피난연결통로터널의 지보패턴 및 보강범위

정국영
한국도로공사
설계처 부장

김지엽
한국도로공사
강원지역본부 차장

김지훈
한국도로공사
설계처 과장

문훈기
(주)용마엔지니어링
상무이사

문두형
(주)용마엔지니어링
부장

1. 서론

터널내 사고 및 화재시 사고처리·구급·구난과 이용자 등의 신속한 대피를 위해 일정간격으로 설치하고 있는 피난연결통로는 최근의 장대터널 건설추세 및 방재기준 강화로 인해 그 설치 개소수가 증가하고 있다. 하지만 현재 피난연결통로 및 피난연결통로 접속부 보강에 대한 지보패턴은 단면크기나 접속에 따른 영향이 반영되어 있지 않은 실정으로 이를 개선한 합리적인 지보설계 방안이 필요하다고 판단된다. 따라서 본 논문에서는 본선과 피난연결통로 접속부의 지반응력 특성을 고려한 적정 지보량 및 보강 범위 산정방안을 제시하고자 한다.

2. 피난연결통로 지보패턴 선정

현재 적용되고 있는 피난연결통로 지보패턴은 단면크기에(차량용 및 대인용) 관계없이 암반등급별로 일률적인 지보를 적용하고 있으며, 교차부 6m구간만 라이닝 철근 및 보강 락볼트를 추가하도록 계획되고 있는 것으로 검토되었다. 따라서 피난연결통로 단면크기(차량용 및 대인용), 교차부, 일반부 등 각각의 현황에 맞는 적절한 지보량을 분석하여 합리적인 지보패턴 선정이 필요한 것으로 분석되었다.

2.1 피난연결통로 지보패턴 선정

피난연결통로 단면크기를 고려하고, 접속부와 일반부에 대해 차등적인 지보패턴을 선정하기 위해 단면크기와 교차 터널부를 반영할 수 있는 Q-system에 의한 지보량 산정 방법을 적용하였다.

Q-system에서 Jn에 대한 평점은 암반의 절리군 수와 상태에 따라 결정되며, 교차 터널부(접속부)나 갱구부에 대한 특수규정을 두어 Q값을 보정하도록 하고 있다.

표 1. 표준지보패턴별 교차부에 대한 Q-Value 산정

구분	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
암반등급	I	II	III	IV	V
$Q_{일반부}$	40이상	40~10	10~4	4~1	1이하
$Q_{교차부}$	13이상	13~3	3~1	1~0.3	0.3이하

표 2. 피난연결통로 표준지보패턴 개선안(한국도로공사, 2009)

구 분		대인용 피난연결통로				차량용 피난연결통로			
		Type-1		Type-2		Type-1		Type-2	
		일반부	교차부	일반부	교차부	일반부	교차부	일반부	교차부
암반등급		I , II , III		IV		I , II , III		IV	
RMR		41이상		40~21		41이상		40~21	
Q-value		4이상	1이상	4~1	0.3~1	4이상	1이상	4~1	0.3~1
굴착공법		전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면	전단면
굴진장(m)		3.5	2.0	2.0	1.5	3.5	2.0	2.0	1.5
숏크리트(cm)		5	8	8	12	8	10	10	12
락볼트	길이(m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	종간격(m)	Random	2.0	Random	1.5	3.5	2.0	2.0	1.5
	횡간격(m)	Random	1.5	Random	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
강지보	제원	–	–	–	50×20×30	–	–	–	50×20×30
	간격(m)	–	–	–	1.5	–	–	–	1.5
라이닝(cm)		30	30(철근)	30	30(철근)	30	30(철근)	30	30(철근)

표 1에서 산출된 교차부에 대한 Q값과 피난연결통로 터널의 직경(차량용 피난연결통로: 6.42m, 대인용 피난연결통로: 3.56m)을 감안하면 다음의 Q-system 도표에 의한 지보량을 산출할 수 있다.

