

대기환경오염물질의 배출량 제어를 위한 경제부하배분의 해석

김용하 · 정민화* · 송길영*

인천대학교 전기공학과, *고려대학교 전기·전자·전파공학부

Analysis of Economic Load Dispatch for the Atmospheric Emission Control in Power Systems

Yong-Ha Kim, Min-Hwa Jeong* and Kil-Yeong Song*

Department of Electrical Engineering, Incheon University

*School of Electrical Engineering, Korea University

요 약

본 연구는 전력계통의 화력발전소로부터 배출되는 NO_x 및 SO₂와 같은 대기환경오염물질을 고려한 새로운 경제부하배분법을 제시한다. 제안된 방법은 총배출량 제약, 지역별 배출량 제약 그리고 이들의 동시제약을 만족하면서 화력발전기의 출력을 계획하는 것에 대해 설명되어진다. 또한, 모든 부하배분의 대체안이며 배출량과 총연료비 사이의 상호상충관계를 나타내는 Trade-Off 곡선에 의해 배출량과 총연료비 사이의 감도해석이 이 알고리즘에 적용된다. 한편, 이 제안된 방법은 개별적 환경피해(NO_x, SO₂ 등)의 상대적 가중치와 총환경비용의 함수로써 경제부하배분이 이것에 의해 어떻게 변화되는지를 해석한다. 본 연구에서 제안된 방법을 시험계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

Abstract— This paper presents a new economic load dispatch considering atmospheric emissions such as NO_x and SO₂ caused by the operation of fossil-fueled thermal generation in power systems. The proposed method is described for scheduling their output of thermal power units so as to comply with total emission constraint, area emission constraint and the both of those constraints. Also, by using a trade-off curve, representing all dispatch alternatives and conflict between the emission and the fuel cost, the sensitivity analysis of the emission and the fuel cost is applied to this algorithm. By the way, this proposed method is analyzed how dispatch changes as a function of the total environmental cost, and as a function of the relative weighting of individual environmental insults, e.g. NO_x and SO₂. By applying the proposed method to the system, the usefulness of this method is verified.

1. 서 론

대기환경오염물질의 배출량 제어를 위한 경제부하배분이란 종래의 경제부하배분 문제에 대기환경 오염물질의 배출량 제약을 고려하고 여기에 환경비용의 개념을 이용하여 대기환경오염물질의 배출량을 적정하게 제어하면서 각 발전기의 출력을 계획하는 것이다.

현재 화력발전소의 대기환경오염물질은 이산화유황(SO₂), 질소산화물(NO_x), 먼지 등이 규제대상으로 되고 있으며 규제방식은 배출농도로 규제하고 있다. 그러나,

최근 화석연료의 연소로 나오는 대기환경오염물질에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 우리나라도 효과적인 대기환경오염물질의 배출량 저감을 위해 기존의 배출농도 규제방식과 병행하여 총량규제방식과 배출량 제어가 포함된 오존경보제(대기 오염도가 심각한 경우 오염원의 배출량 저감을 지시하는 방식)의 도입이 예상되고 있다. 특히, 환경문제가 지구최대의 문제로 부상할 것으로 예측되고 있는 가운데 국제적인 환경규제의 강화(지구환경 협약 등) 정책이 급속도로 추진될 것으로 보이며 대표적인 대기환경오염물질의 배출원이라 할 수 있

는 화력발전소의 경제부하배분(총연료비 최소화)도 환경적 측면에서 새롭게 다루지 않으면 안되는 상황까지 이르게 되었다.

전력계통에서 환경문제를 고려한 경제부하배분에 관한 연구는 1971년 NOx 배출량 최소화에 대한 연구가 Gent와 Lamont¹⁾에 의해 제안된 이래 효율적인 배출량 저감을 위해 총배출량 제약이나 오염물질의 비용화에 의한 방법²⁾, 연료질체를 수행하는 방법³⁾, 최적조류에 배출량 제약을 고려하는 방법⁴⁾ 등으로 대별되어지나 이러한 종래의 방법들은 배출량과 연료비 사이의 상호 상충 관계에서 적절한 배출량 제약치를 선정하는 문제와 배출량 제약시 실제로 필요한 지역별 배출량을 다루지 않고 있으며 또한 다차원에 의해 실질적으로 해를 구하기 힘든 2종 이상의 배출량을 동시에 고려하지 못하고 있다.

본 연구에서는 화력발전소에서 배출되는 대기환경 오염물질의 총배출량 및 지역별 배출량 제약을 고려할 수 있는 새로운 경제부하배분법을 개발하고 계통운용자가 배출량과 연료비 사이의 Trade-off 관계에서 모든 부하배분의 대체안을 상호비교하여 효과적인 운용점을 찾을 수 있도록 배출량과 연료비 사이의 감도(환경비용: 배출량을 미소분 감소시키기 위해 수반되는 연료비의 증가분)를 이용해 경제부하배분의 변화특성을 해석하였다. 한편, NOx와 SO₂와 같은 2종 오염물질의 고려에 있어서는 총연료비, NOx 배출량, SO₂ 배출량의 다목적 문제를 해석하기 위해 총환경비용과 개별 환경오염물질(NOx, SO₂ 등)의 상대적 가중치라는 개념을 도입하여 경제부하배분의 결과가 이것에 의해 어떻게 변하는지를 해석함으로써 총환경비용과 오염물질들의 상대적 가중치를 이용한 경제부하배분 해석의 유용성을 고찰하였다.

