

계층분석과정을 이용한 다이옥신 방지기술시스템의 선정에 관한 연구

권철신 · 조근태

성균관대학교 시스템경영공학부

The Selection of Prevention Technology Systems for Dioxin Treatment: The Analytic Hierarchy Process Approach

Cheol-Shin Kwon · Keun-Tae Cho

Recently, due to the primary emphasis of environmental problem, the proper selection of the prevention technology systems necessary for Dioxin treatment has been one of the critical issues in the industrial sector. This paper shows how an Analytic Hierarchy Process(AHP) model can be used for assessing the performance of selected prevention technology systems: SDA/BF-SCR, SNCR-SDA/BF, SDA/BF, EP-WS-SCR, ED-WS, and EP-SCR-WS essential for Dioxin treatments. The final results show that SNCR-SDA/BF is the most attractive prevention technology system to use in an incinerator system, followed by SDA/BF-SCR, SDA/BF and EP-WS-SCR. This is consistent with the information that we found with respect to the elements that were taken into consideration. Sensitivity analysis is also provided here.

1. 서론

우리나라의 폐기물관리정책이 매립에서 소각으로 바뀌어감에 따라 현재 9개 대형 소각시설이 53개 시설로 늘어날 전망이다. 또한, 갈수록 어려워지는 매립지 확보난으로 인하여 정부에서는 향후 2001년까지 소각처리를 15%로 높일 계획이어서, 향후 우리나라 소각시설은 급격히 늘어날 전망이다. 1997년 말 현재 우리나라에서 발생한 생활폐기물의 양은 1일 47,900톤이며, 이 중 약 7.1%인 3,400톤이 소각처리되고 있다(환경관리연구원, 1999).

그런데 현재 가동중인 소각로의 대부분은 외국 기술에 의해 설계되어 주로 1990년도 초에 건설되기 시작한 것들로서, 대기오염 방지시설로는 '전기집진장치'와 '습식세정장치'를 많이 채택하고 있는 것으로 나타나, 다이옥신 등 유해물질의 흡착 제거보다는 산성가스 및 중금속 등의 제거를 목적으로 설치되었다.

또한, 대부분의 도시쓰레기 소각시설들이 1995년부터 가동이 시작되었던 관계로 소각시설의 운전경험이 짧고 운전기술 축적이 미비하여, 급기야는 1997년 6월 도시쓰레기 소각장에

서 발생하는 다이옥신에 대한 사회적인 문제를 야기하기도 하였다.

도시쓰레기 소각시설은 종합플랜트적 성격이 강하여 이의 건설과 관리 그리고 정책입안을 위해서는 많은 기술적 자료와 경험의 축적을 필요로 하나, 독일이나 일본 등에 비해서 도시쓰레기 소각의 역사가 짧은 우리나라로서는 폐기물의 소각과 관련된 국내 연구가 절대적으로 부족하여 도시쓰레기의 소각시에 발생하는 다이옥신류 등 유해물질의 발생특성 및 제거효율을 파악하기 위한 저감기술을 선정하거나 규제기준 등을 설정하기가 매우 어려운 실정이었다.

이에 따라, 정부에서는 다이옥신 배출규제기준을 국민들이 안심할 수 있는 선진국 수준인 0.1 ng-TEQ/Nm³로 설정하고, 신설로에 대하여는 이를 즉시 적용하나, 기설로에 대하여는 시설보완 등을 통하여 0.5 ng-TEQ/Nm³을 우선 달성한 후, 궁극적으로는 0.1 ng-TEQ/Nm³을 달성할 수 있도록 예산 및 우수연소관리를 위한 운전기술의 지원을 하고 있다(국립환경연구원, 1999).

이에, 본 연구는 현재 가동중인 1일 200톤 이상의 대형 도시쓰레기 소각장에서 대기오염물질 방지시설별 다이옥신의 처리효율을 파악하여, 국내설정에 적합한 적정방지시설의 설치

유도 및 소각장별 다이옥신 저감대책을 마련하기 위한 정책입안 자료로 활용하기 위해서 수행되었다.

방지기술은 소각장의 시설과 주위 환경요인에 따라 어느 정도 정형화된 패턴을 가지고 있지만, 소각장별로 그 시설과 기술은 상이하다. 또한, 경제적 측면에서 방지기술을 비용으로 생각하는 소각로 설치기관들이 갖는 고정관념 때문에 방지기술 자체에 대한 긍정적 이해가 부족한 것이 현실이다. 현재, 소각장에서 다양한 다이옥신 방지기술을 갖추고자 할 때, 무엇을 어떻게 고려해야 할 것인가에 대한 평가 및 결정의 과정이 체계화되어 있지 않은 것이 우리의 현실이다.

이에 따라, 본 연구에서는 다이옥신 방지시설과 관련된 많은 기술시스템 중에서 오늘날 활발한 응용과 개발이 진행중인 대표적인 방지기술에 관한 종합적인 평가를 통하여 소각장의 방지기술 설계에 도움을 주고자 '계층분석과정(Analytic Hierarchy Process: AHP)'에 기초한 평가모형의 개발을 통하여 최적의 방지기술시스템을 제시하고자 한다.

복잡한 시스템에 대한 평가 및 결정문제에 있어서 기술대안의 평가기준은 정량적 자료로 표현될 수 있는 것들도 있지만, 정성적 자료로밖에 표현될 수 없는 것들도 있다. 이러한 상황에서 행해지는 최적의사결정은 이들 자료를 토대로 한 판단기준들 또는 기술대안들 간에 우선순위를 어떻게 두는가에 따라 달라지게 된다.

이러한 관점에서 볼 때, 다수의 기준하에서 평가되는 다수의 대안들의 우선순위를 선정하는 AHP 수법을 적용하여 대안들의 가치를 평가하고, 우선순위를 결정하고자 하는 본 연구에서의 접근방법은 타당하다고 본다. 또한, 이러한 AHP 수법은 다속성 의사결정분석의 선호보정이 있는 모형으로 의사결정에 참여한 사람들간의 주관적 판단의 민감도를 분석하고, 이를 어느 정도 보정할 수 있다는 점에서도 적용의 타당성이 확보된다고 할 수 있다. 본 연구의 분석에 사용된 소프트웨어는 Expert Choice사의 ECpro이다.

2. 다이옥신 방지기술의 현황

2.1 다이옥신 배출현황

2.1.1 배출기준

다이옥신이란 두 개의 벤젠고리에 염소가 여러 개 붙어 있는 화합물로 산소가 두 개인 다이옥신류(polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs)와 산소가 한 개인 퓨란류(polychlorinated dibenzofuran, PCDFs)를 총칭하며, 모두 210가지의 종류가 있다(국립환경연구원, 1999).

