

실드 TBM 터널에 적용 가능한 리스크 관리: II. 리스크 분석 방법

현기창¹, 민상윤², 문준배³, 정경환⁴, 이인모^{5*}

Risk management applicable to shield TBM tunnel: II. Risk analysis methodology

Ki-Chang Hyun, Sang-Yoon Min, Joon-Bai Moon, Gyeong-Hwan Jeong, In-Mo Lee

ABSTRACT In this paper, a risk analysis methodology applicable to shield TBM tunnels was studied. Fault Tree Analysis (FTA) was utilized to identify all risk items and to calculate the probability of failure of each item and Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to obtain the impact of each risk item. Finally, a risk level of each risk item can be assessed. Developed methodology is applied to a Seoul subway site in which EPB shield tunnel method was utilized and it was found that risk analysis results matched reasonably well with field data.

Keywords: Shield TBM tunnelling, risk analysis, risk factor, fault tree analysis, analytic hierarchy process

요약 본 논문에서는 실드 TBM 터널에서 적용 가능한 리스크 분석 방법을 연구하였다. FTA 방법을 통해 리스크 아이템과 각각의 발생확률을 확인하고 AHP 방법을 통해 각각의 리스크 아이템의 영향도를 구하였다. 마지막으로 각각의 리스크 아이템의 리스크 레벨을 평가할 수 있었다. 개발된 방법을 EPB 실드 터널이 사용된 서울 지하철 현장에 적용하여 리스크 분석 결과가 현장 데이터에 부합하는 합리적 결과임을 검증하였다.

주요어: 실드 TBM 터널, 리스크 분석, 리스크 요인, fault tree analysis, analytic hierarchy process

Received on November 7, 2012, Revised on November 19, 2012, Accepted on November 25, 2012.

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

²정회원, 파슨스 디자인매니저

³정회원, ㈜동아지질 부장

⁴정회원, ㈜동아지질 대표이사

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

*Corresponding author: In-Mo Lee, inmolee@korea.ac.kr

1. 서론

일반적으로 터널공법은 크게 발파굴착에 의한 재래식 터널공법(conventional tunnelling)과 기계화 터널공법(mechanized tunnelling method)으로 나뉜다. 근래에는 도심지의 대중교통수단 등과 같이 다양한 터널의 수요가 증가하고 이에 따라 다양하고 복합적인 시공상 문제점도 함께 증가하였다. 이러한 다양한 시공상 문제점에 대처하고 더욱이 발파굴착에 따른 소음, 진동 등의 환경 피해를 최소화하기 위해 기계화 터널공법의 비중은 점차 증대되고 있는 실정이다. 또한 장대터널의 경우 공기 단축이 가능하고 재래식 터널공법의 높은 노무비를 절감할 수 있다는 점은 기계화 터널공법의 장점이라 할 수 있다(한국터널공학회, 2008).

셸드 TBM 터널 공사시 프로젝트의 수행 목표 달성에 방해가 되는 위험요소들을 효과적으로 분석하고 관리함으로써 프로젝트의 목표를 성공적으로 달성할 수 있으며 이와 같은 리스크 분석이 정량적으로 이루어질 때 프로젝트의 다양하고 복잡한 불확실성을 최소화할 수 있다. 따라서 정량적인 리스크 분석은 효과적인 리스크 관리를 위한 중요한 과정이라고 할 수 있다. 하지만, 현재 국내외적으로 셸드 TBM에 적용할 수 있는 리스크 관리 방법은 부족하며 정성적인 리스크 관리 수준일 경우가 많다.

본 논문에서는 셸드 TBM에서 발생 가능한 리스크 요인을 확인하고 그에 따른 리스크 분석과 평가할 수 있는 방법을 개발하여 셸드 TBM 터널 공사시 정량적으로 리스크를 관리할 수 있도록 하였다. 이를 위해 이전 연구에서 셸드 TBM 터널에 발생 가능한 리스크들로 구성된 Fault Tree(FT)를 바탕으로 Fault Tree Analysis(FTA) 방법과 Analytic Hierarchy Process(AHP) 방법을 활용하여 발생가능한 주요 리스크의 발생확률과 영향도를 정량적으로 계산하는 방법을 제시하였다. 또한 제시된 리스크 평가방법을 검증하기 위하여 실제 셸드 TBM 터널현장에서의 리스크 발생 빈도와 그에 따라 발생하는 다운타임 자료를 바탕으로 비교하였다. 제안된 리스크 평가방법을 바탕으로 셸드 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크의 발생확률과 영향도를 모두 고려하고 이 결과를 바탕으로 집중적으로 관리해야 할 리스크들을 제시함으로써 체계적인 리스크 관리를 하고자 한다. 이를 통해 시공 중 발생하는 다운타임을 사전에 예측하고 대책공법을 제시할 수 있는 경제적인 리스크 관리가 가능해질 것으로 판단된다.