본 연구에서 제안한 방법을 시험계통¹⁰⁾에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 배출량 제약을 고려한 경제부하배분

대표적인 대기환경오염물질인 질소산화물 NOx(이산화유황 SO₂에 대해서도 배출량 제약을 고려한 경제부하배분의 알고리즘을 동일하게 적용할 수 있지만 해석의 중복을 피하기 위해 본 연구의 사례연구에서는 NOx만을 다루기로 함)의 총배출량 제약 및 지역별 배출량 제약의 유무에 따라 다음과 같은 4가지의 배출량 제약을 고려한 경제부하배분을 수행할 수 있다.

- (i) 배출량을 고려하지 않은 순수한 경제부하배분
- (ii) 총배출량만을 고려한 경제부하배분¹¹⁾
- (iii) 지역별 배출량만을 고려한 경제부하배분¹¹⁾

(iv) 총배출량과 지역별 배출량을 동시에 고려한 경제부하배분

2-1. 정식화

배출량 제약을 총배출량과 지역별 배출량으로 제약할 수 있도록 정식화하여 이들 제약조건을 만족시키면서 전체 화력발전기의 총연료비를 최소화하는 최적화 문제로 구성하였다. 한편, 배출량에 의한 경제부하배분의 결과를 명확히 하고 해석의 단순성을 위해 본 연구에서는 선로손실 및 출력변화율 등의 고려는 제외하는 것으로 하였다.

2-1-1. 목적함수

지역번호를 j , 각 지역별 발전기 번호를 i 라 하면 목적함수는 1시간 동안의 전체 화력발전기의 총연료비 F_{total} 을 최소로 하는 식 (1)로 구성된다¹⁰⁾.

$$\text{Min: } F_{total} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NG_j} f_{ij} (a_{ij} P_{ij}^2 + b_{ij} P_{ij}) \quad (1)$$

여기서, f_{ij} : 지역 j 에서 발전기 i 의 연료비 단위(\$/GJ)
 a_{ij}, b_{ij} : 지역 j 에서 발전기 i 의 연료소비량 계수
 P_{ij} : 지역 j 에서 발전기 i 의 출력(MW)
 NG_j : j 지역의 화력발전기수
 J : 지역수

2-1-2. 제약조건

(1) 총배출량 제약

대기환경오염물질의 배출량은 일반적으로 발전기의 연료소비량에 비례하기 때문에¹¹⁾ 시간당 총배출량 제약은 다음 식 (2)와 같은 함수제약으로 표현된다.

$$E_{total} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NG_j} \alpha c_{ij} (a_{ij} P_{ij}^2 + b_{ij} P_{ij}) \leq E^{limit} \quad (2)$$

여기서, c_{ij} : 지역 j 에서 발전기 i 의 배출량(kg/GJ)
 E^{limit} : 시간당 배출량 제약치(kg)
 α : 1 또는 0으로 총배출량 제약의 유무 표시

(2) 지역별 배출량 제약

지역번호 $j=1, 2, \dots, J$ 라하면 각각의 지역에 부과되는 시간당 지역별 배출량 제약은 식 (3)과 같다.

$$E_{area, j} = \sum_{i=1}^{NG_j} \beta_j c_{ij} (a_{ij} P_{ij}^2 + b_{ij} P_{ij}) \leq E_j^{limit} \quad (3)$$

여기서, β_j : 1 또는 0으로 j 지역의 배출량 제약의 유무 표시

(3) 수급제약

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NG_j} P_{ij} = D \quad (4)$$

여기서, D: 총 수요(MW)

(4) 출력 상하한제약

$$P_{ij}^{min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{max} \quad (5)$$

여기서, P_{ij}^{min} , P_{ij}^{max} : 지역 j에서 발전기 i의 출력하한치 및 상한치(MW)

2-2. 최적화 방정식의 해법

라그랑지 확대목적함수는 식 (1)의 목적함수에 각 제약조건인 식 (2)-(5)를 더하여 다음과 같이 식 (6)으로 구성된다.

