

불확실한 상황하에서의 多目標 R&D 투자계획수립에 관한 연구

— 최적화 기법과 계층화 분석과정의 통합적 접근방안을 중심으로 —

이영찬* · 민재형**

Multiobjective R&D Investment Planning under Uncertainty

Young Chan Lee* · Jae Hyung Min**

Abstract

In this paper, an integration of stochastic dynamic programming (SDP), integer goal programming (IGP) and analytic hierarchy process (AHP) is proposed to handle multiobjective-multicriteria sequential decision making problems under uncertainty inherent in R&D investment planning. SDP has its capability to handle problems which are sequential and stochastic. In the SDP model, the probabilities of the funding levels in any time period are generated using a subjective model which employs functional relationships among interrelated parameters, scenarios of future budget availability and subjective inputs elicited from a group of decision makers. The SDP model primarily yields an optimal investment planning policy considering the possibility that actual funding received may be less than anticipated one and thus the projects being selected under the anticipated budget would be interrupted. IGP is used to handle the multiobjective issues such as tradeoff between economic benefit and technology accumulation level. Other managerial concerns related to the determination of the optimal project portfolio within each stage of the SDP model, including project selection, project scheduling and annual budget allocation, are also determined by the IGP. AHP is proposed for generating scenario-based transformation probabilities under budgetary uncertainty and for quantifying the environmental risks to be considered.

* 서강대학교 경영학과 대학원

** 서강대학교 경영학과

1. 서 론

연구개발(R&D) 프로젝트의 계획 및 수행에 관한 의사결정과정은 조직의 희소한 자원을 R&D 활동에 배분하여 조직이 추구하는 목표를 최대한 달성하고자 하는 문제와 관련되어 있다. 그러나 많은 경우에 있어 R&D 프로젝트의 계획과 수행은 매우 불확실한 예산집행과정하에서 이루어져 왔고 또한 다른 여러 형태의 환경적 위험요인에 의해 그 성공여부가 결정되고 있다.

최근까지 R&D 프로젝트 선정과 투자계획수립에 관하여 많은 연구와 모형 그리고 방법론들이 발표되어 왔으나 이러한 방법론과 기법들은 대부분 현실적으로 사용되고 있지 않은 것으로 연구되고 있는데[15, 16], 이러한 결과는 조직이 R&D 투자계획을 수립하는데 있어 일반적으로 다음과 같은 두가지 사항을 간과했기 때문에 발생하고 있다. 첫째, 조직에 있어 R&D 프로젝트의 선정과 자원배분활동을 위한 적절한 방법론, 즉 조직의 구체적인 목표기술, 프로젝트 선정에 대한 기준설정 그리고 다수 의사결정자의 의견수렴 등이 미흡했다. 둘째, 프로젝트 선정을 위해서는 경제적인 편익/비용 분석 뿐만 아니라 R&D 투자환경의 분석, 예를 들어 예산집행과정의 불확실성과 환경적 위험요인 분석도 함께 고려 되어야 하며, 이것은 프로젝트 선정과정에 있어서定量的인 요소와定性的인 요소 모두를 고려해야 함을 의미한다[9, 17, 22]. 따라서 최적 정책들을 결정하고 조직이 추구하는 목표를 최대한 달성하기 위해서는 R&D 투자계획수립과정에서 발생할 수 있는 여러 가지 다양한 불확실성을 명확하고 용이하게 고려할 수 있는 방법이 필요하다.

기존의 여러 문헌에서 포트폴리오 접근방법을 이용한 일반적인 투자계획수립문제가 다루어져 왔으나[7, 9, 13, 18, 21] 이러한 접근방법들은 프로젝트의 선정에 있어 불확실성을 고려하지 않은 것들이다. 또한 R&D 프로젝트의 투자계획수립에 있어 불확실성을 포함하기 위한 접근방법도 여러 연구자들에 의해 제시되어 왔는데[2, 5, 8, 11, 12, 17] 이러한 연구들은 대부분 점수법(scoring method)을 확장한 다속성 효용이론(MAUT)을 이용한 것들이다. MAUT는 특정 조직으로부터 도출된 효용함수를 이용하여 의사결정자의 유일한 선호도를 모형화하는 이론으로 R&D 투자계획수립에 있어 위험요소를 반영하기 위한 연구방법으로 많이 적용되어 왔으나 의사결정자들의 주관적 선호도를 계량적으로 모형에 반영시키기가 기술적으로 힘들다는 단점이 존재한다.

Dempster[3]는 불확실성을 포함하는 투자계획수립에 있어 기회제약식(chance constraints), 2단계 선형계획법(two stage linear programming) 그리고 확률계획법(stochastic programming) 등과 같은 확률모형 접근방법을 단일목표하에서 적용하였다. 그러나 Dempster [3]에 의해 다루어진 접근방법은 다목표의 순차적(sequential) 의사결정문제를 해결하기에는 효율적이지 못한 부분이 존재한다. 불확실성을 포함하는 다목표 투자계획수립문제는 최근 Teghem et al.의 연구[20]에서 제시되었다. 이는 다목표 확률적 선형계획법(MOSLP)으로 불리우는 접근방법으로 특정 계획기간동안 다수의 목표 그리고 기초자료의 불확실성을 포함하는 투자계획수립문제를 다루기 위해 제시된 것으로서 선형계획모형의 형태를 지니고 있다. 그러나 이러한 모든 접근방법들은 현실상황을 특징화 하기에는 부적절한 것으로 보이는데 그

이유는 다수의 의사결정자가 참여하여 조직의 갈등과정에 의해 의사결정이 이루어지는 R&D 투자에 있어 의사결정자들의 주관적 판단을 계량적으로 모형에 반영시키는 적절한 방법이 부재하기 때문이다.

본 연구에서는 Teghem et al.[20]에 의해 다루어진 다목표 확률적 선형계획법을 응용하여 다수 의사결정자의 다양한 의견을 효율적으로 다룰 수 있고 R&D 투자계획으로부터 파생되는 예산집행의 불확실성과 기술·경제·정치적 위험요소를 용이하게 반영하기 위해 계층화 분석과정(AHP)을 확률동적계획법(SDP)과 정수 목표계획법(IGP)에 결합하여 통합적인 문제 해결방안을 제시하고자 한다.

2. 다목표 R&D 투자계획모형의 구축

2. 1 R&D 투자활동의 위험요소

R&D 프로젝트의 계획과 수행은 예산의 적절한 배분문제와 밀접한 관련이 있으나 지금까지 수행되어 온 기존의 연구에서는 예산의 불확실성 문제가 거의 다루어지고 있지 않다. 예산의 불확실성은 일반적으로 다음과 같은 상황의 변화에서 기인한다고 할 수 있다. 첫째, 경제상황의 변동에 따른 조직의 재무구조의 악화는 R&D 프로젝트를 지속적으로 수행하기 위한 조직의 능력에 치명적으로 영향을 미쳐 계획된 예산수준과 실제로 배분되는 예산수준과는 차이가 발생할 수 있다. 둘째, 시장상황이 급변하고 국내시장의 규모가 점차 대형화, 탈정형화됨에 따라 경쟁력 확보를 위한 조직의

예산배분 우선순위가 변화할 수 있다. 이러한 예산의 불확실성은 경쟁시장에서의 조직의 정책에 영향을 미치고 따라서 R&D 투자활동에 있어 현재 진행 중인 프로젝트들은 재스케줄링 되거나 연기 또는 취소 되어 결과적으로 경제적 이익의 감소와 같은 위험을 초래한다.

또한 R&D 투자활동에 있어서의 불확실성은 R&D 투자계획수립에 있어서의 환경적 위험요소들도 포함한다. 환경적 위험요소는 R&D 프로젝트의 성공여부를 결정짓는 중요한 요인인데 그 이유는 조직이 고려하고 있는 다수의 목표들이 정부정책의 변동으로 인한 위험, 기술적 위험 그리고 예측오차에 의한 위험 등에 민감하게 반응하기 때문이다. 일반적으로 R&D 투자계획수립에 있어서의 환경적 위험은 다음과 같은 세가지 영역으로 분리될 수 있다. 첫째, 기술적 위험이다. 기술적 위험이란 R&D 프로젝트가 기술적으로 성공하기 힘든 가능성을 지칭하는 것이다. 둘째, 경제적 위험이다. 경제적 위험이란 기술적인 관점에서 성공적인 R&D 프로젝트라 할지라도 시장에서 반드시 이익을 보장할 수 없는 가능성을 지칭하는 것이다. 세째, 정치적 위험이다. 정치적 위험이란 정부정책의 변화로 인해 R&D 투자계획수립의 방향이 변동될 가능성을 지칭하는 것이다[1]. 그러나 이러한 위험들은 계획과정에서 측정하기가 가장 어려운 요소들이다. 이로 인해 R&D 투자계획수립에 있어 환경적 위험요소들이 적절히 반영되지 못하고 결과적으로 R&D 프로젝트의 실패 가능성이 커지게 되는 것이다. 따라서 R&D 프로젝트의 투자계획수립에 있어 환경적 위험요소들을 명확히 인식할 필요가 있으며 이러한 환경적 위험요소들을 적절하게 그리고 용이하게 반영할 수 있는 모형이 요구된다고 할 수 있다.

