (Nakajima, 2005).

유리병내부 기상부분은 아산화질소 농도 분석시 온도에 서의 오스트와르트 용해도 계수와 이상기체 1 몰 체적을 활용하여 역으로 액상 중의 용존 아산화질소 농도를 구했다 (Nakajima, 2005).

이외 T-N과 NO₃-N은 Autoanalyzer (AACS, Bran+rubbe)로, NH₄-N는 환경부 수질오염공정시험방법에 준하여 인도 페놀법을 이용하여 비색계로 분석하였다.

Table 2. Coordinates and land-use of the sampling sites.

| No. | Coordinates | Land use | No. | Coordinates | Land use |
|-----|-------------------------|----------|-----|-------------------------|----------|
| 1 | E:127.55.41, N:35.41.32 | Paddy | 31 | E:128.16.29, N:35,19.11 | Paddy |
| 2 | E:127.51.00, N:35.41.05 | Paddy | 32 | E:128.15.26, N:35,18.06 | Upland |
| 3 | E:127.51.00, N:35.41.06 | Paddy | 33 | E:128.14.55, N:35,19.29 | Paddy |
| 4 | E:128.21.03, N:34.57.05 | Upland | 34 | E:128.13.30, N:35,19.40 | Paddy |
| 5 | E:128.19.51, N:34.59.11 | Paddy | 35 | E:128.13.30, N:35,19.41 | Paddy |
| 6 | E:128.20.05, N:34.59.07 | Paddy | 36 | E:128.12.08, N:35,19.44 | Paddy |
| 7 | E:127.53.54, N:34.53.04 | Paddy | 37 | E:128.07.55, N:35,12.47 | Paddy |
| 8 | E:127.54.25, N:34.56.16 | Upland | 38 | E:128.08.26, N:35,14.25 | Paddy |
| 9 | E:127.56.18, N:34.49.19 | Paddy | 39 | E:128.06.51, N:35,12.25 | Paddy |
| 10 | E:128.25.01, N:35.05.50 | Paddy | 40 | E:128.07.16, N:35,12.10 | Upland |
| 11 | E:128,44.02, N:35.21.39 | Upland | 41 | E:128.07.16, N:35,12.10 | Upland |
| 12 | E:128,46.37, N:35.23.57 | Upland | 42 | E:128.07.16, N:35,12.10 | Upland |
| 13 | E:128,48.40, N:35,29.21 | Upland | 43 | E:128.30.04, N:35,30.38 | Paddy |
| 14 | E:128,48.57, N:35,29.41 | Paddy | 44 | E:128.30.04, N:35,30.39 | Paddy |
| 15 | E:128.42.59, N:35.32.49 | Paddy | 45 | E:128.23.40, N:35,30.99 | Paddy |
| 16 | E:128,43.19, N:35.32.45 | Upland | 46 | E:128,37.47, N:35,18.57 | Paddy |
| 17 | E:128,43.19, N:35.32.46 | Upland | 47 | E:128,41.08, N:35,21.46 | Upland |
| 18 | E:128,43.00, N:35.31.44 | Paddy | 48 | E:128,43.16, N:35,20.50 | Paddy |
| 19 | E:128.42.33, N:35.31.38 | Paddy | 49 | E:128,41.21, N:35,21.42 | Paddy |
| 20 | E:128.39.15, N:35.32.24 | Paddy | 50 | E:128.25.46, N:35.16.58 | Paddy |
| 21 | E:128.39.15, N:35.30.54 | Paddy | 51 | E:128.24.24, N:35.17.17 | Paddy |
| 22 | E:128.46.11, N:35.29.01 | Paddy | 52 | E:127.46.42, N:35.33.33 | Paddy |
| 23 | E:128.03.50, N:34.57.38 | Paddy | 53 | E:127.46.42, N:35.33.33 | Paddy |
| 24 | E:128.05.06, N:34.02.54 | Paddy | 54 | E:127.46.42, N:35.33.33 | Paddy |
| 25 | E:128.05.50, N:34.56.10 | Paddy | 55 | E:127.44.51, N:35.32.25 | Upland |
| 26 | E:128.00.43, N:35.19.53 | Paddy | 56 | E:127.44.51, N:35.32.25 | Upland |
| 27 | E:128.00.43, N:35.19.54 | Paddy | 57 | E:127.44.51, N:35.32.25 | Upland |
| 28 | E:128.00.06, N:35.19.03 | Paddy | 58 | E:128,41.08, N:35,21.47 | Upland |
| 29 | E:128.00.06, N:35.19.03 | Upland | 59 | E:127,47.12, N:35.33.11 | Upland |
| 30 | E:127.57.21, N:35.18.55 | Upland | | | |

