

부산시 대기오염방지를 위한 수리계획법

이 창 효
부산여자대학교 경영학과
(1995년 8월 7일 접수)

Mathematical Programming for Air Pollution Control in Pusan

Chang-Hyo LEE

Dept. of Business Administration, Pusan Women's University, Pusan, Korea
(Manuscript received 7 August 1995)

This study was performed to find the most desirable emission reduction for each mobile source pollutant and the optimal control strategy at a given level of expenditures in Pusan City in 2000 by using the interactive ϵ -constraint method developed by Chang-Hyo Lee and Hyung-Wook Kim, which is one of the mathematical programming models.

The most desirable emission reduction is 7093 ton/year for particulate (TSP), 4871 ton/year for NOx, 5148 ton/year for HC and 36779 ton/year for CO. The optimal control strategy is as follows;

1. As to passenger car and taxi, limiting VKT (vehicle kilometers travelled) in congested areas will be necessary. In addition to this, improving vehicle inspection program should be enforced.
2. As to small-gasoline bus, traffic adaptive control system will be necessary.
3. As to small-diesel bus, non-adjustable engine parameters will have to be applied.
4. As to heavy bus and heavy truck, catalytic trap oxidizer and limiting VKT in congested areas will be necessary.
5. As to motorcycle, 2-cycle motorcycles should be converted to 4-cycle motorcycles.

Key words : air pollution, mathematical programming, emission reduction, mobile source pollutant

1. 서 론

60년대초 만해도 우리나라 자동차는 전국적으로 3~4만대에 불과하여 자동차로 인한 대기오염은 거의 문제가 되지 않았으나, 80년대에 들어서면서 급속히 늘어나기 시작하여 1985년에 100만대를 넘어서고 1988년에는 200만대 그후 7년이 지난 1995년 7월 현재 800만대를 돌파하였으며 2000년대에 가서 전국적으로 1300만대 이상의 자동차가 운행될 것으로 예측하고 있어, 자동차 배출가스로 인한 대기오염은 더욱 악화될 것으로 전망되고 있다. 더구나 대부분의 자동차들이 서울, 부산 등 대도시에

집중되어 있어 출퇴근 시간대의 교통난을 유발하고 이에 따른 자동차 배출가스에 의한 대기오염이 심각한 실정이다. 또한, 자동차는 산업시설이나 난방 시설등 다른 고정대기오염물질 배출원과는 달리 도로라는 특정 지면 위를 달리면서 오염물질을 배출하고 또한 배출위치도 공장굴뚝과 같이 지상에서 수십, 수백미터 높이에서 배출하는 것이 아니라 30~50 cm 정도의 높이에서 배출하므로 사람에게 는 훨씬 큰 피해와 영향을 주게 한다(양방철, 1991).

최근('95. 7. 17)의 TIME지 보도에 의하면 미래에 등장할 가장 혁신적인 기술의 하나로 자동차로

인한 대기오염을 근원적으로 해소시킬 수 있는 무공해차(수소자동차)의 출현을 들고 있을 정도로 90년대에 들면서 환경문제가 가장 중요한 지구 전체적 사회문제가 되면서 국민생활 곳곳에 영향을 미치기 시작하고 있다. 특히 우리나라의 경우에는 이미 가입하고 있는 우루과이 라운드 협약과 지구 온난화 협약 및 앞으로 다가올 그린라운드에 효율적으로 대처해 나가기 위해서 자동차 배출가스로 인한 대기오염물질 감소에 더욱 노력을 기울여야 할 것이다.

본 연구에서는 대기환경정책을 입안하는데 도움이 되는 수리적 모형을 제시하고자 한다. 즉, 대기환경정책수립자가 주어진 예산의 한도내에서 일정한 환경기준치에 도달하기 위해서는 어떤 대책방안을 강구하는 것이 가장 바람직한가를 결정할 때 본 연구에서 제시한 수리적 모형이 유용한 정보를 제시해 주게 된다는 기대하에서 수행된 것이다. 연구대상은 대기오염과 관련된 문제를 부산시의 이동오염원에 기인된 대기오염문제로 국한하였으며, 연구의 대상기간은 기준년도인 1994년에 시작하여 제시된 대책방안을 실시하기에 충분하다고 생각되는 기간의 범위내에서 가능한 한 빠른 예정일을 평가기준으로 삼았다. 그 결과, 제시된 대책방안을 실시하는데 5~6년이 합리적인 기간으로 보아 대상년도를 2000년으로 선정하였다. 자료의 수집은 국립환경연구원 자동차공해연구소, 대학부설 환경문제연구소 그리고 부산지방환경청 관계전문가와 의 면담 및 이 분야에 관련된 여러 국내외 문헌들의 조사를 통하여 이루어졌다.

2. 자동차 배출가스로 인한 부산시 대기오염문제

대기 중에 인공적으로 배출된 오염물질은 여러 가지의 배출원으로 구분할 수 있다. 자동차운행에서 생성되는 배출가스는 도로망을 중심으로 배출확산되어 도시대기오염의 거의 대부분을 차지하고 있으며 여기서 나온 질소산화물, 탄화수소, 일산화

탄소등의 유해가스는 생활환경에서 동식물에 이르기까지 매우 심각한 영향을 주고 있다(한국기계연구소, 1984). 또한 차량에서 방출되는 오염물질은 비교적 그 양이 많을 뿐만 아니라 직접적으로나 간접적으로 아황산가스를 제외한 나머지 모든 오염물질 대기농도에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 부산시의 경우, 1993년도를 기준으로 볼 때 CO배출량(125,954톤)의 63.9%인 80,545톤이 자동차로 기인된 것이었으며, HC는 총배출량(18,139톤)의 59.0%(10,715톤), NOx는 총배출량(138,786톤)의 30.0%(41,770톤) 그리고 TSP는 총배출량(22,226톤)의 30.4%(6,766톤)로 나타났다(환경처, 1994). 이외에도 대부분의 연성물질도 자동차로부터 배출된다. 한편, 자동차의 유해가스 배출량은 자동차의 종류와 성능을 비롯하여 주행조건, 사용연료의 연소조건, 운전조건 그리고 도로조건 등에 따라 크게 차이가 있다(조강래 외, 1993). 가령 휘발유를 사용하는 자동차에서의 일산화탄소는 정지가동(idling)시에 가장 많이 배출되며 탄화수소는 정지가동시와 감속시에 그리고 질소산화물은 가속시에 가장 많이 배출되고 있으며 또한 우리나라의 경우 경유운전으로 인한 매연이 크게 문제가 되고 있는데 이는 연료의 질이나 불완전연소에도 문제가 있으나 기준이상의 과적, 도로사정, 정비불량 등에 보다 큰 원인이 있다고 하겠다. 결국, 대도시의 대기질 악화는 교통문제와 매우 밀접한 관련을 맺고 있다고 하겠다(Teng, J.Y. and G.H.Tzeng, 1994). 여기서, 부산시의 교통현황을 대기오염과 관련지어 살펴보기로 하자.

