

건설공사의 확률적 위험도분석평가

Probabilistic Risk Assessment for Construction Projects

조효남* 임종권** 김광섭***

Cho, Hyo-Nam Lim, Jong-kwon Kim, Kwang-Seop

ABSTRACT

Recently, in Korea, demand for establishment of systematic risk assessment techniques for construction projects has increased, especially after the large construction failures occurred during construction such as New Haengju Bridge construction projects, subway construction projects, gas explosion accidents etc. Most of existing risk analysis modeling techniques such as Event Tree Analysis and Fault Tree Analysis may not be available for realistic risk assessment of construction projects because it is very complex and difficult to estimate occurrence frequency and failure probability precisely due to a lack of data related to the various risks inherent in construction projects like natural disasters, financial and economic risks, political risks, environmental risks as well as design and construction-related risks.

Therefore, the main objective of this paper is to suggest systematic probabilistic risk assessment model and demonstrate an approach for probabilistic risk assessment using advanced Event Tree Analysis introducing Fuzzy set theory concepts. It may be stated that the Fuzzy Event Tree Analysis may be very useful for the systematic and rational risk assessment for real constructions problems because the approach is able to effectively deal with all the related construction risks in terms of the linguistic variables that incorporate systematically expert's experiences and subjective judgement.

1. 서 론

신행주대교, 팔당대교, 지하철, 터널 등의 붕괴와 부실시공사례, 가스폭발 등 각종 건설사고의 발생에도 불구하고 최근 국가적인 대역사의 하나인 경부고속철도의 건설과 영종대교, 광안대교, 서해대교와 같은 장대교량의 건설, 그리고 고속도로 및 지하철 건설 등의 대형건설공사가 계속되는 실정이다. 따라서 이러한 계속되는 대형건설공사의 사고를 미연에 방지하기 위해서는 시공간 구조물의 합리적이며 체계적인 위험도분석 및 관리를 통한 공사의 안전관리의 중요성이 어느 때보다 높아지고 있다.

따라서 본 논문은 실제 건설공사에 적용할 수 있는 합리적이고도 체계적인 확률적 위험도분석 평가기법의 개발에 관한 기초연구 단계의 일환으로서 실제건설공사의 위험도분석 평가기법으로서 유용한 하나의 접근방법으로서 기존의 사건수분석(ETA : Event Tree Analysis) 기법이나 결함수분석(FTA : Fault Tree Analysis)에 의한 방법[Ang/Tang, 1975]을 개선하여 전문가의 주관적인 판단을 언어학적 변량으로 나타내어 이를 퍼지집합의 개념을 도입한 퍼지사건수분석(FETA : Fuzzy Event

* 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 한양대학교 토목공학과 박사과정

*** 한양대학교 토목공학과 석사과정

Tree Analysis) 기법이나 퍼지결함수분석(FFTA : Fuzzy Fault Tree Analysis) 기법에 대해서 집중적으로 고찰하였다. 이러한 퍼지기법을 도입한 사건수분석이나 결함수분석 기법이 실제 건설공사의 위험도분석 평가에 유용하다고 보는 이유는 기존의 사건수분석이나 결함수분석 기법으로 건설공사 위험도분석 평가를 하기에는 설계 및 시공과 직접 관련된 위험요소뿐만 아니라 자연재해, 사회/경제적 위험요소, 정치적 위험요소, 환경적 위험요소 등 건설공사에 내재되어 있는 위험요소가 다양하고 매우 많기 때문에 이들에 대한 정확한 확률해석과 빈도해석을 수행하여야만 가능한데 실제 이러한 확률해석과 빈도해석을 수행할 수 있는 위험요소는 극히 제한되어 있으며, 실질적으로 전문가의 판단아래 정성적으로 위험도평가가 이루어지는 경우가 대부분이기 때문이다.

이러한 퍼지개념에 의한 위험도분석 평가기법을 제시한 사례는 Hadipriono[1985, 1986, 1987]와 Fujino[1994]에 의해 수행된 바 있다. Hadipriono는 언어학적 변량을 퍼지기법을 이용하여 정량화하는 방법을 임시 가설구조물에 대한 사건수분석에 적용하였으며, Fujino[1994]는 결함수분석의 구성요소의 입·출력자료를 언어학적 변량으로 사용한 퍼지결함수분석(FFTA : Fuzzy Fault Tree Analysis)에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 확률적 위험도분석 평가기법 개발에 관한 기초연구로서 건설공사의 확률적 위험도 평가방법을 체계적으로 제시하고, Hadipriono의 임시가설 구조물의 경우에 적용시킨 퍼지사건수분석 기법을 이론적인 기본바탕으로 하여 실제 건설공사의 위험도분석 평가기법으로 확장시켜 적용할 수 있는지에 대한 타당성과 문제점을 고찰하였다.

