

## WASP 모의를 이용한 하천 수계 중금속 위해성평가 방법

신유리 · 윤춘경<sup>†</sup> · 전나정 · 이한필

건국대학교 환경과학과

## Quantitative Risk Assessment Method for Metals in Water Body using WASP

Yu-Ri Shin · Chun-Gyeong Yoon<sup>†</sup> · Na-Jeong Jeon · Han-Pil Rhee

Department of Environmental Science, Konkuk University

(Received 14 March 2010, Revised 31 May 2010, Accepted 17 June 2010)

### Abstract

According to the spatial movements of the Nak-dong river watershed, the changes in heavy metal concentrations were simulated by WASP7.3. The risk assessment was performed using the predicted data of WASP7.3. The target heavy metal was manganese (Mn). In the simulated manganese data of WASP7.3, the average concentration by regions was from 0.03 mg/L to 0.07 mg/L. It is lower than drinking water standard in Korea. The risk assessment was presented that it was high at the junction of Nak-dong river and Kumho river. It was influenced by the discharge of industrial complexes and large cities which were located in the junction. In comparison of drinking water standard and predicted data of WASP7.3 risk assessment, whole watershed was also low level at predicted data. However, to keep the similar risk value ( $10^{-7}$ ) in adults and children anywhere, it requires the additional treatment of the point source discharges. It was also reflected by regions. Through this study, it was possible to evaluate heavy metal influence in unattainable monitoring regions and to estimate heavy metal addition and reduction by locations. Therefore, the outcomes of WASP7.3 can connect with the risk assessment and it can evaluate the safety of human by regions.

**keywords** : Manganese, Risk assessment, WASP7.3, Water quality

### 1. 서론

최근 들어 생활수준의 향상으로 인하여 하천 및 하천 주변에서 이루어지는 여가 활동에 대한 관심이 증가되고 있으며, 이에 따른 수질관리가 중요한 문제로 대두되고 있다(손나라와 양세정, 2008). 본 연구의 대상 지역인 낙동강은 남한 내 유로연장이 가장 긴 강으로서, 산업화 및 도시화로 인하여 하천 관리의 필요성이 증가하였다(백도현 등, 2008). 낙동강 유역은 본류와 합류하천인 금호강을 중심으로 대규모 공단 및 대도시가 위치하고 있다. 이러한 오염원으로부터 유입되는 산업폐수와 생활하수가 낙동강의 주요 오염원으로 작용하고 있으며, 폐수에 포함된 중금속에 의하여 발생하는 환경오염문제가 우려되는 지역이다(배준웅 등, 2001; 이정희 등, 1992; 정기호 등, 1996; 황경엽 등, 2007).

중금속은 각종 산업체 및 공단지구에서 방류되는 유해물질 중 하나로 강으로 유입되어 수체 및 수생태계에 직접적인 영향을 미칠 뿐 아니라, 먹이사슬을 통하여 인간에까지 영향을 미치는 간접적 위험성도 증가시킨다(김성조와 양환승 등, 1986; 송교욱 등, 1993; 정기호 등, 1996; Parvaneh, 1979). 또한, 중금속의 수체 내에서 잔류하는 특성은 수생

생물 및 인체에 잠재적인 독성을 나타낼 수 있기 때문에, 이에 따른 지속적인 연구가 필요하다. 그러나 지금까지의 연구는 낙동강의 퇴적물 내 중금속 분포 및 특성에 관련된 것으로써, 하천 수체 내 중금속에 관한 연구는 미흡한 실정이다(이정희 등, 1992; 정기호 등, 1996; 황경엽 등, 2007). 중금속의 수질환경 개선 및 관리대책을 수립하기 위해서는 환경변화와 관련된 현상의 분석 및 상위 계획에 따른 평가, 중금속 개선 효과에 대한 예측이 필요하다(조미영 등, 2000; 황병기와 Lung, 1998).

현재 국내에 적용되고 있는 하천수질 모형은 QUAL2E, STREAM, WQRRS, NSM, WASP, EFDC, QualKO 등이 있다. 여러 하천수질 모형 가운데, US EPA(U.S. Environmental Protection Agency, 미국 환경부)에서 개발한 WASP 모델링 시스템(Water Quality Analysis Simulation Program)은 하천 수체 내의 적절한 수질 관리를 위한 수단으로서, 자연 현상에 대한 조사 자료들을 바탕으로 다양한 수질 모델링을 적용하고 있다. WASP 모형은 수체에 대한 동적 분할 모형으로서 시간에 따른 변동을 고려할 수 있어 연중변화는 물론 짧은 시간 간격의 수질 변화를 분석하는 데 이용되고 있다(권명준 등, 2003; 오경미 등, 1995; US EPA, 2005). 따라서, 본 연구에서는 한정된 자료와 제한된 여건 속에서 전체적인 오염도를 평가하고 수체 내 수질변화 모의를 위하여 WASP7.3/TOXI를 이용하였다. 이미 WASP

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
chunyeon@konkuk.ac.kr

모형을 하천에 적용한 국내의 연구사례도 존재하며, 대부분 하천의 수질예측을 위하여 적용된 사례가 있다. 하지만, 이는 대부분 영양물질을 위한 수질예측 수준에 머무르는 한계를 갖는다(김성홍, 1990; 박영진, 1996; 성기준, 1993; 이종호, 1999).

