

# 터널의 SHOTCRETE 최적배합에 관한 실내 및 현장 모형 실험 연구

## Laboratory and Field Model Study on the Optimum Mix of Shotcrete in Tunnel Construction

오 병 환\*      박 칠 립\*\*      백 신 원\*\*\*      장 성 욱\*\*\*\*  
Oh, Byung Hwan    Park, Chil Lim    Paik, Shin Won    Jang, Sung Wook

.....

### 요 약

최근들어 고속도로, 고속철도, 지하철 등의 건설이 급격히 증가함에 따라 터널의 건설이 늘어나고 있다. 이러한 터널등의 건설에서 필수적으로 따르는 것이 shotcrete의 시공이며 이러한 shotcrete의 시공은 앞으로 더욱 증가할 추세에 있다.

그러나 shotcrete의 광범위한 시공에도 불구하고 현재 여러가지 문제점을 내포하고 있는 것이 사실이다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라 현행 shotcrete의 현황과 문제점을 알아보고, 실내실험 및 현장 모형실험의 광범위한 실험을 통해 최적배합을 도출하였다. 이 때 적정의 소요강도를 발현하면서 리바운드율이 최소인 배합을 최적배합으로 하였다. 결국 본 연구에서 도출된 최적배합은 앞으로 우리나라에서 성능이 우수하고 고품질의 shotcrete시공을 위한 중요한 토대를 제공하게 될 것으로 사료된다.

### Abstract

Recently, tunnels are increasingly constructed in this country with the increased construction of highways, high-speed railways and subways. Shotcreting is one of the major processes in the tunnel construction. Many problems, however, exist in the current shotcreting practice. The purpose of the present study is, therefore, to explore the problems in the current shotcreting practice, to derive an optimum mix for efficient shotcreting. To this end, extensive experimental study has been conducted. Optimum mixes with high quality and economy were derived. The present study provides a firm base in our country to apply high-quality shotcrete in tunnel construction.

**Keyword :** shotcrete, optimum mix, compressive strength, rebound ratio, dry-mix type, wet-mix type

.....

---

\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정희원, (주)대우 건설기술연구소 소장  
\*\*\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 박사과정 수료  
\*\*\*\* 정희원, (주)대우 건설기술연구소 연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 1994년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

NATM(New Austrian Tunnelling Method) 공법이 소개되면서 터널시공에서는 이 공법이 획기적인 공법으로 인정받게 되었다. 재래식 터널공법과 비교해 NATM 공법의 가장 큰 차이는 지보재로서 steel rib, rock bolt, shotcrete가 지반의 이완을 억제해 준다는 점이다. 이중 특히 shotcrete 분야는 shotcrete 타설장비의 발달로 점점 그 기술이 발전을 해 왔으며, 이러한 추세는 1973년 ASCE와 ACI가 공동으로 주최한 special conference 이후 더욱 가속화되었다. 그러나 현재까지의 모든 정보를 집대성하고 이를 다시 체계있게 정리하여 shotcrete의 설계 및 시공에 관한 지침서가 될만한 업적은 희귀한 상태이다.

더욱이 우리나라에서는 shotcrete에 관한 경험 및 연구실적이 일천하여 shotcrete용 골재, 급결제, 공법 및 장비 등의 선택에 일관성이 없고 특히 표준배합을 결정하기 위한 연구가 미미하여, shotcrete 배합은 외국의 시방서나 시공사례를 참고하고 있는 실정이다. 따라서 이 분야의 연구는 절실하다 하겠다.

본 연구는 shotcrete의 성능개선을 위하여 현행 shotcrete의 기술 수준 파악 및 문제점 도출, 실내 및 모형시험을 통한 최적배합을 도출하여 개선된 shotcrete를 현장에 적용, 고품질 shotcrete를 얻는데 그 목적이 있다.

## 2. Shotcrete 최적배합의 실내시험

### 2.1 개요

shotcrete의 초기강도 및 장기강도에 영향을 미치는 요소들은 단위시멘트량, 물-시멘트비, 잔골재, 골재 최대치수, 급결제량 등을 들 수 있다. 본 실내시험에서는 실험변수를 단위시멘트량, 잔골재율, 급결제량 등으로 정하고 이러한 변수들이 shotcrete의 초기강도 및 장기강도에 어떠한 영향을 미치는지를 알아내는데 그 목적이 있으며, 또한 경제성 및 강도를 분석하여 최적배합을 도출하는데 그 목적이 있다.

## 2.2 사용 재료

### 1) 시멘트

shotcrete용 시멘트는 보통 콘크리트에 쓰이는 시멘트와 같으며 보통 포틀랜드 시멘트가 제일 많이 쓰인다. 구조물에 따라서는 시공후 될 수 있으면 빨리 강도를 발생시킬 필요가 있는 경우 또는 시공후의 양생기간을 충분히 취할 수 없는 경우에는 조강 포틀랜드 시멘트, 초속경 시멘트 등을 쓰는 경우도 있다. 또 shotcrete가 염분의 영향을 받을 특수조건에 노출되는 경우에는 내구성이 높은 시멘트, 가령 고로시멘트 등을 사용하는 것도 가능하다. 본 실내시험에서는 시중에서 판매되는 S사 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

