

# 확률적 연결관계 평가기법(PLET)에 의한 사업공기 추정

김선규\*

\*강원대학교 건축공학과

## Estimation of Project Duration by Probabilistic Linkage Evaluation Technique (PLET)

Kim, Seon-Gyoo\*

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Kangwon National University

**Abstract :** Generally, the most difficult works at scheduling are to estimate the duration of activities and linkages between them because the possibility that the duration and linkages could be exposed to the uncertainties is so high. When estimating a project duration, therefore, the probabilistic estimation of the duration as well as the probabilistic estimation of the linkages between activities should be considered concurrently. The PERT that is one of the most popular techniques applied for the probabilistic estimation of a project duration can not consider the uncertainties of the linkages because it only estimates the probabilistic duration limited to 'FS' relationship. The purpose of this study is to propose the new method "PLET" for stochastically estimating the project duration based on the probabilistic estimation of the BDM's relationships, and also provide more wide and various probabilistic information about the project duration by it.

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

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설사업의 공정계획은 미래에 벌어질 업무들을 분류하고 이들을 시간적인 관점에서 논리적으로 표현하는 것이다. 그러나 건설사업의 대부분은 실제 성과를 예측하고자 하는 관리자의 능력을 제한하는 예측 가능(predictable)하거나 예측 불가능한(unforeseen) 많은 위험요소(risks)들을 내포하고 있기 때문에(Leach 2003) 건설사업의 미래 즉, 건설사업의 공기를 정확하게 추정하는 것은 사실상 불가능하다. 그럼에도 불구하고 많은 연구자들은 건설사업에 잠재된 다양한 위험요소들을 감안하여 사업의 공기를 확률적으로 추정하는 다양한 방법들을 제안하였고, 그중 일부 기법들은 현재 실무에서 활발하게 적용되고 있다.

일반적으로 사업공기를 추정할 때 가장 중요하게 고려해

야 할 사항들이 작업별 공기(activity time)와 작업간 연결관계(linkage)이다. 왜냐하면 사업에 잠재된 위험요인들로 인해 작업공기와 작업간 연결관계가 불확실성에 노출될 가능성이 높기 때문이다. 다시 말해서 작업공기에 내재된 불확실성으로 인해 예상된 기간내에 완공될 수 있을지 단정할 수 없을 뿐만 아니라, 작업간 연결관계에 내재된 불확실성으로 인해 예상된 기간내에 완공될 수 있을지 단정할 수 없다는 것이다. 따라서 사업공기를 확률적으로 추정할 경우 작업공기에 대한 확률적인 추정뿐만 아니라 작업간 연결관계에 대한 확률적인 추정도 반드시 고려할 필요가 있다.

그동안 사업공기를 확률적으로 추정하는 대부분의 기법들은 작업공기의 불확실성에 중점을 두고 있으며, PERT(Project Evaluation and Review Technique)기법이 대표적이다. 그러나 PERT기법은 네트워크의 작업간 연결관계가 ADM(Arrow Diagramming Method)기법과 같이 Finish-to-Start(FS)관계로 제한되기 때문에 작업간 중복관계가 존재할 경우 작업간 연결관계에 대한 확률적인 추정은 불가능하다. 따라서 만약 작업간 연결관계를 확률적으로 추정하고자 할 경우 PERT기법은 이를 만족시킬 수 없다. 나아가 지금까지 네트워크에서 작업간 연결관계를 확률적으로 추정하는 연구가 진행되거나, 이를 기반으로 사업공기를 평가하는 기법이 제안된 사례는 없다.

\* Corresponding author: Kim, Seon-Gyoo, Department of Architectural Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 201-700, Korea  
E-mail: sg1208@kangwon.ac.kr  
Received September 2, 2014; revised September 11, 2014  
accepted September 29, 2014

본 연구는 작업간 중복관계를 자유롭게 표현할 수 있는 BDM(Beeline Diagramming Method)기법을 기반으로, 작업간 연결관계를 확률적으로 추정하여 전체 사업공기를 확률적으로 평가할 수 있는 새로운 방법인 “확률적 연결관계 평가 기법(Probabilistic Linkage Evaluation Technique, PLET)”을 제안하고, PLET을 통해 발주자를 포함한 건설사업 관계자들에게 사업공기에 대한 보다 폭넓고 다양한 확률적인 정보를 제공하는데 목적이 있다.

### 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 다음과 같은 방법과 순서로 진행하였다.

첫째, 지금까지 제안된 대표적인 확률적 사업공기 추정 방법에 대해 고찰하고, 이들의 제한사항과 한계점들을 분석한다.

둘째, 작업간 연결관계에 대한 확률적인 평가의 필요성을 제시한다.

셋째, BDM기법에서 확률적 연결관계 평가기법(PLET)의 기본 개념과 방법론을 제안한다.

넷째, PLET기법을 실제 사례를 통해 검증한다.

다섯째, PLET기법의 기대효과와 향후 연구방향을 제시한다.

본 연구의 범위는 작업간 연결관계에 대한 확률적인 추정으로 제한하며, PERT기법과 PLET기법의 통합은 고려하지 않는다.

