

통계적 모형을 이용한 대기중 망간 농도 예측[†]

권혜지¹ · 김용구²

¹동북지방통계청 · ²경북대학교 통계학과

접수 2016년 1월 11일, 수정 2016년 2월 4일, 게재확정 2016년 3월 2일

요약

최근 국내에서도 환경보건에 관한 관심이 급증하고 있는데, 특히 중금속은 발암의 특성이나 독성의 비임계성에서 대기오염물질과 구분이 되며, 낮은 수준일지라도 장기간 노출되면 호흡기계, 순환기계, 신경계 및 정신적 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이들 중금속 중 망간은 인체에 유해하지만 발암물질로 분류되지 않은 탓에, 망간 자체에 대한 연구는 미비한 편이고, 특히 망간은 자동측정장치(AWS)를 통한 측정이 불가능하고 측정 및 분석에 고난도의 기술이 요구되어서 예산 등 비용효율성의 문제로 지속적인 관측이 불가능하다. 그러한 이유로 우리나라에서는 계절별로 10~12일 정도만 관측이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 자동측정이 가능한 기온, 강수, 풍속 등 기상인자와 관측된 SO₂, PM₁₀, O₃ 등 대기질 물질을 이용한 망간 농도에 대한 통계 모형을 설계하고 이를 통해 부분적으로 관측된 망간 농도를 추정하여 망간의 위해성평가에 대한 정확도를 향상 시키고자 한다. 이를 위해 제안된 모형을 시화·반월 공업지역에서 관측된 자료를 적용하였다.

주요용어: 망간, 비발암위해도, 일반화선형모형, 위해성평가, 중금속.

1. 서론

최근 국내에서도 환경보건에 관한 관심이 급증하고 있는데, 특히 우리나라도 중금속 물질에 의한 공기오염은 심각한 수준으로 예외가 아니다. 이러한 중금속은 발암의 특성이나 독성의 비임계성에서 대기오염물질인 SO₂, NO_x, CO 또는 O₃과 구분이 되며, 낮은 수준일지라도 장기간 노출되면 호흡기계, 순환기계, 신경계 및 정신적 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다 (Kumar과 Jugdutt, 2003; Shah 등, 2006). 국내외에서 대기중 중금속에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔는데, Park 등 (2002)은 서울지역의 중금속 농도가 지역난방을 위해 사용된 화석연료에 유의한 영향을 받는다는 연구결과를 보여주었고, Bae (2002)은 서울 도심과 근교 지역의 중금속 농도를 측정된 결과 그 수준이 미국의 농촌 지역보다 높은 것을 확인하였다. 또 다른 연구에서는 제주도 주변지역에서 조차 중금속 농도가 미국이나 유럽지역보다 높은 수준을 보여줌으로써 육지로 부터 멀리까지 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주었다 (Kim, 2012).

이러한 연구들을 반영하듯, 최근 세계보건기구 (WHO)에서는 대기오염에 따른 건강 피해가 실제보다 크게 저평가 되어 왔으며, 실내외 공기 오염이 원인이 된 질병으로 숨진 사람이 전 세계적으로 700만 명에 이른다고 발표했는데, 이는 세계의 사망자 8명 가운데 1명에 해당하는 수치이다. 사망자를 지역별로 보면, 중국과 한국을 포함한 서태평양권이 288만 5000명으로 전체의 40.9%를 차지하고 있다. 최근 연

[†] 본 논문은 제 1저자인 권혜지의 석사학위 논문 중 일부를 정리한 것임.

¹ (41422) 대구광역시 북구 동암로 64, 동북지방통계청, 서기.

² 교신저자: (41566) 대구광역시 북구 대학로 80, 경북대학교 통계학과, 부교수.

E-mail: kim.1252@knu.ac.kr

구에 따르면 초미세먼지 (PM_{2.5}) 농도가 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아질 때마다 폐암 발생위험이 18%씩 증가하고, 미세먼지(PM₁₀)는 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아질 때마다 폐암 발생위험이 22% 증가한다는 연구결과가 있다 (Lancet, 2013). 이러한 결과들을 토대로, 대기오염물질과 미세먼지는 1급 발암물질로 분류되어 관리되고 있고, 중금속 중 1급 발암물질로 알려진 비소, 벤젠, 석면 등에 대한 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 이에 반해 망간은 인체에 유해하지만 발암물질로 분류되지 않은 탓에, 망간 자체에 대한 연구는 미비한 실정이다.

