

AHP기법을 이용한 천연가스 발전소의 최적가용기술의 중요도 선정

김동욱¹ · 권순길² · 황용우³ · 김영운²

¹해태HTB(주)

²인하대학교 일반대학원 글로벌산업환경융합전공

³인하대학교 환경공학과

Selection of the Importance of Optimum Utilization Technology for Natural Gas Power Plants Using AHP Technique

Donguk Kim¹ · Soongil Kwon² · Yongwoo Hwang³ · Youngwoon Kim²

¹HAI TAI HTB CO.,Ltd.

²Program in Global Industrial & Environmental Technology Convergence, Graduate School of Inha University

³Environmental engineering Department, Inha University

요 약

최근 국내에서 환경오염시설의 통합관리에 관한 법률이 시행되었다. 통합관리에 따라 사업장의 환경인허가는 2017년 시행된 통합법에 따라 사업장 환경관리수준평가를 통하여 인허가 기간을 5~8년까지 갱신하게 된다. 이 과정에서 최적가용기술의 적용률을 평가하게 되는데, 높은 평가점수를 받기 위해서 반드시 필요한 부분이다. 하지만 최적가용기술을 평가하는데 있어 사업장의 상황을 고려하지 않는 문제점이 있다. 적용 가능한 최적가용기술을 국내 기준서와 EU 기준서를 조사하여 사업장의 상황에 맞게 전문가들을 대상으로 AHP분석을 실시하여 우선적으로 적용할 기술을 선정하여 우선순위를 마련하였다.

주제어: 최적가용기술, 천연가스 발전소, AHP

ABSTRACT: Recently, the Act on the Integrated Management of Environmental Pollution Facilities was implemented in Korea. Under the integrated management, the license period of the workplace will be renewed by five to eight years through the assessment of the level of environmental management of the workplace in accordance with the integrated law implemented in 2017. In this process, the application rate of the optimal use technique is evaluated, which is essential to obtain a high evaluation score. However, there is a problem in assessing optimal use techniques without considering the situation at the workplace. An AHP analysis was conducted on experts according to the situation of the workplace by examining the applicable optimal use techniques and the EU standards, and the priority was prepared by selecting the techniques to be applied first.

Key words: Best Available Techniques (BAT), Natural Gas Power Plants, AHP

1. 서 론

지난 30여 년간 유지되어온 분야별로 단절된 환경관리 체계는 산업발전, 사업장 특성, 환경변화 등을 반영하지 못하고 비전문적인 검토와 형식적인 관리로 인해 환경개선 효과는 떨어지고 기업에게는 불필요한 부담이 가중되어왔다. 이에 따라 오염물질 간 상호영향을 감안하여 사업장 특성을 반영한 최적관리방안을 찾고 사업장 오염물질 발생을 최소화하여 환경영향을 저감할 수 있는 대책이 필요하다. 체계적인 관리방안 구축이 필요하며, 환경영향을 합리적 규제 설정, 허가절차 및 지도점검의 통합적 접근, 기술개발과 적정기술의 적용 등으로 환경적 경제적으로 시너

지 효과를 낼 수 있는 방안을 마련해야 한다.

유럽연합(EU) 등 선진국의 제도와 경험을 토대로 국내 기업의 특성을 반영하여 현재 사업장 환경관리의 문제점을 해결하고 기업의 부담을 줄이면서, 사업장 여건에 맞는 환경관리체계를 구축하여 환경 개선 효과를 극대화하기 위해 통합 환경 관리제도가 도입되었다.

통합 환경 관리¹⁾란 오염물질이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고, 경제적으로 가능한 수단(최적가용기술)을 통해서 사업장 전체적으로 오염물질을 최소화 하는 최적의 환경관리 체계를 의미한다. 환경매체별로 운영되었던 기존의 허가 제도를 「환경오염시설의 통합관리에 관한 법률」시행령 제4조 제2항 및 동법 시행규칙 제9조 제

[‡] Corresponding author:

6항에 따라 사업장 단위로 통합 하고, 향상된 기술 수준을 반영하여 합리적이고 사업장 맞춤형으로 관리하도록 변경되었다.

따라서 본 연구에서는 LNG발전소에 적용 가능한 최적 가용기법을 국내 최적가용기법 기준서와 EU 최적가용기법 기준서를 조사하여 사업장의 상황에 맞게 분류하여 항목들을 정리하고, 대기환경 전문가들을 대상으로 AHP분석을 실시하여 LNG발전소 최적가용기법의 우선순위를 선별하여 최적가용기법 적용 시 우선적으로 적용할 기법을 선정하였다. 본 연구를 위하여 전기 및 증기 생산시설의 최적가용기법 중 LNG발전소에 해당하는 최적가용기법을 선별하여 AHP기법을 실시하였고, 전문가의 의견을 수렴하여 가중치²⁾ 분석을 실시하여 최적가용기법의 우선순위를 산정하였다.

2. 국내 천연가스 발전소 개요 및 현황

우리나라 발전시설을 발전원별로 구분하면, 화력발전이 약 64.96%로서 국내 주요 발전방식에 해당되며, LNG 발전이 30.80%로 가장 많고, 석탄 화력발전이 30.25%, 유류발전이 3.91% 수준이다. Table 1은 2017년도 기준 국내 발전원별 구성현황³⁾을 나타낸 것이다.

