

다제품 생산을 위한 최적 테스트 스케줄링 모델 개발

손흥록* · 류준형[†] · 이인범*

동국대학교 에너지환경시스템학부

780-714 경북 경주시 석장동 707

*포항공대 화학공학과

790-784 경북 포항시 남구 효자동 산 31번지

(2009년 8월 3일 접수, 2009년 10월 23일 채택)

Development of a Model for the Optimal Test Scheduling Considering Multiple Products

Hong-Rok Son*, Jun-Hyung Ryu[†] and In-Beum Lee*

Department of Energy & Environment Systems, Dongguk University, 707 Seokjang-dong, Gyeongju-si, Gyeongbuk 780-714 Korea

*Department of Chemical Engineering, POSTECH, San 31, Hyoja-dong, Pohang-si, Gyeongbuk 790-784, Korea

(Received 3 August 2009; accepted 23 October 2009)

요 약

경쟁력을 유지하기 위해 기업은 다양한 신제품들을 동시 다발적으로 개발해야 한다. 이런 제품들은 시장에 출시되기 전에 품질, 안정성, 내구성 등 다양한 시험(test)들을 거쳐야 한다. 여러 시험 수행 일정을 조정함으로써 그로 인한 전체 발생 비용을 고려한 신제품의 순현재 가치(NPV, net present value)가 변하게 되며 이를 최대화 하기 위한 시스템적 방법이 필요하다. 이러한 필요성에 따라서 본 연구에서는 현실적 자원 제약이 고려된 상황에서 다제품(multiple products)들의 최적 시험 순서를 결정할 수 있는 모델을 제시하였다. 또한 수학적 예제를 통해서 테스트 수행 시간이 확률적으로 주어진 경우에도 적용할 수 있다는 것을 검증하였다.

Abstract – As a rule, when develop new product in company, multiple products that have similar function are developed simultaneously. These products are subjected to a group of tests covering quality, safety and durability. If the schedule of tests is changed, the expected net presented value(NPV) of new products is changed. The tests should be scheduled with the goal of maximizing the expected NPV of the new products. A model incorporated resource constraints with the sequencing of testing tasks of multiple products is proposed in this paper. Examples show that the proposed model can handle stochastic task duration data represented by scenarios with probabilities.

Key words: New Product Development, Multiple Product, Resource Constrained

1. 서 론

여러 산업에서 새로운 제품을 개발하여 시장에 출시하기 전에 안정성, 효율, 환경적인 영향, 내구성 등 일련의 시험*(테스트, test)을 거쳐게 된다. 이러한 테스트들을 수행하는데 많은 비용과 시간이 들게 되지만 중간에 테스트를 실패하게 되면 그때까지 사용된 비용과 시간은 모두 쓸모 없게 된다. 그렇기 때문에 이러한 테스트들은 순현재 가치(net present value, NPV)를 최대화 하는 최적의 테스트 순서를 결정하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 기업에서 제품을 연구 개발하는데 있어서 한번에 하나의 제품만을 개발하는 것이 아니라 다양한 기능을 가지는 비슷한 제품을 개발하거나 서로 연관은 없지만 같은 공정이나 테스트를 거

치는 제품을 개발하게 된다. 동시에 여러 제품을 테스트해야 하는 경우 현실적으로 테스트를 수행할 수 있는 검사팀의 수가 제한되어 있다는 것을 감안하면 어느 제품의 테스트를 어떤 순서대로 해야 하는지를 결정해야 하는 문제가 발생한다.

