

베이저안 네트워크와 AHP (Analytic Hierarchy Process)를 활용한 쉴드 TBM 터널 리스크 분석

박정준¹ · 정희영² · 문준배³ · 최항석⁴ · 이인모^{4*}

¹정희원, 한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀 선임연구원

²정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

³정희원, ㈜동아지질 터널사업부 부장

⁴정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Overall risk analysis of shield TBM tunnelling using Bayesian Networks (BN) and Analytic Hierarchy Process (AHP)

Jeongjun Park¹, Heeyoung Chung², Joon-Bai Moon³, Hangseok Choi⁴, In-Mo Lee^{4*}

¹Korea Railroad Research Institute, Advanced Infrastructure Research Team, Senior Researcher

²Korea University, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Ph.D. Student

³DONGAH Geological Engineering Co., Ltd, General Manager

⁴Korea University, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Professor

ABSTRACT: Overall risks that can occur in a shield TBM tunnelling are studied in this paper. Both the potential risk events that may occur during tunnel construction and their causes are identified, and the causal relationship between causes and events is obtained in a systematic way. Risk impact analysis is performed for the potential risk events and ways to mitigate the risks are summarized. Literature surveys as well as interviews with experts were made for this purpose. The potential risk events are classified into eight categories: cuttability reduction, collapse of a tunnel face, ground surface settlement and upheaval, spurts of slurry on the ground, incapability of mucking and excavation, and water leakage. The causes of these risks are categorized into three areas: geological, design and construction management factors. Bayesian Networks (BN) were established to systematically assess a causal relationship between causes and events. The risk impact analysis was performed to evaluate a risk response level by adopting an Analytic Hierarchy Process (AHP) with the consideration of the downtime and cost of measures. Based on the result of the risk impact analysis, the risk events are divided into four risk response levels and these levels are verified by comparing with the actual occurrences of risk events. Measures to mitigate the potential risk events during the design and/or construction stages are also proposed. Result of this research will be of the help to the designers and contractors of TBM tunnelling projects in identifying the potential risks and for preparing a systematic risk management through the evaluation of the risk response level and the migration methods in the design and construction stage.

Keywords: Shield TBM, Risk analysis, Bayesian networks, Analytic Hierarchy Process (AHP)

초 록: 본 논문에서는 쉴드 TBM 시공 시 발생 가능한 사건 및 원인의 규명, 리스크 발생의 인과관계 규명, 리스크의 위험도 판별, 리스크의 저감대책 제시를 통한 쉴드 TBM의 전반적인 시공 리스크 관리에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해서 쉴드 TBM의 사고 사례에 대한 문헌조사, 설계 및 시공 전문가 인터뷰를 수행하였다. 리스크 사건은 절삭량 저하, 막장면 붕괴, 지반 침하, 지반 용기, 이수 분출, 배토 불능, 굴착 불가, 지하수 누수의 8개의 그룹으로 나누어졌다. 리스크의 원인은 지질 원인, 설계 원인, 시공관리 원인의 3가지 그룹으로 나누어졌다. 리스크 원인과 사건간의 인과관계를 체계적으로 분석하기 위하여 베이저안 네트워크를 이용한 도식적인 관계도를 작성하였다. 리스크의 위험도를 산정하기 위하여 리스크가 발생하였을 때 이를 복구하기 위한 다운타임 및 비용을

*Corresponding author: In-Mo Lee

E-mail: inmolee@korea.ac.kr

Received August 30, 2016; Revised September 19, 2016;

Accepted September 21, 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.

기준으로 전문가를 대상으로 Analytic Hierarchy Process (AHP)를 수행하였으며, 위험도 결과에 기반하여 리스크 대응단계를 제시하고 이를 실제 리스크 발생사례와 비교하여 검증하였다. 또한 발생 가능한 리스크에 대응하기 위하여 설계 및 시공단계에서의 리스크 저감대책을 제안하였다. 제안된 연구는 TBM 설계자 및 시공자가 현장의 조건을 고려하여 리스크 원인을 선정하고 이로 인해 발생 가능한 리스크를 체계적으로 분석하여 파악할 수 있게 해주며, 리스크의 위험도의 판별 및 그에 대한 설계 및 시공단계에서의 저감대책을 통해 체계적인 실드 TBM 리스크 관리에 도움을 줄 수 있다.

주요어: 실드 TBM, 리스크 분석, 베이지안 네트워크, Analytic Hierarchy Process (AHP)

1. 서론

전 세계적으로 대심도 장대화 터널, 도심지 터널, 하·해저터널 등의 터널건설에 있어 TBM 적용이 증가되고 있다. TBM의 경우, 고속시공이 가능하면서도 소음과 같은 환경피해의 최소화가 가능하며 터널의 연장이 길어질수록 공사비 측면에서 유리한 장점을 가지고 있다(Maidl et al., 1996).

그러나 실드 TBM을 적용한 터널 프로젝트에서도 예상치 못한 지반의 출현, 지반에 적합하지 않은 장비 type 및 사양, 시공관리 미흡 등의 여러 원인으로 인해 종종 심각한 리스크가 발생한다(Kwak and Park, 2009; Koh et al., 2010; Tóth et al., 2013). 실드 TBM 장비 특성상 리스크가 발생할 경우 장비 type (토압식 실드, 이수식 실드)의 변경은 거의 불가능하고 장비의 상세 변경에도 상당한 시일이 소요되기 때문에 유연한 대처가 어려우며, 과도한 공기지연과 경제적 손실이 발생하게 된다. 따라서 TBM 프로젝트에서는 리스크의 원인을 파악하고 그로 인해 발생할 리스크에 대하여 설계 단계에서부터 체계적으로 대비하는 것이 중요하다.

일반적으로 터널 프로젝트에서 가장 많이 활용하는 리스크 관리 방법은 리스크 등록부를 활용한 방법이다. 그러나 구체적인 공기 및 공사비를 입력할 수 없기 때문에 정량적 분석이 불가능하며(Seo et al., 2010), 시공 시 발생 가능한 리스크 사건에 대해서만 평가하는 것이 아니고 계약적인 문제, 금융적인 문제, 환경적인 문제 등의 프로젝트 전반적인 상황에 대한 리스크를 관리하기 때문에 시공 리스크에 특화된 상세한 리스크 분석에는 한계가 있다. 또한 리스크 등록

부에서는 설계단계에서 예측된 리스크만 다루기 때문에 시공 중에 예상치 못하게 발생할 수 있는 위험지반의 출현, 설계 오류 및 미흡한 시공관리 등으로 인한 리스크에 대해서는 다루기가 어려우며, 이러한 경우에 대해 발생할 리스크 사건과 저감대책은 제시하기 어렵다.

본 연구에서는 실드 TBM 시공 중 발생 가능한 리스크 사건과 이에 대한 원인들을 TBM 장비 type (토압식 실드, 이수식 실드)을 구분하여 조사하였으며, 리스크 사건이 발생하는 일련의 인과관계를 베이지안 네트워크를 활용하여 도식적으로 정리하였다. 또한 리스크 사건의 위험도를 산정하기 위하여 리스크가 발생하였을 때 이를 복구하기 위한 다운타임 및 비용을 기준으로 전문가 인터뷰를 통한 Analytic Hierarchy Process (AHP)를 수행하였다. 또한 위험도 결과에 따라서 리스크 대응단계를 제안하였으며, 이를 실제 리스크가 발생한 사례들과의 비교를 수행하여 그 타당성을 검증하였다. 리스크가 파악되었을 때는 이에 대한 대응을 통해 리스크를 저감시켜야 하며, 이를 위해서 리스크에 대응하는 저감대책에 대한 문헌조사 및 전문가 인터뷰를 수행하여 설계 및 시공단계를 구분하여 제안하였다.