2. 확률적 위험도분석 평가모형

2.1 용어의 정의

본 연구분야인 위험도분석 평가는 국내에서는 아직 널리 사용되지 않고 있으며 특히 건설분야에서는 매우 기초적인 단계에 있으므로 이와 관련된 용어의 정의 자체가 제대로 이루어지지 않은 실정이어서, 본 연구에서 사용한 위험도분석 평가 분야의 용어자체의 의미를 다음과 같이 정의하였다. 위험도(Risk)란 “위험이 내재되어 있는 어떤 사건의 발생가능성과 어떠한 적절한 방식으로 측정된 사건의 결과, 경제적 손실, 환경적 충격의 조합”이라고 정의할 수 있으며, 어떤 사건의 위험도를 정확히 평가하기 위해서는 그 위험사건과 관련된 발생확률과 그 위험사건이 발생한 경우 그 결과에 대한 일체의 자료가 있어야만 가능하다. 또한 위험도분석(Risk Analysis)은 “위험요소를 규명하고 개인의 생명과 자산, 공공재산, 환경 등에 노출되어 있는 위험도를 추정하기 위한 가용한 정보에 대한 체계적인 적용 방법”이라고 볼 수 있다. 위험도분석은 확률적인 방법으로 평가하는 경우가 합리적이므로 문제의 대상에 따라 PSA(Probabilistic Safety Analysis), PRA(Probabilistic Risk Analysis)라고 하며, 정량적인 평가가 수반될 경우 QSA(Quantitative Safety Analysis), QRA(Quantitative Risk Analysis)라고 한다. 한편 위험도분석평가(Risk Assessment)는 위험도분석과 분석결과를 가지고 위험도평가를 수행하는 전 과정을 의미하는 것으로, 위험도분석 결과를 바탕으로 위험도의 허용정도를 기준으로 삼아 사회적·경제적·환경적 측면을 고려하여 위험도의 정도를 판단하는 과정이다[Al-Bahar, 1990].

2.2 위험도분석 평가(Risk Assessment) 절차

위험도분석 평가는 그림 2.1에서 보는 바와 같이, 크게 위험요소의 규명(Risk Identification)과 위험도분석 및 평가(Risk Analysis and Evaluation)로 나누어진다. 위험요소의 규명은 어떤 시스템에서 위험이 내재되어 있는 사건에 대한 각 요소에 대한 존재여부를 인식하고 그 위험요소들에 대한 특성과 불확실성을 정의하는 과정이다. 따라서 위험요소의 규명 절차는 위험도 분석평가를 위한 첫 번째 단계이며 건설공사에 잠재되어 있는 위험요소가 완전히 규명이 되어야 위험도 분석평가가 가능하기 때문에 매우 중요하다. 이러한 위험요소의 규명은 일반적으로 그림 2.1에서 보는 바와 같이 이 단계에서는 예비조사표의 작성, 위험사건에 대한 시나리오 작성, 위험요소의 분류 및 최종적으로 위험요소별 주별 일람표 작성 등의 단계를 거친다[Al-Bahar, 1988].

이러한 위험요소의 규명을 바탕으로 하여 위험도분석 및 평가 절차는 크게 데이터 수집, 불확실성의 모델링, 위험요소의 잠재적인 영향에 대한 평가의 순서로 수행된다. 이 분석·평가의 단계에서는 객관적인 통계자료와 주관적인 판단자료를 근거로 위험요소에 대한 불확실성 모델링을 사

건수분석기법 또는 결함수분석기법을 통하여 구성한 후, 각 위험요소에 대한 발생확률 또는 경제적 손실을 신뢰성해석 또는 파괴모드해석, 비용평가 등을 통해 추정하므로써 전체 위험경로의 파괴위험도를 합리적이고도 체계적으로 구할 수 있다. 따라서, 건설공사의 확률적 위험도 분석평가의 목적은 건설프로젝트 시스템에 내재되어 있는 위험요소들에 대한 잠재성을 규명하고 궁극적으로 위험도를 감소시키는 수단을 찾는 것이다.

