

## 論文

## 삼성분계 혼합시멘트 모르타르의 조기강도 향상을 위한 실험적 연구

배준영\*, 장영일\*\*+

## An Experimental Study for Improving the Early Strength of Ternary Blended Cement Mortar

Jun-Young Bae\*, Young-Il Jang\*\*+

## ABSTRACT

Recently, the development and field applications of Ternary Blended Cement(TBC), where blast furnace slag and fly ash are recycled in Ordinary Portland Cement(OPC) in order to obtain improvements in the durability and heat of hydration reduction performance in large scale civil structures, have been increasing. Also, there are continuing efforts by construction companies to reduce the construction time with the aim of reducing construction costs. Therefore, there is a need to improve the performance of TBC, which has a relatively slow early strength development. In order to improve the early strength of TBC mortar, the compressive strength,  $SO_3$  content, and SEM analysis was determined in this study on mortar with the fineness and content of blast furnace slag and anhydrite regulated. As a result, to secure the early strength of TBC mortar, using blast furnace slag with a fineness of approximately  $4,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ , adding 3.5% anhydrite with a fineness of approximately  $10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , and managing the  $SO_3$  content to roughly 3.72% was found to provide the most outstanding early strength properties.

## 초 록

최근 대규모 토목구조물의 내구성 향상 및 수화열 저감 성능을 확보하기 위하여 1종 보통포틀랜드시멘트에 고로슬래그미분말 및 플라이애시를 혼합 치환한 삼성분계 혼합시멘트(TBC)의 개발 및 현장적용이 증가하고 있다. 또한 최근 건설사를 중심으로 공사비용 절감 등을 이유로 공사기간 단축 노력이 계속되고 있다. 이를 위해 콘크리트의 조기강도 성능이 요구되어진다. 따라서 상대적으로 조기강도 발현이 느린 TBC의 성능 보완이 필요하다. 이 연구에서는 TBC 모르타르의 조기강도 발현 성능을 향상시키기 위한 노력으로, 고로슬래그미분말 및 무수석고의 분말도와 첨가율을 조절하여 모르타르의 압축강도,  $SO_3$  함량 및 SEM 분석을 실시하였다. 실험 결과, TBC 모르타르는 분말도 약  $4,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그미분말을 사용하고 분말도 약  $10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 무수석고 3.5%를 첨가하고  $SO_3$ 함량을 3.72% 내외로 관리하는 것이 가장 우수한 조기강도 특성을 보이는 것으로 나타났다.

**Key Words** : 삼성분계 혼합시멘트(ternary blended cement), 무수석고(anhydrite), 압축강도(compressive strength), 조기강도(early strength), 분말도(fineness)

접수: 2012년 4월 18일, 수정: 2012년 6월 17일, 게재승인: 2012년 6월 28일

\* 충남대학교 토목공학과 대학원

\*\*+ 충남대학교 건설공학교육과, Corresponding author(E-mail:jang1001@cnu.ac.kr)

## 1. 서론

최근 콘크리트 구조물이 대형화됨에 따라 고성능 신재료의 필요성이 대두되고 있다[1-3]. 특히 교량, LNG탱크, 고속철도, 지하철, 댐, 최근의 4대강 수중보 구조물 등 대규모 콘크리트 구조물의 수화열 저감을 위한 노력이 필요하다. 국내에서는 1995년부터 양회업체를 중심으로 저발열형 혼합시멘트 연구 개발이 시작되어 1998년 부산 광안대로에 삼성분계 혼합시멘트(ternary blended cement, TBC)가 약 2만톤 적용된 이후 TBC의 사용이 보편화되었다. TBC는 1종 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC)에 고로슬래그시멘트(blast furnace slag, BFS)와 플라이애시(fly ash, FA)를 혼합 치환한 형태로써 OPC, 고로슬래그시멘트 및 플라이애시시멘트 등에 비해 수화열 발생이 저감되고 내구성능이 우수한 것으로 알려져 있다[4]. 그러나 TBC는 OPC, 고로슬래그시멘트 및 플라이애시시멘트에 비해 콘크리트의 조기강도 발현성이 상대적으로 느린 특징이 있다[5-6].