### 2) 골재

shotcrete용 골재는 일반 콘크리트용 골재와 마찬가지로 깨끗하고, 단단하며, 질기고, 내구적이며, 적당한 입도를 가지고, 화학적으로 안정하여 shotcrete에 적합한 것이어야 한다. 얇은 석편, 가느다란 석편, 찰흙, 유기불순물, 염분 등의 유해물질을 포함해서는 안된다. 본 실내시험에서는 서울근교의 하천에서 채취된 잔골재를 사용하였으며 이 잔골재의 비중은 2.59이고 흡수율은 1.48%이었다. 또한 잔골재의 조립률은 KS F 2526의 잔골재의 조립률 2.3-3.1 범위안에 들어오는 2.71로 나타났다.

shotcrete에 사용되는 굵은골재 또한 일반 콘크리트에 사용되는 강자갈이 적합하며 굵은골재의 최대치수가 크면 시공시에 리바운드가 많고 호스속을 폐쇄시킬 염려가 있어 적절한 최대치수 및 입도분포를 갖는 굵은골재를 선정하는 것이 중요하다. 최근에는 적당한 입도의 강자갈을 구하기 힘들기 때문에 쇄석골재를 사용하는 경우가 많다. 따라서 본 실내시험에서도 현장에 적용할 수 있는 결과를 얻기 위해 현장에서 많이 사용하는 15mm 이하 쇄석골재를 사용하기로 하였다. 본 실내시험에 사용된 굵은골재의 비중은 2.59이고 흡수율은 1.63%이었다. 또한 쇄석골재의 조립률도 6.57로 KS F 2526 굵은골재의 조립률 6-8 범위에 들어오는 결과를 나타냈다.

### 3) 급결제

shotcrete는 일반 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하고 있다. 따라서 초기강도를 필요로 하는 shotcrete에는 급결제를 사용하는 것이 보통이다. 급결제는 리바운드량을 적게하고 setting을 빠르게 하여 초기강도를 크게하는 역할을 한다. shotcrete용 급결제의 유효성분은 수용성염인 sodium carbonate, sodium aluminate, calcium hydroxide이다. 상품화된 급결제는 액상과 분말 제품의 두 종류로 시판되고 있고 건식공법에서는 분말 급결제를 사용하고 습식공법에서는 액상 급결제를 사용하고 있다. 현재 국내현장에서는 습식장비가 비싸기때문에 건식공법이 주류를 이루고 있다. 표1은 본 실험에 사용된 급결제의 물성이다.

Table 1 Properties of accelerator

Density	PH	Shape	Main Component
0.8	13	White powder	Carbonate and aluminate

### 2.3 시험방법

#### 1) 배합

본 실내시험에서는 shotcrete의 초기강도 및 장기강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 단위시멘트량, 잔골재율, 급결제량 3가지를 시험변수로 택하였다. 물-시멘트비는 45%로 하고 단위시멘트량은 400kg/m<sup>3</sup>, 450kg/m<sup>3</sup>, 500kg/m<sup>3</sup>등 3단계로 변화시키면서 시험을 실시하였고, 잔골재율(S/a)은 50%, 60%, 70% 등 3단계로 변화시켜서 시험을 진행하였다. 또한 급결제량(A/C)은 3%, 5%, 7% 등 3단계로 변화시키면서 시험을 실시, 총 27가지의 배합조합에 의해 시편을 제작하였고 표2는 이러한 배합조합 및 시료번호를 나타내고 있다.

표2에 제시된 27가지의 조합가운데 "A-II-3"의 계산예로 들면 다음과 같은 배합설계가 되는데, 이 방법은 나머지 조합의 배합설계에도 모두 동일하게 적용된다.

◆배합설계 예(단위시멘트량 : 400kg/m<sup>3</sup>, s/a : 60%, W/C : 45%)

콘크리트 1m<sup>3</sup>에 대하여

물의 중량 : 400 × 0.45 = 180kg

시멘트 중량 : 400kg

시멘트 용적 : 400/3.144 = 127.23l

공기량 : 2.5%

골재의 절대용적 : 1000 - 180 - 127.23 - 25 = 667.77 l

잔골재 용적 : 667.77 × 0.6 = 400.66 l

굵은골재 용적 : 667.77 × 0.4 = 267.11 l

잔골재 중량 : 400.66 × 2.59 = 1037.71kg

굵은골재 중량 : 267.11 × 2.59 = 691.81kg

표면수를 고려한 경우(잔골재 및 굵은골재 표면수량 2.5%, 0.5%)

시멘트 중량 : 400kg

잔골재 중량 : 1037.71 × 1.025 = 1063.65kg

Table 2 Mixing and specimen number(Lab. test)

Cement content (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	A/c (%)	Specimen
400	50	3	A-I-3
		5	A-I-5
		7	A-I-7
	60	3	A-II-3
		5	A-II-5
		7	A-II-7
	70	3	A-III-3
		5	A-III-5
		7	A-III-7
450	50	3	B-I-3
		5	B-I-5
		7	B-I-7
	60	3	B-II-3
		5	B-II-5
		7	B-II-7
	70	3	B-III-3
		5	B-III-5
		7	B-III-7
500	50	3	C-I-3
		5	C-I-5
		7	C-I-7
	60	3	C-II-3
		5	C-II-5
		7	C-II-7
	70	3	C-III-3
		5	C-III-5
		7	C-III-7

굵은골재 중량 :  $691.81 \times 1.005 = 695.27\text{kg}$

물의 중량 :  $180 - 25.94 - 3.46 = 150.60\text{kg}$

## 2) 시편 제작방법

배합설계에 따라 재료를 계량하고 삼비빔으로 시료를 고르게 섞은 후  $10 \times 20\text{cm}$  원주형 강물드에 각층마다 25회씩의 3층다짐을 하고, 이후 진동기에 1분가량 진동다짐으로 공시체를 제작하였다. 공시체를 제작한 후 24시간 경과하기 이전에 물드를 제거하고 시험전까지  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 항온수조에 넣어 수증양생을 실시하였다. 한 조합의 배합설계마다 6개의 공시체를 제작하였고 이 중에는 3개는 1일 압축강도를, 나머지 3개는 28일 압축강도를 측정하는데 사용하였다.