## 2. 확률적 사업공기 평가 방법 고찰

CPM 네트워크에서 작업공기와 작업간 연결관계가 정확하게 표현되어 있다면 그 공정계획은 최고의 신뢰성을 확보하게 될 것이다. 그러나 공정관리 실무에서 공정계획을 수립할 때 가장 어려운 업무가 바로 작업공기와 작업간 연결관계를 추정하는 것이다. 그중 작업공기를 추정하는 일반적인 방법은 과거 경험자료를 활용하거나, 특정 작업을 위한 작업조와 투입 장비를 구성한 다음 일별 작업가능 물량을 도출하고, 이를 전체 작업물량에 적용하여 작업공기를 추정하는 것이다. 그러나 건설현장이란 과거 경험자료를 그대로 적용할 수 없는 비 반복적 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라, 외부 작업환경에 따른 수많은 변수들로 인해 정확한 작업공기 추정은 매우 어렵다. 특히 경험이 없거나 신규사업의 경우 정확한 공기 추정은 거의 불가능하다. 만약 발주자 또는 의사결정자가 부정확한 단정적인(deterministic) 사업공기보다 융통성이 많은 확률적인(probabilistic) 사업공기 정보를 요구할 경우 이를 만족시킬 방법론을 제시할 필요가 있다. 확률적인 공기추정 방법은 전체 사업공기 또는 주요 중간 완료시점들에 도달하는 시간을 확률적으로 평가하는 것으로서 그동안 PERT기법, GERT기법, 그리고 PERT기법과 Monte Carlo Simulation을

혼합한 응용기법 등 다양한 방법들이 제시되었으며, 그중 일부 기법은 현재 실무에서 활발하게 적용되고 있다.

### 2.1 PERT

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 공기로 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 기반 함으로써 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 GERT

GERT(Graphical Evaluation and Review Technique)는 네트워크 논리(network logic)와 작업공기 추정을 확률

적으로 처리할 수 있는 네트워크 분석 기법으로 퍼듀대학교(Purdue University)의 Alan B. Pritsker 교수에 의해 1966년 제안되었다. GERT 접근방법은 PERT/CPM 제한사항들에 대해 해결방안을 제시하고 있으며 작업간 반복논리(loop logic)를 허용한다(Pritsker 1966).

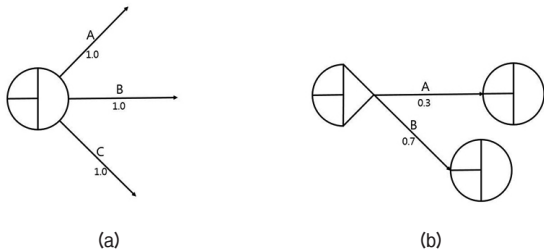


Fig. 1. Deterministic and Probabilistic Branching of GERT

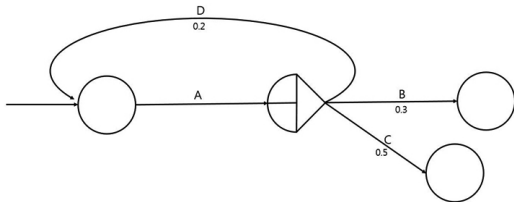


Fig. 2. Looping at GERT

GERT는 PERT와 유사하지만 PERT에서 제공하지 않는 단정적(deterministic) 그리고 확률적(probabilistic) 가지치기(branching)가 가능하다. Fig. 1(a)는 단정적 가지치기, Fig. 1(b)는 확률적 가지치기를 보여주고 있는데 Fig. 1(b)에서 각 가지들의 확률 합은 100%이어야 한다. 또한 Fig. 2는 CPM/PERT에서 불가능한 반복논리를 허용하는 것을 보여주고 있다(Lecture Material 2012). GERT기법의 가장 기본적인 결함은 GERT체계를 모델화시키기 위한 과정이 매우 복잡하다는 것으로, 학문적 범위를 넘어 실무에서 거의 활용되지 않고 있다(Wikipedia 2013).

### 2.3 RDM

RDM(Relational Diagramming Method)기법은 작업간 관계 구축과 중복의 이유(reason)에 초점을 맞추고 공정분석을 실시하는 CPM기법의 일종으로 2006년 제안되었다. 그림 3은 RDM기법으로 작성된 네트워크 예를 보여주고 있다.

RDM 기법은 기존 PDM기법에 주요 정보를 추가하는 것으로 기존 기법과 차별화하고 있으며, 다음과 같은 핵심 정보가 추가된다(Plotnick 2008).

첫째, 작업 내부에서 작업이 실제 착수하는 또는 변경되는 시점에 노드(node)를 추가한다.

둘째, 작업 연결선을 구속하는 원인/이유 코드(reason/why restraint code)를 추가한다.

셋째, 작업기간의 근거를 정의하는 기간코드(duration code)를 추가한다.

넷째, 작업간 구속(restraint)의 확장형식을 추가한다.

