

## 고강도 시멘트 복합체의 배합조건에 따른 압축강도 발현 특성

# Characteristics of Compressive Strength Development of High Strength Cement Composites Depending on Its Mix Design

정연웅<sup>1</sup> · 오성우<sup>2</sup> · 조영근<sup>3</sup> · 정상화<sup>4</sup> · 김주형<sup>2\*</sup>

Yeon-Ung Jeong<sup>1</sup> · Sung-Woo Oh<sup>2</sup> · Young-Keun Cho<sup>3</sup> · Sang-Hwa Jung<sup>4</sup> · Joo-Hyung Kim<sup>2\*</sup>

(Received November 8, 2021 / Revised November 14, 2021 / Accepted November 15, 2021)

This study investigates the compressive strength of high-strength cement composites with 64 mixture designs and 2 curing conditions. The cement composites were designed with varying water-to-binder ratios, silica fume content to cement, and binder content per unit volume of cement composite to explore compressive strength development depending on its mix design. An increase in the water-to-binder ratio decreased the compressive strength of the composites, having consistency with the trend in normal concrete. The compressive strength increased with ages at an ambient curing temperature, but it was not identified at high-temperature curing. The compressive strength development was negligible in case that silica fume content to OPC is 15%~25%, but a decrease in the content below 15% reduced compressive strength. It was more obvious in the specimen of low water-to-binder ratio. The specimen with 840kg/m<sup>3</sup> of binder content per unit volume had the highest compressive strength in this study, and the decrease in binder content reduced the compressive strength of high strength cement composites in low silica fume content.

**키워드** : 고강도, 고성능, 배합조건, 압축강도

**Keywords** : High strength, High performance, Mix proportion, Compressive strength

## 1. 서론

고성능 시멘트 복합체 제조를 위한 배합설계 기술이 지속적으로 발전하고 있다. 일반적으로 고성능 시멘트 복합체의 배합설계를 위해 입자 다짐 모형(particle packing model)이 활용된다(Yu et al. 2015; Zhou et al. 2021). 입자 다짐 모형은 건조상태의 고상 재료의 충전 밀도를 기반으로 하는 건조 다짐 밀도(dry packing density)를 사용하는 모형과 액상 재료(liquid material)와 이들과 고상 재료와의 반응(interaction)에 의한 영향을 함께 고려할 수 있는 젖은 다짐 밀도(wet packing density)를 고려하는 모형으로 나누어 진다(Zhou et al. 2021). 흔히 사용되는 건조 다짐 밀도 모형은 이산 모형(discrete model), 연속 모형(continuous model)

으로 구분되며, 사용되는 복합체의 구성 성분(component)의 개수와 벽효과(wall effect) 및 헐거움 효과(loosening effect)의 고려 유무에 따라 다양한 모형이 개발되어졌다(Kwan et al. 2013; Mangulkar and Jamkar 2013). 젖은 다짐 밀도를 활용하는 모형은 입자의 상태, 사용하는 화학혼화제의 특성, 입자 표면 수막층(water film)의 두께, 입자들의 분산(dispersion) 및 응집(agglomeration) 등을 고려하며 다양한 모형들이 개발되고 있다(Zhou et al. 2021).

입자 다짐 모형을 기반으로 고강도 시멘트 복합체의 유변학적 특성을 기반으로 하는 유변학 기반 배합설계 방법(rheology-based mixture design)(Jiao et al. 2017), 보강 섬유의 유변학적 특성을 기반으로 하는 배합설계 방법(Wang et al. 2017), 통계적 배합설

\* Corresponding author E-mail: kjhmole@kcl.re.kr

<sup>1</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 선임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)

<sup>2</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 책임연구원 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)

<sup>3</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터 센터장 (Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul, 08503, Korea)

<sup>4</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 건설본부 부부장 (Construction Division, Korea Conformity Laboratories, Cheongju, Chungcheongbuk-do, 28115, Korea)

Copyright © 2021 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

계 방법(statistical mixture design)(Barrett 2009) 및 신경망(artificial neural networks, ANN) 학습을 이용한 배합설계(DeRousseau et al. 2018) 등의 다양한 고강도 시멘트 복합체 설계 방법이 제안되었다. 고강도 시멘트 복합체 배합 설계 기술의 개발과 함께 고강도 시멘트 복합체의 역학적 성능 역시 지속적으로 계량되고 있다.

하지만, 입자 다짐 모형을 통해 제시되는 고강도 시멘트 복합체의 배합표는 포틀랜드 시멘트(OPC) 양을 기준으로 각 재료들의 상대 중량비를 제시하는 것이 일반적이며(Park et al. 2015; Kim et al. 2019), 재료 변경 및 목표 설계강도가 변경되는 경우 복잡한 입자 다짐 모형을 통해 배합표를 수정하여야한다. 이러한 절차는 현장 실무진들이 고강도 시멘트 복합체를 생산하는데 제한사항으로 작용되며, 일반 OPC 콘크리트와 유사한 배합설계 절차 마련을 통해 고강도 시멘트 복합체의 범용적 사용이 요구된다.