부산지역의 교통수요는 자동차가 94년말 현재 53만대를 상회하고 있으며, 향후 본격적인 지방자치제 시대를 맞아 서울등 수도권지역보다는 지방에서의 승용차 보유대수가 훨씬 큰 폭으로 증가할 것으로 전망되고 있다. 현재 부산시는 차량의 증가를 따르지 못하는 낮은 도로율과 간선도로의 부족, 교통시설 및 주차장 부족 등으로 교통환경이 전국에서 가장 열악하여 소통난, 승차난, 주차난이 심각한 상태에 이르렀다. 특히, 부산시의 간선도로는 배산임해의 도시공간구조로 인하여 주변의 이면도

로를 충분히 활용하지 못하고 있어 대체도로가 부족한 실정이다. 이로 인하여 간선도로는 전체 도로의 13%에 불과하지만 부산시 교통난의 대부분을 감당할 수 밖에 없는 실정이다. 따라서 간선도로상에 교통류의 집중으로 인하여 심한 체증이 발생하고 있으며, 특히 교차로의 신호주기가 차량의 소통을 원활히 할 수 있는 연동화 내지 최적화 되어 있지 않아 교통류가 단절됨으로서 교차로에 체증이 가중되고 있는 실정이다(동남개발연구원, 1994). 또한 화물물동량은 1일 41만 3천톤 수준으로 시내 주요도로의 화물차 운행비용이 전체 차량통행량의 28%를 차지하고 있다. 한편, 부산지역은 1989년 이후 최근 5년간 자동차대수는 약 200%가 증가되었으나 도로율은 1.75% 향상에 머물러 도로 등의 교통기반 시설이 전국 최저수준이다. 즉, 94년 현재의 도로율은 14.4%로서 서울의 19.0%, 대구 16.0%, 일본 동경 24.4% 보다 매우 열악한 수준이다. 한편 부산지역의 교통수단별 수송분담율은 버스가 46.5%, 지하철 8.4%, 택시 21.5%, 기타 23.6%로 시민통행 수요에 비해 지하철 등 대량수송체제인 궤도 교통수단 분담율이 저조하여 자가용승용차 증가의 직접적인 요인이 되고 있다(부산일보사, 1995; 부산상공회의소 부산경제연구원, 1992).

교통혼잡으로 발생하는 경제적 손실은 연료비 등의 차량운행비용손실, 승객의 시간손실, 수송중인 화물의 가치손실, 공해 등의 환경손실이 있다. 이 중에서 차량운행 비용손실과 승객의 시간손실을 돈으로 환산하여 교통혼잡비용이라고 말하고 있다. '93년의 전국 6대도시의 연간 교통혼잡비용을

살펴보면, 서울이 2조 4천억원으로 가장 많았고 그 다음이 부산으로 1조 2천억원이 넘었다. 한편, 차량혼잡비용을 차량등록대수로 나눈 1대당 교통혼잡비용은 Table 1에 나와 있듯이 6대도시 중 대구가 가장 낮으며, 도로율이 가장 낮은 부산이 가장 높았다. 부산시는 '88년 자동차등록대수가 18만대로서 차량 1대당 혼잡비용이 77만원으로서 3위였으나, '91년부터 1위로 올라섰다. '93년에는 차량등록대수가 47만대로 급증한 데다 지하철공사 등으로 하루 종일 심각한 교통체증을 보여 1대당 교통혼잡비용이 서울의 2배에 가까운 261만원으로 증가하였다(교통개발연구원, 1995).

결국, 부산시의 교통패턴을 단적으로 표현하면 도심에서의 교통체증과 동시에 정지가동시의 배출가스로 인한 대기오염농도의 격증을 들 수 있겠다. 또한 부산의 승용차는 외국에 비해 3~5배의 주행율을 나타내고 있으며 가로망체계 또한 자동차교통을 효과적으로 처리하는데 부적합하기 때문에 교통정체현상이 자주 일어나게 되고 도심에서의 교통속도가 저속화된다. 이로 인해 외국의 대도시에 비해 상대적으로 적은 자동차대수를 보유하고 있음에도 불구하고 이동오염원은 부산시의 대기오염을 가중시키는 주요 원인으로 지적되고 있다. 한편 우리 나라에서는 휘발유의 특별소비세부과 등으로 휘발유가격이 높은 데다가 부산의 경우는 시내 주요도로의 화물차 운행비용이 전체 차량통행량의 28%를 차지하고 있을 정도로 화물차량이 매우 많기 때문에 경유자동차의 등록대수가 매우 큰 편이다. 따라서 경유기관에서 배출 되는 다량의 매

Table 1. Traffic congestion cost per vehicle (million won/year)

Year	Area	Seoul	Pusan	Incheon	Taejeon	Daegu	Kwangju	Average
'88		.29	.77	.85	1.10	.23	.41	.42
'89		.40	.97	.97	1.08	.28	.47	.54
'90		.55	1.24	1.11	1.43	.34	.52	.70
'91		1.00	2.09	1.72	2.16	.57	.79	1.21
'92		1.15	2.28	1.77	2.16	.61	.81	1.34
'93		1.38	2.61	1.91	2.27	.68	.84	1.55

연 및 질소산화물 등은 부산시의 대기오염을 더욱 악화시키고 있다고 하겠다.