국립환경연구원(1999)에서는 1996년 4월에 배출가스 중의 다이옥신 측정·분석 공정시험 방법을 제정하여 운영하고 있으며, 환경부에서는 1일 50톤 이상인 생활폐기물 소각시설의 경우, 배출가스 중의 다이옥신 농도를 관리하도록 1997년 7월

표 1. 선진국의 도시쓰레기 소각로의 다이옥신 배출기준

(단위: ng-TEQ/Nm³)

구 분	미 국	스 웨 덴	독 일	일 본
배출기준	0.14~0.21	신설 0.1 기존 0.1~2	0.1	신설 0.1~5.0 기존 1.0~10.0

표 2. 우리나라 도시쓰레기 소각로의 다이옥신 배출현황

(단위: ng-TEQ/Nm³)

소각시설	1997년 배출농도	최근 배출농도	
		배출농도	연도
일 산	2.86	0.045	1999
평 촌	0.99	0.435	1998
중 동	23.12	0.001	1999
독 동	0.06	0.028	1998
상 계	0.17	0.114	1999
성 서	20.24	0.05(2호기), 0.018(3호기)	1998
창 원	1.04	0.024	1999
다 대	0.32	0.163	1999
해 운 대	0.75	0.466	1999

에 폐기물관리법 시행규칙이 개정되었다.

- ▶ 신규 시설의 경우 : 0.1 ng-TEQ/Nm³
- ▶ 기존 시설의 경우 : 0.5 ng-TEQ/Nm³ (1999년 6월 30일까지 권고기준)
0.5 ng-TEQ/Nm³ (2000년 6월 30일까지 배출기준)
0.1 ng-TEQ/Nm³ (2001년 7월 1일까지 배출기준)

한편, <표 1>과 <표 2>는 각각 선진국과 우리나라의 도시쓰레기 소각로의 다이옥신 배출기준 및 현황을 나타내고 있다.

2.1.2 인체독성

다이옥신의 독성이 처음으로 알려진 것은 염소생산 공장의 근로자들에게 '급성 염소성 여드름(chloracne)'이라 불리는 피부질환이 알려지면서부터이다. 다이옥신은 지용성이므로 체내에 들어오면 지방층에 축적되며, 인체 내에서의 생물학적 반감기는 5~11년으로 알려져 있는데, 인체에 미치는 발암의 독성(<그림 1>)에 대해서 역학조사에 근거한 학자들의 논쟁이 계속되고 있다.

2.2 다이옥신 방지기술

2.2.1 전기집진장치

일반적으로 전기집진장치(Electrostatic Precipitator: EP)의 내부온도가 200℃ 이상인 경우에는 다이옥신류가 합성되기 쉬

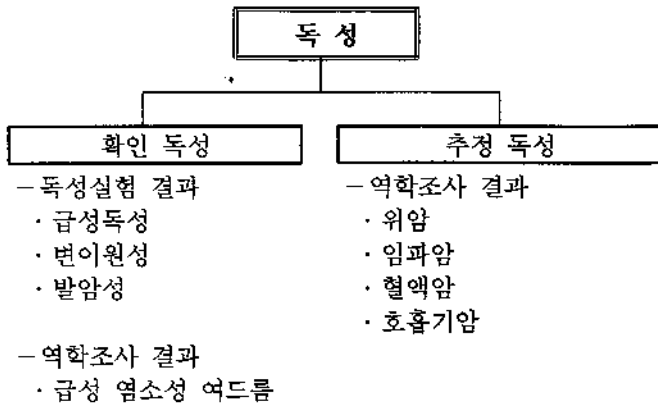


그림 1. 다이옥신의 독성체계.

운 것으로 알려져 있는데, 특히 고온 전기집진장치는 집진 효율상의 이유로 집진기의 내부온도가 약 300°C로 다이옥신류가 합성되기 쉬운 온도영역에서 운전되고 있기 때문에 다이옥신류의 동질체(Congener)들이 대부분 합성되는 것으로 보고되고 있다(US EPA, 1989).

이에 따라 국내·외를 막론하고 전기집진장치 내부에서의 다이옥신류의 합성을 저감하기 위하여 많은 노력이 기울여져 왔는데, 북미지역에서도 전기집진장치만을 사용하는 경우, 대부분 소각시설에서 다이옥신류가 합성되는 것으로 조사되었다. 다이옥신류의 합성률은 전기집진장치의 유입온도가 낮을수록 낮아지는 경향을 보이며, 일부 소각시설에서는 전기집진장치 전단에 활성탄 등의 흡착제를 주입하여 다이옥신류를 약 64% 저감한 사례도 보고된 바 있다(Environment Canada, 1986).

2.2.2 선택적 환원촉매장치

선택적 환원촉매장치(Selective Catalytic Reduction: SCR)는 De-NOx 기술로 개발된 기술로서, 다이옥신류의 제거효율을 높고 현재 분해메커니즘 등 논란이 되고 있는 기술 중의 하나이다. 즉, 약 300°C에서 운전되는 환원촉매를 사용하는 De-NOx 촉매로는 다이옥신을 제거하기가 어렵고, De-Dioxin용으로 V₂O₅의 함량을 높인 산화촉매(TiO₂ / V₂O₅ / WO₃ : TiO₂의 담체에 Pt, V₂O₅, WO₃ 등을 코팅한 촉매)가 다이옥신을 산화시키는 효과가 있다는 보고(Calsson, 1991)에 근거하여 210~260°C의 상대적으로 낮은 온도에서 운전하는 것이 일반적인 추세이다.

2.2.3 습식세정장치

습식세정장치(Wet Scrubber: WS)는 산성가스나 수은 등의 제거에는 매우 우수한 효율(HCl : 99% 이상, SO₂ : 95% 이상, 수은 : 90% 이상)을 나타내지만(Bruna, 1991), 여기에는 추가적인 폐수처리시스템이 필요하고 산성 세정수에 의한 장치의 부식물이 하나의 문제점으로 지적되고 있다. 특히, 낮은 농도의 다이옥신류를 함유하고 있는 연소가스가 유입될 때, 세정수 및 세정탑 내부의 피복재(PP, PE, Rubber 등) 및 충전물질 등에 함유되어 있는 다이옥신류 등에 의해 오히려 배기가스 중의 농도

가 증가하는 현상, 즉 'Memory Effect'에 의한 농도의 증가를 나타내는 것으로 알려져 있다.

한편, 국내의 연구결과에 의하면(김삼권 외, 1988), 습식세정탑에 의한 다이옥신류의 제거효율은 세정수에 활성탄을 혼합·사용하지 않은 경우, -5,731~-25%까지로 평균 -135%의 강도로 습식세정탑을 통과하면서 다이옥신류의 농도가 증가하는 경향을 나타내지만, 세정수에 활성탄을 섞어 배기가스를 처리한 결과, 활성탄의 혼합비율이 증가됨에 따라 다이옥신류의 제거효율은 증가되는 것으로 나타났다. 그리고 활성탄을 18,300 ppm 정도 혼합·사용한 경우, 다이옥신류의 제거효율은 약 83%를 나타낸 바 있다. 따라서, 세정수에 활성탄을 섞어 배기가스를 처리하면, 처음에는 약 75%의 제거효율을 나타내지만, 일정 기간 후에는 0.1 ng-TEQ/Nm³ 이하를 기록하는 것으로 나타나, 활성탄에 의한 제거효율도 기대해 볼 만한 것으로 판단된다.

2.2.4 반건식세정탑/여과집진장치

반건식세정탑/여과집진장치(Semi-Dry Absorption: SDA / Bag Filter: BF)의 다이옥신류 제거효율은 평균 약 99%로 나타나(김삼권 외, 1988), 1차 세진장치로 여과집진장치를 사용하는 것이 전기집진장치를 사용하는 것보다 효과적이라고 판단되는데, 일반적으로 여과집진장치는 전기집진장치에 비해 다음과 같은 장점이 있기 때문에 최근 들어 다이옥신 제거 등에 많이 이용되고 있다.

