

# 혼합 시멘트 모르타르의 내구특성

## Durability Characteristics of Blended Cement Mortars

원 종 필\* · 이 찬 민\*\* · 박 찬 기\*\*  
Won, Jong-Pil · Lee, Chan-Min · Park, Chan-Gi

### Abstract

In this study, durability performance of blended cement mortars is evaluated when various mineral admixtures are used with the cement.

A comprehensive evaluation of the effects of mineral admixtures on the mortar performance was made. The properties of fresh and hardened blended mortars investigated include slump flow and compressive strength. The durability characteristics of cement materials incorporating the mineral admixtures under various physical and chemical causes of deterioration was investigated.

The laboratory test results indicate that mechanical and durability properties of blended cement mortars have superior performance rather than ordinary cement mortars.

Keywords : Blended cement mortars, Durability, Mineral admixture

### I. 서 론

포틀랜드 시멘트로 만들어진 모르타르나 콘크리트는 강도 및 내구성이 우수하고 경제성이 뛰어나 현대 사회를 지지하는 구조물의 주된 구조재료로서 가장 널리 사용되고 있다.<sup>2),6)</sup> 그러나 모르타르나 콘크리트 구조물은 온도, 기후, 계절 등의 자연적인 환경 요인과 더불어 최근에는 급속한 산업발전에 따른 인위적인 환경악화, 즉 지하수와 하천, 토양,

해수 등에 화학적 오염까지 가중되어 성능저하가 가속화되고 있다. 이러한 성능저하는 동결·융해 및 건조와 습윤의 반복 작용을 받으면 상승효과를 보여 더욱 빨리 진행되며 이로 인한 콘크리트 구조물의 심각한 손상을 일으켜 보수 보강 및 유지 관리 등에 상당한 비용이 필요하게 되며 이에 따라 내구성 향상에 대한 요구가 절실해지고 있는 실정이다. 특히 농업기반시설물로서 수리구조물 또는 해양환경에 노출되어 있는 방조제, 배수갑문 등과 같은 구조물은 그 내구성능 저하가 더욱더 심각한 실정이며 그에 대한 방지대책이 요구되고 있다. 콘크리트 성능저하에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하고 복합적으로 작용하여 이에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. 이에 내구성 저하를 방지하기

\* 건국대학교 생명환경과학대학  
\*\* 건국대학교 대학원  
\* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3750  
fax: +82-2-2201-0907  
E-mail address: jpwon@konkuk.ac.kr

위해 시멘트의 일부를 혼화재로 치환하여 고밀도의 제품을 만들거나 시멘트 자체 성질의 개선, 방식 재료 등의 개발 등 다각적인 연구가 진행되어 왔으나 현재까지도 내구성을 저하시키는 인자들에 대해 연구는 절대적으로 부족한 실정이다.<sup>1),5)</sup>

현재 콘크리트 및 모르타르의 내구성을 향상시키기 위하여 사용되는 방법으로는 시멘트의 일부분을 혼화재료로 치환하여 사용하는 방법이 있다. 이와 같은 혼화재료로는 플라이애시, 고로슬래그 및 실리카흙 등이 있으며 특히 플라이애시 및 고로슬래그는 산업부산물로서 그 사용이 현저히 증가하고 있다. 그러나 이와 같은 혼화재료는 각 재료의 특성 및 현장조건에 맞게 적정 혼합률을 결정하여 사용하여야 한다. 또한 한가지 종류의 혼화재료를 사용하는 것보다는 2가지 종류 이상의 혼화재료를 사용하여 각 혼화재료가 가지는 장점을 최대한 이용하는 방법도 최근에 연구가 시작되고 있다. 그러나 현재 국내에서는 플라이애시, 고로슬래그 및 실리카흙 중 한가지 혼화재료 만을 선택하여 적용하는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 시멘트계 재료로 이루어진 모르타르 또는 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성능을 향상시키기 위하여 시멘트계 재료의 혼화재료로 사용되는 여러 재료 중 한가지 종류 또는 두 가지 종류를 선택하여 시멘트에 혼입하여 사용하였을 때의 혼합 시멘트 모르타르의 역학적 및 내구특성을 평가하려 한다.

