

연구개발사업의 평가 및 선정을 위한 DEA/AHP 통합모형에 관한 연구*

임호순** · 유석천*** · 김연성****

A DEA/AHP Hybrid Model for Evaluation & Selection of R&D Projects*

Hosun Rhim** · Seuck-Cheun Yoo*** · Youn-Sung Kim****

■ Abstract ■

This paper presents a DEA-AHP hybrid model to evaluate and select R&D projects. AHP collects and processes information on the weights of evaluation criteria. The processed information is used as an input for DEA/AR model. Only desirable number of projects are selected by the hybrid model. The model is examined by an example generated from a real data set.

1. 서 론

장기적인 국가경쟁력 제고를 위해서는 연구개발 투자규모의 양적인 확대도 중요하지만, 질적인 측면에서의 효율성 제고도 중요하다. 특히 최근처럼 국가경제가 어려움에 처한 경우는 연구개발 사업에 대한 투자의 효율성 제고가 절실히 요구되고 있다. 효율성의 제고는 연구개발 사업 추진의 시발점

인 사업의 평가 및 선정단계에서부터 합리적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 정보통신 분야를 망라한 정부주도의 연구개발 사업에 있어서 효율성 제고라는 현실적인 요구에서 출발하여, 사업의 평가 및 선정을 위한 의사결정 도구로 활용할 수 있는 실용적 모형의 하나로 DEA(Data Envelopment Analysis)와 AHP(Analytic Hierarchy Process)의 통합모형(hybrid model)을 개발한다.

* 본 논문은 정보통신부 1998년도 정보통신연구개발사업의 연구결과 중 일부임.

** 한양대학교 경영학부

*** 동국대학교 경영학과

****관동대학교 경영학과

DEA는 Charnes, Cooper 및 Rhodes[7](이하 CCR)에 의하여 기본적인 모형이 개발된 이래 Banker et al.[2]의 모형을 망라한 다양한 변형이 시도되고 있다. 모형의 적용에 있어서도 은행(Schaffnit et al.[16]), 병원(Chang[5])과 같은 서비스 조직의 성과 평가에 이용될 뿐만 아니라, 학교에서의 연구성과(Beasley[3]), 소프트웨어 개발의 성과측정(Mahmood et al.[10]), 제조공정에서의 기술선택(Baker, Talluri[1], Khouja[9]), 연구개발사업의 평가(Oral et al.[11]) 등과 같은 다양한 분야에서 활용되고 있다.

DEA의 특징은 최소한의 정보를 활용하여 여러 조직이나 사업 과제에 대하여 효율 또는 비효율성을 객관적으로 판별할 수 있게 해 준다는 점에 있다. 연구사업의 평가 시에는 다수의 평가기준이 존재하며, 이 기준들을 통합할 하나의 방편으로 각 평가기준의 중요도에 대한 가중치를 선형적으로 부여하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 평가기준들의 중요도에 대한 선형적 가중치란 본질적으로 주관적 판단에 속하는 문제로, 이 부분의 객관성 결여가 평가 과정 전체의 객관성을 해칠 가능성이 있다. 그러나 DEA 기법은 평가 기준간 선형적 가중치의 부여를 반드시 필요로 하지는 않으며, 가중치가 모형에 추가되는 경우에도 단일 값이 아니라 구간 값 만 있으면 충분하다. 따라서 DEA 기법은 연구개발 사업의 평가 및 선정이라는 의사결정 과정에 객관성을 부여할 수 있는 모형의 하나라고 볼 수 있다.

CCR에 의해 개발된 DEA 모형의 문제점은 효율적으로 판별되는 사업의 수를 제한할 수 없기 때문에 실제 적용 시에 문제를 유발하게 된다. 대부분의 연구개발 사업은 예산의 제약에 따라 일정 수의 사업만이 선정되게 되는데, 이때 DEA에 의해 효율적이라고 판별한 사업의 수가 예산이 허용하는 사업의 수 보다 많은 경우, 효율적이라고 판별된 사업들 간의 우열에 대하여 DEA 모형은 변별력을 가질 수 없게 된다. 더욱이 연구개발 과제에 지원한 사업의 수가 평가표의 평가기준의 수보다 상대적으로 적은 경우, 대부분의 과제가 효율적이라고

판별되는 까닭에 변별력 문제가 심각하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 가중치가 가질 수 있는 값의 범위를 다양한 방법에 의하여 제한하게 된다(Roll, Gollany[12]). 여러 방법 중 Thompson et al.[19]에 의하여 개발된 Assurance Region (이하 AR)모형, 즉 DEA/AR 모형은 직관적으로 이해될 수 있는 실용적 모형으로 본 연구의 기본모형으로 사용되었다.

평가 기준간 상대적 중요성의 가중치가 가질 수 있는 범위를 제한하는 것은 DEA 모형의 변별력을 높일 수 있을 뿐만 아니라, 전문가의 견해를 반영할 수 있는 수단이 되기도 한다. 다만, 다수의 전문가들 간의 견해가 정확히 일치할 수는 없으므로, 견해에 대한 구간 값 또는 범위를 구하는 것이 올바른 방법이 될 것이고 이것이 Assurance Region(AR)을 위한 중요한 입력요소가 된다.

