Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 37:1 (2017) 32~36 *ISSN 1229-9588*

국산 저가형 실리카퓸을 이용한 고성능 콘크리트의 물리적 특성 분석

김상도[a], 윤경구[b], 한승연[b*], 이겨레[b]

Analysis of physical properties of high-performance concrete using domestic low-cost silica fume

Kim Sang Do[a], Yun Kyung Ku[b], Ham Seung Yeon[b*], Lee Kyeo Re[b]

[a] *Korea Conformity Laboratories, 199, Gasan digital 1-ro, Geumcheon-gu, seoul, 08503, Korea*
[b] *Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Korea*

Received 9 June 2017; Revised 21 August 2017; Accepted 24 August 2017

Abstract

In this study, as part of a research on the development of economical high-performance concrete with high strength and high quality, the physical properties of high-performance concrete were analyzed by substituting a certain amount of low-cost domestic silica fume exempted from the re-importation type distribution structure of the domestic production and the existing high-priced silica fume distribution structure. Performing tests to identify the physical properties of the fresh and hardened concrete and durability analogy of the concrete which use low-cost domestic silica fume and imported silica fume, the chloride ion penetration resistance test result showed that the strength difference between the low-cost silica fume and the imported silica fume is not big but the strength of the low-cost silica fume was measured higher than the imported silica fume. The chloride ion penetration resistance of all variables was measured as “very low”. Since the low-cost domestic silica fume can be used as a high-performance admixture of concrete, the results suggest that it is possible to produce a more economical high-performance concrete.

Keywords: High-performance cncrete, Silica fume, Pozzolan, Low-cost silica fume

1. 서 론

콘크리트를 고강도화하게 되면 부재단면의 감소에 따른 자중의 감소, 장대화, 고층화, 유효공간의 이용 등이 가능해지며, 재료의 사용을 줄 일 수 있으므로 경제적인 측면에서도 여러 가지 이익을 얻을 수 있다. 이에 따라 강도를 증진시키기 위한 콘크리트용 혼화재로서 플라이애시, 실리카퓸, 고로슬래그미분말의 사용에 대한 관심이 고조되고 있으며, 아울러 산업부산물의 재활용적인 측면에서도 이익을 가져올 수 있어 혼화재에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1].

그중에서도 페로실리콘이나 실리콘 메탈의 제조 시 발생되는 실리카퓸은 타 재료에 비해 초미립자의 부산물로 적절한 배합 및 타설과 양생을 통해 시멘트 경화체 사이의 공극을 채우는 미세충진과 포졸란 반응(시멘트가 수화할 때 생성되는 수산화칼슘과 화합하는 반응)을 하고, 콘크리트에 치환할 경우 볼베어링 작용을 하여 유동성을 향상시키고 수밀성 및 내구성을 향상시키는 것으로 알려져 있다[1]. 하지만 예전에는 전량 수입에 의존하였고, 최근 국산 실리카퓸이 생산되지만 수출 후 역수입 형태의 유통구조가 형성되어 단가가 기존의 실리카퓸과 별반 다를 것이 없어 경제성이 떨어지고 현장에서 사용하는데 많은 어려움이 존재하고 있다. 또한 분말도 및 SiO_2 함량 등의 문제로 인해 국내 업체를 통해 유통되는 저가형 실리카퓸이 있지만 충분한 검증을 거치지 못해 유통에 어려움을 겪고 있다.

이에 본 연구에서는 콘크리트의 고강도화 및 고품질화를 통한 경제적인 고성능콘크리트의 개발에 대한 연구의 일환으로 국내 생산분 중 역수입 형태의 유통구조에서 제외된 저가형 국내 실리카퓸과 기존 유통구조의 고가형 실리카퓸을 일정량 치환한 고성능 콘크리트의 물리적 특성에 대해 분석하고자 한다.

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6240
fax: +82-33-255-6241
*E-mail address: tmddus0420@*kangwon.ac.kr (Han, Seung Yeon).