한편 공해문제를 해결하는 접근방식은 크게 두 가지 즉, 화학적·의학적·화학공학적 등 자연과학적인 방법과 정책수립모형을 통한 사회과학적 방법(시스템공학 또는 OR 기법 등)으로 나누어 볼 수 있는 바 (Jackson and Wohlers, 1972), 본 적용연구에서는 후자의 방법에 입각하여 설정된 예산의 범위 내에서 일정한 환경기준치에 도달하기 위한 합리적인 대체방안을 수리적 모형에 의해 제시하고자 한다. 대도시의 대기오염문제를 사회공학적인 방법, 그 중에서도 수리계획모형 접근방식을 취한 기존의 연구로는 대표적인 것이 Kohn (1978), Trijonis (1972) 및 Atkinson and Lewis (1974)의 선형계획모형을 들 수 있겠다. 그런데 이들이 사용한 선형계획모형을 사용하려면 정책입안자에게 사전에 오염물질별 최대허용배출량에 관련된 명확한 정보를 제시해야 하는 어려움이 따른다. 또한 선형계획모형과 같은 단일목적계획모형에서 제시하는 최적대안은 본 연구에서 다루게 될 다목적계획모형에서 제시하는 여러 대안들 가운데 하나에 불과하며 이 또한 반드시 유효해 (efficient solution)가 된다는 보장이 없다 (이창효와 김형욱, 1985).

결국, 대도시 대기오염문제와 같은 환경문제는 다수요인의 복합성과 목적가치의 다원성 등을 내포하고 있는 복잡한 시스템에 관련된 의사결정문제이므로 선형계획모형과 같은 전통적인 단일목적계획모형만으로는 해결하기가 쉽지 않으며, 복수목적 내지 다수의 평가기준을 감안한 다목적계획모형 (multiobjective programming)을 적용할 필요가 있다. 이에, 본 연구에서는 다목적계획모형의 하나인 대화형 ϵ -제약법을 통해 부산시 대기오염문제의 해결방안을 모색해 보고자 시도하였다.

3. 수리계획모형의 적용

3.1 모형의 개요

환경문제와 같은 복잡한 공공문제에 있어 정책입안자 내지 의사결정자는 종종 상충하는 다목적에 입각하여 여러 대안중 어느 하나를 선택하게 된다. 여기서 어떤 대안을 선정한다는 것은 이들 상충하는 목적들을 놓고 교환절충 (trade-off)을 시도하는 것이라고 보겠는데, 이러한 교환절충에 있어서는 단지 유효대안 (efficient alternatives)만이 그 대상이 되어야 한다. 어떤 대안이 유효하다는 것은 어느 하나의 목적함수치를 개선시키기 위해 적어도 다른 어느 하나의 목적함수치를 열화시켜야만 되는 경우를 말한다.

위와 같은 다목적에 지닌 의사결정문제를 계량적 접근방식으로 해결하고자 하는 기법을 수리계획법 중에서도 일괄적으로 다목적계획법이라 하며, 이에 는 지금까지 여러 기법들이 개발되어 소개되고 있다 (Shin and Ravindran, 1991; Lofti et al., 1992; Buchanan, 1994; Evans, 1984).

이창효와 김형욱 (1985)이 개발한 대화형 ϵ -제약법도 다목적계획법의 하나로서, 유효한 대안중 의사결정자의 선호도 (priority)가 가장 높은 대안 즉, 선호해 (preferred solution)를 찾아내기 위하여, 의사결정자와 분석전문가가 서로 협의해 가면서 의사결정자의 선호도를 점진적으로 규명해 가는 절차를 밟는 대화형 접근방식으로 특히 환경문제와 같이 직접적으로 다차원 우선순위에 대한 가중치부여가 거의 불가능한 문제에 대해서는 매우 유효하다고 하겠다.

이제 오염물질의 종류가 N 개, 오염원이 u 개, 규제대책방안이 r 개이고, 대상년도의 대기오염감소 소요되는 예산이 T 라고 할 때의 다목적계획모형을 설정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & (f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x)) & (1) \\ \text{s.t.} \quad & Ax \leq s & (2) \\ & c'x \leq T & (3) \\ & x \geq 0 & (4) \end{aligned}$$

여기서, x 는 $(r \times 1)$ 의 벡터로서 규제대책방안의 활동수준을 나타낸다.

$f(x)$ 는 $(N \times 1)$ 의 벡터로서 그 구성원소인 $f_i(x) = \sum_{j=1}^r b_{ij}x_j$, $i=1, \dots, N$ 은 오염물질별 배출규제를 나타내는 목적함수이다 (b_{ij} 는 규제대책방안 j 의 단위당 활동수준에 의해 감소되는 오염물질 i 의 양을 말한다).

A 는 $(u \times r)$ 의 행렬로 구성원소인 a_{ij} 는 규제대책방안 j 의 단위당 활동수준에 의해 규제되는 오염원 k 의 양을 가리킨다.

s 는 $(u \times 1)$ 의 벡터로 오염원의 크기를 나타낸다.

c 는 $(r \times 1)$ 의 벡터로 단위당 오염방지비용을 나타낸다.

T 는 대상년도의 대기오염감소에 소요되는 예산을 가리킨다.

식 (1)~(4)를 대화형 ϵ -제약법에 의해 풀려면 기준목적함수 f_N 을 설정한 후, ϵ -제약문제를 다음과 같이 형성하면 된다 (이창효와 김형욱, 1985).

$$\text{Maximize } f_N(x) \quad (5)$$

$$\text{s.t. } Ax \leq s \quad (6)$$

$$c'x \leq T \quad (7)$$

$$f_i(x) \geq \epsilon, \quad i=1, \dots, N-1 \quad (8)$$

$$x \geq 0 \quad (9)$$

여기서 대화형 접근방식에 입각하여, 식 (5)~

(9)에 의해 산출된 하나의 유효해에서 의사결정자가 설정한 또 다른 유효해로 이동하면서 반복처리 과정을 밟게 되며, 의사결정자가 현재의 해에 만족하거나 해법절차상 더 이상의 반복을 행할 수 없을 때 최종해 즉, 선호해가 얻어지는 것으로 한다.

