

# 고위험 사업에서 PERT와 PLET기법 결합에 의한 확률적 사업공기 추정

김선규\* · 김준영<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>서울대학교 건축학부

## Probabilistic Project Duration Estimation by Combination of PERT and PLET in High-Risk Project

Kim, Seon-Gyoo\*, Kim, Junyoung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

**Abstract :** PERT(Project Evaluation and Review Technique) is typical method in order to probabilistically establish the schedule plan for large scale complex project or mega project. PERT technique is impossible to estimate relationship of each activity probabilistically when there are overlapping relationships because it is limited to Finish-to-Start(FS) relationship. In order to overcome this kind of limitation of PERT technique, PLET(Probabilistic Linkage Evaluation Technique) has been suggested to probabilistically estimate project duration for various overlapping relationships for each activity. However, estimating project duration by PLET technique only considers uncertainty of relationship between activities and not activity time, thus it is not the perfect duration estimating method. The main objective of this research is to propose the integration model of PERT and PLET and verify its probabilistic validity. By verifying application of time calculation method of integration model in practical case, this research will suggest probabilistic project duration estimating method in schedule plan of high-risk construction industry.

**Keywords :** PDM, BDM, Probabilistic Evaluation, PERT, PLET

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설사업은 외부환경에서 장기간 동안 다양한 자원들이 투입되므로 본질적으로 수많은 위험요인(risk events)들에 노출되어 있고, 그러한 위험요인들을 슬기롭게 극복하는 과정이 바로 건설 프로세스(construction process)이다(Smith 1999). 이러한 위험요인들은 건설사업의 전체 사업계획을 수립하는 과정에서 다양한 방식으로 도출되고 분석된 다음 반영이 되지만, 예측한 위험요인들이 실제 그대로 발생하리라는 보장이 없을 뿐만 아니라 예측하지 못했던 수많은 상황들이 발생하게 되는 것이다(Edwards 1995). 특히 대규모 복합 프로젝트(complex project) 또는 메가 프로젝트(mega project)들의 경우, 사업 내·외부 환경의 복잡성으로 인해 예측 불가

능하거나 예상이 빗나가는 사안들이 너무나 많기 때문에 이들을 고위험 사업(high-risk project)이라 부르기도 하는데, 고위험 사업의 공정계획은 수많은 위험요인들과 불확실성(uncertainty)을 고려한 다양한 시나리오(scenario)들을 가정하고, 이들을 확률적으로 분석하면서 최선의 로드맵(road map)을 선택하는 과정이다(Bluce et al, 2005).

확률적으로 공정계획을 수립하는 대표적인 방법이 PERT(Project Evaluation and Review Technique)기법(Malcolm et al, 1959)이다. PERT기법은 작업공기의 불확실성에만 중점을 두고 작업간 연결관계는 Finish-to-Start (FS)관계로 제한되기 때문에 작업간 중복관계가 존재할 경우 작업간 연결관계의 불확실성에 대한 확률적인 추정이 불가능하므로, 만약 작업간 연결관계를 확률적으로 추정하고자 할 경우 PERT기법으로는 불가능하다. PERT기법의 이러한 한계를 극복하기 위해, 김선규(2014)는 공정계획을 수립할 때 작업간 연결관계는 FS관계 뿐만 아니라 다양한 중복관계(overlapping relationship)들이 존재할 수 있으므로, 이러한 다양한 중복관계들의 불확실성을 고려하여 사업전체 공기를 추정하는 방법으로 PLET (Probabilistic Linkage Evaluation Technique)기법을 제안하였다. 그러나 PLET기법에 의한 사

\* Corresponding author: Kim, Seon-Gyoo, Department of Architectural Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 201-700, Korea  
E-mail: sgl208@kangwon.ac.kr  
Received March 4, 2016; revised April 4, 2016  
accepted April 6, 2016

업공기 추정은 작업간 연결관계의 불확실성만을 고려할 뿐, PERT기법에서의 작업공기에 대한 불확실성은 고려하지 않으므로, 완전한 사업공기 추정방법이라 할 수 없다.

본 논문은 작업공기의 불확실성을 고려하는 PERT기법과 작업간 연결관계의 불확실성을 고려하는 PLET기법을 결합시켜 사업공기를 추정하는 통합 모델을 제안하고 확률적 타당성을 검증한다. 그리고 통합 모델의 일정계산방법을 제시하고 이를 실제사례에 적용하여 검증함으로써, 고위험 건설사업의 공정계획을 수립할 때 보다 폭넓고 다양한 위험요인들을 통합적으로 고려하는 확률적 사업공기 추정 방법을 제안하는 것이다.

### 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 다음과 같은 방법과 순서로 진행하였다.

첫째, 기존에 제안된 사업공기를 확률적으로 추정하는 대표적인 방법들인 PERT기법, GERT기법, Monte Carlo Simulation기법, Scenario기법, PLET기법에 대해 고찰하고, 이들의 제한사항과 한계점들을 분석한다.

둘째, 기존에 제안된 사업공기를 확률적으로 추정하는 방법들중 PERT기법과 PLET기법의 통합 필요성을 제시한다.

셋째, PERT기법과 PLET기법 통합 모델을 제시하고, 통합 모델에 대한 확률적 검증을 실시한다.

넷째, PERT기법과 PLET기법 통합 모델의 일정계산방법을 제안하고, 이를 실제사례를 통해 검증한다.

다섯째, PERT기법과 PLET기법 통합 모델의 기대효과와 향후 연구방향을 제시한다.

## 2. 기존 확률적 공기 추정 방법 고찰

### 2.1 PERT기법

1958년 미국 해군(US Navy)의 Polaris 미사일 시스템 프로그램에 도입된 PERT (Project Evaluation and Review Technique)기법은 전체 사업공기와 비용 산정을 위한 경험적인 비용과 일정 정보가 없을 경우 계획수립을 지원하기 위해 제안되었다(Callahan 1992). PERT기법은 주공정선을 찾아 집중 관리한다는 개념에서 CPM기법과 동일하며, ADM (Arrow Diagramming Method) 형식으로 표현된다. CPM기법과 PERT기법의 차이점은 CPM기법에서 작업은 매우 작은 분산을 갖는 공기로 가정하지만, PERT기법은 상대적으로 매우 큰 분산을 갖는 분포로 공기를 정의한다. 따라서 PERT기법은 네트워크를 확률개념으로 분석하므로 경험이 부족하거나 새로운 연구개발사업의 공정관리 도구로 사용할 때 매우 적합하다(Harris 1978). 최근에는 건설환경의 불확실성이 점점 증가하면서 건설사업 위험관리(risk management)의 공정 불확실성과 위험을 분석하고 관리하는 기법으로 폭넓게

적용되고 있다(Kim 2010).

