

고흡수성 스마트 혼화제와 콘크리트

새로운 가능성 - 고흡수성수지(superabsorbent polymer) 콘크리트 혼화제

Use of Superabsorbent Polymers in Concrete

An Overview of the Possibilities Offered by Using these Smart Materials as Concrete Admixtures



이 종 구^{1)*}

Yi, Chong Ku

이번 해외번역기사에서는 고흡수성수지 첨가가 콘크리트 특성에 미치는 영향과 그에 따른 새로운 가능성을 소개한다. 본 기사의 원문은 Concrete International 2013년 1월호에 게재된 것으로 Lyngby 덴마크 기술대학 토목공학과 교수인 O. Mejlhede Jensen에 의해 작성되었다.

1. 개요

물은 콘크리트의 중요한 재료 중 하나로, 콘크리트의 유동성, 초결 및 강도발현 등에 많은 영향을 주고 있음은 이미 널리 알려져 있다. 특히, 주변 온도와 습도에 따라 이동이 가능한 콘크리트 내부의 수분은 경화 초기에 콘크리트의 수축, 팽창, 그리고 균열 형성에 영향을 줄 뿐만 아니라, 장기강도 발현과 creep 등의 장기거동 및 동결융해와 알칼리 실리카 반응에 따른 장기열화

에도 중요한 요인으로 작용한다. 이와 같이, 콘크리트 내부의 수분 조절이 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성 확보와 매우 밀접한 관련성을 갖는다는 것은 분명한 사실이다.

본 기사에서는 콘크리트 내부의 수분 조절을 위한 노력 중 고흡수성 수지(supersbasorbent polymer, SAP)를 활용한 새로운 시도와 관련한 기존 연구결과를 정리하여 소개하고자 한다. SAPs는 다량의 물을 흡수하여 내부에 저장할 수 있는 구조를 가진 고분자화합물로, 대부분 수용성 용액의 흡수를 위해 개발되어 왔다. 몇몇 SAP는 자중의 5000배에 달하는 물의 흡수가 가능한 것으로 보고되고 있지만, 산업용 SAP는 일반적으로 자중의 100~400배 정도의 물을 흡수할 수 있고(Fig. 1) 다양한 크기와 형태(Fig. 2)로 제조가 가능한 것으로 알려져 있다. 물의 흡수와 건조에 의해 팽창·수축하는 SAP의 특성을 콘크리트에 적절히 활용할 경우, SAP는 외부 환경의 변화에 대응하는 “smart materials”로서