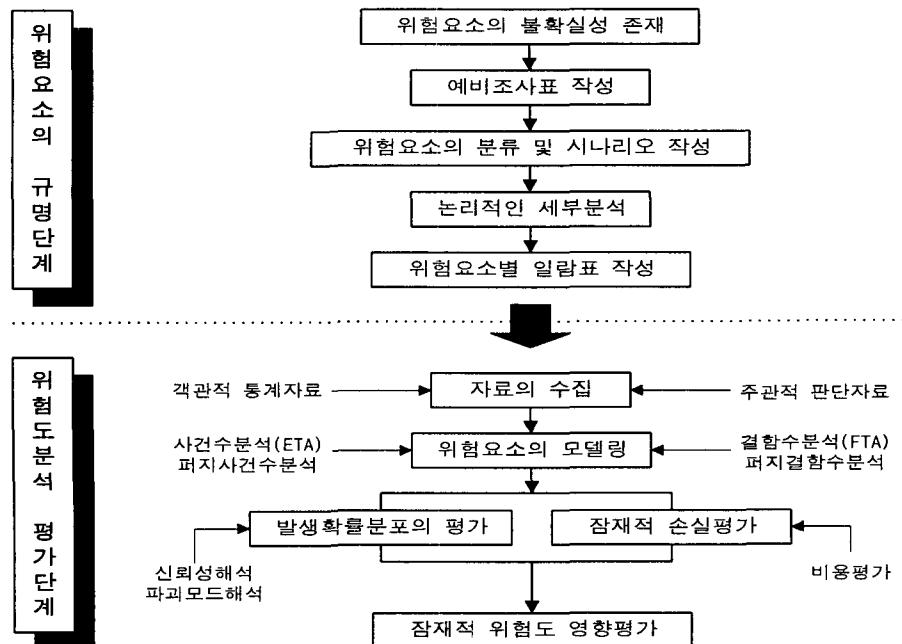


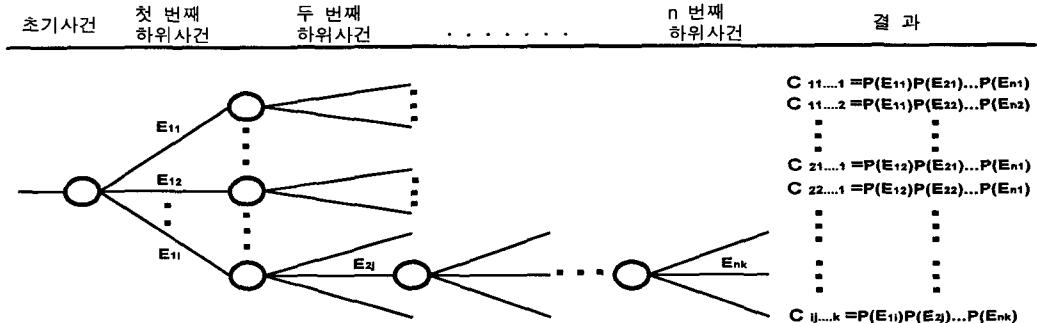
그림 2.1 확률적 위험도분석 평가절차

2.3 확률적 위험도분석 평가 모델링기법

확률적인 위험도 분석평가를 위해서는 건설공사시스템의 여러 위험요소와 시나리오를 규명하고 의사결정 모델링을 통한 분석이 반드시 필요하게 되는데, 이때 가장 널리 이용되는 모델링기법들은 앞에서 언급한 바와 같이 크게 사건수분석과 결합수분석으로 분류될 수 있다.

2.3.1 사건수분석(ETA : Event Tree Analysis) 기법

사건수분석 기법은 그림 2.2에서 보는 바와 같이 전통적으로 사용되는 의사결정수(Decision Tree)의 수정된 형태이다. 사건수분석은 사건 결과들의 기록과 사고에서 결과를 조합하는 초기사건과 하위사건들 사이의 상호연관 관계를 정의하는데 정확한 방법을 제공한다. 사건들을 분류함으로써 또는 정량적인 평가를 통해서 가장 중요한 사건들이 증명된다. 또한 사건수분석은 시스템의 파괴나 사고에 영향을 주는 초기사건(Initiating Event)을 뒤따르는 결함이 있는 사건들을 증명하고 모형화하여, 이런 결함/파괴의 결과를 이끌 수 있는 파괴 조합(경로)을 찾아내는 것이다. 따라서, 사건수분석기법은 사건 결과들의 기록과 사고에서 결과를 조합하는 초기사건과 하위사건들 사이의 상호연관 관계를 정의하는데 정확한 방법을 제공하며, 연대순의 사건 결과의 연구와 설계 대안들의 정량적인 비교를 통해서 사건들을 분류하고 정량적으로 평가하므로써 가장 중요한 사건들(Critical Events)이 증명된다. 일반적으로 사건수분석은 우선 초기사건을 선택하여 규명한 후에 초기사건을 뒤따르는 하위사건들을 구성하므로써 사건수(Event Tree)를 구성한다. 그 다음에 각 경로들에서 발생할 수 있는 사건들의 결과들을 추정하므로써 사건수분석은 수행된다. 이러한 귀납적 분석방법인 사건수분석의 장점은 발생 가능한 파괴경로를 찾아내고 분석할 수 있는 반면에, 분석 시 고려해야만 하는 많은 요소들의 부분파괴경로가 지나치게 많아 분석에 어려운 점이 있다.