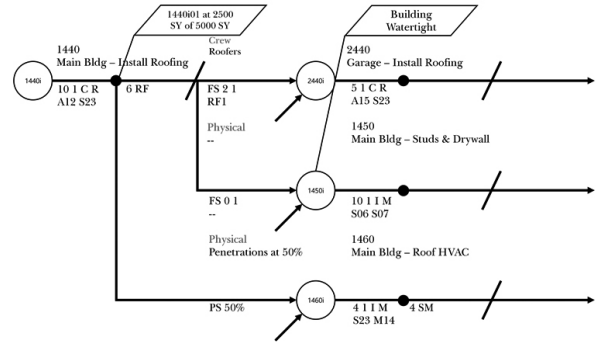


Fig. 3. Example of RDM

### 2.4 SAPA

SAPA(Stochastic Allocation of Project Allowance)기법은 예비사업기간(project time contingency)을 예측하고 그것을 작업수준에 배분하기 위해 2011년 제안되었다. SAPA기법은 사업 공정 시뮬레이션(project time simulation)의 결과를 기초로 PPD(project planned duration)와 PTD(project target duration)를 예측하는 것으로 단정적 또는 확률적 방법을 적용한다. SAPA기법에서 PPD와 PTD을 예측하는데 활용하는 방법은 PERT기법과 몬테카를로 시뮬레이션(monte-carlo simulation)기법이다(Barraza 2011). 일반적으로 사업공기를 확률적으로 추정할 때 가장 많이 적용하는 방법들이 SAPA기법과 같이 PERT기법과 몬테카를로 시뮬레이션기법을 혼용하는 것으로서 그동안 SAPA와 유사한 접근방법들이 많은 연구자들에 의해 발표되어 왔다.

### 2.5 기존 기법들의 제한사항 및 한계

앞서 기술한 기존 사업공기 추정기법과 연결관계 평가기법들을 주요 항목별로 비교하면 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of Activity's Time and Linkage Estimating Techniques

No	Comparison Items	PERT	GERT	RDM	SAPA
1	Probabilistic Time Estimation	○	○	×	○
2	Linkage Overlapping	×	×	○	×
3	Probabilistic Linkage Estimation	×	×	×	×

첫째 확률적 작업공기 추정이 가능한지 여부이다. PERT, GERT, SAPA기법은 작업공기에 대한 확률적 추정이 가능하지만 RDM기법은 불가능하다.



둘째 작업간 중복관계 표현이 가능한지 여부이다. PERT, GERT, SAPA기법은 작업간 연결관계를 “FSO”관계로만 표현하므로 작업간 중복관계 표현은 불가능하다. 그러나 RDM기법은 PDM기법을 기반으로 하기 때문에 작업간 중복관계를 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 중복관계를 원인/이유, 구속 등으로 매우 상세하게 기술할 수 있다.

셋째 작업간 연결관계를 확률적으로 평가할 수 있는지 여부이다. PERT, GERT, SAPA기법은 작업간 연결관계가 “FSO”관계이므로 연결관계에 대한 확률적 평가는 원칙적으로 불가능하다. RDM기법은 작업간 중복관계를 상세하게 설명할 수 있으나, 확률적 개념은 도입되어 있지 않다.

이상의 기존 사업공기 추정기법과 연결관계 평가기법들을 주요 항목별 비교한 결과는 다음과 같다. PERT, GERT, SAPA기법들은 작업공기의 확률적 추정은 가능하지만 작업간 연결관계에 대한 확률적 추정은 불가능하다. RDM기법은 작업간 중복관계에 대해 매우 상세하게 설명할 수 있지만, 작업간 연결관계에 대한 확률적 추정은 불가능하다.

### 3. 확률적 연결관계 평가기법(PLET)

#### 3.1 확률적 연결관계 평가 필요성

공정관리 실무에서 공정계획을 수립할 때 작업공기 추정만큼 중요하고 어려운 작업이 작업간 연결관계를 추정하는 것이다. 일반적으로 작업간 연결관계는 과거 유사한 프로젝트의 선·후행작업의 특성 또는 작업속도와 같은 경험자료들을 고려하여 판단하게 된다. 그러나 작업간 연결관계에 대한 추정 역시 작업공기의 추정과 마찬가지로 건설사업의 비반복적 특성과 외부 작업환경에 따른 다양한 변수들로 인해 선·후행 작업간 정확한 연결관계를 추정하는 것은 결코 쉽지 않다.

ADM기법에서는 작업간 논리가 Finish-to-Start(FS)관계만을 허용하므로 모든 작업의 선·후행을 결정하게 되면 단순히 작업간 연결관계를 “FSO”관계로만 연결하면 된다. 그러나 건설공사의 실제작업들은 선행작업이 완료되지 않아도 후행작업들이 착수되는 작업간 중복관계가 흔히 발생한다. 이러한 경우 ADM기법은 작업간 중복관계를 정확하게 표현할 수 없으므로 작업간 연결관계의 신뢰성은 저하될 수밖에 없다. 반면에 PDM기법은 선·후행 작업간 중복관계를 Start-to-Start(SS), Finish-to-Finish(FF), Start-to-Finish(SF)를 통해 정확하게 표현할 수 있으므로 작업간 연계관계에 대한 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 ADM기법과 PDM기법 모두 작업간 연결관계를 “0”을 포함한 단정적인 숫자로 표현하는데, 작업간 연결관계가 단정적인 숫자로 표현할 수 있을 정도로 단순하거나 기계적이지 않을 경우도 고려해야한다. 예를 들어 PDM기법에서 선·후행 작업간

연결관계가 선행작업이 착수되고 5일 후 후행작업이 착수되는 “SS5”라고 표현했는데, 반드시 그렇게 실행되리라는 보장보다 그렇게 될 가능성이 높다고 추정하는 경우가 대부분이다. 이러한 경우 작업간 연결관계 역시 작업공기와 마찬가지로 확률적인 추정이 필요하게 된다. 만약 작업간 연결관계를 확률적으로 추정할 수 있다면, 확률적으로 사업공기를 추정하기 위한 추가적인 옵션(option)을 제공할 뿐만 아니라, 확률적인 사업공기 추정의 신뢰성도 향상시킬 수 있게 될 것이다.

