

경화촉진제를 사용한 프리캐스트 콘크리트의 단열온도특성 및 FEM해석에 의한 균열성능 평가에 관한 연구

Effect of Hardening Accelerators on the Adiabatic Temperature property Properties of Precast Concrete and FEM analysis for Evaluating the Crack Performance

민 태 범¹

조 인 성²

문 영 범³

이 한 승^{1*}

Min, Tae-Beom¹

Cho, In-Sung²

Mun, Young-Bum³

Lee, Han-Seung^{1*}

*Department of Architectural Engineering, Han Yang University, Sangnok-Gu, Ansan, 426-791, Korea ¹
Research Institute, Chemicon, Jukhyeon-ri, GwanghyeWon-myeon, Jincheon-gun, Chungbuk, 365-834, Korea ²
R & D Center, Sungshin Cement, Bugang-Myun, Sejong Special Self-Governing City, Republic of Korea³*

Abstract

In this study, initial crack index was evaluated by FEM analysis to find the crack propagation from hydration heat in precast concrete. As results, as the usage of hardening accelerator increased, initial compressive strength increased and setting time was shortened. Additionally, as amounts of hardening accelerators increased, the central temperature of concrete increased and the time to reach the highest temperature was shortened. It was demonstrated that the hardening accelerators accelerated the hydration reaction of cement, and caused the increase of hydration heat within the short period of time. Furthermore, the crack index for evaluating the heat level was performed by FEM. As results, there was no problem about the cracks, despite of the growth of initial high hydration heat. This is because of the increased tensile strength that is large enough to sustain the thermally induced-stress.

Keywords : super-high-early-strength concrete, hardening accelerator, non steam curing pre-cast concrete, crack index, adiabatic temperature rise test

1. 서 론

프리캐스트 콘크리트(PC) 공법은 공장에서 제작된 콘크리트 부재를 건축 및 토목현장으로 운반하여 조립하는 것으로, 공정관리가 용이하고 시공성이 우수하여 아파트 지하 공간, 경기장 등을 중심으로 건설현장에서 널리 적용되고 있다. 현재, PC 공법에 관한 연구는 주로 구조체 접합부의 구조성능 향상, 프리스트레스 도입, Half PC화 등 구조측면 및 시공측면에 관한 연구가 주를 이루고 있다.[1,2,3,4,5,6]

그러나, 상대적으로 프리캐스트 콘크리트 사용재료에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

또한, 프리캐스트 콘크리트 제작에서는 대부분 콘크리트의 조기강도 발현을 위하여 증기양생 방법을 사용하고 있으며, 1일 12시간 정도의 증기양생을 반드시 실시하고 있다. 그러나 현재 국제유가 급등으로 인한 증기양생 비용의 상승과 함께 양생비용이 증가함으로써 프리캐스트 생산업체들은 경제적 어려움을 겪는 실정이다. 따라서 이를 해결하기 위하여 증기양생을 실시하지 않고 상온양생으로 PC거푸집의 조기탈형이 가능한 콘크리트 기술개발 요구가 절실히 요청되고 있다[7].

따라서 프리캐스트 콘크리트 제조 에너지를 줄이고 몰드의 전용횟수를 증가시키기 위하여 조강시멘트, 조강형 혼화제 및 조강형 혼화제의 사용과 함께 증기양생기간을 줄이는 연구가 진행되고 있으나 증기양생을 100% 없애지는 못

Received : November 13, 2014

Revision received : December 9, 2014

Accepted : January 5, 2015

* Corresponding author : Lee, Han Seung

[Tel: 82-31-400-5181, E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr]

©2015 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

하고 근본적으로 스팀양생을 사용하고 있다[8,9].

이러한 문제점을 해결 하고자 본 연구에서는 선행연구를 통하여 증기양생을 실시하지 않고 상온양생으로 6시간에 “주택공사 시방서”에 규정하는 몰드 탈형 강도인 10MPa 이상을 발현하는 프리캐스트 콘크리트 개발을 목적으로 한 시멘트모르타르 연구를 실시하여 그 가능성을 확인하였고 [10] 강도발현 메커니즘에 관한 미세화학적 연구 또한 실시 하였다.[11,12,13] 따라서 본 연구에서는 기존연구를 바탕으로 콘크리트 레벨에서의 프리캐스트 콘크리트 개발을 목적으로 하며 수화열에 의한 균열발생을 확인하기 위해 FEM해석을 실시하여 초기균열 지수를 평가하는데 목적이 있다.

2. 실험개요 및 방법

2.1 실험개요

본 연구는 증기양생 없이 상온양생(20±2℃)에서 재령 6시간이내 프리캐스트 콘크리트 거푸집 탈형강도인 10MPa 이상의 강도를 발현하는 프리캐스트 콘크리트개발을 위한 실험으로서, 경화촉진제 사용량에 따라 강도 발현 특성 및 수화열 평가를 통하여 초기균열에 대한 FEM 해석을 실시하였다. 콘크리트 배합은 Table 1과 같으며 경화촉진제 사용량에 따른 콘크리트 특성을 평가하기 위하여 사전 연구[13]를 통하여 W/C는 30%로 설정하였다.