2010년 유해물질총서에 따르면 망간은 인체 필수원소 중 하나이기는 하지만 과다 노출될 경우 신경계에 손상을 초래하고 폐의 염증 등을 유발한다고 알려져 있다 (ATSDR, 2012). 또한, 저농도의 대기 중 망간 노출이 파킨슨병을 초래한다는 연구 결과도 보고 되어 있다 (Alves, 2009; Finkelstein과 Jerrett, 2007). 최근, 국내의 미세먼지 등에 대한 조사에 따르면, 창원 공단지역의 미세먼지 속 중금속 농도가 철 (Fe), 아연 (Zn), 망간 (Mn) 순으로 나타났으며, 평균 농도가 45 ~ 84 ng/m^3 로 조사되었다 (Lee, 2014). 또한, 우리나라 최대의 공업지역인 시화·반월 공업지역의 미세먼지 속 망간 농도는 시화 산업단지의 경우 평균 137 ng/m^3 이고, 반월 산업단지는 평균 농도 111 ng/m^3 (Jung, 2005)로 WHO 가이드라인 0.15 ng/m^3 에 비해 매우 높은 수치이다. 하지만, 망간의 경우 자동측정장치 (AWS)를 통한 측정이 불가능하고 측정 및 분석에 고난도의 기술이 요구되어서 예산 등 비용효율성의 문제로 지속적인 관측이 불가능하다. 그러한 이유로 우리나라에서는 계절별로 10~12일 정도만 관측이 이루어지고 있다.

최근 들어 보건통계학 분야에서 대기오염물질에 대한 통계적 모형은 보편화되고 있다. 주로 고려되는 모형은 포아송 회귀모형이나 음이항 회귀모형과 같은 일반화 선형이다 (McCullagh와 Nelder, 1989). Bell 등 (2006)은 일일 오존 농도에 대한 일반화 선형모형을 고려하였고, 최근에는 가장 관심을 모으는 대기오염물질인 PM₁₀이나 PM_{2.5}에 대해서도 유사한 접근법이 고려되고 있다. 하지만 망간과 같은 비발암 물질에 대한 통계적 분석이나 모형은 제한적인 편이다. 따라서, 본 논문에서는 자동측정이 가능한 기온, 강수, 풍속 등 기상인자와 관측된 SO₂, PM₁₀, O₃ 등 대기질 물질을 이용한 망간 농도에 대한 통계 모형을 설계하고 이를 통해 부분적으로 관측된 망간 농도를 추정하여 망간의 위해성평가에 대한 정확도를 향상 시키고자 한다. 이를 위해 제안된 모형을 시화·반월 공업지역에서 관측된 자료를 적용하였다.

2. 분석 자료: 대기질, 기후 및 망간 자료

본 연구에서 사용된 대기질, 기후 및 망간 자료는 시화·반월 국가 산업 단지에서 관측된 국립환경과학원 자료인데, 시화·반월 국가 산업단지는 대기오염 물질 배출업체가 2000여 개이고, 8000개 이상의 산업체가 존재하는 우리나라 최대 공업지역 중 하나이다 (Seo, 2010). 이 중 대기질 및 기상 자료는 2005년 7월부터 2006년 6월까지 1년간 네 개 지역 (시화·반월 산업 지역, 시화·반월 주거 지역)에서 측정된 자료인데 (Figure 2.1), SO₂, CO, NO₂ 등 대기질 자료는 국가 대기데이터베이스에서 제공한 자료를 그리고 온도, 바람, 풍속 등 기상인자는 국립 자동기상관측소 (National AWS)에서 제공된 자료를 이용하였다. 그리고 망간 농도의 경우 해당 기간동안 계절별로 12일씩 관측된 48개의 관측 데이터를 이용하였다. 각 지역별 자세한 측정 기간과 대기질 데이터는 Table 2.1에 정리 하였다.

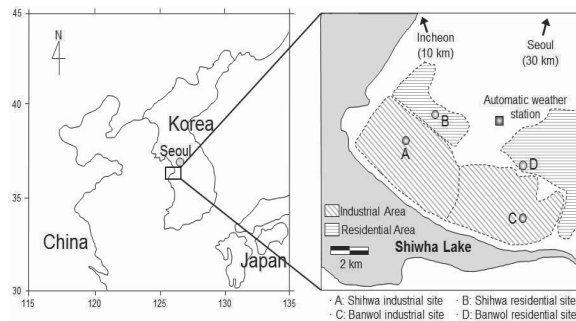


Figure 2.1 Locations of the sampling sites.