첫째, 집진효율이 전기집진장치에 비해 상대적으로 높다(1~5 mg/Nm³ 정도로 전기집진장치의 1/10 정도. 다이옥신의 전구물질의 함유율이 높다고 생각되는 미립자의 포집성능이 우수함). 둘째, 건식/반건식 소석회에 의한 HCl 제거에서는 당량비 3에서 80~95%의 높은 제거효율을 나타낸다. 셋째, 집진장치의 저온화가 상대적으로 용이하고 포집분진의 흡착작용에 의해 중금속의 제거효율도 높다(Hg는 50~70%, 그 이외의 것은 거의 100%에 가깝게 제거 가능).

이와 같이 반건식세정탑/여과집진장치는 전기집진장치에 비해 연소가스의 저온화가 상대적으로 용이하고, 비산재에 의한 흡착효과도 가능하기 때문에 다이옥신류의 배출저감에 유효한 것으로 알려져 있다.

3. 모형의 적용

3.1 AHP 모형

계층분석과정(Analytic Hierarchy Process: AHP)은 의사결정의 전 과정을 다단계로 나눈 후, 이를 단계별로 분석 해결함으로써 최종적인 의사결정에 이르게 하는 하나의 방법(Saaty, 1980)이라고 할 수 있다.

복잡한 의사결정을 합리적, 능률적으로 하기 위한 노력의

일환으로 Saaty(1980)에 의해 고안, 발전되어 온 AHP는 미국 정부의 무기통제 및 군비축소국에서 세계적 경제학자, 게임효용 이론가들과 협력작업을 할 때, 작업이 비능률적으로 진행되는 상황을 극복하기 위해서 개발된 것이다.

AHP는 인간이 의사결정을 행할 때, 두뇌가 단계적 또는 위계적 분석과정을 활용한다는 사실에 착안하여 개발되었으며, 현존하는 의사결정이론 중 가장 광범위한 인정을 받아 세계적으로 폭넓게 활용되고 있다. 이러한 AHP는 다음과 같은 네 가지의 원칙을 따르는데, 본 연구가 대상으로 하는 다이옥신 방지기술의 평가선정모형의 설계에도 이 원리를 적용하게 된다.

(a) 위계적 구조체의 설정: 어떤 복잡한 현상을 다룰 때, 그 구성요소별로, 나아가서는 더 작은 부분으로 나누어 가면서 종국적으로는 계층구조를 설정하는 절차를 취한다. 다시 말하면, 어떤 한 현상에 대해서 동질성을 가진 더 작은 부분으로 계속 분할해 나감으로써 보다 많은 정보를 문제의 구조화에 포함시키며, 보다 완벽한 전체 시스템을 구성해 나가는 것이다.

(b) 상대적 중요성의 설정: 관측한 사물간의 관계를 인식하고, 유사한 사물들을 짝(pair)으로 묶어 특정기준에 근거하여 대비하고, 그 짝의 구성인자간의 선호도를 판단하는 사유과정을 따르며 최종적으로 상상이나 논리과정을 통하여 그들이 내린 판단을 종합해서 전체 시스템에 대한 평가 및 판정을 보다 강화한다.

(c) 논리적 일관성의 유지: 상호 복잡한 관련을 갖고 있는 사물이나 사건에 대해서 논리적 일관성(consistency)을 갖도록 관계가 설정되어야 한다. 여기서, 일관성이란 두 가지의 의미를 갖는데, 하나는 유사한 사물이나 사건들을 동질성이나 관련성에 따라 묶는 것이고, 다른 하나는 특정한 기준이 있을 경우에 사건이나 사물들이 갖는 관계의 강약을 그 기준에 따라 논리적인 방법으로 구성하는 것이다.

(d) 상대적 가중치의 종합: 평가대상이 되는 여러 대안들에 대한 종합적인 우선순위를 얻기 위하여 평가사항들에 대한 상대적인 가중치를 종합하게 된다.

3.2 기술시스템 대안

앞에서 설명한 것처럼, 다이옥신 방지기술은 크게 전기집진장치(EP), 선택적 촉매환원장치(SCR), 습식세정장치(WS), 반건식세정탑/여과집진장치(SDA/BF) 등이 있는데, 일반적으로 소각장 다이옥신 방지시설을 설치할 때, 이들의 조합으로 방지시설의 기술프로세스가 이루어진다. 따라서, 본 연구에서는 현재 소각장에서 사용되고 있는 다음과 같은 여섯 가지의 기술시스템을 대안으로 삼고자 한다.

3.2.1 SDA/BF-SCR 시스템

이 기술 시스템은 SDA에서 소석회 슬러리를 분사하여 SO_x, HCl 등의 산성가스를 제거하고, 이어서 BF 입구의 유동상 반응탑이나 덕트 내로 A/C 분말을 연속적으로 분무하여 배출가스

중의 다이옥신류, 중금속 등을 흡착하면서 BF로 이동하여 BF 내부의 여과포에 비산재, 소석회 분말 등과 함께 퇴적층을 형성함으로써 다이옥신류, 중금속 등을 흡착·제거한다. 또한, BF 후단에 SCR을 설치하여 배출가스 중에서 탈질효과 등을 얻으며, 일반적으로 비산재 등의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 SCR을 집진장치 다음에 설치한다.

이 시스템을 채택하고 있는 목동 소각시설의 실측치에 의하면 SCR에 의한 NO_x 제거율은 90.0%이고, 다이옥신 제거율은 20.8%로 나타나, SCR의 설치목적이 주로 De-NO_x 목적으로 설치되었음을 알 수 있다. 이 프로세스를 채택하고 있는 스토키 방식의 소각시설에는 고양 일산, 과천, 용인, 군포 산본, 구리, 이천, 파주, 의정부, 목동 2호기, 대전 1호기, 김해 장유, 대구 칠곡, 천안, 인천 경서, 광주 상무, 울산, 대전 2호기, 강남 일원 등이 있다.

3.2.2 SNCR-SDA/BF 시스템

이 기술 시스템의 프로세스는 소각로의 연소실 상부에서 SNCR의 분사노즐을 통하여 요소수나 암모니아수를 분사하여 질소산화물을 제거하고, SDA에서 소석회 슬러리를 분사하여 SO_x, HCl 등의 산성가스를 제거한다. 그리고 BF 입구의 유동상 반응탑이나 덕트 내로 A/C 분말을 연속적으로 분무하여 배출가스 중의 다이옥신류, 중금속 등을 흡착하면서, BF로 이동하여 BF 내부의 여과포에 비산재, 소석회 분말 등과 함께 퇴적층을 형성하여 다이옥신류, 중금속 등을 흡착·제거한다.

