



글 유광섭 / 토목기술팀 과장 전화 02-3433-7743 E-mail geoksyu@ssyenc.com

01. 서론

최근 지역간 교통난 문제해결과 급속도로 팽창하는 기간산업의 수요를 충족시키고 미래를 위한 새로운 패러다임으로 2050년 까지 탄소중립실현을 위하여 도로 운송화물을 철도 수송으로 전환하려는 정부의 정책의 변화에 따라 환경친화적 이용에 걸맞는 녹색교통 체계를 구축해야 한다는 시대적, 사회적 요구에 따라 철도교통 시설확충이 늘어나고 있는 추세이다. 이러한 요구에 부합되는 철도교통을 위해 국내에서 22개의 사업이 공사 중에 있고 6개의 사업이 설계 중에 있다.

환경보호 및 민원예방 측면에서 노선 지하화에 대한 사회적 요구가 증가하는 추세이고 현재 설계중인 6개 철도사업 연장 359.6km 중 약 57.1%인 205.4km가 단선전철로 계획되어 단선철도 터널단면의 적용사례는 증가할 것으로 판단된다.

복선철도 터널은 건축한계, 선로중심간격 및 인터페이스 시설물 등을 고려하면 폭(B)이 최소 10.0M 이상으로 터널 내 버력상차 장비인 페이로더의 회전, 장비의 교행 및 대피로 확보에

큰 문제가 없는 반면 단선 철도터널은 복선철도터널에 비해 폭(B)이 6.2~7.0M로 좁아 페이로더의 회전이 불가하며 장비교행 시 저촉이 발생하고, 충분한 대피로 확보에 어려움이 있다.

본 고에서는 기존 단선철도 설계에 적용된 터널단면 검토를 통하여 시공성 측면의 한계를 분석하고 이를 극복하기 위하여 하부단면의 활용을 극대화한 사례에 대하여 알아보고자 한다.

02. 기존 단선철도 터널단면의 한계

2.1 기존 단선철도 터널단면 현황

단선철도 터널단면은 건축한계 및 인터페이스 (전차선, 신호, 전기, 통신설비 등)의 설치 공간 및 공기압 (이명감, 미기압) 문제 등 제반규정에 따른 요소와 경제성, 시공성 및 안정성 등을 종합적으로 고려하여 선정한다.

[표 2.1]과 같이 현재 공사중인 보성~임성리 0공구 실시설계, 이천~문경 0공구 실시설계 및 강릉~제진 기본계획 터널 단면

[표 2.1] 기존 단선철도 터널 표준단면 현황

구분	보성~임성리 0공구(실시설계)	이천~문경 0공구(실시설계)	강릉~제진(기본계획)
단면도			
바닥폭	6,200mm	6,603mm	6,783mm
대피로	1,000mmX2,100mm(편측)	900mmX2,100mm(양측)	900mmX2,100mm(양측)
인버트	-	-	-

현황을 비교한 결과 터널 바닥기초 폭이 6.2~6.8M가 적용되었고 대피로 폭은 보성~임성리 0공구 실시설계의 경우 국가철도공단에서 작성한 철도표준도(1,000mm X 2,100mm)를 준용하여 편측에 설치하였고 이천~문경 0공구 실시설계 및 강릉~제진 기본계획은 대피로(900mm X 2,100mm)를 양측에 설치하였다.

기존 단선철도 터널단면의 현황조사결과 가장 최신단면인 강릉~제진 기본계획의 굴착효율성, 방재안전성 측면의 문제점을 파악하고 이를 개선한 사례를 소개하고자 한다.

