

## 강릉 남대천 수계의 비소(As) 농도 분포 및 거동특성 연구

윤이용 · 김경태\*

관동대학교 건설환경시스템공학부 환경공학과

\*한국해양연구소 해양화학연구단

(1999년 8월 12일 접수, 1999년 10월 8일 채택)

## Level and Fate of Arsenic(As) in the Namdae Stream

Yi-Yong Yoon · Kyung-Tae Kim\*

*Department of Environmental Engineering, Kwandong University*

*\*Chemical Oceanography Division, Korea Ocean Research & Development Institute*

### ABSTRACT

This paper presents the first results of dissolved arsenic in the Kangnung Namdae stream. The distribution of As concentrations measured in 28 August (high water flow) and in 21 November 1997 (low water flow) differs from those of other metals measured during the same period: The concentrations of Doam-dam are lower than those of Obong-dam and accumulation in the downstream in the period of low water flow is not pronounced. The As concentration in the downstream under the low water flow is lower than under high water flow, reciprocally to other metals. Freshwater concentrations are comparable with those measured in pristine river and lower than the world average and the difference of concentrations measured during two period is minute. Therefore, the As concentrations in the Namdae stream are background level and the source of As contamination does not exist. In the mixing zone between the freshwater and Donghae seawater, As behave conservatively, indicating the absence of any significant removal or mobilization processes. A first estimation of total dissolved As input from Namdae stream to Donghae coastal sea shows 65.12 kg/yr.

## 요약문

강릉 남대천 수계에서 처음으로 용존 비소(As)의 분포와 거동에 관한 연구가 수행되었다. 풍수기인 1997년 8월 28일(최종 방류량:  $1.97 \times 10^6$  톤/일)과 갈수기인 동년 11월 21일(최종 방류량:  $0.13 \times 10^6$  톤/일), 두 차례에 걸쳐 조사된 As의 농도 분포는 같은 시기에 조사된 다른 중금속들과 다소 차이를 보인다. 도암댐 보다 오봉댐 유출수의 농도가 미소하게 높았고, 갈수기인 11월 하류부의 농도 급증현상도 나타나지 않았을 뿐 아니라 풍수기인 8월 하류부의 농도보다도 낮았다. 그리고 두 조사기간사이의 농도차가 미비하며, 원시적인 강들과 세계평균치에 비해서도 비교적 낮은 농도로서 남대천 수계에서는 As의 인위적인 오염원이 없고, 자연적인 배경농도(background level) 수준임을 알 수 있다. 하구에서 담수와 해수가 혼합되는 과정에서는 외부 유입이나 제거 기작없이 염분과 함께 직선적으로 증가하는 보존적인 분포를 보이며, 남대천을 통하여 동해로 유출되는 As의 양은 연간 65.12kg 정도이다.

주제어 : 중금속, 비소, 강릉 남대천, 유출량

## 1. 서론

강릉 남대천은 강원도 명주군 왕산면 일대의 대화실산과 두리봉에서 발원된 지류와 대가리에서 발원된 지류가 성산면 오봉리에 위치한 오봉댐에서 합류하여 저장되며 일부는 방출되어 강릉수력 발전방류수와 혼합되고, 약 500 m 하류에서 성산면 삼포암과 가마골에서 흘러 들어 오는 지류와 합류된 후 강릉 시내 중심을 지나 하류지역의 섬석천과 함께 동해로 유출되는 하천이다. 강릉시와 명주군의 농업용수, 공업용수 및 상수원으로 사용되는 남대천의 유로연장은 30.2 km이고 총유역면적은 252.9 km<sup>2</sup>이다. 남대천의 상류지역은 태백산맥의 동쪽사면에서 발달한 영동수계의 전형적인 특징을 나타내는 반면 강릉시를 경유하는 중·하류지역은 생활 하·폐수의 유입으로 오염된 도시하천의 형상을 나타내고 있는 실정이다. 특히 강릉수력발전소가 1990년 6월에 건설되면서 평창군 횡계리 송천지역에 형성된 도암호의 물을 유로변경시켜 발전방류수로 이용한 후 강릉 남대천으로 유출시킴으로써 기존 남대천 지역의 수질과 생태계의 변화가 관심의 대상이 되어 왔다.

