

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.6.757>

JCCT 2022-11-93

NATM 터널 굴진 시 안전관리를 위한 재해영향요인 및 중요도에 관한 연구

A Study on Disaster Influencing Factors and Importance for Safety Management in NATM Tunnel Drilling

이영수*, 윤영근**, 오태근***

YoungSoo Lee*, Younggeun Yoon**, Taekun Oh***

요약 도심지 지하철, 지하차도 건설을 위한 NATM 터널공법에서는 다양한 재해원인들이 존재한다. 본 연구에서는 NATM 터널 굴진 시 주요한 재해영향요인을 도출하기 위해 선행연구를 통해 발생 가능한 위험요인을 천공작업, 장약 및 발파, 버럭처리, 부석정리 그리고 지보재 작업 항목으로 구분하였다. 다음으로 전문가 인터뷰 조사를 통하여 21개의 세부 측정지표로 구체화하였고 AHP(Analytic Hierarchy Process) 설문 및 분석을 진행하였다. 분석 결과, 터널공사 관계자들은 부석정리 작업을 가장 영향이 큰 재해영향요인으로 선택하였으며 이를 우선관리 요소로 설정하는 것이 필요하다는 결론을 도출하였다.

주요어 : NATM 터널 공법, 재해원인, 중요도 분석, AHP 분석

Abstract In the NATM tunnel construction method for urban subway and underpass construction, various causes of disaster exist. In this study, in order to analyze the importance of disaster influencing factors during NATM tunnel excavation, the possible risk factors were analyzed through prior research such as drilling, charging and blasting. It was divided into the work items of wrinkle treatment, pumice cleanup, and support materials. Next, the final 21 detailed measurement indicators were selected through the FGI survey of related experts, and AHP (Analytic Hierarchy Process) analysis were conducted. As a result, it was found that the workers involved in the tunnel construction were the most influential disaster influencing factor.

Key words : NATM Tunnel, Disaster Causes, Importance Analysis, AHP

1. 서론

최근 건설 산업 분야를 포함한 다양한 분야의 비즈니스에서 위험 관리가 요구되고 있으며, 그 시대적 필요성은 점차 증가하고 있다[1]. 터널공사의 경우 설계단계에서 실시되는 지반조사는 넓은 범위를 다루기 때문에 조사 결과의 불확실성이 존재한다. 실제 터널 시공

중에 예상하지 못한 지반 조건 및 상황과 마주치는 경우가 많으며, 이를 사전에 조치하지 못하면 터널 막장 붕괴사고로 인한 공사비용 및 공사기간 증가 이외에도 근로자에 대한 중대재해로 이어질 수 있다. 따라서 안전하고 경제적인 터널공사를 위하여 설계, 시공단계에 적용 가능한 체계적인 리스크 분석 방법이 필요하다[1]. 특히, 도심지에서 지하철, 지하차도 등의 지하시설물

*정희원, 인천대학교 안전공학과 석사과정 (제1저자)
**정희원, 인천대학교 안전공학과 박사과정 (참여저자)
***정희원, 인천대학교 안전공학과 교수 (교신저자)
접수일: 2022년 9월 28일, 수정완료일: 2022년 10월 25일
게재확정일: 2022년 11월 1일

Received: September 28, 2022 / Revised: October 25, 2022
Accepted: November 1, 2022
***Corresponding Author: thoh@inu.ac.kr
Dept. of safety engineering, Incheon National Univ, Korea

건설에 NATM 공법을 활용한 터널공사가 증가하고 있고 공사 특성상 다양한 공법적용 및 제한된 작업공간에서 건설장비를 주로 많이 사용하기 때문에 사고 발생 위험성이 높아 이에 대한 관리가 필요하다. 즉, 터널공사는 지반에 대한 예측이 어렵기 때문에 시공 중 다양한 사고위험요소를 포함하고 있고, 사고발생 시 중대재해발생 소지가 많으며 사고복구에 큰 비용이 발생하므로 설계단계에서 사전에 위험요인을 도출하고 감소대책을 수립하는 안전관리가 매우 중요하다고 볼 수 있다 [2].