1) 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, 공학박사

* E-mail : chongku@korea.ac.kr

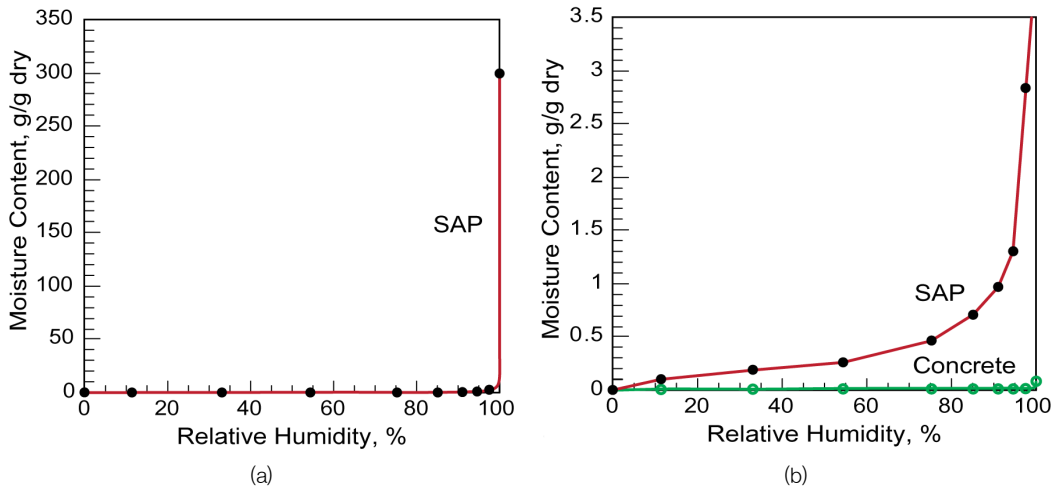


Fig. 1 SAP 등온 흡습 곡선 (흡습과 방습이 동일): (a) SAP 최대 흡수량은 대부분 100 ~ 400 g/g dry. 시멘트 페이스트 공극수와 같이 이온도(ionicity)가 높은 액체의 경우 흡수량은 10 ~ 30 g/g dry로 줄어 들 수 있음. (b) (a) 그림 일부분을 확대한 등온 흡습 곡선. (based on Reference 5). SAP의 등온 흡습 곡선 중 콘크리트 사용에 있어 흡습이 분명한 100% 상대습도 부분을 고려함.

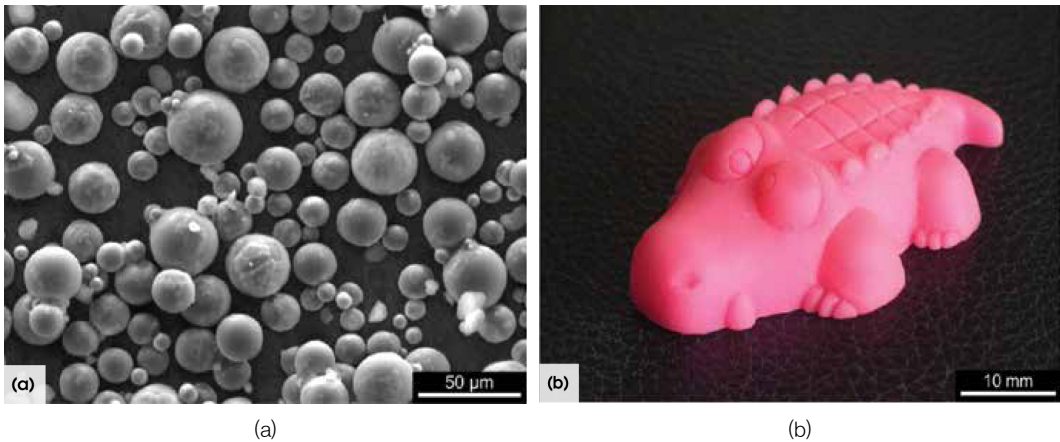


Fig. 2 SAP가 갖을 수 있는 물리적 형상의 예: (a) 현탁중합으로 생산한 구 형태로 콘크리트 자기수축에 활용 가능 (from Reference 3); and (b) 중합용액을 캐스팅하여 생산한 SAP. 수분흡수로 부피가 7배 증가 했으나 일정한 모양을 유지함 (Note: 1 mm = 0.03937 in.)

의 역할을 할 수 있을 것으로 보인다.

2. 초기 연구

1997년 작고한 Per Freiesleben Hansen와 O. Mejlhede Jensen는 양생에 새로운 개념을

도입하고자 하는 연구를 진행하였으며, SAP를 활용한 접근법은 “air entrainment”와 유사한 점이 많아 “water entrainment”라 불렀다. 이 새로운 개념은 고성능 콘크리트의 자기수축에 대응하는 방법을 찾기 위한 그들의 10년간 노력의 결실로서, 수분으로 포화된 공극을 콘크리트 내

부에 형성시키는 기술 개발의 시작점이 되었다. 작은 SAP 알갱이를 콘크리트 혼화제로 사용할 경우, 간편하면서도 콘크리트 성질에 악영향을 주지 않는 water entrainment 형성이 가능하였고, SAP에 의해 형성된 water entrainment는 콘크리트의 동결내구성 증대, 유동성 조절, 혼화제 지연방출 등의 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대되었다.

