

GIS기반 의사결정지원시스템을 이용한 부산 대기질 측정망의 최적화

Optimization of Air Quality Monitoring Networks in Busan Using a GIS-based Decision Support System

유 은 철^{1)*} · 박 옥 현

¹⁾부산광역시보건환경연구원, 부산대학교 공과대학 환경공학과
(2007년 2월 22일 접수, 2007년 8월 21일 채택)

Eun-Chul Yoo^{1)*} and Ok-Hyun Park

¹⁾*Busan Metropolitan City Institute of Health & Environments,
Department of Environmental Engineering, Pusan National University*

(Received 22 February 2007, accepted 21 August 2007)

Abstract

Since air quality monitoring data sets are important base for developing of air quality management strategies including policy making and policy performance assessment, the environmental protection authorities need to organize and operate monitoring network properly. Air quality monitoring network of Busan, consisting of 18 stations, was allocated under unscientific and irrational principles. Thus the current state of air quality monitoring networks was reassessed the effect and appropriateness of monitoring objectives such as population protection and sources surveillance. In the process of the reassessment, a GIS-based decision support system was constructed and used to simulate air quality over complex terrain and to conduct optimization analysis for air quality monitoring network with multi-objective. The maximization of protection capability for population appears to be the most effective and principal objective among various objectives. The relocation of current monitoring stations through optimization analysis of multi-objective appears to be better than the network building for maximization of population protection capability. The decision support system developed in this study on the basis of GIS-based database appear to be useful for the environmental protection authorities to plan and manage air quality monitoring network over complex terrain.

Key words : Air quality monitoring network, A GIS-based-database, Decision support system, Optimization, Complex terrain

1. 서 론

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-757-6937, E-mail : yooagfe@busan.go.kr

우리나라에서는 1973년 서울 4개 측정소, 1974년 부산 3개 측정소 등 연차적으로 대기오염측정소를

확대 설치운영하여 왔으며 2005년 12월 기준으로 전국에 총 370개소(지자체의 산성강하물측정소 제외) 측정소들이 설치 운영 중에 있다(환경부, 2006). 도시의 대기질을 연속적으로 측정할 결과는 대기오염 정보체계의 운영, 대기오염 방지대책 수립과 평가를 위한 기초자료의 제공, 환경기준 달성여부의 판단 및 대기 예측모델의 보정 자료 제공, 대기오염 배출원의 감시 등 여러 목적으로 활용되고 있다. 그러나 측정소별 측정목적과 측정대상의 규모가 명확히 설정되어 있지 않아서 측정결과와의 해석 및 평가에 어려움이 수반되고 있으며(정장표, 2000), 기존 대기오염측정망의 배치기준은 토지이용형태와 측정 장소의 관리 용이성 등에 근거를 두고 있어 지형 및 기상학적 특성 등을 고려하지 못하는 문제점 등이 지적되어 왔다.

대기오염측정망 재배치를 위해 Munn(1981)은 통계적 배치기법에 의한 기존 측정망의 적합성 평가방법을 제시하였으며 Yu and Chang(2001)은 다변량 통계기법을 이용한 대기질유역(air quality basins)의 설계에 대한 연구를 하여 오존, 미세먼지 등의 농도가 균일한 분포를 이루는 부지역(sub-region)을 분류하였다. 박옥현과 박성용(1998)은 복잡한 지형에서 보전성 대기오염물질의 확산특성 해석을 위해 누적반산산기법(cumulative semivariogram technique)을 적용하였으며 대기오염측정소 위치선정에 있어 유용한 방법으로 Duc *et al.*(2001)은 대기오염물질의 공간적 분포 특성과 기상변화로 인한 대기오염물질의 농도 변동의 예측을 위해 Kriging 방법과 상관장(Correlation field)을 이용한 연구를 시도하였다. Chang and Tseng(1999)은 도시지역에서 새로운 대기질측정소의 위치선정과 기존 대기질측정망의 확충시 새로운 접근방법 등에 대한 연구를 수행한 바 있고 Finzi *et al.*(1991)은 대기오염측정망 설계를 함에 있어서 최적화를 위해 하나의 전산체제인 의사결정지원시스템(DSS, decision support system)을 이용하였다. Kao and Hsieh(2006)은 공업지역에서 대기오염측정망의 시공간적 모니터링 효과를 비교평가하기 위해 의사결정지원시스템을 이용한 다목적 최적화분석을 시도하였다. 국내에서도 기피시설물이기 때문에 상당한 사회적 저항을 받고 있는 쓰레기소각장, 폐기물매립 시설 등의 입지선정 등을 위해 다기준-공간의사결정지원시스템(MC-SDSS)을 이용한 연구들(오규식과 권오걸, 2001; 이희연, 2000)이 있었으며 이들 연

구는 복잡한 산업구조와 다양한 사회집단의 이익을 고려한 공간관련 의사결정을 GIS를 기반으로 전산체제화한 다기준평가기법을 활용하여 보다 객관적이고 과학적으로 후보입지를 선정하기 위한 시도였다. 본 연구에서는 기존 대기오염측정망의 배치 및 운영에 따른 문제점을 보완·개선하기 위한 방법으로 지리정보와 연계하여 인구 및 가구수, 오염농도, 배출량 등의 환경, 사회적 요인 등에 대한 기본적인 데이터베이스를 구축하고 이들 데이터베이스 자료들을 활용하여 부산지역에서 운영중인 측정망의 목적분석을 한 다음 대기오염측정소들의 재배치를 위해 다기준 및 제한요소 등을 고려한 공간의사결정(예: 측정소 후보지 선정)을 위해 확산모델링을 통한 대기질 모의와 모니터링 다목적 최적화의 분석을 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 GIS기반 격자시스템 및 데이터베이스 구축

대기오염에 영향을 미치는 환경적, 사회적, 경제적 요인 등의 자료들을 지리정보와 연계하기 위해 부산 지역의 16개 구군 행정구역을 총 73개의 격자시스템(4 km × 4 km)으로 분할하였으며 각 격자의 지리정보는 TM좌표와 연계시켰다. 적용된 수평방향 및 수직방향 TM좌표 범위는 각각 181~227 및 165~210이었으며 수평 및 수직방향 공간을 각각 34, 45개 격자로 분할하였다. 격자내에 포함되는 요소들은 점배출원, 면배출원, 선배출원을 포함하는 배출원 자료와 모델링 및 실측자료의 내삽(interpolation)을 통한 대기오염농도 등 환경적 요소와 인구수, 가구수 등의 사회적 요소, 현재 운영중인 대기오염측정소 등의 정보를 포함한다. 대기오염농도 자료는 2005년 부산지역 대기오염측정소에서 측정된 1시간평균 SO₂, NO₂, PM₁₀농도의 1년간의 측정자료를 이용하였다. 각 요소들의 지리정보는 행정구역의 기초단위인洞을 바탕으로 부산지도(1:25,000)를 디지털화하여 동별 중심 TM좌표를 추출하였고 이에 근거하여 부산광역시(2005)의 동별 인구, 가구수 자료 등을 그림 1과 같이 격자별로 배분하였다. 부산지역의 격자 데이터베이스는 인구수, 가구수, 대기오염 배출원(점, 선, 면배출원), 오염농도, 그리고 기존 설치운영중인 측정소

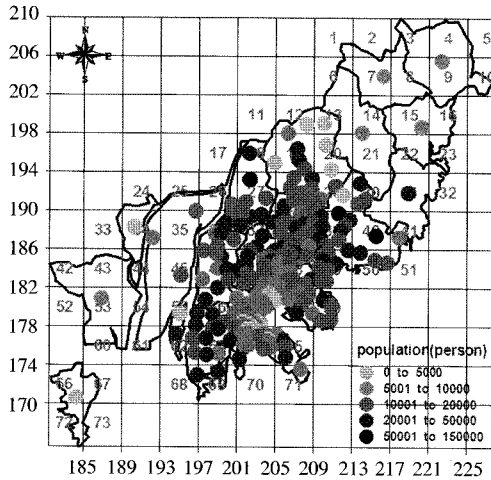


Fig. 1. The system of zonal grid and the distribution of population in Busan, 2005.

