

유도가열을 활용한 동절기 콘크리트의 발열양생 효율성 평가

Heat Curing Performance of Cold-Weather Concrete using Induction Heating Technology

이진복* · 김경택** · 최진수*** · 안치형**** · 신현오*****

Lee, Jinbok*, Kim, Kyeongtaek**, Choi, Jinsoo***, Ahn, Chi-Hyung****, and Shin, Hyun-Oh*****

Abstract

In this study, we evaluated the heat curing performance of cold-weather concrete using the induction heating technology. Specifically, we studied the effects of the size and shape of steel forms as well as different concrete mixtures on the heat curing performance. The test results showed that increasing the cross-section of concrete reduced the homogeneity of temperature distribution throughout it. This problem can be compensated for by adding more conductive materials in the concrete cross-section. The concrete specimens that were cured using induction heating achieved a satisfactory early age strength even though they were stored in a 0 °C low-temperature chamber. Furthermore, we evaluated the electromagnetic compatibility (EMC) of the induction heating process and the magnetic flux density of 13.9 μT thus obtained satisfied the EMC requirement.

Key words : Induction Heating, Heat Curing, Concrete Mixtures, Form Size, Electro Magnetic Compatibility

요 지

본 연구에서는 유도가열 기법을 활용한 동절기 콘크리트의 발열양생 효율성을 평가하였다. 거푸집의 크기 및 형태에 따른 거푸집 콘크리트 발열성능을 검증하였으며, 콘크리트 배합 종류별 발열양생 효율성을 양생 후 압축강도 비교를 통해 평가하였다. 실험결과, 콘크리트 및 거푸집의 단면적이 증가할수록 유도가열에 의한 콘크리트 중심부 및 외부 거푸집의 온도분포 차이가 발생하여 전단면의 고른 양생이 어려움을 확인하였다. 이러한 문제는 단면 내부에 추가로 유도 및 열전달이 가능한 재료를 넣어줌으로 인해 보완이 가능함을 확인하였다. 0 °C의 저온 챔버에서 거푸집 유도에 의해 가열 양생된 콘크리트는 15시간에 충분한 조기강도를 확보하였으며, 물/시멘트 비가 감소할수록 온도증가에 의한 수화 가속효과가 증가하여 강도증진 효과가 향상되었다. 추가적으로, 본 연구에서는 유도가열 시 발생할 수 있는 전자파에 의한 인체 유해성을 평가하였으며, 실험결과 유도가열양생 과정에서 발생한 자속밀도 평균은 13.9 μT로 전자파 적합성기준을 만족하였다.

핵심용어 : 유도가열, 발열양생, 배합종류, 거푸집 크기, 전자파 적합성

1. 서 론

콘크리트는 타설 후 소요의 강도 및 품질을 확보할 때까지 거푸집이 필요하고 콘크리트 주위 온도 및 습도를

적절한 범위로 유지시켜 주는 양생이 필수적이다(Koh et al., 2005). 이러한 양생기간은 콘크리트 구조물을 시공하는 데 있어서 공기를 결정하는 주요 요인으로 작용한다. 특히 동절기에 외기온도 0 °C 이하에서 콘크리트를 타설하는

*정회원, 충남대학교 지역환경토목학과 석사과정(E-mail: jblee1203@o.cnu.ac.kr)

Member, Master's Student, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

**정회원, 충남대학교 지역환경토목학과 석사과정(E-mail: kkt@o.cnu.ac.kr)

Member, Master's Student, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

***학생회원, 충남대학교 지역환경토목학과 학사과정(E-mail: ch.jinsu@o.cnu.ac.kr)

Student Member, Undergraduate Student, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

****한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 조교수(E-mail: chahn@koreatech.ac.kr)

Assistant Professor, School of Electrical, Electronics and Communication Engineering, Korea University of Technology and Education

*****교신저자, 정회원, 충남대학교 지역환경토목학과 조교수(Tel: +82-42-821-5798, Fax: +82-42-821-8877, E-mail: hyunoh.shin@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

