pISSN 1598-2033
eISSN 2233-5706

J. Korea Inst. Build. Const., Vol. 15, No. 3
http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2015.15.3.265

www.jkibc.org

분말형 경화촉진제를 혼입한 PC부재용 콘크리트의 기초특성에 관한 실험적 연구

Effect of Powder Hardening Accelerator on the Physical Properties of Precast Concrete

전 우 철[1] 서 휘 완[1] 배 연 기[1] 박 희 곤[2*] 민 태 범[3] 권 영 호[4]

Jun, Woo-Chul[1] Seo, Hwi-Wan[1] Bae, Yeoun-Ki[1] Park, Hee-Gon[2*] Min, Tae-Beom[3] Kwon, Yeong-Ho[4]

RexconBU Company Quality Control Team, Doosan E&C, Nonhyun-dong, Namdong-gu, Incheon, 405-849, Korea [1]

Research Institute, Doosan E&C, Nonhyun-dong, Gangnam-gu, Seoul, 135-714, Korea [2]

Department of Architectural Engineering, Han Yang University, Sangnok-Gu, Ansan, 426-791, Korea [3]

Department of Architecture & Fire Administration, Dong Yang University, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyeongbuk, 750-711, Korea [4]

Abstract

This study is intended to produce a PC (Precast Concrete) member without a steam curing process in developing the high early strength concrete satisfying the condition of 10MPa in compressive strength at the age of 6 hours, and is intended to ensure economic feasibility by increasing the turnover rate of concrete form. Hence, high early strength cement with high C_3S content and the hardening accelerator of powder type accelerating the hydration of C_3S was used. And the properties of concrete were evaluated according to the hardening accelerator mixing ratio (0, 1.2, 1.6, 2.0). No big difference was found from the tests of both slump and air content. When 1.6 % or higher amounts of the hardening accelerator were mixed, the compressive strength of 10MPa was achieved at the age of 6 hours. From the test results of autogenous (drying) shrinkage and plastic shrinkage, it can be seen that there was a difference according to hydration reaction rate due to the addition of the hardening accelerator. However, it was shown that no problem arose with crack and durability. And it was shown that resistance to freezing-thawing, carbonation, and penetration were excellent.

Keywords : steam curing, precast concrete, hardening accelerator, high-early-strength cement

1. 서 론

1.1 연구의 목적

공장에서의 생산으로 즉시 현장 사용이 가능하며, 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있는 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete, 이하 'PC'라 칭함)는 빠른 시간 내 강도를 확보하여 거푸집의 회전율을 높이기 위한 방법으로 높은 온도의 증기양생을 실시하고 있다.

하지만, 증기양생을 위한 높은 에너지 사용으로 경제적 손실과 환경적 문제가 초래되고 있기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위한 대책이 절실히 요구되고 있다.

이에, PC부재 제조 시, 경제적 및 환경적 문제를 해결하기 위한 방안으로 3종 조강 포틀랜드 시멘트(이하 '시멘트'라 칭함)를 사용하여 증기양생 공정시간을 줄이기 위한 많은 연구가 진행 중이나, 증기양생 공정을 생략하지 못하는 실정이다[1,2]. 또한, 최근에는 콘크리트의 증기양생을 대신하여 CO_2를 사용한 양생방법이 개발되고 있으나, 아직 실용화 단계까지는 미치지 못하고 있다[3].

Received : January 15, 2015
Revision received : February 5, 2015
Accepted : May 8, 2015
* Corresponding author : Park, Hee-gon
[Tel: 82-2-510-3159, E-mail: heegon.park@doosan.com]
ⓒ2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

따라서, 본 연구에서는 재료적 측면으로 PC부재의 거푸집 탈형 강도를 상온조건에서 만족시켜 증기양생 공정을 생략할 수 있는 조강 콘크리트를 개발하여 친환경적인 PC 부재를 실용화 위한 자료로 활용하고자 하는데 목적이 있다[4].