2021년 산업재해 현황분석에 의하면 전체 사망자수 2,080명 전년 동기 대비 18명인 0.9% 증가 하였고, 그 중에 사고 사망자수가 828명으로 건설업이 417명으로 50.4%를 차지하고 있어 전체 산업 중 건설업에서 절반 이상 사고성 사망재해가 발생되고 있는 것으로 파악되었다[3]. 특히, 건설업 터널현장에서 주로 발생하는 중대재해를 살펴보면, 구조물 공사 시 고소작업 중 부주의에 의한 추락, 가시설 안전성 미확보로 인한 붕괴, 발파 및 굴진 작업 시 낙반·붕락, 건설장비 작업 중 안전거리 미확보로 인한 협착·충돌 등에 의한 사망재해가 주로 발생하는 것으로 나타났다[4]. 터널굴착에 따른 위험요인분석은 막장에 대한 육안점검과 계측관리를 통해 안전여부 및 보강재의 적정성을 확인하며, 위험이 인지될 경우 신속하게 유효한 보수, 보강공법을 통해 안정성을 확보하여야 한다.

국내 건설 사고사례 데이터 베이스를 운영중인 국토안전관리원의 건설안전정보 시스템(CSD)에 의하면 2019 - 2022년 사이의 건설공사 재해율은 표 1과 같이 전체 토목공사 재해 건수 2,728건 중 터널공사 재해 건수는

표 1. 사고 객체별 토목공사 대비 터널공사 재해율[5]
Table 1. Tunnel construction accident rate compared to civil works by accident object[5]

사고객체	재해 건수		사망 재해 건수	
	터널공사	토목공사	터널공사	토목공사
토사 및 암반	22	197	3	21
건설기계	42	450	7	59
가시설	17	664	0	24
건설자재	12	404	1	12
건설공구	12	216	1	2
부재	4	134	0	4
질병	3	37	0	9
시설물				
기타	4			
합계	155	2,728	13	159

155건으로 5.68%의 비중을 지닌다[5]. 그 중 토목 공사의 사망 재해 건수 159건 중 터널공사 사망 재해 건수는 13건으로 7.74%의 비중을 지닌다. 이는 전체 재해 건수의 5.68%보다 높은 수치로 터널공사의 중대재해 위험성이 상대적으로 높음을 확인할 수 있다

터널공사의 상대적 위험성을 사고 객체로 분류하여 비교한다면, 토목공사의 가장 많은 사고 객체 유형은 가시설로써 664건이 발생하였고 터널공사는 664건의 재해 중 17건에 해당되며 2.56%의 비중을 나타냈다[5]. 터널공사의 재해 건수가 가장 높은 객체 유형은 건설기계로 전체 450건 중 42건으로써 8.93%의 비중이다. 또한, 사망 재해 비중은 59건 중 7건으로 8.77%의 비중을 나타낸다. 일반적인 토목 건설 현장에서는 가시설 사고 객체가 가장 많지만, 터널공사 현장에서는 건설기계 객체가 가장 많다. 터널공사의 재해 비중이 가장 높은 객체 유형은 토사 및 암반으로 전체 197건 중 22건으로써 11.16%이다. 또한, 사망 재해 비중은 21건 중 3건으로 14.29%의 비중을 나타낸다. 이는 일반적인 토목 건설 현장보다 터널공사 현장에서 토사 및 암반에 의한 재해 발생 시 사망 재해가 발생할 확률이 상대적으로 높음을 의미한다.

터널공사의 상대적 위험성을 표 2와 같이 사고 유형으로 분류하여 비교한다면, 토목공사의 사망 재해 중 가장 많이 발생한 사고 유형은 떨어짐으로서 재해 건수는 433건이나 사망 재해 건수는 35건이다. 이 중 터널

표 2. 사고 유형별 토목공사 대비 터널공사 재해율[5]
Table 2. Tunnel construction accident rate compared to civil works by accident type[5]

사고유형	재해 건수		사망 재해 건수	
	터널공사	토목공사	터널공사	토목공사
떨어짐	14	433	1	35
넘어짐	24	505	0	1
물체에 맞음	42	459	4	23
깔림	7	101	5	43
끼임	21	399	2	17
절단/베임	7	180	0	0
감전	0	7	0	0
교통사고	3	40	0	9
질병	4	36	0	9
찢림	2	23	0	1
질식	0	5	0	3
화상	0	24	0	0
부딪힘	12	212	1	9
기타	19	304	0	18
합계	155	2,728	13	168

공사의 재해 비중은 43건으로 3.23%이며, 사망 재해 비중은 1건으로 2.86%이다. 터널공사의 재해 건수가 가장 높은 사고 유형은 물체에 맞음으로 전체 459건 중 42건으로써 9.15%의 비중이다. 또한, 사망 재해 비중은 23건 중 4건으로 17.39%의 상대적으로 높은 비중을 나타낸다. 이는 터널공사 현장이 물체에 맞음 사고 유형이 일반적인 토목 건설 현장보다 큰 리스크를 지님을 나타낸다[5].