유무 등의 자료들을 Excel 파일로 구축하였으며 각 요인의 변화가 있을 때 쉽게 변경 입력할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 오염농도 분포추정, 배출원 및 측정소 등의 지리적 정보를 시각화하기 위해서 ArcView GIS (ESRI, version 3.2), Surface mapping system 인 Surfer (version 8.00, Golden software, Inc.) 프로그램을 이용하였으며, 자료의 통계분석을 위해 통계처리 프로그램인 SYSTAT (version 10.2)를 사용하였다.

2.2 배출원 조사

인구, 가구수 등 각종 통계자료에 대해 지리정보를 연계하기 위해 동별 자료를 기본적으로 이용하였으며 배출량 자료는 2002년 부산광역시 대기환경개선 실천계획수립 보고서에서 게재된 자료를 기초하여 배출원별 TM좌표를 구해 격자별로 배분하였다. 점배출원은 대기오염물질의 배출량이 많은 1~3종 사업장을 대상으로 분류하였으며 배출량이 상대적으로 적은 4~5종 소형사업장은 면배출원 배출량에 포함시켰다. 주택 등의 난방에 관련한 면배출원 배출량은 2005년 부산광역시 통계연보의 부산지역 동별 가구수(동별 세대수/구별 총 세대수×구별 총 가구수)를 부산지역 총 가구수로 나누어 표준화한 상대값을 가격자별로 배분하여 산정했다. 또한, 선배출원 배출량은 부산지도(1:25,000)를 이용하여 부산지역의 주요

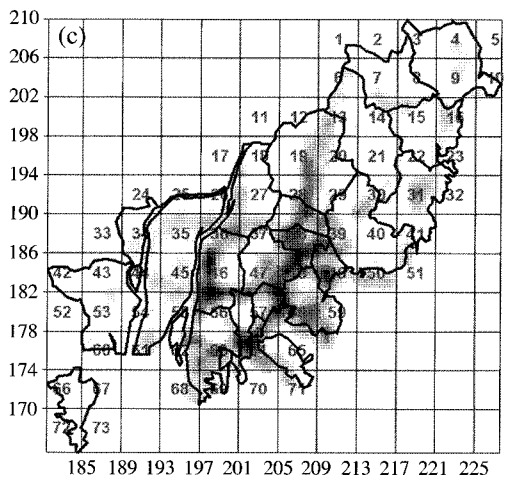
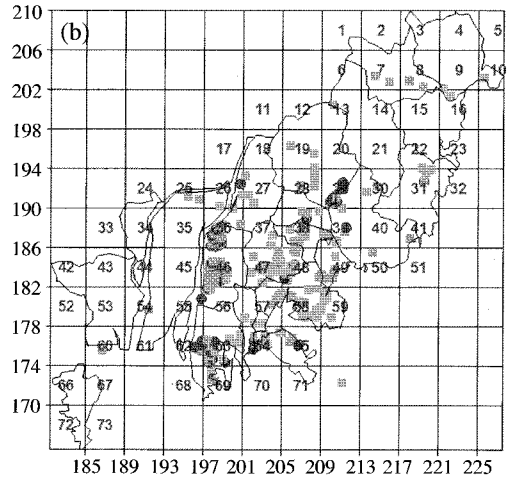
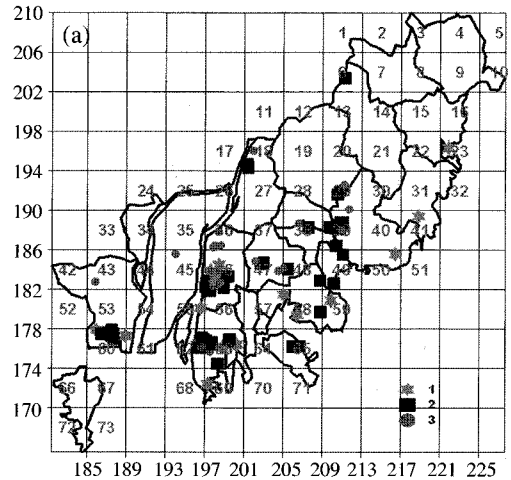


Fig. 2. Distribution of emission source: (a) point; (b) area; (c) line.

간선도로 들을 디지털라이징하여 구한 전체도로의 길이와 면적에 대해 격자내 도로의 상대적인 값으로 변환하여 격자별로 산정하였다. 격자별 점, 선, 면배출원의 분포현황을 그림 2에 각각 나타내었다.

2.3 모의분석

인구보호능력의 최대화, 최고오염농도 검출능력의 최대화 그리고 최다 기준초과빈도 검출능력의 최대화 등 여러 대기오염측정망 운영목적에 적합한 대기오염측정소 위치선정을 위해 필요한 오염물질의 농도 및 빈도분포 등을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서 측정소의 상한치는 기존 2005년 부산지역에서 운영되고 있는 주거지역 9개소, 상업지역 2개소, 녹지지역 2개소, 공업지역 3개소 그리고 도로변측정소 2개소 등 총 18개소로 취하였다. 여기에서는 주거, 상업지역을 일반지역으로 통합분류하고 공업지역, 배경농도지역, 도로변지역 등 4가지로 구분하였다. 목적함수는 인구보호능력의 최대화, 최고농도 검출능력의 최대화, 최다 기준초과빈도 검출능력의 최대화이며 Excel 프로그램을 이용하여 다음의 3가지 목적함수에 대해 최적화분석을 실시하였다.

대기오염으로부터 최대한 많은 시민들을 보호할 수 있는 측정소 배치를 위한 목적함수는 식 (1)과 같다.

$$Z_1 = \sum_j^N (P_j Y_j) \tag{1}$$

P_j 는 측정소가 격자점 j 에 설치되었을 경우 피해를

예방할 수 있는 인구수, Y_j 는 2진수 변량으로 측정소 j 지점을 선택한 경우엔 1, 그렇지 않으면 0이다. N 은 도시지역에서 총 격자수를 나타낸다.

