

E.P.B(Earth Pressure Balance) Shield TBM 공사의 공기 지연 사례 연구

A Case Study of Delay Analysis for E.P.B Shield TBM Method in Construction Site

곽준환* · 박형근**

Kwak, Jun-Hwan · Park, Hyung-Keun

Abstract

Shield TBM, since it was employed for Suyoungman Bay riverbed tunnel of Busan Subway in 2000, has been increasingly adopted in Korea, and in line with growing popularity, the study on Shield TBM has been expanded. However the studies mostly focus on ground condition in a bid to estimate the advancement rate and develop the model for calculating the excavation efficiency, whereas the efforts to analyze the cause of delay and to develop the improvement measures have been neglected. Thus the studies were mostly intended to analyze the schedule slippage focusing on ground conditions, while the study on schedule behind due to equipment itself and related facilities have yet to be attempted in earnest. This study hence was aimed at evaluating the troubles and schedule slippage caused by mechanical elements such as shield TBM equipment and tools and ground conditions, making use of FMEA approach so as to analyze the risk of schedule delay by such elements, thereby proposing the preventive measures to deal with high-risk factors. So, this study suggest the solution to highly ranked trouble factor for the purpose of enhance the efficiency on Shield TBM.

Keywords : shield TBM, initial digging through, trouble, FMEA

요 지

터널 공사에 있어서 Shield TBM 장비의 활용이 증가함에 따라 Shield 공법의 효율성 증대를 위한 다양한 연구 또한 수행되어졌다. Shield TBM에 대한 연구들은 대부분 굴착 대상이 되는 지반의 특성을 고려하여 Shield TBM 장비 선정, 굴진 속도 계산, 모델식 개발 등에 초점을 맞추고 있으며, 굴착의 주체가 되는 Shield TBM 장비와 장비에 의해 발생하는 트러블로 인한 공기 지연에 대한 연구는 수행되어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는, Shield 터널 공사 중 Shield 장비의 초기 굴진을 대상으로 하여, 굴진 시 발생하는 트러블에 의해 야기되는 공기 지연 시간 및 원인을 FMEA 기법을 이용하여 분석하였고, 공기 지연 방지를 위한 관리 방안의 제시를 목적으로 각각의 트러블 항목들에 대한 우선순위를 결정하는 연구를 수행하였다. 그 결과 이전까지의 연구들에서 지반적 요소들에 비해 상대적으로 소홀히 다루어진 Shield TBM의 기계적 요소들의 트러블이 공기 지연을 일으키는 주요 원인이라는 것을 알 수 있었다. 각각의 공기 지연 발생 요소 중 공기 지연 위험도가 큰 몇몇 항목을 대상으로 트러블 관리 방안을 제시함으로써, 본 굴진 및 향후 유사 조건의 프로젝트 수행 시 보다 효율적으로 공사를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : Shield TBM, 초기굴진, 트러블, FMEA

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

오늘날 도심지에서는 복잡한 교통과 고밀집 건물들의 피해를 최소화하기 위해 터널 굴착을 통해 지하 공간을 개발하고 있다. 다양한 터널 굴착 공법 중 마크 부르넬(M. I. Brunel)에 의해 처음 소개된 Shield TBM 공법은 토피고, 지하수의 상태, 불안정한 지반 또는 개착이 불가능한 지역에

서도 굴착이 용이하여 많이 사용되고 있다. 국내에서는 1987년 부산 광복동 전력구 공사를 시작으로 부산시 수정산 배수지터널, 서울 및 부산 지하철 현장에 이르기까지 많은 터널 공사에 Shield TBM 공법이 사용되고 있다.

그림 1은 1998년부터 2009년까지의 Shield TBM에 관한 연구 동향을 분석한 것으로서, 그림에서 볼 수 있듯이 Shield TBM에 대한 연구들의 대부분은 Shield TBM 장비의 굴진 속도 산정 및 굴진 속도 계산 모델식 개발을 위한 연

*충북대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : muaae@naver.com)

