

# Permanent Shotcrete Tunnel Linings 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발 (Ⅲ)

(시멘트 광물계 분말형 급결제를 사용한 습식스�크리트 현장시험시공)

Development of High Performance Shotcrete for Permanent Shotcrete Tunnel Linings (Ⅲ)  
(Field Test of Wet-mixed Shotcrete with Powder Types Cement Mineral Accelerator)

박 해 균\*  
Park, Hae Geun

이 명 섭\*\*  
Lee, Myeong Sub

김 재 권\*\*\*  
Kim, Jea Kwon

김 용 하\*\*\*\*  
Kim, Yong Ha

---

## ABSTRACT

The use of Shotcrete(Sprayed concrete) for the support of underground excavations was pioneered by the Civil engineering industry. Permanent shotcrete tunnel linings such as Single-shell, NMT (Norwegian Method of Tunnelling) have been constructed in many countries for reducing construction time and lowering construction costs instead of conventional in-situ concrete linings. Among essential technologies for successful application of Permanent Shotcrete Linings, high performance shotcrete having high strength, high durability, better pumpability has to be developed in advance. This paper presents the ideas and the first field test results of wet-mixed Steel Fiber Reinforced Shotcrete(SFRS) with powder types cement mineral accelerator. From the results, wet-mix SFRS with powdered accelerator exhibited good early strength improvement and less rebound ratio compared to the ordinary accelerator.

---

## 1. 서 론

터널시공에 있어서 슛크리트(Shotcrete, Sprayed Concrete)는 강지보, 록볼트와 함께 NATM공법에 서 굴착 후의 지반안정을 위한 주요 지보재로서의 기능을 수행한다. 슛크리트는 뿜어 붙이는 특성으로 인해 지반에 부착하여 급격히 경화하는 특성과 함께 조기에 강도를 발현하여 후속작업을 신속히 진행 할 수 있도록 하고 장기적으로 안정한 강도를 발휘하여 영구적으로 1차 지보재로서의 역할을 하여야 한다. 그러나 슛크리트는 초기 급결력의 확보를 위해 급결제를 사용하기 때문에 급결제의 품질과 콘크 리트의 제반 여건에 따라 리바운드량이 증가하고 시공능률이 저하되는 등 품질의 관리가 매우 까다롭 고 장기강도가 감소하는 문제가 있어 대부분의 현장에서 해결책에 부심하고 있으며 이와 함께 인체에 대한 유해성 및 환경오염의 감소방안이 해결해야할 당면과제로 부각되고 있다.

---

\* 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장, 공학박사

\*\* 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장, 기술사

\*\*\* 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 상무, 기술사

\*\*\*\* 삼성물산(주)건설부문 능동터널현장 공사부장, 기술사

특히, 환경문제에 있어서는 세계적으로도 환경에 유해한 급결제의 사용을 금지하고 있는 추세이며 아직도 이러한 급결제가 보편적으로 사용되고 있는 국내현실은 세계적 흐름에 뒤쳐져 있다 할 수 있다. 최근 이러한 문제의 해결방법으로서 급결력의 변화가 심하고 장기강도 손실이 크며 환경오염을 심화시키는 기존의 알루미늄네이트 및 실리케이트 급결제를 환경오염이 적고 품질이 우수한 새로운 종류의 급결제로 대체하려는 연구<sup>1),2)</sup>가 많이 진행되고 있다. 그 결과로 알칼리프리게 급결제와 시멘트광물계급결제가 개발되어 국내 현장적용을 활발하게 추진하고 있으나 실용화되기에는 아직 미흡한 상태에서 더 많은 개선을 필요로 하고 있다. 본 현장에서는 이러한 흐름에 따라 새로운 급결제의 적용을 시도하고자 하였으며 이를 위해 새로 개발된 각 급결제들의 성능을 검토하였으며 터키공사의 설계개선 사항으로 포함된 광물계 급결제를 가지고 실제 현장타설을 진행하게 되었다. 분말형인 광물계 급결제를 습식 시공에 처음 적용하기 위해서는 많은 시행착오를 극복하여야 했으나 시공장비의 개선과 다양한 시공조건의 변화를 통해 안정된 시공이 가능하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 시멘트 광물계 급결제를 변수로 현장시험시공을 실시하여 현장의 품질을 확보하였고 나아가 Single-Shell Tunnel 등 신개념의 Permanent Shotcrete Lining Tunnel 구축에 필수 선결 요소기술인 고성능 숏크리트의 개발 가능성을 확인 하였다.