경험적인 방법에 의한 지보량 및 국내 피난연결통로 지보패턴을 종합하여 표 2와 같이 차량용 및 대인용 피난연결통로에 대해 일반부와 교차부로 구분하여 지보패턴 선정하였다.

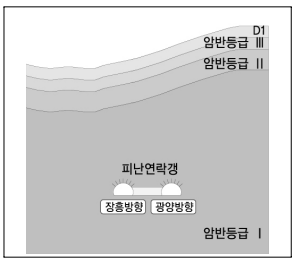
3. 역해석을 통한 지반물성치 산정

선정된 피난연결통로 지보패턴의 적정성을 검증하기 위해 현장계측 자료를 바탕으로 3차원 역해석을 수행하여 현장 특성이 반영된 변형계수와 측압계수를 산정하였다. 본 연구에 적용된 역해석 기법은 확장된 Bayesian방법(Extended Bayesian Method, EBM)을 사용하였다.

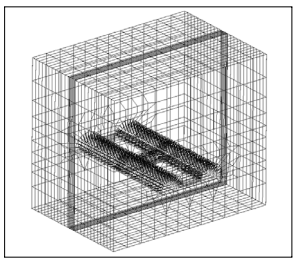
피난연결통로 교차부의 본선 계측 자료를 획득하여 이를 시공단계별 역해석 입력치로 선정하고 설계시 평가된 지반특성치를 역해석 초기 값으로 설정하여 터널 통과구간 지반의 탄성계수값과 측압계수에 대하여 역해석을 수행하였다.

역해석 목적함수가 수렴할 때까지 반복하여 수치해석을 수행하여 피난연결통로 교차부의 최적의 지반특성치를 평가하였으며, 그 결과 그림 2와 같이 탄성계수는 설계시 예측된 17,400MPa에서 약 65% 감소한 6,000MPa에서 수렴되었고, 측압계수는 설계시 가정한 1.0보다 높은 약 1.5정도에의 값에서 수렴되는 경향을 나타났다.

역해석 수렴시 최종 천단변위는 -2.01mm로 계측치인 -2.15mm와 비슷하고, 최종 내공변위 또한 -1.11mm로

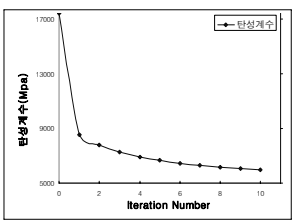


(a) 표준횡단면도

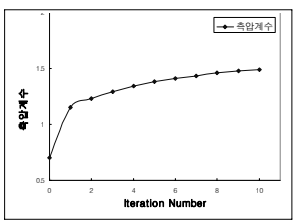


(b) 3차원 해석 모델링도

그림 1. 역해석 단면도 및 해석 모델링

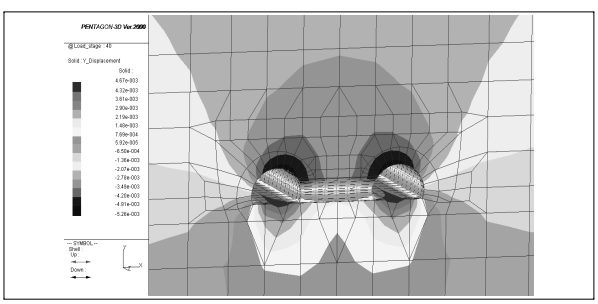


(a) 탄성계수 변화 그래프

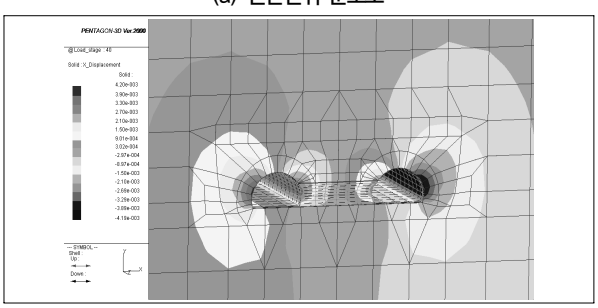


(b) 측압계수 변화 그래프

그림 2. 역해석 수행 결과



(a) 천단변위 분포도



(b) 내공변위 분포도

그림 3. 역해석 수렴후 최종단계 변위

계측치인 -1.22mm와 비슷한 수치를 나타내므로 반복연산에 의한 탄성계수 및 측압계수의 증감 경향은 적절한 것으로 보이며 피난연결통로 구간의 지반특성치로 선정하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 3차원 지반해석을 통한 지보패턴 적정성 검토