Thompson et al.[19]의 연구는 모형 자체의 개발에 대하여 초점을 맞추고 있을 뿐이므로, 실제 AR 입력자료에 대한 연구로는 Belton과 Vickers[4]와 Oral et al.[11]의 연구를 주목할 필요가 있다. Belton과 Vickers[4]의 연구에서는 Visual Interactive 접근방식을 사용하여 실제 평가자가 소프트웨어 상에서 가중치 값을 입력하도록 하여 효율적 의사결정단위(Decision Making Unit: 이하 DMU)의 변화양상을 화면에서 파악하도록 하고 있다. 그러나, AR을 위한 입력 값의 체계적 측정에 대하여는 언급하고 있지 않다. Oral et al.[11]의 연구에서는 AR의 구간을 별도로 측정하지 않고 다른 DMU의 평가에서 제한적으로 제공되는 값을 원용하였다. 즉, DEA 모형은 각각의 DMU에 대하여 선형계획 모형을 실행한 후 목적함수 값에 따라 효율성을 판별하게 되는데, 이때 구해진 각 변수의 값을 다른 DMU의 AR 입력값으로 사용하였다. 그러나, 이때 구해진 각 변수의 값은 평가대상 DMU의 목적함수가 최대한 호의적인 값을 갖게 하는 값일 뿐이며, 이를 다른 DMU의 평가를 위한 선형계획모형의 AR 입력값으로 사용할 적절한 논리적 근거를 발견할 수 없다. 다시 말하면, 이러한 방법은 모형

자체에서 의도되지 않은 정보를 추출하여, 이를 다른 목적으로 사용한다는 점에서 그 유효성이 떨어지는 접근방식이라고 볼 수 있다. 이러한 문제점에 착안하여, 본 모형에서는 AR의 측정치를 구하는 체계적 방법으로 AHP를 이용하였다.

AHP(Analytic Hierarchy Process)는 1972년 Saaty [13]에 의하여 개발된 이래 의사결정과정을 목표에 따라 체계화 시키고 각 목표 또는 의사결정 기준간의 가중치를 구하기 위한 접근법으로 활용되어져 왔다. AHP에 대한 이론적 배경과 다목적 의사결정 문제들에 대한 다양한 응용사례는 Saaty[14, 15]에 잘 소개되어 있다. AHP는 주관적 요소를 가진 의사결정 과정을 체계화한다는 데에서 그 의의를 찾을 수 있는데, 이러한 특성은 본 연구에서 개발하는 모형에 절대적으로 필요한 요소라고 볼 수 있다. 즉, 전체 의사결정 과정을 첫째 기술적으로 효율적인 변경(frontier)를 구하고, 둘째, 이들 가운데 의사결정자의 효용체계에 따라 적정한 DMU를 선택하는 2단계로 파악한다면, 두 번째 과정에서 주관적 요소의 개입을 피할 수는 없게 된다. 이때, 주관적 요소를 평가하기 위한 객관적 절차로서 AHP가 활용되어질 수 있다.

DEA와 AHP의 접목을 시도한 연구는 Shang과 Sueyoshi[18]에서 찾아 볼 수 있는데 이들의 연구는 유연생산시스템(Flexible Manufacturing System)을 위한 기술선택에 관한 문제를 대상으로 하고 있다. 그러나 그들의 연구는 가중치의 평가 문제에 AHP를 도입한 것이 아니라, DEA의 각 평가요소의 입력값 중 계량화 할 수 없는 요소에 대하여 AHP를 적용하였으므로 평가기준 간의 가중치 측정에 AHP를 활용한 본 논문과는 맥을 달리한다고 볼 수 있다.

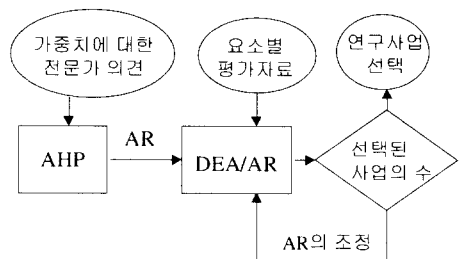
이상의 과정을 통하여 개발된 연구개발 사업의 평가 및 선정모형은 다음과 같은 최소한의 선제 조건들을 수용할 수 있다. 첫째, 연구 개발사업의 평가, 선정 시에 다수의 평가 기준간의 중요도에 대하여 객관성을 최대한 유지한다. 둘째, 예산의 제약에 따라 한정된 수의 사업만이 선정되어야 할 경

우 발생하는 DEA 모형의 변별력 문제를 해결한다. 셋째, 평가를 수행하는 전문가들 간의 다양한 의견을 반영한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 모형을 개발하고, 3절에서는 예제를 통하여 모형의 특성을 파악하며, 4절에서는 결론을 맺는다.