$$L(P, \lambda, \mu, \mu_j, \bar{v}, \bar{v}_j) = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{i=1}^{NG_j} f_{ij}(a_{ij} P_{ij}^2 + b_{ij} P_{ij}) \right] + \lambda (D - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NG_j} P_{ij}) + \mu \alpha \left[\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NG_j} e_{ij} (a_{ij} P_{ij}^2 + b_{ij} P_{ij}) - E^{limit} \right] + \sum_{j=1}^J \mu_j \beta_j \left[\sum_{i=1}^{NG_j} e_{ij} (a_{ij} P_{ij}^2 + b_{ij} P_{ij}) - E_j^{limit} \right] + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NG_j} [v_{ij} (P_{ij} - P_{ij}^{max}) + v_{ij} (P_{ij}^{min} - P_{ij})] \quad (6)$$

여기서, λ : 수급제약조건에 관한 라그랑지 승수
 μ : 총배출량 제약에 관한 라그랑지 승수
 μ_j : 지역별 배출량 제약에 관한 라그랑지 승수
 \bar{v}_{ij}, \bar{v}_j : 출력상하한 제약에 관한 라그랑지 승수
 배출량을 고려한 경제부하배분 문제의 해를 구하는 계산절차는 Fig. 1과 같고 이를 단계별로 설명하면 다음과 같다.

- STEP 1- 초기 DATA를 입력한다. 이때 μ 및 μ_j 는 0으로 가정한다.
- STEP 2- 등중분연료비 방법으로 각 발전기의 출력을 결정한다.
- STEP 3- 총배출량 및 지역별 배출량을 구한다. 이때 Kuhn-Tucker의 최적조건을 적용하여 모든 배출량 제약을 만족하면 계산은 종료한다.
- STEP 4- μ 의 수렴: $\alpha=0$ 인 경우 STEP 5로 넘어가고 $\alpha=1$ 이면서 총배출량 제약을 위반하는 경우 μ 를 초과 배출량 값에 근거한 이분법¹²⁾에 의해 수정하고 STEP 2로 돌아간다. 이와같은 이분법을 이용한 의 반복수정을 통해 총배출량에 관한 Kuhn-Tucker의 최적조건을 만족하게 한다.
- STEP 5- μ_j 의 수렴: $\beta_j=0$ 인 경우 계산은 종료하고 $\beta_j=1$ 인 지역 j의 지역별 배출량 제약을 위반하는 경우 μ_j 를 초과 배출량 값에 근거한 Subgradient법¹²⁾에 의해 수정하고 STEP 2로

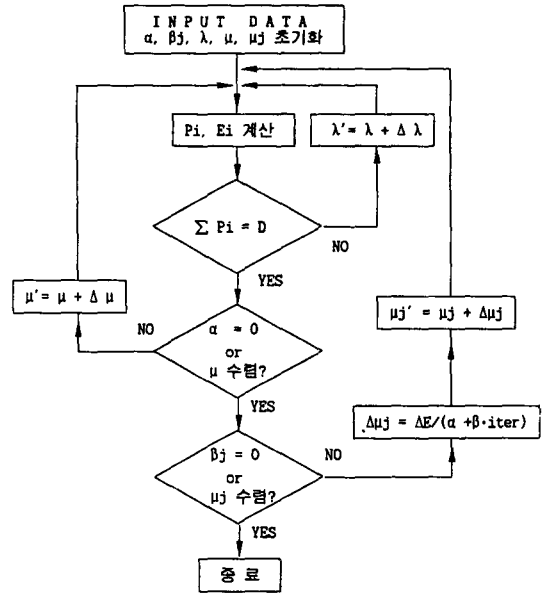


Fig. 1. Flow chart of economic load dispatch considering emission constraint.

돌아간다. 이와같은 Subgradient법을 이용한 μ_j 의 반복수정을 통해 STEP 3에서 지역별 배출량 제약에 관한 Kuhn-Tucker의 최적조건을 만족하면 STEP 4로 돌아간다.

STEP 6- μ 와 μ_j 의 반복수정을 통해 총배출량과 지역별 배출량에 관한 Kuhn-Tucker의 모든 조건을 만족하면 계산은 종료한다.

3. TRADE-OFF 곡선과 환경비용을 이용한 배출량 제어

3-1. 배출량과 연료비 사이의 TRADE-OFF 곡선

총연료비와 배출량은 상호상충하는 Trade-off 관계에 있으며 이것은 계통운영자에게 가능한 모든 경제부하배분의 대체안을 제공하고 이를 비교할 수 있는 수단을 제공하기 위한 것이다. 이와같은 Trade-off 관계를 구하기 위해 "가중법(Weighting Method)"를 사용하면 다음 식 (7)과 같이 정식화된다.

$$\text{Min: } wF_{total} + (1-w)\gamma E_{total} \quad (7)$$

$$0 \leq w \leq 1$$

여기서, w : 총연료비에 할당된 가중치
 $(1-w)$: 배출량에 할당된 가중치
 γ : 배출량을 비용화하는 계수로 1로 설정 (1 \$/kg)

이식에서 w 를 1에서 0까지 점차로 감소시키면서 경제부하배분 문제를 풀면 총연료비와 배출량 사이의 Trade-off 해를 얻을 수 있다. 즉, $w=1$ 일 때 이것은 종래의 경제부하배분(ELD) 문제가 되고 반면 $w=0$ 일 때 최소배출량 부하배분(MED: Minimum Emission Dispatch)⁹⁾ 문제가 된다.

