

## Fly Ash을 이용한 Shotcrete 재료의 개발에 관한 연구

한오형, 강추원<sup>1)</sup>

### A Study on Development of Shotcrete Material using Fly Ash

Oh-Hyung Han, Choo-Won Kang

**ABSTRACT.** Currently, the shotcrete used as basic support in the tunnel excavation, has the advantages of maintaining high-level strength in condition of early shooting with thin thickness based on the excavation characteristics of rock mass. Therefore supreme equipment and materials were developed and the great strides have continued.

Also, the development of measurement technology and the rocks behaviors of underground are evaluated in detail and the designs of strength and thickness are made. The reinforcement materials development of new material is carried on.

Most of the coal fly ash produced in Korea fire power plant is fly ash and bottom mash. Fly ash has been producing to be applied in many fields such as cement, aggregate, construction, civil, agriculture and fisheries. Also a lot of experiments are actively on the way. Therefore in this experiment, in order to use the fly ash mixed with concrete as a material of shotcrete, the experiment was performed in the best content to reduce the compression strength and the shooting rebound ratio of the excavated surface to use fly ash as a substitute material of concrete.

As a result, when 15%wt substitution was made to the fly ash, about 10% of compression strength and 6% of rebound ratio was reduced.

**Key words :** cshotcrete, fly ash, bottom ash, rebound ratio

**초 록.** 현재 터널 굴착시 기초 지보수단으로 활용되고 있는 슛크리트는 암반의 굴착 특성상 조기에 얇은 두께로 타설하여도 높은 강도를 유지할 수 있다는 장점 때문에 그동안 우수한 장비와 재료가 개발되어 비약적인 발전을 거듭해 오고 있다. 또한, 계측기술의 발달로 지하암반 거동상태도 조기에 자세히 파악되어 강도와 두께 등 거의 정확한 설계가 이루어지고 있으며, 신소재의 보강재료도 지속적으로 개발되고 있다. 국내 석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회에는 fly ash와 bottom ash가 있으며, 이러한 석탄회는 시멘트, 골재, 건축, 토목 및 농수산 분야에 이르기까지 많은 분야에 기술개발이 되었으며, 연구가 활발히 진행 중에 있다. 따라서, 본 연구에서는 fly ash를 혼합한 콘크리트를 슛크리트 재료로서 활용하기 위해 기존의 슛크리트 배합설계에서 fly ash를 시멘트의 대체재로서 사용할 때, 압축강도의 향상 및 굴착면의 타설 리바운드율을 저하시키는 최적의 함량에 대하여 실험을 실시하였다. 그 결과, fly ash를 시멘트에 15% 중량 치환했을 때, 약 10%의 압축강도의 향상과 리바운드율이 6% 감소되었다.

**핵심어 :** 슛크리트, 석탄회, fly ash, bottom ash, 리바운드율

## 1. 서 론

현재까지 국내외에서 터널 지보재로서 사용되고 있는 슛크리트 재료는 시멘트모탈+모래+자갈+급결제+분진저감제 등으로서 시멘트 배합비에 따라

그 강도가 결정되고 있으나 압축강도에 비해 인장 강도 및 전단강도가 낮은 결점이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위해 기존의 와이어 메시 보강제 외에 특수 생산된 강섬유와 화학섬유를 첨가하여 시공여건에 따라 사용되어 그 적용이 늘어가고 있다<sup>1)2)</sup>. 그러나, 강도 면에서 한계에 달하고, 작업중 리바운드 되어 떨어지는 재료의 손실이 크다. 그 손실량은 조건에 따라 달라지나 통상 30~45%나 되어 재료의 낭비뿐만 아니라 작업효율의 저하 및

1) 조선대학교 자원공학과

접수일 : 2003년 5월 6일

버럭처리로 인한 공사비가 크게 상승되고 있으며, 슛크리트의 높은 리바운드율의 문제는 여전히 남아있는 실정이다<sup>3),4),5)</sup>.