이 중에서 LNG 발전은 실제 국가 전력수급의 약 30.8%를 담당하고 있다. 일반적으로 1기당 50MW정도의 발전시설로 설계되어 보급되고 있으며, 운영 관리 차원에서도 전력수요 변동에 가장 신속하게 반응할 수 있다는 장점이 있다. LNG발전의 경우 에너지 문제와 함께 대표적으로 잘 알려진 온실가스인 CO₂ 배출량을 저감할 수 있는 가스터빈 방식으로 운영하고 있으며, 최근 LNG복합발전시설이 증가하는 추세이다. 하지만 LNG발전의 단점으로는 일산화질소, 이산화질소, 아산화질소 등의 질소산화물(NO_x)의 배출량이 높게 나타나며, 이는 천연가스의 특성상 질소의 함량이 높기 때문이다.

질소산화물의 형성 메커니즘은 3가지로 분류 된다. 첫째, Thermal-NO_x는 공기 중 산소와 질소의 반응으로 생성되며, Thermal-NO_x의 형성은 온도에 크게 좌우된다. 1,000°C 미만의 온도에서는 질소산화물 배출이 상당히 감소하며, 최대 불꽃의 온도가 1,000°C 미만일 때의 질소산화물 형성은 주로 연료질소에 의해 결정된다. Thermal-

NO_x는 기체 또는 액체 연료를 사용하는 설비에서 질소산화물이 생성되는 주요 경로이다. 둘째, Fuel-NO_x는 연료에 함유된 질소로 형성된다. Fuel-NO_x의 형성은 연료의 질소 함량과 반응 매체의 산소농도로 결정된다. 셋째, Prompt-NO_x는 중간 탄화수소(주로 CH, CH₂)화합물 존재 시 불꽃 면에서 분자 질소의 변환에 의해 형성된다. 일반적으로 Prompt-NO_x 메커니즘에 의한 질소산화물 형성은 다른 반응경로로 생성될 때 보다 훨씬 적다고 알려져 있으나 일부, 연소 다단화 시스템과 같은 특정 연소조건에서 상당량 발생한다. 아산화질소(N₂O)의 형성 메커니즘은 아직 완벽하게 규정되지는 않았다. 질소산화물 형성과 유사한 중간 생성물(HCN, NH₃)을 토대로 하는 형성 메커니즘이 있다는 것이 알려져 있으며, 연소온도가 1,000°C 미만으로 낮으면 아산화질소 배출이 증가하는 것으로 밝혀졌다. 낮은 온도에서는 아산화질소 분자가 비교적 안정적이며, 고온에서는 형성된 아산화질소가 질소(N₂)로 환원된다. 일반적인 고정상 연소설비의 배출량에 비해 유동층 연소에서 나오는 아산화질소가 더 많다. 연구실 실험에서 아산화질소가 '선택적 촉매환원' 공정의 최고 또는 최적온도 범위에서 형성되는 것으로 알려졌다. 아산화질소는 대류권에서 열 적외선 흡수를 통해 지구온실 효과에도 직접 기여한다. 아산화질소는 다른 기체, 구름 및 에어로졸과의 상호작용이 적어 대류권내 잔류 수명이 상당히 길다. 아산화질소는 산소가 있을 때 분해되어 이산화질소(NO₂)와 일산화질소(NO)를 형성하고, 이런 유해물이 배출되는 국내의 천연가스를 사용하는 발전소의 오염물질 배출특성을 대기, 수계, 연소 및 기타잔류물, 소음, 토양 등으로 분류할 수 있고 이에 따른 천연가스발전소의 환경설비 및 방지설비는 아래와 같이 정리해볼 수 있다.

- (1) 보일러에서 대기배출 제어
- (2) 엔진에서 대기배출 제어
- (3) 터빈에서 대기배출 제어
- (4) 폐수 처리

이처럼 LNG발전은 2017년 시행되는 통합 환경 관리제도의 첫 번째 대상 업종이며 통합 환경 관리계획서 상의 환경관리 수준 평가 항목에 따라 BAT적용률을 기입하도록 되어 있으나 단순히 BAT적용 항목의 퍼센티지만 기입하고 항목의 경중에 관한 사항은 논하지 않고 있다. 따라서 한국 및 EU의 최적가용기법 기준서를 비교하여 분석하고 중요인자 도출을 위한 AHP분석을 통하여 국내 천연가스 발전소의 환경관리를 위한 최적가용기술의 우선순위를 마련하고자 한다.

3. 국내의 최적가용기법(BAT) 기준서 분석

최적가용기법은 배출되는 오염물질을 효과적으로 줄이면서도 경제성 있는 산업현장의 적용 기술과 운영방식으로 사업장 환경관리 및 허가검토에 유용하게 채택할 수 있

Table 1. Status of Korea power generation.

Division	Thermal power			Atomic energy	Hydro energy	Renewable energy	Total
	Coal	Oil	LNG				
Facility capacity (10 ³ kW)	32,023	4,140	32,602	23,115	4,700	9,283	105,863
Composition(%)	30.25	3.91	30.80	21.83	4.44	8.77	100

다. 여기서 기술에는 적용기술과 배출시설의 가동·중단 등을 포괄적으로 포함하고 있으며, 가용 기술은 회원국내에서 시설운영자가 쉽게 접근할 수 있고 비용과 편익을 고려하면서 기술적이거나 경제적으로 운전 가능한 조건을 갖추어 산업현장에의 적용이 가능한 기술을 의미한다. 따라서, 천연가스 발전시설의 최적가용기술은 크게 2가지 고려사항을 가진다. 첫째, 에너지 효율성 향상을 고려하여 최적가용기술을 하나 이상 적용하는 것이며, 둘째, 질소산화물 및 일산화탄소 대기배출의 방지 및 감소를 고려하여 최적가용기술을 하나 이상 적용시키는 것이다.

(1) 에너지 효율성

(2) 질소산화물, 일산화탄소 대기배출

사업장에서 발생하는 가스상 물질 배출을 저감하기 위하여 아래 주어진 4가지 기법 또는 기법의 조합을 적용시킨다.

