

미생물 혼입 하이드로젤 지지체 첨가에 따른 자기치유 콘크리트의 물성 변화

추인엽¹, 우진호², 우상균³, 이병재^{4*}

Physical Properties of Self-healing Concrete Mixed with Hydrogel Carrier of Microorganism

Inyeop Chu¹, Jinho Woo², Sang-Kyun Woo³, Byungjae Lee^{4*}

Abstract: The properties of concrete with addition of microgel - containing hydrogel support were investigated. As a result of measuring the slump of the self - healing concrete, the target slump was satisfied in all the mixing conditions, but the slump was decreased as the mixing amount of the hydrogel support increased. The change of porosity due to incorporation of hydrogel support was minimal. As a result of the evaluation of the compressive strength of the self - healing concrete, the incorporation of the hydrogel support did not affect the strength. However, under the same mixing condition, the dispersion value of the specimens tended to increase with increasing hydrogel support contents. As a result of the permeability test of self-healing concrete according to the incorporation of hydrogel support, it was confirmed that the mixing ratio of hydrogel support was effective to decrease the permeability coefficient.

Keywords: Microorganism, Hydrogel carrier, Self-healing, Permeability coefficient

1. 서론

고도성장기의 사회기반시설물 뿐만 아니라 사회적 중요도가 높은 구조물(원전구조물, 터널, 지하구조물, 해양구조물 등)에 유지관리의 중요성이 증대되고 있다. 최근에는 균열 등 콘크리트의 손상을 저감시키거나 자기치유(Self Healing)할 수 있는 콘크리트의 개념이 대두되면서 실제 건설 현장에서의 적용을 위한 연구가 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

콘크리트에 발생하는 균열은 재료 및 배합에 의한 균열, 소성수축균열, 침하균열 등 다양하게 발생한다. 특히 외부환경의 변화에 따른 물리화학적 풍화 침식으로 미세균열이 빈번하게 발생하며, 균열부위의 수분과 화학물질 침투로 인하여 내구성에 치명적인 영향을 받게 된다. 이러한 균열로 인한 단점을 극복하기 위해 지금까지 콘크리트 배합과정에서 유리섬유, 유기폴리머, 합성화합물 등 다양한 보강재료를 사용해 왔다. 하지만 화학적 보강재들은 장기적 성능 유지가 어렵고,

많은 에너지와 비용이 요구되는 단점을 가지고 있다.

따라서, 자기치유 콘크리트(Self Healing Concrete)는 생체광물형성 미생물, 무기 광물질 등을 이용하여 콘크리트에 발생하는 균열을 스스로 인지하고 발생 균열을 치유하는 능력이 부여된 스마트 콘크리트(Smart Concrete)로서, 철근콘크리트를 주재료로 하는 구조물의 내구성과 관련하여 균열을 스스로 치유함으로써 철근부식을 최소화하여 내구수명을 증진시키고 유지보수를 최소화할 수 있으며, 궁극적으로는 “Maintenance Free”를 구현할 수 있는 기술로 평가받고 있다.

본 연구에서는 미생물 혼입 하이드로젤 지지체를 적용한 자기치유 콘크리트의 물성을 평가하여 적용 가능성 연구를 수행하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서는 하이드로젤 지지체를 혼입한 자기치유 콘크리트의 물성평가 및 적용성 규명을 위해 Table 1에 나타낸 시험조건 및 배합변수로 실험을 수행하였다.

¹정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

²정회원, 한국전력공사 전력연구원 연구원

³정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

⁴정회원, 대전대학교 토목공학과 조교수

*Corresponding author: bjlee@dju.kr

Dept. of Civil Engineering, Daejeon University, Daejeon, 34520, Rep. of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Experimental variables

F _{ck} (MPa)		27
Target Slump(mm)		150±10
Target Air contents(%)		4.0±1.5
Hydrogel Carrier (%)		0, 1.0, 1.5
Test items	Physical & mechanical properties	- Slump & Air test - Compressive strength test
	Self healing	- Coefficient of permeability

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 시멘트는 밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3,350 cm²/g인 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였다.

