

확률론적 모의실험 기법을 이용한 일부 지하철 근무자들의 이산화질소 개인노출 시나리오 분석

손 부 순 · 장 봉 기 · 양 원 호*
순천향대학교 환경보건학과, *서울대학교 보건대학원 환경보건학과
(2000년 11월 26일 접수)

Scenario Analysis of Personal Nitrogen Dioxide Exposure with Monte Carlo Simulation on Subway Station Workers in Seoul

Bu-Soon Son, Bong-Ki Jang and Won-Ho Yang*
Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University
*Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University
(Manuscript received 26 November, 2000)

The personal exposures of nitrogen dioxide(NO_2), microenvironmental levels and daily time activity patterns on Seoul subway station workers were measured from February 10 to March 12, 1999. Personal NO_2 exposure for 24 hours were 29.40 ± 9.75 ppb. NO_2 level of occupational environment were 27.87 ± 7.15 ppb in office, 33.60 ± 8.64 ppb in platform and 50.13 ± 13.04 ppb in outdoor. Personal exposure time of subway station workers was constituted as survey results with 7.94 ± 3.00 hours in office, 2.82 ± 1.63 hours in platform and 1 hours in outdoor. With above results, personal NO_2 exposure distributions on subway station workers in Seoul were estimated with Monte Carlo simulation which uses statistical probabilistic theory on various exposure scenario testing. Some of distributions which did not have any formal patterns were assumed as custom distribution type. Estimated personal occupational NO_2 exposure using time weighted average (TWA) model was 31.29 ± 5.57 ppb, which were under Annual Ambient Standard (50 ppb) of Korea. Though arithmetic means of measured personal NO_2 exposure was lower than that of occupational NO_2 exposure estimated by TWA model, considering probability distribution type simulated, probability distribution of measured personal NO_2 exposures for 24 hours was over ambient standard with 3.23%, which was higher than those of occupational exposure (0.02%). Further research is needed for reducing these 24 hour NO_2 personal excess exposures besides occupational exposure on subway station workers in Seoul.

Key words : Personal exposure, Subway station, Monte Carlo simulation, Human activity pattern

1. 서 론

대기오염과 노약자들의 천식 및 병약자들의 초과 사망에 대한 런던 스모그(smog)의 조사연구이후 전 세계적으로 대기오염으로 인한 건강장해에 관해 많은 연구가 진행되었다^{1,2)}. 이들 대기오염물질 노출에 따른 건강영향에 관해 보고되는 논문들이 다루고 있는 내용으로는 호흡기질환율, 사망률, 이환율 등의 증가에 관한 것이 주류를 이루고 있다^{3,4)}. 이 논문들의 공통된 지적은 환경오염 수준에 따른 역학적 영향을 계량적으로 파악하는 것은 장기적인 환경오염도 관리에 유용하며 그 결과물을 기준치 설정에 필요한 기초자료로 이용될 수 있다는 것이다. 그러나 환경오염물질의 노출수준을 결정하고 역학적 인체반응을 측정하는 것은 이들 자료의 특성상 매우 어렵고 산출된 자료가 불확실성을 내포하고 있기 때문에⁵⁾ 통계

적인 방법을 이용한 추정을 통해 해결하려는 연구들이 시도되고 있다.^{2,6)} 국내에서는 대기오염으로 인한 위해성을 추정하기 위한 모델링 기법으로 미국 EPA에서 권고하고 있는 방법인 다단계 모델을 이용하여 점추정을 주로 하고 있고 최근 들어 확률론적인 방법을 이용하는 사례들이 일부 보고되고 있다.⁷⁾

몬테카를로 모의실험(Monte Carlo simulation)은 가능한 상황을 확률분포로 가정하여 이들 분포를 이루는 자료들이 예측 모델내에서 계산되어 그 결과물 또한 특정 분포로 예측을 하는 기법이다⁸⁾. 위해성 평가와 관련된 연구들에서 위해도 예측시 존재하는 불확실성을 다소나마 해소하기 위하여 위의 방법이 적용되어지고 있는데⁹⁾ 국내에서도 다이옥신, VOCs, PAHs 등의 환경오염물질로 인한 위해성 평가에 있어서 이미 사용되어진 바 있다.¹⁰⁾