PERT 네트워크의 작업공기는 확률분포를 갖는 것으로 다음의 세 가지 예상 작업시간으로 추정하는데, 각각 가장 가능성이 높은 공기(most likely, m), 가장 낙관적인 공기(optimistic, a), 가장 비관적인 공기(pessimistic, b)이다. 이를 기반으로 작업의 평균공기( $t_e$ ), 표준편차( $\sigma$ ), 분산( $\sigma^2$ )은 다음과 같이 산정한다.

$$\text{Average Time : } t_e = \frac{a+4m+b}{6} \quad (1)$$

$$\text{Standard Deviation : } \sigma = \frac{b-a}{6} \quad (2)$$

$$\text{Variance : } \sigma^2 = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2 \quad (3)$$

PERT기법의 가장 큰 특징은 전체 사업공기를 준수하기 위해 주요 완료시점에 도달하는 기간을 확률적으로 평가할 수 있도록 함으로써, 공기를 단정적으로 추정하는 CPM기법에 비해 더 많은 정보를 제공한다는 것이다. 그러나 PERT 기법은 ADM 네트워크 형식에 기반함으로써 작업간 연결관계가 Finish-to-Start (FS) 논리로 제한된다. 작업간 논리가 FS에만 국한될 경우, 실제 작업간 논리를 정확하게 반영하지 못하기 때문에 PERT 네트워크 분석의 신뢰성도 떨어질 수밖에 없다.

### 2.2 GERT기법

GERT (Graphical Evaluation and Review Technique)기법은 네트워크 논리(network logic)와 작업공기 추정을 확률적으로 처리할 수 있는 네트워크 분석 기법으로 퍼듀대학교(Purdue University)의 Alan B. Pritsker 교수에 의해 1966년 제안되었다. GERT기법의 접근방법은 PERT/CPM 제한사항들에 대해 해결방안을 제시하고 있으며 작업간 반복논리(loop logic)를 허용한다. GERT기법은 PERT기법과 유사하지만 PERT기법에서 제공하지 않는 단정적(deterministic) 그리고 확률적(probabilistic) 가지치기(branching)가 가능하다(Pritsker 1966).

### 2.3 Monte Carlo Simulation기법

몬테 카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)기법은 난수발생기(random number generator)를 통해 데이터(data)를 창출하는 과정으로, 알려진 또는 가정된 확률분포를 갖는 불확실한 변수들을 포함하는 문제를 모델화시키고, 난수발생기를 통해 실제상황을 반복적으로 구현함으로써 현실적으로 실현시킬 수 없는 상황을 예측하는데 활용하는 확률적 분석기법이다. 이러한 몬테 카를로 시뮬레이션기법은 서로 다른 작업들과 경로(path)들의 중요도(criticality) 뿐만 아니라 사업공기의 확률적 분포를 추정하는데 많이 활용되고 있으며

(Forgionne 1986), 공정관리와 위험요인을 연계시킨 공정분석(Hullet 2009), 사업 예비 공기(project contingency time) 산정 및 배분(Barraza 2011) 등에도 많이 적용되고 있다.

### 2.4 Scenario기법

시나리오(Scenario)기법은 전체 공정계획 또는 일부 작업 공기에 특별한 불확실성(significant uncertainty)이 존재할 경우 프로젝트를 확률적으로 모델링(modelling)하고 분석하는 기법이다. 불확실한 네트워크 구조(uncertain network scenario)는 발생 확률을 갖는 네트워크 시나리오에 의해 표현되는데, 각각의 네트워크 시나리오는 확률로 가지치기(branching)되며, 가지치기된 네트워크 시나리오중 기대값(expected value)이 가장 큰 네트워크 시나리오를 선택하게 된다(Bruce Pollack-Johnson et al, 2005).

### 2.5 PLET기법

PLET (Probabilistic Linkage Evaluation Technique)기법은 BDM (Beeline Diagramming Method)기법을 기반으로 불확실성을 내포한 작업간 연결관계를 확률적으로 평가하여 전체 사업공기를 추정하는 방법이다(Kim 2014). PLET기법에서 선·후행작업간 확률적 연결관계 표현형식은 Fig. 1과 같다.

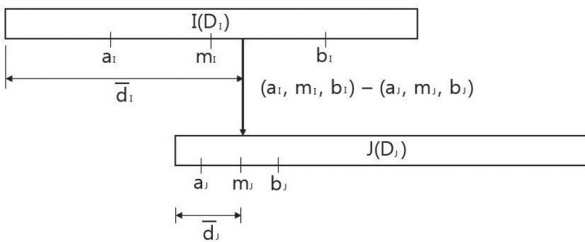


Fig. 1. Linkage Representation of PLET

Fig. 1에서 BDM기법의 연결관계 'N-N' 형식은 PLET기법의 확률적인 연결관계 '(a<sub>i</sub>, m<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>)-(a<sub>j</sub>, m<sub>j</sub>, b<sub>j</sub>)' 형식으로 변경되는데, 앞의 '(a<sub>i</sub>, m<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>)'는 선행작업 'I'가 착수된 후 불확실한 경과일수를 표시하고, 뒤의 '(a<sub>j</sub>, m<sub>j</sub>, b<sub>j</sub>)'는 후행작업 'J'의 경과일수를 표시한다. 그리고 'a'는 가장 낙관적인 경과일수, 'm'은 가장 가능성이 높은 경과일수, 'b'는 가장 비관적인 경과일수를 각각 표시하고, 그림 1에서 'd<sub>i</sub>'와 'd<sub>j</sub>'는 각각 선·후행작업들의 평균경과일수를 표현하는데, 각각의 평균경과일수(d), 경과일수의 표준편차(σ<sub>d</sub>) 및 분산(σ<sub>d</sub><sup>2</sup>)을 계산하는 공식은 (4), (5), (6)과 같다.

$$\text{Average Elapsed Days} : \bar{d} = \frac{a+4m+b}{6} \quad (4)$$

$$\text{Standard Deviation} : \sigma_d = \frac{b-a}{6} \quad (5)$$

$$\text{Variance} : \sigma_d^2 = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2 \quad (6)$$

### 2.6 기존 기법들의 제한사항 및 한계

앞서 기술한 기존의 확률적 공기 추정 방법들을 주요 항목별로 비교하면 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of Probabilistic Project Duration Estimating Techniques

No	Comparison Items	PERT	GERT	Monte Carlo Simulation	Scenario	PLET
1	Probabilistic Time Estimation	○	○	○	○	×
2	Linkage Overlapping	×	×	×	×	○
3	Probabilistic Linkage Estimation	×	×	×	×	○

첫째 확률적 작업공기 추정이 가능한지 여부이다. PERT, GERT, Monte Carlo Simulation, Scenario기법은 작업공기에 대한 확률적 추정이 가능하지만, PLET기법은 작업공기에 대한 확률적 추정은 불가능하다.

