

대기환경오염물질의 배출량을 고려한 경제부하배분

송길영 * 정민화 [◎] 김용하 **
 * 고려대학교 전기공학과 ** 인천대학교 전기공학과

Economic Load Dispatch Considering Atmospheric Emission in Power System

Kil-Yeong Song* Min-Hwa Jeong* Yong-Ha Kim**
 * Korea University ** Incheon University

Abstract : 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., NOx and SO₂.

By applying the proposed method to the system, the usefulness of this method is verified.

1. 서 론

현재 화력발전소의 대기환경오염물질은 이산화유황(SO₂), 질소산화물(NOx), 먼지 등이 규제대상으로 되고 있으며 규제방식은 연료 유황분 및 배출농도 등으로 규제하고 있다. 그러나, 최근 화석연료의 연소로 나오는 대기환경오염물질에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 우리나라로 효과적인 대기환경오염물질의 배출량 저감을 위해 총량규제방식과 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 대기환경오염물질 배출원이라 할 수 있는 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 Lamont^[1]에 의해 제안된 이후 오염물질의 비용화에 의한 방법^[2], 연료절제를 수행하는 방법^[3], 최적조류에 배출량 제약을 고려하는 방법^[4] 등으로 대별되어거나 이러한 종래의 방법들은 배출량과 연료비 사이의 상호상충 관계에서 적절한 배출량 제약치를 설정하는 문제와 배출량 제약시 실제적으로 필요한 지역별 배출량을 다루지 않고 있으며 또한 다차원에 의해 실질적으로 해를 구하기 힘든 2종 이상의 배출량을 고려하지 못하고 있다.

본 연구에서는 화력발전소에서 배출되는 대기환경오염물질의 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)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 비중치라는 개념을 도입하여 경제부하배분이 이것에 의해 어떻게 변하는지를 해석함으로써 총환경비용과 오염물질들의 상대적 비중치를 이용한 경제부하배분의 유용성을 고찰하였다.

2. 배출량 제약을 고려한 경제부하배분

대표적인 대기환경오염물질인 질소산화물 NOx(이산화유황 SO₂에 대해서도 배출량 제약을 고려한 경제부하배분의 알고리즘을 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 경제부하배분^[5]
- (iii) 지역별 배출량만을 고려한 경제부하배분^[6]
- (iv) 총배출량과 지역별 배출량을 동시에 고려한 경제부하배분

2.1 정식화

배출량 제약을 총배출량과 지역별 배출량으로 제약할 수 있도록 정식화하여 이를 제약조건을 만족시키면서 전체 화력발전기의 총연료비를 최소화하는 최적화 문제로 구성하였다.

2.1.1 목적함수

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

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

여기서, f_{ij} : 지역 j에서 발전기 i의 연료비 단가(\$/GJ)
 a_{ij}, b_{ij} : 지역 j에서 발전기 i의 연료소비량 계수(GJ/MW)
 P_{ij} : 지역 j에서 발전기 i의 출력(MW)
 N_{GJ} : j 지역의 화력발전기 수
 J : 지역 수

2.1.2 제약조건

(1) 총배출량 제약

대기환경오염물질의 배출량은 일반적으로 발전기의 연료소비량에 비례하기 때문에 1시간당의 총배출량 제약은 다음 식(2)와 같은 함수제약으로 표현된다.

$$E_{\text{total}} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{N_{\text{GJ}}} e_{ij}(a_{ij}P_{ij}^2 + b_{ij}P_{ij}) \leq E^{\text{limit}} \quad (2)$$

여기서, e_{ij} : 지역 j에서 발전기 i의 배출량 계수 (kg/GJ)
 E^{limit} : 시간당 배출량 제약치 (kg/hour)

(2) 지역별 배출량 제약

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

$$E_{AREA,j} = \sum_{i=1}^{NGj} e_{ij}(a_{ij}P_{ij}^2 + b_{ij}P_{ij}) \leq E_j^{limit} \quad (3)$$

(3) 수급제약

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

여기서, D : 총 수요(MW)

(4) 출력 상하한제약

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

여기서, $P_{ij}^{\min}, P_{ij}^{\max}$: 각발전기의 출력하한치 및 상한치(MW)