국내 석탄 화력발전소에서 생산되는 석탄회(fly ash)는 2001년을 기준으로 491만톤에 이르고 있으며, 지속적인 에너지 공급에 따른 석탄 화력발전소의 건립으로 인해 향후 석탄회는 2005년까지 570만톤에 이를 것으로 추정되고 있다. 아직도 상당량의 석탄회(36%)가 매립되고 있는 실정이며, 장차 회처리장 입지확보의 어려움과 환경보호의 문제성이 야기될 것으로 예상된다. 정부는 1998년부터 석탄회 재활용율을 회생산량의 35%, 2010년에는 80%로 책정하고 있으나, 아직까지 국내에서 발생하는 석탄회의 대부분이 시멘트 혼화제로만 사용되고 있어 재활용율을 높이기 위해서는 획기적인 시장개척이 절실하다<sup>6),7),8)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 석탄회 중 fly ash를 시멘트 대체재로서 슛크리트에 사용할 때, 일축압축강도의 향상 및 굴착면의 타설 리바운드율을 저하시키는 최적의 함량에 대하여 실험을 실시하였다.

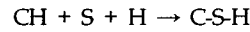
## 2. 석탄회

국내탄(무연탄)의 경우는 30~50%, 석탄(유연탄)은 10~15%정도의 회분을 함유하고 있어 이것이 보일러 내에서 연소된 후 석탄회가 되며, 석탄회는 연소온도, 탄종, 분쇄도, 체류시간에 따라 여러 가지 물리, 화학적인 성질이 변화된다. 미세한 미분상태로 미분탄은 연소되어 배연가스와 함께 보일러에서 배출되어 집진기 하부에서 포집되는데, 이 회를 fly ash(飛灰, 75-90%)라 하고, 보일러 하부에 낙하되는 괴상 또는 입자가 큰 회를 bottom ash(低灰, 10-25%)라 한다. Bottom ash는 분쇄기로 분쇄하여 fly ash와 같이 혼합돼 회처리장으로 이송 후 매립이 일반적이다<sup>9),10),11)</sup>.

### 2.1 포졸란성 시멘트

Pozzolan이란, 활성이 큰 부정형(amorphous)의 silica를 가지는 미세한 분말이며, 그 자체로는 수

경성이 없으나 수분의 존재 하에 석회(Ca(OH))와 반응하여 calcium silicate hydrate 결합을 형성할 수 있는 물질을 말한다.



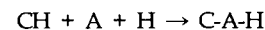
(C-S-H : Calcium silicate hydrate)

( C : CaO    H : H<sub>2</sub>O    S : SiO<sub>2</sub> )

Pozzolan은 포틀랜드 시멘트와 결합할 경우, 수화반응시 생성된 Ca(OH)와 반응하게 되어 Ca(OH)는 소모하면서 C-S-H의 비율을 증가시키게 된다.

Pozzolan 활성을 가지는 물질로는 화산재나 응회암등의 자연산과 fly Ash와 같은 인공적인 것이 있는데, 분말도가 좋고, 형태가 구형인 fly ash가 주로 쓰이는 pozzolan 물질이다. 자연산의 pozzolan 물질로는 규조토(Diatomite)가 있다. 규조토는 규조(Diatom)의 껍질로 바다 또는 호수 밑바닥에 침적하여 이루어지며, 연질의 암석 또는 흙덩이로서 약 95% 이상이 silica로 구성되어 있고, 아주 작은 빈 구멍 등이 대단히 많기 때문에 흡수력이 뛰어나 무게의 약 4배 정도의 액체를 흡수한다. 그 이외에도 화산재는 대표적인 자연 pozzolan 물질에 속한다. 인공적인 pozzolan은 ash가 대표적이라 할 수 있으며, fly ash는 구형이면서, 분말도가 양호하기 때문에 포졸란의 특성을 자체적으로 가지고 있으며, bottom ash는 자체가 porous 구조로 구성되어 있어 흡수력이 높은 pozzolan성 특징을 가지고 있다<sup>11),12)</sup>.

Pozzolan은 그 조성이 다양하며, alumina 등이 있는 경우에는 calcium aluminate hydrate를 만들게 된다.