3.2 부산시 대기오염문제에의 적용

3.2.1 이동오염원별 오염물질배출량 산정

인체에 해로운 자동차의 유해배출가스는 주로 입자상물질 (TSP), 질소산화물 (NOx), 탄화수소 (HC) 및 일산화탄소 (CO)로 구성되며, 이의 배출량은 자동차의 주행조건 즉 평균속도, 정지가동, 가속, 정속 및 감속의 상태와 도로조건 및 기후조건에 따라 상이하다 (조강래 외, 1993).

특히 대기오염규제전략은 순간적으로 실시할 수 없으므로 대기질 (air quality)을 계획하는 과정에서 중요한 일은 배출량을 예측하는 일이다. 조강래 외 (1991)의 연구결과를 토대로 기준년도인 1994년의 이동오염원에 의한 대기오염물 배출량과 대상년도인 2000년의 장래 배출량 추정치를 제시하면 Table 2와 같다.

Table 2. Mobile sources emission inventory (ton/year)

Mobile Sources	1994 emissions					2000 emissions				
	CO	HC	NOx	TSP	Total	CO	HC	NOx	TSP	Total
Passenger Car(PC)	20516	2847	2523	65	25951	27922	4895	5117	0	37934
Taxi	12214	1483	1762	0	15459	31080	3749	4033	0	38862
Small-Gasoline Bus(SGB)	681	55	157	0	893	6248	503	1439	0	8190
Small-Diesel Bus(SDB)	1518	143	1414	342	3417	2050	137	2734	644	5565
Medium Bus(MB)	66	30	51	20	167	119	42	112	48	321
Heavy Bus(HB)	4714	715	4613	710	10752	6059	764	7720	1277	15820
Small Truck(ST)	4297	441	3306	838	8882	7119	536	7168	1755	16578
Medium Truck(MT)	1759	788	1339	536	4422	2576	904	2423	1041	6944
Heavy Truck(HT)	34440	4790	29732	4646	73608	49915	5500	53857	8846	118118
Motor Cycle(MC)	3190	1092	29	3	4314	4376	920	56	0	5352
Total	83395	12384	44926	7160	147865	137464	17950	84659	13611	253684

는 판매시 일시불 비용으로 하고 유지비, 운전비 및 기타 비용은 매년 균일하다고 보았다.

3.2.3 대기오염 절감예산의 설정

우선 이동오염원의 오염물질별 연간 최대배출허용량에 도달하는데 소요되는 최소비용을 선형계획법(linear programming)에 의해 구한다. 이에 필요한 대상년도의 오염물질별 최대배출허용량은 환경부에서 제시한 대기오염도목표(차승환, 1994)를 참고로 하여 설정하였다. Kohn(1978)이 개발한 선형계획모형에 의해 연간최소비용을 구하면 39,460,290천원이 되며 이를 참고로 하여 이동오염원에 기인된 대기오염을 절감하는데 소요되는 예산을 300억원으로 설정하였다.

3.2.4 대화형 ϵ -제약법의 적용

(1) 잉여목적함수의 탐색

오염물질별 배출규제를 나타내는 4개의 목적함수 가운데 유효해집합을 형성하는데 불필요한 잉여목적함수가 존재하는지를 탐색한다. 우선, 목적함수계수벡터로 구성된 행렬 $B = \{b^i \mid b^i \in R^r, i = 1, \dots, M\}$ 에서 $N \leq r$ 일 때, Gauss-Jordan소거법을 적용하여 산출한 B 의 계수(rank) $\rho(B) = N$ 이면, 모든 벡터가 선형독립이 되어 잉여목적함수가 존재하지 않으며 단위벡터가 아니면서 비음의 계수를 갖는 벡터가 존재하면 이에 해당하는 목적함수가 곧, 잉여목적함수가 된다.

Gauss-Jordan소거법을 적용하여 단위벡터가 최대 발생할 때의 목적함수계수행렬을 구하면 Table 3과 같으므로 본 문제에서는 $\rho(B) = N = 4$ 가 되어 잉여목적함수가 존재하지 않음을 알 수 있다.

(2) 기준목적함수의 선정

일반적으로 대기오염절감비용과 대기질 간의 교환관계(trade-off)는 단순하지가 않다. 그러나 대기질은 여러 상이한 오염물질에 의해 영향을 받으므로 이들 오염물질 간에는 교환관계가 존재한다. 그런데 대기오염규제전략을 입안하거나 시행하는데

있어, 어떤 오염물질의 배출규제에 역점을 둘 것이냐는 개개 오염물질 가운데 어느 것이 가장 유해한 오염물질인가에 귀착되는데 이 또한 그리 단순하게 해결될 문제는 아니다.

그러나 대화형 ϵ -제약법에서는 모든 목적에 대해 그 중요도를 부여할 필요는 없으며 단지 기준목적함수로 삼게 될 목적만을 선정하면 된다. 즉, 중요도가 가장 낮은 목적을 선정하는 것으로 족하다. 또한 본 연구의 연구대상이 부산시의 이동오염원에 기인한 대기오염문제이므로 이에 초점을 맞추어 아래에 제시한 관계문헌을 통한 연구결과와 자동차공해연구소 및 부산지방환경청의 대기오염 관련전문가와와의 면담결과를 토대로 CO의 배출규제를 나타내는 목적함수 f_4 를 기준목적함수로 삼았다.

우선, 질소산화물은 도시대기오염 특히 광화학스모그의 원인물질로 알려져 있다. 또한, NOx는 그 자체가 직접적으로 눈에 자극을 주지는 않지만, NOx가 점막 분비물에 흡착되어 산화성이 강한 질산을 형성하므로 기관지염, 폐기종, 폐염과 같은 기관지염을 유발시키고 섬유성 폐색성 기관지초염 및 폐암까지도 일으킬 수 있다(정용, 1991). 따라서 대기오염관리상 매우 중요한 오염물질로 취급되고 있고 이를 줄이기 위하여 세계 각국이 다각도로 방지기술개발에 많은 노력을 경주하고 있다. 우리나라에서도 앞으로 더욱 문제가 될 것으로 전망되기 때문에 보다 적극적인 규제대책이 필요할 것으로 보인다(최덕일 외, 1984).