지금까지 강릉남대천 수질에 관한 몇몇 연구가 수행된 바 있으나<sup>1-6)</sup>, 일부 항목에 단편적으로 편중되어 있거나 일시적 조사 수준에서 실행되어 온 실정이다. 그러나 강이나 하천의 수질은 시기별 그리고

유량에 따라 크게 변함으로서 일시적인 조사만으로 그 환경을 논하는 것은 매우 위험한 일이다. 따라서 강릉 남대천의 종합적인 수질 상태와 남대천이 받고 있는 오염 부하량 및 그 영향 등을 조사함으로써 남대천 수질개선 대책 마련을 위한 연구가 강릉시의 주관으로 1997년 4월부터 일년동안 다양한 유량조건에서 월 1회씩 총 11회 조사되었다. 그 중 중금속과 일반수질 항목에 관한 연구는 이미 논문으로 발표되었으며<sup>7,8)</sup>, 본 연구에서는 수질평가시 특정유해물질로 규정되어 있는 비소(As)의 정확한 측정과 거동특성에 관하여 조사하였다.

최근 들어 GC, AA, ICP-AES와 같은 분석 기기와 주변기기들이 발달함에 따라 ppb 또는 ppt 수준으로 존재하는 자연수중의 As 농도를 정량할 수 있게 되었으며, 과학선진국에서는 특정 환경내에서 As의 거동에 관한 연구가 활발히 수행되어 왔다<sup>9-12)</sup>. 주로 많이 사용되고 있는 ICP-MS는 다수의 원소를 동시에 측정할 수 있는 장점이 있으나 방해물질의 영향을 받기 쉬운 원소의 경우, 기기에 내장된 방해효과 보정 Program이 있으나 쉬운 과정은 아니다. As의 경우에는 ICP-MS의 플라즈마 형성 가스인 Ar과 결합하여 정의 오차를 유발하는 Cl의 영향을 효과적으로 배제하고 측정감도를 높일 수 있는 Hydride generation을 전처리 과정으로 많이 이용하고 있다. 특히, 최근에는 분석이 용이하고, 소량의

시료로 측정이 가능한 Continuous-Flow Hydride Generation 기법이 활발히 보급되고 있다<sup>10,13,14</sup>.

그러나 국내에서 As에 대한 조사는 환경영향평가의 목적에서 주로 실행되었으며, 시료의 채취 및 분석 과정에서 청정기술을 사용하지 않음으로 인하여 신뢰성이 없는 측정을 주로 해왔다. 따라서 이러한 자료로는 정확한 오염 현황이나 추세 파악, 그리고 환경내에서의 거동을 밝히기는 어려운 실정이다. 한편 해양수산부에서 고시한 해양환경공정시험방법<sup>15</sup>에는 Hydride generation과 AA를 결합한 방법이나 그에 준하는 방법으로 As를 측정하도록 하고 있으나 이러한 방법을 이용하여 조사된 국내의 자료로는 단순 보고서<sup>16,17</sup> 두 편 정도가 있을 뿐이다.

따라서 본 연구의 목적은 청정기술을 이용하여 강릉 남대천 및 하구역에서 용존성 As의 정확한 측정과 거동 특성을 밝히는데 있다.

## 2. 시료채취 및 분석

시료채취는 풍수기인 1997년 8월 28일(최종 방류량:  $1.97 \times 10^6$  톤/일)과 갈수기인 동년 11월 21일(최종 방류량:  $0.13 \times 10^6$  톤/일), 두 차례에 걸쳐 강릉 남대천 수계를 두 영역으로 나누어 채수하였다(Fig. 1). 첫째 영역은 오봉댐 방류수와 도암댐 취수구부터 시작하여 하구에서 해수와 만나기 직전인 섬석천과 합류지점까지의 남대천 수역으로 승용차를 이용하여 이동하였으며, 둘째 영역은 남대천 하구 및 연안지역으로서 염분 0 psu(practical salinity unit, ‰)인 최종 담수지점에서 부터 염분 30 psu 지점까지 염분구배를 따라 9개 지점에서 채수했다. 수심이 얕은 남대천 수역에서는 낚시용 고무옷과 긴 비닐장갑을 어깨까지 착용하고 가능한 강의 중앙부까지 도보로 이동하여 미리 산으로 잘 세척된 1 l HDPE 병입구를 상류로 향하여 수면 20~30 cm 아래에서 채수하였다. 남대천 하구와 연안지역은 모