2. 2 연구모형의 특성

R&D 투자계획수립에 있어 미래를 예측하기 위해 과거의 자료만을 전적으로 사용할 수 없는 다차원적인 환경은 주관적인 판단과 통찰 그리고 우선순위화 (ranking of priorities)와 같은 직관적 접근방법에 대한 정당성을 제공한다[4]. 따라서定量的인 요소와定性的인 요소를 동시에 다룰 수 있는 모형이 요구되고 그 모형은 다음의 특성들을 고려하여야 한다. 첫째, 모형은 반드시 순차적인 의사결정을 포함해야 한다는 것이다. 순차적인 의사결정이란 고려하고 있는 계획기간동안 특정 시점에서 이루어진 의사결정이 다음 시점에서의 의사결정에 영향을 미치는 것을 말한다. 둘째, 불확실한 상황의 원인과 효과를 고려해야 한다. 즉, 모형은 궁극적으로 가용 예산수준의 변동가능성과 R&D 투자활동에 있어서의 환경적 위험요소들을 명확히 인식하고 고려할 수 있는 수단을 제시해야 한다. 세째, 계획하고 있는 예산수준이 실제로 어떻게 배분되느냐의 문제는 미래상황에 대한 예측을 의미하고 따라서 확률적 변환과정을 따르게 된다. 모형은 그러한 확률들의 변화에 따른 효과의 민감도 분석을 수행할 수 있도록 단순명료한 체계를 포함해야 한다. 네째, 모형은 순차적인 의사결정과정에서 계량화가 용이하지 않은 불확실성을 효과적으로 다루기 위해 각 의사결정 단계에서 불확실성과 관련된 조직의 목표들과 기준들을 적절히 포함할 수 있어야 한다. 다섯째, 모형은 환경적 위험요소와 관련된 주요 고려사항에 대해单一 또는多數 의사결정자의 판단을 체계적으로 유도해낼 수 있는 기법을 포함하고 있어야 한다.

본 연구에서는 위에서 언급한 R&D 투자계획모형이 가져야 할 특성들을 감안하여 예산의

불확실성, 즉 계획하고 있는 예산수준과 실제 배분된 예산수준과의 차이에서 발생하는 변동 가능성과 환경적 위험요소를 동시에 고려할 수 있는 다목표 R&D 투자계획모형을 제시한다. 제시되는 모형은 확률동적계획법(SDP), 정수 목표계획법(IGP) 그리고 계층화 분석과정(AHP)을 결합한 통합모형으로서의 역할을 수행한다.

2. 3 확률동적계획모형의 구축

우선 본 연구에서는 예산의 불확실성 문제를 다루기 위해 확률동적계획법을 이용한다. 예산의 계획수준과 실제 배분수준간의 차이가 존재하는 상황하에서 다기간에 걸쳐 다수의 프로젝트에 대한 투자를 고려할 경우 계획기간(planning horizon)을 단계(stage)별로 나누고 각 단계에서의 최적 투자의사결정을 내리는 것이 바람직하다. 이러한 연구에 적합한 모형이 바로 동적계획모형으로서 여기에 불확실성을 고려하는 모수(parameters)를 포함한 것이 바로 확률동적계획모형이다. 그러나 본 모형은 기존의 확률동적계획모형을 확장하여 각 계획단계에서의 변환확률(transformation probabilities)을 다수 의사결정자의 의견을 수집, 종합하여 도출하기 위해 여론수렴기법인 AHP를 모형에 포함시켰다. AHP를 이용하여 고려하고 있는 다수의 계획 투자수준이 실제로 집행될 확률치를 도출하였다.

2. 3. 1 투자계획문제의 특징

본 확률동적계획모형에서 고려하는 확률적 모수란 각 계획단계에서 투자활동을 위해 실제 이용할 수 있는 예산수준이다. 여기서 계획단계를 t ($t=1, \dots, s$)로 표시하면 s 는 주어진

계획기간내에서 고려하고 있는 단계의 수이다. 예를 들어, 주어진 계획기간동안 단계 t 에서 수행될 프로젝트 포트폴리오를 고려해 보자. 우선 단계 t 의 시작시점에서 고려할 수 있는 투자수준은 일반적으로 다양한데 이를 기호로 나타내면 다음과 같다. D_t 를 단계 t 에서 고려하고 있는 투자수준이라 하자. 또한 다양한 투자수준을 지수 k ($k=1, \dots, N_D$)로 나타내면 N_D 은 단계 t 에서 계획하고 있는 투자수준의 갯수가 된다. 따라서 단계 t 에서의 특정 투자수준을 D_t^k 로 나타내기로 하자. 계획하고 있는 투자수준과 더불어 각 단계 t 의 종결시점에서 실제로 집행되는 투자수준 또한 다양하다. 따라서 단계 t 에서 실제로 집행되는 투자수준을 나타내는 기호가 필요한데 이를 F_t^l 라 하자. 여기서 실제로 집행된 다양한 투자수준을 나타내는 지수를 l ($l=1, \dots, N_{F_t}$)이라 하면 N_{F_t} 는 실제로 집행된 투자수준의 갯수가 된다. 따라서 단계 t 에서 실제로 집행된 특정 투자수준은 F_t^l 로 정의할 수 있다. 그러나 앞서 언급한 R&D 투자활동의 위험요소로 인해 단계 t 에서의 계획 투자수준이 실제로 집행된다고는 볼 수 없다. 따라서 불확실한 예산집행의 과정을 계량적으로 나타내기 위한 작업이 요구된다고 할 수 있는데 이러한 작업은 확률분포를 도입함으로써 가능해진다. 즉, 앞서 정의한 바와 같이 계획하고 있는 투자수준의 종류를 지수 k 로 나타내면 모든 k 에 대해 단계 t 에서 실제로 집행되는 특정 투자수준 F_t^l 의 확률분포는 $p_t(F_t^l)$ 로 표시할 수 있다. 모든 계획 투자수준과 실제 투자수준의 종류, 즉 모든 k 와 l 에 대한 확률치 $p_t(F_t^l)$ 가 의미하는 것은 계획하고 있는 투자수준이 D_t^k 일 경우 실제 투자수준이 F_t^l 가 되는 가능성을 알아내고자 하는 것이다. 본 연구

에서는 실제로 집행되는 투자수준의 확률치 $p_t(F_t^l)$ 를 도출하기 위해 AHP를 이용하였다.

2. 3. 2 상태변수의 定義

확률동적계획모형을 구축하는데 있어 본 연구에서는 두가지 상태변수를 고려하고자 한다. 먼저 단계 t 에서의 기술축적수준을 하나의 상태변수로 고려한다. 기술축적수준이란 열효율성, 발전용량, 개발지역범위 등을 나타내는 것으로 본 연구에서는 항공노선의 확장범위(단위 : km^3)와 같은 개발지역범위를 기술축적수준으로 정의하였다. 여기서 다양한 기술축적수준의 상태를 지수 i ($i=1, \dots, A$)로 나타내면 A 는 단계 t 에서의 기술축적수준의 갯수가 된다. 여기서 단계 t 에서의 특정 기술축적수준을 L_t^i 로 정의하기로 한다.

일반적으로 단계 t 에서의 계획 투자수준은 단계 $(t-1)$ 에서 실제로 집행된 투자수준에 의해 영향을 받는다. 즉, 단계 t 에서 특정 수준의 투자가 실제로 집행될 가능성은 단계 $(t-1)$ 에서 실제 투자가 얼마나 이루어졌느냐에 영향을 받는다는 것이다. 이러한 내용을 다루기 위해서는 단계 $(t-1)$ 이 끝난 직후 실제로 집행된 투자수준을 나타내는 추가적인 상태변수를 고려해야 한다. 단계 t 에서 실제로 집행된 특정 투자수준을 F_{t-1}^l ($l=1, \dots, N_{F_{t-1}}$)로 정의했으므로 단계 $(t-1)$ 에서 실제로 집행된 특정 투자수준은 F_{t-1}^l 로 나타내기로 하자. 이때 단계 t 에서의 기술축적수준은 L_t^i 로서 추가적으로 고려한 상태변수 F_{t-1}^l 를 각 단계 t 에서의 기술축적수준과 결합하여 상태조합을 만들어 낸다. 따라서 단계 t 의 시작시점에서 시스템의 상태는 현재의 기술축적수준 L_t^i ($\forall i$)과 단계 $(t-1)$ 에서 실제로 집행된 투자수준 F_{t-1}^l ($\forall l$)의 상태조합

에 의해 결정되고 이것을 $L|F_{t-1}^i$ ($\forall i, l$)로 표기하기로 한다.

단계 t 에서의 의사결정 결과는 다음과 같이 두가지 변화를 초래한다. 첫째, 단계 t 에서 다음 단계 ($t+1$)로 시스템의 상태가 변화한다. 앞서 기술한 상태조합변수를 고려했을 때 단계 ($t+1$)에서의 시스템의 상태는 $L_{t+1}|F_t^i$ 로 표시할 수 있다. 둘째, 단계 t 에서 시스템의 상태를 고려한 계획 투자수준과 그에 따라 실제로 집행되는 투자수준의 결과는 단계 t 의 종결시점에서 이익의 순현재가치로 표현되는 경제적 수익과 특정 기술축적수준으로 구체화 된다. 단계 t 에서의 경제적 수익을 V_t 로 표시하면 V_t 는 단계 t 에서의 특정 계획 투자수준 D_t^k 에 따른 실제 투자수준 F_t^i 의 결과이다. 단, 여기서 표현하는 단계 t 에서의 계획 투자수준과 실제 투자수준은 상태조합 (단계 t 에서의 기술축적수준과 단계 ($t-1$)에서의 실제 투자수준)을 반영한 것이다. 여기서 V_t 는 단계 t 에서 실제로 집행되는 투자수준의 가능성에 따라 변화하는 확률변수이므로 V_t 의 기대값을 구해야 한다. 그 기대값은 상태조합을 반영하는 변환확률 $p_k(F_t^i)$ 와 V_t 를 곱해서 구할 수 있다. V_t 의 기대값은 최적 투자수준 D_t^k 를 결정하기 위해 확률동적계획 모형에 이용된다.