2.2 최적화 방정식의 해법

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

$$\begin{aligned} L(P, \lambda, \mu, \mu_j, \bar{\nu}, \bar{\nu}_j) &= \sum_{j=1}^J \left[\sum_{i=1}^{NGj} f_{ij}(a_{ij}P_{ij}^2 + b_{ij}P_{ij}) \right] \\ &+ \lambda(D - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NGj} P_{ij}) + \mu \left[\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NGj} e_{ij}(a_{ij}P_{ij}^2 + b_{ij}P_{ij}) - E_j^{limit} \right] \\ &+ \sum_{j=1}^J \mu_j \left[\sum_{i=1}^{NGj} e_{ij}(a_{ij}P_{ij}^2 + b_{ij}P_{ij}) - E_j^{limit} \right] \\ &+ \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{NGj} \left[\bar{\nu}_{ij}(P_{ij} - P_{ij}^{\max}) + \bar{\nu}_j(P_{ij}^{\min} - P_{ij}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, λ : 수급제약조건에 관한 라그랑지 승수
 μ : 총배출량 제약에 관한 라그랑지 승수
 μ_j : 지역별 배출량 제약에 관한 라그랑지 승수
 $\bar{\nu}_{ij}, \bar{\nu}_j$: 출력상하한 제약에 관한 라그랑지 승수

종래의 경제부하배분 문제를 풀어 배출량에 관한 제약이 만족되지 않는 경우 μ 및 μ_j 를 반복수정하여 Kuhn-Tucker의 최적 조건을 모두 만족시키는 새로운 경제부하배분 문제를 풀게 된다. 계산절차는 그림 1과 같고 이를 설명하면 다음과 같다.

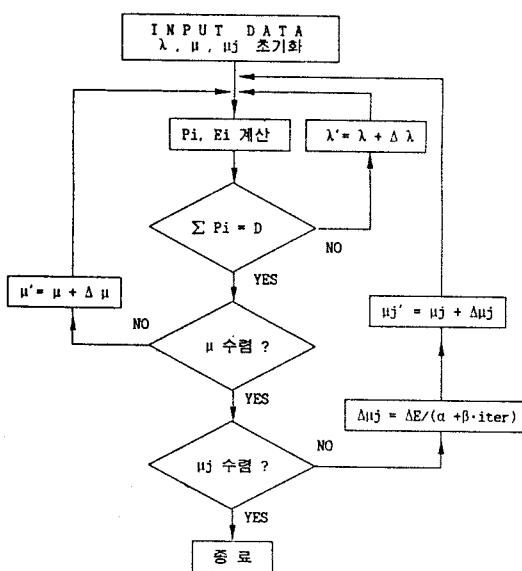


그림 1 배출량을 고려한 경제부하배분의 흐름도

STEP_1 - 초기 DATA 입력(이 때, μ 및 μ_j 는 0 으로 가정)

STEP_2 - 동중분연료비 방법으로 각발전기의 출력 결정

STEP_3 - 총배출량 및 지역별 배출량 계산

(이때 Kuhn-Tucker의 최적조건을 적용하여 모든 배출량 제약을 만족하면 계산 종료)

STEP_4 - μ 의 수령 : 총배출량 제약을 위반하는 경우 총배출량에 관한 Kuhn-Tucker의 최적조건을 만족하도록 μ 를 초과 배출량 값에 근거한 이분법에 의해 반복수정

STEP_5 - μ_j 의 수령 : 지역별 배출량 제약을 위반하는 경우 지역별 배출량에 관한 Kuhn-Tucker의 최적조건을 만족하도록 지역 j 의 μ_j 를 초과 배출량 값에 근거한 Subgradient법에 의해 반복수정

STEP_6 - μ 와 μ_j 의 반복수정을 통해 Kuhn-Tucker의 모든 조건이 만족되면 계산 종료

3. Trade-off 곡선과 환경비용에 의한 경제부하배분

3.1 배출량과 연료비 사이의 Trade-off 곡선

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

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

$$0 \leq w \leq 1$$

여기서, w : 총연료비에 할당된 비중
 $(1-w)$: 배출량에 할당된 비중

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

한편, NOx 및 SO₂의 배출량 함수를 각각 $E_{total,NOx}$, $E_{total,SO2}$ 라고 "Weighting Method"로 NOx 배출량, SO₂ 배출량, 총연료비의 3개 다목적 사이의 Trade-off 관계를 구하기 위해 정식화 하면 식(8)과 같이 표현된다.

$$Min : wF_{total} + (1-w)[\alpha E_{total,NOx} + (1-\alpha)E_{total,SO2}] \quad (8)$$