결과 및 고찰

농업용 관정 지하수 중의 질소성분별 농도 분포 우리나라 지하수에 의한 아산화질소 배출량을 평가하기 위해 2007년부터 2010년까지 4년간 경남지방의 농업용 관정의 지하수 질소성분들을 분석한 결과 (Table 3) 총 질소의 경우 평균 6.91 mg-N L^{-1} , 질산태질소는 5.73 mg-N L^{-1} 이었다. 용존 아산화질소의 농도는 평균 $14.18 \text{ } \mu\text{g-N L}^{-1}$, 중앙값은 $7.78 \text{ } \mu\text{g-N L}^{-1}$, 최고값은 $169.6 \text{ } \mu\text{g-N L}^{-1}$ 으로 분포하였다.

지하수 중의 총 질소나 질산태질소의 연도별 농도는 큰 차이가 없었으나 용존 아산화질소는 2009년에 낮은 결과를 보여주고 있다 (Table 4).

또한, 시기별로도 총 질소나 질산태질소의 농도는 차이가

없었으나 용존 아산화질소는 8월이 가장 낮은 결과를 보였다 (Table 5). 이 같은 이유는 정확하지 않아 앞으로 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되지만 시료가 농경지에서 영농결과의 직접적인 영향을 받지 않는 지하수이기 때문인 것으로 판단되며 단지 용존 아산화질소는 영농조건과 함께 질산화나 탈질을 유발하는 환경조건에 의해 영향을 받기 때문에 연도나 시기별로 차이가 있었던 것으로 생각된다.

지하수 관정 깊이와 아산화질소 간접배출 관련 질소성분의 관계를 Table 6에서 나타내고 있으며 관정깊이가 깊어질수록 T-N, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{N}_2\text{O-N}$ 의 농도는 낮아졌으며 관정깊이가 60 m 이상에서는 급격하게 낮아졌다.

지하수 중의 아산화질소는 용탈된 질소가 탈질이나 질산화 과정에서 생성되며 따라서 지하수 중의 질산태질소의 농

Table 3. Statistics of T-N, NO₃-N, and N₂O-N concentration in the groundwater.

| Division | T-N | NO ₃ -N | N ₂ O-N | N ₂ O-N/NO ₃ -N |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | mg L ⁻¹ | mg L ⁻¹ | μg L ⁻¹ | |
| Average | 6.91 | 5.73 | 14.18 | 0.00354 |
| Median | 5.56 | 4.50 | 7.78 | 0.00184 |
| Maximum | 46.00 | 45.94 | 169.64 | 0.08508 |
| Minimum | 0.15 | t | t | t |

t : trace.

Table 4. Yearly change of T-N, NO₃-N, and N₂O-N concentration in the groundwater.

| Properties | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|--|-------|-------|------|-------|
| T-N (mg L ⁻¹) | 7.78 | 5.71 | 6.89 | 6.97 |
| NO ₃ -N (mg L ⁻¹) | 6.94 | 4.93 | 5.32 | 5.66 |
| N ₂ O-N (μg L ⁻¹) | 14.73 | 17.07 | 8.63 | 17.44 |

Table 5. Seasonal change of T-N, NO₃-N, and N₂O-N concentration from April to October in the groundwater.