2. 3. 3 불확실성 母數의 계량화

변환확률 $p_k(F_t^i)$ 을 도출하기 위해 먼저 각 단계 t 에서 계획 투자수준의 상한치와 하한치를 정한다. 투자수준의 범위 (상한치와 하한치의 차이)를 결정하고 난 뒤 다음 단계는 이 범위를 세부수준으로 나누는 것이다. 세부수준으로 나누어진 계획 투자수준이 실제로 집행될 상대적 가능성(relative likelihood)을 수치화하기

위해 계획 투자수준의 실제 집행결과에 대한 과거자료와 확률동적계획모형의 모수들 사이의 함수관계를 이용한다. 다시 말해서 단계 t 에서의 기술축적수준과 단계 ($t-1$)에서의 실제 투자수준의 상태조합 $L|F_{t-1}^i$ 를 고려한 계획 투자수준과 그에 따른 실제 투자수준의 집행가능성을 나타내는 확률치 $p_k(F_t^i)$ 를 의사결정자의 경험적 판단을 이용하여 도출한다는 것이다. 이러한 주관적 확률치는 과거의 자료를 바탕으로 의사결정자의 경험과 지식을 반영할 수 있는 AHP를 이용하여 용이하게 구할 수 있다[19].

변환확률을 다루기 위해서는 주관적 모형이 요구된다. 여기서 주관적 모형이란 과거의 자료, 모수들간의 함수관계, 미래의 가용예산 시나리오에 대한 정의 그리고 의사결정자의 주관적 판단 등을 결합한 모형을 말한다. 주관적 모형의 각 구성요소에 대한 구체적인 기술은 다음과 같다.

(1) 모수들간의 함수관계 : 상태변환을 다루는 변환확률은 단계 t 에서의 기술축적수준 L_t , 단계 ($t-1$)에서의 실제 투자수준 F_{t-1} , 단계 t 에서의 계획 투자수준 D_t 그리고 단계 t 에서의 실제 투자수준 F_t 의 함수로 정의된다. R&D 영역에서 이러한 함수관계를 계량적으로 정확히 파악해 내기란 용이한 작업이 아니다. 따라서 객관적 자료 뿐만 아니라 의사결정자의 축적된 경험으로부터 나오는 주관적 판단이 요구된다. 즉, 각 단계 t 에서의 기술축적수준과 단계 ($t-1$)에서의 실제 투자수준 그리고 단계 t 에서의 계획 투자수준이 정보로 주어지고 의사결정자는 이에 따라 실제 투자수준 F_t 의 가능성 또는 확률치를 주관적으로 평가하게 되는 것이다.

단계 t에서의 기술축적수준과 단계 (t-1)에서의 실제 투자수준의 상태조합에 따른 변환화률을 행렬로 표시하면 이 행렬의 행은 시스템이 단계 t에서 상태조합 $L^t F_{t-1}^t$ 에 있을 때의 계획 투자수준 D_t^t 를 나타내고 열은 단계 t에서의 실제 투자수준 F_t^t 를 나타낸다. 이 행렬의 각 구성요소들은 D_t^t 가 주어졌을 때 F_t^t 가 집행될 확률이다. 각 단계 t에서의 이러한 변환화률행렬의 총 갯수는 단계 t의 시작시점에서의 기술축적수준의 갯수와 단계 (t-1)에서의 실제 투자수준의 갯수를 곱한 값이 된다.

(2) 미래 가용예산 시나리오에 대한 정의 : R&D 투자계획수립에 있어 확률동적계획모형의 적용결과는 주관적 확률이 어떻게 도출되느냐에 크게 영향을 받는다. 미래 투자수준의 예측에 대한 접근방법은 과거의 투자 우선순위와 정책의 특성에 근거해야 할 뿐만 아니라 의사결정자의 미래 투자수준의 가능성(likelihood)에 대한 평가를 고려해야 한다. 이러한 접근방법은 미래의 가용예산상황을 반영하는 "if-then" 시나리오의 형태를 띠는 경우가 많다. 예산의 변동가능성을 다루기 위한 세가지 시나리오들은 다음과 같이 제시될 수 있다.

첫째, 제약예산 시나리오이다. 이 경우는 현재의 기술축적수준이 높으면 낮은 실제 투자수준에 보다 큰 확률이 부여되고 현재의 기술축적수준이 중간단계이면 낮거나 중간수준의 실제 투자에 큰 확률이 부여되며 현재의 기술축적수준이 낮으면 높은 실제 투자수준에 큰 확률이 부여되는 상황을 나타낸다. 둘째는 비제약예산 시나리오이다. 이 경우는 현재의 기술축적수준에 관계없이 높은 실제 투자수준에 보다 큰 확률이 부여되는 상황을 나타낸다. 세째는 미정예산 시나리오로서 이 경우는 현재의 기술축적수준이 높으면 중간과 낮은 실제 투자

수준에 큰 확률이 부여되고 기술축적수준이 중간이나 낮은 수준에 있으면 중간수준의 실제 투자에 높은 확률이 공통적으로 부여되는 상황을 나타낸다고 가정한다.

(3) 의사결정자의 주관적 판단도출 : 본 연구모형에서는 단일 또는 다수 의사결정자로부터 실제로 집행되는 투자수준의 상대적 가능성을 확률치로 유도해내기 위해 여론수렴기법인 AHP를 이용한다. AHP를 이용한 변환화률의 산출과정을 구체적으로 기술하면 다음과 같다. 우선 의사결정자는 단계 t에서 二狀態 변수(단계 t에서의 기술축적수준과 단계 (t-1)에서의 실제 투자수준), 특정 예산 시나리오 그리고 계획된 투자수준이 주어진 상황하에서 실제로 집행될 가능성을 결정해야 한다. 이러한 판단을 수행하기 위해 의사결정자는 '가능성이 같다', '약간 높다', '높다', '매우 높다' 그리고 '절대적으로 높다'와 같은 언어적 비교(verbal comparisons)와 그것을 수치적 형태로 바꾼 비율척도 즉 1, 3, 5, 7 그리고 9 (각 숫자사이에 짹수를 도입하여 평가등급간의 절충을 고려할 수 있다)를 사용하여 두 대안간의 상대적 가능성을 표시할 수 있다. 변환화률행렬을 만들기 위해 먼저 계획 투자수준 D_t^t 에 따른 실제 투자수준 F_t^t 의 발생가능성에 대한 이원비교를 수행한다. 앞서 언급했듯이 이원비교를 수행함에 있어 미래 가용예산 시나리오와 상호 연관된 모수들 즉, 단계 t에서의 기술축적수준과 단계 (t-1)에서의 실제 투자수준의 상태조합 그리고 계획투자수준 D_t^t 사이의 함수관계가 이원비교과정에서 의사결정자의 정보로 이용된다.

다음으로 고유치 방법(eigenvalue method)을 이용하여 각 실제 투자수준에 대한 복합가중치(composite weight)를 구한 다음 평가의 일관

성을 검증한다. 일관성 비율(consistency ratio: CR)이 수용범위내에 있다면(CR<0.1) 이 복합가중치는 변환화률행렬에서 특정 계획 투자수준을 나타내는 k 번째 행의 구성요소가 된다. 이러한 과정을 모든 단계에서 상태조합수준에 따라 반복한다. 예를 들어, 단계 t 에서의 기술축적수준 i 그리고 단계 $(t-1)$ 에서의 실제 투자수준 l 이 주어지고 단계 t 에서의 계획 투자수준과 실제 투자수준의 갯수가 각각 3개라고 하자. 또한 제약예산 시나리오하에서 계획 투자수준 1 (D_t^1)에 따른 실제 투자수준들의 상대적 가능성이 다음과 같다고 하자. 실제 투자수준 2 (F_t^2)는 실제 투자수준 1 (F_t^1)보다 발생할 가능성이 약간 높고 실제 투자수준 3 (F_t^3)은 실제 투자수준 1 (F_t^1)보다 발생가능성이 매우 높으며, 실제 투자수준 3 (F_t^3)은 실제 투자수준 2 (F_t^2)보다 발생가능성이 높다고 하자. 이러한 정성적인 이원비교를 앞에서 제시한 비율처럼 바꾼 뒤 이원비교행렬(pairwise comparison matrix) \hat{A} 를 작성하면 다음과 같다.

$$\hat{A} = \begin{matrix} & F_t^1 & F_t^2 & F_t^3 \\ F_t^1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} \\ F_t^2 & 3 & 1 & \frac{1}{5} \\ F_t^3 & 7 & 5 & 1 \end{matrix}$$

또한 위 이원비교행렬 \hat{A} 에 고유치 방법을 적용하여 도출된 추정식 $\hat{A}\hat{W}=\lambda_{max}\hat{W}$ 의 결과는 다음과 같다.

$$\lambda_{max} = 3.06 ; \quad \hat{W} = \begin{bmatrix} 0.081 \\ 0.188 \\ 0.731 \end{bmatrix}$$

$$\text{일관성 비율(CR)} = 0.062$$

따라서 단계 t 에서 계획 투자수준 1 (D_t^1)에 따른 실제 투자수준의 확률 $p_l(F_t^1)$ 은 그 수준 l ($l=1, 2, 3$)에 따라 각각 0.081, 0.188, 0.731이 되며 각각은 제약예산 시나리오하에서의 계획 투자수준 1에 대한 실제 투자수준의 가능성, 즉 주관적 확률이 된다. 이러한 접근방법을 이용하여 세가지 미래 가용예산 시나리오하에서 상태조합 (단계 t 에서의 기술축적수준과 단계 $(t-1)$ 에서의 실제 투자수준의 조합)을 반영하는 단계 t 에서의 특정 계획 투자수준에 따른 실제 투자수준의 확률을 도출할 수가 있다.