## II. 실험 계획 및 방법

### 1. 실험 계획

본 연구에서는 혼화재의 종류와 혼화재 치환율을 변화시킨 혼합 시멘트 모르타르의 역학적 특성 및 내구특성을 평가하기 위하여 투수성, 염화물 및 황산염에 대한 저항성을 측정하였으며 동결·융해 반복 작용에 대해서도 고찰하였다. 본 연구에 사용된 배합설계는 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportions

Type of cement	W/B	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			Mineral admixture
		C	W	S	
OPC		575.00			0
FA5		546.25			28.75
FA*10		517.50			57.50
FA15		488.75			86.25
FA20		460.00			115.00
BS**40		345.00			230.00
BS50		287.50			287.50
BS60	0.485	230.00	278.88	1408.75	345.00
BS70		172.50			402.50
FA10BS40		287.50			57.50+230.00
FA10BS50		230.00			57.50+287.50
FA10BS60		172.50			57.50+345.00
FA20BS40		230.00			115.00+230.00
FA20BS50		172.50			115.00+287.50
FA20BS60		115.00			115.00+345.00

\* : Fly ash, \*\* : Blast furnace slag

### 2. 사용재료

#### 가. 시멘트

시멘트는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

#### 나. 골재

잔골재는 비중 2.62의 주문진 천연사를 사용하였다.

#### 다. 광물질 혼화재

광물질 혼화재로서 플라이애시 및 고로슬래그가 사용되었으며 각각의 물리·화학적 성질은 Table 2와 같다.

### 3. 실험방법

#### 가. 압축강도

혼화재료의 시멘트 치환률에 따른 압축강도의 영향을 평가하기 위하여 KS F 5105에 준하여 모르

Table 2 Physical and chemical properties of fly ash(FA) and blast-furnace slag(BS)

Items Type	Specific Gravity	Ig. loss	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)
FA	2.14	3.28	3,400	58.12	23.56	7.69	1.05	2.59	1.12	1.42	0.31
BS	2.91	0.5	4,564	31.1	14.69	0.31	-	47.0	3.5	0.39	0.44

타르의 압축강도 실험을 실시하였다. 시편은 50 × 50 × 50 mm의 입방체 몰드를 제작하여 재령 1일, 7일, 28일, 91일에 6개씩의 압축강도를 측정하였다. 공시체는 24시간의 초기양생 후에 22±3℃의 항온조건으로 수증양생을 실시하였다.

나. 투수저항성

혼합시멘트 모르타르의 투수성은 강도뿐만 아니라 내구성에서도 중요한 의미를 갖는다. 투수성의 증가는 균열의 확장에 의해 강도를 저하시키는 작용뿐만 아니라 동결·융해 및 마모등 내구성능을 악화시킨다. 본 연구에서는 혼합시멘트 모르타르의 투수성을 평가하기 위해서 ASTM C 1202-94 (Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration) 와 AASHTO T 259 (Rapid determination of chloride permeability of concrete)에 준하여 실험을 실시하였다.<sup>3)</sup> Φ100 × 200 mm의 실린더형 공시체를 제작하여 28일, 91일의 재령에서 가운데 부분을 Φ100 × 50 mm로 절단해서 실험을 실시하였다. 각 재령에서 2개의 공시체를 제작하였다. 절단 후 공시체 내부의 갇힌 공기를 제거하기 위해 데시게이터 안에 넣고 진동펌프를 3시간 동안 작동시킨 후 다시 공시체를 물로 포화시키기 위하여 데시게이터에 물을 넣어 1시간 동안 펌프를 작동시켰다. 그 후에 진공펌프의 작동을 중지시키고 공시체를 물 속에서 완전히 포화시킨 상태로 18±1시간 동안 유지하였다.