경우 타설 초기 배합수의 동결로 인해 동해를 입게 되고 경화지연으로 강도발현이 느리게 되며, 이는 최종적으로 콘크리트의 내구성을 저하하는 요인으로 작용한다(MOLIT, 2016). 따라서, 콘크리트 표준시방서에서는 일 평균기온이 4 °C 이하일 경우 한중콘크리트로 관리하도록 하고 있으며 관리지침으로 타설 즉시 보호조치를 취하고, 굳지않은 표면은 타설 후 최소 24시간 동안 동결되지 않도록 보온해야 한다고 명시하고 있다(MOLIT, 2016). 한편 ACI Committee 306R (1988)에서는 일평균 기온이 5 °C 이하 및 24시간의 절반 이상이 10 °C 이하인 경우가 3일 이상 지속 될 때를 Cold Weather로 정의하고 있다.

콘크리트의 양생기간은 콘크리트의 수화반응 속도에 의해 좌우되며, 이러한 수화반응은 양생온도에 따라 크게 변화하므로 동절기에는 시공 중 온도를 고려하여 인위적으로 양생온도를 높여주는 제어양생 기술이 필요하다(Koh et al., 2005, 2014). 일반적으로 건설현장에서는 공간 가열법(열풍기, 히터, 갈탄 등 활용), 표면 가열법(발열용 시트, 온상선 등 활용), 증기양생 등이 활용이 되고 있으며(KCI, 2015), 특수한 방법으로 강제 거푸집 및 콘크리트 내부 철근에 전열선을 부착하여 온도를 제어하는 방법 및 마이크로웨이브 발열거푸집 방법 등도 개발이 되어 현장적용 사례가 보고되고 있다 (Kang et al., 2009; Koh et al., 2014). 이러한 방법들은 대부분 발열체의 발열에 의해 에너지를 전달하는 방식으로 열손실이 크고 화재에 대한 위험이 존재한다. 또한, 일부 방법의 경우 유해가스 발생에 따른 작업자의 안전문제, 화석연료 사용에 따른 환경오염 문제, 고비용 문제 등의 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 기존 제어양생 기술들의 단점을 보완하기 위한 방안으로 개발된 유도가열(Induction Heating)을 이용한 발열양생 기술의 양생 효율성을 평가하였다. 유도가열 기법은 유도코일에 흐르는 고주파 전류에 의해 발생하는 자속과 시간에 따라 변화하는 자속에 의해 유도되는 와전류(Eddy Current)를 통해 발생하는 줄(Joule)열을 이용하여 피가열체를 직접적으로 가열시키는 방법이다(Lee et al., 2019; Kim et al., 2020). 유도가열 시스템 및 동작 이론상에는 선행연구(Kim et al., 2020)에서 확인이 가능하며, 최근 가정에서의 조리기구 및 반도체, 금속산업에서 활발히 이용이 되고 있는 기술이다. 이러한 유도가열 기반 발열양생의 경우 가열체가 금속재질의 거푸집을 비접촉식으로 가열하는 방법으로 안전성이 높고, 가열체는 발열하지 않은 상태로 거푸집만을 유도하여 발열시키므로 열손실 최소화 및 가열시간을 단축할 수 있는 효과가 있다.

선행연구를 통해, Lee et al. (2019)은 유도가열을 이용한 발열양생에서, 양생 최고온도, 최고온도 유지시간을 변수로 양생 후 콘크리트의 압축강도 특성을 평가하여 최적의 양생 곡선을 제시하였다. 또한, 금속재질 거푸집의 종류 및 두께에 따른 유도가열 성능을 평가하였으며, 강섬유 보강 콘크리트

에 대한 유도가열 양생 실험을 통해 외부 금속재질의 거푸집 뿐만 아니라 내부의 강섬유 역시 유도를 통해 가열을 시킬 수 있는 가능성에 대해서 제시하였다.

한편, Kim et al. (2020)은 유한요소해석 기반의 시뮬레이션 및 거푸집 온도분포 계측을 통해 유도가열 양생 시 거푸집 온도분포를 균일하게 유지하기 위한 유도 코일 턴수 및 턴 간격을 제시하였다. 해석 및 실험결과 일반적인 지름 150 mm, 길이 300 mm의 콘크리트 공시체의 가열에 있어서 코일턴수 3회, 코일 간격 75 mm를 적용한 경우가 최고온도 지점과 최저온도 지점의 온도차이가 약 25 °C로 최소화 되고, 최고온도 지점에서 온도 균일도가 증가되는 것을 확인하였다.

