

막장전방 예측기법에 근거한 TBM 터널의 리스크 관리 시스템 개발 및 현장적용

정희영¹ · 박정준² · 이강현³ · 박진호⁴ · 이인모^{5*}

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석박통합과정

²정회원, 한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀 선임연구원

³정회원, 한국도로공사 도로교통연구실 경영전략연구실 선임연구원

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

TBM risk management system considering predicted ground condition ahead of tunnel face: methodology development and application

Heeyoung Chung¹, Jeongjun Park², Kang-Hyun Lee³, Jinho Park⁴, In-Mo Lee^{5*}

¹Ph. D Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Senior Researcher, Advanced Infrastructure Research Team, Korea Railroad Research Institute

³Senior Researcher, Corporate Strategy & Policy Research Division, Korea Expressway Corporation Research Institute

⁴Ph. D Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁵Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

ABSTRACT: When utilizing a Tunnel Boring Machine (TBM) for tunnelling work, unexpected ground conditions can be encountered that are not predicted in the design stage. These include fractured zones or mixed ground conditions that are likely to reduce the stability of TBM excavation, and result in considerable economic losses such as construction delays or increases in costs. Minimizing these potential risks during tunnel construction is therefore a crucial issue in any mechanized tunneling project. This paper proposed the potential risk events that may occur due to risky ground conditions. A resistivity survey is utilized to predict the risky ground conditions ahead of the tunnel face during construction. The potential risk events are then evaluated based on their occurrence probability and impact. A TBM risk management system that can suggest proper solution methods (measures) for potential risk events is also developed. Multi-Criterion Decision Making (MCDM) is utilized to determine the optimal solution method (optimal measure) to handle risk events. Lastly, an actual construction site, at which there was a risk event during Earth Pressure-Balance (EPB) Shield TBM construction, is analyzed to verify the efficacy of the proposed system.

Keywords: TBM, Risk management, Ahead of tunnel face, Risky ground prediction, MCDM

초 록: TBM 시공 중에는 설계단계에서 예측하지 못한 지반과 조우할 수 있다. 그 중에서 TBM 굴진의 안정성을 저해하는 위험지반과 조우할 경우, 예상치 못한 문제로 인한 공사비 증가, 공기 지연 등으로 상당한 경제적 손실이 발생하게 된다. 따라서 시공 중 예상치 못한 리스크를 최소화하는 것은 TBM 프로젝트에서 매우 중요한 문제이다. 본 논문에서는 TBM 시공 중 막장전방의 위험지반을 사전에 예측하는 방안과 해당 위험지반으로 인해 발생 가능한 리스크 사건을 제시하였다. 또한 리스크 사건의 위험도를 평가하고, 대응이 필요한 리스크 사건에 대하여 대책공법을 제시할 수 있는 TBM 리스크 관리 시스템을 개발하였다. 먼저 TBM 굴진 중 안정성을 저해하는 위험지반들로 인해 발생 가능한 리스크 사건을 정리하였으며, 시공 중 막장전방의 위험지반을 예측하기 위한 방법으로 전기비저항 탐사기법을 활용하였다. 이렇게 예측한 위험지반에서 발생 가능한 리스크 사건의 위험도 평가는 위험지반 조우 시 리스크 사건의 발생확률과 리스크로 인한 다운타임의 크기에 대한 상호 영향을 고려하여 수행한다. 평가 결과 등급에 따라 대응이 필요한 리스크 사건에 대하여 대책공법들을 제시하였으며, 여러 대책공법 중 최적의 대책공법을 객관적인 기준으로 선정하기 위하여 공사비와 공사기간 등을 속성으로 한 다기준 의사결정론을 활용하였다. 마지막으로 본 시스템의 검증을 위해 실제 리스크가 발생했던 EPB Shield TBM 현장에 개발 시스템을 적용하여, 시공 중 효과적인 리스크 관리를 통해 발생 가능한 리스크의 사전 대응이 가능함을 확인하였다.

주요어: TBM, 리스크 관리, 터널 막장면 전방, 위험지반 예측, 다기준 의사결정론

*Corresponding author: In-Mo Lee

E-mail: inmolee@korea.ac.kr

Received October 12, 2015; Revised November 27, 2015;

Accepted January 18, 2016

Copyright ©2016, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

터널 공법 중 가장 대표적으로 쓰이는 기계화 터널 공법인 TBM (Tunnel Boring Machine) 공법은 시공 중에 예측하지 못한 문제 발생 및 불량한 지반 조우 시 이를 대처하기 위해 장비를 변경하는데 한계가 있으며, 한번 굴진이 진행되면 장비의 후진이 거의 불가하다는 단점이 있다. 예상치 못한 문제로 인하여 TBM 굴진이 중지되면, 이를 극복하기 위한 대책공법 적용 및 장비 변경으로 인한 비용 증가와 공기 지연에 따른 상당한 경제적 손실이 발생한다. 실제 TBM 굴진 중 사전에 예측하지 못한 위험지반과 조우 시, 이에 대한 적절한 대처는 시공관리에서 매우 중요한 사항이며, 적절한 대처가 이루어지지 않을 경우 막장면 붕괴, 지반 침하, 지하수 누수로 인한 공기 지연, 침수 등의 심각한 문제가 발생하는 경우가 있다. 따라서 TBM 시공 중 막장전방의 위험지반을 사전에 예측하고, 이를 바탕으로 TBM 시공단계에 적용 가능한 체계적인 리스크 관리 시스템의 개발이 필요하다.