(C-A-H : Calcium Aluminate Hydrate)

( C : CaO    H : HO    A : AlO )

Pozzolan을 시멘트와 섞어서 사용하게 되면 시멘트의 workability가 개선되고, 수화열의 발생이

낮아지며, 초기강도는 떨어지나 장기재령의 경우는 강도가 증진되고, 수밀성과 sulfate attack에 대한 저항성이 향상되는 장점이 있다.

### 3 실험개요

#### 3.1 배합재료

##### (1) 시멘트

시멘트는 제1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 화학적 성분과 함량은 표 1과 같다.

표 1. 시멘트의 화학적 성분과 함량

(단위 : wt%)	
조 성	함 량
SiO <sub>2</sub>	18.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.63
MgO	3.68
CaO	63.11
K <sub>2</sub> O	1.07
SO <sub>3</sub>	3.33

##### (2) Fly ash

shotcrete에 혼합되는 fly ash는 보령 화력발전소에서 발생하는 원료 fly ash를 한국 FLY-ASH 시멘트 공업(주)에서 정제한 제품을 사용하였으며, 화학적 조성, 분말도, 비중, SEM 사진, XRD 분석 등에 대한 실험결과는 아래와 같다.

##### 가. 화학적 조성

원료 fly ash에 대한 화학분석 결과는 표 2와 같으며, SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분이 각각 60.83%와 23.66% 그리고, CaO와 K<sub>2</sub>O성분이 각각 2.71%와 1.07%이며, 특히 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분이 약 3.48% 정도로 비교적 높게 나타나 있다.

##### 나. 분말도

Fly ash의 분말도는 SiO<sub>2</sub> 함량과 함께 포졸란활성도를 지배하는 주요 인자로서, 콘크리트의 워커

빌리티(workability)에 영향을 미치므로 매우 중요하다.

표 2. Fly ash의 화학적 성분과 함량

(단위 : wt%)	
조 성	함 량
SiO <sub>2</sub>	60.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.48
MgO	2.71
CaO	0.46
K <sub>2</sub> O	1.07
SO <sub>3</sub>	0.50

우리나라의 경우, KSL 5405 에서 fly ash의 분말도를 비표면적 2,400 cm<sup>2</sup>/g이상으로 규제하고 있으며<sup>13)</sup>, 미국은 ASTM C618에서 44 $\mu$ m 체 잔유량을 34% 이하로 그리고 일본은 JIS 6201에서 44  $\mu$ m 체 잔유량 34% 이하와 비표면적 2,700 cm<sup>2</sup>/g 이상으로 동시에 규제하고 있다. 분말도는 비표면적의 값이 크거나 44  $\mu$ m 체 잔유량이 적을수록 높아지며, 분말도가 높을수록 미세하여 포졸란 활성도가 증가하고, fly ash를 혼합한 콘크리트의 워커빌리티가 증가한다. 본 연구에 사용된 fly ash의 체분석 결과는 표 3과 같다.

##### 다. 비중

Fly ash의 비중은 석탄 내에 불순물로 존재하는 광물들에 따라 다소 다르지만 대체적으로 1.9에서 2.5내외의 비중을 갖는다. 일반적으로 국내탄의 경우, 회분 구성 광물중 철분 함량이 적어 2.1 정도의 비중을 갖고 있지만 유연탄은 회분 구성광물 중 철분 함량이 다양해 2.0에서 2.9까지 되는 경우도 있다.

비중이 fly ash의 특성에 미치는 영향은 불명확하지만 화학성분이 동일한 경우 비중이 가벼우면 분말도가 거칠고 시멘트 혼화 사용시 큰 강도를 기대하기 어렵다.

