

# 도시철도터널공사 시 하저통과구간의 지반투수저하 공법에 대한 연구

## A Study on the Permeability Reduction Methods of the Riverbed Ground during Urban Railway Tunnel construction.

김준정\*

조국환\*\*

이준석\*\*\*

Kim, Joon-Jeong

Cho, Kook Hwan

Lee, Jun Seok

### ABSTRACT

This paper describes a study on the permeability reduction of the riverbed ground during urban railway tunnel construction. The research is mainly concentrated on the study of the grouting or injection methods among permeability reduction methods which can be adapted in the riverbed ground. Firstly, the various grouting methods are theoretically reviewed and compared based on the previous research papers and case study results. It is also evaluated the grouting methods in view of a safe construction of the river crossing railway tunnel. Based on the literature review and previous construction data, the design technology of grouting methods considering the long term hydro-geological behaviour in the riverbed, is suggested. Two injection methods namely, Natural Durable Stabilizer(N.D.S) and Space-Multi Injection Grouting(S.M.I) methods, are introduced as new approach methods which can be adopted to modify the riverbed ground. In order to evaluate the ground that grouted and modified by the N.D.S and S.M.I method, the pilot test programmes including the field and laboratory permeability tests, are carried out in the river crossing tunnel construction sites. The results obtained from pilot test programme, are also reviewed. In conclusion, the grouting efficiency of the S.M.I method using the non-alcalimeter silica sol is better than that of NDS method using cement. In addition, it hopes that the research results are contributed to develop the grouting design technology.

### 국문요약

본 논문은 도시철도공사 시 하저통과구간의 지반투수저하공법에 대한 연구결과이다. 본 연구에서는 하저지반의 투수저하공법들 중 특히 주입공법에 대하여 연구의 초점을 두었다. 이에 따라 하저지반 투수저하를 위하여 적용되고 있는 기존주입공법들의 이론적 배경과 시공방법들을 문헌과 시공사례자료 등을 고찰하여 비교 분석하였다. 이와 같이 다양한 고찰을 통하여 주입공법들을 하저통과 도시철도터널 안전시공 측면에서 평가하였다. 또한 분석 결과로부터 하저지반에서 장단기적으로 안전하게 지반수리거동을 도모하기위한 주입공법의 설계기법에 대하여 제시하였다. 이와 같이 하저지반 투수저하주입공법들의 평가결과를 근거로 하저통과 터널공사 시 안전시공과 완공 후 터널구조물의 장기적인 안전유지관리 측면에서 적용성이 양호하다고 판단되는 N.D.S(Natural Durable Stabilizer)공법과 S.M.I(Space-Multi-Injection Grouting) 공법을 제시하였다. 그러나 이 두공법의 실질적인 시공효과를 평가하기위하여 OO지역에 건설예정인 하저통과 도시철도터널공사구간에서 시험시공을 실시하였다. 시험시공기간 중에는 실내 및 현장에서 지반투수특성시험을 실시하여 시공전후의 지반의 투수성 저하효과를 평가하였으며, 두공법의 시험시공결과는 이론적인 배경과 함께 비교 분석하였다. 결론적으로 S.M.I공법의 경우 N.D.S공법 보다 투수성 저하효과가 큰 것으로 나타났다. 즉, 주입공법에 있어서 시멘트 무기질계 재료보다는 비 알카리성 실리카 줄계가 투수저하 효과를 더 크게 할 수 있을 것으로 판단되었다. 끝으로 본 연구결과로부터 특히 철도터널설계시 하저지반의 투수저하 증대를 위한 주입공법 설계기술발전에 공헌 할 것이다.

\* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 코오롱건설(주) 토목사업본부, 정회원  
E-mail : jjkim@kolon.com

\*\* 서울산업대학교 건설공학부 교수, 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 본부장, 정회원

## 1. 서론

최근 철도건설산업이 국가 교통계획에 중심으로 수립되어가고 있다. 수송시간의 단축 및 운행 속도 증가를 목적으로 설계단계에서부터 노선을 직선화하는 경향이 나타나고 있다. 또한 도시철도공사 시 하저구간을 통과하는 경우 연약지반과 암반내에 절리가 발달 되어 시공의 어려움이 많거나 안정성의 문제가 복합적으로 작용하는 현장이 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 도시철도공사 하저구간의 시공 시 지하수 침투 및 용출에 따른 터널의 안정성 및 시공성을 확보하기 위하여 적용되는 약액주입공법 중 시공성이 뛰어난 N.D.S공법과 S.M.I공법의 현장 적용성 및 시공성을 분석하는데 연구의 목적이 있다. 따라서 두 공법을 현장에서 시험 시공하여 시공 전후의 차수효과 및 지반강도의 변화를 비교 분석하여, 철도터널의 시공 보조공법을 연구하고자 한다.