2. 베이지안 네트워크를 활용한 리스크 사건과 원인의 인과관계 분석

2.1 베이지안 네트워크를 활용한 인과관계 분석

베이지안 네트워크는 불확실하고 복잡한 상황에서 지식을 표현하고 결론을 추론하고자 할 때 유용하게

쓰이는 도구로 인과관계 네트워크(causal network)이다. 베이지안 네트워크는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 여러 가지 변수들을 나타내는 노드와 변수간의 인과관계(causal relation)를 연결선(directed edges)으로 나타내는 방향성 비순환 그래프(Directed Acyclic Graph: DAG)이다. 각각의 변수들은 유한하고 상호간 배타적인(mutually exclusive) 값을 가지고 있으며, 여기서 각 노드는 부모노드에 대한 조건부 확률을

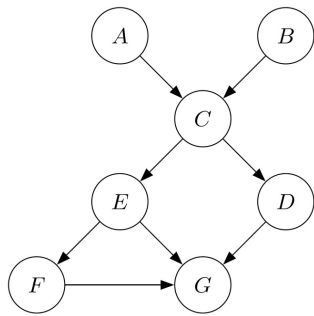


Fig. 1. Schematic of a Bayesian Network

나타내는 확률 테이블을 가지게 된다(Jensen, 2001). 예를 들어 Fig. 1에서 노드 A와 C의 관계에서 노드 A는 노드 C에 대해서 부모(parent)라 하고, 노드 C를 노드 A의 자식(child)이라고 한다. 노드 A와 B는 영향을 주는 노드가 없으므로 조건부 확률을 갖지 않으나 이외의 노드들은 모두 부모노드에 의한 조건부 확률을 갖는다. 베이지안 네트워크는 인과관계가 하나의 순환을 이루는 feedback cycle은 고려하지 않는다. 본 연구에서는 쉘드 TBM 시공 시 발생 가능한 리스크 사건과 리스크 원인 간에 인과관계를 도식적으로 파악하기 위해서 베이지안 네트워크를 활용하였다. 이러한 인과관계를 통해 시공 중 예상치 못한 리스크 원인이 발생하였을 때 이로 인한 어떠한 리스크가 발생할지를 바로 파악할 수 있다.

TBM 터널의 시공 시 발생할 수 있는 리스크 사건과 리스크 사건의 원인에 대한 파악, 리스크 사건의 발생 과정의 파악을 위하여 다수의 TBM 사고 사례에 대한 분석 및 문헌 조사(Shirlaw et al., 2000; Kwak and

Table 1. Potential risk event

| Risk category (Top risk) | Sub-risk | TBM machine type |
|-------------------------------|--|---------------------|
| Cuttability reduction | Excessive abrasion of the cutters | EPB TBM, Slurry TBM |
| | Partial abrasion and damage of the cutters | |
| | Blockage of cutter | |
| Collapse of a tunnel face | Poor management of face pressure | EPB TBM, Slurry TBM |
| Ground surface settlement | | |
| Ground surface upheaval | Excessive face pressure | Slurry TBM |
| Spurt of slurry on the ground | | |
| Incapability of mucking | Large amount of ground water | EPB TBM |
| | Breakdown of screw conveyer | |
| | Breakdown of conveyer belt | |
| Incapability of mucking | Damage of the pipe | Slurry TBM |
| | Breakdown of the pump | |
| | Blockage in slurry pipe | |
| Incapability of excavation | Machine jamming | EPB TBM, Slurry TBM |
| | Insufficient torque and thrust force | |
| | Misalignment/Off-route | |
| Water leakage | Water leakage at the TBM machine | EPB TBM, Slurry TBM |
| | Water leakage at the segment lining/Crack of segment | |

Park, 2009; Koh et al., 2010; Chong, 2013; Tóth et al., 2013), 여러 TBM 시공 전문가 및 설계 전문가 자문을 수행하였다. 쉴드 TBM 굴진 중에 발생할 수 있는 리스크 사건은 장비 제작사, 장비 상세 사양, 현장 상황 등에 따라 매우 다양하게 발생할 수 있으나, 본 논문에서는 일반적인 현장에서 발생 가능하고 그 위험도가 커서 시공관리에 중요한 리스크 사건을 중

심으로 분석을 수행하였으며, 그 결과 시공 중 발생 가능한 주요 리스크 사건은 절삭량 저하, 막장면 붕괴, 지반 침하, 지반 용기, 이수 분출, 배토 불능, 굴진 불가, 지하수 누수의 총 8가지의 상위 리스크로 분류 (Table 1)하였으며, 리스크 원인은 굴진 경로 상에 존재하는 위험한 지반조건으로 리스크 발생에 가장 큰 영향을 미치는 지질 리스크 원인, 적절하지 못한

Table 2. Classification of risk factors

| Type | Event | Risk factor |
|------------------------------------|-------|--|
| A: GEOLOGICAL FACTORS | G1 | Hardness: hard or extremely hard rock, Ground contains large amounts of quartz |
| | G2 | Fractured zone or faults |
| | G3 | Weak ground |
| | G4 | Ground contains clay |
| | G5 | Ground with gravels and/or boulders |
| | G6 | Squeezing and swelling ground |
| | G7 | Mixed ground conditions |
| | G8 | Interface of different type of rock mass |
| | G9 | Ground with high water pressure |
| | G10 | Shallow cover depth |
| B: DESIGN FACTORS | D1 | Design of cutter disc and/or cutter bit |
| | D2 | Design of cutter head |
| | D3 | Design of opening ratio |
| | D4 | Design of torque and thrust force |
| | D5 | Design of segment |
| | D6 | Types of method for segment ring installation |
| | D7 | Selection of gaskets |
| | D8 | Types of method for backfill grouting |
| | D9 | Design of mucking facilities |
| C: CONSTRUCTION MANAGEMENT FACTORS | M1 | Delay of cutter replacement |
| | M2 | Delay of gauge cutter replacement |
| | M3 | Poor soil conditioning with foam and polymer |
| | M4 | Encounter poor ground during EPB open mode |
| | M5 | Poor treatment of slurry |
| | M6 | Poor management of quality of mucking |
| | M7 | Poor management of amount of mucking |
| | M8 | Improper assembly of segments |
| | M9 | Poor management of backfill grouting |
| | M10 | Poor management of thrust force |
| | M11 | Improper reinforcement of borehole |
| | M12 | Poor management of tail seal |

TBM 설계로 트러블을 유발하는 설계 리스크 원인, 그리고 TBM 굴진 중 잘못된 시공관리로 트러블을 유발하는 시공관리 리스크 원인으로 분류(Table 2)하였다. 각각 10개의 지질 리스크 원인, 9개의 설계 리스크 원인, 12개의 시공관리 리스크 원인이 조사되었다 (Park, 2015). 다음 절에서는 Table 1과 Table 2에서 제시한 리스크 사건과 원인과의 체계적인 인과관계를 베이지안 네트워크를 활용하여 수립하고자 한다.