표 3. Fly ash의 체분석 결과

Size range (mesh)	Weight (%)	Assay (%)	Distribution (LOI%)	Size mesh( $\mu$ m)	Cumulative undersize (%)	Cumulative distribution (LOI%)
-500	55.92	2.03(1.13)	26.15	500( 25)	55.92	26.15
-400+500	12.68	2.27(0.29)	6.63	400( 38)	68.60	32.78
-325+400	5.17	2.97(0.15)	3.54	325( 45)	73.77	36.31
-270+325	3.41	4.27(0.15)	3.35	270( 53)	77.18	39.67
-200+270	6.68	5.98(0.40)	9.20	200( 75)	83.86	48.87
-170+200	5.12	7.12(0.36)	8.40	170( 90)	88.98	57.26
-100+170	6.65	11.98(0.80)	18.35	100(150)	95.63	75.61
-60+100	3.01	22.45(0.68)	15.56	60(210)	98.64	91.18
+60	1.36	28.17(0.38)	8.82	+60	100.00	100.00
sum	100.00	(4.34)	100.00			

## 라. 입자형태 및 크기

본 연구에 사용된 fly ash의 전자현미경 사진은 그림 1과 같다. 전자현미경 사진에서 fly ash 입자의 크기는 서로 다르지만 모든 입자들이 둥근 구형으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 따라서, 시멘트에 혼화시 ball bearing과 같은 작용을 하여 콘크리트의 유동성을 증가시키고, 골재사이의 공극을 치밀하게 충전시켜 콘크리트의 강도에 좋은 영향을 미치게 된다<sup>14)</sup>.

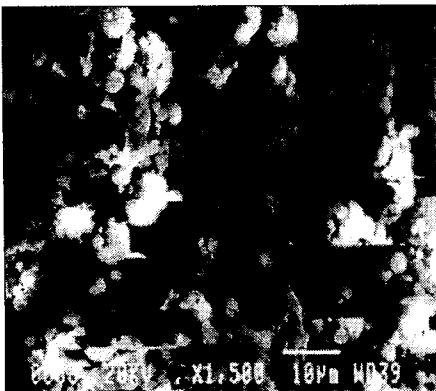


그림 1. Fly ash의 전자현미경 사진

## 마. XRD 분석

본 연구에 사용된 XRD는 (주) Rigaku의 Geiger flex Dmax이고, 200mesh이하의 시료 1g을 2 $\theta$ (10°~60°)를 1°/min 로 측정하였다. 그 결과, 석탄이 연소하기 전에는 석영, 장석, 운모, 고령토, 벤토나이트, 자철광, 황철광 등의 광물이 천연적으로 수반된 상태였으나, 석탄이 높은 온도에서 연소가 된 후에는 이러한 광물들이 열역학적 변화를 받아 그림 2에서와 같이 대부분이 mullite화 된 것을 알 수 있으며, 석영과 소량의 자철광이 함유되어 있음을 볼 수 있다<sup>15)</sup>.

## (3) 골재

숫크리트 배합에 사용되는 골재는 경상남도 진주시에서 채취한 잔골재(13mm)를 사용하였으며, 골재의 물리적 특성은 표 4와 같다.

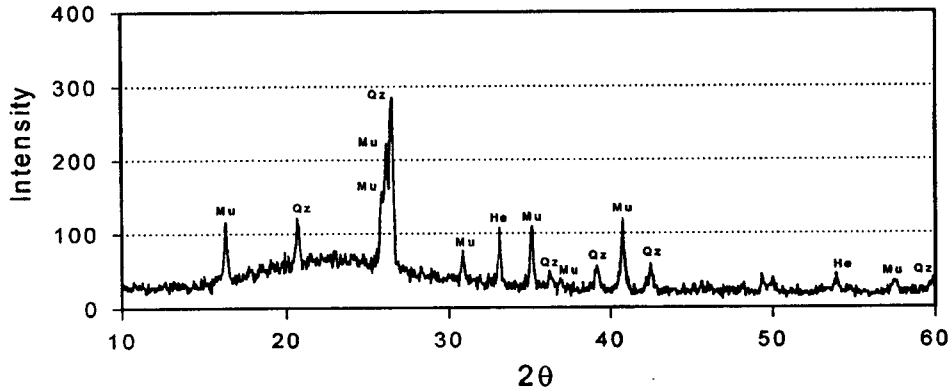


그림 2. 원료 fly ash의 XRD 분석

표 4. 골재의 물리적 특성

종 류	조립률	점토덩어리 (%)	씻기시험 손실량 (%)	마모감량 (%)	표건비중	흡수율 (%)	단위중량 (kg/cm <sup>3</sup> )	안정성 (%)
잔골재	7.32	0.1	0.3	14	2.68	0.86	1,540	4.0

(4) 급결제

현장 슛크리트 배합시 사용된 급결제는 국내 U사의 슛크리트용 분말급결제를 사용하였으며, 물리적 특성은 표 5에 나타내었다.