Table 2.1 Summary of air quality, meteorological, and Mn data

2005/7/1 ~ 2006/6/29	Shihwa-Industrial	Shihwa-Residential	Banwol-Industrial	Banwol-Residential					
Variable	N	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
SO_2 (ppb)	364	9.5	6.2	10.8	5.2	9.7	5.4	6.5	3.2
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	364	71.7	70.5	90.0	57.4	96.2	76.6	57.3	44.3
O_3 (ppb)	364	20.9	11.5	18.3	9.2	20.8	10.6	17.5	8.7
NO_2 (ppb)	364	29.5	13.2	23.9	10.8	24.4	12.1	30.5	13.2
CO (ppb)	364	621.2	366.9	1013.5	377.8	817.9	546.3	588.4	330.6
Temp ($^{\circ}C$)	364	12.7	10.4	12.7	10.4	12.7	10.4	12.7	10.4
Wind speed (m/s)	364	1.8	0.8	1.8	0.8	1.8	0.8	1.8	0.8
Rain (mm)	364	3.1	10.8	3.1	10.8	3.1	10.8	3.1	10.8
Mn ($\mu g/m^3$)	48	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

3. 통계적 분석

3.1. 망간 농도에 대한 통계 모형

일반적으로 관측이 제한된 중금속 농도 자료에 대해서는 log-normal 분포나 Weibull 분포를 가정하고, 자료에 가장 적합한 분포를 추정한 후, 그 분포에서 생성된 자료를 위해도 평가 등에 활용한다 (Seo, 2010). 모형 추론에 앞서, 시화·반월 공업단지과 주거단지에서 관측된 망간농도 자료가 Weibull 분포에 적합 되는지를 확인해 보았다.

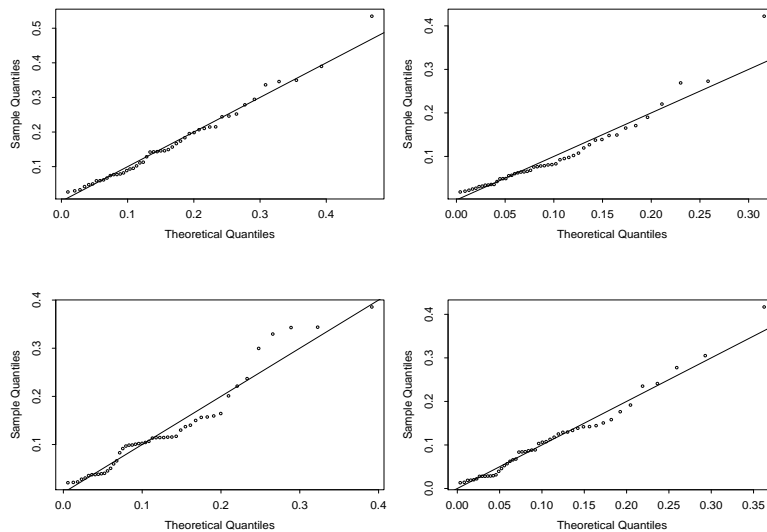


Figure 3.1 Weibull Q-Q plots for observed Mn concentrations at four sites (Shihwa-Industrial, Shihwa-Residential, Banwol-Industrial, Banwol-Residential; clockwise from top left).

Figure 3.1에서 보는 바와 같이 지역에 따라서 그 적합성에 차이가 있으며, 기존의 분포 추정을 통한 방법은 망간농도의 계절성이나 기상 인자 및 대기질 인자에 의한 영향을 고려하는데 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 망간 농도와 기상인자 및 대기질 인자 그리고 계절성과의 관계를 이용한 통계적 확률 모형을 제안하고자 한다. 이를 위해, 다음과 같은 과산화 포아송 회귀모형에 기초한 망간 농도에 대한

모형을 가정하였다 (Kim, 2010; Kim과 Kim, 2012; Kim과 Jung, 2014).

$$E(Y_t^c) = \mu_t^c, \quad Var(Y_t^c) = \phi^c \mu_t^c \quad (3.1)$$

$$\log \mu_t^c = \mu^c + \gamma_1^c C_t + \gamma_2^c S_t + \mathbf{x}_t^{c'} \boldsymbol{\beta}_1^c + \mathbf{z}_t^{c'} \boldsymbol{\beta}_2^c \quad (3.2)$$

여기에서

- Y_t^c 는 지역 c 에서 t 일에 측정된 망간의 농도.
- μ^c 는 c 지역, t 일의 망간의 평균 농도.
- $C_t = \cos(2\pi(t - 181)/365)$, $S_t = \sin(2\pi(t - 181)/365)$.
- \mathbf{x}_t^c 는 c 지역, t 일의 망간 농도에 영향을 미치는 대기질 변수 (SO_2 , PM_{10} , O_3 , NO_2 , CO 등).
- \mathbf{z}_t^c 는 c 지역, t 일의 기상변수 (온도, 풍속, 풍향, 강수량, 이슬점 등).

참고로 γ_1^c 과 γ_2^c 는 각 지역의 망간농도의 주기에 대한 위상을 결정하여 주고 이를 통해 계절적 특성을 설명한다 (Furrer와 Katz, 2007). $\boldsymbol{\beta}_1^c$ 와 $\boldsymbol{\beta}_2^c$ 는 망간 농도에 대한 각 지역별 기상 조건과 대기질 변수의 영향력을 각 각 나타낸다. 그리고 ϕ^c 는 일반화 선형모형에 대한 지역별 산포모수이다.