Table 1. Mixing design of concrete

| Specimen | W/C (%) | Unit weight(kg/m ³) | | | | AD (C×%) | HA (C×%) |
|----------|---------|---------------------------------|-----|-----|-----|----------|----------|
| | | W | C | S | G | | |
| HA-0 | | | | | | 0 | |
| HA-1.2 | 30 | 150 | 500 | 782 | 964 | 1.0 | 1.2 |
| HA-1.6 | | | | | | | 1.6 |
| HA-2.0 | | | | | | | 2.0 |

또한 조강시멘트 사용량은 시멘트량 대비 0%, 1.2%, 1.6%, 2.0%의 4가지 수준으로 설정 하였다. 실험 항목은 굳지않은 콘크리트에서는 슬럼프 플로우 실험과 공기량 실험을 실시하였으며 촉진제의 혼입량에 따라 관입저항 시험을 통해 응결시간을 측정 하였다. 또한 단열온도 상승시험을 통하여 촉진제의 사용량에 따른 수화열 측정을 하였으며 단열온도 상승 시험결과와 압축강도 측정 결과 값을 이용하

여 FEM 해석을 실시하여 균열지수 예측하였다. 경화된 콘크리트 실험에서는 압축강도 측정을 재령 6시간, 12시간, 1일, 3일, 7일, 28일 측정 하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트 및 골재, 고성능 감수제

본 실험에서 사용된 시멘트는 C₃S 함유량이 높은 국내A사의 조강시멘트를 사용하였으며 광물조성은 Table 2와 같다. 또한 잔골재와 굵은 골재는 KS F 2526 과 KS F 2547에 준하는 골재를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 3과 같다. 혼화제는 고성능 AE감수제를 사용하였다. 혼화제의 물리적 성질을 Table 4에 나타내었다.

Table 2. Compound composition of cement

| Type | Compound composition (%) | | | |
|----------------------------|--------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
| High-Early-Strength Cement | 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 | 2.50 | 2.86 | 1.02 |
| Gravel | Crushed gravel | 2.63 | 6.55 | 0.58 |

Table 4. Characteristic of high performance water reducing agent

| Division | Density (g/cm ³) | Main component | Type | Color |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------|--------|------------|
| High performance water reducing agent | 1.05 | Poly carboxyate | Liquid | Dark brown |

2.2.2 경화촉진제

시멘트의 강도는 C-S-H와 밀접한 관계가 있다. 이러한 C-S-H는 시멘트의 구성 광물 중 C₃S와의 반응을 통해 유도 되는 것으로 기존 연구자들에 의해 밝혀진바 있다. C₃S는 시멘트 회합물중 가장 많은 비율을 차지하며 물과의 반응을 통해 먼저 CaO 결합이 끊어져 Ca²⁺가 용해되어 과포화 농도에 도달하게 되면 Ca(OH)₂의 결정이 석출된다. 또한 남아있는 SiO₄⁻는 물과 반응하여 [Si(OH)₆]²⁻와 형태의 수소규산이온으로 용해되며 곧바로 축합하여 C₃S 미수화 입자 주변에 gel상을 형성하게 된다. 형성된

gel상은 Ca^{2+} 와 다시 결합하여 C-S-H의 생성과 성장을 유도한다[14]. 따라서 본 연구에서는 Ca^{2+} 가 C-S-H의 생성에 많은 영향을 미치는 점을 이용하여 주성분이 Ca^{2+} 인 칼슘계의 경화촉진제를 사용하였다. 경화촉진제의 주성분인 Ca^{2+} 는 이온 포화도를 빨리 과포화에 도달하게 만들어주는 역할을 하며 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 형성을 촉진 시킨다. 또한 C_3S 입자 주변에 생성된 gel과 결합하여 빠른 시간 내 C-S-H의 생성과 성장을 유도하는 특징이 있다. 경화 촉진제의 특성은 Table 5에 나타내었다. 또한 Figure 1은 경화촉진제에 의한 강도 발현의 메커니즘을 나타낸 그림이다.

Table 5. Characteristic of hardening accelerator

| Division | Main Component | Form | Color | Density (g/cm ³) |
|-----------------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|
| Hardening accelerator | Calcium formate | Powder | White | 2.15 |

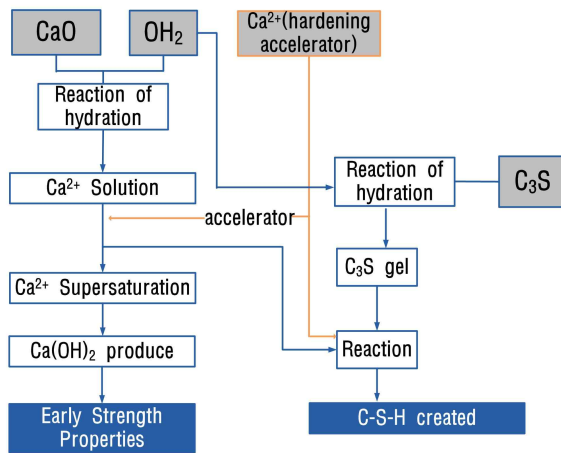


Figure 1. Mechanism of hardening accelerator

2.3 실험방법 및 측정항목

Table 6은 실험항목 및 규격을 나타낸 표이다. 실험방법은 Table 6에 표기된 시험방법에 따라 실시하였으며 단열 온도 상승시험은 일본 ToKyo Rico사의 장비를 이용하여 1분 간격으로 콘크리트 수화열을 측정 하였으며 배합 후 단열온도 상승 값이 일정한 수렴구간에 나타날 때 까지 지속한 후에 시험을 종료 하였다. 단열온도 상승실험 결과는 다음 식(1)에 의거하여 오리지널 프로그램을 이용하여 발열 함수계수(K, α)를 산출하였다. 또한 프리캐스트 콘크리트의 균열지수 FEM 해석은 MIDAS 해석 프로그램을 이용하여 온도이력해석과 열응력 해석을 실시하여 최종 균열지수

해석을 실시하였다.

$$T = K[1 - e^{(-at)}] \text{-----} (1)$$

여기서, T : 시간 t 에서의 단열온도 상승값(°C)

a : 반응속도

K : 최대 상승온도(°C)

t : 재령

균열지수 해석을 실시한 다음 콘크리트표준시방서에 명시된 온도균열제어수준에 따른 온도균열지수와 비교 평가 하였다. Table 6은 콘크리트 표준시방서에 명시된 온도균열 제어수준에 따른 온도균열지수를 나타낸 것이다. Table 7은 실험 항목 및 규격을 나타낸 것이다.

