

## 메타카올린과 실리카폼 혼합에 의한 콘크리트 내 알칼리-실리카 반응 억제 효과

이효민<sup>1\*</sup>, 황진연<sup>1</sup>, 진치섭<sup>2</sup>, 전쌍순<sup>2</sup>, 윤지해<sup>1</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지질학과(hmlee61@pusan.ac.kr)

<sup>2</sup>부산대학교 토목공학과

### 1. 서론

콘크리트의 내구성이란 풍화작용, 화학물질의 작용 또는 마모 등의 원인에 의해 유발되는 성능저하에 대하여 그 본래의 형상과 질을 유지하는 성질을 의미한다. 성능저하는 콘크리트의 내적구성요소들의 화학적 및 광물학적 결합에 따라 유발되기도 하며, 외부의 화학물질의 유입에 의한 화학반응의 결과 그 구성요소의 광물학적·화학적 변화에 의해 콘크리트의 성능이 급속히 저하되기도 한다. 최근에는 콘크리트의 용도와 활용이 더욱 다양해짐에 따라 그 설치환경특성에 따라 발생할 수 있는 특징적인 성능저하를 방지를 위해 다양한 혼화재(admixture)를 사용한 고내구성 및 기능성의 특수 목적용 콘크리트의 개발 및 활용에 대한 관심이 증가되고 있다. 다양한 광물혼화재(mineral admixture)가 콘크리트의 내구성, 작업성, 경제성 등을 개선 향상시키기 위하여 사용되고 있다. 전통적으로 화산회가 천연 포조란(pozzolan)으로 고대로부터 사용되어왔으며, 점토광물, 제올라이트, 응회암, 세일, 사암, 규조토 등의 다양한 천연광물이 혼화재로 그 사용되어왔다. 근래에 와서는 산업폐기물의 활용과 자원절약의 차원에서 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말과 실리카폼의 광물혼화재로의 사용 및 작용 방안이 널리 연구되고 있으며, 최근에는 메타카올린과 같은 소성점토(calcined clay)가 우수한 포조란 반응특성을 나타낼 수 있는 새로운 광물혼화재로서 특수목적용 및 고기능성 콘크리트 개발로의 그 활용 가능성이 선진국을 중심으로 연구가 시작되고 있다. 근래에 들어 골재자원의 고갈로 인해 화학적으로 불안정한 쇄석골재의 광범위한사용과 제조공정의 변화로 시멘트의 알칼리 함량이 지속적인 증가 및 특히 해안구조물의 경우에 해수에 의해 추가되는 알칼리에 의한 알칼리-실리카 반응의 문제는 더욱 심화될 것으로 예상됨으로 콘크리트 기술에서 알칼리-골재반응에 의한 피해 방지가 주목받는 분야가 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 알칼리용액의 침투에 따른 메타카올린과 실리카폼의 알칼리-실리카 반응 억제 효과와 그 메커니즘에 대하여 연구하였다.

### 2. 실험개요

본 연구에 사용된 골재는 잠재적인 알칼리 반응성을 평가하는 모르타르 바(Mortar-Bar) 시험방법인 ASTM C 227 및 ASTM C 1260에 의해 알칼리-실리카 반응성이 나타난 변성암(호온펠스)을 골재를 사용하였다. 혼화재의 치환율에 의한 알칼리-실리카 반응의 저감효과는 메타카올린은 시멘트 중량에 대하여 0, 5, 10, 15, 25, 35%로 치환하고, 실리카폼은 시멘트 중량에 대하여 0, 5, 10, 15, 20%로 치환하여 촉진법인 ASTM C 1260 시험법으로 공시체를 제작한 후, 모르타르 길이변화율로 비교하였다. 시험 모르타르는 바인더(Binder=cement + 혼화재)와 골재를 무게비가 1 : 2.25가 되도록 하고, 물·바인더 비(W/B)는 0.47로 배합을 하였다. 공시체는 2.5×2.5×30cm 치수의 붓을 사용하여 각 골재 당 3개의 길이변화 시편을 제작하였다. 시험 시편은 1N NaOH 용액에 담구고 80±2℃의 온도로 유지시켰다. NaOH 용액이 들어있는 용기는 polypropylene으로 밀봉이 가능하도록 제작하였다. Mortar-Bar의 길이변화는