3.2. 분석 결과

앞에서 제안된 일반화선형모형을 기준으로 통계적으로 가장 유의한 모형을 찾았으며, 최적 모형의 선정 기준은 식별 통계량 AIC (Akaike information criterion)와 BIC (Bayesian information criterion)를 최소로 하는 값을 기준으로 하였다. Table 3.1은 네 개 지역에서 관찰된 망간 농도에 대한 일반화선형모형 (GLM) 적합 결과를 정리한 것이다.

Table 3.1 Estimated coefficient (Coef.) and standard error (SE) values with associated Akaike information criterion (AIC) and Bayesian information criterion (BIC) values for model parameters for four sites.

Covariate category	Shihwa-Industrial		Shihwa-Residential		Banwol-Industrial		Banwol-Residential	
	Coef.	SE	Coef.	SE	Coef.	SE	Coef.	SE
Const.	-3.051	0.167	-2.846	0.227	-2.390	0.133	-2.406	0.160
<i>Cosine</i>	-0.446	0.100	-	-	-	-	0.462	0.186
<i>Sine</i>	-0.296	0.071	-0.153	0.087	-0.220	0.074	-	-
SO_2	-	-	22.599	10.353	-	-	-	-
PM_{10}	0.009	0.001	0.013	0.001	0.006	0.001	0.016	0.002
NO_2	14.085	4.711	-	-	-	-	20.858	7.056
CO	-0.510	0.206	-0.619	0.181	-	-	-1.138	0.255
<i>Temp</i>	-	-	-0.026	0.006	-0.042	0.006	-0.071	0.011
<i>WS</i>	-	-	-0.082	0.043	-	-	-	-
AIC	-172.620		-228.082		-195.390		-211.254	
BIC	-157.650		-213.112		-186.038		-198.156	

그 결과 지역별 모형에서 대부분 계절성 (seasonality) 변수, 대기질 변수 중에서는 PM_{10} , CO 가 그리고 기상변수 중에서는 온도가 주요 변수로 채택되었다. Figure 3.2에서는 네 지점에서의 추정된 망간 농도를 망간 농도 관측값과 함께 보여주었다. 참고로 그림에서 보는 것처럼 대부분 정상적인 망간 농도값을 보여주지만 일부시점에서는 주변값과 상이한 값이 나오는 경우가 있었다. 이러한 값을 가지는 시점에 대한 설명변수를 확인해 본 결과, 일부 설명변수가 관측시점의 설명변수의 범위를 벗어나는 값을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 시점에 대한 추정값에 대해서는 외삽 (extrapolation)의 위험성도 함께 고려되어야 한다 (Kim, 2014).

Table 3.2 Various percentiles of observed and predicted MN concentrations at four sites (Shihwa-Industrial, Shihwa-Residential, Banwol-Industrial, Banwol-Residential).

percentile	Observed Mn concentration($\mu g/m^3$)					Predicted Mn concentration($\mu g/m^3$)				
	80th	90th	95th	98th	99th	80th	90th	95th	98th	99th
Shihwa-Industrial	0.23	0.31	0.35	0.40	0.47	0.19	0.25	0.29	0.41	0.54
Shihwa-Residential	0.14	0.18	0.25	0.28	0.35	0.12	0.15	0.20	0.25	0.38
Banwol-Industrial	0.16	0.26	0.34	0.35	0.37	0.17	0.21	0.25	0.30	0.33
Banwol-Residential	0.14	0.20	0.26	0.31	0.36	0.15	0.20	0.24	0.30	0.35

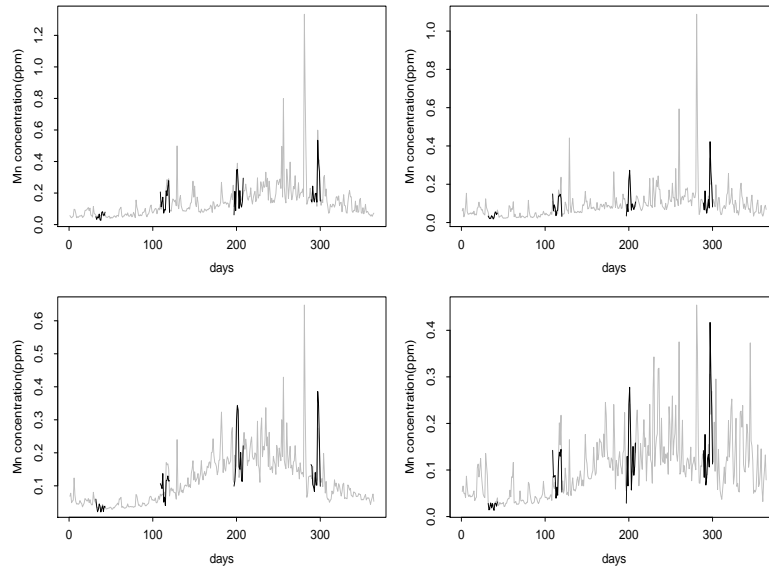


Figure 3.2 Observed (black) and predicted (gray) Mn concentrations for the period 2005-2006 at four sites (Shihwa-Industrial, Shihwa-Residential, Banwol-Industrial, Banwol-Residential; clockwise from top left). It is noticed that day (x-axis) starts since July 2005.