Table 6. Temperature crack index according to temperature crack control level

| Case of crack occurring | f_{cr} |
|-------------------------|----------------------|
| No crack | $1.5 < f_{cr}$ |
| Limited crack | $1.2 < f_{cr} < 1.5$ |
| Limited harmful crack | $0.7 < f_{cr} < 1.2$ |

Table 7. Measurement items

| Division | Experiment factors |
|---|----------------------------------|
| Unconsolidated High-Early-Strength Concrete | Slump Flow(KS F 2595) |
| | Air content(KS F 2421) |
| | Concrete setting time(KS F 2436) |
| Consolidated High-Early-Strength Concrete | Compressive strength(KS F 2405) |
| Microanalysis | Adiabatic temperature rise test |
| | Conduction calorimetry |

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

Table 8은 경화촉진제 첨가량에 따른 Slump Flow 값과 Air content, 응결실험 결과를 나타낸 것이다. 실험 결과 또한 경화촉진제의 사용량이 증가함에 따라 Slump Flow 값은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 경화촉진제의 성분 중 유동성을 증가시키는 Polycarboxyalte 성분이 포함되어 있으므로 유동성이 증가하는 것으로 판단된다. 또한

Air content 시험결과 프리캐스트 콘크리트 생산 시 기준으로 설정하고 있는 3.0% 이하의 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 배합에서의 시멘트사용량이 높고 고강도 · 고유동인 것을 감안하였을 때 일반 고강도 콘크리트와 유사한 공기량을 나타내는 것으로 사료된다. 응결시험 결과 경화촉진제 사용량이 증가할수록 초결 과 종결시간이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 앞선 선행연구[10]와 뒤에 미소수화열 결과를 비교하였을 때 촉진제가 응결에 영향을 미치는 시멘트의 성분 중 C₃A를 촉진시켜 나타나는 현상으로 판단된다.

Table 8. Properties of fresh concrete

| Specimen | Slump Flow (mm) | Air content (%) | Concrete setting time (min) | |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------|
| | | | Inter set | Final set |
| HA-0 | 570 | 1.1 | 330 | 400 |
| HA-1.2 | 600 | 2.5 | 180 | 280 |
| HA-1.6 | 630 | 2.6 | 70 | 160 |
| HA-2.0 | 680 | 2.9 | 60 | 100 |

3.2 경화촉진제 첨가량에 따른 압축강도 발현

Figure 2는 재령별 촉진제 함유량에 따른 압축강도의 실험결과를 나타낸 것이다.

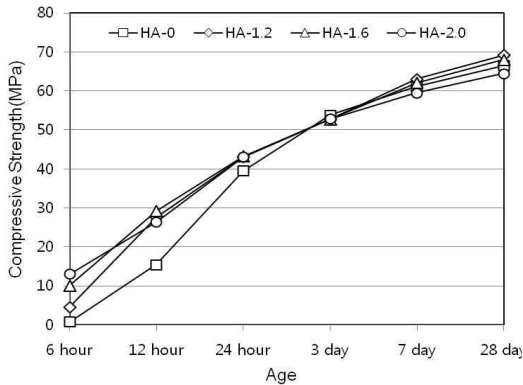


Figure 2. Compressive strength in accordance with age and the content of hardening accelerator

실험결과 촉진제의 사용량이 시멘트 사용량대비 1.6%이상에서는 목표한 재령6시간이내 압축강도 10MPa를 나타내었으나 Plan 실험체인 HA-0의 경우 강도발현이 되지 않았다. 또한 경화촉진제의 사용량이 증가함에 따라 재령 12시간까지의 강도발현 속도의 차이가 있었으며 재령 24

시간 이후부터는 경화촉진제의 사용량에 상관없이 압축강도가 유사한 것으로 나타났다. 이는 경화촉진제가 시멘트의 성분 중 초기강도에 영향을 미치는 C₃A와 C₃S의 수화반응을 촉진시켜 나타나는 현상으로 사료된다. 또한 촉진제가 2%사용된 HA-2.0은 28일 재령에서 Plan 시험체와 비교하였을 때 압축강도가 5MPa 감소하는 현상을 나타내었다. 이는 촉진제로 인해 수화반응이 급격하게 증가하였기 때문이다. 수화반응 속도가 증가할수록 수화생성물의 확산이 불충분하며 시멘트 입자주변에 불투수층 생성과 미세 구조내부의 수화 gel 분포의 불균일에 의해 나타나는 현상으로 판단된다.

