

실드 TBM 터널에 적용 가능한 리스크 관리: I. 리스크 요인 분석

현기창¹, 민상윤², 문준배³, 정경환⁴, 이인모^{5*}

Risk management applicable to shield TBM tunnel: I. Risk factor analysis

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

ABSTRACT In general, risk management consists of a series of processes or steps including risk identification, risk analysis, risk evaluation, risk mitigation measures, and risk re-evaluation. In this paper, potential risk factors that occur in shield TBM tunnels were investigated based on many previous case studies and questionnaires to tunnel experts. The risk factors were classified as geological, design or construction management features. Fault Tree was set up by dividing all feasible risks into four groups that associated with: cutter; machine confinement; mucking (driving) and segments. From the Fault Tree Analysis (FTA), 12 risk items were identified and the probability of failure of each chosen risk item was obtained.

Keywords: Shield TBM tunnelling, risk identification, risk factor, fault tree analysis

요약 일반적으로 리스크 관리는 리스크 확인, 리스크 분석, 리스크 평가, 리스크 대책, 리스크 재평가를 포함하는 일련의 과정으로 구성된다. 본 논문에서는 실드 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크 요인들을 여러 문헌 자료와 워크샵을 바탕으로 조사하였다. 리스크 요인들은 지질 요인, 설계 요인, 시공 관리 요인으로 구분되었다. Fault Tree도는 리스크들을 커터, 기계 구속, 배토(굴진), 세그먼트와 관련된 4그룹으로 분류하여 작성되었다. FT도로부터 12가지 리스크 아이템을 확인하고 각각의 발생확률을 구하였다.

주요어: 실드 TBM 터널, 리스크 확인, 리스크 요인, Fault Tree Analysis

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

¹정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

²정희원, 파슨스 디자인매니저

³정희원, ㈜동아지질 부장

⁴정희원, ㈜동아지질 대표이사

⁵정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

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

1. 서론

일반적으로 터널 기계화 시공기술은 “비트와 디스크 등에 의해 기계적으로 굴착을 수행하는 모든 터널 굴착기술”을 말하며 이는 백호우 또는 리퍼에서부터 가장 복잡한 형태의 쉴드 Tunnel Boring Machine(TBM)까지의 모든 기계굴착방법을 포함한다(ITA, 2004). 이러한 터널 기계화 시공기술은 TBM 공법으로 대표되며 발파에 의한 터널 굴착공법과 비교하여 소음·진동 등의 환경피해를 최소화하고 연장이 긴 장대터널에서의 고속시공이 가능하여 공사비용과 공사기간을 대폭 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다(한국터널공학회, 2008).

하지만, 기계화 터널공법 중 가장 장비규모가 큰 TBM을 활용한 쉴드 TBM 터널의 경우 후진이 거의 불가능하기 때문에 예측하지 못한 문제가 발생할 경우 대처능력이 매우 떨어진다. 이러한 이유로 쉴드 TBM 터널 공사를 진행하는 과정에서 문제가 발생하게 될 경우 TBM 굴진이 중단되게 되고 시공지체에 따른 상당한 경제적 손실이 발생하게 된다. 따라서 터널 공사 시 설계, 시공 단계에서 미리 발생 가능한 위험요소를 예측하고 그에 따른 대책 방안을 마련하여 TBM의 효율을 향상시키고 공기단축을 도모하여 경제적인 기계화 터널시공이 가능하도록 하여야 한다(배규진과 장수호, 2006). 이처럼 쉴드 TBM 터널 공사 시 프로젝트의 수행 목표 달성에 방해가 되는 위험요소들을 효과적으로 분석하고 관리함으로써 프로젝트의 목표를 성공적으로 달성할 수 있으며 이와 같은 리스크 관리가 체계적으로 이루어질 때 프로젝트의 다양하고 복잡한 불확실성을 최소화할 수 있다. 따라서 효과적인 리스크 관리는 프로젝트의 성패를 결정짓는 중요한 과정이라고 할 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는 쉴드 TBM에서 발생 가능한 리스크 요인들을 지질 - 설계 - 시공 관리 요인으로 분류하여 정리하고 어떤 특정된 사상과 극단의 바람직하지 못한 사상과의 관계를 그래픽으로 표시한 Fault Tree도를 통해 원인과 결과를 분석하고자 한다. 또한 전문가들의 설문조사를 통해 리스크 요인별 발생확률 등급을 산정하고 이를 바탕으로 쉴드 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크들의 발생확률을 계산하였다. 이러한 리스크 요인 분석을 통해 쉴드 TBM 터널 시공 시 경제적이고 합리적인 리스크 관리가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

2. 일반적인 리스크 관리 방법의 순서

미국의 사업관리협회(Project Management Institute, PMI)에서는 리스크 관리란 “프로젝트 위험을 분류, 분석, 대응하는 프로세스를 포함하며 이러한 프로세스를 통하여 프로젝트에 운영향을 주는 요인의 결과를 최대화하는 동시에 악영향을 주는 요인들의 결과를 최소화하는 관리기법”이라

정의하였다(PMI, 2000). 일반적으로 터널공사 리스크 관리 절차는 아래 Fig. 1과 같은 순서로 이루어지며 이는 프로젝트가 수행됨에 따라 순차적으로 진행되고 동시에 지속적으로 유지/순환되어야 한다.