2. DEA/AHP 모형

본 절에서는 앞에서 소개된 DEA와 AHP의 통합 모형의 구체적 개발에 초점을 맞춘다. 이때 DEA 모형은 그 변형인 DEA/AR의 형태를 띄게 되고 평가 기준간의 중요도에 대한 가중치는 AHP로부터 구해진다. 모형에 대한 개념적인 구조는 [그림 1]과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 1] 모형의 개념적 구조

DEA 모형은 다수의 평가기준이 존재할 때 DMU의 효율성을 평가하기 위한 모형이다. 이를 엄밀히 표현한다면, DEA란 다차원 공간상의 여러 점들을 일차원 직선상에 mapping하는 방법론이라고 볼 수 있다. 이때 개별 연구개발 사업이 DMU로 정의되며, 효율성(efficiency)은 산출(output) 대 투입(input)의 비율로 정의된다. 예컨대, 사업 0의 다기준(multi-criteria)에 의한 효율의 정의를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$h_0 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r Y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{i0}} \left(\text{or } h_0 = \frac{u^T Y_0}{v^T X_0} \right) \quad (1)$$

h_j : 사업 j 의 효율(efficiency), $j = 0, \dots, n$

y_{rj} : 사업 j 의 산출요소 r 의 값, $r=0, \dots, s$
 x_{ij} : 사업 j 의 투입요소 i 에 값, $i=0, \dots, m$
 Y_j : 사업 j 의 산출요소 벡터 = $(y_{1j}, \dots, y_{sj})^T$
 X_j : 사업 j 의 투입요소 벡터 = $(x_{1j}, \dots, x_{mj})^T$
 u_r : 산출 요소 r 의 가중치
 v_i : 투입 요소 i 의 가중치
 U : u_r 의 벡터 = $(u_1, \dots, u_s)^T$
 V : v_i 의 벡터 = $(v_1, \dots, v_m)^T$
 s : 산출요소의 수
 m : 투입요소의 수
 n : 프로젝트의 수

식 (1)에 의하면 다기준에 의한 효율은 각 투입과 산출요소를 적당한 가중치에 의하여 합산한 후 그 비율을 구한 값이라고 해석할 수 있다. 만약, 일반적인 평점법을 사용하는 경우, 투입, 산출의 가중치가 선형적으로 정해져 있으므로, 연구개발사업의 평가요소에 대한 전문가의 의견 또는 평가점수가 구해진다면 효율성의 계산치는 단번에 구해질 수 있다. 그러나 가중치의 선형적 결정은 의사결정과정의 객관성을 손상시킬 수 있으므로, DEA 모형에서는 가중치의 선형적 결정을 회피하고 다음과 같은 모형에 의해 각 DMU의 효율성을 검정(test)한다.

$$\text{Max } h_0 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j=1, \dots, n \quad (3)$$

$$u_r, v_i \geq 0; \quad r=1, \dots, s; i=1, \dots, m \quad (4)$$

식 (2)는 앞에서 살펴본 효율성의 정의이며, 조건식 (3)은 모든 효율이 1보다 커질 수 없음을 나타낸다. 이 문제의 의사결정변수(decision variables)는 (U^T, V^T) 로, 이는 0보다 큰 값을 가져야 하고, X_j, Y_j 는 전문가 평가에 의해 이미 주어진 값이다. 식 (2)~(3)의 모형을 비율형(ratio form) DEA 모형이라고 하며, 비율형 DEA의 식 (2)의 분자를 1

로 정규화(normalize)하고 모형을 변형하면 다음과 같은 승수형(multiplier form) DEA 모형을 유도할 수 있다.

$$\text{Max } h_0 = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j=1, \dots, n \quad (7)$$

$$u_r, v_i \geq 0; \quad r=1, \dots, s; i=1, \dots, m \quad (8)$$

승수형 모형은 비율형 모형이 비선형(non-linear) 모형인 데 반하여, 선형계획모형으로 바뀌었으므로 계산비용을 절감할 수 있다. 이때, DEA 모형에서 효율적이라 판별되는 DMU는 다수 존재할 수 있다. 만약, 예산의 제약 때문에 효율적이라고 판별되는 DMU보다 적은 수의 DMU만을 선정해야 한다면, 추가적인 정보가 필요하다. 이런 목적의 추가적인 정보를 고려할 수 있는 모형이 Thompson et al.[19]에 의하여 소개된 DEA/AR 모형이다.

$$\text{Max } h_0 = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j=1, \dots, n \quad (11)$$

$$u_1 > 0, v_1 > 0, \quad OL_r u_1 \leq u_r \leq OU_r u_1, \quad (12)$$

$$IL_i v_1 \leq v_i \leq IU_i v_1; \quad r=2, \dots, s; i=2, \dots, m$$

DEA와 DEA/AR의 차이점은 식 (12)에서 발견할 수 있다. OL_r, OU_r, IL_i, IU_i 의 값을 어떻게 측정할 것인가에 관한 접근방법은 다양할 수 있지만, 본 연구에서는 다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making)의 중요 기법의 하나인 AHP를 통해서 체계적으로 구하도록 한다. 본 모형에서는 투입과 산출요소 내에만 변수간의 제약을 설정하였고, 투입과 산출요소 간에는 제약이 존재하지 않는다고 가정하였는데 이러한 형태의 Assurance Region을

Cone-Ratio Assurance Region(CR-AR)이라고 한다. 이는 Thompson et al.[19]의 DEA/AR 모형이 Charnes et al.[6]의 Cone-Ratio 모형을 일반화하였기 때문이다. 식 (9)~(12)의 쌍대문제를 구하면 다음과 같이 포락형(envelopment form) DEA 모형을 구할 수 있다.

$$\text{Min } \theta \quad (13)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n y_{1j} \lambda_j + \sum_{r=2}^s OL_r \mu_r - \sum_{r=2}^s OU_r \mu_{s+r} \geq y_{10} \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - \mu_r + \mu_{s+r} \geq y_{r0}, \quad r = 2, \dots, s \quad (15)$$

$$x_{10} \theta - \sum_{j=1}^n x_{1j} \lambda_j + \sum_{i=2}^m IL_i \gamma_i - \sum_{i=2}^m IU_i \gamma_{m+i} \geq 0 \quad (16)$$

$$x_{i0} \theta - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - \gamma_i + \gamma_{m+i} \geq 0, \quad i = 2, \dots, m \quad (17)$$

$$\theta \text{ free, } \lambda_j \geq 0, \mu_r \geq 0, \gamma_i \geq 0$$

포락형의 DEA 모형은 승수정보나 효율성 판별이 용이하며, 이때 효율적 DMU는 다음과 같은 조건을 만족시킨다.