3. 강도에 미치는 영향

SAP는 콘크리트 내부의 수분이 시멘트 수화 또는 증발로 감소할 경우 수분을 점진적으로 공급하여 효과적인 콘크리트 내부양생을 가능하게 한다. 지난 수십 년간 시멘트 수화 증진과 콘크리트 수축 저감을 위해 내부양생의 효율을 높이려고 경량골재를 사용한 연구가 진행되었으나, 압축강도 및 탄성계수의 저하와 시공성 확보의 어려움 등을 극복하지 못하고 있다. 이러한 경량골재의 단점을 극복하기 위한 대체제로 SAP를 활용할 수 있을 것으로 보이며, 그 이유는 다음과 같다. 강도 측면에서 보면, SAP는 공극을 만들어 강도저하를 유발할 수 있으나 효과적인 내부양생을 통해 시멘트의 수화를 촉진하여 강도를 증진시킬 수 있는 것으로 보고 된 바 있다. 공극에 의한 강도 감소와 내부양생에 의한 강도 증진 중 어느 쪽이 더 큰 영향을 미치느냐는 콘크리트의 물-시멘트 비, 양생 기간, SAP 첨가량에 따라 결정되며, gel-space ratio 개념을 활용한 모델을 사용하여 예측이 가능하다. 물-시멘트 비 0.45 이상인 경우 SAP에 의한 내부양생의 영향은 상대적으로 미비하여 공극에 의한 콘크리트 강도 감소가 지배적이나, 물-시멘트 비 0.45 이하인 경우 내부양생의 영향이 커짐으로서 콘크리트 강도 증진을 기대할 수 있다고 보고 된 바 있으며, 상세한 실험 결과 및 분석을 원

하는 독자들은 참고 문헌 10, 11, 12에서 관련 내용을 찾을 수 있다.

4. 수축에 미치는 영향

수분손실로 인한 콘크리트의 수축은 균열을 유발 하는 요인으로 잘 알려져 있으며, 수축 균열은 수분 손실을 제거하거나 수량 감소율을 낮춤으로써 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 건조수축의 경우 대부분의 수축이 콘크리트 표면에서 일어나는 수분이동에 기인하므로 수분 공급원으로서의 SAP의 활용에 따른 효과는 제한적 일 것이다. 하지만, 고성능 콘크리트에서 발생하는 자기수축의 경우 SAP의 활용은 좋은 해결책이 될 수 있다.

Fig. 3은 소량의 SAP를 사용하여 고성능 시멘트 결합재의 자기 수축을 효과적으로 제어할 수 있음을 보여준다. 이러한 자기수축 감소는 SAP 사용에 따른 시멘트 결합재 내부의 상대습도 증가와 관련이 있는 것으로 나타났으며, 자기 수축 감소효과는 구속 링 수축 시험을 통하여 검

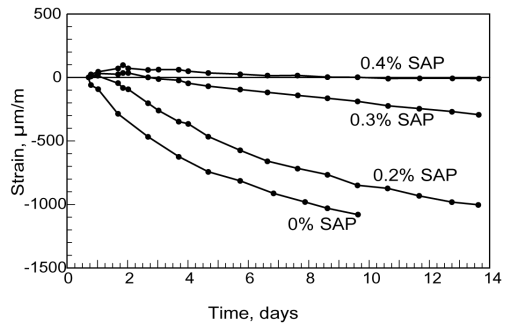


Fig. 3 1998년도 시멘트 페이스트 자기수축 실험 데이터 (물-시멘트 비 0.3, 실리카폼 20%, 시멘트 질량대 비 0~0.4% SAP. SAP부피 조절을 위한 수분도 고려하여 최종 수분량에 반영하였음). 측정은 물과 혼합한 17시간 후부터 섭씨 20도에서 ASTM C1698-09에 따라 수행함. 내부 상대습도는 14일 동안 SAP 0%의 경우 80% 감소하였으나 SAP 0.4%의 경우 상대습도 100 %를 유지함 (Reference 5)

증되었다.

또한, SAP를 콘크리트 혼합시 첨가할 경우, 수분의 기하학적, 열역학적 성질을 조절하는 기능을 제공할 수 있다. SAP 내부의 수분은 자유수 상태로 존재하며 그 크기와 모양이 첨가한 SAP에 따라 결정되므로 특정한 형태와 크기를 갖는 물을 첨가하는 것과 동일한 효과를 낼 수 있어 “water entrainment”는 공학적으로 수분의 분포 설계가 가능한 길을 열었다고 할 수 있다.