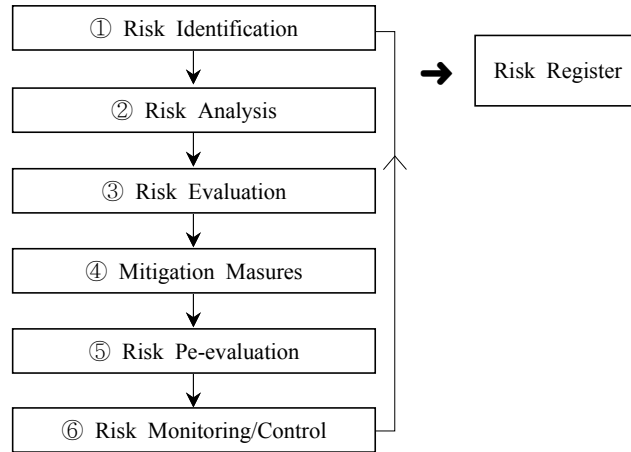


Fig. 1. Risk Management Flow Chart.

① 리스크 확인 (Risk Identification)

먼저 리스크 확인 단계에서는 터널 시공에 따른 발생 가능한 모든 위험 요인을 확인하고 카테고리 별로 분류한다. 이를 위해 발생 가능한 여러 가지 리스크에 대한 전반적인 문헌조사 및 선행 프로젝트 분석, 현 프로젝트 연구 분석 내용을 바탕으로 전문가 평가, 설문 조사 또는 리스크 워크숍을 수행한 후 이를 통해 확인된 리스크의 원인과 결과를 정리한다.

② 리스크 분석 (Risk Analysis)

다음 리스크 분석 단계에서는 리스크 확인 과정에서 파악된 각각의 리스크에 대하여 발생 확률(likelihood of occurrence)과 영향도(impact)를 분석/평가한다. 이러한 발생 확률과 영향도를 분석하는 방법에 따라 리스크 관리 방법의 종류도 나누어지게 된다.

③ 리스크 평가 (Risk Evaluation)

리스크 평가 단계에서는 리스크 분석을 통해 획득된 리스크 정보를 바탕으로 리스크의 위험 정도/수준을 평가하여 리스크 처리 방안 및 리스크 수용 여부를 판단한다. 이때의 리스크를 초기 리스크(initial risk)라 한다.

④ 리스크 저감 대책 제시/강구/적용 (Mitigation Measures)

프로젝트 관리자/소유자의 리스크에 대한 수용 한계에 따라서 적절하고 효율적인 리스크 저감 대책을 강구/적용한다. 이 단계는 리스크를 평가하는 단계에서 벗어나 리스크를 저감시킬 수 있는 대책 방안을 강구/적용함으로써 능동적으로 리스크를 관리하는 단계라 할 수 있다.

⑤ 리스크 재평가 (Risk Re-evaluation)

리스크 저감 대책 적용 이후 각각의 리스크에 대한 리스크 위험 수준을 재평가한다. 이 과정 이후에도 리스크 수용 한계를 넘는 잔류 리스크에 대해서는 상기에 설명된 리스크 관리 절차에 따라 재평가/분석 과정을 반복한다.

이와 같이 리스크 관리를 통해 획득된 모든 정보와 데이터는 리스크 등록부(Risk Register)에 기록하고 프로젝트가 진행됨에 따라 새롭게 얻어지는 정보와 평가결과를 지속적으로 갱신함으로써 프로젝트의 리스크를 통제/관리 할 수 있다.