2. 이론적 고찰

2.1 고성능 콘크리트

고성능 콘크리트란 높은 유동성을 갖는 콘크리트를 기본으로 강도·내구성에 대해서도 일반 콘크리트와 동등 이상의 성능을 갖는 콘크리트를 말하며, 각 나라별로는 해석의 차이에 의해 조금씩 다른 명칭으로 불리고 있다. 이는 고성능 콘크리트가 갖는 고강도·고내구성·고유동 중 어느 성능으로 고성능 콘크리트에 접근하느냐에 따라 달라진다. 일본에서는 콘크리트 구조물의 내구성과 품질에 가장 영향을 미치는 것은 인력에 의한 다짐성능이라고 보고 다짐을 하지 않아도 자기 충전성을 갖는 고유동 콘크리트를 고성능 콘크리트로 보고 있으며, 미국이나 유럽에서는 W/B가 40% 이하의 고내구성·고강도성을 갖는 콘크리트를 High Performance Concrete 즉, 고성능 콘크리트로 보고 있다[2].

고성능 콘크리트의 국내·외 기술동향으로써 국내의 경우는 1990년대부터 활발히 연구가 수행되었으며, 현재는 압축강도 40~60㎫ 범위에서 범용화단계에 있다. 그러나 80~150㎫ 범위의 경우는 레미콘의 생산성 저하, 설계, 시공, 품질관리, 제조 등과 관련하여 국내 표준화 미정립 등 시험적용 단계에 머물고 있는 실정이다[2].

2.2 콘크리트의 고성능화

1) 시공성능의 고성능화

시공성이 좋은 콘크리트는 높은 유동성을 지니고 콘크리트의 타설 작업 시 최소한의 다짐 또는 다짐작업 없이도 복잡하게 배근된 거푸집을 구석구석까지 공극을 남기지 않고 균일하게 충전이 되어야 한다. 종래의 콘크리트의 경우 슬럼프 값이 낮으면 타설 작업이 잘되지 않아 펌프 압송관이 막히거나 다짐작업 시 많은 노력이 필요하였으며, 반대로 슬럼프 값이 높은 경우에는 낙하지점의 중심부에는 굵은골재가 많고 퍼져나간 부분에는 모르타르 부분이 많아지는 재료분리현상이 자주 발생하여 콘크리트 품질저하의 원인이 되기도 하였다[3].

따라서 시공성능 면에서의 고성능화는 콘크리트의 유동성, 재료분리저항성 등의 충전성이 우수하여 콘크리트 자중만으로도 확실하게 충전이 되는 셀프레벨링성(Self Leveling)을 가져야 하며, 타설작업 시 최소한의 다짐 또는 다짐이 전혀 필요 없는 콘크리트가 되도록 할 필요가 있다[3].

2) 강도의 고성능화

고성능콘크리트는 제조 시 고성능감수제의 사용으로 유동성을 얻고 단위수량을 가능한 억제하여 점성을 잃지 않도록 하기 위하여 많은량의 단위분체량을 사용하게 된다. 그럼에도 불구하고 단위수량은 30% 전후의 적은 량을 사용하므로 고강도의 달성이 용이하다. 또한 콘크리트의 점성을 높이기 위해 사용하는 분체 즉, 플라이애쉬, 고로슬래그미분말, 실리카퓸 등의 포졸란 반응 및 잠재수경성 등의 활성효과[4]로 콘크리트의 고강도가 자연스럽게 달성된다.

따라서 고성능콘크리트의 경우 달성할 수 있는 강도범위는 배합조건이나 제조방법, 사용분체의 종류에 따라 달라지지만 압축강도 40~70 MPa정도는 얻을 수 있다.

