

건설공사의 위험도분석을 위한 확률적 위험도 평가

Probabilistic Risk Assessment Techniques for the Risk Analysis of Construction Projects

조 효 남* 임 중 권** 박 영 빈***
Cho, Hyo-Nam Lim, Jong-kwon Park, Young-Bin

ABSTRACT

In this paper, systematic and comprehensive approaches are suggested for the application of quantitative PRA techniques especially for those risk events that cannot be easily evaluated quantitatively. In addition, dominant risk events are identified based on their occurrence frequency assessed by both actual survey of construction site conditions and the statistical data related with the probable accidents. Practical FTA(Fault Tree Analysis) and ETA(Event Tree Analysis) models are used for the assessment of the identified risks. When the risk events are lack of statistical data, appropriate Bayesian models incorporating engineering judgement and test results are also introduced in this paper. Moreover, a fuzzy probability technique is used for the quantitative risk assessment of those risk components which are difficult to evaluate quantitatively.

1. 서론

최근 국내에서는 사회적·경제적으로 막대한 손실을 야기시켰던 신행주대교, 팔당대교의 시공 중 붕괴사고와 대구지하철 공사현장의 가스폭발사고 등과 같은 대형사고가 연이어 발생했으며, 이러한 일련의 사고들의 주요 원인은 주요 건설프로젝트의 위험도관리에 필요한 정량적·정성적인 방법의 실질적인 위험도분석이 결여되었기 때문으로 판단된다.

때때로 경험 많은 전문가조차 예상하지 못한 치명적인 사고들은 공사기간의 지연뿐만 아니라 막대한 경제적 손실을 가져오는 원인이 되기도 하며, 더욱이 어떤 사건의 내재된 위험을 규명할 수 있다하더라도 어떤 전문가들도 사고발생의 정확한 시간을 예측할 수 없으므로 사고를 적절히 방지할 수 없다. 따라서 전체 건설과정 중에 발생할 수 있는 자연재해, 현장 감독관이나 관리자의 부주의와 엄격한 책임의식 결여, 비숙련 기술자에 의한 실수 등과 같은 다양한 사고의 위험으로 조합된 고유의 불확실성을 다루기 위해서는 건설공사의 위험을 확률적인 추정방법으로 평가해야 한다 것은 필수적이다.

따라서, 본 논문에서는 보다 더 체계적이며 실질적인 확률적 위험도분석(PRA: Probabilistic Risk Assessment)을 위해 FTA(Fault Tree Analysis), ETA(Event Tree Analysis)기법 뿐만 아

* 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 한양대학교 토목공학과 박사과정

*** 한양대학교 토목공학과 석사수료

나라 베이지안 기법(Bayesian approach), 퍼지집합(fuzzy set)이론, 인간신뢰도 해석(human reliability analysis)과 같은 주관적 평가(subjective assessment)기법을 이용한 모델링을 제시하고자 한다. 또한 본 논문에서 제안한 방법들은 과거 시공 중에 붕괴되었던 신행주대교의 붕괴경로 분석모델과 대구 성서 쓰레기소각장 건설과 같은 실제 건설프로젝트의 위험도분석을 위한 방법으로 적용되었다.

2. 위험 요소의 분류 및 조사

2.1 위험도분석의 수행절차

건설공사의 위험도분석은 공사의 종류, 공법, 기후·환경적 영향, 윤리적·정신적 자세 등과 같은 복합적인 요소들에 의존한다. 따라서 건설프로젝트에 내재된 위험에 대한 합리적이고도 체계적인 정량적인 분석 및 평가를 위해서 중요 위험요소들을 고려한 분석모형의 제시와 주관적 평가까지 포함한 확률적 위험도분석 과정이 요구된다. 이러한 확률적 위험도분석 과정을 다음 그림 1에 개념적으로 나타내었다.