5. 동결 저항성에 미치는 영향

SAP은 공학적인 수분 분포 이외에도 시멘트 복합체 내의 공극구조를 조절하는 용도로도 사용이 가능하다. 이는 시멘트 수화로 SAP가 수축하여 공극이 형성되면서 “air entrainment”와 유사하게 콘크리트의 동결융해 저항성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 또한, 흔히 사용하는 공기연행법은 공극의 합체(coalescence), 진동다짐이나 펌핑 작업으로 인한 공기량 변화, 감수제와 공기연행제 간의 호환성을 포함한 기술적 난제를 가지고 있는데, SAP는 그러한 단점들을 극복할 수 있어 경화된 콘크리트 내부의 총 공기량, 공극간극, 공극크기 등의 조절을 위한 새로운 방안으로 고려할 가치가 충분하다. Fig. 4는 SAP가 동결융해 저항성에 미치는 영향을 보여준다. 56일 동결융해 시험 결과, SAP 시편에 비해 표준 시편에서 심각한 스케일링이 일어난 것을 확인할 수 있고 SAP 시편은 스웨덴 표준에 따라 ‘만족’ 등급에 해당함을 알 수 있다. SAP를 사용하여 콘크리트 스케일링을 60배 감소시켜 동결융해 저항성을 효과적으로 개선하였으며, 이는 공극 분석결과 콘크리트 부피의 2.8 %에 해당하는 연행공기가 SAP의 사용에 의해 발생하였기 때문으로 나타났다.

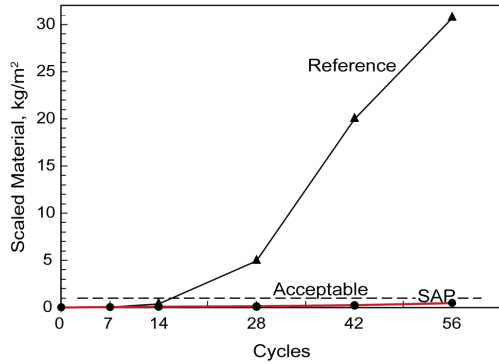


Fig. 4 스웨덴 기준에 따른 동결융해 스케일 시험 결과. - 기준 콘크리트는 물-시멘트 비 0.45, 공기 연행제가 없는 시편임, SAP 시편은 0.3% SAP 및 SAP 부피 조절을 위한 수분을 추가한 것을 제외하고는 기준 콘크리트 배합과 동일. 건조한 SAP 알갱이 크기는 60마이크론, 콘크리트 내부에 형성된 공극의 크기는 200 마이크로, Power 모델에 따른 공극간극은 0.25mm로 나타났음. (Note: 1 kg/m² = 0.2 lb/ft²)

6. 유동성에 미치는 영향

SAP 사용시 SAP의 예상 흡수량을 혼합수량에 반영하여야 하며 이를 간과할 경우 심각한 유동성 저하가 나타날 수 있다. 예를 들어, 수분 흡수율이 15 g/g인 SAP를 시멘트 질량대비 0.4% 혼입한 경우 물-시멘트비를 0.06 만큼 낮추는 효과가 있어 초기 물-시멘트비 0.4인 콘크리트의 항복응력(yield stress)과 소성점성도(plastic viscosity)가 각각 300%, 25% 증가하게 할 수 있고 물에 부풀어 오른 SAP의 존재는 항복응력과 소성점성도를 추가적으로 증가시킬 수 있는데, 이러한 반죽의 결속함은 유동화제로 조절이 가능하다.

SAP의 흡수에 기인한 반죽의 결속함(thickening)은 펌프성 향상과 리바운드 감소를 동시에 요구하는 wet-mix shortcreting의 경우 장점으로 작용할 수 있다. 현재 쇼크리트는 3인치 (80mm) 슬럼프를 유지하도록 많은 노력을 기울여 배합

설계를 하고 있으며, 리바운드 조절을 위하여 노즐 부분에 경화촉진제를 투입한다. 그러나 이러한 방법에 사용되는 대부분의 경화촉진제는 장기 강도발현에 부정적인 영향을 주는 것으로 알려져 있어 기술적으로 많은 어려움이 있다.