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 PC부재의 탈형강도인 10MPa 이상을 재령 6시간에 만족하기 위한 연구로써, 초기강도에 영향을 미치는 C_3S를 다량 함유한 시멘트와 C_3S를 자극하는 분말형 경화촉진제(Hardening Accelerator of Powder Type, 이하'HAP'라 칭함)를 사용하여 그 가능성을 이전 실험[4,5]을 통하여 확인하였으며, 지속적인 연구를 통하여 목표를 만족시킬 수 있는 최적의 HAP 혼입율을 도출하였다. 이에, 본 실험에서는 6시간에 10MPa를 만족할 수 있는 HAP의 적정 혼입율 1.6%를 중심으로 ±0.4%의 차이에 따른 압축강도 발현여부와 작업성 검토를 실시하였고, 대기양생에 따른 수축 및 균열성능 평가를 실시하였다. 또한, HAP의 혼입율에 따른 동결융해 및 탄산화 침투 저항성에 대한 내구성 검토를 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

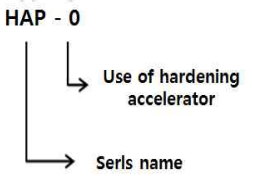
본 실험에 사용된 배합사항은 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 재령 6시간 내 10MPa를 만족시킬 수 있다고 판단한 물/시멘트 비(Water/Cement ratio, 이하 'W/C'라 칭함) 30.0%의 조건에 시멘트를 500kg/m^3 고정하여 사용하였다. 또한, HAP는 조강시멘트 대비 0%, 1.2%, 1.6%, 2.0%의 4 수준으로 설정하여 재령 6시간의 압축강도 결과를 중심으로 수축 및 내구특성을 HAP 혼입율에 따라 성능 비교를 하고자 하였다.

한편, 그에 따른 실험으로 굳지않은 콘크리트에서는 작업성 검토를 위한 슬럼프 및 공기량 시험을 실시하였고, 경화콘크리트에서는 압축강도를 중심으로 자기수축 및 건조수축 길이변화 시험, 소성수축균열시험, 탄산화 침투시험, 동결융해 시험을 실시하였다.

Table 1. Mix proportion of concrete

Division	W/c (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m^3) W	C	S	G	Ad (C*%)	Hap (C*%)
HAP-0	30.0	45.0	150	500	782	964	0.9	0
HAP-1.2								1.2
HAP-1.6								1.6
HAP-2.0								2.0

여기서,



W : Water
C : Cement
S : Sand
G : Gravel
Ad : High efficient AE water-reducing admixture
Hap : Hardening accelerator

2.2 사용재료

Table 2~5는 본 실험에서 사용된 재료들의 특성을 나타낸 것으로써, 사용된 시멘트는 C_3S가 다량으로 함유된 D사의 시멘트를 사용하였다. 또한, 잔골재와 굵은 골재는 KS F 2526 및 KS F 2527에 준한 골재를 사용하였으며, 화학 혼화제는 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

한편, 본 연구의 핵심 재료인 HAP는 주성분이 칼슘 포메이트로 이루어져 있으며, 목표로 설정한 6시간 내 10MPa를 만족하는데 있어 기존 실험[4,6]을 통해 우수한 성능이 검증된 흰색 분말형 재료를 사용하였다.

Table 2. Characteristics of cement

Type	Density (g/cm^3)	Blain (cm^2/g)	Compound composition(%) C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
High early strength cement	3.15	4 820	58.17	14.71	6.82	10.29

Table 3. Characteristics of sand and gravel

Division	Type	Density (g/cm^3)	Fineness modulus	Water absorption ratio (%)
Sand	Washed sand	2.60	2.86	1.02
Gravel	Crushed gravel	2.63	6.55	0.58

Table 4. Characteristics of admixture

Division	Density (g/cm^3)	Main component	Type	Color
Hight performance water reducing agent	1.05	Poly carboxylate	Liquid	Dark brown

Table 5. Characteristics of hardening accelerator

Division	Density (g/cm^2)	Main component	Form	Color
Hardening accelerator	2.15	Calcium formate	Powder	White

2.3 실험방법

Table 6은 본 실험에서 실시한 실험항목 및 수준을 나타낸 것으로써, 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 시험과 공기량 시험은 KS F 2402 및 KS F 2421에 각각 준하여 실시하였다. PC 부재 제작 시 적용되는 작업성을 고려하여 슬럼프는 150±25mm의 범위로 설정하였고, 공기량은 3.0% 이하로 범위를 설정하여 실시하였다.