- a. 흡수에 의한 시설
- b. 흡착에 의한 시설
- c. 열산화법
- d. 촉매산화법

3.1 EU의 최적가용기법(BAT) 기준서 분석

유럽연합(EU)은 1996년에 산업활동에 따른 자원의 사용 및 수질·대기 등 여러 매체로의 오염물질 배출, 에너지 효율화 및 안전사고 예방 등을 종합적으로 평가하여 환경오염을 효율적으로 사전 예방하는 통합환경관리 지침을 제정하였다. 사업장의 환경오염을 하나의 체계로 이해하여 여러 매체에 대한 총체적인 영향을 평가하고 종합적으로 환경오염 저감방안을 찾는 것이다. 스웨덴, 덴마크, 영국, 독일 등의 국가에서 처음 시작되어 EU 회원국만이 아닌 다른 여러 지역에서도 환경오염의 통합적 관리제도를 도입하고 있다.

EU BAT⁴⁾는 세비아 프로세스에 따라 BAT 참고문헌(BREF)이 작성되며, 여러 사업장의 방지시설 및 배출시설, 오염물질의 배출 특성, 기술별 오염방지 효율 등이 고려된다. EU는 BAT 참고문헌(BREF) 작성을 위해 33개의 기술작업반이 운영되고, 세비아 프로세스 흐름에 따라 각 분야별로 2~6년의 기간에 걸쳐 작성되며, 전체적으로 약 10년의 기간이 소요된 것으로 보고된다. 또한 최적가용기법 참고문헌(BREF) 작성계획 시 정보교환포럼을 통해 참고문헌의 작성계획을 결정하고, outline과 guideline를 작성하기 때문에 이 부분에서 국내 기준서 작성 방법과 차이를 보인다.

3.2 국내 BAT 기준서와 EU BAT기준서 비교분석

국내 기준서와 EU기준서의 가장 큰 차이점은 연료와 첨가제의 공급 및 취급에 관한 기법이다. EU BAT기준서는 LNG가스와 암모니아 첨가제의 공급과 취급에 관한 최적가용기법에 관한 내용을 환경편익, 적용범위, 운전경험, 매체통합적 환경영향, 경제성 항목으로 나누어 상세히 다루

고 있다.

국내 BAT기준서와 EU BAT기준서⁵⁾의 천연가스 발전소의 에너지 효율성에 관한 최적가용기법은 열병합발전의 적용, 재생 공급수 가열, 복합사이클 가스터빈의 적용 등은 국내와 EU의 동일한 최적가용기법이며, EU BAT에서는 국내 BAT기준서와 다르게 미연 가스로 인한 열손실 최소화, 천연가스 예열, 작동 매체 가스/증기의 최고 압력과 온도, 증기터빈의 저압력단에서의 최고 압력 강하, 전도 및 복사를 통한 열손실 최소화, 증발기의 존재, 급수 펌프의 효율 개선(내부 에너지 소비량 최소화), 터빈의 날개 기하구조 개선 등을 추가적인 BAT기술로 보고 있다.

4. AHP 기법의 개요

AHP (Analytic Hierarchy Process)⁶⁾ 기법은 다양한 기준의 의사결정방법 중의 하나이며, 계층구조를 구성하는 요소들의 쌍대비교를 통하여 평가자의 경험이나 지식, 직관을 포착하는 의사결정방법론이다. 공통의 목적이나 기준에 대하여 대상을 짝지어 비교함으로써 의사결정문제를 해결하는데, 여기에서는 2개의 필수요소가 있다. 첫째는 판단의 분석적 과정이며, 둘째는 계층의 구축 및 분석의 창조적 과정이다. AHP기법은 다기준 의사결정의 문제를 형성하고, 분석하는 직관적이며 비교적 쉬운 방법이다.

또한, 이론의 명확성 및 단순성, 적용의 범용성 및 간편성이라는 특징이 있어 여러 의사결정 분야⁷⁾에서 널리 활용되어 왔으며, 이론구조 자체에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다. AHP분석을 통해 적용하기 간편하고 어떤 분야든 의사결정이 요구되는 문제에 적용이 가능한 범용적 모델이라고 할 수 있다.

AHP기법은 다음과 같은 6가지 장점이 있다. 첫째, AHP 기법은 비구조화 되어있는 의사결정을 계층적으로 표현한다. 의사결정 문제를 구성하고 있는 다양한 요소를 나열하고, 여러 단계의 항목으로 분류하며, 각 항목에 있는 유사 요소 끼리 묶어 문제의 구조화 및 체계화를 한다. 이를 통하여 의사결정 문제를 보다 명확하게 파악하고, 이해할 수 있다. 이는 인간의 자연스런 사고과정과 유사하다. 둘째, AHP기법은 무형의 평가항목을 측정할 수 있는 척도와 우선순위를 설정하기 위한 방법을 제공해 준다. 평가자의 합리적이며 직관적인 판단에 근거하여 정량적인 요소와 더불어 정성적인 요소 또한 고려할 수 있도록 문제해결을 위한 틀을 제공해 준다. 의사결정 문제는 정량적인 요소와 문제가 복잡할수록, 가시화가 좋을수록 무형의 요소 또는 정성적 요소가 포함된다. 따라서 문제는 이런 요소를 의사결정과정에서 논리적, 체계적으로 반영시킬 수 있느냐는 점이다. 이런 문제를 해결하기 위하여 AHP기법을 적용하며, AHP기법은 인간이 갖고 있는 사유에 의한 논리와 경험에 의한 직관을 통해 정량적인 요소와 정성적인 요소를 동시에 고려하면서 의사결정을 내릴 수 있는 방법이다. 셋째,