중금속이 유입된 하천은 수체 주변에서 수영, 낚시 등의 여가 활동에 따른 공공 보건에 대한 안전성 평가가 필요하다(김두희 등, 1993; 조수현, 1995). WASP7.3 모의 결과를 바탕으로 인체위해성 평가를 적용하였다. 위해성평가는 기준치 제정, 제도시행 전후의 비용효과분석이 가능하다는 점에서 불확실성을 지닌 환경문제를 과학적이고 합리적으로 풀어나갈 수 있는 방법론으로 인식되고 있다(US EPA, 1989a). 이러한 평가를 통해 시기별, 지역별 위해도를 분석하면 중금속에 의한 안전성의 정도를 정량화할 수 있으며, 이를 통해 중금속에 의한 위해도를 보다 쉽게 이해할 수 있을 것이다.

본 연구는 국가수자원관리종합정보시스템의 물환경정보시스템(환경부, 2009) 등에서 제시된 모니터링 자료를 이용하여 대상 유역의 중금속 오염상태 진단 및 유역에 대한 중금속 영향 추이를 예측하고 관리자로 하여금 인체 및 수계 건강성을 고려한 유역관리에 있어서 평가자료를 제시할 수 있는 도구를 개발하는 데 목적이 있다. 이를 통해 대상 물질의 영향 정도 및 지역에 따른 상대적 차이를 평가하고 오염원의 증감을 예측할 수 있으며, 수질악화가 우려되는 지역에 적절한 조치를 취할 수 있도록 함으로써 수질사고를 사전에 예방하는데 도움을 줄 수 있다. 따라서, 낙동강 수체의 이동에 따른 중금속 농도 변화를 WASP7.3으로 모의하였으며, 그 결과로부터 불확실성을 고려한 위해성 평가를 실시하였다. 또한, 평가된 인체 위해도를 바탕으로 수계 안전성을 검토하는 방법론을 제시하는데 목적을 갖는다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 대상 지역

낙동강 유역은 낙동강 본류를 중심으로 대규모 산업공단이 위치하고 있어 산업폐수 및 유역 인구 활동에 의한 생활하수, 그리고 하천 주위의 농업지역에서 배출되는 오염원 등이 낙동강 오염의 주원인으로 작용하고 있다. 뿐만 아니라 낙동강 지류에 설립된 여러 산업공단에서 배출되는 폐수에 의해서도 낙동강 본류의 오염 부담이 가중되고 있는 실정이다(이정희 등, 1992; 정기호 등, 1996).

본 연구의 대상지역은 총량관리단위유역을 중심으로 구분하였을 때, 낙동강 수계구간으로서 낙동강 본류를 중심으로 낙동강 본류에 합류되는 하천을 포함하고 있다. 안동댐과 임하댐이 위치하고 있는 낙동강 상류지점(낙본C, 943 km<sup>2</sup>)으로부터, 경상남도와 부산광역시 경계점 전인 낙동강 본류 하류지점(낙본L, 253 km<sup>2</sup>)까지 WASP7.3모형을 구축하였다. 합류하천으로는 상류로부터 미천(2차 하천), 내성천(국가하천), 영강(2차 하천), 병성천(1차 하천), 위천(1차 하천), 감천(국가하천), 금호강(국가하천), 백천(2차 하천), 회천(1차 하천), 황강(국가하천), 남강(국가하천), 밀양강(국가하천)이 주요 하천으로 고려되었다(Fig. 1).

낙동강 본류의 주요 고려 지점은 상주시와 구미시 경계점 후부터 성주군과 고령군 경계지점 전까지의 유역(낙본E, 690 km<sup>2</sup>)과 대구광역시와 경상남도 경계지점의 낙동강 본류지점(낙본G, 583 km<sup>2</sup>)으로 대구와 경남을 포함하는 지역이 주요지점이다. 낙본E 연구유역은 구미4공단, 구미공단 그리고 구미시가 위치하고 있어 이에 따른 영향을 받고 있다. 또한 낙본G 연구유역은 그 상류 지점이 경상북도와 대구광역시 경계의 낙동강 본류지점(낙본F, 607 km<sup>2</sup>)과 대구광역시와 경상북도 경계지점의 금호강 본류지점(금호C,



Fig. 1. Study area.

723 km<sup>2</sup>)과 경계를 마주하고 있다. 특히 금호C 지점은 대구검단공단, 대구3공단 및 서대구공단이 위치하고 있어 공단의 영향을 직접적으로 받고 있다. 낙본F 지점도 왜관공단이 위치하고 있어 낙본G 지점에 직접적인 영향을 끼치고 있다.

2.2. WASP (Water Quality Analysis Simulation Program)

2.2.1. 모형의 적용

본 연구에서는 US EPA에서 개발하여 관리하고 있는 WASP7.3의 프로그램 중 독성모델(TOXI)을 이용하였다. WASP7.3 모형의 입력자료 구성을 위하여 환경부의 유역경계도 및 총량관리단위유역도를 이용하였다. 수질측정지점의 위치, 공단의 위치 및 하천의 특성을 고려하여 연구지역의 유역을 낙동강 본류(낙본C~낙본L)와 금호강 유역(금호A~금호C)으로 나누었으며, 각각 24개와 5개의 격자로 구성하였다(Fig. 2). 각 격자는 하천 상류로부터 종단 방향으로 평균 1,400 m 간격으로 분할하였으며, 횡단방향으로는 현재 하상의 폭 만큼을 고려하여 분할하였다(Table 1).

연구지역 상류에서의 유량은 segment n1의 상류에 위치한 안동댐과 임하댐에 의하여 결정되고 있다. 이 유량은 하류에까지 영향을 미친다고 사료되어, 이를 낙동강 본류의 배경유량으로서 산정하였다. 금호강 유역의 배경유량으로서 금호A지점의 유량을 고려하였다. 합류하는 12개 하천을 고려하기 위하여 국가수자원관리종합정보시스템의 물환경정보시스템(환경부, 2009)에서 제공하는 일별 유량자료를 이용하여 입력하였다. 이를 검·보정하기 위하여 한국수문조사연보(국토해양부, 2009)를 이용하였다.