차량에서 배출되는 입자상물질(TSP)은 부산의 경우 1993년을 기준으로 전체배출량(22,226톤)의 30.4%인 6,766톤(환경처, 1994)으로 매우 높은 비중이라고는 볼 수 없겠다. 그러나 우리나라의 경우 경유자동차의 보유비율(34%)이 일본(17%) 등 선진국에 비하여 다소 높은 편(최홍진, 1994)으로 이에서 배출되는 매연은 도시미관을 해치는 주원인이 되고 또한 연소과정에서 나오는 역겨운 냄새와 함께 사람이 호흡을 할 때에 불쾌한 감을 주며 심할 경우에는 시각장애를 일으키기도 한다. 특히 이 매연은 발암성물질이라는 점에 관심을 두어야

할 것이다.

탄화수소의 경우에는 규제대상물질이 막연하고 무해한 CH_4 등의 배출이 제한을 받게 된다는 견해도 있긴 하지만, 자동차에서 배출되는 탄화수소는 종류가 다양하며, 이에 인체에 해로운 독극물도 포함되어 있다. 또한 탄화수소는 그 자체로서도 유해한 성분들이 있으나 광화학작용에 의해서 알데히드(aldehyde)를 위시한 각종 산화제를 형성하게 될 때 그 피해가 더욱 크게 나타난다. 결국 탄화수소는 그 자체보다는 광화학스모그의 산화제로 변형함으로써 더 큰 피해를 주게 되므로 산화제와 탄화수소를 분리하여 관리대책을 세울 수 없는 밀접한 관계(한국과학기술원, 1982)에 있다고 하겠다.

일산화탄소는 아황산가스와 함께 대기오염물질의 핵심이 되어 인체의 각 조직에의 산소운반을 저해하는 요인이 되어 교통사고의 간접적 원인이 되기도 한다. 또한, 무색·무미·무취의 가스로서 피부나 점막에 대한 자극이 없어 감지할 수가 없으며(최홍진, 1994) 혈액중에 산소를 배체하므로 혈액의 산소운반 능력을 감소시키기 때문에 조직세포로 공급되는 산소의 부족으로 조직의 저산소증을 일으키기도 한다(정용, 1991).

이제까지는 주로 오염물질이 인체에 미치는 피해를 중심으로 고찰해 보았는데 최근 연구조사 결과에 의하면 전체적으로 서울의 경우 대기오염의 중요성이 아황산가스, 입자상물질, 일산화탄소에서 광화학스모그와 밀접한 관계가 있는 이산화질소, 탄화수소 및 오존으로 전환되고 있다고 하며(서울시정개발연구원, 1994) 이는 부산의 경우도 마찬가지로 적용해 볼 수 있다. 결론적으로 이동오염원에 국한하여 논할 때, 일산화탄소는 다른 오염물질에 비해 상대적으로 낮은 비중을 차지하고 있다고 하겠다.

(3) 유효해집합과 만족화원리

Simon (1964)은 복수목적의 지닌 복잡한 의사결정상황하에서의 최선의 의사결정이라 모든 목적에 대하여 최소한도의 만족수준을 충족시키는 결정이라고 언급한 바 있다. 말하자면 x^0 를 유효해벡터,

ϵ 을 만족수준을 나타내는 벡터라고 할 때 의사결정자는 $f(x^0) \geq \epsilon$ 를 충족시키는 만족해를 찾게 된다. 여기서, $f(x^0) \geq \epsilon$ 를 충족시키는 $x^0 \in X$ 를 ϵ 에 관한 만족할 만한 해라고 부른다. 또한 Simon은 만족수준벡터는 정적이거나 고정적인 것이 아니며, 대체안에 관련된 또 다른 새로운 정보를 입수함으로써 달라질 수도 있다는 점을 지적하고 있다(Soland, 1979).

따라서 특정만족수준 ϵ 에 관한 만족해 $x^0 \in X$ 를 찾은 후에는 보다 높은 만족수준인 $\epsilon' \geq \epsilon$ 에 대해서도 x^0 가 만족해가 되는지를 검토해 볼 필요가 있다. 한편 만약 일정한 만족수준 ϵ 에 관한 만족해 $x^0 \in X$ 가 존재하지 않는다면 이 경우 의사결정자는 만족수준을 종전보다 낮은 $\epsilon'' \leq \epsilon$ 에서 만족해를 찾아야 한다. 이와 같은 절차를 반복함으로써 의사결정자가 받아들여기에 충분한 만족해 즉, 선호해에 도달할 수 있다.

(4) 만족대안의 도출

사전에 설정한 예산 $T=300$ 억원과 기준목적함수 f_4 그리고 이동오염원과 규제대책방안을 보여주는 Table 4의 제반 입력자료를 이용하여 ϵ -제약문제인 식 (5)~(9)를 형성한다.

한편, ϵ 값이 취할 수 있는 범위(이창효와 김형욱, 1985)는 Table 5와 같으며 ϵ 의 초기치 ϵ^0 는 기준목적 f_4 만을 대상으로 하여,

$$\text{Maximize } f_4(x) \\ x \in X$$

에서 얻은 최적해 x^* 를 f_1, f_2, f_3 에 대입하여 구한 $f_1(x^*), f_2(x^*), f_3(x^*)$ 로 한다(Table 5 참조). 즉, $\epsilon^0 = 2,201, \epsilon^1 = 13,536, \epsilon^2 = 7,089$ 가 된다. 이때 규제대책방안의 활동수준을 의미하는 유효해 x^{01} 은 아래와 같으며 $f_4 = 67,721$ 이 된다.

$$x_2 = 7,037 \quad x_4 = 705,077 \quad x_6 = 57,446 \quad x_{11} = 43,685 \\ x_{14} = 84,778 \quad x_{21} = 18,939 \quad x_{29} = 86,130 \quad x_{30} = 254,626$$