한편, NOx 및 SO₂의 배출량 함수를 식 (8)과 (9)로 표현^{1,10)}하고 “가중법(Weighting Method)”으로 NOx 배출량, SO₂ 배출량, 총연료비의 3개 다목적 사이의 Trade-off 관계를 구하기 위해 정식화하면 식 (10)과 같다. 여기서, γ 는 1의 상수값이므로 정식화에서 제외하였다.

$$E_{\text{total, NOx}} = \sum_{i=1}^{NG} e_{\text{NOx},i} (a_i P_i^2 + b_i P_i) \quad (8)$$

$$E_{\text{total, SO}_2} = \sum_{i=1}^{NG} e_{\text{SO}_2,i} (a_i P_i^2 + b_i P_i) \quad (9)$$

여기서, $e_{\text{NOx},i}$: 발전기 i 의 NOx 배출량 계수(kg/GJ)
 $e_{\text{SO}_2,i}$: 발전기 i 의 SO₂ 배출량 계수(kg/GJ)

$$\text{Min: } wF_{\text{total}} + (1-w)[\alpha E_{\text{total, NOx}} + (1-\alpha)E_{\text{total, SO}_2}] \quad (10)$$

$$0 \leq w \leq 1, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

여기서, w : 총연료비에 할당된 가중치
 $(1-w)$: NOx 및 SO₂ 배출량에 할당된 가중치
 α : 오염물질 중 NOx에 할당된 가중치
 $(1-\alpha)$: 오염물질 중 SO₂에 할당된 가중치
 이식에서 NOx에 할당된 가중치 α 는 SO₂ 환경피해에 대한 NOx 환경피해의 상대적인 가중치(예를들어 NOx가 SO₂ 보다 환경피해 면에서 4배 나쁘다면 α 는 0.8)를 나타내는 것으로 각 오염물질에 할당되는 가중치의 합은 1이다.

위의 식 (10)은 다음 식 (11)과 같이 다시 표현되며 이 식은 연료비 및 배출량의 함수특성을 고려할 때 동일한 해¹⁰⁾를 갖는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Min: } w \left\{ F_{\text{total}} + \frac{(1-w)}{w} [\alpha E_{\text{total, NOx}} + (1-\alpha)E_{\text{total, SO}_2}] \right\} \quad (11)$$

$$\Rightarrow \text{Min: } F_{\text{total}} + \frac{(1-w)}{w} [\alpha E_{\text{total, NOx}} + (1-\alpha)E_{\text{total, SO}_2}] \quad (12)$$

환경피해에 대한 상대적인 가중치 α 를 알고 있다면 이 문제는 w 만의 변화로 Trade-off 해를 간단히 구할 수 있지만 환경오염물질들에 대한 환경피해의 정도는 정량적으로 구하기 어려우므로 본 연구에서는 w 와 α 에 의한 총연료비와 NOx 및 SO₂ 배출량의 변화특성을 제시하게 된다. 즉 식 (12)의 w 와 α 를 점차로 변화시키면서 경제부하배분 문제를 풀면 총연료비와 NOx 및 SO₂ 배출량 사이의 Trade-off 해를 구할 수 있다.

3.2. TRADE-OFF 곡선에서의 환경비용

식 (12)의 $\alpha(1-w)/w$ 와 $(1-\alpha)(1-w)/w$ 는 \$/kg의 화폐단위로 각각 NOx의 환경비용, SO₂ 환경비용이 되며 특히 $(1-w)/w$ 는 개별오염물질 NOx와 SO₂의 환경비용을 결정하는 총환경비용이 된다. 환경비용은 Trade-off 곡선을 따라 계속 변화되는 값으로 시간당 배출량이 미소변화할 때 총연료비의 미소변화 범위를 나타내는 감도로서 다음 식 (13)과 식 (14)로 표현된다.

$$\text{NOx의 환경비용} = -\frac{dF_{\text{total}}}{dE_{\text{total, NOx}}} = \frac{\alpha(1-w)}{w} \quad (13)$$

$$\text{SO}_2\text{의 환경비용} = -\frac{dF_{\text{total}}}{dE_{\text{total, SO}_2}} = \frac{(1-\alpha)(1-w)}{w} \quad (14)$$

여기서, (-) 기호는 배출량을 줄이기 위해 총연료비는 증가시켜야 한다는 상호상충 관계를 의미하는 것으로 본 연구의 수치예에서는 (-) 기호를 생략하여 다루기로 한다. NOx 및 SO₂의 환경비용은 계통을 운용하는 의사결정자에게 중요한 정보를 제공한다. 즉, 환경비용의 선택에 따라 NOx 및 SO₂와 같은 대기환경오염물질의 배출량을 적절히 제어할 수 있게 된다. 여기서, w 는 총연료비와 전체 배출량(NOx와 SO₂)의 상대적 비중을 조정하여 w 를 작게 할수록 NOx 및 SO₂ 배출량을 함께 감소시킬 수 있고 따라서 총연료비는 상대적으로 커지게 된다. 한편, α 는 NOx 배출량과 SO₂ 배출량 사이의 상대적인 비중을 조정하게 된다. 이와같이 총연료비와 배출량 사이의 Trade-off 곡선의 해를 구하고 환경비용을 통한 두 목적 사이의 감도분석에 의해 계통운용자는 여러가지 대체안을 서로 비교하여 효과적인 운전점을 결정할 수 있게 된다.