또한, 유역 내 존재하는 측정망 자료(국가수자원관리종합

정보시스템, 2009)에서 공통 중금속 자료인 망간(Mn)을 대상 연구 물질로 선정하였으며, 연구지역의 점오염원에 대한 자료는 1989년부터 2009년까지 조사된 자료를 환경부 물환경정보시스템의 수질측정망(국가수자원관리종합정보시스템, 2009)을 통하여 수집하였다. 이를 바탕으로 대상물질에 대한 농도를 입력 자료로 이용하였다(Table 2).

대상물질인 망간(Mn)의 경우 2004년 1~4회, 2005년 1~4회 수집된 수질모니터링 자료(환경부, 2006)를 이용하여 구미, 고령, 하남, 물금 지역에서 검·보정을 실시하였다.

2.2.2. 위해성평가

위해성 평가(Risk Assessment)는 개인이나 집단이 유해상황에 노출되었을 때 발생할 수 있는 영향의 양과 정도를 추정하는 것이다. 위해성 평가는 위험성확인, 용량-반응평가, 노출평가, 위험도 결정의 4단계로 이루어진다. 위험성확인 단계는 인체에 미치는 물질의 영향을 증명하는 단계이며, 용량-반응평가 단계는 대상 화학물질에 노출된 인체에 미치는 잠재된 영향력을 추정하는 단계이다. 노출평가 단계에서는 잠재된 수용체, 노출경로 및 노출량의 평가가 이루어진다. 또한, 위험도 결정에서는 이전단계의 결과로부터 양적으로 추정된 위험도 값을 통합하는 단계이다(Lim et al., 2008; US EPA, 1989a).

위험성확인

대상 물질인 망간(Mn)은 인체의 발육 및 성장에 필수 금속으로써, 건강한 성인의 경우 약 10~12 mg 정도 존재한다. 망간에 만성중독이 되면 두통, 불면, 관절, 근육통, 경련, 정신 착란, 파킨슨 신드롬 등과 같은 증상을 유발한다.

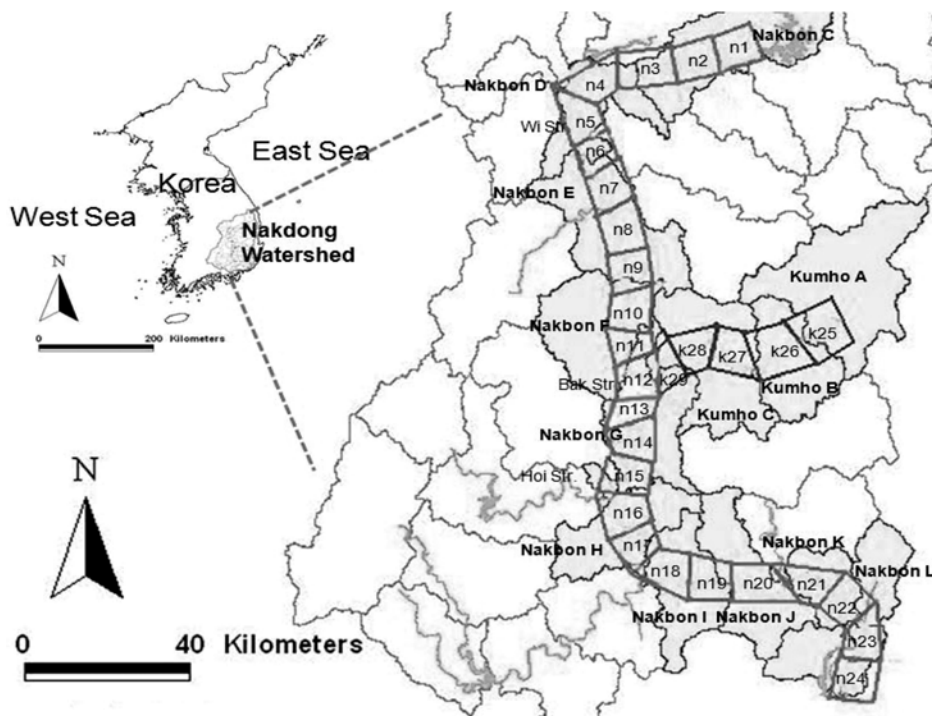


Fig. 2. Divided 29 segments in Nakdong river watershed for WASP7.3.

**Table 1.** Feature of divided 29 segments

Watershed	Segment	Tributary river	Region	Length (m)	Width (m)
	n1		Andong	15,389	225
Nakbon C	n2	Mi Str.		17,130	192
	n3			18,788	280
Nakbon D	n4	Young Riv. Naesung Str.		24,102	262
	n5	Byungsung Riv. Wi Str.		20,859	258
	n6			12,941	409
Nakbon E	n7	Gam Str.		10,644	382
	n8			12,878	285
	n9		Gumi	12,115	263
Nakbon F	n10			10,319	352
	n11			9,045	543
Nakbon G	n12	Kumho Riv. Bak Str.	Dalsung, Daegu	14,218	456
	n13		Goryeong	13,408	205
	n14		Hyungpoong	17,880	182
	n15	Hoi Str.		14,801	172
Nakbon H	n16	Hwang Riv.	Hapcheon	11,820	219
	n17			15,373	189
Nakbon I	n18	Nam Riv.	Namji	15,587	341
	n19			11,974	438
Nakbon J	n20		Hanam	16,090	611
Nakbon K	n21	Milyang Riv.		13,633	453
	n22		Mulkum	10,275	399
Nakbon L	n23		Gupo	10,783	542
	n24			11,887	675
Kumho A	k25			17,050	141
Kumho B	k26			13,176	234
	k27		Namcheon	16,291	92
	k28			10,836	214
Kumho C	k29			13,299	92