표 5. 급결제의 물리적 특성

성 분	성 상	비중(20℃)	pH
탄산염 및 알루미늄네이트	백 색	0.9	13±0.5

3.2 슛크리트의 배합

(1) Fly ash를 혼합하지 않은 슛크리트 배합

Fly ash의 혼합율에 따른 재령별 일축압축강도와 리바운드율의 증감을 조사하기 위해 표 6과 같이 fly ash를 혼합하지 않은 건식 슛크리트 배합을 설계하였으며<sup>16),17)</sup>, 실내 일축압축강도 측정에 사용된 슛크리트 배합은 급결제를 사용하지 않았다.

(2) Fly ash를 혼합한 슛크리트 배합

기존의 슛크리트 배합에 시멘트 대체제로서 fly ash를 중량 치환하여 5~35%까지 5%씩 증가하여 표 7과 같이 배합 설계하였다.

표 6. Fly ash를 혼합하지 않은 슛크리트의 배합

(기준 : 1m<sup>3</sup>)

구 분	C (kg)	W (L)	W/C (%)	GMAX (mm)	S/A (%)	S (kg)	G (kg)	급결제 (kg)
합 량	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2

표 7. Fly ash를 시멘트와 중량 치환한 슛크리트의 배합

(기준 : 1m<sup>3</sup>)

fly ash 함량 (%)	C (kg)	F (kg)	C+F (kg)	W (L)	W/(C+F) (%)	GMAX (mm)	S/A (%)	S (kg)	G (kg)	급결제 (kg)
0	380	·	·	171	380	15	60	1,092	742	15.2
5	361	19	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2
10	342	38	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2
15	323	57	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2
20	304	76	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2
25	285	95	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2
30	266	114	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2
35	247	133	380	171	45	15	60	1,092	742	15.2

C : 시멘트량, F : Fly ash 량, S/A : 세골재 율 W : 물의 량, S : 세골재 량,  
G : 조골재 량, GMAX : 최대 조골재 크기, C+F : 시멘트와 Fly ash의 치환 혼합량

### 3.3 실험방법

#### (1) 일축압축강도

일축압축강도의 측정에 사용된 공시체는 콘크리트 믹서기로 혼합한 후,  $\Phi 15 \times 30$ cm 원주형으로 제작하였으며, 공시체의 윗면은 몰드 탈형전에 캐핑을 실시하였고, 공시체의 윗면은 판유리로 덮어 수분의 증발을 방지하였다. 제작 후 24시간이 경과했을 때, 몰드를 탈형한 후 수중( $20 \pm 3^\circ\text{C}$ )에서 표준양생을 하였으며, 각 재령별(1일, 3일, 7일, 28일)로 18개의 공시체를 제작하여 양생을 마친 직후 일축압축강도 실험을 수행하였다. 일축압축시험기는 용량 100ton의 국내산 압축시험기를 사용하였으며, 하중속도는  $3\text{kg}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 가압하여 일축압축강도를 측정하였다.

#### (2) 리바운드(Rebound)율

본 연구에서 사용한 슛크리트 타설방식은 건식을 이용하였으며, 리바운드율 측정은 터널현장에서 fly ash 혼합율에 따라 0~25%까지 5%씩 증가시켜 총 6회 실시하였으며, 건식 슛크리트 타설 후 리바운드 되는 슛크리트의 중량을 조사하여 리바운드율을 측정하였다.