2. 3. 4 二狀態 확률동적계획모형의 구축

확률동적계획모형의 목적함수는 계획기간의 모든 단계에서 산출되는 경제적 수익에 대한 기대 현재가치의 총합을 극대화시키는 것이다. 각 단계에서 최적 프로젝트 포트폴리오의 선정과 이로부터 산출되는 이익의 순현재가는 목표와 기준에 대한 의사결정자의 선호도에 따라 다음 절에서 언급될 정수목표계획법에 의해 결정된다. 계획기간동안 각 단계에서 발생하는 이익의 순현재가치에 대한 기대값의 합을 극대화하는 최적 총수익은 변환화률을 이용해 식 (1)의 순환 방정식(recursive equation)을 통하여 구할 수 있다.

$$R_t = \max_{D_t \in D_t} [\{E_k\}'s + \alpha \cdot R_{t+1}] \quad (t=1, \dots, s) \quad (1)$$

$$\text{where } E_k = \sum_{i=1}^{N_{F_t}} (p_k(F_t^i))^\beta \cdot V_i \\ \sum_{i=1}^{N_{F_t}} p_k(F_t^i)^\beta = 1$$

$$k=1, 2, \dots, N_{D_t}$$

$$R_{s+1} = 0$$

여기서,

t : 단계를 나타내는 지수 ($t=1, \dots, s$).

s : 주어진 계획기간내의 단계의 수.

V_t : 특정 계획 투자수준 D^t 에 따른 실제 투자수준 F_t^t 로부터 산출되는 단계 t 에서의 이익의 순현재가치.

R_t : 단계 t 의 시작시점에서 이익의 기대 순현재가로 표시되는 경제적 이익.

F_t : 단계 t 에서의 실제 투자수준.

D_t : 단계 t 에서의 계획 투자수준.

N_{D_t} : 각 상태조합 $L^t F_t^i$ ($\forall i, l$)을 고려한 단계 t 에서의 계획 투자수준의 갯수.

k : 특정 계획 투자수준을 가리키는 지수 ($k=1, \dots, N_{D_t}$).

l : 특정 실제 투자수준을 가리키는 지수 ($l=1, \dots, N_{F_t}$).

N_{F_t} : 시스템의 상태가 $L^t F_t^i$ 에 있을 때 단계 t 에서의 실제 투자수준의 갯수.

D_t^i : 기술축적수준 L^t 과 단계 $(t-1)$ 에서의 실제 투자수준 F_{t-1}^i 의 각 상태조합에 대한 단계 t 에서의 최적 투자수준.

$p_k(F_t^i)^\beta$: 미래 가용예산 시나리오 β 하에서 기술축적수준 L^t 과 단계 $(t-1)$ 에서의 실제 투자수준 F_{t-1}^i 의 상태조합을 반영한 특정 계획 투자수준 D_t^k ($\forall i, k, l$)에 따른 실제 투자수준 F_t^l 의 발생 가능성을 나타내는 확률.

α : 단계별 할인요소(discount factor)

즉, 식 (1)을 통해 단계 t 에서 특정 계획 투자수준에 따른 여러 실제 투자수준의 결과로서 도출되는 이익의 순현재가치 V_t 의 기대값과 단계별 할인요소로 현재가치화한 R_t 의 합을 극대화시키는 최적 계획 투자수준 D_t^* 이 단계별로

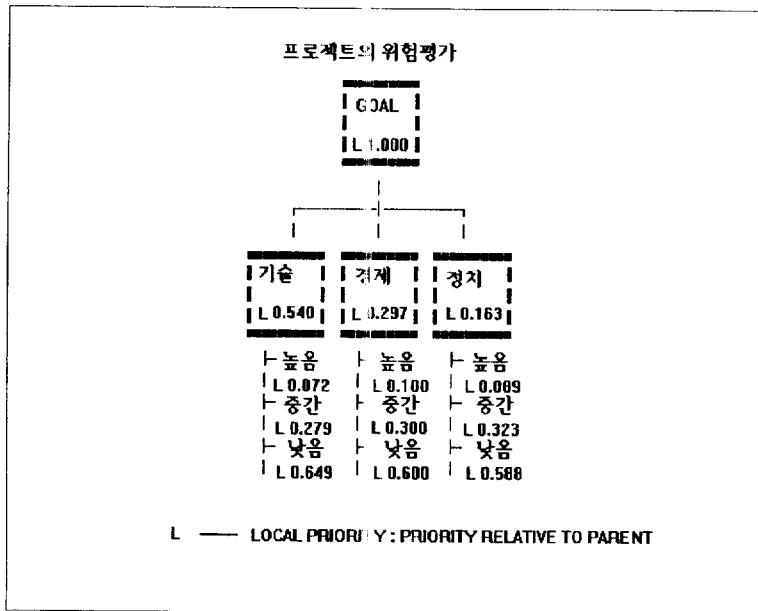
결정된다.

2. 4 多目標-多基準 분석

2. 4. 1. 프로젝트 선정기준

R&D 투자활동의 성공여부는 단순히 조직의 목표들을 모형에 고려한다고 해서 결정되는 것은 아니다. 왜냐하면 R&D 투자활동에 있어서 언급한 환경적 위험요소가 존재하기 때문이다. 이러한 위험요소는 주로 R&D 투자활동의 목표(또는 기준)와 R&D 투자환경으로부터 발생하는데, 이러한 비정량적인 요인들이 R&D 투자활동의 성공여부를 결정하는데 있어 중요한 전략적 위치에 있음을 주지의 사실이다. 따라서 정성적인 요소들을 프로젝트의 선정기준으로 이용할 수 있는 방안이 모색되어야 하는데 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 다기준 의사결정기법인 AHP를 이용한다. AHP는 정량적인 요소 뿐만 아니라 정성적인 요소까지도 의사결정의 기준으로 포함시킬 수 있다. 이러한 장점을 이용, 정성적인 기준 즉, R&D 프로젝트의 위험요소를 반영하는 기준들(기술, 경제 그리고 정치적 위험)을 AHP 계층구조에 포함시켜 각 기준들의 상대적 중요도를 산출한다. 다음으로 위험요소를 반영하는 각 기준들의 강도(intensity)를 설정하고 (본 연구에서는 높음, 중간 그리고 낮음으로 구분하였음) 이에 대한 이원비교를 수행하여 가중치를 산출한 뒤 모든 프로젝트들을 세가지 위험요소의 강도 (높음, 중간 그리고 낮음)에 따라 평가하여 어디에 해당하는지를 결정한다. 그리고 이러한 평가를 통해 각 프로젝트의 위험수준을 가중치 형태로 나타낸다([그림 1], [그림 2] 참조).¹¹⁾ 이 가중치는 각 프로젝트의 위험반영계수로서 정수목표계획법의 프로젝트 선정

기준 제약식의 기술계수로 이용된다.



[그림 1] 프로젝트의 위험요소와 그 강도(intensity)에 대한 AHP 계층구조와 이원비교 수행결과의 예

2. 4. 2 정수목표계획모형의 구축

본 연구에서는 목표 또는 기준 (예를 들어 이익의 순현재가치, 기술축적수준, 환경적 위험)들의 상충관계를 고려하기 위해 정수목표계획법을 이용한다. 확률동적계획모형의 각 단계에서 수행될 최적 프로젝트 포트폴리오의 결정과 관련된 관리적인 관심사항, 예를 들어 최적 스케줄링, 예산배분수준, 프로젝트 선정여부 등은 정수목표계획모형에 의해 결정된다.

그러나 목표계획법(GP)은 광범위하게 쓰이는 기법임에도 불구하고 몇 가지 단점을 가지고

있는 것으로 연구되고 있는데 그 대표적인 것이 바로 부적절한 목표의 설정과 각 목표들의 가중치설정 문제이다[10, 23]. 이 중 부적절한 목표설정에 관한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 Delphi Method, Nominal Group Technique, Brain Storming 등의 여론수집기법을 GP와 결합한 모형이 제시되고 있다[13]. 목표들의 가중치설정에 관한 문제의 핵심은 의사결정자가 목표에 대한 가중치를 사전적으로 설정하는데 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 수단으로 AHP를 이용하여 목표

1) 이러한 과정을 AHP에서는 절대적 측정방법(absolute measurement)이라고 한다. 이것의 본래 취지는 비교할 대안의 수가 매우 많고 과거의 자료를 통해 대안비교의 기준치(standard)가 존재할 때 이용되는 것인데 본 연구에서는 각 프로젝트들의 위험을 계량화시킬 수 있는 수치를 개발하기 위해 응용되었다.

