

불확실성 모델을 사용한 퍼지 위험도분석

A Fuzzy-based Risk Assessment using Uncertainty Model

최현호* ○ 서종원** 정평기***
Choi, Hyun-Ho Seo, Jong-Won Jung, Pyung-Ki

요 약

본 논문에서는 일반적인 건설공사에 있어서 불확실성 모델링을 사용한 체계적인 퍼지위험도 분석기법 및 절차를 제시하였다. 본 논문에서 제시한 기법 및 절차는 전문가의 경험과 주관적인 판단을 이용해서 공사관련 위험사건들의 확률을 결정함으로써 건설공사의 위험도분석을 보다 실제적으로 할 수 있으며 퍼지집합이론 및 퍼지수 개념을 사용한 불확실모델링은 불명확하고 변동이 많은 건설공사에 내재된 사건들을 제어하는 데 효과적이다. 이는 위험도 분석을 위한 객관적인 자료가 부족하고 또 이로 인해 불가피하게 전문가의 경험에 주관적인 자료에 의존하는 한국과 같은 나라에서는 본 연구에서 제시한 불확실 모델링 절차는 정량적인 위험도 분석을 가능하게 함으로써 위험도 관리를 위해서도 매우 유용하게 쓰일 수 있다.

키워드 : 위험도 분석, 불확실성 모델링, 퍼지집합, 퍼지수, 위험도 관리

1. 서론

최근 건설프로젝트에 있어서 설계·시공 등 공사전반에 대한 체계적인 위험도 분석 및 관리가 필요하다는 지적이 한국을 포함한 여러 국가에서 강하게 일고 있다. 그러나 국내외, 특히 국내에서는 주요 건설프로젝트의 시공간 시설물 및 구조물의 정밀 안전시공을 위한 위험도 분석 및 관리 기법이 거의 정립되어있지 않거나 혹은 초대형 건설프로젝트의 경우 형식적인 선에서 위험도 분석이 이루어지고 있으며 다분히 정성적인 평가에 그치고 있어 체계적이며 과학적인 건설공사 안전관리가 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 시공 전(前) 단계에서 시공 중에 발생할 수 있는 시공관련 위험 사건을 예측하고 시공 중에 발생할 수 있는 사고에 대한 피해를 감소시키기 위해 불확실성 모델링(Cho, 2002)을 사용한 퍼지 위험도분석 기법 및 절차를 제안하고 이를 지하철 건설공사에 적용하였다.

2. 건설공사에의 PRA

건설공사는 일반적으로 그림 1에서 보는바와 같이 계약, 계획과 설계, 시공, 그리고 공용 및 유지관리의 네 단계로 나누어진다(Al-Bahar, 1988). 건설공사의 PRA는 계약 전(前) 단계, 시공 전(前) 단계와 같이 각각 다른 단계에 대하여 수행될 수 있다. 건설공사에 있어서 사전 단계에서 행한 위험도 분석은 건설 공사가 진행됨에 따라 더 많은 정보가 유용하게 되어 더욱 정확한 분석을 할 수 있게 된다. 그러나 대부분의 계약자는 건설공사에 내재되어 있는 위험 요소에 의해서 발생할 사

고에 대한 비용 예측과 계약된 프로젝트의 위험 감소를 위한 방안을 찾기 위해서 위험도 분석 결과를 요구하고 있기 때문에, 건설 프로젝트에 있어서 확률적 위험도 분석은 일반적으로 계약 전(前) 단계 또는 시공 전(前) 단계에서 수행된다. 그러므로 시공 전에 건설공사에 잠재되어 있는 위험 사건 예측과 건설공사 동안 분석된 데이터에 근거한 효과적인 위험 관리와 대응 방안을 통한 사고 방지가 필요하다.

