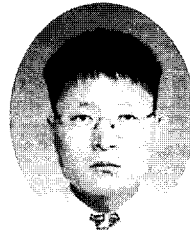


## 터널 배면 공동 뒤편 채움 재료의 개발 - Development of Tunnel Backfill Grouting -



이진용\*



박상규\*

### 1. 서 론

터널의 복공 두께는 지형, 지질, 용수 상황, 기타 여러 가지 조건을 고려하여 결정하고 있으며, 이것은 터널에 작용하는 토압을 철재 지보공과 라이닝 콘크리트의 아치컷션으로 지탱한다는 이론에 근거한다. 그러나 일반적으로 터널 현장에서는 시공후 터널 천단부에 공동으로 인하여 라이닝 배면에 불균등한 토압이 집중적, 국부적으로 작용하여 라이닝 콘크리트에 균열이 생기고 심하면 터널이 붕괴될 수 있다.

최근 들어 터널 안전진단에서 가장 문제가 되고 있는 천정부의 균열 발생과 누수의 원인은 대부분 배면의 공동이 주된 원인인 것으로 밝혀지고 있으며 특히 비파괴 탐사인 GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사를 수행한 결과 이런 문제들이 사실로 규명되었다.

#### (1) 국도 00-2터널 안전진단 자료 :

아래의 그림은 국도 31번 00-2터널(도로 터널)의 천정부에 대하여 실시한 GPR 탐사 결과이며, 터널의 라이닝 배면에 공동이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

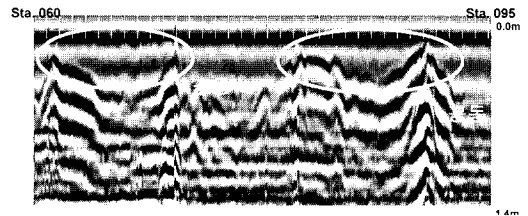


그림 1. 국도 00-2터널 GPR 해석 단면도

#### (2) 고속도로 00터널 안전진단 자료 :

아래의 그림은 고속도로 0-0공구 00터널(고속도로 터널)의 천정부에 대하여 실시한 GPR 탐사 결과이며 터널의 라이닝 배면에 공동이 존재한다.

\* 정회원, 동아건설 기술연구원 수석연구원

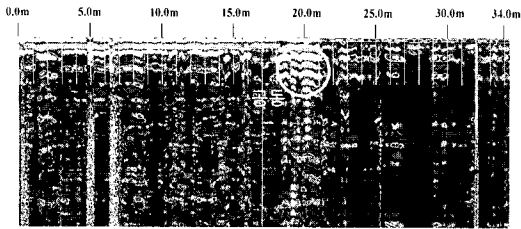


그림 2. 고속도로 ○○터널 GPR 해석 단면도

(3) 철도 ○○-1 터널 안전진단 자료 :

아래의 그림은 전라선 ○○-1터널(철도 터널)의 청정부에 대하여 실시한 GPR 탐사 결과이다. 터널의 라이닝 배면에 공동이 여러 곳에 존재하는 것을 볼 수 있다.

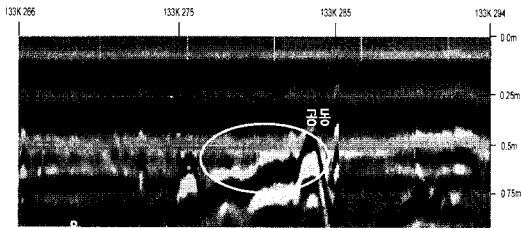


그림 3. 철도 ○○-1터널 GPR 해석 단면도

상기 탐사 결과들을 살펴보면 터널 라이닝 배면 충전이 완벽하지 않다는 것을 알 수 있다. 현재 배면 공동을 충전하기 위해서 대개 시멘트 페이스트나 모르타르 등의 그라우팅 재료를 사용하여 채우는 방법을 채택하고 있지만 완전 충전이 이루어지지 않아 상당수의 터널에서 보수가 요구되고 있으며, 특히 노후 터널에서는 토압의 불균등한 작용으로 인해 라이닝에 누수 현상이 심각하다.

본고에서는 현재 사용되고 있는 터널 배면 뒤채움 재료 및 시공지침서의 문제점을 알아보고, 이것을 개선할 목적으로 기존 터널 배면 뒤채움재보다 충전성이 좋고 경제적인 재료를 소개하고 현장 시험 시공 결과를 통해 터널 공사에 사용 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 시공지침서의 문제점

국내 지방사에서 제시한 터널 배면 공동 뒤채움 재

료 및 시공지침에 대한 문제점을 간단히 설명하면 아래와 같다.

