

다속성 의사결정 이론을 적용한 열공급시스템 최적대안 선정 연구

A Study On Selection Of Optimal Alternative for Thermal Supply System Using Multiple Attribute Decision Making Theory

이덕기*, 박수익*, 양종택**

한국에너지기술연구원*, 충북대학교**

Doek-Ki Lee*, Soo-Uk Park*, Jong-Taek Yang**

Korea Institute of Energy Research*, Chung-Buk University**

1. 서 론

열공급시스템은 시스템 구조상 전체적 흐름이 네트워크 형태를 보이고 있다. 이는 회수→수송→공급 형태로서 구성하고 있는 각각의 요소기술들이 최적의 형태로 서로 조합하는 것으로서 시스템 구축에서 가장 중요한 부분으로 부각되고 있다. 열공급시스템은 열회수기술, 열수송기술, 열공급이용기술 등의 조합에 의하여 무수히 많은 대안을 생성할 수 있다.

산업단지나 발전소 등과 같은 열원에서 발생하는 열을 사용 가능한 에너지로 재생하기 위해 열회수기술을 이용하여 회수하게 되는데 이러한 다양한 열을 유용하게 이용하기 위해서는 열원의 성질에 따라 유용한 열회수기술을 선택해서 사용해야 한다. 그러나, 손실되는 열을 회수하더라도 사용처까지 이송시킬 수 없다면 의미가 없으며 회수된 폐열의 수요처인 배후 도시에 열손실 없이 장거리 수송을 위한 개념의 시스템기술이 필요하게 된다. 이와 관련된 기술이 열수송기술이며 이러한 수송효율을 높이기 위해 몇몇 기술들이 개발중이거나 개발된 상태이다. 공급된 열의 온도가 수요처에 필요한 온도 이하라면 온도를 올려줄 필요가 있으며 이와 관련된 기술이 보일러와 같은 열공급 이용기술이다. 열공급 최적화시스템은 열회수, 열수송, 열공급이용 부문 요소기술들의 조합에 의해 발생열원에서 수요처까지 열을 효율적으로 이용할 수 있게 하는 에너지 시스템을 말한다. 따라서 효과적이고 효율적인 시스템을 구성하기 위한 시스템 대안들은 이들 요소기술들의 조합에 의해 만들어 질 수 있다. 현재, 에너지 흐름시스템에 대한 열공급시스템에 대한 명백한 평가방안이 제시되지 않은 상황에서 다양한 평가속성의 결정과 함께 적합한 열공급 시스템 평가 선정모형의 확립이 필요하며 이를 이용한 최적 열공급 시스템을 선정하여 제시할 필요성이 제기되고 있다.

본 연구에서는 다속성 의사결정이론을 이용한 열공급시스템 최적 대안을 선정하여 제시하였다.

2. 다속성 의사결정 이론

多基準 意思決定(multiple criteria decision making)이란 대안의 평가를 위해 화폐단위로 평가가 가능한 평가요소들은 물론 화폐단위로 평가가 불가능한 평가요소들을 상반된 기준들을 고려하여 意思決定을 내리는 것을 의미한다. Hwang and Lin은 多基準 意思決定을 多目的 意思決定(multiple objective decision making)과 多屬性 意思決定(multiple attribute decision making)으로 분류하고 있다.

多目的 意思決定은 제약조건들에 의해 함축적으로 정의된 무한개의 대안집합에서 최적대

안을 선택하는 것으로 모든 대안이 사전에 인식될 필요가 없다. 多屬性 意思決定은 대안들의 집합이 명시적으로 유한집합일 경우에 사용되며 그 집합으로부터 하나의 대안이나 선호도가 같은 몇 개의 대안을 선택하는 것이다. 따라서 多目的 意思決定은 意思決定 문제를 설계하는데 적당하며 多屬性 意思決定은 선택문제에 유용하다. 다시 말해 多目的 意思決定(MODM)은 주어진 제약식들을 만족하는 무한개의 대안들 중에서 고려중인 목적들을 가장 만족하는 대안을 찾는 것으로서 최적대안을 설계하는 접근방법이며, 이에 반해 多屬性 意思決定(MADM)은 유한개의 대안들 중에서 복수의 요소들을 복합적으로 고려하여 하나의 대안이나 선호도가 같은 몇 개의 대안을 선택하는 접근 방법이다. 대표적인 방법으로는 AHP(Analytic Hierarchy Process)와 MAUT(Multi-Attribute Utility Theory)가 있으며 본 연구에서는 MAUT를 적용하여 최적 열공급시스템을 선정 제시하였다.