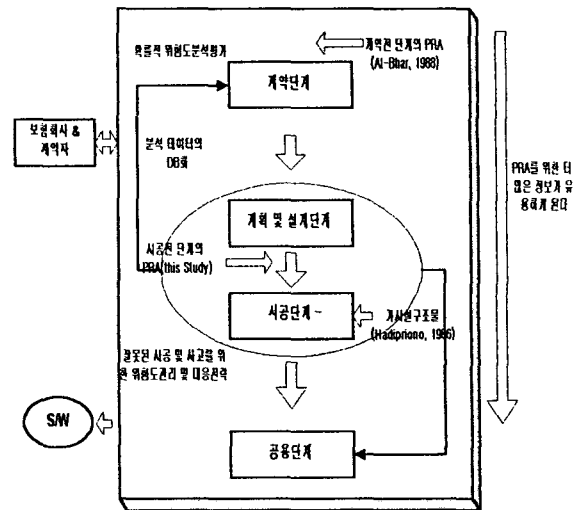


Fig. 1 건설공사의 위험도 분석 및 관리

3. 제안모델

건설공사의 확률적 위험도분석에 관한 기존의 연구들은 과거 데이터가 있는 경우에만 유용하게 사용할 수가 있고 각 공사별로 특성이 다른 현장상황에 대한 영향이 무시되었다. 따라서 본 연구에서는 객관적인 자료와 주관적인 자료로 나누어

* 학생회원, 한양대학교 토목환경공학과 박사수료
** 종신회원, 한양대학교 토목공학과 교수, PE
*** 일반회원, 승화이엔지 건설VE사업부 건설관리사업팀 팀장

질 수 있는 모든 자료를 실제 건설공사에 효과적이고 체계적으로 사용할 수 있는 모델을 제시하였다. 즉, 객관적인 자료가 있는 경우 빈도분석 같은 기존의 확률분석기법을 사용할 수 있도록 하였고, 기존의 자료가 충분치 못한 경우나 전문가의 경험에 기초한 주관적 판단자료의 활용이 불가피한 경우 퍼지 집합(Fuzzy Set)과 퍼지수(Fuzzy Number)개념(Dubois, 1982)을 도입하여 불확실한 주관적인 확률을 사용할 수 있도록 하였다. 또한, 현재의 특성이나 현장상황과 위험도 분석에 큰 영향을 미치는 평가자의 판단을 쉽게 반영시킬 수가 있으며 전문가의 판단에 오차가 있는 경우에 대해서는 불확실 범위를 이용하여 그 오차를 최소화하였다.

3.1 퍼지 불확실성 범위 산정

불확실성 범위를 산정 하는데 있어서 영향을 미치는 요소는 1)작업의 난이도/판단조건에 대한 것과 2) 판단자의 교육/학신/경력에 대한 것 또는, 1)불충분한 데이터와 2)부적당한 해석에 대한 것이 있다. 이 요소들의 조합에 의해서 표 1과 같이 결정되어진다. 여기서 불확실 정도를 나타내는 등급에는 “매우 작다, 작다, 적당하다, 크다” 의 네 가지가 있다. 이러한 요소들은 위험사건의 특성에 따라 추가되거나 변화될 수 있다.

Table 1 불확실성 범위 결정을 위한 분류

1)	2)	결정된 불확실성 범위
매우 작다	매우 작다	매우 매우 가깝다
매우 작다	작다	
작다	매우 작다	
매우 작다	적당하다	매우 가깝다
적당하다	매우 작다	
작다	작다	
작다	적당하다	가깝다
적당하다	작다	
매우 작다	크다	
크다	매우 작다	적당히 가깝다
적당하다	적당하다	
작다	크다	
작다	크다	적당히 적당히 가깝다.
적당하다	크다	
크다	적당하다	
크다	크다	