참고로 1년간 추정된 망간 농도 중 고농도에 대한 다양한 백분율은 Table 3.4에서 비교하였다. 망간 농도에 대한 통계 모형에 기초하였을 때, 모형을 통해 추정된 망간 농도가 실제 관측값에 잘 적합된다. 또한 망간 농도는 여름동안 더 적은 변동성을 보여주고, 추정된 망간 농도가 최고치를 나타낸 3월이 실제 측정기간에서 제외되어 있음이 확인 된다. Figure 3.3의 Box plot을 통해 모형에 기초한 망간 농도와 관측된 망간 농도가 지역별로 어떠한 차이를 나타내는지 확인하였다. 전체적으로 관측된 망간 농도보다 모형에 의해 추정된 망간의 농도가 높게 나타나는데, 이것은 계절적 요인과 기상 요인에 대한 영향 때문이다. 따라서 이 모형을 통해 실제 망간 관측 시 망간 농도가 최고로 예상되는 기간을 포함하는 등 망간 농도 측정의 정확성을 높이는 것에 도움이 될 것이다.

관측 망간 데이터 (2005년 7월~2006년 6월)를 이용해 추정한 모형의 적합성 여부를 좀 더 구체적으로 확인하기 위해, 추정된 모형에 2006년 7월부터 2007년 6월 (next period)까지의 망간 농도 데이터를 적용하여 모형 적합성을 확인하였다. 모형을 통해 예측한 값과 2006년 7월부터 2007년 6월의 실제 관측 망간 농도에 대한 비교 결과 여름을 제외한 나머지 계절에서 관측 망간 농도와 비교적 잘 적합 되고 있음이 확인 된다 (Figure 3.4).

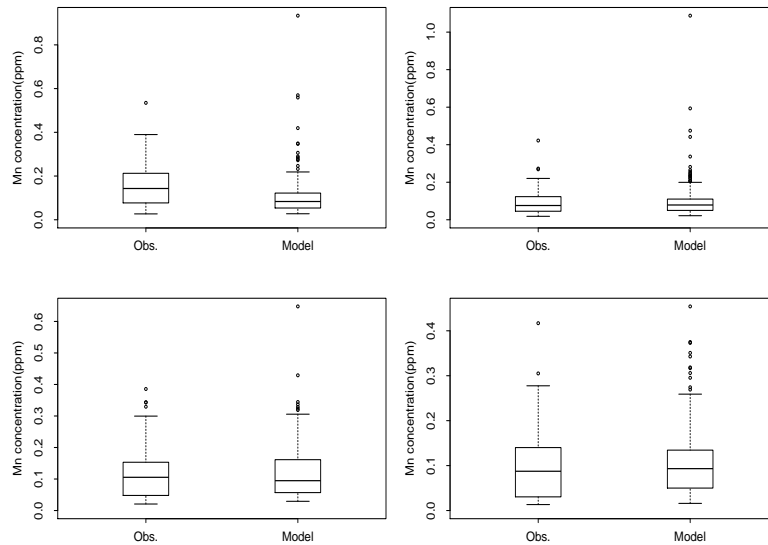


Figure 3.3 Boxplots of observed and predicted Mn concentrations at four sites (Shihwa-Industrial, Shihwa-Residential, Banwol-Industrial, Banwol-Residential; top to bottom).

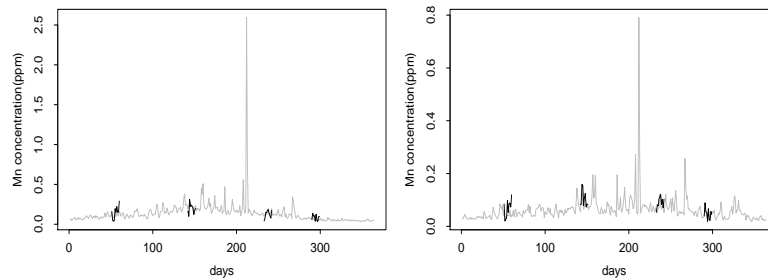


Figure 3.4 Observed (black) and predicted (gray) Mn concentrations for the 2006-2007 period at Shihwa-Industrial (left) and Shihwa-Residential (right). It is noticed that day (x-axis) start since July 2006.