**정회원 · 교신저자 · 충북대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : parkhk@chungbuk.ac.kr)

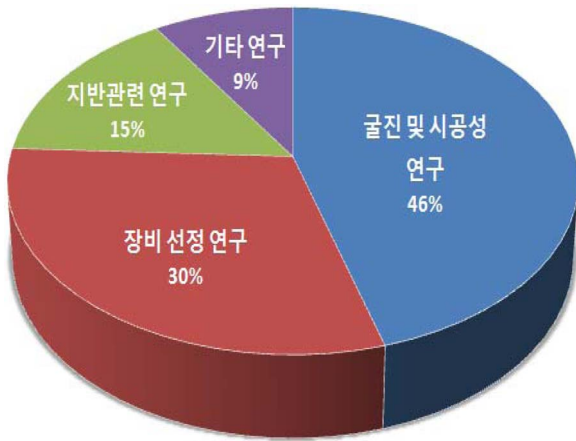


그림 1. Shield TBM 공법에 관한 연구

구와 Shield TBM 장비의 선정에 관한 연구, 대상 지반의 지질학적 요소에 대한 연구들이 대부분이었고, Shield TBM 공법 기계적 요소를 고려한 공기지연 원인 분석 및 대책에 관한 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는, Shield TBM 공법이 적용된 터널 공사의 Shield TBM 장비 및 부대설비 등의 기계적 요소에 의해 발생한 트러블 및 공기지연 시간과 지반적 요소에 의해 발생한 트러블 및 공기지연 시간을 분석하여 Shield TBM 굴진 시 공기지연에 영향을 주는 주요 인자들을 식별하고 이에 대한 트러블 방지대책 제시를 목적으로 연구를 수행하였다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구에서는 국내 D건설사의 E.P.B(Earth Pressure Balance) Shield TBM 공법을 사용하는 서울시 지하철 7호선 연장 A공구 현장과, 한강하저를 통과하는 분당선 지하철 공사현장의 초기굴진 시(A현장 102일, B현장 54일간) 발생한 공기지연을 연구 범위로 정하였다. 연구 방법은 실제 현장의 데이터를 통해 공기지연에 영향을 주는 트러블 요소 및 공기지연시간을 도출하였다.

각각의 트러블 요소에 대하여 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) 방법을 적용하여 해당 요소들의 공기지연 영향도에 따라 리스크 우선순위(RPN: Risk Priority Number)를 결정하였다. 리스크 우선순위가 높은 항목을 중점관리 항목으로 선정하고, 최우선 순위 항목의 공기지연 방지 대책을 제시하고자 한다.

2. Shield TBM 및 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)에 대한 고찰

2.1 Shield TBM 연구 동향

터널 공사에 있어서 Shield 장비의 활용이 증가함에 따라 Shield 공법의 효율성 증대를 위한 다양한 연구 또한 수행되어졌다. 김용일 외(2003, 2006), 김재영 외(2006) 등은 해당 Shield 장비 선정 및 터널 설계에 대한 연구를 수행하였고, 김민성 외(1998), 박철환 외(2001, 2002, 2007), 이석원 외(2003), 채점식 외(2008) 등은 Shield 장비의 굴진성능 및 시공성에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 양인재 외(2002), 홍

원표 외(2004), 배규진 외(2006) 등은 Shield 장비의 굴진 시 발생하는 침하 등의 지질학적 문제들에 대하여 연구를 수행하였다.

2.2 FMEA에 대한 고찰

FMEA는 Failure Mode and Effect Analysis의 약어로 주로 제조업 분야에서 활용되는 신뢰성해석 기법으로 제품과 프로세스 사이에 문제가 발생하기 전에 발생 가능한 문제점을 파악하여 이를 사전에 예방하는 사전조치 활동으로 정의된다. FMEA는 발생 가능한 트러블을 예방하고 안전성을 높여 고객에게 만족을 제공하는데 중점을 둔 프로세스 관리방법이다. 또한, FMEA는 부품들 간의 인과관계를 체계적으로 규명하여 시스템에 치명적인 영향을 줄 수 있는 고장의 최초 징후를 제공하고, 하나의 오류에서 파생되어지는 결과들까지 규명할 수 있다는 장점이 있다.

2.3 건설 사업의 FMEA 적용

최근 건설 사업에서는 프로세스의 잠재적 트러블 징후의 파악 및 원인규명, 트러블을 사전 예방을 통한 프로세스 실패 위험 제거 및 결함의 최초 징후를 제공한다는 장점 때문에 FMEA를 적용한 프로세스 관리가 시도되고 있다.

FMEA를 이용한 건설사업 관리에 관한 연구는 김운성(2002)이 건설 사업에 있어서의 FMEA적용 가능성에 대한 연구를 시작으로, 김기국(2007)의 초고층 빌딩에 대한 연구, 주한중 외(2008)의 건축 설계 분야에 대한 연구, 이현철 외(2009)의 철골 공사에 대한 FMEA 적용 연구가 수행되었다.

건설 사업에 FMEA를 적용하였을 때 얻을 수 있는 효과는 다음과 같다(김운성, 2002).