다. 내황산염

각 배합별 혼합시멘트 모르타르의 황산염에 대한 저항성을 알아보기 위하여 황산염 용액 침지 후 모

르타르의 길이변화 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 ASTM C 1012에 준하여 25 × 25 × 285 mm의 길이변화용 모르타르 공시체와 50 × 50 × 50 mm의 압축강도용 모르타르 공시체를 각 배합별로 3개씩 제작하여 압축강도 공시체의 강도가 200 kgf/cm<sup>2</sup> 이상 발현되는 재령까지 수증양생한 후, 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 황산염 용액에 침지시키면서 재령 1, 2, 3, 4, 8, 13, 15주에 측정하였다.<sup>4),7),8)</sup>

길이변화는 KS F 2424의 다이얼게이지 방법에 의하여 재령별로 측정하여 다음의 식에 의하여 계산하였다.

$$\Delta l (\%) = \frac{l_t - l_o}{l_o} \times 100$$

여기서, Δl : 길이변화(%)

l<sub>t</sub> : 침지재령에서 모르타르의 길이

l<sub>o</sub> : 침지 전 모르타르의 길이

라. 철근부식저항성

보강 철근의 부식은 콘크리트 구조체의 성능을 저하시키는 주요 원인으로 알려져 있고 이러한 철근의 부식이 발생하는 이유는 시멘트 모르타르 및 콘크리트 내부로의 염화물 침투에 의한 것으로 밝혀져 있다. 본 연구에서는 일반 시멘트 모르타르와 각 배합별 혼합시멘트 모르타르의 염화물 침투에 대한 저항성과 철근 부식 저항성에 대하여 평가하기 위하여 S. H. Okba, A. S. El-Dieb 그리고 M. M. Reda 등에 의하여 고안된 철근 부식 가속화 장치를 통해 실험을 실시하였다.<sup>9)</sup> Fig. 1에서와 같이 막대 사탕형 공시체를 제작하여 15% 염화나트륨

용액이 공시체의 반 정도 높이까지 담긴 수조 안에 침지시킨 후 전력 공급원(power supply)과 테스터기를 이용하여 철근과 수조안에 담긴 쇠판 사이에 흐르는 전류량을 가지고 철근 부식 저항성에 대하여 평가하였다. Fig. 2는 철근 부식 가속화 장치를 도식화한 것이다. 본 실험은 철근을 150 mm 길이로 삽입한  $\Phi 100 \times 200$  mm의 막대 사탕형 공시체를 각 배합별로 2개씩 제작하여 91일 재령까지 수중양생을 시켰다. 이때 철근의 부식을 막기 위하여 철근 부분을 실리콘으로 실링하였다. 각 재령에서 공시체를 NaCl 용액에 침수시킨 후 5시간 마다 전류량을 측정하였다.

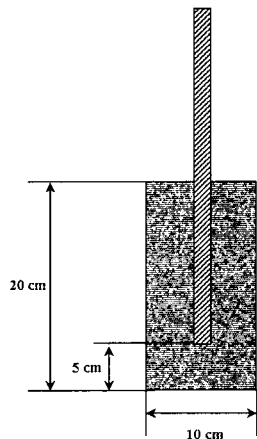


Fig. 1 Schematic diagram of the lollipop specimen

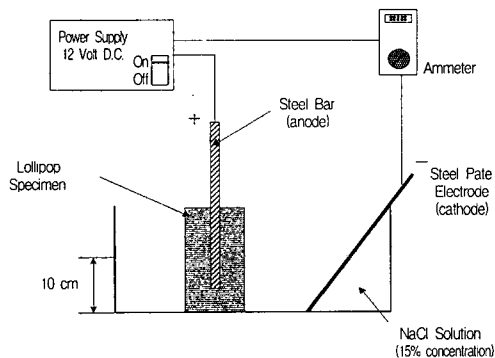


Fig. 2 Schematic diagram of the accelerated corrosion test

#### 마. 동결·융해 저항성

동결융해 작용은 시멘트 모르타르내의 자유수가 동결되어 체적이 팽창되므로 모르타르 내부에 큰 팽창압력이 발생되어 파괴를 일으킨다.