쇼크리트의 슬럼프 조절을 위한 SAP 적용가능성은 시험적용 단계에 있으며, 시험 결과 건조상태의 SAP를 노즐부분에서 추가하면 급속한 수분 흡수로 점성이 증가하여 경화촉진제를 사용하지 않아도 두툼한 쇼크리트 타설이 가능함을 보여주고 있다. 위에서 언급한 쇼크리트의 적용 예에서는 유연학적 특성을 개량하기 위해 SAP를 사용하였지만, SAP는 그 용도 외에도 쇼크리트의 내부양생, 자기수축 저감, 동결융해 저항성에도 긍정적인 효과를 낼 수 있을 것으로 보인다. 특히, 쇼크리트의 특성상 공기량을 제어하는 것이 매우 어렵기 때문에 동결융해 저항성 향상에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 일반적인 공기연행제를 사용하였을 경우 압송을 통해 쇼크리트의 타설이 이루어질 경우 공기량, 공극분포의 변화가 일어날 수 있는 반면 SAP는 쇼크리트 시공방법에 큰 영향을 받지 않아 공극 분포나 공기량을 정확하게 반영한 배합설계가 가능하기 때문이다.

7. 전 망

앞서 언급한 듯이 SAP는 다량의 수분을 흡수할 수 있으며 콘크리트의 성질을 개선하는데 많은 가능성을 제시한다. SAP를 활용한 수분 조절과 콘크리트의 공극구조 개선 이외에도 SAP의 재료자체의 특성을 설계할 수 있어 다음과 같은 추가적인 용도를 고려할 수 있다.

- (1) SAP는 내부 봉합재로 활용이 가능하다. 균열 부위에 침투하는 물을 흡수하여 균

열을 채우는 효과를 낼 수 있는 것이다. 이는 광섬유케이블에서 SAP를 사용하여 광섬유를 따라 수분이 이동하는 것을 막는 이치와 유사하다.

- (2) SAP는 콘크리트 내에 특정한 물질을 조절 방출하는데 활용이 가능하며, 이러한 메커니즘은 다른 여러 분야에서 활용되고 있다. 의학의 예를 들면 위장과 소장이 갖는 산성도의 차이에 의해 약품의 방출 조절이 가능하다. 콘크리트 분야에서는 시멘트와 물이 만나 반응을 시작한 후에 혼화제를 방출하는 메커니즘에 SAP를 활용하기 위하여 많은 관련 화학기업들이 검토 중이다.
- (3) 섬유모양의 SAP는 고투수성 콘크리트 제작 등에 활용이 가능하다. 건조 시 SAP는 섬유모양의 길쭉한 공극을 만들고 화재시 수증기압의 축적을 저지하여 폭발을 예방할 수 있다. 이는 스웨덴의 Hallandsasen 터널 콘크리트에 폴리머 섬유를 첨부하여 화재시 섬유의 용융에 의해 발생하는 공극으로 수증기압을 배출하여 폭발을 방지하였던 기술과 유사하다. SAP를 콘크리트 혼화제로 활용하는 시도들은 콘크리트 연구자들과 관련 기업의 많은 관심을 받고 있다. SAP의 콘크리트 관련 연구자들을 위한 국제학회가 개최되었으며, RILEM 225-SAP 기술위원회를 통하여 다양한 연구가 진행 중이다. SAP를 적용한 콘크리트의 현장 적용도 독일 Kaiserslautern 시에 건설한 2006월드컵 경기장과 중국의 고속철도 등에서 이루어진 바 있다.

이 글에서 소개한 아이디어가 실용화 되는 것은 쉽지 않은 여정이 될 것이다. 실용화 이전에 긍정적인 효과를 입증하는 많은 연구 결과의 축

적과 발생 가능한 문제점들에 대한 충분한 논의를 통해 고강도 콘크리트의 자기수축과 같이 시장 적용 후 문제점을 인지하고 해결방안을 찾는 실수를 반복하는 일이 없기를 바라며 글을 마친다.