상기의 선행연구들은 거푸집의 단면 크기 및 형상은 고정된 상태에서, 코일 배치의 최적화(턴수 및 간격), 최적의 양생곡선 도출(최대온도 및 유지시간 등), 거푸집 종류 및 두께 등의 변수에 따른 거푸집 발열성능 및 가열양생 된 콘크리트의 압축강도에 대한 평가를 수행하였다. 그러나 콘크리트 단면의 증가에 따라 유도가열에 의해 직접 가열되는 거푸집과 수화열 및 거푸집에서 발생한 열의 전달에 의해서 발열되는 콘크리트의 온도차이가 발생할 수 있다. 또한, 거푸집의 형상이 변화함에 따라 코일의 형상이 변화되고, 이는 코일과 거푸집의 일정한 간격유지가 어려운 문제가 발생 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 거푸집의 크기 및 형상에 따른 내부 콘크리트의 온도분포를 확인하였다. 아울러, 선행연구의 경우 단일 배합 콘크리트에 대해서 양생조건 변화에 따른 압축강도 비교를 통해 유도가열 성능을 평가하였다. 그러나 콘크리트의 배합이 변화함에 따라 가열양생에 따른 강도증진 효과에 차이가 있을 수 있으며, 본 연구에서는 강도수준을 고려한 콘크리트 배합 종류를 변수로 하여 유도가열 양생 후 압축강도를 평가하였다. 추가적으로 본 연구에서는 유도가열 시 발생할 수 있는 전자파에 의한 인체 유해성을 확인하기 위하여 유도가열 중 발생 전자파를 측정하여 전자파 적합성 기준과의 비교를 수행하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 거푸집 크기 및 형상에 따른 발열특성 평가

선행연구(Lee et al., 2019)에서 유도가열 양생을 위한 거푸집으로 지름 150 mm의 원형 철재(Steel) 거푸집을 사용한 경우, 유도에 의해 가열이 되는 거푸집 및 내부 콘크리트의 온도편차가 크지 않으며 결과적으로 콘크리트 전단면을 골고루 발열 시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 콘크리트 단면이 증가할 경우 거푸집의 발열온도가 콘크리트 내부까지 전달이 되지 않을 수 있으며 이는 발열양생 효율성을 저하시키는 요인이 된다. 또한, 거푸집 및 코일의 형태가 원형이 아닌 경우 거푸집과 코일간의 간격이 일정하지 않은