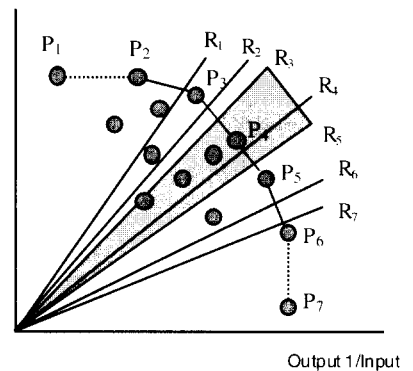
- $\theta = 1$.
- 모든 제약식이 binding, 즉 여유변수(slack variable)의 값이 0.

각 요소 값에 대한 평가치는 다수의 평가자가 평가를 수행하기 때문에 평가자에 따라 서로 다른 값을 갖게 되는데, 대표값으로 본 모형에서는 중앙값(median)을 취하도록 한다. 여러 평가자의 평가를 종합하는 데 있어서 out-lier의 영향을 극소화하는 것이 중요하게 되는데, 이런 문제를 해결하는 방법으로 최고, 최저치를 제한 값의 평균을 구하거나 기하평균을 구하는 등의 여러가지 방법이 있을 수 있다. 이러한 대표값 들 중에서 중앙값을 선택한 이유는 중앙값 역시 산술평균보다 out-lier에 대하여 덜 민감한 경향이 있으며, 차후에 설명되어질 중앙값을 중심으로 한 AR의 조정과정과의 모형의 일관성 유지를 고려하였기 때문이다.

각 평가요소 들의 척도가 다른 경우 이를 처리

하는 데에는 여러가지 접근이 가능하다. 특히, 정성적 자료를 모형에서 처리하는 방법은 Cook et al.[8]에 의해 제시된 바 있다. 이 방법은 정성적 요소의 점수 2점이 1점보다 2배 우월 또는 열등하다는 가정에 근거하지 않는다는 장점을 갖고 있는 반면, 변수의 수가 요소척도의 크기의 곱만큼, 예를 들어 5점 척도를 사용하면 변수의 수가 5배로 증가한다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 대부분의 실분조사의 자료처리과정에서 가정보듯이 리커트 스케일 등으로 측정되는 정성적 변수도 정량적 변수와 같이 처리할 수 있다고 가정한다. 단, 모든 변수는 상호 비교 가능하도록 정규화(normalize)하는 것이 필수적이다. 본 모형에서는 Roll과 Golany[12]와 같이 각 요소값을 평균으로 나누어서 정규화를 실시한다. 즉, n 개의 사업들에 대하여 r 번째 산출 요소의 값이 $\hat{y}_{r1}, K, \hat{y}_{rm}$ 이고, 이들의 평균이 $\hat{y}_{r\bullet} = \sum_{j=1}^n \hat{y}_{rj} / n$ 라면, 정규화된 값은 $\frac{\hat{y}_{r1}}{\hat{y}_{r\bullet}}, K, \frac{\hat{y}_{rm}}{\hat{y}_{r\bullet}}$ 이다.

Output 2/Input



[그림 2] DEA/AR 모형의 도해

OL_r, OU_r, IL_i, IU_i 의 값도 다른 입력자료와 마찬가지로 평가자에 따라 각기 다른 값이 구해질 것이다. [그림 2]에서는 일례를 2차원 평면상에 도시하였다. 만약 투입은 1개 요소, 산출은 2개 요소가 존재하고, 각 DMU의 평면상 위치가 그림의 점들과 같이 주어져 있다면, 효율성 조건을 만족시키는 DMU는 P_2, \dots, P_6 로 표시되는 5개의 점이다. 이 정

우, 투입요소는 하나라고 가정하였으므로, AHP를 통하여 산출요소의 한계값 OL_r , OU_r 만을 고려하면 된다. 평가자가 7인인 경우 그들의 평가치를 그림에 표시한다면, 그들의 산출요소 간 중요도에 대한 의견은 원점을 통과하는 7개의 방사선(ray)으로 표시할 수 있다. 이 7개의 방사선들의 일부가 Assurance Region을 정의하게 되는데 Assurance Region의 크기는 선정사업의 수, 즉 예산의 한도에 의하여 모형에서 결정되어지는 값이다. Assurance Region의 크기를 구하는 전략은 가장 외곽의 방사선 들로부터 시작하여 원하는 수의 DMU들이 선택될 때 까지 탐색적으로 구간을 좁혀나가는 것이다. 예컨대, 2개의 DMU가 선정되어야 한다고 할 때, 초기단계의 Assurance Region은 R_1 , R_7 내부에서 형성되는 지역으로 이때 효율적 DMU는 3개, 즉 P_3 , P_4 , P_5 이다. 따라서 다음 단계에서는 Assurance Region을 줄이게 되고, R_2 , R_6 가 형성하는 Assurance Region에서 원하는 수의 DMU, 즉 P_4 , P_5 를 선택하게 된다. 만약 하나의 DMU만을 선택해야 한다면 R_3 , R_5 가 Assurance Region을 구성하는 방사선이 되고 이때 선택된 DMU는 P_1 가 된다. Assurance Region의 탐색은 가장 외곽의 방사선 으로부터 시작하여 최악의 경우 방사선 들의 중앙 값(median)까지 좁혀질 수 있으므로 반드시 원하는 수의 DMU를 선택할 수 있다. 탐색의 과정에서 선택된 DMU의 수가 원하는 수의 DMU보다 작아진 경우에도 비효율적이라고 판명된 DMU들은 목표함수 값의 크기에 따라 내림차순으로 순위를 정할 수 있으므로, 비효율적인 DMU중 가장 최선 DMU부터 선정하여 나감으로써 문제를 해결할 수 있다.