## 3) 강도시험

공시체의 압축강도 시험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험의 규정에 따라 실시하였다. 압축강도 시험기는 최대용량 200t인 유압식 MORI 압축시험기로 충격하중을 주지 않도록 세심한 주의를 기울이면서 매초  $3.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 표준으로 하중을 공시체가 파괴될 때까지 가압하고 이때의 하중을 기록하여 이것을 단면적으로 나눈 값을 압축강도로 하고  $0.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 정밀도까지 계산하였다. 압축강도는 각 공시체의 압축강도의 평균치를 말하며 10%이상의 편차를 보이는 공시체는 계산에 포함시키지 않았다.

앞에서 기술한 바와 같이 27가지의 배합조합에 대하여 각조합마다 6개씩 총 162개의 원주형 공시체를 제작하고 각조합의 3개의 공시체는 1일 압축강도를 나머지 3개의 공시체는 28일 압축강도를 측정하였다. 각 배합조합의 1일 및 28일 평균압축강도는 표3과 같다. 이때 공시체의 직경은 10cm, 높이는 20cm이다.

## 2.4 시험 결과 분석

### 1) 급결제량에 따른 1일 및 28일 압축강도

급결제량이 3%, 5%, 7%인 경우에 대하여 1일 압축강도는 그림1에서 볼 수 있는 바와 같이 5% 급결제량일 때 일반적으로 가장 큰 압축강도 경향을 보였다. 이는 기존의 보고된 자료의 경향과 동

Table 3 Compressive strengths at 1 day and 28 days

Specimen	1day-compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	28day-compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )
A- I -3	83.8	257.5
A- I -5	75.8	236.1
A- I -7	79.2	229.0
A- II -3	68.4	223.1
A- II -5	77.7	211.2
A- II -7	56.3	176.2
A- III -3	49.9	152.3
A- III -5	49.3	119.5
A- III -7	23.9	89.5
B- I -3	76.8	273.1
B- I -5	81.3	243.7
B- I -7	73.3	231.6
B- II -3	77.1	268.2
B- II -5	69.9	223.4
B- II -7	49.3	233.0
B- III -3	59.8	248.6
B- III -5	72.6	199.1
B- III -7	52.2	153.8
C- I -3	74.3	306.3
C- I -5	83.5	282.9
C- I -7	61.1	231.5
C- II -3	51.8	260.8
C- II -5	78.0	253.7
C- II -7	60.2	217.3
C- III -3	78.0	253.9
C- III -5	77.1	218.3
C- III -7	58.2	161.2

일한 결과로서 급결제량이 5%를 상회하는 경우 오히려 초기강도는 더 떨어지는 역효과를 가져올 수 있다. 따라서 shotcrete에서 무엇보다도 중요시하는 초기강도의 발현을 위해서는 급결제량이 5%일 때가 최적임을 알 수 있었다.

급결제량이 3%, 5%, 7%인 경우에 대하여 28일 압축강도는 그림2에서 볼 수 있는 바와 같이 점점 감소하는 경향으로 기존의 자료와 동일한 결과를 보였으며, 리바운드량이나 초기강도 발현을 위해 첨가되는 급결제는 장기강도에 상당한 악영향을 끼침을 알 수 있었다. 따라서 과다한 급결제사용은 지양되어야 하며 필요최소한의 양을 사용해야 할 것이다.

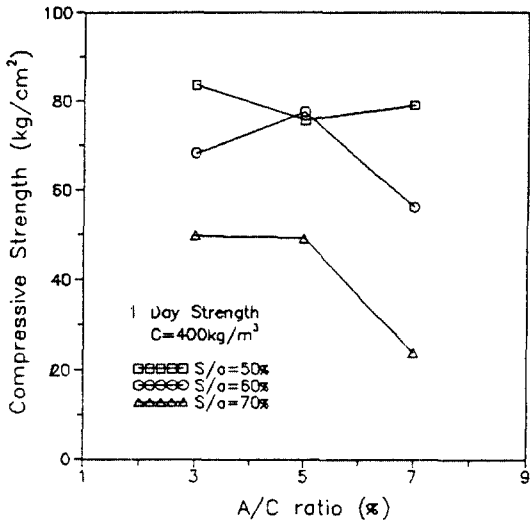


Fig. 1 1 day-compressive strength according to accelerator content (C=400kg/m<sup>3</sup>)