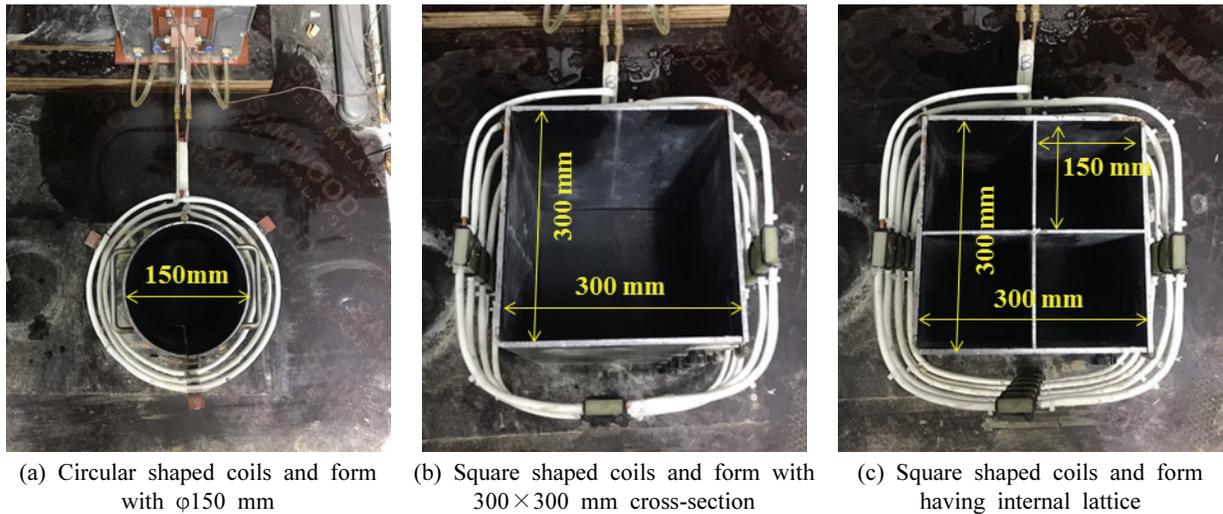


Fig. 1. Steel Forms and Coils for Heating Performance Test

문제로 인해 유도에 의한 가열 효율에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이, 기존의 지름 150 mm 원형 거푸집(Fig. 1(a))과 함께, 일반적인 기둥에서 활용이 가능한 한 변이 300 mm인 직사각형 거푸집(Fig. 1(b))에 대해 유도가열에 의한 발열 성능을 평가하고자 하였다. 추가적으로, 내부에 전도체가 추가적으로 있을 경우의 유도가열 효율성을 평가하기 위하여 상기의 한 변이 300 mm인 직사각형 거푸집 내부에 150 mm 간격으로 외부 거푸집과 동일한 재료인 철재의 칸막이가 추가된 경우(Fig. 1(c))의 유도가열에 의한 발열 성능을 평가하였다.

Fig. 1의 모든 거푸집은 유도에 의한 발열 효율이 우수한 철 재질로 4 mm의 두께로 제작이 되었으며, 바닥면은 유도 자기장의 흐름을 방해하지 않도록 플라스틱으로 제작되었다. 선행연구(Kim et al., 2020)의 결과를 참고하여 온도분포 및 균일도를 효율적으로 유지할 수 있도록 거푸집과 코일의 간격은 35 mm, 코일은 75 mm의 등간격으로 제작되었다. 유도가열양생 곡선 역시 선행연구(Lee et al., 2019)의 결과를 참고하여 Fig. 2와 같이 총 15시간의 양생을 진행하였다. 구체적으로 전 양생 3시간, 최고온도 70 °C 유지 5시간, 후 양생 1.2시간을 적용하였으며, 온도 상승은 시간당 20 °C 이하, 온도 하강은 시간당 15 °C 이하가 되도록 설정하였다.

본 연구에서 사용된 유도가열 장치의 경우, Fig. 3에서와 같이 실시간으로 계측된 온도를 바탕으로 Proportional Integral Derivative (PID) 제어 기반의 온도 조절기가 Fig. 2의 발열양생 곡선을 정밀하게 모사할 수 있도록 설계되었다. 유도가열 장비는 이동의 편의를 위해 온도 제어기를 포함한 전력변환부와 코일을 포함하는 가열부의 분리 형태로 제작이 되었으며, C/T Box에 연결된 코일은 탈부착이 가능한 구조로 구성되어 있다. 따라서 코일의 변경을 통해 하나의 전력변환장치로 다양한 형태 및 크기의 거푸집에 대해서 유도가열이 가능하며, 코일을 병렬로 연결할 경우