대기오염측정소의 배치를 통한 최고 오염농도를 관측할 수 있는 후보지를 선정하기 위한 목적으로 대기오염경보를 발령할 수준의 한계농도에 도달할 만큼 높은 오염농도가 발생할 가능성이 더 큰 지역에서의 dosage 영향을 반영하는 것으로 이에 대한 함수는 아래 식(2a) 및 (2b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_2 = \sum_{j=1}^N [(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^p \omega_i C_{ijt}) / T] Y_j \text{ for multi pollutants} \tag{2a}$$

$$Z_2 = \sum_{j=1}^N [(\sum_{t=1}^T C_{ijt}) / T] Y_j \text{ for single pollutant} \tag{2b}$$

여기서 C_{ijt} 는 격자 j 에 설치된 측정소에 의해 t 기간에 측정된 오염물질 i 의 농도이며 w_i 는 오염물질 i 와 관련있는 가중치이며 T 는 고려되는 전 샘플링 시간이며 p 는 최적화분석에 고려되는 오염물질의 수이다.

더 많은 기준초과빈도는 해당지역에 더 큰 dosage 영향을 나타냄을 의미하는 것으로 목적함수는 식(3)과 같다.

$$Z_3 = \sum_{j=1}^N (D_{ij} Y_i) \tag{3}$$

여기서 D_{ij} 는 격자점 j 에서 예측 또는 검출되는 i 번째 물질의 기준초과 빈도이고 Y_i 는 2진수 변량(i

Table 1. Weight of each sub-objective for each class of monitoring stations.

Sub-objective	General	Traffic	Background	Industrial
Environmental objective				
Highest concentration	0.15	0.1	0.1	0.1
Average concentration	0.05	0.05	0.05	0.05
Concentration exceeding the standard	0.1	0.05	0.1	0.05
Variation range of concentration	0.05	0.05	0.05	0.05
Total emission quantity	0.1	-	0.2	-
Emission quantity of industrial sources	0.05	-	-	0.25
Emission quantity of mobile sources	-	0.25	-	-
Social objective				
Population	0.2	0.1	0.3	0.15
Sensitive receptor	0.1	-	-	-
Traffic	-	0.2	-	-
Air pollution petition	-	-	-	0.15
Economic objective				
Installing cost	0.2	0.2	0.2	0.2

번째 물질을 선택한 경우엔 1, 다른 경우엔 0)이다.

대기오염측정망 운영에 있어서 3가지 목적을 종합적으로 고려하여 최적의 대기오염측정망 배치방안을 연구하기 위해 인구, 오염농도, 배출량 등의 자료와 더불어 측정소의 분류를 위한 하위목적의 환경적 요인, 사회적 요인 그리고 경제적 요인에 대한 세부적인 사항의 가중치(Chen *et al.*, 2006) 에 관한 표 1을 참고하여 최적화 모델의 결과를 산정하였다.

환경부(2005)의 측정소 설치기준을 참고하여 부산 지역에서 다목적 대기오염측정망의 배치를 위한 최적화 분석시 고려되어야 할 제한요소를 다음과 같이 설정하였다.

- 측정소 수 : 총 18개소(일반 11, 공업 3, 배경농도 2, 도로변 2)
- 보호인구는 일반측정소(주거 및 상업지역)의 경우 10만 명 이상이며, 공업지역이 포함되는 경우에는 인구 10만 명 미만이라도 공업지역 근처 풍하방향의 지역에 설치한다.
- 배경농도지역에서는 보호인구가 2,000명 미만이어야 한다.
- 두 측정소 사이의 거리는 4 km 이상이어야 하고, 동일한 격자내 1개 이상의 측정소 설치는 배제하며 단, 일반 측정소와 도로변측정소의 중복설치는 예외로 한다.
- 도로변측정소의 경우 교통량은 30,000대/day 이상인 곳으로 인구 50만 이상 도시에는 1개소(광역시 급 2개소) 이상 설치한다.

다목적 최적화분석을 위한 모델은 식 (4)와 같다.

$$\text{Max } Z = \sum_i \sum_j \sum_k (W_j \times OB_{ijk}) \quad (4)$$

여기서 W_j 는 하위목적의 가중치이고 OB_{ijk} 는 하위 목적값으로 하첨자 i 는 물질, j 는 격자, k 는 측정소를 나타낸다.

인구보호, 최고오염농도 그리고 최다 기준초과빈도 등의 검출능력 최대화 등 여러 대기오염측정망 운영 목적에 적합한 대기오염측정소 위치선정을 위해 필요한 오염물질의 농도 및 빈도분포 등을 조사할 필요가 있다. 오염물질의 공간적 분포 등을 모의하기 위해서 미국 EPA에서 개발하여 널리 보급되어 사용되는 ISC 모델(US EPA, 1995)을 이용하였으며 입력 자료는 부산지역의 지형(해상도 1 km × 1 km), 2005

년 부산지역의 1년간 기상자료 그리고 점, 면 및 선 배출원의 배출량 자료를 사용하였으며 모델링의 대상 오염물질로서 SO₂, NO₂, PM₁₀ 3종류를 취하여 각각의 최고 및 평균농도, 기준초과빈도 등을 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 농도모의 결과

ISC 모델은 비반응성 물질을 대상으로 매시간 풍향과 풍속이 준정상 상태(pseudo-steady state)임을 가정하고 개발되었으나 수용점(receptor)의 지형자료로서 착지지점의 고도만을 고려함으로써 지형의 특성을 충분히 반영하지 못하고 원래 광화학반응을 고려하여야 하는 반응성 물질에 대한 영향을 예측할 수 없는 한계를 가지고 있었으나 ISC 모델의 CO POLLUTID에 2차오염 에어로졸을 상당히 포함할 수 있는 PM₁₀을 지정할 경우 24시간 혹은 연평균 PM₁₀농도 예측이 가능하도록 개정 보완되어 많은 연구(전상기 등, 2003; 정상진, 2003)에서 이 모델을 적용하여 PM₁₀을 예측한 바 있다. ISC 모델을 이용해서 구한 2005년도 부산지역 연평균 SO₂, NO₂, PM₁₀의 예측농도와 실측농도의 상관성은 표 2와 같다. 모델링 결과, SO₂, NO₂의 상관계수는 각각 0.39, 0.20으로 낮은 상관성을 보여 예측값과 실측값의 차이가 있음을 보인 반면에 PM₁₀의 상관계수는 0.57로 SO₂, NO₂보다 실측치를 다소 잘 예측하는 것으로 나타났다.

입력자료 등의 불확실성 및 모델의 성능한계 등으로 모델링의 예측값과 실측값의 차이가 많이 있지만 모델구조가 단순하고 운용비용이 적게 소요되는 등의 이점과 ADMS 모델보다는 예측성능이 우월하다

Table 2. Correlation coefficients (r) between measured and predicted concentrations of SO₂, NO₂ and PM₁₀ in Busan (n=50).