3. 쉘드 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크 요인

앞서 살펴본 것처럼 효율적인 리스크 관리를 위해서는 “리스크 확인” 과정이 선행되어야 한다. 따라서 쉘드 TBM 터널에서의 효율적인 리스크 관리를 하기 위하여 쉘드 TBM 터널에서 발생 가능한 모든 리스크 요인을 확인한 후 카테고리 별로 분류하고 원인과 결과를 정리하는 과정을 수행하였다. 쉘드 TBM 터널 리스크와 관련된 설계 및 시공 자료와 같은 여러 문헌 자료뿐만 아니라 TBM 터널 현장 경험이 풍부한 TBM 설계 및 시공 전문가들과의 워크숍을 통해 얻어진 리스크 요인들을 Table 1과 같이 지질 - 설계 - 시공관리로 나누어 정리하였다. 조사 결과 지질 요인이 12가지, 설계 요인이 5가지, 시공관리 요인이 17가지였으며 체계적인 데이터베이스(DB) 구축을 위해 지속적으로 갱신/보완 될 것이다. 현장에서 터널 시공을 진행할 때 주의 깊게 관리해야 할 시공관리 요인이 매우 다양한 것으로 나타났으며 막장 전방 탐사 기법 등의 개발을 통해 굴진해야할 지반 상태 및 조건에 대해 미리 파악하여 지질 요인에 대한 대비를 하는 것 역시 중요하다는 것을 알 수 있었다.







Table 1. Risk factor 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 | |

4. FTA를 활용한 리스크 요인 분석

정리된 리스크 요인을 바탕으로 리스크의 원인과 결과를 분석하기 위하여 Fault Tree Analysis (FTA) 방법을 활용하였다. FTA란 문제 원인이 무엇인가 하는 연역적 사고방식으로 시스템이 문제를 결합 수 차트로 탐색해 나감으로써 어떤 요인이 문제의 원인이었는가를 찾아내는 해석기법으로 결합수 분석기법으로 불려진다. 위험형태의 존재별로 사상을 선정한 뒤 정상사상에서 기본사상까지 게이트를 이용하여 Fault Tree(FT)도를 작성해야하며 일반적인 FT도를 작성하는데 필요한 기호는 아래의 Table 2와 같다(송혁 등, 2006).

Table 2. Fault Tree Analysis Shapes.

| | Shapes | Name | Description |
|-------------------|---|-------------------|--|
| Event shapes |  | Event | A top event or an intermediate event |
| |  | Basic event | A basic initiating fault requiring no further development |
| |  | Undeveloped event | An event which is no further developed |
| |  | House event | An event that is normally expected to occur |
| Logic gate shapes |  | AND gate | The output event occurs if all input events occur |
| |  | OR gate | The output event occurs if at least one of the input events occurs |

FT도는 어떤 특정된 사상과 극단의 바람직하지 못한 사상과의 관계를 그래픽으로 표시한 것이다. 이 과정에서 시스템 전체에 심각한 영향을 미치는 리스크를 목표사상으로 정한다. FT는 목표사상에 연결되는 사상들의 일련의 연속과 가능한 조합에 의하여 구축된다. 목표사상에서 출발하여 가능한 기초적인 원인들이 논리 게이트로 연결된다. Tree는 모든 기본사상이나 기본원인에 도달할 때까지 전개되며, 각각의 발생확률은 사례를 통하여 규정된다. 시스템 FT도가 작성된 후 정성적으로 평가될 수 있다. 또한 목표사상에 연결된 수치적 정보를 통해 정량적으로 평가할 수 있다(허성관 등, 2005).

다음과 같은 순서로 작성해 나간다.

- ① 대상이 되는 시스템의 범위를 정한다.
- ② 대상시스템이 관계되는 자료를 준비한다.
- ③ 상상하고 정하는 사고의 명제(나무의 정상사상(Top Event))를 결정한다.
- ④ 원인 추구의 전제조건을 생각해둔다.
- ⑤ 정상사상에서 시작하여 순차적으로 생각되는 원인 사상을 논리기호로 이어간다.
- ⑥ 먼저 골격이 될 수 있는 개략적인 나무를 만든다.
- ⑦ 각각의 사상에 번호를 붙인다.

본 논문에서는 전문가들의 의견을 수렴하여 커터, 기계구속, 배토(굴진), 세그먼트로 분류한 FT도를 작성하였다. 작성된 FT도를 통하여 각각의 리스크와 리스크 요인들 사이의 원인과 결과를 확인할 수 있다. 또한 각각의 기본 리스크 요인들은 지질 요인(A), 설계 요인(B), 시공 관리 요인(C)으로 구분하여 분석시 참고할 수 있도록 하였다.

4.1 기계(커터)와 관련된 리스크 요인 분석

기계(커터)와 관련된 리스크의 가장 큰 문제는 커터의 절삭량 저하에 따른 굴진을 저하 문제인 것으로 분석되었다. 절삭량 저하를 일으키는 원인은 커터가 과도하게 마모되거나 편마모가 발생하는 것과 같이 커터에 문제가 생겼을 경우와 TBM 기계의 추진력(thrust force)과 회전력(torque)이 부족한 경우로 분류할 수 있다. 전체적인 내용은 Fig. 2와 같다.