들간의 이원비교를 통해 각 목표의 가중치를 도출하였다. 선형적인 가중치 설정에 비해 AHP를 이용한 방법이 갖는 장점은 목표에 대한 선호도를 의사결정자의 경험과 지식을 바탕으로 하여 체계적으로 도출할 수 있다는 점이다. 또한 정수계획법(IP)은 프로젝트의 수행여

부를 결정짓는 제약식과 스케줄링, 예산편성과 같은 관리적인 제약식을 용이하게 다룰 수 있는 기법이다. 이러한 접근방법을 이용하여 최적 프로젝트 스케줄링과 단계내에서의 최적 예산편성을 하게 된다.

본 연구는 0-1 변수를 포함하는 정수목표계

TECH	HIGH 1[0.111]	MEDI 2[0.430]	LOW 3[1.000]		GLOBAL D:\PACKAGE\EC80\PRACT2
	TECH	ECON	POLT		
ROW: 1	.	.	.		
COL: 1	.	.	.		
ALTERNATIVE	.5396	.2970	.1634	TOTAL	
1 PROJECT1	MEDI	LOW	HIGH	0.554	
2 PROJECT2	HIGH	MEDI	LOW	0.372	
3 PROJECT3	LOW	HIGH	MEDI	0.679	
4 PROJECT4	LOW	MEDI	MEDI	0.778	
5 PROJECT5	MEDI	LOW	LOW	0.692	
.	.	.	.		
○ EXPERT CHOICE PROGRAM 의 ABSOLUTE MEASUREMENT 를 이용하여 각 프로젝트들의 위험수준을 평가한 것임.					

[그림 2] 절대적 측정방법(absolute measurement)을 이용한 프로젝트의 위험반영계수(가중치) 산정의 예

획모형을 통해 계획 예산수준 각각에 대해 최적 프로젝트 포트폴리오를 선정하고 그에 따른 이익의 순현재가치를 산출하여 확률동적계획모형의 입력자료로 이용한다. 이 과정에서 이익의 순현재가치에 영향을 미치는 환경적 위험요인들을 반영하는 기준과 다수의 목표가 고려되고 이러한 다목표-다기준하에서의 최적 프로젝트 포트폴리오를 결정한다.

본 연구에서 고려하고 있는 정수목표계획모형의 목적함수는 각 목표수준의 미달치의 가중합계를 최소화하는 것이다. 제약식의 첫번

형태는 기술축적수준, 경제적 이익 그리고 시장점유율과 같은 목표들로 구성되어 있는 목표 관련 제약식과 위험요인을 고려한 프로젝트 선정기준 제약식이다. 두번째 형태의 제약식은 관리적인 제약식으로 최적 프로젝트 스케줄링 그리고 프로젝트 수행여부와 관련되어 있다. 세번째 형태의 제약식은 예산배분 제약식으로 최적 계획 투자수준과 관련되어 있다. 본 연구에서의 정수목표계획모형은 식 (2)와 같이 구축될 수 있다.

$$\text{Min } \sum_{q=1}^Q W_q D_q^- \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{M_t} A_{jq} X_j + D_q^- - D_q^+ = G_q \quad \langle \text{목표와 기준관련 제약식} \rangle$$

$$\sum_{n=1}^{P_j} Y_{jn} - X_j = 0 \quad \langle \text{관리적 제약식} \rangle$$

$$\sum_{j \in M_t^n} C_{jn} Y_{jn} \leq B_t^n \quad \langle \text{매년예산 제약식} \rangle$$

$$\sum_{n=1}^T B_t^n \leq BT_t \quad \langle \text{총예산 제약식} \rangle$$

$$X_j = 0, 1 \quad j = 1, \dots, M_t$$

$$Y_{jn} = 0, 1 \quad j = 1, \dots, M_t; n = 1, \dots, P_j$$

여기서,

q : 특정 목표를 가리키는 지수 ($q = 1, \dots, Q$).

Q : 고려하는 목표의 수.

W_q : q 번째 목표에 대한 가중치.

D_q^- : q 번째 목표의 목표수준 미달치.

M_t : 단계 t 에서 고려되는 프로젝트의 수.

A_{jq} : q 번째의 목표에 대한 j 번째 프로젝트의 공헌도.

X_j : 단계 t 에서 j 번째 프로젝트의 선택여부를 나타내는 $\{0, 1\}$ 변수.

G_q : q 번째 목표의 목표수준.

n : 단계내의 특정 시점 (본 연구에서는 年度로 나타냄)을 가리키는 지수 ($n = 1, \dots, T$).

n_j : 프로젝트 j 가 단계내의 특정 년도초에 시작하는 것을 나타내는 지수 ($n_j = 1, \dots, P_j$).

T : 단계내의 年數.

CP_j : 단계내에서 프로젝트 j 를 완수하는데 걸리는 시간(年數).

Y_{jn} : 단계내에서 프로젝트 j 가 n 번째 年度初에 선택되는지의 여부를 나타내는 $\{0, 1\}$ 변수.

C_{jn} : D_t^k 와 F_t^l 사이의 예상되는 차이에 대한 비용상승계수²⁾를 고려한 단계 t 의 n 번째 年度에서의 프로젝트 j 의 비용.

M_t^n : 단계 t 의 n 번째 年度에 선택되는 프로젝트의 수.

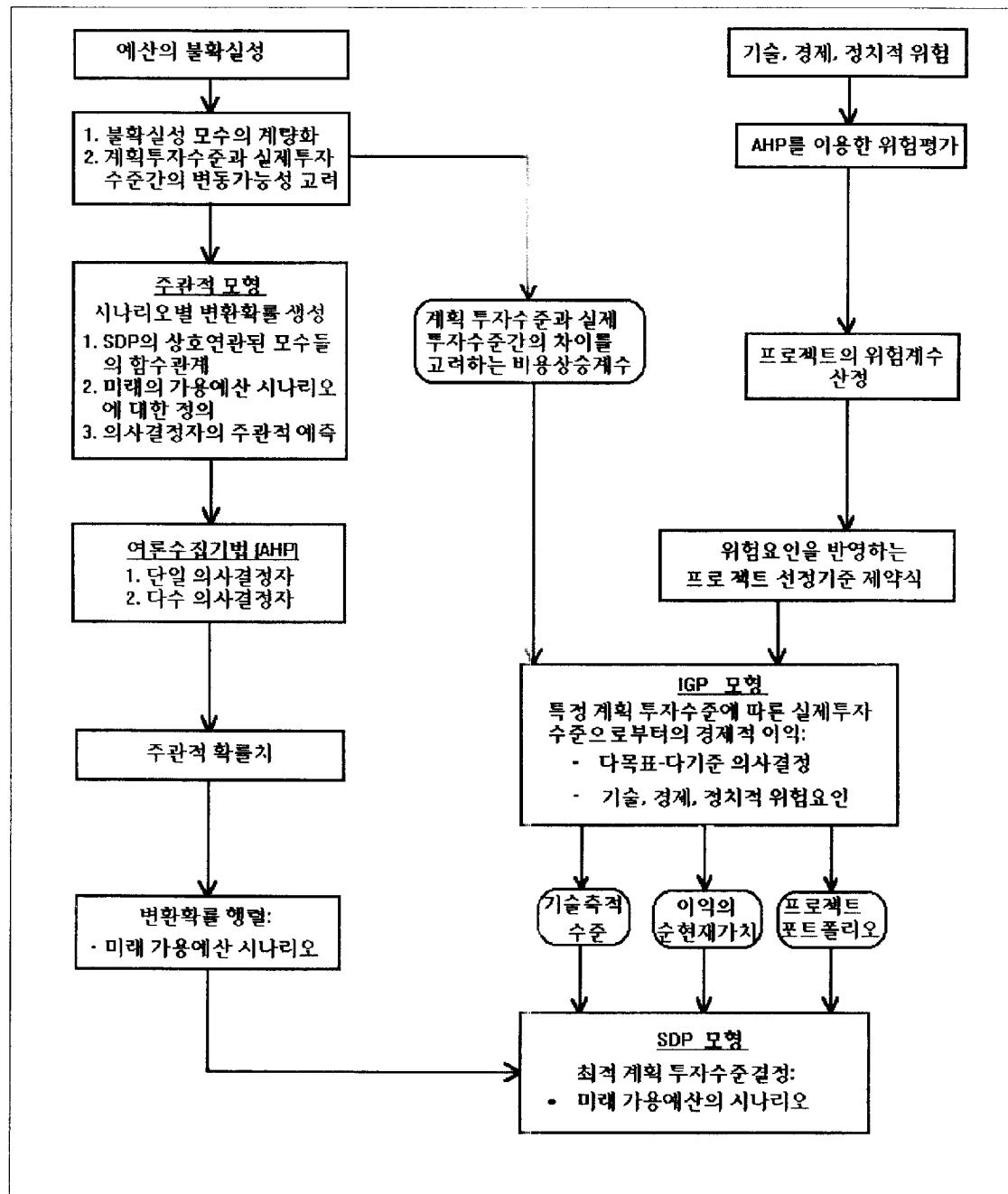
B_t^n : 단계 t 의 n 번째 年度의 예산배분액.