2. Fault Tree Analysis를 활용한 리스크 발생확률 분석 방법

FTA는 정성적 평가로부터 인지된 하나의 특정 사고나 주요 시스템의 리스크를 정상사건(top

event)으로 놓고 연역적인 기법으로 리스크의 원인을 분석하는 방법이다. 정상사건과 리스크의 요인간의 이론적 관계를 AND 게이트와 OR게이트를 사용하여 명백하게 하는 동시에 각 요인의 발생확률을 근거로 정상사건의 발생을 정량적으로 예측할 수 있다(홍은수 등, 2007). 일반적으로 FT를 구성하는 기본 논리 구조는 AND gate와 OR gate이다. 이러한 AND gate와 OR gate로 이루어진 사상의 발생확률(F)은 식 1과 식 2와 같이 계산할 수 있다(구본희 등, 2008).

$$F_{ANDgate} = F_1 \cdot F_2 \cdots F_n = \prod_{i=1}^n F_i \tag{1}$$

$$F_{ORgate} = 1 - [1 - F_1] \cdot [1 - F_2] \cdots [1 - F_n] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) \tag{2}$$

이전 논문에서 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크 요인을 Table 1과 같이 정리하였으며 FT도를 이용하여 발생 가능 리스크와 리스크 요인의 상관관계를 리스크 타입별로 (즉, 커터, 기계구속, 배토, 세그먼트) 분류하여 Fig. 1~4에 정리하였다. 구성된 FT의 기본 이벤트 즉, 리스크 요인들에 대한 발생확률을 근거로 위의 식 1과 2을 통해 실드 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크들의 발생확률을 계산할 수 있었다. 본 논문에서는 실제 서울 지하철 공사 현장에 대한 설문조사 결과를 바탕으로 리스크별 발생확률을 계산하고 이를 현장 결과와 비교하였다.

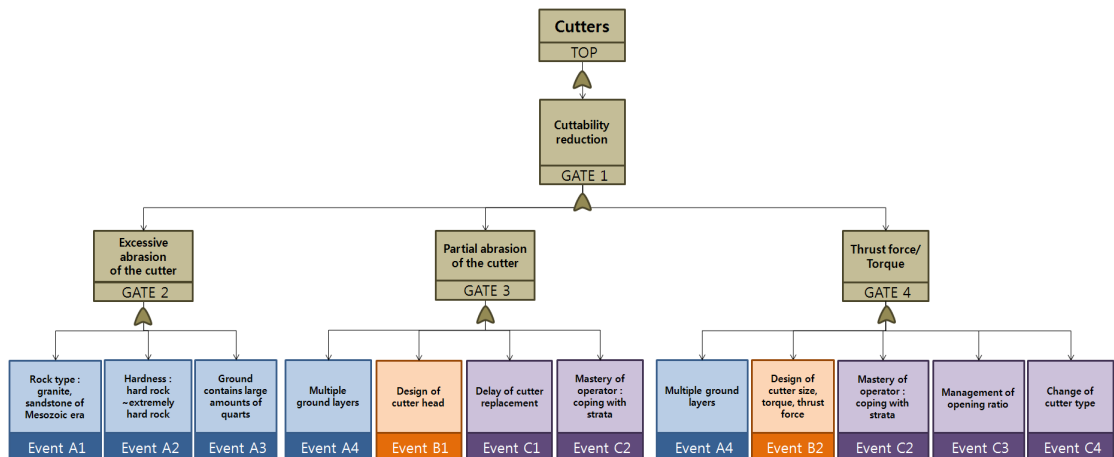


Fig. 1. Analysis of risk factors associated with the cutter.

Table 1. Risk factors for Shield TBM tunnel.

	Event	Risk factor		Event	Risk factor
A Geological factors	event A1	Rock type : granite, granodiorite, Mesozoic sandstone	C Construction management factors	event C1	Delay of cutter replacement
	event A2	Hardness : hard or extremely hard rock		event C2	Mastery of operator: coping with strata
	event A3	Ground contains large amounts of quartz		event C3	Management of opening ratio
	event A4	Multiple ground layers		event C4	Change of cutter type
	event A5	Squeezing ground		event C5	Unskilled operation of direction control unit
	event A6	Swelling ground		event C6	System errors in surveying
	event A7	Insufficient bearing capacity of ground		event C7	Poor assembly of taper segments
	event A8	Fractured zone of faults exists		event C8	Late replacement of gauge cutter
	event A9	Degree of weathering, hydrothermal alteration		event C9	Poor management of earth pressure or slurry pressure
	event A10	Ground contains a gravel layer		event C10	Management of amount of mucking
	event A11	Collapse of ground surface		event C11	Mucking control of irregular size and shape
	event A12	Confined aquifer exists		event C12	Liquidity control of mucking
B Design factors	event B1	Design of cutter head		event C13	Mucking process and process control
	event B2	Design of cutter size, torque, thrust force		event C14	Forced direction change of machine
	event B3	Selection of TBM machine		event C15	Insufficient management of backfill grout
	event B4	Ring jointing method		event C16	Assembly work of key segments
	event B5	Selection of waterstops		event C17	Alien substances intruded into segment joint faces