둘째 작업간 중복관계 표현이 가능한지 여부이다. PERT, GERT, Monte Carlo Simulation, Scenario기법은 작업간 연결관계를 "FSO"관계로만 표현하므로 작업간 중복관계 표현은 불가능하다. 그러나 PLET기법은 BDM기법을 기반으로 하기 때문에 작업간 중복관계를 자유롭게 표현할 수 있다.

셋째 작업간 연결관계를 확률적으로 평가할 수 있는지 여부이다. PERT, GERT, Monte Carlo Simulation, Scenario기법은 작업간 연결관계가 "FSO"관계이므로 연결관계에 대한 확률적 평가는 원칙적으로 불가능하다. 반면에 PLET기법은 BDM기법으로 표현하는 작업간 연결관계에 대해 확률적 추정이 가능하다.

이상의 기존 공기 추정 방법들을 주요 항목별 비교한 결과 PERT, GERT, Monte Carlo Simulation, Scenario기법들은 작업공기의 확률적 추정은 가능하지만 작업간 중복관계를 표현할 수 없을 뿐만 아니라, 작업간 연결관계에 대한 확률적 추정은 불가능하다. 반면에 PLET기법은 BDM기법을 기반으로 하고 있어 작업간 중복관계를 자유롭게 표현할 수 있는 동시에, 작업간 연결관계에 대한 확률적 추정도 가능하다.

## 3. 확률적 공기 추정 방법 통합 필요성

### 3.1 PERT와 PLET기법 통합 필요성

고위험 건설사업에서 공정계획을 수립할 때 고려해야할 위험요인들은 매우 다양하고 광범위하다. 그런데 이러한 위험요인들은 작업공기와 더불어 작업간 연결관계에도 존재할 수 있다.

앞서 2.6절에서 기술한 바대로 PERT기법을 비롯한 GERT 기법, Monte Carlo Simulation기법, Scenario기법들은 작업 공기에 대한 확률적인 추정은 가능하지만, 작업간 연계관계를 단순히 'FSO'관계로만 추정하므로 작업간 중복관계를 표현할 수 없을 뿐만 아니라 작업간 연결관계에 대한 확률적 추정도 불가능하다. 건설사업의 CPM 공정계획을 업무분류체계(work breakdown structure, WBS)를 기준으로 수립할 때 작업간 다양한 중복관계 표현은 불가피하다(Kim 2015). PLET기법은 BDM기법으로 표현된 작업간 중복관계를 확률적으로 추정하는 방법이지만, PLET기법 역시 작업간 연결관계의 불확실성만을 고려할 뿐 작업공기에 대한 불확실성은 고려하지 않으므로 완전한 사업공기 추정방법이라 할 수 없다. 따라서 PERT기법을 통해 작업공기에 대한 불확실성을 고려함과 동시에 PLET기법을 통해 작업간 연결관계의 불확실성을 동시에 고려한다면 고위험 건설사업의 확률적 공기 추정의 신뢰성을 대폭 향상시킬 수 있을 것이다. 따라서 작업공기의 불확실성을 고려하는 PERT기법과 작업간 연결관계의 불확실성을 고려하는 PLET기법을 결합시킨 새로운 사업공기 추정 통합모델을 모색할 필요가 있다.

## 4. PERT와 PLET기법 통합 모델

### 4.1 PERT와 PLET기법 통합 모델의 표현

Fig. 2는 PERT와 PLET기법을 결합시킨 통합 모델을 일반화시켜 표현하고 있다.

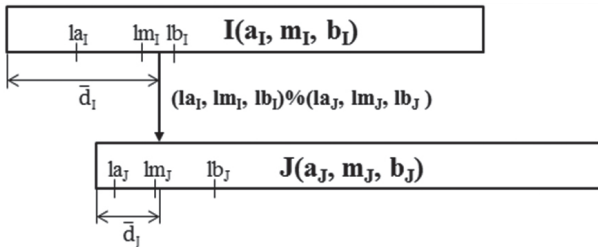


Fig. 2. Integration Model of PERT & PLET

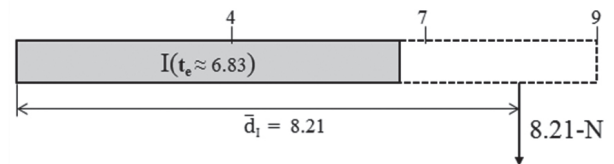
Fig. 2의 통합 모델에서 첫째 작업 I와 J의 작업공기는 PERT기법을 적용하기 위해 가장 가능성이 높은 공기(most likely, m), 가장 낙관적인 공기(optimistic, a), 가장 비관적인 공기(pessimistic, b)로 삼점으로 추정(three points estimate)한다. 선행작업 I의 삼점 추정은  $I(a_i, m_i, b_i)$ 로 후행작업 J의 삼점 추정은  $J(a_j, m_j, b_j)$ 로 표현한다. 그리고 둘째 작업 I와 J간 연결관계는 PLET기법을 적용하기 위해 BDM기법의 연결관계 표현방법중 'N%' 형식을 적용하여  $(la_i, lm_i, lb_i)%(la_j, lm_j, lb_j)$ 으로 표현하는데, 앞의  $(la_i, lm_i, lb_i)$ 는 선행작업 'I'가 착수된 후 경과비율을 삼점 추정한 표시이며, 뒤의  $(la_j, lm_j, lb_j)$ 는 후행작업 'J'가 착수된 후 경과비율을 삼점

추정한 표시이다. 여기서 'la'는 가장 낙관적인 경과비율, 'lm'은 가장 가능성이 높은 경과비율, 'lb'는 가장 비관적인 경과비율을 각각 표시하고 있으며,  $\bar{d}_i$ 는 선행작업 'I'가 착수된 후 평균경과일수이고,  $\bar{d}_j$ 는 후행작업 'J'가 착수된 후 평균경과일수를 표시한다.

#### 4.1.1 BDM기법의 연결관계 'N%' 형식 적용

BDM기법에서 중복되는 선·후행작업간 연결관계 표현방법은 경과일수에 의한 'N-N' 형식과 경과비율에 의한 'N%' 형식이 있다.(Kim, 2010) 이 두 가지 형식 중 PLET기법에서는 기본적으로 'N-N' 형식을 연결관계 기본 표현형식으로 적용하고 있다(Kim 2014). 이는 PLET기법에서는 선·후행작업들의 작업공기는 변하지 않는다고 전제한 다음 선·후행작업간 연결관계의 불확실성만을 고려하기 때문이다. 즉 연결관계를 'N-N' 형식으로 표현하더라도 선·후행작업의 연결관계 평균경과일수  $\bar{d}_i$ 와  $\bar{d}_j$ 는 선행작업공기  $D_i$ 와 후행작업공기  $D_j$ 를 초과하지 않기 때문이다. ( $0 \leq \bar{d}_i \leq D_i, 0 \leq \bar{d}_j \leq D_j$ ).