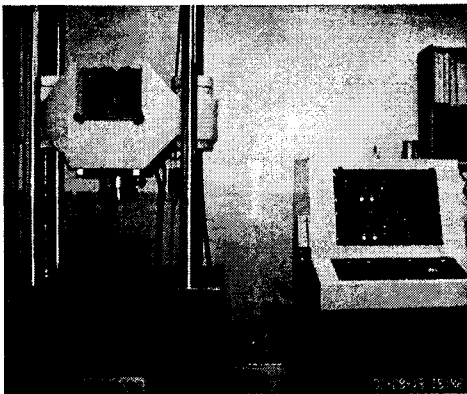


그림 3. 압축강도 시험기

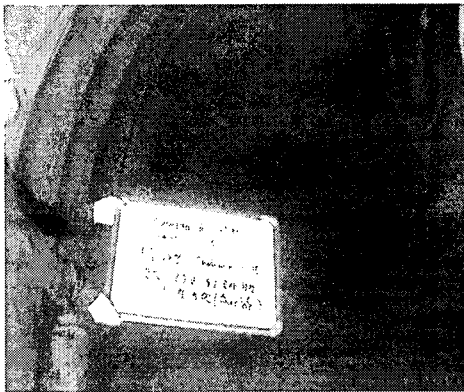


그림 4. 터널 현장의 리바운드율 측정

표 8. Fly ash 혼합율에 따른 강도 특성

No.	Fly ash 혼합율(%)	재령별 일축압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
		1일	3일	7일	28일
1	0	106	172	240	343
2	5	108	165	246	340
3	10	97	153	232	362
4	15	92	158	245	377
5	20	88	136	215	346
6	25	84	105	188	322
7	30	71	94	169	298
8	35	52	87	152	283

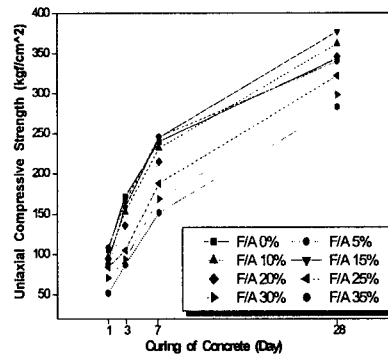


그림 5. 양생기간에 따른 일축압축강도

#### 4. 실험결과

##### 4.1 압축강도실험

Fly ash의 혼합율을 0~35%까지 5%단위로 8단계로 증량 치환하였으며, 각각 15×30cm의 공시체를 18개씩 제작하여 재령 1일, 3일, 7일, 28일 별로 각각 일축압축강도를 측정하였다.

측정값은 최대, 최소 각각 2개의 일축압축강도치를 제외시켜 총 14개의 일축압축강도를 평균하였다. 표 8은 fly ash 혼합율에 따른 강도특성이며, 그림 5, 6은 양생기간과 fly ash 혼합율에 따른 일축압축강도의 변화를 나타내었다.

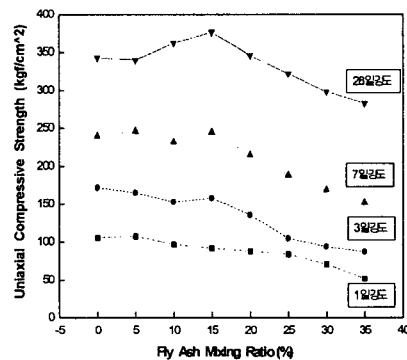


그림 6. Fly ash 혼합율에 따른 압축강도

Fly ash 혼합율이 증가할수록 재령 1일, 3일의 강도는 혼합율 0%의 일축압축강도보다 감소하는 것으로 나타났다. 재령 1일 강도는 설계기준강도 ( $100 \text{ kgf/cm}^2$ )보다 낮은 강도수준을 보이고 있어 fly ash의 혼합에 따른 초기강도의 저하현상이 나타났다. 재령 7일에는 혼합율 5~20% 에서 강도 회복을 보이고 있다.