## 2. 현장 소개

시멘트 광물계 분말형 급결제를 사용한 습식숏크리트 공법이 적용된 현장은 국도 24호선 중 밀양시와 울산시를 연결하는 구간 중 가지산을 통과하는 NATM 터널현장으로서 기존 도로는 산악지 2차선 도로로서 평면선형이 불량하고 종단구배가 급하여 사고위험과 이동성이 불량하였으므로 신설 노선으로 간선도로망을 구축하여 물류비용을 절감하고 이동성을 향상시켜 장래 교통 수요의 효율적인 대처와 지역간의 균형적인 발전을 도모하기 위해 터널을 계획하였다. 이 터널은 2차로 병렬터널로서 길이가 4,580m 와 4,534m 로 현재 시공 중이며 종단 구배는 배수와 환경유지 및 주행성 확보를 위해 0.92%로 설계되었다. 터널 내 평면곡선 반경은 R=1800m 이상이고 편구배 2%로서 운전자의 운전 습관을 고려하여 설계하였다. 터널내의 시설로는 비상주차대와 피난 연락갱의 방재시설을 각각 750m 정도의 간격으로 설치하였고 환기는 1개의 수직갱과 젯트팬에 의한 종류식 환기방식을 채택하였다.

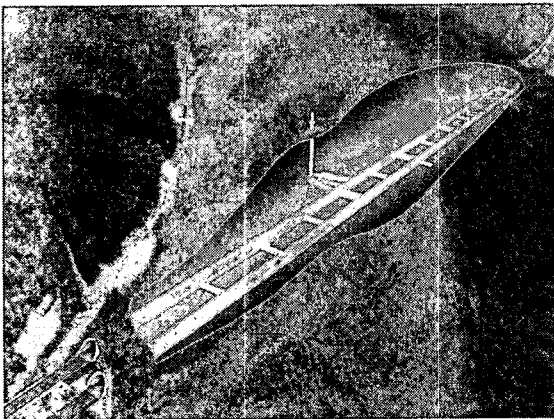


그림 1 터널현장 조감도

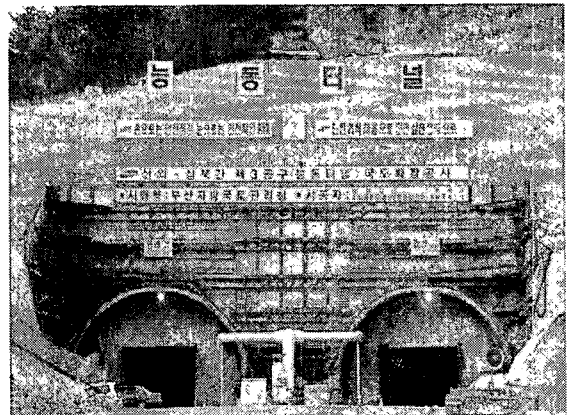


사진 1 터널현장 사진

### 3. 시멘트 광물계 급결제

썬크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 현재 국내에서 사용되고 있는 급결제 종류는 약 4가지로 실리케이트(몰유리계), 알루미늄네이트, 시멘트 광물계, alkali free계로 요약할 수 있다. 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 실리케이트계는 사용량 증가에 따른 장기강도 저하와 급결에 사용되지 않은 잉여분의 배출에 따른 환경오염, 작업 간 체내 흡수시 체외 배출이 힘든 단점을 가지고 있으며, 알루미늄네이트계는 현재 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 급결제로 국내에서도 사용이 증가하고 있는데 시멘트 수화반응을 촉진시켜 급결효과를 나타내며 실리케이트보다 우수한 장기강도의 발현이 가능하지만, 사용량이 초과하면 내구성 및 장기강도를 급격히 감소시키고 겔(gel)화 시간이 약간 느리며 pH11~14의 강한 염기성으로 작업자의 화상을 일으켜 프랑스, 노르웨이 등 유럽의 일부 국가에서는 사용을 금지하고 있다.