한편 대규모 토목 및 건축 현장에서는 공사기간의 단축을 통한 생산성의 향상과 비용절감을 위해 TBC 콘크리트의 조기강도 향상이 요구된다. 또한 외기온도가 낮은 동절기 공사에서 별도의 단열 및 가열양생을 행하지 않으면 초기동해를 입기 쉽고, 경화 지연으로 인한 강도 발현 저하 문제가 발생된다[7-9]. 이와 같은 이유로 TBC 콘크리트의 설계 강도를 상향시키는 방법도 있으나 과다 설계 및 경제성이 결여되는 문제점 등이 발생된다. 따라서 TBC 콘크리트의 조기강도 발현 성능을 향상시키기 위한 노력이 필요하다. 그러나 국내 관련 연구는 부족한 실정이다.

이 연구에서는 BFS와 무수석고(anhydrite, AH)의 분말도 및 첨가율 조절을 통해 TBC 모르타르의 조기강도 향상방안을 실험적으로 검토하고자 한다.

## 2. TBC 메커니즘 및 조기강도 확보방안

### 2.1 TBC 메커니즘

OPC의 수화반응을 빠르게 진행시켜 강도를 조기에 발현시키고 수화발열량을 적게 제한한다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 적은 수화열 발생 및 소요의 강도발현특성을 동시에 만족하기 위해서는 OPC보다 발열량이 적은 「제3의 물질」을 이용하는 것이 필요하다.

시멘트의 수화열은 Hess의 법칙에 의해 수화전후의 용해열 차로 표시하게 된다[10]. 수화생성물의 용해열은 대부분 일정하기 때문에, 미수화 상태에서의 용해열이 OPC보다 적은 수화반응물질을 제3의 물질로 이용하면 된다. 현재 제3의 물질로 주로 이용되어지는 혼화재료는 BFS와 FA가 있으며, 이들의 용해열을 Table 1에 나타내었다.

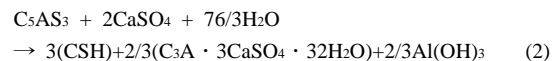
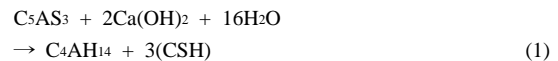
BFS는 잠재수경성 물질로, OPC와는 달리 물과 접촉할 때

스스로 수화반응을 개시하지 않는다. 그러나 강알칼리성을 가지고 있는 OPC와 혼합시 BFS의 유리질을 구성하고 있는 불규칙한 O-Si-O-Al-O의 3차원 망상구조체 쇄상 결합이 pH 12 이상의 강알칼리에 의해 절단된다.

망목구조내에 들어있는 Ca, Mg, Al 등이 쉽게 용출됨으로써 용출된 각 이온은 OPC와 같은 수화 반응으로 규산칼슘수화물이나 알루미늄산칼슘수화물을 생성하여 경화하게 되며, 식 (1) 및 식 (2)와 같다[11].

Table 1 Heat of dissolution of cement and mineral admixture

| Classification                  | Heat of dissolution (cal/g) |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Blast furnace slag(BFS)         | 582                         |
| Fly ash(FA)                     | 220                         |
| Ordinary portland cement(OPC)   | 603                         |
| High early strength cement(HSC) | 613                         |



따라서, BFS를 사용한 콘크리트는 초기재령에서는 강도발현이 늦지만, 장기재령에서는 오히려 높은 강도를 나타낸다. 이러한 경향은 BFS의 함량이 많을수록 현저하며 치환율이 증가할수록 수화열은 감소하는 경향을 나타낸다. 한편 BFS는 분말도 및 수화온도에 매우 민감하여 양생온도 및 분말도가 높을수록 활성도는 커지고 수화열은 증가하게 되는 특징이 있다.