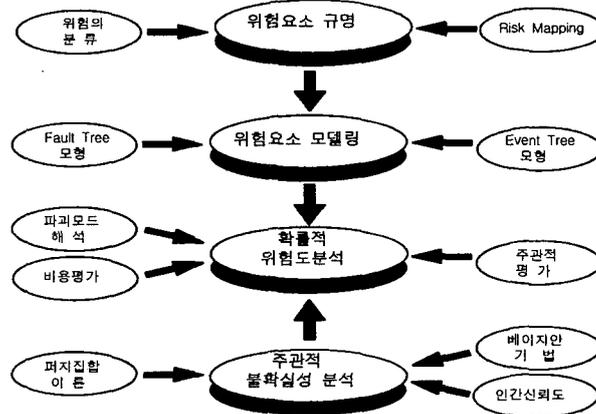


그림 1. 확률적 위험도분석의 과정

2.2 위험 요소의 분석

위험도 해석 및 관리의 과정들이 규명된 내재적 위험요소들에 대해서만 실시되므로 위험요소의 분류 및 예비분석은 매우 중요하며, 이러한 과정들의 정확성은 그 과정이 어느 정도 합리적이면서도 체계적인가에 의해 좌우된다. 따라서 건설 프로젝트에 관련된 주요 위험요소에 대한 분류와 확률적인 방법의 해석·평가에 대한 고려가 절실히 요구된다. 즉, 다양한 위험요소를 고려한 최적모형을 개발하기 위해서는 무엇보다도 위험요소의 규명이 선행되어야 하며 건설 프로젝트에 내재하고 있는 위험요소의 잠재적 근원과 중요성에 대한 다각적인 조사 및 연구가 필요하다.

2.3 자료수집 및 불확실성의 모델링

위험도분석을 위해서는 무엇보다도 위험요소와 관련된 자료를 수집하는 것이 중요하다. 그러나 불행히도 많은 경우에 있어서 위험요소와 관련한 직접적으로 적용 가능한 기록자료가 없으므로 이런 경우에는 주관적인 평가기법이 필요할 것이다.

건설 프로젝트에서 위험 사건의 불확실성들은 자연적인 고유의 변량으로 내재되어 있으며, 또한 위험에 대한 가능한 결과와 발생의 변화에 적합한 자료가 불충분하여 발생한다. 이와 같은 불확실성의 결과로 인해 위험의 결과에 대해서 확실성을 가지고 예측할 수 없다. 또한 일반적으로 위험의 발생가능성에 대해 “보다 가능한” 또는 “거의 불가능한”과 같은 단순한 어구로 표현하려는

경향이 있다(AI-Bahar 1988).

따라서, 잠재적인 중요성뿐만 아니라 발생가능성에 대해 정량적인 평가로써 언어적 변량의 불확실성에 대해서 논리적으로 명백한 표현을 얻는 것이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 정성적인 표현을 정량적이고 확률적인 표현으로 전환하는데 퍼지집합 이론을 이용한다.

3. 확률적 위험도분석(PRA)의 모델링기법

3.1 결합수분석(FTA: Fault Tree Analysis) 기법

FTA는 연역적 논리를 기초로 하여 위험 사건들의 시스템과 작동을 분석하는 방법이다 (McCormick & Sanders, 1982). 이 분석방법은 위험 사건을 유발하는 모든 요소들을 나타내고 기록하는 좋은 수단이 될 뿐만 아니라, 시스템의 파괴 또는 작동불능 등을 나타내는 최종 사건에 이르게 하는 많은 하위의 해석단계를 포함하므로, 본 논문에서는 교량과 같은 구조물의 붕괴모드를 나타내고 위험도분석을 수행하는데 있어 FTA기법을 사용할 것이다. 또한, FFTA(Fuzzy Fault Tree Analysis)는 분석된 구성요소의 입·출력자료를 언어적 변량값(Boolean linguistic variables)을 사용하기 때문에 확장된 FTA기법이라 할 수 있다. FFTA기법에서는, 시스템의 부분적 연결상태와 시스템의 구성요소가 고려될 수 있으며, 평가된 구성요소와 함께 전체시스템을 분석할 수 있다.

3.2 사건수분석(ETA: Event Tree Analysis) 기법

모든 잠재적인 위험요소들은 초기사건에 뒤따라 발생한다는 것을 확인하기 위해서는, 서로 다른 하위사건들의 발생결과를 규명하는 것이 필요하다. 이 분석방법은 결합수 구성도(event tree diagram)를 이용함으로써 체계적이며 효과적으로 성취될 수 있다. 다시 말해, 구조물에서 파괴의 선행원인인 구성요소의 파괴 메카니즘은 사건 구성도로 묘사되며, 모든 경로는 구성요소들이 연속적으로 발생하는 파괴 사건들을 나타낸다. 또한, 경로의 시작에서 파괴를 야기되는 사건은 촉발사건과 가능사건의 발생과 연관되며 각각의 경로 끝의 사건은 구성요소의 파괴와 관련된다.