구체적으로 OL_r , OU_r , IL_r , IU_r 의 값을 구하기 위하여 AHP에서는 먼저 의사결정이 지향하는 목표들의 체계를 계층구조로 표현하는 것에서부터 출발하여 각 기준의 중요성에 대하여 쌍비교(pair-wise comparison) 설문을 제시한다. 이때, 목표체계의 계층화는 일종의 기술(art)에 속하는 것으로 뚜렷한 이론적 배경이 개발되어 있지는 못하나 적

어도 쌍비교의 문제점을 해결하기 위한 실질적인 면에서 그 의의를 발견할 수는 있다. 즉 계층화가 되지 않은 상태에서 쌍비교를 행할 경우는 비교의 횟수가 지나치게 증가하여 평가자에게 과도한 부담을 지우게 되며, 이로부터 얻은 자료 역시 신뢰성이 저하될 우려가 있다. 예컨대 계층구조화 되지 않은 평가기준이 7개 존재한다면 이를 한번에 쌍비교 할 경우 비교회수는 ${}^7C_2 = 21$ 이나, 이를 [그림 3]의 산출요소와 같이 (1,2,2,2)의 세부항목으로 분할 하여 2층으로 계층구조화 한 경우 전체 비교회수는 ${}^4C_2 + {}^1C_1 + {}^2C_2 + {}^2C_2 + {}^2C_2 = 10$ 회로 현저히 감소됨을 알 수 있다.

쌍비교에 의해 동일계층의 집단 내 목표 들간의 중요도에 대한 평가치를 구한 값이 다음과 같다고 하자.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \Lambda & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & M \\ M & & O & M \\ a_{n1} & \Lambda & \Lambda & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

이때 n 은 집단 내에서 비교되는 목표들의 수, a_{ij} 는 목표 i 의 목표 j 에 대한 상대적 중요도를 나타내는데 이 값을 목표, 다시 말하면, 요소들의 중요도에 따른 가중치 w_i 와 w_j 의 비율과 같다고 보면, 다음의 행렬을 구할 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \Lambda & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_2} & \frac{w_2}{w_2} & & M \\ \frac{w_1}{w_n} & \frac{w_2}{w_n} & & M \\ M & & O & M \\ \frac{w_n}{w_1} & \Lambda & \Lambda & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (19)$$

이때, 가중치의 벡터를 W 라 정의하면,

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ M \\ w_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

따라서, 행렬 A 는 다음과 같은 성질을 가지게 된다.

$$A \times W = nW \quad (21)$$

이때, 식 (21)은 행렬 A 의 고유치(eigen value)와 고유벡터(eigen vector)를 구하는 식과 같다. 따라서 전문가 의견에 의하여 작성된 식 (18)의 행렬 \tilde{A} 와 식 (19)의 이론적 행렬 A 에서 양자의 차이가 미소하다면 \tilde{A} 로부터 구한 고유벡터가 A 의 고유벡터, 즉 W 와 크게 다르지 않을 것이다. 이때 고유치와 고유벡터는 유일(unique)하지 않으나 가장 큰 고유치에 해당하는 고유벡터의 값을 \tilde{W} 라 하면,

$$\tilde{A} \times \tilde{W} = \lambda_{\max} \tilde{W} \quad (22)$$

이 경우 λ_{\max} 의 값이 n 에 가까워 질수록 \tilde{W} 의 값이 일관성(consistency)을 가지고 있다고 정의한다. 고유벡터 \tilde{W} 는 Saaty[15]가 제시한 알고리즘에 의하여 구할 수 있으며, 계층구조 하에서 구해진 \tilde{W} 값들을 종합하여 각 평가기준의 중요도를 구할 수 있다.

먼저 산출요소에 대하여 p 명의 평가자로부터 구한 산출요소 간의 중요도의 가중치를 다음과 같이 표시하자 : $OW^k = (ow_1^k, K, ow_s^k)^T$ ($k = 1, \dots, p$ (단, k 는 평가자에 대한 인덱스, p 는 평가자의 수). OU_r 과 OL_r 은 $\frac{u_r}{u_1}$ 의 한계치 (bound)이므로 OW^k 은 다음과 같이 변형되어야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{OW^k}{ow_1^k} &= \left(1, \frac{ow_2^k}{ow_1^k}, K, \frac{ow_s^k}{ow_1^k} \right)^T \\ &\equiv (1, or_2^k, K, or_s^k)^T \quad (k = 1, \dots, p) \end{aligned}$$