이 중 커터가 과도하게 마모되는 경우는 모두 지질 요인으로 인하여 발생하며 지반의 암종이 화강암, 화강섬록암, 중생대/고생대 사암(Event A1)일 경우, 지반의 강도가 경암~극경암(Event A2)일 경우, 석영이 다량으로 함유된 지반(Event A3)일 경우이다. 커터의 편마모는 복합 지층(Event A4)과 같은 지질 요인과 지반에 맞지 않는 커터 헤드 선택에 따른 설계 요인(Event B1)으로 인하여 발생한다. 뿐만 아니라 커터의 교체시기가 너무 늦거나(Event C1) TBM 운전자(operator)의 지반 변화에 따른 대응 능력의 부족(Event C2)과 같은 시공 관리 요인도 원인이 될 수 있다. 마지막으로 TBM 기계의 추진력과 회전력이 부족한 경우는 커터 크기, 추력, 회전력 설계를 위한 입력 정보 등이 불량하거나(Event B2) 복합 지층에서의 개구율 관리(Event C3), 부적절한 커터 타입 변경(Event C4)의 시공 관리 요인으로 인하여 발생하는 것으로 분석되었다.

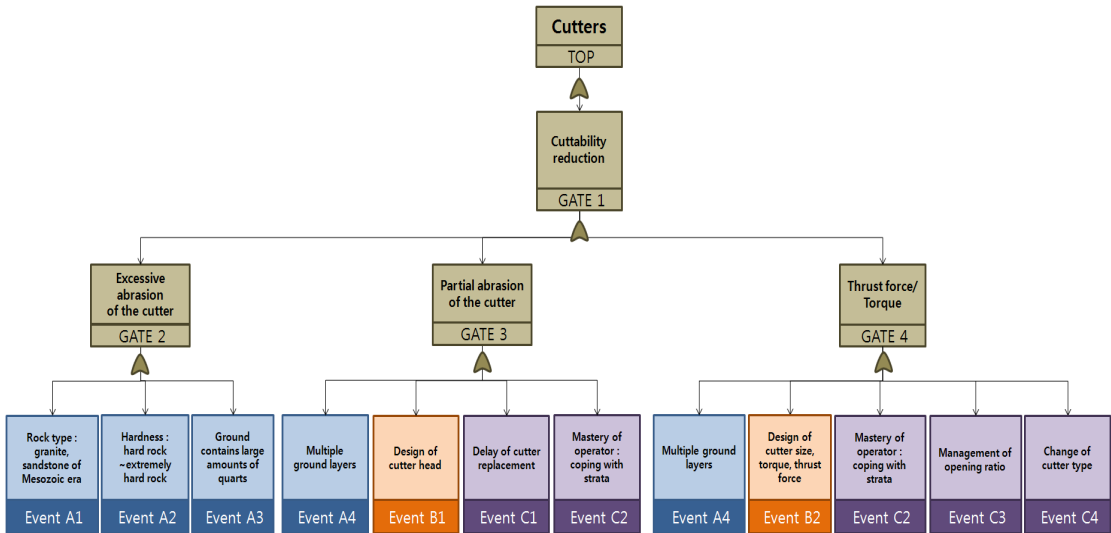


Fig. 2. Analysis of risk factors associated with the cutter.

4.2 기계구속과 관련된 리스크 요인 분석

기계 구속과 관련된 리스크 요인 분석 결과 지반의 과도한 변위로 인해 반력이 부족하거나 굴착과정에서 테일보이드(Tail void)부분이 폐색되면서 기계가 움직이지 못하는 경우, 설계된 노선에 맞게 시공이 되지 않아 생기는 선형 관리 문제로 나눌 수 있다.

반력이 부족하게 되는 경우는 모두 지질 요인으로 지반이 압출되거나(Event A5) 단층파쇄대가 존재하는 경우(Event A8)에 발생하며 지반지지력이 부족한 지반(Event A7)이나 팽창성 지반(Event A6)에서 과도한 변위가 발생되고 결과적으로 반력이 부족하게 되는 경우로 분류된다. 커터헤드 끝단에는 커터의 마모도를 확인하거나 Tail void에 이물질이나 버력 등이 채워지는 것을 방지하기 위해 게이지 커터가 설치된다. 이 게이지 커터의 교체시기가 늦어지게 되면(Event C8) Tail void가 이물질이나 버력 등으로 폐색되고 TBM 기계의 마찰력이 증가하여 기계가 움직이지 못하는 리스크가 발생한다.