혼합시멘트 모르타르의 동결융해저항성을 평가하기 위하여  $100 \times 100 \times 400$  mm의 각주형 공시체를 제작하여 실내에서 14일간 양생한 후 KS F 2456에 따라 동결융해실험을 수행하였다.<sup>3)</sup> 1 사이클을 4시간으로 하였으며 기준 공시체를 제작하여 공시체 중심에서의 온도를  $4^{\circ}\text{C}$ 에서  $-18^{\circ}\text{C}$ 로 떨어뜨리는 동결작용과 다시  $4^{\circ}\text{C}$ 로 올리는 융해작용을 반복하였다. 25, 50, 100, 200, 300 사이클에서 압축강도를 측정하여 각 사이클에 대한 강도 변화율로 동결융해 저항성 정도를 나타내었다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 1. 압축강도

보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 플라이애시(FA), 고로슬래그(BS) 및 플라이애시(FA)와 고로슬래그(BS)를 사용한 혼합 시멘트 모르타르의 압축강도 시험결과는 Fig. 3 ~ Fig. 5와 같다. 플라이애시 혼합 시멘트 모르타르는 치환율이 증가할수록 28 일까지는 OPC 보다 낮은 강도를 보이지만 91일의 장기강도는 더 높아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 플라이애시 자체는 수경성이 없지만 함유되어 있는

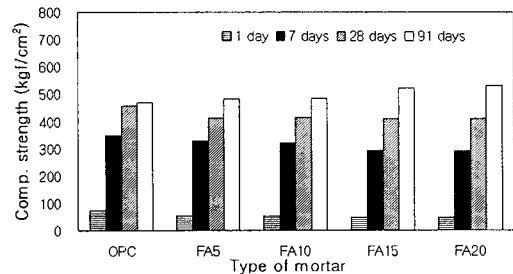


Fig. 3 Compressive strength of blended cement mortars with fly ash

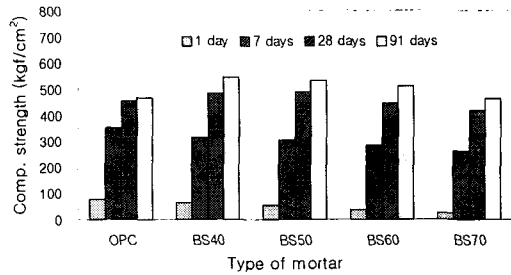


Fig. 4 Compressive strength of blended cement mortars with blast furnace blast

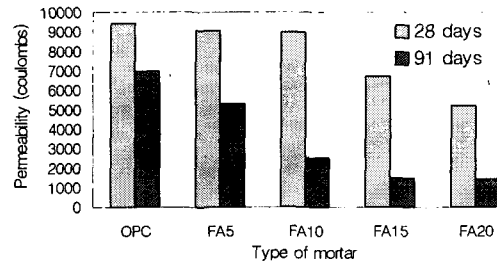


Fig. 6 Chloride permeability of blended cement mortars with fly ash

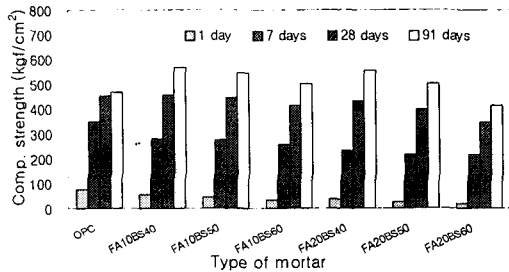


Fig. 5 Compressive strength of blended cement mortars with fly ash and blast furnace slag

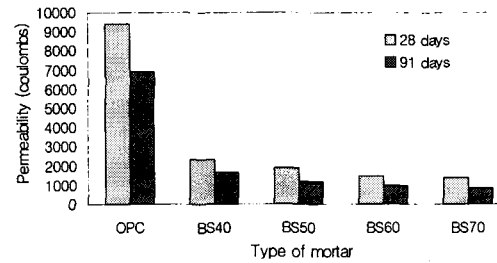


Fig. 7 Chloride permeability of blended cement mortars with blast furnace slag

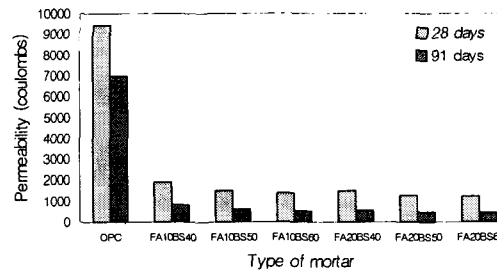


Fig. 8 Chloride permeability of blended cement mortars with fly ash and blast furnace slag