FA는 포졸란 활성을 가진 물질로, 그 자신에게는 수경성이 없으나, 유리구조상의 가용성 규산 등이 시멘트 중의  $\text{C}_3\text{S}$  나  $\text{C}_2\text{S}$ 의 수화시 생성되는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 상온에서 반응함에 따라 안정한 불용성의 규산칼슘수화물이나 알루미늄산칼슘수화물 등을 만들게 된다[12]. FA 첨가 콘크리트의 압축강도는 비교적 초기재령에서는 일반 콘크리트보다 작지만, 재령이 증가함에 따라 포졸란 반응의 증가에 의해 압축강도가 커지게 된다. 또한 FA의 포졸란 반응은 온도가 높아짐에 따라 활성화되고 강도 증진 효과도 현저하다. 한편 FA는 OPC의 수화 생성물인 수산화칼슘과 반응하여 경화성을 발휘하지만, 그 반응속도는 상대적으로 상당히 늦고 수화 발열량도 매우 적다. FA의 용해열은 OPC의 절반 이하이므로 수화열 저감효과가 매우 크다. 그러나 수화속도가 느리기 때문에 혼입량을 증가시키면 초기 및 중기 강도발현이 작게 된다. 따라서 사용상에 한도가 있으며 일반적으로 30%의 혼입량을 그 한계로 보고 있다. 반면에 BFS의 용해열은 FA보다 커 수화열 저감 효과는 상대적으로 떨어지지만 강도발현에 있어서는 FA보다 유리하며, 전체 결합재의 약 60%까지 치환이 가능하다.

Table 2 Experimental plan

| Series | ID    | Binder composition(%) |    |               |       |       |       |              |        |        |
|--------|-------|-----------------------|----|---------------|-------|-------|-------|--------------|--------|--------|
|        |       | OPC                   | FA | BFS(fineness) |       |       |       | AH(fineness) |        |        |
|        |       |                       |    | 4,200         | 4,300 | 4,500 | 4,700 | 6,000        | 10,000 | 13,000 |
| I      | I-1   | 100                   | -  | -             | -     | -     | -     | -            | -      | -      |
|        | I-2   | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | -            | -      | -      |
|        | I-3   | 40                    | 20 | -             | 40    | -     | -     | -            | -      | -      |
|        | I-4   | 40                    | 20 | -             | -     | 40    | -     | -            | -      | -      |
|        | I-5   | 40                    | 20 | -             | -     | -     | 40    | -            | -      | -      |
| II     | II-1  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (0)*         | -      | -      |
|        | II-2  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (1)*         | -      | -      |
|        | II-3  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (2)*         | -      | -      |
|        | II-4  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (3)*         | -      | -      |
|        | II-5  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (4)*         | -      | -      |
|        | II-6  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (5)*         | -      | -      |
|        | II-7  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (6)*         | -      | -      |
| III    | III-1 | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (3)*         | -      | -      |
|        | III-2 | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | (3)*         | -      | -      |
|        | III-3 | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | -            | (3)*   | -      |
| IV     | IV-1  | 40                    | 20 | 40            | -     | -     | -     | -            | 0      | -      |
|        | IV-2  | 40                    | 20 | 37.5          | -     | -     | -     | -            | 2.5    | -      |
|        | IV-3  | 40                    | 20 | 37.0          | -     | -     | -     | -            | 3.0    | -      |
|        | IV-4  | 40                    | 20 | 36.5          | -     | -     | -     | -            | 3.5    | -      |
|        | IV-5  | 40                    | 20 | 36.0          | -     | -     | -     | -            | 4.0    | -      |
|        | IV-6  | 40                    | 20 | 35.0          | -     | -     | -     | -            | 5.0    | -      |
|        | IV-7  | 40                    | 20 | 32.5          | -     | -     | -     | -            | 7.5    | -      |

\* Addition ratio of total binder content

Table 3 Target properties and test item

| Series | Target properties    | Test item                              |
|--------|----------------------|--|
| I      | Compressive strength | - Compressive strength(3, 7 days)      |
| II     |                      |  |
| III    |                      |  |
| IV     | 3 days $\geq$ 20 MPa | - Compressive strength(3, 7, 28 days)  |
|        | 7 days $\geq$ 30 MPa |  |
|        |                      | - Chemical analysis of SO <sub>3</sub> |
|        |                      | - SEM analysis(I-1, I-2, II-5, IV-4)   |

이상과 같이 TBC는 사용하는 OPC 및 혼화재료의 종류, 양, 분말도 등의 조합으로 다양한 설계가 가능하며, 일반적으로 수화열 저감 및 건조수축이 적고 강도발현성이 양호한 3 성분 배합은 OPC 30~50%, BFS 20~60%, FA 10~30% 로 알려져 있다[10].