그러나 이들 발암 위해도에 기초한 물질들에 대해서는 많은 연구들이 진행되고 있는 반면 실내공기오염에 있어 오히려 그 노출빈도와 기간이 상대적으로 중요한 이산화질소(NO₂)에 대하여¹¹⁻¹³⁾ 확률론적 노출 모의실험을 적용한 연구사례가 부족한 실정이다.^{14,15)}

최근 지하공간에서 체류하는 시간이 점차 증가됨에 따라 지하공간상의 특성상 지하공간 실내공기오염에 따른 위해성에 대한 논의가 계속되고 있다. 지하공간으로 대표적인 지하철 역사의 경우 근무자들이 노출되는 이산화질소를 포함한 여러 가지 실내공기 오염물질들이 역사에 설치된 각종 공조설비의 운영이 적절치 못할 경우 근무자들 뿐만 아니라 지하철 이용 승객들에게도 건강상 악영향을 미칠 우려가 있으므로 그 실태 파악이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 서울시 소재 일부 지하철 노선의 각 역사에서 근무하는 역무원 및 매표원을 대상으로 NO₂의 개인노출 정도를 분석하고, 각 근무공간별 체류시간과 NO₂ 농도를 측정하여 시간가중평균 모델을 적용하였다. 그리고, 측정된 체류시간과 NO₂ 농도의 빈도분포를 이용하여 확률론적 모의실험 방법으로 지하철내 근무자들의 NO₂ 개인 노출량을 추정하고자 하였다.

2. 연구방법

지하철 실내 공기중 NO₂의 지하철내 근무자들에 대한 노출평가를 수행하고자 1999년 2월 10일부터 동년 3월 12일까지 서울시 제2기 지하철인 5호선의 7개 역사(마포, 충정로, 서대문, 광화문, 종로3가, 을지로4가, 동대문운동장)와 7호선의 9개 역사(노원, 중계, 하계, 공릉, 태릉입구, 먹골, 중화, 상봉, 면목)의 승강장, 역무실 및 외기에서 각 역사별로 하루 24시간 동안 이산화질소의 실내공기중 농도와 근무자 개인노출 농도를 측정하였다.

각 지하철 역사에서 이산화질소농도 측정에는 배지모양(badge-type)의 NO₂ 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하였다. 개인노출 측정시 사전에 동의서를 구하고 사용방법과 주의점에 대하여 충분히 주지시킨 후 측정 시작시간을 기록하고 조사자가 역무원의 옷깃에 직접 수동식 시료채취기를 부착시킨 후 승강장, 역무실의 중앙 위치와 외기의 입구 상단부에 동일한 측정기구를 설치하였다.

근무자의 근무형태와 시간별 활동 행태(daily time activity pattern)를 파악하기 위하여 개인노출측정 참가자를 포함한 각 역사별 총 73명의 역무원을 대상으로 근무시간, 근무지 근무형태 및 활동 행태 등을 묻는 설문지를 배포하고 24시간 후 수동식 시료채취기와 함께 수거하고 분석하였다. 수거된 NO₂ 수동식 시료채취기는 밀봉하여 실험실로 옮겨져 분석되었다. NO₂의 화학분석과 정도관리는 여러 논문에 제시된 방법과 동일하게 실시하였다.^{14,15)}

측정조사와 병행하여 실시한 설문조사방법은 자기기입법(personal self-administration)으로써 설문자가 직접 피설문자를 방문하여 설문지를 배포하고 일정 시간이 지난 후 다시 회수하는 self-report 방식을 이용하였다. 조사된 실측치들은 SPSS 통계프로그램에 입력하고 각 변

수들간에 대하여 상관 및 회귀 분석을 실시하였다.