II. 연구 범위 및 방법

본 연구의 범위는 도심지에서 지하철, 지하차도, 지하구조물 등 건설 시 가장 많이 적용되는“NATM공법 터널공사”현장을 대상으로 터널 시공 중에 발생 될 수 있는 근로자 안전과 생명을 저해하는 위험요인 도출 및 중요도 분석을 통해 가장 사고 위험성이 높은 위험요인을 도출하여 건설공사 위험성 평가에 우선적으로 적용하여 선제적인 사고예방대책을 수립하고자 한다. 본 연구는 전문가 그룹 심층 인터뷰(FGI)는 안전보건공단, 국토안전관리원, 안전진단 및 재해예방지도 전문기관 종사자, 대학 교수 중에 터널 경력 10년 이상, 박사 또는 기술사 자격을 가진 전문가 그룹 15명 을 대상으로 도심지 NATM공법 터널공사 굴진 시공 중에 가장 사고 위험성이 높은 재해영향요인을 도출하여 변수를 설정하였다. 또한 NATM 터널공사 현장에 참여하고 있는 건설사업관리자, 시공사, 관리감독자 및 안전관리자, 터널 근로자 200명을 대상으로 계층별 쌍대비교 설문조사를 진행하였다.

연구절차는 그림 1과 같이 터널공사 관련 선행연구 분석 및 국내에서 시행 중인 위험성평가 제도, 터널공사 관련 이론적 고찰을 통해 연구방법을 파악하고 연구 방향을 설정하고 NATM 터널공사 현장에서 종사 중인 건설사업관리자, 시공사 및 협력사 근로자 200명 정도 대상으로 FGI를 통해 도출된 위험요인에 대한 설문조사를 실시하였다. 수집된 200부 중 100부의 유효한 설문지에 대해 AHP 분석기법을 적용하여 도심지 NATM 터널공사 관련 근로자 안전을 저해하는 재해영향요인 도출 및 중요도 우선순위를 분석하여 위험성평가 운영 시 사고 저감을 위한 우선관리 요소로 제시하고자 한다.

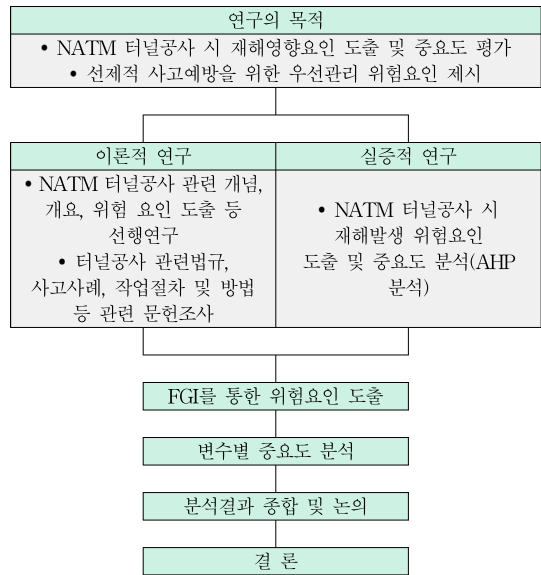


그림 1. 연구 절차
 Figure 1. Research procedures

III. 연구결과 및 분석

3.1 설문 응답자의 구성

설문 응답자는 표3과 같이 시공사 및 협력사 관리감독자 및 안전관리자로서 종사하는 인원이 63%로써 가장 높았고 다음은 시공사 하청대상 인원이 18%, 터널 현장 근로자가 13% 순으로 나타났다.