창원 소각시설의 실측치에 의하면, 이 프로세스는 다이옥신 제거효율이 우수하지만, NO_x 제거 효율은 SCR이 설치된 소각시설보다 다소 떨어진다. 또한, WS나 SCR을 많이 채택하는 독일이나 일본과는 달리 유럽 및 북미지역에서는 다이옥신류 저감을 위하여 SNCR-SDA/BF 프로세스를 주로 채택하고 있는데, SNCR은 SCR에 비해 NO_x의 제거효율은 다소 떨어지나, 설치 및 운영비용이 저렴하고 소각로 주입 요소나 암모니아에 의해 염소의 활성도가 저하되는 것으로 알려져, 다이옥신류의 발생 억제 효과도 있는 것으로 보고되고 있다. 이 프로세스를 채택하고 있는 스토키 방식의 소각시설에는 안양 평촌, 창원 1호기, 광명, 창원 2호기, 안산, 화성 등이 있다.

3.2.3 SDA/BF 시스템

SDA에서 소석회 슬러리를 분사하여 SO_x, HCl 등의 산성가스를 제거한다. 그리고 BF 입구의 유동상 반응탑이나 덕트 내로 A/C 분말을 연속적으로 분무하여 배출가스 중의 다이옥신류, 중금속 등을 흡착하면서 BF로 이동하여 BF 내부의 여과포에 비산재, 소석회 분말 등과 함께 퇴적층을 형성함으로써 다이옥신류, 중금속 등을 흡착, 제거한다. 이 프로세스를 채택하고 있는 스토키 방식의 소각시설에는 안양 평촌 등이 있다.

3.2.4 EP-WS-SCR 시스템

이 기술 시스템은 EP를 집진장치로 사용하고, 후단에 WS를

설치하여 가스소다 수용액을 분사함으로써 산성가스를 제거하며, 이어서 SCR에서 질소산화물 등을 제거한다. 이 프로세스는 EP의 저온화와 더불어 EP 전단 및 WS에 활성탄을 분무하면 최종 배출구에서 다이옥신 제거효율이 증가한다. 이 프로세스를 채택하고 있는 스토커 방식의 소각시설에는 부산 다대, 노원 상계, 성남 2호기, 부산 명지 등이 있다.

3.2.5 EP-WS 시스템

이 기술 시스템은 EP를 집진장치로 사용하고, 후단에 WS를 설치하여 가스소다 수용액을 분사함으로써 산성가스를 제거한다. 그리고 EP의 저온화와 더불어 EP 전단 및 WS에 활성탄을 분무하면 최종 배출구에서 다이옥신 제거효율이 증가한다. 이 시스템을 채택하고 있는 스토커 방식의 소각시설에는 대구 성서 등이 있다.

3.2.6 EP-SCR-WS 시스템

이 기술 시스템을 채용하고 있는 곳은 해운대, 다대 등의 소각장으로, EP 및 SCR의 오염물질 제거효율과 에너지의 효율적 이용 측면에서 폐열보일러의 후단온도를 290℃로 높게 설계하여 방지시설을 조합한 것으로 보이나, EP 내부온도가 다이옥신류가 합성되기 쉬운 온도영역에 있고 SCR에 유입되는 연소가스는 EP에 의해 분진은 제거되지만, HCl, 분진 등 산성가스가 제거되지 않아 촉매의 수명에도 문제점이 제기되고 있다. 그리고 이 시설은 설계 당시에 에너지의 효율적인 이용 측면이 지나치게 강조되어 대기오염물질의 저감 및 SCR의 수명 측면 등에서 문제점의 보완이 요구되고 있는데, 다이옥신류를 저감하기 위해서는 이 시설의 적정 방지시설의 기술조합이 EP-SCR-WS 순으로 이루어져야 할 것으로 판단되며, EP 및 WS에서의 다이옥신의 합성을 막기 위해서는 EP의 저온화 및 EP 전단에서의 활성탄 분무, 세정수에 활성탄 혼합사용 등의 조치가 필요할 것으로 본다(환경관리공단, 1998).

3.3 시스템의 평가기준

본 연구는 소각장에서 사용되는 다이옥신 방지시설에 대한 선정용 목표로 하기 때문에 상술한 기술 시스템 대안들 중 어느 시설이 가장 적합한 것인지를 판정하고자 하는 것이다. 따라서, 이들 대안의 평가기준은 이러한 목적에 부합되도록 의사결정을 지원할 수 있는 효율성 측면을 중심으로 선정되어야 하기 때문에 시설투자에 대한 제반 비용을 경제성으로 하고, 방지시설의 기술적 특성, 효율 등은 기술성으로, 운영 및 보수관리상의 문제 등을 운용성으로 보는 세 가지의 평가기준을 설계하도록 한다.

경제성은 설치비와 운영비로 나누어 고려하였는데, 설치비는 하루 처리량이 200t인 소각장을 기준으로 하여 산정하였고, 운영비는 1999년도 소각장별 실제 운영비 현황을 근거로 인건비, 전력비, 약품비, 유지보수비, 소각재 처리비, 기타 비용

으로 산정하였다. 그런데 공정별 운영비에 대한 구체적 자료 확보가 곤란하여 공정별로의 운영의 난이도 측면에서 현장관계자와 인터뷰하고 그 결과를 3단계(높음, 보통, 낮음)로 구분하였다.

기술성은 소각시설 중 방지시설에 국한하여 접근하도록 한다. 다이옥신 제거율은 최종배출까지의 제거율을 산정하는데, 여기서 온도유지성은 각 방지기술별 요구온도가 다르기 때문에 그들 기술에 따라 적정온도를 유지하는 기술을 고려한 것으로서, 다이옥신은 300℃에서 재합성이 가장 높기 때문에 300℃는 피해 가도록 온도를 유지해야 한다. 전처리 요구도는 방지시설에 유입되는 가스의 온도가 너무 높으면 방지시설의 고장원인이 되므로 소각로를 거쳐 폐열보일러에서 나오는 가스의 온도를 각 방지시설에 알맞게 처리해야 한다. 방지물질 제거율은 다이옥신뿐만 아니라, 기타 유해물질을 제거하는 것도 중요하기 때문에 대표적인 유해물질인 NOx, SOx의 제거율을 고려하였다.

운용성은 설치 후의 운전시에 요구되는 전반적인 운영상의 조작성을 고려하였고, 보수관리에 있어서의 기술적인 어려움과 각 방지시설의 주기적인 점검 및 부품교환 등의 문제를 고려하였다.

지금까지 살펴본 기술대안에 대하여 각 평가기준별 전문가의 의견과 기존의 자료를 바탕으로 정리한 방지기술 시스템간의 상호 비교결과는 <표 3>과 같으며, 각종 기술 시스템의 선호도 평가를 위하여 설계된 계층구조의 모형은 <그림 2>와 같다.

3.4 시스템간의 쌍대평가

<표 4>에서 <표 11>에 나타난 기준간 쌍대비교는 앞 절의 자료를 토대로 평가자의 주관적 선호도가 반영되면서 수행된다. 본 연구에서는 서울 및 경기 소재의 소각장을 비롯하여 환경부, 국립환경연구원, 서울시립대 대기오염방지연구실 등을 직접 방문하여 평가기준에 따른 각 대안별 특성을 파악한 후에 <표 3>을 작성하였고, 이를 근거로 하여 각 계층별 평가작업이 이루어졌다.