| Properties | Apr. | Jun. | Aug. | Oct. |
|--|-------|-------|------|-------|
| T-N (mg L ⁻¹) | 6.60 | 7.08 | 7.55 | 6.56 |
| NO ₃ -N (mg L ⁻¹) | 5.51 | 5.50 | 6.51 | 5.53 |
| N ₂ O-N (μg L ⁻¹) | 11.34 | 13.11 | 9.22 | 19.31 |

Table 6. Change of T-N, NO₃-N, and N₂O-N concentration at different depth of well.

| Well depth | T-N | NO ₃ -N | N ₂ O-N | N ₂ O-N/NO ₃ -N |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| m | mg L ⁻¹ | | μg L ⁻¹ | |
| 0 ~ 10 | 8.8 | 7.6 | 17.4 | 0.0028 |
| 10 ~ 30 | 6.8 | 5.8 | 16.7 | 0.0032 |
| 30 ~ 60 | 8.2 | 6.9 | 14.1 | 0.0037 |
| 60 ~ 90 | 5.0 | 3.9 | 7.2 | 0.0037 |
| 90< | 3.6 | 2.5 | 7.6 | 0.0053 |

도는 아산화질소 배출량에 중요한 영향을 미친다 (Bouwman, 1990).

4년간의 조사결과를 종합한 지하수 중의 NO₃-N 농도와 용존 N₂O-N 농도는 Fig. 1과 같이 큰 정의 상관관계를 나타내 아산화질소가 질산태질소의 탈질과정에서 생성되는 중간 대사물질이라는 사실과 부합함을 알 수 있었다. 또한, 질산태질소의 농도에 일정비율을 적용할 경우 지하수에 녹아 있는 아산화질소의 농도를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

Figure 2는 NO₃-N 농도와 NO₃-N/N₂O-N 농도비와의 상호연관성을 분석한 결과로서 지하수 중의 NO₃-N 농도가 높아져도 NO₃-N/N₂O-N 비율은 변화를 보이지 않아 NO₃-N 농도와 NO₃-N/N₂O-N 비율은 상관성을 보이지 않았다.

이는 IPCC 가이드라인에서 지하수에 의한 아산화질소 간접배출량은 지하수 중의 질산태질소의 농도와는 관계없이 지하로 침투되는 질소량에 NO₃-N/N₂O-N의 비율을 곱해서

계산하는 방법 (식 1)과 일치하는 결과를 보여주고 있다.

우리나라 농업용 관정 지하수 중의 N₂O-N/NO₃-N 농도 비율분포 지하수 중에 녹아있는 아산화질소는 지표로 유출되면 쉽게 대기 중으로 휘산되기 때문에 지하수에 의한 아산화질소의 배출량을 측정하기는 어렵다. 또한, 농경지에 사용한 비료의 지하유출은 대부분 질산태질소의 형태로 이루어지며 지하수 중의 질산태질소 농도가 증가할수록 용존 아산화질소의 농도는 증가하지만 용존 아산화질소와 질산태질소의 비율은 질산태질소의 농도와는 큰 관계가 없이 지역이나 환경적 특성에 의해 결정된다 (Roh et al., 2005; Yun et al., 2004). IPCC는 농경지에서 수계를 통한 아산화질소의 간접배출량은 식 (1)과 같이 시비한 질소 중에서 수계로 유출된 질소량에 유출 용액 중의 질산태질소 농도와 용존 아산화질소의 비율을 곱해서 추정한다. 따라서

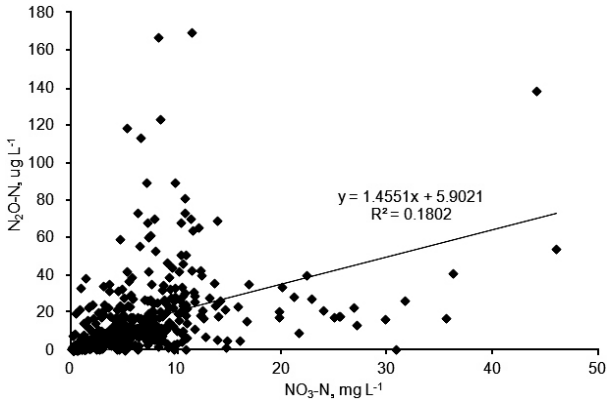


Fig. 1. Relationship between NO₃-N concentration and N₂O emission.