테스트할 제품의 순서를 결정하는 문제에서 고려되어야 할 요소로서 테스트 비용과 성공확률, 테스트 혹은 제품간의 우선순위, 특정 테스트가 가능한 테스트 팀, 제품 개발 기한 등이 있다. 만약 비슷한 성공 확률을 가지고 있는 테스트라고 한다면 비용이 적게 드는 테스트를 우선하는 것이 유리할 것이다. 각 테스트 사이에서도 반드시 특정 테스트를 먼저 수행한 다음에 진행해야 하는 테스트 또한 고려해야 한다. 기업 입장에서 제품 개발을 하는데 있어서 우선 순위를 가지는 제품이 존재할 수 있고, 이러한 내용은 테스트를

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jhryu@dongguk.ac.kr

*이 논문은 KAIST 장호남 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

*화학 공학연구정보센터의 화학공학 술어집에서 'test'를 '시험'으로 번역하여 사용하였으나 '테스트'란 어휘가 실제 현장에서 광범위하게 사용됨으로 인해 본 논문에서는 이를 사용하였음.

하는 순서에도 크게 영향을 미칠 수 있으므로 이를 고려할 필요가 있다. 또한 특정 테스트를 할 수 있는 자원(resource)의 제약이 있을 수 있다. 검사팀의 수가 정해져 있는 것이 대표적 사례가 될 수 있는데, 특정 테스트를 수행하는데 주어진 자원은 한정될 수 있고, 수행할 제품과 그 테스트들의 수가 많을 경우, 그 한정된 자원에 많은 테스트가 물리게 되어 전체 테스트 일정의 병목부분이 되어 전체 일정을 지연시키는 원인이 될 수 있다.

테스트 일정 관련하여 이전에 몇몇 연구가 발표되었다. Schmidt and Grossmann[1]은 신제품 개발 공정에서 최적 테스트 순서를 결정하는데 기본이 되는 여러 가지 모델을 제시하였다. Jain and Grossmann [2]은 이 모델을 자원 제약을 반영한 모델로 확장하였다. 그들의 모델에서 다제품의 경우가 고려되었지만 테스트 시간이 정해지고 고정적이라는 가정을 사용하였다. Honkomp 등[3]은 제품 개발 프로젝트의 R&D 단계에서 제한된 자원을 사용하여 최적의 기대 수익을 얻을 수 있는 문제를 제안하였다. Subramanian 등[4]은 시뮬레이션 기반의 모델을 제안하였고, Blau 등[5]은 신제품 개발 공정에서 위기 관리에 관한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. Maravelias and Grossmann[6]은 제품 생산 결정 문제에 신제품 개발 공정의 최적 테스트 순서 결정 문제를 결합한 혼합 정수 선형 계획 모델을 제안하였다. Son 등[7]은 신제품 개발 공정의 최적 테스트 순서를 결정하는 문제에서 자원 제약과 재시험을 고려할 수 있는 모델을 제시하였다.

기존 연구들에서 테스트 시간이 불확실성이 있는 경우에 대하여 다제품 테스트를 동시에 고려하는 모델들에 대한 기존 연구가 없었기 때문에 본 연구에서는 더 살펴보고자 한다. 우선 자원 제약이 고려된 상황에서 여러 제품의 최적 테스트 순서를 결정할 때 이를 동시에 고려해야 하는 이유를 설명하고 이를 위한 모델을 제시하였다. 또한 예제를 통해 이를 검증하였다.

2. Motivating Example

동시에 여러 제품을 고려해야 하는 이유를 수치 예제(numerical example)를 통해 설명해 보도록 하겠다. 한 회사에서 두 개의 제품 A와 B를 생산하는데 제품 A는 테스트 1, 2를 통과해야 하고 제품 B는 테스트 3, 4를 통과해야 한다. 이에 필요한 각 테스트의 성공 확률(p_{ie}), 테스트 비용(c_{ie}), 테스트 수행 시간(d_{ie})은 Table 1에 주어졌다.