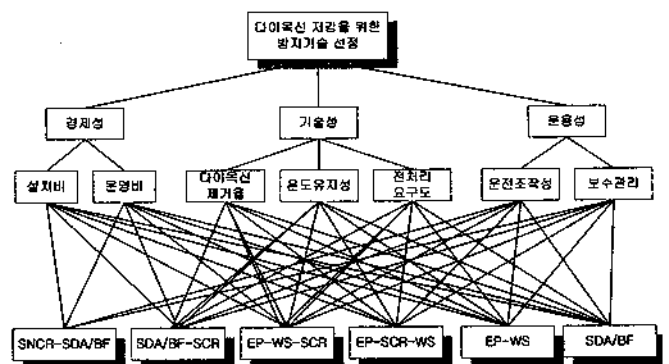


그림 2. 방지기술 계층구조의 설계.

표 3. 평가기준에 따른 기술 시스템 대안별 특성

평가기준 \ 대안		SDA/BF-SCR	SNCR-SDA/BF	SDA/BF	EP-WS-SCR	EP-WS	EP-SCR-WS
경제성	설치비 (200 t/day)	159억	100억	147억	187억	182억	156억
	운영비 (/연)	높음	낮음	높음	낮음	보통	높음
기술성	제거율(%)	91.1	97.7	98.5	96.2	58.8	70.4
	온도 유지성(°C)	100 (135→157→235)	52.5 (165→135→157.5)	22.5 (135→157.5)	240 (325→16→235)	165 (325→160)	165 (325→235→160)
	전처리 요구도 (850°C 기준)	140°C	160°C	140°C	155°C	243°C	271°C
운용성	운전조작성	운전조작성 용이	운전조작성 어려움	운전조작성 용이	운전조작성 어려움	운전조작성 어려움	운전조작성 용이
	보수 관리	<ul style="list-style-type: none"> • 여과포 교환필요 • 슬러리 관리필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 노즐 점검필요 • 여과포 관리필요 • 슬러리 관리필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 여과포 교환필요 • 노즐 점검필요 • 슬러리 관리필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 전극 교환필요 • 부식·마모 방지필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 전극 교환필요 • 부식·마모 방지필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 전극 교환필요 • 부식·마모 방지필요

나아가, 본 연구에서는 모형의 현장 적용시, 평가주체에 따라서 이들 쌍대비교 데이터는 달라질 수 있으므로, ECpro가 제공하는 감도분석 기능을 이용하여 평가의 신뢰성과 일관성을 검증하였다.

<표 3>에서 정량적 데이터의 경우, Saary(1980)가 제시한 가중치 부여방법을 통하여 기술대안간의 특성을 고려하면서 우선순위를 결정짓는 쌍대비교의 근사값을 구하였고, 정성적 데이터의 경우, 전문가의 자문을 토대로 <표 3>을 구성하였고, 이 표를 근거로 하여 주관적 평가를 통해 산출하였다.

<표 4>는 방지시설 도입의 주체가 갖는 주기준별 선호도의 패턴이 평가에 어떻게 반영되는지를 살펴보기 위하여 아래와 같은 네 가지의 시나리오를 고려하기로 한다. <표 5>는 주기준의 하위기준간 선호도 평가의 결과이며, <표 6>은 본 모형에서 고려된 각 기준에 대한 방지시설 기술대안간의 선호도

표 4. 주기준간의 선호도 시나리오

동등한 중요도, CR : 0.00				경제성 중시, CR : 0.00			
	경제성	기술성	운용성		경제성	기술성	운용성
경제성	1	1	1	경제성	1	2	2
기술성	1	1	1	기술성	1/2	1	1
운용성	1	1	1	운용성	1/2	1	1
기술성 중시, CR : 0.00				운용성 중시, CR : 0.00			
	경제성	기술성	운용성		경제성	기술성	운용성
경제성	1	1/2	1	경제성	1	1	1/2
기술성	2	1	2	기술성	1	1	1/2
운용성	1	1/2	1	운용성	2	2	1

표 5. 하위기준간 선호도 평가결과

경제성	설치비	운영비	
설치비	1	1/2	
운영비	2	1	
CR : 0.00			
기술성	다이옥신 제거율	온도 유지성	전처리 요구도
다이옥신 제거율	1	4	5
온도 유지성	1/4	1	3
전처리 요구도	1/5	1/3	1
CR : 0.08			
운용성	운전 조작성	보수 관리	
운전 조작성	1	1	
보수 관리	1	1	
CR : 0.00			

평가의 결과이다.

그리고 CR값은 모두 0.1보다 작게 나타나 평가의 일관성은 확보되었다고 볼 수 있다.

4. 적용의 결과

소각장이 채용하는 다이옥신 방지시설의 평가 및 선정을 위하여 이 논문에서는 다음과 같은 네 가지 시나리오에 대한 분석을 행하였다. 첫째는 평가의 주기준들에 동등한 가중값을 두

표 6. 기술 시스템 대안간의 선호도 평가결과

			SDA/BF-SCR	SNCR-SDA/BF	SDA/BF	EP-WS-SCR	EP-WS	EP-SCR-WS
경제성	설치비	SDA/BF-SCR	1	1/3	1	2	2	1
		SNCR-SDA/BF	3	1	3	4	4	3
		SDA/BF	1	1/3	1	2	2	1
		EP-WS-SCR	1/2	1/4	1/2	1	1	1/2
		EP-WS	1/2	1/4	1/2	1	1	1/2
		EP-SCR-WS	1	1/3	1	2	2	1
	운영비	SDA/BF-SCR	1	1/3	1	1/3	1/2	1
		SNCR-SDA/BF	3	1	3	1	2	3
		SDA/BF	1	1/3	1	1/2	1/2	1
		EP-WS-SCR	3	1	2	1	2	3
		EP-WS	2	1/2	2	1/2	1	2
		EP-SCR-WS	1	1/3	1	1/3	1/2	1
기술성	제거율	SDA/BF-SCR	1	1	1	1	7	5
		SNCR-SDA/BF	1	1	1	1	7	5
		SDA/BF	1	1	1	1	7	5
		EP-WS-SCR	1	1	1	1	7	5
		EP-WS	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1/3
		EP-SCR-WS	1/5	1/5	1/5	1/5	3	1
	은도유지성	SDA/BF-SCR	1	1/2	1/2	3	2	2
		SNCR-SDA/BF	2	1	1	5	3	3
		SDA/BF	2	1	1	5	3	3
		EP-WS-SCR	1/3	1/5	1/5	1	1/3	1/3
		EP-WS	1/2	1/3	1/3	3	1	1
		EP-SCR-WS	1/2	1/3	1/3	3	1	1
전처리요구도	SDA/BF-SCR	1	1	1	1	1/2	1/2	
	SNCR-SDA/BF	1	1	1	1	1/2	1/2	
	SDA/BF	1	1	1	1	1/2	1/2	
	EP-WS-SCR	1	1	1	1	1	1	
	EP-WS	2	2	2	1	1	1	
	EP-SCR-WS	2	2	2	1	1	1	
운용성	운전조작성	SDA/BF-SCR	1	2	1	2	1	2
		SNCR-SDA/BF	1/2	1	1/2	2	1	2
		SDA/BF	1	2	1	1/2	1/2	1
		EP-WS-SCR	1/2	1/2	2	1	1	2
		EP-WS	1	1	2	1	1	2
		EP-SCR-WS	1/2	1/2	1	1/2	1/2	1
	보수관리	SDA/BF-SCR	1	1	1	3	2	3
		SNCR-SDA/BF	1	1	1	3	2	3
		SDA/BF	1	1	1	3	2	3
		EP-WS-SCR	1/3	1/3	1/3	1	1/2	1
		EP-WS	1/2	1/2	1/2	2	1	2
		EP-SCR-WS	1/3	1/3	1/3	1	1/2	1

는 경우, 둘째는 경제성을 중시하는 경우, 셋째는 기술성을 중시하는 경우, 넷째는 운용성을 중시하는 경우가 그것이다. 이를 위하여 중시되는 특정기준에 대한 가중치는 0.5로 하고, 나머지 기준의 가중치는 동등하게 하는 방법을 취한다. 각 시나리오별로 평가절차가 전개되고, 나아가 감도분석이 행해진 결과가 <표 7~10>과 <그림 3~6>에 나타나 있다.