한편, 압축강도는 온도 20±2℃ 및 습도 60±5%의 환경 조건하에서 양생을 실시한 공시체를 KS F 2405에 준하여 재령 6, 12, 24시간 및 7, 28일의 압축강도를 측정하였다. 건조수축 길이변화 시험과 자기수축 길이변화 시험은 KS F 2424에 준하여 100×100×400mm의 각주 시험체를 제작하였다. 건조수축 길이변화 시험은 상온 20±2℃, 습도 60±5%의 환경 조건 하에 기건 양생을 실시한 후, 부착형 스트레인게이지를 사용하여 91일간 연속 측정하였다. 또한, 자기수축 길이변화 시험은 콘크리트와 외기의 수분이동을 막기 위해 랩핑 후, 매립형 스트레인게이지를 사용하여 5일간 연속 측정하였다. 소성수축균열시험은 균열을 유발시키기 위하여 중심부에 구속을 주어 ASTM C 1581의 기준에 준한 Figure 1의 판상-링형 몰드를 사용하여 40±2℃의 온도조건에서 1~2일 강제양생으로 초기에 발생하는 균열의 최대 폭 및 총 길이를 확인하였다.

동결융해 시험은 KS F 2456의 기중 급속동결 후 수중융해 시험방법에 준하여 실시하였다. 온도의 범위는 공시체 중심온도를 -18~4℃로 하고 1사이클 시간은 4시간으로 하여 50사이클마다 공명진동수를 측정하여 다음 식 (1)에 의하여 상대동탄성 계수를 계산하였다.

탄산화 촉진 시험은 KS F 2584에 의거하여 제작된 시험체를 온도 20±2℃, 습도 60±5%, CO_2 발생량 5.0±0.5%의 환경조건에서 촉진 양생을 진행 후 재령 1, 2, 4, 8, 12주에 각각 측정하여 실험체 15곳의 평균값으로 탄산화 깊이를 측정하였다.

$$P_c = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2}\right) \times 100 \quad \text{---------- (1)}$$

여기서,

P_c : 동결융해 사이클 후의 상대동탄성 계수(%)

n_0 : 초기의 1차공명 진동수(hz)

n_c : 동결융해 후의 1차 공명진동수(hz)

Table 6. Measurement items and levels

Measurement items	Measurement range
Slump	(150±25)mm
Air content	3.0% below
Compressive strength	6, 12, 24, 168, 672 hours
Plastic shrinkage crack test	1~2 day
Autogenous shrinkage	6 day
Drying shrinkage	91 day
Carbonation test	1, 2, 4, 8, 12 week

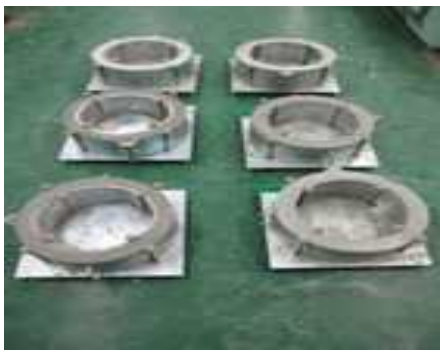


Figure 1. Flat-ring type mold

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트 특성

Figure 2는 굳지않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것이다.

슬럼프 시험결과, 배합과 관계없이 혼화제량 0.80%의 동일량 투입 시, HAP의 혼입율이 증가할수록 슬럼프가 증가하는 경향을 나타내었지만, 그 폭은 크지 않은 것으로 나타났으며, 목표치인 150±25mm 범위를 만족하였다. 또한, 공기량 시험결과, 목표로 한 3.0%이하를 2.0~2.5%의 범위로 모두 만족하였다. 따라서, 슬럼프 및 공기량은 HAP의 혼입에 따라 영향이 크게 없는 것으로 판단된다.

