

충주지역의 대기환경용량 추정에 관한 연구

A Study on the Atmospheric Environmental Capacity in Chungju Area

박상찬* · 연익준 · 조병렬 · 조중식 · 강병욱

충주대학교 공과대학 환경공학부

(2007년 11월 6일 접수, 2007년 11월 28일 채택)

Sang-Chan Park*, Ik-Jun Yeon, Byeong-Real Cho,

Jung-Sik Cho and Byung-Wook Kang

Division of Environmental Engineering, Chungju National University

(Received 6 November 2007, accepted 28 November 2007)

Abstract

The purpose of this study is to calculate atmospheric environmental capacity for PM_{10} , NO_2 and SO_2 using a rollback model in Chungju. From the results of this study, the source contributions for PM_{10} and NO_2 was the following order: line source > area source > point source. However, the source contributions for SO_2 was the following: point source > area source > line source. While the atmospheric environmental capacity of NO_2 and SO_2 was enough to meet the regional air quality target, PM_{10} emission needs to be reduced by 5%.

Key words : Atmospheric environmental capacity, Rollback model, Chungju

1. 서 론

우리나라에서는 지난 수 십년 동안 급속한 산업화와 경제성장을 이룩하는 동안 성장과 발전의 의미로 1990년대까지는 개발이 최우선시 되어왔으며, 그에 따라서 개발과 보전측면에서 발생하는 갈등으로 인하여 많은 문제를 유발하였다. 최근 들어 이와 같은 인식에서 탈피하여 국토와 지역의 환경용량을 고려한 성장관리체제로 패러다임으로 전환하면서 환경용량에 대한 관심이 증대되고 있다.

환경용량의 개념은 1930년대부터 생태학, 인구학, 관광학, 환경계획학 등에서 다양한 형태로 응용되고 있으며 자연환경의 보전가치에 따라 인간생활을 건전한 방향으로 이끌며 보호할 수 있는 범위로 정의하고 있다. 환경용량평가란 환경용량 구성요소의 한계치를 기준으로 하여 일정지역의 경제규모가 해당 지역의 환경용량을 초과했는지의 여부를 파악함으로써 그 지역에서 이루어지는 각종 개발 사업이 환경에 미치는 영향이 어느 정도인지에 대한 정책적 판단을 내리는 일로 정의된다. 현재까지 국내외에서 수행된 환경용량 산정사례는 시스템 다이내믹스 활용방법, 생태적 발자국 지수 산정방법, 에머지 분석방법, Onishi 접근방법 등이 있다(마강래, 1998; 문태훈,

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)43-841-5353, E-mail : scpark@cju.ac.kr

1998; Odum, 1996; Onishi, 1994).

대기환경용량을 파악하는 것은 현재의 대기 질 수준을 가능하고 개선 해야 할 양 등에 대한 구체적인 정보를 제공하게 되는 체계적인 접근방법이라 할 수 있다. 우리나라 공단 및 대도시의 대기오염도 변화를 살펴보면 과거에 비하여 아황산가스의 오염도가 연료정책의 일환으로 확연한 개선을 볼 수 있다. 하지만 미세먼지, 질소산화물 및 오존농도는 뚜렷한 변화 추세를 발견하기 어렵거나 오히려 조금씩 악화되고 있는 추이를 보여주고 있다. 이와 같은 대기오염현상의 심화는 황사현상과 같이 외부의 오염물질의 장거리 이동에 의한 영향 등 외부적인 요인을 비롯하여 해당 지역에서 산업단지나 자동차의 증가 등으로 인한 오염물질 배출량의 증가를 들 수 있다. 그러나 동일한 오염물질이 배출되더라도 그 지역의 지형, 기상 등의 영향으로 오염도와 이에 따른 영향정도는 상이하게 나타날 수 있기 때문에 지역의 대기환경용량의 파악은 중요한 의미를 가지고 있다.

대기환경용량과 관련된 외국의 적용 사례로서는 캐나다에서 호수의 산성화 방지 대책으로서 호수의 환경용량을 고려한 황산염의 습성침착량을 대기환경용량으로 정하여 조사한 바 있고, 중국 Lanzhou지역에서 아황산가스에 대한 대기환경용량 산정에 관한 연구 등이 있으며 (An *et al.*, 2007; Ro and Robert, 1999), 국내 연구로는 수도권 및 산업단지를 대상으로 대기환경용량을 산정한 바 있다(장영기 등, 2005; 문윤섭 등, 2004; 김정수 등, 2003).