- ① 체계적이고 합리적인 공사품질 관리
- ② 하자 발생에 대한 책임소재 파악이 쉬움
- ③ 품질관리 측면에서의 공정해석이 용이함
- ④ 엔지니어들의 하자 발생 감소 및 결함요소 발견 능력 향상
- ⑤ 공정 개선사항의 순서화로 효율적인 공사 수행 가능
- ⑥ 사고발생 가능성 감소
- ⑦ 제조물책임법 소송의 증거자료로 사용할 수 있음

3. Shield TBM 초기굴진에 대한 공기지연 요인 분석

3.1 현장개요

본 연구에서 대상으로 하고 있는 Shield TBM 공법을 사용하고 있는 지하철 공사현장 A, B현장에 대한 개요는 표 1과 같으며 그림 2와 그림 3은 A, B현장의 평면도 및 Shield TBM 장비에 대해 나타나고 있다.

그림 4는 한국터널공학회에서 제시한 기계화 시공법 분류 기준안으로써, Shield TBM의 종류 및 분류방법에 대해 설명하고 있다. 본 연구 대상현장에 적용된 Shield TBM은 굴착도 처리 및 이수 설비의 불필요, 상대적으로 작업 부지로 인해 도심지 터널 굴착에 많이 사용하고 있는 E.P.B Shield TBM을 채택하고 있다.

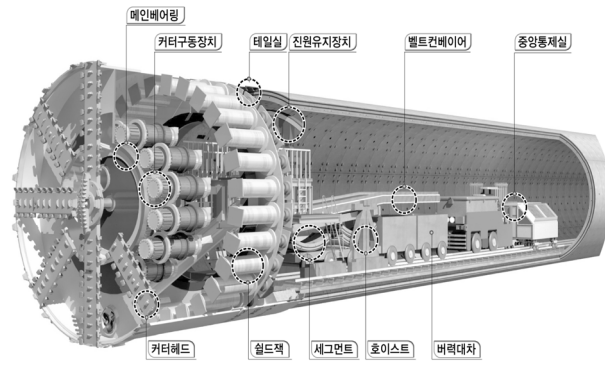
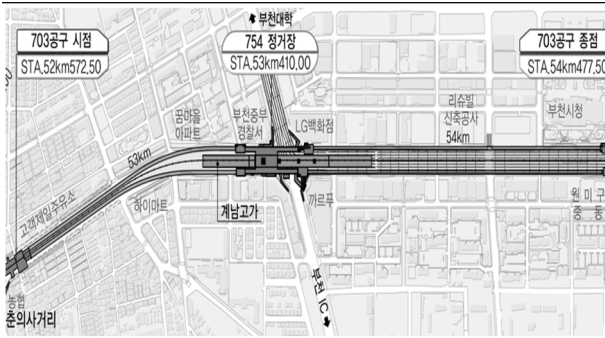


그림 2. A현장 평면도 및 Shield TBM

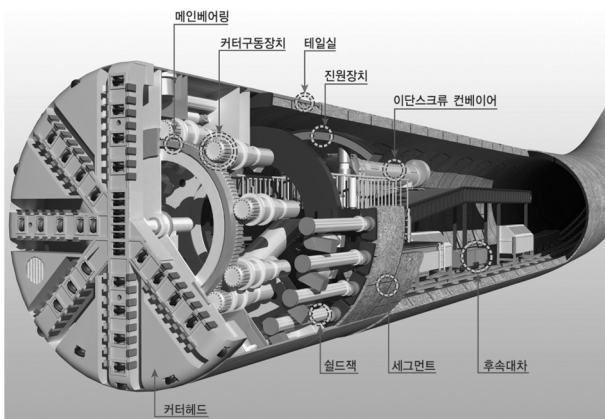
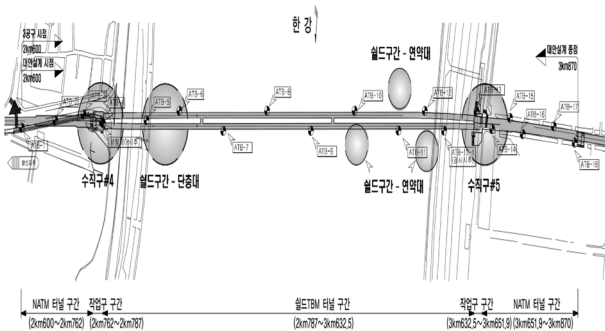


그림 3. B현장 평면도 및 Shield TBM

표 1. 연구 대상 현장 개요

	A현장 개요	B현장 개요
총 연장	1,905.0m	1,660.0m
Shield 터널 연장	1,594.0m	845.5m
지반상태	풍화토(65%) 풍화암(35%)	전 구간 경암 분포
장비 현황	토사용 비트 장착 E.P.B Shield TBM	암반용 디스크 커터 장착 E.P.B Shield TBM

Shield TBM

전면 밀폐형

추진책

기계식 지보	이수식 (Slurry)	토압식(E.P.B)	혼합식
Shield TBM	Shield TBM	Shield TBM	Shield TBM

그림 4. Shield TBM 장비 분류

3.2 FMEA를 이용한 연구 수행절차

FMEA는 제품이나 프로세스에서 발생 가능한 실패의 원인을 규명하는 방법으로 실패 원인의 중요도를 나타내는 치명도(Severity: S), 실패의 발생 가능성을 나타내는 빈도(Occurrence: O), 실패 원인의 사전 검출 가능성을 나타내는 검출도(Detection: D)의 세 가지 요소를 평가한다.