한편, 최근 건설 환경에 대한 관심증대로 요구되는 초기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않는 환경 친화적인 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 시험시공이 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인 제품으로 유럽에서 개발된 alkali free 액상급결제와 일본에서 개발된 시멘트 광물계(칼슘 알루미늄네이트) 분말급결제가 있다. 1990년대 중반 유럽에서 개발된 alkali free 액상형 급결제는 기존의 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 고강도 발현 및 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 각광받고 있다. 국내에서도 2~3종류의 alkali free 급결제가 생산되고 있으나 시공실적이 많지 않으며, 비교적 높은 단가(실리케이트의 2~3배)와 급결제 tank, 압송펌프, 압송관 등에 대해서는 부식방지를 위한 재료의 사용이 요구되는 단점이 있다. 한편, 노르웨이 도로국(NPRA)에서는 상품화된 여러 종류의 alkali free급결제에 대한 full scale test를 실시하였는데 일부 제품의 경우 용수부위에서 초기강도의 발현이 다소 늦어진다고 보고<sup>3)</sup>하고 있다.

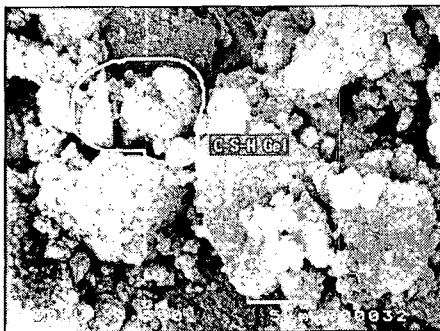
일본에서는 1960년대부터 강알칼리의 액상형 급결제를 사용해 왔으며 그 후 시멘트 광물계의 분말형 급결제가 개발되어 1980년대부터 분말형 급결제에 대한 사용 비율이 점점 증가하고 있다. 시멘트 광물계 급결제는 시멘트 중에 존재할 수 있는 급결성 광물인 칼슘 알루미늄네이트 광물을 별도로 합성하여 분쇄한 분말형 급결제로서 시멘트의 광물을 이용하기 때문에 급결성이 뛰어나고 강도의 발현이 안정적이기 때문에 특수시멘트가 발달한 일본에서는 급결제 시장의 90%이상을 점유하고 있다. 칼슘알루미늄네이트는  $CA_2$  로부터  $C_3A$  에 이르는 연속고용체로서 알루미늄 시멘트, 초속경 시멘트 및 특수시멘트에 광범위하게 적용되고 있는 광물이며,  $Ca(OH)_2$ 나 알칼리와 반응하면 급속한 수화반응이 진행되는 특징을 가지고 있다.

광물계 급결제 중 가장 급결력이 뛰어난 것은  $C_{12}A_7$  계로서  $C_{12}A_7$  은 결정질 보다는 비정질의 상태일 때 더 급결력이 우수하므로  $C_{12}A_7$  의 제조시 용융물을 급속 냉각하여 비정질화 하는 방법을 사용하고 있다. 현재 국내에서는 비정질  $C_{12}A_7$  을 주성분으로 하는 시멘트 광물계 급결제가 개발되어 이미 건축 시공현장에서는 상용화 되어 있다. 비정질  $C_{12}A_7$  은 자체적으로도 물과 반응하면 급속히 경화하는 특성이 있으며 포틀랜드시멘트와 혼합하면 급결하며 포틀랜드시멘트에 존재하는 석고에서 용출된  $SO_3$  와 반응하여 침상형의 에트린자이트( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ )를 다량 생성하여 초기강도를 발현한다. 에트린자이트는 포틀랜드시멘트의 초기 수화시 생성되는 광물로서 시멘트의 수화를 저해하지 않기 때