의사결정자와의 질의응답 결과, 의사결정자의 만

Table 4. Emission sources and control methods

Sourcek	S _k :Source magnitude in 2000	Control method j	B _{ij} :Emission reduction per control unit (ton/year)				C _j :Annual cost per control unit(1000won)
			TSP	NO _x	HC	CO	
PC	712113	1. Traffic adaptive control system	-	.0018	.0015	.0271	3
		2. Improve vehicle inspection program	-	-	.0017	.0311	122
		3. EGR-CSR system	-	.0100	-	-	81
		4. Limit VKT in congested areas	-	.0018	.0015	.0271	0
Taxi	57446	5. Traffic adaptive control system	-	.0122	.0098	.0816	3
		6. Improve vehicle inspection program	-	.0033	.0259	.4345	122
		7. EGR-CSR system	-	.0670	-	-	81
		8. Limit VKT in congested areas	-	.0122	.0098	.0816	0
		9. Non-adjustable engine parameters	-	.0061	.0098	.0815	18
SGB	43685	10. Traffic adaptive control system	-	.0026	.0045	.0400	3
		11. Improve vehicle inspection program	-	-	.0031	.0460	122
SDB	84778	12. Catalytic trap oxidizer	.0062	.0236	-	-	367
		13. Redesign diesels	.0062	-	-	-	720
		14. Non-adjustable engine parameters	-	.0024	.0170	.0052	18
MB	3959	15. Catalytic trap oxidizer	.0111	.0280	-	-	367
		16. Redesign diesels	.0111	-	-	-	720
HB	18939	17. Catalytic trap oxidizer	.1353	.4263	-	-	367
		18. Redesign diesels	.1353	-	-	-	720
		19. Improve maintenance of buses	.0541	-	-	-	600
		20. Opacity regulations	.1353	-	-	-	240
		21. Limit VKT in congested areas	.0271	.0853	.0261	.1949	0
ST	208738	22. Catalytic trap oxidizer	.0072	.0253	-	-	367
		23. Redesign diesels	.0072	-	-	-	720
MT	53848	24. Catalytic trap oxidizer	.0176	.0445	-	-	367
		25. Redesign diesels	.0176	-	-	-	720
HT	86130	26. Catalytic trap oxidizer	.0980	.5946	-	-	367
		27. Redesign diesels	.0980	-	-	-	720
		28. Opacity regulations	.0980	-	-	-	240
		29. Limit VKT in congested areas	.0196	.1191	.0188	.1446	0
MC	254626	30. Eliminate two-cycle motorcycles	-	-	.0084	.019	60

Total possible reductions all sources units controlled (ton/year): TSP 44,707 Nox 96,741 HC 12,550 CO 155,778

족수준을 밑도는 목적함수 f_1 (TSP), f_2 (NO_x) 의 여 (이때 f_3, f_4 는 집합 A^- 에 속하는 것으로 평가한 값은 이를 증가시키는 대신 (이때 f_1, f_2 는 집합 A^+ 다) ϵ 를 다시 설정한 결과 $\epsilon^i, i=1,2,3$ 은 다음과 에 속하는 것으로 평가한다)에 만족수준을 상회하 같다.
는 f_3 (HC), f_4 (CO)의 값은 이를 감소시키기로 하

Table 5. Range of ε

	f_1 (TSP)	f_2 (NO _x)	f_3 (HC)	f_4 (CO)
x^1	11,233	580	0	0
x^2	8,594	52,575	2,208	55,988
x^3	2,201	13,573	8,456	67,629
x^4	2,201	13,536	7,089	67,721
u_i^*	11,233	52,725	8,456	67,721
l_i^{**}	2,201	580	0	0

* : maximum value of ε .
 **: minimum value of ε .

Table 6. A search for preferred solution

k	ε (TSP, NO _x , HC)	$f_4(f_1, f_2, f_3)$ CO(TSP, NO _x , HC)	A^+	A^0	A^-
0	(2201,13536,7089)	67721 (2201,13536,7089)			
1	(6717,33131,5722)	50392 (6717,33131,5722)	f_1, f_2	—	f_3, f_4
2	(7093,34764,5449)	40718 (7093,34764,5449)	f_1, f_2	—	f_3, f_4
3	(7093,38356,5148)	53846 (7093,38356,5148)	f_2, f_1	f_1	f_3
4	(7093,39793,5148)	50522 (7093,39793,5148)	f_2	f_1, f_3	f_1
5	(7093,40440,5148)	42274 (7093,40440,5148)	f_2	f_1, f_3	f_1
6	(7093,40871,5148)	36779 (7093,40871,5148)		f_1, f_2, f_3, f_1	

$$\varepsilon_1^1 = 6,717 \quad \varepsilon_2^1 = 33,131 \quad \varepsilon_3^1 = 5,722$$

이를 ε -제약문제의 새로운 우변항으로 삼아 최적치를 구하면, 두번째 반복과정에서의 유효해 x^{02} 가 얻어지며 이때 $f_1=6,717$, $f_2=33,131$, $f_3=5,722$ 그리고 $f_4=40,719$ 가 얻어진다. 유효해 x^{02} 와 f_i 의 값을 의사결정자에게 제시하여 그의 의견을 물은 결과, f_1 (TSP)와 f_2 (NO_x)는 증가를 원하는 대신에 f_3 (HC)는 감소해도 좋다는 견해를 보였으며 이를 토대로 하여 ε_2^2 를 설정한 결과,

$$\varepsilon_1^2 = 7,093 \quad \varepsilon_2^2 = 34,764 \quad \varepsilon_3^2 = 5,449$$

가 되었다. 식 (5)~(9)에 의해 유효해 x^{03} 와 이에 대응하는 보다 개선된 f_i 의 값 즉, $f_1=7,093$, $f_2=34,764$, $f_3=5,449$ 그리고 $f_4=40,719$ 를 산출하였다.

결국, Table 6에 제시된 바와 같이 6차의 반복과정을 거친 끝에 의사결정자는 모든 f_i 의 값 즉, $f_1=$

7,093, $f_2=40,871$, $f_3=5,148$ 그리고 $f_4=36,779$ 가 자신의 최소만족수준에 가까운 해로 평가하였으며 이때의 유효해가 우리가 찾는 선호해 즉, 최적대안이 된다고 하겠다.