평가가 완료되면 세 가지 요소를 모두 곱하여 RPN(Risk Priority Number)를 계산하여 이를 크기순으로 정렬하여 각각의 인자에 대한 관리 우선순위를 결정하게 된다.

$$RPN = S \times O \times D$$

우선순위가 결정되면 우선순위가 높은 항목을 집중관리 항목으로 선정하고 해당 항목들의 관리 방법을 선정하여 집중관리를 실시함으로써, 트러블 요소를 미연에 방지하고, 그 영향을 최소화 하도록 한다.

그림 5는 FMEA 방법을 이용하여 공기지연에 영향을 미치는 각각의 요소들에 대한 위험도 분석을 진행하는 과정을 나타내고 있다.

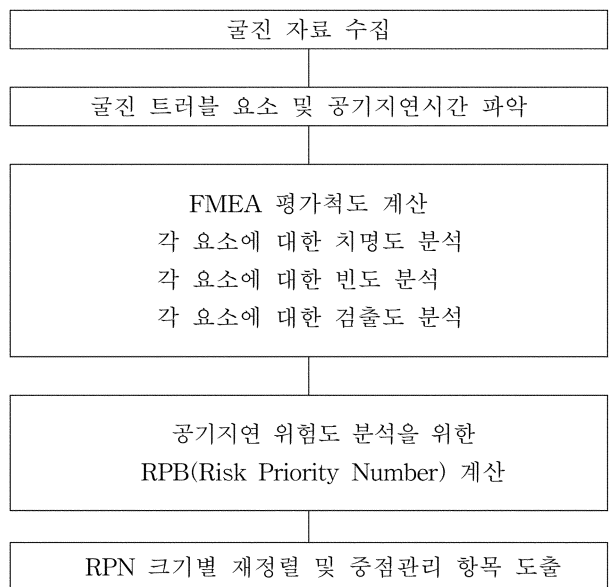


그림 5. FMEA를 이용한 연구절차

3.3 굴진자료 수집

본 연구에서 국내 D건설사가 수행하고 있는 2곳의 E.P.B Shield TBM 지하철 공사의 초기굴진 시 발생한 공기지연 요소 및 공기지연 시간에 대한 자료를 해당 현장의 일일 업무일지 및 현장 보고서를 통해 수집한 후 연구를 수행하였다.

A현장의 초기굴진은 2007년 11월부터 2008년 2월까지 총 102일이 소요되었고, 그 중 본 연구에서는 트러블 발생에 따른 공기지연 일수 22일을 대상으로 트러블 항목 및 공기지연 시간에 대한 자료를 수집하였다.

B현장은 2006년 05월부터 2006년 07월까지 총 54일간의 초기굴진이 수행되었고, 그 중 본 연구에서는 트러블 발생에 따른 공기지연 일수 14일을 대상으로 트러블 항목 및 공기지연 시간에 대한 자료를 수집하였다.

3.4 굴진 트러블 요소 및 공기지연시간 파악

표 2는 본 연구에서 대상으로 하고 있는 A현장과 B현장의 초기 굴진 과정에서 발생한 트러블 자료로써, 각 현장의 초기굴진 일일 업무 일지 상의 트러블 항목들을 수집하고, 해당 항목을 특성별로 정리하여 기계, 지반, 이송설비, 세그먼트, 기타의 5가지 항목으로 나누고 세부 트러블 요소들을 정리한 것이다.

표 2에서 알 수 있듯이 본 연구에서 대상으로 하고 있는 현장에서는 Shield TBM 장비 및 부대시설 등의 기계적 트러블 요소가 더 많은 것을 알 수 있다.

표 2. 각 현장 별 트러블 요소

A현장 주요 트러블 요소		B현장 주요 트러블 요소	
항목	트러블 요소	항목	트러블 요소
기계적 요소	커터 및 챔버부 막장 주입재 뒷채움 설비	기계적 요소	릴리프 밸브 이물질
지반적 요소	공동발생 붕락발생 침하누수	지반적 요소	슬라임 청소 슬라임 청소
이송 시설	여굴 과다 지반보강 스크루 컨베이어	이송 시설	스크루 막힘 기관차 고장 및 탈선 크레인와이어 절단
세그먼트	수평컨베이어 스크루 피더 수직컨베이어	세그먼트	미검수 세그먼트 반입 세그먼트 파손 세그먼트 미확보
기타	추력과다 잭오일 누유 어스앵커 제거	기타	측량장비이상

4. FMEA를 이용한 자료 분석

4.1 FMEA 평가 척도 계산

본 연구에서 RPN 계산을 위해사용 된 FMEA 평가 척도는 다음과 같으며, 척도의 기준은 표 3과 같다.