표 3. 설문 응답자 분포
 Table 3. Distribution of survey respondents

구분	내 용	빈도(명)	비율(%)
종사 분야	건설사업관리자	6	6.0
	시공사 관리감독자 및 안전관리자	63	63.0
	협력사 관리감독자 및 안전관리자	18	18.0
	터널 근로자	13	13.0
경력	5년 미만	20	20.0
	5년~10년 미만	5	5.0
	10년~15년 미만	14	14.0
	15년~20년 미만	18	18.0
	20년~25년 미만	17	17.0
	25년~30년 미만	18	18.0
	30년 이상	8	8.0
연령	20 대	9	9.0
	30 대	11	11.0
	40 대	28	28.0
	50 대	45	45.0
	60대 이상	7	7.0
성 별	남 성	99	99.0
	여 성	1	1.0

경력은 5년 미만이 20%, 그리고 5년~10년 미만이 5%로 가장 적었고 20년 이상이 35%로서 가장 많았다. 연령은 50대가 가장 많은 45%를 보이고 있으며 40대 이상이 전체의 80%를 차지하는 것으로 분석되었고 대다수가 남성 근로자임을 알 수 있다.

3.2 분석지표의 중요도 평가(AHP) 결과

○ 주요 재해영향요인 비교분석

NATM 터널 굴진 시 천공작업·장약 및 발파·버력처리·부석정리·지보재 작업 과정 중에 발생 될 수 있는 재해 영향 요인에 대한 AHP 가중치는 그림 2와 같다. 우선, 터널 굴진시 재해요인 요소인 갱내 천공작업으로부터 지보재 설치 작업간 평가요소를 분석한 결과를 살펴보면, 장약 및 발파 요인이 33%로써 가장 높게 나왔으며, 부석정리가 21%, 지보재 작업이 19%, 천공작업은 16% 그리고 버력처리 10% 순으로 분석되었다. 과거 터널 건설 현장에서 발생한 사고사례에서도 장약 및 발파와 부석정리 및 지보재 설치 작업간 사고가 가장 많이 발생한 것으로 나타났다.

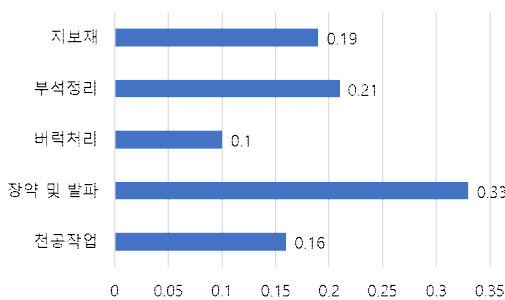


그림 2. 터널 굴진시 재해요인별 상대적 가중치
Figure 2. Relative weight for each disaster factor during tunnel excavation

장약 및 발파 작업간에는 화약류 취급 오류나 장약 시 폭발위험 안전요소가 항상 내재하여 있으며 발파작업 시 오발이나 비산석으로 인한 위험이 매우 크고 나아가 감전위험 등 제반 안전관리가 집중적으로 요구되고 있음을 알 수 있다. 또한 부석정리 요인이 두 번째로 높은 가중치를 보이고 있는데 이는 무리한 부석제거에 따른 붕락이나 장비 부석 제거 작업시에 발생할 수 있는 각종 협착사고 우려 등이 상존하고 있음을 반증하는 것이다. 그리고 각종 지보재 설치 작업간에도 자재

낙하위험, 강지보재 설치중 낙석이나 장비에 의한 협착 등의 재해가 발생할 수 있어서 일련의 공정간 안전성 확보가 매우 중요하다고 인식하고 있음을 알 수 있다.

○ 천공작업 요인 세부 평가요소

NATM 터널 굴진작업을 위한 천공작업 시 평가요소를 분석한 결과는 그림 3과 같다. 천공 시 진동으로 인한 낙석 및 붕락위험이 0.36으로 가장 높았고 이어서 잔류화약의 폭발위험이 0.28, 좁은 공간에서 각종 장비 운행 중에 발생하는 협착위험이 0.21, 감전 및 소음으로 인한 청각장애가 0.15 순으로 나타났다.

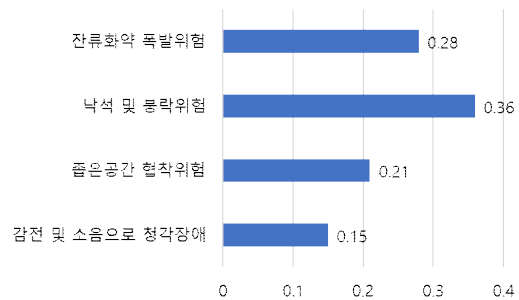


그림 3. 터널 천공작업 평가요소간 상대적 가중치
Figure 3. Relative weights among evaluation factors for tunnel drilling work