그러나 PERT와 PLET기법 통합 모델에서는 작업공기를 PERT기법에 의해 삼점으로 추정하기 때문에 평균작업공기가 변화하므로 선·후행작업간 연결관계를 'N-N' 형식으로 표현할 경우 평균경과일수가 평균작업공기를 초과하는 경우가 발생할 수 있다. 예를 들어 Fig. 3(a)와 같이 선행작업 I의 작업공기를 '(4, 7, 9)' (점선 표시)로 삼점 추정하였다면 식(1)에 의해 평균작업공기( $t_e$ )는 약 '6.83'(색채음 표시)으로 계산된다. 그런데 만약 선행작업 I의 착수 후 평균경과일수( $\bar{d}_i$ )가 약 '8.21'로 계산되어 이를 'N-N' 형식인 '8.21-N'으로 표현하였다면, 평균경과일수( $\bar{d}_i$ )가 평균작업공기( $t_e$ )를 초과하는 ' $\bar{d}_i \approx 8.21 > (t_e \approx 6.83)$ ' 모순이 발생하게 된다.



(a) Example of N-N

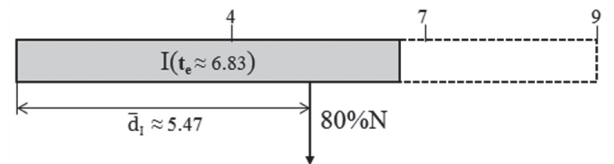


Fig. 3. Difference of N-N & N%N

따라서 PERT와 PLET기법 통합 모델에서 중복되는 선·후행작업간 연결관계의 경과일수가 평균작업공기 범위 밖에 위치하는 모순을 피하기 위해 평균작업공기를 경과비율에 의한 'N%' 형식으로 표현할 필요가 있다 ( $0\% \leq N \leq 100\%$ ). Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에서 추정된 선행작업 I의 평균작업공

기중 80%시점까지의 평균경과일수를 '80%N'으로 표현한 예를 보여주고 있다. Fig. 3(b)에서 선행작업 I의 평균경과일수( $\bar{d}_i$ )는 작업이 착수된 후 '80%' 경과된 시점인 약 '5.47'로 계산되어 평균작업공기( $t_e \approx 6.83$ ) 범위 내에 위치하게 된다. 즉 'N%N' 형식으로 표현되는 평균경과일수( $\bar{d}_i$ )는 평균작업공기( $t_e$ )를 초과할 수 없으므로,  $0 \leq \bar{d}_i \leq t_e$ , PERT와 PLET기법 통합 모델에서 중복되는 선·후행작업간 연결관계는 반드시 'N%N' 형식으로 표현되어야만 한다.

#### 4.1.2 PERT와 PLET기법 통합 모델의 평균작업공기 및 평균경과비를 산정방법

PERT와 PLET기법 통합 모델의 평균작업공기 및 평균경과일수를 산정하는 방법은 다음과 같다. 첫째 평균작업공기는 PERT기법의 평균공기, 평균공기의 분산 및 표준편차를 산정하는 식(1), (2), (3)을 적용하여 계산한다. 둘째 평균경과일수는 PLET기법의 평균경과일수, 경과일수의 분산과 표준편차를 계산하는 식(4), (5), (6)을 적용하여 산정한다. 다만 PLET기법만을 표현한 Fig. 1과 달리 PERT와 PLET기법 통합 모델을 표현한 Fig. 2에서는 연결관계 표현이 '(la<sub>i</sub>, lm<sub>i</sub>, lb<sub>i</sub>)%(la<sub>j</sub>, lm<sub>j</sub>, lb<sub>j</sub>)'로 변경되었다. 따라서 식(4), (5), (6)에서 평균작업공기( $t_e$ )와 경과비율(la, lm, lb)을 곱하여 경과일수를 계산한 다음, 평균경과일수( $\bar{d}$ ), 평균경과일수의 표준편차( $\sigma_d$ ) 및 분산( $\sigma_d^2$ )을 산정해야 하므로 식(4), (5), (6)은 식(7), (8), (9)와 같이 변경되어야 한다.

$$\text{Average Elapsed Days : } \bar{d} = \frac{t_e \times (la + 4lm + lb) \div 100}{6} \quad (7)$$

$$\text{Standard Deviation : } \sigma_d = \frac{t_e \times (lb - la) \div 100}{6} \quad (8)$$

$$\text{Variance : } \sigma_d^2 = \left( \frac{t_e \times (lb - la) \div 100}{6} \right)^2 \quad (9)$$

### 4.2 PERT와 PLET기법 통합 모델 일정계산 방법

#### 4.2.1 PERT와 PLET기법 통합 모델의 확률분포 검증

PERT기법에서 네트워크의 일정계산은 각 작업의 평균작업공기를 단순히 더하거나 빼서 전진계산과 후진계산하고, 전체 네트워크 공기의 분산은 각 작업들의 분산을 단순히 더하여 계산한다. 이는 PERT 네트워크에서 각각의 작업들은 확률분포가 상호 완전 독립적(exclusively independent)이라 전제하기 때문이다. PLET기법 역시 연결관계의 확률분포가 상호 독립적이기 때문에 PERT기법의 일정계산방법을 그대로 적용하고 있다(Kim 2014).

그러나 PERT와 PLET기법 통합 모델에서 평균작업공기와 연결관계가 상호 완전 독립적인지 검증할 필요가 있다. 왜냐하면 선·후행작업간 연결관계의 경과일수가 선·후행작업의 평균작업공기에 대한 비율로 계산되므로, 작업공

기는 연결관계에 직·간접적으로 영향을 미치고 있기 때문이다. 만약 평균작업공기와 연결관계가 상호 결합 확률분포(joint probability distribution)이거나 혹은 조건부 확률분포(conditional probability distribution)일 경우, PERT와 PLET기법 통합 모델은 기존의 PERT기법이나 PLET기법의 일정계산방법을 그대로 적용할 수 없을 것이다.

임의의 두 사건 A, B에 대해 두 사건이 모두 발생하는 사건을 결합 사건(joint event)이라 하고, 결합 사건이 발생할 확률을 결합 확률(joint probability)이라 하며 'P(AB)'로 표현한다(Cheong 2012). 그리고 어떤 사건 B가 발생하였을 때 사건 A가 발생할 확률은 사건 B의 영향을 받아 변하는데 이를 조건부 확률(conditional probability)이라 하며 'P(A|B)'로 표현한다(Walpole et al, 1985). 만약 사건 A가 발생하는데 사건 B가 영향을 주지 않으면 두 사건은 서로 독립(independent)이라 하며 'P(A|B)=P(A)'로 표현한다(Walpole et al, 1985). 또한 두 사건의 확률이 동시에 발생하면 두 확률을 곱하며, 두 사건의 확률이 독립적일 경우 두 확률을 더하게 된다(Ahn 2014).