3.2 제안 퍼지 소속도 함수

새로이 제안된 함수는 일반확률과 퍼지 확률의 차이를 적절히 이용한 것이라고 할 수 있다. 즉, 일반적인 확률은 절대적으로 낮은 0과 절대적으로 높은 1의 기준을 사용하기 때문에 애매한 소속도를 표현하지 못하는 단점이 있었다. 그리고 일반적인 퍼지확률은 “높다(발생한다)/ 낮다(발생하지 않는다)”라는 언어적 변량이 특정 소속도에 한정돼 있어 사람마다 다른 판단 기준에 따라 소속도가 완전히 달라질 수 있는 문제점이 있다. 그래서 적절한 확률 기법을 통하여 산출되거나 전문가의 의견을 받아들여서 가정된 입력 데이터를 일반 확률에서처럼 소속도 1을 가진다고 가정하였다. 그리고 이의 불확실성을 고려하여 퍼지 불확실성 곡선을 Baldwin 램프곡선에 기초를 두어 제안하였다. 각 x축의 값들이 처음 예상한 값들에 근접해

서 범위가 정해지게 된다. 이렇게 함으로써 0과 1사이의 무수히 많은 범위에 대해 한정된 언어적 변량으로 인한 각기 다른 사람들의 생각에서 오는 판단으로 인한 확률 값의 차이(같은 1/100을 사람에 따라서 높다 혹은 낮다라고 생각)를 줄이고 다양한 확률범위를 가지는 각 위험요소들의 경로에 대한 해석이 가능해진다. 여기까지는 보통의 퍼지속속도 곡선중의 하나인 삼각함수모형과 비슷한데 이렇게 되면 각 사건마다 각각 하나의 다른 램프곡선이 필요하게 된다. 그래서 이를 하나의 곡선식으로 일반화하기 위하여 x값을 중앙에 위치시키고 언어학적 hedge를 도입하였다.

새로이 제안한 곡선에서 x축은 일반 확률 값을 나타내며 곡선은 불확실성을 포함한 언어적 변량을 나타내는데 여기서 사용되는 언어적 변량은 높다, 낮다, 양호하다 등의 언어적 변량이 아니라, 퍼지수 개념에 근거를 두어 “0.3정도(around 0.3)” 등의 퍼지수를 개선하여 아래와 같은 언어적 변량의 램프곡선을 이용하여 불확실성 범위를 산정 한다.

“가깝다/매우 가깝다”, “높은 쪽/낮은 쪽에 가깝다”, “~보다 약간/매우 높다”, “~보다 약간/매우 낮다”

다음은 퍼지램프곡선의 계산 절차를 간단히 나타내었다.

- 1단계 : 만약 전문가가 어떤 사건이 발생할 가능성을 “이 상황에서 지른 사건은 혹은 그 사건이 발생했을 경우에 다른 사건이 발생할 가능성은 10번 중에 2번 정도이다.” 혹은, 과거 유사한 위험사건의 발생확률이 적절한 확률해석에 의해 0.2가 결정되었다. 현장전문가가 주관적 판단을 한다면 $0.5^y = \frac{2}{10}$, $y = 2.32$ 을 만족하는 y 값을 구한 다음 위의 x축에 해당하는 값의 승한 값의 확률 값으로 놓는다.
- 2단계 : x의 y승을 이용해서 구한 x값을 재 정렬시킨다. 다음 표는 제안된 램프곡선에 의해 구해진 x값의 분포를 보여 준다. 표에서 보면 알 수 있듯이 0.5y의 소속도가 1로 가정되고 중앙에 위치되었다.

	0.0y	0.1y	0.2y	0.3y	0.4y	0.5y
y=2.32	0	0.0048	0.024	0.06	0.12	0.2
y=9.38	0	4.16E-10	2.8E-7	0.000012	0.0001	0.0015
	0.6y	0.7y	0.8y	0.9y	1.0y	
y=2.32	0.31	0.44	0.60	0.78	1.0	
y=9.38	0.0083	0.035	0.123	0.372	1.0	

- 3단계 : 이렇게 구한 값들을 바탕으로 비퍼지화 기법(본 연구에서는 무게중심법 사용)을 이용하여 각 위험사건의 불확실범위를 산정하고 그 위험사건들의 해당 시나리오의 최종 위험도를 산출한다.