TBM 프로젝트 시 적용되는 리스크 관리 방법으로는 리스크 등록부를 활용하는 방법이 일반적이거나, 리스크 요인의 선정이 체계적이지 않고, 리스크의 중요성과 발생확률을 산정하는데 있어 정성적인 평가가 많다. 또한 TBM의 리스크에 대한 선행연구에서는 실제 시공단계에 적용 가능한 체계적이고 정량적인 리스크 관리 시스템에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 전기비저항 탐사기법을 활용하여 시공 중 막장전방의 위험지반을 사전에 예측하고, 해당 위험지반으로 인해 발생 가능한 리스크 사건의 위험도를 평가하여 대응이 필요한 리스크 사

건에 대해 대책공법을 제시할 수 있는 체계적이고 정량적인 리스크 관리 시스템을 구축하고자 한다. 이렇게 구축한 시스템을 통해 TBM 터널 시공 시 경제적이고 체계적인 리스크 관리가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

2. 막장전방 예측기법에 근거한 TBM 리스크 관리 시스템 개발

본 논문에서 구축한 TBM 리스크 관리 시스템은 막장전방 예측기법에 근거하여 TBM 터널 시공단계에 적용 가능한 리스크 관리 시스템으로 Fig. 1과 같은 흐름으로 진행된다. 먼저 막장전방 예측기법을 통해 굴진 중 위험지반을 예측하고, 예측한 위험지반으로 인해 발생 가능한 리스크 사건을 제시한다. 다음으로 해당 리스크 사건들에 대한 위험도 평가를 수행하여 위험도에 따른 대응여부를 제시하고, 대응이 필요한 사건에 대하여 최적의 대책공법을 객관적인 기준으로 선정하기 위해 다기준 의사결정론을 활용한다.

2.1 장비별 위험지반과 발생 가능 리스크 사건

TBM 굴진의 안정성을 저해하는 위험지반은 장비의 고유 특성에 따라 다르기 때문에, 장비를 Open TBM과 Shield TBM으로 구분하여 각각의 장비별 위험지반을 선정하였다. Open TBM은 주로 양호한 암반 굴착에 최적화된 공법으로, 단층파쇄대와 같은 불량지반이 소규모로 존재하더라도 커터헤드 후방에 즉시 지보재를 설치하는데 한계가 있어 리스크가 관리가 어려우며, 대규모의 불량지반의 경우 TBM 굴진

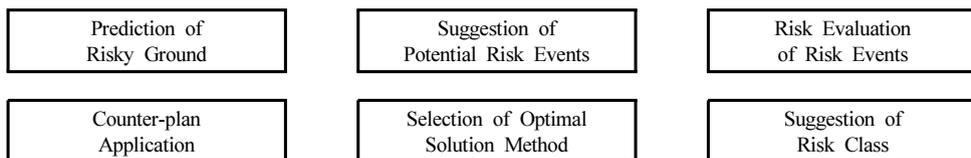


Fig. 1. Flow chart of TBM risk management system

자체가 불가능하여 재래식 터널 공법(conventional tunnelling method)을 사용하여 굴착할 수밖에 없는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 Open TBM에서 시공 중 안정성을 저해하는 위험지반으로 파쇄대를 선정하였다. Shield TBM은 Open TBM과 달리 내부 작업공간을 보호하는 쉴드와 세그먼트 라이닝이 있어 파쇄대에서의 대처가 용이한 편이지만, 복합지층에서는 커터의 편마모로 절삭량이 저하될 수 있으며, 막장압 관리가 부족할 경우 굴진이나 배토 문제가 발생할 수 있고 더 나아가 막장면 붕괴 등의 사건이 발생할 수 있다. 따라서 Shield TBM 시공 중 안정성을 저해하는 위험지반을 복합지층으로 선정하였다.

TBM 시공 중 해당 위험지반과 조우 시 발생 가능한 리스크 사건을 제시하기 위하여, 먼저 TBM 공사 시 발생 가능한 리스크 사건을 분석하였다(Hyun et al., 2012a). TBM에서 발생 가능한 리스크 사건과 관련된 여러 문헌 자료뿐만 아니라 TBM 설계 및 시공 전문가들과의 워크숍을 통해 Table 1과 같이 커터, 기계구속, 배토/굴진, 세그먼트의 카테고리 구분하여 리스크 사건을 분석하였고, 이를 바탕으로 위험지반과 리스크 사건 간의 인과관계를 분석하여 위험지반으로 인해 발생 가능한 리스크 사건을 정리하였다. 그 결과, 파쇄대로 인해 발생 가능한 리스크 사건들은 반력 부족, 선형 관리, 배토 과다, 배토 불능이고, 복합지층

의 경우는 절삭량 저하, 선형 관리, 배토 과다, 배토 불능이다.

