

MIP를 통한 혼합 시멘트계 재료의 미세구조 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Microstructure Characteristics of Cementitious Composites by MIP

김 태 상* 정 상 화** 채 성 태*** 이 봉 춘**** 우 영 제***** 송 하 원*****
Kim, Tae Sang Jung, Sang Hwa Chae, Seong Tae Lee, Bong Chun Woo, Young Je Song, Ha Won

ABSTRACT

Recently, in Korea, there has been an increasing number of research papers published which are to improve durability of concrete, particularly by analyzing correlation between diffusivity of chloride and porosity/pore size distribution. In these studies, such test methods as mercury intrusion porosimetry(MIP), gas adsorption or image analysis method are used to analyze the microstructure of materials while MIP is most widely used for concrete. This study analyzes the results of porosity and pore size distribution of paste and concrete adding fly ash or blast furnace slag by using MIP equipment which is widely used for determining micro-porosity structure of cementitious materials. A variation in porosity and pore size distribution at the curing day 3, 7 and 28 has been observed by using MIP equipment for cement paste 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60% of W/C when using 300kg/m³ of cement, 35%, 45%, 55% of W/C when replaced 60% with blast-furnace slag, and 35%, 45%, 55% of W/C when replaced 30% with fly ash. For long-term water cured normal OPC concrete and mixed concrete replaced 60% with blast-furnace slag powder, micro-structure of the sample has been analyzed by using MIP equipment when W/C indicated 40%, 45%, 50% respectively and the binder varied 300kg/m³, 350kg/m³, 400kg/m³, and 450kg/m³.

요 약

최근 국내에서는 콘크리트의 내구성능을 향상시키기 위해서 많은 연구결과들이 발표되고 있는데 특히 염화물의 확산특성과 기공율 및 기공크기의 분포와 관련하여 분석한 논문들이 많아지는 추세이다. 이때 미세구조를 분석하기 위한 방법은 수은 압입법, 가스 흡착법, 화상분석법 등이 있는데, 콘크리트 분야에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 방법은 수은 압입법이다. 본 연구는 시멘트계 재료의 미세공극 구조를 파악하기 위해서 널리 사용되고 있는 MIP 장비를 이용하여 혼합 시멘트 페이스트와 혼합콘크리트에 대하여 공극율과 공극크기분포를 측정된 결과를 분석한 것이다. 시멘트 량 300kg/m³을 기준으로 W/C 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%와 고로 슬래그 미분말 60%를 치환하고 W/C 35%, 45%, 55% 및 플라이애시 30%치환하고 W/C 35%, 45%, 55% 인 시멘트 페이스트 시편에 대해서 MIP를 사용하여 3일, 7일, 28일의 공극율과 공극크기분포 등의 변화를 관찰하였으며, 장기간 수중 양생한 일반 OPC 콘크리트와 고로슬래그 미분말 60%를 치환한 혼합 콘크리트에 대해서는 W/C 40%, 45%, 50%, 그리고 결합재량은 300kg/m³, 350kg/m³, 400kg/m³, 450kg/m³로 변화시킨 시편에 대해 MIP를 사용하여 미세구조를 분석하였다.

*정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터 구조재료팀 선임연구원

**정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터 구조재료팀장

***정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터장

****정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터 구조재료팀 선임연구원

*****정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터 구조재료팀 선임연구원

*****정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 교수

1. 연구배경 및 목적

최근 들어 국내에서는 철근 콘크리트 구조물의 내구성능 향상과 내구수명 설계에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며, 이러한 연구들을 통하여 확산과 대류이동 특성은 시멘트계 재료의 내구성 연구에 필수적인 요소라는 것이 인식되었다. 이러한 이동 메카니즘을 모델링하고 이해하기 위해서는 공극율이나 공극구조와 같은 물리적 고유의 파라메타들이 필요하다. 왜냐하면 공극율과 공극크기분포 또는 콘크리트의 물리적, 역학적 특성에 결정적인 영향을 미치며, 굳은 콘크리트의 가장 중요한 특성인 압축강도나 내구성은 공극구조와 직접적인 연관이 있기 때문이다¹⁾. MIP는 시멘트계 재료의 기공구조특성을 연구하는데 널리 사용되어져 온 방법으로 최근 몇 년 동안 이 방법은 수화된 시멘트 페이스트, 모르타르, 콘크리트의 기공구조 특성을 연구하기 위하여 국내에서도 많이 도입되었다. 또한 광물계 혼화제인 플라이애시나 고로슬래그 미분말은 콘크리트에서 염화물 이온의 침투를 억제한다는 것은 잘 알려진 사실이나 이러한 재료의 수화에 따른 미세구조의 형성에 대한 연구가 많지 않아 염화물 확산성과 미세구조의 관계가 아직까지는 명확하지 않다. 그러므로 본 논문에서는 혼화제를 사용한 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 물시멘트비와 재령에 따른 미세구조의 변화에 대해서 MIP를 사용하여 얻은 데이터를 가지고 분석하고자 한다.