우선 테스트를 수행하는 팀 수에 제한이 없는 경우를 생각해 보자. 이 경우에는 제품 A와 B는 서로 영향을 받지 않고 테스트를 수행할 수 있다. 각 제품의 테스트 순서는 3가지 경우를 생각해 볼 수 있다. 예를 들어 제품 A의 경우에는 테스트 1→테스트 2, 테스트 2→테스트 1, 그리고 테스트 1과 2를 동시에 수행하는 경우를 생각해 볼 수 있다. 각각의 경우를 비교하기 위해서 전체 비용을 계산하

Table 1. Data for example

Product	Test	p_{ie}	c_{ie} (\$)	d_{ie} (H)
A	1	0.60	200	6
	2	0.98	150	7
B	3	0.80	150	6
	4	0.90	150	5

고 그 중에서 전체 비용이 가장 적게 되는 경우를 선택해야 한다. 전체 비용은 기대 비용과 제품 개발 지연으로 인한 수입 감소의 합으로 나타낼 수 있고, 제품의 기대 비용은 각 테스트의 수행 비용과 이전에 수행된 테스트의 성공확률의 곱으로 표현할 수 있다. 수입 감소는 보통 부분 선형 함수(piecewise linear function)의 형태로 표현하는데 본 예제에서는 다음과 같이 계산한다고 가정한다.

$$t_A = 5[\max(t_A - 10, 0)] + 10[\max(t_A - 13, 0)] \quad (1)$$

$$2t_B + 6[\max(t_B - 11, 0)] + 10[\max(t_B - 14, 0)] \quad (2)$$

여기서 t_A 와 t_B 는 각 제품의 전체 테스트 완료 시간(hour)을 나타낸다.

생각할 수 있는 테스트 순서에 따른 각 제품별 기대 비용, 테스트 완료 시간, 수입 감소, 전체 테스트 비용을 계산해 보면 Table 2와 같다.

Table 2에서 알 수 있듯이 제품 A는 1→2 순서로, 제품 B는 3→4의 순서로 테스트를 진행하는 것이 전체 비용이 가장 적게 드는 것을 알 수 있다.

그러나 테스트를 수행할 수 있는 팀의 수가 정해져 있는 경우에는 결과가 달라질 수 있다. 위의 예에서 2개의 팀만 테스트를 수행할 수 있고 1번 팀은 테스트 1, 3만 수행할 수 있고 2번 팀은 테스트 2, 4만 수행할 수 있다고 가정하면 앞의 결과(구별을 위해 시나리오 1이라 부르겠다)는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

이 경우 테스트의 순서에 변화가 없으므로 기회 비용은 변화가 없지만 제품 B의 테스트 완료 시간이 변하기 때문에 수입 감소는 증가하게 된다. 각 제품의 전체 테스트 비용을 계산해 보면 다음과 같다.

$$\text{Cost_Product A(\$)} : [200 + 0.6 \times 150] + [13 + (5 \times 3) + (10 \times 0)] = 318$$

$$\text{Cost_Product B(\$)} : [150 + 0.8 \times 150] + [(2 \times 18) + (6 \times 7) + (10 \times 4)] = 388$$

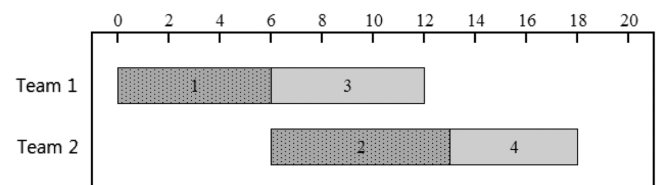


Fig. 1. Scheduling after sequencing the tasks.

Table 2. The expected cost, completion time, income decrease, and total cost

Product	Sequence of tests	Expected cost(\$)	Completion time(H)	Income decrease(\$)	Total cost(\$)
A	1→2	$200 + 0.6 \times 150 = 290$	13	$13 + 5 \times 3 + 10 \times 0 = 28$	318
	2→1	$200 + 0.98 \times 150 = 346$	13	$13 + 5 \times 3 + 10 \times 0 = 28$	374
	parallel	$200 + 150 = 350$	7	$7 + 5 \times 0 + 10 \times 0 = 7$	357
B	3→4	$150 + 0.8 \times 150 = 270$	11	$2 \times 11 + 6 \times 0 + 10 \times 0 = 22$	292
	4→3	$150 + 0.9 \times 150 = 285$	11	$2 \times 11 + 6 \times 0 + 10 \times 0 = 22$	307
	parallel	$150 + 150 = 300$	6	$2 \times 6 + 6 \times 0 + 10 \times 0 = 12$	312