2.2 전기비저항을 활용한 막장전방 예측기법

본 논문에서 선정한 TBM 시공 중 안정성을 저해하는 위험지반은 장비별로 Open TBM은 파쇄대, Shield TBM은 복합지층이다. 굴진 중 설계단계에서 예측하지 못한 파쇄대나 복합지층과 조우할 경우, 앞서 제시한 리스크 사건들이 발생할 수 있으며 심각한 경우 큰 규모의 피해가 발생할 가능성이 있다. 따라서 해당 위험지반을 사전에 예측하여 피해를 최소화하도록 관리하는 것이 중요하다. TBM 굴진 중 막장전방의 위험지반을 예측하는 기법을 선정하기 위하여 현재 TBM에서 사용되고 있는 막장전방 예측기법들에 대한 문헌조사를 수행하였다. 탄성파, 전자기파, 전기비저항 등을 활용한 다양한 탐사기법들이 사용되고 있었고(Lee, 2014), 각 기법들의 특성을 고려하여 TBM 장비별 위험지반인 파쇄대 및 복합지층을 탐지하기 위한 최적의 탐사기법을 선정하였다. 여러 기법들 중에서 주변 지반 영향이 적으며, 상대적으로 측정 및 해석 시간이 짧고 정확성이 높은 전기비저항 탐사를 선택하였다.

본 시스템에 적용한 TBM 막장전방 예측기법은

Table 1. Potential risk events during TBM construction and risk factor (Risky ground conditions)

Risk category	Risk event	Risky ground condition (Risk factor)
Cutter	Cuttability reduction: - Excessive and partial abrasion - Insufficient thrust force/torque	Mixed ground condition
	Insufficient reaction force	Fractured zone condition
Machine confinement	Alignment management	Fractured zone & Mixed ground conditions
	Tail void occlusion	-
Mucking & TBM driving	Face pressure management	-
	Incapability of mucking	Fractured zone & Mixed ground conditions
	Breakdown of conveyer belt	-
Segment	Excessive mucking	Fractured zone & Mixed ground conditions
	Segment damage	-
	Water leakage	-

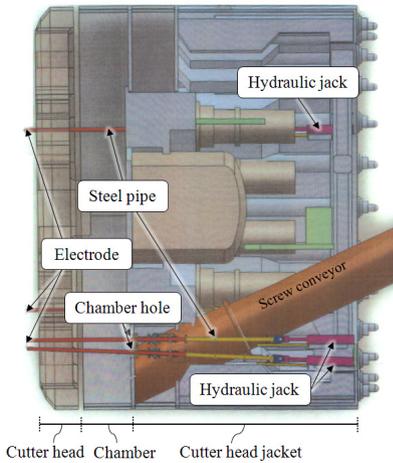


Fig. 2. Advanced electrode installation in TBM

Park et al. (2014)에 의해 개발된 압출식 전극을 활용한 전기비저항 탐사이다. 압출식 전극은 전기비저항 탐사를 TBM에 적용하여 수행할 수 있도록 고안된 장치로써, TBM에서 전극을 챔버 내로 관통시켜 막장면에 부착하여 전기비저항을 측정할 수 있다. 또한 전극과 지반의 접촉면적을 일정하게 유지시켜 줌으로써 측정되는 저항의 정확도가 높으며, 절연재를 전극에 간편하게 설치할 수 있다. TBM에 설치된 압출식 전극의 모습은 Fig. 2와 같다.

2.2.1 전기비저항과 RMR (Rock Mass Rating)의 상관관계

전기비저항을 활용하여 막장전방 지반을 측정할 수 없으므로, 막장전방 지반의 상태를 암반지반의 제반요소를 종합적으로 평가하는 RMR (Rock Mass Rating)로 나타냈다. 전기비저항 탐사를 수행하여 얻어지는 전기저항(R)으로부터 전기비저항(ρ)을 구할 수 있으며,

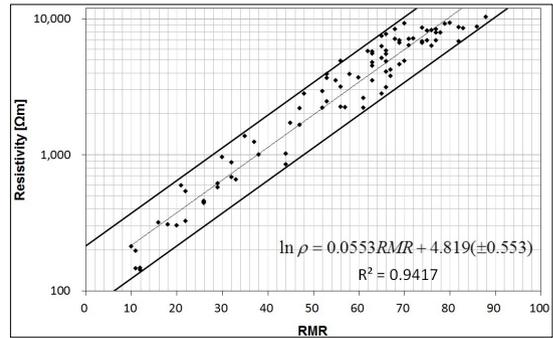


Fig. 3. Resistivity-RMR correlation

전기비저항으로부터 RMR을 얻어낼 수 있는 전기비저항-RMR 상관관계식이 제안되었다(Lee et al., 2012). 그 결과 전기비저항 검증으로부터 얻어진 전기비저항과 RMR은 결정계수(R^2) 0.9 이상의 신뢰도 높은 상관관계를 보여주었으며, 전기비저항을 이용하여 암반등급을 결정하는 방법이 과학적으로 타당하다는 것을 확인하였다. 따라서 압출식 전극을 활용한 전기비저항 탐사를 통해 얻어진 전기비저항을 Fig. 3의 전기비저항-RMR 상관관계식에 대입하여 막장전방 지반의 RMR을 도출할 수 있다.

