



메타카올린을 사용한 고강도콘크리트의 모세관공극 특성과 전위차 염소이온 확산계수에 관한 연구

김남욱¹⁾ · 여동구²⁾ · 송준호²⁾ · 배주성^{3)*}

¹⁾청주대학교 토목환경공학과 ²⁾전북대학교 토목공학과 ³⁾전북대학교 토목공학과, 공업기술연구센터

A Study on the Characteristic of Capillary Pore and Chloride Diffusivity by Electrical Difference of High-Strength Concrete Using Metakaolin

Nam-Wook Kim¹⁾, Dong-Goo Yeo²⁾, Jun-Ho Song²⁾, and Ju-Seong Bae^{3)*}

¹⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, RCIT, Chonju 561-756, Korea

ABSTRACT According to the high demand of concrete structures with high performance, various studies have examined on the high performance concrete, especially high strength concrete. Various admixtures are required to produce high strength concrete and silica fume has been the most popular admixture. Recently, however, metakaolin, which is similar to silica fume in properties but cheaper, has been introduced to high strength concrete. In this study, high-strength concrete using metakaolin were studied of capillary pore structure by mercury intrusion porosimetry technique and the accelerated chloride diffusivity by electrical difference. In result, it was found that the pore structure improved and compressive strength increased and chloride diffusivity reduced as more metakaolin content was added. In addition, a regression analysis of 5~2,000 nm pore volume and both compression strength and chloride diffusivity revealed that each these had a high correlation of about 0.76 and 0.68.

Keywords : metakaolin, capillary pore, mercury intrusion porosimetry, pore structure, chloride diffusivity

1. 서 론

콘크리트 구조물이 고층화, 대형화 및 다양화됨에 따라 콘크리트의 품질 또한 고성능화가 요구되고 있으며, 그 중 고강도콘크리트에 대한 연구도 활발히 진행되어 왔다. 고강도콘크리트 제조에 관한 연구는 적절한 혼화재료의 개발, 특수한 배합설계 및 시공 방법 등으로 구분되어지며, 그중에서도 혼화재료의 개발 및 이의 활용에 관한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다¹⁾. 혼화재료는 일반적으로 보통포틀랜드시멘트와 혼합하여 사용하며 구조물의 초기 수화열 저감, 내구성의 향상 및 압축강도 증진 등 구조물에 요구되는 목적에 맞도록 사용된다. 이러한 혼화재료의 대표적인 것으로는 플라이애쉬, 고로슬래그 및 실리카폼 등을 들 수 있으며 지금까지 콘크리트의 성능 개선에 다양하게 활용되어 왔다. 혼화재료 중 고강도콘크리트를 제조하기 위해서 일반적으로 사용되는 실리카폼은 성능은 우수하나 제조 단가의 상승으로 인한 경제성이 단점으로 지적되어 왔다. 그러나 최근 들어 실리카

폼과 거의 특성이 동일하고 경제적으로 유리한 메타카올린에 대한 연구가 주목을 받고 있다^{2,3)}. 메타카올린은 미국, 프랑스, 일본 등 선진국에서는 이미 상품화 되어 실리카폼의 대체제 및 고강도콘크리트의 제조 시 널리 사용되고 있는 추세이다. 메타카올린은 카올린을 특수처리 하여 제조하는데 카올린은 고령토에 함유되어 있으며 국내의 경우 경남지역에 그 매장량이 풍부하여 취득이 용이하다. 그러나 국내에서는 이러한 메타카올린을 고강도콘크리트의 혼화재료로서 활용하기 위한 연구 및 활용 실적이 상대적으로 미비한 실정이다⁴⁾. 한편 기존 연구에서 메타카올린을 사용할 경우 초기 수화열의 증가로 인한 온도균열의 가능성을 지적하고 있어 이에 대한 대비 또한 필요하다⁵⁾. 본 연구에서는 메타카올린을 사용한 고강도콘크리트의 특성을 구명하고자 콘크리트 시험체를 제작하여 수은압입법 (이하 MIP)으로 모세관공극 구조를 분석하였고, 압축강도와 염소이온 침투 저항성을 측정하여 이들과 모세관공극과의 관계를 비교·분석하였다. 이러한 연구 결과를 종합적으로 평가함으로써 메타카올린을 고강도콘크리트의 혼화재료로 활용하기 위한 기초적인 자료로 제공하는데 본 연구의 목적이 있다.

*Corresponding author E-mail : seong@chonbuk.ac.kr
Received January 30, 2007, Accepted May 10, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

2. 콘크리트의 공극

수화 초기에 콘크리트의 공극은 물이 차지하였던 공극과 혼합 시 공기가 연행되어 발생하는 기포로 분류되며 경화가 진행됨에 따라 물이 차지하였던 공극은 시멘트 수화물에 의하여 그 크기가 감소하며 일반적으로 겔공극과 모세관공극으로 분류된다.

겔공극과 모세관공극의 크기에 대해서는 여러 가지 견해가 있으나 Uchikawa 등은 겔공극을 1~3 nm, 모세관공극을 3 nm~30 μm로 정의하였으며⁶⁾, Diamon 등은 1.2 nm 이하의 크기를 시멘트의 주요 수화물인 C-S-H의 층간 공극에 해당되는 결정 내 공극 (intracrystallite pore), 1.2~3.2 nm 범위를 결정 간 공극 (intercrystallite pore), 3.2~200 nm 범위를 겔 입자간 공극 (intergel particle pore)으로 분류하였다⁷⁾.

Metha 등은 5 nm 이하를 겔공극, 5~100 nm의 공극을 모세관공극으로 분류하였으며, 모세관공극을 다시 5~50 nm의 마이크로 공극과 50~100 nm의 매크로 공극으로 분류하였다. Metha에 의하면 마이크로 공극은 시멘트 경화체의 건조수축 및 크리프에 영향을 크게 미치며, 매크로 공극은 강도와 이온의 침투성에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하고 있으며, 10 μm 이상의 공극은 골재와 시멘트 경화체 사이의 천이 영역, 연행공기 및 갇힌 공기로 분류하였다⁸⁾.