Fly ash 혼합율 25% 이상 일축압축강도의 경우, fly ash 혼합율 0~20%보다 뚜렷한 강도저하현상이 나타났으며, 재령별 강도의 증가치가 양생기간이 경과할수록 상대적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 fly ash의 혼합율이 증가할수록 fly ash의 포졸란 반응이 숯크리트의 장기압축강도에 영향을 미친 것으로 판단된다<sup>18)</sup>.

Fly ash 혼합율 0~35%까지 모두 일반적인 숯크리트 설계기준강도( $280 \text{ kg/cm}^2$ )를 상회하고 있으며, fly ash 혼합율 15%의 재령 28일 압축강도의 경우, 타 혼합율에 비해 가장 큰 강도수준을 보이고 있으며, 혼합율 0%의 강도보다 10%의 강도발현현상이 나타났다. 또한, fly ash 혼합율 10~20%의 재령 28일 일축압축강도는 혼합율 0%의 강도보다 증가하였다.

따라서 숯크리트 배합설계시 fly ash를 시멘트 대체제로서 10~20%까지 혼합하더라도 숯크리트의 강도가 증가되는 것으로 나타났다.

#### 4.2 리바운드율

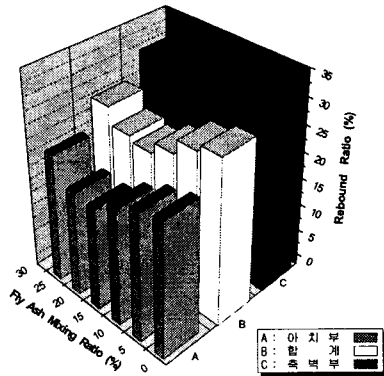
리바운드율 측정은 숯크리트 배합설계시 시멘트 대체제로서 fly ash를 0~25%까지 혼합하여 터널 내에서 숯크리트를 타설한 후 리바운드 되는 재료의 중량을 조사하였으며, 각 혼합율별 아치부 1회, 측벽부 1회로 총 2회 실시하였다. 일축압축강도시험 결과, 초기강도의 저하현상 및 타 혼합율에 비해 상대적으로 강도가 낮은 fly ash 혼합율 30%, 35%에 대한 리바운드율 측정은 제외하였으며, fly ash 혼합율에 따른 리바운드중량과 비율을 표 9 및 그림 7에 나타내었다.

Fly ash의 혼합율에 따른 리바운드율은 기존의 숯크리트 배합시 28.6%에서 fly ash 혼합율15%일 때 22.3%까지 감소하다가 fly ash 혼합율 20%부터 리바운드율이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. fly ash 혼합율 15%에서 가장 낮은 리바운드율이 나타났으며, fly ash를 혼합하지 않은 기존의 숯크리트 배합시보다 약 6%의 리바운드 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 터널 아치부와 측벽부의 상대적 리바운드 비율은 약 10%의 차이가 나타났으며, fly ash 혼합율에 따른 타설부위별 리바운드율의 변화는 불규칙적으로 나타났다.

표 9. Fly ash 혼합율에 따른 리바운드 중량과 리바운드율

No.	fly ash 혼합율 (%)	재료의 전중량 (kg)	리바운드 중량 (kg)			리바운드율 (%)		
			아치부	측벽부	타설단면	아치부	측벽부	타설단면
1	0	4,800	551	820	1,371	23.0	34.2	28.6
2	5	4,800	523	786	1,309	21.8	32.8	27.3
3	10	4,800	473	702	1,175	19.7	29.3	24.5
4	15	4,800	411	661	1,072	17.1	27.5	22.3
5	20	4,800	417	697	1,114	17.4	29.0	23.2
6	25	4,800	525	741	1,266	21.9	30.9	26.4