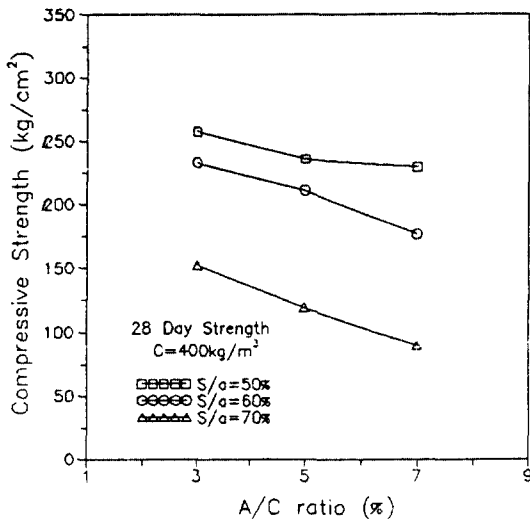


Fig. 2 28 day-compressive strength according to accelerator content (C=400kg/m<sup>3</sup>)

2) 잔골재율에 따른 1일 및 28일 압축강도

잔골재율이 50%, 60%, 70% 증가함에 따라 1일 및 28일 압축강도 모두 그림3, 그림4에 나타난 것과 같이 전반적으로 감소하는 경향으로 일반콘크리트와 같은 결과를 보였다. 이것은 실내에서 shotcrete 배합을 하여 몰드로 공시체를 제작하였기 때문에 shotcrete와 같은 재료의 리바운드 효과가 없으며 단지 일반콘크리트에 급결제만이 더 들어

가 것으로 일반콘크리트의 경향을 보이는 것은 지극히 당연한 사실이다. 따라서 강도측면에서는 잔골재율이 낮은 것을 사용하는 것이 좋으나 실제의 shotcrete 시공에서는 뿔어 붙일때 잔골재율이 낮으면 리바운드가 많이 생기기때문에 잔골재율에 있어 상호 상반된 관계에 있는 리바운드와 강도를 고려한다면 잔골재율이 60%가 적당한 것으로 사료된다.

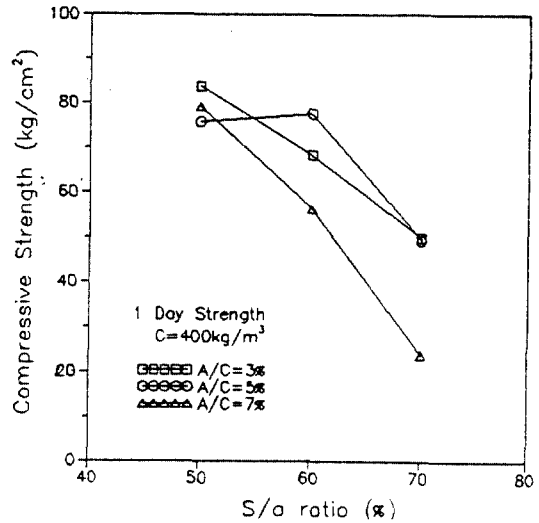


Fig. 3 1 day-compressive strength according to S/a ratio (C=400kg/m<sup>3</sup>)

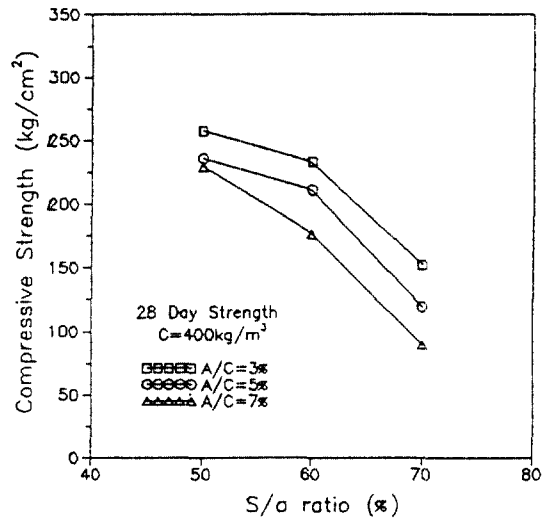


Fig. 4 28 day-compressive strength according to S/a ratio (C=400kg/m<sup>3</sup>)

3) 단위시멘트량에 따른 1일 및 28일 압축강도  
 단위시멘트량이  $400\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $450\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $500\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 점점 증가할수록 1일 압축강도에서는 점점 증가하는 경향으로 일반콘크리트와 같은 결과를 보였으나, 그 증가폭은 그리 크지 않았다. 그림5는 단위시멘트량에 따른 1일 압축강도를 보여 주고 있으며 28일 압축강도에서는 그림6에서 보는

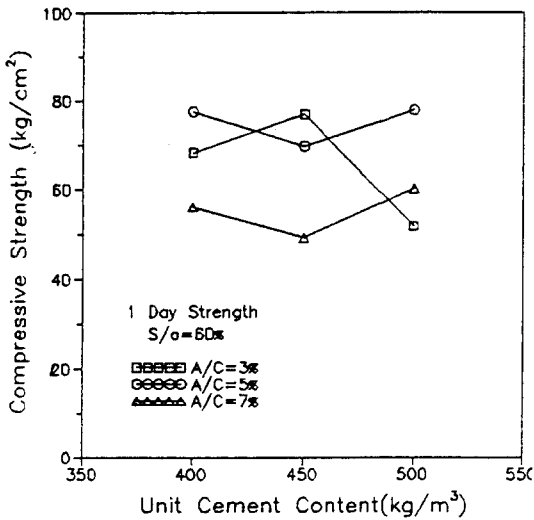


Fig. 5 1 day-compressive strength according to cement content ( $S/a=60\%$ )