3. 다속성효용이론을 적용한 시스템평가 및 선정

3-1. 속성 결정 및 속성수준의 정량화

본 연구에서는 열공급시스템 구성에 필요한 이유로서 속성을 결정하였다. 본 속성들은 경제성, 기술성, 환경성, 파급효과를 Attribute1으로, 13개의 요인을 Attribute2로 규정하여 실시하였다. 이에 따라 열공급시스템 최적 대안 선정을 위해 고려하여야 할 13개의 屬性이 결정되었으며 이에 해당되는 각 屬性의 정량적인 評價를 위한 기준을 설정하였다. 각 전문가의 大屬性에 대해 序列評價에 의한 가중치를 기준으로 산출한 결과 經濟性(0.345), 技術性(0.335) 環境性(0.195), 파급효과(0.125)로 經濟性이 가장 높은 屬性으로 나타났다.<표 1>

<표 1> 屬性과 屬性水準의 定量化

Attribute1	Attribute2	屬性水準의 定量化
Att.1-1. 經濟性 (0.345)	Att.2-1. 투자비규모 Att.2-2. 공급원가	시설투자비(억원) Steam공급가(원/TON)
Att.1-2. 技術性 (0.335)	Att.2-3. 신뢰도 Att.2-4. 안전도 Att.2-5. 기술성속도 Att.2-6. 보수용이성	시스템의 신뢰도(%) 시스템의 안전도(%) 시스템 구성 기술의 성숙도(%) 시스템의 보수 용이성(%)
Att.1-3. 環境性 (0.195)	Att.2-7. CO ₂ 배출량 Att.2-8. SO _x 배출량 Att.2-9. NO _x 배출량 Att.2-10. TSP배출량	CO ₂ 배출저감량(TC) SO _x 배출저감량(TON) NO _x 배출저감량(TON) TSP배출저감량(TON)
Att.1-4. 波及效果 (0.125)	Att.2-11. 에너지수급기여도 Att.2-12. 과학적 공헌도 Att.2-13. 타산업융용가능성	자원 공급 가능 정도(TOE) 과학기술이 끼치는 영향(%) 타산업 대응 기술의 적용성(%)

3-2. 기술대안의 결정

熱供給시스템 대안은 廢熱回收技術, 熱輸送技術, 熱供給利用技術 등의 조합에 의해 결정된 5개 대안(HOS₁₋₅)을 대상으로 하였다.

<표 2> 시스템 대안의 구성

Alternative system	시스템 구성		
	폐열회수	열수송	열공급
HOS ₁	general heat exchanger →	hot water or steam →	high-efficiency boiler
HOS ₂	general heat exchanger →	hot water or steam →	absorption heat pump
HOS ₃	ceramic heat exchanger →	metal hydride →	absorption heat pump
HOS ₄	heat exchanger using solid particles →	hot water or steam →	high-pressure using MVR
HOS ₅	heat exchanger using solid particles →	metal hydride →	high-pressure using MVR

3-3. 單一屬性 效用函數 決定 및 모수산출

효용함수는 크게 위험중립형과 위험선호형, 위험기피형이 있으며 각각의 형태는 다음과 같다.

- 위험중립 : $u(x) = a + \beta x \dots \dots \dots (1)$

- 위험기피 및 선호 : $u(x) = a + \beta e^{\gamma x} \dots \dots \dots (2)$

x : 속성의 특정수준

$U(x)$: 속성의 특정수준에서 평가되는 효용

모수 a, β, γ 를 결정하기 위해서 각 속성 범주의 각 끝 값을 결정하여 다음과 같이 표시한다.

$U(a) = 1$, a 는 속성의 범주에서 가능한 최고점

$U(b) = 0$, b 는 속성의 범주에서 가능한 최저점

그리고, 효용의 중간값(0.5)이 되는 속성치를 설문을 통해 파악하였다. 이때의 속성치를 c 라 하면 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$U(c) = 0.5U(a) + 0.5U(b) \dots \dots \dots (3)$

이때, 응답자가 c 를 a 와 b 의 중앙값을 선택한다면 이는 위험중립 성향이고, 중앙값보다 큰 값을 선택한다면 위험선호, 작은 값을 선택한다면 위험기피 성향이다. 본 연구에서 a, b 는 응답자가 이해하기 쉽도록 기준치를 부여한 수치로 정했다.