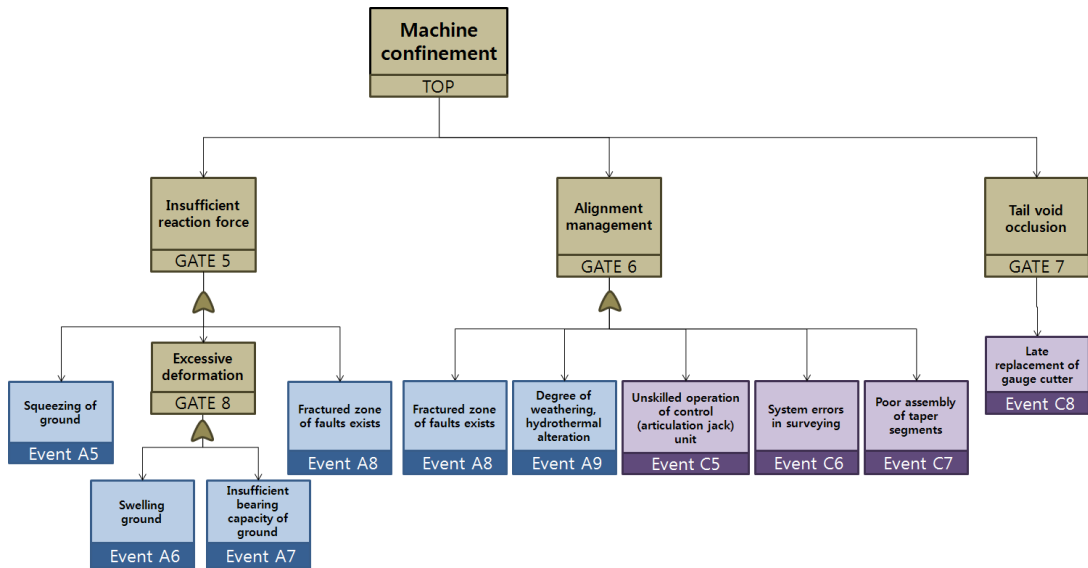


Fig. 2. Analysis of risk factors associated with the machine confinement.

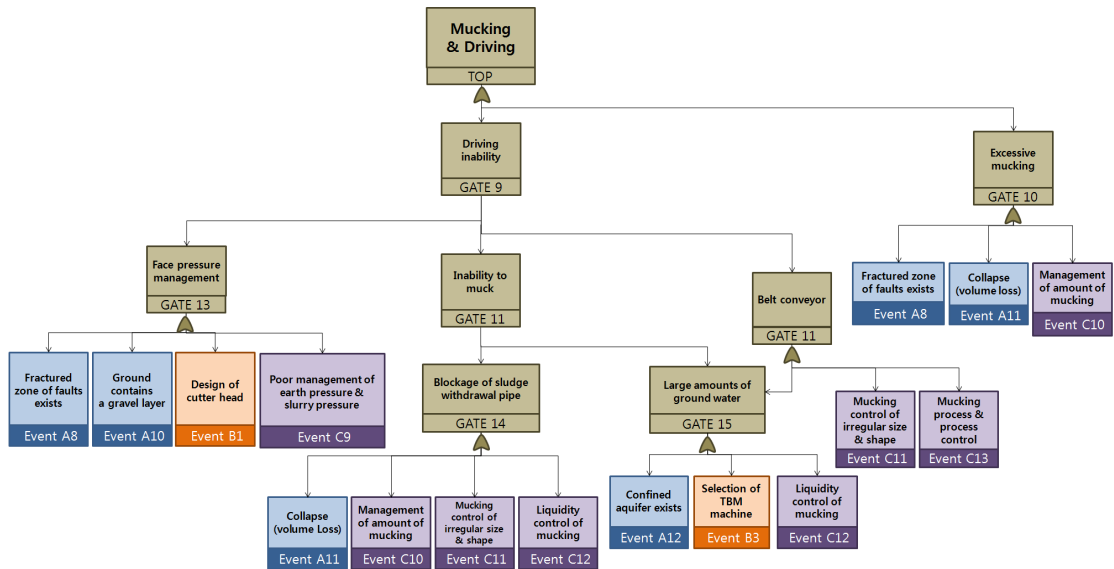


Fig. 3. Analysis of risk factors associated with the mucking and driving.