각 연구과정을 통하여 측정된 개인 NO₂ 노출량 측정결과와 각 근무공간에서의 NO₂ 농도 및 근무지 체류시간을 이용한 시간가중치 모델의 예측량과 비교 분석하였다. 그리고, 시간가중치 모델의 각 변수에 분포특성과 평균 및 표준편차를 토대로 상업용 프로그램인 @Risk (Palidate Co.) 소프트웨어를 이용하여 몬테카를로 모의실험을 수행하였다.¹⁶⁾ 역무실과 매표실은 근무패턴에 큰 차이가 없어 동일공간으로 가정하여 역무실로 통일하였다. 모의실험에 적용된 모델은 시간가중평균(time-weighted average, TWA)식을 이용하였다.¹⁷⁾ TWA 모델식은 식 (1)과 같다.

$$TWA = \frac{\sum [Conc_i \times Time_i]}{\sum Time} \quad (1)$$

here, Conc_i : Exposure concentration at *i*th site

Time_i : Exposure time at *i*th site

∑ Time : Total exposure time

몬테카를로 모의실험은 100,000회 반복하였으며, 각 입력 변수들의 분포추정과 동시에 민감도 분석(sensitivity analysis)을 하였다. 모의실험이 끝난 후 추정된 TWA의 분포와 개인노출의 연속적인 빈도분포 추정치를 서로 비교하여 각각의 특성과 차이점을 분석하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

조사대상 역사에서 측정된 NO₂의 결과치를 표 1에 나타내었다.

Table 1. Occupational NO₂ exposure distribution in Seoul subway stations

Location N ^a	Type	Parameter (ppb)	Goodness-of-fit test			
			X ²	p-value	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
Office 16	Normal	27.87 ± 7.15 ^b	0.5000	0.4735	0.1667	0.4625
	Lognormal	26.76 ± 1.36 ^c	5.5000	0.0190	0.2228	1.0244
	Extreme	31.00, 5.25 ^d	1.5000	0.2207	0.0890	0.1355
Platform 13	Normal	33.60 ± 8.64	2.4615	NA ^e	0.2265	0.8286
	Lognormal	32.33 ± 1.34	2.4615	NA	0.2418	1.1520
	Extreme	37.30, 5.71	2.9231	NA	0.2054	0.6087
Outdoor 16	Normal	50.13 ± 13.04	2.5000	0.1138	0.2091	0.8923
	Lognormal	48.77 ± 1.25	1.5000	0.2207	0.1533	0.5442
	Extreme	44.17, 8.41	1.0000	0.3173	0.1479	0.4417
Personal 32	Normal	29.40 ± 9.75	8.2500	0.0828	0.1342	0.6309
	Lognormal	27.97 ± 1.37	6.5000	0.1648	0.1169	0.3738
	Extreme	25.04, 7.45	4.7500	0.3139	0.1147	0.3871

a Number of samples

b Mean ± S.D.

c Geometric Mean ± S.D.

d Mode, Scale

e Not available for insufficient sample size

각 근무공간에서의 NO₂ 측정농도의 평균 및 표준편

차는 역무실 27.87±7.15 ppb, 승강장 33.60±8.64 ppb, 외기 50.13±13.04 ppb 이었으며 이들 측정결과와 분포 특성을 적합도 검정(goodness-of-fit test)한 결과 각각 정규분포(p=0.4795), 비확률분포, 대수정규(log-normal)분포(p=0.2207)하는 것으로 나타났다. 대상 역사에서 근무하는 역무원을 대상으로 24시간 동안 착용하여 측정된 개인 NO₂ 노출량은 기하평균 및 기하표준편차가 27.97±1.37 ppb인 대수정규분포 특성(X²=6.5000, p=0.1648)을 보였다.

근무중 각 근무 공간에서 시간활동 행태를 조사한 결과는 표 2와 같다. 역무실내 체류시간의 산술평균 및 표준편차는 7.94±3.00 시간이었으며 승강장에서는 2.82±1.63 시간으로 2곳 모두 특정확률분포를 가정할 수 없었으며 비확률분포로서 임의분포로 가정할 수 있었다. 근무중 외부에서 체류하는 곳은 식당이 대부분이었고 근무지에서 매우 근접한 곳이었으며 1시간정도 체류한다고 대답한 역무원이 응답자의 96%를 차지하고 있어 단일 값인 1 시간으로 가정할 수 있었다.