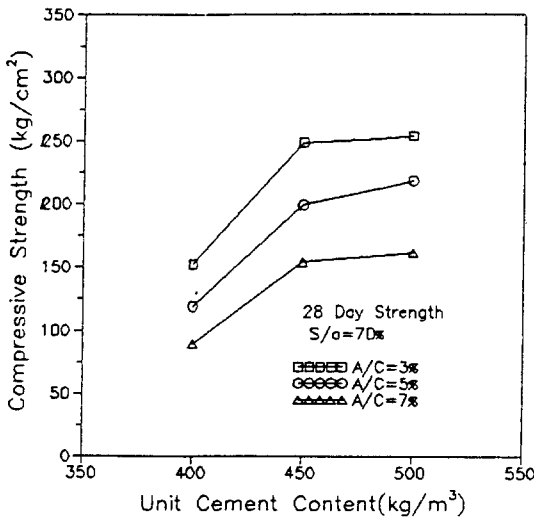


Fig. 6 28 day-compressive strength according to cement content ( $S/a=60\%$ )

바와 같이 단위시멘트량이 증가할수록 점점 증가하는 경향으로 1일 압축강도와 같은 결과를 보였으나 그 증가폭은 1일 압축강도보다도 더 큰 결과를 보였다. 일반적으로 shotcrete에서는 초기강도가 무엇보다도 중요하다. 따라서 단위시멘트량이 점증됨에 따라 초기강도의 증가폭이 그리 크지 않은 점과 shotcrete의 재료비용에서 시멘트가 차지하는 비중이 크다는 경제적인 측면을 고려한다면 본 실내시험의 단위시멘트량은  $400\text{kg}/\text{m}^3$ 이 최적이라 사료된다.

### 3. Shotcrete 최적배합의 모형시험

#### 3.1 개요

shotcrete의 압축강도, 인장강도 그리고 전단강도의 측정은 보통의 시험방법을 이용하여 수행될 수 있다. shotcrete는 초기강도 측정이 매우 중요하다. 이 경우 코아채취는 shotcrete의 경화가 불충분하기 때문에 물론 불가능하여 충격시험법 (schmidt hammer), 인발시험 (pull out test) 중 하나를 택하여 강도를 측정한다. 인발시험은 시료를 잡아당기는데 필요한 힘으로부터 전단, 인장강도를 계산하고, 그것으로부터 압축강도를 계산하는 방법이다. 그러나 이러한 방법들은 측정치들간의 분명한 상관관계를 보여주지 못할뿐만 아니라 측정된 결과의 정확도도 떨어진다.

shotcrete의 공사에 앞서 shotcrete의 양질의 품질관리나 경제적인 시공을 위해서는 리바운드량을 측정할 수 있는 시험이 선행되어야 한다. 지금까지 시험을 통해 보고된 리바운드량들은 시험마다 리바운드량에 영향을 미치는 인자들이 다르고 측정할 때마다 약 20%정도까지의 오차가 있기 때문에 서로 비교될 수 없다. 주로 리바운드량에 영향을 미치는 인자중 무시되어지는 것은 층의 두께이다. 건식공법이나 굵은골재를 포함한 shotcrete의 경우 두께의 효과는 매우 중요하다. 일반적으로 두께가 두께워질수록 리바운드량은 점점 감소하며, 평균 리바운드율은 노즐을 통해 뿜어지는 총재료의 중량을 리바운드되어지는 재료의 중량으로 나눈 값으로 정의한다.

본 모형시험에서는 실내시험에서 얻어진 최적의 배합비를 기준으로 잔골재율(S/a)과 급결제량(A/C)을 변화시키면서 시험을 실시 분석하여 실제 현장에 적용할 수 있는 최적의 배합비를 알아내는데 그 목적이 있다.

### 3.2 사용재료 및 장비

시험의 일관성을 위해 시멘트, 골재, 급결제 등은 실내시험에서 사용한 것과 동일한 것을 모형시험에서도 사용하였다.

#### 1) Panel

실제로 shotcrete 공사현장에서는 리바운드량을 측정하기가 매우 곤란하기 때문에 공사에 앞서 모형시험을 통해 배합설계량을 결정하게 된다. 이러한 모형시험은 shotcrete의 현장과 동일한 조건 하에서 실시되어야 하며 일반적으로 shotcrete 시험은 Panel을 제작하여 모형시험을 실시하여 shotcrete연구 및 분석을 하게 된다. 따라서 본 모형시험에서도 90cm×180cm 두께 12mm베니어 합판으로 그림7과 같이 shotcrete를 타설할 panel을 제작하였다. Panel의 앞면은 그림에서 보는 바와 같이 나무로 120×70×10cm 크기의 상자형틀을 만들고 뒷면은 shotcrete 장비의 압력이 높기 때문에 여러 개의 나무로 보강을 하였다.