2.2.2 RMR 기반의 위험지반 예측 가이드라인

전기비저항 탐사를 통하여 도출한 막장전방 지반의 RMR을 바탕으로 위험지반을 예측하기 위한 가이드라인을 Table 2와 같이 제안하였다. 본 가이드라인은 설계단계에서 지반조사를 통해 터널 시공 노선의 지반조건을 충분히 고려하여 TBM 장비의 선택이 적절하게 이루어졌으나 TBM 터널 시공 중 설계단계의 지반조사에서 나타나지 않은 지질구조, 이상대 등이 나타나는 경우에 대해서 사용하는 것으로, 앞서 선정된 장비별(Open TBM과 Shield TBM) 위험지반인

Table 2. Guideline for predicting risky ground conditions

Type	Risky ground (Prediction ground)	Current excavation ground	RMR in ground ahead of tunnel face
Open TBM	Fractured zone conditions	Rock ground	Less than 40% compared to current excavation ground
Shield TBM	Mixed ground conditions	Soft ground	More than 40
		Rock ground	Less than 20

파쇄대와 복합지층을 예측하기 위한 가이드라인이다. 위험지반 예측 가이드라인은 현재 굴착지반 대비 전방 지반에 대한 RMR 비 또는 값으로 위험지반을 구분한다. 즉, 현재 지반상태는 굴착되면서 얻어지는 데이터 및 배토로부터 파악할 수 있으므로 현재 지반 상태 대비 막장전방의 지반상태가 공학적으로 얼마나 좋아지거나 나빠지는지를 파악함으로써 위험지반을 예측한다.

굴착지반이 주로 암반지반인 경우에 사용하는 Open TBM 굴진 중에 갑작스럽게 조우한 파쇄대는 터널 사공 안정성에 큰 영향을 준다. 파쇄대는 4, 5등급 지반에서 주로 나타나지만, 2~5등급의 암반에서도 나타나는 경우가 있는 것으로 분석되었다(Lee et al., 2012). 따라서 RMR 절대값으로 파쇄대의 출현을 예측하기에는 어려움이 있기 때문에, 양호한 지반 굴착 중에 RMR이 급격히 감소하는 경우를 통해 파쇄대의 여부를 예측해야 한다. RMR이 40이상(40~100)인 지반을 굴착하는 것을 고려하였을 때, 현재 굴착지반 대비 RMR이 40~60% 수준인 경우에 4, 5등급의 암반이 나타날 가능성이 높다. 따라서 심각한 리스크가 발생할 가능성이 있는 현재 굴착지반 대비 RMR이 40%인 경우를 Open TBM에서 파쇄대의 예측 기준으로 설정하였다.

Shield TBM 굴진 중 시공성과 안정성을 저해시키는 요소는 복합지층으로, 연약지반 및 암반지반 굴진 중에 나타날 수 있는 복합지층을 예측해야 한다. 현재 굴착지반이 RMR이 매우 작은 연약지반인 경우에는 RMR 비로 평가 시, 막장전방의 지반을 과대평가할 수 있다. 따라서 RMR 비로 복합지층을 판단하기에는 어려움이 있다고 판단되어 RMR 절대값을 사용하였다. RMR이 40이상인 경우는 풍화암 이상의 암반지반, GSI (Geological Strength Index)가 25인 이하인 경우는 풍화토로 보는 점을 고려하여, RMR이 20이하인 경우를 토사지반으로 보았다. 따라서 현재 굴착지반이 연약지반일 때 막장전방에 암반지반이 출현하는 경우와 현재 굴착지반이 암반지반일 때 막장전방에

연약지반이 출현하는 경우, 막장면과 예측지점 사이에 복합지층이 존재할 가능성이 높다. 이렇게 전기비 저항 탐사를 활용한 TBM 막장전방 예측기법을 통하여 막장전방에 존재하는 위험지반인 파쇄대와 복합지층의 예측이 가능하다.

2.3 리스크 사건의 위험도 평가

전기비저항을 활용한 막장전방 예측기법을 통해 설계단계에서 예측하지 못한 파쇄대와 복합지층을 확인하고, 그로 인해 발생 가능한 리스크 사건이 제시 되면, 해당 리스크 사건들 중에서 대응이 필요한 사건을 판단하기 위한 위험도 평가를 수행한다. 즉, TBM 굴진 중에 조우할 수 있는 위험지반을 앞서 제시한 막장전방 예측기법을 통해 사전에 예측하고, 해당 위험지반 조우 시 발생하게 될 리스크 사건들의 위험도를 평가한다. 본 시스템에서 제안하는 리스크 사건의 위험도 평가는 굴진 중 위험지반 조우 시 리스크 사건의 발생확률과 리스크 발생으로 인한 다운타임의 크기에 대한 상호 영향도를 고려하여 수행한다.

발생확률은 TBM 굴진 중 파쇄대나 복합지층이 출현할 경우 각각의 위험지반으로 인해 리스크 사건들이 발생할 확률이다. 이는 본 시스템을 적용하는 TBM 프로젝트 현장에서 위험지반 조우 시 리스크 사건이 발생할 확률에 대해 시공 전문가 설문조사를 실시하여 산정한다. 영향도 산정에는 AHP (Analytic Hierarchy Process)를 활용하였다(Hyun et al., 2012b). 먼저, TBM 공사 시 발생 가능한 리스크 사건들(Table 1)로 쌍대 비교 행렬을 작성하고, 시공 전문가 설문조사를 통해 각각의 리스크 사건 발생으로 인한 다운타임 크기에 대한 상호 영향도를 산정하여 쌍대 비교 행렬을 완성하였다. 완성된 쌍대 비교 행렬로부터 Tabel 3과 같이 리스크 사건별 영향도를 산정하였으며, 이는 TBM 공사 시 발생할 수 있는 리스크 사건에 대한 다운타임을 기준으로 산정하여 일반적인 TBM 현장에 적용이 가능하다.