이와 같이 공극의 크기 및 분류는 연구자에 따라 다소 차이는 있지만 공극의 크기는 콘크리트의 물성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서는 기존의 분류 내용과 연구를 참고로 하여 Fig. 1과 같이 공극의 크기를 구분하였으며 여러 공극 중 콘크리트의 물성에 가장 큰 영향을 미치는 콘크리트 모세관공극 구조를 평가하기 위하여 MIP로 측정 가능한 범위에서 총 공극

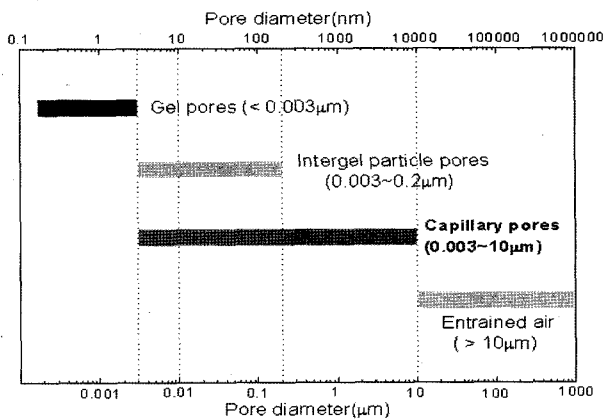


Fig. 1 Classification of pore sizes⁹⁾

Table 2 Chemical compositions and properties of materials

| Kinds | Composition (%) | | | | | | | Density (g/cm ³) | Specific gravity (cm ² /g) |
|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | MgO | Na ₂ O + K ₂ O | | |
| Cement | 21.4 | 5.1 | 2.99 | 0.32 | 64.0 | 1.6 | 0.79 | 3.15 | 3,360 |
| Fly ash | 49.5 | 27.9 | 7.82 | 0.82 | 2.00 | 2.03 | 5.20 | 2.23 | 3,327 |
| Metakaolin | 52.1 | 45.3 | 0.60 | 1.64 | 0.05 | - | 0.37 | 2.50 | 150,000 |

량, 공극 크기 5~50 nm의 마이크로 공극량, 공극 크기 50~100 nm의 매크로 공극량, 공극 크기 5~2,000 nm의 공극량으로 구분하고 MIP 분석 결과에 따라 공극 크기 30 nm 이하의 공극량과 30 nm 이상의 공극량 및 평균 공극 직경으로 분류하여 분석하였다.

3. 시험 개요

3.1 사용 재료

3.1.1 골재

본 연구에서는 잔골재는 하천사를, 굵은골재는 최대치수 25 mm의 쇄석을 사용하였으며 이들의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

3.1.2 시멘트 및 혼화재료

시멘트는 H사의 1종 보통포틀랜드시멘트 (OPC), 혼화재로 메타카올린 및 플라이애쉬를 사용하였으며, 이들의 화학 성분 및 특성은 Table 2와 같다.

3.2 배합

모든 콘크리트의 설계기준강도는 60 MPa로 설정하였으며, 슬럼프는 150±20 mm, 공기량은 3.0±1.0%로 일정하게 유지하였다. 또한 물-결합재비는 30%, 잔골재율을 40%로 설정하였다. 혼화재료의 경우 메타카올린은 시멘트 사용 중량의 5%, 10%, 15% 및 20%로 대체하였으며, 초기 수화열에 의한 온도균열을 방지하여 정확한 공극 측정을 하고자 플라이애쉬를 결합재 중량의 20%로 일정하게 혼입하였다. 또한 목표 슬럼프와 공기량을 확보하기 위해 소정의 PNS계 고성능 AE감수제 (HRMR)를 사용하였으며, 콘크리트의 배합표는 Table 3과 같다.

4. 시험 방법

4.1 압축강도 시험

콘크리트의 압축강도는 Ø100×200 mm 원주형 시험체

Table 1 Physical properties of aggregates

| Aggregates | Gravity | Absorption (%) | Max. size (mm) | F.M |
|------------------|---------|----------------|----------------|------|
| Fine aggregate | 2.53 | 1.31 | - | 2.80 |
| Coarse aggregate | 2.64 | 0.63 | 25 | 6.66 |

Table 3 Mixing proportions of concretes

| Specimens | W/B (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | |
|-----------|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| | | | Binder | | | W | S | G | HRMR |
| | | | C | FA | MK | | | | |
| OPCC | 30 | 40 | 464 | 116 | 0 | 174 | 603 | 943 | 10.9 |
| MK05C | | | 435 | | 29 | | 600 | 940 | 11.2 |
| MK10C | | | 406 | | 58 | | 598 | 936 | 11.6 |
| MK15C | | | 377 | | 87 | | 595 | 932 | 11.9 |
| MK20C | | | 348 | | 116 | | 593 | 928 | 12.4 |

를 제작하여 온도 20±2°C에서 수중양생 한 후 각각 재령 7일, 28일, 56일 및 91일에 KS F 2405에 따라 실시하였다.

4.2 MIP 시험

본 연구에서는 콘크리트의 모세관공극을 분석하기 위하여 mercury intrusion porosimetry (MIP)를 이용하였다. 수은을 60 kpsi까지 압입하여 공극직경 3 nm~1×10⁵ nm까지 측정하였고, 수은 접촉각은 130.0°로 하였다.