		Predicted		
		SO ₂	NO ₂	PM ₁₀
Measured	SO ₂	0.39		
	NO ₂		0.20	
	PM ₁₀			0.57

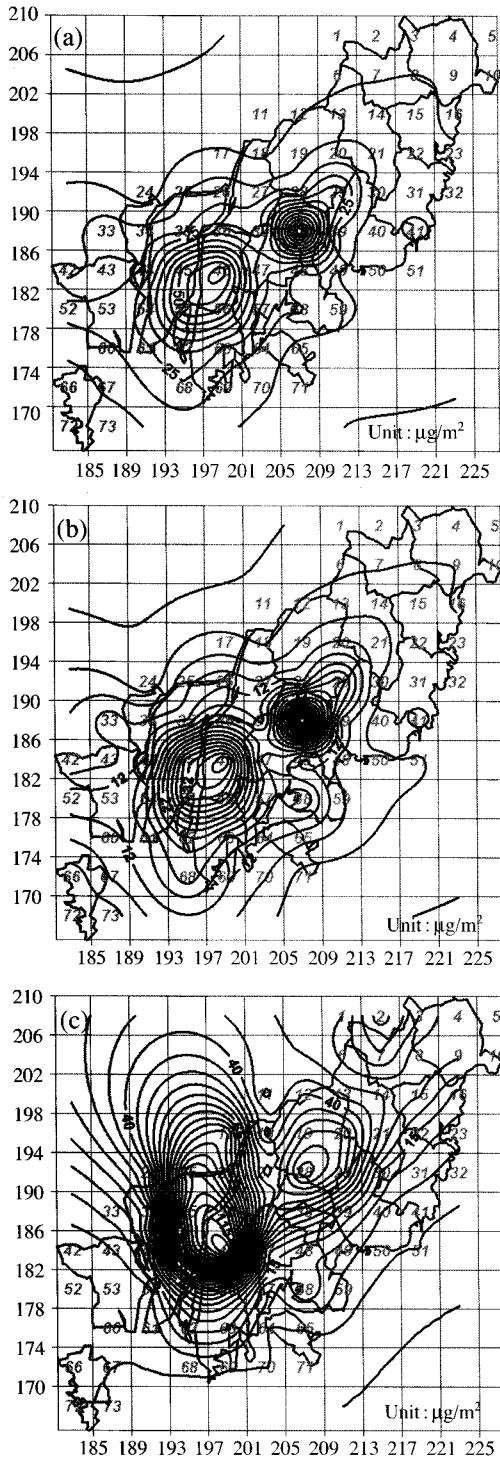


Fig. 3. Isopleth maps of (a) SO_2 (b) NO_2 and (c) PM_{10} , obtained by using ISC model.

는 보고(Park *et al.*, 2007)를 참고하여 이 연구에서는 부산의 복잡지형에 ISC모델을 적용하였다. ISC 모델을 이용해서 구한 2005년도 부산지역 연평균 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 오염농도 분포를 그림 3에 나타내었다. 모델링으로 구한 SO_2 , NO_2 오염농도의 공간적 분포를 살펴보면 도심지역(격자 38)과 공장 등의 사업장이 밀집해 있는 공업지역(격자 46, 63)이 높게 나타난다. 반면에 PM_{10} 은 도심지역보다는 공장밀집지역(격자 46)과 더불어 대형 공사장 등이 많은 지역이 높은 분포를 보였다.

3.2 최적화분석

3.2.1 인구 보호능력 최대화

인구보호 능력을 최대화하기 위한 목적으로 자동차의 통행량에 따른 영향을 받는 도로변측정소를 제외한 측정소 상한치 16개소에 대해 최적화 분석을 수행한 결과를 표 3과 그림 4에 나타내었다. 분석결과 기존 측정소 배치와 10개의 격자가 동일한 분포를 나타내었으나 6개 격자는 다르게 나타났는데 이는 측정소 배치의 목적함수의 변수로 인구보호 능력의 최대화를 위해 인구수만 고려함에 크게 기인한 것으로 보인다. 그림 4에서 보듯이 기존 측정망의 배치는 부산전체 지역에 걸쳐 널리 배치되어 있는 반면에 인구보호능력의 최대화 목적을 위해 최적화 분석된 측정소의 배치는 인구밀도가 높은 부산지역을 중심으로 밀집되어 나타났다.

최대 인구보호를 위한 목적으로 측정소(16개소) 배치를 위해 최적화분석을 한 결과, 측정소가 설치될 대체 격자내 인구수, 배출원 점유정도 등에 대한 특성을 표 4에 나타내었다. 최대 인구보호를 위한 최적화 분석에 따른 측정소 배치시 인구수는 기존 측정소 배치때 보다 약 80만 명이 더 많은 약 300만 명 정도의 인구를 보호할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 해당 격자에 배치될 측정소가 그 격자내의 거주자 모두를 보호할 수 있다는 가정에 기초한다. 또한, 최적화 분석한 결과에 따른 격자내 점, 선, 면배출원 전체 배출원이 차지하는 정도가 2.56으로 기존 배치의 2.73보다 낮았으나 배출원별로 살펴보면 최적화 분석 결과 선택된 격자의 면배출원(주택)과 선배출원이 각각 0.77, 0.53으로 기존의 배치보다 높게 나타난 반면에 점배출원과 소형점배출원은 각각 0.64,

Table 3. An alternative monitoring network for maximizing the protection capability for population.

	Alternative grids	Total no. of stations
Alternative network (except for stations along road)	27, 28, 36, 37, 38, 39, 40, 46, 47, 48, 49, 56, 57, 58, 63, 64	16
Current network	7, 22, 27, 28, 35, 38, 39, 46, 48, 49, 50, 58, 60, 63, 64, 65	

*Maximum number of monitoring stations is 16.

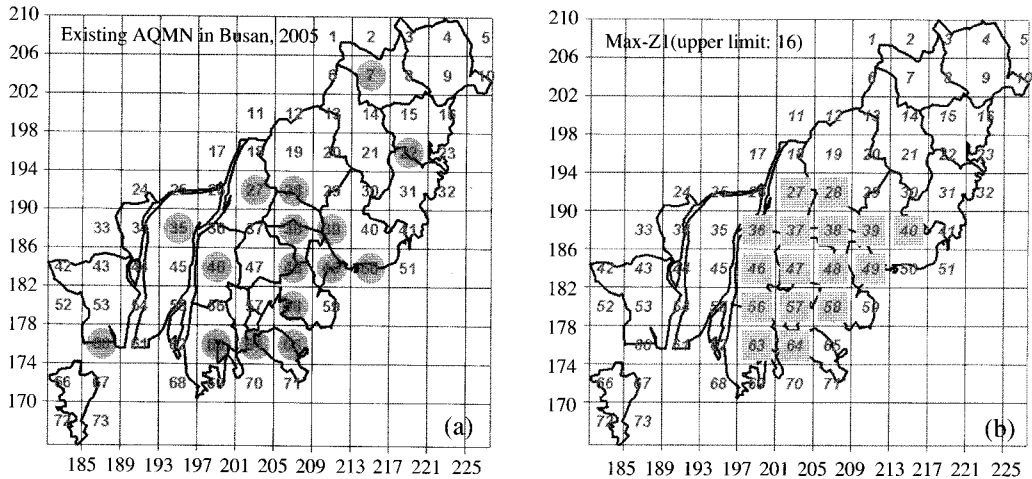


Fig. 4. The alternative monitoring network (b) for maximizing protection capability for population using the same number of stations as the current monitoring network (a).

Table 4. Comparison of population and source fraction between alternative and current network.