2.3.2 결함수분석 기법(FTA)

반면에 결함수분석(FTA : Fault Tree Analysis) 기법은 그림 2.3에서 보는 바와 같이 사건수분석 기법과는 대조적으로 전형적인 연역적 체계의 분석 방법으로서 시스템의 파괴의 원인이 되는 파괴모드에 대한 분석을 위한 것이다. 결함수분석기법은 최상위사건과 이 사건을 뒤따르는 원인이 되는 기본원인들 사이의 논리적인 상호연관성을 도해적인 표현으로 나타내는 하나의 모델링 기법이며, 주요 파괴사건을 이끌어내는 여러 가지 결함 또는 파괴사건들의 발생확률에 대한 정량적인 평가를 포함한다. 그림 2.3은 결함수분석의 구성절차와 “AND”, “OR”게이트를 이용한 하위사건으로부터의 상위사건의 확률을 계산하는 과정을 나타낸다.

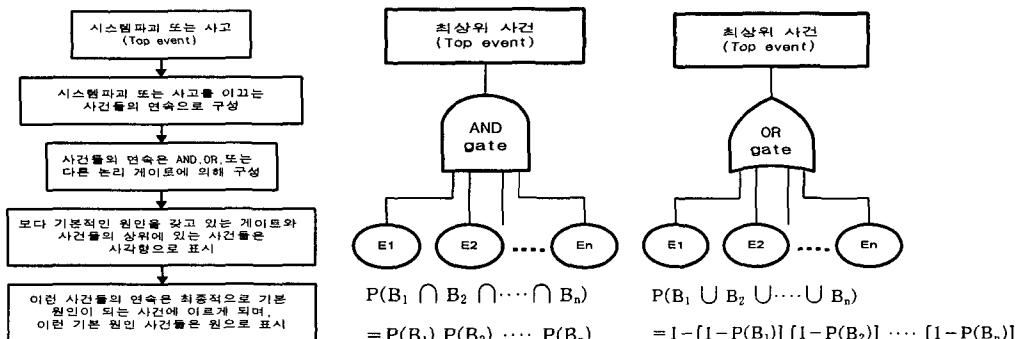


그림 2.3 결함수분석의 구성절차 및 게이트의 확률계산

2.3.3 퍼지기법응용 : 퍼지사건수분석(FETA) 기법, 퍼지결함수분석(FFTA) 기법

한편 퍼지사건수분석 기법(FETA : Fuzzy Event Tree Analysis)과 퍼지결함수분석 기법(FFTA : Fuzzy Fault Tree Analysis)은 앞에서 언급한 바와 같이 각각 Hadipriono[1985, 1986, 1987]와 Fujino[1994]에 의해 제안된 방법으로서 건설공사의 확률적 위험도분석 평가기법 개발에 관한 기초 연구의 일환으로서, 본 연구에서 집중적으로 분석 고찰하고자 하는 기법이다. 이 방법들은 분석된 구성요소의 입·출력자료를 언어학적 변량으로 사용한다. 실질적인 건설공사 위험요소들이 데이터의 부족, 공사과정의 다양한 불확실성으로 인하여 전문가의 판단 등에 의존할 수밖에 없는 경우가 거의 대부분이기 때문에 이러한 전문가의 판단을 언어학적 변량을 사용하여 모델링하는 매우 실용적인 모델이라 할 수 있다. 퍼지개념을 제외하고서는 네트워크 구성자체는 위에서 언급한 기존의 사건수분석기법과 결함수분석기법과 큰 차이는 없으며, 우선 Hadipriono와 Fujino가 응용하였던 퍼지개념에 대해 간단히 언급하고자 한다.