이렇게 산정한 발생확률과 영향도를 Risk rating (Table 4)에 의거하여 발생확률점수와 영향도점수로 환산하고, 각각의 점수를 곱하여 리스크 점수를 산정한다. 이렇게 산정한 리스크 점수에 따라 각각의 리스크 사건을 Negligible, Tolerable, Undesirable, Intolerable

네 가지 위험도 등급으로 평가하며(Fig. 4), 각각의 등급에 따라 대응 및 리스크 수용 여부를 판단한다. 여기서, Negligible은 추가적인 고려사항이 필요하지 않는 등급이며, Tolerable는 리스크 수용 등급으로 리스크 저감 대책이 요구되지 않는다. Undesirable은

Table 3. Impact of risks for downtime

Risk category	Risk event	Impact
Cutter	Cuttability reduction	0.062
Machine confinement	Insufficient reaction force	0.090
	Alignment management	0.155
	Tail void occlusion	0.025
	Face pressure management	0.089
Mucking & TBM driving	Incapability of mucking	0.174
	Breakdown of conveyer belt	0.136
	Excessive mucking	0.056
	Segment damage	0.185
Segment	Water leakage	0.029

Table 4. Risk rating

Probability	Rating score	Impact
More than 80 %	5	More than 0.16
60 - 80 %	4	0.12 - 0.16
40 - 60 %	3	0.08 - 0.12
20 - 40 %	2	0.04 - 0.08
Below 20 %	1	Below 0.04

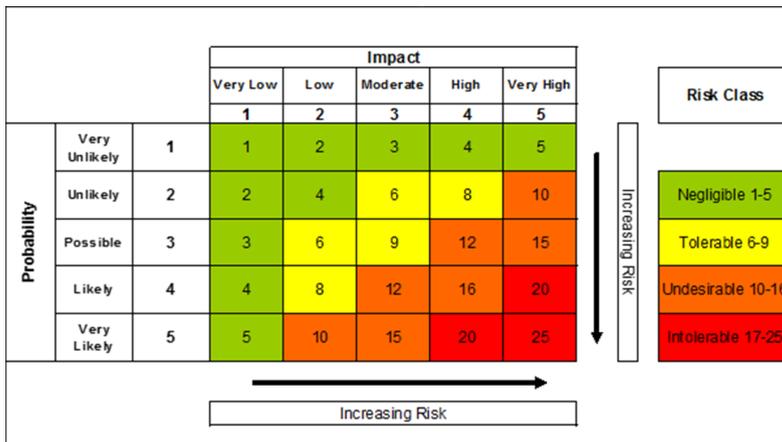


Fig. 4. Risk scoring matrix

리스크 저감 효과와 비용이 균형을 이루게 저감 대책을 적용하는 등급이고, Intolerable은 비용에 상관없이 충분한 리스크 저감 대책을 적용하는 등급이다.

2.4 최적의 대책공법 선정 및 제시

리스크 사건의 위험도 평가 결과 대응이 필요한 등급은 Undesirable, Intolerable이며, 해당 등급으로 판단 시 대책공법을 적용하게 된다. 하지만 하나의 리스크 사건에 여러 대책공법이 존재할 수 있기 때문에 그 중 최적의 대책공법을 선정하는 과정이 필요하다. 따라서 객관적인 기준으로 최적의 대책공법을 선정하기 위하여 다기준 의사결정론(Multi-Criterion Decision Making, MCDM)을 활용하였다(Ahn, 2007). 다기준 의사결정론의 진행 순서는 Fig. 5와 같으며, 이를 통해 리스크 사건에 적용할 최적의 대책공법을 선정하는 방안을 다음과 같이 제안한다.

2.4.1 대안별 속성 선정

다기준 의사결정론을 활용하여 최선의 대안을 선정할 경우, 대안들을 비교할 기준인 속성(attribute)을 선정하는 과정이 필요하다. 먼저 대책공법을 선정함에 있어 가장 중요한 속성으로 공사비와 공사기간을 선정하였다. 또한 대책공법이 현장 상황이나 특성에 따라 리스크를 예방하거나 대처할 수 있는지를 판단하기 위하여 신뢰성 속성을 포함하였고, 대책공법이 현장에 적용 가능한 공법인지 아닌지를 평가하기 위

하여 적용성 속성을 추가하였다. 여기서 공사비와 공사기간은 양적기준의 속성이며, 신뢰성과 적용성은 질적기준의 속성이다. 의사결정의 산정과정을 나타내기 위하여 Table 5와 같이 세 가지 대안을 가정하여 의사결정표를 구성하였다. 여기서, 질적기준인 신뢰성과 적용성 속성은 다기준 의사결정론에서 주로 사용되는 양극법인 9점 척도를 활용하여 나타내었다.