가용성의 규산 등이 시멘트 수화시 생성하는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 반응하여 불용성의 안정한 규산칼슘 수화물등을 생성하는 포졸란 반응의 증가에 의한 것으로 사료된다. 고로슬래그 미분말을 혼합한 시멘트 모르타르도 재령 91일에 BS70을 제외하고는 OPC의 강도를 상회하는 것을 볼 수 있으며 치환율이 증가하면서 강도가 점점 낮아지는 경향을 보여주었다. 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 함께 혼합한 시멘트 모르타르도 고로슬래그와 비슷한 경향을 보이고 있다. FA20BS60을 제외하고는 모두 91일에서 OPC를 상회하나 슬래그 미분말의 치환율이 증가하면서 강도가 적어지는 것을 알 수 있다.

## 2. 투수저항성

염소이온 투과에 의한 전하량 측정방법에 따라서

혼합 시멘트 모르타르의 투수성을 측정하였다. 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 플라이애시(FA), 고로슬래그 미분말(BS) 및 플라이애시와 고로슬래그를 혼합한 혼합 시멘트 모르타르의 투수시험 결과는 Fig. 6 ~ Fig. 8과 같다. ASTM에서 제시된 평가기준과 비교해서 보통 포틀랜드 시멘트는 28일과 91일에서 모두 높은 투수성을 나타내었다. 플라이애시 혼합 시멘트 모르타르는 28일 모든 혼합물

에서 높은 투수성을 나타내었으나 91일 재령에서는 FA5를 제외하고 FA10은 보통의 투수성을 FA15와 FA20은 낮은 투수성을 나타내었다. 이는 플라이애시의 포졸란 반응에 의하여 91일에서 더욱 치밀한 구조를 만들기 때문이라고 사료된다. 고로슬래그 미분말 혼합 시멘트 모르타르에서 BS40은 28일에 보통의 투수성을 91일에는 낮은 투수성을 보였다. BS50은 28일과 91일에서 모두 낮은 투수성을 보였으며 BS60과 BS70은 모두 28일에 낮은 투수성을 91일에는 매우 낮은 투수성을 보였다. 이는 플라이애시와 마찬가지로 고로슬래그 미분말의 포졸란 반응에 의한 잠재수경성에 의한 것으로 사료된다. 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합하여 혼입한 시멘트 모르타르에서는 각 혼입물 모두에서 28일에 낮은 투수성을 91일에는 매우 낮은 투수성을 보였다. 이는 서로 다른 분말도의 플라이애시와 고로슬래그 미분말이 서로의 공극을 채워줌으로써 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 각각 혼합하였을 때 보다 더욱더 우수한 투수저항성을 나타낸 것으로 사료된다.

### 3. 내황산염

혼화재의 치환율에 따른 황산염 침식으로 인한 길이변화 결과는 Fig. 9 ~ Fig. 11과 같다. 13주 후 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)는 혼화재를 혼입한 혼합 시멘트 모르타르보다 2배 이상의 현저한 길이 변화가 나타났다. 플라이애시 혼합 시멘트 모르타르는 모든 치환율에서 OPC보다 50%정도의 길이 변화 감소를 보였으며 FA20이 가장 큰 효과를 보였다. 고로슬래그 미분말 혼합 시멘트 모르타르에서는 모든 혼입율에서 OPC보다 30%이하 정도의 감소율을 보였으며 그 중 BS60에서 가장 큰 효과를 보였다. 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 함께 혼합한 혼합 시멘트 모르타르에서는 플라이애시 분말의 공극을 더욱 미세한 고로슬래그 미분말이 채워줌으로써 플라이애시 단독으로 사용하였을 때