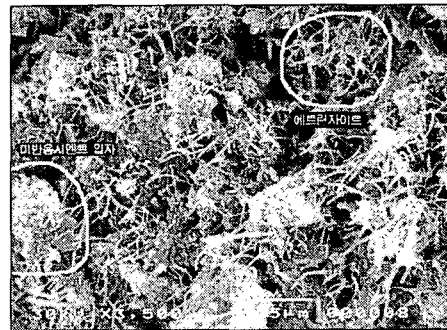
문에 장기적으로 강도손실이 거의 없으며 조건에 따라 고강도의 발현도 가능하게 한다. 시멘트 광물계 급결제의 가장 큰 특징은 급결력이 강하기 때문에 용수부위에서 숏크리트 타설이 용이하며 장기강도의 손실이 극히 적다는 점이다. 이러한 장점은 리바운드량의 감소와 함께 장기 강도를 높이기 위해 시멘트량을 절감할 수 있다. 또한 시멘트와 유사한 자극성 및 pH특성을 보이고 있어 환경오염 및 유해성이 적으며 분말이므로 콘크리트의 슬럼프 변화에 둔감하여 현장에서의 숏크리트 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만 광물계 급결제는 분말이기 때문에 현재 사용되는 액상급결제의 시공장비로는 시공이 힘들며 별도의 분말전용 공급장치를 필요로 하고 국내에는 관련 규정이 없지만 일본의 경우 법률로 분진발생을 엄격히 규제( $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ )하는 등 분말형 급결제 사용에 따른 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 주사전자 현미경(SEM)분석

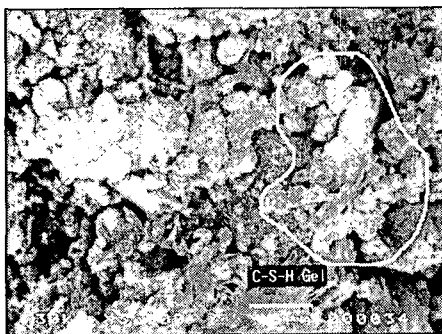
1종 보통 포틀랜드시멘트에 물 30%와 각 급결제를 현장의 실제사용조건을 감안하여 실리케이트계 12%, 광물계급결제 5%를 각각 혼합하여 균일하게 혼합한 후 시편을 만들고 혼합 후 실리케이트는 3시간 및 1일, 광물계급결제는 30분 및 1일 경과 후에 각각 아세톤에 2시간 동안 넣어 수화를 정지시킨 후 진공 건조하여 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.



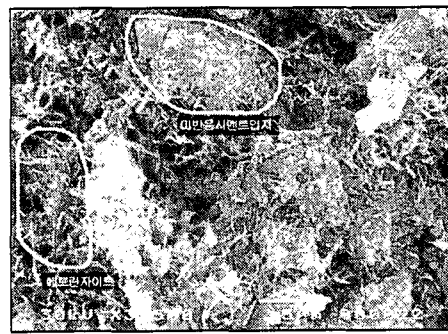
(a) 실리케이트 3시간 경과 후



(b) 시멘트 광물계 30분 경과 후



(c) 실리케이트 1일 후



(d) 시멘트 광물계 1일 후

사진 2 SEM을 통한 급결성능 분석

그 결과, 실리케이트 급결제의 초기 응결조직을 보면 시멘트의 입자나 수화광물은 보이지 않고 물 유리가  $\text{Ca(OH)}_2$  와 반응하여 생성된 겔상 물질로 시멘트 입자가 덮여 있는 상태로 관찰된다. 이는 초기에 물유리 자체가 시멘트에서 용출된  $\text{Ca(OH)}_2$  로 인해 순간적으로 겔화된 것이며 이 연질의 겔상은 시멘트 입자들을 피복하여 응집하지만 시멘트의 수화반응을 저해하므로 종결이 느리게 나타나는 특징을 나타낸다. 1일 경과시의 시편에서는 초기와 같이 시멘트 입자나 특별한 수화물은 관찰되지 않고 단순히 C-S-H 겔상이 초기 보다 더 작은 알갱이 형태로 나타나고 있다. 이것은 시간의 경과에 따라 초기 겔상 물질이 수축되며 갈라지고 시멘트와 계속 반응하여 안정화 되고 있음을 나타내나 시멘트 입자가 피복되어 있는 구조이기 때문에 장기적인 시멘트의 수화에 불리하며 이로 인해 원래의 장기강도의 감소가 일어나게 되는 것으로 판단된다.