3.3 경화촉진제 사용량에 따른 미소수화열 특성

Figure 3는 경화촉진제 사용량에 따라 미소수화열 열량계를 이용한 시멘트 수화열중 제1차 피크를 나타낸 것이다. 수화속도 실험결과 HA-0에 비하여 경화촉진제 사용량이 증가 할수록 수화 발열량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 경화촉진제는 초기에 C₃A도 자극시키는 것으로 사료되며 응결시간을 단축시키는 원인으로 판단된다. Figure 4는 미소수화열 실험결과중 제2차 피크 나타낸 것이다. 실험결과 촉진제를 사용한 실험체에서는 Plan 실험체에 비해 1차 피크가 안정된 후 2차피크의 수화발열의 주 원인이 되는 시멘트 화합물의 C3S가 경화촉진제 의해 수화열이 빨리 증가하는 것으로 보아 3시간이후부터 C₃S수화반응이 시작하는 것을 알 수 있다. 따라서 수화속도 측정 실험을 통하여 본 연구의 핵심인 촉진제의 혼입을 통하여 약 1시간 이후부터 촉진제가 C₃S의 수화를 촉진시켜 초기에 강도발현을 이끌어내는 것으로 판단된다.

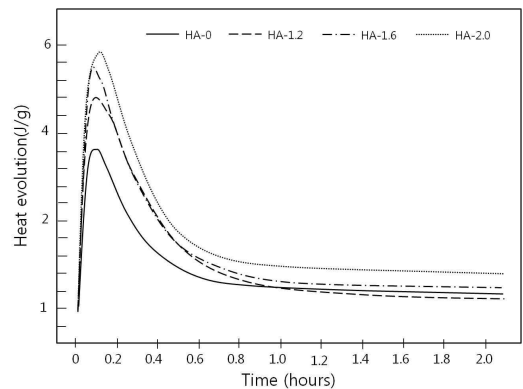


Figure 3. Hydration rate of the first peak point depending on the amount used hardening accelerator

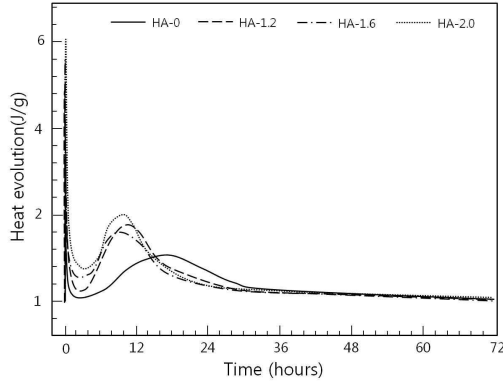


Figure 4. Hydration rate of the second peak point depending on the amount used hardening accelerato

3.4 경화촉진제 사용량에 따른 단열온도 특성

Table 9와 Figure 5는 경화촉진제 사용량에 따른 단열 온도 상승시험 결과를 나타낸 결과이다. 실험결과 경화촉진제 사용량이 증가할수록 초기 수화발열량이 높은 것을 알 수 있었다. 이는 경화촉진제가 수화열에 영향을 미치는 C₃S를 촉진시켜 나타나는 현상으로 판단된다.

Table 9. The internal highest temperature of concrete according to the usage of hardening accelerator

| Specimen | The highest temperature (°C) | Reaching time (hour) | Temperature coefficient (K) | Rate coefficient of reaction (a) |
|----------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| HA-0 | 80.7 | 36 | 56.9 | 3.3 |
| HA-1.2 | 81.7 | 30 | 55.8 | 3.9 |
| HA-1.6 | 82.5 | 25 | 57.9 | 4.3 |
| HA-2.0 | 83.1 | 24 | 58 | 4.3 |

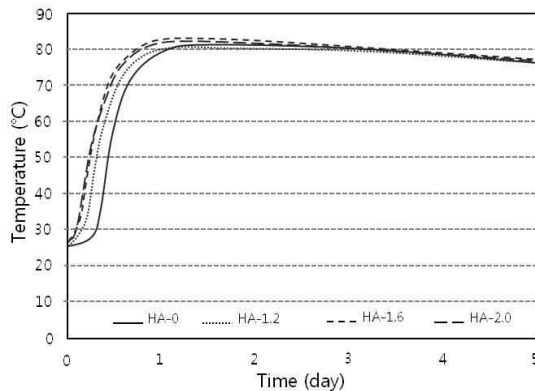


Figure 5. Adiabatic temperature rise test result according to hardening accelerator content amount

또한 콘크리트 내부 최고온도는 각각의 실험체들이 유사한 온도를 나타냈다. 이는 시험에 사용된 시멘트 사용이 같기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 경화촉진제의 사용유무에 따라 최고온도를 발현하는 재령은 다른 것을 알 수 있다. 이는 경화촉진제가 시멘트 수화반응을 단시간에 촉진시키기 때문에 최고온도 발현 재령이 다른 것으로 판단된다.

Figure 6는 단열온도 상승시험결과에서 최고온도계수(K)와 반응속도계수(a)를 나타낸 그림이다. 최고온도계수와 반응속도계수 도출결과 경화촉진제 사용량이 증가할수록 최고온도계수와 반응속도 계수가 증가하는 것으로 나타났다. Plan 실험체와 경화촉진제 사용량이 가장 많이 사용된 HA-2.0의 실험체를 비교하였을 때 최고온도계수(K) 유사하게 나타났다. 이는 시멘트 사용량이 동일하기 때문에 유사하게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 반응속도 계수는 Plan 실험체와 1의 차이를 나타내었다. 이는 경화촉진제가 시멘트 수화반응을 촉진시켜 나타나는 현상으로 사료된다. 따라서 경화촉진제의 사용량이 증가할수록 반응속도가 증가하고 강도발현 발현 속도 또한 증가하는 것으로 판단된다. 또한 경화촉진제의 사용량에 따라 높은 수화열을 나타냄으로서 건조 수축이나 자기수축에 의한 균열이 발생 할 것으로 사료되며 추후 연구에서는 수축실험이 병행되어야 한다.