zero reading 후 3, 6, 9, 12, 14일에 대해 매번 같은 시간에 측정하였다. 혼화재를 혼합한 모르타르의 압축강도 시험은 KS L 5105 “시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 수행하였다. 유동성을 파악하기 위하여 모르타르 길이변화 공시체 제작 시 플로우 시험(flow test)을 실시하였다. 본 실험에 사용된 혼화재들은 국내산으로서 메타카올린은 하동·산청 지역의 고령석광물을 국내 00사에서 소성 제조한 것이며, 메타카올린과 실리카폼의 화학적 성분은 Table 1과 같다. 혼화재 치환에 따른 포조란 반응성 검토를 위하여 Binder를 따로 혼합하여, 각 재령일 별로 XRD분석을 통하여 포트랜드아이트( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )의 함량에서 변화를 정량적(Siloquant)으로 분석하였다. 시험 후 시편은 박편으로 제작하여 알칼리-실리카 겔의 특성을 SEM/EDAX로 분석 예정이다.

Table 1. Chemical compositions of mineral admixtures used in the study.

|             | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | CaO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | LOI   |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------|------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Metakaolin  | 51.70            | 40.312                         | 7.429                          | 0.486 | 3.314 | 0.992             | 0.469            | 0.02  | 0.198                         | 3.844 |
| Silica Fume | 94.296           | 0.141                          | 0.360                          | 0.913 | 0.108 | 0.311             | 1.632            | 0.263 | 0.119                         | 1.214 |

### 3. 결과 및 토론

#### 3-1. 알칼리-실리카반응에 의한 팽창 억제 효과

ASTM C 1260에 준하여 측정한 혼화재의 치환율에 따른 모르타르의 알칼리-실리카 팽창에 따른 길이변화율은 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 메타카올린의 경우에는 치환율 15%이하에, 실리카폼의 경우에는 치환율이 10% 이하에서 14일의 길이변화는 감소하였지만 ASTM C 1260에서 규정하고 있는 0.1% 팽창률을 넘는 것으로 알칼리-실리카 반응에 의한 팽창억제 효과가 충분하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 실리카폼의 치환율이 10% 이상, 메타카올린의 치환율 15% 이상에서 길이변화가 급격히 감소하여 0.2% 이상의 알칼리-실리카 반응에 의한 모르타르의 팽창을 억제하는 효과를 보여주고 있다. 재령일증가함에 따라 치환율에 관계없이 길이변화의 증가율은 약간씩 증가하는 경향을 나타냈으나, 혼화재를 혼합한 경우보다 혼합하지 않은 경우에는 재령에 따른 길이변화 증가량이 더 커지는 경향을 알 수 있다. 그러나 실리카폼의 경우 15% 이상, 메타카올린의 경우에는 25%이상에서 재령일에 따른 길이 증가율이 안정적으로 감소되는 것으로 나타났다.

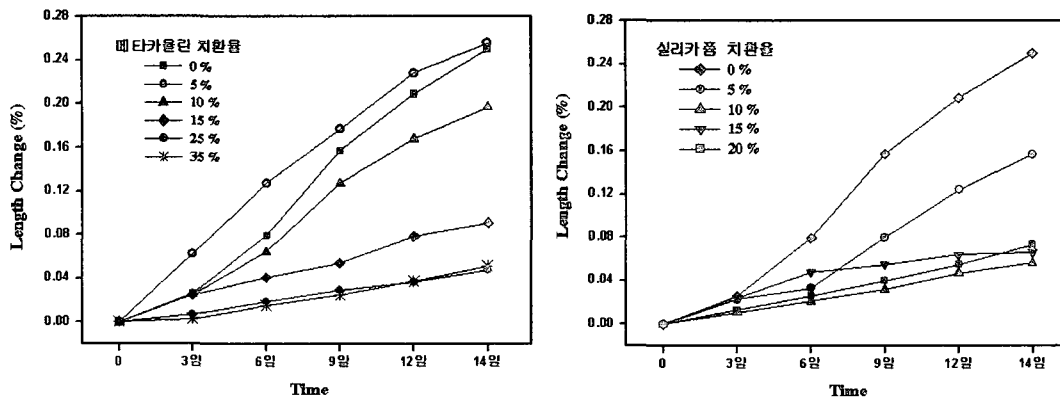


Fig. 1. The alkali-silica expansion of mortar-bars mixed with various replacement ratio of

mineral admixtures.