**Table 2.** Heavy metal monitoring station (Water quality Information network system, MOE, 2009)

Segment	Station	Research duration
n8	Gumi Industrial complex IV	2007 ~ 2009
n9	Gumi Industrial complex	1992 ~ 2009
n10	Waegwan Industrial complex	1992 ~ 2009
n12	Sungseo Industrial complex	1992 ~ 2009
n14	Dalseong Industrial complex	1990 ~ 2009
k28	Daegu Geomdan Industrial complex	1990 ~ 2009
k29	Daegu Industrial complex III	1989 ~ 2009

MOE : Ministry of Environment Republic of Korea

WHO(World Health Organization, 세계보건기구)에서는 이에 대한 음용수 기준을 0.1 ~ 0.5 mg/L로 규정하고 있으며, 국내 기준에서는 0.3 mg/L로 규정하고 있다(이정희 등, 1992; 환경부, 2006, 2009).

#### 용량-반응평가

여가 활동이 활발하게 일어나는 시기인 여름철(5월~8월)을 대상으로, 노출 대상을 낙동강 유역에 거주하여 보다 쉽게 접할 수 있는 지역 주민을 성인과 어린이로 구분하였다. 또한, US EPA의 IRIS(Integrated Risk Information Sys-

tem)에서 제시하고 있는 노출경로에 따른 망간(Mn)의 RfD (Reference Dose)를 참고하였다.

#### 노출평가

본 연구에서는 여가 활동에 따른 물의 섭취(Ingestion)를 주경로로 설정하였으며, 피부 접촉(Dermal contact)은 고려되지 않았다(Table 3).

**Table 3.** Toxicity index of manganese (Mn) at ingestion pathway

	RfD	MF*	UF**	Reference
Mn	$1.4 \times 10^{-1}$ mg/kg·day	1	1	IRIS***, 1996

\* Modifying factor

\*\* Uncertainty/Variability factor

\*\*\* IRIS : Integrated Risk Information System

여가 활동에 따른 대상 물질의 섭취량을 고려하기 위하여, US EPA(1989a)에서 제시한 여가 활동 시 발생 가능한 대상물질의 섭취량 평가식 (1)을 이용하였으며, 평가식에 사용된 노출 인자는 Table 4에 제시하였다.

$$Water\ Ingestion(mg/kg \cdot day) = \frac{CW \times IR \times EF \times ED \times ET}{BW \times AT} \quad (1)$$

**Table 4.** Exposure factor for guidelines

	Factor	Units	Adult	Child	Reference
AT	Average Time	days	9,125	2,190	US EPA, 1989b
BW	Body Weight	kg	62.8	31.9	MOE, 2007
IR	Ingestion Rate (swimming)	L/day	0.2	0.2	WHO, 2008
EF	Exposure Frequency	event/year	4.8	4.8	MOE, 2007
ED	Exposure Duration	years	25	6	MOE, 2007
ET	Exposure Time (swimming)	hr/event	0.885	0.885	MOE, 2007
CW	Chemical Concentration	mg/L	WASP output concentration		US EPA, 1989b

\* MOE : Ministry of Environment Republic of Korea

\*\* US EPA : U.S. Environmental Protection Agency

WHO는 먹는물 수질기준은 레크리에이션 시 발생가능한 물의 섭취와 관련을 가지고 있다고 명시하고 있으며, 그 물의 양은 하루에 마시는 물의 양의 약 10%에 이른다고 제시하고 있다. 또한, WHO에서는 하루에 마시는 평소 물의 양은 하루에 약 2 L로 추정하고 있어, 본 연구에서는 여가 활동 시 발생가능한 물의 섭취량을 200 mL/day로 추정하였다(WHO, 2008).

**위해도 결정**

US EPA(1989a)에서 제시한 발암등급표에 따르면, 본 연구의 대상물질인 망간(Mn)은 위해도 분류가 등급 D로서 인간에게 암을 일으키지 않는 물질로 분류된 물질이다. 따라서, 본 연구에서는 US EPA에서 제시한 비발암 평가만을 실시하였다(식 (2)).

$$Noncancer\ Hazard\ Quotient = \frac{CDI}{RfD} \quad (2)$$

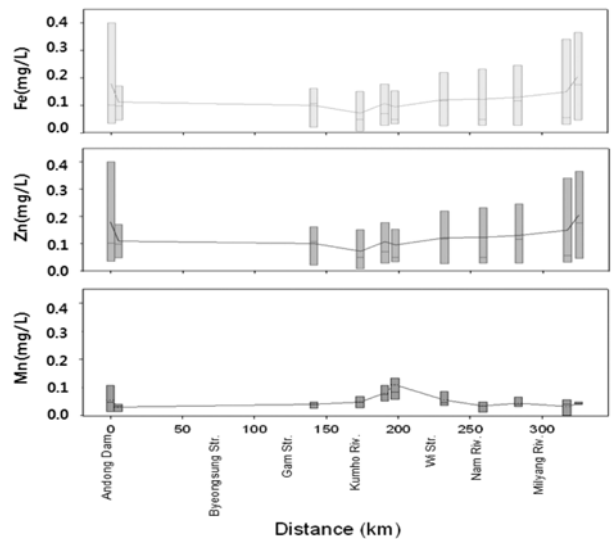
여기서, RfD(Reference Dose, mg/kg-day)는 US EPA의 IRIS에서 제시한 값을 이용하였으며, CDI(Chronic Daily Intake, mg/kg-day)는 식 (1)에서 도출한 값을 이용하였다.