단, $or_r^k \equiv \frac{ow_r^k}{ow_1^k}$. 각 r 에 대하여 (or_1^k, K, or_p^k) 를 오름차순으로 정렬(sorting)한 값을 (or_r^k, K, or_r^k) 라 하자(단, $r = 2, \dots, s$). 만약, 가장 넓은 Assurance Region을 구한다면, $OU_r = or_r^p$, $OL_r = or_r^1$ 이고, Assurance Region이 작아질수록 (or_r^1, K, or_r^p) 의

중앙값(median)에 접근하는 값들이 사용되게 된다. 산출요소와 마찬가지로 투입요소에 대하여도 투입요소의 AHP평가 가중치 $IW^k = (iw_1^k, K, iw_m^k)$ 와 ir^k 로 나눈 비율 $(1, ir_2^k, K, ir_m^k)^T$, 그리고 각 k 에 대하여 재정렬하여 구한 값 (ir_i^1, K, ir_i^p) 를 이용하여, IU_i, IL_i 의 값을 조정한다.

선정하고자 하는 DMU의 수가 S 개인 경우, 이상의 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

S개의 DMU를 선정하기 위한 프로세스

단계 1 : 1) 평가자들의 평가치의 중앙값 $\hat{y}_{ij}, \hat{x}_{ij}$ ($r = 0, \dots, s; i = 0, \dots, m; j = 0, \dots, n$) 계산.

2) 1)의 값을 정규화하여 평가치에 대입,

$$\text{즉, } (y_{i\cdot}, K, y_{\cdot m}) = \left(\frac{\hat{y}_{i\cdot}}{\hat{y}_{\cdot\cdot}}, K, \frac{\hat{y}_{\cdot m}}{\hat{y}_{\cdot\cdot}} \right),$$

$$(r = 0, \dots, s; i = 0, \dots, m).$$

단계 2 : 1) AHP에 의해 $(ow_1^k, K, ow_s^k)^T, (ir_1^k, K, ir_m^k)^T$ ($k = 1, \dots, p$)의 값을 측정.

$$2) \quad or_r^k = \frac{ow_r^k}{ow_1^k}, \quad ir_i^k = \frac{ir_i^k}{ir_1^k},$$

$$(r = 2, \dots, s, i = 2, \dots, m)$$

3) 각 r, i 에 대하여 $(or_1^k, K, or_r^k), (ir_1^k, K, ir_i^k)$ 을 오름차순으로 정렬하여 $(or_r^1, K, or_r^p), (ir_i^1, K, ir_i^p)$ 를 생성.

4) 각 r, i 에 대하여 $(or_r^1, K, or_r^p), (ir_i^1, K, ir_i^p)$ 의 중앙값 or_r^{med}, ir_i^{med} 을 계산.

5) iter = 0.

단계 3 : 1) iter iter + 1.

2) if $(or_r^{p-iter+1} < or_r^{med})$, stop;

else (OU_r, OL_r, IU_i, IL_i)

$$= (or_r^{p-iter+1}, or_r^{med}, ir_i^{p-iter+1}, ir_i^{med}).$$

3) 각 DMU에 대한 식(13)~(17)의 LP해를 계산.

4) if(선정된 DMU의 수 S), stop;

else 단계 3 (1)로 복귀.

3. 예 제

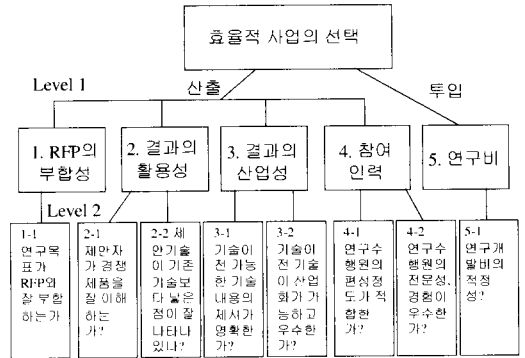
본 절에서는 예제를 통하여 DEA/AHP 모형의

특성을 파악하도록 한다¹⁾. 문제의 해를 구하기 위하여 LP는 Excel solver를 사용하였고, AHP는 C언어를 사용하여 직접 제작한 프로그램을 이용하였다. 우선, 공모연구과제에 대한 연구제안서가 4부 도착해 있고, 평가위원단은 3인의 위원으로 구성되어 있다고 가정한다. 연구개발 사업의 평가 요소는 다음의 <표 1>과 같은 항목들이 사용되며 각 항목은 5점으로 평가된다고 가정한다.

수행과제 기술성 평가 분야는 연구개발 사업의 산출분야로 인식할 수 있다. 이는 점수가 좋을수록 연구개발 사업의 위탁자에게 바람직한 결과를 제공할 수 있기 때문이다. 같은 논리로 연구자원 투입의 효율성분야에서, 과제비는 연구개발 사업의 투입분야로 인식되어지는 반면, 참여인력은 산출분야로 인식하여야 한다. 따라서 <표 1>의 평가항목은 4가지 산출요소(RFP의 부합성, 과제결과의 활용성, 과제결과의 산업성, 참여인력)와 1가지 투입요소(과제비)로 재분류 할 수 있다.