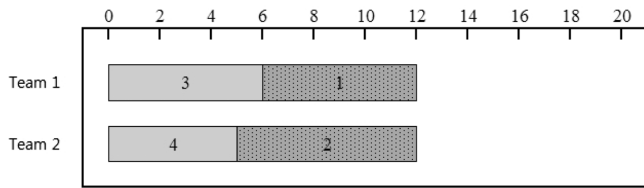


Fig. 2. Scheduling without sequencing the tasks.

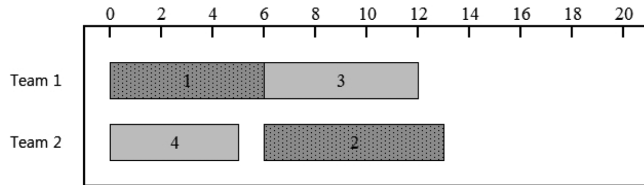


Fig. 3. Simultaneous scheduling and sequencing.

여기서 테스트 완료 시간을 최소로 할 수 있는 경우(시나리오 2라 부르겠다)를 생각해 볼 수 있다. 이때의 최적 테스트 순서는 Fig. 2와 같이 도식화할 수 있다.

제품 A와 B의 테스트 완료 시간(H)은 각각 12와 6이다. 이 경우 테스트 완료 시간을 최소로 하였으므로 수입 감소는 줄어들었지만 두 제품 모두 테스트를 동시에 수행하였기 때문에 기회 비용이 증가하게 된다. 각 제품의 전체 테스트 비용은 다음과 같다.

$$\text{Cost_Product A(\$)} : [200+150]+[12+(5 \times 2)+(10 \times 0)]=372$$

$$\text{Cost_Product B(\$)} : 150+150+[(2 \times 6)+(2 \times 0)+(10 \times 0)]=312$$

두 제품을 동시에 고려할 때 최적의 테스트 순서는 Fig. 3과 같이 A는 1→2 순서로, 제품 B는 4→3의 순서로 수행하는 경우이다(시나리오 3이라 부르겠다). 제품 A와 B의 테스트 완료 시간(H)은 각각 13과 12이다. 각 제품의 전체 테스트 비용은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Cost_Product A(\$)} : [200+0.6 \times 150]+[13+(5 \times 3)+(10 \times 0)]=318$$

$$\text{Cost_Product B(\$)} : [150+0.9 \times 150]+[(2 \times 12)+(2 \times 1)+(10 \times 0)]=311$$

이 경우의 전체 테스트 비용은 629\$이고 이는 시나리오 1보다 77\$가 적고, 시나리오 2보다는 55\$가 적은 값이다. 이 예제에서 알 수 있듯이 테스트 팀의 수가 제한되어 있는 경우에는 여러 제품의 테스트 순서를 결정할 때 각 제품별로 테스트 순서를 결정하는 것이 아니라 동시에 모두 고려하여야 한다.

3. Mathematical Formulations

본 연구에서는 Son 등[7]에서 제시한 모델 중에서 자원 제약을 고려한 모델인 NM1을 기본으로 하였다. 모델 NM1은 테스트 순서를 결정하는데 있어서 테스트 수행 시간이 확률적으로 주어진 경우에 있어서 자원 제약을 고려한 모델을 바탕으로 동시에 여러 제품을 고려하는 모델을 제시할 것이다.