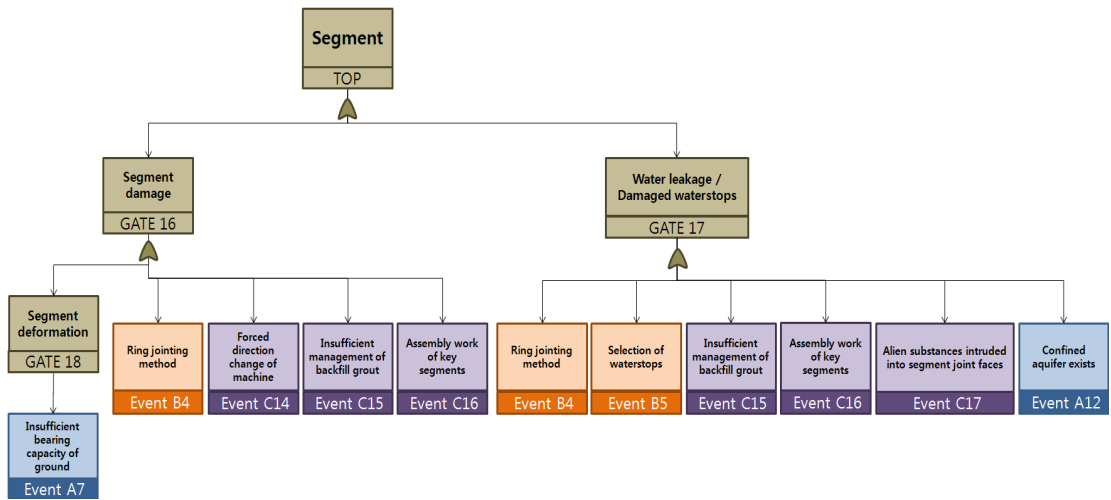


Fig. 4. Analysis of risk factors associated with segments.

3. Analytic Hierarchy Process(AHP)를 통한 리스크 영향도 분석 방법

AHP는 1970년대 초반 T. L. Saaty에 의해 개발된 계층 분석적 의사결정방법이다. 이 방법은 의사결정요소의 속성과 그 측정척도가 다양한 다 기준 의사결정문제에 효과적으로 적용되어 의사결정자가 선택할 수 있는 여러가지 대안들을 체계적으로 순위화가 가능하게 도와준다.

구성된 FT도에서 각각의 기본 이벤트는 리스크 요인이 되고 이벤트의 상위 단계인 각각의 게이트들은 실제 발생 가능한 리스크들이 된다. 하지만 커터와 관련된 리스크의 경우 커터가 과도하게 마모된 경우나 편마모가 발생한 경우 등은 모두 복합적으로 발생하여 커터의 절삭량 저하를 발생 시키게 되므로 하나의 리스크로 구분하였다. 배토/굴진과 관련된 리스크의 경우에는 막장압 관리가 부족하거나 배토가 불능한 경우, 벨트 컨베이어에 이상이 생긴 경우 모두 굴진이 불가하게 되지만 각각의 경우가 모두 개별적으로 발생 가능하기 때문에 각각을 모두 개별적인 리스크로 구분하였다. 이와 같이 쉘드 TBM 공사시 발생 가능한 리스크들을 정리하면 아래의 Table 2와 같다.

Table 2. Possible Risks during Shield TBM Construction.

Section		Risk item
Cutters	Risk 1	Cuttability reduction
Machine confinement	Risk 2	Insufficient reaction force
	Risk 3	Alignment management
	Risk 4	Tail void occlusion
Mucking & Driving	Risk 5	Face pressure management
	Risk 6	Incapability of mucking
	Risk 7	Breakdown of Belt conveyer
	Risk 8	Excessive mucking
Segment	Risk 9	Segment damage
	Risk 10	Water leakage

AHP 기법을 활용하기 위해서는 먼저 n개의 항목에 대한 비교를 통해 nC₂회의 쌍대응비교를 수행하고 이를 바탕으로 비교행렬 A를 만든다. 비교행렬 A를 통해 각 항목별 가중치를 구하기 위해서 비교행렬 A의 최대고유치(maximum eigenvalue)에 대응하는 주고유벡터(dominant eigenvector)의 요소를 가중치로 이용하는 고유벡터법(eigenvector method)이 사용되며 기본식은 아래 식 3과 같다(이홍철 등, 2007). 본 논문에서는 실드 TBM 터널 공사시 발생하는 다운타임 크기에 대한 상호 비교 척도에 대해 설문조사를 실시하였다. 고유벡터법을 활용함으로써 구한 리스크별 가중치를 리스크의 영향도로 제시하고자 한다.

$$A\vec{u} = \lambda_{\max} \vec{u} \tag{3}$$

여기서, λ_{\max} 는 최대고유치이며 이때의 고유벡터 \vec{u} 를 주고유벡터라고 한다.

고유벡터법을 바탕으로 판단의 불일치성을 측정함으로써 자료의 일관성을 검증할 수 있다. 위의 식에서 λ_{\max} 는 항상 n보다 같거나 크기 때문에 구한 λ_{\max} 가 n에 근접할수록 쌍대비교행렬 A는 일관성을 가진다고 볼 수 있다. 이러한 행렬 A의 일관성을 판단하기 위하여 식 4와 식 5와 같은 일관성지수(CI, Consistency Index)와 일관성비율(CR, Consistency Ratio)을 구함으로써 일관성 검정을 할 수 있다. 일관성비율(CR)이 0.1보다 작은 경우에 일관성을 유지하는 것으로 판단한다.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \tag{4}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

여기서, 무작위지수(RI, Random Index)는 1에서 9까지 정수들을 무작위로 추출하여 역수행렬을 작성한 후 일관성지수를 구한 것으로 일관성의 허용한도를 나타낸다. n에 따른 무작위지수(RI)는 아래의 Table 3과 같다(김관중 등, 2006).