Monte-Carlo analysis는 위해도 산출에 있어서 불확실성에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다(Burmaster and Anderson, 1994). 본 연구에서는 불확실성을 고려한 위해도 결정을 위하여 Monte-Carlo analysis(정규분포, n=10,000)를 이용하였으며, 유의수준 95%에서 위해도 값의 산정이 이루어졌다(Finkel, 1990).

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 낙동강 중금속 수질 현황**

낙동강의 전반적인 오염 정도를 추정하기 위하여, 2004년 1~4회, 2005년 1~4회 측정된 낙동강 유역 수질모니터링자료(환경부, 2006)를 바탕으로 철(Fe), 아연(Zn), 망간(Mn) 농도에 대한 낙동강 상류에서 하류까지 거리별로 도시하였다(Fig. 3). 철과 아연의 경우 대상 중점지역인 금호강과 낙동강 본류의 합류지점에서의 농도가 상류와 하류부분과 유사한 경향이 나타남을 확인하였다. 이는 산업공단에 의한 영향 이외에 다른 외부요인이 존재할 것이라 판단되



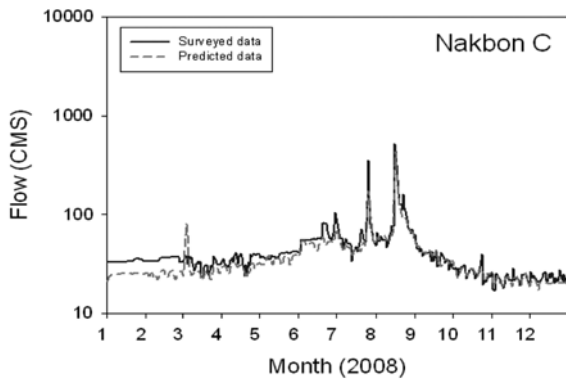
**Fig. 3.** Metal concentrations by distance.

어 본 연구에서는 배제하였다. 망간(Mn)의 경우 대규모 산업시설이 위치한 왜관, 성주, 달성 지역, 그리고 대구시를 통과하는 금호강과 합류된 이후를 중심으로 그 농도가 높아지는 것을 확인하였다. 하류부분으로 갈수록 농도가 낮아지고는 있지만, 상류 수질등급에는 미치지 못하는 수준임을 확인할 수 있었다. 이를 통하여, 공단 및 대도시가 밀집해 있는 중류 지역의 수질이 다른 지역에 비하여 악화된 수준이라 판단할 수 있다. 또한, 여름철 집중 호우 및 태풍의 영향으로 인하여 퇴적물의 물리적 변화가 존재할 경우, 퇴적물이 호기성 상태로 전환되면서 오염의 개연성이 높은 산업공단 지역에서는 중금속 용출이 발생하기 쉽다(황경영 등, 2007). 따라서 이 지역의 망간(Mn)을 대상으로 WASP 모의 및 위해성평가를 실시하였다.

**3.2. WASP 모의**

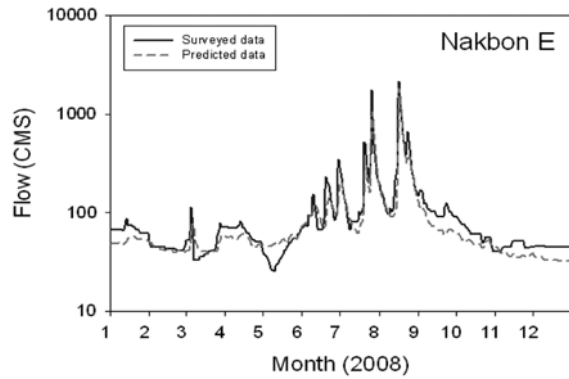
**3.2.1. 유량의 검·보정**

낙동강 본류를 중심으로 수계 유역 단위별로 한국수문조사연보(국토해양부, 2009)를 참고하여 유량의 검·보정(2008년 기준)을 실시하였다. 상류에서 하류로 갈수록 각지천이 합류함에 따라 유량이 증가하였으며, 하류로 갈수록 7월에서 9월 사이의 유량 변동이 눈에 띄게 나타났다. 이는 상류에 위치한 안동댐과 임하댐에서 방류되는 유량에 영향을