3) 내구성능의 고성능화

콘크리트의 내구성능 저하 요인으로는 동결융해, 중성화, 염해, 알칼리골재반응, 건조수축, 마모 등이 있으며, 이러한 내구성능 저하요인들의 대부분 수분이나, 공기의 접촉 및 침투로 인해 심화된다. 함유수분 혹은 침투수분의 동결에 의해 발생하는 동해, 공기나 우수, 지하수의 침투로 인해 발생되는 중성화현상, 비산염분의 침투, 알칼리골재반응 시 수분흡수 팽창, 콘크리트의 내부수분의 일산에 의한 건조수축과 균열 발생 등은 콘크리트 내구성능 저하의 직접적인 요인이 되고 있다. 여기에다 기계시공이나 작업성 증진을 위한 물시멘트비 증가와 이에 따른 재료분리, 블리딩현상의 심화, 다짐불량 등의 시공불량 요인도 콘크리트의 내구성능을 현저하게 저하시킨다. 이들 중 특히 동결융해, 중성화, 건조수축 등에 의한 내구성능 저하는 국내의 일반적인 환경하에서도 확실하게 진행하고 있어 콘크리트 구조물의 장기적인 수명을 좌우하고 있다. 또한 염해, 알칼리골재반응 등에 의한 내구성능 저하는 지역적인 환경조건 등에 의해 해안에서 가까운 지역 혹은 특정 골재의 유통지역 등지에서 발생된다. 최근 국내에서도 골재자원의 부족 등으로 인해 바닷모래 사용에 따른 염해 문제가 우려되고 있으며, 알칼리골재반응도 국내의 일부지역에서 반응성 골재가 발견되었다는 보고도 있다[3].

2.3 실리카퓸

1) 실리카퓸의 정의

실리카퓸(Silica fume) 또는 마이크로 실리카(microsilica)는 전기아크로에서 고순도의 우드칩, 코크스 등을 사용하여 실리콘 메탈 혹은 페로실리콘 합금을 생산하는 과정에서 고순도 quartz가 환원되어 얻어지는 부산물이다. 주성분은 실리카로서 전체 성분의 85%를 차지하는 평균입경이 0.15㎛인 구형 미분말이다. 밀도와 분말도는 각각 150~700 kg/㎥ 및 150,000~300,000 ㎠/g 의 범위이다. 통상적으로 실리카퓸은 시멘트량의 7%를 사용했을 때 가성비가 가장 좋은 것으로 알려져 있다. 부산물을 포집하여 그대로 포장한 제품을 비압축, 별도의 냉각압축과정을 거쳐 완전히 압축한 제품을 압축이라고 한다.

2) 실리카퓸의 반응 메카니즘

실리카퓸은 초기에는 대기오염을 줄일 목적으로 관심이 집중되었으나, 최근 고성능 감수제가 개발되면서 고품질 콘크리트를 생산하기 위해 결합재로 각광받고 있다[5].

기존 연구에 의하면 전이지역에는 다량의 공극과 수산화칼슘이 포함되어 있으므로 시멘트 페이스트보다 압축강도가 낮다고 하였다. 또한 수산화칼슘은 다른 지역에 비해 상대적으로 전이지역에서 많이 발생하며, 결정이 크게 성장하여 골재표면에 평행한 강한 방향성을 보이므로 작은 응력에도 쉽게 균열이 발생한다고 보고하였다[6]. 실리카퓸을 혼입함으로써 전이지역의 부착강도 증진에 의한 압축강도 증진효과가 있다고 나타내고 있다[7]. 실리카퓸의 혼입에 의해 굵은 골재 하부에 발생하는 블리딩수에 의한 공극 발생이 감소하여 경화된 콘크리트 구조를 개선할 뿐아니라, 전이지역의 두께가 감소한다고 보고 있다[8]. 또한, 실리카퓸의 미세입자는 시멘트 수화에 촉매효과뿐 아니라 수산화칼슘의 결정에 대해 응집핵으로 작용하여 수산화칼슘 결정의 크기와 방향성을 감소시키는 것으로 보고하고 있다. 그리고 실리카퓸의 미세입자는 시멘트 입자 사이에 존재하는 공극을 채움으로써 콘크리트의 역학적 특성을 개선하는 충전재 역할을 함으로써 고강도, 고내구성을 가지는 콘크리트를 생산할 수 있다[9]. 그리고 미립자인 실리카퓸은 시멘트 수화 초기에는 충전재 역할을, 시멘트 수화 후기에는 포졸란 활성 반응이 우세하다고 나타내고 있다[10].