시험편은 수중양생한 재령 7일, 28일, 56일 및 91일 콘크리트 시험체를 파쇄한 후 ASTM D 4284에 의거 굵은 골재를 제외한 모르타르 부분을 105°C 온도에서 항량 건조시켜 사용하였으며, 수은의 압력과 압입량을 이용한 다음의 식 (1)로부터 공극의 직경을 산정하였다.

$$\varnothing = \frac{-4 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{P} \tag{1}$$

여기서, \varnothing : 공극의 직경 (cm)

P : 적용 압력 (kgf/cm²)

γ : 표면장력 (dyne/cm)

θ : 접촉각 (radian)

한편, 공극이 원통형이라 가정하면 총 표면적 (S_t)과 총 체적 (V_t)의 관계로부터 공극의 평균 직경 (D_a)은 식 (2)로부터 산정된다.

$$D_a = \frac{4V_t}{S_t} \tag{2}$$

4.3 염소이온 확산계수 시험

콘크리트의 전위차 염소이온 확산계수를 측정하기 위하여 $\varnothing 100 \times 200$ mm 원주형 시험체를 50 mm 두께로 절단한 후, Fig. 2와 같이 확산 셀을 구성하였다. 전해질로는 음극 셀 (Cell I)에 0.5 M 염화나트륨 (NaCl)과 포화 수산화칼슘 (sat. Ca(OH)₂) 수용액, 양극 셀 (Cell II)에 포화 수산화칼슘 수용액을 사용하였다. 이때 확산 셀의 전압을 30 V로 하여 8시간 동안 전류를 측정하였다⁹⁾.

일정 시간 동안 전위차를 가하여 염소이온의 이동을 촉진시킨 후 콘크리트 시험체를 할렬하여 0.1 N AgNO₃ 을 분무하였다. 할렬면을 통하여 염소이온의 침투 깊이를 측정하고 Tang 등의 식 (3)을 이용하여 비정상 상태의 촉진염소이온 확산계수(D)를 구하였다^{10,11)}.

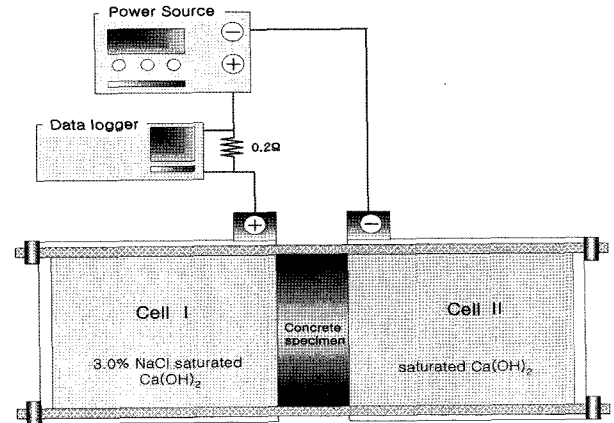


Fig. 2 Schematic of the diffusion coefficient test

$$D = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \tag{3}$$

여기서, $\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \text{erf}^{-1} \left[1 - \frac{2C_d}{C_o} \right]$

D : 비정상 상태에서 구한 전위차 촉진 염소이온 확산계수

R : 기체 상수 (8.314 J/mol·K)

T : 절대온도 (K)

L : 시편 두께 (m)

z : 이온 전자가

F : 패러데이 상수 (96,500 J/V·mol)

U : 전위차 (V)

x_d : 비색법에 의한 침투 깊이 (m)

t : 전위차의 적용 시간 (sec)

erf : error function

C_o : 음극 셀의 염소이온 농도 (mol/l)

C_d : 비색법에 의한 반응 농도 (mol/l)

5. 시험 결과 및 고찰

5.1 압축강도

메타카올린 대체율과 재령에 따른 압축강도는 Table 4 및 Fig. 3에 나타내었다. 메타카올린을 사용한 콘크리트의 압축강도는 OPCC와 비교했을 때 초기강도의 발현이 커 재령 7일에서 MK20C의 경우 약 59 MPa 정도로 OPCC의 28일 강도 수준을 나타냈으나, 재령 28일 이후의 강도 증진율은 크게 둔화되었는데 이는 초기에 포졸란반응이

Table 4 Result of compressive strength (unit: MPa)

| Types \ Ages | 7 | 28 | 56 | 91 |
|--------------|------|------|------|------|
| OPCC | 49.6 | 59.7 | 61.6 | 63.5 |
| MK05C | 51.1 | 61.9 | 62.7 | 64.3 |
| MK10C | 55.3 | 66.0 | 66.8 | 68.6 |
| MK15C | 58.3 | 67.3 | 68.0 | 69.0 |
| MK20C | 59.1 | 67.7 | 68.3 | 69.4 |

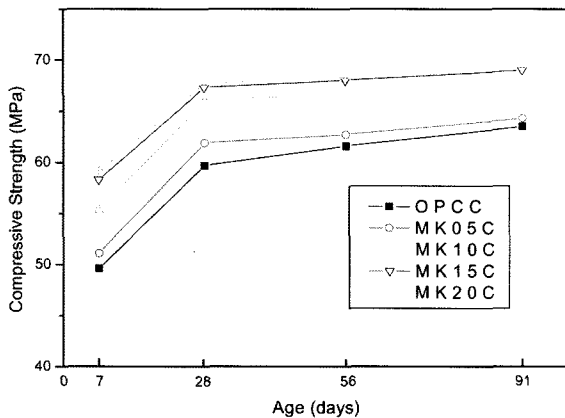


Fig. 3 Compressive strength according to the age

활발히 진행되었기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 메타카올린의 대체율이 증가할수록 전반적으로 압축강도가 증가하였으나 그 증가율은 메타카올린 대체율 15% 이상에서는 현저히 둔화됨을 알 수 있었다. 이는 메타카올린의 대체율이 증가할수록 시멘트의 수화 생성물인 C-H의 양은 상대적으로 작아지고 메타카올린의 주성분인 SiO₂ 및 Al₂O₃ 양은 늘어나게 되므로 대체량에 비해 포졸란반응이 상대적으로 적게 나타난 현상 때문으

로 판단된다. 따라서 이와 같은 결과로부터 압축강도 증진 측면에서 메타카올린의 적정 대체율은 10~15% 정도로 판단된다.