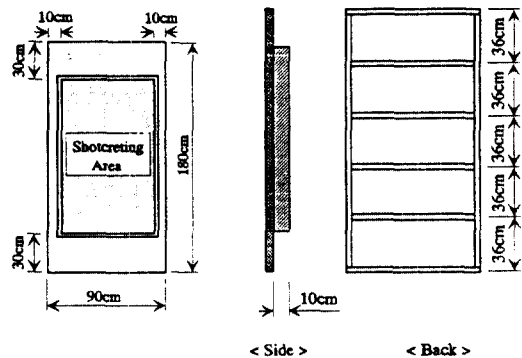


Fig. 7 Panel size

#### 2) 장비

shotcrete 타설을 위해서는 shotcrete 기계의

개발이 불가피하고 shotcrete의 발전이 shotcrete 기계의 개량을 가져오고 있다는 것은 말할 나위도 없다. 국내에 소개된 건식 shotcrete spray gun에는 크게 3종류가 사용되고 있으나 건식 shotcrete spray gun중에서 Aliva 260 type이 국내 반입량의 90%를 점유하고 있다. 따라서 본 모형시험에서도 Aliva 260 type shotcrete 장비를 사용하였다.

### 3.3 시험 방법

#### 1) 배합

실내시험으로부터 결정된 배합비인 단위시멘트량 400kg/m<sup>3</sup>, 물-시멘트비 45%를 일정하게 하고 잔골재율을 50%, 60% 등 2단계로 변화시키면서 모형시험을 실시하였고, 급결제량은 3%, 5%, 7% 등 3단계로 변화시켜 시험을 진행하였다.

각 배합조합에 의해 총 6개의 panel에 shotcrete를 타설하였다. 표4는 이러한 배합조합 및 시료 번호를 나타내고 있다.

Table 4 Mixing and specimen number(Field Model test)

Cement content (kg /m <sup>3</sup> )	S /a(%)	A /c(%)	Specimen
400	50	3	A- I -3
		5	A- I -5
		7	A- I -7
	60	3	A- II -3
		5	A- II -5
		7	A- II -7

표4에 제시된 6가지의 배합설계는 실내시험의 배합설계와 동일한 방법으로 하였으며 리바운드 되는 양을 고려하여 60%를 할증, 160%를 배합량으로 하여 시험을 실시하였다.

#### 2) 시험과정

모형시험을 위해 제작한 panel을 그림8과 같이 78°로 기울어진 벽면에 세워놓고 shotcrete 모형시험을 실시하였다. 본 모형시험은 J건설의 터널 공사 현장의 협조로 터널속의 벽면에 panel을 세워놓고, 또한 리바운드량을 측정할 수 있도록 천

막을 panel 밑의 주위에 깔아놓고 시험을 실시하였다. 시험을 실시하기에 앞서 물-시멘트비를 정확히 하기 위해 shotcrete 장비의 재료 및 물의 분출능력을 여러번의 시험 슛크리팅을 통해 구할 수 있었다. Aliva 260의 재료의 분출능력을 4m<sup>3</sup>/hr로 하고 물은 12kg/min으로 밸브를 고정, 전 모형시험을 물-시멘트비 45%로 유지하면서 시험을 실시하였다.

시험의 일관성을 위하여 모형시험에 필요한 재료를 시험전에 미리 계량한후 하루에 panel 6개에 슛크리팅을 실시하였다. 슛크리팅을 한후에는 일반 현장조건과 마찬가지로 기건양생을 실시하였고 3일이 경과한 후부터 직경 10cm의 코아를 채취하기 시작했다.

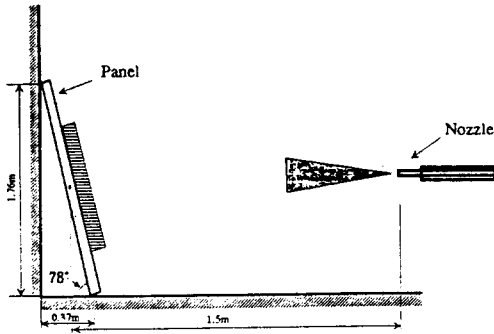


Fig. 8 Model test

### 3) 리바운드량 측정

panel을 벽면에 세워놓고 그 밑에 천막을 깔은후 panel에 슛크리팅을 실시, 천막에 리바운드된 콘크리트를 모아서 100kg까지 젤 수 있는 저울로 계량을 하여 다음식으로 리바운드율을 계산하였다.

$$\text{리바운드율}(\%) = \frac{\text{리바운드 중량}}{\text{스�크리팅된 재료 총중량}} \times 100 = \frac{W_r}{W_r + W_w} \times 100$$

여기서,  $W_r$  = 리바운드된 재료 중량

$W_w$  = 벽에 뱀어 붙여진 재료중량

### 4) 코아 채취

각 배합조합마다 panel에 슛크리팅을 하고 3일

이 경과한 이후부터 코아 채취기를 이용하여 직경 10cm인 코아를 채취하기 시작하였다. 또한 코아 채취는 터널 벽면에 세워놓고 슛크리팅한 panel을 편평한 곳에 눕혀 놓고 실시하였으며 코아채취기의 흔들림을 방지하기 위하여 steel wire를 이용 코아채취기를 고정하였다. 코아채취된 시료들은 20℃의 실내에서 기건양생을 한후 7일, 14일, 28일 강도를 측정하였다.