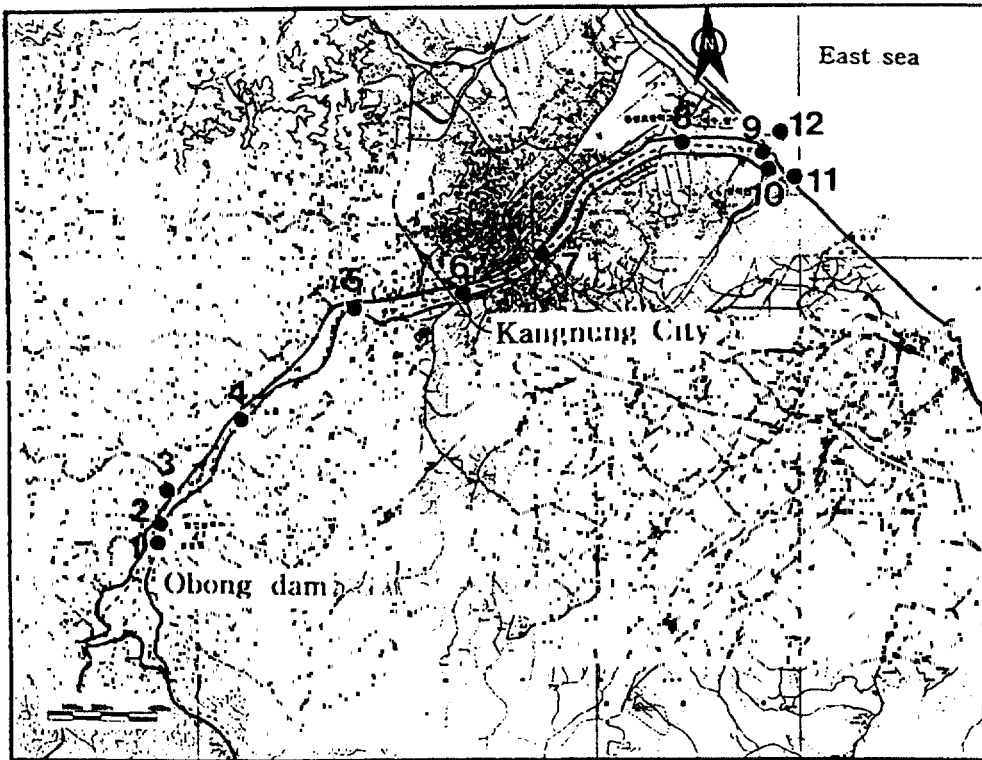


Fig. 1. Location of the sampling stations(1. Obong-dam, 2. Water discharge point, 3. Gusan, 4. Sanggumsan-bo, 5. Hongjae-bo, 6. Hapung-bo, 7. Dusan-bo, 8. Dongmung Chokyo, 9. Mixing zone, 10. Sumsukchun, 11. Namhangjin, 12. Anmok).

선으로부터 100 m 이상 떨어진 PVC 재질의 작은 배에서 일회용 긴 비닐장갑을 어깨까지 착용하고 미리 산으로 잘 세척된 1 l HDPE 병을 이용하여 직접 손으로 채수하였다. 시료가 담겨진 HDPE 병은 오염을 방지하기 위해 비닐 봉지로 이중 포장한 후 실험실로 옮겨졌으며, 12시간 이내에 고순도 질소가스 압을 이용하여 미리 산으로 세척된 0.4 μm Nuclepore filters로 여과하였다. 여과후 고순도 염산으로 여과액을 산처리한 후(pH 1 정도) 다음 처리전까지 암냉실에 보관하였다.