Table 2. Occupational daily time activity patterns in Seoul subway stations

Location	N ^a	Type	Parameter (hr)	Goodness-of-fit test			
				X ²	p-value	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
Office	24	Normal	7.94±3.00 ^b	7.2500	0.0266	0.2000	0.5516
		Lognormal	7.37±1.4 ^c	10.5833	0.0050	0.2063	0.6906
		Logistic	7.83, 1.66 ^d	7.2500	0.0266	0.1825	0.5187
Platform	11	Normal	2.82±1.63	0.1818	NA ^e	0.2310	0.6574
		Lognormal	2.22±2.16	3.4545	NA	0.2878	1.0204
		Exponential	0.32 ^f	3.4545	0.0631	0.2564	0.9448
Outdoor	24	Uniform	1	-	-	-	-

a Number of samples

b Mean±Standard Deviation

c Geometric Mean±Standard Deviation

d Mean, Scale

e Rate

f Not available for insufficient sample size

측정된 각 NO₂ 노출농도 변수들의 상관분석결과는 표 3과 같다. 개인노출도 측정 결과의 재현성의 확인을 위해서 각 역사별 역무원 2인에게 동시에 착용토록 하여 조사된 NO₂ 측정결과간에 상관계수(Pearson correlation coefficient)는 0.601로 통계적으로 유의하여(p=0.014) NO₂ 노출 양상이 개인별로 차이가 크지 않은 것으로 조사되었다(그림 1). 승강장과 외기간의 NO₂ 농도간에도 상관계수 0.664로 통계적으로 유의한 상관성을 보였고(p=0.013) 이외의 변수들간에는 통계적으로 유의한 상관성이 없었다. 이 결과는 지하철내 NO₂ 발생원이 없다고 가정할 때, 외기의 NO₂가 환기장치 등을 통하여 직접 승강장으로 유입되었을 것이라 생각된다.

Table 3. Correlations between measured NO₂ levels in Seoul subway stations

		Subject A	Subject B	Office	Platform
Subject B	Pearson correlation	0.601*			
	p-value	0.014			
	No.	16			
Office	Pearson correlation	0.327	0.254		
	p-value	0.216	0.342		
	No.	16	16		
Platform	Pearson correlation	0.065	0.178	0.314	
	p-value	0.834	0.561	0.296	
	No.	13	13	13	
Outdoor	Pearson correlation	0.135	-0.84	0.212	0.664*
	p-value	0.617	0.757	0.432	0.013
	No.	16	16	16	13

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

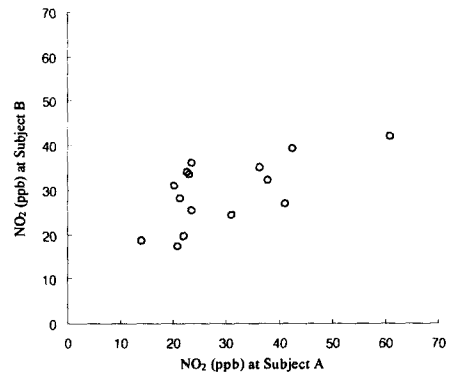
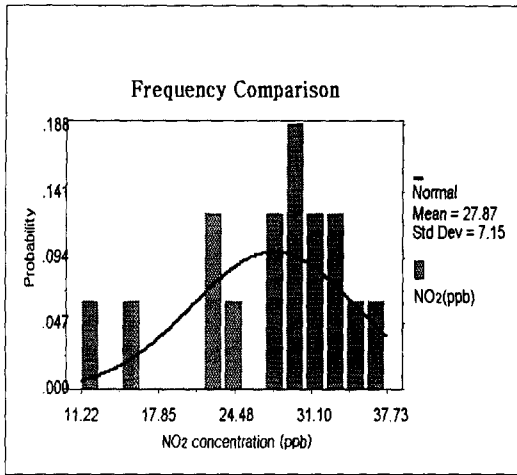
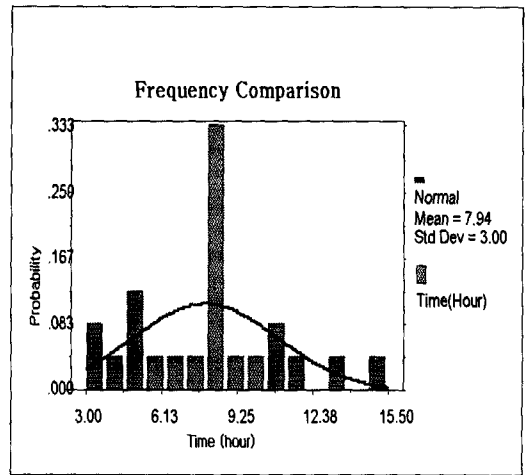