## 2.2 초기강도 확보 방안

TBC를 구성하고 있는 BFS의 경우 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 체인구조가 OH<sup>-</sup>의 공격을 받아 용리되어 수화반응이 진행된다. 활발한 수화를 지속하기 위해서는 BFS로부터 용리한 Ca<sup>2+</sup>, OH<sup>-</sup>만으로는 부족하며, 외부로부터 OH<sup>-</sup>의 공급이 필요하며, BFS 표면의 수화물에 적절한 석출구조를 형성해야 한다. 이를 위해서는 액상의 pH를 약 12로 유지시키고, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 공존

시킬 필요가 있다. 이에 대한 방안으로 알칼리 활성화제인 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH, KOH, Ca(OH)<sub>2</sub> 등을 선택적으로 결합재 대비 소량 첨가하여 TBC 중 BFS의 잠재수경성을 촉진시키는 방법이 있다. 또한 BFS의 자극을 최대화시키기 위해 분말도를 향상시키는 방법이 있으나, 수화열 발생이 증가될 수 있으므로 주의가 요구된다.

한편 SO<sub>3</sub>함량 조절을 통한 에트링가이트(ettringite) 생성을 촉진시키는 방안이 있으며 이를 위해서 AH(CaSO<sub>4</sub>)를 첨가하는 방법이 있다. 또한 AH의 분말도를 증가시켜 물리적 접촉면적을 최대화하여 수화활성도를 높이는 방안도 고려할 수 있다. 따라서 TBC의 초기강도 확보를 위해서는 상기 방안들에 대한 실험적 검토가 필요하다.

## 3. 실험계획 및 시험방법

### 3.1 실험계획

TBC 모르타르의 초기강도 향상을 위한 실험계획은 Table 2와 같다. 모르타르의 초기강도 향상을 위해 BFS의 분말도(fineness) 4수준(4,200, 4,500, 4,600, 4,700 cm<sup>2</sup>/g) 및 AH의 분말도 3수준(6,000, 10,000, 13,000 cm<sup>2</sup>/g)과 첨가율을 각각 설정하였다.

이 연구를 위한 실험은 4단계를 설정하여 진행하였다. 1 단계에서는 BFS의 분말도를 조절하여 TBC 모르타르의 초기 수화활성을 높임으로써 초기강도 개선효과의 가능성을 검토하였다. 2단계에서는 분말도 6,000 cm<sup>2</sup>/g의 AH를 전체 결합재 대비 외함로 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6% 첨가하여 모르타르의 초기강도를 검토하였다. 3단계에서는 AH 분말도 6,000, 10,000, 13,000 cm<sup>2</sup>/g를 각각 외함로 3% 첨가하여 모르타르의 초기강도 특성을 검토하였다. 4단계에서는 3단계 검토에서 초기강도 개선효과가 가장 우수하게 나온 분말도의 AH를 결합재 내함로 0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 7.5% 범위까지 첨가하여 모르타르의 초기강도 특성을 검토하였다.

TBC 모르타르의 초기강도 향상을 위한 목표물성 및 실험 항목은 Table 3과 같다. 이 연구에서 개선하고자 하는 TBC 모르타르의 초기강도 개선목표는 OPC 100%(I-1)의 강도값을 고려하여, 재령 3일에서 20 MPa이상, 재령 7일에서 30 MPa이상으로 설정하였다. 실험항목은 1~3단계에서 재령 3, 7일 모르타르 압축강도를, 4단계에서는 재령 3, 7, 28일 압축강도 측정 및 SO<sub>3</sub> 화학분석을 각각 실시하였다. 최종적으로 초기강도 발현에 따른 수화생성물의 형성을 확인하고자 SEM(scanning electron microscope) 분석을 수행하였다. 이 연구에 사용된 재료의 물리적 특성은 Table 4와 같다.

