

## 연료전지 기술개발 추진전략간의 비교분석 방법론

최성수 · 정근모\*

한국가스공사 연구개발원

\*아주대학교 에너지학과

### A Study on Prioritizing and Evaluating R & D Alternatives for Fuel Cell Technology

Sung Soo Choi and Kum Mo Chung\*

R & D, Training Center, Korea Gas Corporation

\*Department of Energy, Ajou University

#### 요 약

연료전지의 R & D 평가에 있어 현재의 불확실한 상황에서 미래의 의사결정에 유용한 결과를 제공할 수 있는 방법론을 고찰해 보았다. 시뮬레이션을 이용한 사례연구는 기초 입력자료가 동일하다는 가정하에 일정상의 선후관계만을 고려한 경우(Case 1), 동등 및 배제 하위프로젝트를 고려한 경우(Case 2) 및 각 단계의 병렬수행을 허용한 경우(Case 3)에 대하여 수행하였으며, 이를 통하여 병행된 연구의 단계별 성공확률은 서로 상관관계를 갖고 있으며 각 프로젝트의 성공확률은 Case 1, Case 2, Case 3 순으로 향상되었고 상업화 성공시기는 Case 3 에서 현저하게 단축됨을 확인할 수 있었다.

**Abstract**—This study was directed to an inquiry into a methodology for prioritizing and evaluating R & D alternatives for fuel cell technology, that can provide information for use in future decisions under the current uncertainty. A case study was performed for three cases of fuel cell development under the assumption that basic input data are same. The three cases are the case considering sequential R & D schedule only(Case 1), the case considering equivalent and excluding subprojects(Case 2), and the case allowing parallel efforts for each phase(Case 3). The following results were obtained; the probabilities of success for R & D phases in parallel projects are correlated, the probability of success for each project increases through Case 1, Case 2 and Case 3 successively and the expected dates of commercialization were notably shortened in Case 3.

#### 1. 서 론

R & D란 현실의 불확실한 기술적·경제적 상황 속에서 미래의 의사 결정에 이용할 정보를 제공하기 위한 기술개발 및 연구활동으로서 그 특성상 대규모 기술의 상업화 성공까지는 장시간의 연구기간을 요하며 R & D활동의 일정, 비용 및 획득 가능한 기술적 결과에 대해 불확실성을 근본적으로 내재하고 있다. 연료전지기술의 경우 R & D 프로그램을 수행하기 위해 인산형, 용융탄산염형, 고체전해질형 등 서로 상이한 연구대안을 설정한다 하더라도 실제연구에 있어서 많은 부분의 문제

해결영역은 서로 유사하거나 때로는 완전히 동일할 경우가 많다. 이러한 대안간의 기술적 상관관계는 프로그램의 평가를 좀더 복잡하게 만드는 요소로 작용할 것이며 병렬의 R & D활동 진행시에는 하나의 연구대안에서의 성공 및 실패는 다른 대안에서의 성공 및 실패와 연관되어 차후의 R & D활동에 영향을 미치게 될 것이다.

이러한 특성들로 인하여 기존의 PERT와 같은 프로젝트 평가기법으로는 R & D를 평가하는데 한계성을 갖게 되며 특히 새로운 R & D단계의 개시/종료 등과 같은 의사결정을 내재화시키는 것은 불가능하다 할 수

있다. 따라서, 연료전지기술의 R & D 특성을 종합적으로 고려할 수 있는 평가방법론을 본테칼로 시뮬레이션을 이용하여 모형화하고자 한다[9].

### 2. R & D 평가 시뮬레이션 모델의 개요

R & D 평가 시뮬레이션 모델이란 R & D 프로그램을 평가하는 시뮬레이션 기법으로서 R & D 활동 자체에 본질적으로 내재된 일정, 비용 및 획득가능한 기술적 결과에 대한 불확실성을 고려하여 미래의 의사결정에 이용될 수 있는 정보를 제공하는데 목적을 두고 있다 [3]. 이는 미래의 절대적인 예측이나 추정을 목표로 하는 것이 아니라 프로그램 내외의 다양한 출처로부터의 지식을 결합하여 의사결정자에게 유용한 정보를 제공할 수 있는 수리 및 통계적 구조임을 의미한다. 따라서, 모델이 제공하는 정보는 프로그램과 관련된 변수(parameter)에 대한 확률적 데이터로서 시간에 대한 R & D 프로그램의 상업화 성공확률, 상업화 가능시기의 확률 분포 및 관련출력에 대한 확률분포 등이 될 것이다.

R & D 프로그램의 구성은 Fig. 1과 같으며, 그 기본 개념은 각 '연구대안'이 상업화 수준까지 도달하기 위해 중요한 기술개발을 필요로 하는 '문제해결영역'을 구성하여 각 대안에 대한 'R & D 단계'를 정의함으로써 3차원 상에서 각각의 상관관계를 고려하여 최적의 성공확률을 보장하는 수준을 제시하는 것이다. 따라서, R & D 프로그램은 각 연구대안들의 문제해결영역에서 일련의 R & D 단계로 수행되는 하위프로젝트 및 이를 연구대안별로 통합한 프로젝트로 구성된다. R & D 프로그램의 구성논리는 하위프로젝트, 수행단계와 같은 R & D 활동의 개시/지속/종료/완료 등의 결정기준을 구성하며, 전략은 결정기준에 의해 의사결정에 참고되어지는 R & D 예산, 일정 및 R & D 활동의 병렬수행 여부 등의 구조를 형성하는 것이다.