Fig. 1. Ion of occupational NO₂ exposures between subject A and subject B working in the same office. (Pearson correlation coefficient=0.601, p=0.014)

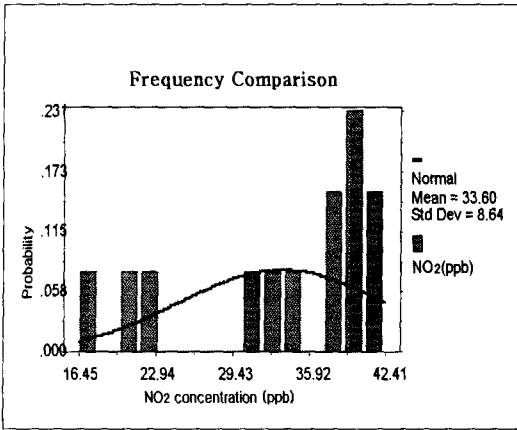
위 NO₂ 측정결과 및 시간활동 행태의 빈도분포(막대 그래프)와 평균·표준편차를 이용하여 모의실험한 결과(선)를 그림 2에 나타내었다. 그리고, 역무실, 승강장, 외기 각 3장소의 NO₂ 농도 및 장소별 체류시간을 식 (1)에 적용하였다. 모의실험을 통해 추정된 지하철 역무원들의 근무중 NO₂의 TWA 분포와 실제 24시간 동안 수동식 시료채취기를 부착하여 분석한 결과에서 추정된 노출분포를 그림 3과 같이 비교하였다. 몬테카를로 방법으로 100,000회 반복 모의실험하여 얻은 TWA의 분포형태는 정규분포였으며, 개인 NO₂ 노출의 평균 및 표준편차 31.29±5.57 ppb이었다. 조사대상자인 역무원들의 하루동안 실측된 NO₂ 개인노출 모의실험의 빈도분포는 대수정규분포를 나타내어, TWA에 의한 모의실험 추정치와 상이한 결과를 보였다. 일반적으로 실내·실외의 공기 오염물질은 대수정규분포를 나타내지만, 본 연구에서는 역무실의 NO₂ 농도가 정규분포를 하기 때문에 TWA에 의한 추정치의 빈도분포에 영향을 주었을 것으로 고려되었다.¹⁶⁾