이는 터널 굴진 시 천공작업 중 낙석 및 붕락위험이 다른 평가요소와 대비하여 가장 높은 가중치를 보이고 있어서 천공 작업 전 부석정리를 철저히 할 필요가 있고 나아가 천공 중 이상 용출수 발생 시에는 즉시 작업을 중지하는 등 Risk를 제거하는 노력이 가장 필요함을 알 수 있고, 갱내 특성상 좁은 공간에서의 안전확보를 위하여 장비작업구역 내 출입인원 통제를 철저히 하고 후진경보기 및 장비신호수의 반사조끼 착용 등 사고예방을 위한 제반 안전조치와 더불어 현장 관리감독자 및 안전관리자에 의한 철저한 관리감독과 발주처의 적극적인 참여, 체계적인 안전감독(감리 포함) 업무가 요구되고 있음을 알 수 있다.

○ 장약 및 발파 요인 세부 평가요소

터널 굴진 시 재해영향 요인 중 장약 및 발파작업 시 평가요소를 분석한 결과는 그림 4와 같다. 장약작업 중 낙석위험이 0.23으로 가장 높은 상대적 가중치를

보이고 있으며 작업 구역내 장비 후진 시 협착위험이 0.18로 두 번째로 높은 재해 요인으로 인식하고 있어서 협소한 갱내 작업공간 특성을 고려하여 더욱 철저한 장비 작업구역 내 출입통제와 관리 강화될 필요성 있다. 그리고 화약류 취급 및 장약 시 폭발위험 요인과 고소 작업대 사용 중 협착위험이 각각 0.16으로 동일한 수준으로 위험성을 인식하고 있어서 화약류 취급시 절연성 재료 확인과 뇌관 등 취급 부주의로 인한 폭발 방지와 더불어 각종 뇌관 사용시 누설 진류에 대한 오폭방지에 철저한 안전관리가 요구되고 있음을 나타내고 있다.

그리고 발파 시 오발 및 비산석 위험요인이 0.14로 나타나 도통시험과 효과적인 대피방송 및 대피소관리가 요구되고 있으며 전기케이블 연결 중 감전위험 요소도 0.12의 가중치를 보이고 있어서 해당 분야 작업순서 오류 방지와 절연보호 장갑 착용 준수 등 현장위주의 철저한 안전관리 이행이 요구되고 있는 것으로 분석되었다.

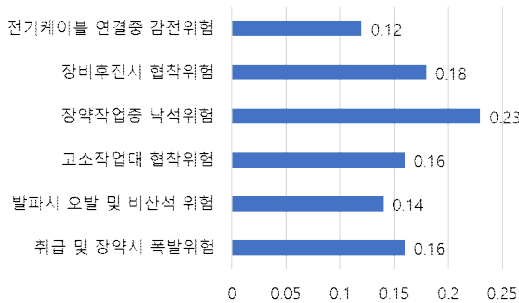


그림 4. 터널 굴진을 위한 장약 및 발파작업 평가요소간 상대적 가중치
 Figure 4. Relative weights between the evaluation factors of charge and blasting for tunnel excavation

○ 버럭처리 요인 세부 평가요소

터널 내 버럭처리 작업 평가요소간 상대적 가중치는 그림 5와 같다. 터널 굴진 시 재해요인 중 버럭처리 요인에 대하여 세부지표간 비교 분석한 결과, 막장 불안정한 상태에서의 낙반 및 폭발위험 요소가 0.5로 가장 높게 인식되었으며 다음으로는 갱내 장비작업 시 협착위험이 0.32, 매연 또는 분진으로 인한 질식 및 호흡기 장애발생이 0.18로 나타났다.

특히 50%의 높은 가중치를 보이는 막장 낙반 및 폭발위험 요소를 안전하게 관리하기 위해서는 작업장 내

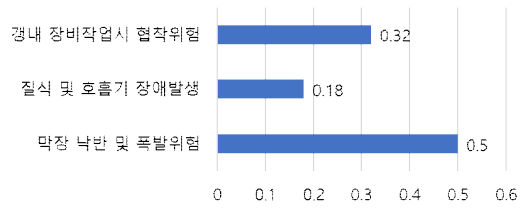


그림 5. 터널 내 버럭처리 작업 평가요소간 상대적 가중치
 Figure 5. Relative weights between evaluation factors of the block handling task in the tunnel

위험 작업구획 설정과 철저한 철저한 인원 및 장비의 출입통제 관리가 이루어져야 하고 버럭처리전에 사전 부석정리와 이상유무 점검이 요구되고 나아가 부석정리 시 잔류화약 유무 등 세밀 확인 점검이 요구되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 갱내 장비작업 시 협착위험 요소도 0.32의 가중치 값을 보이고 있어서 갱내 작업시에는 장비 후진경보 및 식별용 경광등을 설치하고 갱내의 적절한 조도 확보(막장구간 60Lux 이상)와 장비작업 구역 설정 및 출입통제 관리가 철저히 이루어져야 하며, 투입된 모든 인원은 매연이나 분진으로 질식 및 호흡기 장애가 발생하지 않도록 하여야 한다.