본 연구에서는 입자 다짐 모형을 사용하지 않고 일반콘크리트 배합설계와 유사한 고강도 시멘트 복합체의 배합설계 절차를 제시하기 위해 단위 부피당 사용되는 재료의 중량비를 변수로 고강도 시멘트 복합체를 제조하였다. 물/결합재비, OPC 대비 실리카 흙의 함량, 단위 결합재량을 변수로 총 64개의 배합과 두 종류의 양생 방법을 변수로 배합실험 및 압축강도 측정을 실시하였다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 사용 재료

본 연구에서는 단위 중량 3,150kg/m<sup>3</sup>의 A사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. X-선 회절 분석을 통한 OPC의 광물조성은 C<sub>3</sub>S 51.0%, β-C<sub>2</sub>S 32.7%, C<sub>4</sub>AF 9.0%, C<sub>3</sub>A 2.6%, 석고(gypsum) 3.1%, 무수석고(anhydrite) 1.7%로 조사되어 일반적인 OPC의 조성과 유사함을 확인하였다. 광물 혼화재(mineral admixture)로는 단위중량 2,200kg/m<sup>3</sup>의 E사의 실리카 흙(silica fume, SF)을, 고강도 시멘트 복합체의 충전재로는 S사의 실리카 분말(silica powder, SP)과 규사(silica sand, SS)를 사용하였다. SP 및 SS의 단위 중량은 각각 2,650kg/m<sup>3</sup> 및 2,648kg/m<sup>3</sup>으로 조사되었다. 각 재료의 상세 특성은 선행연구의 것과 동일하다(Jeong et al. 2020). 굳지 않은 시멘트 복합체의 유동성 확보를 위해 D사의 폴리카르본산계 고성능 AE감수제를 혼화제로 사용하였다.

### 2.2 실험 방법

본 연구에서는 선행연구(Kang et al. 2019)에서 제안한 초고성능

콘크리트 배합을 기준배합(control)으로 선정하고, 배합조건을 수정하였다. Control 배합은 물/결합재비(w/b) 0.2, OPC:SF:SP:SS 비는 1:0.25:0.25:1.10이며, 단위 용적당 결합재(OPC+SF)량은 1,040kg/m<sup>3</sup>이다.

Control 배합의 수정을 통해 (1)물/결합재 비, (2)실리카 흙의 혼입량, 및 (3)단위결합재량이 고강도 시멘트 복합체에 역학적 성능에 미치는 영향을 확인하기 위한 배합을 도출하였다. Table 1(a)는 물/결합재 비의 압축강도 영향을 확인하기 위한 배합을 나타낸다. 페이스트의 부피를 고정한 상태로 control 배합에서 물/결합재 비를 0.225, 0.25, 0.275 및 0.3으로 변경하였다. Table 1(b)는 실리카 흙의 혼입량을 변경한 고성능 시멘트 복합체의 배합표를 나타낸다. 페이스트의 부피를 고정한 상태로 OPC 대비 실리카 흙의 상대비를 0.2, 0.15, 0.1, 0.05 및 0으로 변경하고, 각 경우에 물/결합재 비를 0.2, 0.25 및 0.3으로 배합표를 구성하였다. Table 1(c)는 단위결합재량의 영향을 확인하기 위한 배합조건을 나타낸다. Control 배합의 단위결합재량 1,040kg/m<sup>3</sup>을 940kg/m<sup>3</sup>, 840kg/m<sup>3</sup>, 740kg/m<sup>3</sup>, 및 640kg/m<sup>3</sup>으로 다변화하고 모든 경우에 물/결합재를 0.2, 0.25, 0.3, OPC 대비 실리카 흙의 상대비를 0.25, 0.15 및 0.05로 변경하여 배합조건을 구성하였다. 배합조건 변경에 따른 페이스트의 부피 변화는 실리카 분말의 함량을 고정한 상태로 규사의 부피에 반영하여 배합표를 구성하였다. Table 1에 나타난 시편명의 설명은 Fig. 1에 나타내었다.

### Specimen label explanation

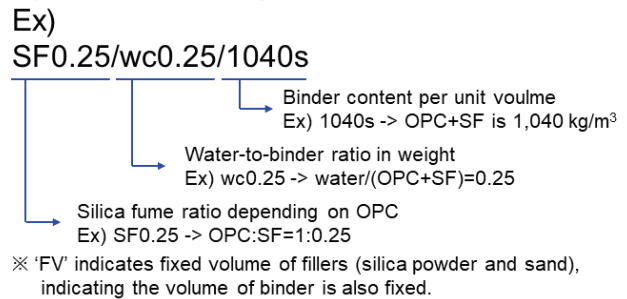


Fig. 1. Explanation of specimen label used in this study

화학 혼화제는 적정 유동성을 확보할 수 있는 수준으로 그 양을 산정하였으며, Table 1에 제시한 혼화제의 양은 화학 혼화제의 고정형 함량을 기준으로 기술하였다. 혼화제에 포함될 수량은 별도로 계산하여 배합수량을 조정하여 배합을 실시하였다.