수입 B사 실리카퓸과 국산 압축 실리카퓸의 경우 SiO2함량이 90%이상의 제품이고, 수입A사와 국산 반압축, 압축 실리카퓸의 SiO2g함량은 90%미만의 제품을 사용하였다.

3. 실험 계획 및 결과

3.1 실험계획

본 연구에서는 강사와 굵은 골재를 혼합하여 콘크리트에 적용하였다. 또한 실리카퓸(SF)을 종류별로 콘크리트에 치환하여 종류에 따른 콘크리트의 기초물성 및 내구 특성을 평가하고자 한다. 실험변수로 실리카퓸 혼입량은 결합재량 대비 7%를 선정하였고, 변수로는 저가형 압축(D), 반압축(SD), 비압축(UD) 실리카퓸과 수입산 실리카퓸 2종류를 선정하여 실험을 진행했다. Table 1은 실험변수를 나타낸 것이고, Table 2는 실험방법을 나타낸 것이다.

Table 1 Test Variable

Admixture	Variable
SF 7	Domestic (D), (SD), (UD) Imports A(UD), B(UD)

D=Densified, SD=Semi-Densified, UD=Undensidied

Table 2 Test categories and standard used in this study

Category	Standard	Schedule
Slump test	KS F 2402	Immediately after mixing
Air content test	KS F 2421	Immediately after mixing
Compressive strength	KS F 2405	28 days and 56 days
Flexure strength	KS F 2711	28 days
Resist chloride ion penetration test	KS F 2711	28 days and 56 days

3.2 공기량 및 슬럼프 시험결과

공기량 시험결과 실리카퓸의 종류 및 가공방법에 따른 영향은 없는 것으로 판단된다. 슬럼프 시험결과 국산 반압축과 비압축 실리카퓸 변수에서 다른 변수에 비해 다소 낮은 슬럼프값을 갖는 것으로 나타났다. Fig. 1은 공기량 시험과 슬럼프 시험결과를 나타낸 그래프이다.

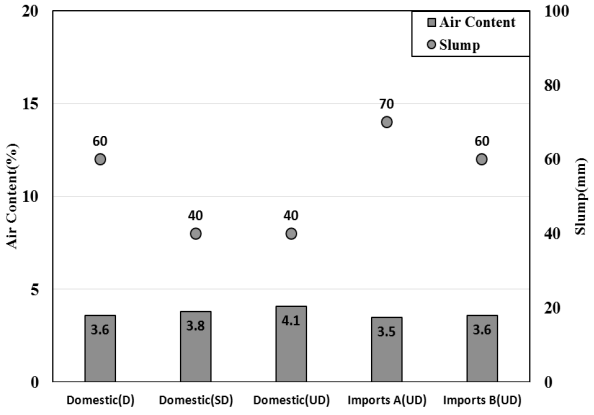

Fig. 1 Results of Air Content and Slump Test

3.3 압축강도 및 휨강도 시험결과

압축강도 시험결과 재령 28일 압축강도와 재령 56일 압축강도 모두 국산 저가형 실리카퓸을 사용한 변수가 다소 높은 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 국산 압축 및 반압축, 수입 B 실리카퓸을 사용한 변수에서는 56일 압축강도가 28일 압축강도에 비해 다소 증가한 반면, 국산 비압축과 수입 A 실리카퓸 변수에서는 약간 감소하는 경형을 보였다.

재령 28일 휨강도 시험결과 모든 시험변수에서 8.5 MPa 이상의 매우 높은 휨강도를 발현하였다. 하지만 실리카퓸의 종류 및 가공방법에 따른 휨강도의 차이는 매우 작았다. Fig. 2는 압축강도 시험결과를 나타낸 그래프이고 Fig. 3은 휨강도 시험결과를 나타낸 그래프이다.