Table 3. Random Index.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

본 논문에서는 앞서 정리된 10개의 리스크들을 바탕으로 쌍대 비교 행렬을 만든 뒤 TBM 시공 전문가들로부터 리스크의 영향도, 즉 각각의 리스크들로 인해 발생하는 다운타임 크기에 대한 상호 비교 척도에 대해 설문조사를 실시한다.

4. FTA와 AHP를 활용한 리스크 분석 방법 활용 사례 - 서울 지하철 000공구

4.1 서울 지하철 000공구 건설 공사 개요

서울 지하철 000공구는 최소토피는 8.06 m(1.08D, D는 쉴드 직경)로 Fig. 5와 같이 A, B터널의 지반조건은 충적 모래층이며 C, D터널에서는 풍화암 및 연경암이 혼재되어 있다. 또한 한국화학시험연구원, 국회의사당, 국회 앞 지하차도의 건축물과 도로 및 셋강 등 5개소에 걸쳐 지중 구조물과 교차하고 여의하류IC의 교각을 근접 통과하므로 과도한 지반침하를 방지하여 주변 구조물에 대한 영향을 최소화해야 하는 구간이다.

서울 지하철 000공구 현장의 공사개요는 다음 Table 4와 같다.

Table 4. Summary of the Seoul Subway Section 000 construction site.

Project Site	Seoul Subway Line No. 9 Section 00 Construction Project
Project Period	July 15, 2003 ~ March 31, 2008
Project Location	Dangsan-dong ~ Yeouido-dong in Seoul
Size	extension 2,330m (stations - 2, shield tunnels - 1,807m x 2)
machine type	Shield TBM (Slurry type)

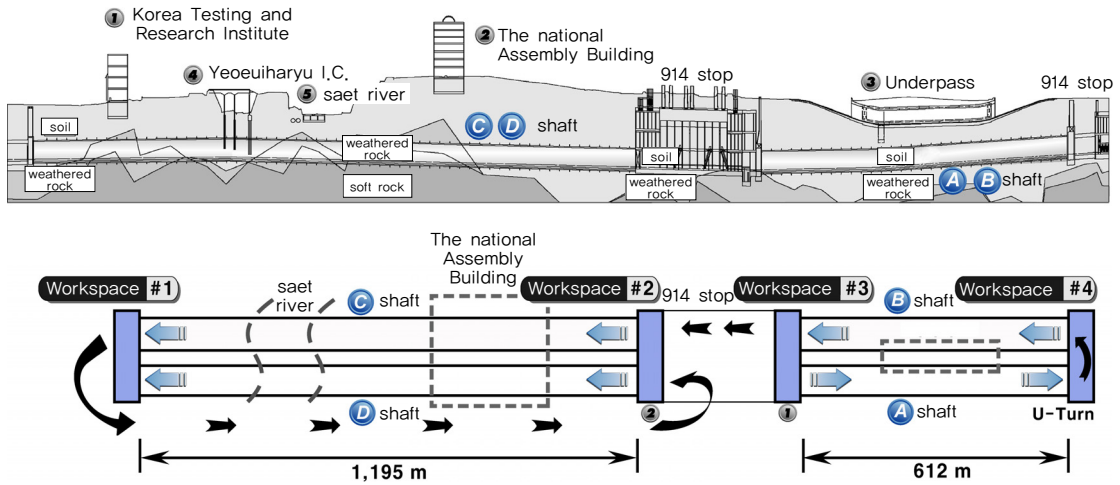


Fig. 5. Outline of Seoul Subway Section ○○○.

4.2 FTA를 활용한 리스크 발생확률 분석

본 연구에서 개발된 FTA를 활용한 리스크 발생확률 분석기법을 검증하기 위하여 서울지하철 ○○○공구 현장 데이터와 비교·검토하였다. 리스크 요인별 발생확률 등급은 아래의 Table 5와 같이 결정하고 TBM 현장 경험이 10년 이상인 TBM 시공 전문가에게 서울 지하철 ○○○공구의 지질도, 문헌자료, 공사계획 등 여러 가지 정보를 제공한 뒤 리스크 요인별 발생확률 등급에 대한 설문조사를 아래의 Table 6과 같이 실시하였다. 또한 실시된 설문조사 결과를 바탕으로 본 논문의 2장에서 설명한 AND gate와 OR gate로 이루어진 사상의 발생확률(F)에 대한 계산방법인 식 1과 2를 통하여 FTA 분석을 수행하고 각각의 리스크 발생확률을 계산하였다. FTA 분석을 통해 수행된 리스크별 발생확률 결과는 다음 Table 7과 같다.

Table 5. Risk probability level.

Probability level	Probability(%)
1 level (Very Likely)	more than 80%
2 level (Likely)	51 - 80%
3 level (Possible)	31 - 50%
4 level (Unlikely)	10 - 30%
5 level (Very Unlikely)	Below 10%

Table 6. Survey result of Seoul Subway Section ○○○ for risk probability analysis.