#### 3.2 BDM기법에서 불확실한 연결관계 추정

BDM기법은 선·후행 작업간 연결관계를 선행작업 중간 임의의 시점에서 후행작업 중간 임의의 시점으로 최단거리의 직선으로 표현하며, BDM기법에서 선·후행 연결관계를 표시하는 기본 형태는 ‘N-N’으로 표시하는 방법이다. ‘N-N’에서 선행되는 ‘N’은 선행작업이 착수 한 후 경과일수를 표시하고, 후행되는 ‘N’은 후행작업이 착수 한 후 경과일수를 표시한다. 중간의 ‘-’은 선·후행 작업의 경과일수를 분리하는 표시자(indicator)이다(Kim 2010).

‘N-N’형태에서 선행작업 ‘I’착수 후 경과일수와 후행작업 ‘J’착수 후 경과일수가 매우 불확실하다고 가정하고, 각각의 불확실한 경과일수들을 PERT기법의 작업일수 추정과 유사한 방법으로 세 종류의 시점들로 표현하면 다음과 같다. 즉 선행작업 착수 후 경과일수가 최소인 시점을 ‘a<sub>i</sub>’, 가장 가능성이 높은 시점을 ‘m<sub>i</sub>’, 최대인 시점을 ‘b<sub>i</sub>’라 하고, 후행작업 착수 후 경과일수가 최소인 시점을 ‘a<sub>j</sub>’, 가장 가능성이 높은 시점을 ‘m<sub>j</sub>’, 최대인 시점을 ‘b<sub>j</sub>’라고 표현하는 것이다.

Fig. 4는 선행작업과 후행작업의 불확실한 경과일수를 앞서 기술한 바대로 세 종류의 시점들로 표현하고, 선·후행작업의 최소, 최대 시점들을 연결한 네 종류의 BDM 연결관계를 표현하고 있다.

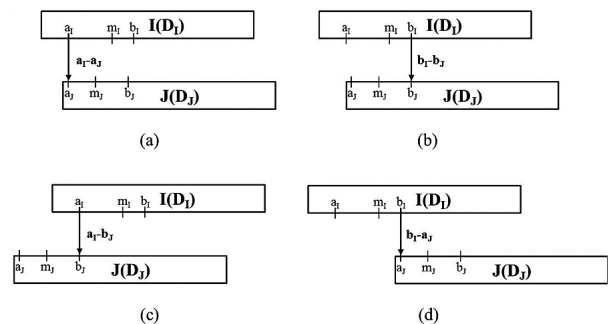


Fig. 4. Linkages of BDM under the Uncertainties

Fig. 4의 (a)는 선행작업 착수 후 경과일수가 최소인 시점(a<sub>i</sub>)과 후행작업 착수 후 경과일수가 최소인 시점(a<sub>j</sub>)을 연결한 연결관계 ‘a<sub>i</sub>-a<sub>j</sub>’를, (b)는 선행작업 착수 후 경과일수가 최

소인 시점( $a_i$ )과 후행작업 착수 후 경과일수가 최대인 시점( $b_i$ )을 연결한 연결관계 ' $a_i-b_i$ '를, (c)는 선행작업 착수 후 경과일수가 최대인 시점( $b_j$ )과 후행작업 착수 후 경과일수가 최소인 시점( $a_j$ )을 연결한 연결관계 ' $b_j-a_j$ '를, (d)는 선행작업 착수 후 경과일수가 최대인 시점( $b_j$ )과 후행작업 착수 후 경과일수가 최대인 시점( $b_i$ )을 연결한 연결관계 ' $b_i-b_j$ '를 각각 나타내고 있다. 이상과 같은 네 종류의 연결관계들을 통해 선·후행작업의 경과일수에 불확실성이 내재되어 있을 경우 연결관계의 시간적 변화 범위는 최소 (c)의 연결관계 ' $b_j-a_j$ '로부터 최대 (d)의 연결관계 ' $b_i-b_j$ '까지로 추정할 수 있다. 따라서 선·후작업간 연결관계를 추정할 때 불확실성이 잠재되어 있다면 각각의 경과시점들이 변화하게 되고, 이 같은 변화는 전체 네트워크의 일정계산에도 직접적인 영향을 미치게 될 것이다.

### 3.3 BDM기법 기반 확률적 연결관계 표현 형식

본 연구에서는 BDM기법을 기반으로 불확실성을 내포한 작업간 연결관계를 확률적으로 추정하여 전체 사업공기를 확률적으로 평가하는 새로운 방법으로 “확률적 연결관계 평가 기법(Probabilistic Linkage Evaluation Technique, PLET)”을 제안하며, PLET기법에서 선·후행작업간 확률적 연결관계 표현형식은 Fig. 5와 같다.