시나리오 k에서의 전체 프로젝트 완료 시간을 t_{ek} 라 표현하고 이 값은 모든 테스트가 끝나는 시간보다 크거나 같아야 한다.

$$s_{iek} + d_{iek} \leq t_{ek} \quad \forall i, e, k \quad (3)$$

여기서 s_{iek} 는 시나리오 k에서 제품 e가 수행해야 하는 테스트 i의

시작 시간을 나타내고, d_{iek} 는 시나리오 k에서 제품 e의 테스트 i를 수행하는 기간을 나타낸다.

s_{iek} 의 상한 값(upper bound), U_{iek} 는 다음과 같은 (4)와 (5)의 식으로 주어진다.

$$U_{iek} = \sum_{j \neq i, e \neq f} d_{jfk} \quad \forall i, e, k \quad (4)$$

$$0 < s_{iek} \leq U_{iek} \quad (5)$$

이진변수(binary variable)인 y_{iejf} 는 제품 e의 테스트 i와 제품 f의 테스트 j 사이의 선후관계가 존재할 때 1이며 그렇지 않은 경우 0이다. 각 테스트 사이의 선후관계는 다음과 같은 제약조건을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_{iejf} \wedge y_{jfie} \\ s_{iek} + d_{iek} \leq s_{jfk}, \forall k \end{bmatrix} \vee \begin{bmatrix} y_{jfie} \wedge \neg y_{iejf} \\ s_{jfk} + d_{jfk} \leq s_{iek}, \forall k \end{bmatrix} \vee [\neg y_{iejf} \wedge \neg y_{jfie}] \quad (6)$$

$$y_{iejf} + y_{jfie} \leq 1 \quad \forall (i, e, j, f) | (i, e) \neq (j, f) \quad (7)$$

$$y_{iejf} + y_{jflg} + y_{lgie} \leq 2 \quad \forall (i, e, j, f, l, g) | (i, e) \neq (j, f) \neq (l, g) \quad (8)$$

$$y_{jfie} + y_{jelg} + y_{lgif} \leq 2 \quad \forall (i, e, j, f, l, g) | (i, e) \neq (j, f) \neq (l, g) \quad (9)$$

테스트 순서를 결정하는 문제에서는 대부분 반드시 만족시켜야 하는 기술적인 선후관계 제약조건을 갖는다. 이 선후관계는 테스트 사이에서 뿐만 아니라 제품 사이에서도 나타날 수 있다. 제품 e의 테스트 i와 제품 f의 테스트 j 사이의 기술적인 선후관계를 집합 A라 하고 이는 이진변수 y_{iejf} 를 고정함으로써 간단히 표현할 수 있다.

$$(i, e, j, f) \in A \quad (10)$$

$$y_{iejf} = 1, y_{jfie} = 0 \quad \forall (i, e, j, f) \in A \quad (11)$$

Schmidt and Grossmann[1]에서 비선형 형태인 목적함수식을 선형식으로 바꾸기 위해서 separable programming 방법을 사용하였다. 본 연구에서도 이를 표현하기 위해 변수 λ_{iekn} 를 도입하였고 아래와 같은 제약조건을 추가하였다.

$$\sum_n a_{iekn} \lambda_{iekn} = -rs_{iek} + \sum_j \ln(p_{jfk}) y_{jfie} \quad \forall i, e, k \quad (12)$$

$$\sum_n \lambda_{iekn} = 1 \quad \forall i, e, k \quad (13)$$

제품 e의 테스트 i가 팀 t의 슬롯 s에서 수행되는 경우 이진 변수 X_{iest} 는 1의 값을 갖게 되며 그 외의 경우엔 0이 된다. 모든 테스트는 특정 팀의 슬롯에서 한번 반드시 수행되어야 하며 이를 다음의 식처럼 수식화할 수 있다.

$$\sum_{s,t} X_{iest} = 1 \quad \forall i, e \quad (14)$$

어떤 테스트는 반드시 특정 팀에서 수행해야 경우가 발생할 수 있다. 이와 같은 제약 조건을 집합 B로 정의하고 다음의 식으로 간단히 나타낼 수 있다.