AHP기법은 평가자의 주관적인 판단에 대한 일관성을 검증할 수 있는 기법이 마련되어 있어, 결과에 신뢰성을 높일 수 있다. 넷째, AHP기법은 의사결정문제와 관련한 변화된 정보의 민감성을 분석할 수 있다. 평가기준의 가중치를 변화시킴으로써 대안의 우선순위가 변화되는 과정을 검토할 수 있다. 다섯째, AHP기법은 계층적으로 수정될 가능한 환경변화에 대한 적응성이 강하다. 의사결정자는 의사결정문제의 항목별 요소들을 추가 또는 삭제할 수 있으며, 항목에 있는 요소들의 선호도에 대한 판단을 바꿀 수 있다. AHP기법 과정을 반복하는 것은 가설설정 및 검증과 같은 것이다. 여섯째, AHP기법은 다양한 평가자들의 의견과 판단을 수치적인 통합을 통하여 각 대안의 종합된 우선순위를 도출할 수 있다.

4.1 AHP 기법의 적용절차

Fig. 2의 Step 1은 다양한 의사결정문제를 관련된 상호 의사결정 사항의 계층으로 분류하여 의사결정계층을 형성한다. 의사결정계층을 형성하는 첫 번째 단계는 AHP기법의 적용에서 가장 중요한 Step이라고 할 수 있다. 첫 번째 단계에서 의사결정 분석자는 관련되어 있는 다양한 의사결정 사항들을 계층화 시킨다. 계층의 최고층에는 가장 포괄적인 의사결정사항이 놓여지고, 그 다음 계층은 의사결정에 영향을 미치는 다양한 세부 요소들로 구성되어진다. 각각의 요소들은 하위계층일수록 구체적인 사항을 가지게 된다. 여기서 한 계층 내의 각각의 요소들은 비교가 가능하여야 한다. 계층의 최하층은 선택의 대상이 되는 여러 의사결정의 대안들로 이루어진다. Step 2는 의사결정 항목들 간의 쌍대비교를 통하여 판단자료를 수집하는 과정이다. 이 단계는 상위계층에 있는 항목들의 목표를 달성하기 위해 공헌하는 직계하위계층의 요소들을 쌍대비교 함으로써 행렬을 작성할 수 있다. Step 2는 각 계층 내 의사결정 항목들의 쌍대비교 프레임을 통하여 각각의 계층별로 쌍대비교 행렬을 구한다. 가중치란 상대적 비중이나 상대적 중요도를 뜻한다. 예를 들어 평가기준이 두 가지일 경우 직접 비교하여 상대적 비중이나 중요도를 바로 판단할 수 있다. 그러나 평가기준이 여러 개일 경우 각각의 상대적 비중이나 중요도를 고려하여 가중치를 산정하기 어렵다.

따라서 AHP기법은 다양한 평가기준들을 2개씩 도출하여 쌍대비교를 통해 가중치를 산정한다. 쌍대비교 과정에

Based on the relative importance measure

1	2	3	4	5
If the degree of influence between the factors is "equal"	If the degree of influence between the factors of "slightly negative"	If the degree of influence between the factors of "negative"	If the degree of influence between the factors of "very negative"	If the degree of influence between the factors of "absolute negative"

Fig. 1. Scale of dual comparisons.

는 평가기준들에 대한 의사 결정자의 선호도 정도를 나타내고, 이에 해당하는 적절한 수치를 부여할 수 있는 수량화 과정이 내포되어 있다. 이를 위해 AHP기법에는 Saaty가 제안한 9점 척도가 선호되고 있다. Miller가 심리학 실험에서 도출한 "인간은 7(±2)개 까지의 대상을 혼동 없이 동시에 비교 가능하다"라는 결과에 근거하여 1에서 5까지의 수와 이 수의 역수를 사용하고 있다. 5점 척도의 내용은 Fig. 1와 같다.

Step 3는 고유치 방법을 통하여 의사결정요소들 간의 상대적 가중치를 산정하는 단계이다.

Step 4는 평가대상이 되는 다양한 대안들의 우선순위를 도출하기 위해 의사결정항목들의 상대적 가중치를 종합화하는 단계이다. Step 4에서는 계층의 가장 상위에 있는 의사결정의 목적달성을 위해 가장 하위에 있는 대안의 종합순위를 결정하는 가중치를 산출하는데, 이는 Step 3에서 구한 각 계층의 가중치를 종합하여 산출한다.

Fig. 2의 Step 1은 AHP기법의 적용에서 가장 중요한 Step으로 다양한 의사결정문제를 관련된 상호 의사결정 사항의 계층으로 분류하여 의사결정계층을 형성한다. 첫 번째 단계에서 의사결정 분석자는 관련되어 있는 다양한 의사결정 사항들을 계층화 시킨다. 계층의 최고층에는 가장 포괄적인 의사결정사항이 놓여지고, 그 다음 계층은 의사결정에 영향을 미치는 다양한 세부 요소들로 구성되어진다. 각각의 요소들은 하위계층일수록 구체적인 사항을 가지게 된다. 여기서 한 계층 내의 각각의 요소들은 비교가 가능하여야 한다. 계층의 최하층은 선택의 대상이 되는 여러 의사결정의 대안들로 이루어진다.