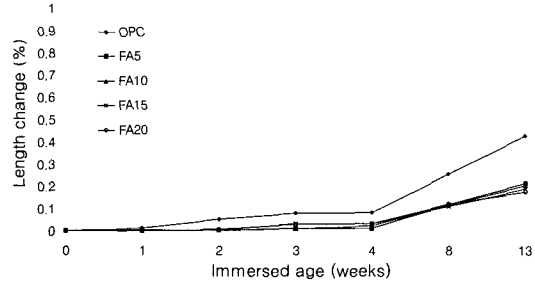


Fig. 9 Length change of blended cement mortars with fly ash

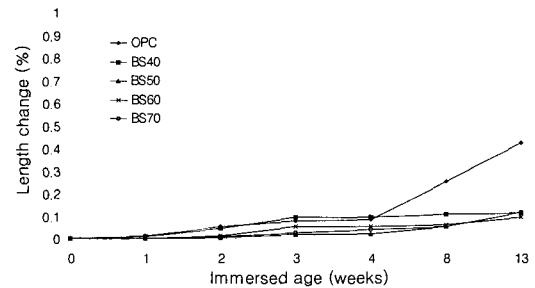


Fig. 10 Length change of blended cement mortars with blast furnace slag

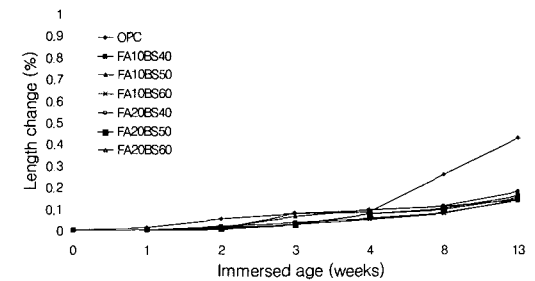


Fig. 11 Length change of blended cement mortars with fly ash and blast furnace slag

보다 좀더 좋은 효과를 보이는 것을 볼 수 있었고 FA10BS40에서 가장 큰 황산염 침식 저항성을 보였다.

### 4. 철근부식저항성

철근 부식 가속화 장치를 이용하여 측정한 철근 부식 실험의 결과는 Fig. 12 ~ Fig. 14에 나타내었

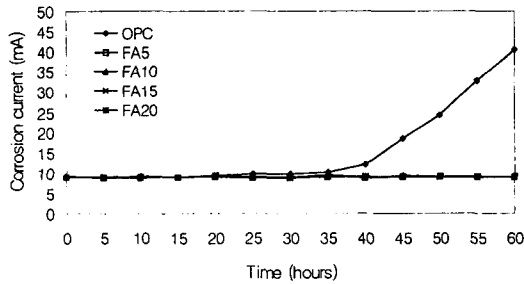


Fig. 12 Corrosion current with time of blended cement mortars with fly ash

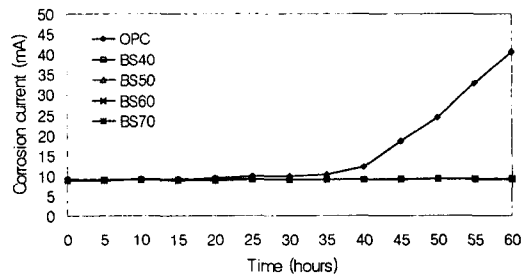


Fig. 13 Corrosion current with time of blended cement mortars with blast furnace slag

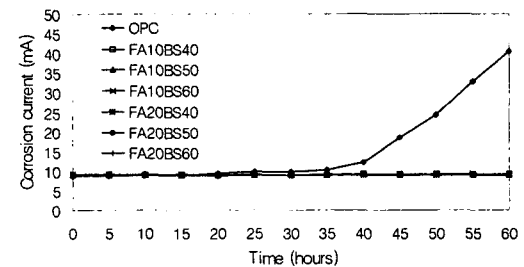


Fig. 14 Corrosion current with time of blended cement mortars with fly ash and blast furnace slag