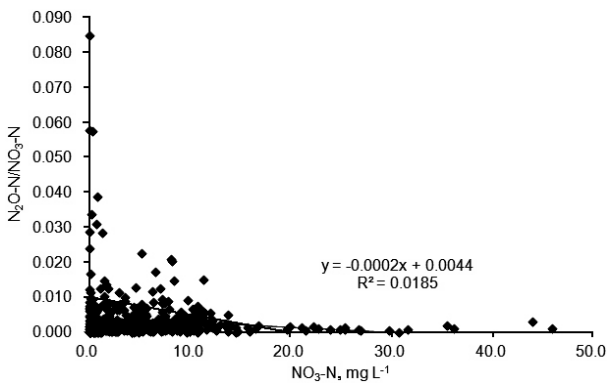
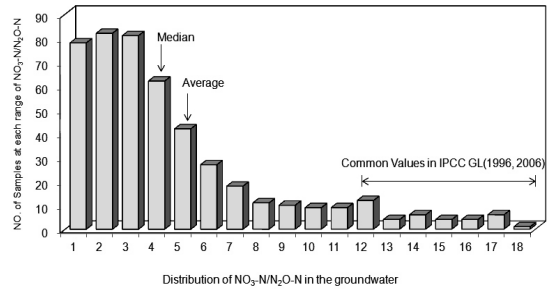


Fig. 2. Relationship between NO₃-N concentration and normalized NO₃-N/N₂O rate.

수계에 의한 아산화질소 간접배출량 평가에 가장 중요한 요인이 관개수 중 N₂O-N/NO₃-N 비율이며, 이 비율이 아산화질소 간접배출의 계수가 된다.

Figure 3은 우리나라 농경지 지하수 중의 N₂O-N와 NO₃-N 농도의 비율 분포결과이다. 2007년부터 2010년까지 4년간 측정된 N₂O-N와 NO₃-N 농도비율의 평균값은 0.00354, 중앙값은 0.00184이며, 97%가 IPCC의 질소의 지하침출에 의한 아산화질소 배출량 계산 default 값인 0.015이하에 분포하고 있다.

IPCC (1997)는 Mosier et al. (1998b)에 의해 지하수 중의 N₂O-N 농도와 NO₃-N 농도비 분포는 대개 0.003~0.06이며, 가장 보편적인 농도분포는 0.007~0.02라는 연구결과를 바탕으로 지하침출 (EF_{5-g}), 지표수유출 (EF_{5-r}), 강어귀 (EF_{5-e})의 영역별 용존 아산화질소와 질산태질소의 비율은 각각 0.015, 0.0075, 0.0025, 전체적으로는 이를 합한 0.025를 default 값으로 제시하고 있다. 따라서 우리나라도 현재 수계에 의한 아산화질소 간접배출량을 계산하는 계수로 0.025를 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서 2007년부터 2010년까지 4년간 측정된 우리나라 농경지 지하수 중의 N₂O-N과 NO₃-N 농도의 비율의 평균값은 0.0034, 중앙값이 0.0018로서, 97%가 IPCC의 질소의 지하침출에 의한 아



| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0.0.0006 | 0.0006-0.0012 | 0.0012-0.0018 | 0.0018-0.0024 | 0.0024-0.0030 | 0.0030-0.0036 | 0.0036-0.0042 | 0.0042-0.0048 | 0.0048-0.0054 |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 0.0054-0.006 | 0.0060-0.0066 | 0.0066-0.0072 | 0.0072-0.0078 | 0.0078-0.0084 | 0.0084-0.009 | 0.0096-0.0096 | 0.0096-0.0102 | 0.0102-0.0108 |

Fig. 3. Distribution of NO₃-N and N₂O-N ratio in the groundwater.