4. 사례연구

4-1. 모델계통의 특성

본 시험계통은 Table 1과 같은 특성을 지닌 11기의 화력발전소로 구성하였으며 수요는 8000 MW로 하였다.¹⁰⁾

4-2. 총배출량을 고려한 경우

시험계통에 대해 NOx의 총배출량 제약 값을 변화시키면서 총연료비와 총배출량을 구하면 다음 Fig. 2와 같은 Trade-off 곡선을 얻을 수 있다.

여기서 ELD는 배출량 제약을 고려하지 않은 경제부하배분의 결과이고 MED⁹⁾는 시험계통에서의 최소배출량 부하배분의 결과가 된다. 이 시험계통의 MED에서는 각 발전기의 출력조정에 의해 종래의 경제부하배분 수행시 보다 최고 24.9%의 배출량을 감소시킬 수 있으

Table 1. Characteristics of test system.

UNIT	종 별	f_i (\$/GJ)	e_{NOx} (kg/GJ)	e_{SO_2} (kg/GJ)	Heat Rate (GJ/MW)		P_{max} (MW)	P_{min} (MW)
					a_i	b_i		
1.	COAL	1.42	0.166	1.375	0.000064	10.5343	1000	300
2.	COAL	1.42	0.352	1.214	0.000064	10.5343	1000	300
3.	COAL	1.42	0.062	0.543	0.000064	10.5343	1000	300
4.	OIL	2.56	0.259	0.671	0.000797	10.1887	1000	300
5.	OIL	2.56	0.116	0.588	0.000797	10.1887	1000	300
6.	OIL	2.65	0.116	0.447	0.000797	10.1887	1000	300
7.	OIL	2.89	0.079	0.331	0.000797	10.1887	1000	300
8.	OIL	2.89	0.116	0.315	0.000797	10.1887	1000	300
9.	OIL	2.98	0.124	0.133	0.000797	10.1887	1000	300
10.	GAS	2.61	0.111	0.0	0.000996	8.54642	1000	300
11.	GAS	2.61	0.111	0.0	0.004014	8.58414	500	150

며 이때 총연료비는 14.1% 증가하게 된다. 그리고 환경비용 μ (연료비와 배출량 사이의 감도)는 이 Trade-off 곡선을 따라 연속적으로 변화하는 값(즉, 곡선각점의 기울기)이며 이 환경비용 μ 를 이용하여 총연료비와 총배출량 사이의 Trade-off 관계를 다시 표현하면 다음 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 3은 대기오염상태에 따라 총배출량 제약조건으로 운전하는 경우에 대해 배출량 제약값을 결정하는 계통운영자에게 총연료비와 총배출량 사이의 Trade-off 특성과 환경비용을 통해 효율적인 발전기 출력을 결정하는데 도움을 주기 위한 것이다. 환경비용 μ 가 작은 부분(0~7 \$/kg)에서는 적은 연료비의 증가로 큰 배출량 감소 효과를 얻을 수 있는 반면 환경비용 38 \$/kg 이상에서는 배출량 저감효과에 대해 큰 연료비 희생이 따르므로 대기오염상태가 심각하지 않는 한 운전범위로 결정해서는 안된다. 이와같은 감도분석으로부터 계통운영자는 가능한 한 환경비용 7 \$/kg 이하에서 발전기 출력을 결정하

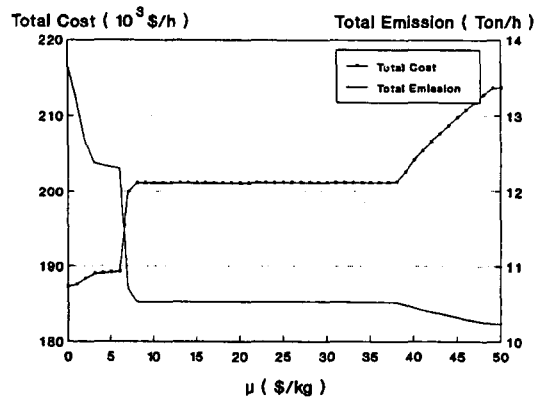


Fig. 3. Sensitivity analysis between the fuel cost and the total emission by the environmental cost μ .

는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있다.