평가위원으로부터 받아야 할 입력정보는 각 산출요소 들의 가중치에 대한 정보와 각 연구사업에 대한 항목별 평가 점수이다. 이때 투입요소는 과제

비 하나만 존재하므로 가중치를 구할 필요가 없다. 산출요소는 크게 두 가지 수준(level)으로 나누어져 있는데 이들의 체계는 [그림 3]과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 3] 의사결정 목표체계

요소 가중치에 대한 값을 구하기 위해서는 두 가지 수준에서 각각 중요도에 대한 쌍비교 질문을 한다. 중요도에 대하여 극단적으로 중요 (5)에서 동등 (1)까지의 5점 척도를 사용하였고 설문형식은 다음과 같다.

<표 1> 선정평가표

	평가항목	세부기준	평가점수
수행 과제 기술성 평가	1. RFP의 부합성	1-1. 연구목표가 RFP와 잘 부합하는가?	1 2 3 4 5 미흡 우수
	2. 과제결과의 활용성	2-1. 제안자가 기존 경쟁제품의 문제점과 특성을 잘 파악하고 있는가?	1 2 3 4 5 미흡 우수
		2-2. 제안기술이 기존기술에 비하여 낡은 점이 구체적으로 잘 나타나 있는가?	1 2 3 4 5 미흡 우수
	3. 과제결과의 산업성	3-1. 기술이전 가능한 기술내용의 제시가 이해할 수 있게 구체적이고 명확하게 잘 나타나 있는가?	1 2 3 4 5 미흡 우수
		3-2. 기술이전 목록 및 기술 내용이 실제로 산업화가 가능하고 우수한가?	1 2 3 4 5 미흡 우수
	연구 자원 투입의 효율성	4. 참여인력	4-1. 연구수행원의 편성정도가 적합타당하고 경제적인가?
4-2. 연구수행원의 수행업적 및 배경에서 제안과제와 관련된 전문성, 경험이 우수한가?			1 2 3 4 5 미흡 우수
5. 과제비		5-1 총 연구개발비 구성의 적정성	1 2 3 4 5 경제적 과다

1) 예제는 실제 연구사업 선정자료에 근거하였으나 대외비 유지를 위해 상당부분 수정된 자료이다.

순위를 나열하면, 제안서 1, 제안서 2, 제안서 3의 순서로 평가된다. 이 예제의 경우에는 첫번째 반복 연산(iteration)에서 단 하나의 연구사업 만이 효율적이라고 평가 되었으나, 그러하지 않은 경우, Assurance Region을 좁혀가면서 다시 평가를 해야 한다.

〈표 7〉 DEA/AHP의 목표함수값

	제안서 1	제안서 2	제안서 3	제안서 4
목표값	0.94	0.56	0.48	1.00

〈표 8〉에서는 AR에 의한 한계가 존재하지 않는 DEA 모형의 해를 구하여 보았다. 이 경우 제안서 1, 2, 4의 목표함수 값이 1이나, 제약식이 모두 binding하는 것은 제안서 4뿐이었다. 따라서 효율적이라고 평가되는 사업은 제안서 4이며 제안서 1, 2는 [그림 2]의 P_1, P_7 과 같이 extreme point이지만, 개선의 여지가 있는 경우이다. 이런 경우의 문제점은 목표함수 값에 의해서 제안서 1과 제안서 2 간의 우열을 가릴 수 없다는 점이다. DEA/AHP도 이와 같은 상황이 발생할 수는 있지만, AR에 의하여 해의 영역이 축소되므로 이런 가능성을 상당히 줄일 수 있다.

〈표 8〉 AR을 제외한 경우의 목표함수 값

	제안서 1	제안서 2	제안서 3	제안서 4
목표값	1.00	1.00	0.80	1.00

4. 결 론

본 연구에서는 연구개발 사업의 평가 및 선정을 위한 DEA/AHP의 합성 모형을 개발하고 이의 사용사례를 제시하였다. 개발된 모형은 실제 의사결정 과정에서 사용될 수 있도록 실용성을 강조한 모형이며, 예제도 실제 상황에 근거하여 작성되었다. DEA/AHP 모형의 특징은 DEA 모형의 객관성이라는 특징을 최대한 이용하는 동시에, DEA의 한계로 지적될 수 있는 변별력 문제를 체계적으로 보

완하기위한 방편으로 AHP를 도입하였다는 데에 있다. 즉 앞에서 언급하였듯이 의사결정 과정을 크게 효율적 변경(frontier)의 설정과 주관적 효용체계에 의한 선택으로 나누어 볼 때, 모형의 특성에 따라 전자는 DEA를 이용하고 후자에 대하여서는 AHP를 활용하였다. 이는 연구개발사업의 평가 선정이라는 의사결정 상황에서 주관적 요소의 개입은 피할 수 없지만, DEA와 AHP라는 도구를 사용하여 적어도 절차의 객관화를 시도한 것으로 평가할 수 있다.