### 5. 결론

본 연구에서는 석탄회 일부인 fly ash를 시멘트 대체재로서 중량 치환하여 슛크리트 배합설계를 하였으며, 일축압축강도와 건식 슛크리트 타설에 의한 리바운드율 측정에 대한 실내 및 현장시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실내 일축압축강도시험 결과, 슛크리트 배합설계시 fly ash를 시멘트 대체재로서 10~20%까지 혼합했을 때, fly ash를 혼합하지 않은 기존의 배합설계보다 강도가 증가되는 것으로 나타났으며, fly ash의 혼합율이 15% 일 때, 기존의 배합설계에 비해 최대 10%의 강도발현현상이 나타났다.
- 2) Fly ash 혼합율 25% 이상 일축압축강도의 경우, fly ash 혼합율 0~20%보다 뚜렷한 강도저하현상이 나타났으며, fly ash 혼합율이 증가할 수록 초기강도가 점진적으로 감소하였으나 장기강도는 fly ash의 포졸란 반응에 의해 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 터널 현장 리바운드 시험 결과, fly ash의 혼합율에 따른 리바운드율은 fly ash 혼합율 15%

에서 가장 낮은 리바운드율이 나타났으며, fly ash를 혼합하지 않은 기존의 슛크리트 배합시보다 약 6%의 리바운드 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

- 4) Fly ash를 시멘트 대체재로서 슛크리트에 사용할 때 일축압축강도의 향상 및 굴착면의 타설 리바운드율을 저하시키는 최적의 함량은 fly ash를 시멘트중량의 15% 대체시켰을 때 압축강도의 향상과 리바운드율의 감소를 나타내었다.
- 5) 석탄회를 효율적으로 활용하기 위해서는 fly ash 혼합에 따른 초기강도의 저하방지를 위한 첨가제(급결제, AE제 등)에 대한 현장시험과 bottom ash와의 혼합에 의한 슛크리트 재료의 개발에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2000년도 조선대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드리고, 시료를 제공해 준 한국 FLY-ASH 시멘트 공업(주) 등에도 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1. E. Hoek, P.K. Kaiser and W. F. Bawden, 1995, Support of Underground Excavation in Hard Rock, A. A. Balkema, Rotterdam, pp.190~200.
2. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, Vol. II, No.2, pp.205~214.
3. 이양규, 권인환, 2001, Shotcrete 리바운드량 감소를 위한 실험적 분석, 대한토목학회논문집, 제21권 제4D호, pp.499~508.
4. 안상기, 1993, 슛크리트의 리바운드 감소에 대

- 한 재료개발 연구시험, 콘크리트학회지, 제5권 1호, pp.54~61.
5. 전준태, 이양규, 2003, 습식 Shotcrete 리바운드 량 감소량에 대한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 제23권 제1D호, pp.89~95.
  6. 이희상, 2002, 국내외 석탄회 발생 및 처리현황, 석탄회 활용 기술연구회 워크숍, pp.3~15.
  7. 이종훈, 1994, 석탄회 이용가치와 재활용 기술, 한국전력공사, pp.91~93.
  8. 서귀준, 1993, 석탄회를 이용한 콘크리트 특성 및 활용방안.
  9. 임남웅 외, 1997, Bottom Ash와 Fly Ash를 이용한 시멘트 모르타 제조, pp.1~4.
  10. 임남웅, 염희남, 1998, 신소재 시멘트 모르타 개발과 콘크리트 적용 물성조사, 1998, pp.3~5.
  11. W. G. Ryan, 1988, Fly Ash in Concrete, Booklet. Boral Pozzolan, Australia.
  12. J. A. Dalziel, 1985, The Effect of Different Potland Cement upon the Pozzolanicity of Pulverized Fuel Ashes and the Strength of Blended Cement Mortars, Cement and Concrete Association Technical Report 555.
  13. 한국산업규격, 1992, 한국표준협회 KSL 5405.
  14. 박승범, 1998, 콘크리트의 향상 및 경제성 제고, 한전산업개발(주).
  15. ASTM Standard, American Society for Testing and Material, 1990, 1990 Annual Book, Philadelphia, Vol.04.02, pp.186~190.
  16. 이희근, 임한욱, 1995, 터널·지하공간 굴착공학, pp.123~126.
  17. 윤지선, 1996, NATM 공법의 조사·설계·시공, pp.113~114, 150~160
  18. ACI Committee 226, 1997, Use of Fly Ash in Concrete, ACI manual of concrete practice.