BT_t : 단계 t 에서의 계획 예산배분액.

확률동적계획모형과 정수목표계획모형의 결합과정에서 정수목표계획모형의 결과는 확률동적계획모형의 입력자료가 된다. 구체적으로, 정수목표계획모형의 결과는 정수목표계획모형과 확률동적계획모형을 연결시켜 주는 다음과 같은 연결변수를 제공한다. 첫째, 각 단계의 최적 프로젝트 포트폴리오 설정으로부터 산출되는 이익의 순현재가치 V ; 둘째, 각 단계의 최적 프로젝트 포트폴리오에 의해 결정되는 기술축적수준이다. 그리고 이러한 결과를 입력자료로 이용하는 확률동적계획모형을 통해 각 단계에서의 상태조합 LF_{t-1}^l 과 미래 가용예산 시나리오에 따른 최적 계획투자수준 D_t^i 를 결정한다.

확률동적계획모형(SDP)과 정수목표계획모형(IGP) 그리고 계층화 분석과정(AHP)의 결합과정은 [그림 3]과 같이 요약될 수 있다.

2) 여기서 비용상승계수를 도입한 이유는 다음과 같다. 계획하고 있는 투자수준과 실제로 진행되는 투자수준이 차이가 날 때 단계 t 에서 수행될 각 프로젝트 소요비용의 투정비율(본 연구에서는 물가상승율)로 프로젝트의 비용을 상승시킴으로써 단계 t 의 매년 예산범위내에서 그에 따른 프로젝트들의 수행시기와 조직의 여러 목표달성을 위한 민감도를 분석하는데 이용하기 위해서이다.



[그림 3] SDP-IGP-AHP 결합모형의 논리구조도

3. 모형의 적용

본 연구모형의 적용을 위해 다음과 같은 상황을 고려해 보자. K社는 향후 25년에 걸친 계획기간동안 R&D 투자계획을 수립하고자 한다. 이러한 장기의 계획기간은 적절한 계획정책의 수립을 위해 다섯개의 단계로 나뉘어진다. 총 160개의 R&D 프로젝트가 고려되고 있으며 각 단계는 33, 32, 30, 32 그리고 33개의 프로젝트들로 구성되어 있다. 환경적 위험요소를 반영하는 프로젝트 선정기준을 마련하기 위해 AHP 모형이 구축되고 각 프로젝트의 위험반영계수가 산정된다. 경제적 분석을 위해 할인율과 물가상승율은 각각 매년 12%와 6%로 가정한다.

본 모형은 다음과 같이 두 차례의 최적화 단계를 거쳐 실행된다. 먼저 다수의 정수목표계획모형들 (예를 들어, 단계 t 에서 5개의 계획투자수준 $D_t^k (k=1, \dots, 5)$ 과 5개의 실제 투자수준 $F_t^l (l=1, \dots, 5)$ 의 조합을 고려할 경우 25개의 정수목표계획모형)은 LINDO를 이용하여 해를 도출하였다. 정수목표계획모형으로부터 산출된 결과는 각 단계에서의 이익의 순현재가치

와 기술축적수준, 프로젝트의 스케줄링 그리고 각 연도의 예산배분액이다. 이익의 순현재가치를 나타내는 V_t 와 기술축적수준 L_t^k 은 정수목표계획모형을 확률동적계획모형과 연결시키는 변수들로서 확률동적계획모형을 C 언어로 프로그램화 하여 각 단계의 시작시점에서 이익의 기대순현재가치를 극대화 시키는 최적 계획 투자수준을 결정하는데 이용되었다. 확률동적계획모형의 결과는 다목표 프로젝트 포트폴리오를 가장 만족시키는 최적 계획 투자수준 D_t^* 이다.

본 예에서 고려하고 있는 단계의 수는 다섯개이고 단계 1, 2, 3에서의 기술축적수준은 13 가지, 단계 4, 5에서는 16가지를 고려하였으며, 계획 투자수준과 실제 투자수준은 모든 단계에서 5가지이다.

3. 1 정수목표계획모형의 결과분석

정수목표계획모형을 실행하기에 앞서 본 연구에서는 목표계획모형의 단점으로 지적되고 있는 목표수준의 초과치 또는 미달치에 대한 선형적인 가중치선정 문제를 고려하였다. 이러한 단점은 AHP를 이용한 단일 또는 다수의 사결정자의 반복적인 의견수렴과정을 거쳐 의

〈표 1〉 AHP를 이용한 최종 가중치와 이원비교행렬³⁾

목표와 기준 목표와 기준	1	2	3	4	가중치
1. 기술축적 수준	1	1/2	5	1	0.263
2. 이익의 순현재가치	2	1	5	2	0.438
3. 시장점유율	1/5	1/5	1	1/3	0.071
4. 위험반영기준	1	1/2	3	1	0.228
CR = 0.018					

3) 본 연구에서는 경영학과 대학원생들을 대상으로 목표들간의 이원비교를 수행하였다.

〈표 2〉 SDP 단계 1의 입력자료로 이용될 IGP 수행결과

프로젝트	이익의 순현가 (\$10^4)*	프로젝트가 시작되는 년도				
		D _i ^{**}	D _i ²	D _i ³	D _i ⁴	D _i ⁵
1	122.2	1***	1	1	1	1
2	101.5	2	0	1	1	2
3	121.8	1	1	1	1	1
4	100.6	4	4	4	0	1
5	92.5	0	0	1	1	1
6	149.9	1	1	1	0	0
7	122.3	1	1	1	1	1
8	117.7	1	1	1	1	1
9	102.4	4	4	4	4	4
10	125.5	1	1	0	1	1
11	100.7	4	3	4	4	3
12	120.6	1	1	1	5	1
13	104.7	0	0	0	0	4
14	117.8	3	0	3	0	0
15	132.7	1	0	0	1	0
16	122.4	1	1	1	1	0
17	110.2	0	0	1	0	0
매년 예산 배분액						
첫째 년도(B ₁)	147.33	131.39	109.26	92.56	74.31	
둘째 년도(B ₂)	283.11	250.73	210.41	178.61	141.78	
세째 년도(B ₃)	186.23	159.77	140.01	115.09	90.73	
네째 년도(B ₄)	180.25	154.66	136.14	110.54	89.41	
다섯째 년도(B ₅)	126.07	110.34	94.39	80.61	65.71	
총예산(\$10^4)	922.99	807.34	690.22	577.41	461.94	
목표 달성을 수준						
기술축적수준(km ³)	392841	444120	337822	376356	326256	
이익의 순현가(\$10^4)	1957.4	1784.9	1562.6	1497	1314.4	
선정된 프로젝트수	14	11	14	12	12	
사용된 총예산(\$10^4)	922.99	807.34	690.22	577.41	461.94	

*) 순현재가치로 표시되는 경제적 이익을 의미함.

**) 계획 투자수준을 높은 수준부터 단계적으로 표시하였음($D_i^1 > D_i^2 > \dots > D_i^5$).

***) 단계 1의 5년기간중 프로젝트의 시행년도여기서 '0'은 해당 프로젝트가 선정되지 않았음을 의미함.

사결정자의 선호를 반영하는 최종 비지배(non-dominated)해를 구함으로써 해결할 수 있다 [13]. 따라서 정수목표계획모형의 최종 결과는 AHP를 이용한 가중치 배정을 통해 도출되었다. AHP를 이용하여 목표들의 미달치(본 연구에서는 목표들의 미달치만이 바람직하지 않은 편차로서 고려되었음)에 대한 최종 가중치를 산출한 결과와 이를 이용하여 정수목표계획모형의 해를 구한 결과가 <표 1>과 <표 2>에 각각 나타나 있다.

<표 2>는 목표와 기준에 대한 선호도(AHP를 이용한 가중치)를 이용하여 단계 1에서 정수목표계획모형의 결과를 나타낸 것이다. <표 2>의 구체적인 내용을 살펴보면, 계획 투자수준별로 17개의 프로젝트들만이 고려되었고, 나머지 프로젝트들은 모든 계획 투자수준하에서 한번도 선정되지 않아 제외시켰다. 다음으로 단계 1에서의 각 계획 투자수준에 따른 프로젝트의 선정여부를 단계내 5년기간중 프로젝트 시행년도로 표시하였다. 예를 들어 1은 단계내 첫번째 년도에 특정 프로젝트가 선정되었음을 나타내는 것이고, 2는 두번째 년도에 특정 프로젝트가 선정되었음을 나타내며, 0은 선정되지 않았음을 나타낸다. 또한 선정된 프로젝트 포트폴리오를 수행하기 위한 매년의 예산배분액이 계획 투자수준별로 제시되어 있으며, 그 투자결과에 따른 목표달성수준을 제시하였다. 여기서, 시장점유율은 확률동적계획모형의 입력자료로 이용되지 않아 제외시켰다.

단계 1에서 각 계획 투자수준 $D^k(k=1, \dots, 5)$ 에 대해 선정된 프로젝트 포트폴리오와 목표달성도를 조사한 결과 다음과 같은 특징이 발

견된다. 낮은 수준의 계획투자(D^1, D^5)가 고려될 경우 가용예산수준을 초과하지 않기 위해 정수목표계획모형은 선정된 프로젝트수와는 별립적으로 낮은 비용을 가진 프로젝트를 선정하는 경향이 있다. 즉, <표 2>의 목표달성도에서 보는 바와 같이 낮은 계획 투자수준(D^1, D^5)하면서 사용된 총예산수준은 모든 계획 투자수준에서 선정된 프로젝트수와는 관계없이 낮은 수준임을 알 수 있다.