먼저, 경제성, 기술성, 운용성의 중요도를 균등하게 두었을 경우, 최적기술대안은 SNCR-SDA/BF(0.242)로 다른 대안과는 그 중요도에서 명확히 구별되게 나타났다. 그 다음 기술대안으로는 아주 근소한 차이를 나타내지만, SDA/BF-SCR, SDA/BF의 순으로 나타났으며, 계속해서 약간의 차이를 나타내면서, EP-WS-SCR, EP-WS, EP-SCR-WS의 순으로 기술 시스템의 최종 중요도가 평가되었다.

경제성을 중시한 경우는 SNCR-SDA/BF(0.270)가 가장 선호되

는 것으로 나타났으나, EP-WS-SCR이 두 번째로 중요하게 나타나고 있다.

기술성을 중시했을 경우, 역시 최적대안은 SNCR-SDA/BF(0.248)로 나타났으며, 약간의 중요도 차이를 두고, SDA/BF, SDA/BF-SCR, EP-WS-SCR, EP-WS, EP-SCR-WS의 순으로 최종 중요도가 평가되었다.

마지막으로 운용성에 높은 중요도를 둔 경우, SNCR-SDA/BF(0.240)가 가장 높게 평가되었고, 그 다음으로 SDA/BF-SCR, SDA/BF, EP-WS-SCR, EP-WS, EP-SCR-WS의 순으로 최종 중요도가 평가되었다. 결론적으로, SNCR-SDA/BF 프로세스가 경제성, 기술성, 운용성이라고 하는 모든 기준에서 대부분 높게 평가되어 다이옥신 방지설비에서 가장 중요한 기술 시스템으로 채택되어야 함을 말해 주고 있다.

표 7. 계층별 중요도(균등한 중시)

구분 조건	상위기준	하위기준	대안		
균등한 중시	경제성	0.333	설치비	0.111	SNCR-SDA/BF 0.242 SDA/BF-SCR 0.187 SDA/BF 0.186 EP-WS-SCR 0.169 EP-WS 0.122 EP-SCR-WS 0.093
		0.333	운영비	0.222	
	기술성	0.333	다이옥신 제거율	0.225	
			온도 유지성	0.075	
			전처리 요구도	0.034	
			운전 조작성	0.167	
	운용성	0.333	보수관리	0.167	

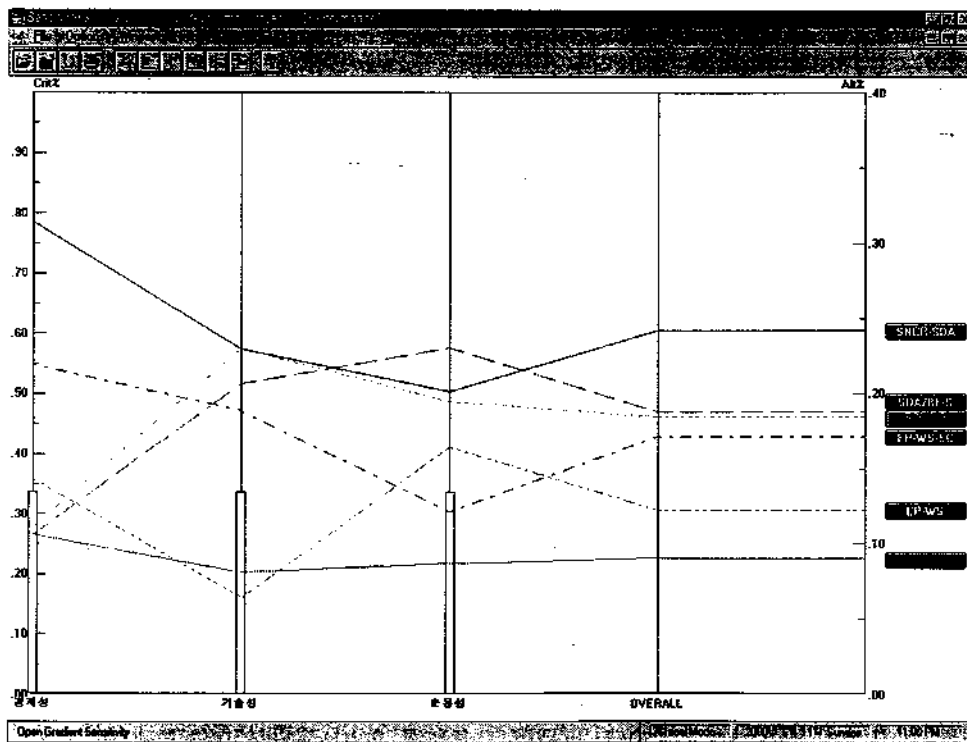


그림 3. 기술 시스템별 중요도(균등한 중시).

표 8. 계층별 중요도(경제성 중시)

조건	구분	상위기준	하위기준	대안	
경제성 중시	경제성	0.500	설치비	0.111	
			운영비	0.333	
	기술성	0.250	다이옥신 제거율	0.225	SNCR-SDA/BF 0.270
			온도 유지성	0.056	EP-WS-SCR 0.179
			전처리 요구도	0.034	SDA/BF 0.165
				0.034	SDA/BF-SCR 0.164
	운용성	0.250	운전 조작성	0.167	EP-WS 0.126
			운전 조작성	0.125	EP-SCR-WS 0.097