4.3. 총배출량 및 지역별 배출량을 동시에 고려한 경우

총배출량 및 지역별 배출량의 동시제약을 고려한 경제부하배분은 계통내 모든 화력발전기에 총배출량 제약이 부과된 상태에서 각 지역의 특성에 따른 지역별 배출량을 동시에 제약하여 가장 엄격한 환경제약을 고려한 것이다.

본 연구에서는 시험계통의 11대 발전기를 4개 지역으로 분할하며 지역별로 구성된 발전기 번호와 종래의 경제부하배분에 의한 지역별 NOx 배출량은 다음과 같다.

- AREA 1: 발전기 번호 1, 4, 6 ... 5,515.3 kg/h
- AREA 2: 발전기 번호 2, 8, 9 ... 4,481.4 kg/h
- AREA 3: 발전기 번호 3, 5, 11 ... 2,335.5 kg/h
- AREA 4: 발전기 번호 7, 10 ... 1,306.3 kg/h

배출량의 실제적인 제약방법은 지리적 특성, 기상학

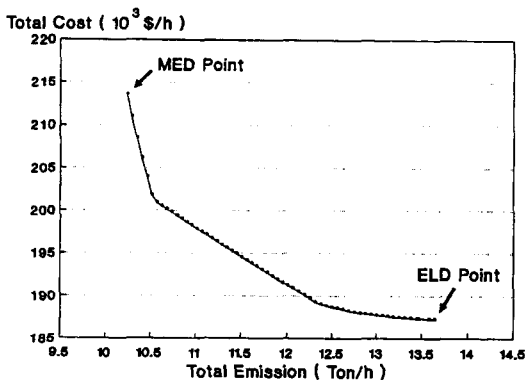


Fig. 2. Variation of the fuel cost by the total emission constraint.

적 해석 등의 특수한 접근방법이 필요하므로 본 연구에서는 해석범위의 한정을 위해 배출량 제약조건을 상정하여 임의의 지역에 부과하는 것으로 하였다. 본 연구에서는 지역 1과 2의 배출량이 가장 많이 발생하기 때문에 지역별 배출량 제약을 지역 1 제약과 지역 1 및 2의 동시제약의 2가지 경우로 구분하여 총배출량 제약값과 총연료비 사이의 Trade-off 관계를 구하고 이를 총배출량 제약만을 고려한 경제부하배분의 결과(4.2절)와 비교하였다.

Fig. 4는 지역 1에서 상정한 4가지 배출량 제약값에 따라 총배출량과 총연료비의 Trade-off 관계를 나타낸 것이다.

이러한 결과를 지역별 배출량 제약을 고려하지 않은 Trade-off 곡선과 비교하면 지역 1의 배출량 제약에 따라 총연료비가 어떻게 변화하는지를 도식적으로 파악할 수 있다. 그리고, 가로축의 총배출량에 대해 지역 1의 배출량 제약값이 2,200 kg, 2,500 kg에서는 지역별 배출량 제약을 고려하지 않은 Trade-off 곡선과 비교하여 총연료비의 증가비율이 상대적으로 크나 3,000 kg, 4,000 kg에서는 총연료비의 증가비율이 비교적 작다는 것을 알 수 있으므로 계통운영자는 총배출량 및 지역별 배출량 제약을 동시에 고려할 때 이러한 운용자료를 주어진 대기환경조건과 연료비(예를 들어, 총연료비가 제약으로 정해진다면 그림과 같이 5개의 Trade-off 곡선상에서 정해진 총연료비에 해당하는 5개의 대체안을 얻을 수 있다)의 측면에서 비교분석할 수 있을 것이다.

Fig. 5는 지역 1 및 2의 배출량 제약값에 따라 총연료비와 총배출량의 Trade-off 관계를 나타낸 것이다. 지역별 배출량 제약값의 선정은 해석의 단순성을 위해 우선 지역 1의 배출량 제약값을 4,500 kg으로 고정하고 지역 2의 배출량 제약값을 2,500~4,000 kg으로 단계적으로

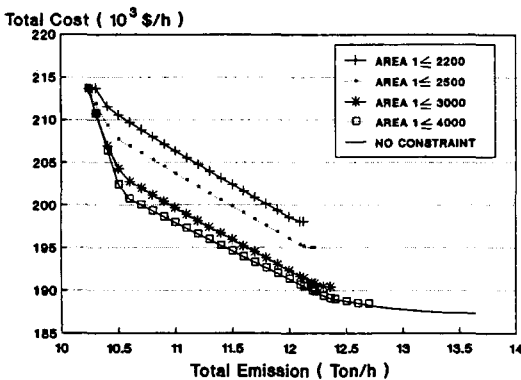


Fig. 4. Comparison of trade-off curve under the area 1 and the total emission constraints.