### 3.2 시험방법

모르타르 배합은 KS L ISO 679 『시멘트의 강도 시험방법』에 의거 결합재 : 표준사 = 1 : 3, W/B = 50% 조건에

Table 4 Properties of materials

| Material                       | Properties       |                                    |               |
|--------------------------------|------------------|------------------------------------|---------------|
|                                | Specific gravity | Fineness( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) | Ignition loss |
| Ordinary portland cement (OPC) | 3.15             | 3,488                              | 2.17          |
| Blast furnace slag (BFS)       | 2.94             | 4,188                              | 0.34          |
|                                |                  | 4,312                              |               |
|                                |                  | 4,523                              |               |
|                                |                  | 4,701                              |               |
| Fly ash (FA)                   | 2.12             | 3,878                              | 3.02          |
| Anhydrite (AH)                 | 2.21             | 6,035                              | -             |
|                                |                  | 10,056                             |               |
|                                |                  | 12,941                             |               |

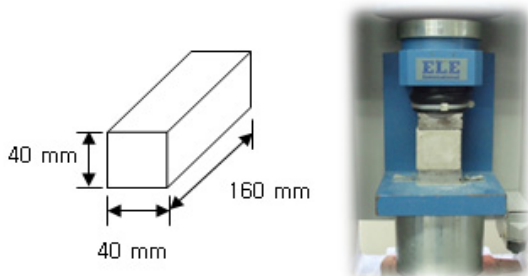


Fig. 1 Compressive strength test specimen.



Fig. 2 Scanning electron microscope.

준하여 실시하였다. TBC 모르타르의 조기강도 향상을 검토하기 위한 압축강도 시험은 KS L ISO 679 『시멘트의 강도 시험방법』에 의거하여 Fig. 1과 같은 공시체를 제작하고 재령 3, 7 및 28일에 각각 측정하였다. 또한 TBC의  $\text{SO}_3$  함량을 정량적으로 분석하기 위해 KS L 5120 『포틀랜드 시멘트의 화학 분석 방법』에 준하여 함량 분석을 실시하였다. SEM 측정은 Fig. 2와 같은 JEOL사의 장비를 이용하였으며, TBC의 조기강도 발현에 따른 수화생성물을 확인하고자 배율 20,000배로 관찰하였다.

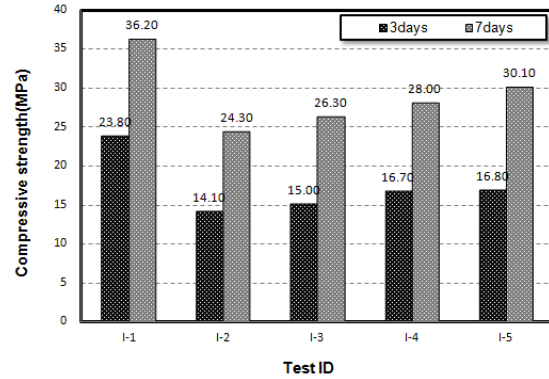


Fig. 3 Compressive strength obtained from five types of mortar mixes.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 고로슬래그미분말의 분말도 영향(1단계)

Fig. 3은 OPC 100% 및 BFS의 분말도에 따른 TBC 모르타르의 압축강도 시험 결과이다. OPC 100%인 I-1의 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났다. TBC는 BFS의 분말도가 높아질수록 모르타르의 압축강도도 증가되는 경향으로 나타났다. 그러나 분말도를 4,700  $\text{cm}^2/\text{g}$ 까지 상향하더라도 재령별 압축강도의 증진은 약 20% 정도로써, 본 연구에서의 목표 조기강도에는 미치지 못하는 것으로 나타났다.

### 4.2 무수석고 첨가율에 따른 영향(2단계)

Fig. 4는 분말도 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 인 AH 첨가율에 따른 TBC 모르타르의 압축강도 시험 결과이다.

AH의 첨가율을 외할로 4% 까지 증가시킬수록 재령 3일 압축강도도 증진됨을 확인하였다. 그러나 AH 첨가율 5, 6% 배합에서는 압축강도가 감소되는 경향으로 나타났다. 이는 AH 첨가율이 일정수준 이상이 되면 반응 후 잔류 AH가 모르타르의 과팽창 요인으로 작용하여 강도저하의 원인이 될 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

### 4.3 무수석고 분말도에 따른 영향(3단계)

Fig. 5는 AH의 분말도 변화에 따른 TBC 모르타르의 압축강도 시험 결과이다.