- 터널표준시방서(대한터널협회, 1999) : 터널 배면 공동 충전에 대한 기준이 미흡하여 라이닝 배면의 공극 충전용 재료와 주입 공법에 대해 임의적인 기준, 즉 일반 그라우팅 기준을 적용하거나 혹은 임의 배합을 적용하여 설계 및 시공에 어려움이 있다.
- 토목지질실무지침서(농어촌진흥공사, 1992) : 비교적 주입 재료에 대해 상세히 서술되어 있으며, 모르타르를 일반적인 주입 재료로 선정하여 배합시 유의 사항, 유동성 및 배합에 따른 장비 선정에 대해서 기준을 제시하고 있다. 그러나, 모르타르 배합의 특성상 모래등 골재의 입도를 선별하여 시공해야 하므로 현장 적용에 어려움이 있다.
- 지하철 7호선 실시설계 특별시방서(서울시지하철 건설본부, 1993) : 시방서에서는 확인공을 설치하여 라이닝 콘크리트가 천정부까지 완전 충전이 되었는지를 확인하고 공동이 발견되면 모르타르를 타설하여 공동을 충전하도록 되어 있으나, 사용 재료 및 공법에 대한 기준이 전혀 언급이 되어 있지 않다.
- 고속도로 터널설계 실무 자료집 (한국도로공사) : 터널 배면 공동 충전에 대하여 사용 재료 및 주입 공법에 관한 기준이 전혀 언급되어 있지 않다.

현재 국내 터널 배면 공동 뒤채움 재료로 사용되는 것은 시멘트 페이스트가 가장 보편적 재료이며 그 외에 모르타르, 경량기포 콘크리트 등이 사용되고 있다. 그러나 모르타르의 경우 재료 분리 현상이 문제시되고, 시멘트 페이스트에서는 블리딩이 많이 발생하여 공동의 완전한 충진을 할 수 없는 재료상의 문제점 때문에 신규 터널 배면 및 기존 터널의 보수·보강 현장에서 품질 불량 사례가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 <표 1>은 기존 사용 재료의 문제점을 요약한 것이다.

### 2.2 터널 배면 공동 뒤채움 재료 개발

현재 사용되고 있는 배면 공동 뒤채움재는 <표 1>에서 언급한 바와 같이 재료 분리 및 블리딩률이 높아 배면 공동을 완전히 충전하기 위해서 1차 주입 후

표 1. 기존 터널 배면 공동 뒤채움 재료의 문제점

구분	모르타르	시멘트 페이스트	폴리우레탄	경량 기포 콘크리트
기술적인면	- 재료 분리 - 주입시 모래의 침강으로 인한 판의 막힘 상 발생	- 블리딩률이 높아 완전한 진이 안됨.	- 주입압 및 발포압에 의해 라이닝 손상이 우려 - 국부적 누수 구간 보수 및 보강에는 유리함.	- 지하수 구간에 취약 - 균질한 기포를 발생시키기 어려움.
경제성	- 시멘트 페이스트에 비해 경제적임. - 품질 확보를 위해 모래의 체가름을 해야 함으로 비용이 추가되고, 재료의 낭비가 발생	- 품질 확보를 위해 2차 작업을 할 경우 비용이 추가로 소요됨. - 비교적 경제적인.	- 다른 주입 재료에 비해 고가임.	- 기포 발생 및 장기에 미세 균열 발생 - 재료비는 저렴함.
시공성	- 모래의 입경이 고려되어야 하므로 별도의 래치기 반 작업이 필요하며 시간이 많이 걸림.	- 모르타르에 비해 재료가 단순해 작업이 용이함.	- 비교적 단순하나 동질기 작업 불가능	- 기포 발생 장비 추가 투입으로 인하여 장비 운용이 번거로움. - 기포 발생, 믹싱 등 작업이 어려움.

2차로 재충진을 해야 하는 어려움이 있다. 그러나 이러한 문제를 극복하기 위하여, 시멘트와 산업 부산물인 폴라이 에쉬를 혼합하고 특수한 혼화제를 첨가하여 블리딩률을 최소화하고, 경제적이며, 시공시 기존의 그라우팅 주입 장비로 주입이 가능하도록 개선한 뒤채움재를 개발하였다.