5.2 MIP

각 시험체의 재령별 수은압입법에 의한 분석 결과는 각각 Tables 5~8과 같고 이들을 각각 Figs. 4~7에 나타내었다. 이들 결과로부터 메타카올린의 대체율 및 재령이 증가할수록 공극크기가 30 nm 이상에서는 공극량이 감소하였고, 그 이하에서는 공극량이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 메타카올린의 높은 분말도 및 포졸란 반응으로 인해 30 nm 이상의 공극이 30 nm 이하의 작은 공극으로 분산되며, 포졸란 반응물로 인해 충전된 것으로 판단된다.

한편, MK15C와 MK20C의 공극분포가 거의 유사하게 나타나 메타카올린 15% 이상의 대체는 콘크리트 매트릭스의 공극 분포에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있었다. 이러한 현상은 압축강도 시험에서 확인할 수 있었는데 대체율이 15% 이상에서는 압축강도의 증가율이 현저히 떨어졌음을 알 수 있었다.

각 표에 나타난 결과로부터 총 공극량은 메타카올린의 대체율 증가보다는 재령의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 메타카올린의 분말도 및 포졸란 반응물로 인한 거대 기공의 미세 기공화 현상이 총 공극량에는 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

다음으로 마이크로 공극량은 메타카올린의 대체율이 증가할수록 증가하였으나, 재령과는 큰 상관성을 보이지 않고, 매크로 공극량은 메타카올린의 대체율 및 재령의

Table 5 Result of pore analysis at 7days

| Types \ Factors | OPCC | MK05C | MK10C | MK15C | MK20C |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Total pore volume (ml/g) | 0.0948 (111.5) | 0.0989 (116.4) | 0.0855 (100.6) | 0.0962 (113.2) | 0.0900 (105.9) |
| Micro pore volume (ml/g) | 0.0521 (105.9) | 0.0612 (124.4) | 0.0607 (123.4) | 0.0704 (143.1) | 0.0666 (135.4) |
| Macro pore volume (ml/g) | 0.0237 (230.1) | 0.0230 (223.3) | 0.0087 (84.5) | 0.0046 (44.7) | 0.0027 (26.2) |
| 5~2,000 nm pore volume (ml/g) | 0.0904 (117.6) | 0.0925 (120.3) | 0.0798 (103.8) | 0.0857 (111.4) | 0.0775 (100.8) |
| 3~30 nm pore volume (ml/g) | 0.0231 (82.2) | 0.0267 (95.0) | 0.0343 (122.1) | 0.0572 (203.6) | 0.0659 (234.5) |
| 30 nm~10 μm pore volume (ml/g) | 0.0716 (125.8) | 0.0722 (126.9) | 0.0512 (90.0) | 0.0390 (68.5) | 0.0240 (42.2) |
| Average pore dia. (nm) | 32.1 (145.2) | 29.4 (133.0) | 22.7 (102.7) | 15.2 (68.8) | 13.0 (58.8) |

Table 6 Result of pore analysis at 28days

| Types \ Factors | OPCC | MK05C | MK10C | MK15C | MK20C |
|--------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Total pore volume (ml/g) | 0.0850 (100.0)* | 0.0827 (97.3) | 0.0790 (92.9) | 0.0897 (105.5) | 0.0826 (97.2) |
| Micro pore volume (ml/g) | 0.0492 (100.0)* | 0.0511 (103.9) | 0.0516 (104.9) | 0.0593 (120.5) | 0.0590 (119.9) |
| Macro pore volume (ml/g) | 0.0103 (100.0)* | 0.0034 (33.0) | 0.0035 (34.0) | 0.0023 (22.3) | 0.0017 (16.5) |
| 5~2,000 nm pore volume (ml/g) | 0.0769 (100.0)* | 0.0714 (92.8) | 0.0681 (88.6) | 0.0739 (96.1) | 0.0677 (88.0) |
| 3~30 nm pore volume (ml/g) | 0.0281 (100.0)* | 0.0406 (144.5) | 0.0454 (161.6) | 0.0644 (229.2) | 0.0688 (244.8) |
| 30 nm~10 μm pore volume (ml/g) | 0.0569 (100.0)* | 0.0421 (74.0) | 0.0336 (59.1) | 0.0253 (44.5) | 0.0138 (24.3) |
| Average pore dia. (nm) | 22.1 (100.0)* | 16.9 (76.5) | 15.2 (68.8) | 12.1 (54.8) | 10.4 (47.1) |

*Value in the parenthesis is the percentage according to the value of 28days OPCC

Table 7 Result of pore analysis at 56days

| Types | OPCC | MK05C | MK10C | MK15C | MK20C |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Total pore volume (ml/g) | 0.0815 (95.9) | 0.0816 (96.0) | 0.0813 (95.6) | 0.0800 (94.1) | 0.0675 (79.4) |
| Micro pore volume (ml/g) | 0.0457 (92.9) | 0.0491 (99.8) | 0.0587 (119.3) | 0.0552 (112.2) | 0.0464 (94.3) |
| Macro pore volume (ml/g) | 0.0064 (62.1) | 0.0030 (29.1) | 0.0041 (39.8) | 0.0020 (19.4) | 0.0020 (19.4) |
| 5~2,000 nm pore volume (ml/g) | 0.0731 (95.1) | 0.0711 (92.5) | 0.0731 (95.1) | 0.0660 (85.8) | 0.0600 (78.0) |
| 3~30 nm pore volume (ml/g) | 0.0282 (100.4) | 0.0407 (144.8) | 0.0514 (182.9) | 0.0619 (220.3) | 0.0523 (186.1) |
| 30 nm~10 μm pore volume (ml/g) | 0.0533 (93.7) | 0.0409 (71.9) | 0.0298 (52.3) | 0.0182 (32.0) | 0.0153 (26.9) |
| Average pore dia. (nm) | 23.8 (107.7) | 16.5 (74.7) | 15.5 (70.1) | 11.3 (51.1) | 11.4 (51.6) |