3. 2 최적 투자계획수립

모든 단계 t 에서 <표 2>와 같은 정수목표계획모형의 결과를 도출하고 이를 확률동적계획모형의 입력자료로 이용한다. 미래 가용예산 시나리오하에서⁴⁾ 확률동적계획법을 통하여 최적 계획 투자수준의 상대도수(%)를 구한 결과가 <표 3>에 단계별로 정리되어 있다.

<표 3>의 상대도수가 갖는 중요한 의미는 확률동적계획모형을 통해 도출된 최적 계획 투자수준이 실제 투자수준에 어느 정도 근접하는지를 검증할 수 있는 수단이 된다는 것이다. 즉, 현재 계획하고 있는 투자수준의 실제 집행 결과와 확률동적계획모형에서 도출된 투자수준을 가용예산 시나리오별로 그 상대도수를 비교함으로써 확률동적계획법을 이용한 접근방법이 어떤 시나리오하에서 어느 정도의 현실적인 접근방법인지를 비교할 수 있다는 것이다.

<표 4>는 세가지 가용예산 시나리오중 제약예산 시나리오에서 현단계의 기술축적수준과 전단계의 실제 투자수준간의 상태조합에 따른 최적 계획 투자수준을 분포형태로 나타낸 것이

4) 본 연구모형에서는 미래 가용예산 시나리오로 제약예산, 제약예산 그리고 미정예산 시나리오 세가지를 고려하였다.

다. 비제약예산 시나리오 및 미정예산 시나리오하에서도 〈표 4〉와 같은 최적 계획 투자수준의 분포형태를 각각 구할 수 있으며, 이를 통해 〈표 3〉의 단계별 최적 계획 투자수준의 상대도수를 결정하게 된다. 〈표 4〉에서 제시된 계획 투자수준과 실제 투자수준 그리고 기술축적수준을 나타내는 지수는 모두 감소하는 순서

로 되어 있다. 즉, 1은 가장 높은 수준을 나타내고 5는 다섯번째로 낮은 수준을 나타낸다.

제약예산 시나리오하에서 단계 t에서의 기술축적수준과 단계 (t-1)에서의 실제 투자수준의 상태조합에 따른 최적 계획 투자수준 D_t^i 의 분포형태를 보여주고 있는 〈표 4〉로부터 다음과 같은 특징들을 발견할 수 있다.

〈표 3〉 미래 가용예산 시나리오하에서의 단계별 최적 계획 투자수준

	최적 계획 투자수준				
	D_t^1	D_t^2	D_t^3	D_t^4	D_t^5
단계 t = 1					
상대도수(%)**					
제약예산 시나리오	100*	0	0	0	0
비제약예산 시나리오	100*	0	0	0	0
미정예산 시나리오	100*	0	0	0	0
단계 t = 2					
상대도수(%)					
제약예산 시나리오	0	9.23	10.77	61.54	18.46
비제약예산 시나리오	42.3	28.4	15.4	6.2	7.7
미정예산 시나리오	0	3.8	78.5	10.8	6.9
단계 t = 3					
상대도수(%)					
제약예산 시나리오	0	1.54	38.46	46.15	13.85
비제약예산 시나리오	67.7	32.3	0	0	0
미정예산 시나리오	0	6.9	82.3	6.9	3.9
단계 t = 4					
상대도수(%)					
제약예산 시나리오	0	0	31.25	68.75	0
비제약예산 시나리오	23.2	76.8	0	0	0
미정예산 시나리오	0	0	34.2	62.6	3.2
단계 t = 5					
상대도수(%)					
제약예산 시나리오	0	12.5	22.5	65	0
비제약예산 시나리오	87.1	12.9	0	0	0
미정예산 시나리오	0	0	96.8	0	3.2

*) 단계 1에서 최적 계획 투자수준은 모두 D_t^1 으로 결정됨을 나타냄.

**) 〈표 4〉를 토대로 하여 특정 단계에서 상태조합을 고려한 최적 계획 투자수준의 상대도수(%)를 도출하였음.

〈표 4〉 제약예산 시나리오하에서 단계 t의 기술축적수준과 단계 (t-1)에서의
실제 투자수준의 상태조합에 따른 최적 투자수준

단계 t = 1							
전단계에서의 투자수준은 없음 : 기술축적수준은 하나라고 가정							
최적 투자수준 D_i^* 는 수준 D_i^t							
기술축적 수준 i	단계 t = 2					단계 t = 3	
	전단계 투자수준						
	1	2	3	4	5		
1	5**	5	5	5	5	1	
2	5	5	5	5	5	2	
3	4	4	4	4	4	3	
4	4	4	4	4	4	4	
5	4	4	4	4	4	5	
6	4	4	4	4	4	6	
7	4	4	4	4	3	7	
8	4	4	4	5	4	8	
9	4	5	4	4	4	9	
10	4	4	4	4	4	10	
11	3	2	3	3	3	11	
12	3	4	4	4	3	12	
13	2	2	2	2	2	13	
기술축적 수준 i	단계 t = 4					단계 t = 5	
	전단계 투자수준						
	1	2	3	4	5		
1	4	4	4	4	4	1	
2	4	4	4	4	4	2	
3	4	4	4	4	4	3	
4	4	4	4	4	4	4	
5	4	4	4	4	4	5	
6	4	4	4	4	4	6	
7	4	4	4	4	3	7	
8	4	4	4	3	4	8	
9	4	4	4	4	4	9	
10	4	4	4	4	4	10	
11	3	4	4	3	3	11	
12	4	4	4	3	3	12	
13	4	4	3	3	3	13	
14	3	3	3	3	3	14	
15	3	3	3	3	3	15	
16	3	3	3	3	3	16	

*) 단계 1에서 최적 계획 투자수준은 가장 높은 수준(D_i^t)만 도출됨.

**) 단계 2에서 시스템의 상태가 기술축적수준 1과 전단계 투자수준 1의 상태 조합에 있을 때 최적 계획 투자수준은 다섯번쩨 투자수준(D_5^t)임을 나타냄.

첫째, 단계 t 에서 최적 계획 투자수준의 상당 부분이 (46.15%~68.75% : 이 수치는 상대 도수를 나타냄) 네번째로 낮은 계획 투자수준 $D_i^4(t=1, \dots, 5)$ 으로 선택되고 있다. 둘째, 기술 축적수준은 최적 계획 투자수준의 분포에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 단계 2, 3에 있어 높은 기술축적수준 ($i=1, \dots, 5$)과 전단계의 실제 투자수준 ($i=1, \dots, 5$)간의 상태조합으로부터 선정된 최적 계획 투자수준은 74%의 빈도로 네번째 수준(D_i^4)이 된다는 것이다. 그리고 다섯번째로 낮은 계획 투자수준 D_i^5 는 26%의 빈도를 나타내고 있다. 또한 기술축적수준이 중간수준일 경우 ($i=6, \dots, 10$) 전단계의 실제 투자수준 ($i=1, \dots, 5$)과의 상태조합에 따른 최적 계획 투자수준은 D_i^3 가 24%, D_i^4 가 60% 그리고 D_i^5 는 16%를 차지하고 있어 높은 계획 투자수준의 빈도가 증가함을 알 수 있다. 그리고 낮은 기술축적수준 ($i=11, \dots, 13$)과 전단계의 실제 투자수준 ($i=1, \dots, 5$)의 상태조합에서는 D_i^3 가 23%, D_i^4 가 67% 그리고 D_i^5 는 10%를 차지하여 최적 계획 투자수준으로 높은 계획 투자수준의 빈도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 단계 4와 단계 5의 경우에도 유사한 분포를 하고 있다. 즉, 기술축적수준의 상태가 높은 수준에서 낮은 수준으로 이동함에 따라 최적 계획 투자수준은 높은 수준으로 이동함을 알 수 있다. 이러한 수치결과는 다음과 같은 의미를 갖는다.

첫째, 특정 단계에서 가용예산 시나리오에 따른 의사결정자들의 실제 투자수준 예측은 최적 계획 투자수준의 결정에 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다. 예산의 불확실성을 효과적으로 동적계획모형에서 고려하기 위해 제안된 가용예산 시나리오는 의사결정자로 하여금 실제 투자수준을 예측하는데 있어 가능집합을 제

공해 주고 의사결정자는 이러한 가용예산 시나리오하에서 실제 투자수준에 대한 주관적 예측을 하게 된다. 예를 들어, 제약예산 시나리오하에서 실제 집행될 투자수준이 낮을 것으로 예측되면 즉, 낮은 실제 투자수준에 높은 확률치가 배정되면 단계 t 에서 최적 계획 투자수준의 대부분은 낮은 계획 투자수준이 된다고 할 수 있다. 둘째, 추가적인 상태변수로 고려된 전단계의 실제 투자수준은 최적 계획 투자수준에 중요한 영향을 미치지 못한다고 할 수 있는데, <표 4>에서 보는 바와 같이 모든 단계에서 전단계의 실제 투자수준이 여러 수준으로 ($i=1, \dots, 5$) 변화하더라도 최적 계획 투자수준은 비교적 일정한 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 예산의 불확실성과 환경적 위험요소를 고려한 R&D 프로젝트 포트폴리오의 선정과 스케줄링 그리고 최적 투자수준을 결정하기 위해 확률동적계획모형(SDP)과 정수목표 계획모형(IGP) 그리고 계층화 분석과정(AHP)을 결합한 통합모형의 수행과정을 설명하고 수치예를 통하여 통합모형의 적용가능성을 살펴보았다.