Table 2 Physical properties of OPC

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Chemical composition (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
3.15	3,350	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	1.30

2.1.2 골재

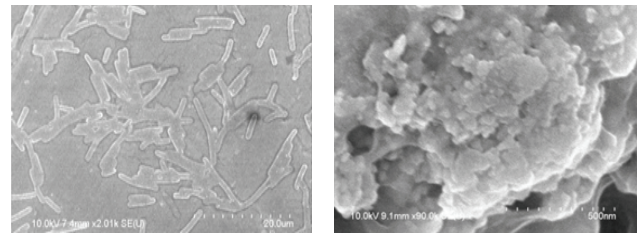
본 연구에 사용된 골재는 강원 영월군 J사에서 생산된 부순 굵은 골재 및 잔골재를 사용하였다. Table 3은 사용골재의 물리적 성질을 나타내었다.

Table 3 Physical properties of aggregate

Items	Grading (mm)	Density (g/cm ₃)	Water absorption(%)	Absolute volume(%)	F.M
Coarse aggregate	25	2.69	0.9	59	6.88
Fine aggregate	5	2.58	1.1	-	2.61

2.1.3 하이드로젤

자기치유 콘크리트에 적용될 하이드로젤 지지체의 원료 중 미생물은 한국생명공학연구원 미생물자원센터 (Korean Collection for Type Culture)에서 보유하고 있는 Bacillus sphaericus 14 균주를 배양하고 미생물의 광물 형성을 확인하였다(Fig. 1).



(a) Bacillus sphaericus 14 (b) CaCO₃ precipitation

Fig. 1 SEM of microorganism

하이드로젤 지지체 제작 전경은 Fig. 2에 나타내었고, 하이드로젤 지지체의 입경은 1.0~1.3mm를 유지하도록 하였다 (Table 4). 또한, 본 연구에서 제조한 하이드로젤 지지체의 성능평가를 위해 해외 B사에서 개발하여 시판중인 B제품을 사용하여 치유특성을 비교분석하였다.

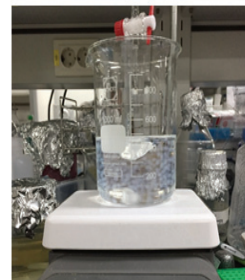


Fig. 2 hydrogel carrier production

Table 4 Physical properties of hydrogel

Item	Grading (mm)	Density (g/cm ³)	Color
HC-K	1.0 ~ 1.3	0.85	dark brown
HC-B	0.8 ~ 1.3	0.80	dark brown

2.1.4 혼화제

시멘트 분산작용에 의해 콘크리트의 성질을 개선시키는 혼화제로서, 국내 S사제품의 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 5와 같다.

Table 5 Physical properties of admixture

Admixture	Appearance	Density (g/cm ³)	pH	Mass contents (%)
High-range water reducing agent	Light brown liquid	1.06	6.5	41 ~ 45

2.2 실험방법

2.2.1 슬럼프 및 공기량

자기치유 콘크리트의 물성변화 검증을 위해 슬럼프 및 공기량 시험을 실시하였으며, 슬럼프 시험은 KS F 2402 “콘크리트의 슬럼프 시험방법”에 준하여 측정하였다. 공기량 시험은 KS F 2449“굳지 않은 콘크리트의 용적에 의한 공기량 시험방법”에 준하여 평가하였다.

2.2.2 압축강도 시험방법

자기치유 콘크리트의 압축강도 시험은 $\phi 100 \times 200$ mm의 공시체를 제작하여 KS F 2405 『콘크리트의 압축강도 시험방법』에 준하여 유압식 만능시험기를 사용하여 측정하였다.

2.2.3 투수 시험방법

자기치유 콘크리트의 치유성능 확인은 균열부에 수압을 부여하여 통과된 수량을 측정함으로써 평가가 가능하다. 투수 시험에 관련된 표준은 제정되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 KS F 2322 “흙의 투수 시험 방법”의 원리를 준용하여 Fig 3와 같은 투수시험기를 제작하였다. 시험체는 $\phi 150 \times 300$ mm의 공시체를 제작하고 28일간 수중양생한 뒤, 두께 50mm의 디스크 형태로 절단하였다. 절단한 시험체를 접합중기를 이용하여 인공균열을 유발 하고 고압분사기를 이용하여 내부 미세면지를 제거하였다. 쪼갠 공시체의 균열폭 제어를 위해 균열면에 약 0.2mm의 동판을 끼우고 공시체의 표면 균열폭이 0.25~0.30mm가 되도록 테이프 및 호스밴드를 이용하여 구속하였다. 그 후에 옆면에 누수가 되지 않도록 에폭시 수지를 이용하여 도포하였다.