Table 1. Mix design of high-strength cement composites

| (a) change in water/binder(w/b) ratio        |                                |                                     |                                       |                                     |                               |       |                                   |
|--|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------|-----------------------------------|
| Label  | Binder                         |                                     | Silica powder<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica sand<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Water<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | w/b   | Admixture<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|  | Cement<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica fume<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |                                       |                                     |                               |       |                                   |
| Control                                      | 832                            | 208                                 | 208                                   | 915.2                               | 208                           | 0.200 | 9.6                               |
| SF0.25/wc0.225/FV                            | 795.2                          | 198.8                               | 208                                   | 915.2                               | 223.65                        | 0.225 | 8.8                               |
| SF0.25/wc0.25/FV                             | 762                            | 190.5                               | 208                                   | 915.2                               | 238.13                        | 0.250 | 8                                 |
| SF0.25/wc0.275/FV                            | 731.4                          | 182.85                              | 208                                   | 915.2                               | 251.42                        | 0.275 | 7.2                               |
| SF0.25/wc0.3/FV                              | 703.2                          | 175.8                               | 208                                   | 915.2                               | 263.7                         | 0.300 | 6.4                               |
| (b) change in silica fume content            |                                |                                     |                                       |                                     |                               |       |                                   |
| Label  | Binder                         |                                     | Silica powder<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica sand<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Water<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | w/b   | Admixture<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|  | Cement<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica fume<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |                                       |                                     |                               |       |                                   |
| SF0.2/wc0.2/FV                               | 874                            | 174.8                               | 208                                   | 915.2                               | 209.76                        | 0.200 | 9.6                               |
| SF0.2/wc0.25/FV                              | 800                            | 160                                 | 208                                   | 915.2                               | 240                           | 0.250 | 8                                 |
| SF0.2/wc0.3/FV                               | 737                            | 147.4                               | 208                                   | 915.2                               | 265.32                        | 0.300 | 6.4                               |
| SF0.15/wc0.2/FV                              | 920                            | 138                                 | 208                                   | 915.2                               | 211.6                         | 0.200 | 9.6                               |
| SF0.15/wc0.25/FV                             | 841.6                          | 126.24                              | 208                                   | 915.2                               | 241.96                        | 0.250 | 8                                 |
| SF0.15/wc0.3/FV                              | 775                            | 116.25                              | 208                                   | 915.2                               | 267.38                        | 0.300 | 6.4                               |
| SF0.1/wc0.2/FV                               | 972                            | 97.2                                | 208                                   | 915.2                               | 213.84                        | 0.200 | 9.6                               |
| SF0.1/wc0.25/FV                              | 888                            | 88.8                                | 208                                   | 915.2                               | 244.2                         | 0.250 | 8                                 |
| SF0.1/wc0.3/FV                               | 817                            | 81.7                                | 208                                   | 915.2                               | 269.61                        | 0.300 | 6.4                               |
| SF0.05/wc0.2/FV                              | 1030                           | 51.5                                | 208                                   | 915.2                               | 216.3                         | 0.200 | 9.6                               |
| SF0.05/wc0.25/FV                             | 940                            | 47                                  | 208                                   | 915.2                               | 246.75                        | 0.250 | 8                                 |
| SF0.05/wc0.3/FV                              | 864                            | 43.2                                | 208                                   | 915.2                               | 272.16                        | 0.300 | 6.4                               |
| SF0/wc0.2/FV                                 | 1094                           | 0                                   | 208                                   | 915.2                               | 218.8                         | 0.200 | 9.6                               |
| SF0/wc0.25/FV                                | 998                            | 0                                   | 208                                   | 915.2                               | 249.5                         | 0.250 | 8                                 |
| SF0/wc0.3/FV                                 | 917                            | 0                                   | 208                                   | 915.2                               | 275.1                         | 0.300 | 6.4                               |
| (c) change in binder content per unit volume |                                |                                     |                                       |                                     |                               |       |                                   |
| Label  | Binder                         |                                     | Silica powder<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica sand<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Water<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | w/b   | Admixture<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|  | Cement<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica fume<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |                                       |                                     |                               |       |                                   |
| SF0.25/wc0.25/1040s                          | 832                            | 208                                 | 208                                   | 777                                 | 260                           | 0.250 | 8                                 |
| SF0.25/wc0.3/1040s                           | 832                            | 208                                 | 208                                   | 640                                 | 312                           | 0.300 | 6.4                               |
| SF0.15/wc0.2/1040s                           | 915.2                          | 124.8                               | 208                                   | 945                                 | 208                           | 0.200 | 9.6                               |
| SF0.15/wc0.25/1040s                          | 915.2                          | 124.8                               | 208                                   | 808                                 | 260                           | 0.250 | 8                                 |
| SF0.15/wc0.3/1040s                           | 915.2                          | 124.8                               | 208                                   | 670                                 | 312                           | 0.300 | 6.4                               |
| SF0.05/wc0.2/1040s                           | 998.4                          | 41.6                                | 208                                   | 975                                 | 208                           | 0.200 | 9.6                               |
| SF0.05/wc0.25/1040s                          | 998.4                          | 41.6                                | 208                                   | 837                                 | 260                           | 0.250 | 8                                 |
| SF0.05/wc0.3/1040s                           | 998.4                          | 41.6                                | 208                                   | 699                                 | 312                           | 0.300 | 6.4                               |
| SF0.25/wc0.2/940s                            | 752                            | 188                                 | 208                                   | 1059                                | 188                           | 0.200 | 8.2                               |
| SF0.25/wc0.25/940s                           | 752                            | 188                                 | 208                                   | 935                                 | 235                           | 0.250 | 6.6                               |
| SF0.25/wc0.3/940s                            | 752                            | 188                                 | 208                                   | 810                                 | 282                           | 0.300 | 5                                 |