2.2 기존단선철도 터널단면 문제점 분석

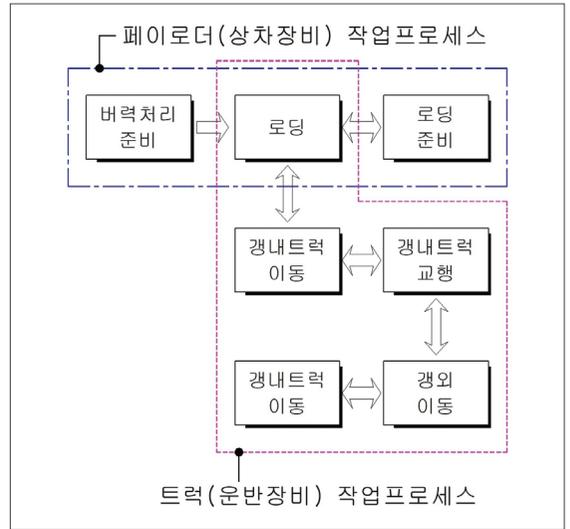
2.2.1 굴착 효율성 측면

1) 버력반출

터널공사는 굴착(발파 또는 기계굴착) → 버력반출(상차장비 + 운반장비 조합) → 지보(Shotcrete + Rock Bolt) → 굴착 시퀀스의 반복작업으로 이루어진다. 여기서 버력반출은 터널 굴착공기 중 1/3 ~ 1/4를 차지하는 요소이며 1회 공정시간 (Cycle Time)의 22~48%를 차지하는 주요공정 중 하나로서, 버력반출 시간은 터널 바닥면 기초 폭과 단면높이를 고려한 장비의 조합여하에 따라서 굴착 효율성이 증대될 수 있다.

버력을 적재하는 로딩기계의 결정은 버력반출 전반의 능률을 좌우하므로 단선철도터널 내공단면에 적합하고 또한 단시간에 적재작업을 완료하는 기종을 선택해야 하며, 또한 후속기계의 능력도 고려해야 한다. 버력 적재 능력은 지반의 단위중량, 단면 크기, 천공, 발파상태 등의 조건에 따라 다르다. 본 고에서 검토하는 공사의 경우 버력상차장비는 페이로더, 버력운반장비는 15ton 덤프트럭을 사용하는 것으로 검토하였다.

[그림 2.1] 버력처리 공정의 흐름도



일반적인 버력반출 공정은 발파가 끝나고 환기가 완료되면 페이로더와 덤프트럭이 투입하여 버력을 처리하게 된다. 이 과정은 [그림 2.1]과 같이 페이로더는 심는 작업과 버력을 모아두는 작업을 반복하게 되며, 덤프트럭은 버력을 싣고 갱내를 이동하여 사토장 또는 버력처리장까지 운반하고 돌아온다. 발파로 발생한 버력을 모두 처리할때까지 이 과정은 반복 수행되며 처리가 완료되면 장비의 철수가 이루어진다.

따라서 버력반출 공정에서 덤프트럭에 버력을 상차하기 위한 버력 상차 전용장비인 페이로더의 회전가능 여부 및 터널 내 장비교행(덤프트럭, 덤프트럭과 페이로더) 가능여부가 굴착 효율성을 결정하는 주요 인자 중 하나이다.

[표 2.2] 장비조합에 따른 페이로더 회전

구분	이천~문경 0공구(실시설계)	강릉~제진(기본계획)
장비조합	페이로더(3.5m³) + 덤프트럭(15ton)	페이로더(1.72m³) + 덤프트럭(15ton)
페이로더 회전검토 (BIM)		
검토결과	<ul style="list-style-type: none"> 터널 바닥폭 < 페이로더 장비 길이 (B=6,783mm) (L=7,571mm) → 터널 내 회전 불가능 상차를 위한 회차각 까지 후진(최대 200m) → 상차 Cycle Time 증가, 작업효율 저하 	<ul style="list-style-type: none"> 터널 바닥폭 > 페이로더 장비 길이 (B=6,783mm) (L=6,151mm) → 터널 내 회전 가능 상차를 위한 덤프트럭 반복이동 → 상차 Cycle Time 증가, 작업효율 저하

2) 페이로더 회전

[표 2.2]와 같이 상기 비교한 단선철도 터널단면 중 바닥기초 폭이 가장 큰 강릉~제진 기본계획 단면을 적용하여 장비 조합에 따른 갱내 페이로더 회전에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 적용된 장비의 제원은 [표 2.3]과 같다.