4. 확률적인 위험도분석(PRA) 기법

일반적으로 위험도분석은 정량적인 평가기법과 정성적인 평가기법으로 이루어진다. 정량적인 모형은 수치적 또는 확률적인 모형을 기초로 구성되는데 반해, 정성적 기법은 기본적으로 주관적인 판단에 의존한다. 더욱이 주관적인 평가기법은 과거의 경험과 비교함으로써 위험을 인식하는 것을 기초로 한다. 인간 신뢰도에 대한 불확실성과 위험에 대한 충분한 자료의 결핍으로 인해, 주관적인 불확실성 분석을 위한 적합한 방법이 고려되어야 한다. 따라서 퍼지집합 이론과 인간 신뢰도 분석과 같은 접근 방법은 무엇보다도 의사결정의 특성을 평가하는데 있어서의 어려움과 해석과정의 모호함을 정량

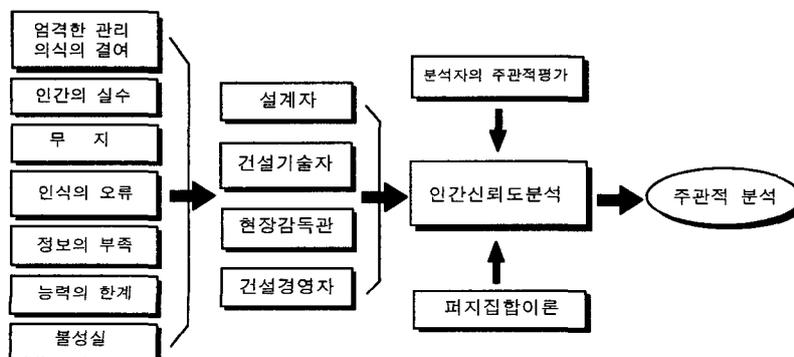


그림 2. 인간 신뢰도 분석에서 고려되는 요소들

화하는데 적용할 수 있다.

4.1 인간 신뢰도(Human Reliability)

일반적으로 건설 프로젝트에서 건설과 관련된 인간의 상호작용을 중요한 위험요소로 인식되지 않아 왔다. 그러나 실제로 일반적인 의미의 “인간의 실수”와 함께 설계자와 건설기술자의 무지, 무의식에 기인한 행동양식상의 문제가 결정적인 위험요소로 자주 발생한다. 따라서 위험도분석에서 중요한 위험요소로서 인간의 오류를 합리적으로 고려하기 위해서, 전반적인 의미로서의 인간 신뢰도에 대한 분석을 위해 고려할 수 있는 요소들을 그림 2에 나타내었다.

4.2 퍼지집합이론(Fuzzy Set Theorem)

위험도 해석은 매우 다양한 불확실성이 문제의 정의, 요소들의 평가, 상대적인 값의 정의, 그리고 해석과정의 모호함과 의사결정의 특성의 평가에 존재한다는 관점에서 모호하다. 이 논문에서 퍼지기법은 모호함 개념의 의미, 생각, 보통의 언어를 묘사하고, 그 정도를 정량적이며 확률적인 표현으로 전환하는데 이용된다. 주관적인 분석에 있어서의 언어적 변량들은 표 1과 같이 퍼지값으로 전환된다. 퍼지값은 그림 3의 수정된 Baldwin의 ramp 함수모형(Blokley, D. I., 1980)에 기초한다.

표 1. 언어적 변량에 대한 퍼지집합의 값

성취정도	중요도	f(x) 값
매우 우수	매우 중요	$\left(\frac{x}{10}\right)^6; 0 \leq x \leq 10$
우수	중요	$\left(\frac{x}{10}\right)^3; 0 \leq x \leq 10$
양호	보통	$\begin{cases} \frac{x}{10}; 0 \leq x \leq 5 \\ \frac{10-x}{10}; 5 \leq x \leq 10 \end{cases}$
불량	약함	$\left(\frac{10-x}{10}\right)^3; 0 \leq x \leq 10$
매우 불량	매우 약함	$\left(\frac{10-x}{10}\right)^6; 0 \leq x \leq 10$