○ 부석정리 요인 세부 평가요소

터널 굴진 시 재해요인으로 부석정리 요인을 세부 분석한 결과는 그림 6에 제시되어 있으며 무리한 부석 제거에 따른 봉락 및 잔류화약 폭발위험이 0.6으로 장비 부석제거 작업시 협착위험보다 높은 것으로 분석되었다. 따라서 부석제거에 따른 봉락 및 잔류화약에 대한 재해를 방지하기 위해서는 Face Mapping에 따른 막장면의 세밀한 관찰관리 실시와 갱내(막장면 등) 계측관리를 주기적으로 시행하고, 부석제거 작업 시 용출수 및 잔류화약 유무점검의 철저한 시행이 요구되고 있다.

또한 부석제거 작업시 장비에 의한 협착위험 방지를 위해 현장 관리자의 시인성 및 안전거리 확보와 나아가 장비와 인력작업을 동시 병행하는 것은 지양되어야 할 것이다.

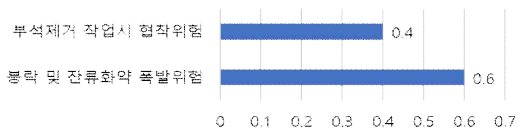


그림 6. 터널 내 부석정리 작업 평가요소간 상대적 가중치
 Figure 6. Relative weight between evaluation factors of pumice cleaning work in tunnel

○ 지보재 요인 세부 평가요소

그림 7은 터널 지보재작업 평가요소간 상대적 가중치를 비교 분석한 결과를 나타낸 것이다. 분석결과 고소작업대 상부작업 시 추락 및 협착위험 요소와 강제지보재 설치 중 낙석위험이 0.24로 동일하게 나타났으며 상대적으로 타 요소에 비하여 높은 재해영향 요소로 인식하고 있음을 알 수 있다. 따라서 고소작업대(차징카) 무리한 작업 금지와 안전대 착용, 고소작업대(차징카) 하부 출입통제 강화로 협착위험 요소 억제와 나아가 강제지보재 설치 작업 중 작업방법 오류로 자재 전도위험 등을 방지해야 함을 알 수 있다.

믹서트럭 운행중 협착위험은 0.16으로 근로자의 시인성 확보가 중요하고 차량 유도원 배치가 상시 운용되어야 할 것이다. 또한 굴삭기에 의한 자재운반중 줄걸이 파단으로 인한 낙하 등 자재 운반중 낙하위험 요소는 0.14의 가중치로 분석되었고 숏크리트 작업 시 건강장에 요소는 0.009로 가장 낮은 순위로 분석되었다.

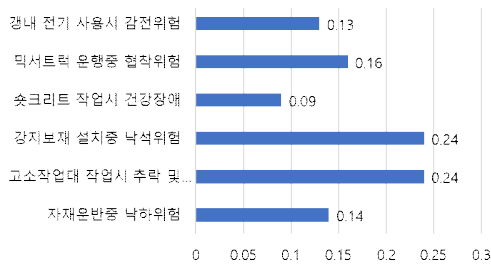


그림 7. 터널 지보재작업 평가요소간 상대적 가중치
Figure 7. Relative weight between evaluation factors of tunnel support rework

○ 재해영향원인 종합분석

최종적으로 터널 굴진 시 재해영향 요인에 대한 중요도 종합분석 결과는 표 4와 같다. 터널 굴진 시 재해영향요인의 전체 하위요인 21개 측정지표를 분석한 결과, 최종 중요도를 반영한 종합순위 산정결과 부석정리요인의 하위 측정요인 모두가 1위 및 2위를 차지하고 있고 장약 및 발파요인 중 장약작업 중 낙석위험과 장비 후진시 협착위험 등 하위 측정지표가 3위와 4위를, 그리고 천공작업 요인의 천공시 진동으로 낙석 및 봉락위험 측정요소가 5위순으로 나타났다. 특히, 터널 내 부석정리 작업요인의 하위 측정항목인 무리한 부석제거에 따른 봉락 및 잔류화약 폭발위험과 장비 부석 제거 작업 시 협착 등 2개 전체가 최종 가중치 산정결과 각

각 0.126과 0.084로써 종합순위 1위 및 2위를 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 즉 터널공사관련 관계관들이 부석정리 작업을 가장 영향이 큰 재해 영향요인으로 인식하고 있음을 알 수 있다.