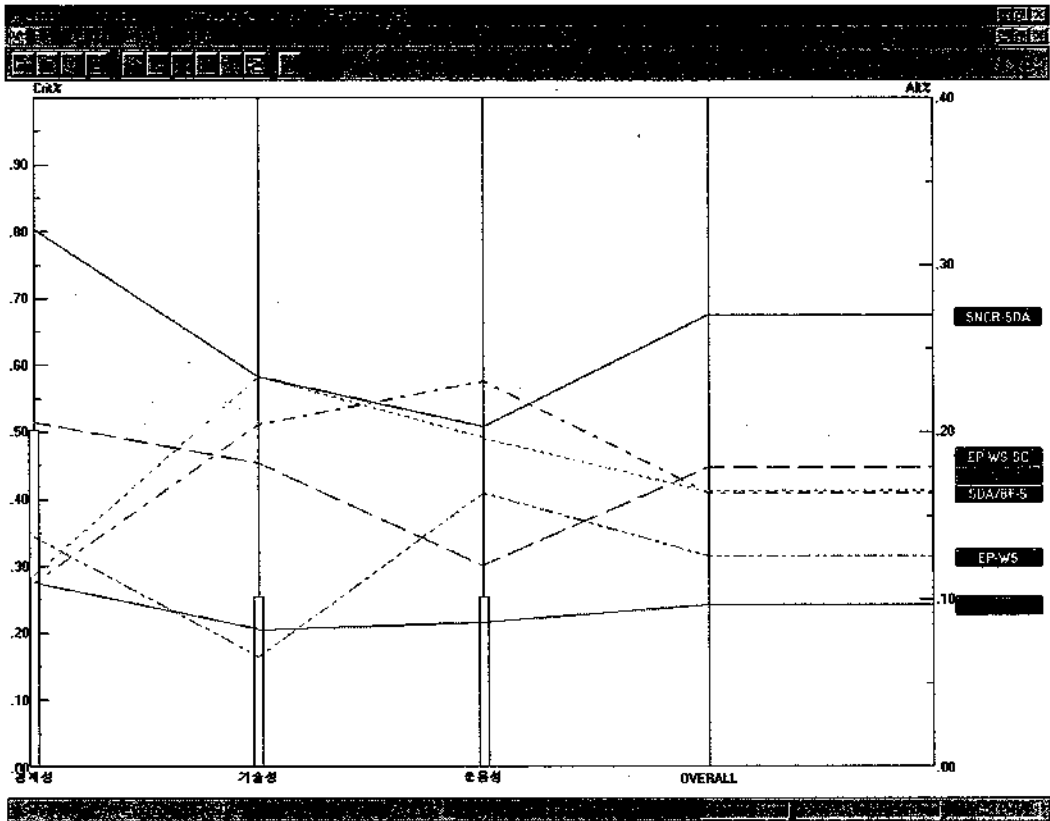


그림 4. 기술 시스템별 중요도(경제성 중시).

표 9. 계층별 중요도(기술성 중시)

조건	구분	상위기준	하위기준	대안		
기술성 중시	경제성	0.250	설치비	0.083	SNCR-SDA/BF SDA/BF SDA/BF-SCR EP-WS-SCR EP-WS EP-SCR-WS	0.248 0.194 0.188 0.172 0.108 0.090
			운영비	0.167		
	기술성	0.500	다이옥신 제거율	0.337		
			온도 유지성	0.113		
			전처리 요구도	0.050		
	운용성	0.250	운전 조작성	0.125		
			보수관리	0.125		

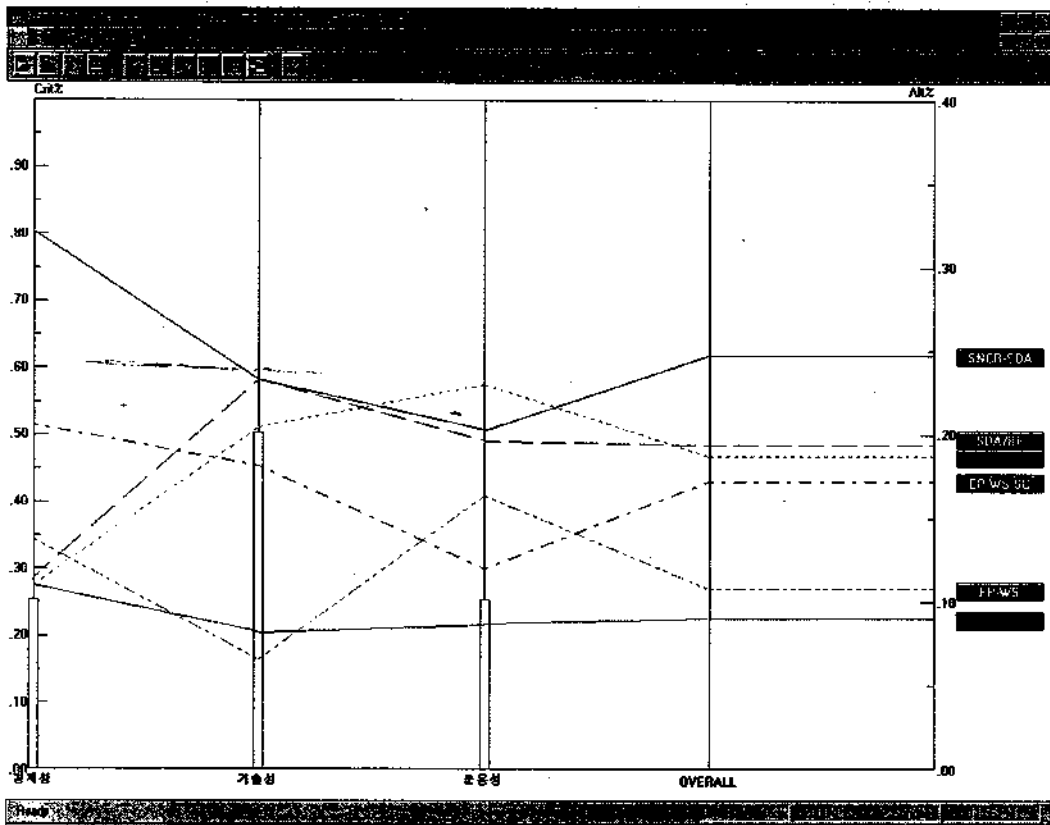


그림 5. 기술 시스템별 중요도(기술성 중시).

표 10. 계층별 중요도(운용성 중시)

구분 조건	상위기준	하위기준	대안
운용성 중시	경제성 0.250	설치비	0.083
		운영비	0.167
	기술성 0.250	다이옥신 제거율	0.168
		온도 유지성	0.056
		전처리 요구도	0.025
	운용성 0.500	운전 조작성	0.025
		보수관리	0.025
			SNCR-SDA/BF
		SDA/BF-SCR	0.194
		SDA/BF	0.185
		EP-WS-SCR	0.157
		EP-WS	0.132
		EP-SCR-WS	0.091