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

여기서, w : 총연료비에 할당된 비중

$$(1-w) : NOx 및 SO₂ 배출량에 할당된 비중$$

$$\alpha : 오염물질 중 NOx에 할당된 비중$$

$$(1-\alpha) : 오염물질 중 SO₂에 할당된 비중$$

식(8)를 다시 표현하면 연료비 및 배출량 함수특성을 고려할 때 동일한 해를 갖는 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Min : F_{total} + \frac{(1-w)}{w} [\alpha E_{total,NOx} + (1-\alpha)E_{total,SO2}] \quad (9)$$

식(9)의 w 와 α 를 점차로 변화시키면서 경제부하배분 문제를 풀면 총연료비와 NOx 및 SO₂ 배출량 사이의 Trade-off 관계를 구할 수 있다.

3.2 Trade-off 곡선에서의 환경비용

식(9)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 미소변화범위를 나타내는 감도로서 다음 식(10)과 식(11)로 표현된다.

$$NOx의 환경비용 = -\frac{dF_{total}}{dE_{total,NOx}} = \frac{\alpha(1-w)}{w} \quad (10)$$

$$SO_2의 환경비용 = -\frac{dF_{total}}{dE_{total,SO2}} = \frac{(1-\alpha)(1-w)}{w} \quad (11)$$

여기서, (-) 기호는 배출량을 줄이기 위해 총연료비는 증가시켜야 한다는 상호상충 관계를 의미한다. NOx 및 SO₂의 환경비용은 계통을 운용하는 의사결정자에게 중요한 정보를 제공한다. 즉, 환경비용의 선택에 따라 NOx 및 SO₂ 배출량을 적절히 조정할 수 있다. 여기서, w 는 총연료비와 전체 배출량(NOx와 SO₂)의 상대적 비중을 조정하며 a 는 NOx 배출량과 SO₂ 배출량 사이의 상대적인 비중을 조정하게 된다.

4. 사례연구

4.1 모델개통의 특성

본 시험계통은 표 1과 같은 특성을 지닌 11기의 화력발전소로 구성하였으며, 수요는 8000 MW로 하였다.^[5]

표 1 시험계통의 특성자료

U N I T	종별	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

4.2 총배출량을 고려한 경우

시험계통에 대해 NOx의 총배출량 제약 값을 변화시키면서 총연료비와 총배출량을 구하면 다음 그림 2와 같다.

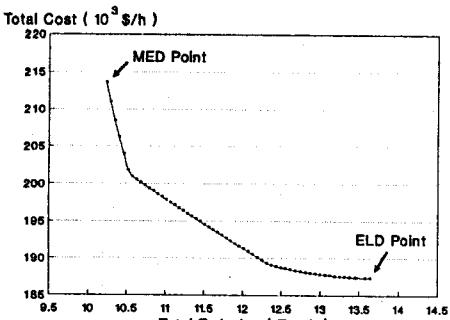


그림 2 총배출량 제약에 의한 총연료비의 변화

여기서 ELD는 배출량 제약을 고려하지 않은 경제부하배분의 결과이고 MED는 시험계통에서의 최소배출량 부하배분의 결과가 된다. 이 시험계통의 MED에서는 각 발전기의 출력조정에 의해 종래의 경제부하배분 수행이 보다 최고 24.9%의 배출량을 감소시킬 수 있으며 이때 총연료비는 14.1% 증가하게 된다. 한편, NOx의 환경비용 μ 를 변화시켜 총연료비와 총배출량 사이의 Trade-off 관계를 해석하면 다음 그림 3과 같다.

환경비용 μ 는 Trade-off 곡선을 따라 나타나는 기울기(두목적 사이의 감도)를 의미하며 그림 3은 대기오염상태에 따라 총배출량 제약조건으로 운전하는 경우에 대해 배출량 제약치를 결정하는 계통운용자에게 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 감소효과를 얻을 수 있는 반면 환경비용 38 \$/kg 이상에서는 배출량 저감효과에 대해 큰 연료비 회생이 따르므로 대기오염상태가 심각하지 않는 한 운전

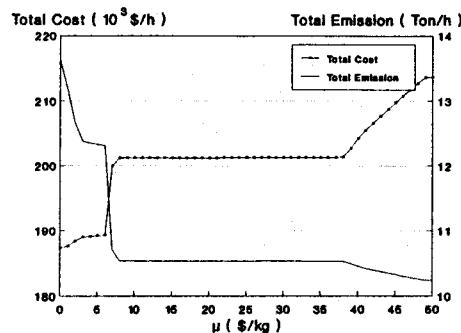


그림 3 환경비용 μ 에 의한 총연료비와 총배출량의 감도분석

범위로 결정해서는 안된다. 이와같은 감도분석으로부터 계통운용자는 가능한 한 환경비용 7 \$/kg 이하에서 발전기 출력을 결정하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있다.