마지막으로 선형 관리 문제는 단층파쇄대나 열수변질의 지반을 만나는 등(Event A9)의 지질 요인으로 인해 발생할 수 있고 방향제어(articulation jack)가 미숙하거나(Event C5) 지표측량 시스템의 오차가 발생하는 경우(Event C6) 또는 Taper 세그먼트의 조립이 불량한 경우(Event C7)의 시공관리 요인으로 인해 발생한다. Fig. 3에서 세부내용을 보여준다.

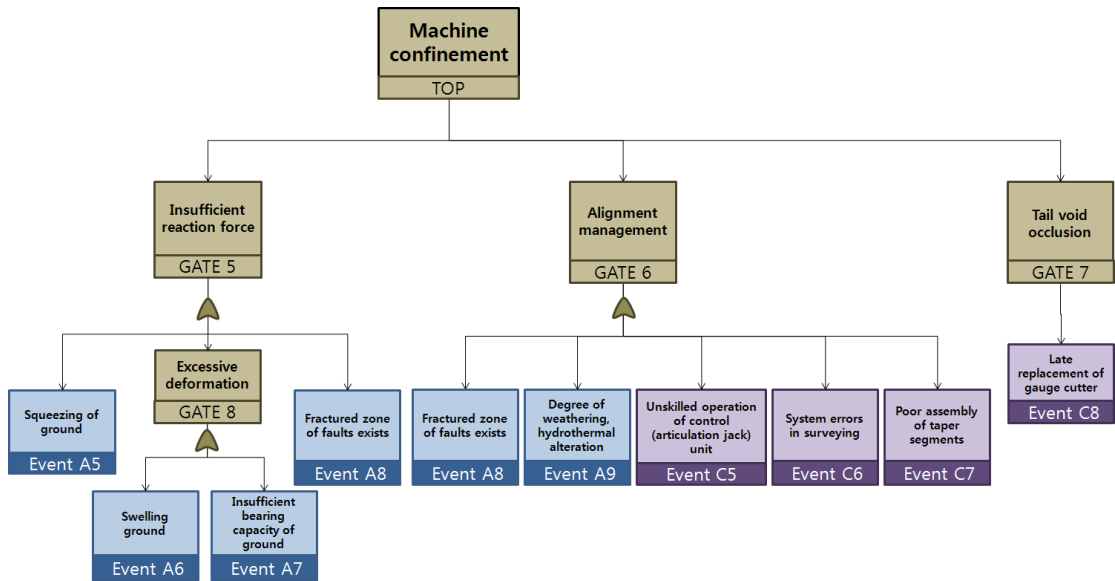


Fig. 3. Analysis of risk factors associated with the machine confinement.

4.3 배토(굴진)와 관련된 리스크 요인 분석

배토와 관련된 리스크 발생시에는 공사가 중단되기 때문에 굴진이 불가능한 경우와 함께 고려하였다. 먼저 굴진할 수 없게 되는 경우에는 자갈층 지반(Event A10)이나 단층파쇄대를 만나거나 (Event A8) 커터 헤드 설계(Event B1)나 토압 및 이수압 관리가 불량한 경우(Event C9)에 막장압 관리가 되지 않아 발생하는 것으로 나타났다.

또한 배니관이 폐색되거나 다량의 지반용수가 발생할 때 배토가 불능하게 되면 굴진이 불가능하게 된다. 배니관이 폐색하는 요인으로는 지표면이 붕괴(Event A11)되거나 배토량 관리(Event C10)가 되지 않는 경우가 있고 이 밖의 요인에는 불규칙한 크기 및 형상의 버력(Event C11)이 들어오거나 배토의 유동성 관리(Event C12) 등의 시공 관리 요인이 큰 부분을 차지하고 있다. 배토 불능 문제는 배니관 폐색뿐만 아니라 다량의 지반용수가 발생하는 경우에도 주의해야하는데 이러한 다량의 지반용수는 피압층이 존재(Event A12)하거나 지반에 맞지 않는 TBM 장비를 설계한 경우(Event B3)에 주로 발생하는 것으로 조사되었다.

마지막으로 벨트 컨베이어 관련 문제는 앞서 배니관을 폐색하게 만드는 요인이었던 불규칙한 크기 및 형상의 버력(Event C11)이 들어오거나 갱내/갱외의 배토 처리 과정에서 공정 관리(Event C13)가 제대로 되지 않을 경우에 주로 발생한다. 전체적인 내용은 아래 Fig. 4와 같다.