## 2. 약액주입공법

약액주입이란 지반내에 주입관을 삽입하여 지중에 압송, 충전시켜 일정한 시간(Gel-time)이 경과함에 따라 주입된 액과 지반이 고결되는 것으로서, 지반의 불투수화 또는 지반강도증대를 그 목적으로 한다. 본 연구에서는 현장의 지반조건에 적합한 약액주입공법을 선정하기 위하여 기존의 약액주입공법의 특징과 현장 적용성 파악이 필요하다.

### 2.1 기존의 약액주입공법

#### 2.1.1 물유리계 주입공법

1950년대 이후 미국과 유럽, 일본을 중심으로 아크릴 아미드계, 우레탄계 등 다양한 약액주입공법이 개발되어 폭넓게 사용되었으나 1974년 일본 후쿠오카현의 아크릴 아미드계 액에 의한 식수오염사건 이후 모든 국가에서 실질적으로 환경오염이 없는 물유리계를 제외한 환경오염이 우려되는 액의 사용이 금지된 것이 오늘날의 현실이다.

특히 액의 고결후 지속적인 수축으로 인한 내구성 저하는 차수성능과 지반보강효과를 현저히 떨어뜨려 일정시간이 경과하면 그 공학적 기능을 부분 또는 완전히 상실하게 된다. 이러한 이유로 현재 물유리계 공법은 터널공사나 구조물 기초공사 등에 보조공법의 일부로 한시적 차수용도에만 그 성능을 발휘할 뿐 구조물의 지지력 보강, 댐과 제방의 차수벽 공사와 같이 내구성을 요하는 영구 주입공사에는 적당치 않은 것으로 알려져 있어 경제적인 면에서도 손실이 발생하며 구조물 안정성에도 문제점이 생길 수 있음을 인지해야 한다. 특히 고결전 강알카리성인 물유리계 액에 의한 지하수 오염 가능성성이 있다. 이는 주입공법의 사용 환경을 고려하였을 때 매우 우려되는 상황이다.

표1. 기존의 약액주입공법의 비교

공 법	장 점	단 점
물유리계 주입공법	<ul style="list-style-type: none"><li>- 주입성능 우수</li><li>- Gel-time 조절용이</li><li>- 저렴한 시공비</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- 내구성저하로 영구 주입공사 사용제한 (압축강도 저하 및 투수계수 저하)</li><li>- 강알카리성으로 환경오염문제 가능성</li><li>- 용출로 인한 6가크롬등 중금속 오염 가능성</li></ul>
시멘트계 주입공법	<ul style="list-style-type: none"><li>- 주입성확보시 확실한 보강효과</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- 대상지반 제한</li><li>- 주입효과 불확실</li><li>- 주변지반교란 가능성</li><li>- Gel-time 조절 불가능</li></ul>

#### 2.1.2 시멘트계 주입공법

최초의 시멘트 혼탁액 주입공법은 1802년 프랑스의 샤를베르니(C. Berigny)가 천연 포줄란을 사용한

수문보강 공사로 알려져 있다. 이후 포틀랜드 시멘트가 사용되면서 사용법위가 넓어 졌으나 주입성능의 한계로 인하여 대상 지반의 제한, 주입효과의 불확실성, 지반교란 가능성 등의 문제가 지적되고 있다. 또한 Gel-time이 길어 차수의 목적으로는 사용에 한계를 안고 있다. 최근 재료를 지중에 강제 압입, 교란시켜 고결체 형성, 미립자 사용 등 주입효과를 향상 시킨 공법이 개발되었으나 여전히 침투성과 Gel-time 때문에 대상지반이 제한되고 장비의 대형화와 시공비 상승 등으로 사용이 제한적이다.