표 2. 개발된 재료의 시험 결과

재료명	배합량 (kgf/m <sup>3</sup> )		Flow (cm)	블리딩 (%)	압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	물	결합재			7일 평균	28일 평균
터널 배면 공동 뒤채움재	672	841	25±5	1 내외	18	40

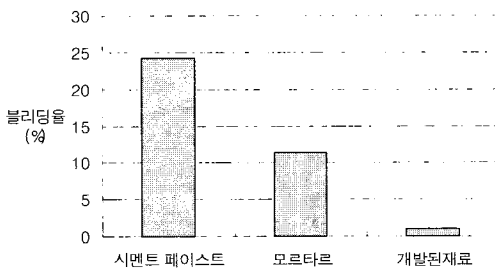


그림 4. 재료 종류에 따른 블리딩률

재료의 특징은 <표 2>와 같으며 터널 배면 공동에 결정적으로 영향을 미치는 블리딩을 기존 사용 재료와 비교하면 <그림 4>와 같다.

### 2.3 현장 시험 시공

개발된 재료의 실용성 확인을 위해, 현재 시공 중인 터널 일부 구간에 적용하여 터널 배면의 완전 충전성 여부를 확인하도록 하였다. 시공 장소는 지하철 시공 현장으로 시공 구간은 약 108 m 이고 시공 물량은 약 5.25 m<sup>3</sup>이었다. 본 시험 시공 대상 터널의 지질 상태는 풍화암, 연암, 보통암 등이 나타났으며, 터널 상부는 풍화암 또는 연암이 약 0.5 ~ 2 m 두께이며, 암층 상부에는 풍화도층이 부분적으로 분포하고, 해성퇴적층이 약 4.3 ~ 11.5 m, 매립층이 약 1.2 ~ 8.0 m의 두께로 분포되어 있으며 터널의 단면의 형태는 <그림 5>와 같다.

충진된 재료를 현장에서 시험을 실시한 결과 플로 우치는 30 cm로 측정되었으며, 블리딩률은 약 1%로 측정되었다. 강도 시험은 현장에서 압축강도시험용 몰 드를 제작하여 실내에서 재령 7일, 28일에 대하여 실시하였으며 시험 결과는 <표 3>과 같다.

표 3. 압축 강도 결과

시료	규격 (cm)	7일 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	28일 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
시험 시공 배합	5×5×5	20	40

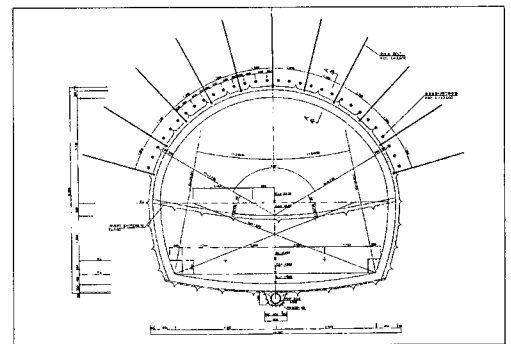


그림 5. 터널의 표준 단면도

### 2.3.1 비파괴 물리탐사(GPR)

터널 배면 뒤채움재 시공 전후의 라이닝 배면 공동의 유무를 파악하기 위하여 비파괴 물리 탐사 방법인 GPR 탐사를 시행하였다. 탐사에 사용된 장비는 미국 GSSI사의 Sir-2 system 제품으로 400 MHz 안테나이며, GPR 탐사 결과 데이터 해석용 프로그램인 Radan을 이용하여 분석하였다.

전체 터널 시험 시공 구간 중 탐사용 작업대의 이동이 가능한 구간을 설정하여 31K 918 ~ 31K 979 까지 총 61 m 구간에 걸쳐 GPR 탐사를 실시하였으며, 탐사측선은 통상 라이닝 배면 공동이 존재하는 터널의 천정부에서 터널 진행 방향과 종단으로 실시하였다. 본 탐사에서는 1 m 이상의 탐사 심도를 보장하는 주파수 중 가장 해상도가 높은 주파수 400 MHz 안테나를 사용하여 연속 모드로 탐사를 실시하여 자료를 획득하였다. 현장에서 획득한 자료는 Radan 프로그램을 사용하여 자료 처리 및 해석을 수행하였으며 천정부를 탐사하기 위해서 이동식 작업대를 제작하여 탐사를 실시하였다(그림 6).