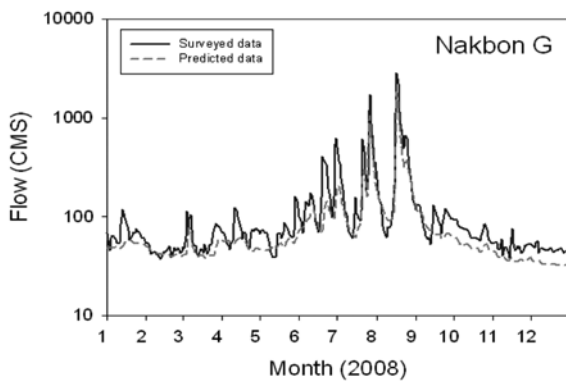
(a) Nakbon C

$R^2 = 0.96$  RMSE = 5.67 EI = 0.96



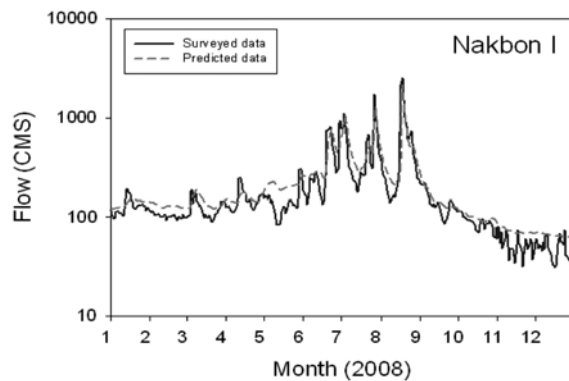
(b) Nakbon E

$R^2 = 0.97$  RMSE = 14.60 EI = 0.96



(c) Nakbon G

$R^2 = 0.93$  RMSE = 22.48 EI = 0.91



(d) Nakbon I

$R^2 = 0.93$  RMSE = 44.99 EI = 0.88

Fig. 4. Water flow calibration.

받았기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 4). Ramanarayanan 등 (1997)에 따르면 모델 예측값의  $R^2$  (the coefficient of determination)와 EI(the Nash-Sutcliffe efficiency index)가 0.5 ~ 0.6보다 큰 경우 유의한 수준이라 제시하였다. 유량의 검·보정 결과,  $R^2$ 는 0.93 ~ 0.97 사이의 값을 가지며, EI는 0.88 ~ 0.96 사이에 위치하여 유의한 수준임을 나타내고 있다. RMSE도 0.015 ~ 0.040 사이의 값을 보이고 있다. 이로부터 모의치가 실측치를 잘 반영하고 있음을 판단할 수 있다.

### 3.2.2. 망간의 검·보정

검·보정이 실시된 구간은 위해성 평가가 이루어질 구간을 중심으로 수질모니터링 자료(환경부, 2006)가 존재하는 지역으로 선정하였다. WASP7.3/TOXI에서 중요시되는 상수와 인자값은 분배계수(Partition coefficient,  $K_D$ (L/kg))로서, 각 매체(media : soil, suspended solid, sediment, DOC)에 따른 분배계수를 입력할 수 있다. Böttcher(1997, 1998)에 따르면, 대상물질(Mn)에 대한 분배계수는 고체입자(solid)인 경우에 1.5 ~ 13.5 (120°C)이며,  $K_D \approx 1$ 을 한계수준으로 언급하고 있다. 따라서 본 연구에서는 토양매체에 따른 분배계수를 한계수준인 1로 검·보정하였다. Table 5는 수질모니터링 자료를 이용한 구미, 고령, 하남, 물금 지

역에서의 독성물질 검·보정 결과이다. 망간(Mn) 농도를 상류부터 하류에 도시한 그래프와 마찬가지로 고령 지역에서 가장 높은 농도(평균 0.067 mg/L)를 나타내었다. 검·보정 결과,  $R^2$ 의 경우 2004년과 2005년 모두 0.64 ~ 0.96 사이에 위치하여 유의한 수준임을 나타내고 있다. RMSE도 0.006 ~ 0.031 수준을 보이고 있어, 비교적 모의치가 실측치를 잘 반영한다고 판단된다.

Table 5. Mn concentration calibration (2004 ~ 2005)

		2004	2005
Gumi	$R^2$	0.642	0.784
	RMSE	0.013	0.016
	EI	0.420	-0.478
Goryeong	$R^2$	0.781	0.871
	RMSE	0.040	0.033
	EI	0.771	0.273
Hanam	$R^2$	0.961	0.931
	RMSE	0.015	0.025
	EI	-1.480	-1.794
Mulkm	$R^2$	0.748	0.749
	RMSE	0.031	0.006
	EI	-1.678	0.892

### 3.3. 위해성 평가

#### 3.3.1. 지역에 따른 위해성 평가

Table 5는 지역에 따른 각 격자 별 유의수준 95%에서 산출한 위해도 값과 평균이다. 대상물질인 망간(Mn)의 레크리에이션에 따른 영향을 평가하기 위하여 망간(Mn)의 먹는물 수질기준(0.3 mg/L : 법제처, 2009)을 한계 기준으로 설정하였다. 이는, 이미 하천으로 유입되어 자정작용이 이루어졌다고 판단되는 상황에서 여가 활동이 이루어지며, 섭취가 일어날 수 있다고 판단하였기 때문이다. 먹는물 수질 기준을 WASP 모의값과 같은 조건에서 위해성 평가를 실시하여 비교를 시도하였다. 그 결과 낙동강 유역에서의 대상물질의 위해도는 먹는물 수질기준 위해성 평가값(성인:  $7.94 \times 10^{-5}$ ; 어린이:  $1.56 \times 10^{-4}$ )에 비하여, 비교적 낮은 수준을 나타내고 있었다(Table 6).

**Table 6.** 95% Chronic hazard index estimates by water ingestion of recreation activities

		Adult	Child
Risk by regions	Andong	95% HI	$4.52 \times 10^{-7}$
		average	$3.02 \times 10^{-7}$
	Gumi	95% HI	$5.25 \times 10^{-7}$
		average	$4.42 \times 10^{-7}$
	Goryeong	95% HI	$1.11 \times 10^{-6}$
		average	$5.59 \times 10^{-7}$
	Hanam	95% HI	$5.70 \times 10^{-7}$
		average	$4.46 \times 10^{-7}$
	Mulkum	95% HI	$5.70 \times 10^{-7}$
		average	$4.46 \times 10^{-7}$
	Drinking water	95% HI	$7.94 \times 10^{-5}$
			$1.56 \times 10^{-4}$

지역적인 영향 비교 시, 고령지역에서 망간(Mn)의 영향이 성인과 어린이 모두에서 가장 높은 수준을 나타내었다. 이는, 금호강 유역에 위치한 공업단지와 구미에서 고령 사이에 위치한 공업단지(낙본 E~G)에 의한 영향으로 판단된다.