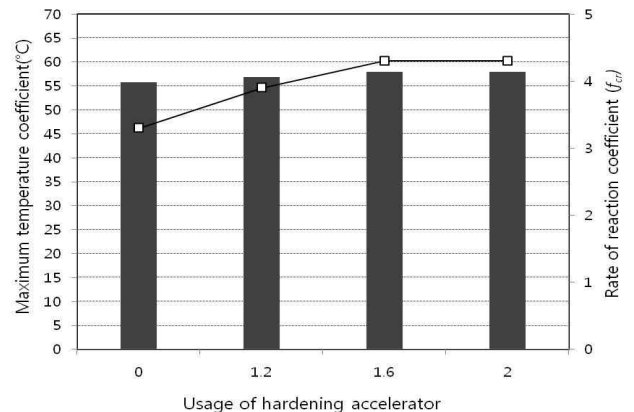


Figure 6. Heat generation function coefficient by adiabatic temperature rise test result

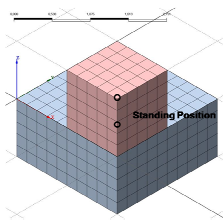
4. 경화촉진제 사용량에 따른 균열지수 FEM 해석

4.1 FEM 해석 개요

Table 10은 FEM해석에서 적용한 모델링 개요를 나타낸다. FEM 해석은 MIDAS 프로그램을 이용하였으며 단열온

도 상승 시험 및 압축강도 시험 결과를 바탕으로 2m×2m×1m의 메스콘크리트 부재로 설정하여 해석을 실시하였다. 또한 해석 부재의 중심부와 표층부의 온도이력과 응력분포 해석위치는 Table 10에 나타내었으며 해석 시간은 7일로 하였다. Table 11은 해석시 입력 데이터 값을 나타내며 경화촉진제 사용량에 따른 콘크리트 타설 온도, 28일 압축강도, 발열함수계수(K,a)를 적용하였다. 또한 FEM 해석의 수행과정은 Figure 7과 같이 수행하였다.

Table 10. Summary of FEM analysis modeling

| Modeling | Detailed items |
|---|--|
|  | 4/1 Modeling |
| | Width : 100cm Height length : 100cm Length : 100cm |

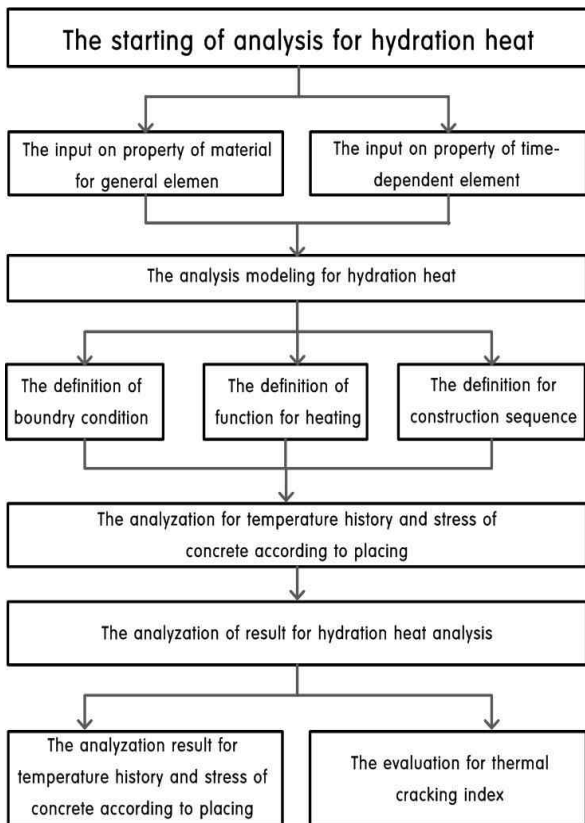


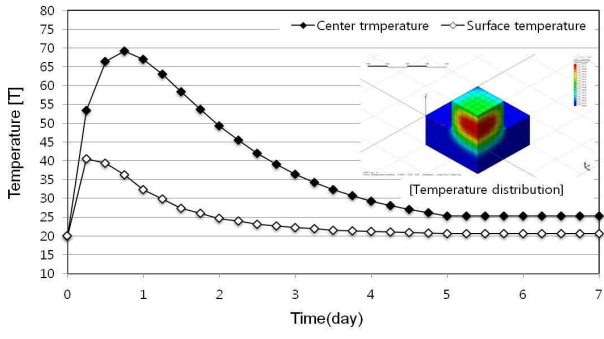
Figure 7. The flow chart for analysis process of FEM

Table 11. Input data of FEM analysis

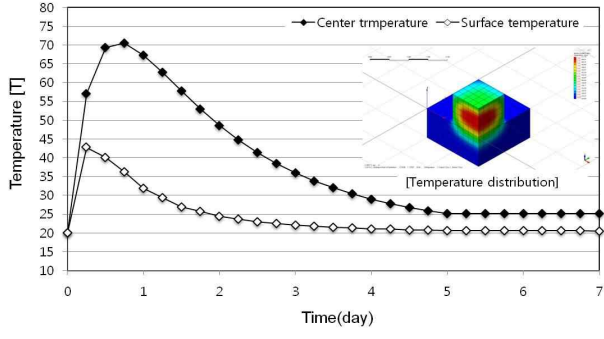
| Division | Construction | Ground |
|--|--|----------------------|
| Specific heat (kcal/kg·°C) | 0.25 | 0.2 |
| Weight(N/m ³) | 23540 | 17000 |
| Thermal conductivity (kcal/m·hr·°C) | 2.3 | 1.7 |
| Convection current (kcal/m ² ·h·°C) | Exposed surface | 8 |
| | form | 8 |
| Outdoor temperature (°C) | 20 | - |
| Placing temperature (°C) | 20 | - |
| Maximum temperature coefficient (K) | HA-0 | 56.9 |
| | HA-1.2 | 55.8 |
| | HA-1.6 | 57.9 |
| | HA-2.0 | 58 |
| Reaction rate (a) | HA-0 | 3.3 |
| | HA-1.2 | 3.9 |
| | HA-1.6 | 4.3 |
| | HA-2.0 | 4.3 |
| 28-Days compressive strength (MPa) | HA-1.2 | 69.3 |
| | HA-1.6 | 68.1 |
| | HA-2.0 | 64.5 |
| revelation calculation of compressive strength | Age compressive strength by apply experimental | |
| Compressie strength in 91days (N/mm ²) | 3.4782×10 ⁴ | 1.0×10 ³ |
| Coefficient of Thermal Expansion | 1.0×10 ⁻⁵ | 1.0×10 ⁻⁵ |
| Poisson's ratio | 0.167 | 0.2 |