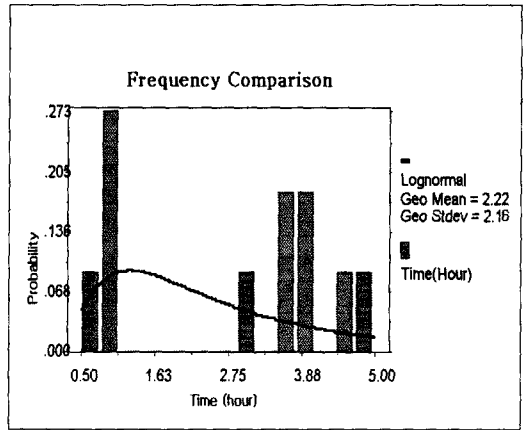
(a) NO₂ (ppb) in office



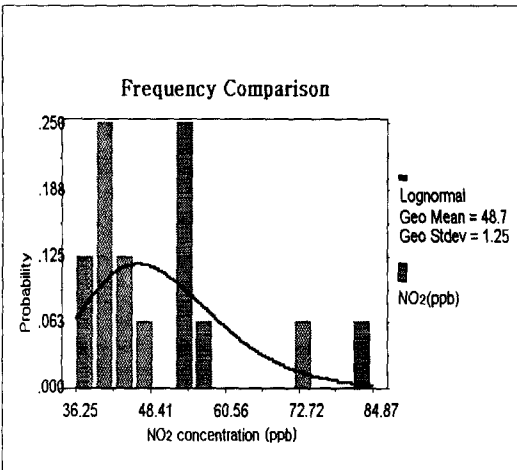
(b) Exposure time (hour) in office



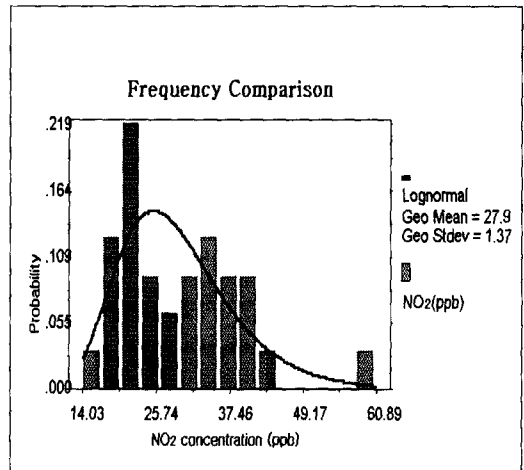
(c) NO₂ (ppb) in platform



(d) Exposure time (hour) in platform



(f) Personal NO₂ exposure (ppb)



(e) NO₂ (ppb) in outdoor

Fig. 2. Frequency distribution of occupational NO₂ levels and times using Monte Carlo simulation.

또한 그림 3의 산술 평균치를 비교하여 볼 때 수동식 시료채취기를 이용하여 실측된 NO₂ 개인노출의 모의실험 값은 29.40±9.76 ppb이며, TWA를 이용한 모의실험의 개인노출 값은 31.29±5.57 ppb로서 두 분포상의 특성이 다르다는 점을 감안하지 않을 경우에는 TWA 노출 추정치가 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 그림 3에서 나타냈듯이 노출특성이 다른 점을 고려하면 정규분포하는 TWA 노출 추정치는 0.02%가 한국의 연간 NO₂ 대기 기준치인 0.05 ppm (50 ppb)을 초과하는 반면 대수정규분포하는 실측 NO₂ 개인노출치는 3.23%가 대기기준치를 초과하여 24시간 실제 개인노출치가 지하철 역사내 근무 중 역무원들이 경험할 노출추정치에 비해 대기기준을 초과할 가능성이 더 높았다. 본 연구에서 실측된 역무원들의 24시간 NO₂ 개인노출은 직장 생활과 직장의 생활, 즉 각자의 가정생활과 출퇴근 시간이 모두 포함된 노출량이기 때문에 근무중 노출특성과는 다른 분포를 나타낸 것이라 생각된다. 따라서, 근무 이외의 생활공간에서의 노출량을 조사하여 전체 NO₂ 노출의 기여도를 산정하기 위한 연구가 필요하며 노출평가에 있어 모의실험을 적용하여 이후 타 실내공기 오염물질에 대해 적용할 필요가 있을 것이다.

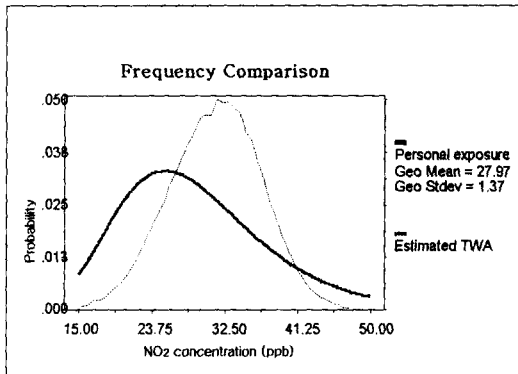


Fig. 3. Comparison between measurements of personal NO₂ exposures for 24 hours and estimations of occupational NO₂ exposure with time weighted average model.