| Label              | Binder                         |                                     | Silica powder<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica sand<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Water<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | w/b   | Admixture<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------|-----------------------------------|
|                    | Cement<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Silica fume<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |                                       |                                     |                               |       |                                   |
| SF0.15/wc0.2/940s  | 827.2                          | 112.8                               | 208                                   | 1086                                | 188                           | 0.200 | 8.2                               |
| SF0.15/wc0.25/940s | 827.2                          | 112.8                               | 208                                   | 962                                 | 235                           | 0.250 | 6.6                               |
| SF0.15/wc0.3/940s  | 827.2                          | 112.8                               | 208                                   | 838                                 | 282                           | 0.300 | 5                                 |
| SF0.05/wc0.2/940s  | 902.4                          | 37.6                                | 208                                   | 1113                                | 188                           | 0.200 | 8.2                               |
| SF0.05/wc0.25/940s | 902.4                          | 37.6                                | 208                                   | 989                                 | 235                           | 0.250 | 6.6                               |
| SF0.05/wc0.3/940s  | 902.4                          | 37.6                                | 208                                   | 865                                 | 282                           | 0.300 | 5                                 |
| SF0.25/wc0.2/840s  | 672                            | 168                                 | 208                                   | 1203                                | 168                           | 0.200 | 6.9                               |
| SF0.25/wc0.25/840s | 672                            | 168                                 | 208                                   | 1092                                | 210                           | 0.250 | 5.3                               |
| SF0.25/wc0.3/840s  | 672                            | 168                                 | 208                                   | 981                                 | 252                           | 0.300 | 3.7                               |
| SF0.15/wc0.2/840s  | 739.2                          | 100.8                               | 208                                   | 1228                                | 168                           | 0.200 | 6.9                               |
| SF0.15/wc0.25/840s | 739.2                          | 100.8                               | 208                                   | 1116                                | 210                           | 0.250 | 5.3                               |
| SF0.15/wc0.3/840s  | 739.2                          | 100.8                               | 208                                   | 1005                                | 252                           | 0.300 | 3.7                               |
| SF0.05/wc0.2/840s  | 806.4                          | 33.6                                | 208                                   | 1252                                | 168                           | 0.200 | 6.9                               |
| SF0.05/wc0.25/840s | 806.4                          | 33.6                                | 208                                   | 1141                                | 210                           | 0.250 | 5.3                               |
| SF0.05/wc0.3/840s  | 806.4                          | 33.6                                | 208                                   | 1030                                | 252                           | 0.300 | 3.7                               |
| SF0.25/wc0.2/740s  | 592                            | 148                                 | 208                                   | 1348                                | 148                           | 0.200 | 6.5                               |
| SF0.25/wc0.25/740s | 592                            | 148                                 | 208                                   | 1250                                | 185                           | 0.250 | 4.7                               |
| SF0.25/wc0.3/740s  | 592                            | 148                                 | 208                                   | 1152                                | 222                           | 0.300 | 3.3                               |
| SF0.15/wc0.2/740s  | 651.2                          | 88.8                                | 208                                   | 1369                                | 148                           | 0.200 | 6.5                               |
| SF0.15/wc0.25/740s | 651.2                          | 88.8                                | 208                                   | 1271                                | 185                           | 0.250 | 4.7                               |
| SF0.15/wc0.3/740s  | 651.2                          | 88.8                                | 208                                   | 1173                                | 222                           | 0.300 | 3.3                               |
| SF0.05/wc0.2/740s  | 710.4                          | 29.6                                | 208                                   | 1391                                | 148                           | 0.200 | 6.5                               |
| SF0.05/wc0.25/740s | 710.4                          | 29.6                                | 208                                   | 1293                                | 185                           | 0.250 | 4.7                               |
| SF0.05/wc0.3/740s  | 710.4                          | 29.6                                | 208                                   | 1195                                | 222                           | 0.300 | 3.3                               |
| SF0.25/wc0.2/640s  | 512                            | 128                                 | 208                                   | 1492                                | 128                           | 0.200 | 6                                 |
| SF0.25/wc0.25/640s | 512                            | 128                                 | 208                                   | 1407                                | 160                           | 0.250 | 4.1                               |
| SF0.25/wc0.3/640s  | 512                            | 128                                 | 208                                   | 1322                                | 192                           | 0.300 | 3.6                               |
| SF0.15/wc0.2/640s  | 563.2                          | 76.8                                | 208                                   | 1510                                | 128                           | 0.200 | 6                                 |
| SF0.15/wc0.25/640s | 563.2                          | 76.8                                | 208                                   | 1426                                | 160                           | 0.250 | 4.1                               |
| SF0.15/wc0.3/640s  | 563.2                          | 76.8                                | 208                                   | 1341                                | 192                           | 0.300 | 3.6                               |
| SF0.05/wc0.2/640s  | 614.4                          | 25.6                                | 208                                   | 1529                                | 128                           | 0.200 | 6                                 |
| SF0.05/wc0.25/640s | 614.4                          | 25.6                                | 208                                   | 1444                                | 160                           | 0.250 | 4.1                               |
| SF0.05/wc0.3/640s  | 614.4                          | 25.6                                | 208                                   | 1360                                | 192                           | 0.300 | 3.6                               |

The amount of admixture is based on solid content, and water content includes the water in admixture.

배합조건의 고상재료를 기계식 믹서를 사용하여 5분간 건비빔(dry-mix)을 실시하여 분말형 재료의 균질성(homogeneity)을 확보하였다. 혼합된 고상재료에 화학혼화제와 배합수를 투입하여 유동성이 확보될 때까지 중속으로 배합을 실시하였다. 유동성 확보 후 고속에서 2분, 저속에서 2분 추가 배합을 통해 굳지 않은 시멘트 복합체의 균질성을 확보하고자 하였다.

배합한 시멘트 복합체는 50×50×50mm<sup>3</sup> 정육면체 몰드에 타설하였으며, 건조수축 방지를 위해 플라스틱 비닐로 샘플 상단을 밀봉하였다. 타설한 시멘트 복합체는 온도 20°C, 상대습도 65%의 항온항습실에서 24시간 양생 후 탈형하였다. 탈형한 샘플은 두 가지 양생 조건으로 압축강도 측정 시까지 양생하였다. 첫째는 온도 20°C, 상대습도 65%의 항온항습실에서 상온 양생을 실시하였고,

둘째는 탈형 후 온도 90°C, 상대습도 99%의 챔버에서 48시간 고온 양생을 실시하고, 상온 양생과 동일 조건의 항온항습실에서 강도 측정시까지 양생을 실시하였다.

제작된 고강도 시멘트 복합체의 압축강도는 재령 3일, 7일 및 28일에 만능재료시험기(universal testing machine, UTM)을 이용하여 1축 압축강도를 측정하였다. 샘플당 6개의 시편의 압축강도를 측정하고 산술평균하여 샘플의 압축강도를 산정하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 물/결합재 비의 영향

Fig. 2는 상온 양생 시편의 재령일에 따른 압축강도 발현을 나타낸다. 일반적인 콘크리트 재료의 압축강도 발현과 동일하게 재령일이 증가할수록 압축강도가 상승하며, 물/결합재의 증가에 따라 강도가 저하되는 것으로 나타났다(Mehta and Monteiro 2006).