$$\sum_s X_{iest} = 1 \quad (i, e, t) \in B \quad (15)$$

같은 팀이 수행하는 테스트들 사이에는 반드시 선후 관계가 형성

되며 그에 따라 이진변수 y_{ieff} 가 결정된다. 그러므로 이진변수 y_{ieff} 와 X_{iest} 사이에는 다음과 같은 관계가 형성된다.

$$(1 - y_{ieff}) \leq M(2 - X_{iest} - X_{jfst}) \quad \forall s < s', (i, e) \neq (j, f), t \quad (16)$$

최적 테스트의 순서를 결정하는 문제에서 목적값은 기대 비용과 제품 개발 지연에 따른 수입 감소의 두 부분으로 나누어 표현될 수 있다. NPV의 기대값을 최대로 하기 위해서는 수입 감소를 최소화 하고 기대 비용을 최소화해야 한다. 두 가지 내용을 한 식으로 표현 하기 위해서 수입 감소에 대한 항목을 기대수입의 음의 값을 최소화 하는 문제로 바꾸어 적용하였다. 이를 다음 식과 같이 비선형이며 비오목한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\min \sum_k P_k \left(\sum_{i,e} c_{iek} \sum_n (e^{a_{iekn}} \lambda_{iekn}) + \sum_e \sum_m f_{ekm} u_{ekm} \right) \quad (17)$$

여기서 c_{iek} 는 시나리오 k 에서 제품 e 의 테스트 i 를 수행하는데 드는 테스트 수행비용이며 f_{ekm} 은 제품 개발이 지연됨에 따라 발생하는 수입 감소를 나타낸다.

이제까지 제안된 목적함수와 제약 조건을 가진 모델을 사용하여 어떻게 테스트 일정 계획을 수립할 수 있는지를 다음의 수치 예제를 통해 설명하겠다.

4. Illustrative Examples

4-1. Example 1

제약회사가 2개의 제품에 대해서 각각 4개의 테스트를 수행해야 하는 경우를 고려해보자. 테스트를 수행할 수 있는 팀의 수는 2팀 이고 각 테스트의 성공확률, 테스트 수행 비용, 수행 시간과 각 수행 시간이 일어날 확률은 Table 3에 정리되어 있다.

본 논문에서 제안된 모델을 바탕으로 하여 위의 Table 3의 데이터를 사용하여 얻은 결과를 Fig. 4에 정리하였다. 그림에 나와 있듯이 제품 A의 경우 2번과 4번 테스트를 성공한 후에 1번과 3번 테스트를 수행하고, 제품 B의 경우 2번 테스트는 1번과 3번 테스트가 성공한 후에 수행하고 4번 테스트는 1번 테스트만 성공하면 수행할 수 있도록 하고 있다. 또한, Fig. 4에서 보는 바와 같이 1번 팀은 제품 A의 1, 4번 테스트와 제품 B의 1, 4번 테스트를 수행하고 2번 팀은 나머지 테스트를 수행한다.

4-2. Example 2

두 번째 예제는 3개의 제품에 대해서 각각 10개의 테스트를 수행하는 문제이다. 테스트를 수행할 수 있는 팀의 수는 4팀이고 각 테스트의 성공확률, 테스트 수행 비용, 수행 시간은 Table 4와 같다.

Table 3. Data for example 1

Product	Test	p_i	c_i	d_i	$P(d_i)$
A	1	0.807	75,500	{13, 14, 15}	{0.2, 0.6, 0.2}
	2	0.775	105,500	{11, 12, 13}	{0.3, 0.4, 0.3}
	3	0.889	222,700	{8, 9, 10}	{0.3, 0.5, 0.2}
	4	0.900	285,000	{14, 15, 16}	{0.25, 0.5, 0.25}
B	1	0.970	75,500	{12, 13, 14}	{0.2, 0.7, 0.1}
	2	0.903	105,500	{16, 17, 18}	{0.4, 0.4, 0.2}
	3	0.925	222,700	{15, 16, 17}	{0.3, 0.3, 0.4}
	4	0.907	285,000	{19, 20, 21}	{0.3, 0.5, 0.2}