본 논문에서 쓰인 불확실범위의 경우 그 정확도에 따른 기존 이론을 토대로 여러 곡선을 구성함으로써 그 사람이 판단한 값의 정확도를 가늠할 수 있으며 절대적으로 참이라고 할 경우에는 그 값이 불확실범위 없이 그대로 그 위험사건의 확률로 쓰여진다. 아울러 0과 1의 값을 가질 경우는 절대적으로

참이다.

다음 그림 2 및 표 2는 앞서 언급한 본 연구를 통해서 제안된 절차에 의해서 구성된 퍼지소속도함수의 한 예를 보여주고 있다.

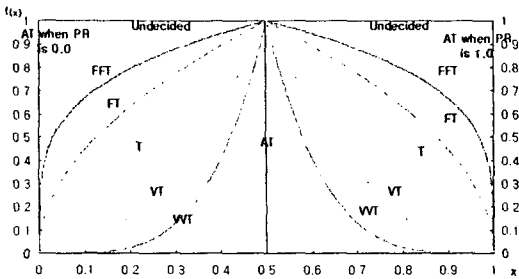


Fig. 2 “가깝다”에 대한 멤버곡선의 예

Table 2 “가깝다”에 대한 소속도 함수

구분	Values ($f(x)$)
매우매우 가깝다 (VVC)	$\left\{ \left[(2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^4 ; 0.1 \leq x \leq 0.51$ $\left\{ \left[(2-2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^4 ; 0.51 \leq x \leq 1.01$
매우 가깝다 (VC)	$\left\{ \left[(2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^2 ; 0.1 \leq x \leq 0.51$ $\left\{ \left[(2-2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^2 ; 0.51 \leq x \leq 1.01$
가깝다 (C)	$\left[2x^{\frac{1}{2}} \right]^y ; 0.1 \leq x \leq 0.51$ $\left[2-2x^{\frac{1}{2}} \right]^y ; 0.51 \leq x \leq 1.01$
약간 가깝다 (FC)	$\left\{ \left[(2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^{\frac{1}{2}} ; 0.1 \leq x \leq 0.51$ $\left\{ \left[(2-2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^{\frac{1}{2}} ; 0.51 \leq x \leq 1.01$
약간 멀다 가깝다 (FFC)	$\left\{ \left[(2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^{\frac{1}{4}} ; 0.1 \leq x \leq 0.51$ $\left\{ \left[(2-2x^{\frac{1}{2}}) \right]^y \right\}^{\frac{1}{4}} ; 0.51 \leq x \leq 1.01$
완전히 가깝다 (AC)	1

또한 본 연구에서는 “Lower/Higher than” 소속도함수를 제안하였다. 이 곡선은 예를 든다면 “발파작업을 한다면 공구당 최소한 2명 이상은 다친다” 식의 최소치나 최대치를 포함하는 언어적 변량을 위험도분석평가에 이용할 수 있도록 제안되었다.

4. 응용사례

제안한 퍼지위험도분석 기법 및 절차를 실질적으로 적용하기 위해 대상 구조물을 최근 대형사고의 발생이 빈번하고 현재도 건설이 계속되고 있는 지하철 건설공사로 선정하였다. 본 연구에서 대상구조물로 선택한 지하철 건설공사에는 다양한 위험사건과 불확실성이 내재되어 있기 때문에 이러한 잠재적 위험사건들을 어떻게 분석평가 하여 관리하느냐에 따라 위험

사건을 방지하고 앞으로의 유사한 건설프로젝트의 입찰단계·시공전 위험도를 분석하는데 유용한 자료로서 활용할 수 있을 것이다.

4.1 위험사건수집

대상 지하철 건설공사의 위험사건을 수집하기 위해서는 먼저 위험도분석평가 대상이 되는 건설공사에 대한 전반적인 사항들을 조사하여야 한다. 본 연구에서는 대상 건설공사인 지하철 건설공사의 위험사건 수집을 위해서 일반사항 총 30개 항목과 터널구간 11개 항목으로 구성하여 각 공사에 내재한 위험요소들을 자세하게 조사하였으며 이를 위하여 위험사건 수집 sheet를 제작하였다.