4.3 총배출량 및 지역별 배출량을 동시에 고려한 경우

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

- o AREA 1 : 발전기 번호 1, 4, 6 . . . 5515.3 kg/h
- o AREA 2 : 발전기 번호 2, 8, 9 . . . 4481.4 kg/h
- o AREA 3 : 발전기 번호 3, 5, 11 . . . 2335.5 kg/h
- o AREA 4 : 발전기 번호 7, 10 . . . 1306.3 kg/h

배출량의 실제적인 제약방법은 지리적 특성, 기상학적 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 결과와 비교하였다.

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

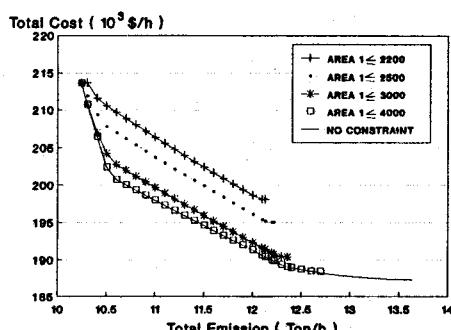


그림 4 지역 1 및 총배출량 제약에서 Trade-off 곡선 비교

이러한 결과를 지역별 배출량 제약을 고려하지 않은 Trade-off 곡선(No Constraint)과 비교하면 지역 1의 배출량 제약에 따라 총연료비가 어떻게 변화하는지를 도식적으로 파악할 수 있다. 그리고, 지역 1의 배출량 제약값이 2200kg, 2500kg에서는 지역별 배출량 제약을 고려하지 않은 Trade-off 곡선에 대해 총연료비의 증가율이 상대적으로 크나 3000kg, 4000kg에서는 총연료비의 증가율이 비교적 작다는 것을 알 수 있으므로 계통운용자는 총배출량 및 지역별 배출량 제약을 동시에 고려할 때 이러한 운용 Data를 주어진 대기환경조건과 연료비의 측면에서 비교분석할 수 있다.

그림 5는 지역 1 및 2의 배출량 제약값에 따라 총연료비와 총연료비의 Trade-off 관계를 나타낸 것이다. 지역별 배출량 제약값의 설정은 해석의 단순성을 위해 우선 지역 1의 배출량 제약값을 4500kg으로 고정하고 지역 2의 배출량 제약값을 2500kg ~ 4000kg으로 단계적으로 제약하는 것으로 하였다. 그림과 같이 2개 지역의 배출량을 동시에 제약하면 실현할 수 있는 대체안은 크게 감소한다는 것을 알 수 있다.

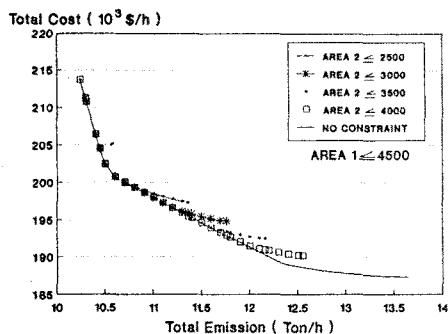


그림 5 지역 1,2 및 총배출량 제약에서 Trade-off 곡선 비교

4.4 2종 오염물질의 배출량을 고려한 경우

그림 6~그림 8은 총환경비용 $(1-w)/w$ 와 2종 오염물질의 상대적 비중치 α 및 $(1-\alpha)$ 에 의해 총연료비, NOx 배출량, SO₂ 배출량이 각각 어떻게 변하는지를 보여주고 있다.