본 연구는 중부 내륙지역에 위치한 충주시에 대하여 대기환경용량을 산정하여 지역의 대기환경개선을 위한 효율적인 관리방안 수립에 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구 방법 및 내용

2.1 오염물질 배출량 산정

대기오염물질 배출원은 고정과 이동 배출원으로 구분하여 산업단지내 대규모 사업장 등을 점배출원으로 하였고, 면배출원은 주거지역과 상업지역으로 구분하였으며, 이동배출원은 자동차와 기차로 구분하여 오염물질 배출량을 산출하였다.

배출량 산정항목은 대기로 배출되어 타 물질과의

반응성이 적고 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있는 오염물질로 배출량이 비교적 많은 물질인 PM₁₀, SO₂, NO₂로 하였다.

2.1.1 점오염원

산업체 및 대기배출시설이 집중되어 있을 것으로 예상되는 산업단지의 배출량산정은 미국 환경청의 배출계수를 적용하여 계산하였다.

2.1.2 면오염원

충주시 전 지역을 주거지역 (8.738 km²), 상업지역 (1.362 km²)으로 구분 하였고, 지역의 면적과 인구통계를 바탕으로 시설면적별 에너지사용규정에 따른 단위열부하량을 이용하였다. 연료사용량은 연료별 환산기준을 이용하여 산정하였으며, 시설규모는 지역면적×용적율×실난방면적율로 산출하였다. 여기서 지역면적은 충주시 도시계획자료의 지역별 주거지역 면적을 근거로 용적율을 중간수치인 70%로 가정하였고, 실난방면적율도 70%로 가정하였다(에너지경제연구원, 2004).

연료소비량은 시설규모×단위열부하량을 이용하였으며, 연료별 오염물질 배출량은 연료소비량×배출계수를 적용하여 면오염원에 의한 오염물질 배출량을 산정하였다(산자부, 2002). 연료종류별 오염물질 배출 계수는 표 1과 같다.

Table 1. Fuel emission factors for area source.

Division	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
LPG (g/m ³)	0.050	0.01	2.18
LNG (g/m ³)	0.003	0.01	2.62
Kerosene (g/L)	0.240	1.7	5.46

2.1.3 이동오염원 (선오염원)

이동오염원을 산정하기 위한 자동차 등록대수는 충주시 통계연보를 이용하였으며, 이륜차는 승용차에 포함을 시켰다(충주시, 2005). 차종별 오염물질 배출계수는 자동차 총 오염물질 배출량 산정방법에 관한 규정을 이용하였다(환경부, 2005). 배출량 산정을 위한 차종별 1일 주행거리는 교통안전공단 자료를 이용하였으며(교통안전공단, 2006), 자동차에 의한 오염물질 배출량산정은 차량대수×배출계수×주행거리를 이용하여 산정하였으며, SO₂ 산정은 연료소비량

Table 2. Emission factors for vehicles types.

(Unit: g/km · No.)

Division	PM ₁₀	NO ₂
Passenger	0.074	0.366
Van and Bus	0.109	3.959
Truck	0.162	3.602
Particular vehicles	0.350	10.948

Table 3. Emission factors for train.

(Unit: kg/kL)

Division	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
Diesel train	3.58	1.64	64.36

(L/년) × 연료비중 × 황함유량 × 2/100 이용하여 계산하였다(표 2).

2. 1. 4 기타 오염원

기차에서 발생하는 오염물질 배출량의 산출은 노선별 연료소비량 × 차종별 배출계수를 이용하여 산출하였다. 노선별 연료소비량은 도면상의 노선거리 × 운행횟수 × 단위 연료사용량을 이용하여 산정하였으며, 배출계수는 디젤기관차에 관한 자료를 이용하였으며(한국철도기술연구원, 1997), 오염물질별 배출계수는 표 3에 나타내었다.

2. 2 지형 자료

충주시는 우리나라의 중앙부와 동북부에 위치하며 동남쪽으로는 소백산맥의 여맥인 계명산과 남산, 대림산, 월악산과 서쪽으로 국망산, 북쪽으로 천등산 등 비교적 높은 산으로 둘러싸인 산간분지로 형성되어 있다. 충주지역의 환경용량을 산정하기 위해 축척 1/25,000 수치지도를 이용하였으며, 시내 중심가를 중심으로 7 × 7 km 지역에 대하여 350 m 간격으로 격자분할 작업을 실시한 후, 각 격자별 표고를 구하였다. 충주지역 평균 표고는 약 109 m로 비교적 높은 지형을 형성하고 있으며 고도의 구성비는 표 4에 나타내었다.