한편, 시멘트 광물계의 30분 경과 후의 시편을 보면 수화 초기부터 응결 및 초기강도를 발현하는 중요한 광물인 에트린자이트 결정이 생성되어 거미줄 같이 번어 나와 미반응 상태인 시멘트 입자들을 결합시키고 있는 것을 관찰할 수 있다. 1일 경과 후의 조직을 보면 길이가 짧아지고 그물처럼 엉켜 안정화 되어 있는 에트린자이트의 결정을 관찰할 수 있으며 이 조직들은 미수화 입자와 공극을 유지하여 계속적으로 수화반응이 원활히 진행될 수 있는 형태를 가지므로 포틀랜드시멘트 자체의 강도를 저해하지 않을 것으로 판단된다.

## 5. 현장시험시공

### 5.1 사용재료

시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 세골재는 경북 경주산으로 비중 2.55, 흡수율 2.61을 사용하였고, 조골재는 울산시 중리산으로 비중 2.71, 흡수율 0.71, 최대입경 15mm 이하인 것을 사용하였다. 강섬유는 섬유 길이에 대한 직경의 비인 형상계수 60( $\phi 0.5 \times 30\text{mm}$ )의 Hook & bundle type(비중 7.85)의 제품을 사용하였다. 급결제(accelerator)는 국내 U사의 시멘트 광물계 분말형 급결제를 사용하였으며, 타설시 작업성 확보와 슬럼프 조절을 목적으로 나프탈렌계 유동화제를 사용하였다.

### 5.2 배합설계

본 시험에 사용된 재료의 배합을 표 1에 나타내었다. 금번 시험에 사용된 배합은 턴키공사 현장인 관계로 현장배합을 기준으로 시험을 실시하였으며, 본 급결제를 사용한 최적배합비 도출을 위해 새로운 시험이 현재 진행 중에 있다.

표1 슛크리트 배합설계

| Cement | Gmax<br>(mm) | Slump<br>(cm) | W/C<br>(%) | S/a<br>(%) | Air<br>(%) | Unit Weight<br>( $\text{kg/m}^3$ ) |     |      |     |                | accelerator<br>(%) | plasticizer<br>(%) |
|--------|--------------|---------------|------------|------------|------------|------------------------------------|-----|------|-----|----------------|--------------------|--------------------|
|        |              |               |            |            |            | W                                  | C   | S    | G   | Steel<br>Fiber |                    |                    |
| OPC    | 15           | 12±2.5        | 47.6       | 65         | 2.5        | 214                                | 450 | 1027 | 587 | 40             | C x 5.0            | C x 1.0            |

### 5.3 분말형 급결제의 습식샷크리트 시공 및 타설

광물계 급결제는 분말형태이므로 분말을 압축공기에 의해 정량적으로 이송할 수 있는 분말공급장치를 기존 샷크리트 장비에 추가하여 사용하였다. 금번 현장타설에 사용된 장비는 일본 Plibrico사의 Q-gun을 Putzmeister사의 습식장비에 결합하여 Y자관으로 급결제를 콘크리트에 투입하는 방식으로서 기존의 액상장비를 개조한 것이다. 이 장비는 국내의 대부분의 장비와 같은 Double piston 압송방식으로서 시간당 최대 20m<sup>3</sup>의 속도로 시공할 수 있다. 분말공급장치에서 압축공기에 부유된 분말급결제는 Y자관에서 콘크리트에 투입되고 노즐에 이르기까지 호스 내에서 혼합이 이루어진 후 노즐에서 분사되도록 하고 있다. 분말공급장치는 분말급결제를 급결제 탱크 하부의 회전원판에 의해 연속적으로 정량 배출하며 압축공기로 이송하여 Y자관으로 공급하는데 이때 압축공기에 수분이 있으면 급결제가 경화하여 폐색이 발생하므로 압축공기는 air dryer에서 수분을 완전히 제거하여 공급하게 된다. 급결제의 배출량은 인버터의 주파수를 조절하여 원판을 구동하는 모터의 회전수를 변경함으로써 조정한다. 적용초기에는 장비 압축공기의 압력 밸런스의 문제로 Y자관에서 콘크리트가 역류되어 급결제와 함께 굳어 막히는 현상이 발생하는 경우가 많았으나 각 압축공기 연결부의 압력과 분말공급장치의 압력을 조절하고 분말공급장치의 일부를 개조하여 안정된 시공조건을 얻을 수 있었다.