4.2 FEM 해석 결과

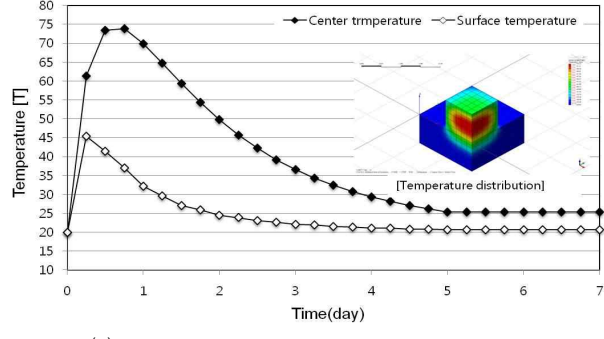
Figure 8은 FEM해석에 의한 온도 이력을 나타낸 그림이며 경화촉진제가 사용되지 않은 HA-0(a)의 경우 중심부의 피크 온도는 타설 후 18시간에서 69°C의 온도를 나타내었으며 이때 표층부의 온도는 36°C 로서 중심부와 표층부의 온도 차이는 33°C로 나타났다. 또한 경화촉진제가 1.2% 사용된 HA-1.2(b)의 경우 타설 후 18시간에서 중심부 온도와 표층부온도가 HA-0과 1°C가량 차이가 있었으며 뚜렷한 차이점을 나타내지 못하였다. 이는 촉진제 사용량이 소량이기 때문에 시멘트의 수화반응을 충분히 촉진시키지 못하여 나타나는 현상으로 판단된다. HA-1.6(c)과 HA-2.0(d) 은 콘크리트 타설 후 재령 12시간에서 최고온도를 나타내었으며 중심부의 최고 온도 또한 1°C의 차이로 나타났으며 촉진제가 사용되지 않은 Plan 실험체(HA-0)와 1°C차이 밖에 나타나지 않았다. 하지만 중심부의 최고 온도 발현시간은 6시간 단축되는 것으로 나타났다. 따라서 FEM해석에 의한 온도 이력분석결과 촉진제의 사용량이 증가할수록 중심부의 최고온도가 유사하게 나타났다.



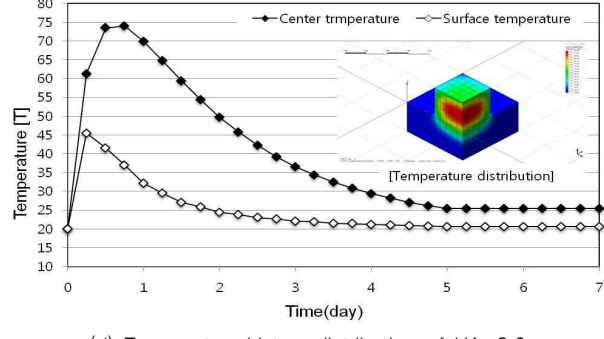
(a) Temperature history distribution of HA-0



(b) Temperature history distribution of HA-1.2



(c) Temperature history distribution of HA-1.6

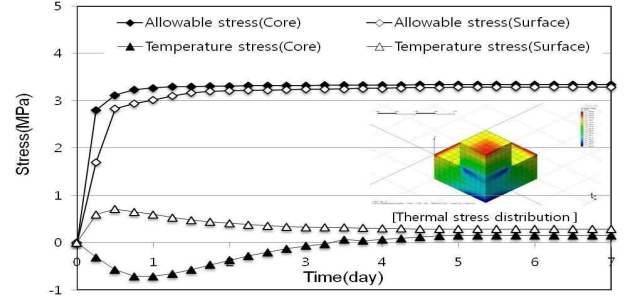


(d) Temperature history distribution of HA-2.0

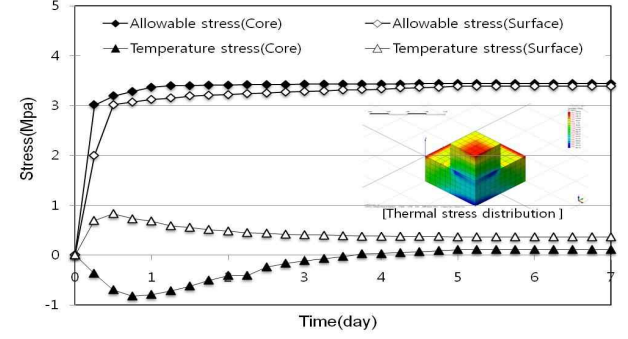
Figure 8. Temperature history result by FEM analysis