4.2 위험사건 규명

위험사건규명의 절차를 실제 건설공사의 위험도를 분석 평가하는 과정에서 좀더 합리적이고 실제 적용이 가능하도록 크게 위험사건 분류단계와 위험경로의 시나리오 및 점검목록작성 단계의 2가지로 분류하였다. 먼저 위험사건 분류단계에서는 기존의 위험사건 분류작업(AI-Bahar, 1988)의 한계를 보완하여 자연해체관련, 재정·경제관련, 설계관련 그리고 시공관련 위험사건 등 4개의 범주로 구성된 위험사건으로 분류하였다. 한편 발생가능한 잠재적인 위험사건의 경로인 시나리오가 구성되면 그 시나리오를 바탕으로 앞서 제시한 절차에 의한 위험도 분석을 위해 각 위험 경로에 대한 조건부 판단을 위한 체크리스트 작성이 필요하다. 본 연구에서 사용된 체크리스트는 각 축발가능사건에 따른 시나리오 경로를 기준으로 각 점검항목을 구성하고 있으며 그 항목의 점검에 따라 각 경로에 대한 조건부 확률을 결정하게 된다. 아울러 결정된 기준 확률 값의 불확실량에 대한 고려항목도 포함되어 있다.

본 논문에서 사용한 체크리스트는 지하철 건설공사에 내재해 있는 위험사건들을 규명하기 위해 실제 보험회사에서 사용하고 있는 체크리스트를 참고로 하여 좀더 세밀하고 현장상황을 고려해 본 연구에서 적용할 위험도 분석기법에 맞게 새로이 보완하여 작성하였다.

본 연구에서 작성된 37개의 체크리스트는 앞서 분류한 네 가지 위험사건 분류별로 예상위험사건 경로를 나타낸 것으로 추후에 지하철 건설공사의 현장 위치 등 각 공사의 특성에 따라 추가 보완 될 수 있다.

4.3 위험도 분석 및 평가

체크리스트 작성이 완료되면 주관적인 판단과 확률 기법에 의해서 각 위험 사건들에 대한 확률 값 및 언어적 변량을 결정하고 이를 바탕으로 제안된 퍼지소속도 함수를 이용하여 최종 위험도를 구할 수 있다.

비용의 산정에 있어서도 같은 방법을 사용한다. 과거자료나 주관적 판단에 의해 결정된 예산 손실액을 곡선의 가운데 두고 그때의 y_{cost} 값을 퍼지소속도 함수를 이용하여 구한 뒤 주어진 언어 변량에 따라 불확실량을 고려하면 된다.

x축 값의 결정에 있어서 본 연구에서는 전문가의 인터뷰를 통해 통상 건설프로젝트의 위험사건 발생에 대한 소요 경비 예측에 있어 주관적 판단이나 과거자료를 통해 분석된 값이

통상 2배까지는 넘지 않는다는 일반적으로 보험회사에서 통용되는 건설공사보험의 조건이 바탕이 되었다. 하지만 좀더 많은 넓은 비용 범위를 구하고자 한다면 그것은 각 특성에 맞게 수정할 수 있을 것이다.

이와 같은 절차를 이용해서 각 시나리오에 대한 위험도 결과로써 확률 범위와 비용범위에 의해서 최대 및 평균위험 비용을 산출할 수 있다. 그리고 각각의 시나리오에 대한 위험 비용을 간단히 합함으로써 대상건설공사의 전체 위험 비용을 산출할 수 있다.