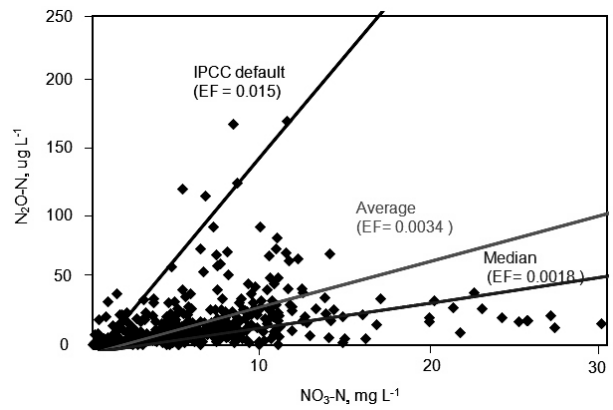


Fig. 4. Comparison of IPCC default value and average and median values of NO₃-N and N₂O-N ratio in the groundwater.

산화질소 배출량 계산 default 값인 0.015이하에 분포하고 있으며, IPCC가 질소의 지하 유출에 의한 아산화질소 간접배출량 계산을 위한 default 값으로 제시한 0.015의 근거가 되는 지하수 중의 N₂O-N농도와 NO₃-N 농도비 분포는 대개 0.003~0.06 이며 가장 보편적인 농도로 제시한 0.007~0.02보다 거의 1/10 정도로 낮음을 알 수 있었다 (Fig. 4).

이상의 시험 결과들을 바탕으로 우리나라 농경지에서의 사용된 질소의 수계 유출에 의한 아산화질소 간접 배출계수 (EF₅)중 가장 비중이 큰 EF_{5-g}는 IPCC의 default 값인 0.015 대신 우리나라 농경지 지하수 중의 N₂O-N농도와 NO₃-N 농도비의 평균값인 0.0034를 제시코자 하며, 따라서 수계유출에 의한 아산화질소 간접 배출계수 (EF₅)는 현재 우리나라의 국가 배출량평가에 사용되는 IPCC default 값인 0.025 대신 0.0134 (EF_{5-g}: 0.015, EF_{5-r}: 0.0075, EF_{5-e}: 0.0025)를 국가배출계수로 제시코자 한다.

우리나라 농경지에서의 N₂O-N 간접배출량 평가 2008년 우리나라 농경지에서 투입된 질소 중 수계유출에 의한 아산화질소 간접배출량은 Table 7과 같다.

우리나라 아산화질소 간접배출량 평가에 사용된 질소량은 농경지에 투입된 총 질소 중 IPCC 가이드라인에 의해 대

Table 7. Indirect N₂O emission from nitrogen leaching in agricultural land of Korea in 2008.

| N _{FERT} | N _{LEACH} | Emission Factor | N ₂ O Indirect Emission by leaching | | | | |
|-------------------|--------------------|---|--|------------------|---------------------|-------|-----------|
| | | | N ₂ O-N | N ₂ O | CO ₂ -eq | | |
| ----- ton ----- | | ---- N ₂ O-N/NO ₃ -N ---- | ----- ton ----- | | | | |
| 493,100 | 147,930 | Default | EF _{5-g} | 0.0150 | 2,219 | 3,487 | 1,080,946 |
| | | (A) | EF ₅ | 0.0250 | 3,698 | 5,812 | 1,801,576 |
| | | Specific Country | EF _{5-g} | 0.0034 | 503 | 790 | 245,014 |
| | | (B) | EF ₅ | 0.0134 | 1,982 | 3,115 | 965,645 |

$N_{LEACH}^{*} = N_{FERT} \times Frac_{LEACH}$,
 N_{LEACH} = THE leached / runoff nitrogen from agricultural soils,
 N_{FERT} = THE Inputs of Nitrogen in agricultural soils,
 $Frac_{LEACH}$ = The fraction of the fertilizer and manure nitrogen lost to leaching and surface runoff.