2.4.2 속성별 점수 정규화

다기준 의사결정에서 속성값(attribute value)의 정규화(normalization)는 서로 다른 단위를 갖는 속성값들을 비교하기 위해 수행한다. 대책공법 선정에서의 속성값은 공사비는 금액, 공사기간은 시간, 신뢰성과 적용성은 질적 척도에 따른 점수로 속성값들의 단위가 다르기 때문에 정규화 과정이 반드시 필요하다. 본 논문에서 활용한 정규화 방법은 로그정규화 방법(logarithmic normalization method)이다. 신뢰성, 적용성과 같이 높은 값일수록 유리한 속성은 혜택기준(benefit criteria)인 식 (1)로 정규화 하고, 공사비, 공사기간과 같이 낮을수록 유리한 속성은 비용기준(cost criteria)인 식 (2)를 사용한다(Zavadskas and Turskis, 2008).

$$a_{ij} = \frac{\ln(x_{ij})}{\ln\left(\prod_{i=1}^m x_{ij}\right)} \quad (\text{Preferable max } x_{ij}) \quad (1)$$

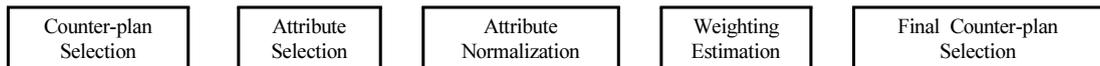


Fig. 5. MCDM flow chart

Table 5. MCDM table (example)

	Cost	Period	Reliability	Applicability
Counter-plan 1	1 million KRW	1 hour	7	9
Counter-plan 2	10 million KRW	100 hours	9	7
Counter-plan 3	5 million KRW	10 hours	8	5

Table 6. Normalized MCDM table (example)

	Cost	Period	Reliability	Applicability
Counter-plan 1	0.3477	0.5000	0.3127	0.3819
Counter-plan 2	0.3223	0.1667	0.3531	0.3383
Counter-plan 3	0.3300	0.3333	0.3342	0.2798

$$a_{ij} = \frac{1 - \frac{\ln(x_{ij})}{\ln(\prod_{i=1}^m x_{ij})}}{m - 1} \quad (\text{Preferable min } x_{ij}) \quad (2)$$

여기서, x_{ij} 는 대안 A_i 의 속성 X_j 에 대한 점수, a_{ij} 는 정규화된 점수이며 정규화된 의사결정표는 Table 6과 같다.

2.4.3 속성별 가중치 산정

다기준 의사결정론에서 각 대안을 평가하는 속성의 상대적 중요성을 나타내는 가중치는 의사결정에서 매우 중요한 요인이며, 현재까지 가중치 부여방법으로 알려진 절차들은 순위화 절차, 등급화 절차, 쌍별비교 절차, 갈망수준 절차, 엔트로피 절차가 있다(Ahn, 2007). TBM 시공 중 리스크 관리를 위한 대책공법의 선정은 신속히 이루어져야하기 때문에, 본 논문에서는 의사결정자가 비교적 이해하기 쉽고 계산이 간편하면서 다양한 측면에서 유용하게 쓰이는 엔트로피 절차를 통해 가중치를 도출하였다(Lee, 2003). 엔트로피 절차는 의사결정행렬로부터 가중치 벡터를 추정해 내며, 엔트로피 관점에서 의사결정행렬은 그 자체로 기준(속성)들에 대한 가중치들을 추정해 낼 수 있는 정보를 담고 있다. 즉, 대안들 간의 차이가 큰 기준은 중요한 기준(속성)이고 대안들 간의 차이가 적은 기준

은 덜 중요한 기준(속성)이다.

먼저 속성 X_j 에 대한 대안 A_i 의 평가값 p_{ij} 를 다음 식 (3)과 같이 속성 X_j 의 기준값들의 합에 대한 대안 A_i 의 기준값의 비율로 정의한다.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3)$$

그러면 속성 X_j 의 엔트로피 e_j 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$e_j = - \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

이 때 e_j 의 가능한 범위가 식 (5)와 같이 주어짐을 알 수 있다.

$$0 \leq e_j \leq \ln m \quad (5)$$

따라서 정규화된 엔트로피 $u_j = e_j / \ln m$ 는 식 (6)과 같이 균일도(degree of uniformity)로 기능할 수 있다.

$$0 \leq u_j \leq 1 \quad (6)$$

Table 7. Weighting factor by Entropy procedure (example)

	Cost	Period	Reliability	Applicability
u_j	0.9995	0.9206	0.9989	0.9927
d_j	0.0005	0.0794	0.0011	0.0073
w_j	0.0052	0.8998	0.0127	0.0823

이로부터 기준 X_j 의 다양도(degree of diversity) d_j 는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$d_j = 1 - u_j \quad (7)$$

그러면 기준 X_j 의 가중치 w_j 는 식 (8)과 같이 정규화된 다양도로 정의되며 Table 7과 같다.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (8)$$

2.4.4 종합점수 산정 및 대안 선정

앞선 과정을 통해 대안별로 속성값을 정규화하고 가중치를 산정하여, 최종적인 의사결정표(Table 8)를 완성한다. 완성한 의사결정표에서 가중치를 적용한 각 대안별 최종결과 점수를 비교하기 위하여, MCDM에서 가장 널리 사용되고 있는 단순가중합법(Simple Additive Weighting Method: SAW)을 활용하였다. 단순가중합법에서 여러 대안들 중 가장 선호도가 높은 대안 A^* 는 식 (9)와 같이 구한다.

$$A^* = \left\{ A_i \mid \max \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_j} \right) \right\} \quad (9)$$

여기서, x_{ij} 는 대안 A_i 의 속성 X_j 에 대한 점수, w_j 는 속성 X_j 의 가중치이다.