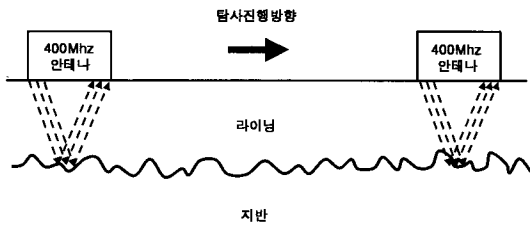


그림 6. 콘크리트 라이닝 경계면 탐사 모식도

### 2.3.2 탐사 결과

#### [ 시공 전 ]

공동의 깊이를 측정하기 위해서는 공동 상부에서 반사되는 신호와 하부에서 반사되는 신호가 분리되어야 한다. 그러나 대부분의 라이닝 배면 공동은 소규모이므로 그 깊이를 정확하게 판단하기는 어렵다. 또한 각종 철근 및 지보재 등에 의해 회절 신호와 산란 신호가 다수 존재하기 때문에 공동의 깊이를 정확하게 계산하기는 쉽지 않다. 그러나 본 탐사에서는 31K 425 ~ 31K 923 구간에서 라이닝 배면에 비교적 선명한 공동의 반사체를 확인할 수 있었다.

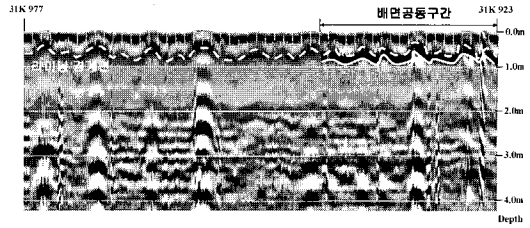


그림 7. 터널 배면 뒤채움재 시공 전 탐사 결과

#### [ 시공 후 ]

터널 배면 뒤채움재 시험 시공을 실시한 후 그 효과를 확인하기 위하여 GPR 탐사를 실시하였다. 탐사에 동원된 장비 및 현장 여건은 사전 GPR 탐사와 동일하게 설정하였으며 탐사 결과는 아래 <그림 8>과 같다. 결과에 의하면, 사전 탐사에서 나타났던 공동 구간의 반사체가 시공 후 탐사 결과에서는 나타나지 않음으로써 개선된 재료의 완전 배면 공동 충전 효과를 확인할 수 있었다.

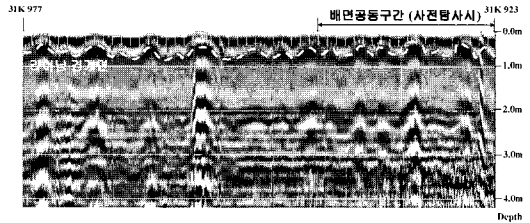


그림 8. 터널 배면 공동 뒤채움재 시공 후 탐사 결과

## 3. 결 론

최근 터널 구조물 안전진단시 천정부에 발생한 균열 및 누수문제가 심각하며, 그 원인의 대부분이 배면 공동인 것으로 판명되고 있다. 터널 배면의 공동은 라이닝 콘크리트 타설시 시공상 어려움으로 발생되는데 이러한 배면 공동에 토압이 균등하게 작용하지 않으므로 라이닝 콘크리트에 균열이 생기고, 심하면 터널의 안정성을 위협할 수 있다. 기존에 사용되는 배면 공동 뒤채움 재료는 블리딩이 20 ~ 30 % 정도 발생하며, 재료 분리와 주입 장치 막힘 등으로 품질과 시공성에서 극히 불량하다. 그러나 이러한 문제가 해결되고 있지 않은 것은 그 중요성에 대한 인식 부족과 발주처에서 터널 배면 뒤채움재의 공사비를 시공자에게 부담시킴으로써 형식적으로 뒤채움을 실시하는 것이 일반화

되어 있기 때문이다.

그러므로 터널에 국부적인 하중이나 불균등한 토압으로 인해 발생할 수 있는 라이닝 콘크리트의 균열을 감소시키고 안전한 터널을 건설하기 위해서는 본문에서 소개된 재료와 같이 배면 공동을 완전하게 채울 수 있는 재료 개발 및 시공 방법의 개발이 요망된다. □

### 참고문헌

1. 차승렬, 경량기포 모르타르를 이용한 터널그라우팅에 관한 고찰, 한양대 석사학위 논문, 1984.
2. 황성욱, 터널 복공 배면 모르타르 주입에 관한 연구, 한양대 석사학위 논문, 1984.
3. 권형석외, GPR을 이용한 터널 라이닝두께 검측, 1997.
4. 터널공사 표준시방서, 건설부, 1985.
5. 터널표준시방서, 건설교통부, 1999.
6. 토목지질 실무지침서 및 그라우팅시방서, 농촌진흥공사, 1992.
7. 지하철 7호선 실시설계 특별시방서, 서울시지하철건설본부, 1993.
8. 고속도로 터널설계 실무 자료집, 한국도로공사.