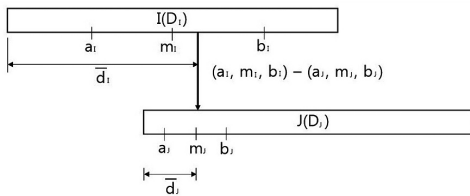


Fig. 5. Linkage Representation of PLET

Fig. 5에서 BDM기법의 연결관계 'N-N'형식은 PLET기법의 확률적인 연결관계 ' $(a_i, m_i, b_i) - (a_j, m_j, b_j)$ '형식으로 변경되었으며, 이에 대한 상세 설명은 Fig. 6과 같다.

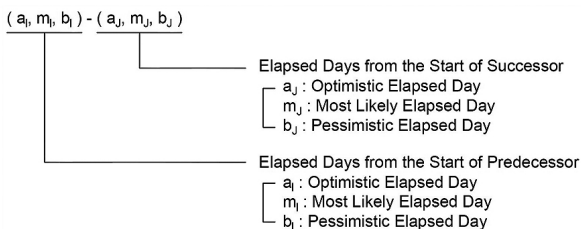


Fig. 6. Description of PLET Linkage

선행작업 'I'가 착수된 후 불확실한 경과일수는 ' $(a_i, m_i, b_i)$ '로, 후행작업 'J'의 경과일수는 ' $(a_j, m_j, b_j)$ '로 표시하며, 'a'는

가장 낙관적인 경과일수, 'm'은 가장 가능성이 높은 경과일수, 'b'는 가장 비관적인 경과일수를 각각 표시하고, Fig. 5에서 ' $\bar{d}_i$ '와 ' $\bar{d}_j$ '는 각각 선·후행작업들의 평균경과일수를 표시한다.

PERT 개념을 수립한 사람 중 하나인 Charles E. Clark (1962)은 PERT 작업공기는 가장 자연현상에 가까운 베타분포(beta distribution)로 추정하는 것이 합리적이고 베타분포를 갖는 작업의 평균공기 및 표준편차 분산을 계산하는 단순화시킨 수학적식을 식 (1), (2), (3)과 같이 제안하였다(Harris 1978). PLET기법에서 선·후행작업들의 확률적 경과일수 추정방법도 PERT기법의 작업공기 추정방법과 동일하게 세 종류의 시점들로 자연현상에 가장 가까운 베타분포로 추정하고자 한다. 따라서 PLET기법에서 경과일수를 추정하기 위한 계산식은 PERT기법의 수학적식을 그대로 적용하는 것이 가능하다. 그러므로 PLET기법의 평균경과일수( $\bar{d}$ ), 경과일수의 표준편차( $\sigma_d$ ) 및 분산( $\sigma_d^2$ )을 계산하는 공식은 식 (1), (2), (3)을 준용하여 다음과 같이 (4), (5), (6)으로 정의할 수 있다.

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

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

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

### 3.4 PLET기법 일정계산 방법

#### 3.4.1 전진계산

PLET기법의 전진계산(forward pass computation)은 후행작업들의 초기일정인 초기착수일(ESD)과 초기완료일(EFD)을 계산하는 것으로, PLET기법의 기반인 BDM기법의 전진계산방법을 그대로 적용한다.

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 (7), (8)과 같다. 여기서 D<sub>J</sub>는 후행작업의 작업공기이다.

$$ESD_J = ESD_I + \bar{d}_I - \bar{d}_J \quad (7)$$

$$EFD_J = ESD_J + D_J \quad (8)$$

그 다음 복수의 선행작업들이 하나의 후행작업에 합병(merge)하는 경우, PLET기법의 전진계산방법을 일반화시키면 공식 (9)와 같으며, 식 (9)에서  $\forall I$ 는 모든 작업 I를 의미한다.

$$ESD_J = \text{Max}_{\forall I} ESD_I + \bar{d}_I - \bar{d}_J \quad (9)$$

### 3.4.2 후진계산

PLET기법의 후진계산(backward pass computation)은 선행작업들의 만기일정인 만기착수일(LSD)과 만기완료일(LFD)을 계산하는 것으로, PLET기법의 기반인 BDM기법의 후진계산방법을 그대로 적용한다.

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 (10), (11)과 같다. 여기서 D<sub>I</sub>는 선행작업의 작업공기이다.

$$LSD_I = LSD_J + \bar{d}_J - \bar{d}_I \quad (10)$$

$$LFD_I = LSD_J + D_I \quad (11)$$

그 다음 하나의 선행작업이 복수의 후행작업들로 분산(burst)되는 경우, PLET기법의 후진계산방법을 일반화시키면 공식 (12)와 같으며, 식 (9)에서  $\forall J$ 는 모든 작업 J를 의미한다.

$$LSD_I = \text{Min}_{\forall J} LSD_J + \bar{d}_J - \bar{d}_I \quad (12)$$

### 3.4.3 자유여유 및 전체여유 계산

자유여유(free float, FF)는 후행작업의 조기착수일에 영향을 주지 않으면서 선행작업이 갖는 여유시간으로 정의한다. 네트워크의 전진계산 과정에서 후행작업의 조기착수일(ESD)과 선행작업의 조기완료일(EFD)사이엔 차이가 발생하는데, 이를 Link Lag이라고 한다(Harris 1978). PLET기법에서 Link Lag은 선 · 후행 작업 연계시점의 차이로서 식 (13)과 같이 정의할 수 있다.