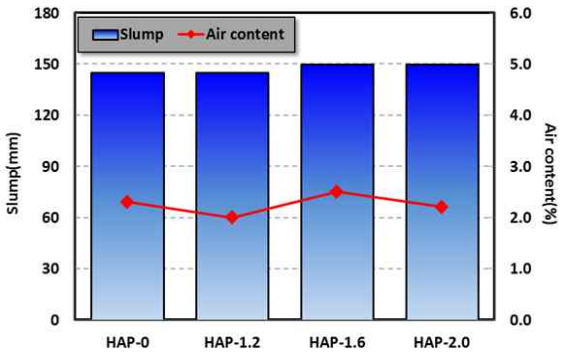


Figure 2. Result of slump and air content test

3.2 콘크리트 압축강도 특성

Figure 3은 재령 28일까지의 압축강도 시험결과를 나타낸 것이다. 목표로 한 6시간 내 10MPa를 만족하는 배합은 HAP-1.6과 HAP-2.0으로 나타났으며, 목표를 만족시키기 위한 HAP의 혼입율은 1.6%이상으로 판단된다. 또한, HAP를 혼입한 배합은 혼입율과 관계없이 HAP-0에 대비하여 재령 12시간까지 150%이상의 높은 강도 발현을 나타내었다. 이는, 시멘트 내 성분 중 초기강도와 밀접한 관계가 있는 C_3S의 수화반응을 HAP가 촉진시킴으로써 나타나는 현상으로 사료된다.

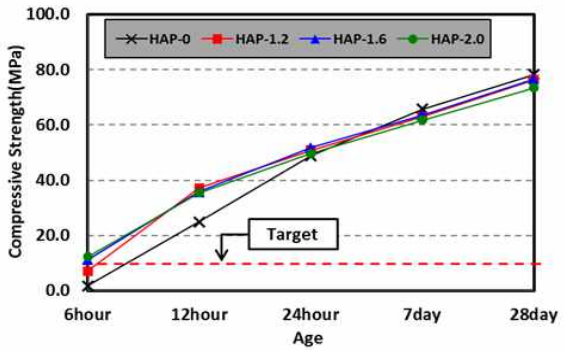


Figure 3. Result of compressive strength test

한편, 재령 24시간 이후부터 모든 배합이 유사해지며, HAP의 혼입율이 증가할수록 HAP-0에 비해 강도는 약간 저하하는 경향을 나타내었다. 이는, 초기 재령에 급격한 수화반응으로 수화생성물의 확산이 되지 않기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

3.3 콘크리트 수축 및 균열 특성

Figure 4는 HAP 혼입율에 따른 자기수축 길이변화 를 5일 동안 연속 측정한 결과를 나타낸 것으로써, HAP의 혼입량이 증가함에 따라 초기에 수축량이 높아지는 경향을 나타내었다. 이는, HAP 혼입율과 관계없이 HAP-0보다 수축량이 크게 나타난 것은 HAP의 혼입으로 초기의 수화작용 속도로 인하여 수축량이 높게 나타나는 것으로 사료된다.

한편, HAP-0의 최대 수축량은, 약 -144×10^{-6}을 나타내었으며, HAP를 혼입함에 있어 최대 수축량의 차이는 -7×10^{-6}~-19×10^{-6}의 범위로 크지 않은 차이를 나타내었다.

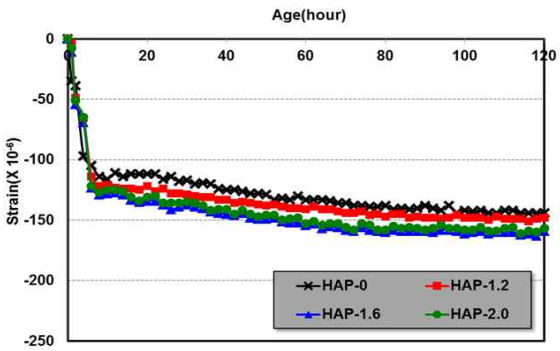


Figure 4. Result of autogenous shrinkage test

Figure 5는 건조수축의 길이변화를 91일간 연속측정한 결과를 나타낸 것으로써, HAP-0의 최대 수축량은 -211×10^{-6}이며, 배합 중 가장 높은 수축량을 나타내었지만, -250×10^{-6} 이하로 나타낸 것을 확인하였다. 이는, 배합 자체의 낮은 W/C로 인하여 증발되는 수분이 매우 적기 때문에 수축응력이 적은 것으로 인하여 나타난 결과로 판단된다[7]. 또한, 수화가 진행됨에 겔 공극량의 생성과 함께 압축강도가 높아질수록 건조수축 변형량이 크게 증가하지 않는 것으로 보고 된 바 있다[8]. 따라서, 재령이 지날수록 높아지는 강도로 인하여 콘크리트의 수축량이 크게 증가하지 않는 것으로 사료된다.