참고문헌

1. "Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction", RILEM State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP, V. Mechtcherine and H. W. Reinhardt, eds., Springer, 2012, p.165.
2. ASTM C1698-09, "Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, p.8.
3. Banfill, P. F. G., "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Rheology Reviews, 2006, pp.61-130.
4. Esteves, L. P. and Jensen, O. M., "Absorbency of Superabsorbent Polymers in Cementitious Environments", Concrete with Smart Additives and Supplementary Cementitious Materials, MRS Proceedings - XXI International Materials Research Congress 2012 (Cancun, Mexico), Cambridge University Press, 2012 (in publication).
5. Hasholt, M. T., Jensen, O. M., Kovler, K. and Zhutovsky, S., "Can Superabsorbent Polymers Mitigate Autogenous Shrinkage of Internally Cured Concrete without Compromising the Strength?", Construction and Building Materials, Vol. 31, June 2012, pp.226-230.
6. Hasholt, M. T., Jespersen, M. H. S. and Jensen, O. M., "Mechanical Properties of Concrete with SAP Part I: Development of Compressive Strength", International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, O. M. Jensen, M. T. Hasholt and S. Laustsen, eds., RILEM Pro074, 2010, pp.117-126.
7. Hasholt, M. T., Jespersen, M. H. S. and Jensen, O. M., "Mechanical Properties of Concrete with SAP Part II: Modulus of Elasticity", Proceedings of the International RILEM Conference, Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, O. M. Jensen, M. T. Hasholt and S. Laustsen, eds., RILEM Pro074, 2010, pp.127-136.
8. Internal Curing of Concrete—State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 196-ICC, RILEM Report 41, K. Kovler and O. M. Jensen, eds., 2007, p.161.
9. International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, O. M. Jensen, M. T. Hasholt and S. Laustsen, eds., RILEM Pro074, p.329.
10. Jensen, O. M., "Autogenous Phenomena in Cement-Based Materials", DSc thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2005.
11. Jensen, O. M., "Use of Superabsorbent Polymers in Construction Materials", 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, W. Sun, K. van Breugel, C. Miao, G. Ye, and H. Chen, eds., RILEM Pro061, 2008, pp.757-764.
12. Jensen, O. M., "Water Absorption of Superabsorbent Polymers in a Cementitious Environment", International RILEM Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering, C. Leung and K. T. Wan, eds., RILEM Pro079, 2011, pp.22-35.
13. Jensen, O. M. and Hansen, P. F., "Autogenous Deformation and RH-Change in Perspective", Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 12, Dec. 2001, pp.1859-1865.
14. Jensen, O. M. and Hansen, P. F., "Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principles and Theoretical Background", Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 4, Apr. 2001, pp.647-654.
15. Jensen, O. M. and Hansen, P. F., "Water-Entrained Cement-Based Materials: II. Experimental Observations", Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 6, June 2002, pp.973-978.
16. Jolin, M. and Beaupre, D., "Understanding Wet-Mix Shotcrete: Mix Design, Specifications, and Placement", Shotcrete, summer 2003, pp.6-12.
17. Laustsen, S., "Engineered Air-Entrainment of Concrete", Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2011.
18. Lee, H. X. D., Wong, H. S. and Buenfeld, N., "Self-Sealing Cement-Based Materials Using Superabsorbent Polymers", International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, O. M. Jensen, M. T. Hasholt and S. Laustsen, eds., RILEM Pro074, 2010, pp.171-178.
19. Li, X.-T., Institute of Railway Construction, Beijing, personal communication, June 2012.

- Selected for reader interest by the editors.
20. Modern Superabsorbent Polymer Technology, F. L. Buchholz and A. T. Graham, eds., WILEY-VCH, New York, Nov. 1997, p.304.
 21. Powers, T. C. and Brownyard, T. L., "Studies of the Physical Properties of Hardened Cement Paste, Part 6. Relation of Physical Characteristics of the Paste to Compressive Strength", ACI Journal Proceedings, Vol. 43, No. 9, Sept. 1947, pp.845-857.
 22. SS 13 72 44, "Testing of Concrete—Hardened concrete—Scaling by Freezing", fourth edition, Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 2005 (in Swedish).

담당 편집위원: 이종구
(고려대학교 건축사회환경공학부 부교수)
chongku@korea.ac.kr