다. 혼합 시멘트 모르타르가 OPC보다 좋은 결과를 보였다. OPC는 35시간 이후 조금씩 전류량이 증가하기 시작하여 45시간째 되는 시점부터 현저하게 전류량이 증가하는 것을 볼 수 있었으며 이는 45시간째 되는 순간부터 철근의 부식이 현저하게 발생한다는 것을 의미한다. 혼합 시멘트 모르타르는 거의 같은 전류량으로 60시간까지 지속되는 것

을 확인할 수 있었으며 이는 분말도가 큰 혼화재에 의하여 치밀한 내부구조를 갖게 되고 또한 포졸란 작용에 의하여 OPC보다 모르타르 내부공극이 감소하는 밀실한 구조를 갖기 때문이라고 사료된다. 또한 플라이애시, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합한 모르타르 배합에 따른 결과는 그 차이를 나타내지 않았다.

### 5. 동결·융해 저항성

동결융해 반복 후 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 사용한 혼합 시멘트 모르타르의 각 혼화재별 혼입율에 따른 반복횟수당 압축강도 변화는 Fig. 15 ~ Fig. 17과 같이 나타났다.

플라이애시, 고로슬래그 미분말, 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합한 시멘트 모르타르의 동결

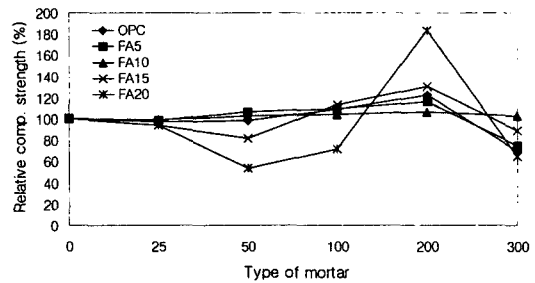


Fig. 15 Relative compressive strength after freezing and thawing cycles of blended cement mortars with fly ash

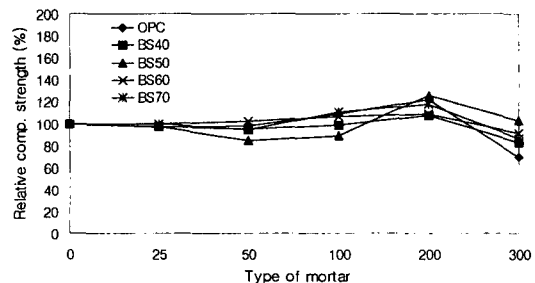


Fig. 16 Relative compressive strength after freezing and thawing cycles of blended cement mortars with blast furnace slag

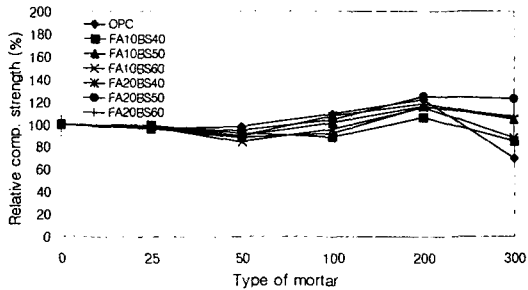


Fig. 17 Relative compressive strength after freezing and thawing cycles of blended cement mortars with fly ash and blast furnace slag

융해 저항성은 초기재령에서 느린 수화반응에 의하여 동결융해 초기 사이클에서는 강도의 감소를 보이다가 100 사이클 이상이 되면서 강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 300 사이클에서 강도가 감소하는 것은 과도한 동결융해의 반복에 의하여 공시체 외부의 파손에 의한 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 현재 시멘트계 재료의 역학적 특성 및 내구특성을 증진시키기 위하여 사용되는 혼화재인 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 각각 시멘트의 일부분을 치환하여 제조한 혼합시멘트 모르타르와 플라이애시와 고로슬래그를 동시에 혼합한 시멘트 모르타르의 역학적 특성 및 내구특성을 평가하고자 하였으며 그 결과를 분석하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 압축강도는 모든 혼화재에서 장기로 갈수록 OPC보다 상회하는 경향을 보여 주었으며 플라이애시와 고로슬래그를 동시에 혼합한 시멘트 모르타르는 고로슬래그 미분말을 치환한 시멘트 모르타르와 거의 동일한 강도발현 경향을 보여주었다.