[표 2.3] 시뮬레이션 장비 제원

구분	페이로더		덤프
용량	1.72m ³	3.5m ³	15ton
길이(L)	6,151mm	7,571mm	7,756mm
너비(W)	2,490mm	3,065mm	2,500mm
높이(H)	4,673mm	5,452mm	3,288mm

[CASE 1]은 페이로더(3.5m³)와 덤프트럭(1 5ton) 장비 조합으로 시뮬레이션 검토하였으며, 터널 기초 바닥면 폭(B=6,783mm)이 페이로더 길이(L=7,571mm) 보다 작아 터널 내 페이로더의 회전이 불가하다. 이에 따라 페이로더가 덤프트럭에 버럭 상차를 위해 방향전환소까지 최대 200M 후진이 필요하여 상차 Cycle Time이 증가하고 작업효율이 저하된다.

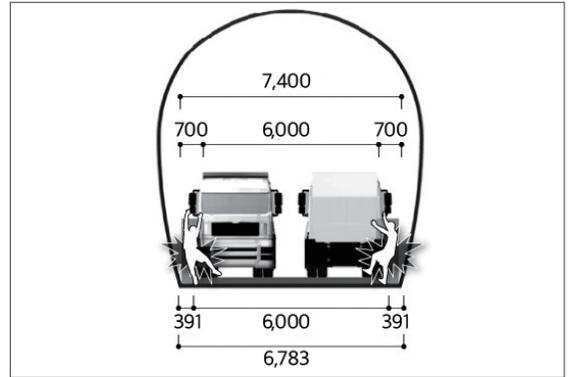
[CASE 2]의 경우 갱내 회전이 가능한 페이로더(1.72m³) + 덤프트럭(15ton) 장비 조합을 검토한 결과 페이로더의 갱내 회전은 가능하나 페이로더가 3.5m³에 비하여 약 49% 용량이 작아져 상차를 위한 반복이동으로 상차 Cycle Time 증가 및 작업효율이 저하된다.

3) 덤프트럭 교행

터널 내 버럭운반용 장비인 덤프트럭이 교행가능하면 작업 대기 시간이 단축되어 버럭처리 효율이 향상될 수 있다. 터널 내 버럭운반장비로 주로 이용되는 15ton 덤프트럭으로 검토하였으며, 그 규격은 [표 2.3]에서와 같이 7.756m(길이, L) X 2.5m(너비, W) X 3.288m(높이, H)이다.

[그림 2.2]에서와 같이 덤프트럭이 교행할 경우 시공중 좌우측으로 가배수로를 설치 및 보행로가 필요하여 좌우측 0.7m 이상의 여유폭이 확보되어야 한다. 따라서 기존 단선철도 터널단면은 여유폭이 부족으로 인한 공사중 배수 및 안전상의 문제가 발생하여 교행이 불가하고 굴착효율성이 떨어지는 한계가 있다.

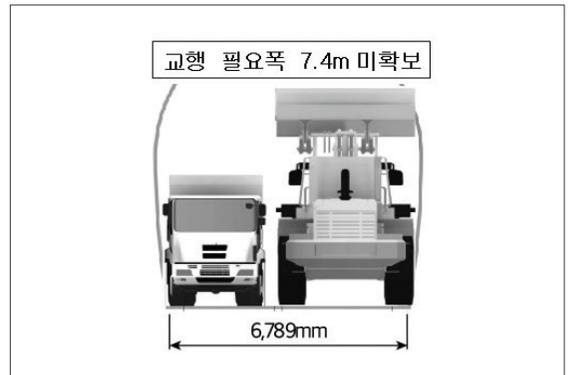
[그림 2.2] 기존단면 덤프트럭 교행 검토



4) 페이로더와 덤프트럭 교행

터널 내 버럭상차장비인 페이로더와 버럭운반용 장비인 덤프트럭 교행이 가능하면 페이로더의 후진 없이 갱내 상차가 가능하여 버럭처리 효율이 향상될 수 있다. 터널 내 버럭상차장비로 주로 이용되는 3.5m³ 페이로더로 검토하였으며, 그 규격은 [표 2.3]에서와 같이 7.571m(길이, L) X 3.065m(너비, W) X 5.452m(높이, H)이다.