AH의 분말도에 따른 압축강도 변화를 살펴보기 위해, 2단계에서의 실험결과를 바탕으로 전체 결합체의 3%를 외할 치환하여 실험을 진행하였다. 실험 결과 AH 분말도가 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 에서 10,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 상승함에 따라 모르타르 조기강도도 증가 발현됨을 확인할 수 있었다. 그러나 AH 분말도 13,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 에서는 분말도 10,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 에 비해 강도가 낮게 발현되었다. 이는 과도한 AH의 분말도 향상은 AH 자체의 응집현상을 유발시켜, 조기강도 효과가 상대적으로 저하된 결과라 예상된다.

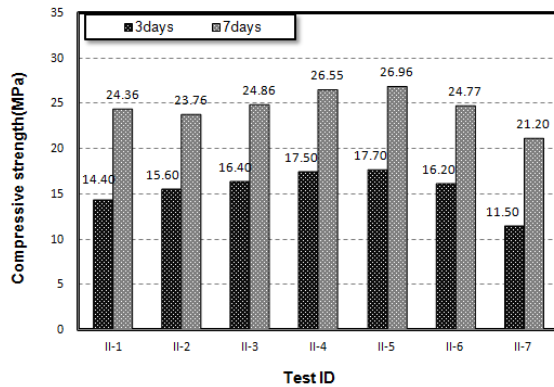


Fig. 4 Compressive strength obtained from seven types of mortar mixes.

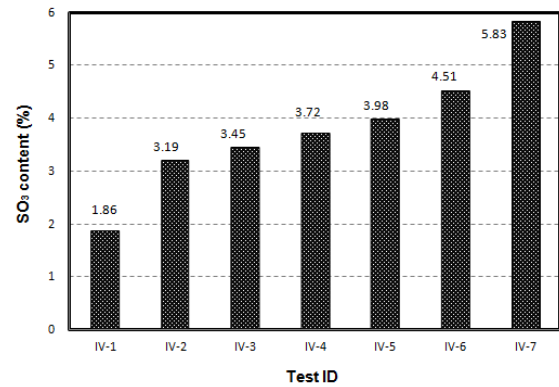
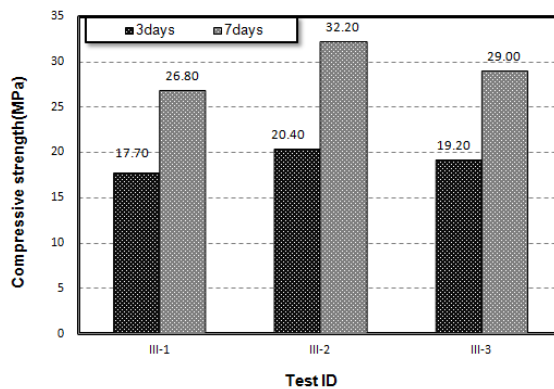
Fig. 7 SO<sub>3</sub> content obtained from seven types of mortar mixes.

Fig. 5 Compressive strength obtained from three types of mortar mixes.

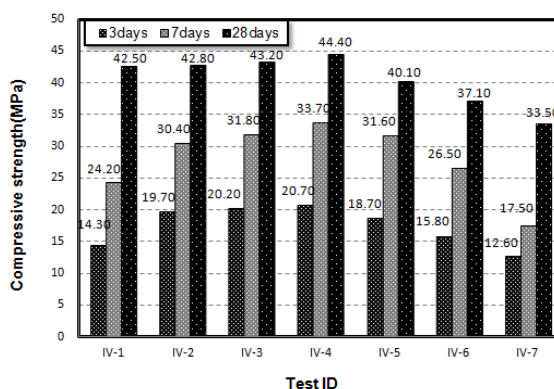


Fig. 6 Compressive strength obtained from seven types of mortar mixes.

상기의 결과를 종합하면 TBC 모르타르의 조기강도 향상을 위해서는 AH 분말도를 10,000 cm<sup>2</sup>/g으로 관리하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

#### 4.4 10,000 cm<sup>2</sup>/g 무수석고 첨가율에 따른 영향(4단계)

Fig. 6은 3단계 검토에서 조기강도 개선효과가 현저하게 나타난 분말도 10,000 cm<sup>2</sup>/g AH의 첨가율에 따른 압축강도 시험 결과이다.