As 측정은 Morrow et al.(1997)<sup>13)</sup>과 Perkin Elmer(1998)<sup>14)</sup>의 방법을 기초로 하였으며, 본 연구에서는 ICP-AES 대신 Continuous Flow Hydride Generation 후 ICP-MS(VG PQ II<sup>+</sup>)로 측정하였다. 측정과정은 여과 후 산 처리된 시료수 10 ml를 20 ml PE 병에 취하여 6 N 염산 5 ml를 추가한 다음 5 % KI/Ascorbic acid 0.75 ml를 첨가하여 20분 이상 방치한 후 Internal standard로서 Sb 1ppm 용액 100μl를 가하였다. 이렇게 준비된 시료와 0.5% NaBH<sub>4</sub> 용액을 Fig. 2와 같이 구성된 Continuous Flow Hydride System에 통과시켰다. Peristaltic pump를 이용하여 각각의 용액을 연속적으로 주입하여 Teflon mixing loop를 통과시킴으로서 서로 반응하여 비소를 포함하는 가스상태의 수소화물을 생성시킨다. 이 혼합물은 Ar 가스가 흐르고 있는 Tubular Membrane Gas Liquid Separator(TMGLS)를 통과하면서 가스상태의 수소화물은 용액으로부터 분리되어 측정장치인 ICP-MS로 들어가고, 용액은 배출된다. Calibration curve는 0, 0.5, 1.0, 2.5 ppb의 As 표준용액 10 ml씩 취하여 위의 과정에 따라 일반시료와 같이 분석하여 얻어졌다. 분석중에 발생할 수 있는 오염의 가능성을 최소화하기 위하여 TMGLS에 시료를 주입하기 전까지의 모든 처리과정은 Clean booth와 Clean

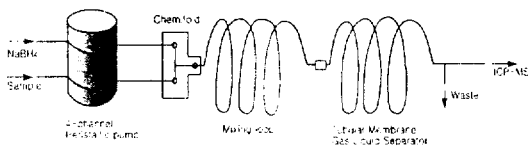


Fig. 2. Schematic of continuous flow hydride generation system.

bench(Class 100) 내에서 실시되었다. ICP-MS와 Continuous Flow Hydride System을 이용한 분석 조건은 Table 1에 나타내었다.

분석의 정확도를 높이기 위해 사용된 시약들은 가능한 고순도이거나 증류장치로 정제된 것을 사용하였으며, 용액의 제조와 용기 세척은 이온교환수를 사용하였다. 본 연구에 사용된 주요 시약과 재료는 다음과 같다.

1) 이온교환수

실험에 사용한 이온교환수는 Mill-Q 시스템 혹은 수돗물을 대형 이온교환장치와 Barnstead사의 이온교환장치(Nonopure Infinity)에 연속적으로 통과시킨 것으로 18.0~18.3 MΩ 이상의 순도를 항상 유지시켜 사용하였다.

2) 염산

Merck사의 Suprapur급을 직접 사용하거나 GR급 염산을 6N로 희석한 다음 Teflon 증류장치로 정제한 후 사용하였다.

3) 5 % KI/Ascorbic acid 용액

특급 KI(Yakuri Pure Chemical Co., Ltd.)와 L(+)-Ascorbic Acid(Junsei Chemical Co., Ltd.) 각각 5 g을 이온교환수 100 ml에 용해시켜 사용하였다.