2.3 배합

자기치유 콘크리트의 배합요인에 따른 물리·역학적 특성을 분석하기 위하여 배합설계는 물-결합재비 49.8%, 잔골재를 48.0%로 선정하였으며, 하이드로젤 지지체의 혼입율을 0, 1.0, 1.5%로 변화시켜 배합을 실시하였다. 또한 믹싱은 하이드로젤 지지체의 분산성을 확산시키기 위해, 먼저 결합재와 골재를 투입하고 35rpm으로 60초 동안 혼합 한 후, 하이드로

젤 지지체를 투입하여 30초간 추가 믹싱을 하였다. 마지막으로 혼합수 및 혼화제를 투입하고 120초 동안 혼합하는 분할 투입방법으로 배합하였다.



Fig. 3 Permeability testing device

2.4 공시체의 제작

공시체의 제작은 믹싱을 끝낸 자기치유 콘크리트를 각 소요의 몰드($\phi 150 \times 300$ 및 $\phi 100 \times 200$)에 채운 후 각 층마다 다짐봉을 이용하여 층경다짐을 실시하여 제작하였다. 자기치유 콘크리트가 타설된 공시체는 24시간 기건양생 후에 탈형하고 소요의 재령(28일)까지 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 수중에서 표준양생을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슬럼프

자기치유 콘크리트의 배합조건에 따른 슬럼프 측정결과는 Fig. 4와 같다.

Table 6 Mix proportions

Item	W/C (%)	S/a (%)	Hydrogel Carrier (%)	Unit weight(kg/m ³)					
				W	C	S	G	Ad.	Hydrogel Carrier
Plain	49.8	48.0	0	168	340	874	907	0.204	-
HC-K1.0			1.0	168	340	874	907	0.204	3.40
HC-K1.5			1.5	168	340	874	907	0.204	4.56
HC-B1.5			1.5	168	340	874	907	0.204	4.56

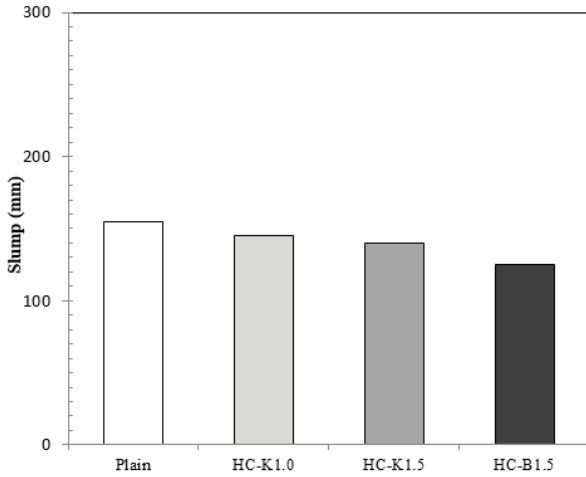


Fig. 4 Result of Slump test

이를 고찰하여보면 Plain 배합에서는 155mm로 당초 목표 슬럼프 150±10mm를 만족하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발한 HC-K 하이드로젤 지지체 혼입을 증가에 따른 슬럼프 변화는 미소하지만 슬럼프 값이 감소 되는 것으로 나타났다. 이는 하이드로젤 지지체의 경우 미생물 활성화에 필요한 수분 흡수 특징 때문으로 판단된다. 하이드로젤 지지체는 중성 상태에서 일부 수분을 흡수하는 경향을 가지고, 높은 알칼리 상태에서는 수분흡수를 하지 않는 특징을 가지고 있는데, 콘크리트 배합시 수화반응을 하지 않은 상태에서의 혼합수 일부를 흡수하여 슬럼프 감소를 나타낸 것으로 판단된다. 하지만 모든 배합 조건에서 목표 슬럼프 (150±10mm)는 만족하는 것으로 확인되었다.

하지만, 국외 제품인 HC-B 제품의 경우, 1.5% 혼입시 슬럼프 저하가 개발제품에 비해 높은 것으로 확인되었다.

3.2 공기량

하이드로젤 지지체의 혼입조건에 따른 굳지않은 콘크리트의 공기량 측정결과는 Fig. 5에 제시하였다.

이를 고찰하여 보면, 하이드로젤 지지체를 혼입하지 않은 Plain의 경우 공기량 3.8%로 측정되어 목표 공기량 4.0±1.5%를 만족하는 것으로 나타났다.