퍼지이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해주는 방법으로서 버클리대학의 Zadeh[1965] 교수에 의해서 처음 소개되었으며, 본 논문에서는 건설공사에서 발생할 수 있는 위험요소들에 대해서 전문가의 경험과 직관에 의한 주관적인 판단을 정량적으로 평가할 수 있는 퍼지집합개념을 도입한 퍼지사건수분석 기법을 제안하였다. 주관적인 판단자료는 “그렇다” “아니다”, “좋다” “나쁘

다”와 같이 단순히 표현되지 않고 “다소”, “아주”, “상당히”와 같은 수식어와 연관된 복잡하고 애매하게 표현되는 언어변량(Linguistic Values)이다. 가령, 어떤 위험요소에 대해 발생가능성이 “매우높다”, “높다”, “중간”, “낮다”, “매우낮다” 등과 같이 주관적인 평가를 할 수 있으며, 이와 같은 언어학적 변량들은 그림 2.4와 표 2.1에서와 같은 등급으로 분류되어 수정된 Baldwin의 ramp함수모형에 의해서 퍼지소속도(Fuzzy membership)로 정량적인 값으로 전환될 수 있다. 이러한 언어학적 변량에 대한 퍼지집합의 소속도는 표 2.1에서와 같이 5가지의 등급으로 분류하여 제안하였다 [Hadipriono, 1986]. 그림 2.4는 언어학적 변량의 각 등급에 대한 소속도를 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 $X=1$ 은 10^{-x} 즉, 10^{-1} 을 의미한다.

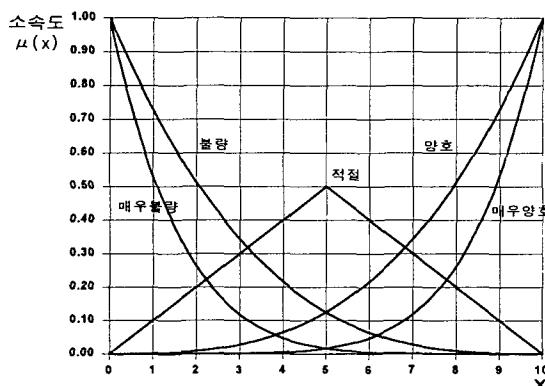


그림 2.4 수정된 Baldwin의 Ramp함수

표 2.1 언어학적 변량에 대한 퍼지집합의 소속도

요소성능 (PF)	발생규모 정도(M)	발생가능성 (PR)	소속도 $\mu(x)$
매우양호	매우크다	매우낮다	$(\frac{x}{10})^6 ; 0 \leq x \leq 10$
양호	크다	낮다	$(\frac{x}{10})^3 ; 0 \leq x \leq 10$
보통	보통	보통	$\begin{cases} \frac{x}{10} & ; 0 \leq x \leq 5 \\ \frac{10-x}{10} & ; 5 \leq x \leq 10 \end{cases}$
불량	작다	높다	$(\frac{10-x}{10})^3 ; 0 \leq x \leq 10$
매우불량	매우작다	매우높다	$(\frac{10-x}{10})^6 ; 0 \leq x \leq 10$

본 연구에서는 퍼지개념을 도입한 사건수분석기법 즉, 퍼지사건수분석 기법에 대해 실제 건설공사 프로젝트의 확률적 위험도분석 평가를 수행하였으며 자세한 수치예제는 3장의 적용예 및 고찰에서 기술하였고, 여기서는 사건수(Event Tree)에서의 각 파괴경로의 발생확률을 결정하는 단계를 나타내었다.

〈단계 I〉 : 각 축발가능사건(T_i)의 발생규모정도(M)와 이에 해당하는 발생가능성(PR)사이의 관계를 나타내는 퍼지연산은 다음 식 (2.1)과 같이 수행하며, 각 발가능사건(E_i)의 요소성능(PF)과 이에 해당하는 발생가능성(PR)사이의 관계를 나타내는 퍼지연산은 식 (2.2)와 같이 수행한다.

$$R(T_i) \in \phi(M \times PR) \quad (2.1)$$

$$R(E_i) \in \phi(PF \times PR) \quad (2.2)$$

이때, 식 (2.1), (2.2)에서의 퍼지연산은 다음과 같은 방법으로 구해진다. $A \in \phi(x)$ 이고 $B \in \phi(y)$ 인 퍼지집합 A, B가 있을 때, $R = A \times B$ 인 관계의 퍼지집합의 소속도함수는 식 (2.3)과 같으며, 이를 행렬식으로 나타내면 식 (2.4)와 같다.