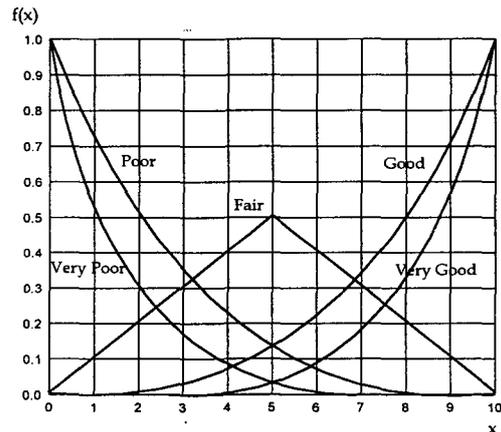


그림 3. 수정된 Baldwin의 ramp 함수

4.3 베이저안 기법(Bayesian approach)

베이저안 기법은 이용 가능한 정보가 제한되어 있고 주관적인 판단이 필요한 경우에 있어서 대단히 중요하다. 모수추정의 경우에 있어서 기술자는 종종 가능한 값이나 모수 값의 범위에 대한 약간의 지식을 갖는다. 더구나 기술자는 어떤 값이 다른 값보다 좀더 많이 발생하리라는 값에 대한 직관적 판단을 갖기도 한다. 그래서 직관과 경험에 기초를 둔 주관적 판단이나 간접적 정보는 적합한 추정치를 얻기 위하여 관측된 자료를 기초로 조직적으로 평가될 수 있으며, 베이저안 기법은 그러한 판단을 하기 위한 기초가 있는 경우에 특히 유용하다(Ang and Tang 1975).

따라서 베이저안 기법은 사전정보와 사건이 발생할 상대적 가능성을 나타내는 새로운 정보와의 상호연관성을 특정지우는 방법을 제시한다. 이 방법에서 모수추정과 관련된 불확실성은 기본 랜덤 변량의 고유변수로 정식화됨으로써 조합될 수 있다. 그러므로 베이저안 이론은 기본랜덤변량의 모수 값을 알고 있을 때 사전확률(prior probability)을 갱신하여 사후확률(posterior probability)을 구하는데 효과적인 기법이다.

각각의 사건들의 기본랜덤변량의 특성에 따라 이들 사건들의 확률분포형태를 모델링하고, 그림 4와 같은 갱신과정을 통해 사후확률을 구할 수 있다. 예를 들면, 부적절한 재료의 사용이라는 사

건의 경우는 Gaussian 또는 Lognormal 분포로 모델링화 할 수 있으며, 지진, 태풍, 홍수와 같은 자연재해의 발생은 Poisson 또는 Beta 분포로 모델화할 수 있다. 이와 같이 각각의 사건들의 사전 분포특성을 안다면 표 2에서와 같이 베이저안 이론을 이용하여 갱신된 사후확률의 모수들을 구할 수 있다.

표 2. 사후확률의 모수들

분포형태	기본 랜덤 변량	사후확률의 모수
Gaussian	$P_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\mu'' = \frac{\mu'(\sigma'^2/n) + \bar{x}(\sigma_{\mu'})^2}{\sigma'^2/n + (\sigma_{\mu'})^2}$ $\sigma_{\mu''} = \sqrt{\frac{(\sigma'^2/n)(\sigma_{\mu'})^2}{\sigma'^2/n + (\sigma_{\mu'})^2}}$
Lognormal	$P_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right]$	$\mu'' = \frac{\mu'(\xi'^2/n) + \sigma^2 \ln \bar{x}}{\xi'^2/n + \sigma^2}$ $\sigma_{\mu''} = \sqrt{\frac{\sigma^2 (\xi'^2/n)}{\xi'^2/n + \sigma^2}}$
Poisson	$P_X(x) = \frac{(\mu t)^x}{x!} e^{-\mu t}$	$\nu'' = \nu' + t$ $k'' = k' + x$
Exponential	$P_X(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$\nu'' = \nu' + \sum_1^i x_i$ $k'' = k' + n$