### 3. R & D 평가 시뮬레이션 모델의 수행방법

R & D 과정은 하위프로젝트 수준에서 설계되어진다. 우선 모든 연구대안에 대하여 각 문제해결영역의 각 R & D 단계에서 기술개발의 성공수준을 정의하는 모든 변수에 대한 최소기술요구수준(minimum technology requirements)이 설계되어야 하며 이를 기초로 각 하위프로젝트에 대한 성공확률 및 이에 따른 R & D 활동에 필요한 소요예산을 시간에 대한 함수로 평가할 수 있도록 한다. R & D 프로그램에서의 각 하위프로젝트는 완료시기 및 기술적인 성공에 대하여 불확실한 결과를 갖는 활동으로서 이 불확실성은 확률분포를 이용하여

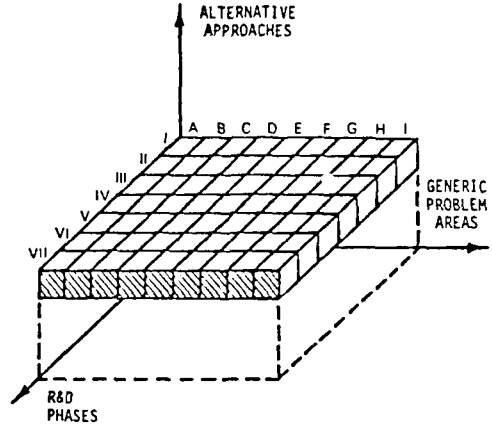


Fig. 1. An R & D Program Model.

처리한다.

#### 3-1. 하위프로젝트의 완료시기 결정

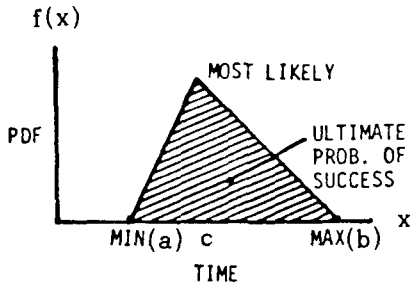
하위프로젝트의 누적성공확률은 개시후 시간의 경과에 따라 증가하여 궁극적 성공확률(upos)에 수렴해 갈 것이다. 그러나 R & D의 경우 몬테칼로 시뮬레이션 수행의 기초가 되는 확률분포의 가정시에 제약을 받게 되는데 이는 R & D 활동 자체가 현실적으로 존재하지 않는 미래의 기술을 대상으로 하므로 확률분포를 추정하기 위한 현존하는 데이터가 전무하다는 사실과 획득가능한 기술적 결과에 대한 불확실성으로 인하여 누적 성공확률은

$$\int_a^b f(x) dx = upos \text{ 로서}$$

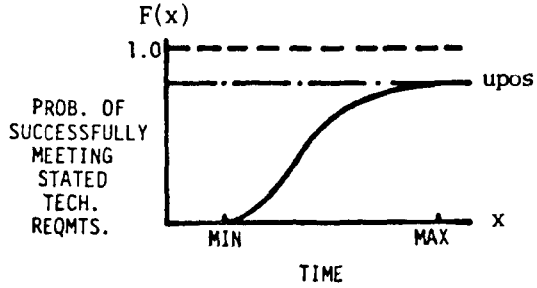
1-upos 만큼의 실패확률을 내재하고 있다는 점이다. 따라서, 하위프로젝트의 완료시기는 수정된 삼각분포를 사용하였으며 이의 확률밀도함수는 Fig. 2에서 궁극적 성공확률이  $upos \leq 1$  이라는 점으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2 \cdot upos(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & a \leq x \leq c & (1) \\ \frac{2 \cdot upos(b-x)}{(b-a)(b-c)}, & c < x \leq b & (2) \\ 0, & o/w \end{cases}$$

하위프로젝트 개시 후 성공까지의 기간을 나타내는 확률변수 X는 누적분포함수 F(x)로부터 역변환을 통하여 생성될 수 있는데 역함수 F<sup>-1</sup>(u) 생성의 간편성을 더하기 위하여 수정된 삼각분포를 갖는 확률변수 X ~ trian(a, b, c)를 변수 변환을 통하여 X' ~ trian(0, 1,



(a) Probability density function



(b) Cumulative distribution function

Fig. 2. Modified triangular distribution.

$c' = (c-a)/(b-a)$ 로부터 생성 후  $X = a + (b-a)X'$ 로 치환할 수 있으며, 이때  $u > u_{pos}$ 인 경우 해당 하위프로젝트를 실패로 간주함으로써 궁극적 실패가능성을 고려할 수 있다. 몬테칼로 시뮬레이션의 절차를 정리하면 다음과 같다[11].

1단계 :  $U \sim U(0, 1)$ 로부터 확률값  $u$  생성,  $0 \leq u \leq 1$ .

2단계 :  $X' \sim \text{triang}(0, 1, c' = (c-a)/(b-a))$ ,  $0 \leq c' \leq 1$ 로부터  $x'$  생성

$$g(x') = \begin{cases} \frac{2 \cdot u_{pos} \cdot x'}{c'} & , 0 \leq x' \leq c' \\ \frac{2 \cdot u_{pos} \cdot (1-x')}{1-c'} & , c' < x' \leq 1 \\ 0 & , o/w \end{cases} \quad (3)$$

$$G(x') = \begin{cases} \frac{u_{pos} \cdot x'^2}{c'} & , 0 \leq x' \leq c' \\ \frac{u_{pos} \cdot (1-x')^2}{1-c'} & , c' < x' \leq 1 \\ u_{pos} & , 1 < x' \end{cases} \quad (4)$$