Figure 9는 FEM해석에 의한 열응력 해석결과를 나타낸 그림이다. 열응력에 의한 균열은 온도 응력이 허용응력과 비슷하거나 높을 때 발생한다. 하지만 본 연구의 열응력

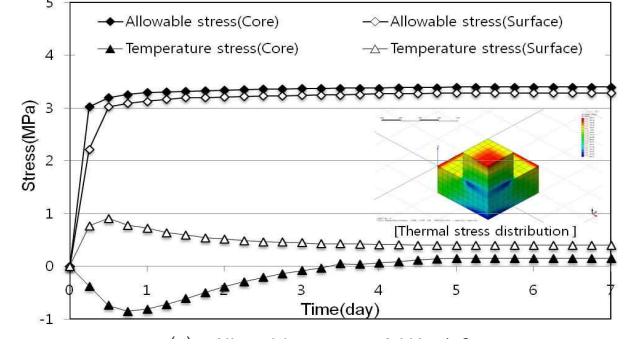
해석결과 모든 시험체 에서 온도 응력이 허용응력 범위 이 내로 나타는 것으로 보아 열응력에 의해서는 균열이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 경화촉진제에 의하여 재령 초기에 조기강도가 발현이 됨으로 허용응력이 상승함으로 나타나는 현상으로 판단된다.



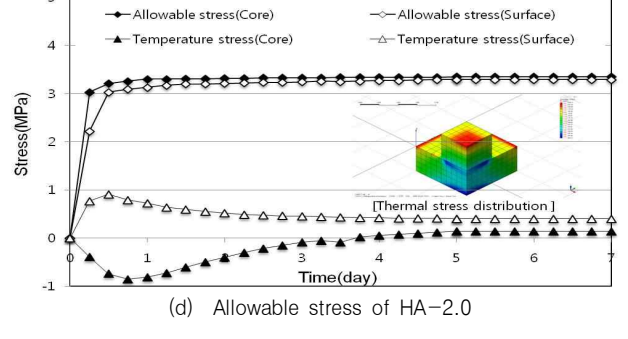
(a) Allowable stress of HA-0



(b) Allowable stress of HA-1.2



(c) Allowable stress of HA-1.6



(d) Allowable stress of HA-2.0

Figure 9. Temperature history result by FEM analysis

Figure 10은는 표면에 발생하는 시간에 따른 온도균열 지수를 나타낸 것이다. 온도균열지수 평가 결과 촉진제가 사용되지 않은 HA-0 경우 온도균열지수가 1.0으로 나타났다. 이를 Table6에 나타나있는 온도균열제어 수준에 따라 평가하였을 때 0.7이상으로 나타났기 때문에 균열발생은 위험하지 않은 것으로 나타났다. 또한 경화촉진제의 사용량이 증가 할수록 균열지수는 HA-0보다 0.8~1.2 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 Figure 8에서 나타나듯이 재령초기에 압축강도가 증가하여 허용응력이 상승하였기 때문인 것으로 판단된다.

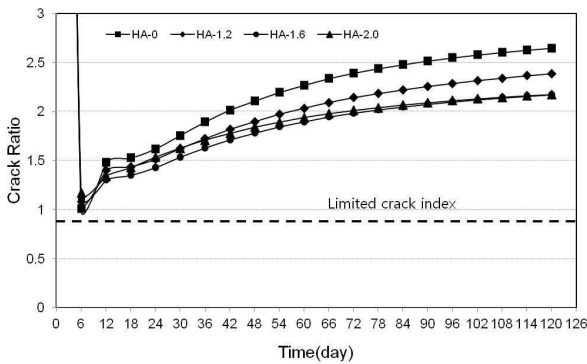


Figure 10. According to time of temperature crack Index

Table 11. Temperature history analysis result through FEM analysis

| Specimen | The reaching time for core's highest temperature (hour) | The temperature of core (°C) | The temperature of surface (°C) | Temperature difference (°C) | Crack index |
|----------|---|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------|
| HA-0 | 30 | 69.8 | 32.2 | 36.4 | 1.0 |
| HA-1.2 | 18 | 70.5 | 36.2 | 34.3 | 1.08 |
| HA-1.6 | 12 | 73.4 | 37.3 | 36.1 | 1.11 |
| HA-2.0 | 12 | 73.8 | 37.4 | 36.4 | 1.12 |

따라서 온도에 의한 균열지수를 평가한 결과 균열지수의 범위는 1.0~1.12의 범위로 유해한 균열발생이 없을 것으로 예측된다.

FEM해석을 통하여 온도이력 분포와 열응력에서, 균열열수해석을 실시한 결과 경화촉진제의 사용량이 증가 할수록 중심부 온도와 표면 부 온도가 상승하나 최고온도는 유사하게 나타났으나 최고온도 발현시점이 단축되는 것을 알 수 있었다. 또한 열응력 해석결과 허용응력이 온도 응력보다 높기 때문에 균열지수가 높은 것으로 사료되어 수화열에

의한 균열발생은 없을 것으로 판단된다. 이는 경화촉진제가 수화반응을 촉진시켜 콘크리트가 초기에 높은 강도를 발현하여 초기에 발생하는 균열을 저감시킨 것으로 판단된다.