2. 3 기상 자료

충주시의 기상 특성을 파악하기 위해 충주기상대의 자료를 이용하였으며, 기온, 풍속 및 풍향을 분석하여 표 5와 그림 1에 나타내었다. 충주시의 연 평균 기온은 약 12°C를 보였으며, 대기오염 물질의 확산

Table 4. Topography of Chungju area.

Classification	Grid(No.)	Ratio(%)
< 70 m	55	13
70 ~ 80	120	27
80 ~ 90	55	13
90 ~ 100	55	13
100 ~ 150	89	20
150 ~ 200	22	5
200 ~ 250	19	4
250 ~ 300	8	2
300 ~ 350	7	2
350 ~ 400	5	1
> 400 m	4	1

Table 5. Summary of meteorological data in Chungju area in 2004.

	Temperature (°C)	Average wind (m/s)	Maximum wind (m/s)	Wind direction
Jan.	-3.1	1.4	7.9	WSW
Feb.	1.6	2.1	9	WSW
Mar.	5.4	1.8	8.4	SSW
Apr.	12.6	1.9	7.3	W
May	17.8	1.9	7.2	WSW
Jun.	23.0	1.6	10.7	ENE
Jul.	25.7	1.4	7.3	E
Aug.	25.6	1.6	8.8	ENE
Sep.	20.5	1.5	8.5	ENE
Oct.	12.8	1.3	8.2	ENE
Nov.	7.0	1.3	9.3	WSW
Dec.	0.3	1.3	6.7	WSW

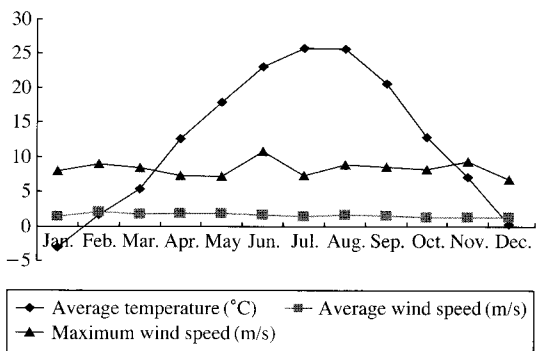


Fig. 1. Monthly variation of temperature and wind speed in 2004.

과 관련해서 중요하게 고려되는 변수는 기온보다는 풍향과 풍속이라 할 수 있고 충주시의 평균 풍속은

약 1.6 m/s를 나타냈다. 확산모델수행을 위한 기상자료는 2004년도 충주시 기상대 자료를 모델 입력에 필요한 대기안정도별 풍향, 풍속 혼합고 등 기상종합빈도함수(Joint Frequency Function)로 변환하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대기질 현황

충주시 지역의 대기 질 변화경향을 파악하기 위하여 자동측정망 조사 자료를 이용하였다. 각 오염물질별 최근 10년간의 농도변화경향은 표 6과 같다.

Table 6. The annual variation of air pollutant concentrations in Chungju.

Year	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)	CO (ppm)	PM ₁₀ (μg/m ³)	O ₃ (ppm)
1995	0.014	0.020	1.2	-	0.018
1996	0.010	0.020	1.2	-	0.022
1997	0.008	0.023	1.0	-	0.023
1998	0.006	0.019	0.9	-	0.022
1999	0.032	0.016	0.8	-	0.019
2000	0.005	0.016	1.01	-	0.016
2001	0.005	0.016	1.01	56	0.016
2002	0.007	0.013	0.84	50	0.019
2003	0.005	0.016	0.58	51	0.022
2004	0.004	0.012	0.64	53	0.024

최근 10년간의 변화경향을 분석한 결과 SO₂ 및 CO는 확실한 감소경향을 나타내었으나 NO₂의 경우에는 감소경향이 약한 편으로 나타났으며 PM₁₀과 O₃은 증가와 감소를 반복하고 있음을 알 수 있다. 특히, PM₁₀의 농도는 지자체의 달성목표농도인 50 μg/m³을 넘어서고 있는 것을 알 수 있으며, 목표달성을 위해서는 관리대책이 강구되어야 할 것으로 보여진다.

3.2 오염물질 배출량

배출계수를 이용하여 대상지역의 오염물질별 배출량을 계산한 결과 표 7과 같은 결과를 얻었다.