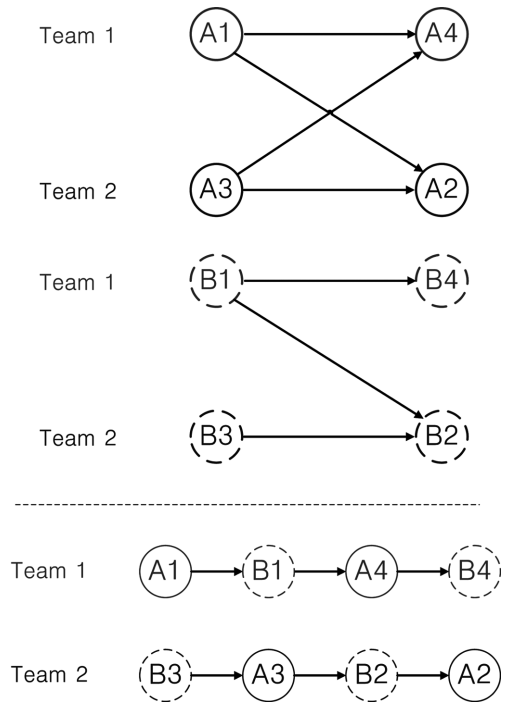


Fig. 4. Optimal schedule of example 1.

Table 4. Data for example 2

Product	Test	p_i	c_i	d_i
A	1	1	8	150
	2	1	8	100
	3	1	5	120
	4	0.84	1	10
	5	0.98	49	90
	6	1	111	180
	7	0.95	6	30
	8	1	174	200
	9	1	62	270
	10	1	1	20
B	1	1	16	90
	2	0.87	113	15
	3	0.91	1	5
	4	1	13	90
	5	1	53	60
	6	1	9	30
	7	1	117	90
	8	1	40	90
	9	1	57	150
	10	1	23	90
C	1	1	10	30
	2	1	15	25
	3	1	6	60
	4	0.84	1	10
	5	1	92	40
	6	1	46	5
	7	0.95	1	20
	8	1	38	120
	9	0.94	1	60
	10	1	42	15

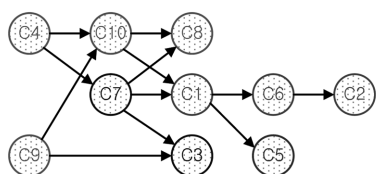
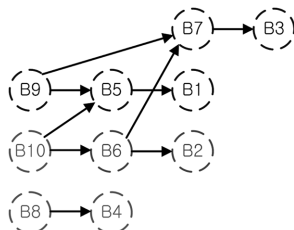
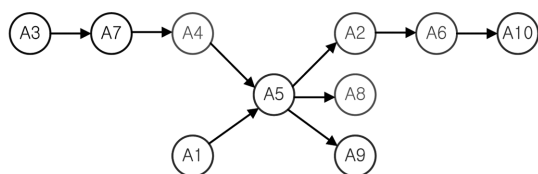


Fig. 5. Optimal schedule of example 2.

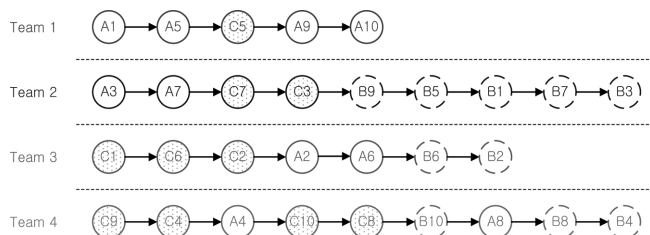


Fig. 6. Optimal schedule of example 2.

이 예제는 문제의 계산 시간을 고려하여 테스트 수행 시간이 결정되어 있는 경우를 고려하였다.