2.2 절삭량 저하

TBM 굴착에 있어 중요한 문제 중 하나는 커터 헤드의 굴착이 설계한대로 정상적으로 이루어지게 하는 것으로, 커터 헤드의 절삭량이 저하되게 되면 굴진속도의 감소로 인하여 전체적인 공사기간이 늘어나게 된다. 커터 헤드의 절삭량이 저하되는 하위 리스크 사건으로는 커터가 과도하게 마모되어 절삭효율이 떨어지거나, 커터가 비정상적으로 마모되거나 손상되어 굴착이 이루어지지 않는 경우 그리고 커터가 폐색되어서 굴착이 이루어지지 않는 것으로 나타났다.

커터의 과도한 마모를 발생시키는 원인으로는 우선 예상치 못한 경암 혹은 석영이 다량 함유되어 있는 암반으로 인한 과도한 마모량 증가가 있으며, 자갈층

지반을 만나게 되면 불규칙한 형상의 자갈로 인하여 커터에 과도한 마모가 발생하게 된다. 또한 설계단계에서 디스크 커터 및 커터 비트의 강도, 배치 등이 지반 조건에 맞지 않을 경우 커터의 과도한 마모 혹은 커터의 비정상적 마모 및 손상을 발생시킬 수 있다. 커터의 비정상적 마모 및 손상을 발생시키는 다른 원인으로는 복합지반을 굴착할 때 면판이 회전하면서 상대적으로 강도가 낮은 토사 혹은 풍화암을 굴착하던 디스크 커터가 단단한 경암을 만나면서 지속적인 충격을 받아 손상되는 경우가 있으며, 고수압의 지하수가 있는 지반을 굴착할 때에 지하수와 토사가 디스크 커터의 베어링에 침투하여 고장이 나는 경우가 있다. 커터의 과도한 마모 및 비정상적 마모, 손상이 발생할 때에는 정기적인 커터 점검을 통하여 커터 교체를 수행하여야 하며, 교체가 지연될 시 절삭량 저하가 발생하게 된다. 점토 협재물이 존재하는 지반 굴착시에는 협재물이 커터에 들러붙어 커터를 폐색시키거나 커터의 회전을 방해하여 편마모를 발생시킬 수도 있으며, 이를 방지하기 위해 적절한 개구율 설계가 필요하다. 또한 헤드의 형상이 지반에 적합하지 않으면 절삭량 저하가 발생할 수 있으며, 베이지안 네트워크를 활용하여 절삭량 저하에 대한 인과관계를 구성하면 다음 Fig. 2와 같다.

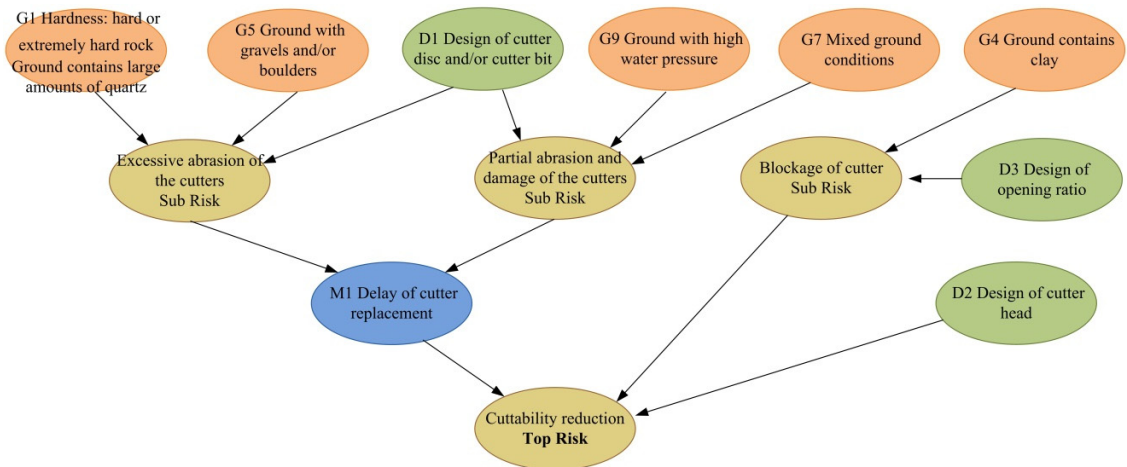


Fig. 2. Causal relation between risk factors and cuttability reduction

2.3 막장면 붕괴 및 지반 침하, 지반 용기, 이수 분출

막장압을 가하는 방법은 TBM type에 따라 다르므로 리스크 발생의 원인과 리스크 사건을 장비 type 별로 구분하였다. EPB TBM의 경우 복합지반으로 인하여 균일한 가압이 어려우며, 또한 자갈층 지반의 경우 자갈이 파쇄되지 않고 커터 헤드에 걸려서 면판이 face-loss 상태가 될 수 있으며, 암반등급이 급격하게 변화하는 구간에서는 지반에 맞는 첨가재 사용이 늦어져서 막장압이 제대로 가해지지 않을 수 있다. 이 외에도 연약지반, 단층파쇄대에서 막장압의 유지가 어려울 수 있다. 또한 EPB open mode로 굴착

중에 불량한 지반을 만나게 되면 막장압 유지가 어렵다. 막장압 유지가 제대로 되지 않고 이에 대한 배토량 관리가 미흡하여 대처가 늦어지게 되면 막장면이 붕괴되고 굴착토가 과도하게 배토되어 상부 지반의 침하가 발생할 수 있다.

Slurry TBM의 경우 단층파쇄대, 자갈층 지반 혹은 시추공이 제대로 보강되지 않은 지반을 굴착하게 되면, 이수가 손실되어 막장압의 유지가 어려울 수가 있으며, 연약지반의 경우 이수압이 너무 크면 지반이 할렬될 수 있고 압이 작으면 막장이 붕괴할 수 있어 어려움이 있다. 막장압 유지가 제대로 되지 않으면 막장면이 붕괴되거나 지반이 침하하고 막장압이 과다하면 지반이 용기되거나 이수가 분출될 수 있다. 공통