한편, 본 모형은 연구개발사업이 선정 및 평가라는 특수한 상황에 대하여 개발 되었으나, 평가의 객관성을 유지하면서, 의사결정자의 평가에 대한 의지가 적절히 반영되어야 하는 다양한 경영상의 평가문제에도 일반화할 수 있는 모형이라고 여겨진다. 단, 모형을 현실적으로 적용하는 데 있어서 있을 수 있는 문제는 AHP 모형에서 평가항목이 지나치게 많을 경우 쌍비교에 따른 평가자에게 부가되는 부담이라고 볼 수 있다. 그러나 이러한 문제는 선정평가표에 나타난 실제 평가항목 들에 대한 보다 철저한 연구에 의하여 해결될 수 있을 것이다. 이론적으로는 유효한 평가항목의 선택을 위하여 정규상관분석(canonical correlation analysis)을 이용할 수 있을 것이다(Sengupta[17]). 한편, NSF(National Science Foundation)에서 평가요인에 대하여 행한 연구결과에서는[20], 평가요인의 수를 줄일 것을 강력히 권고하고 이를 실제로 시행하고 있다. 이는 우리나라의 현행 평가제도에 상당한 시사점을 제공하고 있을 뿐만 아니라, 쌍비교에 따른 평가부담을 줄이는 방안과도 일치하는 사례로 활용될 수 있을 것이다. 그러나, 이에 대한 구체적인 연구는 본 논문의 범위를 벗어나므로, 보다 자세한 내용은 유석천과 임호순[21]의 연구를 참조할 수 있을 것이다.

끝으로 실용적인 면에서 살펴보면 본 모형은 기본적으로 선형계획법에 근거하고 있으므로 이용자가 모형을 파악하기가 상대적으로 용이하여, 모형을 마치 암흑상자(black box)같이 여기는 상황에서

발생하는 사용자로부터의 저항을 상당히 줄일 수 있다. 본 논문의 예제는 엑셀을 사용하여 해를 구하였으나, 본 모형의 실질적 구현을 위한 소프트웨어의 개발은 차후과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

- [1] Baker, R.C., and S. Talluri, "A Closer Look at the Use of Data Envelopment Analysis for Technology Selection," *Computers Ind. Engineering*, Vol.32, No.1 (1997), pp.101-108.
- [2] Banker, R.D., A. Charnes, and W.W. Cooper, "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis," *Management Science*, Vol.30 (1984), pp.1078-1092.
- [3] Beasley, J.E., "Determining Teaching and Research Efficiencies," *Journal of the Operational Research Society*, Vol.46, No.4 (1995), pp.441-452.
- [4] Belton, V., and S.P. Vickers, "Demystifying DEA-A Visual Interactive Approach Based on Multiple Criteria Analysis," *Journal of Operations Research Society*, Vol.44, No.9 (1993), pp.883-896.
- [5] Chang, H., "Determinant of Hospital Efficiency : The Case of Central Government Owned Hospitals in Twaiwan," *Omega International Journal of Management Science*, Vol.26, No.2 (1998), pp.307-317.
- [6] Charnes, A., W.W. Cooper, and Z.M. Huang, "Polyhedral Cone-Ratio DEA Models with an Illustrative Application to Large Commercial Banks," *Journal of Econometrics*, Vol.46 (1990), pp.73-91.
- [7] Charnes, A, W.W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the Efficiency of Decision Making Units," *European Journal of Operational Research*, Vol.2 (1978), pp.429-444.
- [8] Cook, W.D., M. Kress, and L.M. Seiford, "Data Envelopment Analysis in the Presence of Both Quantitative and Qualitative Factors," *Journal of the Operational Research Society*, Vol.47 (1996), pp.945-953.
- [9] Khouja, M., "The Use of Data Envelopment Analysis for Technology Selection," *Computers Ind. Engineering*, Vol.28, No.1 (1995), pp.123-132.
- [10] Mahmood, M. A., K. J. Pettingell, and A. I. Shaskevich, "Measuring Productivity of Software Projcets : A Data Envelopment Analysis Approach," *Decision Science*, Vol.27, No.1 (1996), pp.57-80.
- [11] Oral, Kettani, and Lang, "A Methodology for Collective Evaluation and Selection of Industrial R & D Projects," *Management Science*, Vol.37, No.7 (1991), pp.871-885.
- [12] Roll, Y. and B. Golany, "Alternate Methods of Treating Factor Weights in DEA," *OMEGA International Journal of Management Science*, Vol.21, No.1 (1993), pp.99-109.
- [13] Satty, T.L., "An Eigenvalue Allocation Model for Prioritization and Planning," Energy management and Policy Center, University of Pennsylvania, 1972.
- [14] Satty, T.L., "Highlights and Critical Points in the theory and Application of the AHP," *European Journal of Operational Research*, Vol.74 (1994), pp.426-447.
- [15] Satty, T.L., *Multicriteria Decision Making, The Analytic Hierarchy Process*, RWS Publication, Pittsburgh, 1990.
- [16] Schaffnit, C., D. Rosen, and J.C. Paradi, "Best Practice Analysis of Bank Branches : An Application of DEA in a Large Canadian Bank," *European Journal of Operational*

- Research*, Vol.98 (1997), pp.269-289.
- [17] Sengupta, J.K., "Tests of efficiency in data envelopment analysis," *Computers and Operations Research*, Vol.17 (1990), pp.123-132.
- [18] Shang, J. and T. Sueyoshi, "A Unified Framework for the Selection of a Flexible Manufacturing System," *European Journal of Operational Research*, Vol.85 (1995), pp. 297-315.
- [19] Thompson, R.G., L.N. Langemeier, C.T. Lee, E. Lee, R.M. Thrall, "The Role of Multiplier Bounds in Efficiency Analysis with Application to Kansas Farming," *Journal of Econometrics*, Vol.46 (1990), pp.93-108.
- [20] <http://www.nsf.gov/sbe/int/map/htm>
- [21] 유석천, 임호순, "정보통신연구개발사업 평가 선정체계의 제도적 개선 방안", *정보통신 연구진흥*, 1권 1호 (1999), pp.37-58.