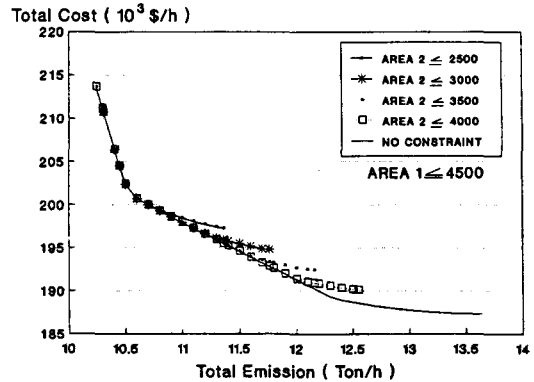


Fig. 5. Comparison of trade-off curve under the area 1, 2 and the total emission constraints.

제약하는 것으로 하였다. 그 결과 총배출량과 지역별 배출량을 동시제약하는 경우 본 연구에서 개발한 알고리즘의 수렴성을 검증할 수 있으며 그림과 같이 2개 지역의 배출량을 동시에 제약하면 실현할 수 있는 대체안은 크게 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한, 지역별 배출량 제약을 고려하지 않은 Trade-off 곡선과 비교하여 이렇게 2개의 지역별 배출량을 동시에 제약할 때 총연료비의 증가비율은 매우 적음(1% 이하)을 알 수 있다.

4.4. 환경비용에 의한 2종 오염물질의 배출량을 고려한 경우

2종 오염물질의 배출량 저감을 다루는 하나의 방법으로 총환경비용과 개별오염물질(본 연구에서는 NOx와 SO2를 고려)의 상대적 가중치를 도입하고 이것을 적용하여 경제부하배분의 결과가 어떻게 변하는지를 해석하기로 한다. Fig. 6-8는 총환경비용 (1-w)/w와 2종 오염

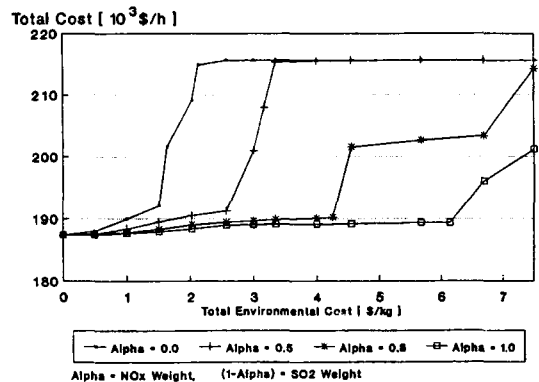


Fig. 6. Variation of the fuel cost by the total environmental cost.

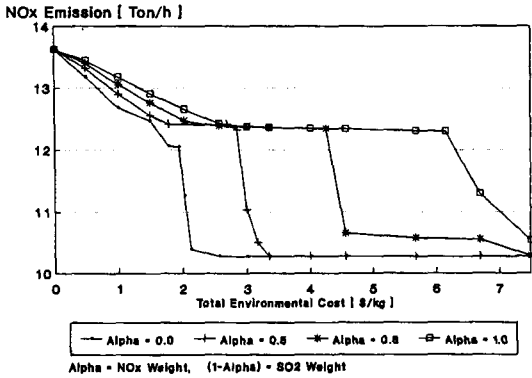


Fig. 7. Variation of the NOx emission by the total environmental cost.

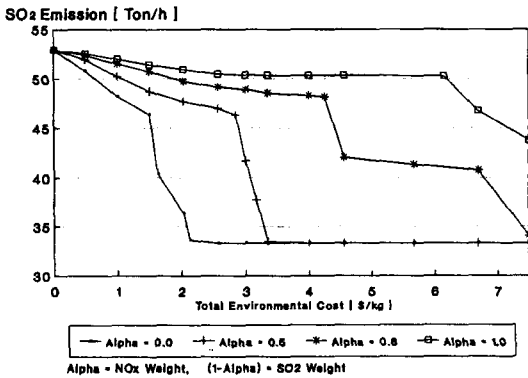


Fig. 8. Variation of the SO₂ emission by the total environmental cost.

물질의 상대적 가중치 α 및 $(1-\alpha)$ 에 의해 총연료비, NOx 배출량, SO₂ 배출량이 각각 어떻게 변하는지를 보여주고 있다.

여기서, $[(1-w)/w]\alpha$ 는 NOx 배출량의 환경비용이고 $[(1-w)/w](1-\alpha)$ 는 SO₂ 배출량의 환경비용을 의미하게 된다. 총환경비용 $(1-w)/w$ 와 NOx 및 SO₂의 상대적 가중치를 각각 변화시키면 환경비용의 부파에 따른 총연료비의 증가특성을 분석할 수 있으므로 배출량 저감을 위해 사용되는 NOx 및 SO₂의 환경비용을 어떻게 결정할 것인가 하는 문제를 해결하는데 있어 총환경비용 및 개별오염물질의 상대적 가중치의 이용은 매우 유용할 것이다. 예를들어 어떤 환경기관의 조사를 통한 Data에 의해 NOx의 환경비용이 4 \$/kg이고 SO₂의 환경비용이 1 \$/kg이라 한다면 총환경비용은 5 \$/kg이 되며 NOx에 대한 가중치 α 는 0.8(이때 SO₂에 대한 가중치 $(1-\alpha)$ 는 0.2가 됨)이 된다. 즉, α 가 0.8인 곡선에 대한 총환경비용 5 \$/kg의 운전점에서 총연료비와 NOx 및 SO₂ 배출

량을 결정할 수 있게 된다.