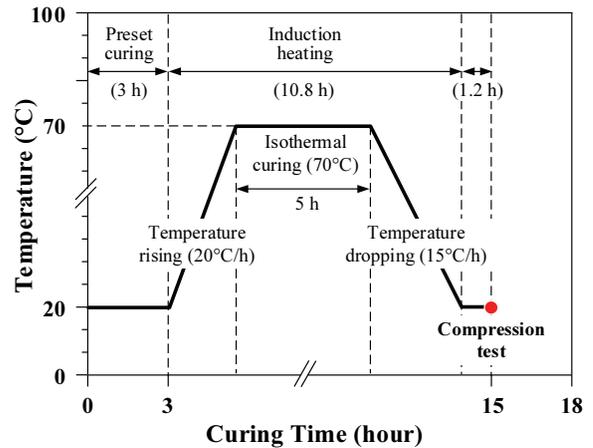


Fig. 2. Temperature Variation During Curing

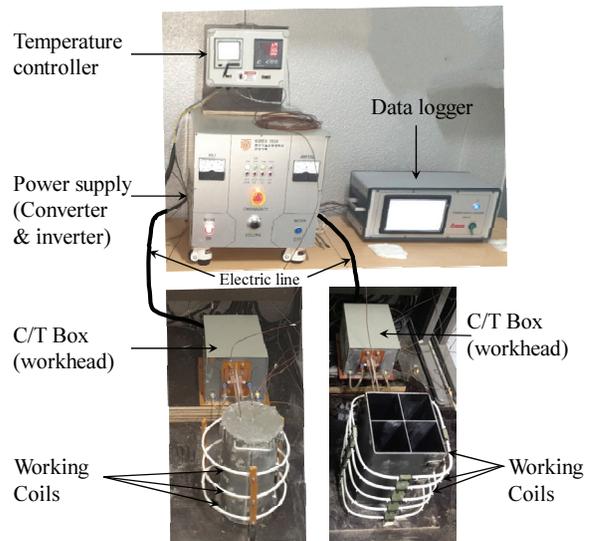


Fig. 3. Test Equipment for Heating Performance Test

여러 개의 거푸집에 대한 동시 가열이 가능하도록 설계되었다(Fig. 3). 이러한 전력변환장치는 최대출력 7 kWh, 동작 주파수 40 kHz로 설계되었으며, C/T Box에는 공진 캐패시터 및 전류 증폭을 위한 변압기가 설치되어 있다. 최종적으로 C/T Box와 연결된 워킹 코일에 흐르는 고주파 전류에 의해 발생한 자기장의 흐름을 통해 피가열체가 비접촉식으로 가열되는 구조로 되어있다.

모든 실험은 동절기 환경조건을 모사하기 위하여 0 °C의 항온챔버에서 수행하였으며, Fig. 1의 3종류 거푸집에 동일한 콘크리트를 타설 후 총 15시간 동안 유도가열 장비를 이용하여 Fig. 2의 발열양생 곡선에 따라 가열을 진행하였다. 발열양생 곡선은 선형연구(Lee et al., 2019)에서 유도가열 양생에 의한 초기강도 확보에 가장 효율적인 것으로 확인된 최고온도 70 °C-5시간 유지로 결정을 하였다. 또한 동절기 콘크리트 타설 직후 동해를 방지하기 위하여 초기 3시간의 전 양생 구간에서도 유도가열을 통해 20 °C의 온도를 유지할 수 있도록 설정하였다. 유도가열 과정에서 거푸집 종류 및 크기별 내부 콘크리트의 발열 특성을 거푸집 내측 및 콘크리트 단면 중앙부에 삽입된 열전대(Thermocouple)에서 계측한 온도 데이터를 통해 평가하였다. 추가적으로 콘크리트 표면을 열화상 카메라로 촬영하여 열전대로 계측한 결과 값을 검증하였다.

2.2 배합 종류별 강도발현 특성 평가

콘크리트 배합 종류에 따른 유도가열기반 발열양생 효율성을 양생 후 압축강도 비교를 통해 평가하였다. 이를 위해 Table 1과 같이 물/시멘트 비(W/C)가 각각 38% 및 44%인 두 종류의 보통콘크리트 배합이 사용되었다. W/C38 배합은 현장에서 교각용 한중 콘크리트로 사용이 되고 있는 설계기준강도 약 35 MPa의 배합이며, W/C44 배합은 현장에서 교각, 암거, 교대 등에 사용이 되고 있으며, 일반적인 계절에 적합한 설계기준강도 약 24 MPa의 배합이다.

Table 1. Concrete Mix Proportions

Mix	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				SP (%)
			W	C	S	G	
W/C38	38.3	47.9	176	460	800	894	0.75-0.9
W/C44	43.9	49.2	160	364	879	914	0.65-0.8

W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; S: Sand; G: Gravel; SP: Super-plasticizer (wt%)

Table 1의 배합에 사용된 재료의 물리적 특성은 다음과 같다.