역해석에 의해 산정된 지반의 물성치를 이용하여 본 연

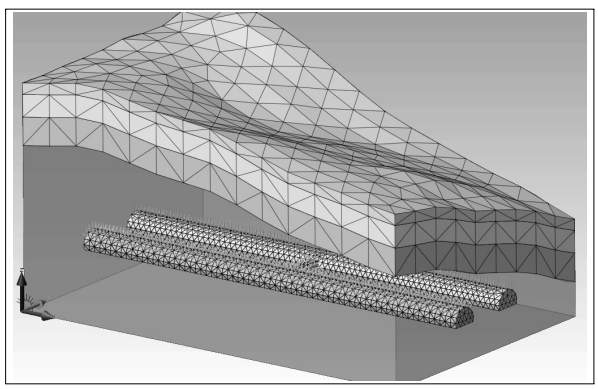


그림 4. 해석적용 모델

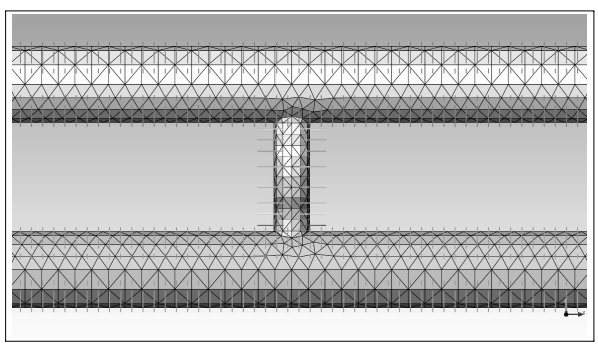


그림 5. 해석적용 평면

표 3. 수치해석 적용 물성치

지반등급	단위중량 (kN/m^3)	변 형 계 수 (MPa)	점 착 력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아슨비
I(터널구간)	26.3	6,000	2.1	44	0.2

구에서 선정한 차량용 및 대인용 피난연결통로 구간 지보패턴의 적정성 검토를 위해 지반 및 터널해석 전용 프로그램인 MIDAS GTS를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다.

차량용 및 대인용 피난연결통로 지보패턴 적정성 검증을 위한 수치해석 결과 천단변위 및 내공변위는 교차부와 일반부에서 모두 -1.3mm 이내로 수렴하였고, 숏크리트 응력 및 록볼트 축력 또한 허용치보다 작게 검토되어 선정된 지보패턴은 적정한 것으로 분석되었다.

피난연결통로 접속부 보강범위 선정을 위해 Hsiao(2008) 등의 연구결과를 참고로 하여 한국도로공사 표준지보패턴, 접속부 보강패턴(RP-1~3), 피난연결통로 지보패턴을 적용하여 수치해석을 활용한 Case Study(84단면)을 수행하였다.

Hsiao등의 연구에서는 접속각도 및 심도 변화를 고려한 암반등급별 보강범위를 터널천단변위의 10%증가량을 기준으로 제시하였으나, 접속터널 단면변화의 영향을 고려치 못하였으므로 본 연구에서는 단면크기가 상이한 대인용 및 차량용 피난연결통로에 대해 Case Study를 수행하여, 단면 크기에 따른 접속부 영향을 반영하였다.