Step 2는 의사결정 항목들 간의 쌍대비교를 통하여 판단자료를 수집하는 과정이다. 이 단계는 상위계층에 있는 항목들의 목표를 달성하기 위해 공헌하는 직계 하위계층의 요소들을 쌍대비교 함으로써 행렬을 작성할 수 있다. Step 2는 각 계층내 의사결정 항목들의 쌍대비교 프레임을 통하여 각각의 계층별로 쌍대비교 행렬을 구한다. 가중치

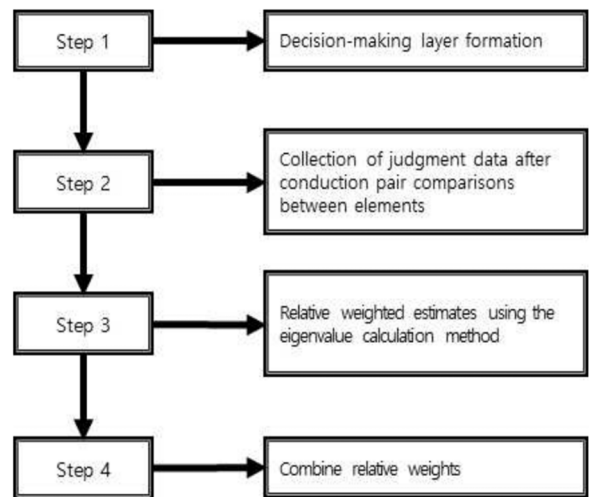


Fig. 2. AHP application procedures.

란 상대적 비중이나 상대적 중요도를 뜻한다. 예를 들어 평가기준이 두 가지일 경우 직접 비교하여 상대적 비중이나 중요도를 바로 판단할 수 있다. 그러나 평가기준이 여러 개일 경우 각각의 상대적 비중이나 중요도를 고려하여 가중치를 산정하기 어렵다. 따라서 AHP기법은 다양한 평가기준들을 2개씩 도출하여 쌍대비교를 통해 가중치를 산정한다. 쌍대비교 과정에는 평가기준들에 대한 의사 결정자의 선호도 정도를 나타내고, 이에 해당하는 적절한 수치를 부여할 수 있는 수량화 과정이 내포되어 있다. 이를 위해 AHP 기법에는 Saaty가 제안한 9점 척도가 선호되고 있다. Miller가 심리학 실험에서 도출한 “인간은 7(±2)개까지의 대상을 혼동 없이 동시에 비교 가능하다”라는 결과에 근거하여 1에서 5까지의 수와 이 수의 역수를 사용하고 있다. 5점 척도의 내용은 Fig. 3와 같다.

Step 3는 고유치 방법을 통하여 의사결정요소들 간의 상대적 가중치를 산정하는 단계이다.

Step 4는 평가대상이 되는 다양한 대안들의 우선순위를 도출하기 위해 의사결정항목들의 상대적 가중치를 종합화하는 단계이다. Step 4에서는 계층의 가장 상위에 있는 의사결정의 목적달성을 위해 가장 하위에 있는 대안의 종합 순위를 결정하는 가중치를 산출하는데, 이는 Step 3에서 구한 각 계층의 가중치를 종합하여 산출한다.

4.2 AHP 기법의 계층구조 구성

AHP기법은 구조화되지 않은 의사결정문제들을 계층적으로 표현한다. 의사결정문제를 구성하는 다양한 요소를 나열하며, 다양한 단계의 계층으로 분류하고, 각 계층의 유사요소 끼리 묶어 문제의 체계화 및 구조화를 수행한다. 이런 방법을 통하여 의사결정문제를 정확히 파악할 수 있다. Fig. 3는 AHP기법의 계층구조 구성을 나타낸 그림이다.

4.3 AHP 기법의 일관성 지수

AHP기법에서는 다수의 평가자의 일관성을 검정하기 위하여 무작위 지수(RI;Random Index)라는 것을 사용한다. Saaty가 제시한 RI값은 점수 척도를 이용하여 표본크기를 100으로 하여 무작위로 만든 역수행렬의 일관성 지수의 평균값으로 Fig. 4에 제시하였다.

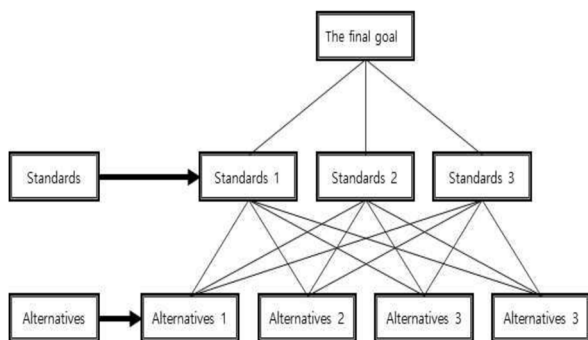


Fig. 3. AHP structure of the hierarchy.

일관성을 검정하기 위하여 일관성 지수(CI; Consistency Index)를 RI로 나눈 일관성비율(CR; Consistency Ratio)을 이용한다. CR 값이 0.1 미만인 경우 평가자의 응답이 완전한 일관성을 유지하여 쌍대비교를 수행한 것을 나타낸다. 아래 Fig. 5는 일관성을 유지하여 응답한 예시이다.

일관성을 검정하기 위하여 우선 Amax값을 구한다. Amax 값은 행렬곱을 우선 순위로 나눈 값의 평균값이며 위 예시의 Amax값은 3.04이다. 이후 일관성 지수를 구해야 한다. CI값은 산출식은 $CI=(Amax-n)/n-1$ 이며 위 예시의 CI값은 0.01이다. 최종적으로 CR값을 구하려면 CI값을 RI값으로 나누어 준다. 위 예시의 CR값은 0.02이며 CR값이 0.1미만이기 때문에 이 응답은 일관성이 유지되었다고 판단한다.

4.4 AHP 국내외 선행연구 사례

최근 에너지 분야에서도 의사결정을 위해 AHP 분석기법을 도입되고 있다. AHP 기법이 의사결정자의 직관이나 경험 등을 중심으로 하고 있기 때문에 정성적 평가기준들이 대체적으로 쉽게 비교평가 될 수 있다는 장점을 제시하였는데, 이 장점은 에너지 관련 의사결정 지원도구로 다양하게 활용되고 있다.