## 2.2 N.D.S 공법과 S.M.I 공법

### 2.2.1 N.D.S 공법

N.D.S공법은 무기질계 고미분말 재료를 사용하여 주입성능을 향상시키며 환경 친화적이고 내구성이 뛰어난 무기질계 급결성 지반 주입재를 사용하다. 이 공법의 목적은 물유리를 사용하지 않는 순수 시멘트 무기질 재료를 혼합한 그라우팅공법으로 침투수를 미연에 차단하여 터널 내 굴착 시 원활하게 공사를 진행시키는 공법이다.

N.D.S공법의 장점은 첫째 규산용액을 사용하지 않으며 Gel-time을 조정할 수 있고 강도발현 및 용탈현상으로 인한 수축현상이 없다. 둘째 환경유해물질인 6가크롬의 용출이 전혀 없는 환경친화적 공법이다. 단점은 첫째 최근 개발되어 시공실적이 적다. 둘째 공사비가 고가이다. 마지막으로 파일용 고강도 구성 시에는 숙련공이 필요하다.

### 2.2.2 S.M.I 공법

S.M.I공법은 근래에 사용되어지고 있는 주입공법들의 문제점을 보완하여 개발된 비 알카리성 실리카졸계공법이다. 기존의 약액주입공법의 문제점은 강도의 저하가 크다는 점을 들 수 있다. 이와 같은 기존의 문제점을 보완한 S.M.I공법은 목적물의 특성에 따라 다공관의 특수주입장치를 사용하며 고결물에서 알카리의 용탈은 없고 대부분 중성범위이다. 또한 주입지반의 pH의 변화를 일으키지 않으므로 환경오염을 일으키지 않으며 지하수면 밑에서 주입하는 경우에도 희석에 의한 Gel-time의 지연이 없고 지하수에 대량 희석되어도 확실한 주입효과와 고결특성이 우수하다. 특히 지수성이 뛰어나 지중차수벽으로 적합하며, 점성이 작아 물이 침투 가능한 지반에는 거의 침투하며 특히 세립토에 대한 침투고결효과가 우수하다.

## 3 N.D.S공법과 S.M.I공법의 시험시공

N.D.S공법과 S.M.I공법을 현장시험을 통하여 각 공법의 시공효과를 검증하고 두 공법을 비교 분석하고자 한다. 또한 공법이 적용될 지반이 터널 굴착부분임을 감안하였을 때 터널 굴착 부분의 지반과 유사한 지반에서 시험이 이루어져야 하므로 지반조사 결과에 따른 지반의 상태를 파악하여 최적의 위치를 선정하여 시험시공 하였다.

### 3.1 지반현황

본 연구에 있어서 지반조사는 현장 시추와 물리탐사를 실시하여 대상지반의 현황을 분석 하였으며 그 결과 그림1과 그림2와 같이 나타났다. 이에 따른 주입공법의 시공시 약액주입량을 산정하였다.



그림1. 조사지역 지질도

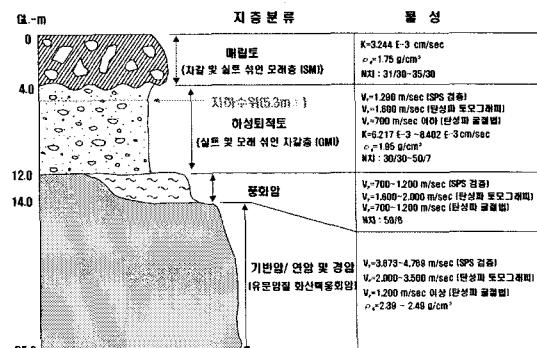


그림2. 조사지역 지층

### 3.2 N.D.S 공법의 시험시공

N.D.S 공법은 2중관 Rod공법으로 혼합방식이 적용되는 N.D.S공법은 2.0 Shot 방식을 기본으로 하며, 초기 급결 및 완결 주입에서는 A, B액을 1:1 비율로 주입하는 것을 원칙으로 하나 지층상태에 따라서 주입재의 혼합비율을 조정하여 주입하였다. 또한 N.D.S 그라우팅은 저압주입방식으로 주입압력 5 kg/cm<sup>2</sup>이하를 요구하나 현장여건에 따라 주입압력을 최대 40 kg/cm<sup>2</sup> 이하를 기준으로 하여 시험 시공하였다. 급결재와 완결재의 Gel-Time은 급결재의 경우 Gel-Time이 7~12 sec이고 완결재의 경우 60~90 sec이며, 본 시험시공에 적용된 주입재료의 표준 배합비는 표2와 같다.