- (1) 1종 보통 포틀랜드 시멘트: 밀도 3.15 g/cm³, 비표면적 3,000 cm²/g, 평균입경크기 13.2 μm)

- (2) 굵은골재(쇄석): 최대치수 25 mm, 밀도 2.67 g/cm³, 조립률 6.12
- (3) 잔골재(자연사): 밀도 2.56 g/cm³, 조립률 2.99
- (4) 혼화제: 폴리카본산계 국내산 고성능 감수제

각각 W/C38 및 W/C44 배합에 있어 목표 슬럼프에 도달하기 위해 고성능 감수제가 약 0.75~0.9%, 0.65~0.8% 만큼 사용되었으며, 물/시멘트 비가 감소할수록 더 많은 양의 고성능 감수제가 혼입되었다. 굳지않은 콘크리트의 물성에서 KS F 2402 (2017)에 따라 슬럼프 시험을 수행하였으며, 두 배합 모두 평균 120 mm 정도의 슬럼프를 나타내었다.

유도가열 양생과정은 앞선 2.1절의 거푸집 발열특성 평가와 유사하며, 본 실험에서는 압축강도 평가를 위해 Fig. 1(a)와 같은 철 재질의 φ150 × 300 mm 거푸집에 서로 다른 배합의 콘크리트(W/C38, W/C44)를 각각 2개씩 타설하여 15시간 동안 0 °C의 챔버에서 Fig. 2의 온도곡선에 따라 유도가열양생을 진행하였다(IHC). 또한 양생조건에 따른 강도 비교를 위해 동일한 크기의 거푸집에 동일 배합의 콘크리트를 타설 후, 각각 3개의 시험체를 유도가열시험이 진행되는 0 °C 챔버(LTC) 및 상온챔버(MTC)에 넣어 15시간 동안 저온 및 상온에서 양생하였다. 모든 시험체는 15시간 양생 후 KS F 2405 (2010)에 준하여 압축강도 시험을 수행하여 그 강도를 비교하였다.

2.3 유도가열 시 전자파 유해성 평가

유도가열은 가열코일에 흐르는 전류에 의해서 발생하는 자기장으로 피가열체를 가열하는 방식으로 코일 주변에는 항상 자기장이 생성된다. 따라서 유도가열의 사용에 있어 전자파에 의한 인체 유해성 문제가 함께 거론이 되고 있다. 현재 가정에서도 인덕션 레인지를 조리도구로 안전하게 사용하고 있지만, 콘크리트 양생 시 필요한 장비는 건설공사의 특성을 고려할 때 가정용 인덕션에 비해 가열면적과 출력전력량이 크게 된다. 따라서 유도가열 시 발생하는 자기장이 작업자의 건강에 미치는 유해성을 검토할 필요가 있으며, 이는 전자파 적합성(Electro Magnetic Compatibility, EMC) 기준(RRA, 2019)을 만족해야 한다.

이를 위해 Fig. 4(a)의 전자파 측정기기(EHP-200)를 활용하여 Fig. 4(b)와 같이 유도가열 중 자속밀도를 측정하였다. 전자파 측정 장비는 유도가열 코일로부터 300 mm 만큼 이격하여, 각 방향의 100 cm² 면적에서 측정한 평균을 구한다. 전자파 측정 시 유도가열 장비는 실험체를 약 80 °C 정도의 고온으로 가열하는 상태로 설정하였으며, 이때 전력 변환장치의 출력은 140 V, 4 A를 나타내었다.



(a) Equipment (EHP-200) (b) Test setup

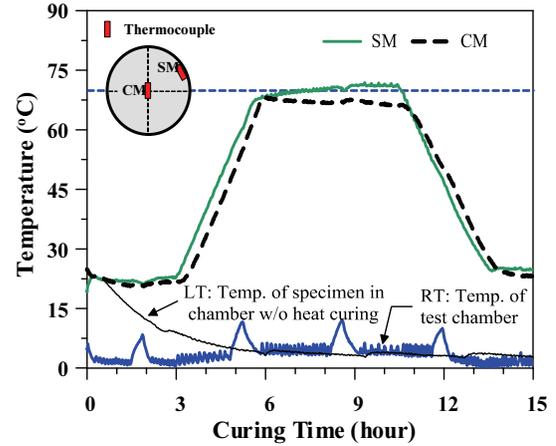
Fig. 4. Test Setup and Equipment for Measuring Magnetic Flux Density