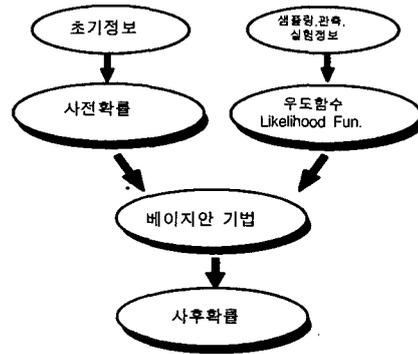


그림 4 베이저안 방법에 의한 사전확률 갱신 과정

4.4 MCS(monte carlo simulation) 기법

시뮬레이션은 실제에 대한 가상 모형과 가정들의 집합에 기초해서 실제의 현상을 본을 뜨는 과정이다(Ang and Tang 1975). 불확실성을 다루는 수단으로서의 MCS(Monte Carlo simulation)는 다양한 위험변량의 확률분포로부터 건설 프로젝트의 확률분포를 얻는데 이용될 수 있다.

그러나, MCS기법을 적용하는데 있어 각각의 위험변량의 확률분포에 따라 변수들 사이의 상호관계를 나타내는 공분산을 고려하는데 있어서 특별히 주의해야 한다. MCS에서 오류의 일반적인 근원중의 하나는 어떤 한 구성요소의 변화가 다른 구성요소에 영향을 미치지 않는 독립적인 구성요소라는 것이다. 다만, 전형적인 건설 프로젝트에서, 만약 변량들의 상호 연관성이 충분히 적다면 비록 독립의 가정이 커다란 오류를 야기시키지 않는다고 볼 수 있으므로 그러한 가정을 토대로한 해석이 가능하다. 그러나, 만일 이러한 변수들간의 연관성이 클 경우는 상관관계수에 의해 정확한 해석을 할 필요가 있다.

5. 적용사례 및 고찰

5.1 대구성서 쓰레기소각장 건설공사

대구성서 쓰레기소각장의 건설공사의 위험도분석에서 사용된 모델링기법은 ETA이며, Event Tree의 구성요소를 소각장 건설공사중 사고가 발생할 가능성이 있는 가능사건(enabling event)과 이를 촉발시키는 촉발사건(triggering event)에 대해 표 3과 표 4에 각각 정리하였다. 또한 공사중에 일어날 수 있는 발생가능사건과 촉발사건과의 상호관계를 표 5에 정리하였으며, 이러한 상호관계를 토대로 event tree를 구성할 수 있다. 본 논문에서는 구성요소로서 저항강도의 부족(E2)을 유발할 수 있는 사건들(Ti, T4, T5)에 대한 Event Tree를 그림 5에 제시하였다.

이와 같이 Event Tree를 구성한 후, 각각의 사건들의 경로에 해당하는 발생확률을 MCS기법에 의해 구하여, 관측·실험에 의한 정보를 이용하여 베이저안 기법으로 갱신된 사후확률을 구한다. 또한 주관적 판단이 필요한 요소에 대해서는 퍼지기법을 이용하며, 경제적손실과 발생확률을 곱하여 각각의 경로의 위험도를 추정하여 합함으로써 전체적인 위험도를 평가할 수 있다. 소각장 건설공사장의 전체 Event Tree중 발생가능사건 E2에 대한 위험도분석은 그림 5와 같다. 예를 들어, 콘크리트 압축강도 시험결과 다음과 같은 값 : 290 kg/cm², 285 kg/cm², 270 kg/cm², 305

표 3. 발생가능사건

구성요소	발생가능사건들의 형태
기 초	(E1) 기초의 부등침하
구조물	(E2) 저항강도의 부족
	(E3) 가설구조물의 파괴
	(E4) 구조물의 불안정 및 불충분
	(E5) 주 구조물의 손상