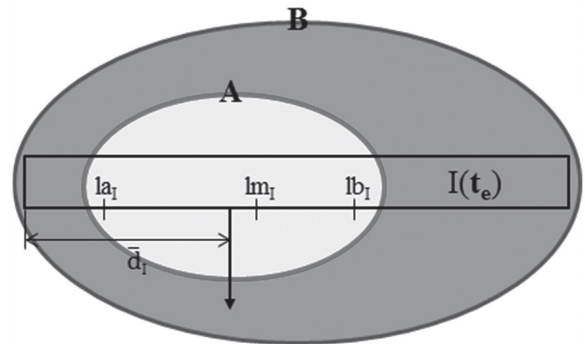


Fig. 4. Probability Distributions of Activity Duration & Linkage

Fig. 4는 PERT와 PLET기법 통합 모델에서 작업 I의 평균작업공기( $t_e$ ) 확률분포 B와 작업 I와 연결된 평균경과일수( $\bar{d}_i$ ) 확률분포 A를 함께 보여주고 있다. Fig. 4에서 첫째 평균작업공기 확률분포 B가 확정된 다음, B 범위내에서 평균경과일수 확률분포 A가 결정되므로 확률분포 A와 B는 동시에 발생하지 않는다. 따라서 평균작업공기 확률분포와 평균경과일수 확률분포는 결합 분포가 아니다. 둘째 평균경과일수 확률분포 A는 평균작업공기 확률분포 B에 영향을 받으므로 조건부 확률이지만, 확률분포 A는 확률분포 B의 범위 내에서만 발생하기 때문에 'P(A|B)=P(A)'가 성립되므로 확률분포 A와 B는 상호 독립적이다.

이상의 확률분포 검증으로부터 평균작업공기 확률분포와 평균경과일수 확률분포는 조건부 확률이지만 상호 독립적이므로, PERT와 PLET기법 통합 모델의 일정계산방법은 기존의 PERT기법과 PLET기법의 일정계산방법을 그대로 적용할

수 있다. 즉 PERT와 PLET기법 통합 모델에서 네트워크의 일정계산은 평균작업공기와 평균경과일수를 단순히 더하거나 빼서 전진계산과 후진계산하고, 전체 네트워크 공기의 분산도 각 평균작업공기와 평균경과일수의 분산을 단순히 더해서 계산하면 된다.

### 4.2.2 전진계산

PERT와 PLET기법 통합 모델의 전진계산(forward pass computation)은 후행작업들의 조기일정인 조기착수일(ESD)과 조기완료일(EFD)을 계산하는 것으로, PLET기법의 전진계산방법을 적용한다(Kim 2014).

가장 먼저 선행작업 I 착수 후 평균경과일수  $\bar{d}_I$ 가 경과한 시점과 후행작업 J 착수 후 평균경과일수  $\bar{d}_J$ 가 경과한 시점이 연계되는 일대일(single versus single) 연결관계에서 후행작업의 ESD<sub>J</sub>와 EFD<sub>J</sub>를 산정하는 공식은 (10), (11)과 같다. 여기서 ( $t_{eJ}$ )는 후행작업 J의 평균작업공기이다.

$$ESD_J = ESD_I + \bar{d}_I - \bar{d}_J \quad (10)$$

$$EFD_J = ESD_J + (t_{eJ}) \quad (11)$$

그 다음 PERT와 PLET기법 통합 모델에서 복수의 선행작업들이 하나의 후행작업에 합병(merge)하는 경우, PLET기법의 전진계산방법을 일반화시킨 공식 (12)를 적용하며, 식 (12)에서  $\forall I$ 는 모든 작업 I를 의미한다.

$$ESD_J = \text{Max}_{\forall I} ESD_I + \bar{d}_I - \bar{d}_J \quad (12)$$

### 4.2.3 후진계산

PERT와 PLET기법 통합 모델의 후진계산(backward pass computation)은 선행작업들의 만기일정인 만기착수일(LSD)과 만기완료일(LFD)을 계산하는 것으로, PLET기법의 후진계산방법을 적용한다(Kim 2014).

가장 먼저 선행작업 I 착수 후 평균경과일수  $\bar{d}_I$ 가 경과한 시점과 후행작업 J 착수 후 평균경과일수  $\bar{d}_J$ 가 경과한 시점이 연계되는 일대일 연결관계에서 선행작업의 LSD<sub>I</sub>와 LFD<sub>I</sub>를 산정하는 공식은 (13), (14)와 같다. 여기서 ( $t_{eI}$ )는 선행작업 I의 평균작업공기이다.

$$LSD_I = LSD_J + \bar{d}_J - \bar{d}_I \quad (13)$$

$$LFD_I = LSD_I + (t_{eI}) \quad (14)$$

그 다음 PERT와 PLET기법 통합 모델에서 하나의 선행작업이 복수의 후행작업들로 분산(burst)되는 경우, PLET기법의 후진계산방법을 일반화시킨 공식 (15)를 적용하며, 식 (15)에서  $\forall J$ 는 모든 작업 J를 의미한다.

$$LSD_I = \text{Min}_{\forall J} LSD_J + \bar{d}_J - \bar{d}_I \quad (15)$$

### 4.2.4 자유여유 및 전체여유 계산

PERT와 PLET기법 통합 모델의 자유여유(free float, FF)는 PERT기법의 Free Slack, PLET기법의 Free Float와 동일하며, 후행작업의 조기착수일에 영향을 주지 않으면서 선행작업이 갖는 여유시간으로 정의한다. 네트워크의 전진계산 과정에서 후행작업의 조기착수일(ESD)과 선행작업의 조기완료일(EFD) 사이에 차이가 발생하는데, 이를 Link Lag이라고 한다(Harris 1978). PERT와 PLET기법 통합 모델에서 Link Lag은 선·후행 작업 연계시점의 차이로서 식 (16)과 같이 정의할 수 있다.

$$LAG_{IJ} = (ESD_J + \bar{d}_J) - (ESD_I + \bar{d}_I) \quad (16)$$

자유여유(FF)는 작업이 갖는 최소의 Link Lag값이다(Harris 1978). 만약 선행작업 I가 다수의 후행작업 J와 연계되어 있다면, 작업 I의 자유여유 FF<sub>I</sub>는 최소의 LAG<sub>IJ</sub>이며 식 (17)과 같이 정의된다. 식 (17)에서  $\forall J$ 는 모든 작업 J를 의미한다.

$$FF_I = \text{Min}_{\forall J} LAG_{IJ} = \text{Min}_{\forall J} (ESD_J + \bar{d}_J) - (ESD_I + \bar{d}_I) \quad (17)$$

PERT와 PLET기법 통합 모델의 전체여유(total float, TF)는 PERT기법의 Total Slack, PLET기법의 Total Float와 동일하며, 후행작업의 조기착수일(ESD)에 영향을 주지만 전체 네트워크의 준공시점에 영향을 주지 않는 여유시간이다. 전체여유(TF)는 작업이 가질 수 있는 최대의 여유시간으로 전진계산과 후진계산의 차이로 계산한다. 즉 작업 I의 전체여유 TF<sub>I</sub>는 LSD<sub>I</sub>와 ESD<sub>I</sub>의 차이 또는 LFD<sub>I</sub>와 EFD<sub>I</sub>의 차이로서 식 (18)과 같다.

$$TF_I = LSD_I - ESD_I = LFD_I - EFD_I \quad (18)$$

### 4.2.5 공정선의 평균공기, 분산, 표준편차 계산

Fig. 5는 PERT와 PLET기법 통합 모델에서 작업들의 연결된 공정선(path)의 예인 작업 H-I-J-K-L을 보여주고 있다.