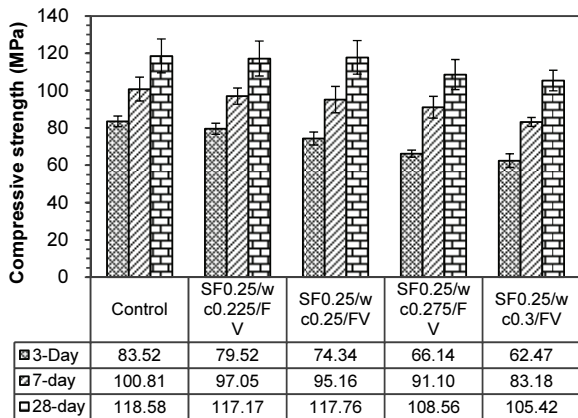


Fig. 2. Compressive strength development at ambient curing

상온 및 고온 양생을 실시한 재령 28일 압축강도 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 상온 및 고온 양생과 무관하게 물-결합재비의 증가에 따라 재령 28일 압축강도가 하락하는 것으로 조사되었다. 하지만, 48시간 90°C의 고온 양생을 실시한 시편의 압축강도 저하폭이 상온 양생을 실시한 시편의 강도 저하보다 크게 나타나는 것으로 나타났다. 고온 양생 시편의 경우 물/결합재비 0.2에서 150.8MPa, 물/결합재비 0.3에서 128.1MPa로 약 15%의 강도가 저하된 반면, 상온 양생 시편의 경우 물/결합재비 0.2에서 118.6MPa, 물/결합재비 0.3에서 105.4MPa로 약 11%의 강도 저하가 발생하였다.

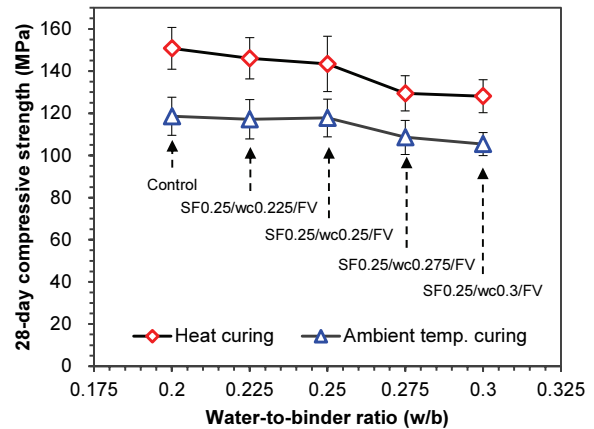


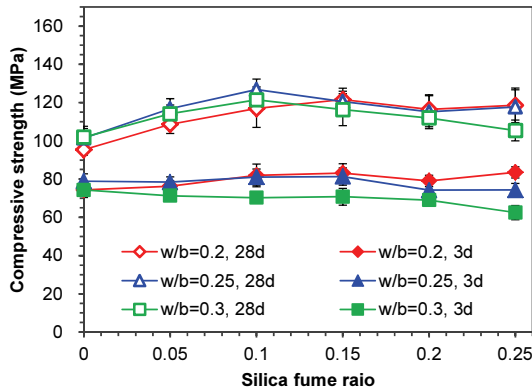
Fig. 3. Compressive strength at 28 days depending on water-to-binder ratio

#### 3.2 실리카 흙의 영향

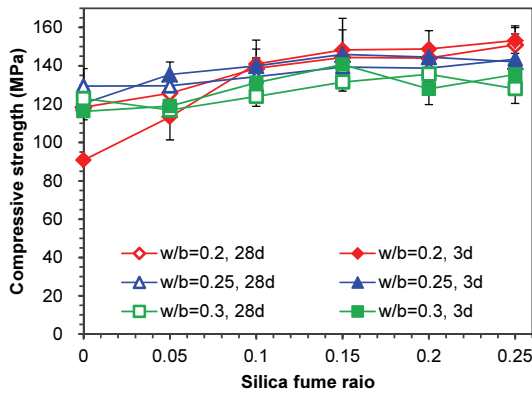
고강도 시멘트 복합체에서 실리카 흙의 영향을 확인하기 위한 Table 1(b)의 압축강도 측정 결과 및 각 시편의 표준편차를 Fig. 4에 나타내었다. 단, 일부 시편의 표준편차가 작아 식별이 어려울 수 있다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 상온 양생을 실시한 시편의 경우 재령 3일에서 재령 28일로 재령일 증가에 따른 압축강도 발현이 뚜렷한 것으로 나타난다. 하지만 고온 양생을 실시한 Fig. 4(b)의 결과는 재령일 증가에 따른 압축강도가 증가가 식별되지 않는 것으로 나타난다. 이는, 고온 양생을 실시하는 과정에서 시멘트의 수화반응이 촉진되어 재령 3일 이후 추가 수화반응이 이루어지지 않은 것에 기인한다(Kang et al, 2017; Lee et al, 2020).

OPC 대비 실리카 흙의 상대비가 0.15보다 큰 경우 실리카 흙이 고강도 시멘트 복합체의 압축강도에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 하지만, 실리카 흙의 상대량이 0.1보다 작은 경우 상온 및 고온 양생 실시유무에 무관하게 실리카 흙의 상대량 감소에 따라 강도가 점진적으로 낮아지는 것으로 나타났다. 특히, 물/결합재비가 0.2인 시편의 경우 강도저하가 큰 폭으로 발생하며, 물/결합재비 0.25 및 0.3인 시편의 강도보다도 강도가 더 낮은 것으로 나타났다. 이는 물/결합재가 0.2 수준의 고강도 시멘트 복합체 제조시 적정량의 실리카 흙 함량을 유지하여야 하는 것을 나타낸다. Li and Kwan(2014)은 실리카 흙의 구형(spherical) 형상과 작은 입자 크기로 인해 분말 재료간의 마찰을 줄이는 볼-베어링 효과(ball-bearing effect)가 작용하여 유동성을 개선하고 재료 내부의 균질성을 개선하는 것을 주장하였다. 볼-베어링 효과에 의한 유동성 증진 및 재료의 균질성 향상은 물/결합재비가 낮은 시편일수록 중요하게 작용된다. 따라서, 본 연구에서 물/결합재비 0.2인 시편

에서 실리카 흙의 상대비가 0.1 이하인 경우 물/결합재비가 0.25 및 0.3인 시편에서의 강도저하보다 크게 나타난 것은 이러한 실리카 흙의 불-베어링 효과가 충분하지 않아 재료의 균질성이 저하되고 시멘트 응집으로 인한 강도저하가 큰 폭으로 발생된 것으로 판단된다(Hamed et al, 2019).