표2. N.D.S 공법 시공시험에 사용한 주입재 m<sup>3</sup> 당 배합비

NDS-ES	NDS-UF	NDS-AC	물
75 kg	275 kg	2.6 kg	883 kg

변수위(magg)법에 의한 주입 후 투수시험 검사 결과 퇴적토층을 기준으로 기설계 주입율( $\lambda = 39.9\%$ ) 적용시 투수계수( $1.02 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ )는 현저히 감소하지만 시방서 허용기준( $k \leq 3 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ )에는 미치지 못하는 결과로 나타났으며, 정압에 의한 주입율( $\lambda = 53.7\%$ ) 적용시 투수계수( $8.71 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ )는 품질기준에 충분히 부합됨을 알 수 있었다. 투수시험은 주입작업 10일 경과 후 수위강하 측정으로 확인 하였다. 확인 결과 시공전 토류판 배면의 누수량이 상당히 많았으나 시공후의 누수량은 거의 없음을 확인할 수 있었다.

### 3.3 S.M.I 공법의 시험시공

S.M.I공법으로 혼합방식이 적용되는 실리카졸 그라우팅 공법에서는 2.0 Shot 방식을 기본으로 하며 순결과 완결을 병행하여 주입하여 1:1 비율로 주입하는 것을 원칙으로 하여 주입하였다. 또한 그라우트 믹서는 회전수 850rpm 이상, 토출관경 50m/m 이상 1조 용량 200ℓ 이상의 3조식 교반장치로서 흡입구 연결부에는 적절한 스크린을 설치하고 토출구에는 토출량 조절밸브가 부착된 것으로 주입하였다.

주입압력은 15kg/cm<sup>2</sup> 이하로 주입하였으며, 주입량 10ℓ/min ~ 20ℓ/min을 기준으로 주입하였다. 개착 구간에 근접하여 시공 시 주입압력에 의한 흙막이 토류벽의 변형을 방지하기 위하여 주입압력은 15kg/cm<sup>2</sup> 이하를 유지하여 주입하였다. 흙막이 토류벽의 변형을 육안으로 관찰하여 변형의 조짐에 따라 주입작업을 일시적으로 중단시키며 추가적인 변형상태를 정밀관찰하고 다시 주입을 실시하므로 안전 시공에 특별한 조치를 하였으며, 계획된 주입압력과 계획주입량에 미치도록 조정하며 주입작업을 완료 시켰다. 표3은 S.M.I 공법 시공시험에 사용한 주입재의 총 사용량이다.

표3. S.M.I 공법 시공시험에 사용한 주입재 총 사용량

구 분	단 위	설계량	시공량	비 고
시멘트	포	836	1,151	+ 315포
경화재	KG	1255	1,728	+ 473KG
실리카졸	L	80000	123,000	+ 43000L

시공시험 10일 경과후 주입지반의 투수계수는  $k = 2.23 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$  으로 나타났으며, 시공전 토류판 배면의 누수량이 상당히 많았으나 시공후의 누수량은 거의 없음을 확인할 수 있었다. 또한 지시약에 의한 착색시험결과 그림3과 같이 자홍색이 나타나 적절한 주입이 이루어진 것을 육안으로 확인하였다.



그림3. 지시약에 의한 착색시험결과

### 3.4 N.D.S공법과 S.M.I공법의 현장 적용성 평가

본 시험에서는 N.D.S공법과 S.M.I공법의 시공효과 검증을 위한 현장시험을 실시하였다.

N.D.S공법의 경우 투수시험 수행결과 풍화암 및 연경암층에서는 시방기준에 부합되지만 퇴적층에서는 시방기준에 부합되지 않는 결과로 재시험을 시행하였다. 재시험 결과 측정 투수계수가 시방기준치에 부합하나 설계 주입률( $\lambda = 39.9\%$ )보다 135% 초과한  $\lambda = 53.7\%$ 의 주입률을 보였다. 이러한 주입률의 초과는 할렬 및 주변 지반의 용기를 발생시켜 대수대가 존재하는 자갈 섞인 사질토층(GM)에서의 시공시 적용성의 검토가 충분히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