5. 피난 연결통로 접속부 보강범위 검토

5.1 피난연결통로 접속각도에 따른 보강범위 검토 사례

표 4. 국내 연구사례(한국건설기술연구원, 1997)

접속부 영향인자	검 토 결 과
접속터널의 접속각도	• 접속각이 90도일 때 가장 안정 • 예각측에 응력집중이 보다 높게 발생 • 영향범위는 1~3D 범위
본선과 접속터널 직경비	• 접속터널직경이 본선터널직경에 가까워질수록 지반안정성 저하

표 5. 일본도로공단 설계요령 제안(設計要領 第三集 第九編トンネル 第7장 기타구조물의 설계)

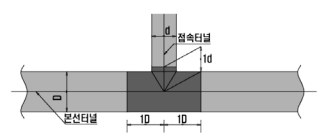
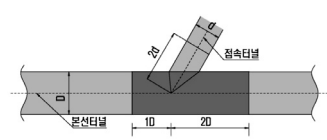
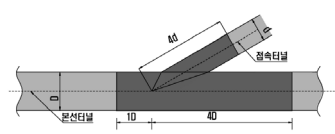
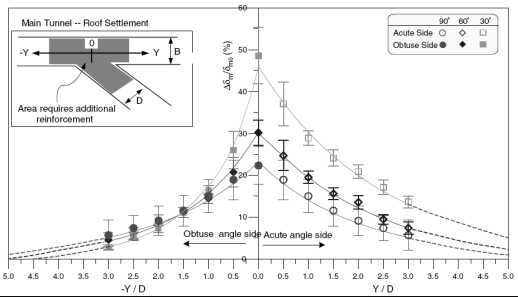
교차 각도	원지반의 응력집중	보 강 방 법	
90°	일반부의 1.6배		• 본선터널 영향범위 본선터널 직경의 1.0배 • 접속터널 영향범위 접속터널 직경의 1.0배
60°	일반부의 2.0배		• 예각 측정시 본선터널 직경의 2.0배 • 둔각 측정시 본선터널 직경의 1.0배 정도
30°	일반부의 2.7배		• 예각 측정시 본선터널 직경의 4.0배 • 둔각 측정시 본선터널 직경의 1.0배 정도

표 6. Hsiao등의 연구(2008)



- 터널천단변위의 10%증가량을 기준으로 접속부 보강범위를 제시
- 접속각도별, 심도변화를 고려한 암반등급별 보강범위를 제안
- 접속터널 단면변화에 따른 영향 고려 없음

국내 연구결과 및 해외 설계기준을 검토하여 접속부 보강범위 산정시 참고하였으며, 3차원 수치해석을 활용하여 접속부 응력집중 및 지반변위발생, 지보재 안정성을 종합적으로 판정하여 접속각도별 지반거동 및 보강범위를 평가 후 국내 실정에 적합한 적정 보강범위를 정량적으로 제시하고자 한다.

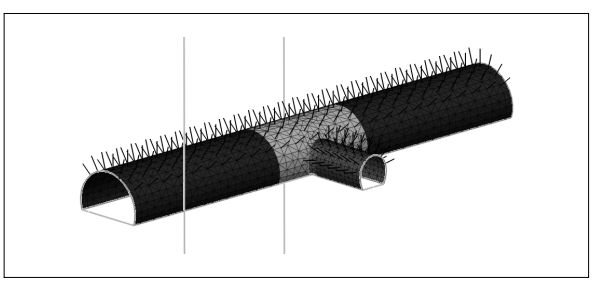
5.2 CASE STUDY 해석조건

Case Study 수행 시 고려인자는 터널상부 토피고 변화에 따른 지중응력(P_0)과 암반강도(σ_{cm})의 비 (σ_{cm}/P_0) 및 접속각도(90°, 60°, 30°)의 변화이며 이에 따른 본선 및 피난연결통로 거동을 검토하였다. Hoek(2002)가 제안한 지질강도정수(GSI)와 RMR 간의 상관관계 및 등가 Mohr-Coulomb 파괴기준 c, ϕ값으로부터 암반강도(σ_{cm})를 산정하고, 적용 토피고 및 암종별 단위중량을 감안한 유효토피하중으로부터 암반강도비(σ_{cm}/P_0)를 산정하였다.