① 치명도는 오류 또는 트러블 발생 시 프로세스에 얼마나 영향을 주는가를 나타내는 지표로써, 본 연구에서는 Shield TBM의 초기 굴진 시 발생한 트러블에 의해 야기된 공기지연 시간을 분석하여 각각의 공기지연 요소들

이 야기하는 공기지연 시간의 평균 40시간을 기준으로 5점 척도를 작성하였다.

- ② 빈도는 각각의 공기지연 요소들에 의해 발생한 트러블에 의 발생빈도를 분석하여 각각의 공기지연 요소들의 평균 발생빈도 수 5회를 기준으로 5점 척도를 작성하였다.
- ③ 검출도는 유정호 외(2008)의 연구를 참고로 하여 해당 트러블 요소가 공기지연에 미치는 영향의 정도를 기준으로 작성하였다. 해당 요소의 트러블 발생이 공기지연을 야기하면 주면 2, 공기지연을 야기하지 않는 트러블이면 1로 선정하였다.

표 3. FMEA 척도

치명도 (hr)	치명도 수준	빈도 (회)	발생 수준	검출도	영향 수준
공기지연 0~39	1	1~4회 발생	1	트러블에 의한 공기지연 미발생	1
공기지연 40~79	2	5~8회 발생	2		
공기지연 80~119	3	9~12회 발생	3		
공기지연 120~159	4	13~16회 발생	4	트러블에 의한 공기지연 발생	2
공기지연 160 이상	5	17회 이상 발생	5		

4.2 치명도 계산

표 4는 A현장의 트러블 항목에 대한 치명도를 산출한 것이다.

표에서 보면 뒷채움 설비, 침하누수 등과 같이 공기지연 시간이 0인 7개의 항목들이 있다. 이러한 항목들은 트러블이 발생하여도 Shield TBM이 해당 지점을 굴진한 후 해당 트러블 사항에 대한 조치를 취해야 하는 항목들이다. 굴진 후 트러블에 대한 조치를 취하므로 트러블 발생이 공기지연에 직접적으로 영향을 주지 않는다.

그러나 본 연구에서 다루고 있는 현장에서 발생한 트러블

표 4. A현장 치명도 계산

항목	공기지연시간	치명도	산출 근거
커터및챔버부	192	5	160~199 hr
막장주입재	48	2	40~79 hr
뒷채움설비	0	1	0~39 hr
공동발생	48	2	40~79 hr
붕락발생	120	4	120~159 hr
침하누수	0	1	0~39 hr
여굴과다	0	1	0~39 hr
지반보강	0	1	0~39 hr
스크루 컨베이어	0	1	0~39 hr
수평컨베이어	60	2	40~79 hr
스크루 피더	48	2	40~79 hr
수직컨베이어	0	1	0~39 hr
추력과다	0	1	0~39 hr
잭오일 누유	12	1	0~39 hr
어스앵커제거	0	1	0~39 hr

요소 전체에 대한 종합적인 분석을 위하여 해당 항목들의 치명도 수준을 1로 선정하여 RPN 계산 시 해당 항목들도 고려될 수 있도록 하였다.

표 5는 B현장의 트러블 항목의 치명도를 계산한 것이다. B현장은 A현장과는 달리 공기지연 시간이 0인 트러블 항목이 없으며, 모든 항목의 트러블 발생이 해당 현장의 공기지연에 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다.

표 5. B현장 치명도 계산

항목	공기지연 시간	치명도	산출 근거
세그먼트 파손	117	2	40~79 hr
세그먼트 미반입	53	1	0~39 hr
미검수 세그먼트 반입	26	1	0~39 hr
릴리프 밸브 이물질	3	1	0~39 hr
기관차 고장 및 탈선	2	1	0~39 hr
스크루 막힘	5	3	80~119 hr
지상 슬라이딩 청소	1	1	0~39 hr
크레인 와이어 절단	38	1	0~39 hr
측량기계이상	7	1	0~39 hr

4.3 빈도계산

표 6은 A현장의 트러블 항목들의 발생 빈도를 산출한 것이다. 여굴 과다를 제외하면 커터 및 챔버부, 뒷채움 설비 등의 기계적 요소들에 의한 트러블 발생 빈도가 높은 것을 알 수 있다.