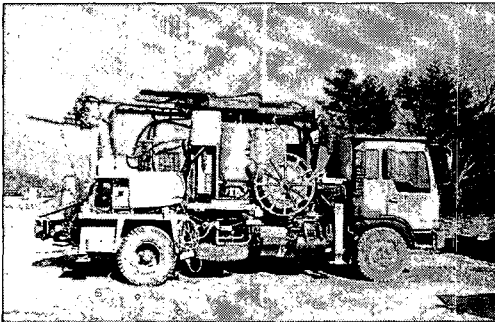


사진 3 Putzmeister 장비

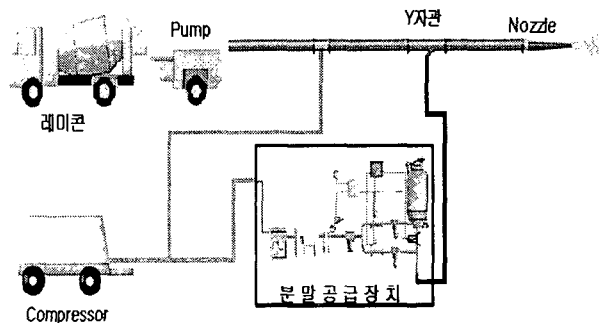


그림 2 분말형 급결제 습식샷크리트 장비 조합

### 5.4 시험항목 및 방법

#### 5.4.1 굳지 않은 콘크리트 시험

강도 시험용 패널에 타설 하기 전 배치플랜트에서 생산된 base concrete에 대한 슬럼프 경시 변화를 알아보기 위해 KS F 2402규정에 의한 콘크리트 슬럼프 실험(12±2.5cm)과 KS F 2421의 공기실 압력방법에 의한 공기량 측정시험(2.5%)을 실시하였으며, 타설 전 콘크리트의 온도측정(18℃)을 실시하였다.

#### 5.4.2 압축강도(Compressive strength)시험

빔몰드(□ 15×15×55cm)를 사용하여 Plain (급결제 미첨가 콘크리트) 및 급결제를 혼합한 샷크리트의 강도를 측정하여 1일, 7일, 28일 강도를 비교하였으며 급결제 혼합 샷크리트의 경우 시간당 15~20 m<sup>3</sup>의 타설속도로 빔몰드에 분사하였다.

### 5.4.3 휨강도 및 휨인성 시험

휨강도 측정을 위해 강재 몰드(15×15×55cm)를 사용하여 슛크리팅 한 후 KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법)규정에 의거 1일, 7일, 28일 강도 측정을 실시하였다. 휨인성시험은 지간길이 45cm의 3등분점 재하법으로 휨인성을 평가하였으며, 처짐 측정을 위해 LVDT를 보의 중앙에 설치하였고 재령 28일 등가휨강도(Equivalent flexural strength,  $f_e$ )는 아래의 식을 통해 처짐( $\delta$ )이 지간( $l$ )의 1/150(=3.0mm)이 될 때까지 하중-처짐 곡선 아래 면적( $T_b$ )을 구해 산정하였다.

$$f_e = (T_b / \delta_{150}) \times (l / bh^2)$$

## 6. 결과 및 분석

### 6.1 강도 시험결과

압축강도, 휨강도 및 휨인성 시험 결과를 표2에 나타내었다. 전체적으로 볼 때 시멘트 광물계 급결제를 사용한 슛크리트는 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험에서 국내의 관련 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