	Event	Risk factor	Level		Event	Risk factor	Level
A Geological factors	event A1	Rock type : granite, granodiorite, Mesozoic sandstone	5	C Construction management factors	event C1	Delay of cutter replacement	5
	event A2	Hardness : hard or extremely hard rock	4		event C2	Mastery of operator: coping with strata	5
	event A3	Ground contains large amounts of quartz	5		event C3	Management of opening ratio	5
	event A4	Multiple ground layers	5		event C4	Change of cutter type	5
	event A5	Squeezing ground	5		event C5	Unskilled operation of direction control unit	4
	event A6	Swelling ground	5		event C6	System errors in surveying	5
	event A7	Insufficient bearing capacity of ground	5		event C7	Poor assembly of taper segments	4
	event A8	Fractured zone of faults exists	4		event C8	Late replacement of gauge cutter	4
	event A9	Degree of weathering, hydrothermal alteration	5		event C9	Poor management of earth pressure or slurry pressure	5
	event A10	Ground contains a gravel layer	4		event C10	Management of amount of mucking	3
	event A11	Collapse of ground surface	5		event C11	Mucking control of irregular size and shape	4
	event A12	Confined aquifer exists	4		event C12	Liquidity control of mucking	4
B Design factors	event B1	Design of cutter head	5		event C13	Mucking process and process control	4
	event B2	Design of cutter size, torque, thrust force	5		event C14	Forced direction change of machine	4
	event B3	Selection of TBM machine	5		event C15	Insufficient management of backfill grout	3
	event B4	Ring jointing method	5		event C16	Assembly work of key segments	4
	event B5	Selection of waterstops	5		event C17	Alien substances intruded into segment joint faces	4

Table 7. Risk probability analysis result of Seoul Subway Section ○○○.

Section		Risk item	Probability
Cutters	Risk 1	Cuttability reduction	54.5 %
	Risk 2	Insufficient reaction force	31.4 %
Machine confinement	Risk 3	Alignment management	53.8 %
	Risk 4	Tail void occlusion	20.0 %
Mucking / Driving	Risk 5	Face pressure management	42.2 %
	Risk 6	Incapability of mucking	77.8 %
	Risk 7	Breakdown of Belt conveyer	61.1 %
	Risk 8	Excessive mucking	54.4 %
Segment	Risk 9	Segment damage	65.3 %
	Risk 10	Water leakage	42.2 %

4.3 AHP를 활용한 리스크 영향도 분석

리스크의 영향도를 분석하기 위해서는 앞서 정리된 10개의 리스크들을 바탕으로 쌍대 비교 행렬을 만든 뒤 TBM 시공 전문가들로부터 리스크의 영향도, 즉 각각의 리스크들로 인해 발생하는 다운타임 크기에 대한 상호 비교 척도에 대해 설문조사를 Table 8과 같이 실시하였다. 설문조사 결과와 본 논문의 3장에서 설명한 식 3과 같은 고유벡터법을 활용하여 구한 주고유벡터 요소를 구하였다. 주고유벡터의 요소들은 각각의 리스크들의 다운타임 크기에 대한 가중치, 즉 영향도이며 아래의 Table 9와 같이 정리할 수 있다.

자료의 일관성을 검증하기 위하여 고유벡터법을 통해 구한 λ_{max} 는 10.712였다. 계산된 최대 고유치(λ_{max})로 식 4를 통해 구한 일관성지수(CI)는 0.0791이며 Table 3에서 난수지수(RI)는 요소의 개수가 10개일 경우 1.51이다. 따라서, 일관성 비율(CR)은 0.052로 0.1보다 작으므로 설문조사를 시행한 영향도 쌍대 비교 행렬은 일관성이 있다고 판단되며 이를 통해 구한 리스크의 영향도(가중치)는 의미 있는 결과로 판단된다.

Table 8. Survey result of Seoul Subway Section ○○○ for risk impact analysis.

Risk	Cuttability reduction	Insufficient reaction force	Alignment management	Tail void occlusion	Face pressure management	Incapability of mucking	Breakdown of Belt conveyer	Excessive mucking	Segment damage	Water leakage
Cuttability reduction	1	1	1/5	5	1	1/5	1/3	1	1/5	3
Insufficient reaction force	1	1	1	3	1	1/5	1	3	1/3	3
Alignment management	5	1	1	5	3	1	1	3	1	3
Tail void occlusion	1/5	1/3	1/5	1	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1
Face pressure management	1	1	1/3	5	1	1	1	1	1/3	3
Incapability of mucking	5	5	1	5	1	1	1	3	1	5
Breakdown of Belt conveyer	3	1	1	5	1	1	1	3	1	5
Excessive mucking	1	1/3	1/3	3	1	1/3	1/3	1	1/5	3
Segment damage	5	3	1	5	3	1	1	5	1	5
Water leakage	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	1

Table 9. Risk impact result of Seoul Subway Section ○○○.