$u = G(x')$

$$x' = G^{-1}(u) = \begin{cases} \left[ \frac{c' \cdot u}{u_{pos}} \right]^{1/2} & , 0 \leq u \leq c' \\ 1 - \left[ \frac{(1-c')(u_{pos}-u)}{u_{pos}} \right]^{1/2} & , c' < u \leq u_{pos} \\ \infty & , u > u_{pos} \end{cases} \quad (5)$$

3단계 :  $x = a + (b-a)x'$ 로 변수변환

3-2. 기술진보계수(technology advancement factor)

대부분의 R & D는 그 목적상 미래의 기술진보에 대한 기회를 제공할 수 있도록 계획되어지며 이 경우 현재의 최소기술요구수준 이상의 기술적 약진은 이후의 R & D활동에 있어서의 성공 가능시기 단축 및 궁극적 성공확률의 증가를 가능하게 하고 때로는 미래의 계획된 특정 하위프로젝트의 수행자체를 불필요하게 하여 다음 R & D단계의 해당 문제해결영역의 하위프로젝트로 건너뛸 수 있게 하는 도약효과(leapfrogging effect)를 창출할 수도 있다.

기술적 약진을 나타내는 기술진보계수(taf) n은 다음 (n-1)번째 R & D단계의 해당 문제해결영역까지 필요한 최소기술요구수준이 달성되어 다음 R & D단계에서 해당 하위프로젝트의 수행 자체가 불필요한 상태로 생략될 것을 의미한다. 그러나 현단계 기술수준의 한계상 taf의 증가에 따라 기술적 약진의 발생확률은 기하급수적으로 감소할 것이므로 지수분포를 가정하는 것이 적합할 것이며 단지 현단계의 최소기술요구수준만을 만족할 확률은  $\Pr(taf \leq 1)$ 로서 정의하였다. 지수분포의 확률밀도 함수는 다음과 같으며 Fig. 3과 같은 형태를 갖는다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta} \cdot \exp(-x/\beta) & , x \geq 0 \\ 0 & , o/w \end{cases} \quad (6)$$

한편 taf를 의미하는 확률변수 X는 다음의 절차에 따라 생성될 수 있다[11].

1 단계:  $U \sim U(0, 1)$ 로부터 확률값  $u$  생성,  $0 \leq u \leq 1$ .

2 단계:  $X \sim \text{expo}(\beta)$ 로부터  $x$  생성.

$$u = F(x)$$

$$x = F^{-1}(u) = -\beta \cdot \ln(u)$$

누적분포함수로부터 역변환을 통하여 생성된 taf는 실수로 구성될 수도 있는데 대안 i, 단계 j, 하위프로젝트 k의 taf를 m,n, 궁극적 성공확률을  $P_{ijk}(\infty)$ 라 한다면

(j+m-1)번째 단계까지의 해당 하위프로젝트는 수행이 생략되고 (j+m)번째 단계의 해당 하위프로젝트 개시 후의 시간 t에 대한 누적성공확률  $P_{ojk}(t)$ 는 taf를 고려하지 않고 생성된 최초의 추정된 누적성공확률  $P_{ojk}(t)$  보다 식(10)에 의해 개선될 것임을 의미하며, 이 효과는 Fig. 4에서 설명될 수 있다[6].

$$P_{njk}(t) = P_{ojk}(t) + n[1 - P_{ojk}(\infty)] \cdot P_{ojk}(t) \quad (10)$$

R & D 시뮬레이션에서 다루어져야 할 또 다른 R & D의 특성은 각 프로젝트에서 수행되는 하위프로젝트간의 상관관계이다. 이것은 각기 다른 연구대안간에는 공유된 문제해결 영역이 있어 동일한 하위프로젝트를 포함하고 있을 경우가 많으며 이 경우 하나의 대안에서의 해당 하위프로젝트에 대한 성공은 다른 대안에서의 같은 수준의 성공으로 인식될 것이며 이를 동등 하위프로젝트 (equivalent subproject)라 정의한다.

3-3. 연구대안의 지속/종료 의사결정기준

R & D초기단계에 있어서의 최고 관심사는 해당 연구대안이 기술적으로 생존가능하나가의 여부일 것이나 일단 기술적으로 성공가능성이 확보될 이후의 단계에서는 상업화 성공으로 얻을 수 있는 경제적 보상의 기

대치가 될 것이다. 따라서, 두 가지의 평가기준이 필요하게 되고 이들 기준의 적용은 연구대안의 기술적 성공을 가늠하는 특정 R & D수행단계인 JX단계의 성공적 완료시점에 의하여 결정될 것이며 현실적인 관심은 가장 가능성이 큰 연구대안에 우선 순위를 부여하는 것이다.

3-3-1. 기술적 생존 가능성

JX단계 종료 이전시점에서의 평가기준은 프로젝트의 성공가능확률로 나타낼 수 있는데 이를 궁극적 기술생존확률  $upotv$ 라 정의하면 근사적으로 시뮬레이션의 현시점으로부터 JX단계의 종료까지의 모든 하위프로젝트의  $upos$ 의 곱으로 표현될 것이다. 여기서 하위프로젝트의  $upos$ 에 대해 고찰해 보면 현시점에서 시뮬레이션 상으로 완료가 확인된 하위프로젝트의  $upos$ 는 당연히 1로 수정되어 있을 것이며 아직 개시되지 않은 하위프로젝트의 경우에는 Fig. 2 (b)의 점근선 확률에 해당되는 최초추정  $upos$ 가 적용될 것이다. 그러나 개시는 되었지만 아직 종료되지 않은 하위프로젝트에 대해서는 현시점 t에서 아직 성공되지 않았다는 새로운 정보의 획득으로 인하여 현시점 t에서는 하향조정된  $upos$ 인  $P_{\infty}(t)$ 가 적용되어야 한다.