Network	Population ¹⁾ (person)	Point source ²⁾ (fraction)	Area source ³⁾ (fraction)		Line source (roads) ⁴⁾ (fraction)	Sum of emission (fraction)
			House	Small source		
Alternative	3,007,049	0.64	0.77	0.62	0.53	2.56
Current	2,200,834	0.82	0.56	0.88	0.47	2.73

¹⁾ Population in the selected grids

^{2), 3), 4)} Emission fraction of each source to total emission in the selected grid

0.62로 최적화 분석결과가 기존의 배치보다 낮게 나타났다. 이는 인구보호를 최대화하기 위한 목적으로 측정소를 배치함으로써 격자내 거주 인구수가 면배출원(주택) 및 선배출원과 상관성을 갖게 됨을 시사한다.

3. 2. 2 최고오염농도 검출능력 최대화

부산지역 대기오염측정망의 오염물질별 검출능력 최대화를 위해 상기 식 (2a) 및 (2b)의 함수를 적용하여 SO₂, NO₂, PM₁₀ 각 단일 오염물질만을 고려한 경

Table 5. Alternative grids for maximizing the detection capability of highest pollution concentration.

Pollutant	Alternative grids
NO ₂	29, 36, 37, 38, 45, 46, 47, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 68
SO ₂	29, 36, 37, 38, 45, 46, 47, 53, 54, 55, 56, 57, 61, 62, 63, 68
PM ₁₀	38, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 62, 68, 69
SO ₂ , NO ₂ & PM ₁₀	29, 34, 35, 36, 38, 39, 45, 46, 47, 54, 55, 56, 57, 58, 62, 68
Current network	7, 22, 27, 28, 35, 38, 39, 46, 48, 49, 50, 58, 60, 63, 64, 65

*Maximum number of monitoring stations is 16.

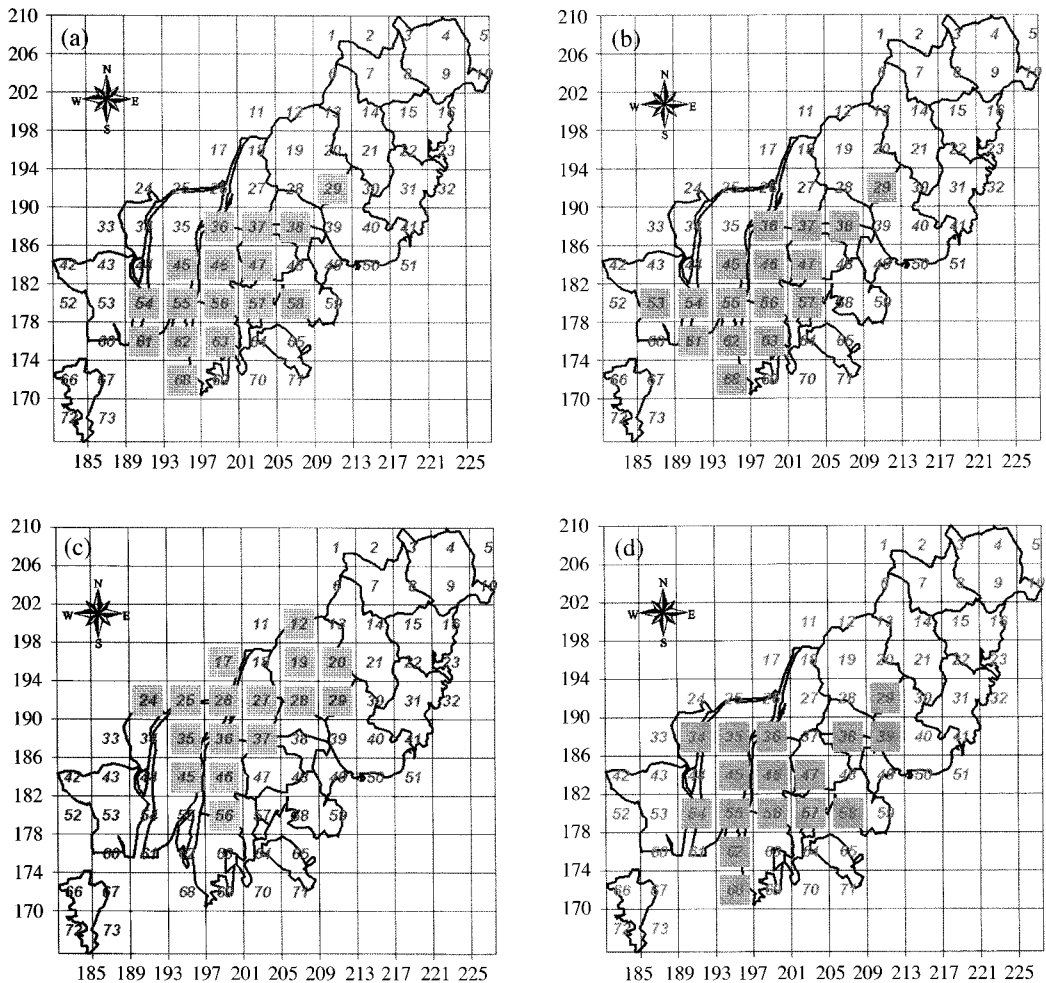


Fig. 5. The alternative grids for maximizing the detection capability of highest concentration of (a) NO_2 , (b) SO_2 , (c) PM_{10} , and (d) multi-pollutants.

우와 3가지 오염물질 전부를 고려했을 경우에 대해 측정소 상한치 16개소를 배치하는 방법에 대해 각각 검토하였다. ISC 모델을 이용하여 각 receptor에서 모의된 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 의 최고오염도를 격자별로 배분하였으며 오염물질별 검출능력을 최대화할 수 있는 최적화분석 결과 측정소 후보입지로 선택된 격자는 표 5와 같다.

그림 5는 부산지역에서 ISC 모델을 이용하여 SO_2 (1 hr), NO_2 (1 hr) 그리고 PM_{10} (24 hr) 3가지 오염물질에 대한 최고농도를 모의한 결과를 근거로 하여 부산지역에서 오염물질의 검출능력을 최대화 할 수 있

는 최적화분석 결과 선택된 측정소 입지후보 격자를 나타낸 것이다. 가스상 오염물질인 SO_2 , NO_2 는 1개 격자를 제외하고는 모든 격자들이 일치하는 결과를 보인 반면에, PM_{10} 은 SO_2 , NO_2 의 측정소 입지후보와는 상이한 결과를 보였다. SO_2 , NO_2 , PM_{10} 의 3가지 오염물질을 동시에 고려하여 최고오염농도를 검출할 수 있는 측정소 입지후보지를 검토한 결과 도심지역 으로부터 서쪽으로 측정소의 배치가 필요한 것으로 나타났다. 가스상 오염물질인 SO_2 , NO_2 의 최고농도를 검출할 수 있는 측정소 입지후보지역으로는 사업장이 밀집해 있는 곳과 도심지역이 선정되었으나 입

Table 6. Alternative grids for maximizing the detection capability of highest violation frequency.

Pollutant	Alternative grids
SO ₂ (≥0.15 ppm/hr)	29, 38, 45, 46
NO ₂ (≥0.15 ppm/hr)	29, 38, 45, 46, 54, 55, 56, 58, 61, 62
PM ₁₀ (≥100 µg/m ³ /24 hr)	38, 45, 46, 47, 48, 54, 56, 57, 62, 69

자상 물질인 PM₁₀의 최고농도 검출지역은 사업장 밀집지역 및 도심지역보다는 부산의 북서쪽지역으로 다소 편중되어 나타났다.