표 6. A현장 빈도계산

항목	발생건수	빈도	산출 근거
커터및챔버부	17	5	16~20 회
막장주입재	6	2	5~8 회
뒷채움설비	13	4	13~16회
공동발생	3	2	5~8 회
붕락발생	2	2	5~8 회
침하누수	3	2	5~8 회
여굴과다	13	5	16~20 회
지반보강	4	2	5~8 회
스크루컨베이어	3	2	5~8 회
수평컨베이어	10	3	9~12 회
스크루 피더	8	2	5~8 회
수직컨베이어	1	1	1~4 회
추력과다	7	2	5~8 회
잭오일 누유	1	1	1~4 회
어스앵커제거	3	1	1~4 회

표 7은 B현장의 트러블 항목들의 발생 빈도를 산출한 것이다. 각 항목들의 빈도는 같으나 세그먼트 파손에 의한 트러블 발생 횟수가 가장 많은 것을 알 수 있다.

4.4 검출도 계산

표 8은 A현장의 트러블 항목에 대한 검출도를 산출한 것이다. 공기지연 시간이 0인 7개의 트러블 항목들은 공기지연

표 7. B현장 빈도 계산

항목	발생건수	빈도	산출 근거
세그먼트 파손	3	1	1~4 회
세그먼트 미반입	1	1	1~4 회
미검수 세그먼트 반입	1	1	1~4 회
릴리프 밸브 이물질	1	1	1~4 회
기관차 고장 및 탈선	1	1	1~4 회
스크루 막힘	1	1	1~4 회
지상 슬라이딩 청소	1	1	1~4 회
크레인 와이어 절단	1	1	1~4 회
측량기계이상	1	1	1~4 회

을 일으키지 않으므로, 해당 항목의 검출도에 대한 영향은 무시할 수 있으나 RPN 계산 시 해당 항목들도 고려될 수 있도록 검출도에 1을 부여하였다.

표 8. A현장 검출도 계산

항목	공기지연시간	검출도	산출근거
커터및챔버부	192	2	무시불가능
막장주입재	48	2	무시불가능
뒷채움설비	0	1	무시가능
공동발생	48	2	무시불가능
붕락발생	120	2	무시불가능
침하누수	0	1	무시가능
여굴과다	0	1	무시가능
지반보강	0	1	무시가능
스크루 컨베이어	0	1	무시가능
수평컨베이어	60	2	무시불가능
스크루 피더	48	2	무시불가능
수직컨베이어	0	1	무시가능
추력과다	0	1	무시가능
잭오일 누유	12	2	무시불가능
어스앵커 제거	0	1	무시가능

표 9는 B현장의 트러블 항목에 대한 검출도를 산출한 것이다. A현장과는 달리 모든 항목들이 공기지연을 일으키기 때문에, 해당 항목들의 검출도에 대한 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있다.

표 9. B현장 검출도 계산

항목	공기지연시간	검출도	산출근거
세그먼트 파손	117	2	무시불가능
세그먼트 미반입	53	2	무시불가능
미검수 세그먼트 반입	26	2	무시불가능
릴리프 밸브 이물질	3	2	무시불가능
기관차 고장 및 탈선	2	2	무시불가능
스크루 막힘	5	2	무시불가능
지상 슬라이딩 청소	1	2	무시불가능
크레인 와이어 절단	38	2	무시불가능
측량기계이상	7	2	무시불가능

4.5 공기지연 위험도 분석

4.5.1 RPN(Risk Priority Number) 계산

공기지연 발생 가능 인자의 위험도를 나타내는 RPN값은 FMEA의 세 가지 척도(빈도, 영향도, 검출도)를 모두 곱하여 계산하였다.

RPN값은 해당 트러블 항목이 공기지연에 미치는 영향을 종합적으로 나타내는 값으로서, RPN 값이 클수록 중점적으로 관리해야 할 항목임을 나타낸다.

4.5.2 중점관리 항목 도출

각각의 트러블 발생 요소에 대한 RPN값이 계산된 후, RPN값의 크기에 따라 트러블 항목들을 정렬하였다. 동일한 RPN 값을 가지는 트러블 항목들은 치명도, 검출도, 빈도의 순으로 우선순위를 고려하여 해당 항목을 정렬한다.