$$LAG_{IJ} = (ESD_J + \bar{d}_J) - (ESD_I + \bar{d}_I) \quad (13)$$

자유여유는 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 (14)와 같이 정의된다. 식 (14)에서  $\forall J$ 는 모든 작업 J를 의미한다.

$$FF_I = \text{Min}_{\forall J} LAG_{IJ} = \text{Min}_{\forall J} (ESD_J + \bar{d}_J) - (ESD_I + \bar{d}_I) \quad (14)$$

전체여유(total float, TF)는 후행작업의 조기착수일(ESD)에 영향을 주지만 전체 네트워크의 준공시점에 영향을 주지 않는 여유시간이다. 전체여유는 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 (15)와 같다.

$$TF_I = LSD_I - ESD_I = LFD_I - EFD_I \quad (15)$$

### 3.4.4 공정선의 평균공기, 분산, 표준편차 계산

PLET기법의 일정계산은 BDM기법과 매우 유사하지만 PLET 네트워크에서 작업들의 연결인 공정선(path)의 평균공기( $t_e$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ ) 산정방법은 BDM기법과는 많은 차이가 있는데, 그것은 PLET기법의 경과일수를 확률분포로 가정하기 때문이다. 만약 PLET 네트워크에서 작업 H, I, J, K, L을 연결하는 공정선을 가정하고, 각 작업들의 평균경과일수와 분산을 표시하면 Fig. 7과 같다.

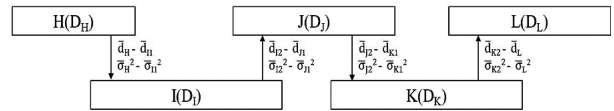


Fig. 7. Path's Average Elapsed Days and Variances of PLET

Fig. 7에서 공정선 H-I-J-K-L의 평균공기( $t_{eHL}$ )는 각 작업들의 ESD를 산정하는 공식 (7)을 연속적으로 적용한 후, 최종 작업의 공기를 더하는 식 (16)과 같이 계산된다. 단 공정선에 '〈0〉'관계가 존재할 경우, 'N-N'관계에서 선행작업 공기를 'N', 후행작업 공기를 '0'으로 하여, 해당 작업공기 'N'을 공정선의 평균공기에 추가시킨다.

$$(t_e)_{HL} = \bar{d}_H - \bar{d}_{I1} + \bar{d}_{I2} - \bar{d}_{J1} + \bar{d}_{J2} - \bar{d}_{K1} + \bar{d}_{K2} - \bar{d}_L + D_L \quad (16)$$

공정선 H-I-J-K-L의 평균공기에 대한 분산( $\sigma_{HL}^2$ )은 각 작업 연결선들의 평균경과일수에 대한 분산의 합으로 식 (17)과 같이 계산되며, 이에 대한 표준편차( $\sigma_{HL}$ )는 식 (18)과 같다.

$$\sigma_{HL}^2 = \sigma_H^2 + \sigma_{I1}^2 + \sigma_{I2}^2 + \sigma_{J1}^2 + \sigma_{J2}^2 + \sigma_{K1}^2 + \sigma_{K2}^2 + \sigma_L^2 \quad (17)$$

$$\sigma_{HL} = \sqrt{\sigma_{HL}^2} \quad (18)$$

## 4. 확률적 연결관계 평가기법 검증

본 연구에서 제안한 PLET기법을 검증하기 위하여 공동주택 단위세대 마감공사중 바닥미장(plastering)이후 작업들에 대해 PLET 네트워크를 Fig. 8과 같이 구성하였다. Fig. 8의 PLET 네트워크는 총 10개의 작업들과 총 11개의 작업간 연결관계로 구성되었고 그중 Fig. 6과 같은 확률적 연결관계는 8개이다. 예를 들어 선행작업 바닥타일(floor tiles)과 후행작업 도장(painting)은 '(7,9,10)-(0,1,3)'의 확률적 연결관계를 갖고 있는데, 이는 바닥타일작업이 착수된 후 가장 낙관적인 경과일수 7일, 가장 가능성 높은 경과일수 9일, 가장 비관적인 경과일수 10일인 시점으로 부터, 도장작업이 착수된 후 가장 낙관적인 경과일수 0일, 가장 가능성 높은 경과일수 1일, 가장 비관적인 경과일수 3일 시점으로 연계될 수 있음을 의미한다.