하이드로젤 지지체의 혼입율에 따른 공기량의 변화는 모든 조건에서 목표 공극률 범위를 만족하였지만, 유의미한 데이터를 나타내지 못하였다. 측정 횟수에 따라 공기량이 증가와 감소를 반복하였다.

해외 B사의 제품(HC-B)의 경우의 경우에서도 본 연구에서 개발한 HC-K와 유사한 공극률을 나타내었다. 이는 하이드로젤 지지체의 혼입유무와 상관없이 공기량 변화는 미미한 것임을 확인하였다.

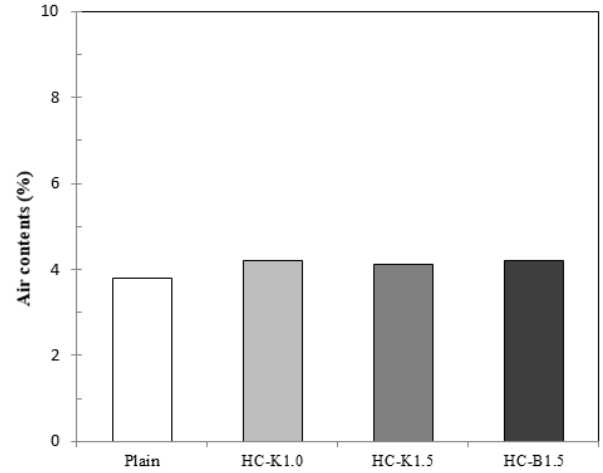
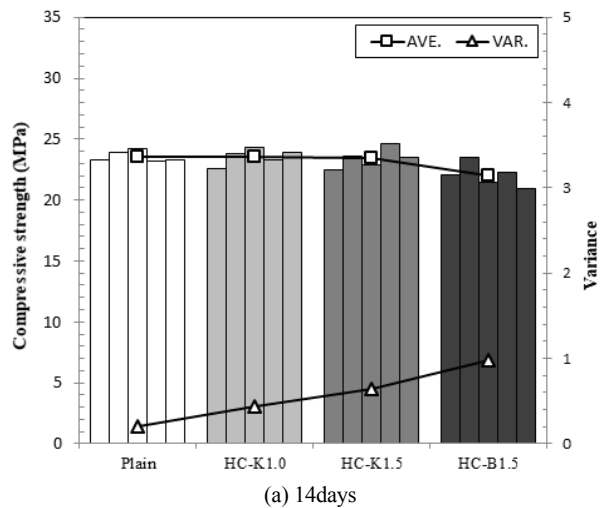


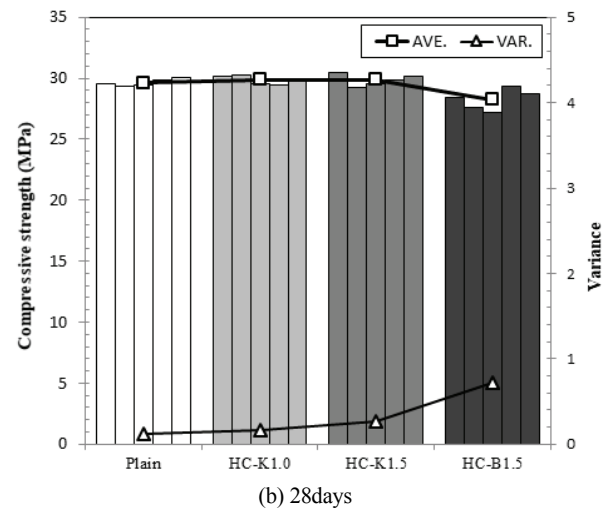
Fig. 5 Result of air contents test

3.3 압축강도

자기치유 콘크리트의 압축강도 시험결과는 Fig. 6에 나타



(a) 14days



(b) 28days

Fig. 6 Results of compressive strength test

내었다. 하이드로젤 지지체의 혼입을 및 재령(14일, 28일)에 따른 결과를 고찰하면 다음과 같다. 하이드로젤 지지체를 혼입하지 않은 Plain의 경우, 배합강도 27MPa을 만족하여 28일에 29.6MPa을 나타내었다.

하이드로젤 지지체의 혼입에 따른 압축강도 경향은 재령에 상관없이 유사한 강도 경향을 나타내어 하이드로젤 지지체의 혼입이 강도에 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다. 하지만, 동일 배합조건에서 Plain 및 하이드로젤 지지체 혼입 조건(HC-B1.0, HC-B1.5)에 따라 시험체간의 분산값이 다른 경향을 나타내었다.