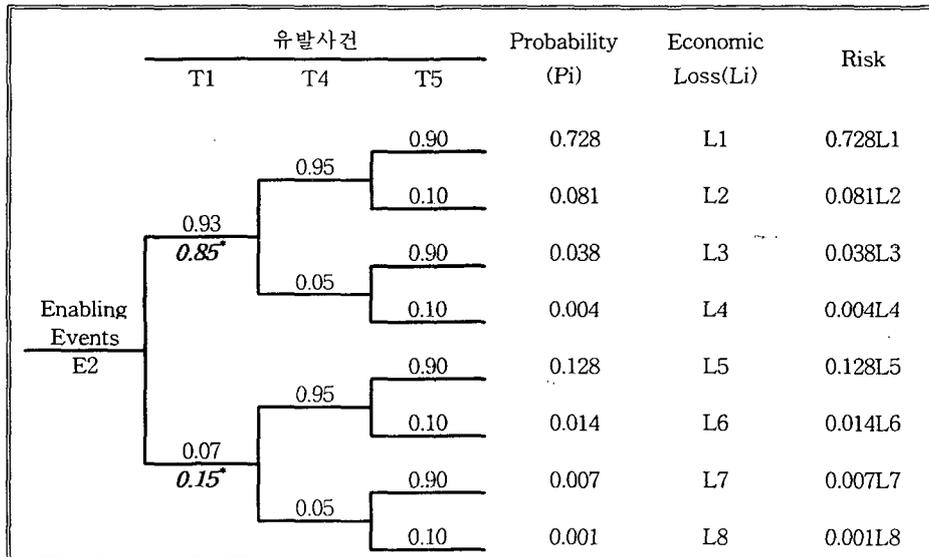
표 4. 유발사건

구성요소	유발가능사건
T1	부적절한 재료의 사용
T2	자연재해(지진, 태풍, 홍수 등)
T3	사고에 의한 충격하중
T4	설계상의 실수
T5	시공상의 오류

kg/cm², 310 kg/cm²을 얻었다. 콘크리트 압축강도는 확률분포 특성상 Lognormal분포를 갖는다고 가정하면, 이들 5개의 시편들의 평균과 표준편차는 5.676, 0.05이다. 그리고, 최근 몇 년동안 같은 시공업자에 의해 시공된 유사한 구조물의 콘크리트 압축강도는 평균 5.414와 표준편차 0.08인 Lognormal분포를 갖는다고 할 때, 위의 사전정보를 베이저안 기법을 이용하여(표2 참고) 갱신하면 평균 5.657, 표준편차 0.0215인 Lognormal분포를 갖는다. 이때 콘크리트의 설계압축강도가 280kg/cm² 이라 할 때, 갱신된 확률분포를 갖는 콘크리트 압축강도가 설계강도보다 작을 확률은 15%이다. 이와 같은 방법으로 베이저안 기법을 적용하여 갱신된 발생확률을 구할 수 있으며, 이러한 베이저안 기법을 통한 발생확률의 갱신은 촉발사건의 특성과 가용정보에 따라 적용여부를 결정하여 한다. 최종적으로 그림 5에서와 같이 수정된 발생확률(Pi)과 각각의 경로에 대한 경제적 손실(Li)을 곱함으로써 위험도를 평가할 수 있다.

표 5. 발생가능사건과 유발사건의 상호관계

발생가능사건		유발가능사건				
		T1	T2	T3	T4	T5
기 초	(E1)	-	⊙	-	⊙	⊙
구조물	(E2)	⊙	-	-	⊙	⊙
	(E3)	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
	(E4)	-	-	⊙	⊙	⊙
	(E5)	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙



(위의 촉발사건의 발생확률값은 가정된 값이며, *표시는 베이저안기법을 적용한 값이다.)

그림 5. 발생가능사건 E2에 대한 event tree

위에서 결정된 각각의 경로에 대한 위험도는 인간신뢰도를 고려하지 않은 것으로, 표 4의 촉발 사건중 시공상의 오류(T5)와 같이 특히 잠재적 영향이 큰 요소에 대해 인간신뢰도해석이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 인간신뢰도 해석은 먼저 표 6과 같이 전문가에 의한 정성적인 평가를 토대로 하며, 이와 함께 표 1과 그림 3과 같이 퍼지기법에 의한 정량화가 필요하다. 본 논문에서는 구체적인 정량화 과정은 생략하였다.

5.2 신행주대교 건설공사

신행주대교의 붕괴모드에 대한 위험도분석을 위해 그림 6과 같이 FTA기법을 이용하여 모델링하였다. 우선, 교량의 붕괴원인으로 가교각의 붕괴, 콘크리트사장재의 파괴 및 거더의 파괴로 나누었으며, 각 사건들에 대한 하위 사건들을 구성하였다. 가교각에 대해서는 압축 및 편심 휨파괴로 구분하였으며, 다시 각각의 하위사건들에 대한 두 번째 하위사건들을 그림 6에서와 같이 다시 구성하여 모델링하였다. 같은 방법으로 콘크리트 사장재와 거더의 파괴에 대한 하위사건들을 구성하였다.