Table 8 Result of pore analysis at 91days

| Types | OPCC | MK05C | MK10C | MK15C | MK20C |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Total pore volume (ml/g) | 0.0868 (102.1) | 0.0800(94.1) | 0.0714 (84.0) | 0.0810 (95.3) | 0.0808 (95.1) |
| Micro pore volume (ml/g) | 0.0513 (104.3) | 0.0532 (108.1) | 0.0458 (93.1) | 0.0492 (100.0) | 0.0532 (108.1) |
| Macro pore volume (ml/g) | 0.0177 (171.8) | 0.0116 (112.6) | 0.0030 (29.1) | 0.0067 (65.0) | 0.0024 (23.3) |
| 5~2,000 nm pore volume (ml/g) | 0.0812 (105.6) | 0.0737 (95.8) | 0.0632 (82.2) | 0.0702 (91.3) | 0.0661(86.0) |
| 3~30 nm pore volume (ml/g) | 0.0193 (68.7) | 0.0269 (95.7) | 0.0330 (117.4) | 0.0396 (140.9) | 0.0612 (217.8) |
| 30 nm~10 μm pore volume (ml/g) | 0.0674 (118.5) | 0.0531 (93.3) | 0.0384 (67.5) | 0.0413 (72.6) | 0.0196 (34.4) |
| Average pore dia. (nm) | 29.5 (133.5) | 23.6 (106.8) | 20.4 (92.3) | 20.0 (90.5) | 11.3 (51.1) |

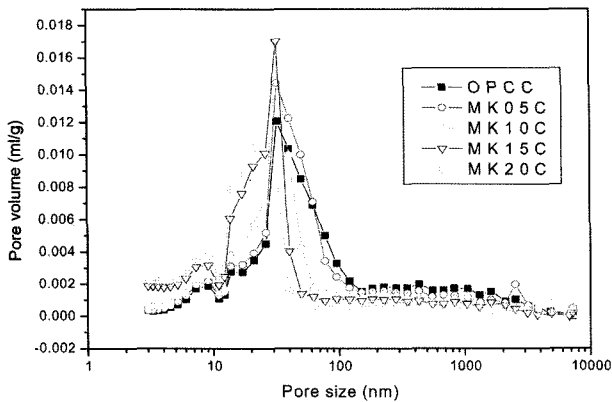


Fig. 4 Result of MIP analysis at 7 days

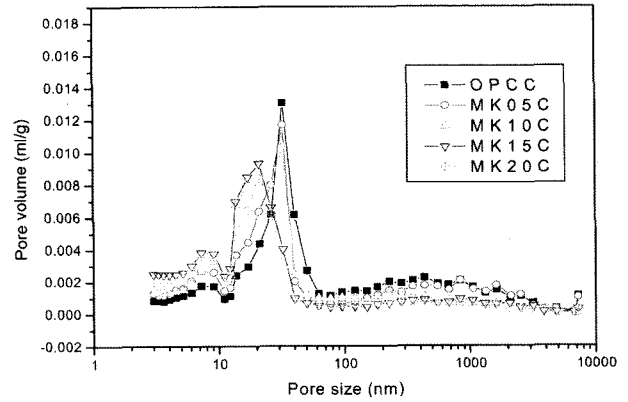


Fig. 6 Result of MIP analysis at 56 days

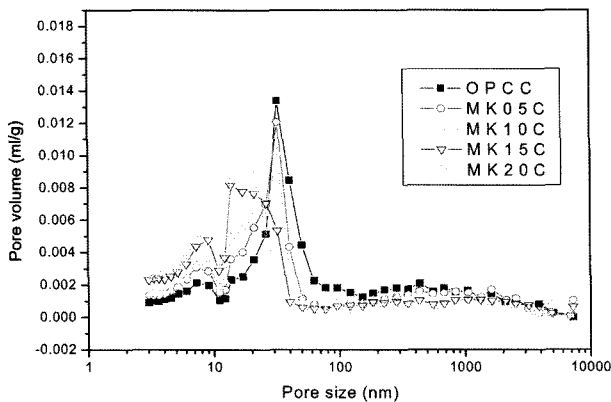


Fig. 5 Result of MIP analysis at 28 days

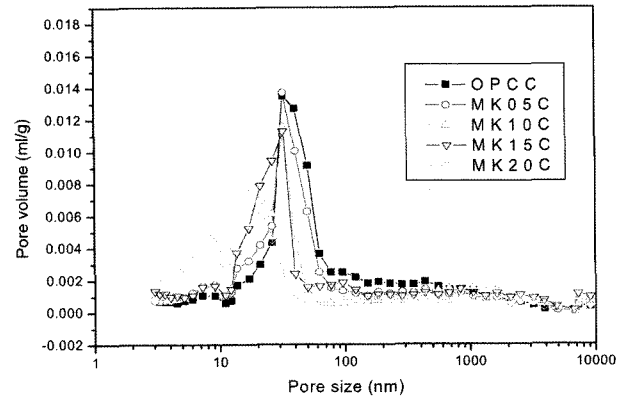


Fig. 7 Result of MIP analysis at 91 days

증가에 따라 확연히 감소됨을 확인할 수 있다. 그리고 30 nm 전·후의 공극량은 메타카올린의 대체율에 따른 증감이 뚜렷하며, 재령의 증가도 약간의 영향을 미치는 것으로 보인다. 이는 메타카올린의 수화반응과 분말도가 이 부분의 공극량을 증가시키는데 재령 초기에 수화반응

이 대부분 이루어지므로 재령과는 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다.

한편 5~2,000 nm 범위의 공극량은 메타카올린의 대체율 및 재령의 증가에 따른 감소 현상이 비교적 일정한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 압축강도 및 염소이온

확산계수 결과와도 일치하므로 이 범위의 공극량이 메타카올린을 사용한 콘크리트의 압축강도 및 염소이온 확산계수에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 판단되었다.

마지막으로 평균 공극 직경은 메타카올린의 대체율에 따른 감소 현상이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상은 평균 공극 직경이 콘크리트 혼화재의 분말도에 의해 좌우되는 것으로 추정된다.