이는 베이즈의 정리(Bayes' formula)에 기초한 것으로서 Fig. 5에서 사상 A를 하위 프로젝트의 궁극적인

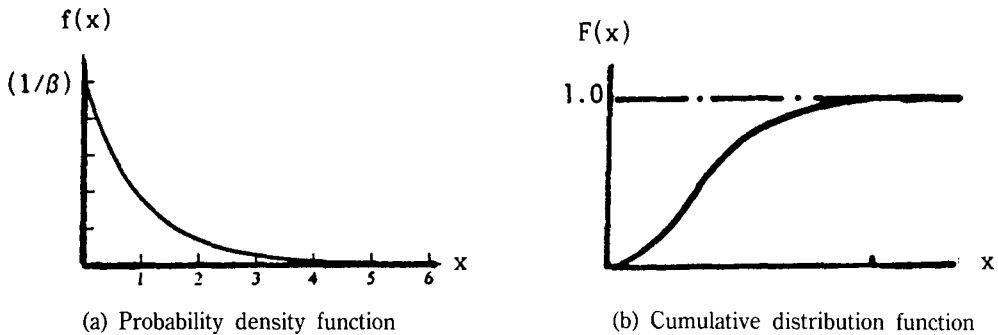


Fig. 3. Exponential distribution

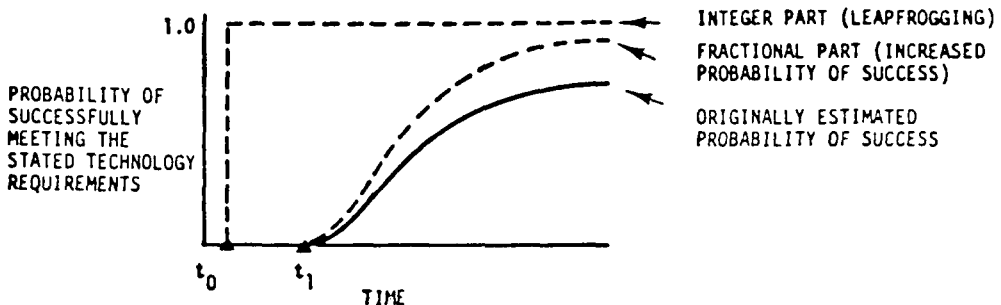


Fig. 4. The effect of leapfrogging on the probability of success of a subsequent subproject

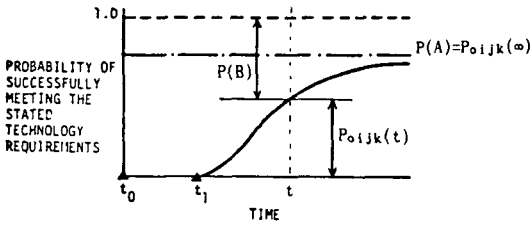


Fig. 5. Probabilities of events

성공, 사상 B를 시점 t에서 하위프로젝트가 아직 성공되지 못한 상태라고 두면 사전확률  $P(A) = P_{oi jk}(\infty)$  및  $P(B) = 1 - P_{oi jk}(t)$ 에 기초한 사후확률  $P(A|B)$ 는 식 (11)과 같이 유도되어진다[10].

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P_{oi jk}(\infty) - P_{oi jk}(t)}{1 - P_{oi jk}(t)} = P_{\infty}(t) \quad (11)$$

궁극적 기술생존확률은 첫째, 각 의사결정시점에서 허용한계치 Y와 비교하여 이보다 작을 경우 해당 연구대안의 종료기준으로 이용되며 둘째, 새로운 단계의 개시가능수가 제한되어 있을 경우 이것이 큰 연구대안의 개시 우선순위 지정기준으로서 이용된다.

3-3-2. 기대가치/비용 비율(expected value/cost ratio)

JX단계 종료시점 이후에는 경제적 관점이 대두되며 경제적 평가기준으로서 기대가치/비용 비율을 사용하는데 이는 R & D활동에 내재된 불확실성으로 인하여 비용 및 편익이 확률과 결부되어 나타나므로 기존의 편익/비용 비율 분석[7] 등 확정적 모형에 적용되는 평가방법으로는 한계가 있기 때문이다. 하나의 프로젝트가 Fig. 6에서와 같이 구성되어 프로젝트 성공시 편익의 현재가치를 B, 단계 i에 대한 비용의 현재가치를 Ci, 궁극적 성공확률을 Pi라 하고 각 결정시점에서 다음 단계로의 진행 혹은 현단계에서 종료의 결정제도(decision tree)로 이루어진다고 가정한다면 기대가치는 후방귀납법(backward induction approach)에 의해 식 (12)와 같이 계산될 수 있으며[6, 10], 이를 단계 n까지 연장하면 식 (13)과 같이 일반화 된다.

$$E\{V\} = P_1 P_2 P_3 (B - C_1 - C_2 - C_3) - P_1 P_2 (1 - P_3) (C_1 + C_2 + C_3) - P_1 (1 - P_2) (C_1 + C_2) - (1 - P_1) C_1 \quad (12)$$

$$E\{V\} = \prod_{i=1}^n P_i (B - \sum_{j=1}^n C_j) - \sum_{i=1}^n \left\{ \prod_{j=1}^i P_j (1 - P_{i+1}) \cdot \sum_{j=1}^{i+1} C_j \right\} \quad (13)$$