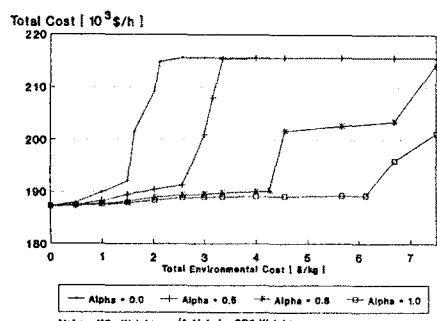


그림 6 총환경비용에 의한 총연료비의 변화

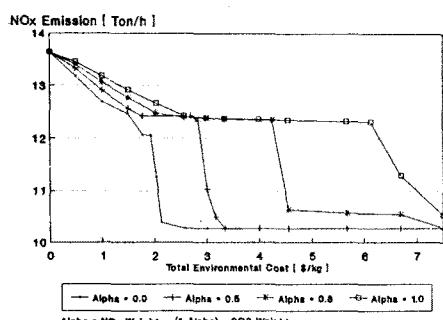


그림 7 총환경비용에 의한 NOx 배출량의 변화

이 그림들로부터 NOx는 종래의 경제부하배분과 비교해 최고 24.9%의 배출량을 감소시킬 수 있으며 이때 총연료비는 14.1% 증가함을 알 수 있다(이것은 이미 4.2절에서 알아 보았다). 또한, SO₂의 경우는 최고 37.1%의 배출량 감소가 가능하며 이때 총연료비는 15.1% 증가한다. 즉, 이 시험계통은 배출량 저감량에 있어서 NOx 보다 SO₂가 보다 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

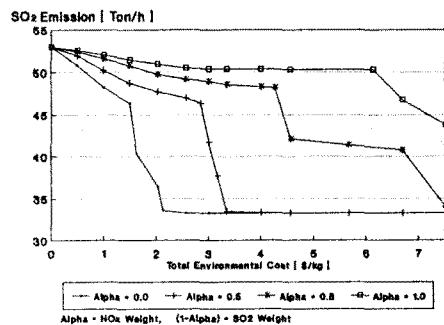


그림 8 총환경비용에 의한 SO₂ 배출량의 변화

그림 6~그림 8에서와 같이 4가지의 서로 다른 상대적 비중치(α)에서 총환경비용 $(1-w)/w$ 의 변화에 따른 총연료비, NOx 배출량, SO₂ 배출량의 결과는 현저히 다르므로 2종의 대기환경오염물질을 고려한 경제부하배분에서 총환경비용과 오염물질의 상대적 비중치의 선택은 매우 중요한 문제가 되며 또한, 이러한 해석방법은 개별오염물질의 상대적 비중치(이들 비중치의 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 연구에서 제안한 배출량 제약과 환경비용에 의한 경제부하배분의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 화력발전소의 대표적 대기환경오염물질인 질소산화물의 배출량 제약을 1시간당의 총배출량 제약과 지역별 배출량 제약을 모두 고려할 수 있는 경제부하배분법을 개발하였다.

(2) 이러한 경제부하배분법을 이용한 결과 본 연구의 시험계통에서는 종래의 경제부하배분과 비교하여 NOx와 SO₂의 배출량을 각각 24.9%, 37.1%까지 저감시킬 수 있으며 이때 총연료비는 14.1%, 15.1%가 증가함을 알 수 있다.

(3) 또한, Trade-off 곡선과 환경비용을 이용한 해석을 통해 연료비와 배출량 사이의 상호관계를 제시하고 여기서 개통운용자가 효과적으로 배출량 저감을 수행할 수 있는 부하배분의 운전범위를 찾는 수 있도록 하였다.

(4) NOx와 SO₂의 배출량을 동시에 고려할 때 총환경비용과 개별 환경오염물질의 상대적 비중치라는 개념을 도입하여 경제부하배분이 이것에 의해 어떻게 변하는지를 해석하고 이러한 총환경비용과 개별 환경오염물질의 상대적 비중치의 유용성을 통해 2종 이상의 오염물질을 동시에 고려하는데 이용되는 다목적 최적화 문제를 보다 간단히 해석할 수 있도록 하였다.

[참고문헌]

- M. R. Gent and J. W. Lamont : "Minimum Emission Dispatch", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, pp.2650-2660, Nov./Dec. 1971.
- J.K. Delson : "Controlled Emission Dispatch", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-93, No5, pp.1359-1366, Sep./Oct. 1974.
- A. tsuji : "大気環境保護を考慮した電力系統の経済負荷配分に関する考察", 日本電力中央研究所研究報告, May 1978.
- J. H. Talaq, Ferrial and M. E. El-Hawary : "Minimum Emissions Power Flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.1, pp.429-435, February 1994.
- 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.
- 송길영, 정민화, 허성일, 김용하, "대기환경규제를 고려한 전력계통의 경제부하배분", 대한전기학회 '94 하계학술대회