한편, 매 반복과정마다 의사결정자가 보다 용이하게 목적간의 교환절충을 행할 수 있도록 오염물질 i 의 배출절감량을 가리키는 유량 (flow) f_i 값 외에 정량 (stock) q_i 의 증분량 Δq_i 의 값을 제시해 줄 수도 있는데 이를 위해서는 Zimmer and Larsen (1965)이 개발한 다음과 같은 유량과 정량과의 관계식을 사용해 볼 수 있다.

$$q_i = m_i + b_i$$

여기서 q_i 는 오염물질 i 의 연간평균대기농도, m_i 는 사전에 결정되어 있는 상수 그리고 b_i 는 규정배정농도 (Kohn, 1971)를 말한다.

4. 분석결과 및 검토

지금까지 대상년도인 2000년에 부산시의 이동오염원에 의한 오염물질배출량을 주어진 예산의 범위내에서 오염물질별로 어느 수준까지 감소시키는 것이 가장 바람직하며, 이때의 최적규제대안은 어떤 것인가를 수리계획법 (mathematical programming)인 대화형 ϵ -제약법에 의해 산출해 보았다.

결국, 주어진 예산의 범위내에서는 TSP 7093톤/년, NOx 40871톤/년, HC 5148톤/년 그리고 CO는 36779톤/년을 절감시키는 것이 가장 바람직하다는 결과를 얻었다. 이를 2000년도의 절감필요량인 TSP 7085톤/년, NOx 44551톤/년, HC 6097톤/년, CO 50368톤/년과 대비해 보면 TSP와 NOx는 각각 목표량인 절감필요량의 100.1%, 91.7% 그리고 HC와 CO는 각각 84.4%, 73.0%에 해당하는 수준이다. 이를 통해 알 수 있는 것은 주어진 예산이 한정되었을 때 예산을 효율적으로 배분하기 위해 오염물질 가운데 TSP와 NOx를 절감하는 것에 더 큰 비중을 두었음을 알 수 있다.

그리고 최적규제대책방안 (Table 7)으로서 자가용승용차에 대해서는 중심가의 교통량제한조치를 취하는 것이 가장 바람직한 해결방안으로 판명되었는 바, 이의 구체적인 실시방안으로는 도심으로

진입하는 차량에 대한 도심통행세 징수, 주행세 도입, 도심주차시설통제등을 들 수 있겠다. 그런데 이러한 방안들은 관리상의 어려움을 지니고 있으므로 시행과정에서의 부작용을 최소화 할 수 있는 세심한 보완조치가 요구된다고 하겠다. 영업용승용차인 택시에 대해서는 중심가의 교통량제한조치와 병행하여 차량검사제도개선방안이 요구된다. 차량검사제도와 관련하여 조강래 외 (1992)는 연구보고서를 통해 촉매부착자동차 (출고후 50,000km 또는 5년동안 배출가스를 보증하도록 되어 있는 '90년도 이후에 생산된 자동차)의 정비점검에 의한 배출가스 저감효과가 매우 높다고 밝히고 있으며 특히, LPG자동차가 가솔린 자동차보다 일상적인 정비·점검을 통해 배출가스를 더 크게 저감시킬 수 있다고 한다. 소형 (15인승 이하)가솔린버스에 대해서는 첨단신호제어시스템의 적극적인 도입이 필요하다. 첨단신호제어시스템은 실시간제어로 교통류 변화에 대응하고 혼잡상황, 도로조건등을 수집하는 기능을 갖추므로써 기존 교통신호제어체계의 제어 방법 및 기능상의 한계를 개선할 수 있게 된다 (이인영, 1994). 특히 부산시는 재정형편상 도로를 획기적으로 늘릴 수 없는 실정이므로 교통신호체계등을 개선함으로써 교통난 해결과 함께 대기오염물질의 감소효과 (홍민선 외, 1993)도 기대할 수

Table 7. Opimal control strategy

Variable number	Control method description	Opimal activity level
4	Limit VKT* in congested areas for passenger car	712113
6	Improve vehicle inspection program	4145
8	Limit VKT* in congested areas for taxi	53301
10	Traffic adaptive control system	43685
14	Non-adjustable engine parameters	84778
17	Catalytic trap oxidizer	9305
21	Limit VKT* in congested areas for heavy bus	9634
26	Catalytic trap oxidizer	49551
29	Limit VKT* in congested areas heavy truck	36579
30	Eliminate two-cycle motorcycles	103951

* : Vehicle kilometers travelled.

있다.

소형디젤버스에 대해서는 연료조절장치 임의조작 방지를 위한 엔진부속품봉인제도를 도입할 필요가 있다. 대형(26인승 이상)디젤버스에 대해서는 중심가의 교통량제한조치와 함께 매연산화여과장치를 설치할 필요가 있다. 디젤자동차의 배출가스 방지기술은 크게 엔진내에서의 오염물질 저감기술과 후처리에 의한 저감기술로 양분할 수 있는데 매연산화여과장치는 후자에 해당하는 것으로 이 장치는 매연뿐만 아니라 CO 및 HC도 산화시켜 정화하며 특별한 재생장치가 필요없이 운행중인 자동차에 비교적 쉽게 적용할 수 있는 장치이다(김양권 외, 1987). 대형(적재량 3톤 초과) 트럭에 대해서는 매연산화여과장치의 설치와 병행하여 중심가의 교통량제한조치를 취할 필요가 있다. 현재 부산시의 주요 간선도로는 컨테이너 수송차량등 화물차량의 통행율이 15~28%로 매우 높으므로 교통체증과 함께 대기오염을 악화시키는 요인이 되므로 이들 대형화물차량의 도심진입을 억제하는 대책을 강구할 필요가 있다. 부산시민의 교통의식에 관한 설문조사(동남개발연구원, 1993)를 실시한 결과, 대부분의 응답자(81.1%)가 대형화물차량의 간선도로 진입을 제한하고 진입금지 구간을 확대하는 것에 찬성하고 있는 것으로 나타나기도 했다. 끝으로 이륜자동차에 대해서는 2-사이클 엔진을 4-사이클 엔진으로 교체하는 방안을 생각해 볼 수 있다.