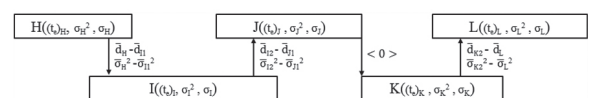


Fig. 5. Sample Path on Integration Model of PERT & PLET

Fig. 5 공정선에서 작업 H, I, J, K, L의 작업공기는 PERT 기법에 의해 삼점으로 추정되었고, 각각의 평균작업공기, 분산, 표준편차가 '작업명(평균공기( $t_e$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ ))' 형식으로 작업바(activity bar) 내부에 나타내고 있다. 그리고

작업간 연결관계 역시 PLET기법에 의해 삼점으로 추정되었고, 각각의 연결관계는 연결선(beeline) 우측에 ‘평균경과일수 ( $\bar{d}_n - \bar{d}_m$ ), 분산( $\sigma_n^2 - \sigma_m^2$ )’형식으로 나타내고 있다.

PERT와 PLET기법 통합 모델의 일정계산은 PLET 네트워크에서 작업들의 연결인 공정선(path)의 평균공기( $t_e$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ ) 산정방법과 유사하다. 다만 PERT기법에 의해 산정된 평균작업공기, 분산을 PLET기법에 의해 산정된 평균경과일수, 분산과 순차적으로 더해가는 과정이 추가된다.

가장 먼저 공정선 H-I-J-K-L의 평균공기( $t_e$ )<sub>HL</sub>를 산정하는 과정은 다음과 같다. 첫째 공정선의 모든 작업들의 평균작업공기( $t_e$ )를 산출한다. 둘째 공정선상 ‘N%N’ 연결관계의 경우 각 작업들의 ESD를 산정하는 식(10), (11)을 연속적으로 적용하여 각 작업의 ESD와 EFD를 산정한다. 셋째 공정선상 ‘<0>’ 연결관계가 포함되어 있을 경우 ‘N-N’ 형식의 ‘N-0’으로 표현할 수 있으므로 선행작업의 평균공기( $t_e$ )를 공정선의 평균공기에 추가한다. 넷째 공정선의 마지막 평균작업공기를 더한다. 이상의 과정을 식으로 표현하면 식 (19)와 같다(Kim 2015).

$$\begin{aligned}
 (t_e)_{HL} = & \sum \text{Apply 'Eq.(10),(11)'} \text{ (if 'N\%N')} \\
 & + \sum \text{Predecessor's Average Duration (if '<0>')} \\
 & + \sum \text{Last Activity's Average Duration} \quad (19)
 \end{aligned}$$

그리고 공정선 H-I-J-K-L의 평균공기에 대한 분산( $\sigma_{HL}^2$ )은 각 작업 연결선들의 평균작업공기의 분산과 평균경과일수의 분산 합으로 계산되며 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{HL}^2 = & \sigma_H^2 + \sigma_I^2 + \sigma_J^2 + \sigma_K^2 + \sigma_L^2 + \sigma_{HI}^2 + \sigma_{IJ}^2 + \sigma_{JK}^2 + \sigma_{KL}^2 \\
 & + \sigma_{K2}^2 + \sigma_{L}^2 + \sigma_{L}^2 \quad (20)
 \end{aligned}$$

공정선 H-I-J-K-L의 평균공기에 대한 표준편차( $\sigma_{HL}$ )는 식 (20)을 제곱근한 식(21)과 같다.

$$\sigma_{HL} = \sqrt{\sigma_{HL}^2} \quad (21)$$

### 5. PERT와 PLET기법 통합 모델 검증

본 연구에서 제안한 PERT와 PLET기법 통합 모델을 검증하기 위하여 공동주택 단위세대 마감공사중 바닥미장(plastering)이후 준공검사(inspection)작업들에 대해 PERT와 PLET기법 통합 모델 네트워크를 Fig. 6과 같이 구성하였다. Fig. 6의 PERT와 PLET기법 통합 모델 네트워크는 총 10개의 작업들과 총 11개의 작업간 연결관계로 구성되었다. Fig. 6에서 PERT기법으로 삼점 추정된 작업공기들은 7개이며, PLET기법으로 삼점 추정된 연결관계들은 8개이다.