### 3-2. 물성특성에서의 변화

압축강도시험 결과 실리카폼의 경우에는 15% 치환율을 제외하고 대체적으로 초기(7일) 및 후기(28)일 강도에서 보통의 모르타르 보다 낮은 경향을 나타내었다. 그러나 메타카오린의 경우 초기강도의 경우 보통의 모르타르보다 전 치환율 범위에서 높게 나타났으며, 후기강도는 35%의 치환율을 제외한 전 치환율 범위에서 보통의 모르타르 이상의 우수한 강도 발현을 보여준다. 두 혼화재 모두 10% 이상의 치환율에서 유동성이 저하되는 것으로 나타났다. 이러한 유동성 저하는 실리카폼과 메타카오린의 높은 표면적으로 인한 배합수의 흡수량을 증가시킴으로 발생하는 문제점으로 유동성의 개선의 효과가 있는 플라이애쉬의 혼합 혹은 감수제의 사용이 고려되어야 할 것으로 생각된다.

### 3-3. 광물혼화재의 포조란 반응 특성에의 관련성

포조란이란  $\text{SiO}_2$  혹은  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 의 기본 구조를 가지는 물질로서 그 자체는 거의 교질 물질로서의 성질을 가지지 않으나, 수분이 존재할 경우 포틀랜드 시멘트의 수화반응에 의해 생성되는 포트랜다이트( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )와 결합하여 시멘트의 주 교질 물질인 CSH, CAH, CASH을 형성하는 물질을 말한다. XRD 정량분석은 실리카폼과 메타카오린의 혼합은 콘크리트 내 무게비로 약 25% 정도를 구성하는 포트랜다이트의 비를 재령일과 치환율이 증가함에 따라 감소시키고, 시멘트의 주 교질 물질인 CSH, CAH, CASH의 비를 증가시킴을 보여준다. 이러한 포트랜다이트의 감소와 교질 물질비의 증가는 콘크리트의 강도 증가에 기여한 것으로 생각된다. 또한, 포트랜다이트는 콘크리트내의 pH를 유지하는 기능과 함께 경화된 콘크리트의 내구성에 영향을 미치는 유해성 화학반응에 관여되는 광물이다. 따라서 포트랜다이트의 감소는 시멘트의 화학적 내구성을 증가 할 수 있다. 최근의 연구(Sabir, 2001)에 의하면, 알칼리-실리카반응에 의한 팽창은 높은 Ca 함량과 상대적으로 낮은 Na 혹은 K의 함량을 가지는 알칼리-칼슘-실리카겔을 형성하는 경우에 더욱 현저한 팽창이 수반되며, 겔의 양은 가용한  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 양과 실리카의 양에 좌우된다 한다. 광물혼화재의 혼합은 콘크리트내의 가용 포트랜다이트의 양을 줄여 유해성의 “높은 Ca-함유실리카겔(high Ca-silica gel)”의 형성이 감소되어 팽창률 감소에 기여하는 것으로 판단된다.

미세입자로 구성된 광물혼화재가 혼합은 평균 세공의 크기를 현저히 감소시키고, 이로 인하여 유해성 외부 화학물질의 확산과 수분 흡수율에 중대한 영향을 미치게 된다. 0.05-10  $\mu\text{m}$  크기의 모세 공극의 부피가 감소함에 따라 투수계수가 감소된다. 이와 같이 극 미세공의 형성에 의한 투수계수의 감소로 외부 기원의 특정 유해성 화학물질의 침투율을 감소시키는 것은 콘크리트의 내구성에 중요한 영향을 미치는 하나의 요인이 되는 것으로 알려져 있다(Gruber et al., 2001). 본 연구의 실험조건에서 혼화재의 낮은 치환율에서 유해성 팽창을 억제할 수 없었던 것은 이들의 치환량으로는 모르타르 조직의 치밀화로 인한 알칼리 용액의 침투에 대한 혼화재들의 물리적 효과가 불충분했던 것도 하나의 이유로 생각 할 수 있다.

## 4. 결론

이상의 연구 결과를 종합적으로 분석한 결과, 콘크리트 설치 후 내·외적 요인에 의한 알칼리-실리카반응에 의한 내구성저하를 방지를 위해 메타카오린은 15-25%, 실리카폼은 10-15% 정도를 혼합하는 것이 가장 효과적인 것으로 생각된다.

## 5. 사사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2001-00064)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

## 6. 참고문헌

- Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D. and Thomas, M. D. A. 2001. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement & Concrete Composite*. 23. 479-484.
- Sabir, B. B. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolams for concrete: a review. *Cement & Concrete Composite*. 23. 441-454.