S.M.I공법의 경우 시공위치의 상태가 토공작업이 진행하는 동안에 상당히 많은 양의 지하수가 용출되어, 지중 연속벽 배면에 지하수와 함께 토사의 유출로 인한 동공이 발생되어 있었다. 이러한 상태의 지반에 S.M.I공법을 실시한 결과 배면공동이 채워지고 토류판 배면 원지반의 미세한 공극에도 주입재가 충분히 침투되어 원지반의 강도를 강화하였다. 차수보강작업 후 투수계수를 측정한 결과 투수계수( $k = 2.23 \times 10^{-5}$ )가 불투수층에 가까운 상당히 양호한 결과가 도출되었으며, 수위강하는 주입작업 10일 경과 후에 확인결과 1m 가량만이 하강한 것으로 나타났다. 또한 채취된 시료에 실시한 착색시험을 주입 한 2개 지역 전 구간에 대하여 ‘매우 양호’한 결과를 얻을 수 있었으며, 시공 완료 후 실시한 육안확인 결과에서도 주입재가 지반 내에 충분히 주입된 것으로 확인되었다.

따라서 하저를 통과하는 터널공사 시 터널구조물의 장기적인 안전유지관리 측면에서 보았을 때 S.M.I 공법이 N.D.S공법보다 적용성이 양호하다 할 수 있다.

### 4. 최적 차수공법 선정을 위한 수치해석적 평가

본 내용은 부산지하철 3호선 2단계 325공구 현장 중 원 설계에 적용된 터널 차수그라우팅 공법(N.D.S)이 설계에 적용된 투수계수( $k = 3.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ )를 만족시키지 못하여, 현장여건에 부합된 대체 차수공법으로 S.M.I공법을 선정하였다. 변경된 차수그라우팅 및 보조공법 적용에 대한 터널의 안정성 및 시공성 확보 여부를 알아보기 위하여 모델링을 통한 수치 해석적 방법으로 해석을 수행하였다.

#### 4.1 해석조건

본 연구에서는 2차원 유한요소해석 프로그램인 Pentagon-2D를 사용하였으며 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 모델을 통하여 측압계수( $K_0 = 1.0, 1.75, 2.5$ )의 변화와 지보패턴을 적용하고 패턴의 대표단면을 선정하여 시공단계별로 터널의 안정성을 당초 설계되었던 지보패턴과 비교·평가 하였으며, 해석에 사용된 터널 단면은 그림4와 같다.

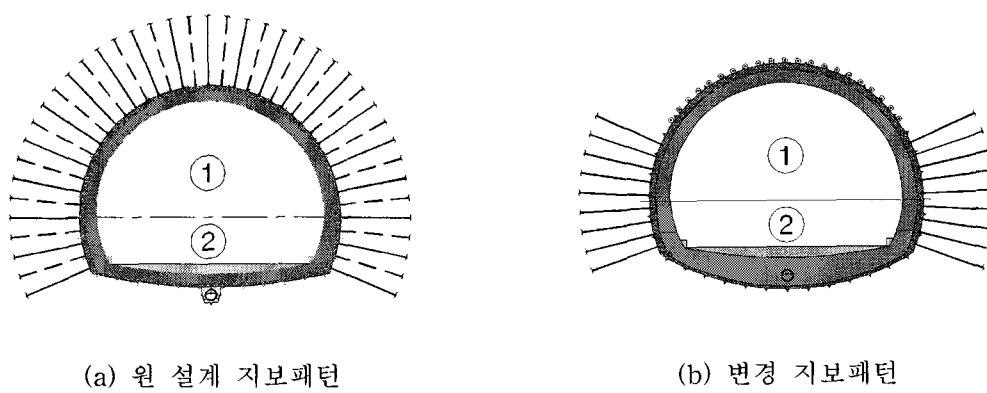


그림4. 지보패턴 단면

본 연구에서 사용된 해석영역은 그림5와 같이 굴착에 따른 경계면의 영향이 없도록 설정하였으며, 해석 단계는 그림6(I. 상반굴착 → II. Soft 속크리트+록볼트 → III. Hard 속크리트 → IV. 하반굴착 → V. Soft 속크리트+록볼트 → VI. Hard 속크리트)과 같은 순서로 해석하였다.