2. 수은압입법(MIP)의 물리적 기초

수은압입법(MIP)은 시험시편의 준비과정에서 상당히 많은 사항들을 고려하여야 하는 측정법임에도 불구하고, 사실 단순한 원리를 이용하여 간단히 공극의 크기 및 분포를 측정할 수 있다. 이때 사용되는 방정식이 Washburn equation이다. 공극의 모양을 실린더형 모세관으로 정의한다면 수은이 침투하는 공극의 크기는 다음의 식과 같이 적용된 압력에 반비례한다.²⁾

$$D = - \frac{4\gamma \cos \theta}{P} \quad (1)$$

여기서, P는 수은 압입 압력(psia), γ 는 수은의 표면장력(dynes/cm), θ 는 고체와 수은의 접촉각(degrees), D는 공극직경이다(μm).

또한 모세관 공극의 총 체적이 V_t 이고 총 표면적이 S_t 이면, 이 둘의 관계로부터 모세관 공극의 평균직경 D_a 를 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$D_a = \frac{4V_t}{S_t} \quad (2)$$

3. 실험

3.1 시편제작

MIP를 사용하여 시멘트 페이스트 시편과 콘크리트에 대해서 실험하였는데, 시멘트량 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 을 기준으로 W/C 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%와 고로 슬래그 미분말 60%를 치환하고 W/C 35%, 45%, 55% 및 플라이애시 30%치환하고 W/C 35%, 45%, 55% 인 시멘트 페이스트 시편을 제작하였으며, W/C 40%, 45%, 50%, 그리고 결합재량은 $300\text{kg}/\text{m}^3$, $350\text{kg}/\text{m}^3$, $400\text{kg}/\text{m}^3$, $450\text{kg}/\text{m}^3$ 로 변화시킨 OPC 콘크리트와 고로슬래그 미분말 60%를 치환한 혼합 콘크리트를 제작하여 수중양생 후 1년 된 시편을 대상으로 미세구조를 분석하였다.

3.2 MIP 시편준비

제작된 시편은 수은압입법으로 공극을 측정하기 위해서 각 재령에서 수화정지를 위하여 진공데시게이터에 넣고 아세톤으로 침지하였으며, 이후 105°C의 건조로에서 24시간 동안 건조시켜 시편에서 물을 완전히 제거하였다.

3.2 MIP 측정

본 연구에서는 Micromeritics Auto PoreVI 9505 수은압입장비를 사용하였는데 최대 33,000psia (228MPa) 까지의 압력으로 수행하였다. 많은 논문에서 MIP의 결과에 영향을 주는 요소들에 대해서 연구하였는데 이러한 요소들은 시편준비방법, 수은의 접촉각 표면장력 등이다. 접촉각과 표면장력은 일반적으로 국내 논문에서 적용하고 있는 수치들을 적용하여 각각 130°와 485 dines/cm을 사용하였다.

4. 실험결과 분석

기대했던 바와 같이 물시멘트비가 증가할수록 총공극율 및 한계공극직경이 커지는 경향을 보였으며, 수화가 진행될수록 공극이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한 이는 고로슬래그 미분말과 플라이애시에서도 같은 경향을 보였다. 물시멘트비가 커짐에 따라 최대공극율의 공극크기가 1 μ m쪽으로 커지는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 0.1 μ m이하 크기의 공극은 물시멘트비가 많을수록 증가하나, 0.1 μ m~1 μ m 크기에서의 공극은 물시멘트비가 많을수록 작아지게 된다.

일반 시멘트 페이스트나 플라이애시를 혼입한 페이스트의 경우에는 한계공극직경이 물시멘트비에 따라 커지는 경향을 보이고 있으나 고로슬래그 미분말의 경우에는 전체적으로 공극량은 줄어들었으나 한계공극직경의 변화는 보이지 않고 있다.

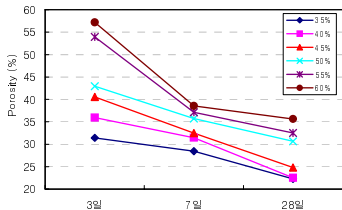


그림 1 OPC 시멘트 페이스트

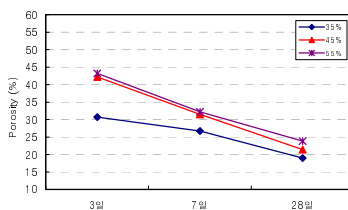


그림 2 GGBS 60% 혼합 페이스트

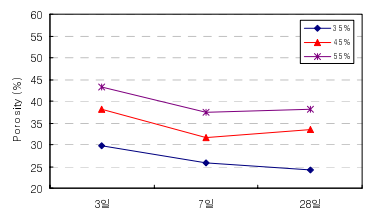


그림 3 PFA 30% 혼합 페이스트

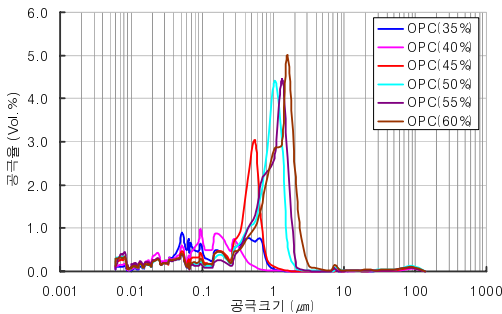


그림 4 OPC 모르타르 공극크기분포(28일)