위 식 3개가 결정된다면, 모수가 3개이므로 값을 구할 수 있다. 그런데 이와 같은 초월함수에 대한 방정식을 풀고자 할 때는 직접 계산하는 것보다, MAPLE, Mathematica, MACSYMA와 같은 CAS(Computer Algebra System)을 이용하는 것이 간편하며 본 연구에서는 MAPLE과 MS Excel을 사용하였다.

3-4. 속성의 중요도 결정

각 屬性의 중요도를 결정함에 있어서 多屬性 效用函數의 계수로서 사용될 13개 屬性의 중요도를 優先順位 評價를 통하여 결정하였는데 多屬性 效用函數의 계수는 중요도가 큰 屬性의 계수가 큰 수로 들어가야 하므로 評價된 優先順位를 역으로 한 후 각 수치를 屬性別로 均準化 하였다. 각 요소를 均準化하는 방법으로 3장에서 제시한 각 열벡터(column vector)를 자신의 norm으로 나눔으로써 얻어지는 벡터 均準化(Vector normalization)를 사용하였다.

이에 따라 산출된 결과를 살펴보면 속성1인 투자비가 가장 중요한 속성으로 나타났으며 다음으로 신뢰성, 공급원가, 안전성, 기술성숙도, 에너지수급 등의 순으로 나타났다.

또한, 다속성 효용함수의 계수로서 사용될 13개 속성의 중요도를 우선순위 평가를 통하여 결정하였는데, 다속성 효용함수의 계수는 중요도가 큰 속성의 계수가 큰 수로 들어가야 하므로 평가된 우선순위를 역으로 한 후 각 수치를 속성별로 均準化 하였다. 각 요소를 均準化하는 방법으로 벡터 均準化(Vector normalization)를 들 수 있으며 이 방법은 각 열벡터를 자신의 norm으로 나눔으로써 얻어진다. 본 연구에서 수행된 6개의 속성치 x_i 에 대한 均準化 값을 r_i 라 한다면 이를 구하기 위한 식은 식(4) 같이 나타낼 수 있다.

$r_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_6^2}} (i=1 \dots 6) \dots \dots \dots (4)$

이에 따라 산출된 결과를 살펴보면 속성3인 에너지 이용효율 향상이 가장 중요한 속성으로 나타났으며 다음으로 CO₂ 저감, 자원공급가능량, 기술파급효과, SO_x, NO_x 저감, VOC(휘발성유기화합물) 저감의 순서로 나타났다.

<표 3> 속성의 중요도 산출결과

Spe.	att.1	att.2	att.3	att.4	att.5	att.6	att.7	att.8	att.9	att.10	att.11	att.12	att.13	Total
	투자비	공급원가	신뢰성	안전성	기술성숙	보수용이	CO ₂	SO _x	NO _x	TSP	에너지수급	과학적공헌	타산업응용	
$S_1 \sim S_{20}$ Total	2.63	2.34	2.39	2.01	1.96	1.53	1.63	1.08	0.84	0.51	1.66	0.54	0.68	20.0
$S_1 \sim S_{20}$ Ave.	0.13	0.12	0.12	0.10	0.10	0.08	0.08	0.06	0.04	0.03	0.08	0.03	0.04	
rank	1	3	2	4	5	9	7	8	10	13	6	12	11	

3-5. 다속성 효용함수 도출

이 단계는 단일속성 효용함수를 결합하여 다속성 효용함수를 도출하는 과정이다. 다속성 효용함수의 대표적 형태는 다음과 같다.

n 개의 속성 $x=(x_1, \dots, x_n)$ 에 대한 다속성 효용함수

$$U(x) = U(x_1, \dots, x_n) \quad x_i : \text{각 속성}$$

$$\text{가법형} : U(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{승법형} : U(x) = \frac{1}{k} \left[\prod_{i=1}^n k_i u_i(x_i) - 1 \right] \dots \dots \dots (6)$$

$$U(x), u_i(x_i), k_i \in [0, 1], \quad 1+k = \prod_{i=1}^n (1+k_i)$$

i : 속성 인덱스, j : 응답자 인덱스 k_i : 비례상수로서 속성 i 의 가중치
 $u_i(x_i)$: 개별속성에 대한 단일 속성 효용함수

승법형은 속성의 독립성이 보장되지 않는 경우에 쓰인다. 본 연구의 설문에서는 속성들간의 독립성이 보장되도록 정했기 때문에 가법형을 사용하였다. 예로서, 가법형을 적용한 전문가 6에 대한 다속성 효용함수는 다음과 같이 계산된다. 여기서 계수 k 는 각 속성의 중요도 계수이고, $U_i(x_i)$ 는 속성 i 에 대한 단일속성 효용함수이다.