$$f_R(x_i, y_j) = f_{A \times B}(x_i, y_j) = \Lambda [f_A(x_i), f_B(y_j)] \quad (2.3)$$

$$\forall x_i \in X, \forall y_j \in Y ; \text{ for } i = 1 \sim m, j = 1 \sim n$$

$$f_R(x_i, y_j) = R_{A \times B} \in (X, Y) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{i1} & \cdot & \cdots & r_{ij} & \cdots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

여기서, r_{ij} 는 $R_{A \times B} \in (X, Y)$ 에 포함된 각 요소의 소속도를 나타내며, 문제는 퍼지곱(Λ : Conjunction)의 형태이므로 퍼지집합이론에 있어서 잘 알려진 바와 같이 $f_A(x_i)$ 와 $f_B(y_j)$ 의 소속도의 최소값으로 구해진다.

《단계 II》: 앞의 《단계 I》에서 얻은 퍼지행렬의 각 열(Column)로부터 최대소속도를 취하여 측발 가능사건과 발생가능사건의 퍼지집합을 구성한다. 그리고 이를 이용하여 각 경로별 퍼지집합을 조합한다.

《단계III》: 앞의 《단계 II》에서 얻은 각 경로들의 퍼지기대확률값은 다음과 식으로부터 구할 수 있다.

$$PR(\text{경로 } i) = \sum_{j=0}^{10} \frac{\mu(x_j)}{\sum_{j=0}^{10} \mu(x_j)} (x_j) \quad (2.5)$$

이와 같이 퍼지사건수분석에 의한 확률적 위험도분석은 해석과정상에 내재되어 있는 모호함과 주관적인 평가를 정량적으로 변환하는데 유용하다. 이 연구에서 퍼지기법은 언어적으로 표현되는 위험요소에 대해 정량적이며 확률적인 표현으로 전환하는데 이용된다.

3. 적용예 및 고찰

본 연구는 앞에서 언급한 바와 같이 확률적 위험도분석 평가기법 개발의 기초연구단계로서 우선 퍼지사건수분석 기법이 어떻게 실제 건설공사의 위험도분석 평가에 적용할 수 있는지에 대한 체계적인 방법을 제시하였고 기존 방법의 적용 타당성과 문제점을 도출하였다.

본 논문의 수치예제는 본 적용 방법에 대한 이해를 돋기 위해서 1994년 붕괴되었던 신행주대교 건설공사를 적용 대상으로 하였다. 이때 사건수분석을 구성하고 있는 각 위험요소들에 대해서 전문가의 주관적인 판단을 기초로 하여 언어학적 판단을 정량적으로 평가할 수 있는 퍼지집합의 개념을 응용하여 앞 절의 2.3.3에서 제시한 단계를 따라 수행하였다.

표 3.1 사건수분석에서 위험요소의 언어학적 변량 및 사건수구성

측발가능사건(Ti)		발생규모 정도(M)	발생가능성 (PR)	사건수 (Event Tree)
T1	설계상의 오류(시방규준의 잘못 적용, 실수)	보통	보통	E2 경로 1
T2	건설장비의 진중하중, 차량의 충격하중	보통	높다	E3 2
T3	사용재료의 품질불량, 부적합	보통	높다	E4 3
T4	시공상의 오류 (설계도면의 잘못 적용, 작업미숙)	보통	높다	E5 4
T5	자연재해(폭우, 홍수, 강풍, 지진 등)	크다	낮다	E6 5
발생 가능사건(Ei)		요소성능(PF)	발생가능성 (PR)	E7 6
E1	기초의 지지력 부족으로 인한 부등침하	보통	보통	E2 7
E2	가교각의 압축파괴	불량	높다	E3 8
E3	가교각의 편심휨파괴	불량	높다	E4 9
E4	교대/교각/주탑의 압축파괴	보통	보통	E5 10
E5	교대/교각/주탑의 편심휩파괴	보통	보통	E6 11
E6	케이블의 인장파괴	보통	보통	E7 12
E7	덱의 휨파괴	양호	보통	

표 3.2 측발가능사건 T2의 퍼지연산 행렬

	발생가능성(PR)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.064	0.027	0.008	0.001	0
2	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
3	0.300	0.300	0.300	0.300	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
4	0.400	0.400	0.400	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
5	0.500	0.500	0.500	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
6	0.400	0.400	0.400	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
7	0.300	0.300	0.300	0.300	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
8	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
9	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