일반적으로 편익/비용 분석에 이용되는 비용은 전체 프로그램 비용을 의미하지만 기대가치/비용 분석에서는

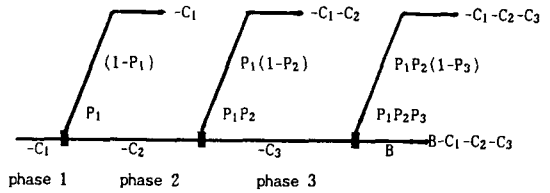


Fig. 6. Project evaluation decision tree

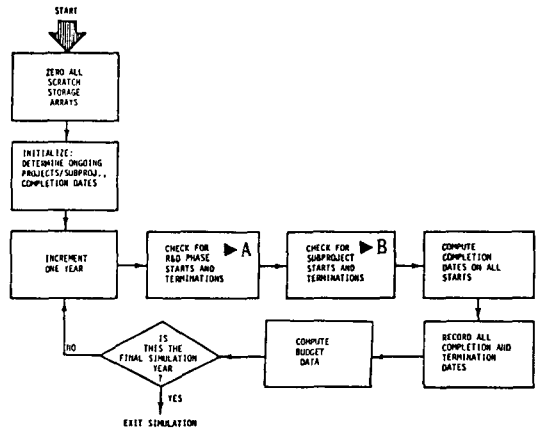


Fig. 7. R & D program simulation logic

이미 미래의 R & D단계가 불확실한 상황에서 실행됨을 확률을 통하여 고려하였으며, 현시점에서의 프로젝트의 지속여부는 오직 다음 단계의 지속여부에 의하여 결정되어지므로 이 경우 비용은 다음 단계의 비용만을 고려한다. 따라서, 경제적 측정기준인 기대가치/비용 비율은 현 의사결정시점이 j-1단계라면  $E\{V\}/C_j$ 로 계산되고 이것은 첫째, 한계치 Z와 비교하여 이보다 작을시 해당 프로젝트를 종료시키는 평가기준으로 이용되며 둘째, 새로운 단계의 개시가능수가 한정되었을때 연구대안의 우선순위 지정에 이용된다.

4. 결정과정의 모형화

4-1. R & D프로그램 시뮬레이션 과정

R & D프로그램 시뮬레이션 과정을 설명하면 Fig. 7과 같은데[4-6], 우선 초기화 과정을 거쳐 R & D단계 및 하위프로젝트의 개시/종료를 검토하여 모든 개시 프로젝트 및 하위프로젝트에 대한 완료시기를 결정하고 최종적으로 R & D프로그램의 성공/실패/지속여부에 관한 점검이 이루어진다. 만약 시뮬레이션이 점검시점에서 종료 혹은 완료가 이루어지지 않았다면 고정시간을 1년 증가시키고 지금까지의 시뮬레이션 수행방법을 반복하게 될 것이다. 따라서 시뮬레이션은 상업화의 성공으로

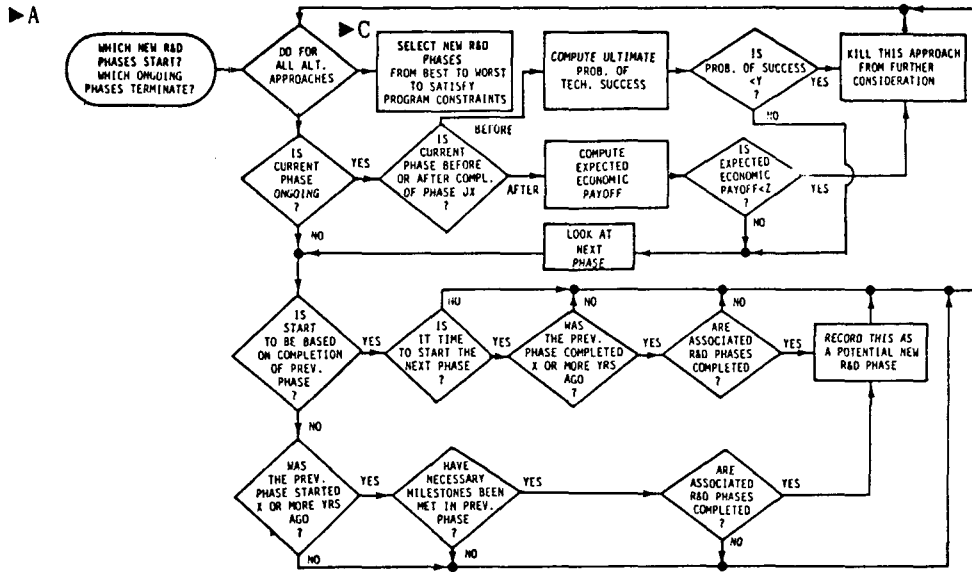


Fig. 8. R & D phase termination and start logic

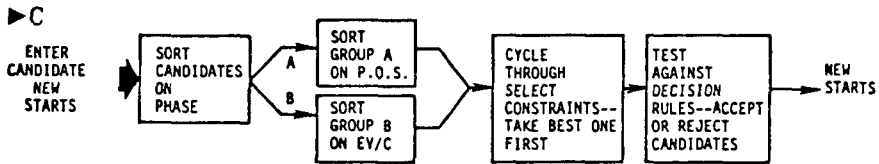


Fig. 9. New R & D phase start logic

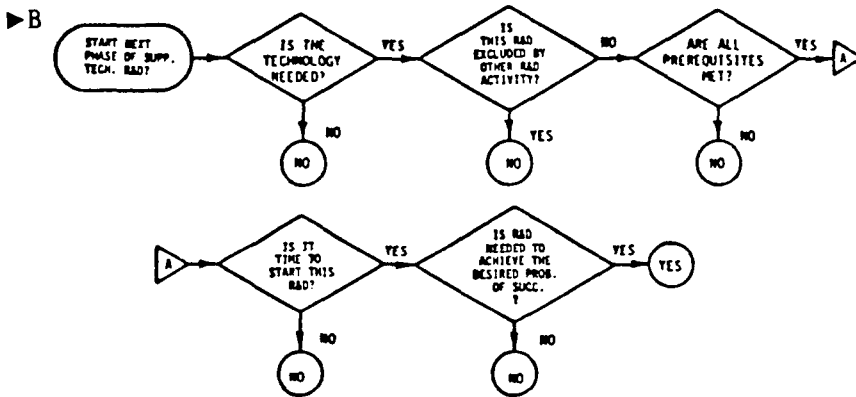


Fig. 10. Logic for start of the next phase of support technology R & D

R & D 프로그램이 완료되거나 사전에 종료된 경우, 혹은 허용된 시뮬레이션 종결시기까지 완료되지 못한 경우에 종결되어지게 된다.