3. 2. 3 최다 기준초과빈도의 검출능력 최대화

ISC모델을 이용하여 부산지역 SO₂ (1 hr), NO₂ (1 hr) 그리고 PM₁₀ (24 hr)에 대한 대기환경기준 초과빈도가 높은 지역을 모의한 결과, 표 6은 오염물질별 기준초과 빈도가 높게 예측된 지역에 근접한 격자들을 나타내었으며 그림 6은 ISC모델에서 예측된 대기환경기준 초과빈도가 높은 지역을 나타내었다.

SO₂, NO₂ 그리고 PM₁₀의 대기환경기준을 초과하는 지역을 살펴보면, SO₂, NO₂는 차량통행량이 많은 도심지역에 위치한 지역(격자 29, 38)과 공장 등이 밀집한 지역(격자 46)을 중심으로 높은 빈도를 보였으며 NO₂의 대기환경기준을 초과하는 지역이 SO₂보다 상대적으로 더 넓은 분포를 나타냈다. PM₁₀의 대기환경기준 초과빈도 역시 차량통행량이 많은 도심지역에 해당하는 지역(격자 38, 47, 48, 57)과 함께 공장 등이 밀집한 지역에 해당하는 지역(격자 46) 등 넓은 지역에서 나타났다.

3. 2. 4 다목적 대기오염측정망의 최적화 분석

앞에서는 인구보호능력의 최대화, 최고농도 검출능력의 최대화 그리고 최다 기준초과빈도 검출능력의 최대화라는 각각의 다른 목적을 달성하기 위해 기존 측정망의 배치방안을 검토하였으며 그 결과는 설정한 목적에 따라 각각 다른 배치를 나타내었다. 대기오염측정소의 3가지 목적함수를 동시에 만족하면서 그 값들이 최대값을 가지는 경우에 선택된 격자들에 측정소를 배치함으로써 부산지역의 대기오염측정망의 운영에 따른 효과를 최대화할 수 있을 것이다. 우선 기존의 토지용도 구분에 따라 분류된 주거, 상업, 공업, 배경지역 그리고 도로변측정소를 일반지역(주거+상업지역), 배경지역, 공업지역 그리고 도로변측정소로 구분하였으며 기존 측정소의 수, 대기오염측

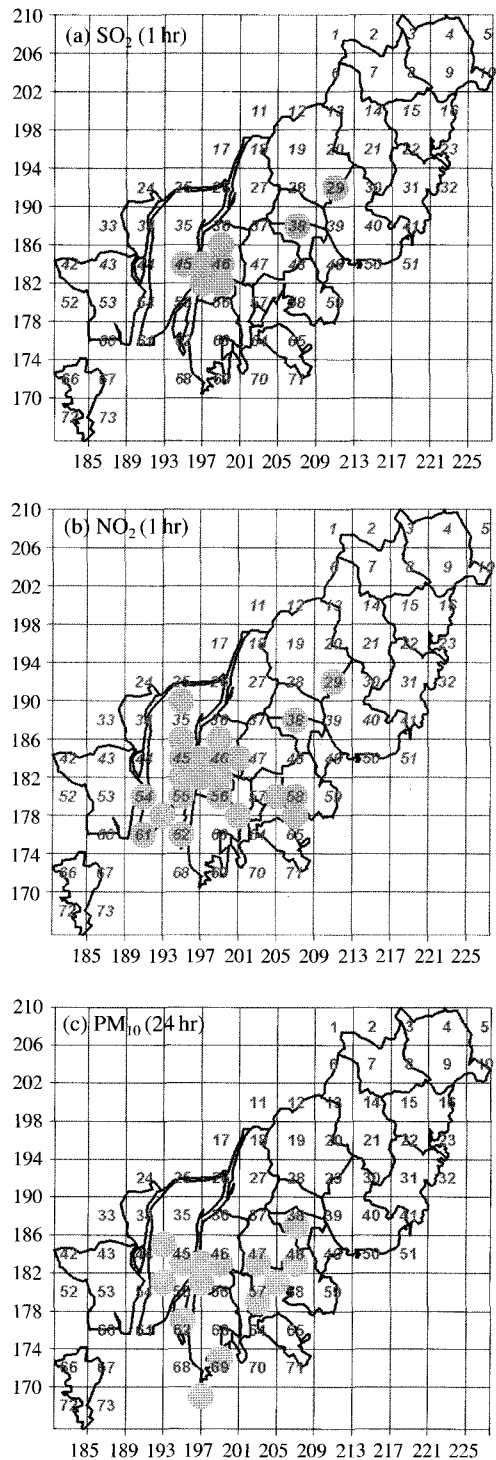


Fig. 6. Distribution of violation for (a) SO₂ (1 hr), (b) NO₂ (1 hr) and (c) PM₁₀ (24 hr) standard.

Table 7. Classification of monitoring station for multiple objective optimization model.

Classification of station	Current grids	Alternative grids	No. of stations
General	7, 22, 27, 28, 38, 39, 48, 49, 50, 58, 64	28, 38, 39, 47, 48, 49, 56, 57, 58, 64, 65	11
Traffic	38, 57	38, 58	2
Background	35, 65	5, 73	2
Industrial	46, 60, 63	46, 60, 63	3