Section		Risk item	Impact
Cutters	Risk 1	Cuttability reduction	0.059
Machine confinement	Risk 2	Insufficient reaction force	0.088
	Risk 3	Alignment management	0.159
	Risk 4	Tail void occlusion	0.023
Mucking / Driving	Risk 5	Face pressure management	0.084
	Risk 6	Incapability of mucking	0.180
	Risk 7	Breakdown of Belt conveyer	0.134
	Risk 8	Excessive mucking	0.054
Segment	Risk 9	Segment damage	0.192
	Risk 10	Water leakage	0.027

4.4 리스크 발생확률과 영향도를 고려한 리스크 평가

4.4.1 일반적인 리스크 평가 방법

FTA와 AHP를 활용한 리스크 분석 결과를 바탕으로 리스크 평가를 수행하였다. 먼저 리스크 발생확률과 영향도에 대한 Risk Rating(RR)을 산정하여 각각의 리스크에 대한 발생확률과 영향도를 모두 고려하여 평가한다. 본 논문에서는 아래 Table 10과 Fig. 6과 같이 적용 현장에 적합한 Risk Rating을 설정하였다.

Table 10. Risk Rating Example.

Probability (%)	Impact	Score
more than 80%	more than 0.16	5
61 - 80%	0.12 - 0.16	4
41 - 60%	0.08 - 0.12	3
21 - 40%	0.04 - 0.08	2
below 20%	below 0.04	1

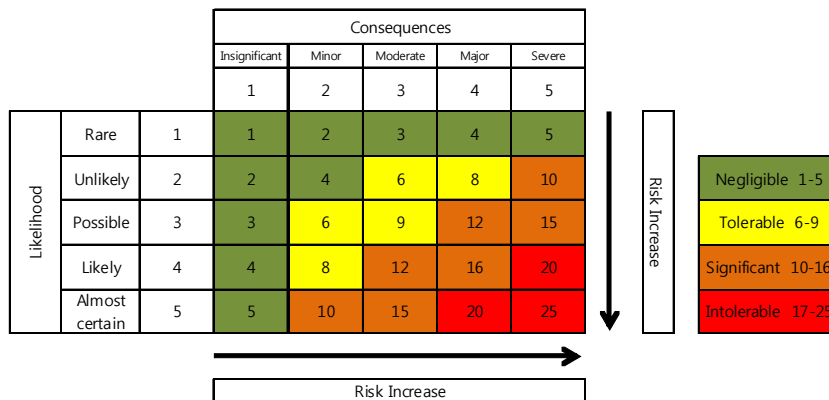


Fig. 6. Risk Rating evaluation guideline.

4.4.2 서울 지하철 000공구 프로젝트의 리스크 평가 적용

마지막으로 FTA와 AHP를 활용한 리스크 분석 결과와 결정된 Risk Rating(RR)을 고려하여 리스크 수준을 산정하면 아래 Table 11과 같다. 특히 배토가 불능한 경우와 세그먼트 파손과 관련된 리스크가 위험한 것으로 평가된 것을 알 수 있다.

Table 11. risk level evaluation result.

Section		Risk item	Probability	Impact	Probability Score	Impact Score	Risk Level
Cutters	Risk 1	Cuttability reduction	54.5 %	0.059	3	2	6
Machine confinement	Risk 2	Insufficient reaction force	31.4 %	0.088	2	3	6
	Risk 3	Alignment management	53.8 %	0.159	3	4	12
	Risk 4	Tail void occlusion	20.0 %	0.023	1	1	1
Mucking / Driving	Risk 5	Face pressure management	42.2 %	0.084	3	3	9
	Risk 6	Incapability of mucking	77.8 %	0.180	4	5	20
	Risk 7	Breakdown of Belt conveyer	61.1 %	0.134	4	4	16
	Risk 8	Excessive mucking	54.4 %	0.054	3	2	6
Segment	Risk 9	Segment damage	65.3 %	0.192	4	5	20
	Risk 10	Water leakage	42.2 %	0.027	3	1	3

4.4.3 서울 지하철 000공구 리스크 평가 결과 검증

앞서 분석하고 평가된 리스크 관리 방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 서울 지하철 000공구 공사시 작성했던 A 터널에서의 작업관리일지를 바탕으로 실제 발생했던 리스크들과 제안된 리스크 분석·평가 방법을 통해 얻은 리스크 레벨 결과를 Table 12와 같이 정리하였다. 펌프나 송배기관 문제로 발생하는 배토 불능 리스크와 뒷채움재 관리가 부족하거나 그로 인해 발생하는 세그먼트 파손 리스크의 비율이 33.5%로 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다. 큰 위험을 초래하는 반력 부족이나 막장압 관리 부족과 관련된 리스크들은 발생하지 않았으며 본 연구에서 리스크 요인으로 분류하지 않았던 기계내부 청소, 전기 설비, 시멘트 재고 부족 등의 리스크가 발생되어 기타로 구분하였다.