AH 첨가율 3.5% 까지 재령 3, 7, 28일 압축강도가 증가되는 경향으로 나타났다. 그러나 4.0 및 5.0% 첨가 배합에서는 모든 재령에서 압축강도 증진이 둔화되는 경향을 보이고 있다. 특히, 7.5% 첨가 배합에서는 AH가 첨가되지 않은 IV-1에 비해 모든 재령에서 압축강도가 낮게 나타났다. 즉, 과도한 AH의 첨가는 잔류 AH로 인하여 모르타르의 과팽창 요인으로 작용되고, 압축강도 저하의 원인이 될 수 있으므로 세심한 주의가 필요하다.

따라서 TBC의 조기강도 향상을 위해서는 BFS의 분말도를 약 4,200 cm<sup>2</sup>/g 정도 유지한 상태에서 분말도 약 10,000 cm<sup>2</sup>/g의 AH를 3.5% 첨가하는 방안(IV-4)이 가장 적절한 것으로 나타났다.

#### 4.5 SO<sub>3</sub> 함량 분석 결과

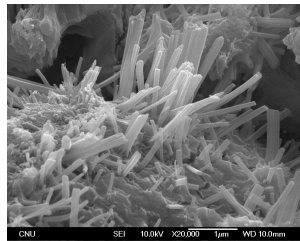
Fig. 7은 AH 첨가율 변화에 따른 TBC 모르타르의 SO<sub>3</sub> 함량 분석 결과이다.

AH 첨가율이 증가할수록 SO<sub>3</sub> 함량도 증가하는 것으로 나타났다. 조기강도 발현 특성이 가장 우수한 IV-4는 SO<sub>3</sub> 함량이 3.72%로 나타나 향후 조기강도 발현 특성을 위한 품질관리 기준 설정시 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

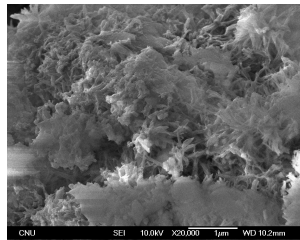
TBC 모르타르의 조기강도 확보를 위해서는 적절한 BFS의 분말도 유지와 함께 SO<sub>3</sub> 함량의 적절한 조절을 위한 AH 첨가를 동시에 고려해야 할 것으로 판단된다.

#### 4.6 SEM 분석 결과

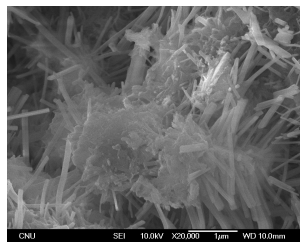
Fig. 8은 결합재 종류, AH 분말도 및 첨가율에 따른 재령 3일에서의 SEM 분석 결과이다.



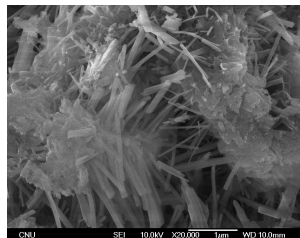
(a) I-1



(b) I-2



(c) II-5



(d) IV-4

Fig. 8 SEM analysis results obtained from four types of mortar mixes.

SEM 분석 결과를 살펴보면, 초기 모르타르 압축강도에 영향을 미치는 요인인 에트링가이트 수화 생성물의 핵(seed) 발생을 확인할 수 있다. 초기 재령에서  $SO_3$  함량이 많을 경우 에트링가이트 핵의 생성이 많아진다. 특히 길이가 긴 핵은 모르타르의 강도발현에 기여하지만, 지나친  $SO_3$  함량에 의한 짧은 길이의 핵은 모르타르 내부 팽창압 발생을 유발한다. 따라서  $SO_3$  함량을 적절히 조절하면, TBC 모르타르의 초기 에트링가이트 핵 생성을 활성화시키면서 길이도 증가시켜 모르타르 강도발현에 기여하게 된다.