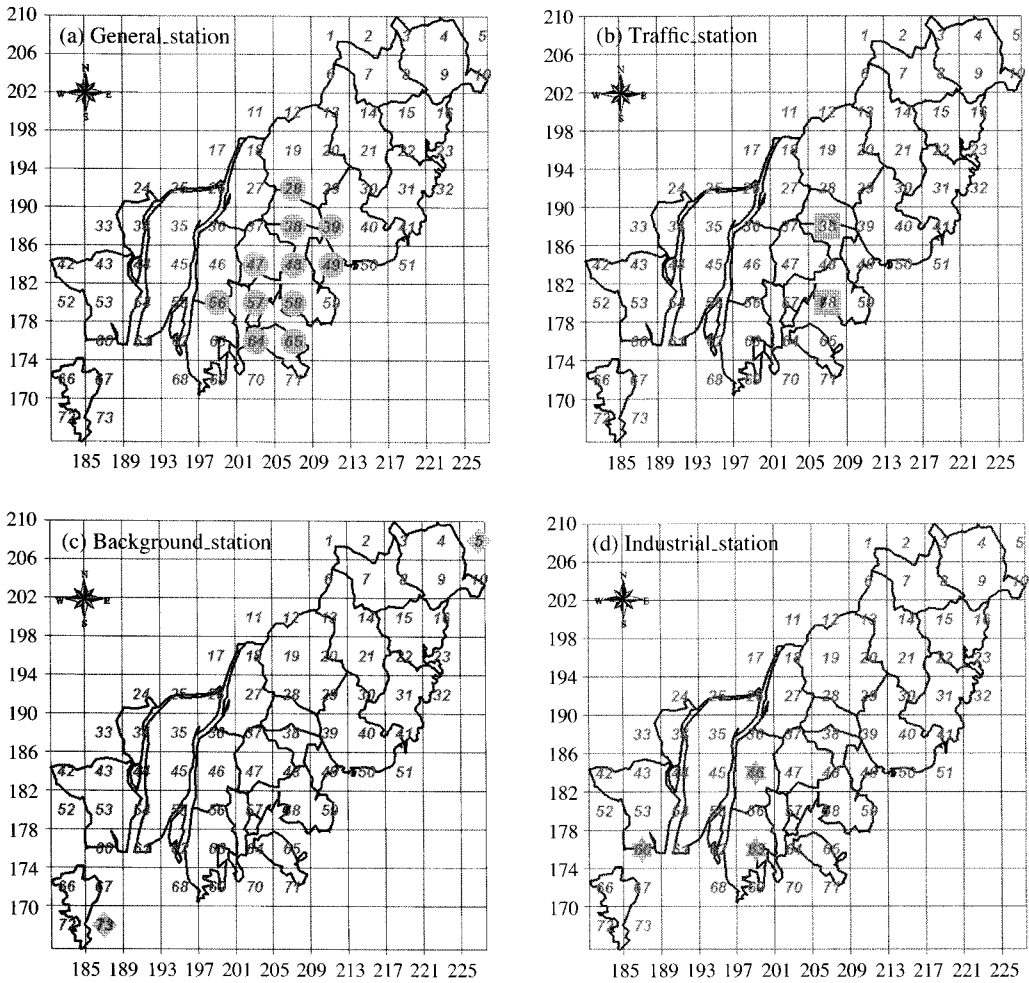


Fig. 7. The siting alternative grids for optimizing the multiple-objective monitoring network.

정망 기본계획에 따른 측정망 설치기준 등을 제한요소로 설정하였으며 측정소의 분류를 위한 하위목적의 환경적 요인, 사회적 요인 그리고 경제적 요인에 대한 세부적인 사항의 가중치(Chen *et al.*, 2006; 표 1 참조) 등을 고려하여 최대 목적값 격자들을 표 7에

나타내었다.

다목적 최적화분석에 따른 측정망의 배치를 하기 위해 측정소의 상한치를 18개소로 제한하였으며 공업지역에 위치하는 측정소는 그 운영목적이 공장 등에서 배출되는 오염물질의 거동을 감시하기 위한 것

Table 8. Comparison of population and source fraction between current and alternative monitoring network.

	Population (person)	Point source (fraction)	Area source (fraction)		Line source (roads) (fraction)	Sum of emission (fraction)
			House	Small point source		
Current	2,200,834	0.82	0.56	0.88	0.47	2.73
Alternative	3,067,086	0.96	0.79	0.91	0.58	3.24

Table 9. Comparison of population and source fraction covered by each class of monitoring stations.

Class (landuse)	Population (person)	Point source (fraction)	Area source (fraction)		Line source (roads) (fraction)	Sum of emission (fraction)
			House	Small point source		
General	2,274,631	0.23	0.57	0.06	0.39	1.25
Traffic	470,853	0.11	0.13	0.01	0.10	0.35
Industrial	321,602	0.62	0.09	0.83	0.09	1.63
Total	3,067,086	0.96	0.79	0.90	0.58	3.23

으로 목적함수의 최대값에 의한 배치보다 지역적인 특성에 따라 크게 좌우되므로 기존의 위치를 그대로 반영하고 최적화분석에서 우선적으로 제외하였다. 목적함수에 따른 측정소의 후보입지의 격자를 선정하기 위해 제한요소중 일반지역과 도로변지역 측정소가 중복되는 것은 허용하되 배경농도지역, 공업지역에 위치하는 측정소는 중복되는 것을 방지하기 위해 우선적으로 최적화분석을 실시하고 선정된 격자는 전체 격자에서 제외하고 나머지 격자에 대해 최적화분석을 실시하였다. 표 7과 그림 7에서와 같이 다목적 최적화분석 결과에 따른 측정소 배치결과를 살펴보면, 일반지역 측정소 후보지는 총 11개지역중 7개 지역이 기존지역과 동일하며 도로변지역 측정소는 일반측정소와 중복되어 나타났으며 배경농도지역의 측정소는 기존 격자(35, 65)와는 아주 상이하게 부산의 남북방향 가장자리에 위치한 격자(5, 73)에 배치하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 특히, 기존 측정소가 토지용도구분에 따른 설치운영으로 녹지지역의 측정소(35, 65)에서 관측된 측정값들 중에서 일부 오염물질의 농도가 기준치를 초과하는 등 적절치 않은 측정값을 부산지역의 배경농도로 활용한 부적절한 사례를 고려해 볼 때 최적화분석에 의한 배경농도 측정소의 위치는 인구 및 오염배출원이 적은 외곽지역에 위치하여 적절한 것으로 판단된다.

3. 2. 5 대기오염측정망의 최적화 효율성 비교

기존 측정망과 다목적 함수의 최적화분석에 따른

측정망의 배치시 인구보호와 배출원을 커버할 수 있는 능력에 대한 비교를 표 8에 나타내었다. 다목적함수 적용에 따른 최적화분석 결과에 따라 부산지역의 대기오염측정망을 배치할 경우 기존의 배치에 비하여 대기오염으로부터 보호받을 수 있는 인구수가 약 86만 명이 증가되며 배출원별로는 점, 선, 면배출원이 기존 0.82, 0.47, 1.44에서 각각 0.96, 0.58, 1.70으로 증가하였으며 전체 배출원(총합 4)을 커버할 수 있는 정도도 기존의 2.73에서 3.23으로 증가하여 최적화분석에 의한 측정망의 배치가 인구보호 및 배출원 감시에 있어 더 효과적임을 보였다.

또한, 부산지역에서 다목적 최적화분석을 통한 대기오염측정망의 재배치를 하였을 경우, 측정소 분류에 따른 인구수 그리고 측정소 배치에 따른 배출원을 감시할 수 있는 정도를 표 9에 나타내었고 이는 해당 격자에 배치될 측정소가 그 격자내의 거주자 모두를 보호할 수 있다는 가정에 기초한다.

측정소 분류에 따른 인구보호능력을 살펴보면, 전체 측정소에서 보호를 할 수 있는 인구수는 약 3,067천 명으로 이중 일반측정소는 약 2,275천 명으로 전체 인구의 74.2%, 도로변측정소는 약 470천 명 약 15.4% 그리고 공업지역 측정소는 약 321천 명 14.1% 정도로 인구보호가 가능한 것으로 나타났다. 측정소 분류에 따른 배출원의 커버정도는 전체 총합(4.00)에 대해 3.23으로 약 80.8%를 차지하며 공업지역에 설치되는 측정소 1.63(50.5%), 일반 및 도로변 측정소에 의해 각각 1.25, 0.35를 차지하였다.

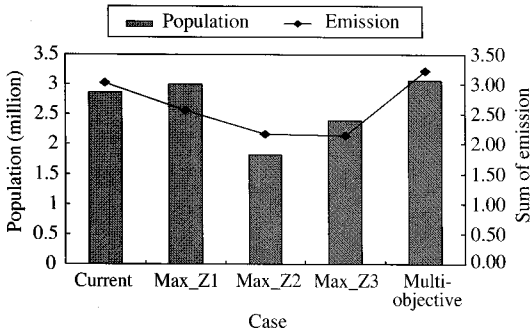


Fig. 8. Comparison of population protected and emissions estimated between the current, single-objective, and multi-objective network.