표2. 강도시험결과

(kgf/cm<sup>2</sup>)

| 시험    | 구분        | 재령 1일 | 재령 7일 | 재령 28일 |
|-------|-----------|-------|-------|--------|
| 압축강도  | plain     | 93.8  | 276.3 | 396    |
|       | Shotcrete | 125   | 281   | 350    |
| 휨강도   | Plain     | 17.1  | 46.1  | 58.4   |
|       | Shotcrete | 23.6  | 41.2  | 50.0   |
| 등가휨강도 | Plain     | -     | -     | 42.3   |
|       | Shotcrete | -     | -     | 36.7   |

먼저, 압축강도 결과를 살펴보면 1일 압축강도 100kgf/cm<sup>2</sup> 을 확보하였으며, 재령 7일 이후에는 급결제 첨가 여부와 관계없이 압축강도 210kgf/cm<sup>2</sup> 이상이 발현되었다. 재령28일에는 350kgf/cm<sup>2</sup> 로 plain 콘크리트 강도의 88%를 확보함으로써 높은 초기강도와 함께 범용 급결제가 가지는 장기강도의 저감을 극복하고 고강도화로 영구 슛크리트 지보시스템 구축이 가능한 품질을 확보하는 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 휨강도 및 휨인성 시험에서도 관련 규정(한국도로공사, 28일 휨강도 45kgf/cm<sup>2</sup>, 등가휨강도 30.6kgf/cm<sup>2</sup>, 휨인성계수 68% 이상)을 만족하는 것으로 나타났으며, 재령 28일의 등가휨강도를 기준으로 할 경우 20% 향상된 결과를 보였다. 참고로 본 배합은 현장배합을 사용한 결과로 최적 배합비를 도출하여 적용할 경우 더욱 우수한 성능이 기대될 것으로 판단된다.

### 6.2 리바운드 평가

스�크리트를 발파면(천정 및 측벽부)에 Sealing 하면서 리바운드량을 측정하였다. 이때 급결제 종류에 따른 리바운드양을 비교하기 위해 실리케이트계와 시멘트광물계 2종류를 같은 장소에서 타설 하였으며 타설현장 바닥에 시트를 깔고 급결제별로 각각 2m<sup>2</sup> 씩 타설한 후 리바운드된 재료를 모아서 무게를 측정하여 슛크리트 총무게에 대한 백분율로 표시하였다. 실리케이트계는 현재 사용 중인 Normet 장비로 타설 하였고, 시멘트광물계는 Putzmeister 장비로 타설 하였다. 리바운드 측정결과를 아래 표 3에 표시하였다.

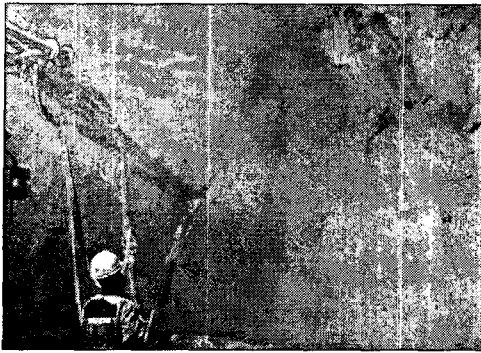


사진 4. 광물계 급결제 타설



사진 5. 리바운드 측정

표3 리바운드 측정 결과

| 급결제 종류     | 급결제 사용량   | 리바운드량  | 비 고                                      |
|------------|-----------|--------|--|
| 시멘트광물계(분말) | 시멘트량의 5%  | 12~15% | 급결제 별 2m <sup>3</sup> 의 슛크리트를 천정과 벽면에 타설 |
| 실리케이트(액상)  | 시멘트량의 12% | 16~19% |  |

### 6.3 분진평가

국내에는 관련 규정이 없지만 일본의 경우 법률로 분진발생을 엄격히 규제(3.0mg/m<sup>3</sup>)하는 등 터널 시공간 발생되는 분진에 대한 관심이 많으며, 일반 액상형 급결제와 비교했을 때 분말형 급결제의 사용은 분진이 다소 증가할 것이라 판단된다. 금번 실험에서는 디지털 분진계등 분진을 평가하는 장비 없이 운안관측 및 VTR 촬영을 통해 비교하였으며 그 결과, 액상형(실리케이트)과 비교했을 때 큰 차이가 없는 것으로 나타났지만, 보다 합리적인 평가를 위해 분진측정기를 도입하여 분진을 평가할 계획이다.