정수목표계획모형은 R&D 투자계획에 있어서 예산배분과 프로젝트 선정 그리고 스케줄링에 대한 다목표 의사결정문제를 용이하게 다룰 수 있는 모형으로 특히 R&D 투자의 위험요소를 계량화하기 위해 도입한 AHP는 효용함수를 이용하는 기존의 다속성 효용이론(MAUT)과는 달리 의사결정자의 참여를 유도할 수 있

는 단순한 체계를 갖추고 있어 정수목표계획모형의 현실적 적용가능성을 제고시키는데 유용한 기법임을 보였다. 정수목표계획모형을 통해 각 단계에서 매년의 최적 예산배분과 목표달성 수준 그리고 프로젝트들의 스케줄링을 결정하였다.

화률동적계획모형에 있어서는 예산의 불확실성이 반영되었다. 이것은 가용예산 시나리오에 근거한 변환화률을 고려함으로써 가능할 수 있었는데, 미래 가용예산에 대한 시나리오는 제약예산, 비제약예산 그리고 미정예산 시나리오로 구분하였다. 제약예산 시나리오란 투자자금이 제한된 경우나 높은 투자수준을 획득할 기회가 적은 상황을 지칭한다. 이 경우에 선택된 최적 계획 투자수준은 주로 낮은 수준에서 결정되었고, 비제약예산 시나리오하에서 선택되는 최적 계획 투자수준은 주로 높은 투자수준과 관련되어 있었다. 그리고 미정예산 시나리오하에서 선택된 최적 계획 투자수준은 주로 중간 수준에서 결정되었다.

본 연구에 있어 AHP의 적용은 다음과 같은 점에서 중요한 의미를 지닌다. 첫째, 미래의 가용예산 시나리오에 근거한 변환화률을 도출하는데 이용된 AHP는 다수의 의사결정자가 존재하는 상황에서 예산의 불확실성에 대한 상충되는 의견들을 수렴시켜 주는 역할을 수행한다. 이것은 집단내의 의견수렴이 요구되는 프로젝트의 선정 및 투자상황에서 매우 중요한 의미를 지닌다. 둘째, 정수목표계획모형에서 이용된 AHP는 R&D 프로젝트와 관련된 위험요소를 보다 용이하게 계량화함으로써 고려하고자 하는 다수의 목표와 더불어 프로젝트 선정 기준을 마련했다는 데에 의미가 있다. 또한 목표와 기준들간의 상충관계를 고려하여 상대적 선호도 (또는 가중치)를 도출하는데 AHP를

이용함으로써 목표계획모형의 단점, 즉 목표우선순위의 사전설정에 대한 문제점을 극복할 수 있는 하나의 방법론을 제시하였다.

또한 통합모형에서 도출된 최적 계획 투자수준은 다음과 같은 시사점을 준다. 첫째, 통합모형에 의해 결정된 최적 계획 투자수준은 예산의 변동가능성이 존재할 때 발생하는 R&D 프로젝트의 재스케줄링, 최소 그리고 부분적 수행 등의 문제를 해결할 수 있게 해준다. 즉, 통합모형을 이용하여 의사결정자는 미래의 가용예산상황을 나타내는 여러가지 시나리오들을 고려하고 각 시나리오에 따른 투자수준의 예측을 축적된 경험과 지식을 통해 확률치료로 도출하여 이를 최적 계획 투자수준을 결정하는데 이용함으로써 예산의 불확실성을 효과적으로 고려한 의사결정을 할 수 있게 된다는 것이다. 둘째, 통합모형은 최적 계획 투자수준을 상대도수의 형태로 도출함으로써 현재 계획하고 있는 투자수준의 실제 집행결과와 비교할 수 있게 해준다. 이는 도출된 최적 계획 투자수준이 어떤 가용예산 시나리오하에서 현실에 가장 근접하는지를 분석할 수 있는 수단을 제시해 줌을 의미한다.

본 연구는 R&D 투자활동과 관련된 불확실성과 다목표·다기준을 고려하는 문제를 해결하기 위해 최적화 기법(SDP, IGP)과 계층화 분석과정(AHP)을 결합한 모형을 제시하는데 초점을 맞추었다. 우선 예산의 불확실성을 다루기 위해 미래의 가용예산 시나리오하에서 실제 투자수준에 대한 예측을 AHP를 이용한 변환화률의 형태로 도출하여 화률동적계획모형에 이용하였고, 정수목표계획모형에서는 고려하고 있는 다수의 목표외에 환경적 위험요소를 AHP를 통해 계량화하여 프로젝트 선정기준 제약식으로 이용하였다. 이의 대안적 방법으로

정수목표계획모형에 기회제약식(chance constraints)을 도입하여 예산제약식과 목표제약식을 기회제약식의 형태로 변형함으로써 예산의 불확실성이나 환경적 위험요소로 인한 투자결과의 불확실성을 효과적으로 다룰 수 있으므로 이에 대한 후속적인 연구가 필요하다 하겠다.

참고문헌

- [1] Baker, N. R., "R&D Project Selection Models: An Assessment," *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 21, No. 4 (1974), pp. 165-171.
- [2] Cook, W. D. and L. M. Seiford, "R&D Project Selection in a Multidimensional Environment: A Practical Approach," *Journal of Operations Research Society*, Vol. 33, No. 5 (1982), pp. 397-405.
- [3] Dempster, M. A. H., *Stochastic Programming*, London: Academic Press, 1980.
- [4] Drucker, P., *Management, Tasks, Responsibilities, Practice.*, New York: Harper & Row, 1973.
- [5] Dyer, J. S. and H. W. Lorber, "The Multiattribute Evaluation of Program Planning Contractors," *OMEGA*, Vol. 10, No. 6 (1982), pp. 673-678.
- [6] Expert Choice, Inc., *EXPERT CHOICE*, Pittsburgh, 1990.
- [7] Gear, A. E., A. G. Lockett and A. W. Pearson, "Analysis of Some Portfolio Selection Models for R&D," *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 18, No. 2 (1971), pp. 66-77.
- [8] Golabi, K., C. Kirkwood and A. Sicherman, "Selecting a Portfolio of Solar Energy Projects Using Multiattribute Preference Theory," *Management Science*, Vol. 27, No. 2 (1981), pp. 174-189.
- [9] Gupta, S. K., J. Kyaparis and Chi-Ming Ip, "Project Selection and Sequencing to Maximize Net Present Value of the Total Return," *Management Science*, Vol. 38, No. 5 (1992), pp. 751-752.
- [10] Hannan, E. L., "An Assessment of Some Criticisms of Goal Programming," *Computers & Operations Research*, Vol. 18, No. 4 (1985), pp. 525-541.
- [11] Keefer, D. L., "Allocation Planning for R&D with Uncertainty and Multiple Objectives," *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 25, No. 1 (1978), pp. 8-14.
- [12] _____ and C. W. Kirkwood, "A Multiobjective Decision Analysis: Budget Planning for Product Engineering," *Journal of Operations Research Society*, Vol. 29, No. 5 (1978), pp. 435-442.
- [13] Khorramshahgol, R., H. Azani and Y. Gousty, "An Integrated Approach to Project Evaluation and Selection," *IEEE Transactions on Engineering*

- Management*, Vol. 35, No. 4 (1988), pp. 265-270.
- [14] Kunch, P. and J. Teghem, Jr., "Nuclear Fuel Cycle Optimization Using Multiobjective Stochastic Linear Programming," *European Journal of Operational Research*, Vol. 31 (1987), pp. 240-249.
- [15] Lee, J. J., S. J. Lee, and Z. T. Bae, "R&D Project Selection: Behavior and Practice in a Newly Industrializing Country," *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 33, No. 3 (1986), pp. 141-147.
- [16] Liberatore, M. J., "An Extension of the Analytic Hierarchy Process for Industrial R&D Project Selection and Resource Allocation," *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 34, No. 1 (1987), pp. 12-18.
- [17] Madey, G. R. and B. V. Dean, "Strategic Planning for Investment in R&D Using Decision Analysis and Mathematical Programming," *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 32, No. 2 (1985), pp. 84-90.
- [18] Qurin, G. D., *The Capital Expenditure Decision*, Homewood, 1967.
- [19] Saaty, T. L., *The Analytic Hierarchy Process*, 2nd edit., RWS Publication, 1990.
- [20] Teghem, J. Jr., D. Dufrane, M. Thauvoye, and P. Kunch, "Strange-An interactive method for multiobjective linear programming under uncertainty," *European Journal of Operational Research*, Vol. 26, No. 1 (1986), pp. 65-82.
- [21] Weingarwntner, H. M., *Mathematical Programming and the Analysis of Capital Budgeting*, Chicago, 1967.
- [22] Winkofsky, E. P., R. M. Mason and W. E. Souder, "R&D Budgeting and Project Selection: A Review of Practices and Models," *Management of Research and Innovation*, B. V. Dean and J. L. Goldhar, Eds. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1980.
- [23] Zeleny, M., "The Pros and Cons of Goal Programming," *Computers and Operations Research*, Vol. 8 (1981), pp. 357-359.