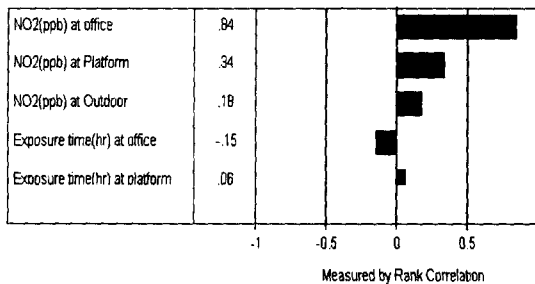


Fig. 4. Sensitivity analysis of estimated occupational NO₂ exposures using time weighted average model.

각 근무공간에서의 노출농도 및 시간이 전체 TWA 분포에 미치는 민감도 분석결과(그림 4), 역무실내의 NO₂ 농도의 순위상관계수(rank correlation coefficient) 값이 0.84로 가장 큰 영향을 미치고 승강장의 NO₂ 농도가 0.34, 외기의 NO₂ 농도가 0.18의 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면 체류시간은 순위상관계수가 역무실 -0.15, 승강장 0.06으로 TWA를 추정하는데 민감한 영향을 주지 않는 것으로 산출되었다. 민감도 분석결과에서는 지하철 역무원과 같이 같은 직종에서 근무시간 중 각 근무공간내의 체류시간이 거의 일정한 경우에 TWA분포에 민감한 영향을 주는 것이 역무실내 NO₂로 분석되었으므로 현재 실내 NO₂는 근무태 즉 각 근무공간내 체류시간을 바꾸어서 관리하기 보다 사무실내 공조시스템을 통한 관리가 더 효율적이라고 볼 수 있다.

본 연구에 이용된 NO₂ 수동식 시료채취기는 NO₂와 관련된 대부분의 연구에서 측정조건에 따라 다소 변이가 있는 것이 단점으로 지적되고 있으나 개인노출 추정에 있어 제일 적용성이 뛰어난 도구이며 많은 개인노출도 측정연구에 이용되고 있으므로 결과에 신빙성이 떨어지지 않을 것으로 생각된다^{14,15}. 위에서 추정된 노출결과는 서울시내 일부 노선의 역사에서 조사된 결과이므로 서울시 지하철 전체 역무원들의 NO₂ 노출에 대한 대표치로서는 한계가 있으나 연구에서 도출된 역사별 근무조건이 유사하다고 본다면 지하철내 역무원들을 대상으로 확률적으로 평가된 기초 참고자료로는 의의가 있을 것이다.

4. 결론

서울시 소재 일부 지하철 노선 근무자를 대상으로 NO₂의 개인노출을 측정하고 확률론적인 방법을 이용하여 평가하였다. 근무자들의 근무양상을 설문지를 통하여 조사한 결과 근무지내 평균 NO₂ 노출 측정치는 각각 역무실내 27.87±7.15 ppb, 승강장 33.60±8.64 ppb, 외기 50.13±13.04 ppb, 24시간 개인노출 29.40±9.75 ppb로 각각 정규분포, 비확률분포, 대수정규분포 및 대수정규분포이었으며, 각 근무공간내 체류시간은 역무실 7.94±3.00 시간, 승강장 2.82±1.63시간, 외부 1시간이었다. 이들 각 노출장소에서의 노출시간 및 노출농도를 고려하여 노출양상을 몬테카를로 모의실험하여 지하철내 역무원들의 근무중 NO₂ 개인 노출에 대한 확률분포를 추정한 결과 지하철 역무원들은 31.29±5.57ppb인 정규분포하며, 현재 대기기준치를 적용하였을 때 대수정규분포하는 24시간 개인노출 측정결과(기하평균 및 표준편차, 27.97±1.37 ppb)의 기준치 초과확률 3.23% 보다 낮은 0.02%가 허용 가능한 총노출 농도를 초과하는 것으로 나타났다. 현재 대기환경 기준치를 적용한 경우 서울시 일부 지하철 역사내 역무원들의 근무중 근무공간내 노출은 24시간 NO₂ 개인노출과 비교했을 때 산술 평균상으로는 더 높게 추정되었으나 노출분포양상을 고려하면 직업적인 노출이 외의 일반 생활환경에서 노출되는 NO₂로 인해 대기기준을 초과할 확률이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 NO₂ 개인노출요인 및 노출량 관리에 있어서 실내·외에서의 노출정도와 노출양상을 종합적으로 고려한 추가적인 연