5. 결 론

경화촉진제와 조강시멘트를 사용하여 증기양생이 없는 프리캐스트 콘크리트에 대하여 성능평가 및 수화열에 의한 균열지수를 FEM 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 경화촉진제의 사용량이 증가 할수록 유동성은 증가하는 것으로 나타났으며 이는 경화촉진제의 성분 중 유동성을 증가시키는 Polycarboxylate성분이 포함되어 있음으로 유동성이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 공기량은 일반 고강도 콘크리트와 유사한 범위를 나타내었다.
- 2) 응결실험 결과, 경화촉진제의 사용량이 증가 할수록 응결시간은 단축되는 것으로 판단되며 기존 프리캐스트 콘크리트의 콘크리트는 타설 시간이 60분 이내 이루어짐으로 증기양생이 없는 프리캐스트 콘크리트 개발시 경화촉진제의 사용량은 시멘트량 대비 2%이하로 사용해야 할 것으로 판단된다.
- 3) 압축강도 측정결과 경화촉진제의 사용량이 증가할수록 조기압축강도는 증가하였으며 장기 압축강도에서는 감소하는 것으로 나타났다. 수화반응 속도가 증가 할수록 수화생성물의 확산이 불충분하며 시멘트 입자 주변에 불투수층 생성과 미세 구조내부의 수화 gel 분포의 불균일에 의해 나타나는 현상으로 판단된다.
- 4) 미소수화열량계를 통한 시멘트의 수화속도와 총 수화열 측정 결과 약 1시간 이후부터 촉진제가 C₃S의 수화속도를 앞당겨 초기에 강도를 발현시키는데 효과적인 것을 확인 할 수 있었다.
- 5) 단열온도 상승시험결과 경화촉진제 사용량이 증가할수록 초기 수화발열량이 높은 것을 알 수 있었다. 또한 경화촉진제가 시멘트 수화반응을 단시간에 촉진시키기 때문에 최고온도 발현 재령이 다른 것으로 나타났다.
- 6) FEM 해석을 통하여 균열지수 평가를 한 결과 초기에 수화열이 증가해도 균열에는 영향이 없는 것으로 예측된다. 이는 초기에 압축강도 발현속도가 증가하여 허

용응력이 온도응력보다 높기 때문인 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 콘크리트 레벨에서의 프리캐스트 콘크리트 개발을 목적으로 하며 수화열에 의한 균열발생을 확인하기 위해 FEM 해석을 실시하여 초기균열 지수를 평가하였다. 평가결과 경화촉진제 사용량이 증가할수록 초기 압축강도가 증가하는 것으로 나타났으며 응결 시간 또한 단축되는 것을 알 수 있었다. 이는 경화촉진제에 의하여 시멘트 화합물중 C₃A의 반응에 의해서 응결시간이 단축되는 것으로 판단된다. 또한 단열온도 상승 시험 결과 경화촉진제의 사용량이 증가 할수록 콘크리트 중심부 온도 80℃이상의 온도를 나타냈으며 경화촉진제에 의해서 최고 온도 발열 시간을 단축시키는 것으로 나타났다. 이는 경화촉진제가 시멘트 수화반응을 촉진시켜 수화열을 짧은 시간에 높게 나타나는 현상으로 판단된다. 또한 높은 수화열은 균열을 발생시킬 수 있으므로 FEM 해석을 통하여 균열지수 평가를 실시하였다. FEM 해석 결과 초기에 높은 수화열이 증가하여도 균열에는 영향이 없는 예측된다. 이는 초기강도가 높기 때문에 허용응력이 증가로 인하여 인장강도가 증가하기 때문이다.

키워드 : 초조강 콘크리트, 경화촉진제, 무증기 양생 프리캐스트 콘크리트, 균열지수, 단열온도 상승시험

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. Jose V, Marti, Fernando G, Victor Y, Julian A, Design of pre-stressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures*. 2013March;48:342-52
2. Yavuz Y, A,M,T. Waleed, Mohd, Saleh J, Saleh L, AAC-concrete

- light weight precast composite floor slab. *Construction and Building Materials*. 2013March;40:405-10
3. Vanessa C C, Mounir K E D, Maria C N. Using a modified genetic algorithm to minimize the production costs for slabs of precast prestressed concrete joists. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2007 June;20(4):519-30
4. Song HS, Yu SY. Analysis on the Behaviors of Precast Concrete Beam-Column Connections Subject to Cyclic Loading. *Journal of the Korea Concrete institute*. 2006 August;18(4):497-506
5. Kim LB, Kim OJ, Lee JW, Lee DB. Structural Performance Evaluation of Improved Precast Concrete Stairs. *Architectural Institute of Korea*. 2005 september;21(11):27-34
6. Lee LH, Youn SC. Quality Management on Precast Concrete System. *Journal of the Korea Concrete institute*. 1994october;6(5):23-8
7. C. Tashiro, H. Tanaka. The effect of the lowering of initial curing temperature on the strength of steam cured mortar. *Cement and Concrete Research*. 1977 September;7(5):545-51.
8. Vacharapoom B, Nashwan D. Intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products. *Automation in Construction*. 2006 November;15(6):737-45
9. Paolo M, Maria G M. An innovative passive control technique for industrial precast frames. *Engineering Structures*. 2010April;32(4):1123-32
10. Min TB, Cho IS, Lee HS. Fundamental Study on the Development of Precast Concrete without Steam Curing. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2012December;28(12):61-8.
11. Min TB, Jo 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 June;13(4):407-15
12. Min TB, Jo IS, Lee HS. Experimental Study on the Early Strength Development Mechanism of Cement paste using Hardening Accelerator and High-Early-Strength Cement. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2014January;18(1):84-92
13. Min TB, Jo IS, Lee HS, Park WJ, Choi HK. Experimental study on the development of compressive strength of early concrete age using calcium-based hardening accelerator and high early strength cement. *Construction and Building Materials*. 2014April;64:208-14
14. About pozzolanic reaction, Ki moon dang. 2008:34-45