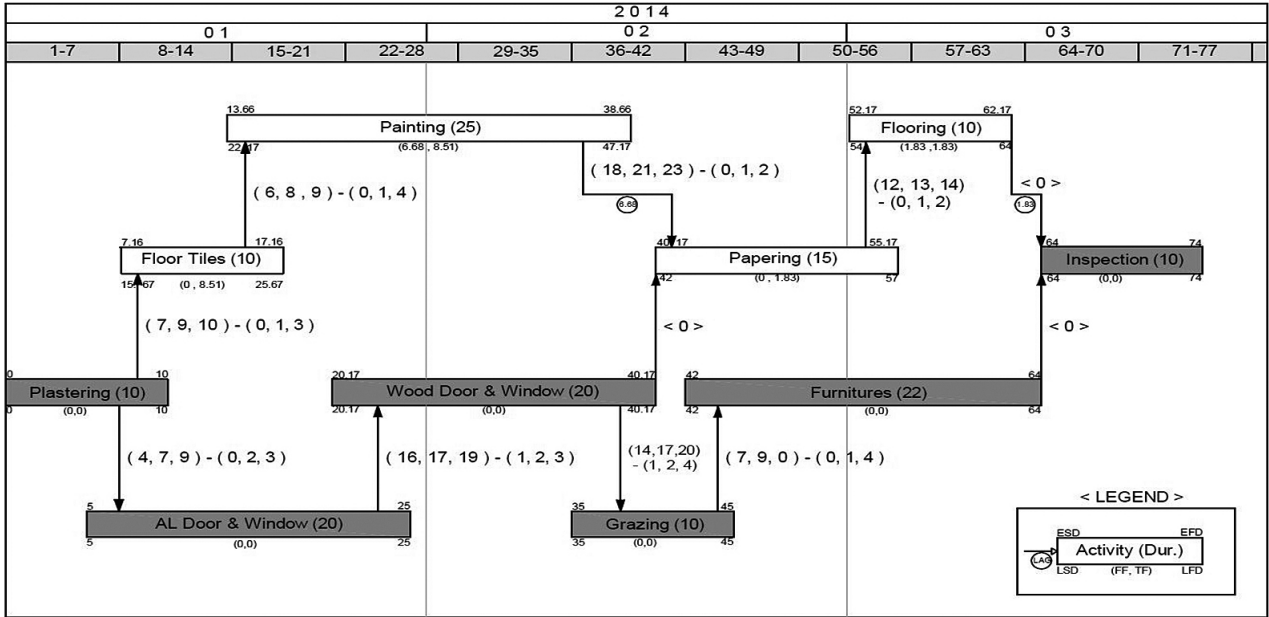


Fig. 8. A Sample PLET Network

Fig. 8 PLET 네트워크에 대해 일정계산을 실행한 결과는 Table 2와 같다. Table 2는 작업별 확률적 연결관계를 기준으로 본 연구에서 제안한 공식 (7)에서 (15)를 적용하여, 작업별 평균경과일수( $\bar{d}$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ ), 조기 및 만기일정(ESD, EFD, LSD, LFD), 여유시간(FF, TF)의 계산 결과를 보여주고 있다. 일정계산 결과 FF와 TF가 모두 '0'인 주 공정선(C.P.)은 Plastering → AL Door & Window → WD

Door & Window → Glazing → Furnitures → Inspection으로 나타났으며, 주공정선의 평균공기( $t_e$ ), 분산( $\sigma^2$ ), 표준편차( $\sigma$ )는 공식 (16), (17), (18)을 적용하여 계산하면 다음과 같다.

$$t_e = 6.83 - 1.83 + 17.17 - 2.00 + 17.00 - 2.17 + 8.33$$

$$1.33 + 22(' < 0 > ' 관계) + 10(최종작업) = 74$$

$$\sigma^2 = 0.69 + 0.25 + 0.25 + 0.11 + 1.00 + 0.25 + 0.25 + 0.45 = 3.25$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{3.25} = 1.80$$

Table 2. Schedule Computation Results of A Sample PLET Network

No	Activity Description └ Predecessors	Dur. days	Prob. Linkage (a,m,b)	Avg. E. Days $\bar{d}$	Var. $\sigma^2$	S.D. $\sigma$	Schedule Computation Dates and Floats						
							ESD	EFD	LSD	LFD	FF	TF	C.P.
1	Plastering └ None	10	-	-	-	-	0	10	0	10	0	0	○
2	Floor Tiles └ Plastering	10	(0,1,3)	1.17	0.25	0.50	7.16	17.16	15.67	25.67	0	8.51	
3	Painting └ Floor Tiles	25	(0,1,4)	1.33	0.45	0.67	13.66	38.66	22.17	47.17	6.68	8.51	
4	AL Door & Window └ Plastering	20	(0,2,3)	1.83	0.25	0.50	5	25	5	25	0	0	○
5	WD Door & Window └ AL Door & Window	20	(1,2,3)	2.00	0.11	0.33	20.17	40.17	20.17	40.17	0	0	○
6	Glazing └ WD Door & Window	10	(1,2,4)	2.17	0.25	0.50	35	45	35	45	0	0	○
7	Papering └ Painting └ WD Door & Window	15	(0,1,2)	1.00	0.11	0.33	40.17	55.17	42	57	0	1.83	
8	Furnitures └ Glazing	22	(0,1,4)	1.33	0.45	0.67	42	64	42	64	0	0	○
9	Flooring └ Papering	10	(0,1,2)	1.00	0.11	0.33	52.17	62.17	54	64	1.83	1.83	
10	Inspection └ Furnitures └ Flooring	10	-	-	-	-	64	74	64	74	0	0	○

\* Dur. : Duration, Prob. : Probabilistic, Avg. : Average, Var. : Variance, S.D. : Standard Deviation, C.P. : Critical Path



## 5. 결론

최근 점차 복잡해지고 다양한 이해관계로 얽혀지는 건설환경은 건설사업의 불확실성과 위험을 대폭적으로 증가시키고 있기 때문에, 사실적이며 정교한 공정계획의 수립을 더욱 어렵게 만들고 있다.