2. 염소이온투과시험을 이용한 혼합시멘트 모르타르의 투수성시험결과 ASTM에서 제시된 평가기준과의 비교에서 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르는 28일과 91일에서 모두 높은 투수성을 보였으나 혼

합시멘트 모르타르의 모든 배합은 혼입율이 증가할수록, 재령이 증가할수록 매우 낮은 투수성을 보였다. 특히 플라이애시와 고로슬래그를 동시에 혼합한 시멘트 모르타르는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 각각 혼합한 시멘트 모르타르와 비교하여 더욱더 우수한 투수저항성을 보여주었는데 이는 분말도가 다른 혼화재료가 시멘트 모르타르에 존재하는 공극을 채워 더욱더 밀실한 구조를 만들었기 때문이다.

3. 황산염 침지 후 길이변화 시험에서 13주 후 모든 혼화재를 혼입한 혼합 시멘트 모르타르가 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르 보다 50% 이상의 현저한 감소를 보였다. 특히 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 함께 혼합한 혼합 시멘트 모르타르에서는 플라이애시 분말의 공극을 더욱 미세한 고로슬래그 미분말이 채워줌으로써 플라이애시 단독으로 사용하였을때 보다 좀더 좋은 효과를 보이는 것을 볼 수 있었다.

4. 철근 부식 시험에서는 모든 혼합 시멘트 모르타르가 OPC보다 훨씬 좋은 철근 부식 저항성을 보임을 알 수 있었다. 또한 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 혼입한 모르타르와 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 동시에 혼합한 모르타르의 철근 부식저항성은 큰 차이가 발생하지 않았다.

5. 동결·융해 저항성 시험에서는 모든 혼합 시멘트 모르타르가 100 사이클 이상이 되면서 강도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 혼입한 모르타르와 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 동시에 혼합한 모르타르의 철근 부식저항성은 큰 차이가 발생하지 않았다.

6. 위와 같은 결과로 플라이애시 및 고로슬래그 미분말 한가지 혼화재료 만을 혼합한 혼합시멘트 모르타르는 전체적으로 보통 시멘트 모르타르와 비교하여 내구성의 증진효과를 볼 수 있었다. 그러나 각각의 특성이 다른 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 동시에 혼합하여 사용하면 두 가지 혼화재



료의 특성을 모두 얻을 수 있어 장기적으로 시멘트 모르타르 및 콘크리트의 내구성을 향상시킬 것이라 판단된다.

본 논문은 2002학년도 건국대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임

### References

1. Yoon, Je-Hwan. (1997). *Portland cement and concrete*. Sejinsa
2. Jang, Bok-Ki, Jung, Chang-Ju, Lee, Jong-Ho, Lim, Young-Moo. (1998). *Material chemistry of cement*. Chonnam National University master's thesis
3. Won, Jong-Pil, Kwon, Youn-Sung, Lee, Jon-Ja. *Properties of high-performance concrete containing high-reactivity metakaolin*. KCI Concrete Journal June 2002 14(3): 349~356
4. ASTM C 1012. *Length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution*
5. P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro. (1992). *Concrete Structure, Properties, and Materials Second Edition*
6. V. S. Ramachandran. (1984). *Concrete Admixtures Handbook*. Noyes Publications
7. P. K. Mehta. (1983). *Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement - Another Look*. Cement and Concrete Research 13: 401~406
8. F. M. Kilinckale. (1997). *The effect of MgSO<sub>4</sub> and HCl solutions on the strength and durability of pozzolan cement mortars*. Cement and Concrete Research 27(12): 1911~1918
9. S. H. Okba, A. S. El-Dieb and M. M. Reda. (1997). *Evaluation of the corrosion resistance of latex modified concrete(LMC)*. Cement and Concrete Research 27(6): 861~868