표 10. A현장 RPN 계산 결과

항목	빈도	치명도	검출도	RPN
커터 및 챔버부	5	5	2	50
수평컨베이어	3	2	2	12
막장주입제	2	2	2	8
붕락발생	1	4	2	8
스크루 피더	2	2	2	8
뒷채움 설비	4	1	1	4
공동발생	1	2	2	4
여굴과다	4	1	1	4
추력과다	2	1	1	2
재요일누유	1	1	2	2
침하누수	1	1	1	1
지반보강	1	1	1	1
스크루 컨베이어	1	1	1	1
수직컨베이어	1	1	1	1
어스앵커제거	1	1	1	1

표 10은 본 연구의 A현장에서 발생한 트러블 항목들의 리스크 우선순위(RPN)를 분석한 결과로 커터 및 챔버, 수평 컨베이어, 스크루 피더, Backfill 설비 등 Shield TBM의 기계적인 요소들의 리스크 우선순위가 상대적으로 크게 나타났다.

기계적 요소들의 리스크 우선순위가 높은 이유는 Shield TBM이 대상 현장의 철저한 지반조사를 바탕으로, 해당 현장의 지반 조건에 맞추어 최적의 굴진이 가능하도록 주문 제작하는 방식이 사용되고 있기 때문에 상대적으로 기계적 요소에 의해 발생하는 트러블이 지반적 요소에 의해 발생하는 트러블보다 많이 발생하게 되기 때문이다.

또한, 표 11의 결과에서 볼 수 있듯이 B현장에서도 A현장의 경우와 마찬가지로 공기지연을 일으키는 요소들 중 RPN 값이 높은 것들은 스크루 막힘, 측량장비 결함, 기관차 탈선 등과 같은 부대시설의 기계적 트러블인 것을 알 수 있다.

따라서 공사 시작 전에 충분한 지반조사가 이루어 졌다면, Shield TBM 터널공사 시 Shield TBM 터널 공사의 트러블 발생을 막고, 공기지연을 예방하기 위해서는 종래에

표 11. B현장 RPN 계산 결과

항목	빈도	치명도	검출도	RPN
스크루 막힘	1	3	2	6
세그먼트 파손	1	2	2	4
릴리프 밸브 이물질	1	1	2	2
기관차 고장 및 탈선	1	1	2	2
세그먼트 미반입	1	1	2	2
측량기계이상	1	1	2	2
지상 슬라이딩 청소	1	1	2	2
미검수 세그먼트 반입	1	1	2	2
크레인와이어절단	1	1	2	2

집중 관리 되던 토질적 요소들 보다는 굴착주체인 Shield 장비와 계측장비, 굴착도 운송 설비 등과 같은 부대시설들에 대한 보다 집중적인 관리가 이루어져야만 하는 것을 알 수 있다.

5. 공기지연 요소 방지대책

본 연구에서는 공기지연에 가장 큰 영향을 주는 RPN값이 가장 큰 항목을 대상으로 트러블 방지 대책을 제시하였다.

5.1 A현장의 공기지연 방지대책

표 10의 결과에서 볼 수 있듯이 A현장에 있어서 RPN값이 가장 크게 나온 항목은 커터 및 챔버 부분에서 발생하는 트러블 항목이다. 커터 및 챔버부에서는 커터 토크치 과다, 챔버 폐색의 원인에 의해 트러블이 발생하므로 이에 대한 방지대책을 제시함으로써, 트러블 발생을 최소화 할 수 있다.

커터 토크의 과다 현상의 발생 이유는 선행비트에 의한 마찰력 증가가 주된 원인이다. 따라서 선행비트의 형상을 마찰력이 작은 형태의 비트로 교체하고, 토층별 적정 커터 회전수를 관리하고, 적정 추력과 토압의 관리를 통해 커터 토크의 과다 상승을 막을 수 있다.

챔버 폐색을 방지하기 위해서는 막장 주입제와 공급수를 적정량 투입하여 배출 토사의 유동성을 확보하고, 배출토사와 막장주입제의 교반력을 증대시켜 챔버 폐색을 방지할 수 있다.

5.2 B현장의 공기지연 방지대책

표 11에서 볼 수 있듯이 B현장에서 RPN값이 가장 크게 나온 항목은 버럭 이송 설비의 스크루 부분에서 발생한 스크루 막힘 현상이다.

스크루의 막힘 현상을 방지하기 위해서는 장비의 설계 시 스크루 각도를 완만하게 하고, 버럭 반출 지연이 예상될 경우 미리 스크루 내부 버럭을 비워 스크루 막힘에 의한 공기지연을 방지할 수 있다.

6. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 EPB Shield TBM의 초기굴진 자료를 분석하여, 초기 굴진 시 공기지연을 일으키는 트러블 인자들을

식별하였다. 도출된 트러블 인자들을 FMEA 방법을 이용하여 트러블 관리 우선순위를 작성하였다. 이를 통해 본 연구에서 얻은 성과는 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서는 Shield TBM의 초기 굴진을 대상으로 초기 굴진 시 발생하는 트러블을 분석하고 위험도가 높은 트러블 요인을 식별하여 관리 우선순위를(RPN) 제시하였다.