4-2. R & D 단계의 종료/개시 결정과정

R & D 시뮬레이션에서 결정과정은 모든 연구대안에 대해 진행중이거나 잠재적인 연구활동에 대해 주기적

결정시점에서 발생한다고 가정한다. 새로운 단계의 개시가능성 여부의 검토는 직전의 단계가 완료되었거나 진행중인 단계에서 그 단계의 성공을 확신할 수 있는 이정표(milestone)를 만났을 때 이루어지며, 새로운 단계의 개시가능시기(pro.comst, pro.stast) 점검 및 연관 프로젝트(associated projects)의 성공 혹은 실패가 확

**Table 1. Development Schedule for Fuel Cell Systems and Technology**

| 기술영역          | 단계 | 1단계<br>(1992-1996)         | 2단계<br>(1997-2001) | 3단계<br>(2002-2010) |
|---------------|----|----------------------------|--------------------|--------------------|
| ◦ 스택제조기술      |    | 고효율 전극제조 기술확립(인산형, 용융탄산염형) |                    | 저가, 고효율화           |
|               |    | 기초연구, 전극제조 기술확립(고체전해질형)    |                    | 상업화                |
| ◦ 연료개질기술      |    | 40 KW급                     | 200 KW급            | MW급                |
|               |    | 메탄올, 도시가스 개질기개발            |                    |                    |
| ◦ 전력변화 및 제어기술 |    | 수KW급                       |                    |                    |
|               |    | 수백KW급                      |                    |                    |
| ◦ 시스템종합       |    | 납사, 석탄 가스화                 |                    |                    |
|               |    | 40 KW급                     | 200 KW급            | MW급                |
|               |    | 제어기술확립 및 직·교류 변환장치 개발      |                    |                    |
|               |    | 운전제어시스템개발                  |                    |                    |

**Table 2. Results of R & D simulation for each case**

| Project   | Phase | Phase status<br>(% of simulations) |      |      |      | Average start<br>& end dates |        | Average<br>years<br>Length | Expected date of<br>commercialization<br>Year | Probability  |              |
|-----------|-------|------------------------------------|------|------|------|------------------------------|--------|----------------------------|---|--------------|--------------|
|           |       | Nogo                               | Acti | Term | Comp | Start                        | End    |                            |   | project<br>1 | project<br>2 |
| 1) Case 1 |       |                                    |      |      |      |                              |        |                            |   |              |              |
| 1         | 1     | 0.0                                | 0.0  | 7.6  | 92.4 | 1992.0                       | 1997.8 | 5.8                        | 2007  | 0.011        | 0.005        |
| 1         | 2     | 7.6                                | 0.0  | 5.5  | 86.9 | 1997.8                       | 2003.6 | 5.8                        | 2008  | 0.098        | 0.092        |
| 1         | 3     | 13.1                               | 0.0  | 7.2  | 79.7 | 2003.6                       | 2009.4 | 5.8                        | 2009  | 0.400        | 0.423        |
| 2         | 1     | 0.0                                | 0.0  | 7.1  | 92.9 | 1992.0                       | 1997.8 | 5.8                        | 2010  | 0.797        | 0.787        |
| 2         | 2     | 7.1                                | 0.0  | 6.7  | 86.2 | 1997.8                       | 2003.6 | 5.8                        |   |              |              |
| 2         | 3     | 13.8                               | 0.0  | 7.5  | 78.7 | 2003.6                       | 2009.4 | 5.8                        |   |              |              |
| 2) Case 2 |       |                                    |      |      |      |                              |        |                            |   |              |              |
| 1         | 1     | 0.0                                | 0.0  | 4.7  | 95.3 | 1992.0                       | 1997.8 | 5.8                        | 2007  | 0.014        | 0.016        |
| 1         | 2     | 4.7                                | 0.0  | 4.7  | 90.6 | 1997.8                       | 2003.5 | 5.7                        | 2008  | 0.134        | 0.184        |
| 1         | 3     | 9.4                                | 0.0  | 4.3  | 86.3 | 2003.5                       | 2009.2 | 5.7                        | 2009  | 0.546        | 0.618        |
| 2         | 1     | 0.0                                | 0.0  | 4.7  | 95.3 | 1992.0                       | 1997.7 | 5.7                        | 2010  | 0.863        | 0.864        |
| 2         | 2     | 4.7                                | 0.0  | 5.1  | 90.2 | 1997.7                       | 2003.4 | 5.7                        |   |              |              |
| 2         | 3     | 9.8                                | 0.0  | 3.8  | 86.4 | 2003.3                       | 2009.1 | 5.7                        |   |              |              |
| 2) Case 3 |       |                                    |      |      |      |                              |        |                            |   |              |              |
| 1         | 1     | 0.0                                | 0.0  | 4.9  | 95.1 | 1992.0                       | 1997.8 | 5.8                        | 2002  | 0.001        | 0.003        |
| 1         | 2     | 2.8                                | 2.1  | 4.4  | 90.7 | 1997.1                       | 2002.9 | 5.8                        | 2003  | 0.006        | 0.005        |
| 1         | 3     | 7.8                                | 1.5  | 4.5  | 86.2 | 2002.2                       | 2007.9 | 5.8                        | 2004  | 0.012        | 0.009        |
| 2         | 1     | 0.0                                | 0.0  | 4.4  | 95.6 | 1992.0                       | 1997.7 | 5.7                        | 2005  | 0.023        | 0.013        |
| 2         | 2     | 2.5                                | 1.9  | 4.2  | 91.4 | 1997.2                       | 2002.9 | 5.7                        | 2006  | 0.079        | 0.054        |
| 2         | 3     | 7.3                                | 1.3  | 4.8  | 86.6 | 2002.3                       | 2008.0 | 5.7                        | 2007  | 0.286        | 0.266        |
|           |       |                                    |      |      |      |                              |        |                            | 2008  | 0.573        | 0.579        |
|           |       |                                    |      |      |      |                              |        |                            | 2009  | 0.807        | 0.805        |
|           |       |                                    |      |      |      |                              |        |                            | 2010  | 0.862        | 0.866        |