4) 0.5 % NaBH<sub>4</sub> 용액

Aldrich사의 98 % NaBH<sub>4</sub> 0.5 g을 이온교환수

Table 1. Operating conditions of ICP-MS and continuous flow hydride generation system

RF Power	1350 watts
Plasma gas	Ar
Cool gas flow	13 L/min
Auxiliary gas flow	0.6 L/min
Nebulizer gas flow	0.5 L/min
Uptake time	150 sec
Acquisition time	30 sec
Acquisition mode	Peak Jump
Run	2
NaBH <sub>4</sub> flow rate	1.0 ml/min
Sample flow rate	1.5 ml/min
Mixing loop	PTFE tubing(OD 1.6 mm, ID 1.3mm), Length 700mm

Table 2. Detection limit and standard recovery

	As(ppb)
Blank	
B1	0.04
B2	0.06
B3	0.07
Mean	0.06
Standard deviation	0.02
Detection limit*	0.06
CASS-3	
Certified value	1.09±0.07
<i>This study</i>	
C1	1.13
C2	1.17
C3	1.16
Mean	1.15
Standard deviation	0.02
Standard deviation (%)	1.7
Recovery (%)	106

\*Detection limit=3 × standard deviation of blank

100 ml에 용해시켰으며, 0.05 g의 NaOH를 가하여 용액을 안정화시켰다.

5) As, Sb 표준용액

Merck사의 ICP용 1000 ppm 표준물질을 희석하여 사용하였다.

분석도중 캐나다의 Nation Research Council에서 공급하는 연안표준해수, CASS-3을 분석함으로써 분석결과의 정확도를 검증하였다. Recovery는 106 %(1.15 ppb)이고, 3번의 개별적인 측정으로부터 얻은 표준편차는 1.7 %이며, 본 연구 분석방법에 의한 As의 검출한계는 0.06 ppb이다. 이러한 자료들을 Table 2에 나타내었으며 분석의 정확성에 대한 신뢰를 가질 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 남대천의 As 농도

풍수기(1997년 8월 28일, 유량:  $1.97 \times 10^6$  톤/

일)와 갈수기(1997년 11월 21일, 유량:  $0.13 \times 10^6$  톤/일), 2회에 걸쳐 측정된 강릉 남대천 수계의 비소농도 분포를 Table 3와 Fig. 3에 나타내었다.

정점별 변화는 같은 시기에 조사된 다른 중금속들과 다소 차이를 보인다. 윤과 김(1998)<sup>7)</sup>에 따르면 Cu, Cd, Pb, Ni, Zn, Fe의 경우, 강릉수력의 발전 방류수로 사용되는 도암호의 물이 오봉댐의 유출수보다 다소 농도가 높았으며, 발전방류수와 오봉댐 유출수의 혼합수가 중·하류를 통과하면서 농도가 증가하는 추세가 갈수기에 두드러지게 나타난다고 언급하였다. 그러나 As의 경우에는 도암댐 보다 오봉댐 유출수의 농도가 미소하게 높았으며, 갈수기인 11월 하류부의 As 농도가 급증하지 않았을 뿐 아니라 만조기인 8월 하류부의 농도보다 낮다. 이같은 현상은 다른 중금속들이나 COD, SS, 영양염류, 대장균 같은 일반 오염물질들의 거동<sup>7,8)</sup>과는 대조적인 양상이다.

연안으로 유출되는 남대천의 최종 As 농도는 유량이 적었던 11월의 측정치( $0.41 \mu\text{g/l}$ )보다 유량이 많았던 8월의 측정치( $0.48 \mu\text{g/l}$ )가 다소 높았다. 이것은 조사전날 많은 강우량과 발전 방류수가 유출된 8월에 다른 오염물질에서 관찰된 희석현상이 As의 경우에는 전혀 나타나지 않았음을 알 수 있다.

남대천에서 측정된 As의 농도를 Changjiang, Huanghe와 같이 인간활동에 비교적 노출되지 않은 원시적인 큰 강들과 산업활동의 영향을 많이 받고 있는 Rhone강과 Rhin강, 그리고 Martin et al. (1991)<sup>23)</sup>이 제안한 전세계 강들의 평균치와 비교해 볼 때(Table 3), 비교적 낮은 농도로서 강릉 남대천 수계에서 As의 점오염원이 없음을 알 수 있다.

#### 3.2. 담수와 해수의 혼합(용존 As-염분의 상관 관계)

As의 농도와 염분의 상관 관계도 Fig. 3에 나타내었다.