AHP는 설문대상의 오랜 경험을 바탕으로 의사결정문제에서 다소 다루기 어려운 문제에 대한 종합적인 의사결정을 위해서 국내외 다양한 영역에서 활용되고 있으며, 효용성을 인정받고 있다.

Table 2와 같이 국내·외적으로 많은 선행연구가 진행되

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fig. 4. Random index.

	Pair comparison			Priority	Matrix product	MP/Priority
	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3			
Alternative 1	1.00	0.33	0.20	0.11	0.32	3.01
Alternative 2	3.00	1.00	0.33	0.26	0.79	3.03
Alternative 3	5.00	3.00	1.00	0.63	1.95	3.07
Total	9.00	4.33	1.53	1.00	-	-

Fig. 5. AHP example for consistency ratio.

Table 2. 국내·외 선행 연구 사례.

구분	내용
국내 선행 연구	기업차원에서 신재생에너지 분야에 진출하기 위한 평가기준 제시(장기윤 2010)
	한국의 신재생에너지 확산정책을 위한 평가요소를 AHP 기법 적용(Heo et al 2010)
국외 선행 연구	기존 전력선에 연결된 태양광 발전 설비의 최적 위치 선정 의사결정 방법 제시(Lee et al 2009)
	가정 난방 에너지로 신재생에너지 경제적 타당성 분석(Jaber et al 2008)

었고, 실제로 의사결정에 활용되었다. 특히 에너지 분야에서 AHP분석기법은 적극 활용되었는데, 이는 에너지기술이 가진 대규모적으로 중장기투자에 따른 투자의 비가역성 존재, 기반사업의 특성으로 인한 정책요소 영향 등과 같은 투자의 불확실성이 큰 분야임으로 해당분야의 인사이드를 확보한 전문가들의 종합적인 의사결정이 필요했기 때문으로 해석해 볼 수 있다.

5. 연구방법

우리나라의 통합 환경 관리제도 시행에 따른 최적가용 기술적용에 국내 BAT기준서와 EU BAT를 비교 분석 후, AHP 기법을 통해 평가 항목 간 상대적 우선순위를 결정하여 스코어링을 통해 적용될 수 있는 우선순위를 결정하였다.

최적가용기법의 우선순위 선정 연구를 진행하기 위해 학계 전문가(2명), 천연가스 발전소 환경관리자(10명), 가스발전 플랜트 시공 전문가(8명), 대기환경 전문가(20명)를 대상으로 설문지를 실시하였다. 설문조사 기간은 3차로 나누어 총 3주간 진행하였다. AHP분석은 응답자의 일관성을 검증하기 위하여 일관성 지수(CR) 값을 산출하여 0.1미만인 응답자의 일관성이 결여되지 않은 설문조사 자료를 활용하였다. 분석결과 각 전문가별 우선순위는 상이하였다. 학계 전문가 및 현직 환경관리자, 대기환경 전문가의 경우 대체적으로 신설비의 도입 보다는 공정제어의 전산화를 우선순위로 두고 있으며, 이것은 현재 가동 중인 천연가스 발전소의 경우에 적용가능성이 높고 효율이 높은 최적가용기술이라 사료된다. 가스발전 플랜트 시공 전문가의 경우 복합사이클 또는 열병합발전과 같은 기술적인 측면을 우선순위로 두고 있으며, 이는 시공자 입장에서 열효율의 향상이나 NOx의 배출저감은 추상적인 공정제어의 전산화 측면보다 설비나 기술적인 방법으로 다루어야 할 항목이기 때문이라 사료된다.

2017년 시행되는 통합 환경 관리제도의 첫 번째 대상 업종이며 통합 환경 관리계획서 상의 환경관리 수준 평가 항목에 따라 BAT적용률을 기입하도록 되어 있으나 단순히 BAT적용 항목의 퍼센티지만 기입하고 항목의 경중에 관한 사항은 논하지 않고 있다. 따라서 한국 및 EU의 최적가용기법 기준서를 비교하여 분석 후 주요인자 도출을 위한 AHP분석을 통하여 국내 천연가스 발전소의 환경관리를 위한 최적가용기술의 우선순위를 마련하고자 아래의 Fig. 6에 제시하였다.

5.1 연구결과(AHP 이용 분석 결과)

천연가스 발전소의 최적가용기법 우선순위 선정을 위한 연구를 진행하기 위해 학계 전문가(2명), 천연가스 발전소 환경관리자(10명), 가스발전 플랜트 시공 전문가(8명), 대기환경 전문가(20명)를 대상으로 설문지를 실시 후 각 전문가들의 평가항목 중 가중치를 산정하여 최적가용기법의

우선순위를 산정했다.

천연가스 연소시설의 에너지 효율성 영향인자와 질소산화물 및 일산화탄소 대기배출의 영향인자 2가지 측면으로 나누어 산정하였다.

천연가스 연소시설의 에너지 효율성의 영향인자는 중분류 없이 CHP 예비, 재생 공급수 가열, 복합사이클(CCGT) 적용 등의 3가지 소분류로 순위를 선정하였다.

천연가스 연소시설의 질소산화물 및 일산화탄소 대기배출의 영향인자는 보일러의 천연가스 연소 시 질소산화물의 대기배출 방지 및 감소기법과 SCR 사용 시 암모니아의 감소 제한 하에 가스터빈에서 NOx, CO배출 방지 및 저감 기법, 내연 기관의 천연가스 연소 시 질소산화물 대기배출 방지 및 감소기법, 천연가스 연소 시 일산화탄소의 대기배출 방지 및 감소기법의 4가지 중분류로 나누어 순위를 산정하였다.