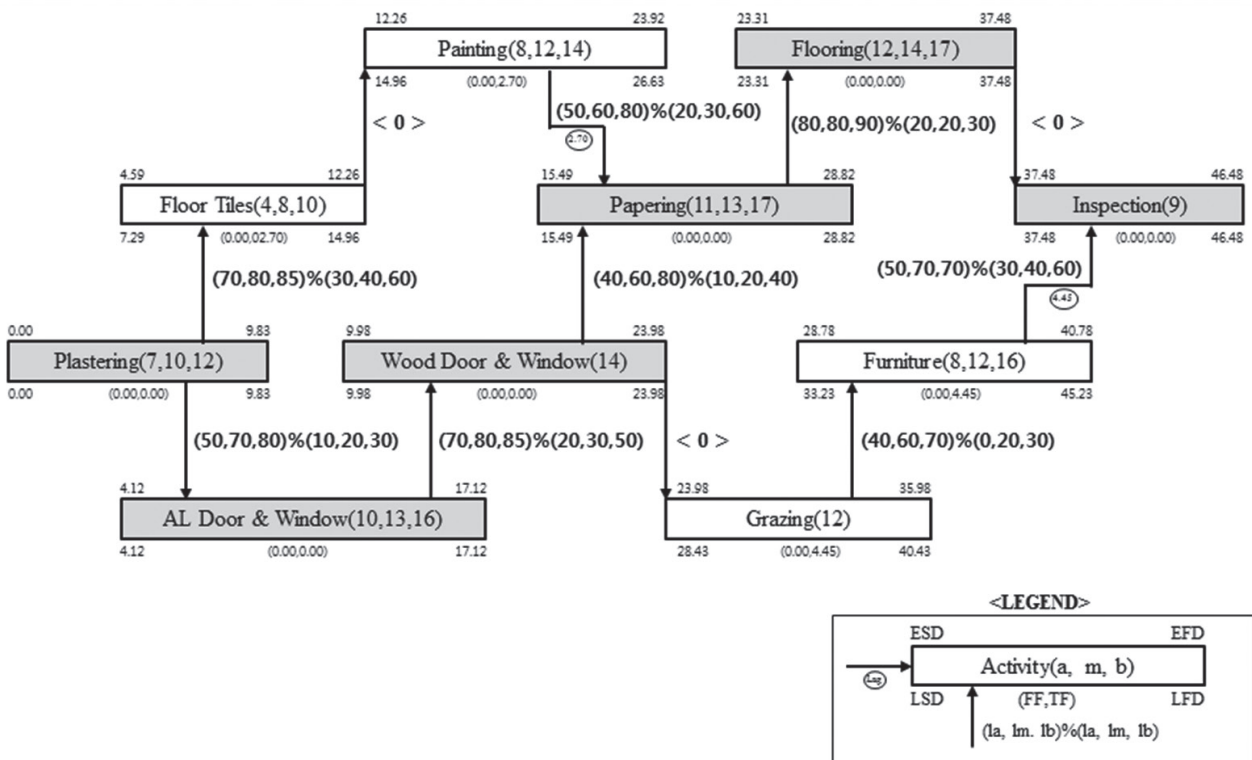


Fig. 6. Sample Network for Integration Model of PERT & PLET

Table 2. Schedule Computation Results of A Sample PERT+PLET Network

No	Activity Description ↳ Predecessors	Activity Duration						Linkages						Schedule Computation Dates and Floats						
		a	m	b	Avg	Var	S.D.	la	lm	lb	Avg	Var	S.D.	ESD	EFD	LSD	LFD	FF	TF	C.P.
		days			$t_e$	$\sigma^2$	$\sigma$	%			$\bar{d}$	$\sigma^2$	$\sigma$							
1	Plastering	7	10	12	9.83	0.69	0.83	-	-	-	-	-	-	0.00	9.83	0.00	9.83	0.00	0.00	○
	↳ None	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.70	12.54	-	-
2	Floor Tiles	4	8	10	7.67	1.00	1.00	30	40	60	3.19	0.15	0.38	4.59	12.26	7.29	14.96	0.00	2.70	
	↳ Plastering	7	10	12	9.83	0.69	0.83	70	80	85	7.78	0.06	0.25							
3	AL Door & Window	10	13	16	13.00	1.00	1.00	10	20	30	2.60	0.19	0.43	4.12	17.12	4.12	17.12	0.00	0.00	○
	↳ Plastering	7	10	12	9.83	0.69	0.83	50	70	80	6.72	0.24	0.49							
4	Painting	8	12	14	11.67	1.00	1.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00	12.26	23.92	14.96	26.63	2.70	2.70	
	↳ Floor Tiles	4	8	10	7.67	1.00	1.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00							
5	Wood Door & Window	14	14	14	14.00	0.00	0.00	20	30	50	4.43	0.49	0.70	9.98	23.98	9.98	23.98	0.00	0.00	○
	↳ AL Door & Window	10	13	16	13.00	1.00	1.00	70	80	85	10.29	0.11	0.33			16.43	29.43			
6	Papering	11	13	17	13.33	1.00	1.00	10	20	40	2.89	0.44	0.67	15.49	28.82	15.49	28.82	0.00	0.00	○
	↳ Wood Door & Window	14	14	14	14.00	0.00	0.00	40	60	80	8.40	0.87	0.93							
	Papering	11	13	17	13.33	1.00	1.00	40	50	60	6.67	0.20	0.44	12.78	26.12	15.49	28.82			
7	Grazing	12	12	12	12.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00	23.98	35.98	28.43	40.43	0.00	4.45	
	↳ Wood Door & Window	14	14	14	14.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00							
8	Flooring	12	14	17	14.17	0.69	0.83	20	20	30	3.07	0.06	0.24	23.31	37.48	23.31	37.48	0.00	0.00	○
	↳ Papering	11	13	17	13.33	1.00	1.00	80	80	90	10.89	0.05	0.22							
9	Furniture	8	12	16	12.00	1.78	1.33	0	20	30	2.20	0.36	0.60	28.78	40.78	33.23	45.23	4.45	4.45	
	↳ Grazing	12	12	12	12.00	0.00	0.00	40	60	70	7.00	0.36	0.60							
10	Inspection	9	9	9	9.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00	37.48	46.48	37.48	46.48	0.00	0.00	○
	↳ Flooring	12	14	17	14.17	0.69	0.83	0	0	0	0.00	0.00	0.00							
	Inspection	9	9	9	9.00	0.00	0.00	30	40	60	3.75	0.20	0.45	33.03	42.03	-	-			
10	↳ Furniture	8	12	16	12.00	1.78	1.33	50	70	70	8.00	0.16	0.40							

Fig. 6의 PERT와 PLET기법 통합 모델 네트워크에 대해 일정계산을 실행한 결과는 Table 2와 같다. Table 2는 PERT 기법에 의한 작업공기를 a, m, b로 삼점 추정하고, 각각의 평균작업공기( $t_e$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ )를 산정하였으며, 작업별 확률적 연결관계도 la, lm, lb로 삼점 추정하고, 각각의 평균경과일수( $\bar{d}$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ )를 산정하였다. 그리고 PERT와 PLET기법 통합 모델 일정계산 식(10)에서 (18)을 적용하여 각 작업들의 조기 및 만기일정(ESD, EFD, LSD, LFD), 여유시간(FF, TF)을 계산한 결과값을 보여주고 있다. 일정계산 결과 FF와 TF가 모두 '0'인 주공정선(C.P.)은 Plastering → AL Door & Window → WD Door & Window → Papering → Flooring → Inspection으로 나타났으며, 주공정선의 평균공기( $t_e$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ )는 공식 (19), (20), (21)을 적용하여 계산한 결과는 다음과 같다.

$$t_e = 0 + 6.72 - 2.60 + 10.29 - 4.43 + 8.40 - 2.89 + 7.00 - 2.20 + 14.17(' < 0 > ') + 9.00(\text{Last Activity}) \approx 46.48$$

$$\sigma^2 = 0.69 + 0.24 + 0.19 + 1.00 + 0.11 + 0.49 + 0.00 + 0.87 + 0.44 + 1.00 + 0.05 + 0.06 + 0.83 + 0.00 + 0.00 + 0.00 \approx 5.97$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{5.97} \approx 2.44$$

## 6. 결론

건설사업에서 미래에 발생할 모든 변수나 위험요인들을 정확하게 예측하는 것은 불가능하다. 특히 불확실성이 매우 높은 고위험 건설사업에서 사업에 내재된 혹은 사업에 영향을 미칠 외부 요인들을 완전하고 완벽하게 예측하는 것은 거의 불가능에 가깝다. 그럼에도 불구하고 사업을 준비하며 공정 계획을 수립할 때 예측 가능한 대부분의 변수와 위험요인들을 반영하는 것은 사업관리자들이 감당해야할 당연한 의무이자 엄중한 책임인 것이다.