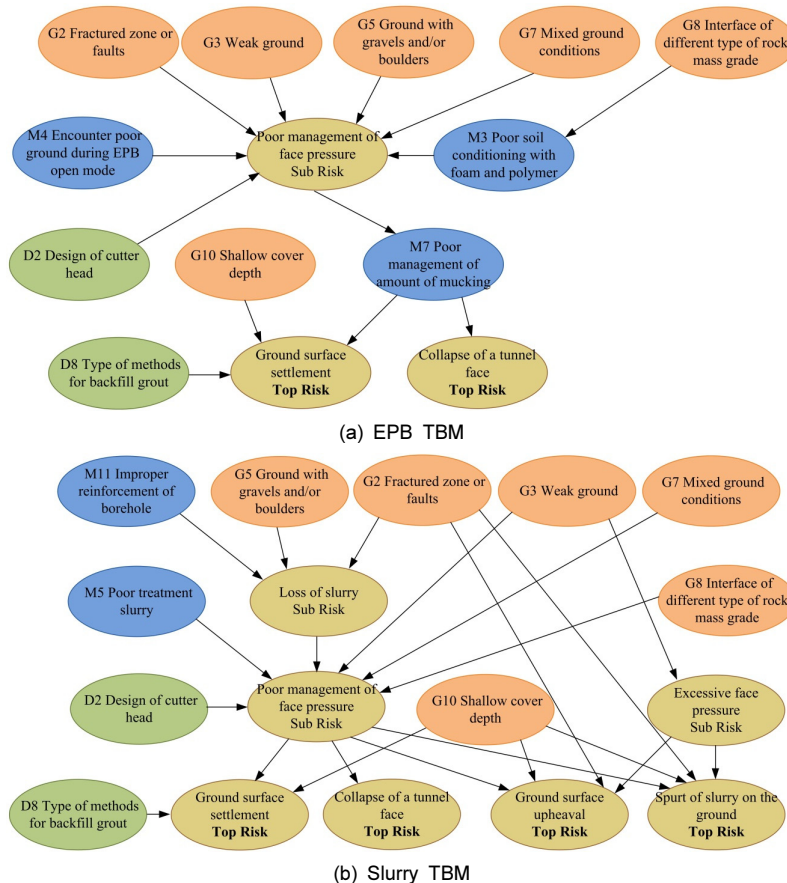


Fig. 3. Causal relation between risk factors and risks related to applying face pressure

적으로 커터 헤드의 형상이 지반에 적합하지 않으면 막장압 유지가 어려우며, 토피코가 낮거나 뒤채움 그라우팅이 제대로 이루어지지 않으면 지반 침하가 발생할 수 있다. 베이지안 네트워크를 활용하여 막장압과 관련된 인과관계를 구성하면 Fig. 3과 같다.

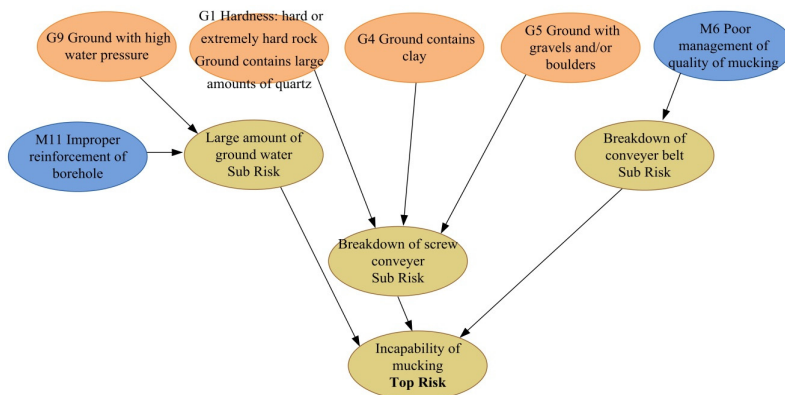
2.4 배토 불능

굴착된 버력의 배토 방법 또한 TBM type에 따라 다르므로 리스크 발생의 원인과 리스크 사건을 장비 type 별로 구분하였다.

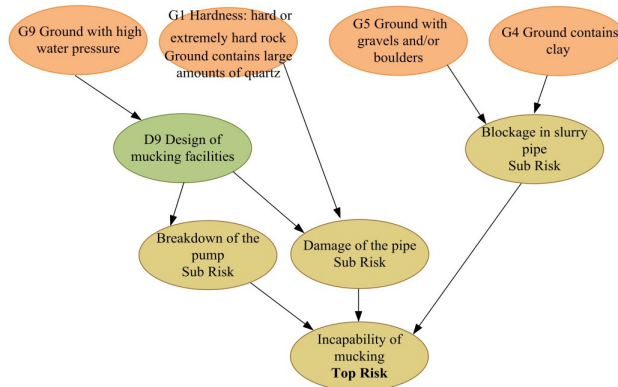
EPB TBM의 경우 과도한 지하수가 유입되거나 스크류 컨베이어의 고장 및 폐색이 발생하면 배토가 불가능하게 된다. 고수압 함수대를 굴착하게 되는 경

우에 과도한 지하수가 유입될 가능성이 있고, 지반 조사를 위해 굴착한 시추공에 대한 보강이 제대로 이루어지지 않으면, 지하수가 유입되어 배토가 어려울 수 있다. 자갈층 지반이나 경암~극경암, 석영함유 다량 암반에서는 파쇄되지 않은 자갈이나 암편이 스크류 컨베이어의 고장을 유발할 수 있으며, 점토 협재물이 존재하는 구간에서는 점토가 폐색을 발생시킬 수 있다. 굴착토의 형상이 일정하지 않아 과도하게 불규칙한 하중이 지속적으로 컨베이어 벨트에 가해지면 컨베이어 벨트가 고장 날 수 있다.

Slurry TBM의 경우 펌프 고장, 배관 손상, 배관 막힘으로 인하여 배토가 불가능하게 된다. 고수압 함수대에서는 고수압이 배관 및 펌프에 작용하므로 배관의 성능이 고압을 견딜 수 없으면 배관에서 지하수



(a) EPB TBM



(b) Slurry TBM

Fig. 4. Causal relation between risk factors and incapability of mucking

가 흘러나오거나 배관의 손상이 발생하며, 펌프에 갑작스런 고압이 가해지면 고장이 발생할 수 있다. 경암 및 석영이 많은 암반지반은 배관을 손상시킬 우려가 있으며, 자갈층 지반 및 점토 협재물이 존재하는 지반에서는 배관이 막힐 수 있다. 베이지안 네트워크를 활용하여 배토 불능과 관련된 인과관계를 구성하면 다음 Fig. 4와 같다.

2.5 굴진 불가

굴진 불가를 발생시키는 리스크 사건은 기계가 구속되거나 커터의 토크 및 추력의 부족, 선형의 유지가 어려운 경우이다. 압축성 및 팽창성 지반에서는 과도한 지반 변위로 인하여 기계가 구속될 수 있으며, 게이지 커터를 적절한 시기에 교체하지 않아도 기계

가 구속될 수 있다. 고수압 함수대에서는 고수압에 대응하기 위해서 막장면에 높은 압력을 가해야 하므로 커터 토크 및 추력이 부족할 수가 있다. 단층파쇄대와 연약지반에서는 지지력이 부족하여 선형유지의 어려움이 발생할 수 있다. 베이지안 네트워크를 활용하여 굴진 불가와 관련된 인과관계를 구성하면 다음 Fig. 5와 같다.

2.6 지하수 누수

지하수 누수를 발생시키는 리스크 사건은 실드 헤드부에서의 누수와 세그먼트에서의 누수로 나눌 수 있다. 지하수 누수에 가장 큰 원인으로는 고수압 함수대가 존재하는 경우이며, 고수압 함수대가 존재할 때 테일 씸(tail seal)의 관리가 미흡하면 실드 헤드부로