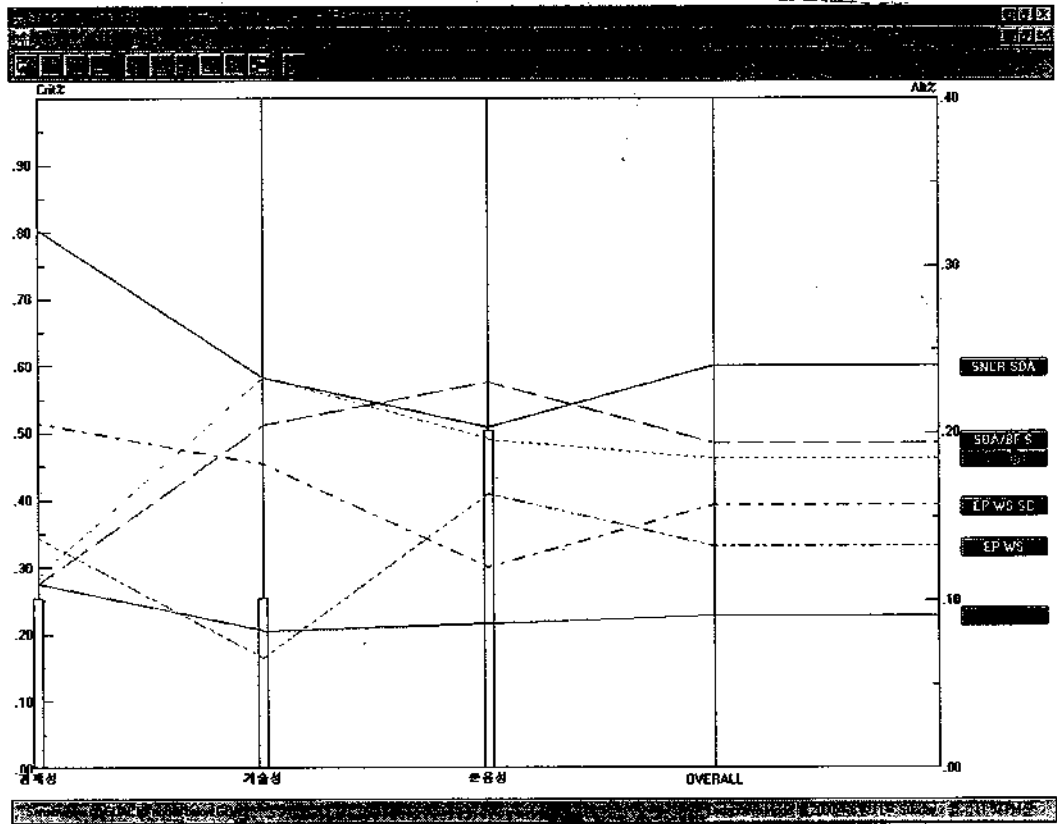


그림 6. 기술 시스템별 중요도(운용성 중시).

5. 결론

본 연구의 결과, 대형(하루 200t 처리규모 기준) 도시쓰레기 소각시설에서 다이옥신류를 저감하기 위한 경제성, 기술성, 운용성 측면의 최적 방지시설은 SNCR-SDA/BF 시스템으로 나타났다. SDA/BF-SCR 공정도 우수한 다이옥신의 제거효율을 나타냈으나, 설치비 및 운영비에서 SNCR-SDA/BF에 비해 높아 최적기술 시스템으로는 선정되기 어렵다. 그리고 전기집진장치(EP)를 포함하고 있는 기술 시스템의 경우, 경제성, 기술성, 운용성 면에서 효율이 떨어지는 것으로 나타났기 때문에 향후 전기집진장치(EP)를 포함한 방지기술은 사용하지 않는 것이 타당하다고 판단된다.

그리고 이 연구를 통하여 건설 예정인 대형 소각장의 다이옥신 저감을 위한 방지시설은 SNCR-SDA/BF 공정의 기술 시스템을 채택하는 것이 바람직하다는 결론이 도출되었다.

결국 본 연구의 목적은 다이옥신 오염의 심각성을 저감하기 위하여 소각장에서 채용될 방지기술의 선정에 대한 문제에 초점을 맞추어, AHP의 적용가능성을 모색하고자 한 것이었는데, 다이옥신 방지기술들이 다양한 기본기술의 조합에 의한 시스템들로 제시되고, 이러한 여섯 가지의 기술대안들이 모두 기술적 측면에서 채용될 수 있는 속성을 가졌기 때문에 AHP적 접근이 충분히 수행될 수 있었다.

이와 같이 다기준 의사결정수법의 하나인 AHP를 통하여 기술 시스템 자체에 대한 검토를 경제성, 기술성, 운용성 등 다수의 기준하에서 통합적으로 고려하고 평가할 수 있는 모델을 제시했다는 점에서 본 연구의 의의는 크다 하겠다.

이러한 연구의 의의와 더불어 기술성과 경제성에 대한 합리적인 평가기준을 세부적으로 설정하는 작업과 그들간의 상호관련성에 대한 더욱더 면밀한 검토를 행할 필요가 있어, 이를 추후의 연구과제로 제시하고자 한다.

본 연구의 수행과정에서 우리나라의 소각장 방지기술이 제대로 운영된 것은 1998년 말에서 1999년도 정도로서 아직은 기초통계 자료조차 미비한 상태일 뿐만 아니라, 더구나 그 기술

자체가 외국에서 도입된 것이라 기술적인 측면에서 접근하기도 어려웠고, 운영적 측면에서도 축적된 기술이 빈약해서 조사에 많은 어려움이 있었다.

또한, 소각장의 일반적인 이해가 혐오시설로 인식되어 있고, 다이옥신에 대한 논의가 사회적으로 민감한 사안이라 자료를 수집하는 과정에서도 어려움이 많았는데, 앞으로 다이옥신 방지기술이 국산화되고 기술면과 운영면에서 많은 자료가 확보됨에 따라 기술시스템의 선정모형은 더욱 정밀화될 수 있을 것이다.

참고문헌

국립환경연구원 (1999), 도시쓰레기 소각 효율 계고를 위한 기술 세미나.
권철신, 조근태, 홍순욱 역 (2000), 리더를 위한 의사결정, 동원출판사.
김삼권 외 2명 (1988), 도시쓰레기 소각시설의 방지시설별 다이옥신 처리효율 조사연구, 국립환경연구원.
김삼권 외 11명 (1999), 도시폐기물 소각시설에서의 다이옥신류 생성 및 배출, 한국폐기물학회.
김삼권 외 12명 (1999), 도시폐기물 소각시설의 방지시설별 다이옥신류 처리효율 조사연구, 한국폐기물학회.
조근태(권철신 감수) (1999), R&D의 예측과 결정, 자유아카데미.
환경관리공단 (1998), 소각시설 운영 관리 현장 업무.
환경관리연구원 (1999), 특집/다이옥신 대책 및 측정기술(I), 첨단환경 기술.
환경관리연구원 (1999), 특집/다이옥신 대책 및 측정기술(II), 첨단환경 기술.
환경관리연구원 (2000), 특집/폐기물처리와 소각 발전기술, 첨단환경 기술.
Bruna, T. G. (1991), Air & Waste Management Association.
Caisson, K. B. (1991), Dioxin Destruction in Catalysis for NO_x Reduction.
Environment Canada (1986), Air Pollution Control Technology.
Satty, T. L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill.
Satty, T. L. (1983), Priority Setting in Complex Problem, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 30(3).
Satty, T. L. (1986), Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process, *Management Science*, 32(7).
US EPA (1989), Combustion Control at Existing Facilities.



권철신

한양대학교 무기재료공학과 학사
한양대학교 산업공학과 석사
연세대학교 경제학과 석사
일본 동경공대 경영공학과 석사
일본 동경공대 사회공학과 박사
미국 MIT Post.Doc. 초청연구원
한양대학교 산업공학과 조교수
미국 GWU 경영과학과 초빙교수
현재: 성균관대학교 시스템경영공학부 교수
관심분야: R&D시스템, R&D경영, NPD, 개발공학, 컨셉개발론, 창조경영



조근태

성균관대학교 산업공학과 학사
성균관대학교 R&D시스템전공 석사
성균관대학교 개발공학전공 박사
성균관대학교 과학기술연구소 특별연구원
University of Pittsburgh Post-Doc. 연구원
한국보건산업진흥원 책임연구원
현재: 성균관대학교 시스템경영공학부 조교수
관심분야: R&D결정론, 기술예측론, AHP, 개발공학, 기술정보론, 기술경영