Table 3 지하철 공사의 위험도분석 결과

분류	시트	총 위험(평균) (단위 : 10,000원)	비고
시공관련	I~XXIX	621,820 (1,772,250)	
설계관련	XXX~XXXI	37,550 (82,980)	
정치·재정 관련	XXXII~XXXI V	36,280 (99,730)	
자연재해	XXXV~XXXV II	76,700 (208,275)	
총 계		772,350 (2,163,235)	

표 3의 분석결과를 보면 알 수 있듯이 정량적인 위험도를 살펴보면 시공관련위험도가 전체 위험도의 약 80%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 시공관련 공사비가 전체 공사비의 거의 대부분을 차지한다는 점을 감안하면 당연한 결과라고 사료된다.

한편, 본 연구에서는 적용된 지하철 공사에서의 총 기대위험 비용이 7,723,500,000원(최대 : 21,632,350,000)으로 산출되었다. 그리고 본 논문에서는 제한된 지면관계로 생략된 주요 위험경로들에 의한 총 손실기대비용은 총 공기동안 5,849,750,000원(최대 : 16,429,400,000원)으로 조사되었다. 이는 전체 공사비 대비 약 5%(최대 : 약 14%)에 해당되는 비용이며 주요 위험 경로에서의 위험도가 전체 위험도의 약 76%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 물론, 이 결과치는 대상 건설공사에 국한되는 것이며 모든 지하철 건설공사의 기대위험비용이 이와 비슷하다고는 할 수 없다. 그러나 지금까지 방대한 데이터베이스를 이용하여 기대위험비용을 간단한 빈도분포만으로도 산출할 수 있는 외국의 경우를 제외하면 어떠한 연구도 본 연구와 같이

실제 건설공사의 실질적인 위험도를 정량적인 위험도로 산출된 연구는 거의 전무하다고 할 수 있다.

한편, 총 기대비용은 프로젝트의 특성과 새로운 위험 시나리오가 추가됨에 따라 변화 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 건설공사에 내재되어 있는 다양한 위험사건과 위험 시나리오를 조사하여 체계적이고 과학적인 확률적 위험도분석 절차를 제시하였고 이를 실제 지하철 건설공사의 설계·시공간 위험도분석평가에 적용해보았다.

이와 같은 연구를 통하여 기존의 위험도분석평가에 관한 연구들과는 달리 이상화된 건설공사에 대해서 위험도 분석을 실시한 것이 아니라 실제 건설공사인 지하철 건설공사의 공사 전(全)단계에 적용을 함으로서 실질적인 위험도의 정량화를 나타내었다는데 큰 의의를 둘 수 있다. 또한 실제 건설공사에 내재된 위험도를 정량적으로 분석평가하는데 퍼지불확실성 범위를 적용하여 실제 위험도의 오차를 고려함으로써 기존의 연구와는 차이를 두었다.

참고문헌

1. Al-Bahar, J. F. (1988), "Risk Management Approach for Construction Projects: A Systematic Analytical Approach for Contractors", Ph. D. Thesis.
2. D. Dubois, H. Prade, The use of fuzzy numbers in decision analysis, in: M.M. Gupta, E. Sanchez (Eds.), Fuzzy Information and Decision Processes, North-Holland, New York, 1982, pp. 309~321.
3. Cho, H. N., Choi, H. H., Kim, Y. B. (2002), "A risk Assessment Methodology for incorporating uncertainties using Fuzzy concepts" Reliability Engineering & System Safety, Vol. 78, pp. 173~183.

Abstract

This paper presents a systematic risk assessment procedure with uncertainty modeling for general construction projects. Since the approach is able to effectively deal with all the related construction risks in terms of the assumed probability with conditional probability concept that systematically incorporate expert's experiences and subjective judgement, the proposed methods with uncertainty modeling is able to apply to all the construction projects inherent in lots of uncertain risk events.

The fuzzy set theory is adopted to enhance risk assessment, to effectively handle the vague and dynamic phenomenon of an event. Therefore, the fuzzy-based risk assessment is very useful, for those countries, such as Korea, where objective probabilistic data for risk assessment is extremely rare, and thus the utilization of subjective judgmental data based on expert's experiences is inevitable.

Keywords : Risk assessment, Uncertainty modeling, Fuzzy set theory, Fuzzy number