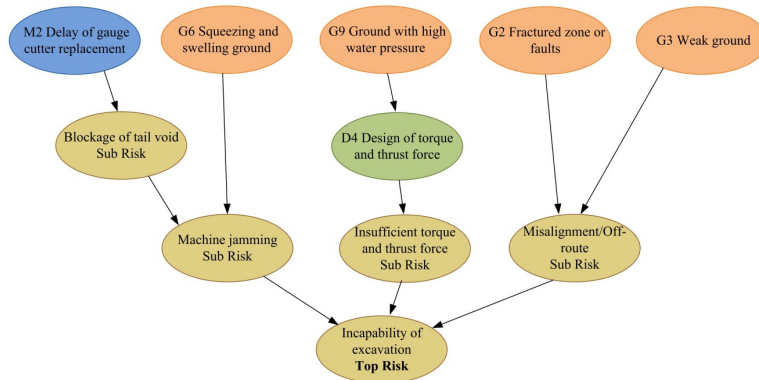


Fig. 5. Causal relation between risk factors and incapability of excavation

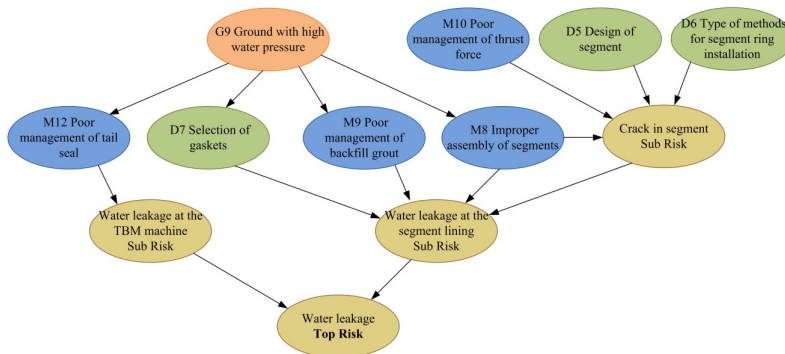


Fig. 6. Causal relation between risk factors and water leakage

누수가 발생하고, 세그먼트의 연결부의 방수가 제대로 되지 않거나 세그먼트 조립 불량이거나 뒤채움 그라우팅의 관리가 부족하면 세그먼트에서 누수가 발생할 수 있다. 세그먼트에 대한 설계가 잘못되어 강도가 부족한 경우와 비균등 추력 및 과도한 추력을 가한 경우에 세그먼트에 균열이 발생할 수 있으며, 이 경우에는 세그먼트에서 누수가 발생할 수 있다. 베이지안 네트워크를 활용하여 지하수 누수와 관련된 인과관계를 구성하면 다음 Fig. 6과 같다.

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

앞 절에서는 8개의 리스크 사건을 정의하고 이를 유발하는 리스크 원인과 인과관계를 베이지안 네트워크를 이용하여 규명하였다. 이제 이렇게 정의된 8개의 리스크 사건은 과연 어느 정도의 영향이 있는지를 아는 것이 중요하다. 이 8개의 리스크 사건의 영향정도를 Analytic Hierarchy Process (AHP)를 이용하여 정량적으로 분석하고자 한다.

3.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

AHP (Analytic Hierarchy Process)는 1970년대 초반 Saaty (1980)에 의해 개발된 의사결정 방법으로 다수의 요인들이 존재할 때 이러한 요인들을 계층적으로 구조화하고 각 요인들의 상대적인 중요도를 고려하여 최적의 대안을 선정하는 방법이다. 또한 측정의 목적과 수단(측정지표)을 계층적으로 연결시켜 복수의 요소들에 대한 가중치를 동시에 고려하기 보다는 둘 씩 짝을 지어 쌍대비교를 하게 함으로써 측정하려는 요소 및 지표들 간의 상대적 중요도 판단을 명확하고 용이하게 하는 기법이다(Hyun et al., 2015). AHP는 그 이론적 배경이 명확하여 기본논리를 이해하는데 어려움이 없으며, 적용하기가 간편하면서 실용적이기 때문에 폭넓은 분야의 의사결정에 널리 사용되

고 있다. AHP는 어떠한 분야든 의사결정이 요구되는 문제에는 적용이 가능한 범용적 모델이라고 할 수가 있으며, 다음과 같은 특징을 가지고 있다(Saaty, 1980; Cho et al., 2003).

첫째, AHP는 의사결정문제를 구성하고 있는 모든 요소를 나열하여, 여러 상이한 레벨로 분류하고 각 레벨에 있는 유사요소끼리 묶어 가면서 문제를 구조화 및 체계화하며, 이를 통해 복잡한 의사결정문제를 계층적으로 표현한다. 이는 인간의 자연스런 사고과정과 일치한다.

둘째, 평가자의 직관적이고 합리적인 평가를 근거로 정량적인 요소뿐만 아니라 정성적인 요소까지 고려하는 포괄적인 의사결정의 틀을 제공해 준다.

셋째, 평가자들(decision maker)의 판단에 대한 논리적 일관성을 검증할 수 있는 장치가 있어 결과에 대한 신뢰성을 높인다. 평가자의 설문조사 결과를 통해 산정되는 일관성지수와 일관성비율을 가지고 평가자의 답변의 일관성을 검토할 수 있다. 일관성 지수(Consistency Index: CI)를 난수지수(Random Index: RI)로 나누어서 일관성 비율(Consistency Ratio: CR)을 산정하며, 일관성 비율이 0.1이하의 값을 가지면 설문조사의 결과가 일관성이 있다고 판단한다.

넷째, 의사결정 문제와 관련된 정보의 변화에 따른 민감도를 분석할 수 있게 해준다. 평가기준의 가중치를 변화시켜 나감으로써 대안의 우선순위가 어떻게 변화하는 지를 검토할 수 있다.

다섯째, AHP는 상황과 여건의 변화에 따라 계속적으로 수정할 수 있는 모델이다. 의사결정자는 의사결정문제의 계층에 있는 요소들을 추가 또는 삭제할 수 있으며, 계층에 있는 요소들간의 선호에 대한 판단을 바꿀 수도 있다.

여섯째, AHP는 그룹의사결정도 가능하게 해준다. 즉, 다수평가자의 다양한 판단을 합의나 수치적 통합을 통해 각 대안의 종합된 최종 우선순위를 도출할 수 있게 해준다.

3.2 리스크 영향도(위험도) 분석

리스크 사건이 시공 중 발생하였을 때 프로젝트에 미치는 영향은 리스크의 위험도에 따라서 다를 것이다. 위험한 리스크의 경우 다수의 시일과 공사비가 소요되더라도 전방 지반을 보강하거나 장비 사양 변경, 굴진속도의 감소 등의 대응을 반드시 해야하지만 상대적으로 낮은 위험도의 리스크는 시공을 진행하면서 리스크가 발생할 때 대응을 하는 것이 더 효율적일 것이다.

앞서 그룹화한 8가지의 리스크 사건들 간의 상대적인 위험도를 산정하기 위해서 Table 3과 같은 쌍대비교표(pairwise comparison matrices)를 활용하여 열명의 TBM 전문가들에게 설문조사를 수행하였다. 리스크 위험도의 기준은 리스크가 발생한 후에 이를 복구하기 위해 투입되는 공사비와 소요되는 기간을 기준으로 하였다. 완성된 쌍대비교는 고유벡터법(eigenvector method)을 사용하여 정량적으로 리스크의 위험도에 대한 값을 산정한다. 쌍대비교행렬을 종합하여 가중치를 부여하고 가산하기 위해서 최대고유치(maximum eigenvalue)에 대응하는 주고유벡터(dominant eigenvector)

의 요소를 가중치로 이용하였다. 이에 대한 기본 식은 아래와 같다.

$$A \cdot \vec{u} = \omega_{\max} \cdot \vec{u} \tag{1}$$

여기서, A 는 쌍대비교행렬이며, \vec{u} 는 주고유벡터이고 ω_{\max} 는 최대고유치이다.