각 중분류의 세부항목으로는 보일러의 천연가스 연소 시 질소산화물의 대기배출 방지 및 저감기법 항목에서는 공기 및 연료주입 다단화, 배출가스 재순환, 저 NOx버너, 선택적 촉매환원, 선택적 비 촉매환원, 공정제어의 전산화로 필수적인 6가지 항목을 소분류로 나누어 우선순위를 산정했다. SCR 사용 시 암모니아의 감소 제한 하에 가스터빈에서 질소산화물 대기배출 방지 및 저감기법 항목에서는 건식 저 NOx버너, 선택적 촉매환원, 물 또는 증기주입, 공정의 전산관리, 저 부하 설계, 저 NOx버너의 6가지 소분류로 나누어 우선순위를 산정했다.

내연기관의 천연가스 연소 시 질소산화물 대기배출 방지 및 저감기법 항목으로는 희박연소, 선택적 촉매환원, 공정의 전산관리 등의 3가지 소분류로 나누어 우선순위를 산정하였다.

천연가스 연소 시 일산화탄소 대기배출 방지 및 저감기법 항목으로는 완전연소(연소실 설계, 최적의 모니터링, 연소시스템 관리)와 NOx배출 감소를 위한 최적화된 시스템, 최적화된 자동공정 관리, 산화촉매의 적용 등의 4가지 소분류로 나누어 Table 3와 같이 각 항목에 정리하여 우선순위를 결정하게 하였다.

위와 같이 최적가용기법을 적용하여 전문가들로부터 하

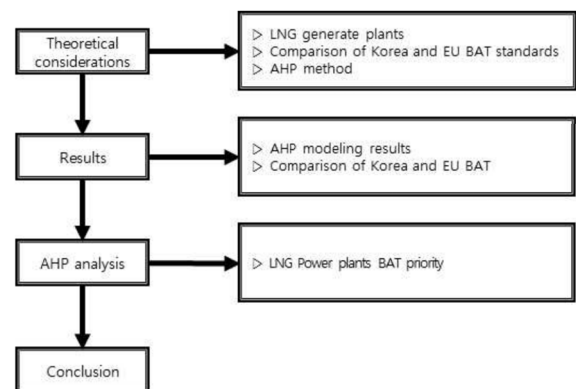


Fig. 6. Research procedure.

여금 우선순위 산정한 뒤 도출했을 때, Table 4와 같은 결과로 정리되었다.

6. 결론

국내 통합환경관리제도 시행에 따라 사업장 상황을 고려하지 않은 최적가용기술의 적용을 평가하고 있는 문제점이 있다. 최적가용기술 기준서 조사와 AHP기법을 통한 전문가들의 견해를 통해 천연가스 발전소의 최적가용기술의 우선순위를 판별하였다. 천연가스 발전소의 최적가용기술은 포괄적이고 다양하기 때문에 국내 전기 및 증기 생산시설 최적가용기술 기준서의 천연가스 발전소 최적가용기술 항목표를 통해 천연가스 발전소에 해당하는 요소만을 도출하여 설문조사를 실시하였다. 학계 전문가, 천연가스 발전소 환경관리자, 대기환경전문가, 플랜트 시공 전문가들의 의견을 에너지 효율성의 측면과 NOx, CO대기배출 방지 및 저감 측면 2가지 측면으로 나누어 가중치가 높은 것으로 분석하였다.

학계 전문가 및 천연가스발전소 환경관리자, 대기환경전문가들은 에너지 효율성 항목의 복합사이클가스터빈의 적용을 중요시 하고 있고, 가스터빈의 NOx 및 CO 대기배출 방지 및 저감기법 항목에서 공정의 전산화를 가장 중요시 하고 있다. 이는 기존의 천연가스 발전소에 쉽게 적용가능하며, 설비의 개보수를 최소화 할 수 있기 때문이다.

플랜트 시공 전문가들은 에너지 효율성 항목의 복합사이클가스터빈의 적용을 중요시 하고 있고, 가스터빈의 NOx 및 CO대기배출 방지 및 저감기법 항목에서 건식 저 NOx 버너의 적용을 가장 중요시 하고 있다. 이는 학계 전문가 및 천연가스발전소 환경관리자, 대기환경전문가와 다르게 신규 공정에 적용 가능한 기법이 중요하다고 생각하고 있

Table 3. 최적가용기술 평가항목.

구분	최적가용기술 평가항목
(1) 천연가스 연소시설의 에너지 효율성 영향인자	CHP 예비, 재생 공급수 가열, 복합사이클(CCGT)적용
(2) 4가지 중분류	보일러 NOx 배출방지 및 저감 가스터빈 NOx 배출방지 및 저감 내연기관 NOx 배출방지 및 저감 천연가스 연소 시 CO배출방지 및 저감
(2)-1 보일러 NOx 배출방지 및 저감	공기 및 연료주입 다단화, 배출가스 재순환, 저 NOx버너의 적용, 선택적 촉매환원, 선택적 비 촉매환원, 공정제어의 전산화
(2)-2 가스터빈 NOx 배출방지 및 저감	건식 저 NOx버너, 선택적 촉매환원, 물 또는 증기주입, 공정의 전산관리, 저 부하 설계, 저 NOx버너
(2)-3 내연기관 NOx 배출방지 및 저감	희박연소, 선택적 촉매환원, 공정의 전산관리
(2)-4 천연가스연소시 CO배출방지 및 저감	완전연소, 최적화된 시스템, 자동공정 관리, 산화촉매의 적용

었다. 최적가용기술의 우선순위 도출 결과를 통해 기존에 국내에서 가동되고 있는 사업장에서 최우선으로 적용할

Table 4. 최적가용기술 우선순위 결과.