### 5) 강도 시험

shotcrete panel에서 채취된 시료들의 면은 고르지 못하기 때문에 grinder와 cutter기를 사용하여 시료의 면을 일정하게 한후 유황으로 capping을 하고 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 규정에 따라 코아 압축강도 시험을 실시하였다. 실내시험에서도 사용했던 최대용량 200t인 유압식 MORI 압축 시험기로 충격하중을 주지 않도록 세심한 주의를 기울이면서 매초 3.5kg/cm<sup>2</sup>를 표준으로 하중을 시료가 파괴될 때까지 가압하고 이때의 하중을 기록하여 이것을 단면적으로 나눈후 시료의 높이가 일정하지 않기 때문에 보정계수를 곱한 값을 압축강도로 하고, 0.1kg/cm<sup>2</sup>의 정밀도까지 계산하였다. 또한 실내시험과 마찬가지로 압축강도는 각 코아시료의 압축강도의 평균치를 말하며 10%이상의 편차를 보이는 코아시료는 계산에 포함시키지 않았다.

## 3.4 시험 결과

### 1) 리바운드율

각 panel마다 슛크리팅을 한후 천막에 떨어진 콘크리트를 모아서 계량을 하여 리바운드율을 측정 한 결과 표5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 결과들은 운반에 따른 재료의 손실이나 천막을 벗어난 리바운드량을 정확히 고려할 수

Table 5 Rebound ratio

Specimen No	Rebound ratio(%)
A-I-3	21.4
A-I-5	18.6
A-I-7	25.0
A-II-3	19.7
A-II-5	17.8
A-II-7	18.8



없기 때문에 약간의 오차는 있을 것이다.

## 2) 압축강도

각 배합조합에 대하여 6개의 panel에 슛크리트를 한후 각 panel마다 9개씩, 총 54개의 코아 시료를 채취하여, 각 배합조합마다 9개의 코아시료를 7일, 14일, 28일 압축강도를 측정하는데 각각 3개씩 사용하였다. 코아시료의 압축강도를 측정하기에 앞서, 높이를 기록하여 JIS A 1107의 높이에 따른 압축강도 보정계수를 강도측정후 곱한 값을 압축강도로 하였다. 표6은 보정계수를 곱한 평균 압축강도로서 각 배합조합의 7일, 14일, 28일 재령별 압축강도를 나타낸 표이다.

Table 6 Compressive strengths(kg/cm<sup>2</sup>)

Specimen No	7 days	14 days	28 days
A- I -3	134.2	174.7	201.9
A- I -5	127.3	164.8	198.3
A- I -7	128.7	165.7	191.4
A- II -3	156.2	182.8	213.0
A- II -5	146.8	169.6	210.1
A- II -7	140.3	166.1	209.8

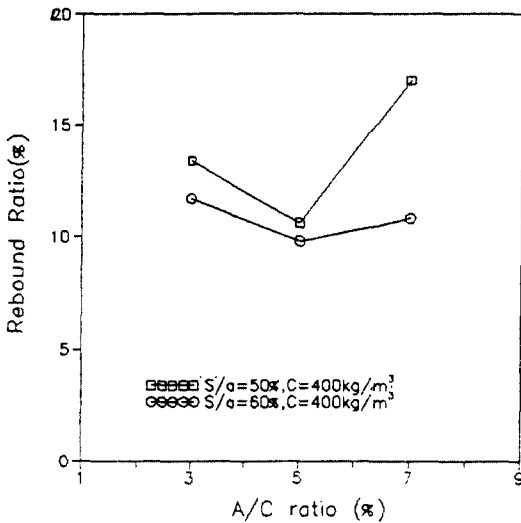


Fig. 9 Rebound ratio according to accelerator content

## 3.5 시험결과 분석

### 1) 리바운드율

그림 9에서 보는 바와같이 급결제량이 증가하면

리바운드율이 감소한다는 기존의 연구결과와는 달리 오히려 5% 급결제량에서 최소의 리바운드율을 보였다. 잔골재율이 50%, 60%인 경우를 비교하여 보면 잔골재율이 50%일때가 60%일때보다 더 큰 리바운드 경향으로 기존의 연구결과와 동일한 경향을 보였다. 따라서 급결제량은 5%가 리바운드면에서 적당하다.

### 2) 압축강도

그림10은 재령별 압축강도로서 그림에서 볼 수 있는 바와같이 재령에 따라 거의 선형적으로 강도가 증진되는 결과를 보였으며 그림11은 급결제량에 따른 압축강도인데, 급결제량이 3%, 5%, 7%로 증가함에 따라 강도는 점점 감소하는 경향을 보였으나 감소폭이 실내시험에서는 상당히 컸지만 본 모형시험에서는 그리 크지 않았다. 그림 12는 실내시험과 모형시험의 강도를 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와같이 잔골재율이 60%인 경우, 급결제량이 7%일 때를 제외하고 실내시험의 몰드강도가 모형시험의 코아강도보다 더 큰 압축강도 결과를 보였다. 이는 실내시험과 모형시험의 조건이 모두 같다고 볼때 본 모형시험에서 측정할 수 없었던 1일강도도 실내시험의 60-90kg/cm<sup>2</sup>강도를 상회하지는 않으리라는 생각을 증명해주는 결과이다. 따라서 실제의 현장 shotcrete의