#### 3.3.2. 산업공단 방류수 처리효율에 따른 위해성 평가

망간(Mn)에 대한 지역적인 위해도를 비교하였을 때, 상류에서 가장 낮은 수준의 위해도를 나타내었으며, 공업단지가 위치한 지역을 거치면서 위해도가 증가하였다. 하류로 갈수록 위해도가 감소하였지만, 여전히 상류에 비하여 높은 수준을 나타내었다. 이때, 부산지역의 취수장이 위치한 물금(segment n22)에서 상류지역인 안동지역(segment n1)과 유사한 수준까지 위해도를 낮추기 위해 요구되는 추가적인 처리의 정도에 대한 평가를 시도하였다.

점오염원으로 고려된 산업공단(Table 2) 방류수를 추가 처리하여, 망간(Mn) 배출 농도가 각 산업공단 방류수에서 30%, 50%, 70%씩 제거되었다고 가정하였으며, 이에 따른 위해성 평가를 실시하였다(Table 7). 처리율에 따른 위해성 평가 결과, 처리율이 높을수록 위해도는 점차 감소하는 경향을 나타내었으나 방류수의 망간(Mn) 농도를 70% 저감시켰을 경우에도 여전히 안동지역보다 높은 수준이었다. 한

**Table 7.** 95% Chronic hazard index estimates by the reduction rate of wastewater discharge water in Mulkum

		Adult	Child
Chronic Hazard Index	Andong	95%	$4.52 \times 10^{-7}$
		average	$3.02 \times 10^{-7}$
	Mulkum	95%	$5.70 \times 10^{-7}$
		average	$4.46 \times 10^{-7}$
	30% reduction	95%	$5.06 \times 10^{-7}$
		average	$4.13 \times 10^{-7}$
	50% reduction	95%	$4.84 \times 10^{-7}$
		average	$3.96 \times 10^{-7}$
	70% reduction	95%	$4.79 \times 10^{-7}$
		average	$3.81 \times 10^{-7}$
	Drinking water	95%	$7.94 \times 10^{-5}$
			$1.56 \times 10^{-4}$

편, 30% 저감시켰을 때, 성인과 어린이 모두  $10^{-7}$ 수준의 위해도를 나타내는 것으로 평가되었으며, 이는 허용 가능한 수준이다.

## 4. 결론

본 연구는 수계 오염의 사전예방 및 안전성 검토에 대한 방법을 제시하기 위하여 실시되었다. WASP7.3을 이용하여 낙동강 유역을 대상으로 망간(Mn)의 공간적 이동에 따른 농도 변화를 모의한 후, 인체 위해도의 산출 및 불확실성을 고려하여 인체에 대한 안전성을 검토하였다. 이를 통하여 현장조사가 불가능한 지역에서의 중금속 영향력 파악 및 지역에 따른 중금속 증감상징 등의 연구를 수행할 수 있었다. 나아가 모델 모의 결과를 위해성 평가와 연결하여 인체에 대한 안전성을 목적에 따라 평가할 수 있었다.

WASP7.3의 모의 결과 망간(Mn)의 지역에 따른 평균 농도는 0.03 mg/L ~ 0.07 mg/L 사이에 위치하고 있으며, 이는 먹는물 수질기준(0.3 mg/L : 법제처, 2009)보다 낮은 수치이다.

망간(Mn)에 대한 위해성 평가 결과, 낙동강 상류에서 하류로 갈수록 금호강이 유입되는 지점을 기준으로 망간(Mn)에 의한 위해도가 높아졌다가 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 낙동강 중류에 위치한 산업공단과 대도시로부터 유출되는 오염원의 영향에 따른 것으로 판단된다. 먹는물 수질 기준(법제처, 2009)과 모의된 지역별 망간(Mn) 농도의 위해도의 평가 결과, 위해도가 전체 지역에서 먹는물 수질기준에 비하여 낮은 수준으로 판단되었다. 그렇지만 성인과 어린이 모두  $10^{-7}$  수준의 고른 위해도를 지역적으로 갖기 위해서는 낙동강 중류의 점오염원으로 고려된 방류수에 추가적인 처리가 필요한 것으로 평가되었다. 또한, 성인보다 어린이의 경우가 전체 지역에서 민감한 수준의 위해도 값을 나타내고 있으며, 추가적인 수계 안전성 검토 시 어린이를 중심으로 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 평가 방법을 제시하기 위한 목적을 가지고 있어, 우선적으로 단일 항목에 대한 평가를 시도하였다. 그렇