3. 실험결과 및 분석

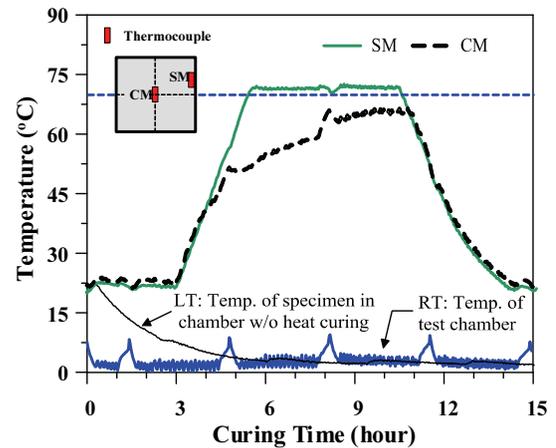
3.1 거푸집 크기 및 형상에 따른 발열특성 평가

Fig. 1에서 설명한 크기 및 형상이 다른 3종류의 거푸집에 콘크리트를 타설한 후 15시간의 유도가열 양생을 수행하면서 측정된 온도이력 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 지름 150 mm의 원형 철재 거푸집을 사용한 경우의 시험결과이다. 그림에서 “SM”의 경우 거푸집 내측에서 콘크리트와 접하는 부분의 온도이며, “CM”은 지름 150 mm인 콘크리트 공시체 중심에서의 온도 측정 결과이다. 두 경우 모두, 길이방향으로는 공시체 높이의 절반에 해당하는 위치의 온도를 의미한다.

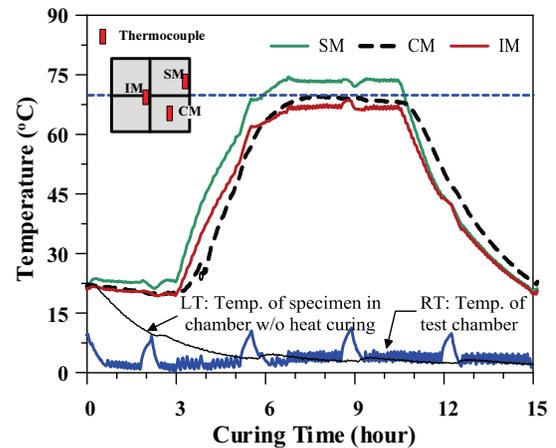
초기 전 양생 구간에서는 0 °C 챔버 내에서 상온과 비슷한 수준을 유지하기 위해 최소의 출력으로 유도가열기가 작동하며 콘크리트 내부와 거푸집의 온도가 비슷하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 온도 상승구간에서는 본격적으로 유도가열에 의해 거푸집의 온도가 상승하게 되어, 직접적으로 가열이 되는 거푸집의 온도 상승속도가 콘크리트 내부의 온도 상승속도 보다 빠른 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 최대온도 유지가 끝나는 시점(약 10:30 h)에서 역전이 되어 온도하강 구간에서는 거푸집의 온도 하강이 콘크리트 중심부 온도 하강보다 다소 빠른 것을 알 수 있다. 한편, 최고온도 유지구간에서도 일정한 온도 유지를 위해 최소한의 출력이 발생되어 거푸집의 가열/비가열이 반복이 되며, 이에 따라 직접적으로 가열이 되는 거푸집의 온도가 콘크리트 중심부 온도보다 약 0~4 °C 정도 높은 것을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 미세한 온도의 차이는 외부환경 및 온도 제어과정에서의 오차를 고려할 때 무시할만한 결과라고 할 수 있다. 따라서 선행연구(Lee et al., 2019)에서도 확인된 바와 같이 지름 150 mm의 원형 철재 거푸집을 사용한 경우, 유도에



(a) Circular shaped form with $\phi 150$ mm



(b) Square shaped form with 300×300 mm cross-section



(c) Square shaped form having internal lattice

Fig. 5. Temperatures Measured during Induction Heat Curing

의해 가열이 되는 거푸집 및 내부 콘크리트의 온도편차가 크지 않으며 결과적으로 콘크리트 전단면을 골고루 발열시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