[그림 2.3] 기존단면 페이로더/덤프트럭 교행



[그림 2.3]에서와 같이 페이로더와 덤프트럭의 교행을 위한 최소 필요 폭(7.4m) 미확보로 기존 단면들은 페이로더와 덤프트럭의 교행이 불가능하다. 따라서 터널 내 버럭 상차를 위해 페이로더가 갱내에서 방향전환소까지 최대 200m 후진해야 하므로 굴착 효율성이 떨어지는 한계가 있다.

2.2.2 방재 안전성 측면

기존 단면 현황을 비교한 결과 대피로 폭은 보성~임성리 0 공구 실시설계의 경우 국가철도공단에서 작성한 철도표준도

(1,000mm X 2,100mm)를 준용하여 편측에 설치하였고 이 천~문경 0공구 실시설계 및 강릉~제진 기본계획은 대피로 (900mm X 2,100mm)를 양측에 설치하였다.

[표 2.4] 기존단면 열차탈출 시뮬레이션

양측대피로(강릉~제진 기본계획)	
탈출 개념도	
탈출방법	양측대피(최대동시대피인원 : 2명)
탈출시간	246초
방재특성	<ul style="list-style-type: none"> • 장애인과 비장애인 간섭 발생 • 대피로 진입시 병목현상 발생 → 대피속도 저하

상·하행 구분 없이 운행하는 단선터널의 경우 열차의 진입 방향을 예측하기 어렵고 편측 대피로 설치는 점검원이 작업중 열차진입시 편측 대피만 가능하여 대피로 위치 착각에 따른 사고발생 우려가 있다. 또한 화재시 편측 문으로만 열차탈출이 가능하여 승객하차 지연으로 열차 탈출시간이 증가한다. 따라서 대피성능은 양측 대피로 터널단면이 유리할 것으로 판단된다.

[표 2.4]는 대피로(900mm X 2,100mm)을 양측에 설치한 강릉~제진 기본계획의 열차 탈출 시뮬레이션 검토결과 대피로 폭이 900mm로 협소하여 최대대피인원은 2명으로 열차에서 대피로 진입시 병목현상이 발생하고 화재발생 대피시 장애인과 비장애인 간섭 등에 의해 대피속도가 저하되어 승객 전원 열차탈출시까지 246초가 소요된다.

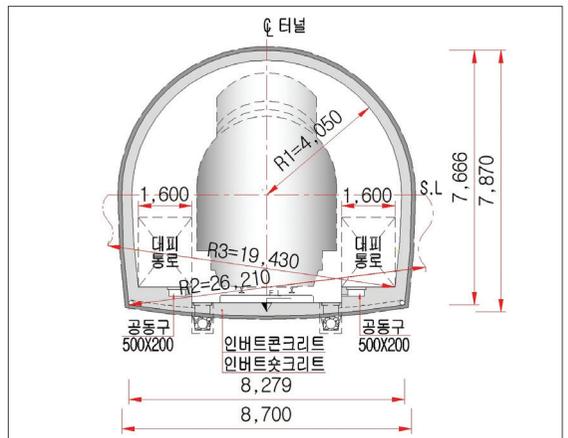
03. 단선철도 터널단면 개선사례

3.1 터널하부 활용 극대화 단면 선정

주행안정성 및 승객의 쾌적성 측면에서 터널단면을 가급적 크게 건설하는 것이 유리하나 터널 단면적이 커지게 되면 공사비가 증가하여 경제성이 저하되는 현실적인 제약을 받게 된다. 따라서 공기압 검토를 통해 최소 내공단면적 이상을 확보하고 경제성 및 시공성까지 모두 만족시킬 수 있는 최적의 철도터널 단면계획이 요구되고 있다.