《단계 I》: 사건수분석에서의 발생가능사건(Enabling Event)이란 설계단계나 건설중의 불충분함,

결합 등으로 야기되는 구성요소의 파괴에 원인을 제공하는 사건들을 의미하며, 촉발가능사건(Triggering Event)이란 건설도중의 추가적인 하중 또는 다른 구성요소의 파괴를 유발하는 요소의 파괴와 같은 외적인 사건들을 의미한다. 촉발가능사건의 발생규모정도와 발생가능성, 발생가능사건의 수행정도와 발생가능성을 표 3.1에서처럼 전문가적인 판단을 기초로 언어학적 변량으로 나타낼 수 있으며, 사건수(Event Tree)에서의 각 파괴경로의 발생확률은 앞장의 2.3.3에서 언급한 단계를 통해서 구할 수 있다. 본 적용예의 문제중 촉발가능사건 T2를 예로 들면, 촉발가능사건(T2)의 발생규모정도와 발생가능성을 고려한 퍼지집합은 식 (2.1)에 의해 퍼지연산을 수행하면 표 3.2와 같은 행렬을 구할 수 있다.

《단계Ⅱ》: 《단계Ⅰ》에서 구한 퍼지연산행렬의 각 열에서 촉발가능사건 T1~T5, 그리고 발생가능사건 E1~E7에 대해 각각 최대소속도를 취하면 표 3.3과 같은 퍼지집합으로 나타난다. 그리고 각각의 촉발가능사건에 대해서 발생되는 파괴경로에 대한 퍼지집합은 촉발가능사건과 발생가능사건의 소속도 중에서 작은 값을 취하므로써 표 3.4~3.6과 같은 퍼지집합을 구할 수 있다.

《단계Ⅲ》: 《단계Ⅱ》에서의 각 경로들에 대한 퍼지기대확률값은 식(2.5)로부터 구할 수 있으며, 이를 나타낸 것이 표 3.4~3.6에서 마지막 열의 퍼지확률이다. 예를 들어 표 3.5의 촉발가능사건 T2에 대한 경로 8(T2-E3)의 파괴경로에 대한 발생가능성에 대한 퍼지기대확률값은 식 (2.5)으로부터 추정해보면 0.2478이다. 이와 같은 단계를 걸쳐 T2의 여러 파괴경로중에서 가장 위험한 경로(Critical Path)를 찾아낼 수 있으며, 이러한 분석방법으로 각 촉발가능사건들(Ti)에 대한 위험경로를 밝힐 수 있다.

이와 같은 분석절차를 통해서 얻은 결과를 나타내는 표 3.4~3.6을 보면 가장 위험도가 높은 파괴경로는 T2, T3, T4의 E7, E8 파괴경로에서 발생함을 알 수 있다. 이는 가교각에 있어 위험발

표 3.3 촉발가능사건과 발생가능사건의 퍼지집합

퍼지사건	퍼지소속도 $\mu(x)$											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
촉발가능사건	T1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
	T2	0.5	0.5	0.5	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
	T3	0.5	0.5	0.5	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
	T4	0.5	0.5	0.5	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
	T5	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.343	0.512	0.729	1
발생가능사건	E1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
	E2	1	0.729	0.512	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
	E3	1	0.729	0.512	0.343	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0
	E4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
	E5	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
	E6	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
	E7	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0

표 3.4 촉발가능사건 T1에 대한 각 경로의 퍼지확률

발생경로	퍼지소속도 $\mu(x)$										퍼지 확률		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
촉발가능사건 T1	1	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	2	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	3	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049
	4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049
	5	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049
	6	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049
	7	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	8	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	9	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049
	10	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049
	11	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049
	12	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.0049

표 3.5 촉발가능사건 T2,T3,T4에 대한 각 경로의 퍼지확률

발생경로	퍼지소속도 $\mu(x)$										퍼지 확률		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
촉발가능사건 T2	1	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	2	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	3	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	4	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	5	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	6	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	7	0.05	0.05	0.05	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.2478
	8	0.05	0.05	0.05	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.2478
	9	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	10	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	11	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118
	12	0	0.1	0.2	0.3	0.216	0.125	0.064	0.027	0.008	0.001	0	0.0118

표 3.6 촉발가능사건 T5에 대한 각 경로의 퍼지확률

발생경로	퍼지소속도 $\mu(x)$										퍼지 확률		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
촉발가능사건 T5	1	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0007
	2	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0007
	3	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002
	4	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002
	5	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002
	6	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002
	7	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0007
	8	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0007
	9	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002
	10	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002
	11	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002
	12	0	0.001	0.008	0.027	0.064	0.125	0.216	0.3	0.2	0.1	0	0.0002