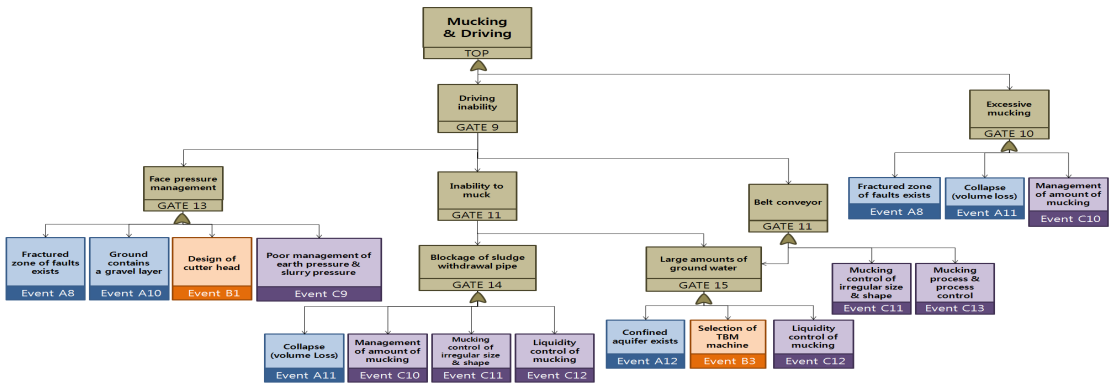


Fig. 4. Analysis of risk factors associated with the mucking and driving.

4.4 세그먼트와 관련된 리스크 요인 분석

세그먼트와 관련된 리스크의 문제는 크게 세그먼트가 파손되는 경우와 지수재가 손상되거나 누수가 발생하는 경우로 나누어 생각할 수 있다. 먼저 세그먼트가 파손되는 경우에는 지반 지지력이 부족(Event A7)하여 세그먼트 처짐이 발생하여 파손에 이르는 경우와 적절치 못한 링 체결방식(Event B4)으로 설계했을 경우이다. 또한 시공 관리 요인으로는 무리하게 TBM의 방향을 변경(Event C14)하거나 뒷채움 주입재의 관리가 부족(Event C15)할 경우, 그리고 키 세그먼트의 조립 작업이 불량(Event C16) 할 때 발생하는 것으로 조사되었다.

지수재가 손상 되거나 누수가 발생하는 경우는 피압층이 존재(Event A12)하거나 지수재나 링 체결방식 설계가 잘못 된 경우(Event B4, Event B5)에 나타난다. 또한 시공 관리 요인으로는 세그먼트 접착면에 이물질이 혼입되었을 경우(Event C17)에 발생하는 것으로 분석되었다. 전체적인 내용은 아래 Fig. 5와 같다.

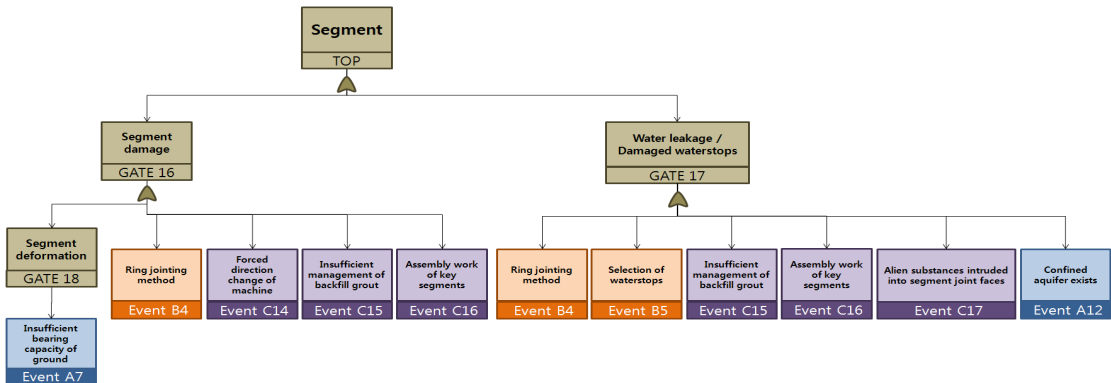


Fig. 5. Analysis of risk factors associated with segments.

5. FTA를 활용한 샬드 TBM 터널에서의 리스크 발생확률

위와 같이 커터, 기계구속, 배토(굴진), 세그먼트로 분류하여 정리한 리스크 요인들을 바탕으로 FT도를 구성하였다. 일반적으로 FTA에서 시스템의 발생확률은 n개의 기본 이벤트들의 논리게이트의 결합으로 계산되어진다. 본 논문에서 FTA 구성에 사용된 논리 구조는 기본 논리 구조인 AND gate와 OR gate로 이루어져 있다. 이러한 AND gate와 OR gate로 이루어진 사상의 발생확률(F)은 식 1과 식 2와 같다(구분희 등, 2008).