기존 단선철도 터널단면은 하부 바닥폭이 6.783m로 협소하여 갱내 페이로더 회전 및 장비 교행 불가로 굴착효율성이 불량하고, 대피로 폭이 협소하여 방재안정성 또한 불리하다. 이러한 기존 단선터널 단면의 한계를 극복하기 위하여 [그림 3.1]과 같이 기존터널과 비교하여 높이는 7.666m로 작아지고 터널바닥면 폭은 8.279m로 확대하여 경제성 및 안정성을 확보하면서 굴착효율성, 방재안전성을 극대화 한 단면을 선정하였다.

[그림 3.1] 터널하부 활용 극대화 단면



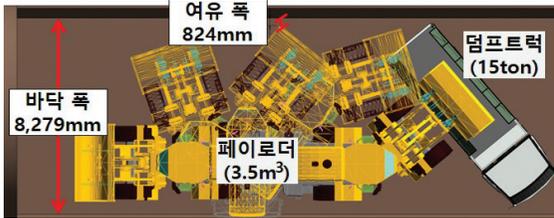
3.2 굴착 효율성 측면 개선사항

1) 페이로더 회전

기존 터널단면들의 경우 하부 바닥 폭이 최대6.783m로 페이로더(3.5m³)의 회전이 불가하여 회전이 가능한 페이로더(1.72m³)로 버력 상차장비를 변경하거나 또는 페이로더가 최대 200m 후진이 필요하여 굴착 효율성이 저하된다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 터널 내 장비교행 및 페이로더 회전이 가능한 터널단면 최소바닥폭 7.4m 이상이 되도록 동일

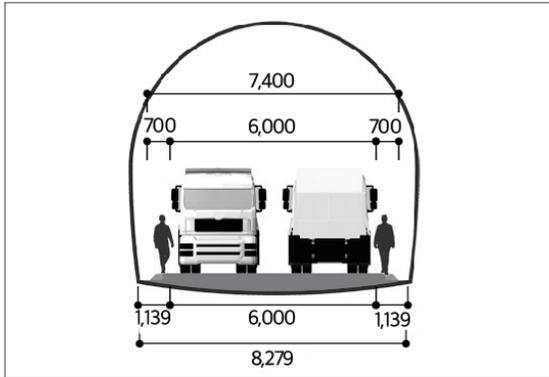
한 터널단면적에 대하여 단면높이를 7.7m로 최소화하고 바닥 폭을 8.3m로 확대하여 터널단면을 최적화하였다. 이로 인하여 페이로더의 방향전환소까지 후진이 불필요하고 갱내 회전하여 덤프트럭에 직접 상차가 가능하다.

[그림 3.2] 2차원 장비회전 및 상차 검토(BIM)



2) 덤프트럭의 교행

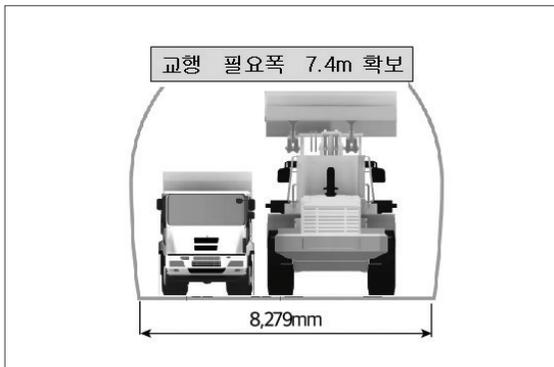
[그림 3.3] 개선단면 덤프트럭 교행 검토



개선된 단면에서는 [그림 3.3]에서와 같이 덤프트럭이 교행할 경우 덤프트럭간 여유 이격거리 0.3m를 고려하여도 좌·우측으로 약 1.14m의 여유가 있어 가배수로를 설치 공간 및 보행로가 확보된다. 따라서 갱내 덤프트럭 교행이 가능하며 버럭 반출 속도 증가에 따른 굴착 효율성이 확보된다.