전문가 설문조사를 통해 작성한 쌍대비교표는 Table 3과 같으며, 이 때의 일관성 지수(CI)와 난수지수(RI) 값을 산정하여 일관성 비율(CR)을 산정하였다. CI를 산정하는 식은 아래와 같으며, RI는 Saaty (1980)가 제시한 쌍대비교행렬 크기 n 에 대한 RI 값을 사용하였다.

$$CI = (\omega_{\max} - n) / (n - 1) \tag{2}$$

쌍대비교표의 일관성 지수(CI)와 난수지수(RI) 값은 각각 0.0678과 1.41로 산정되었으며, 이를 통하여 산정한 일관성 비율(CR)은 0.0481으로 0.1보다 작으므로 설문조사를 시행한 위험도 쌍대비교표는 일관성이 있다고 판단된다. 여러 설문조사를 바탕으로 산정한 리스크 영향도(위험도)는 Table 4에 나타나있다.

Table 3. Pairwise comparison matrix (Relative importance matrix)

| | Cuttability reduction | Collapse of a tunnel face | Ground Surface settlement | Ground Surface upheaval | Spurt of slurry on the ground | Incapability of mucking | Incapability of excavation | Water leakage |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------|
| Cuttability reduction | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 | 3 |
| Collapse of a tunnel face | 5 | 1 | 3 | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| Ground surface settlement | 3 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | 3 |
| Ground surface upheaval | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1 |
| Spurt of slurry on the ground | 1 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| Incapability of mucking | 3 | 1 | 1/3 | 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| Incapability of excavation | 5 | 1 | 1 | 5 | 5 | 1 | 1 | 5 |
| Water leakage | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1 |

Table 4. Result of risk impact analysis

| Risk | Impact | Risk response level |
|-------------------------------|--------|---------------------|
| Cuttability reduction | 0.067 | 2 |
| Collapse of a tunnel face | 0.269 | 4 |
| Ground surface settlement | 0.112 | 3 |
| Ground surface upheaval | 0.036 | 1 |
| Spurt of slurry on the ground | 0.031 | 1 |
| Incapability of mucking | 0.189 | 3 |
| Incapability of excavation | 0.256 | 4 |
| Water leakage | 0.040 | 1 |

Table 5. Risk response level

| Risk response level | Risk response | Impact |
|---------------------|---|----------------|
| 4 | Absolutely applying risk mitigation method | More than 0.20 |
| 3 | Applying risk mitigation method | 0.10 ~ 0.20 |
| 2 | Careful construction without risk mitigation method | 0.05 ~ 0.10 |
| 1 | No response | Below 0.05 |

리스크 대응은 리스크 위험도에 따라 이루어지는 것이 효율적이므로, 본 논문에서는 리스크 위험도에 기반한 리스크 대응단계를 제안하였다(Table 5). 대응 1단계는 리스크의 위험도가 낮아 특별한 대책공법을 적용하지 않아도 시공 상에 문제가 발생하지 않을 것으로 판단되는 리스크이다. 대응 2단계는 리스크의 위험도가 어느 정도 존재하여 리스크가 발생할 경우 이에 대처하기 위한 공기지연이 발생할 수 있지만, 특별한 대책공법을 시행하기 보다는 시공 시 장비운용 등에 주의하면서 진행하는 단계이다. 대응 3단계는 리스크의 위험도가 커서 리스크가 발생하게 되면 상당기간 공기지연이 발생할 것으로 예상되는 단계로 대책공법을 적용해야 하는 단계이다. 대응 4단계는 리스크의 위험도가 매우 커서 이에 대한 무조건적인 대책공법을 적용해야 하며, 위험구간을 통과하기 전에 이에 대처하기 위한 대책공법을 반드시 시행하거나 장비의 변경 등의 조치를 취해야 하는 단계이다. 전문가 설문조사를 통해 산정한 리스크 위험도 값에

근거한 각 리스크 별 대응단계는 막장면 붕괴, 굴진 불가는 대응 4단계, 지반 침하, 배토 불능은 대응 3단계, 절삭량 저하는 대응 2단계, 지반 융기, 이수 분출, 지하수 누수는 대응 1단계로 나타났다(Table 4).

3.3 현장 사고사례에 대한 리스크 영향도 분석 비교

앞서 산정한 리스크 사건 별 리스크 대응단계에 대한 검증을 위해서 TBM 프로젝트에서 발생한 사고 사례와 비교를 하였다. TBM 사고사례에 대한 문헌조사를 수행하여 프로젝트명, 지반 조건, 리스크 사건, TBM 장비 type, 리스크 결과에 대해 정리하였으며, 이는 Table 6과 같다(Shirlaw et al., 2000; Koh et al., 2010; Chong, 2013).

절삭량 저하의 경우, 장비의 변경보다는 지속적인 디스크 커터 마모도 점검, 정기적인 커터 교체, 추력 및 토크, 커터 헤드 회전속도의 조절 등의 숙련된 장비운용, 개구율 조절 등으로 극복하는 것이 일반적이기 때문에 2단계의 대응단계는 적절한 것으로 판단된다. 막장면 붕괴 사례에서는 막장면 붕괴로 인하여 지표면에 함몰이 생기고, 막장면으로 다수의 토사가 유입되어 시공의 어려움을 겪거나 지표면 아래에 공극이 발생하는 결과가 발생하였다. 이러한 결과는 시공 시 과도한 공기지연을 발생시키거나 도심지의 경우 인명 피해 및 인접 구조물의 손상 등을 발생시킬 수 있으므로 대응 4단계의 평가 결과는 적절한 것으로 판단된다. 지표면에 싱크홀이 발생하거나 과도한 침하가 발생하게 되면 인명 피해나 인접 건물에 피해를 줄 수 있으며, 추가적으로 지반에 대한 보강이 이루어져야 하므로, 지반 침하의 대응 3단계 평가결과는 적절한 것으로 판단된다. 지반 융기는 과도한 막장압에 의해 발생할 수 있으나, 이는 시공 관리에 큰 문제가 없을 시에는 발생하기 어려운 상황이므로 1단계의 리스크 평가는 적절하다. 이수 분출은 사례에서 보듯이 리스크가 발생하여도 재산이나 인명에 미치는 피해가 미미하며, 시공 관리에 큰 문제가 없을 시 발생하