사업의 불확실성을 감안하여 공정계획을 수립하는 방법은 다양하다. 그중에 PERT기법이 오랜 기간동안 가장 광범위하게 적용되어 왔고, PERT기법을 기반으로 파생된 많은 기법들이 있으며 그중 PERT기법과 몬테 카를로 시뮬레이션 기법을 혼합한 형태가 가장 일반적인 확률적 공기 추정 모델이라 할 수 있다. 그러나 PERT기법은 작업간 연결관계를 FS관계로 제한하여 작업공기의 불확실성만을 고려할 뿐 작업간 연결관계의 중복성이나 불확실성은 고려하지 않고 있기 때문에, PERT기법만으로 사업의 모든 불확실성을 고려하여 공정 계획을 수립하는 것은 불가능하다. PERT기법의 이러한 제한



사항을 극복하기 위하여 PLET기법이 제안되었으나, PLET기법은 작업간 중복성과 연결관계의 불확실성은 고려하지만 작업공기의 불확실성을 고려하지 않기 때문에 완벽한 확률적 공기 추정방법이라 할 수 없다.

본 논문에서는 PERT기법의 작업공기 불확실성 추정과 PLET기법의 작업간 연결관계의 불확실성 추정방법을 통합한 PERT와 PLET기법 통합 모델을 제안하였다. PERT와 PLET기법 통합 모델은 작업공기의 불확실성 뿐만 아니라 작업간 연결관계의 불확실성도 고려할 수 있기 때문에, 사업에서 예측 가능한 모든 변수와 위험요인들을 고려한 확률적 사업공기 추정이 가능하다.

공정관리는 사업의 진행과정을 논리적으로 예측 관리하는 것이지만, 미래란 항상 불확실하므로 불확실성을 관리하는 위험관리(risk management) 개념과 공정관리를 통합하려는 시도는 매우 자연스러운 현상이다. PERT기법, 몬테 카를로 시뮬레이션 기법, 다양한 파생기법들, 그리고 PLET기법과 본 논문에서 제안하는 PERT와 PLET기법의 통합 모델들 모두 공정관리와 위험관리를 통합시키고자 하는 노력의 일환이라 할 수 있다. 그러나 공정관리와 위험관리의 본질적인 특성 차이로 인해 아직 통합은 불완전하므로 앞으로 공정관리와 위험관리의 진정한 통합을 위해 추가적이며 혁신적인 연구와 노력이 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2015년 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호:520150039).

## References

- Ahn, S. C. (2014). "Forward-Looking Probability and Statistics" *Hanbit Media Inc.* Korea, pp. 15-26.
- Barraza, G. A. (2011). "Probabilistic Estimation and Allocation of Project Time Contingency" *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, USA.
- Bruce, P. J., and Matthew, J. L. (2005). "Project Planning Under Uncertainty Using Scenario Analysis" *Project Management Journal*, PMI, pp. 15-26.
- Callahan, M. T., Quackenbush, D. G., and Rowings, J. E. (1992). "Construction Project Scheduling" *McGraw-Hill*, USA.
- Cheong, H. Y. (2012). "Probability, Random Variable and Random Process" *Hanbit Media Inc.* Korea, pp. 15-26.
- Edwards, L. (1995). "Practical Risk Management in the Construction Industry" *Thomas Telford*, England.
- Forgionne, G. A. (1985). "Quantitative Decision Making" *Wadsworth Inc.*, USA.
- Harris, R. B. (1978). "Precedence and Arrow Networking Techniques for Construction" *John Wiley & Sons*, USA.
- Hullet, D. T. (2009). "Practical Schedule Risk Analysis" *Gower Publishing Ltd.*, England.
- Kim, S. (2010). "Advanced Scheduling Technique", *Kimoon-Dang*, Korea.
- Kim, S. (2010). "Construction Risk Management", *Kimoon-Dang*, Korea.
- Kim, S., Yoo, J., Kim, D., and Park, J. (2014). "TACT Scheduling & Monitoring of Apartment Finish Works based on the BDM Technique", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(2), Korea.
- Kim, S. (2014). "Estimation of Project Duration by Probabilistic Linkage Evaluation Technique (PLET)", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(6), Korea.
- Kim, S. (2015). "BDM Scheduling", *Munwoon-Dang*, Korea.
- Leach, L. (2003). "Schedule and cost buffer sizing; How to account for the bias between project performance and your model." *Project Management Journal*, USA.
- Peebles, P. Z. (2001). "Probability, Random Variables and Random Signal Principles" *McGraw-Hill*, USA.
- Pritsker, A. A. B. (1966). "GERT: Graphical Evaluation and Review Technique" *National Aeronautics and Space Administration*, USA.
- Smith, N. J. (1999). "Managing Risk in Construction Project" *Blackwell Science*, USA.
- Walpole, R. E., and Myers, R. H., (1985). "Probability and Statistics for Engineers and Scientists-Third Edition" *Macmillan Publishing Company*, USA.

---

**요약 :** 대규모 복합 프로젝트(complex project) 또는 메가 프로젝트(mega project)들에서 확률적으로 공정계획을 수립하는 대표적인 방법이 PERT (Project Evaluation and Review Technique)기법이다. PERT기법은 작업공기의 불확실성에만 중점을 두고 작업간 연결관계는 Finish-to-Start(FS)관계로 제한되기 때문에 작업간 중복관계가 존재할 경우 작업간 연결관계의 불확실성에 대한 확률적인 추정이 불가능하다. PERT기법의 이러한 한계를 극복하기 위해, 작업간 다양한 중복관계들의 불확실성을 고려하여 사업전체 공기를 추정하는 방법으로 PLET (Probabilistic Linkage Evaluation Technique)기법을 제안되었다. 그러나 PLET 기법에 의한 사업공기 추정은 작업간 연결관계의 불확실성만을 고려할 뿐, PERT기법에서의 작업공기에 대한 불확실성은 고려하지 않으므로, 완전한 사업공기 추정방법이라 할 수 없다. 본 논문은 작업공기의 불확실성을 고려하는 PERT기법과 작업간 연결관계의 불확실성을 고려하는 PLET기법을 결합시켜 사업공기를 추정하는 통합 모델을 제안하고 확률적 타당성을 검증한다. 그리고 통합 모델의 일정계산방법을 제시하고 이를 실제사례에 적용하여 검증함으로써, 고위험 건설사업의 공정계획을 수립할 때 보다 폭넓고 다양한 위험요인들을 통합적으로 고려하는 확률적 사업공기 추정 방법을 제안하는 것이다.

**키워드 :** PDM, BDM, 확률적 추정, PERT, PLET

---