기 중으로 휘산되는 부분인 화학비료의 10% (Frac_{GASF})와 유기태질소 (가축분뇨)의 20% (Frac_{GASM})를 제외한 493,100 톤으로 산정하였다. 이중 수계를 통해 외부로 유출되는 질소량은 역시 IPCC 가이드라인의 Frac_{LEACH} (30%)을 적용하여 계산한 147,930톤이며 여기에 IPCC의 default 값인 지하침출에 의한 배출계수 (EF_{5-g}) 0.015와 그에 따른 외부유출 계수 (EF₅) 0.025를 적용하여 계산한 수계에 의한 아산화질소 간접배출량은 1,801,576 톤 (CO₂-eq)이었다. 하지만 본 연구에서 신규로 제안한 지하침출에 의한 배출계수 (EF_{5-g})인 0.0034와 그에 따른 외부유출 계수 (EF₅) 0.0134를 적용할 경우 간접배출량은 964,645톤 (CO₂-eq)으로 835,931 톤 (CO₂-eq)의 온실가스 배출 감축효과를 얻을 수 있을 것이다.

요 약

아산화질소 (N₂O)는 가장 중요한 지구온난화 가스 중의 하나로 농업용으로 시용한 비료의 생물학적인 변환에 의한 것이 가장 큰 배출 원인으로 알려져 있다.

우리나라 농경지로부터 아산화질소의 간접배출 특성 및 배출량을 밝히기 위해 2007부터 2010년 까지 4년간 경남지방의 농업용관정의 지하수 질소성분들을 분석한 결과, 총 질소의 경우 평균 6.91, 질산태질소는 5.06 mg-N L⁻¹이었다. 용존 아산화질소의 농도는 평균 14.2 µg-N L⁻¹, 중앙값은 7.8 µg-N L⁻¹, 최고값은 169.6 µg-N L⁻¹로 분포하였다.

지하수 중의 총 질소나 질산태질소의 농도는 연도나 시기별로 큰 차이가 없었으나 용존 아산화질소 농도는 연도별로는 2009년에 시기별로는 8월이 가장 낮은 결과를 보였다.

우리나라 지하수 중의 N₂O-N 농도와 NO₃-N 농도비는 평균값이 0.0034, 중앙값이 0.0018이며, 95% 이상이 IPCC 가이드라인의 default 값인 0.015 이하에 분포하고 있어 IPCC가 1996 가이드라인의 농경지 지하유출에 의한 간접

배출계수 (EF_{5-g}) 0.015 N₂O-N/NO₃-N가 우리나라의 환경보다 너무 높게 선정된 것임을 알 수 있었다. 따라서 IPCC의 EF_{5-g} default 값인 0.015 N₂O-N/NO₃-N 대신 우리나라 농경지 지하수 중의 N₂O-N와 NO₃-N 농도비의 평균값인 0.0034 N₂O-N/NO₃-N을 농경지 질소의 지하유출에 의한 아산화질소 간접배출량 평가를 위한 국가고유 배출계수 (EF_{5-g})로 제시코자 하며, 따라서 농경지에서 수계유출에 의한 아산화질소 전체의 간접 배출계수 (EF_{5-g}+EF_{5-r}+EF_{5-e})는 현재 우리나라의 국가 배출량평가에 사용되는 IPCC default 값 0.025 N₂O-N/ NO₃-N 대신 0.0134 N₂O-N/NO₃-N를 제시코자 한다.