한편, HAP의 혼입율과 관계없이 최대 수축량이 -10×10^{-6}~-18×10^{-6}의 아주 적은 차이로 HAP는 수축에 큰 영향성이 없는 것으로 보인다. 또한, JASS 5에서 규정한 내구성 확보를 위한 수축저감 목표치 -800×10^{-6} 이하를 나타내었기 때문에 HAP의 혼입에도 수축균열로 인한 문제는 없을 것으로 판단된다[5].

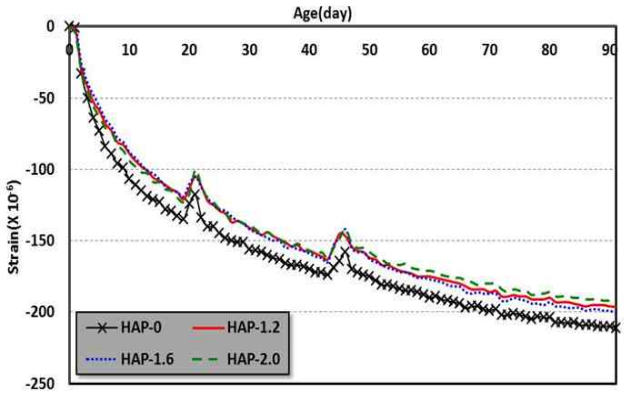


Figure 5. Result of drying shrinkage test

Figure 6과 Figure 7은 소성수축 균열시험과 균열 성상의 형태를 각각 나타낸 것으로써, 모든 배합의 균열은 대부분 중심 구속지점 주변으로 나타났으며, 최대 균열 폭은 약 0.08mm로 동일하게 나타났다. 또한, HAP 혼입과 관계없이 초기균열의 총 길이는 22~45mm 범위로 나타나 모든 배합은 낮은 W/C와 조강시멘트를 사용한 배합조건으로 증발할 수분이 적기 때문에 일반 배합에 비하여 적은 균열을 나타낸 것으로 사료된다.

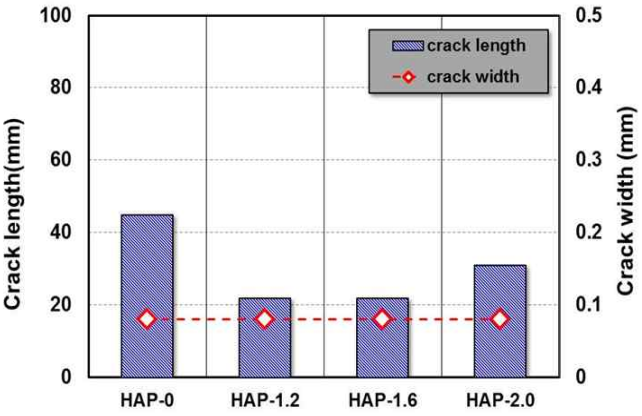


Figure 6. Result of plastic shrinkage crack test

한편, HAP-1.2와 HAP-1.6 은 22mm로 가장 낮은 균열의 총 길이를 나타내었으며, HAP-0에 비하여 약 50%이상 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는, HAP를 혼입하여 양생 초기 빠른 수화작용으로 인하여 PC 부재 생산 시, 습윤 또는 증기양생을 실시하지 않고도 표면 및 내구성에 문제가 될 만한 초기 균열은 크게 나타나지 않을 것으로 판단된다.