불확실한 건설환경 또는 경험이 부족하거나 미래에 대한 정교한 예측이 불가능할 경우, 전체 사업공기를 확률적으로 추정하는 방법으로 PERT기법을 많이 적용하고 있다. PERT기법은 기본적으로 네트워크의 작업간 연결관계를 FSO로 확정된 후 작업공기를 확률적으로 추정함으로써 전체 사업공기를 확률적으로 평가하는 기법이다. 이외에도 GERT기법, PERT기법과 몬테카를로 시뮬레이션을 결합하여 전체 사업공기를 확률적으로 평가하는 기법이 제안되었으며, 그중 일부는 지금도 실무에서 많이 활용되고 있다.

그러나 공정계획을 수립할 때 작업간 연결관계를 FSO로만 표시할 수 없을 뿐만 아니라, 공정계획 수립에서 작업공기의 추정만이 어렵고 불확실한 업무는 아니다. 중복관계 표현이 가능한 기법들에서 작업간 연결관계의 추정도 매우 어렵고 불확실한 업무이다.

본 연구에서는 BDM기법의 작업간 연결관계를 확률적으로 추정하여 전체 사업공기를 확률적으로 추정할 수 있는 새로운 방법인 “확률적 연결관계 평가기법(Probabilistic Linkage Evaluation Technique, PLET)”을 제안하였다. 또한 PLET기법의 연결관계 표시방법, 일정계산방법 등도 제시하였고 사례 PLET 네트워크를 통해 이들을 검증하였다.

본 연구는 기존 PERT기법의 작업공기에 대한 확률적 추정을 기반으로 전체 사업공기를 추정하는 것으로부터, 작업간 연결관계에 대한 확률적 추정을 기반으로 전체 사업공기를 추정할 수 있는 방법으로까지 확장시켰다는데 의미가 있으며, 이러한 새로운 접근방법은 불확실한 건설환경 아래에서 공정계획을 수립할 때 좀 더 융통성 있는 사업공기 추정을 지원하게 될 것으로 기대한다. 그리고 앞으로 기존 PERT기법과 새로운 PLET기법을 통합할 수 있는지 여부와 통합할 경우 어떠한 모습으로 구현할 지에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

## References

- Barraza, G. A. (2011). “Probabilistic Estimation and Allocation of Project Time Contingency”. *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, pp. 259–265.
- Callahan, M. T., Quackenbush, D. G., Rowings, J. E. (1992). “Construction Project Scheduling” *McGRAW-HILL*, USA.
- Harris, R. B. (1978). “Precedence and Arrow Networking Techniques for Construction” *John Wiley & Sons*, USA
- Kim, S. G. (2010). “Advanced Scheduling Technique”, *Kimoon-Dang*, Korea.
- Kim, S. G., Noh, S. B., Lee, Y. H., Yu, Y. J., Kim, J. B. and Koo, J. O. (2012). “Schedule Computation Method of Two-way Multiple Overlapping Relationships on BDM Technique”, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(2), pp. 120–127.
- Kim, S. G., Yoo, J. W., Kim, D. S. and Park, J. I. (2013). “TACT Scheduling & Monitoring of Apartment Finish Works based on the BDM Technique”, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(2), pp. 3–11.
- Leach, L. (2003). “Schedule and cost buffer sizing; How to account for the bias between project performance and your model.” *Project Management Journal*, USA
- Lecture Material (2012), “Lecture 15 – Recent Scheduling Methods and Tools” *IE 406 – Project Scheduling and Control*, Cankaya University, Turkey.
- Plotnick, F. L. (2008). “Relational Diagramming Method”, *A Thesis of Ph.D, Drexel University*, USA.
- Pritsker, A. A. B. (1966). “GERT: Graphical Evaluation and Review Technique” *National Aeronautics and Space Administration*, USA.
- Wikipedia (2013) “Graphical Evaluation and Review Technique” *The free encyclopedia*.



---

**요약 :** 일반적으로 공정계획을 수립할 때 가장 어려운 업무가 작업별 공기와 작업간 연결관계를 추정하는 것이다. 왜냐하면 사업에 잠재된 위험요인들로 인해 작업공기와 작업간 연결관계가 불확실성에 노출될 가능성이 높기 때문이다. 따라서 사업공기를 확률적으로 추정할 경우 작업공기에 대한 확률적인 추정뿐만 아니라 작업간 연결관계에 대한 확률적인 추정도 반드시 고려해야 한다. 확률적으로 사업공기를 추정하는 대표적인 방법인 PERT기법은 작업간 연결관계를 'FSO'로 확정하고 작업공기만을 확률적으로 추정하므로 작업관계의 불확실성을 고려할 수 없었다. 본 연구에서는 BDM기법의 연결관계를 확률적으로 추정함으로써 전체 사업공기를 확률적으로 추정하는 새로운 방법인 PLET기법을 제안하고, 이를 통해 사업공기에 대한 보다 폭넓고 다양한 확률적인 정보를 제공하는데 목적이 있다.

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

---