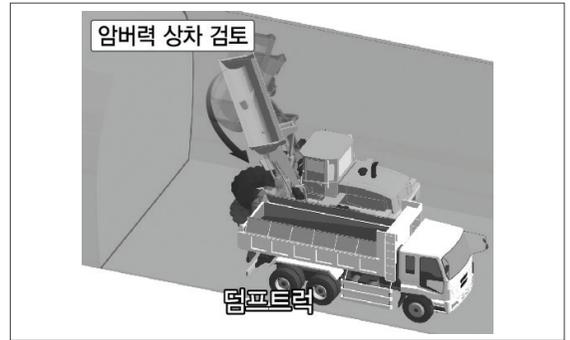
3) 페이로더와 덤프트럭의 교행

[그림 3.4] 개선단면 페이로더/덤프트럭 교행



[그림 3.4]에서와 같이 개선단면의 경우 바닥폭 8.279m로 페이로더와 덤프트럭의 교행을 위한 최소 필요폭 7.4m가 확보되어 갱내 페이로더와 덤프트럭의 교행이 가능하다. 또한 [그림 3.5] 및 [그림 3.6]과 같이 시뮬레이션을 통하여 개선단면의 3차원 BIM기반의 장비 시뮬레이션을 수행하여 페이로더의 덤프트럭 직접 상차 및 3.5m³ 페이로더의 터널상부 간섭여부를 검토하여 터널 버럭처리 장비의 적정성을 확인하였다.

[그림 3.5] 덤프트럭 직접상차 검토(BIM)

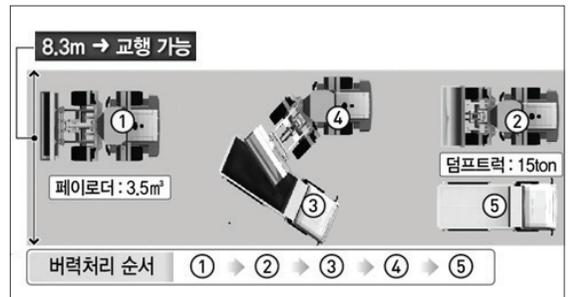


[그림 3.6] 터널상부 간섭검토(BIM)



페이로더와 덤프트럭의 교행 및 페이로더의 회전이 동시에 가능하므로 버럭처리 Cycle Time 최소화를 위해 [그림 3.7]과 같이 버럭 처리 순서를 선정하였다.

[그림 3.7] 버럭 처리 순서



최적화 단면은 원활한 장비 교행 및 페이로더 회전에 의한 버력 상차터널의 바닥 폭 7.4m 이상을 확보하여 굴진면에서 페이로더의 회전 가능, 운반장비의 교행가능 및 버력상차, 운반장비의 갱내 교행 가능으로 버력처리 시간을 24% 단축 하였고 추가적인 시공성 확보를 위해 200m 간격으로 방향전환소를 설치하여 공사중 덤프의 회차공간을 확보하였으며, BIM을 이용한 장비교행 및 페이로더 적재 가능여부를 검증하여 시공 효율 극대화를 확인하였다.

3.3 방재안전성 측면 개선사항

기존 양측 0.9m로 적용된 대피로 폭을 4인 동시 대피가 가능하도록 양측 1.6m로 확대하였다.

[표 3.1]과 같이 열차 탈출 시뮬레이션 결과 대피과정에서 발생하는 장애인과 비장애인 간섭을 최소화 하였고 열차에서 대피로 진입시 발생하는 병목현상에 의한 하차정체를 배제하여 승객대피시간을 기존 246초에서 194초로 52초(21.1%) 단축시켜 방재위험도를 최소화 하였다.

[표 3.1] 개선단면 열차탈출 시뮬레이션

양측대피로(최적화 단면)	
탈출 개념도	
탈출방법	양측대피(최대동시대피인원 : 4명)
탈출시간	194초(52초 단축)
방재특성	<ul style="list-style-type: none"> 장애인과 비장애인 간섭 배제 대피로 진입시 병목현상 배제 → 방재위험도 최소화

최적단면의 운용중 활용계획으로 국가철도공단 공동관로 인 터페이스 협의내용(전철처-566호)을 반영하여 공동구 크기를 500mm×200mm 확대한 결과 유지관리 편의성 또한 증대하였다.