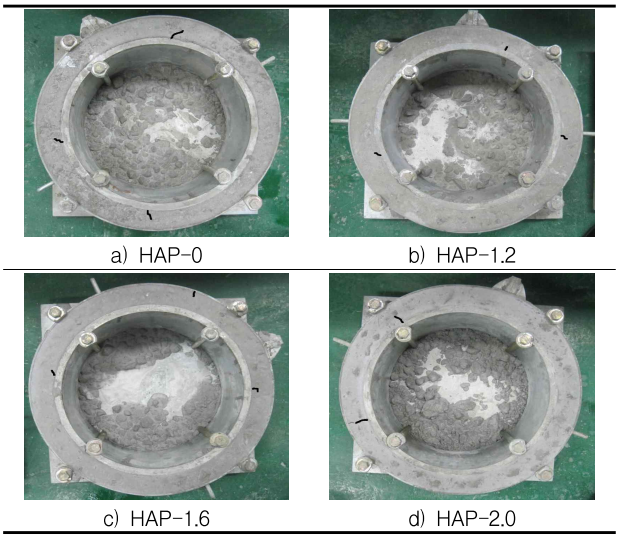


Figure 7. Plastic shrinkage crack behavior

3.4 콘크리트 내구특성

Figure 8은 HAP 혼입율에 따른 콘크리트의 상대 동탄성계수를 나타낸 것이다. 시험결과, 동결융해 300싸이클 종료시점에서 HAP의 혼입율과 관계없이 모든 배합의 상대동탄성 계수는 80%이상으로 나타나 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이는, 일본 JASS 5에서 규정하는 고내구성 품질목표인 동결융해 300싸이클 종료 시, 내구성 지수 80%를 상회하여 만족하고 있는 것으로 높은 시멘트 사용량과 낮은 W/C로 인하여 콘크리트의 강도가 높기 때문에 동결 시, 팽창압과 융해 시, 응축력에 대한 저항력이 상대적으로 증가하여 동결융해 저항성이 높은 것으로 판단된다.

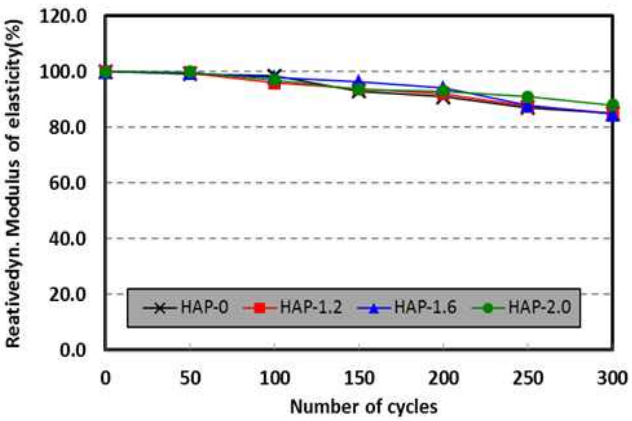


Figure 8. Result of freezing-thawing test

Figure 9와 Figure 10은 재령별 HAP의 혼입율에 따른 탄산화 침투 시험결과를 나타낸 것으로써, 모든 시험체는 재령 4주부터 탄산화 침투가 시작되어 12주까지 0.04~0.11mm로 탄산화 침투가 나타났지만, HAP의 혼입율과 관계없이 모든 배합의 탄산화 침투는 매우 적은 범위를 나타내었다. 이는, 높은 시멘트의 사용과 낮은 W/C로 콘크리트의 내부의 조직이 치밀하여 탄산가스가 침투할 공간이 없기 때문에 중성화에 대한 영향은 매우 낮을 것으로 사료된다.