(a) Specimens cured at ambient temperature



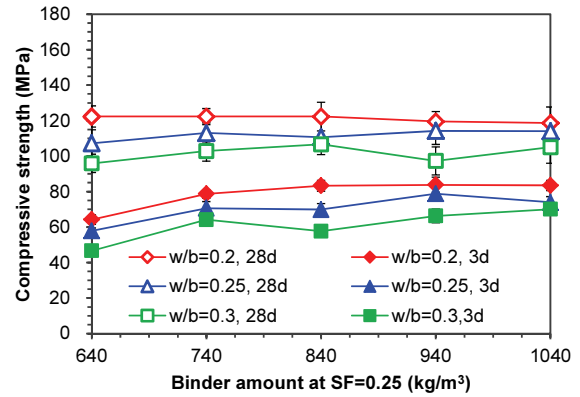
(b) Specimens cured by heat treatment

Fig. 4. Compressive strength at 3 and 28 days depending on silica fume content

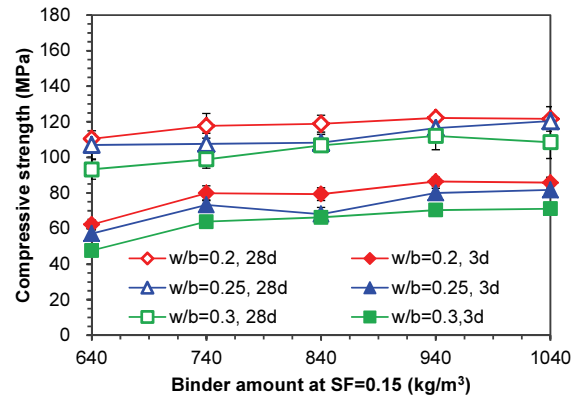
### 3.3 단위 결합재량의 영향

상온 양생한 고강도 시멘트 복합체의 역학적 특성과 단위 결합재량과의 상관관계를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 실리카 흙의 상대비가 0.25인 상온 양생한 고강도 시멘트 복합체의 재령 28일 압축강도는 단위 결합재량 변경에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 다만, 재령 3일 시편의 경우 단위 결합재량 감소로 인해 시멘트 복합체의 압축강도가 소폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 재령 초기 수화반응이 충분하지 못한 경우에는 단위 결합재량이 증가할수록 충전재(SP 및 SS)와 경화체 매트릭

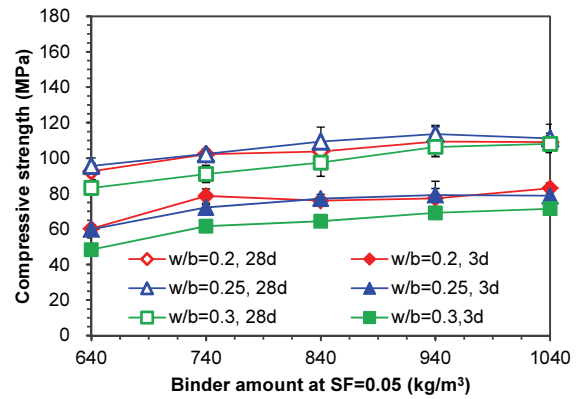
스칸의 부착이 원활하기 때문에 해석할 수 있다.



(a) Specimen with SF 0.25



(b) Specimen with SF 0.15



(c) Specimen with SF 0.05

Fig. 5. Compressive strength of ambient cured specimens depending on binder content per unit volume

실리카 흙의 상대비가 0.25에서 0.15 및 0.05로 감소할수록 단위 결합재량 감소에 따른 압축강도 저하가 보다 뚜렷해지는 것으



로 나타났다(Fig. 5(b) 및 (c)). 또한, 실리카 흙의 상대비가 0.05인 시편의 경우 3.2절에서 기술한 바와 같이 물/결합재비가 0.2인 시편의 압축강도가 물/결합재비가 0.25인 시편의 압축강도보다 낮은 것으로 나타났다. 이는, 단위 결합재량과 관계없이 실리카 흙의 상대비가 낮은 경우 물/결합재비를 지속해서 낮추는 것이 고강도 시멘트 복합체의 강도를 향상할 수 있는 방법이 아님을 나타낸다.

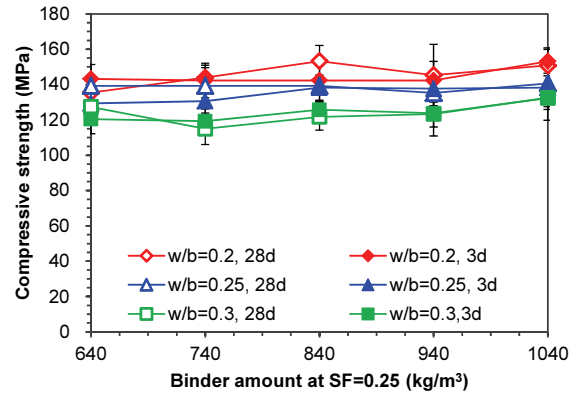
상온 양생을 실시한 시편의 경우 물/결합재비, 단위 결합재량, 및 실리카 흙의 상대비와 관계없이 재령이 증가에 따른 압축강도 증가는 뚜렷하게 나타나는 것으로 조사되었다.