5. 결 론

부산시의 이동오염원(자동차)에 기인한 대기오염문제를 해결하기 위하여 정책수립모형을 통한 사회공학적 방법을 적용해 보았다. 설정된 예산의 범위내에서 오염물질별로 어느 수준까지 배출량을 감소시키는 것이 가장 바람직하며 이때의 합리적인 대책방안은 어떤 것인가를 수리계획법의 하나인 대화형 ϵ -제약법에 의해 제시해 보았다.

그런데 여기서 사용한 모형은 대기오염에 관련

된 실제문제를 매우 단순화하여 형성된 것으로 여러가지 제약요인을 내포하고 있다고 하겠다. 즉, 이동오염원의 오염물질로서 주요 오염물질인 입자상물질(TSP), 질소산화물(NOx), 탄화수소(HC) 및 일산화탄소(CO)만을 대상으로 하였으며 여타의 오염물질 가령 아황산가스, 연화합물등은 고려하지 않았다. 그리고 차량오염물 저감대책방안에 있어서도 자료입수의 곤란으로 기술적인 문제, 비용산출상의 문제등을 완전히 고려하지는 못했다.

따라서 본 연구에서 제시한 결과는 현실적인 정책자료를 제시하는데 있다기 보다는 주로 대기오염문제에 있어 수리계획법이 어떻게 이용가능한가를 보여준 실례라 하겠다. 즉, 본 연구의 결과에 나타난 수치 하나 하나의 의미를 찾기 보다는 모형의 구성 및 그 전개방안에 초점을 맞추는 것이 좋을 것이다.

참 고 문 헌

- 교통개발연구원, 1995, 교통연구속보 1994년판 모음집, 144pp.
- 김양권 외, 1987, 경유자동차 오염물질 저감대책에 관한 연구(I), 국립환경연구원보, 9, 313~327.
- 김종석, 1994, '94년도 대기보전을 위한 정책방향, 첨단환경기술, 2, 2~7.
- 동남개발연구원, 1993, 부산시 교통문제에 관한 시민의식조사, 91pp.
- 동남개발연구원, 1994, 부산시 교통체증지역 교통소통 완화방안, 120PP.
- 부산상공회의소 부산경제연구원, 1992, 부산경제백서 1991년도판, p.282.
- 부산일보사, 1995, 부일년감 1995년판.
- 서울시정개발연구원, 1994, 서울시 대기오염특성연구, 260pp.
- 양방철, 1991, 자동차 공해방지대책 추진방향, 대기보전세미나: 자동차공해방지대책(한국대기보전학회), 79~106.

- 이인영, 1994, 서울시 신신호 교통제어 시스템, 대한교통학회지, 12(2), 65~74.
- 이창효·김형욱, 1985, 대화형다목적계획법에 관한 연구, 경영학연구 (한국경영학회), 15(1), 57~80.
- 정용, 1991, 자동차 배출물질과 건강장해, 대기보전 세미나: 자동차공해방지대책 (한국대기보전학회), 1~75.
- 조강래 외, 1987, 자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량산정에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 3(1), 55~64.
- 조강래 외, 1991, 도시지역 대기질 개선에 관한 연구 (III)-이동오염원의 오염물질 배출부하량 산정을 중심으로, 국립환경연구원, 158pp.
- 조강래 외, 1993, 자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산출에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 69~77.
- 조강래, 1994, 자동차 배출가스에 의한 대기오염과 그 방지를 위한 기술적 대안, 기아환경심포지움-자동차산업과 환경보전, 27~39.
- 차승환, 1994, 대기환경보전법해설, 자동차공해측정검사 (환경처 환경공무원교육원), 3~19.
- 최덕일 외, 1984, 대기오염물질 배출허용기준 개정을 위한 조사연구 (II), 국립환경연구소보, 6, 11~22.
- 최홍진, 1994, 자동차공해방지대책, 자동차공해측정검사 (환경처환경공무원교육원), 21~34.
- 한국과학기술원, 1982, 대기환경기준 설정을 위한 연구, 144pp.
- 한국기계연구소, 1984, 자동차 배출가스측정용 비분산적외선 CO/HC 측정기개발, 과학기술처, 3.
- 홍민선 외, 1993, 대도시 교통신호시스템에 따른 대기오염물질 배출량 변화에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 93~100.
- 환경부, 1995, 21세기 환경비전, 환경관련 보도자료 ('95. 6월).
- 환경처, 1994, 대기오염물질배출량 ('93), 89pp.
- Atkinson, S. E. and D. H. Lewis, 1974, A cost effective analysis of alternative air quality control strategies, J. Environ. Eco. Mgt., 1, 237~250.
- Buchanan, J. T., 1994, An experimental evaluation of interactive MCDM methods and the decision making process, J.Opl Res., 45(9), 1050~1059.
- Evans, G. W., 1984, An overview of techniques solving multiobjective mathematical programs, Management Science, 30(11), 1268~1282.
- Jackson, W. E. and H. C. Wohlers, 1972, Regional Air Pollution Control Costs, Journal of the Air Pollution Control Association, 22(9), 679~684.
- Kohn, R. E., 1978, A linear programming model for air pollution control, MIT Press.
- Kohn, R. E., 1971, Optimal air quality standards, Econometrica, 39(6), 983~995.
- Lofti, V., Stewart, T. J. and S. Zionts, 1992, An aspiration-level interactive model for multiple criteria decision making, Computers Ops Res., 19(7), 671~681.
- Shin, W. S. and A. Ravindran, 1991, Interactive multiple objective optimization: survey 1-continuous case, Computers Ops Res., 18(1), 97~114.
- Simon, H. A., 1964, On the concept of organizational goal, Administrative Science Quarterly, 9, 1~12.
- Soland, R. M., 1979, Multicriteria optimization: a general characterization of efficient solutions, Decision Sciences, 10(1), 36.
- Teng, J. Y. and G. H. Tzeng, 1994, Multicriteria evaluation for strategies of improving and controlling air quality in the super city: a case study of Yaipei City, Journal of Environmental Management, 40, 213~229.
- Trijonis, Jr., J.C., 1972, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Zimmer, R. E. and R. I. Larsen, 1965, Calculation air quality and its control, J. Air Poll. Control Assoc., 15(12), 565~572.