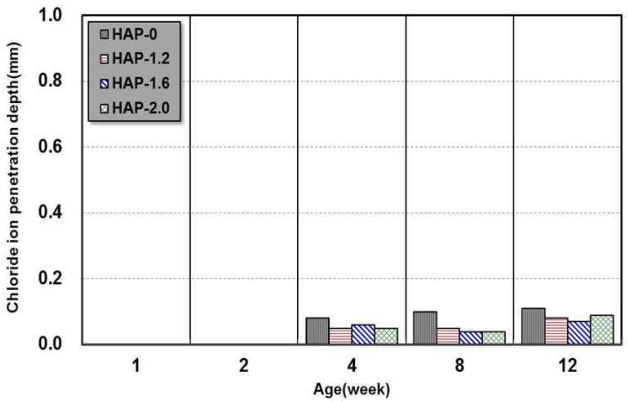


Figure 9. Result of carbonation penetration test

4. 결 론

본 연구는 경화촉진제를 혼입하여 증기양생이 필요없는 PC부재용 조강콘크리트 개발의 일환으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 굳지않은 콘크리트의 슬럼프시험 및 공기량 시험은 HAP의 혼입율과 관계없이 각 시험의 목표범위를 큰 차이 없이 만족하여 HAP의 혼입율에 따른 큰 영향성은 보이지 않는다.
2) HAP의 혼입으로 재령 12시간까지는 높은 압축강도 발현을 나타내었으나, 재령 24시간 이후로는 HAP의 영향성이 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한, 상온양생으로 재령 6시간에 10MPa를 만족하는 HAP의 혼입율은 1.6%이상에서만 나타났기 때문에 경제성을 고려하여 적정 혼입율은 1.6%인 것으로 판단된다.
3) 수축 및 균열평가를 위한 자기수축 길이변화 시험에서는 HAP의 혼입율이 증가할수록 수화작용 속도에 의한 수축량이 증가하는 경향을 나타내었으며, 건조수축 길이변화 시험에서는 HAP를 혼입율과 상관없이 모든 배합의 차이는 크게 나타나지 않았으며, 내구성 확보를 위한 수축균열 저감 목표치를 만족하였

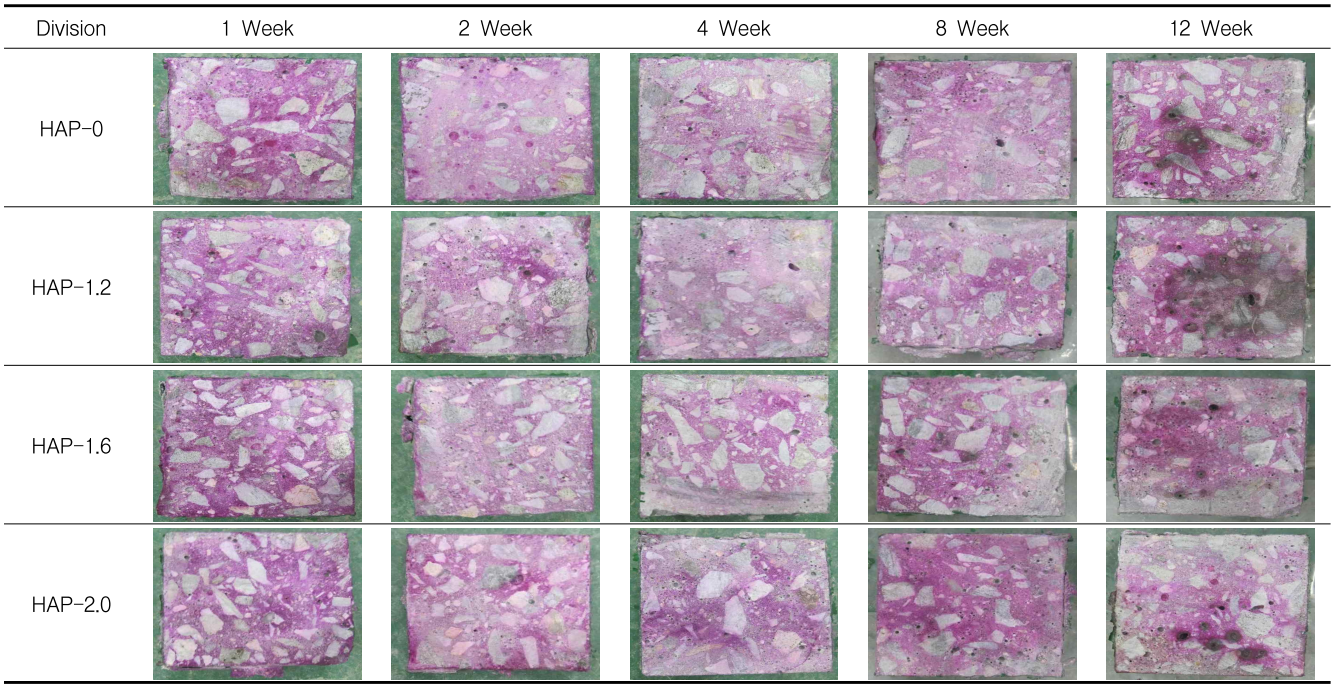


Figure 10. Carbonation penetration behavior

기 때문에 수축 균열에 따른 문제는 발생하지 않을 것으로 판단하며, 대기양생만으로도 초기에 발생되는 균열은 적을 것으로 사료된다.