표 4 터널 굴진 시 재해 영향요인 중요도 종합 분석결과
Table 4 Results of comprehensive analysis on the importance of factors influencing disasters during tunnel excavation

대분류	중분류	측정지표	가중치	그룹순위	전체가중치	전체순위
터널 굴진 시 재해 요인	천공 작업 (0.16)	• 갑전 및 소음으로 청각장애	0.15	4	0.024	19
		• 좁은 공간 운행 중 협착위험	0.21	3	0.034	14
		• 천공 시 진동으로 낙석/봉락위험	0.36	1	0.058	5
		• 천공 시 잔류화약 폭발위험	0.28	2	0.045	12
	장약 및 발파 (0.33)	• 화약류 취급 및 장약 시 폭발위험	0.16	3	0.053	6
		• 발파작업시 오발/비산석 위험	0.14	4	0.046	9
		• 고소작업대 사용 중 협착위험	0.16	3	0.053	6
		• 장약 작업 중 낙석위험	0.23	1	0.076	3
		• 장비 후진 시 협착위험	0.18	2	0.059	4
	버럭 처리 (0.10)	• 전기케이블 연결 중 감전위험	0.12	5	0.040	13
		• 막장 불안정한 상태 낙반/폭발위험	0.50	1	0.050	8
		• 매연,분진으로 질식 및 호흡기 장애 발생	0.18	3	0.018	20
	부석 정리 (0.21)	• 갱내 장비 작업 시 협착위험	0.32	2	0.032	15
		• 부석제거에 따른 봉락 및 잔류화약 폭발위험	0.60	1	0.126	1
	지보재 (0.19)	• 장비 부석 제거 작업 시 협착	0.40	2	0.084	2
		• 자재 운반 중 낙하위험	0.14	3	0.027	17
		• 고소작업대 상부 작업 시 추락/협착위험	0.24	1	0.046	10
		• 강제지보재 설치 중 낙석위험	0.24	1	0.046	10
		• 숏크리트 작업 시 건강장애	0.09	5	0.017	21
		• 믹서트럭 운행 중 협착위험	0.16	2	0.030	16
		• 갱내 전기 사용 시 감전위험	0.13	4	0.025	18

따라서 Face Mapping에 따른 막장면 관찰관리를 철저히 하고 작업간 용출수 나 잔류화약 유무 점검이 주기적으로 이루어져 부석제거에 따른 봉락이나 잔류화약 폭발 위험성을 제거해야 할 것이다. 또한 장비 부석 제거 작업시 협착위험 방지를 위해 관리자의 시인성 확보와 안전거리 확보가 중요하며 장비 및 인력작업 동시 병행은 지양하여 Risk 감소에 주력할 필요가 있다..

장약 및 발파작업 요인 중에서 장약작업 중 낙석위험의 최종 가중치는 0.076으로 종합순위 3위로 나타났고 장비후진 시 협착위험 요소가 4위로 분석됨에 따라 다른 하위 측정지표에 비해 높은 재해 영향요인으로 중요도를 보이고 있으므로 장약 및 발파 작업전 낙석우려가 있는 위험요소 사전 확인 및 제거와 장비작업 구역내

보다 철저한 인원 및 장비 출입통제 강화로 협착위험 방지노력이 더욱 필요한 것으로 사료된다.

그리고 종합순위 5위를 차지한 천공작업 중 진동으로 낙석 및 붕락위험요소 역시 장약 및 발파 요인의 3위 측정지표와 그 중요도의 맥락을 같이하고 있어서 천공작업적 부석정리 중요성이 재강조되고 천공 중 이상 용출수 다량 발생시 즉시 작업중지와 원인분석이 중요함을 알 수 있다. 이러한 터널 굴진 시 재해영향 요인의 강도를 고려하여 작업 근로자에 대한 사고예방을 위해 현장에서 근무 중인 건설사업관리자, 관리감독자, 안전관리자. 근로자에 대한 사전작업허가 및 패널티 제도 등의 체계적인 시스템 관리가 필요하며, 또한 효과적인 교육훈련을 강화하고 체계적인 안전관리 활동을 통한 위험관리가 중요하다.