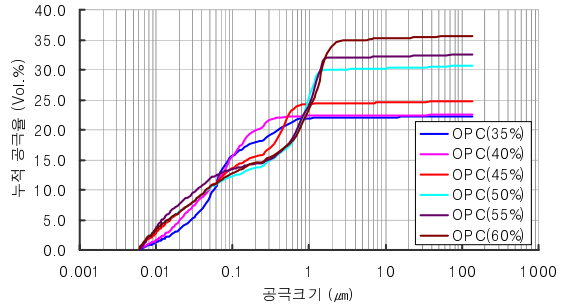


그림 5 OPC 모르타르 누적공극율(28일)

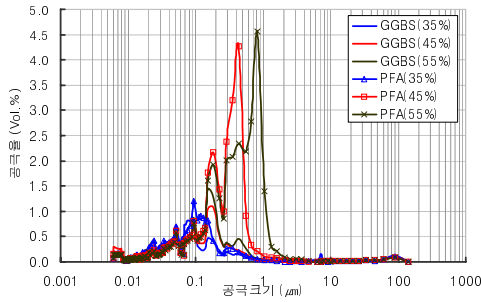


그림 6 혼합 시멘트모르타르 공극크기분포(28일)

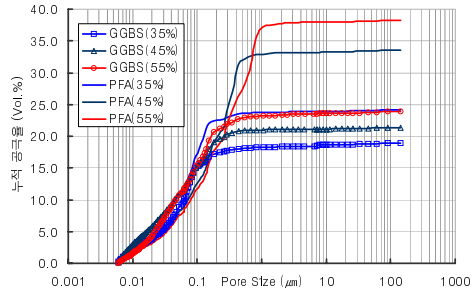


그림 7 혼합시멘트모르타르 누적공극율

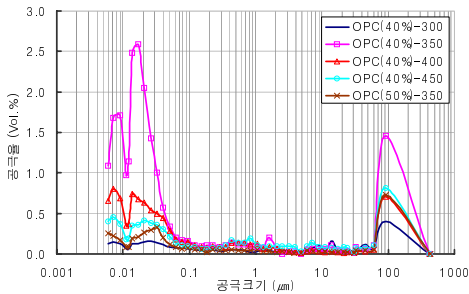


그림 8 OPC 공극크기분포(1년양생)

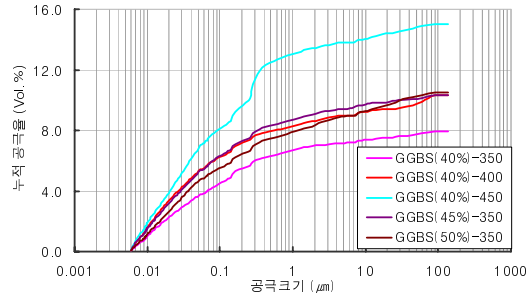


그림 9 GGBS 콘크리트 누적공극율(1년양생)

5. 결론

본 연구에서는 혼합시멘트계 재료의 미세구조 특성을 살펴보았는데, 물시멘트비에 따라 공극크기 분포와 공극율이 영향을 받고 있으며, 이러한 미세구조 특성은 콘크리트에서 이온이나 기체의 확산 특성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 본 연구로부터 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 물시멘트비에 따라 공극률이 증가하며, 시멘트의 수화진행에 따라 공극율이 감소한다.
- 2) 모세관 공극영역의 누적공극율을 보면 1년된 고로슬래그 60% 혼합콘크리트에서는 바인더량이 증가함에 따라 공극율이 증가하나, OPC 콘크리트에서는 바인더량이 증가함에 따라 공극률이 감소한다
- 3) 물시멘트비가 커질수록 한계공극크기가 $1\mu\text{m}$ 부근으로 가까워지는 경향을 보이며, 1년양생 된 콘크리트의 한계공극크기는 모세관공극의 마이크로 영역인 $0.05\mu\text{m}$ 이하로 감소한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업 중 ‘고성능 다기능 콘크리트의 개발 및 활용 기술 연구’의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. R. kumar, B. Bhattacharjee “Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research”, Cement and Concrete Research 33(2003) pp 417~424
2. Micromeritics AutoPore IV 9505 Operator’s Manual