재령 14일의 배합조건별 분산값은 Plain: 0.197, HC-B1.0: 0.430 및 HC-B1.5: 0.637로 나타나 하이드로젤 지지체의 혼입율이 높아짐에 따라 분산값이 증가되는 경향을 나타내었다. 재령 28일에서는 분산값의 증가경향이 감소되기는 하였으나 하이드로젤 지지체의 혼입에 따라 유사한 경향을 나타내었다. 이는 다량의 하이드로젤 지지체가 콘크리트 내부에 고루 분포되기는 하지만, 콘크리트 파괴시에 파괴면에 하이드로젤 지지체가 포함될 경우 일부 강도감소경향을 나타내었기 때문으로 판단된다.

또한, 국외 제품인 HC-B 제품의 경우, 1.5% 혼입시 강도가 Plain 대비 4.7~6.5% 강도 감소를 나타내었으며, 시험체간의 분산도 가장 큰 특징을 나타내었다.

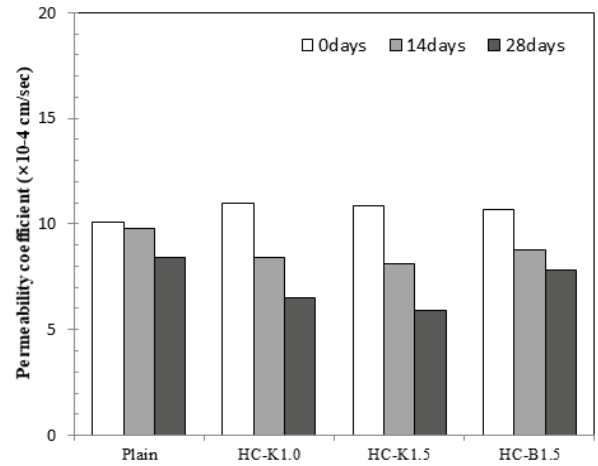
3.4 자기치유 콘크리트 투수시험

자기치유 콘크리트의 치유능력 평가를 위해 특수 제작된 투수장비를 이용하여 투수계수를 측정하여 치유효과를 검증하였다. 시험결과는 Fig 7에 나타난 바와 같다.

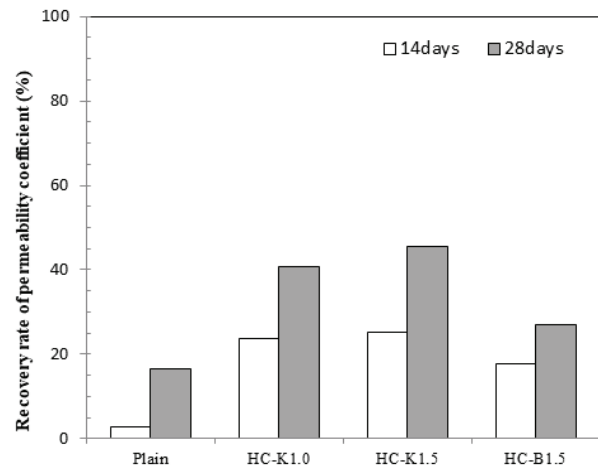
하이드로젤 지지체를 혼입하지 않은 시험체에서도 투수계수 감소가 나타나 균열 유발 후 14일에 2.8%, 28일에 16.7%의 회복율을 나타내었다. 이는 콘크리트 내부의 미수화 시멘트 중 일부가 투수시험 중 추가로 공급된 수분에 의해 수화발현을 하였기 때문으로 판단된다.

하이드로젤 지지체의 혼입율에 따라서는 재령의 증가에 따라 투수계수가 급격히 감소되는 것으로 나타났으며, 하이드로젤 지지체 1.5%혼입시 재령 28일에서 최대 45.6%의 투수계수 회복율을 나타내었다. 따라서 미생물을 활용한 하이드로젤 지지체의 자기치유 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한, 투수시험 후 균열부위를 절단하였을 때, 시험체 표면에 탄산칼슘이 석출된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 8).

한편, 국외 B사의 하이드로젤 지지체의 경우, 투수계수가 감소되어 자기치유 효과가 있는 것으로 판단되나, 본 연구에서 개발한 HC-B1.5 배합에 비해 59.3%p 정도의 효과만 있는 것으로 나타났다.