최적 테스트 순서는 Fig. 5와 6과 같다. Fig. 5는 각 제품 별로 테스트 사이의 우선순위를, Fig. 6은 각 팀에서 수행해야 하는 테스트의 순서를 나타낸다. Jain and Grossmann[2]의 결과와 비교해 보면, 계산 시간이 37167.1초에서 29576.3초로 더 단축되었다.

모든 예제는 GAMS의 CPLEX 9.0를 사용하였으며 Intel 2.4 GHz CPU와 2 GB RAM에서 계산되었다.

5. 결 론

회사에서 제품을 개발하는데 있어서 경제적으로 테스트 일정계획을 수립하는 문제는 매우 중요하다. 본 연구에서는 자원 제약이 있는 상황에서 동시에 여러 제품을 고려하는 모델을 제시하였다. 제시된 모델에서는 테스트 비용과 성공확률, 테스트 혹은 제품간의 우선순위, 특정 테스트가 가능한 테스트 팀 등을 고려하여 문제를 풀었다. 또한 예제를 통해서 테스트 수행 시간이 확률적으로 주어진 경우에도 적용할 수 있다는 것을 검증하였다.

감 사

이 연구는 2009년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2008-313-395 D00178)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Schmidt, C. W. and Grossmann, I. E., "Optimization Models for the Scheduling of Testing Tasks in New Product Development," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 3498-3510(1996).
- Jain, V. and Grossmann, I. E., "Resource-Constrained Scheduling of Tests in New Product Development," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38**, 3013-3026(1999).
- Honkomp, S. J., Reklaitis, G. V. and Pekny, J. F., "Robust Planning and Scheduling of Process Development Projects Under Stochastic Conditions," *AIChE Annual Meeting*, Los Angeles, CA (1997).
- Subramanian, D., Pekny, J. F. and Reklaitis, G. V., "A Simulation-optimization Framework for Research and Development Pipeline Management," *AIChE Journal*, **47**(10), 2226-2242(2001).
- Blau, G., Metha, B., Bose, S., Pekny, J., Sinclair, G., Keunker, K. and Bunch, P., "Risk Management in the Development of New Products in Highly Regulated Industries," *Comput. Chem. Eng.*, **24**, 659-664(2000).
- Maravelias, C. and Grossmann, I. E. "Simultaneous Planning for New Product Development and Batch Manufacturing Facilities," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 6147-6164(2001).
- Son, H. R., Ryu, J. H. and Lee, I. B., "Development of Scenario-Based Models for Optimal Test Scheduling Considering Retest and Outsourcing," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **42**(5), 330-337(2009).
- Baker, N. R., "R&D Project Selection Models: An Assessment," *IEEE Trans. Eng. Manage.*, **21**(4), 165(1974).
- Doersch, R. H. and Patterson, J. H. "Scheduling a Project to Maximize Its Present Value: a 0-1 Programming Approach," *Management Sci.*, **23**, 882(1977).
- Elmaghraby, S. E. and Herroelen, W. S. "The Scheduling of Activities to Maximize the Net Present Value of Projects," *Eur. J. Oper. Res.*, **49**, 35(1990).
- Maravelias, C. and Grossmann, I. E., "Optimal Resource Investment and Scheduling of Tests for New Product Development," *Comput. Chem. Eng.*, **28**, 1021-1038(2004).
- Rogers, M. J., Gupta, A. and Maranas, C. D., "Real Options Based Analysis of Optimal Pharmaceutical Research and Development Portfolios," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**(25), 6607-6620v(2002).
- Schmidt, R. L. and Freeland, J. R., "Recent Progress in Modeling R&D Project-Selection Processes," *IEEE Trans. Eng. Manage.*, **39**, 189(1992).
- Souder, W. E. and Mandakovic, T., "R&D Project Selection Models," *Res. Manage.*, **29**, 36(1986).