표 7에서 대상오염물질인 PM₁₀, SO₂, NO₂의 배출량은 각각 707, 2,349, 8,640 kg/d으로 나타났다. 각 오염물질별 배출원의 기여도를 살펴보면 PM₁₀의 경

우 선오염원인 자동차의 기여도가 443 kg/d로 전체 배출량의 63%를 차지하였고 다음으로 면오염원이 140 kg/d로 20% 비율로 나타났다. 점오염원의 기여도가 17%로 낮은 배출기여도를 나타내었다. SO₂의 경우 점오염원의 배출량이 1,468 kg/d로 전체배출량의 58%의 기여도를 보였으며 면오염원의 배출량이 749 kg/d로 전체배출량의 30%의 기여도를 나타내었다. NO₂의 경우 점오염원의 배출량이 5,235 kg/d로 전체 배출량의 61%의 기여도를 보였으며 면오염원의 배출량이 2,939 kg/d로 전체배출량의 34%의 기여도를 나타내었다. 위에서 살펴본 바와 같이 오염물질별 배출원의 기여도는 PM₁₀과 NO₂가 점오염원의 기여도보다 자동차의 기여도가 큰 것으로 나타나는 유사한 패턴을 나타내었는데, 이는 충주지역의 공업단지 규모가 비교적 작은 것에 기인하는 것으로 사료된다.

SO₂의 배출원 기여도 경향은 PM₁₀과 NO₂와는 전혀 다른 형태로 나타났는데, 이는 사용하는 연료 중 황 함량이 높은 연료를 사용하기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

3.3 확산모델을 이용한 배출량 평가

연구대상지역에 대한 배출량 추정결과를 평가하기 위하여 모델을 이용하여 대기 중 농도를 추정하였다. 대기 중 농도를 추정하기 위하여 사용한 모델은 대기확산모델 중 현재 국내지형의 특성상 많이 사용하고 있는 ISCLT (Industrial Source Complex Long Term model)을 사용하였다. 모델추정을 위한 배출원은 300×300 m 격자로 구분하여 오염원 위치자료로 입력하였으며, 모델 입력에 필요한 기상자료는 대기안정도별 풍향, 풍속 혼합고 등 기상종합빈도함수(JFF)로 변환하여 사용하였다.

모델에 의한 배출농도 추정치를 측정망자료에 근

Table 7. Estimated annual emission rate of air pollutants by source categories in Chungju area.

Source	Emission (kg/day)			
	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	
Point sources	120	1,468	419	
Area sources	140	749	2,939	
Line sources	Vehicle	443	130	5,235
	Train	4	2	47
Total	707	2,349	8,640	

Table 8. Comparison of observed and simulated concentration.

Item	Automatic measurement network (2004)	Model estimate (2004)	Standard
PM ₁₀ (μg/m ³)	53	42.5	70
SO ₂ (ppm)	0.004	0.003	0.02
NO ₂ (ppm)	0.012	0.036	0.05

거한 실측농도와 비교하여 표 7에 나타내었다.

PM₁₀의 경우 측정망자료에 의한 관측치는 53 μg/m³인 것에 대하여 추정된 배출량자료를 이용한 모델예측치는 42.5 μg/m³으로 나타나 약간 과소평가된 것을 알 수 있다. SO₂의 경우에는 관측치가 0.004 ppm인 것에 대하여 추정치가 0.003 ppm을 보였으며 NO₂의 경우에는 관측치가 0.012 ppm인 것에 대하여 추정치가 0.036 ppm을 나타내어 배출량추정치와 실측치 사이에 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 여러 가지 원인이 존재할 수 있는데 작성한 배출자료의 불확실성에 의한 오차도 상당히 존재하는 것으로 판단된다.

3.4 대기환경용량 산정

본 연구에서는 대기환경용량의 산정을 위해서 대기 질 목표를 달성하기 위한 지역 내 허용배출량을 산정하는 방식으로 접근하였다. 대기환경용량의 산정을 위해서 연구대상지역의 대기오염물질의 확산 및 이동특성이 일정한 경우로 한정하여 지역 내의 오염물질 총배출량과 연평균 농도 사이에는 일정한 비례 관계가 존재한다는 전제하에서 목표농도에 따른 지역 내 총배출량을 추정하는 대기확산모형(rollback model)을 이용하였으며 활용한 모델 식은 다음과 같다.

$$C = \alpha \cdot \frac{Q}{u}$$

여기서, C : 대기 중 오염물질의 농도

Q : 지역 내 단위면적당 배출량

u : 지역 내 평균풍속

α : 지역 내 오염물질의 확산 · 이동을 설명하는 매개변수

모형에서 지역 내 오염물질의 확산 및 이동을 설명하는 매개변수의 산출은 2004년 측정망 측정치를

Table 9. Estimation of total emission at target atmospheric environmental standard in Chungju area.