(a) Permeability coefficient



(b) Recovery rate of permeability coefficient

Fig. 7 Results of permeability test



Fig. 8 Section of specimen

4. 결론

본 연구에서는 미생물 혼입 하이드로젤 지지체를 적용한 자기치유 콘크리트의 물리·역학적 특성 및 자기치유 성능을 평가하여 적용 가능성 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 자기치유 콘크리트의 슬럼프 측정결과, 모든 배합조건에서 목표슬럼프를 만족하였으며, 하이드로젤 지지체의 혼입시 하이드로젤 지지체의 혼입수 흡수로 인해 일부 슬럼프가 감소되는 경향을 나타내었다.
- 2) 하이드로젤 지지체 혼입에 따른 공극률의 변화는 미미한 것으로 나타났다.
- 3) 자기치유 콘크리트의 압축강도 평가결과, 재령에 따라 강도는 증가하였으며, 하이드로젤 지지체의 혼입은 강도에 영향을 미치지 않았다. 하지만 동일 배합조건하에서 시험체간의 분산값이 하이드로젤 지지체 혼입량 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.
- 5) 하이드로젤 지지체의 혼입에 따른 자기치유 콘크리트의 투수시험 결과, 하이드로젤 지지체의 혼입이 투수계수 감소에 효과가 높은 것으로 확인되었다.
- 6) 하이드로젤 지지체를 적용한 자기치유 콘크리트의 성능 평가 결과, 콘크리트에 적용가능한 것으로 판단되나, 추후 내구성 평가 등이 보완 되어야 할 것으로 사료된다.

References

- Hyun Jung Kim, and Woojun Park (2016). Current Research Topics in Development of Self-healing Concrete Using Microorganisms, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 28(3), 30-34.
- Al-Salloum, Y., Hadi, S., Abbas, H., Almusallam, T., and Moslem, M. A. (2017). Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation - A review, *Construction and Building Materials*, 154, 857-876.
- Wha-Jung Kim, Sung-Tae Kim, Sung-Jin Park, Sa-Youl Ghim, and Woo-Young Chun (2009). A Study on the Development of Self-Healing Smart Concrete Using Microbial Biomineralization, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(4), 501-511.
- Lee, Jun-Cheol, Kim, Wha-Jung, Chun, Woo-Yong, and Lee, Chang-Joon (2013). The Effect of Microorganisms on Compressive Strength of Cement Paste, *JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction*, 29(7), 65-72.
- Kong, L., Zhang, B., and Fang, J. (2017). Study on the applicability of bactericides to prevent concrete microbial corrosion, *Construction and Building Materials*, 149, 1-8.
- Kim, Ha Yeon, Son, Hyeong Min, Park, Sol Moi, and Lee, Haeng Ki (2017). Overview of the effect of microbiological calcium carbonate precipitation(MCCP) on co-culture of urea degrading and non-urea degrading bacteria, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 29(2), 245-246.
- Grengg, C., Mittermayr, F., Ukrainczyk, N., Koraimann, G., Kienesberger, S., and Dietzel, M. (2018). Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: A review. *Water research*.

Received : 06/27/2018
 Revised : 08/22/2018
 Accepted : 10/29/2018

요 지 : 콘크리트 자기치유를 목적으로 미생물 혼입 하이드로젤 지지체 첨가에 따른 콘크리트의 특성을 검토하였다. 자기치유 콘크리트의 슬럼프 측정결과, 모든 배합조건에서 목표슬럼프를 만족하였으나, 하이드로젤 지지체의 혼입량 증가에 따라 슬럼프 감소가 있었다. 하이드로젤 지지체 혼입에 따른 공극률의 변화는 미미하였다. 자기치유 콘크리트의 압축강도 평가결과, 하이드로젤 지지체의 혼입은 강도에 영향을 미치지 않았다. 하지만 동일 배합조건하에서 시험체간의 분산값이 하이드로젤 지지체 혼입량 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 하이드로젤 지지체의 혼입에 따른 자기치유 콘크리트의 투수시험 결과, HC-B1.5 배합의 경우 최대 45.6%의 투수계수 회복율을 나타내어 하이드로젤 지지체의 혼입이 투수계수 감소에 효과가 높은 것으로 확인되었다.

핵심용어: 미생물, 하이드로젤 지지체, 자기치유, 투수계수