<S₃의 多屬性 效用函數>

$$\begin{aligned}
 U(S_3) &= \sum_{i=1}^{13} k_i u_i(x_i) \\
 &= k_1 u_1(x_1) + k_2 u_2(x_2) + k_3 u_3(x_3) + k_4 u_4(x_4) + k_5 u_5(x_5) + k_6 u_6(x_6) \\
 &\quad \dots \dots + k_{13} u_{13}(x_{13}) \\
 &= 0.14(1.309017 - 1.536766 e^{-0.016040 x_1}) + 0.13(-3.261138 + 2.982980 e^{0.00009 x_2}) \\
 &\quad + 0.11(1.784057 - 4.059474 e^{-0.016443 x_3}) + 0.09(-1.089535 + 0.568110 e^{0.013024 x_4}) \\
 &\quad + 0.08(-0.258841 + 0.053223 e^{0.031635 x_5}) + 0.07(-1.603488 + 0.987588 e^{0.009693 x_6}) \\
 &\quad \vdots \\
 &\quad + 0.10(-9.5700002 + 2.83002 e^{0.1218755 x_{13}})
 \end{aligned}$$

3-6. 속성치 및 기술대안의 우선순위 결정

각 열공급 시스템의 屬性值를 결정함에 있어서 전문가는 屬性值로 직접 응답한 것이 아니라 각 열공급 시스템別 優先順位로 응답하였으므로 그 優先順位를 屬性值로 변환해야 한다. 변환방법은 屬性범주에 優先順位를 등간적으로 맵핑하여 산출하였다. 각 전문가들의 열공급시스템별 속성치를 구한후 이에 따른 효용치 산출하였다.

한편, 이들 열공급시스템에 대한 각 전문가들의 통합된 효용치는 총 20점 만점에 HOS₁이 가장 높은 15.549, 다음이 HOS₄로 15.487, HOS₂가 15.390이었으며 HOS₃이 가장 낮은 8.412로 나타났다. <표 4>

이를 선형변환한 결과는 이러한 결과들을 종합한 각 技術들의 效用値를 계산한 결과 제 1 순위는 HOS₁의 효용치가 4.852로서 가장 우수한 것으로 나타났으며 다음으로 HOS₄가 4.811, HOS₂가 4.777, HOS₅가 2.932, HOS₃이 2.628순으로 나타났다.<표 5>

<표 4> 전문가의 각 시스템에 대한 效用値

Spe.	HOS ₁	HOS ₂	HOS ₃	HOS ₄	HOS ₅	Total
S ₁	0.650	0.802	0.373	0.889	0.448	3.162
S ₂	0.956	0.815	0.474	0.609	0.426	3.279
S ₃	0.720	0.872	0.347	0.810	0.404	3.153
S ₄	0.762	0.921	0.457	0.840	0.450	3.430
S ₅	0.822	0.806	0.450	0.700	0.458	3.235
S ₆	0.973	0.850	0.546	0.670	0.444	3.483
S ₇	0.897	0.869	0.477	0.814	0.554	3.610
S ₈	0.667	0.691	0.433	0.887	0.551	3.229
S ₉	0.644	0.663	0.752	0.542	0.437	3.038
S ₁₀	0.646	0.668	0.262	0.886	0.433	2.895
S ₁₁	0.980	0.935	0.382	0.841	0.616	3.755
S ₁₂	0.628	0.732	0.268	0.982	0.537	3.146
S ₁₃	0.642	0.646	0.369	0.957	0.451	3.067
S ₁₄	0.885	0.514	0.404	0.363	0.326	2.492
S ₁₅	0.620	0.615	0.282	0.977	0.464	2.958
S ₁₆	0.877	0.835	0.599	0.755	0.408	3.475
S ₁₇	0.722	0.704	0.464	0.572	0.437	2.898
S ₁₈	0.813	0.909	0.356	0.733	0.529	3.341
S ₁₉	0.881	0.689	0.355	0.828	0.545	3.298
S ₂₀	0.764	0.854	0.362	0.782	0.498	3.260
Total	15.549	15.39	8.412	15.437	9.416	64.204