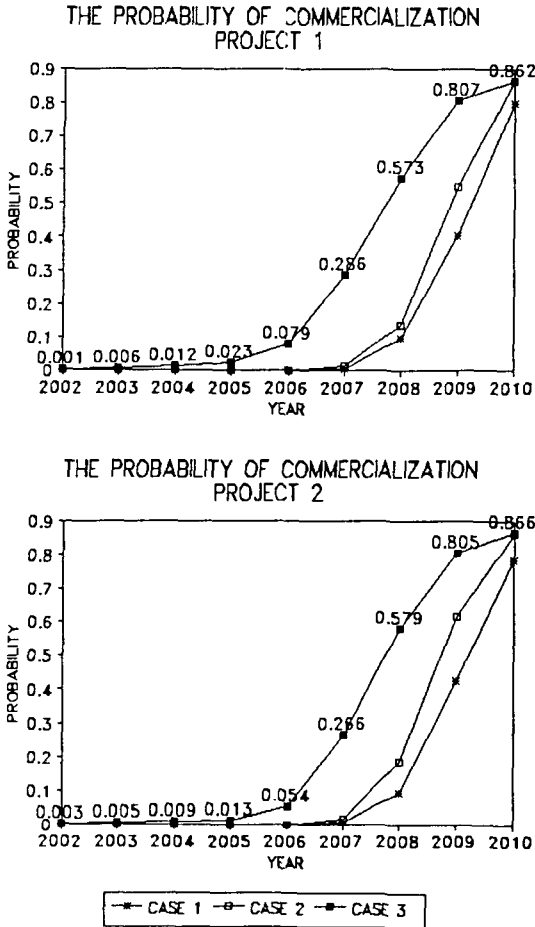


Fig. 11. Probabilities of commercialization by year for each case

정되었을 때 잠재적 개시후보단계로서 기록된다. 잠재적 개시후보단계들 중에서 개시우선순위는 가장 상업화 단계에 근접한 단계로부터 순차적으로 주어지는데 전략상 특정 단계이후로의 진입이 가능한 프로젝트의 수 (no.allow)를 제한할 경우 상대적으로 R&D의 진척이 부진한 프로젝트의 수행을 제한하는데 이용된다. R&D단계의 종료/시기 결정과정은 Fig. 8, Fig. 9와 같다[3, 6].

4-3. 하위프로젝트의 개시 결정과정

일단 새로운 R&D단계의 개시가 결정되면 그 단계 내에서 적절한 하위프로젝트의 개시가 필요하게 되는데, 이 과정은 Fig. 10에 표현되어 있다[6]. 일반적으로 단계내의 하위프로젝트들은 개시가능하거나 선수 하위프로젝트의 존재로 인하여 제한을 받지 않는한 동시에 수행될 수 있다고 가정한다. 또한 다른 프로젝트와 공

유된 문제해결 영역에서 이미 수행중이거나 완료되어 현재의 프로젝트에서 수행이 배제된 하위프로젝트(excluded subprojects) 및 R&D단계의 해당 문제해결영역에서 taf 2이상의 기술진보에 의한 도약효과의 영향을 받는 단계에 해당되는 하위프로젝트는 수행을 생략할 수 있다.

5. 연료전지의 R & D평가 방법론의 사례연구

5-1. 연료전지의 R & D평가 프로그램의 가정 및 범위

연료전지발전기술은 아직 개발단계에 있는 기술이므로 실용화를 위해서는 해결되어야 할 기술적 문제를 안고 있으며[2] 주어진 단계별 추진계획은 Table 1과 같다[1]. 본 연구에 있어서 시뮬레이션의 수행은 연구대안 2개를 대상으로 하고 R&D단계는 기초연구단계, 실용화단계, 상업화 단계의 3단계로 구분하며 문제해결영역은 스택제조기술, 연료개질기술, 전력변환 및 제어기술, 시스템 종합기술 4가지 영역으로 단순화하여 수행하고자 하며 경제적 측면의 검토는 일단 제외하고 기술적 성공가능성만을 고려하고자 한다. 또한 각 하위프로젝트의 입력자료는 단순화를 위하여 개시시기 1992년, 종료시기 2010년, 최단완료 가능시간 3년, 최지(maximum delayed)완료 허용시간 5년, 최빈(most likely)완료 추정시간 4년, 궁극적 성공확률 0.98, 지수분포의 변수  $\beta=0.5$  및 궁극적 기술생존확률의 한계치를 0.01로 모두 동일하게 가정하였다.