표 6. 시공현장의 인간신뢰도 평가표

	운영체계	전문지식	시공경험	책임의식
매우 우수				
우수		◎		◎
양호	◎			
보통			◎	
불량				
매우 불량				

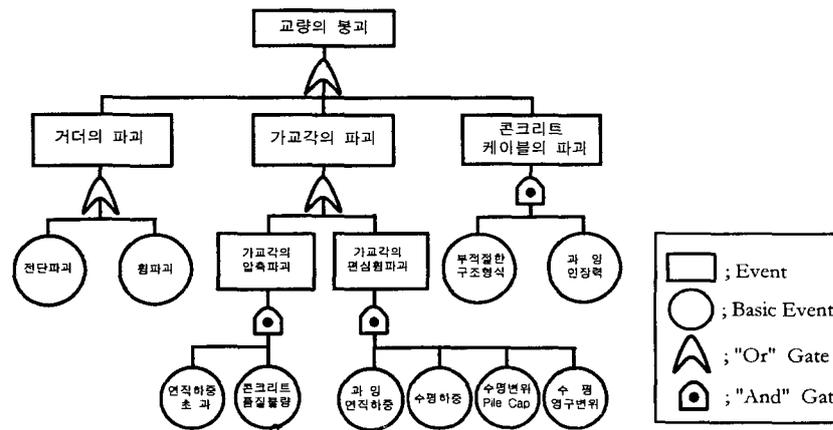


그림 6. 신행주대교의 Fault Tree 구성도

6. 결론

본 연구에서는 ETA기법을 이용하여 실제 건설프로젝트의 위험도평가를 위한 모델을 제시하였으며 베이지안기법을 이용한 발생확률의 갱신방법 및 과정에 대해서도 언급하였다. 또한, 신행주대교의 붕괴모드에 대한 FTA기법을 이용한 모델링을 통해 교량의 붕괴경로를 개념적으로 나타내었다. 이러한 위험도 평가 및 파괴모드의 분석은 다른 대형건설공사에 적용하여 내재된 위험도에 대해 체계적으로 분석할 수 있으며, 이러한 위험도분석을 바탕으로 시공간 발생할 수 있는 각종 위험요소에 대해 능동적으로 대처할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에 이어 계속적으로 여러 위험요소에 내재적으로 큰 영향을 미칠 수 있는 인간위험도에 대한 주관적 분석기법과 퍼지기법을 이용한 언어적 변수의 합리적인 정량화기법에 대해 연구될 것이며, 이를 바탕으로 보다 실질적이고도 체계적인 위험도분석기법을 제안하도록 할 것이다.

7. 참고문헌

1. Al-Bahar, J. F. and Crandall, K. C. (1990), "Systematic Risk Management Approach for Construction Projects", *J. of Const. Eng. and Manag.*, Vol. 226.
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 and Sons.
4. Blockley, D. I. (1980), *The Nature of Structural Design and Safety*, John Wiley and Sons.
5. Fischhoff, B., Lichtenstein, S., Slovic, P., Derby, S., and Keeney, R. (1984), *Acceptable Risk*, Cambridge Univ. Press.
6. Fujino, Tomoyuki (1994), "The development of A method for Investigation construction Site Accidents Using Fuzzy Fault Tree Analysis", Ph. D. Thesis.
7. Geier, R. L. (1988), "Subjective Evaluation of Risk in Industrial Safety Engineering", Ph. D. Thesis.
8. Hadipriono, F. C., Lim, Chin-Leong, and Wong, Ka-Hock (1986), "Event Tree Analysis to prevent Failures in Temporary Structures", *J. of Const. Eng. and Manag.*, Vol. 112, No. 4.
9. Karowowski, W. and Mital, A. (1986), "Potential Applications of Fuzzy Sets in Industrial Safety Engineering", *Fuzzy Sets and System*, Vol. 19, pp. 105-120.
10. Murphy, D. M. (1995), "Incorporating Human and Management Factors in Probabilistic Risk Analysis", Ph. D. Thesis.
11. Touran, A. and Wisser, E. P. (1992), "Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables", *J. of Const. Eng. and Manag.*, Vol. 118, No. 2.
12. Touran, A. (1993), "Probabilistic Cost Estimating with Subjective Correlations", *J. of Const. Eng. and Manag.*, Vol. 119, No. 1.