Item	Target concentration	Allowable emission (kg/d)
PM ₁₀ (μg/m ³)	40	534
	50	668
	60	800
	70	934
SO ₂ (ppm)	0.005	2,934
	0.010	5,871
	0.015	8,805
	0.020	11,742
NO ₂ (ppm)	0.010	7,200
	0.020	14,000
	0.030	21,600
	0.040	28,797
	0.050	35,997

적용하여 구하였다. 모델을 적용한 목표농도별 허용배출량 결과는 표 9와 같다.

충주시의 현재 대기 질은 PM₁₀, NO₂, SO₂가 모두 국가대기환경기준을 만족하고 있다. 표 7에 의하면, 지역 내 오염물질별 총배출량은 PM₁₀이 707 kg/d, NO₂가 8,640 kg/d, SO₂가 2,349 kg/d의 배출량으로 추정되었으며 지역 내 목표농도로 대기환경기준을 적용할 경우에는 아직까지 대기환경용량이 충분한 것으로 나타났다. 그러나 PM₁₀의 경우에 지역대기 질 목표치를 50 μg/m³으로 설정하고 있기 때문에 그에 따른 허용배출량은 669 kg/d으로 현재 추정배출량이 707 kg/d으로 허용배출량을 초과하고 있으며, 지역 대기 질을 달성하기 위해서는 현재 배출량 5%의 삭감이 필요한 것으로 추정되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 중부내륙지역인 충주시의 대기환경용량을 산출하기 위하여 대기확산모형(rollback model)을 이용하여 목표농도에 따른 지역 내 배출허용량을 추정한 결과 다음과 같은 결과를 알 수 있었다.

대상오염물질인 PM₁₀, SO₂, NO₂의 배출량은 각각 707, 2,349, 8,640 kg/d으로 나타났으며, 배출원의 기여도를 살펴보면 PM₁₀과 NO₂의 경우 선오염원 > 면오염원 > 점오염원의 순서로 나타나 유사한 경향을 보인 반면에 SO₂의 경우 점오염원 > 면오염원 > 선오

염원 순서로 나타나 PM₁₀과 NO₂의 경향과는 반대의 경향을 나타내었다.

대기환경용량을 추정한 결과 PM₁₀의 경우에 지역 대기 질 목표치를 달성하기 위해서는 현재 배출량 5%의 삭감이 필요한 것으로 추정되었다.

감사의 글

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

참 고 문 헌

교통안전공단(2006) 2005년도 자동차 주행거리 실태조사, 92-212.

김정수, 박일수, 이석조, 김민석, 김록호, 유 철(2003) 도시지역 대기질 관리를 위한 대기환경용량 산정 기법, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 151-152.

마강래(1998) Ecological footprint를 이용한 경제활동의 환경영향에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사논문.

문윤섭, 구운서, 김유근, 임윤규, 이소영(2004) 울산지역에서 대기환경용량 산정 및 대기질 모델링의 기여도 평가, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 131-132.

문태훈(1998) 지속가능한 성장을 위한 환경용량의 산정과

환경지표 개발에 관한 연구, 한국정책학회보, 7(1), 149-171.

산자부(2002) 에너지사용계획 수립 및 협의절차 등에 관한 규정(산자부고시 제2002-130호).

에너지경제연구원(2004) 에너지이용합리화법 시행규칙(제2조 별표 1)의 환산기준.

장영기, 김호정, 송기봉, 김 관(2005) 시흥 및 안산지역의 대기환경용량 추정에 관한 연구, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 227-228.

충주시(2005) 충주시 통계연보.

한국철도기술연구원(1997) 디젤기관의 배출가스 대기오염 현황 및 저감방안에 관한 연구.

환경부(2005) 자동차 총 오염물질 배출량 산정방법에 관한 규정.

An, X., H. Zuo, and L. Chen(2007) Atmospheric environmental capacity of SO₂ in winter over Lanzhou in China: A case study, *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(4), 688-699.

Odum, H.T.(1996) *Environmental accounting : Emerge and environmental decision making*, John Wiley & Sons, Inc..

Onishi, T.(1994) A capacity approach for sustainable urban development: An empirical study, *J. of the Regional Studies Association*, 28(1), 39-51.

Ro, C.-U. and V. Robert(1999) Acid wet deposition and critical loads in eastern Canada, *Proceedings of 5th international joint seminar on regional deposition processes in the atmosphere*, 12-16 October, Seoul, Korea, 227-234.