시뮬레이션의 사례별 검토는 본 논문에서 서술한 R&D기법을 배제하고 단순히 연구 일정상의 선후관계만을 고려한 경우를 Case 1, 동등 하위프로젝트와 배제 하위프로젝트만을 고려한 경우를 Case 2, 각 단계의 병렬수행과 이정표까지를 허용한 경우를 Case 3으로 하여 각 Case별로 1000회의 시뮬레이션을 수행하여 시기별 상업화 누적성공확률의 도출을 통하여 R&D평가 시뮬레이션 모형 적용시의 효과를 비교하고자 한다.

한편  $\beta$ 는 지수분포의 누적확률에 근거하여 단계의 도약효과를 4단계 이하로 제한하고  $Pr(taf \leq 1)$ 를 85% 이상 보장하기 위하여 0.5를 사용하였으며, 동등 하위프로젝트는 연료개질기술의 특성상 각 연구대안에 대해 유사할 것이므로 각 단계의 하위프로젝트 2에 적용하고, 배제 하위프로젝트는 인버터(inverter)의 특성상 모든 연료전지의 생성물인 직류전원에 연결이 가능할 것이므로 하위프로젝트 3에 적용하였다.

5-2. 시뮬레이션의 결과 및 고찰

Table 2의 결과에서 3가지 경우 모두 각 단계의 평균수행기간은 거의 동일한 값을 보이고 있는데, 이는 단계의 종료시기를 성공 및 실패 모두에 대해 고려하



였기 때문이며 시물레이션 상에서 각 단계의 실패시기는 최저완료 허용시기로 가정하였다. Case 1에 비해 Case 2의 경우 각 단계의 성공확률 및 프로젝트의 연도별 상업화 성공확률이 전반적으로 높게 나타남을 알 수 있는데, 이는 이미 성공이 확인된 하위프로젝트에 의해 다른 프로젝트의 배제 하위프로젝트들이 중복수행없이 성공으로 확인되었음에 기인한다 할 수 있다.

Case 1과 Case 2의 상업화 성공시기는 유사함에 비해 Case 3의 경우 현저하게 단축되었으며 프로젝트의 연도별 상업화 성공확률 역시 Fig. 11에서와 같이 월등하게 향상됨을 알 수 있다. 이는 새로운 단계의 개시가 전 단계의 모든 하위프로젝트의 완료 이전에도 이정표만을 만족한다면 허용되므로 단계의 병렬수행으로 인해 전반적인 성공시기의 단축으로 연결된 것이라고 할 수 있다. 반면 Case 2와 Case 3에서의 각 단계별 성공확률 및 최종년도의 상업화 성공확률은 거의 동일함을 보이는데, 이는 성공이 보다 빠른 시기에 나타날 뿐이지 전체적인 성공확률은 결국 궁극적 실패확률(1-upos)에 의해 동일한 영향을 받음을 의미한다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 연료전지 기술개발 추진전략간의 비교 분석을 통하여 R & D의 특성을 종합적으로 고려할 수 있는 평가 방법론을 모형화하고자 하였다. R & D평가 시물레이션모델은 R & D자체에 본질적으로 내재된 불확실성 및 상관관계를 고려할 수 있었고 R & D단계 및 하위 프로젝트의 개시/지속/완료/종료에 관한 의사결정 과정의 내재화가 가능하였으며 시간별 프로그램 성공확률, 각 단계별 성공/실패확률 및 상업화 가능시기의 확률 분포 등의 확률론적 데이터를 제시할 수 있었다.

따라서 기존의 PERT와 같은 확정적 프로젝트 평가 기법이 단순히 연구일정상의 선후관계만을 고려하는 (Case 1) 한계성을 극복할 수 있었으며 간략화된 사례 연구를 통하여 각 단계의 성공확률 및 프로젝트의 연

도별 성공확률이 전반적으로 향상되고 상업화 성공시기는 현저하게 단축됨을 확인할 수 있었다. 이는 각 연구대안간의 상관관계 및 기술진보에 대한 정보교류가 현저하게 성공확률을 증가시킬 수 있음을 의미하는 것으로 전문가에 의한 정도 높은 하위프로젝트의 정의 및 입력 데이터의 채집과 적절한 기술특성조사를 통한다면 보다 신뢰성있는 결과를 도출할 수 있을것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 한국동력자원연구소, 신·재생에너지 기술개발 중장기 계획 수립에 관한 연구 (1992-2010), 1990.
2. Appleby John, "Phosphoric Acid Fuel Cells(PAFCs)", ENERGY, Volume 11 (1/2), 1986, 13-94.
3. ECON, Inc., Implement and Exercise a Methodology for prioritizing and Evaluating Technological and Scientific R & D Alternatives (Proposal), 1980.
4. ECON, Inc., Sensitivity Analysis of the RADSIM R & D Assessment Model (Interim Report), 1981.
5. ECON, Inc., Sensitivity Analysis of the RADSIM R & D Assessment Model (Final Report), 1982.
6. ECON, Inc., A Research and Development Simulation Model, 1980.
7. Grant E. L., Ireson W. G., Learenworth R. S. (ed. 7), Principles of Engineering Economy, John Wiley & Sons, Inc., 1978.
8. Griffin J. M. and Steele H. B. (ed. 2), Energy Economics and Policy, Academic Press College Division, 1986.
9. Hillier F. S. and Lieberman G. J. (ed. 3), Introduction to Operations Research, Holden-Day, Inc., 1980.
10. Hogg R. V. and Craig A. T. (ed. 4), Introduction to Mathematical Statistics, Macmillan Publishing Co., Inc., 1978.
11. Law A. M. and Kelton W. D., Simulation Modeling and Analysis, McGraw-Hill, Inc., 1980.