IPCC의 수계 간접 배출계수인 0.025 N₂O-N/NO₃-N을 적용하여 평가한 2008년 우리나라 농경지에서 질소의 수계 유출에 의한 아산화질소 배출량은 1,801,576톤 (CO₂-eq)이었으나 본 연구에서 제시한 배출계수인 0.0134 N₂O-N/NO₃-N을 적용할 경우 964,645톤 (CO₂-eq)으로 835,931톤 (CO₂-eq)의 온실가스 배출 감축효과를 얻을 수 있었다. 하지만 본 연구에서 제시한 배출계수는 질소 유출경로 중 가장 비중이 큰 지하침출에 의한 배출계수인 EF_{5-g} 뿐으로 우리나라 농경지 아산화질소 간접배출량의 올바른 평가를 위해서는 앞으로 시용된 질소 중 수계를 통한 외부 유출 비율에 관한 default 값인 Frac_{LEACH} (30%), 표면수 유출계수인 EF_{5-r} (0.0075 N₂O-N/ NO₃-N), 그리고 하천변을 통해 유출되는 계수인 EF_{5-e} (0.0025 N₂O-N/NO₃-N)에 관한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ006783)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- Beaulieu, J.J., C.P. Arango, S.K. Hamilton, and J.L. Tank. 2008. The production and emission of nitrous oxide from headwater streams in the midwestern United States. *Global Change Biology*, 14:878-894.
- Bouwman, A.F. 1990 Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystem and the atmosphere, in soils and the Greenhouse Effect, edited by A.F. Bouwman, pp. 61-127, John Wiley, Hoboken, N J.
- Dissolved N₂O measurement method by headspace gas analysis Japan Society of soil science and plant nutrition. 1999. 70 (In Korea).
- Dowdell, R.J., J.R. Buford, and R. Cress. 1979. Loss of nitrous oxide dissolved in drainage water from agricultural land, *Nature*, 278, 342-343.
- Hasegawa, K., K. Hanaki, T. Matsuo, and S. Hidaka. 2000. Nitrous oxide from agricultural water system contaminated with high nitrogen, *Chemos. Global Change Sci.*, 2. 335-345.
- Hiscock, K.M., A.S. Bateman, I.H. Muehlherr, T. Fukada, and P.F. Dennis. 2003. Indirect emissions of nitrous oxide from regional aquifers in the United Kingdom. *Environ. Sci. Technol.* 15:37(16):3507-12.
- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 1997. Revised guidelines for national greenhouses gas inventories; Reference manual (volume 3) pp 4. 109.
- Minami, K. and A. Ohsawa. 1990. Emission of nitrous oxide dissolved in drainage water from agricultural land. In: A.F. Bouwman (ed.). *Soils and the greenhouse effect*. John Wiley & Sons, New York. p. 503-509.
- Mosier, A.R., J.M. Duxbury, J.R. Freney, O. Heinemeyer, and K. Minami. 1998a. Assessing and mitigating N₂O emissions from agricultural soils. *Climatic Change*, 40, 7-38.
- Mosier, A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzingerand, and O. Van Cleemput. 1998b. Closing the global N₂O budget: Nitrous Oxide emissions through the agricultural Nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225-248.
- Muehlherr, I.H. and K.M. Hiscock. 1997. A preliminary assessment of nitrous oxide in Chalk groundwater in Cambridgeshire, U.K. *Applied Geochem.* 12, 797-802.
- Nakajima, Y. 2005. Elucidation of the mechanism of indirect emission of greenhouse gases associated with runoff of nutrient solute. The meeting of Japan-Korea cooperative research project on water quality conservation in gro-ecosystem and assessment of risk to the environment., 52.
- Roh, K.A., M.K. Kim, B.M. Lee, N.J. Lee, M.C. Seo, and M.H. Koh. 2005. Assessment of nitrogen impact on watershed by rice cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 24(3):270-279.
- Ronen, D., M. Magaritz, and E. Almon. 1988, Contaminated aquifers are a forgotten component of the global N₂O budget, *Nature* 335, 57-59.
- Sawamoto, T., Y. Nakajima, M. Kasuya, H. Tsuruta, and K. Yagi. 2005. Evaluation of emission factors for indirect N₂O emission due to nitrogen leaching in agro-ecosystems. *Geophys. Res. Lett.*, 32.
- Ueda S., N. Ogura, and E. Wada. 1991. Nitrogen stable isotope ratio of groundwater N₂O. *Geophys Res Lett* 18:1449-1452.
- Yun, S.G. 2004. Monitoring project on agri-environment quality in Korea (In Korea).