3.3. 비발암 위해도 평가

위해도란 환경 중 유해한 인자의 특정 농도나 특정 용량에 노출 되어진 경우, 개인 또는 집단에 악영향을 줄 수 있는 결과의 발생 확률 또는 가능성을 말한다. 유해인자의 건강에 대한 영향은 발암 또는 비발암으로 구분한다. 발암 영향은 동물 또는 인간에게 암 발생 및 증가를 초래하고, 비발암 영향은 호흡 기관 손상, 신경계 손상, 기형아 출산, 성장 문제 등을 초래한다 (Lee, 2014).

이 논문에서는 비발암물질인 망간의 농도 추정모형을 이용하여, 비발암위해도 평가를 시행한다. 위해도 평가에 앞서 노출 평가가 선행된다. 노출 평가란 대기 및 주변 환경 중 화학물질이 체내 등으로 들어오는 노출 수준을 추정하는 것으로, 평생일일평균 노출량 (Lifetime Average Daily Dose: LADD)은

다음과 같이 산출한다.

$$LADD = \frac{C \times IR \times ED \times EF \times AB}{BW \times AT} \tag{3.3}$$

여기에서 C 는 망간과 같은 유해한 인자의 노출 농도이다. 그리고, Table 3.3의 기준변수들을 이용하여, 호흡 노출 참고치 (RfD)와 평생일일평균 노출량 (LADD)의 비로 비발암위해도 지수 (Hazard Quotient) 를 산출한다. 이때 실제 비발암 위해도는 몬테카를로 방식에 의한다.

Table 3.3 Summary of terms associated with the Hazard Quotient.

terms	unit	variability
Unit Risk (UR)	per $\mu g/m^3$	7.8e-06
Inhalation Rate (IR)	m^3/day	$N(13, 0.9^2)$
Exposure Duration (ED)	years	25
Frequency of Exposure (EF)	days/year	triangle distribution(180,345,365)
Absorption efficiency (AB)	%	100
Body Weight (BW)	kg	$N(62, 8.8^2)$
Averaging Time (AT)	days	70 years = 25,500 days

$$\text{Hazard Quotient} = \frac{LADD}{RfD} \tag{3.4}$$

이렇게 산출된 망간의 비발암 위해도 평가를 위해 실제 관측 망간 농도와 모형을 통해 추정된 망간 농도, 그리고 관측 데이터 중 40개에 대해 Weibull 분포를 가정한 망간 농도의 비발암 위해도를 비교하여 추정값의 실효성을 확인하였다. 시화·반월 산업 및 주거 단지의 3가지 망간 농도에 대한 비발암 위해도 통계량을 요약하였다 (Table 3.4).

Table 3.4 Summary of Hazard Quotient based on observed and predicted Mn concentrations at four sites (Shihwa-Industrial, Shihwa-Residential, Banwol-Industrial, Banwol-Residential).

region	Mn	Min	1st Qu.	Med	Mean	3rd Qu.	Max
Shihwa-Industrial	observed	1.89e-04	8.72e-04	1.58e-03	1.92e-03	2.56e-03	1.04e-02
	modelled	2.77e-04	8.65e-04	1.38e-03	1.72e-03	2.12e-03	2.60e-02
	Weibulled	3.16e-06	9.37e-04	1.65e-03	1.92e-03	2.60e-03	1.13e-02
Shihwa-Residential	observed	1.01e-04	4.95e-04	8.50e-04	1.13e-03	1.41e-03	8.14e-03
	modelled	1.19e-04	5.60e-04	8.90e-04	1.10e-03	1.33e-03	2.10e-02
	Weibulled	3.93e-07	4.87e-04	9.38e-04	1.15e-03	1.57e-03	9.80e-03
Banwol-Industrial	observed	1.41e-04	5.83e-04	1.23e-03	1.46e-03	1.80e-03	7.37e-03
	modelled	2.00e-04	6.41e-04	1.10e-03	1.37e-03	1.88e-03	1.24e-02
	Weibulled	1.15e-06	6.59e-04	1.23e-03	1.47e-03	2.02e-03	1.21e-02
Banwol-Residential	observed	9.09e-05	4.14e-04	1.07e-03	1.29e-03	1.72e-03	1.02e-02
	modelled	1.09e-04	6.05e-04	1.11e-03	1.30e-03	1.70e-03	1.11e-02
	Weibulled	9.67e-07	5.25e-04	1.03e-03	1.30e-03	1.78e-03	1.52e-02

모형화된 망간 농도에 대한 비발암 위해도와 관찰된 망간의 비발암 위해도, 그리고 Weibull 분포에 의한 비발암 위해도의 밀도함수를 비교해 보았다 (Figure 3.5). 모형화된 망간 농도에 기초한 밀도함수는 주어진 환경에서 망간 농도 변수가 비발암위해도와 관련이 있음을 의미한다. 이를 토대로 망간 농도가 높은 지역에 거주하는 사람들에게 위험 상황에 대한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