고온 양생한 고강도 시멘트 복합체의 압축강도와 단위 결합재량의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a) 및 (b)에 나타난 바와 같이 OPC 대비 실리카 흙의 비율이 0.25 및 0.15인 경우 단위 결합재량이 1,040kg/m<sup>3</sup>에서 840kg/m<sup>3</sup>으로 감소하는 경우 압축강도가 소폭 상승하고, 840kg/m<sup>3</sup>에서 640kg/m<sup>3</sup>으로 감소하는 경우 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. Stock et al.(1979)은 일반적인 콘크리트에서 골재의 부피비가 20% 이하인 경우 골재의 부피 증가로 인해 콘크리트의 압축강도가 감소하나, 골재의 부피비가 40% 이상인 경우 골재의 부피 증가로 인해 콘크리트의 압축강도가 감소하는 것을 보고하였다. 이는 골재의 부피비가 낮은 상황에서는 골재의 증가로 인해 골재 주변 배합수가 변동하거나 ITZ의 부피 증가로 강도가 감소하지만, 골재의 부피가 일정 수준 이상으로 증가되는 경우 시멘트의 수화반응에 기인하는 수축감소 및 블리딩 감소로 골재와 시멘트 페이스트의 부착력이 향상되기 때문으로 알려져 있다(Neville 1997). Fig. 6(a) 및 (b)에서 가장 높은 강도를 발현한 단위 결합재량 840kg/m<sup>3</sup>의 총진재 부피는 SS 44~46%, SP 7.8% 수준으로, 고강도 시멘트 복합체의 배합에서 적정 부피비는 이정도 수준에서 결정되는 것으로 나타났다. 고강도 시멘트 복합체의 경우 일반 콘크리트와 구별되게 물/결합재비가 매우 낮고, 사용하는 골재의 입자 크기가 매우 작기 때문에 일반 콘크리트의 최적 골재비가 다른 경향을 나타내는 것으로 판단된다.

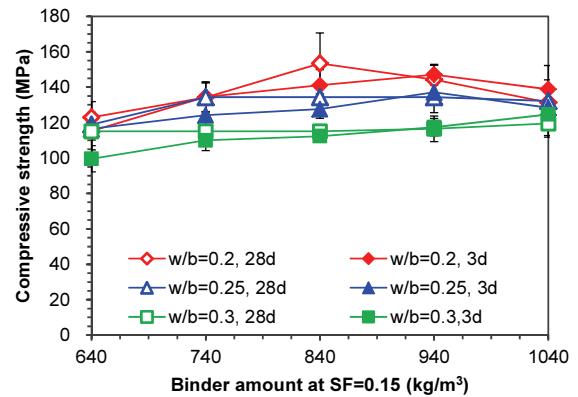
Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 실리카 흙의 혼입량이 낮은 경우 물/결합재비가 0.2인 시편의 압축강도가 물/결합재비가 0.25인 시편보다 낮은 것으로 나타났으며, 이는 앞선 다른 결과와 일치하는 경향을 나타내었다. 실리카 흙의 혼입량이 일정 수준 이하인 경우 물/결합재비를 낮추는 것이 시멘트 복합체의 압축강도를 반드시 향상시키는 것이 아님을 나타낸다.

#### 4. 결론

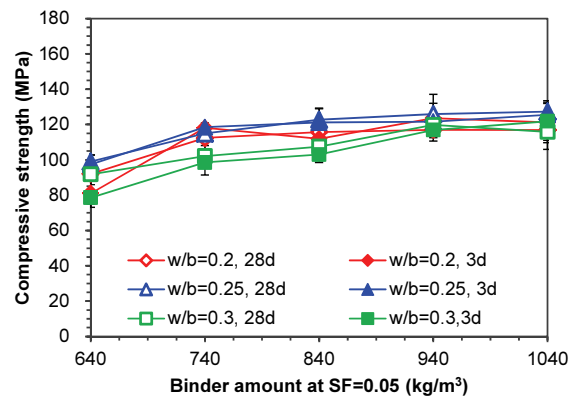
본 연구에서는 고강도 시멘트 복합체 제조를 위해 다양한 설계 인자들을 변수로한 배합실험 및 압축강도 발현을 조사하였다. 연



(a) Specimen with SF 0.25



(b) Specimen with SF 0.15



(c) Specimen with SF 0.05

Fig. 6. Compressive strength of specimens by heat treatment depending on binder content per unit volume

구에서 고려한 실험 변수는 물/결합재비, OPC 대비 실리카 흙의 비율 및 단위 결합재량으로 선정하였으며, 총 64개의 배합을 고려하였다. 각 배합에 대해 20°C의 상온 양생과 48시간, 90°C의 고온 양생을 양생 조건으로 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 상온 양생한 고강도 시멘트 복합체의 압축강도는 재령일 증가 및 물/결합재비 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 고온 양생한 고강도 시멘트 복합체는 재령일 증가에 따라 압축강도 증가는 없는 것으로 나타났고, 물/결합재비 증가에 따라 압축강도가 감소한다. 물/결합재비 증가에 따른 압축강도 저하폭은 상온 양생한 시편보다 큰 것으로 나타났다.
2. OPC 대비 실리카 흙의 중량비에 따른 압축강도의 발현 특성은 상온 및 고온 양생 유무에 따라 경향이 다른 것으로 조사되었다. 물/결합재비 및 단위 결합재량의 변동을 고려할 경우 고강도 시멘트 복합체에 사용되는 실리카 흙의 함유량은 OPC 대비 중량비 0.15 이상을 유지하는 것이 좋을 것으로 판단된다.
3. 물/결합재비가 0.2인 경우 실리카 흙의 중량비를 0.1이하로 혼합하는 경우 물/결합재비 0.25 및 0.3인 경우보다 압축강도 발현이 낮을 수 있어 주의가 필요하다.
4. 상온 양생을 실시한 고강도 시멘트 복합체의 경우 단위 결합재량 변경에 따른 압축강도의 변동성을 크지 않은 것으로 조사되었다. 다만, 단위 결합재량과 OPC 대비 실리카 흙의 함량이 동시에 낮아지는 경우 뚜렷한 강도 강소가 관찰되었다.
5. 고온 양생을 실시한 고강도 시멘트 복합체의 압축강도는 OPC 대비 실리카 흙의 상대비가 0.15 이상에서는 단위 결합재량 840kg/m<sup>3</sup>에서 압축강도 발현이 가장 좋은 것으로 나타났다. 하지만, OPC 대비 실리카 흙의 상대비가 0.05인 경우 단위 결합재량 감소에 따라 점진적으로 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다.
6. OPC 대비 실리카 흙의 상대비가 0.1 이하 및 단위 결합재량 750kg/m<sup>3</sup> 이하에서는 굳지 않은 시멘트 복합체의 유동성을 저해하므로 적절한 유동성 확보대책을 마련하여야 할 것으로 판단된다.