Fig. 6~8에서와 같이 4가지 서로 다른 오염물질의 상대적 가중치(Alpha)에서 총환경비용 $(1-w)/w$ 의 변화에 따른 총연료비, NOx 배출량, SO₂ 배출량의 결과는 현저히 다르므로 2종의 대기환경오염물질을 고려한 경제부하배분에서 총환경비용과 오염물질의 상대적 가중치의 선택은 매우 중요한 문제가 되며 또한, 이러한 해석방법은 개별오염물질의 상대적 가중치(이들 가중치의 합은 1)를 사용하기 때문에 NOx, SO₂ 뿐만아니라 3종 이상의 대기환경오염물질의 배출량을 고려할 때도 다목적 최적화 문제를 보다 간단하게 해석할 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

본 논문에서 제안한 대기환경오염물질의 배출량 제어를 위한 경제부하배분의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 화력발전소에서 배출되는 대표적인 대기환경오염물질(NOx, SO₂ 등)의 배출량 제약을 1시간당의 총배출량 제약과 지역별 배출량 제약으로 모두 고려할 수 있는 경제부하배분법을 개발하였다.
- 2) 이 결과 본 연구의 시험계통에서는 종래의 경제부하배분과 비교하여 NOx의 배출량을 24.9%까지 저감시킬 수 있고 이 때 총연료비는 14.1% 증가함을 알 수 있으며(MED) 부하배분의 모든 대체안은 이러한 MED와 ELD의 운전점 사이에서 환경비용(배출량과 연료비 사이의 감도)에 의한 Trade-off 곡선으로 결정되게 된다.
- 3) 이와같이 Trade-off 곡선을 이용한 경제부하배분의 해석을 통해 연료비와 배출량 사이의 상호관계를 제시하고 여기서 계통운용자가 효과적으로 배출량 제어를 수행할 수 있는 부하배분의 운전범위를 환경비용으로부터 찾을 수 있도록 하였다.
- 4) NOx와 SO₂의 2종 배출량을 동시에 고려할 수 있는 해석기법으로서 총환경비용과 개별 환경오염물질의 상대적 가중치라는 개념을 도입하여 경제부하배분이 이것에 의해 어떻게 변하는지를 해석해서 총연료비, NOx 배출량, SO₂ 배출량의 3개 다목적 최적화 문제를 보다 간단히 해석할 수 있도록 하였다.
- 5) 향후, 송전계통까지 포함된 복합계통에서 대기환경오염물질의 배출량이 전력계통의 경제성에 어떠한 영향을 미치는 가에 대해 계속 연구해 나갈 계획이다.

참고문헌

1. M.R. Gent and J.W. Lamont: "Minimum Emission Dispatch", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, pp.

- 2650-2660, Nov./Dec. 1971.
2. J.K. Delson: "Controlled Emission Dispatch", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-93, No5, pp. 1359-1366, Sep./Oct. 1974.
 3. J.B. Cadogan and L. Eisenberg: "Sulfur Oxide Emission Management for Electric Power System", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-96, No. 2, pp. 393-401, March/April 1977.
 4. S.W. Hess, etc: "Planning System Operations to meet NO_x Constraints", IEEE Computer Applications in Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 10-14, July 1992.
 5. A. tsuji: "An Analysis on Economic Dispatch of Generating Stations with Emission Constraint", CRIEPI Report, No. 177078, May, 1978.
 6. A. tsuji: "Optimal Fuel Mix and Load Dispatching Under Environmental Constraint", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 2, pp. 2357-2364, May 1981.
 7. R.D. Tabors: "Coal to Natural Gas Seasonal Fuel Switching: An Optimal for Acid Rain Control", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 457-462, May 1989.
 8. 横山隆一 他, "信頼性 選好指標に基づく 電力潮流の多目的最適化", 日本 電氣學會論文紙 B, **106**(3), (1986).
 9. J.H. Talaq, Ferial and M.E. El-Hawary: "Minimum Emissions Power Flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 429-435, February 1994.
 10. T. Gjengedal, etc: "A Qualitative Approach to Economic-Environmental Dispatch-Treatment of Multiple Pollutants", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, pp. 367-373, September 1992.
 11. 송길영, 정민화, 허성일, 김용하: "대기환경규제를 고려한 전력계통의 경제부하배분", 대한전기학회 '94 하계학술대회 논문지, 1994년 7월.
 12. Mokhtar S. Bazaraa, Hanif D. Sherali and C.M. Shetty: "Nonlinear Programming", John Wiley & Sons, 1979.