앞서 연구된 리스크 분석 방법을 통해 예측할 수 있었던 리스크들은 발생한 리스크 총 167건 중 151건으로 약 90% 정도였다. 분석 결과 발생확률과 영향도가 높았던 리스크는 배토가 불능한 경우와 세그먼트가 파손되는 경우로 리스크 레벨은 비용에 상관없이 리스크를 저감시키는 충분한 대책이 마련되어야 하는 Intolerable 단계였다. 또한 측량 시간이 포함되는 선형관리나 벨트 컨베이어 고장과 관련된 리스크도 영향도가 비교적 크게 평가되어 리스크 레벨이 경고 단계인 Significant

단계로 평가되었다. Table 12와 같이 현장 데이터와 비교하여 보면 리스크 레벨이 높았던 배토가 불가능한 경우와 뒷채움재 관리 부족 등이 포함된 세그먼트가 파손되는 경우에 총 다운타임이 매우 큰 것으로 나타났다. 또한 리스크 레벨이 경고 단계인 선형관리나 벨트 컨베이어 고장과 관련된 리스크의 총 다운타임도 비교적 큰 것을 알 수 있다.

제안된 리스크 분석 방법을 기 시공된 현장 데이터와 비교한 결과 리스크의 발생확률과 영향도를 모두 정량화할 수 있는 리스크 분석방법으로 신뢰할 만한 방법인 것을 알 수 있었다. 향후 각각의 리스크에 대한 효과적인 저감 대책에 대한 연구와 리스크 예측 방법 개발 연구를 통해 좀 더 효율적이고 경제적인 리스크 관리가 가능할 것이다.

Table 12. Risk result of of Seoul Subway Section ○○○.

Section		Risk item	Number	Ratio	Total Downtime (min.)	Risk Level
Cutters	Risk 1	Cuttability reduction	6	3.6%	345	6
Machine confinement	Risk 2	Insufficient reaction force	-	0.0%	-	6
	Risk 3	Alignment management	6	3.6%	1113	12
	Risk 4	Tail void occlusion	-	0.0%	-	1
Mucking / Driving	Risk 5	Face pressure management	-	0.0%	-	9
	Risk 6	Incapability of mucking	56	33.5%	9588	20
	Risk 7	Breakdown of Belt conveyer	21	12.6%	3295	16
Segment	Risk 8	Excessive mucking	2	1.2%	275	6
	Risk 9	Segment damage	56	33.5%	5251	20
Etc.	Risk 10	Water leakage	4	2.4%	282	3
	Risk 11	Machine cleaning	6	3.6%	592	
	Risk 12	Electric installation	7	4.2%	1830	
	Risk 13	Cement shortage	3	1.8%	790	
Total			164	98.2%	22,571	

5. 결 론

본 논문에서는 FTA와 AHP를 활용한 리스크 분석 방법을 제시하였다. 이전 연구에서 리스크 확인 과정을 통해 정리된 리스크 요인들과 그에 따른 리스크 사이의 원인과 결과를 분석한 FT도를 작성하였다. 쉴드 TBM 터널 공사과정에서 기본 이벤트의 발생확률 등급을 산정하고 작성된 FT도를 바탕으로 리스크들의 발생확률을 구하였다. 또한 AHP 방법을 활용하여 리스크의 다운타임에 대한 영향도를 계산하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서 제시된 Risk Rating으로 각각 리스크들의 위험

정도를 평가할 수 있었다.

개발된 리스크 분석 방법을 검증하기 위하여 서울 지하철 공사 시 발생된 리스크 자료와 비교하였다. 실제 TBM 시공 전문가에게 현장에 대하여 설문 조사를 한 후 개발된 리스크 분석 방법을 사용하여 리스크 분석 및 평가 과정을 수행하였다. 그 결과 배토 불능과 관련된 리스크와 세그먼트 파손과 관련된 리스크가 가장 위험한 것으로 평가되었다. 실제 현장 데이터에서도 배토 불능과 세그먼트 파손과 관련 리스크의 발생비율이 가장 높고 평균 다운타임도 큰 것으로 나타났다. 또한 총 다운타임이 상대적으로 큰 것으로 조사되었던 선형관리 리스크와 벨트 컨베이어 관련 리스크는 리스크 레벨이 경고 단계인 것으로 평가되었다. 개발된 리스크 분석 방법을 통해 예측 할 수 있었던 리스크들은 현장에서 발생된 리스크 총 167건 중 151건으로 약 90%였으며 실드 TBM 공사 현장에서 적용할 만한 신뢰성을 가지는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업의 “TBM 핵심 설계-부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술 개발” 연구비지원(10기술혁신E09)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Hong, E.S., Kong, J.S., Shin, H.S., Lee, I.M., (2007), “A Case Study for Probabilistic Risk Evaluation based on Event Tree Analysis Technique for the Design of Shield TBM”, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 2, pp. 139-147.
2. Kim, K.J., Jang, M.S. (2006), “The method of results of decision reflections between PI project valuation groups using AHP”, Journal of Korean Society of Road Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 145-157.
3. Korean Tunnelling Association (2008), Series of Tunnel Engineering 3 - Tunnel Mechanized Construction Design, CIR, Seoul. pp. 3-6.
4. Ku, B.H., Cha, J.M., Kim, H.C. (2008), “Reliability analysis of distribution systems by using FTA”, The Korean Institute of Electrical Engineers power engineering autumnal conference, pp. 247-249.
5. Lee, H.C., Kim, S.K., Kim, O.K. (2007), “Development of decision making model for selecting the soft foundation improvement method using AHP technique”, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 4, pp. 499-506.
6. Saaty, T.L. (1980), The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York.