### Conflicts of interest

None.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 21NANO-B156177-02). 이에 감사드립니다.

### References

Barrett, P. (2009). *Review of Statistical Models: Theory and Practice*, Psychology Press, Taylor & Francis Group, Abingdon.

DeRousseau, M.A., Kasprzyk, J.R., Srubar, W.V. (2018). Computational design optimization of concrete mixtures: A Review, *Cement and Concrete Research*, **109**, 42–53.

Hamed, N., El-Feky, M.S., Kohail, M., Nasr, E.S.A.R. (2019). Effect of nano-clay de-agglomeration on mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, **205**, 245–256.

Jeong, Y.U., Lim, G.H., Kang, Y.H., Jung, S.H., Kim, J.H. (2020). Preliminary study on development of high strength cement composites at 2,000kg/m<sup>3</sup> of specific weight, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(4)**, 562–570 [in Korean].

Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, Y., Liu, Y., Li, H. (2017). Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete—A Review, *Cement and Concrete Composites*, **83**, 146–159.

Kang, S.H., Hong, S.G., Moon, J. (2019). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **115**, 389–400.

Kang, S.H., Lee, J.H., Hong, S.G., Moon, J. (2017). Microstructural investigation of heat-treated ultra-high performance concrete for optimum production, *Materials*, **10**, 1106.

Kim, S.K., Makhbal, T.O., Kim, W.S., Han, S.M. (2019). The study about strength characteristics of ultra-high performance fiber reinforced concrete(UHPFRC) with fiber combination, *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, **10(1)**, 26–33 [in Korean].

Kwan, A.K.H., Chan, K.W., Wong, V. (2013). A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect, *Powder Technology*, **237**, 172–179.

Lee, N., Jeong, Y., Kang, H., Moon, J. (2020). Heat-induced acceleration of pozzolanic reaction under restrained conditions and consequent structural modification, *Materials*, **13**, 2950.

Li, Y., Kwan, A.K.H. (2014). Ternary blending of cement with fly ash microsphere and condensed silica fume to improve the



- performance of mortar, *Cement and Concrete Composites*, **49**, 26–35.
- Mangulkar, M., Jamkar, S. (2013) Review of particle packing theories used for concrete mix proportioning, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **4(5)**, 143–148.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill, New York, 52–55.
- Neville, A.M. (1997). *Properties of Concrete*, John Wiley & Son, Inc., New York, 287–289.
- Park, C.J., Koh, K.T., Ahn, G.H., Han, M.C. (2015). Effect of silica fume types on the mechanical properties of ultra-high performance concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **3(3)**, 220–227 [in Korean].
- Stock, A.F., Hannant, D.J., Williams, R.I.T. (1979). The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete, *Magazine of Concrete Research*, **31(109)**, 225–234.
- Wang, R., Gao, X., Huang, H., Han, G. (2017). Influence of theological properties of cement mortar on steel fiber distribution in UHPC, *Construction and Building Materials*, **144**, 65–73.
- Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2015). Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete(UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, *Cement and Concrete Composites*, **55**, 383–394.
- Zhou, M., Wu, Z., Ouyang, X, Hu, X., Shi, C. (2021). Mixture design methods for ultra-high-performance concrete-A Review, *Cement and Concrete Composites*, **124**, 104242.

### 고강도 시멘트 복합체의 배합조건에 따른 압축강도 발현 특성

본 연구에서는 고강도 시멘트 복합체의 배합조건에 따른 압축강도 발현 특성을 분석하기 위해 물/결합재비, OPC 대비 실리카 흙의 함량 및 단위 결합재량을 변수로 총 64개의 배합조건과 2종류의 양생 조건으로 배합실험 및 압축강도 측정을 실시하였다. 일반적인 OPC 콘크리트와 유사하게 물/결합재비의 증가는 고강도 시멘트 복합체의 압축강도를 감소하는 것으로 나타났으며, 상온 양생 시편의 경우 재령일에 따른 압축강도 증가가 뚜렷하게 발생하는 것으로 조사되었다. 하지만 고온 양생을 실시하는 경우 재령일에 따른 압축강도 증가는 관찰되지 않았다. OPC 대비 실리카 흙의 함량이 25%에서 15%로 낮아지는 경우 강도 변화는 미미한 것으로 조사되었으나, 15%에서 0% 감소하는 경우 뚜렷한 강도 감소가 식별되며, 물/결합재비가 낮은 경우 이러한 현상은 더욱 두드러지는 것으로 조사되었다. 단위 결합재량의 840kg/m<sup>3</sup>인 경우 압축강도 발현이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 실리카 흙 함량이 낮은 경우 단위 결합재량 감소에 따른 압축강도 저하가 뚜렷해지는 것으로 조사되었다.