### 7. 결 론

최근 세계적인 도로 터널의 설계를 보면 산악터널에서 지하수의 수압에 대한 영향을 고려하지 않고 완전 배수형식으로 설계를 하고 있다. 또한, 국내 터널 설계기준에서도 수압의 영향을 고려하지 않는 배수형 터널설계를 기준으로 하는 등 양질 암반에서 콘크리트 라이닝의 기능이 점차 구조적인 역할에서 마감기능의 개념으로 변화되어야 한다는 인식이 확산되고 있다.

이러한 시점에서 국내 산악지형의 견고하고 양질의 암반조건을 고려할 때, 터널 지보패턴의 간소화와 내부 라이닝의 기능화, 간략화 등으로 공기 단축과 건설 경비를 최소화할 수 있는 영구지보 개념의 터널(NMT, Single-Shell Tunnel 등) 건설이 국내에서도 요구되고 있으며, 이러한 터널건설의 성패는 고성능 슛크리트의 기술 확보와 직접적인 관계가 있다고 할 수 있다. 국내 실정에 적합한 영구터널 지보시스템 개발을 목적으로 실시한 금번 기초실험의 결론을 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 시멘트 광물계 급결제를 사용한 슛크리트는 압축강도, 휨강도, 휨인성 시험에서 우수한 강도발현을 보였으며, 28일 압축강도 350kgf/cm<sup>2</sup> (plain 콘크리트 대비 88%), 등가휨강도는 관련 기준대비 20% 향상된 36.7kgf/cm<sup>2</sup> 를 확보하였다.



- 2) 시멘트광물계 급결제를 사용한 슛크리트의 리바운드양은 약 12~15% 정도로 실리케이트계 급결제를 사용한 경우(16~19%)보다 우수한 부착성능을 확보하는 것으로 판단된다.
- 3) 육안관측 및 VTR 촬영을 통한 분진 발생량 검토 결과, 액상 급결제와 비슷하게 관측되었으나 보다 합리적인 결과를 위해서는 디지털 분진계 등을 통한 측정이 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 본 현장시험시공을 통해 Single-Shell Tunnel 등 신개념의 Permanent Shotcrete Lining Tunnel 건설을 위한 슛크리트 요소기술의 개발 가능성이 확인 되었으며, 금번 시험이 현장에서 사용되고 있는 배합을 기준으로 한 결과이기 때문에 향후 추가시험을 통한 최적배합비 산출을 통해 단위시멘트량의 절감범위, 장기내구성, 분진발생량, 경제성 및 시공성 분석 및 해석에 사용되는 탄성계수 등 물성치 산정에 대한 검토가 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 현재 당사에서 추진중인 기술개발과제("신개념 터널 라이닝 공법 개발")의 기초연구결과 의 일부로서 본 모형시험을 수행하는데 많은 협조를 주신 (주)유니온 연구소의 조남섭 부장님께 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제 (2002.5) "Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(I) 고강도 슛크리트 개발을 위한 alkali-free 급결제 적용", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol.14, 건설업체 기술발표회.
2. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제 (2002.11) "Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발(II) 용수(湧水)부에서의 조강시멘트 적용", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol.15, 건설업체 기술발표회.
3. E.Grov., "Active Design in Civil Tunnelling with Sprayed Concrete as a Permanent," International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Australia, 2001, pp.123-133.
4. 건설교통부(1999), 터널표준시방서, (사)대한터널협회
5. 건설교통부(1999), 터널설계기준, (사)대한터널협회.
6. 건설교통부(1996), 콘크리트표준시방서.
7. ACI (1995), Reported by ACI Committee 506 Specification for Shotcrete.
8. EFNARC(1996), European Specification for Sprayed Concrete Guidelines for Specifiers and Contractors.
9. (社)日本トンネル技術協會(1996), トンネルの吹付けコンクリート.