3.4 터널 안정성 검토

1) 해석영역 및 해석조건

터널단면의 안정성 검토는 FEM해석 프로그램인 MIDAS-GTS NX를 사용하였다. 해석영역은 경계조건의 영향을 최소화하기 위해 좌, 우측 10D, 상부는 지표면, 하부는 10D로 설정하였다. 이는 바닥변위와 내공변위가 충분히 수렴할 수 있는 범위의 영역이다. 또한 터널의 단면형상, 지형 및 지층현황, 굴착시공 순서에 따른 하중분담율, 강관위치 등을 고려하여 모델링 하였으며 해석조건은 [표 3.2]와 같다.

[표 3.2] 해석조건 및 모델링도

해석조건		해석 모델링도
굴착방법	상/하반단면	
굴진장	1.5m/3.0m	
S/C 두께	120mm	
R/B 길이	4.0m	
K0	0.5~1.5	

일반적으로 축압계수(K0)는 터널의 종류에 관계없이 0.5~1.5의 값을 가정하여 적용하고 있으며, 임의로 가정된 2개 이상 축압계수(예 : 0.5, 1.0, 1.5 또는 0.5, 1.0 등으로 가정)로 각각의 단면에 대하여 해석을 수행하고 안전한 범위 내에서 설계하는 방법을 사용한다. 따라서 본 해석에서는 축압계수를 3개의 CASE(K0 = 0.5, 1.0, 1.5)로 비교 검토하여 불리한 쪽을 채택하였다.

2) 해석결과

수치해석 결과 [표 3.3]과 같이 천단 변위는 최대 11.81mm, 내공변위 최대 13.05mm로 미소하게 나타났다.

[표 3.3] 연직변위 및 수평변위 해석결과

연직변위도	수평변위도
천단변위 = 11.81mm	내공변위 = 13.05mm

숏크리트 힘압축응력 및 록볼트 축력 해석결과를 정리하면 [표 3.4]와 같다. 숏크리트 힘압축력과 록볼트 축력은 축압계수(K0) 1.5일 경우 최대값을 나타낸다. 숏크리트 최대 압축력(7.94MPa) 및 록볼트 최대 축력(82.02kN)은 허용치 이내로 안정한 것으로 판단된다.

[표 3.4] S/C 힘압축응력 및 R/B 축력 해석결과



04. 결론

본 고에서 기존 단선철도 설계에 적용된 터널단면들의 굴착효율성 및 방재안전성 측면 한계극복을 위한 하부단면 활용을 극대화한 개선사례를 소개하였다. 이를 정리하면 다음과 같다.

① 건축한계, 인터페이스 설치공간 및 공기압검토에 의한 최소내공단면을 확보하면서 높이는 7.9m로 축소하고 터널바닥

면 폭을 8.279m로 확대하여 페이로더의 회전 및 장비의 교행이 가능하도록 터널 단면을 최적화 하여 버력처리 시간 24% 단축으로 굴착효율성을 향상시켰다.

② 바닥폭의 운영중 활용을 위해 대피로 폭을 양측 0.9m에서 4인 동시 대피가 가능하도록 양측 1.6m로 확대하여 승객대피 시간이 52초(21.1%) 단축되어 방재위험도를 최소화 하였다.

③ 수치해석을 통한 터널안정성 검토결과 최대 천단변위 11.81mm, 최대 내공변위 13.05mm로서 미소하며 숏크리트 최대압축응력 및 록볼트 최대축력 모두 허용치 이내로 안정한 것으로 판단된다.

※ 참고문헌

01. 철도저널, 2015, 김상철, “단선철도의 합리적인 버력처리방안 연구: 시공 중 터널재난 예방방안(1)”
02. 자연 터널 그리고 지하공간, 2014, 이용율, “공기역학적 고찰을 통한 고속철도터널 단선구간 단면선정방법 연구”
03. 자연 터널 그리고 지하공간, 2015, 정상준, “단선철도양측대피로 터널단면의 적용성 검토”
04. 자연 터널 그리고 지하공간, 2011, 류동훈, “고속화에 따른 철도터널의 단면규모 결정요소에 대한 고찰”
05. 대한토목학회, 2008, 소병각, “터널 버력처리 공정의 생산성 분석을 위한 시뮬레이션 모델 개발”