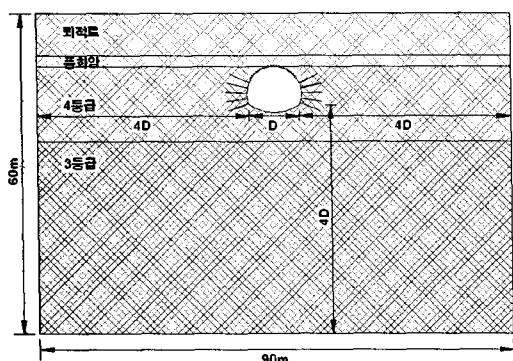


그림5. 변경 지보패턴의 해석단면

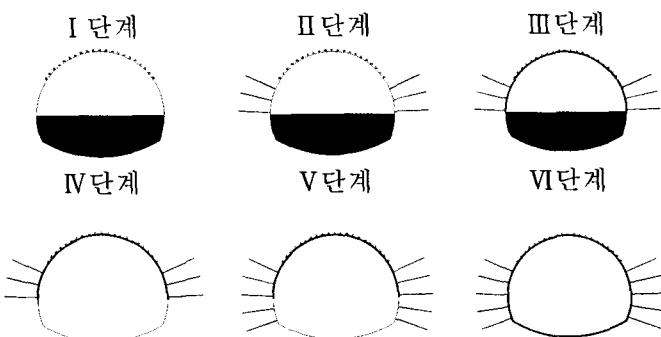


그림6. 변경 지보패턴의 해석단계

#### 4.2 수치해석 결과

본 연구에서 수치해석결과 천단변위, 내공변위, 슷크리트 흠 압축응력 및 인장응력, 록볼트 축력에 관하여 검토하였다.

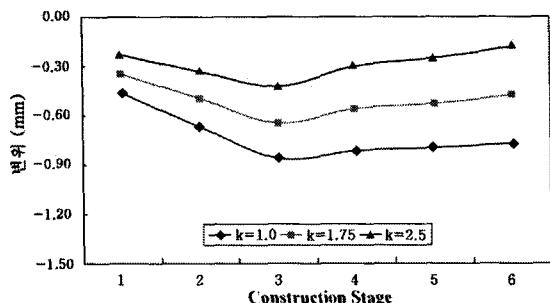


그림7. 천단변위 발생 경향

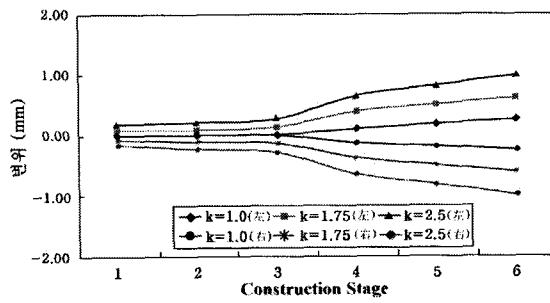


그림8. 내공변위 발생 경향

수치해석을 통한 해석 결과 천단변위, 내공변위의 최대값은 그림 7, 그림8과 같이 각각  $K_o = 1.0$  일 때 0.866mm, 0.248mm,  $K_o = 1.75$  일 때 0.644mm, 0.628mm,  $K_o = 2.5$  일 때 0.422mm, 1.008mm로 안정한 범위에 있는 것으로 판단된다.

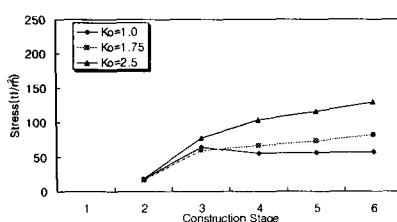


그림9. 슷크리트 압축응력

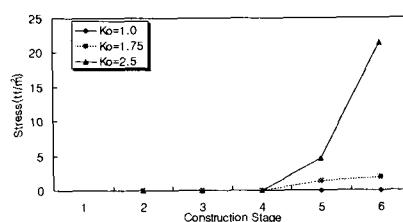


그림10. 슷크리트 인장응력

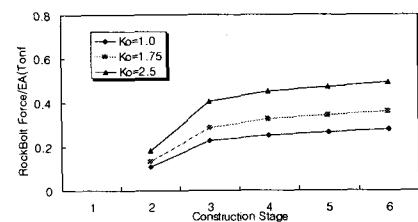


그림11. 록볼트 축력

표4. 수치해석 검토결과

축 압	구 분	원 안	변경안	구 분	원 안	변경안	구 분	원 안	변경안	
1.00	최대 천단 변위	1.234mm	0.866mm	쐐크리트	최대 압축응력	65.2 tonf/m²	57.3 tonf/m²	최대 록볼트 응력	0.24 tonf	0.28 tonf
1.75		0.964mm	0.644mm		112.3 tonf/m²	82.7 tonf/m²	0.38 tonf	0.36 tonf		
2.50		0.704mm	0.422mm		184.5 tonf/m²	130.0 tonf/m²	0.52 tonf	0.49 tonf		
1.00	최대 내공 변위	0.321mm	0.248mm	쐐크리트	최대 인장응력	-	0.04 tonf/m²			
1.75		0.767mm	0.628mm		-	-	1.97 tonf/m²			
2.50		1.215mm	1.008mm		-	-	21.4 tonf/m²			