IV. 결 론

본 연구는 NATM 터널작업시 발생할 수 있는 주요 재해요인을 도출하였다. 이를 활용하기 위해서는 그룹별 중요도 우선순위에 따라 위험요인을 우선관리 대상 항목으로 선정하고 건설공사 위험성평가 시 중점관리 항목으로 반영하여 터널 굴진 공사 중에 안전사고 예방을 위한 안전대책을 수립하여야 한다. 또한 매일 작업 시작전에 안전작업방법에 대한 사전미팅을 통해 단위 작업별 위험요인 안전대책을 철저히 이행할 수 있도록 건설사업관리자 및 시공사간 상호 원활한 소통으로 실천 협의가 필요하다. 본 연구는 NATM 터널 작업 시 효율적 안전관리를 위해 다음과 같은 방안을 제시한다.

첫째, 재해영향요인 중분류 평가요소간 비교분석 결과 장약 및 발파 작업요인이 33%로 가장 높은 비중을 차지하였다. 따라서 장약 작업 시 화약류 취급 부주의에 의한 폭발 및 막장면 부석 낙하로 인한 안전사고 발생 위험이 높은 것으로 나타났다. 이에 따른 안전대책으로는 화약류 취급시 화약관리책임자 지휘하에 취급하고 근로자 임의로 취급하지 않도록 통제관리를 철저히 해야 하며, 그리고 장약 작업전에 낙석방지를 위한 철저한 부석정리 작업과 막장면 인접 근로자에 대한 척추보호조끼 착용, 전담 감시자를 배치하여 세심한 작업 관리가 이루어져야 한다.

둘째, 부석정리 및 지보재 작업요인에 대한 재해영향요인 평가요소간 비교분석 결과 부석정리 21%, 지보재

작업 19%로 나타났다. 부석정리는 잔류화약 폭발위험이 가장 높게 나왔고, 지보재 작업은 고소작업대 추락 및 협착위험 그리고 지보재 설치 중 낙하위험이 대체적으로 높은 비중을 차지하였다. 이에 따른 예방대책으로 부석정리 작업전에 화약관리책임자에 의한 잔류화약 여부 등을 필히 확인하는 절차가 필요하다. 또한 지보재 작업 간 고소작업대차 사용 시 추락예방을 위해서 견고한 안전난간 설치 및 작업 중 불안정한 행동금지, 설치 작업 시 자재 인양에 따른 줄걸이 설치와 작업 안전 및 작업지휘자에 의한 통제관리가 성실히 이행되어야 한다.

셋째, 터널 작업 특성상 한정된 좁은 공간 속에서 장비를 사용하여 부석정리 및 버려반출 작업시 발생할 수 있는 충돌, 협착위험이 높다. 따라서 작업공간의 충분한 조도를 확보하고 보도 및 차도를 구획 설치하여 장비가 이동하는 동선과 근로자가 이동하는 동선을 분리할 필요가 있으며, 장비 이동구간에는 속도제한 및 위험경고 표지판을 설치하고, 야간 작업 시에는 운전원 줄음방지를 위한 사전 안전대책 강구와 철저한 통제관리를 한다 면 터널 내 장비 사고발생 위험을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 도출된 위험요소 항목을 바탕으로 계획 및 설계 단계에서부터 위험성 평가를 실시하고 예방대책을 수립함으로써 NATM 공법 터널 굴진 공사 시 사고 저감이 가능할 것으로 기대한다.

References

- [1] O. Cretu, B. Robert, B. Terry, "Risk management for design and construction", RSMMeans, p. 1-288, 2011.
- [2] Chung, H. Y A causal network-based risk matrix model applicable to tunnels, Ph.D. Thesis. Ph.D. Thesis. Korea University, Seoul, South Korea., 2019
- [3] Ministry of Employment and Labor, "Industrial accident analysis", 2021.
- [4] J. H. Seong, J. U. Youn, Identification and importance analysis of hazards affecting the stability of TBM tunnelling works, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 1, pp. 973-983, November 2017.
- [5] Construction Safety Management Integrated Information. <https://www.csi.go.kr/>