Table 6. TBM trouble cases

| Projects | Ground condition | Risk events | TBM type | Risk result | Risk response level |
|--|--|-------------------------------|----------|---|---------------------|
| Seoul Subway (Korea) | Hardness: hard or extremely hard rock Ground contains large amounts of quartz | Cuttability reduction | EPB | Consumption of cutters 30% more than designed due to excessive abrasion of the cutter | 2 |
| Storebaelt Tunnel (Denmark) | Ground with gravels and/or boulders | Cuttability reduction | EPB | Frequent change of cutter bit and inspection of cutter head each 75 rings (124 m) Construction delay occurred for unexpected change of bit and adjacent ground reinforcement | 2 |
| Kyoto Tunnel (Japan) | Weak ground | Collapse of a tunnel face | EPB | Soil and water flowed into the tunnel through screw conveyer Stoppage of construction due to ground surface settlement | 4 |
| South Bay Ocean Outfall (San Diego, USA) | Ground with gravels and/or boulders | Collapse of a tunnel face | EPB | Stoppage of construction due to soil inflow and water blowout from tunnel face | 4 |
| MRT (Singapore) | Interface of different type of rock mass grade | Collapse of a tunnel face | EPB | Subsurface voids which required 196 m ³ of grout to fill were formed | 4 |
| MRT (Singapore) | Weak ground | Spurts of slurry above ground | Slurry | The discharge of slurry to the surface, while it poses less risk to surface structures, still presents a road hazard and a disruption to surface activities | 1 |
| Okayama Prefecture tunnel (Japan) | Weak ground | Ground surface settlement | Slurry | Ground fracture due to excessive face pressure made ground relaxation during tunnel construction. After 1 year, ground relaxation extended to the surface and the surface collapsed. | 3 |
| Seoul Subway (Korea) | Ground with high water pressure | Incapability of mucking | EPB | Water flowed into the tunnel through screw conveyer Adjacent ground was reinforced using curtain wall method for decrease of water inflow | 3 |
| Seoul Subway (Korea) | Ground with gravels and/or boulders | Incapability of mucking | Slurry | Gravel and boulders blocked the slurry discharge pipe Opening ratio was reduced from 21% to 17% Inspection window was installed for checking the slurry discharge pipe | 3 |
| Storebaelt Tunnel (Denmark) | Ground with high water pressure | Incapability of excavation | EPB | Insufficient machine face pressure capability (3bar) led to stoppage of excavation under 8bar water pressure. Additional two piston for applying face pressure was installed. | 4 |
| Yellow river diversion project (China) | Squeezing ground | Incapability of excavation | EPB | During excavation, machine jamming occurred. Manual excavation with a jackhammer was used to cut and remove the converged rock mass. After 9days of being jammed, the TBM was totally released and resumed normal excavation. | 4 |

기 어려우므로 1단계의 리스크 평가는 적절하다. 지하수의 유입으로 인한 배토 불능의 경우 주변지반을 보강하여 유입수량을 줄이거나, 첨가재의 변경 등의 방법으로 대처를 해야 하고, 자갈이나 호박돌로 인해 배토불능의 경우도 개구율의 변경, 점검창 설치 등의

장비 변경이 필요하다. 배토 불능이 발생하면 공사가 중지되고 공기지연이 발생하므로 대응 3단계의 평가 결과는 적절한 것으로 판단된다. 굴진 불가가 발생하게 되면 일차적으로 공사가 중지되며, 이에 대처하기 위해 장비의 변경이나 인력의 투입 등의 과도한 공기

지연이 발생하므로 대응 4단계의 평가는 적절한 것으로 판단된다. 지하수 누수는 공기지연에 미치는 영향이 거의 없고, 시공 시 주의하면 발생하지 않기 때문에 대응 1단계는 적절한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 AHP를 활용한 리스크 영향도 분석 및 그 결과에 기반한 대응단계를 실제 TBM 현장에서 발생한 사고사례와 비교하였을 때, 발생 리스크 사건별 대응단계는 적절한 것으로 확인되었다. 따라서 이를 활용하여 실제 TBM 현장에서 발생할 리스크 사건에 대한 위험도 판별이 가능할 것이며, 이는 리스크의 체계적인 대응을 위한 척도로 활용될 것으로 판단된다.

4. 설계와 시공단계에서의 TBM 리스크 저감 및 대처 방안

TBM 리스크 대응에 있어서 설계와 시공단계 각각의 대응 방법에 차이가 있으며, 장비를 제작하는 설계 단계에서부터 시공단계의 전 단계에 걸쳐 리스크에 대응할 필요가 있다. 이를 위해서 설계 및 시공단계에서의 리스크 대처 방안을 전문가 인터뷰 및 문헌조사를 수행하여 다음과 같이 정리하였다.

4.1 절삭량 저하 방지를 위한 대처 방안

절삭량 저하 중 디스크 커터의 과도한 마모 및 편마모, 비트 손상을 방지하기 위해서는 설계단계에서 프로젝트의 지반에 적합한 커터 헤드 설계 및 커터 강도 설계가 필요하며, 시공단계에서는 정기적인 디스크 커터 마모도 점검 및 교체를 수행할 필요가 있다. 디스크 커터 고장을 방지하기 위해서는 설계단계에서는 커터의 베어링, 씰의 고성능화가 필요하며, 시공단계에서는 해저구간과 같이 고수압이 작용하는 곳 이전에 커터의 점검 및 교체를 할 필요가 있다.

커터 헤드 폐색을 방지하기 위해서는 설계단계에서 자갈과 같은 큰 암석 분쇄기 설치 및 개구율을 변경할

수 있는 장비 설계가 필요하며, 시공단계에서는 개구율 변화, 굴착응고 방지를 위한 분산제를 이수와 혼합(Slurry TBM) 및 첨가제 사용(EPB TBM)이 수행되어야 한다.

4.2 막장압 유지를 위한 대처 방안

막장압 유지가 어려운 리스크의 경우 단층파쇄대, 복합지반, 연약지반 등 불리한 지반 조건에서 시공하는 경우 발생할 가능성이 크다. 이에 대처하기 위해서 설계단계에서 지반조사의 양 증가, 위험지반에 대한 보강계획 설계, 적절한 장비 type 결정, EPB TBM의 경우 첨가제 투입 설비 설치, Slurry TBM의 경우 지반에 대비한 이수조정 장치 설치 등이 필요하다. 시공단계에서는 지반보강 시행, 숙련된 장비운용(추력, 토크, 커터 헤드의 회전 속도, 굴진 속도의 조정), 첨가제(EPB TBM) 투입 및 이수 조절(Slurry TBM) 수행, 지표면 침하 체크, 배토량 측정 등이 필요하다.

4.3 배토 원활을 위한 대처 방안

배토와 관련하여서는 설계단계에서는 다음과 같이 대응할 수 있다. 자갈층 지반에 대비하여 돌분쇄기를 설치하여야 하며 EPB TBM의 경우 스크류 컨베이어에 점검창의 설치가 가능하고, 점토질의 지반 및 지하수 과다 지역에 대비한 첨가제 투입 계획 및 장비를 마련해야 하며, Slurry TBM의 경우 이수조정 장치 설치 및 조절 계획을 수립해야 한다. 고수압 함수대와 같이 지하수가 많은 구간에서는 EPB TBM의 경우 스크류 컨베이어 길이 증가, 더블 스크류 컨베이어 설치, 연결부 방수 성능 증가가 필요하며, Slurry TBM은 펌프나 파이프에 고수압 대응이 가능한 패킹 사용, 압력 변동이 적은 펌프 배열이나 가변속 펌프 증설 등의 긴급 예방 조치를 고려한 장비 설치가 필요하다. 또한 Slurry TBM의 경우 자갈, 강도 높은 암석으로 인하여 배니관이 손상될 수 있으므로 배관의 크기

증가 및 강도 증진, 굴곡부 지양의 설계가 필요하다. 시공단계에서는 EPB TBM의 경우 지반에 적합한 첨가재를 투입하여 배토의 품질을 확보하는 것이 가장 중요하며, Slurry TBM의 경우 이수를 조절하고 수압을 모니터링 하고 배관 마모도 및 펌프에 대한 정기적인 점검 및 교체를 하는 것이 필요하다.