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

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

이처럼 구성된 FT도를 바탕으로 각 리스크의 발생확률을 정량적으로 산정하기 위해서는 기본 이벤트 즉, 리스크 요인들의 발생확률에 대한 자료를 수집하여야 한다. 하지만 TBM 터널 공사 과정에서의 리스크 요인들의 발생확률 자료는 구하기 어렵기 때문에 전문가들의 설문조사를 통하여 샬드 TBM 터널 공사시 리스크 요인들의 발생확률 등급을 산정하였다. 본 논문에서는 프로젝트 특성을 고려하여 설문조사를 위한 발생확률에 따른 등급은 Table 3과 같이 결정하였으나 등급에 대한 가이드라인은 시공 전문가나 리스크 전문가의 판단에 따라 유동적이다. 이를 기준으로 TBM 현장 경력이 10년 이상인 TBM 시공 전문가들의 설문조사 결과는 Table 4와 같이 정리하였다. 총 5명의 TBM 시공 전문가들에게 설문조사를 실시하였으며 작성된 발생등급을 발생확률로 변환한 후 리스크 요인별 발생확률의 평균을 계산하였다.

Table 3. Risk probability level.

| Probability level | Probability of failure (%) |
|-------------------------|----------------------------|
| 5 level (Very Likely) | more than 60% |
| 4 level (Likely) | 30 - 60% |
| 3 level (Possible) | 10 - 30% |
| 2 level (Unlikely) | 5 - 10% |
| 1 level (Very Unlikely) | Below 5% |

Table 4. Survey result for risk probability analysis.

| | event | Risk factors | Expert 1 | Expert 2 | Expert 3 | Expert 4 | Expert 5 | Probability |
|---------------------------------|-----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| Geological factors | event A1 | Rock type : granite, granodiorite, Mesozoic sandstone | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 12% |
| | event A2 | Hardness : hard or extremely hard rock | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 6% |
| | event A3 | Ground contains large amounts of quartz | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 8% |
| | event A4 | Multiple ground layers | 2 | 5 | 1 | 2 | 2 | 21% |
| | event A5 | Squeezing ground | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 11% |
| | event A6 | Swelling ground | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 11% |
| | event A7 | Insufficient bearing capacity of ground | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 | 18% |
| | event A8 | Fractured zone of faults exists | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 8% |
| | event A9 | Degree of weathering, hydrothermal alteration | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 12% |
| | event A10 | Ground contains a gravel layer | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 | 14% |
| | event A11 | Collapse of ground surface | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 6% |
| | event A12 | Confined aquifer exists | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 7% |
| Design factors | event B1 | Design of cutter head | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4% |
| | event B2 | Design of cutter size, torque, thrust force | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 5% |
| | event B3 | Selection of TBM machine | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4% |
| | event B4 | Ring jointing method | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 5% |
| | event B5 | Selection of waterstops | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4% |
| Construction management factors | event C1 | Delay of cutter replacement | 1 | 4 | 1 | 2 | 1 | 12% |
| | event C2 | Mastery of operator: coping with strata | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 6% |
| | event C3 | Management of opening ratio | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 7% |
| | event C4 | Change of cutter type | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 11% |
| | event C5 | Unskilled operation of direction control unit | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 7% |
| | event C6 | System errors in surveying | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 6% |
| | event C7 | Poor assembly of taper segments | 1 | 4 | 2 | 1 | 2 | 13% |
| | event C8 | Late replacement of gauge cutter | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 10% |
| | event C9 | Poor management of earth pressure or slurry pressure | 1 | 4 | 1 | 2 | 2 | 13% |
| | event C10 | Management of amount of mucking | 2 | 4 | 3 | 2 | 2 | 18% |
| | event C11 | Mucking control of irregular size and shape | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 8% |
| | event C12 | Liquidity control of mucking | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 15% |
| | event C13 | Mucking process and process control | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 | 14% |
| | event C14 | Forced direction change of machine | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 5% |
| | event C15 | Insufficient management of backfill grout | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 20% |
| | event C16 | Assembly work of key segments | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 7% |
| | event C17 | Alien substances intruded into segment joint faces | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 4% |

설문조사 결과와 식 1과 2를 활용하여 실드 TBM 터널에서 발생 가능한 총 12가지 리스크들의 발생확률을 계산하였다. 먼저 커터와 관련된 리스크의 발생확률은 커터의 과도한 마모가 23.1%, 커터의 편마모가 36.9%, 추력 및 회전력 부족이 41.3%로 계산되었다. 이러한 리스크들은 결국 절삭량 저하로 이어지며 FTA를 통한 절삭량 저하 리스크의 발생확률은 71.5%로 비교적 높았다.