생가능성이 높고, 이는 성능정도가 불량한 언어학적 변량으로 취하므로써 나온 타당한 결과라 판단된다. 그러나 여기서 주목할 사항은 이러한 확률값은 우리가 일반적으로 알고 있는 확률값이 아니라 퍼지확률값임을 주지하여야 한다. 따라서 기존의 사건수분석 및 결함수분석과 비교해서 발생 확률에 손실비용을 고려한 위험도평가가 용이하지는 않지만, 이러한 손실에 대한 것도 언어학적 변량으로 취급하여 해석할 수 있으므로 상대적인 퍼지확률치를 비교하므로써 위험도관리를 위한 조치 및 제어를 위하여 매우 유용한 방법이라 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 건설공사의 체계적이며 합리적인 확률적 위험도평가 모형에 대해 제시하였고, 확률적 위험도분석평가에 관한 기초연구의 일환으로 퍼지사건수분석기법을 실제 건설공사의 위험도평가에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구에서 제시한 건설공사의 체계적인 확률적 위험도분석 평가모형은 향후 건설공사의 위험도분석평가 및 위험도관리(Risk Management)를 위한 모형으로서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 본 연구에서 수치예제로 적용한 퍼지사건수기법은 건설프로젝트에 내재된 다양한 불확실성을 언어학적 변량으로 취급하므로써 실제 건설프로젝트의 위험도평가 및 위험도관리를 위한 유용한 방법이라 사료된다.
- 3) 기존의 사건수분석이나 결함수분석기법으로 건설공사 위험도분석 평가를 하기에는 건설공사에 내재되어 있는 위험요소가 다양하고 매우 많기 때문에 이들에 대한 정확한 확률해석과 빈도해석을 수행하여야만 가능한데, 실제 이러한 확률해석과 빈도해석을 수행할 수 있는 위험요소는 극히 제한되어 있는 경우가 대부분이기 때문에 퍼지적 위험도분석 기법의 적용이 불가피하다고 사료된다.
- 4) 국내 위험도분석 평가사례를 살펴보면 합리적이며 과학적인 방법이라기 보다는 기본적인 현장 조사를 바탕으로 한 형식적인 평가수준에 그치고 있으므로 본 연구에서 제시한 확률적 위험도 평가모형과 본 논문에서 제안한 퍼지사건수분석 기법과 같은 과학적인 확률적 위험도평가방법이 절대적으로 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 1996년도 건설교통기술연구개발사업 과제인 “건설공사의 확률적 위험도분석 평가기법 개발”에 대한 제 1차년도 연구를 바탕으로 수행되었으며, 연구비 지원에 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Al-Bahar, J. F. and Crandall, K. C.(1990), "Systematic Risk Management Approach for Construction Projects," *J. of Construction Eng. and Manag.*, Vol. 226, No. 3, pp. 533~546.
2. Al-Bahar, J. F.(1988), *Risk Management Approach for Construction Projects: A Systematic Analytical Approach for Contractors*, Ph. D. Thesis.
3. Ang, A. H-S. and Tang, W. H.(1975), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. I, II, John Wiley & Sons Inc.
4. Fujino, T.(1994), *The Development of a Method for Investigation Construction Site Accidents Using Fuzzy Fault Tree Analysis*, Ph. D. Thesis.
5. Hadipriono, F. C.(1987), "Approximate Reasoning for Falsework Safety Assessment", *Structural Safety*, Vol. 4, pp. 131~140.
6. Hadipriono, F. C.(1985), "Assessment of Falsework Performance Using Fuzzy Set Concepts", *Structural Safety*, Vol. 3, pp. 47~57.
7. Hadipriono, F. C., Lim, C. L., and Wong, K. H.(1986), "Event Tree Analysis to prevent Failures in Temporary Structures," *J. of Construction Eng. and Manag.*, Vol. 112, No. 4, pp. 500~513.
8. Suokas, J. and Rouhiainen, V.(1993), *Quality Management of Safety and Risk Analysis*, Elsevier.
9. Zadeh, L. A.(1965), "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338~353.
10. 조효남, 임종권, 박영빈(1997), “건설공사의 위험도분석을 위한 확률적 위험도 평가”, *한국전산구조공학회/봄학술발표회 논문집*, 제 10권, 제 1집, pp. 27~34.