이상의 결과로부터 메타카올린의 사용은 콘크리트 공극구조에 영향을 끼치고 있음을 확인하였으며, 이는 콘크리트 압축강도 및 염소이온 확산계수의 변화와도 밀접한 관계가 있어 결국 메타카올린의 사용을 통한 콘크리트의 고강도화는 공극 구조 개선이 중요한 내용임이 확인되었다.

5.3 모세관공극과 압축강도와의 상관 관계

콘크리트의 모세관공극과 압축강도와의 상관성을 알아보기 위하여 MIP 분석 결과와 압축강도를 회귀분석하여 Fig. 8에 나타내었다.

각각의 결정계수를 살펴보면 총 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.57, 마이크로 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.12, 매크로 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.00, 공극 크기 5~2,000 nm인 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.76, 공극 크기 30 nm 전·후의 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.23 및 0.53, 마지막으로 평균 공극

직경-압축강도의 결정계수는 0.45로 나타났다.

본 연구의 경우에는 크기가 5~2,000 nm 범위의 공극량의 결정계수가 가장 크게 나타남으로서 이 영역이 압축강도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 메타카올린의 대체율의 증가 및 재령이 경과되면서 공극 크기가 감소되어 압축강도가 증진됨을 확인할 수 있었다.

5.4 염소이온 확산계수

각 콘크리트의 재령에 따른 확산 특성의 변화를 파악하기 위하여 재령 7일, 28일, 56일 및 91일의 염소이온 확산계수를 구하였으며, 이에 대해 정리하여 Table 9 및 Fig. 9에 나타내었다.

먼저 메타카올린의 대체율에 따라 살펴보면, 모든 재령에서 OPCC가 MK20C의 염소이온 확산계수보다 약 2배 이상 높음을 확인할 수 있다. 이는 메타카올린에 의한 포졸란 반응물과 높은 분말도가 거대 공극을 여러 개의 미세 공극으로 변화시켜 염소이온의 침투 경로를 길어져 나타난 결과로 판단된다. 즉, 포졸란반응에 의하여 형성된 C-S-H 및 C-A-H 수화물이 시멘트 경화체의 공극을 채움 (pore blocking) 으로 매크로 공극이 감소하고 마이크로 공극이 증가하므로 공극의 연결성의 저하나 굴곡도를 증가시켜 염소이온의 확산 경로를 길어지게 한다.

그리고 재령이 증가함에 따라 OPCC 및 메타카올린을 사용한 모든 콘크리트의 염소이온 확산계수가 확연히 감

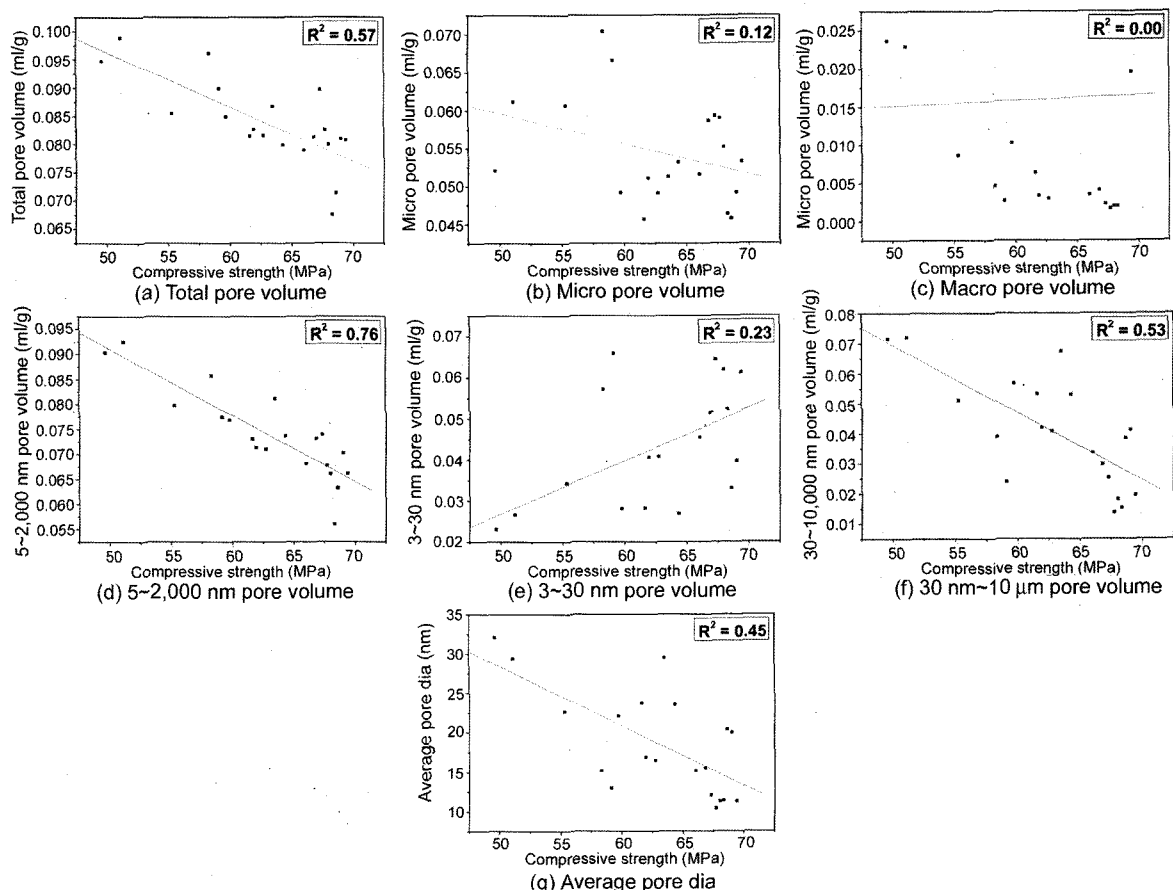


Fig. 8 Correlation with compressive strength and capillary pore structure

Table 9 Result of diffusion coefficient ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$)

| Ages Types | 7 | 28 | 56 | 91 |
|---------------|-------|-------|------|------|
| OPCC | 37.65 | 16.69 | 7.82 | 4.63 |
| MK05C | 26.84 | 12.94 | 6.36 | 3.60 |
| MK10C | 20.29 | 10.22 | 4.78 | 3.09 |
| MK15C | 18.60 | 7.79 | 3.69 | 2.72 |
| MK20C | 16.32 | 6.47 | 3.21 | 2.35 |