의사결정론을 적용한 최종 결과, 각 대안별 최종결과

점수(의사결정점수)가 가장 높은 대안(Counter-plan 1)을 최선의 대안으로 선정한다. 로그정규화 방법과 엔트로피 절차를 활용한 의사결정 방법은 비교적 간단한 절차로 선호대안을 선정할 수 있으며, 각 대안이 가진 고유의 의사결정행렬을 통해 가중치를 산정함으로써 분석시간을 최소화할 수 있다. 따라서 TBM 시공 중 대응이 필요한 사건에 대책공법을 적용할 경우, 이와 같은 절차를 통하여 최적의 대책공법을 효과적으로 선정하여 제시할 수 있다.

3. TBM 리스크 관리 시스템 현장적용

본 논문에서 구축한 TBM 리스크 관리 시스템의 적용 현장은 EPB Shield TBM을 사용한 해저터널 현장으로, 굴착외경은 4.38 m, 연장은 1,560 m이며 공사비는 약 240억원, 공사기간은 20개월이다. 적용현장의 지반 조건은 경암과 연암이 주를 이루며 풍화암과 혼재되어 있는 구간도 존재한다(Fig. 6). 본 현장은 실제로 예상치 못한 복합지층과 조우하여 해수 유입 과다로 인한 배토 불능의 사건이 발생하였고, 해당 리스크를 관리하지 못하여 한 달 이상의 과도한 공기지연으로 인한 경제적 손실이 발생되었다. 따라서 본 현장에 TBM 리스크 관리 시스템을 적용해 적절한 리스크 관리를 통하여 시공 중 리스크 발생으로 인한 피해의 최소화가 가능한지 검증해보았다.

본 현장에 TBM 리스크 관리 시스템을 적용하였을 경우, 전기비저항을 활용한 막장전방 예측기법을 통해 막장전방의 위험지반(복합지층)을 예측함으로써 복합지층으로 인해 발생 가능한 리스크 사건들을 사전에 확인할 수 있다. 이렇게 확인한 리스크 사건은

Table 8. Finalized MCDM table (example)

	Cost	Period	Reliability	Applicability	Total
Weighting factor	0.0052	0.8998	0.0127	0.0823	1.0000
Counter-plan 1	0.3477	0.5000	0.3127	0.3820	0.4871
Counter-plan 2	0.3223	0.1667	0.3531	0.3383	0.1840
Counter-plan 3	0.3300	0.3333	0.3342	0.2798	0.3289

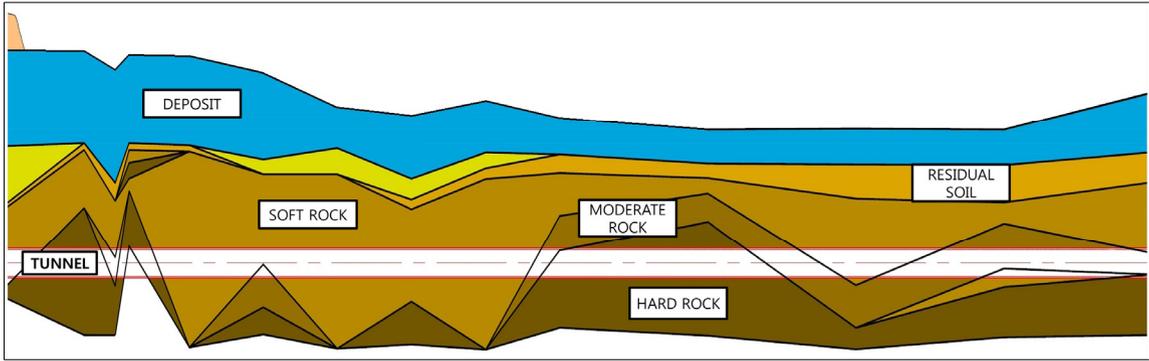


Fig. 6. Profile of construction site

절삭량 저하, 선형 관리, 배토 과다, 배토 불능으로 해당 리스크 사건들 중에서 대응이 필요한 사건을 판단하기 위해 발생확률과 영향도를 고려한 위험도 평가를 진행하였고, 그 결과는 Table 9와 같다. 발생확률은 본 현장에서 굴진 중 복합지층이 출현할 경우에 해당 리스크 사건이 발생할 확률로, 이는 시공 전문가 설문조사를 통하여 산정하였고, 영향도는 사전에 산정한 리스크 발생으로 인한 다운타임의 크기에 대한 상호 영향도(Table 3)를 적용하였다.

위험도 평가 결과, 실제 현장에서 발생한 리스크

사건과 동일하게 배토 불능 사건만이 리스크 점수가 20점으로 위험도가 Intolerable 등급이었고, 나머지 사건들은 Tolerable과 Negligible 등급으로 나타났다. 따라서 Intolerable 등급의 배토 불능 사건이 대책공법 적용이 필요한 것으로 판단된다.