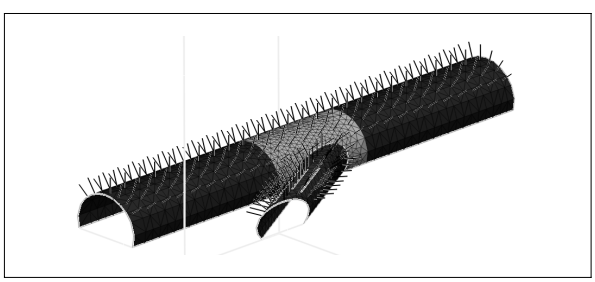
5.3 접속각도별 보강범위 선정

Case Study 수행 시 고려인자는 암반강도와 터널상부 토피고 변화에 따른 초기지중응력비(σ_{cm}/p_0), 암반등급(RMR) 및 피난연결통로 접속각도이며 이들의 영향을 고려하여 본선 및 피난연결통로 거동을 검토하였다. 검토결과 그림 7~8과 같이 본선과 피난연결통로의 접속각도가 작을수록 천단변위 증가율이 커져서 보강범위가 증가하는 경향을 나타내었다.

표 7은 피난연결통로 접속부 보강영역을 정리한 내용이다. 해석결과 본선과 피난연결통로 접속부, 천단부 및 측벽에 집중적으로 소성영역이 발생하며 추가적인 지보

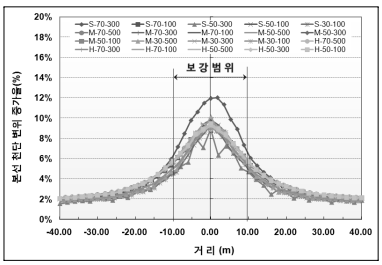


차량용 접속부 (접속각도 90°)

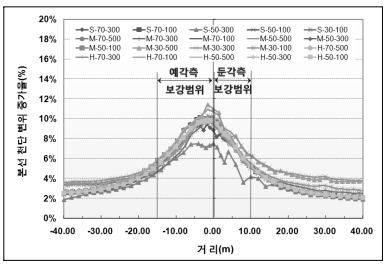


차량용 접속부 (접속각도 30°)

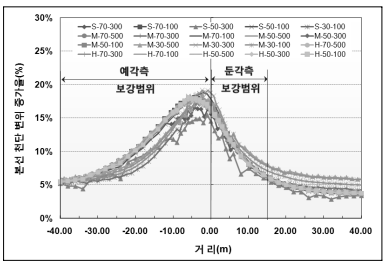
그림 6. CASE STUDY 수행을 위한 모델링도



차량용 90°접속

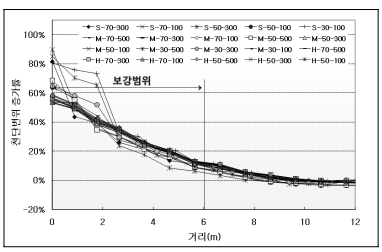


차량용 60°접속

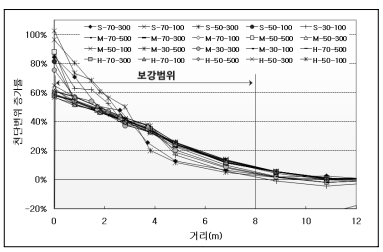


차량용 30°접속

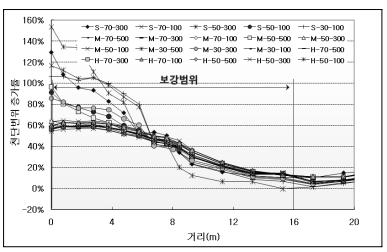
그림 7. 접속 각도별 본선부 보강범위 선정



차량용 90°접속



차량용 60°접속



차량용 30°접속

그림 8. 접속 각도별 피난연결통로 보강범위 선정

표 7. 피난연결통로 보강범위 비교 검토

1) 본선 및 대인용 피난연결통로 접속부 (90° 접속)