4.4 굴진 원할을 위한 대처 방안

굴진 불가와 관련해서는 설계단계에서 굴진면 붕괴 검지 장치를 설치하여 막장부의 기계구속 여부를 파악할 수 있도록 하고, 프로젝트의 수압을 파악하여 그에 맞는 추력을 설계해야 한다. 또한 단층파쇄대나 연약지반에서는 선형유지가 어렵기 때문에 장비 침하를 방지하기 위한 주변 지반 보강대책이 필요하며, 하·해저터널과 같이 지하수위면 아래에서 굴진할 경우 부력으로 인한 장비 상승을 방지하기 위한 실드부 무게 증가 등의 대책을 마련해야 한다. 시공단계에서는 게이지 커터의 정기적인 점검 및 교체를 수행하여 기계구속을 방지하고 막장압이 높은 곳에서는 막장압을 지속적으로 모니터링 하고 그에 맞는 추력을 가하는 숙련된 장비운용이 필요하다.

4.5 지하수 누수 방지를 위한 대처 방안

지하수 누수와 관련하여 설계단계에서는 세그먼트 누수를 막기 위한 적합한 세그먼트 지수재 사용, 부식을 막기 위한 내염 콘크리트 혹은 피복(coating) 적용, 헤드부 누수를 막기 위한 테일 그리스 자동 급유장치 설치, 고압용 테일 그리스 적용, 테일 씰 형상 및 재질, 단수 검토, 긴급 지수장치 설치가 있다. 시공단계에서는 지하수나 해수의 조건에서도 뒤채움 그라우팅 주입이 잘 이루어 줄 수 있도록 첨가재를 사용해야 하며, 세그먼트 균열을 방지하기 위하여 추력을 균등하게 가해야 한다. 또한 키 세그먼트 조립 시 지수재가 손상되지 않도록 주의해야 하며, 세그먼트 조립 시

단차 및 벌어짐의 관리가 필요하다. 현장에서 세그먼트의 제조, 저장, 운반, 설치 시 품질을 유지하여야 하며, 정기적으로 테일 브러시(tail brushes)를 체크하고 그리스를 주입해야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 실드 TBM 설계자 및 시공자가 현장의 조건을 고려하여 리스크 원인을 파악하고 이로 인해 발생 가능한 리스크를 체계적으로 분석하여 리스크의 위험도 판별 및 그에 대한 설계 및 시공단계 저감대책을 통해 체계적으로 실드 TBM 리스크를 관리할 수 있도록 하는 것이다. 이를 위해서 실드 TBM 시공 중 발생 가능한 리스크 사건과 원인을 분석하여 각각 8개와 3개로 그룹화 하였으며, 정리된 리스크 원인과 리스크 사건 간의 인과관계 파악을 위하여 베이지안 네트워크를 활용한 도식적인 관계도를 작성하였다. 이를 통하여 TBM 시공 중 리스크 사건이 발생하는 일련의 과정에 대한 체계적인 파악이 가능하다.

8개의 리스크 사건을 대상으로 위험도를 산정하기 위하여 리스크가 발생하였을 때 이를 복구하기 위한 다운타임 및 비용을 기준으로 AHP를 수행하였으며, 가중치에 따른 리스크 대응단계를 4개로 제안하였다. 대응 4단계로는 막장면 붕괴, 굴진 불가, 3단계는 배토 불능, 2단계는 절삭량 저하, 지반 침하, 1단계는 지반 융기, 이수 분출, 지하수 누수로 나타났으며, 이는 실제 리스크 발생 사례와 비교했을 때 타당하게 나타났다.

리스크에 대응하기 위한 대책공법을 설계 및 시공 단계 별로 정리하였다. 설계단계에서는 리스크에 대비한 최적의 장비 설계, 위험구간의 리스크 대응 계획 등이 필요하며, 시공단계에서는 주의 깊은 장비운용 및 소모성 부품의 정기적인 점검 및 교체 등이 필요한 것으로 나타났다.

여기서 제안된 연구는 실드 TBM으로 터널을 설계

및 시공하는 경우에 발생 가능한 리스크 사건의 인과 관계를 밝히고, 이 리스크에 대한 대처 방안을 체계적으로 정리하였으므로 TBM 설계자 및 시공자가 현장의 조건을 고려하여 리스크 원인을 선정하고 이로 인해 발생 가능한 리스크를 체계적으로 분석하여 파악할 수 있게 해주며, 리스크의 위험도 판별 및 그에 대한 설계 및 시공단계에서의 저감대책을 통해 체계적인 쉴드 TBM 리스크 관리에 도움을 줄 수 있다고 믿는다.

또한 일반적으로 리스크 분석에 많이 활용이 되는 Risk Matrix 평가 기법에도 본 연구 결과의 활용이 가능할 것으로 생각된다. Risk Matrix를 활용하면 리스크 위험도 산정에 있어 리스크의 중요도와 발생확률을 동시에 고려할 수 있는 장점이 있으나, 리스크 원인에 대해서는 고려하지 않기 때문에 리스크 사건의 발생확률이 정성적인 평가에 의해 산정되는 경우가 많다. 본 논문에서 제안한 베이지안 네트워크는 리스크의 원인과 사건간의 인과관계가 명확하며, 추후 이를 활용하여 정량적인 리스크 발생확률 산정의 연구가 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(16SCIP-B066321-04)” 과제 및 철도기술연구사업의 “BIM기반 철도인프라 관리 표준기술 개발(16RTRP-B104239-02)” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Cho, G., Cho, Y., Gang, H. (2003), “The analytic hierarchy process”, Donghyun Publisher, Gyeonggi, Korea.
2. Chong, W. (2013), “Tunnel Boring Machine (TBM) performance in Singapore’s Mass Rapid Transit (MRT)

system”, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

3. Hyun, K.C., Min, S., Choi, H., Park, J., Lee, I.M. (2015), “Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 49, pp. 121-129.
4. Jensen, F.V. (2001), “Bayesian networks and decision graphs”, Springer-Verlag, New York.
5. Koh, S.Y., Kwon, S.J., Choo, S.Y., Kim, Y.M. (2010), “The study of the disputed issues during the soft ground shield TBM design and construction according to shield TBM trouble case study”, 2010 Fall Conference of the Korean Society for Railway, Jeju, Korea, pp. 2362-2371.
6. Kwak, J.H., Park, H.K. (2009), “A case study of delay analysis for E.P.B shield TBM method in construction site”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 6D, pp. 737-743.
7. Maidl, B., Herrenknecht, M., Anheuser, L. (1996), “Mechanised shield tunneling”, Ernst & Sohn, Berlin, Germany.
8. Park, J. (2015), “A risk management system applicable to shield TBM tunnel using Bayesian network”, Ph.D. Dissertation, Korea University, Seoul, Korea.
9. Tóth, Á., Gong, Q., Zhao, J. (2013), “Case studies of TBM tunneling performance in rock-soil interface mixed ground”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 38, pp. 140-150.
10. Saaty, T.L. (1980), “The analytic hierarchy process”, McGraw-Hill, New York.
11. Seo, J.W., Yoon, J.H., Kim, J.H., Jee, S.H. (2010), “Development of risk analysis structure for large-scale underground construction in urban areas”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 3, pp. 59-68.
12. Shirlaw, J.N., Hencher, S.R., Zhao, J. (2000), “Design and construction issues for excavation and tunnelling in some tropically weathered rocks and soils”, *Proceedings of GeoEng2000*, Melbourne, Australia, Vol. 1, pp. 1286-1329.