배출원별로 세부적으로 살펴보면, 대형사업장 등 점배출원과 면배출원중 소형 사업장 등에 대해서는 공업지역에 위치한 측정소가 각각 0.62, 0.83로 다른 측정소에 비해 커버하는 정도가 상대적으로 컸으며 가정 난방 등 면배출원과 선배출원에 대해서는 일반 측정소가 각각 0.57, 0.39로 높았다. 특히, 선배출원에 대한 커버정도는 도로변 측정소보다 일반 측정소가 더 높게 나타났는데 이는 일반 측정소가 주거지역 및 상업지역 등에 널리 많이 분포함으로써 도로변 측정소 후보지 격자의 상대적인 차이에 의한 것으로 보인다.

지금까지 단일 목적과 더불어 다목적 기준 적용에 따른 최적화 분석을 통하여 부산지역 대기오염 측정망의 효과적인 배치를 위한 방법을 비교 검토하였다. 그림 8은 기존의 측정망과 단일, 다목적 함수의 최대 값을 구해 측정소를 배치하였을 때, 인구보호 능력과 배출원 감시능력을 비교한 것이다. 인구보호를 최대화 할 수 있는 측정망의 배치는 다목적 최적화 분석 결과가 인구보호능력의 최대화 단일 목적에 의한 결과보다 약 6만 명 정도 많았으며 배출원 감시를 위한 능력 역시 기존 측정망 배치의 3.03보다 3.23으로 더 높은 결과를 보였다. 따라서 부산지역의 대기오염 측정망은 다목적 최적화 분석에 따른 측정소 배치를 통해 기존의 측정망 배치보다 인구보호 및 배출원 감시능력을 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한, 측정자료의 연속성 유지와 측정소의 신설 또는 이전 비용의 절감 등을 위해 기존 측정소들에 대해 배출원, 지형 등 주변여건 변화에 따른 측정소 운영 목적을 재평가·분류함으로써 유익한 측정결과의 해석이 가능하며 대기환경개선을 위한 대책수립에 기여할

수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

기존 대기오염 측정망의 배치 및 운영에 따른 문제점을 보완·개선하기 위해 지리정보시스템(GIS)과 연계하여 인구 및 가구수, 오염농도, 배출량 등의 D/B를 구축하고 의사결정지원시스템을 이용한 최적의 대기오염 측정망 배치를 위해 SO₂, NO₂, 그리고 PM₁₀ 등 3가지 대상물질에 대한 확산 모델링을 수행하였고 인구보호능의 최대화, 최고농도검출능의 최대화, 환경기준초과빈도 검출능의 최대화 등 단일 목적 함수와 더불어 앞의 3가지 목적을 동시에 고려한 다목적 함수의 적용을 통한 최적화분석을 시도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 부산지역 대기오염 측정망의 배치를 위해 인구보호능의 최대화(Max_Z1), 최고오염도 검출능의 최대화(Max_Z2) 그리고 기준초과빈도의 검출능 최대화(Max_Z3) 등 3가지 단일 목적함수에 대한 최적화 분석결과와 인구보호능의 최대화를 위한 목적함수가 가장 효과적인 것으로 나타났다.

둘째, 최대 인구보호를 위한 최적화 분석에 따른 측정소 배치시 해당 격자에 배치될 측정소가 그 격자 내의 거주자 모두를 보호할 수 있다는 가정에 기초하면 기존 측정소 배치보다 약 80만 명 더 많은 인구를 보호할 수 있는 것으로 나타났다.

셋째, 다목적 함수의 최적화 분석 결과에 따라 측정소 배치를 하였을 때, 인구보호능의 최대화만을 위한 측정소 배치의 경우보다 보다 약 60,000명 정도 보호 가능한 인구가 증가하는 것으로 평가되었으며 배출원 감시를 위한 능력에 있어서는 기존 측정망 배치보다 더 개선되는 결과를 보였다. 따라서 부산지역에서 다목적 최적화 분석 결과에 따른 측정소를 재배치함으로써 더 효과적인 대기오염 측정망의 구축이 가능하며 유익한 측정결과의 해석을 통해 대기환경개선을 위한 대책수립에 보다 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

넷째, 기존 측정자료의 연속성 유지, 측정소의 신설 또는 이전비용의 절감 등을 위해 배출원, 지형 등 주변여건 변화에 따른 기존 측정소의 재평가·분류를 위한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 박옥현, 박성용(1998) 대기확산 특성 해석을 위한 Semi-Variogram 및 Cumulative Semi-Variogram 기법의 적용, *대한환경공학회지*, 20(1), 67- 81.
- 부산광역시(2005) 통계연보, <http://www.busan.go.kr/open-content/databank/statistics>.
- 오규식, 권오결(2001) 다기준공간의사결정 지원시스템의 구축과 활용-폐기물 매립시설 입지분석을 중심으로, *The Journal of GIS Association of Korea*, 9(2), 227-238.
- 이희연(2000) 공공시설물 입지선정에 있어서 다기준평가기법의 활용에 관한 연구-쓰레기 소각장을 사례로 하여, *대한지리학회지*, 35(3), 437-454.
- 전상기, 이성철, 박경선(2003) 대단위배출원에서 기인한 입자상오염물질의 확산추적을 통한 ISCST3 모델과 수용모델의 비교연구, *한국대기환경학회지*, 19(6), 789-803.
- 정상진(2003) ISC모델의 적용성 평가-소각장 주변지역의 단기농도예측, *한국환경과학회지*, 12(7), 809-816.
- 정장표(2000) 환경오염물질의 시·공간적 특성 평가시스템 개발, 2000년도 산·학·연 컨소시엄 연구개발보고서, 경성대학교 산·학·연 컨소시엄센터.
- 환경부(2005) 대기오염측정망 기본계획(2006-2010).
- 환경부(2006) 환경백서.
- Chang, N.B. and C.C. Tseng(1999) Optimal evaluation of expansion alternatives for existing air quality monitoring network by grey compromise programing, *Journal of Environmental Management*, 56, 61-77.
- Chen, C.H., W.L. Liu, and C.H. Chen(2006) Development of a multiple objective planning theory and system for sustainable air quality monitoring networks, *Science of the Total Environment*, 354, 1-19.
- Duc, H., I. Shannon, and M. Azzi. (2001) Spatial distribution characteristics of some air pollutants in Sydney, *Mathematics and Computers in Simulation*, 54, 1-21.
- Finzi, G., L. Zani, and M. Zecchini (1991) A decision support system for the design of air quality monitoring networks, *Environmental Software*, 6(1) 55-60.
- Kao, J.J. and M.R. Hsieh (2006) Utilizing multiobjective analysis to determine an air quality monitoring network in an industrial district, *Atmospheric Environment*, 40, 1092-1103.
- Munn, R.E. (1981) *The design of air quality monitoring networks*. London; MACMILLAN PUBLISHERS LTD.
- Park, O.H., J.Y. Shin, and M.G. Seok (2007) Improvement of atmospheric pollution prediction in coastal area using a "GIS-based decision support system", to be published.
- USEPA (1995) *User's guide for the industrial source complex (ISC3) dispersion models*, EPA-454/B-95-003a, Research Triangle Park, NC, USA.
- Yu, T.Y. and L.F.W. Chang (2001) Delineation of air-quality basins utilizing multivariate statistical methods in Taiwan, *Atmospheric Environment*, 35, 3155-3166.