또한 복합지층으로 인한 배토 불능 사건에 적용 가능한 대책공법을 여러 문헌 자료와 시공 전문가 의견을 바탕으로 차수그라우팅, 첨가재 투입/변경, 더블 스크류 컨베이어 설치로 선정하였고, 이 대안들 중 본 현장에 가장 적합한 대책공법을 선정하기 위해

Table 9. Evaluation of risk events (Shield TBM)

Risk factor	Risk category	Risk event	Probability	Impact	Probability score	Impact score	Risk score	Risk grade
Mixed ground conditions	Cutter	Cuttability reduction	57%	0.062	3	3	9	Tolerable
	Machine confinement	Misalignment	10%	0.155	1	4	4	Negligible
	Mucking & TBM driving	Excessive mucking	28%	0.056	2	2	4	Negligible
		Incapability of mucking	78%	0.174	4	5	20	Intolerable

Table 10. Finalized MCDM table

	Cost	Period	Reliability	Applicability	Total
Weighting factor	0.1101	0.6680	0.0296	0.1923	1.0000
Waterproof grouting	0.3008	0.2500	0.3531	0.3383	0.2756
Foam injection/modification	0.3769	0.4399	0.3127	0.3820	0.4180
Double screw conveyer	0.3223	0.3101	0.3342	0.2798	0.3063

공사비, 공사기간, 신뢰성, 적용성을 속성으로 한 다기준 의사결정론을 적용하였다. 여기서 공사비는 직접비와 간접비로 나누어 산출하였으며, 공사비와 공사기간은 모두 시공 전문가의 의견을 바탕으로 본 현장에 적합한 값을 산출하여 사용하였다. 최종 의사결정표는 Table 10과 같으며, 의사결정론 적용으로 본 현장에 적용할 최적의 대책공법은 의사결정점수가 가장 높은 첨가재 투입/변경으로 선정하였다.

본 현장에 TBM 리스크 관리 시스템을 적용한 결과, 막장전방 예측기법을 통하여 사전에 위험지반(복합지층)을 예측할 수 있었고, 이로 인해 발생할 리스크 사건들 중 대책공법을 적용해야 할 배토 불능 사건을 확인하였다. 그 후 배토 불능 사건에 대한 여러 대책공법 중에서 최적의 대책공법으로 첨가재 투입/변경을 선정하였으며, 이렇게 선정된 대책공법을 복합지층 굴진 시에 적용하였을 경우 실제로 현장에서 발생한 한 달 이상의 공기지연을 방지할 수 있다고 판단하였다. 따라서 본 시스템은 TBM 시공 중 발생할 리스크를 체계적으로 관리함으로써 리스크 발생으로 인한 피해의 최소화가 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 TBM 막장전방 예측기법에 근거하여 시공 중 발생 가능한 리스크를 체계적이고 정량적으로 관리하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 TBM 장비별 위험지반을 Open TBM은 파쇄대, Shield TBM은 복합지층으로 구분하고, 전문가 설문조사 및 문헌 조사를 통하여 각각의 위험지반으로 인해 발생 가능한 리스크 사건을 규명하였다. 시공 중 막장전방의 위험지반을 예측하기 위한 방법으로는 전기비저항 탐사를 활용하였으며, 이를 통해 도출한 막장전방 지반의 RMR을 기반으로 위험지반 예측 가이드라인을 제안하였다. 또한 위험지반으로 인해 발생 가능한 리스크 사건의 대응여부를 판단하기 위하여 발생확률과 영향도를 고려한 위험도 평가 방안을 제시하였으며,

다기준 의사결정론을 활용하여 대응이 필요한 사건에 대한 최적의 대책공법을 객관적인 기준으로 선정하는 방안을 제시하였다.

본 논문에서 구축한 TBM 리스크 관리 시스템을 검증하기 위하여 실제 리스크가 발생한 EPB Shield TBM 현장에 적용하였다. 그 결과 현장에서 발생한 배토 불능 사건을 사전에 예측하고, 그에 대한 최적의 대책공법으로 첨가재 투입/변경을 선정하여 적용함으로써 실제 현장에서 한 달 이상 발생한 공기지연을 방지할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 TBM 리스크 관리 시스템을 실제 현장에 적용한다면 시공 중 효과적인 리스크 관리를 통하여 리스크 발생으로 인한 피해의 최소화가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술 개발(13건설연구T01)” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ahn, S.J. (2007), “Statistical decision making theory”, Freeacademy, pp. 355-409.
2. Hyun, K.C., Min, S.Y., Moon, J.B., Jeong, G.H., Lee, I.M. (2012a), “Risk management applicable to shield TBM tunnel: I. Risk factor analysis”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 6, pp. 667-681.
3. Hyun, K.C., Min, S.Y., Moon, J.B., Jeong, G.H., Lee, I.M. (2012b), “Risk management applicable to shield TBM tunnel: II. Risk analysis methodology”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 6, pp. 683-697.
4. Lee, K.H., Seo, H.J., Park, J.H., Ahn, H.Y., Kim, K.S., Lee, I.M. (2012), “A study on correlation

- between electrical resistivity obtained from electrical resistivity logging and rock rating in-situ tunnelling site”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 5, pp. 503-516.
5. Lee, K.H. (2014), “Predictions of ground conditions ahead of tunnel face applicable to TBM”, Ph.D. Dissertation, Korea University.
 6. Lee, K.I. (2003), “Selecting on the preferred alternatives of the MADM problems using the entropy measure”, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 55-61.
 7. Park, J.H., Lee, K.H., Shin, Y.J., Kim, J.Y., Lee I.M. (2014), “Predicting ground condition ahead of tunnel face utilizing electrical resistivity applicable to shield TBM”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 6, pp. 599-614.
 8. Zavadskas, E.K., Turskis, Z. (2008), “A new logarithmic normalization method in games theory”, *INFORMATICA*, Vol. 19, No. 2, pp. 303-314.