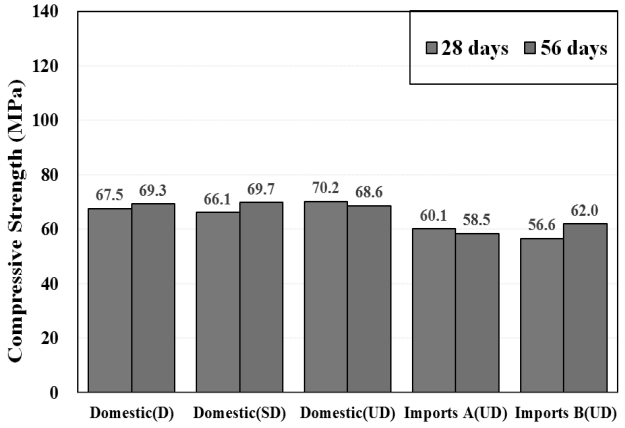

Fig. 2 Results of Compressive Strength

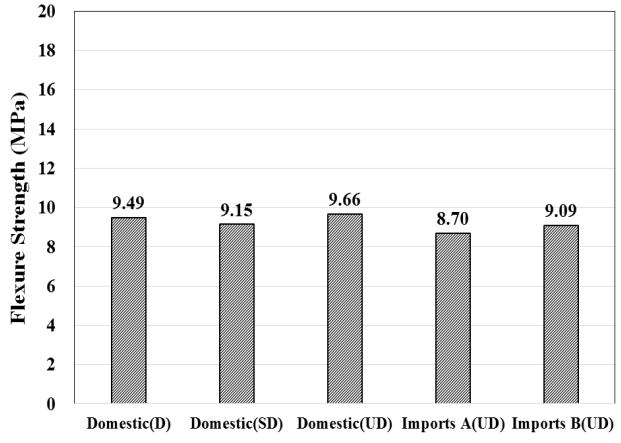

Fig. 3 Results of Flexure Strength

3.4 염소이온 침투저항성 시험결과

염소이온 침투저항성 시험(RCPT)은 일반적으로 콘크리트의 내구성 실험 중 가장 많이 행해지는 실험이다. 염소이온 침투저항성은 콘크리트의 수밀성을 판단하는 가장 대표적이고 간단한 실험으로 표면박리, 동결융해, 화학저항성 등 방법이 복잡하고 어려운 시험의 결과를 염소이온 침투저항성 실험결과로 유추할 수 있다.

재령 28일 RCPT 시험결과 SiO_2의 함량이 90%이상의 실리카퓸을 사용한 변수에서 "매우 낮음" 등급으로 나타났으며, 90% 이하의 실리카퓸을 사용한 변수에서 "낮음" 등급으로 나타났다. 재령 56일 RCPT 시험결과에서는 모든 변수에서 "매우 낮음" 등급으로 나타났다. 이는 페이스트내의 미세공극 및 골재와 페이스트 사이의 천이영역이 수화반응으로 생성된 수산화칼슘과 실리카퓸의 SiO_2 성분과의 포졸란 반응으로 인한 콘크리트의 밀도상승으로 인한 결과로 판단된다. Fig. 4는 염소이온 침투저항성 결과를 나타낸 그래프이다.