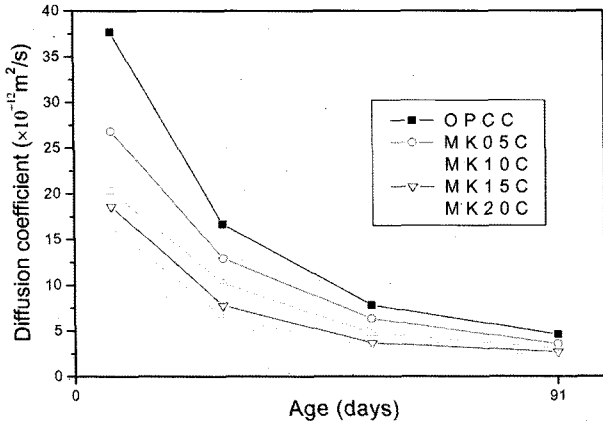


Fig. 9 Diffusion coefficient according to the age

소되며, 감소 비율도 비슷함을 확인할 수 있다. 이는 재령이 경과됨에 따라 포졸란반응에 의해 조직이 치밀해짐으로써 염소이온의 침투가 억제된다는 것을 의미하며 기존 연구와도 유사한 결과를 보이고 있다.

메타카올린을 사용한 고강도콘크리트의 압축강도가 염소이온 확산 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 재령 7일, 28일, 56일 및 91일에서 측정된 압축강도와 염소이온 확산계수와 상관 관계를 나타낸 것이 Fig. 10이다.

그 결과 압축강도가 증가할수록 염소이온 확산계수는 선형적으로 감소하였으며, 결정계수는 약 0.88 정도로 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다.

5.5 모세관공극과 염소이온 확산계수와 상관 관계

콘크리트의 모세관공극과 염소이온 확산계수와 상관

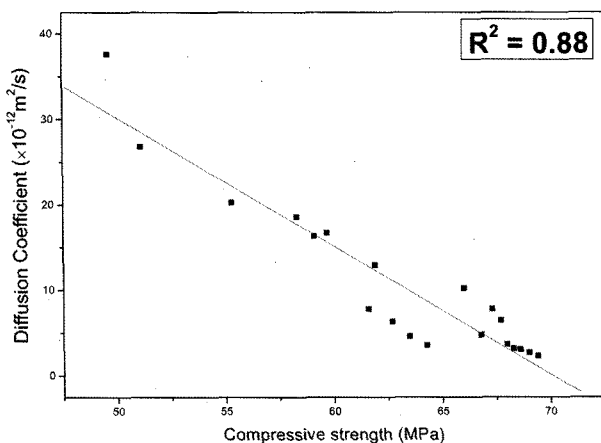


Fig. 10 Correlation with compressive strength and diffusion coefficient

성을 알아보기 위하여 MIP 분석 결과와 염소이온 확산계수를 회귀분석하여 Fig. 11에 나타내었다.

각각의 결정계수를 살펴보면 총 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.56, 마이크로 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.14, 매크로 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.44, 공극크기 5~2,000 nm인 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.68, 공극크기 30 nm 전·후의 공극량-압축강도의 결정계수는 약 0.10 및 0.34, 마지막으로 평균 공극 직경-압축강도의 결정계수는 0.29로 나타났다.

각 구간별로 조사한 공극량과 염소이온 확산계수 사이의 상관성 분석 결과 5~2,000 nm 영역의 결정계수가 가장 크게 나타남으로서 이 영역의 공극량이 염소이온 확산계수에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 메타카올린의 대체율에 따른 콘크리트의 압축강도와 모세관공극 구조, 염소이온 확산계수와 모세관공극 구조의 상관성을 구명하기 위하여 MIP 분석, 압축강도 시험 및 전위차에 의한 촉진 염소이온 확산 시험을 실시하였으며, 그 결과를 비교 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 메타카올린의 대체율이 증가할수록 콘크리트의 압축강도가 증가하고 염소이온 확산계수는 감소되었으나, 대체율이 15% 이상일 경우에는 대체 효과가 미비하여 효율성을 고려할 때 메타카올린의 적정 대체율은 약 10~15% 정도로 판단된다.
- 2) MIP 시험 결과 메타카올린의 대체율이 증가할수록 콘크리트 매트릭스의 모세관공극 구조가 개선되었으나, 대체율이 15% 이상일 경우에는 그 개선 효과가 미비하여 모세관공극 구조 개선을 위한 메타카올린의 적정 대체율은 약 10~15% 정도로 판단된다.
- 3) 메타카올린을 사용한 콘크리트의 압축강도와 염소이온 확산계수의 회귀분석 결과 결정계수는 약 0.88 정도로 구해져 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다.
- 4) 메타카올린을 사용한 콘크리트의 공극 중에서 크기가 5~2,000 nm 범위의 공극량이 압축강도 및 염소이온 확산계수에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 공극량과 압축강도, 공극량과 염소이온 확산계수의 결정계수는 각각 0.76 및 0.68 정도로 상관성이 높은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 안태호, 김용태, 김병기, “시멘트·콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린 응용 가능성”, 콘크리트학회지, 14권 4호, 2002, pp.118~127.
2. 김동석, “메타카올린을 혼입한 콘크리트의 공학적 특성