같은 기간 동안 조사된 다른 중금속들(Cu, Pb, Ni, Zn, Fe)과는 상반되고 Cd과는 동일하게 As는 담수보다 해수의 농도가 높았다. 일부 중금속의 경우, 담수와 해수의 혼합과정에서 유입 혹은 제거 현상이 나타난 경우도 있으나, As의 경우에는 염분과

Table 3. Concentration of dissolved arsenic(As) in the Namdae stream, some selected rivers and in seawater( $\mu\text{g/l}$ )

Namdae Stream			River	Sea	Reference
	28/8/1997	21/11/1997			
Doam-dam	0.16	0.33	St. Laurent	0.54	18)
Obong-dam	0.21	0.41	Rhin	0.8~1.41	19)
Water discharge point 1	0.28		Huanghe	2.03	20)
Water discharge point 2	0.32		Changjiang	0.70	21)
Gusan	0.36	0.38	Rhone	2.31	22)
Sanggumsan-bo	0.27	0.33	World average	1.7	23)
Hongjae-bo	0.26	0.31		Coastal Dong-hae(30psu)	1.29~1.38
Hapung-bo	0.28	0.34		Mediterranean	1.34~1.50
Dusan-bo	0.29	0.34		World average	
Dongmung chokyo	0.48	0.41		(Deep Ocean)	1.7
Mixing zone	0.59	0.41		(Ocean Margin)	1.1
Sumsukchun	0.63	1.34			this study
Namhangjin		1.04			22)
Anmok	0.80	1.27			23)
0psu	0.55	0.57			
0psu		0.65			
3psu	0.61	0.71			
8psu	0.75	0.83			
15psu	0.92	1.03			
18psu		1.15			
20psu		1.20			
21psu	1.07				
23psu		1.19			
25psu		1.26			
27psu	1.18				
28psu	1.22				
29psu	1.27				
30psu	1.29	1.38			

18) Takayanagi and Cossa, 1985 19) Andreae and Froelich, 1984 20) Huang et al., 1988  
 21) Zhong, 1988 22) Guan, 1991 23) Martin and Windom, 1991

함께 직선적으로 증가하는 보존적인 분포를 보인다. 이것은 담수와 해수가 만나는 과정에서 저니로부터의 용출이나 대기로부터의 유입, 부유입자와의 상호작용 즉, 용출 혹은 흡착되는 기작없이 단순한 물리적인 혼합을 의미한다.

### 3.3. 동해 연안으로 방출되는 As의 양

동해로 방출되는 남대천은 크게 강릉수력의 발전 방류수, 오봉댐의 방류수와 주변유역으로부터 유입수(이하 자연유입수라 칭함), 강릉시의 생활하수로

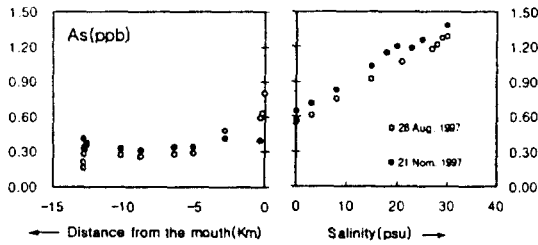


Fig. 3. Distribution of the total dissolved As in the Namdae stream and concentration vs. salinity in the estuary.

구성되어 있다. 강릉수력 발전방류수는  $125 \times 10^6$  톤/년(강릉수력발전소 1997년 자료), 자연유입수는  $1.7 \times 10^6$  톤/년(발전소 건설 전해인 1989년 건설교통부 자료), 강릉시 생활하수는  $15 \sim 18 \times 10^6$  톤/년(강릉시청 하수와 개별연락, 한국과학기술연구원, 1993<sup>24)</sup>)로 추산할 수 있다. 따라서 최근 연간 총 방출 유량은  $144.7 \times 10^6$  톤/년으로 추산되며, 그중 86 %는 발전방류수, 12 %는 강릉시의 생활하수, 나머지 약 2 % 미만이 자연유입수로 구성되어 있다.