실제 현장에서 가장 빈번하게 발생하는 배토 관련 리스크들을 살펴보면 막장압 관리 부족이 66.4%, 배토 불능한 경우가 46.3%, 벨트 컨베이어 고장으로 인한 리스크가 59.7%로 계산되었다. 이러한 리스크들은 결국 TBM 굴진을 불가능하게 하므로 이들을 통한 굴진 정지 리스크의 발생확률은 계산하면 81.7%이다. 또한 배토가 과다하게 많은 경우도 71.3%로 계산되어 실제 현장과 같이 높은 발생확률을 보였다.

TBM 기계 구속과 관련된 리스크는 반력 부족으로 인한 기계 구속이 40.2%, 선형관리가 38.4%, 테일보이드 폐쇄에 따른 리스크가 10.0%로 계산되었다. 또한 세그먼트 관련된 리스크는 세그먼트 파손이 44.4%, 지수재 손상 및 누수 발생 리스크가 17.3%로 계산되었다. FTA를 활용한 실드 TBM 터널에서의 리스크 발생확률을 정리하면 아래 Table 5와 같다.

Table 5. Risk probability analysis result.

| 구분 | Risk Item | | Probability of failure |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Cutter | Cuttability reduction | | 71.5% |
| | [1] | Excessive abrasion of the cutter | 23.1% |
| | [2] | Partial abrasion of the cutter | 36.9% |
| | [3] | Insufficient thrust force/torque | 41.3% |
| Machine confinement | Insufficient reaction force | | 40.2% |
| | Alignment management | | 38.4% |
| | Tail void occlusion | | 10.0% |
| Mucking / Driving | Driving inability | | 81.7% |
| | [1] | Face pressure management | 66.4% |
| | [2] | Incapability of mucking | 46.3% |
| | [3] | Belt conveyer problem | 59.7% |
| | Excessive mucking | | 71.3% |
| Segment | Segment damage | | 44.4% |
| | Water leakage | | 17.3% |

6. 결 론

본 논문에서는 리스크 관리를 위해 가장 먼저 선행되어야 하는 리스크 확인 과정에 대하여 알아보았다. 먼저 쉘드 TBM 터널에서 발생 가능한 리스크 요인들을 지질 요인, 설계 요인, 시공 관리 요인으로 분류하였다. 리스크 지질 요인으로는 암반의 종류, 암반의 성상, 지층의 종류 등에 따라 총 12가지로 분류되었으며 리스크 설계 요인은 커터 헤드 타입 설계, 커터·회전토크·추력 설계, TBM 장비 설계, 링 체결 방식, 지수재 선정과 같이 총 5가지로 정리되었다. 마지막으로 시공 관리 요인으로는 커터 교체 지연이나 막장압 관리 부족, 배토량 관리 부족 등 총 17가지로 정리되었다. 여러 리스크 요인들을 정리한 결과 막장 전방 예측을 통한 리스크 지질 요인을 사전에 파악하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 시공 시에는 쉽게 간과할 수 있는 관리 요인도 실제 리스크로 발전할 수 있으므로 주의해야한다.

위와 같이 정리된 리스크 요인과 리스크 사이의 원인과 결과에 대한 분석을 위하여 커터, 기계 구속, 배토, 세그먼트로 분류한 FT도를 작성하였다. TBM 시공 전문가들을 통해 기본 이벤트인 리스크 요인에 대한 발생확률 등급을 설문조사하고 이를 바탕으로 쉘드 TBM 터널에서 발생가능한 총 12가지 리스크들의 발생확률을 계산하였다. 실제 현장에서 가장 빈번하게 발생하는 배토 관련 리스크의 발생확률이 가장 높게 나왔으며 커터의 절삭량 저하 리스크의 발생확률도 비교적 높았다. 이러한 FTA를 통한 리스크의 원인 분석 과정을 바탕으로 리스크 요인에 대한 관리를 수행하고 추후에 발생 가능성이 높은 리스크들이 현장에서 발생하지 못하도록 제어 할 수 있을 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. Bae, G.J., Chang, S.H. (2006), “Improvement and evaluation of TBM performance by considering construction risk”, KTA 2006 Symposium, pp. 11-46.
2. Huh, S.K., Lee, J.H., Jeong, J.T. (2005), “Analysis of train accident in korea using FTA and AHP”, Journal of The Korean Institute of Plant Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 123-135.

3. ITA (2004), "ITA/AITES Accredited material guidelines for tunnelling risk management: international tunnelling association", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, No. 2, pp. 217-237.
4. KTA (2008), Series of Tunnel Engineering 3 - Tunnel Mechanized Construction Design, CIR, Seoul.
5. 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.
6. PMI (2000), Project Risk Management, PMBOK 2000 Edition.
7. Song, H., Park, H.G., Go, S.S. (2006), "A study on the analysis of accident cause of form work using FTA(Fault Tree Analysis) system", Journal of Construction Association of Korea, Vol. 22, No. 6, pp. 119-127.