둘째, 본 연구에서는 Shield TBM 공법의 트러블 요소 식별 및 관리 방안 제시를 위해 제조업 분야에서 주로 사용되고 있는 FMEA 기법을 적용함으로써, 기계적 요소가 강한 Shield TBM 시공분야에서의 FMEA 적용을 통한 리스크 관리에 대한 가능성을 제시하였다.

셋째, 본 연구에서 제시한 굴진 트러블 RPN은 Shield TBM의 공기지연 요소를 사전에 제시하여, Shield TBM을 이용한 공사 시 공기지연 예방을 위한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

넷째, Shield TBM 굴진 시 중요도가 저평가 받고 있던 Shield TBM 장비 및 주변시설 트러블에 의한 공기지연이 많이 발생한 것을 알 수 있었고, 이에 따른 중점 관리가 필요하다는 것을 알 수 있었다.

다섯째, 본 연구 결과를 통해 Shield TBM 현장의 토목 기술자로는 원활한 업무를 수행하기 위해 Shield TBM 장비 및 부대시설에 대한 기계적 지식 및 해당 장비의 트러블 발생 시 대처 방안에 대한 기초 지식이 필요함을 알 수 있었다.

본 연구는 터널 기계화 시공 방법 중 E.P.B Shield TBM만을 대상으로 FMEA를 적용한 트러블 분석에 관한 연구를 진행하였다는 한계가 있다.

따라서 향후 연구에서는 터널 기계화 시공에 FMEA 방법의 적용성을 향상시키기 위해 E.P.B 방식 외에 이수식(Slurry), 기계식 Shield TBM 공사에 FMEA를 적용하여 공기지연에 관한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구된 것으로 이에 감사드립니다(This work

was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2008).

참고문헌

- 김기국(2007) FMEA 기법을 이용한 초고층 건축시공의 공사비 초과요인 발굴에 관한 연구, **대한건축학회논문집**, 대한건축학회, pp. 171-178.
- 김민성(1998) Shield 공법의 시공성 개선에 관한 연구, **한국해양 공학회**, pp. 3-9.
- 김용일(2005) 서울지하철 7호선 연장 703공구 대구경 쉴드 터널 설계, **한국철도학회 추계학술대회 논문집**, 한국철도학회, pp. 424-442.
- 김용일(2006) 분당선 한강하저 대구경 E.P.B Shield 터널 시공 사례, **철도시설**, 한국철도시설협회, 통권 제100호, pp. 78-97.
- 김재영(2006) **평화토지반 쉴드 TBM의 선정과 적용사례-서울지하철 7호선 연장 704공구 설계사례**, KTA2006 Symposium.
- 문상조(2002) EPB쉴드 터널의 안전시공-발전, 도달, 막장안정, **침하역제를 중심으로**, KTA2002 Symposium.
- 박철환(2002) 암반층에서 Shield TBM의 굴착속도와 추력과의 관계, **터널과 지하공간: 한국암반공학회지**, 한국암반공학회, 제12권 제2호 통권39호, pp. 115-119.
- 배규진(2006) **시공 리스크를 고려한 TBM의 굴진성능 향상 및 평가기술**, KTA2006 Symposium.
- 양인재(2002) 부산시 수정산배수지터널 TBM 굴진시 공법적합성을 평가하기 위한 암반의 지질공학적 평가, **대한지질공학회 학술발표논문**, 대한지질공학회, pp. 211-218.
- 유정호(2008) FMEA를 활용한 중점안전관리 항목 도출방안, **한국건설관리학회지**, 한국건설관리학회, 제6호, 통권 제46호, pp. 185~193.
- 이석원(2003) TBM 굴진성능 예측을 위한 모델링, **터널과 지하공간: 한국암반공학회지**, 한국암반공학회, 제13권 제6호, pp. 413-420.
- 이현철(2009) FMEA를 활용한 철골공사 작업지연요인의 중요도에 관한 연구, **한국건설관리학회 논문집**, 한국건설관리학회, Vol. 10, No. 1, pp. 91-101.
- 채점식(2008) 쉴드 터널에서 쉴드 TBM 장비의 굴진속도 산정, **한국구조물진단학회 논문집**, 한국구조물진단학회, 제9권 제1호 통권31호, pp. 35-41.
- 홍원표(2004) Shield 터널에서 굴진속도가 지반침하에 미치는 영향에 관한 연구, **중앙대학교 건설대학원**.
- Shao-Ming Liao (2008) *Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground*, Tunnelling and Underground Space Technology.

(접수일: 2009.10.7/심사일: 2009.10.28/심사완료일: 2009.10.28)