4) 내구성 실험으로 실시한 동결융해 시험 결과, 내구성 지수 80%를 상회함에 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 탄산화 시험결과에서는 모든 배합이 4 주후부터 침투가 되는 것으로 나타났지만, 그 성상은 콘크리트의 표면 정도만이 침투된 것으로 볼 수 있기 때문에 탄산화 침투 저항성도 우수한 것으로 나타났다. 이는, 시멘트 사용량이 높고, 낮은 W/C로 인하여 내부 조직이 치밀하여 나타난 결과라 판단된다.

본 연구를 통하여 경화촉진제를 혼입한 조강형 콘크리트의 개발로 스팀양생 공정을 제외한 PC 부재를 생산으로 경제성 및 환경적 문제를 해결하는데 기여할 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 재령 6시간에 압축강도 10MPa 이상을 만족하는 조강형 콘크리트를 개발함에 스팀양생 공정을 생략한 PC(Precast Concrete)부재를 생산하고자 하였으며, 거푸집의 회전율을 높임에 경제성을 확보하는데 목적이 있다. 이에, C_3S의 함유량이 높은 조강시멘트와 C_3S의 수화작용을 촉진시키는 분말형 경화촉진제를 사용하였으며, 경화촉진제 혼입율 0%, 1.2%, 1.6%, 2.0%에 따른 콘크리트의 특성을 평가하였다. 경화촉진제 혼입율에 따라 슬럼프 및 공기량 시험에는 큰 차이를 나타내지 않았으며, 1.6%이상을 혼입하였을 때, 재령 6시간에 10MPa를 만족하였다. 자기(건조)수축 길이변화 시험 및 소성수축 시험 결과, 경화촉진제의 혼입으로 수화반응 속도에 따른 차이는 있지만, 균열 및 내구성에 대한 문제가 발생되지 않을 것으로 나타났으며, 동결융해 및 탄산화 침투에 대한 저항성도 우수한 것으로 나타났다.

키워드 : 증기양생, 프리캐스트 콘크리트, 경화촉진제, 조강 시멘트

Acknowledgement

This study is part of the output of the research funding for Advanced-City Development project 2012 of the Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs(Project No. 12, Advanced-City C19)

References

1. Vacharapoom B, Nashwan D. Intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products. Automation in Construction. 2006 Nov;15(6) :737-45
2. Paolo M, Maria G M. An innovative passive control technique for industrial precast frames. Engineering Structures. 2010 Apr;32(4):1123-32
3. Won IW, Na YG, Kim TJ, Kim SK. Energy-efficient algorithms of the steam curing for the in situ production of precast concrete members. Energy and Buildings. 2013 Sep;64:275-84.
4. Jun WC, Lee JH, Park HG, Lee JS, Kim KM, Cho IS. A Study on the Development of Non-PC High-Early -Strength Concrete Without Steam Curing. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2014 Apr;04(2):156-62.
5. Jun WC, Lee JH, Seo I, Lee JW, Lee JS, Cho IS. Properties of the Early Strength of the Concrete According to the Usage of Hardening Accelerator. Proceeding of the Korea Institute of Building Construction 2012 autumn Conference; 2012 Nov 16; Ansan, Korea. Seoul(Korea): Korea Institute of Building Construction; 2012. p. 221-2.
6. Min TB, Cho IS, Lee HS. Fundamental Study on the Strength Development of Cement Paste using Hardening Accelerator and High-Early-Strength Cement. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2013 Jun;13(4):407-15
7. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, Park DC. An Experimental Study on the Carbonation and Drying Shrinkage of Concrete Using High Volumes of Ground Granulated Blast-furnace Slag. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2012 Dec;12(4):393-400.
8. Nagashio Y, Masuda Y. Influence of ground granulated blast-furnace slag on drying shrinkage and carbonation of concrete with ecocement. Journal of Architectural Institute of Japan. 2010 Apr;75(650):675-80.
9. Korea concrete institute. Concrete Standard Specification Explanation. 3th ed. Korea: Kimoondang; 2009. Chapter 25, factory products; p. 553-70.