앞서 설명한 용존 As-염분 상관관계로부터 강하구에서 일어나는 기작이 보존적임을 감안할 때 남대천 유출수중 As의 "실제용존농도" (effective dissolved concentration)는 최종담수농도(8월 0.48  $\mu\text{g/l}$ , 11월 0.41  $\mu\text{g/l}$ )를 그대로 사용할 수 있다. 남대천을 통하여 동해로 유출되는 As의 유출량은 실제용존농도로서 최종담수농도를 최종 유출 유량(8월 28일 :  $1.97 \times 10^6$  톤/일, 11월 21일 :  $0.13 \times 10^6$  톤/일)에 곱하므로써 하루동안의 방출량(8월 28일: 0.86 kg/일, 11월 21일: 0.05 kg/일)을 산출할 수 있다.

유량의 변화에 따른 중금속 농도변화는 중금속의 종류에 따라, 그리고 강의 특성에 따라 차이는 있지만 갈수기에 높은 농도, 풍수기에 희석효과에 의한 낮은 농도를 보이는 일반적인 경향이 Rhone강을 비롯한 유럽의 산업화된 강들에서 조사된 바 있으며<sup>25)</sup>, 강릉 남대천의 일부 중금속 경우에도 마찬가지였다<sup>7)</sup>. 본 연구에서는 8월과 11월 단지 두 번 조사되었지만 이들은 유량이 가장 많았던 시기와 적었던 시기의 상반된 측정치이므로(연평균 일일유량  $0.4 \times 10^6$  톤/일) 평균 중금속 농도의 상·하한치로 생각할 수 있으며 As의 경우 그 차이가 미소하여 남

대천 수계에서 As의 인위적인 오염원이 없으며 이 농도는 자연적인 배경농도(background level) 수준임을 알 수 있다. 이 두 값의 평균(0.45  $\mu\text{g/l}$ )을 연간 총 방출 유량,  $144.7 \times 10^6$  톤/년에 곱하여 얻은 연평균 As의 유출량은 65.12 kg/년이다. 이것은 미흡하지만 강물을 통하여 연안으로 전달되는 As를 정량화한 국내 최초의 자료로서 연안오염 연구의 중요한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 다른 지역에서도 이와 같은 기초연구가 많이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### 3.4. 동해 연안의 As 농도

우리나라 연안에서 조사된 신뢰할 만한 자료는 대단히 미비한 실정이다. 본 연구에서 조사된 동해 연안의 As 농도를 지중해 연안의 표층수와 원양과 근해의 세계 평균치와 비교해 볼 때(Table 3) 거의 유사한 수준임을 알 수 있다.

## 4. 결 론

강릉 남대천 수계에서 풍수기와 갈수기, 2회에 걸쳐 조사된 As의 농도 분포는 같은 시기에 조사된 다른 중금속들과 다소 차이를 보인다. As의 경우에는 도암댐보다 오봉댐 유출수의 농도가 미소하게 높았으며, 갈수기인 11월 하류부의 As 농도가 급증하지 않았을 뿐 아니라 풍수기인 8월 하류부의 농도보다 낮다. 그리고 두 조사기간사이의 농도차가 미비할 뿐 아니라 원시적인 강들에 비해서도 비교적 낮은 농도로서 남대천 수계에서는 As의 인위적인 오염원이 없으며, 이 농도는 자연적인 배경농도(background level) 수준임을 알 수 있다. 하구에서 담수와 해수가 혼합되는 과정에서는 외부 유입이나 제거 기작없이 염분과 함께 직선적으로 증가하는 보존적인 분포를 보이며, 남대천을 통하여 동해로 유출되는 As의 양은 연간 65.12 kg 정도이다.