I-1(OPC 100%)은 에트링가이트 핵이 장방향으로 길게 발

생되어 초기 모르타르 압축강도 증진이 상대적으로 가장 큰 결과와 일치한다. I-2는 3일 재령에서 에트링가이트 핵이 충분히 형성되지 않은 것을 확인할 수 있다. II-5와 IV-4는 첨가된 AH의  $SO_3$  영향으로 에트링가이트 핵 생성이 I-2에 비해 상대적으로 많고 길게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 IV-4는 형성된 에트링가이트의 핵이 상대적으로 길고 많으므로 초기 TBC 모르타르의 압축강도 발현에 기여가 큰 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

TBC 모르타르의 조기강도 향상을 위한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) BFS의 분말도가 증가할수록 TBC 모르타르의 조기강도는 향상되나, 목표물성에는 미치지 못하는 것으로 나타났다.
- 2) AH 첨가율 4% 까지 재령 3일 압축강도가 증가되나, 그 이상 첨가될 경우 압축강도가 감소되는 경향으로 나타났다.
- 3) 분말도  $10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$  AH를 첨가한 TBC 모르타르의 조기강도가 가장 크게 나타났다.
- 4) TBC 모르타르의 조기강도 향상을 위해서는 분말도 약  $4,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 BFS와 분말도 약  $10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 AH를 3.5% 첨가하는 방안이 가장 적절한 것으로 나타났다.
- 5) 조기강도 발현 특성이 가장 현저한 TBC 배합의  $SO_3$  함량이 3.72%로 나타나, 향후 조기강도 발현 특성을 위한 품질 관리 기준 설정시 참고할 수 있을 것으로 사료된다.
- 6) SEM 분석 결과, OPC 및 조기강도 특성이 가장 우수한 TBC 배합(IV-4)은 모르타르 압축강도 발현에 영향을 미치는 에트링가이트 핵의 분포가 많고 긴 것으로 나타났다.

## 후 기

이 연구는 충남대학교 학술연구비(관리번호:2011-1902)에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Yoo, D.M., Hwang, H.H., Kim, S.T., and Park, S.Y., "An Experimental Study on the Shear Connection for UHPC Deck Bridge," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 5, 2011, pp. 29-33.
- 2) Bang, J.W., Kim, J.S., Lee, B.Y., Jang, Y.I., and Kim, Y.Y., "Development of Hybrid Fiber-reinforced High Strength Lightweight Cementitious Composite," *Journal*

- of the Korean Society for Composite Materials, Vol. 23, No. 4, 2010, pp. 35-43.
- 3) Hong, G.H., Kim, K.S., and Han, B.K., "High Performance Fiber Reinforced Cement Composites in Construction Field," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 19, No. 1, 2006, pp. 43-48.
  - 4) Song, H.W., Lee, C.H., Lee, K.C., Kim, J.H., and Ann, K.Y., "Chloride Penetration Resistance of Ternary Blended Concrete and Discussion for Durability," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 4, 2008, pp. 439-449.
  - 5) Kim, K.H., Hwang, I.S., Kwon, O.B., Kim, K.M., and Park, H.C., "A Study on the Improvement of Early Strength of Low Carbon Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 687-688.
  - 6) Kim, D.J., Kim, T.H., Song, C.Y., and Bak, J.B., "An Experimental Study on the Method of Improvement of Early Strength for Slag Cement," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 369-370.
  - 7) Lee, S.S., Song, H.Y., and Lee, J.H., "An Experimental Study on the Early Strength Development Properties of Concrete According to Curing Condition and Used Materials," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 6, 2008, pp. 721-729.
  - 8) 山海堂, *コンクリート科学と技術*, 1996, pp. 1-10.
  - 9) 羽原俊祐, "コンクリートの構造とその物性, わかりやすいセメント科学," *社団法人セメント協会*, No. 9, 1993, pp. 78-104.
  - 10) Lotte Engineering & Construction, "초고층 구조물의 기초 콘크리트 타설 방안 연구," 2008, pp. 13-14.
  - 11) Ghosh, S.N., *Advances in cement technology*, Pergamon press, 1983, pp. 560-561.
  - 12) 荒井康未, 장복기, 정창주, 이종호, 임용무, *시멘트 재료 화학*, Chonnam University Press, 1998, pp. 266.