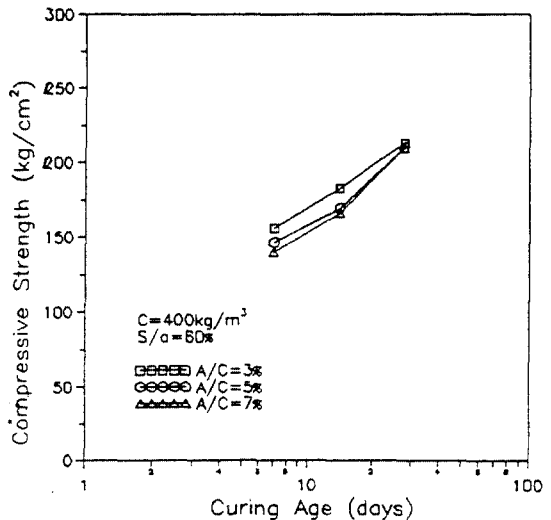


Fig. 10 Compressive strength according to curing age (C=400kg/m<sup>3</sup>, S/a=60%)

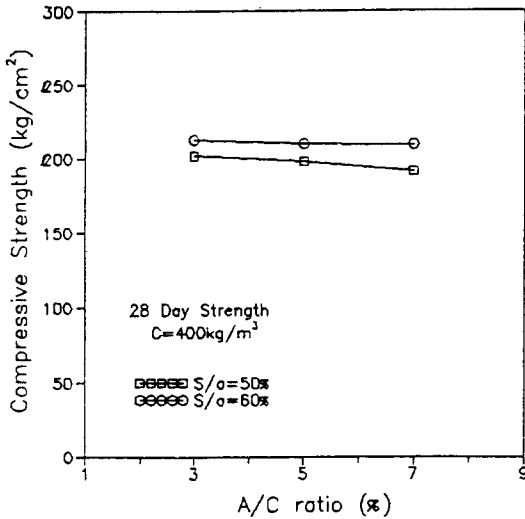


Fig. 11 Compressive strength according to accelerator content (at 28 days)

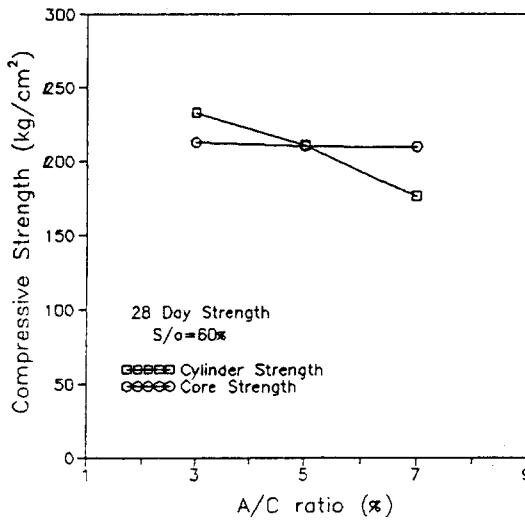


Fig. 12 Compressive strength comparison of laboratory test and field model test (S/a=60%)

1일 압축강도도 실내시험의 범위와 거의 비슷하거나 낮을 것으로 생각되어 현행 shotcrete의 1일 압축강도의 기준이 재정립되어야 한다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 쏘크리트의 성능개선을 위한 최적배합을 도출하기 위하여 실내시험, 현장모형시험을 포괄적으로 수행하였으며, 이로부터 얻어진

결론은 다음과 같다.

실내시험에서는 단위시멘트량이 증가함에 따라 일반 콘크리트와 같이 1일 및 28일강도는 증가하는 경향을 보였으나 증가폭은 그리 크지 않았으며, 잔골재율이 증가할수록 1일 및 28일 강도가 감소하는 경향으로서 일반콘크리트와 같은 경향을 보였다.

또한 급결제량에 따른 1일 강도에서는 급결제 5%인 경우가 전반적으로 큰 결과를 나타냈으며 28일 강도에서는 급결제량이 증가할수록 강도가 하락하는 결과를 보였다. 따라서, 최적배합은 C=400kg/m<sup>3</sup>, S/a=60%, A/C=5%로 나타났다.

모형시험에서의 리바운드량은 급결제량이 5%인 경우가 리바운드가 가장 적어 최적으로 나타났고 잔골재율이 클수록 리바운드량은 줄어드는 경향으로 나타났다. 따라서, 모형시험에서의 최적배합은 실내시험과 동일한 C=400kg/m<sup>3</sup>, S/a=60%, A/C=5%이 추천된다.

본 연구결과는 앞으로 우리나라에서 품질이 우수하고 경제적인 쏘크리트 시공을 위한 중요한 토대와 자료를 제시하는 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. D.R.Morgan, "High Early Strength Blended-Cement Wet-Mix Shotcrete," Concrete International, 1991, pp.35-39
2. D.R.Morgan, "Freeze-Thaw Durability of Shotcrete," Concrete International, 1989, pp.86-93
3. G.W.Seegbrecht, "Durability of Dry-Mix Shotcrete," Concrete International, 1989, pp.47-50
4. D.R.Morgan, "Dry-Mix Silica Fume Shotcrete in Western Canada," Concrete International, 1988, pp.24-32
5. S.H.Gebler, "Durability of Dry-Mix Shotcrete Containing Regulated-Set Cement," Concrete International, 1989, pp.56-58
6. "Shotcrete," 콘크리트 공학 Hand Book, pp. 565-576
7. "Shotcrete의 배합특성 시험 연구보고서," 대우엔지니어링, 1984
8. 中原 康, "Shotcrete 工法," 日本 콘크리트工学, 1985, pp.66-70

(접수일자 : 1994. 6. 3)