구 분	본선 보강영역(m)		접속터널 보강영역(m)
	예각측	둔각측	
일본도로공단	13.3m (1.0D)	13.3m (1.0D)	3.40m (1.0d)
Hsiao 등의 연구	5.78m (1.7d)	5.78m (1.7d)	5.78m (1.7d)
본 연구 성과	10.0m (0.75D)	10.0m (0.75D)	4.00m (1.18d)

2) 본선 및 차량용 피난연결통로 접속부

구 분		본선 보강영역		접속터널 보강영역
		예각측	둔각측	
90°	일본도로공단	13.3m (1.0D)	13.3m (1.0D)	6.20m (1.0d*)
	Hsiao 등의 연구	10.6m (1.7d*)	10.6m (1.7d*)	10.6m (1.7d*)
	본 연구 성과	10.0m (0.75D)	10.0m (0.75D)	6.00m (0.97d*)
60°	일본도로공단	16.6m (2.0D)	13.3m (1.0D)	12.4m (2.0d*)
	Hsiao 등의 연구	15.5m (2.5d*)	10.6m (1.7d*)	15.5m (2.5d*)
	본 연구 성과	15.0m (1.1D)	10.0m (0.75D)	8.00m (1.3d*)
60°	일본도로공단	53.2m (4.0D)	13.3m (1.0D)	24.8m (4.0d*)
	Hsiao 등의 연구	23.0m (3.7d*)	10.6m (1.7d*)	23.0m (3.7d*)
	본 연구 성과	40.0m (3.0D)	15.0m (1.1D)	16.0m (2.6d*)

D: 본선터널 직경(≒13.3), d: 대인용피난갱 직경(≒3.4m), d*: 차량용피난갱 직경(≒6.2m)

설치로 터널 안정성을 확보하여야 할 것으로 판단되었다.

6. 결론

근래 도로계획 및 건설추세는 터널의 개소수와 장대터널 건설이 증가하는 추세에 있으며, 이와 더불어 터널내 재해시 가장 효율적인 시설물 중 하나인 피난연결통로의 개소수도 기하급수적으로 증가하고 있으나, 아직까지 피난연결통로 관련 기준은 많은 부분이 미정립되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 피난연결통로의 합리적이고 경제적인 지보패턴과 접속부 보강범위를 선정하기 위해 다음과 같이 연구를 수행하였다.

1. Q-system, 기존 사례 및 이론식에 의한 지보패턴 검토 후 대인용 및 차량용 피난연결통로 지보패턴을 선정하였다.
2. 선정된 지보패턴의 현장 적용성을 검증하기 위해 계측자료를 이용한 역해석을 통해 지보패턴의 적정성을 검토하였고, 그 결과 안전율이 모두 기준치 이상으로 검토되어 선정된 지보패턴은 적정한 것으로 분석되었다.
3. 본선 및 피난연결통로 접속부 보강범위 선정을 위해 3차원 지반해석 (Case Study, 84단면)을 수행하였으며, 본 Case Study와 국외 연구 사례를 비교 분석한 결과 본선 보강영역의 경우 접속각도 변화에 따라 예각측 0.75D~3.0D, 둔각측 0.75D~1.1D값을 나타내는 것으로 분석되었고, 피난연결통로 보강영역의 경우도 0.94D~2.6D로 일본 기준 및 Hsiao등의 연구에 비하여 대부분 작은 값을 나타내는 것으로 검토되었다.

본 연구에서 제시한 피난연결통로 접속부 구간의 지보패턴 및 보강범위는 제한적인 지반정보에 의해 정량화 된 결과이므로 실제 설계 적용 시 현장조건이 반영된 3차원 지반해석에 의해 안정성을 검증하여야 할 것으로 판단되며, 피난연결 통로는 부득이한 경우를 제외하고는 설치간격 등을 기준에 맞게 조정하여 암질이 양호한 구간에 위치토록 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.