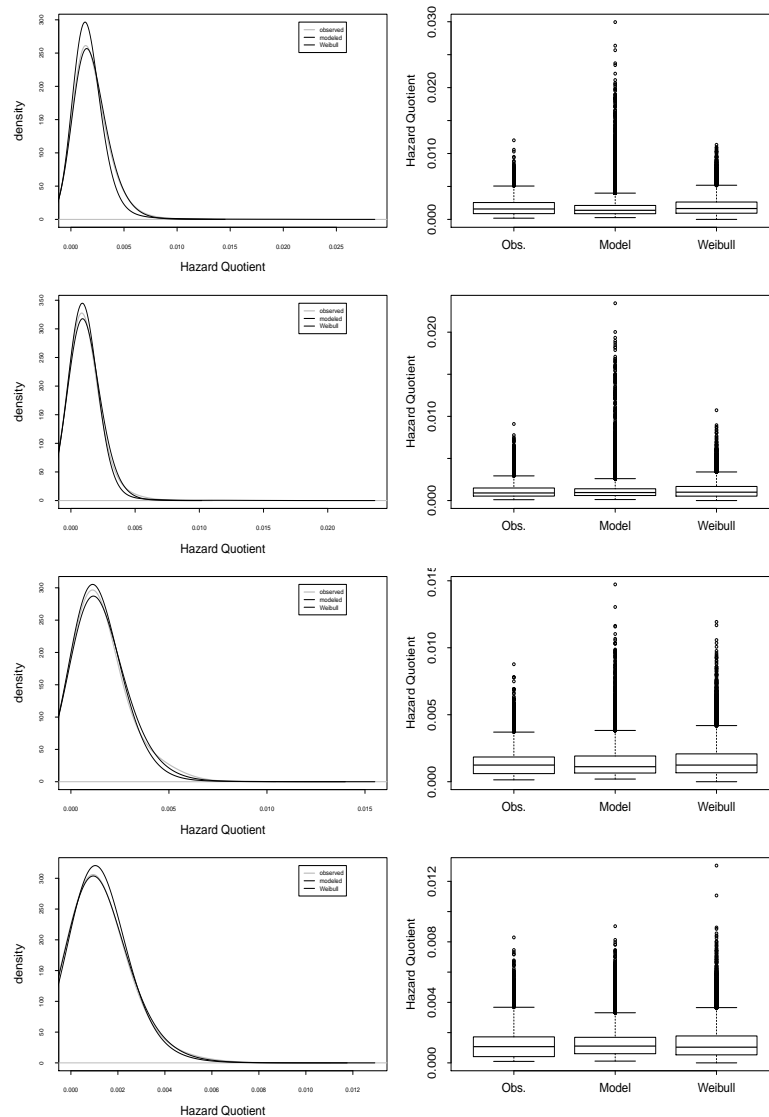


Figure 3.5 Estimated density (left) and boxplots (right) of Hazard Quotient based on observed Mn concentrations (gray) and predicted Mn concentrations (black) at four sites (Shihwa-Industrial, Shihwa-Residential, Banwol-Industrial, Banwol-Residential; top to bottom).

4. 결론

앞서 말한 바와 같이, 우리 나라에서는 망간을 일년 중 48일 관찰한다. 48개의 관측값으로 다른 관측되지 않은 망간의 농도를 추정하기는 매우 어렵다. 하지만 일반선형모형 (GLM) 접근법을 이용하여 효과적인 망간 농도 모델링이 가능하다. 이 논문에서 추정된 모델은 계절성과 기상인자 그리고 대기인자의 영향력을 고려하여 망간 농도를 예측함으로써 모형의 정확도를 높였다. 추정된 모형을 통한 망간 농도는 여름 동안 적은 변동성을 보였고, 3월에 최고 농도를 보여주었다. 이를 기초로, 실제 망간 농도 측

정 시 모형에서 망간 농도가 가장 높은 시즌인 3월을 관측기간에 포함 함으로써, 망간 농도 측정에 더욱 정확한 접근이 가능하다. 그리고, 이렇게 추정된 모형은 몬테카를로 시뮬레이션을 기반으로 비발암위해도에 대한 보다 현실적 평가 역시 가능하게 한다.