지만 중금속은 자연 상태에서 다양한 물질과 함께 존재하며, 이에 따른 통합독성에 대한 영향이 충분히 고려되지 않았다. 따라서 다음 연구에서는 하천에 유입되는 다양한 중금속에 대한 검토가 필요하며, 이와 함께 추가적인 모니터링 자료가 확보된다면, 하나의 평가 방법으로서 충분한 이용가치를 가질 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 4-5-3)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국가수자원관리종합정보시스템(2009). <http://water.nier.go.kr/>.  
 국토해양부 한강홍수통제소(2009). 한국수문조사연보. 11-150000-000579-10.
- 권명준, 권순국, 홍성구(2003). 농촌유역 하천의 수질예측을 위한 SWAT 모형과 WASP 모형의 연계운영. *한국농공학회지*, **45**(2), pp. 116-125.
- 김두희, 장봉기, 홍성철, 문효정, 이덕희, 오혜주(1993). 폐놀 오염사건 이후의 낙동강수 오염평가. *예방의학회지*, **26**(2), pp. 268-281.
- 김성조, 양환승(1986). 만경강(萬頃江) 유역의 토양 및 수도체중(水稻體中) 중금속 함량. *한국환경농학회지*, **5**(1), pp. 11-23.
- 김성홍(1990). 감조하천에 대한 정상상태 수질모형의 적용. 석사학위논문, 서울대학교.
- 박영진(1996). 농촌유역 소하천에 대한 WASP4의 적용. 석사학위논문, 서울대학교.
- 배준웅, 이상학, 이성호(2001). 금호강 오염의 종합적 조사. *한국분석과학회지*, **15**(1), pp. 54-66.
- 백도현, 하권철, 이주성, 이영길, 김은주, 조혜영, 황윤정, 홍성철, 이용운(2008). 낙동강 중하류의 부영양화평가. *한국도시환경학회지*, **8**(1), pp. 99-106.
- 법제처(2009). 국가법령정보센터 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙.
- 성기준(1993). 하천 수질모형의 비교분석에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교.
- 손나래, 양세정(2008). 주5일 근무제 시행에 따른 가계의 여가 및 여가비 지출 행태 변화에 관한 연구. *상명대학교 사회과학연구소*, **25**, pp. 1-28.
- 송교욱, 김종구, 박청길(1993). 낙동강 수계 수질관리를 위한 모델링(III). *수질보전 한국물환경학회지*, **9**(2), pp. 131-138.
- 오경미, 조순행, 유희찬(1995). 남한강 실측치와의 통계적 비교를 근거로 한 수질 예측모형의 적용성 평가. *한국수질보전학회지*, **11**(4), pp. 311-321.
- 이정희, 문덕환, 이종태, 김성천, 정귀원, 이채연(1992). 낙동강 하류의 중금속 오염도에 관한 조사 연구. *인체의학*, **13**(1), pp. 43-54.
- 이종호(1999). WASP5에 의한 대청호 수질모델링. *환경영향평가*, **8**(1), pp. 93-105.
- 정기호, 김문순, 정중학(1996). 낙동강 하류 유역의 저니토, 토양, 잡초 및 채소 중의 중금속의 분포와 상관관계. *한국환경과학회지*, **5**(6), pp. 801-812.
- 조미영, 황병기, 이상호(2000). 아산권역내 곡교천의 수질분석 및 지리정보체계를 이용한 유역 오염원 관리방안에 관한 연구. *공동체계 학술발표회 논문집*, 한국물환경학회. 대한상하수도학회.한국수도협회, pp. 331-334.
- 조수현(1995). 환경오염에 의한 건강피해 ; 우리나라의 실태와 문제점. *예방의학회지*, **28**(2), pp. 245-258.
- 환경부(2006). 물환경종합평가방법 개발 조사연구(III), 인체 및 수생태계 위해성 평가체계 구축.
- 환경부(2007). 한국노출계수핸드북.
- 환경부(2009). 국가법령정보센터 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙.
- 황경엽, 박성열, 백원석, 정재호, 김영훈, 신원식, 이남주, 황인성(2007). 낙동강 퇴적물 내 중금속 존재 형태 및 용출 가능성. *상하수도학회지*, **21**(1), pp. 113-122.
- 황병기, Lung, W. S. (1998). WASP/EUTRO5 모델링 시스템을 이용한 연안역 개발에 따른 향후 수질예측 및 관리 사례. *수질보전 한국물환경학회지*, **14**(2), pp. 177-186.
- Böttcher, M. E. (1997). The transformation of aragonite to MnXCa(1-X)CO<sub>3</sub> solid-solutions at 20°C: An experimental study. *Marine Chemistry*, **57**, pp. 97-106.
- Böttcher, M. E. (1998). Manganese(II) partitioning during experimental precipitation of rhodochrosite-calcite solid solutions from aqueous solutions. *Marine Chemistry*, **62**, pp. 287-297.
- Burmaster, D. E. and Anderson, P. D. (1994). Principles of good practice for the use of monte carlo techniques in human health and ecological risk assessments. *Risk Analysis*, **14**(4), pp. 477-481.
- Finkel, A. M. (1990). *Confronting uncertainty in risk management*. *Resources for the Future*, Centre for Risk Management, Washington, DC.
- Integrated Risk Information System (IRIS) (1996). [http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showQuickView&substance\\_nmbr=0373#reforal](http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showQuickView&substance_nmbr=0373#reforal).
- Lim, H. S., Lee, J. S., Chon, H. T., and Sager, M. (2008). Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, **96**, pp. 223-230.
- Parvaneh, V. (1979). An investigation on the mercury contamination of Persian Gulf fish. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **23**(1), pp. 357-359.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. *ASAE Paper*, No. 97-2209.
- US EPA (1989a). *Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I, Human Health Evaluation Manual(Part A)*, Washington, D.C. 20450.
- US EPA (1989b). *Exposure Factors Handbook Final Report No, EPA 600/8-89/043*. Office of Health and Environmental Assessment, Washington DC.
- US EPA (2005). *Watershed/Water Quality Technical Support Center WASP7 Course Page, Introduction to the Water Quality Analysis Modeling System*.
- WHO (2008). *Guidelines for Drinking-water Quality*, Third edition, Incorporating the first and second addenda, Volume 1. recommendations. Geneva.