구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Splengler, J. D. and M. L. Soczek, 1984, Evidence for improved ambient air quality and the need for personal exposure research, *Environ. Sci. Technol.*, 18, 268A-280A.
- 2) Lee, J. T., D. Shin and Y. Chung, 1999, Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan Korea, *Environ. Health Perspect.*, 107(2), 149-154.
- 3) Fairbairn, A. S. and D. D. Reid, 1997, Air pollution and other local factors in respiratory disease, *J. Epidemiol. Community Health*, 51, 216-222.
- 4) 이승준, 1996, 환경오염이 건강에 미치는 영향에 관한 국내 연구의 고찰, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 5) Brand, K. P. and M. J. Small, 1995, Updating uncertainty in and integrated risk assessment: conceptual framework and methods, *Risk Analysis*, 15(6), 719-731.
- 6) Gratt, L. B., 1996, Probabilistic health risk assessment, air toxic risk assessment and management, Van Nostrand Reinhold, 317-339pp.
- 7) 정용, 신동천, 최용욱, 1997, 여천공단지역의 환경오염으로 인한 건강위해성평가, 연세대학교 환경공해연구소.
- 8) Copeland, T. L., D. J. Paustenbach, M. A. Harris and J. Otani, 1993, Comparing the results of a monte carlo analysis with EPA's reasonable maximum exposed individual(RMEI); A case study of a former wood treatment site, *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, 18, 275-312.
- 9) Su, S. H., R. M. Little and N. J. Gudka, 1998, Characterization of uncertainty, risk assessment and indoor air quality, Lewis Publishers, 137-160pp.
- 10) 환경부, 1997, 대기오염물질의 위해성평가 및 관리기술, 환경위해성평가 및 관리기술 제2단계 1차년도 보고서.
- 11) Spengler, J. D., C. P. Duffy, R. Letz, T. W. Tibbltts and B. G. Ferris, 1983, Nitrogen dioxide inside and outside 137 homes and implications for ambient air quality standards and health effects research, *Environ. Sci. Technol.*, 71(3), 164-168.
- 12) Ryan, P. B. and W. E. Lambert, 1991, Personal exposure to indoor air pollution; Indoor air pollution - A health perspective, The Johns Hopkins University Press, 109-127pp.
- 13) Levy, J. I., K. Lee, Y. Yanagisawa, P. Hutchinson and J. D. Spengler, 1998, Determinants of nitrogen dioxide concentrations in indoor ice skating rinks, *Am. J. Public Health*, 88(12), 1781-1786.
- 14) 양원호, 배현주, 김현용, 정문식, 정문호, 2000, Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용한 실내 이산화질소 노출의 분류 오류에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 26(1), 30-35.
- 15) 양원호, 이기영, 백도명, 2000, 실내 및 실외 공기중 이산화질소의 개인 노출량 측정을 위한 수동식 시료 채취기의 성능평가, 한국대기환경학회지, 16(6), 625-631.
- 16) Smith, R. L., 1994, Use of Monte Carlo simulation for human exposure assessment at a Superfund site, *Risk Analysis*, 14(4), 433-439.
- 17) Lee K., W. Yang and N. Bofinger, 2000, Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposure in Australia, *Journal of Air & Waste Management Association*, 50, 1739-1744.