구분	학계 전문가 및 발전소 환경관리자 대기환경전문가의 우선순위	
	BAT	Priority Ranking
(1) 천연가스 연소시설의 에너지 효율성 영향인자	복합사이클 적용	1st 0.65
	재생 공급수 가열	2nd 0.24
	CHP 예비	3rd 0.11
(2) 4가지 중분류	가스터빈의 NOx 저감	1st 0.50
	보일러 NOx 저감	2nd 0.26
	천연가스 연소시 CO저감	3rd 0.16
	내연기관 NOx 저감	4th 0.08
(2)-1 보일러 NOx 배출방지 및 저감	공정제어의 전산화	1st 0.36
	저 NOx버너의 적용	2nd 0.24
	선택적 촉매환원	3rd 0.17
	선택적 비 촉매환원	4th 0.11
	배출가스 재순환	5th 0.08
	공기 및 연료주입 다단화	6th 0.04
(2)-2 가스터빈 NOx 배출방지 및 저감	공정의 전산관리	1st 0.39
	저 NOx버너	2nd 0.22
	건식 저 NOx버너	3rd 0.14
	선택적 촉매환원	4th 0.12
	저 부하 설계	5th 0.09
	물 또는 증기주입	6th 0.03
(2)-3 내연기관 NOx 배출방지 및 저감	공정의 전산관리	1st 0.68
	선택적 촉매환원	2nd 0.21
	희박연소	3rd 0.11
(2)-4 천연가스 연소시 CO배출방지 및 저감	자동공정 관리	1st 0.47
	완전연소	2nd 0.28
	산화촉매의 적용	3rd 0.16
	최적화된 시스템	4th 0.10
구분	가스발전 플랜트 시공 전문가의 우선순위	
	BAT	Priority Ranking
(1) 천연가스 연소시설의 에너지 효율성 영향인자	복합사이클 적용	1st 0.75
	CHP 예비	2nd 0.21
	재생 공급수 가열	3nd 0.06
(2) 4가지 중분류	가스터빈의 NOx저감	1st 0.61
	내연기관 NOx 저감	2nd 0.26
	보일러 NOx 저감	3rd 0.08
	천연가스 연소시 CO저감	4th 0.05
(2)-1 보일러 NOx 배출방지 및 저감	저 NOx버너의 적용	1st 0.35
	선택적 촉매환원	2nd 0.27
	공정의 전산관리	3rd 0.16
	선택적 비 촉매환원	4th 0.10
	배출가스 재순환	5th 0.08
	공기 및 연료주입 다단화	6th 0.04
(2)-2 가스터빈 NOx 배출방지 및 저감	건식 저 NOx버너	1st 0.41
	저 NOx버너	2nd 0.22
	공정의 전산관리	3rd 0.12
	선택적 촉매환원	4th 0.11
	저 부하 설계	5th 0.10
	물 또는 증기주입	6th 0.04
(2)-3 내연기관 NOx 배출방지 및 저감	선택적 촉매환원	1st 0.55
	공정의 전산관리	2nd 0.34
	희박연소	3rd 0.11
(2)-4 천연가스 연소시 CO배출방지 및 저감	완전연소	1st 0.48
	자동공정 관리	2nd 0.26
	최적화된 시스템	3rd 0.16
	산화촉매의 적용	4th 0.10

수 있는 기법은 공정의 전산화 및 복합사이클의 적용이며, 신규 사업장의 경우 건식 저 NOx 버너의 적용 및 복합사이클의 적용이다. 이러한 우선순위 선정을 통하여 국내 사업장의 최적가용기법의 적용 및 최적가용기법의 평가를 용이하게 할 수 있도록 방법을 제시하였다.

향후 과제로서는 본 연구에서 도출된 우선순위에 따라서 각각의 최적가용기법을 기업체 및 그 밖의 연구자들이 각 기법의 경제성을 평가하여 기업이나 평가기관이 이용할 수 있도록 하는 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다. 그리고 본 연구에서 사용한 AHP기법 분석이외에도 공학적으로 접목시킬 수 있는 회기분석등과 같은 다른 분석기법을 이용하여 우선순위를 산정함으로써 분석기법에 따른 중요도⁸⁾의 차이 여부 또한 필요하다고 생각된다.

사사

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0008421,

2020년 산업전문인력역량강화사업)

REFERENCES

- 1) 환경부, 전기 및 증기 생산시설의 통합오염방지 및 관리를 위한 최적가용기법 기준서, p. 200-242, p. 469-490, p. 555 (2016).
- 2) 조인성, 오재일, 박규홍, “AHP기법을 활용한 폐기물매립지 입지선정 인자의 가중치에 대한 전문가 설문조사”, 대한환경공학회 2006 추계학술연구발표회 논문집, p. 1603-1606 (2006).
- 3) 한국전력공사(KEPCO), <http://home.kepco.co.kr/4>. 유럽연합 집행위원회, EU 통합환경관리 (IPPC) BAT 기준서 대형연소시설, p.13, p. 409-487 (2006).
- 5) European Commission, Best Available Techniques (BAT) Reference Documnet for Large Combustion Plants, p. 21, p. 27, p. 553-665 (2016).
- 6) 조근태, 계층분석적 의사결정, 동현출판사, p. 25 (2003).
- 7) 조근태, 앞서가는 리더들의 계층분석적 의사결정, 동현출판사, p. 15 (2005).
- 8) 조인성, 오재일, 박규홍, “AHP기법을 활용한 폐기물매립지 입지선정 인자의 가중치에 대한 전문가 설문조사”, 대한환경공학회 2006 추계학술연구발표회 논문집, p. 1603-1606 (2006).