<표 5> 전문가의 각 시스템에 대한 선형변환된 효용치

Spe.	HOS ₁	HOS ₂	HOS ₃	HOS ₄	HOS ₅	Total
S ₁	0.206	0.254	0.118	0.281	0.142	1.000
S ₂	0.291	0.248	0.144	0.186	0.130	1.000
S ₃	0.228	0.277	0.110	0.257	0.128	1.000
S ₄	0.222	0.268	0.133	0.245	0.131	1.000
S ₅	0.254	0.249	0.139	0.216	0.142	1.000
S ₆	0.279	0.244	0.157	0.192	0.128	1.000
S ₇	0.248	0.241	0.132	0.225	0.153	1.000
S ₈	0.207	0.214	0.134	0.275	0.171	1.000
S ₉	0.212	0.218	0.247	0.178	0.144	1.000
S ₁₀	0.223	0.231	0.091	0.306	0.150	1.000
S ₁₁	0.261	0.249	0.102	0.224	0.164	1.000
S ₁₂	0.200	0.233	0.085	0.312	0.171	1.000
S ₁₃	0.209	0.211	0.120	0.312	0.147	1.000
S ₁₄	0.355	0.206	0.162	0.146	0.131	1.000
S ₁₅	0.210	0.208	0.095	0.330	0.157	1.000
S ₁₆	0.252	0.240	0.172	0.217	0.117	1.000
S ₁₇	0.249	0.243	0.160	0.197	0.151	1.000
S ₁₈	0.243	0.272	0.107	0.219	0.158	1.000
S ₁₉	0.267	0.209	0.108	0.251	0.165	1.000
S ₂₀	0.234	0.262	0.111	0.240	0.153	1.000
sum	4.852	4.777	2.628	4.811	2.932	20.000
ave.	0.243	0.239	0.131	0.241	0.147	1.000
rank	1	3	5	2	4	

4. 결 론

다속성효용이론(MAUT)은 각 전문가에 대한 일관성을 측정할 수 있는 방법으로 분석자가 응답자의 여러 요인(전공, 주요업무 등)을 고려하여 나타난 결과로서 측정할 수 있는데 본 연구에서 실시한 전문가 설문평가 응답의 경우 편중된 평가가 나타나지 않았으며 이에 따라 객관적인 입장에서 평가가 이루어진 것으로 분석되었다.

본 논문에서는 열공급시스템에 대한 최적대안을 선정하기 위한 연구로서 아직까지 국내에서 수행된 바 없는 다속성효용이론을 적용하여 열공급 시스템을 평가하고 선정하여 優先順位를 제시하였다.

에너지기술은 많은 종류의 要素技術과 시스템 技術을 가지고 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 5개 열공급시스템은 모두 중요하게 이용될 수 있는 시스템들이다. 그러나 지극히 제한된 투자조건(예컨대, 인력, 예산 등)에서 개발에 優先順位를 두고자 할 때 본 연구에서 제시한 순위를 고려하는 것도 바람직할 것으로 보여진다.

본 연구의 특징은 MAUT를 적용할 때 多屬性을 고려하는 것뿐만 아니라, 多樣한 시스템을 비교한다는 것이다. 그래서 각각 이들의 조합을 모두 고려하여 최적한 優先順位를 결정하였다.

참고문헌

1. 이덕기외, MAUT를 이용한 차세대 에너지기술 평가 및 선정 연구, 기술혁신학회지 (ISSN1598-2912), 제4권 제2호 pp143-156, 2001년 7월
2. Hwang, C. L., and Lin, M. J., *Group Decision Making under Multiple Criteria- Methods and Applications*, Springer-Verlag, 1987, pp342-370
3. Behnam Malakooti and Sriram Subramanian, "Generalized polynomial decomposable multiple attribute utility functions for ranking and rating multiple criteria discrete alternatives", *Applies Mathematics and Computation*, Vol. 106, Issue 1, pp. 69-102, 1999.
4. Chapman G.B.; Elstein A.S.; Kuzel T.M.; Nadler R.B.; Sharifi R.; Bennett C.L., "A multi-attribute model of prostate cancer patients' preferences for health states, *Quality of Life Research*", Vol. 8, Issue 3, pp. 171-180, 1999.
2. Keeney, R., and H. Raiffa, *Decision with Multiple Objectives*, Wiley, New York, 1976