숏크리트에 작용하는 허용 휨 압축응력은  $84 \text{ kg/cm}^2$ 으로 측압계수  $K_o = 1.0, 1.75, 2.5$  일 때 숏크리트 최대압축강도는 그림9과 같이  $57.3\sim130.0 \text{ tonf/m}^2$ 로서 허용치범위를 초과하지 않은 것으로 나타났다. 측압계수  $K_o = 1.0, 1.75, 2.5$  일 때 휨 인장응력은 그림10과 같이  $0.04\sim21.4 \text{ tonf/m}^2$ 의 범위를 보이며, 허용 휨 인장응력  $6.1 \text{ kgf/cm}^2$ 내의 값을 나타낸다. 록볼트의 축력은 그림11과 같이  $0.28\sim0.49 \text{ tonf}$ 의 범위를 보이고 허용치인  $8.6 \text{ tonf}$ 를 초과 하지 않아 터널안정성에는 문제점이 없을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과를 정리하면 표4와 같다.

## 5. 결론

본 연구에서는 도시철도 하저 통과 터널 내 차수 및 지반보강에 관한 분석을 위하여 하저지반의 투수 저하공법들 중 주입공법에 대하여 연구하였다. 하저지반 투수저하를 위하여 적용되고 있는 기존주입공법의 비교, N.D.S공법과 S.M.I공법을 현장시험, 수치해석적 분석을 통하여 비교 분석을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. N.D.S공법의 경우 투수시험 수행결과 풍화암 및 연경암층에서는 시방기준에 부합되지만 퇴적층에서는 시방기준에 부합되지 않는 결과로 인하여 재시험 결과 측정 투수계수( $8.71 \times 10^{-6}$ )가 시방기준치에 부합하나 설계 주입률( $\lambda = 39.9\%$ )보다 135% 초과한  $\lambda = 53.7\%$ 의 주입률을 보였다.
2. S.M.I공법의 경우 차수보강작업 후 투수계수를 측정한 결과 투수계수( $k = 2.23 \times 10^{-5}$ )가 불투수층에 가까운 상당히 양호한 결과가 나왔으며, 수위강하는 주입작업 10일 경과 후에 확인결과 1m 가량 만이 하강한 것으로 나타났다. 또한 시공 완료 후 실시한 지시약에 의한 착색시험결과에서도 자홍색으로 변하여 주입재가 지반 내에 충분히 주입된 것으로 확인되었다.
3. Pentagon을 이용한 수치해석적 평가 결과, 원안보다 변경안의 변위가 작게 나옴으로서 터널의 안정성 향상을 볼 수 있었다.
4. 위의 결과를 종합하여 볼 때 S.M.I 공법이 N.D.S 공법보다 현장 상황에 맞추어 실시한 차수 및 지반보강의 목적을 충분히 달성한 것으로 판단되었다.

## 참고문헌

1. 부산지하철 3호선2단계 325공구 건설공사 터널 차수공법 변경 및 터널안정 검토보고서
2. 부산지하철 3호선 325공구 건설공사 본선환기구 차수공사 보고서
3. 부산지하철 325공구 그라우팅 확인조사 보고서
4. 부산지하철 325공구 동천교 접속슬래브 통과구간 개량지반부 지구물리탐사 보고서
5. 부산지하철 3호선2단계 325공구 건설공사 차수,보강그라우팅(NDS) 시험시공 결과보고서
6. 천병식, “최신 지반주입 -이론과 실제-”, 원기술, pp. 175-208, 1998.
7. 송상준, “NDS 공법의 시험시공을 통한 지반개량 효과에 관한 연구”, 창원대학교, 2004.
8. (사)대한지질공학회, “2003 지질공학 단기 실무강좌 지반개량 및 보강공법”, (사)대한지질공학회, 2003.