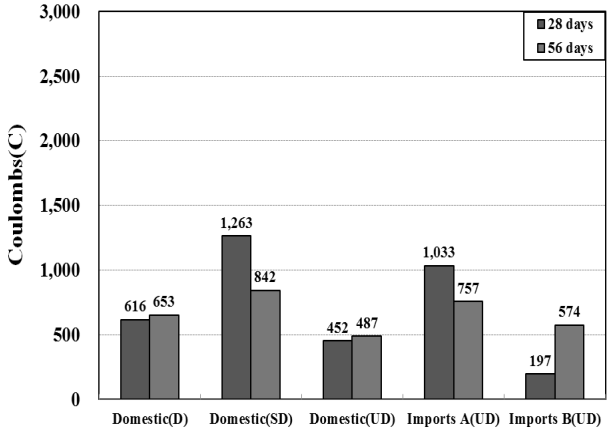

Fig. 4 Results of RCPT

4. 결 론

본 연구에서는 기존 유통 중인 수입 실리카퓸 제품 2종류와 국내에서 저가형으로 생산되는 실리카퓸 3종류에 대해 실험을 진행하였다. 공기량 및 슬럼프 실험을 통해 굳기 전 특성과 압축강도 및 휨강도 시험을 통한 역학적 특성에 대해 실험을 진행하였다. 또한 콘크리트 염소이온 침투저항성 시험을 통해 각 종류별 실리카퓸을 사용한 콘크리트의 수밀성을 판단하고 수밀성에 의한 내구성을 유추하였다. 공기량 시험결과 실리카퓸의 종류 및 가공방법이 공기량에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다. 슬럼프 시험결과 실리카퓸의 종류 및 가공방법에 따라 다소 차이를 보여 콘크리트 생산 시 유동화제 및 감수제 등의 혼화제를 사용함에 있어 주의가 필요할 것으로 판단된다. 압축강도 시험결과 국산 저가형 실리카퓸을 사용한 변수에서 높은 압축강도를 발현하였고, 휨강도에서는 별다른 차이를 보이지 않아 국산 저가형 실리카퓸의 사용으로 인한 강도성능의 저하는 없을 것으로 판단된다. 염소이온 침투저항성 시험에서는 재령 56일 시험결과 모든 시험변수가 "매우 낮음" 등급의 시험결과를 보여 실리카퓸의 종류 및 가공방법에 따른 내구성 저하는 없을 것으로 판단된다. 실험결과 국산 저가형 실리카퓸이 콘크리트의 고성능 혼화재료로써 사용이 가능하고, 이로 인한 보다 경제적인 고성능 콘크리트의 생산이 가능할 것이란 결과를 도출하였다.

References

[1] Park, J. H., 2006, The Property of Concrete Using Silica Fume, Master Thesis, Dongguk University, Republic of Korea.

[2] Kim, W. K., 2010, The Effect of Materials of on Fire Resistance of High Performance Concrete, Doctorate Thesis, Cheongju University, Republic of Korea.

[3] Jung, Y. W., 2008, The Properties and Mix Design of High Performance concrete, Doctorate Thesis, Keimyung University, Republic of Korea.

[4] Li, Z., Peng, J., Ma, B., 1999, Investigation of Chloride Diffusion for High-performance Concrete Containing Fly Ash, Micro Silica and Chemical Admixtures ACI Materials Journal, 391-396.

[5] Kim, D. G., 2004, A Effect of Ternary Concrete in Properties Pozzolan Materials on compressive Strength, Master Thesis, Pusan National University, Republic of Korea.

[6] M. D. Cohen, 1990, Mechanism of Plastic Shrinkage Cracking in Portland Cement and Portland Cement-Silica Fume Paste and Mortar, Cement and Concrete Research, Volume 20, Issue 1, pp 103-119.

[7] S. Mindess, 1988, Bonding in Cementitious Composites : How Important is It, Materials Research Society, Volume 5, Issue 10, pp 3-10.

[8] P. J. M. Monteiro, 1986, Improvement of the Aggregate-Cement Paste Transition Zone By Grain Refinement of Hydration Products, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Volume 4, Issue 10, pp 433-437.

[9] T. Knudsen, 1982, Silica Fume-Cement Paste : Hydration and Pore Structure, Condensed Silica Fume in Concrete, Proceedings of the Nordic Research Seminar on Condensed Silica Fume on Concrete, Volume 8, Issue 2, pp 19-50.

[10] R. J. Detwiler, 1989, Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behaviour of Concrete, ACI Materials Journal, Volume 86, Issue 6, pp 609-614.