References

- Alves, G., Muller, B., Herlofson, K., Hogenesch, I., Telstad, W., Aarsland, D., Tysnes, O. B. and Larsen, J. P. (2009). Incidence of Parkinson's disease in Norway: the Norwegian ParkWest study. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **80**, 851-857.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2012). *Toxicological profile for manganese*, U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, America.
- Bae, S. Y., Yi, S. M. and Kim, Y. P. (2002). Temporal and spatial variations of the particle size distribution of PAHs and their dry deposition fluxes in Korea. *Atmospheric Environment*, **36**, 5491-5500.
- Bell, M. L., Peng, R. D., and Dominici, F. (2006) "The exposure-response curve for ozone and risk of mortality and the adequacy of current ozone regulations", *Environmental Health Perspectives*, **114**, 532-536.
- Finkelstein, M. M. and Jerrett, M. (2007). A study of the relationship between Parkinson's disease and markers of traffic-derived and environmental manganese air pollution in two Canadian cities. *Environmental Research*, **104**, 420-432.
- Furrer, E. M. and Katz, R. W. (2007). Generalized linear modeling approach to stochastic weather generators. *Climate Research*, **34**, 129-144.
- Jung, G. (2005). *A Study on the pollution characteristics of airborne PM10 at the Siwha and Banwall industrial areas*, Master Thesis, Korea Polytechnic University, Gyeonggi-do.
- Jung, G. S., Lee, J. D. and Kim, Y. B. (2013). Associations between airborne Manganese and blood Manganese in the Korean general population according to KNHANES. *Journal of Environmental Science International*, **22**, 1589-1598.
- Kim, J. Y., Lee, J. Y., Choi, S. D., Kim, Y. P. and Ghim, Y. S. (2012). Gaseous and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons at the Gosan background site in East Asia. *Atmospheric Environment*, **49**, 311-319.
- Kim, Y., Seo, Y. K. and Baek, S. O. (2013). A statistical inference for concentrations of benzo[a]pyrene partially measured in the ambient air of an industrial city in Korea. *Atmospheric Environment*, **81**, 92-101.
- Kim, Y. (2010) An analysis of the potential impact of various ozone regulatory standard on mortality. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **22**, 125-136.
- Kim, Y. J. (2014) Analysis of recurrent event data with incomplete observation gaps using piecewise models. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **25**, 1117-1125.
- Kim, Y. and Kim, H. J. (2012). Stochastic precipitation modeling based on Korean historical data. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **23**, 1309-1317.
- Kim, J. Y. and Jung, K. (2014) The research on daily temperature using continuous AR model. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **25**, 155-167.
- Kumar, D. and Jugdutt, B. I. (2003). Apoptosis and oxidants in the heart. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, **142**, 288-297.
- Lee, C. (2014). *Analysis of risk assessment and heavy metals in airborne fine particulate matter in industrial city, Changwon*, Master Thesis, Ulsan University, Ulsan.
- McCullagh, P. and Nelder, J. A. (1989). *Generalized linear models*, Chapman & Hall/CRC, London.
- Park, S. S., Kim, Y. J. and Kang, C. H. (2002). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Seoul, Korea. *Atmospheric Environment*, **36**, 2917-2924.
- Shah, M. H., Shaheen, N., Jaffar, M., Khaliq, A., Tariq, S. R. and Manzoor, S. (2006). Spatial variations in selected metal contents and particle size distribution in an urban and rural atmosphere of Islamabad. *Pakistan Journal of Environmental Management*, **78**, 128-137.
- Seo, Y. K. (2010). *Occurrence and behaviour of hazardous air pollutants in a large industrial area*, Ph. D. Thesis, Yeungnam University, Gyeongbuk.
- Son, G. T. (1998). Statistical methods for analyzing meteorological and environmental data. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, **34**, 497-504.
- Yorifuji, T. and Kashima, S. (2013). Air pollution: Another cause of lung cancer. *The Lancet Oncology*, **14**, 788-789.

A statistical prediction for concentrations of Manganese in the ambient air[†]

Hye Ji Kwon¹ · Yongku Kim²

¹Dongpook Branch, Statistics Korea

²Department of Statistics, Kyungpook National University

Received 11 January 2016, revised 4 February 2016, accepted 2 March 2016

Abstract

Hazardous air pollution caused by heavy metals in the air is at a serious level. Although manganese(Mn), one of the heavy metals, is a non-carcinogenic substance, it has a harmful influence on the human body. It is partially measured because automatic monitoring technologies have not yet be fully established. We introduced a statistical model for the daily concentration of manganese. Incorporating a linkage between Mn and meteorology, the proposed model is formulated in way to identify meteorological effects and to allow for seasonal trends, enabling not only accurate measurement of manganese concentration, but also information about the evaluation on a Hazard Quotient (non-cancer risk).

Keywords: Hazard quotient, hazardous air pollutants, Manganese, risk assessment, statistical prediction.

[†] This paper is based on part of He Ji Kwon's Master thesis.

¹ Administration, Dongpook Branch, Statistics Korea, Daegu 41422, Korea.

² Corresponding author: Associate professor, Department of Statistics, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea. E-mail: kim.1252@knu.ac.kr