## 참 고 문 헌

1. 한국전력공사, 강릉수력 발전 방류수의 수질조

- 사 보고서(1992).
2. 최금주, 박광하, 전방욱, "최근 5개년간 강릉 내 곡교 지점의 수질 변화," *자연과학*, **5**, 81~87 (1989).
  3. 김형섭, 전방욱, 백남극, "강릉남대천의 수질과 식물성 플랑크톤의 분포," *자연과학*, **6**, 36~50 (1990).
  4. 김규중, 전방욱, 백남극, "강릉남대천 수계에서의 미생물 분포 조사," *자연과학*, **6**, 67~76 (1990).
  5. 최창근, 심혜숙, 김형섭, 김규중, 전방욱, "강릉 수력발전소 발전수 방류전후의 남대천 수질과 미생물 분포," *동해안연구*, **4**, 16~21(1993).
  6. 박광하, 전방욱, 민선홍, 최봉종, "영동지역 주요 3개 하천의 수질실태 및 관리에 관한 연구," *동해안연구*, **5**(1), 1~15(1994).
  7. 윤이용, 김경태, "강릉 남대천 수계의 중금속 분포 및 거동특성 연구," *대한환경공학회지*, **20**(8), 1039~1049(1998).
  8. 윤이용, 김대현, 이승목, "강릉 남대천 하류의 오염물질 정체 현상과 발전 방류수의 영향," *대한환경공학회지*, **21**(11), 2221~2230(1999).
  9. Andreae, M. O., "Arsenic speciation in seawater and interstitial waters: The influence of biological-chemical interactions on the chemistry of a trace element," *Limnol. Oceanogr.*, **24**, 440~452(1978).
  10. Ikeda, M., "Determination of arsenic at the picogram level by atomic absorption spectrometry with miniaturized suction-flow hydride generation," *Anal. Chim. Acta.*, **167**, 289~297(1985).
  11. Aurilio, A. C., Mason, R. P., and Hemond, H. F., "Speciation and fate of arsenic in three lakes of the Aberjona watershed," *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 577~585 (1994).
  12. Kitts, H. J., Millward, G. E., Morris, A. W., and Ebdon, L., "Arsenic biogeochemistry in the Humber Estuary, U.K.," *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, **39**, 157~172(1994).
  13. Morrow, A., Wiltshire, G., and Hursthouse A., "An improved method for the simultaneous determination of Sb, As, Bi, Ge, Se, and Te by hydride generation ICP-AES: Application to environmental samples," *At. Spectrosc.*, **18**, 23~28(1997).
  14. Perkin Elmer, Perkin Elmer News, p. 33 (1998).
  15. 해양수산부, *해양환경공정시험방법*, p. 317 (1998).
  16. 한국해양연구소, *영동화력발전소 인근 어촌계 공동어장 조사*(1994).
  17. 한국해양연구소, *장목리 남해기지 건설사업에 따른 환경영향평가서*(1994).
  18. Takayanagi, K. and Cossa, D., "Speciation of dissolved selenium in upper St. Lawrence estuary," *In Marine and estuarine geochemistry*, Sigleo, A.C. and Hattori, A. (Eds.)(1985).
  19. Andreae, M. O. and Froelich, P. N., "Arsenic, antimony and germanium biogeochemistry in the Baltic sea," *Tellus*, **36B**, 101~117(1984).
  20. Huang, W. W., Martin, J. M., Seyler, P., Zhang, J., Zhong, X. M., "Distribution and behavior of arsenic in the Huanghe (Yellow river) estuary and Bohai sea," *Mar. Chem.*, **25**, 75~91(1988).
  21. Zhong, X. M., *Comportements biogeo-chimiques de selenium et de l'arsenic dans les milieux fluviaux, estuariens et marins*, Ph D. thesis, Paris VI university, p. 215 (1988).
  22. Guan, D. M., *Elements traces dissous en milieu fluviales, estuarien et marin : distribution, speciation et biochimie*, Ph D. thesis, Paris VI university, p. 81(1991).
  23. Martin, J. M. and Windom, H., "Present and future role of ocean margins in regulating marine biogeochemical cycle of trace elements," *Marginal Seas Processes*



- in Global Change*, R.F.C. Montoura, J. M. Martin and R. Wollast (Eds), Wiley, New York, NY, pp. 45~67(1991).
24. 한국과학기술연구원, 강릉수력 발전 방류수의 환경조사 및 개선대책 보고서, p. 189(1993).
25. Yoon, Y. Y., Speciation et bilans geochemiques des metaux traces en Mediterranee occidentale et zones cotieres adjacentes, Ph D. thesis, Paris VI university 6(1994).