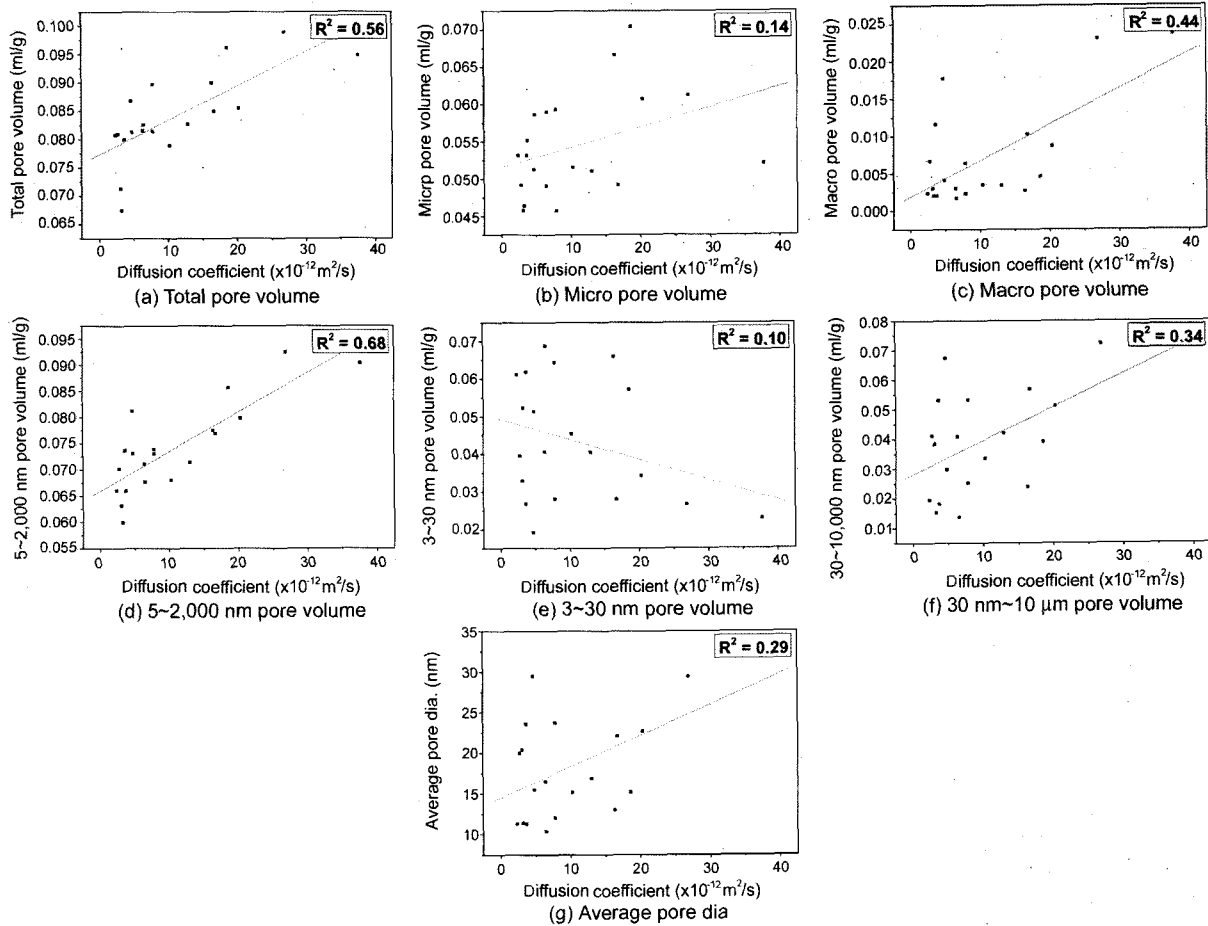


Fig. 11 Correlation with diffusion coefficient and capillary pore structure

- 에 관한 연구”, 공주대학교 석사학위논문, 2003, pp.25~34.
3. 김진만, 이상수, 김동석, “메타카올린을 사용한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 15권 1호, 2003, pp.47~52.
 4. 염준환, “메타카올린을 사용한 콘크리트의 고강도 및 고내구성화에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문, 2004, pp.36~42.
 5. 이상호, 문한영, “Metakaolin 혼합 고강도콘크리트의 내구특성 예측”, 한국구조물진단학회 논문집, 9권 2호, 2005, pp.173~180.
 6. Uchikawa, H., *Gypsum and Lime*, No.299, 1990, pp.497~505.
 7. Diamon, M, *Journal of American Ceramic Society*, Vol.60, No.3~4, 1991, pp.110~114.
 8. Metha, P. K. and Moteiro, P. J. M, *Concrete ; Structure, Properties, and Materials*, 2nd Ed. Prentice Hall, 1993, pp.76~88.
 9. 문한영, 김홍삼, 최두선, “콘크리트 종류별 모세관공극 특성과 전위차 염소이온 확산계수”, 대한토목학회 논문집, 23권 5A호, 2003, pp.969~976.
 10. L. Tang, “Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development”, *Magazine of Concrete Research*, Vol.48, No.176, 1992, pp.173~179.
 11. L. Tang and L. O Nilsson, “Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field”, *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.49~53, 1992, pp.49~53.

요약 콘크리트 구조물의 고성능화가 요구됨에 따라 고성능콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 특히 고강도콘크리트에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 고강도콘크리트를 제조하기 위해서는 혼화재료의 첨가가 필수적이라 할 수 있으며, 지금까지는 실리카폼을 주로 사용하여 왔으나, 최근에는 실리카폼과 대등한 성능을 가지면서 실리카폼보다 저가인 메타카올린을 사용한 고강도콘크리트에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 메타카올린을 사용한 고강도콘크리트를 대상으로 수은압입법에 의한 모세관공극 특성과 전위차에 의한 염소이온 확산계수를 측정한 결과에 대하여 고찰하였다. 그 결과, 메타카올린의 대체율이 증가할수록 공극 구조가 개선되었으며, 압축강도가 증가하고 염소이온 확산계수는 감소하는 것으로 나타났다. 콘크리트의 모세관 구조와 압축강도 및 염소이온 확산계수의 회귀분석 결과 크기가 52,000 범위의 공극량이 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 각각의 결정계수가 약 0.76 및 0.68 정도로 높은 상관 관계를 나타내었다.

핵심용어 : 메타카올린, 모세관공극, 수은압입법, 공극 구조, 염소이온 확산계수