한편 Fig. 5(b)는 단면이 300 × 300 mm인 직사각형 거푸집

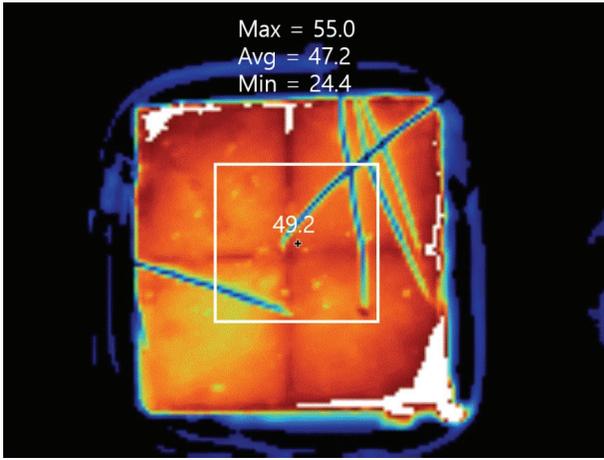


Fig. 6. Temperature Variations of Induction Heat Cured Concrete Surface

으로, Fig. 5(a)의 원형 거푸집과 비교하여 거푸집 표면에서 콘크리트 중심부까지의 최단거리가 약 2배 정도 증가된 경우에 대한 발열양생 온도이력 결과이다. 전 양생 구간 및 온도 상승구간 초기에는 거푸집과 콘크리트 내부의 온도가 비슷한 경향을 보이지만, 이후 콘크리트 내부 온도 상승 속도는 급격히 감소하여 유도가열에 의한 발열양생에서 최대온도 유지기간이 끝나는 시점(10:30 h)에서도 목표 최대 온도인 70 °C에 도달하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 최대 온도 유지구간에서 거푸집과 콘크리트 중심부의 온도 차이는 약 5-20 °C로 콘크리트 단면적 증가에 따라 거푸집 유도가열을 통한 콘크리트 전단면의 균일한 발열성능을 확보하기에 한계가 있음을 확인하였다.

상기의 단면증가에 따른 콘크리트 전단면 발열성능 확보의 어려움을 해결하고자, 거푸집 내부 단면의 가운데에 추가로 유도 및 열전달이 가능한 철 재질의 내부 칸막이를 추가한 거푸집에 콘크리트 타설한 이후 유도가열 양생 중의 온도를 측정하여 Fig. 5(c)에 나타내었다. 유도에 의해 직접적으로 가열되는 외부 거푸집과 비교하여 콘크리트 중앙부 및 내부 철재 칸막이 부분의 온도가 다소 낮게 측정이 되었으나, 온도 차이는 약 5 °C 미만으로 확인이 되었다. 이러한 결과는 콘크리트 단면적이 증가하는 경우에도 내부에 유도 및 열전달이 가능한 재료를 넣어주는 경우 유도가열에 의한 거푸집 내부 콘크리트의 발열성능을 향상 시킬 수 있음을 시사하는 결과이다. 한편, 이러한 효과는 Fig. 6의 콘크리트 표면에 대한 열화상 카메라 촬영 결과(Fig. 1(c) 단면)를 통해서도 확인할 수 있다. 최고온도 구간에서 열화상 카메라를 이용해 콘크리트 표면 온도를 확인한 결과, 온도가 가장 높은 외부 거푸집(약 55 °C)과 비교하여 내부 콘크리트의 온도(약 49 °C) 차이가 약 6 °C 정도로 열전대를 통해 측정한 내외부 온도차이(약 5 °C 미만)와 비슷한 결과를 나타내었으며, 콘크리트 전단면에서 온도편차가 크지 않음을 확인할 수 있다. 여기서, 열화상 카메라로 확인한 거푸집 및 콘크리트의

온도(약 47~55 °C)가 열전대 측정결과(약 67~73 °C)보다 다소 낮은 이유는 열전대의 경우 공시체의 길이방향 가운데 위치에서 콘크리트 및 거푸집의 내부 온도를 측정한 반면, 열화상 카메라의 경우 0°의 대기와 접하고 있는 콘크리트 및 거푸집의 표면에 대한 촬영 결과이기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 거푸집 유도에 의한 콘크리트 가열양생에 있어서 전단면의 고른 온도분포 성능은 콘크리트 및 거푸집의 단면적이 증가 할수록 감소하는 것으로 나타났으며, 이러한 문제는 단면 내부에 추가로 유도 및 열전달이 가능한 재료를 넣어줌으로 인해 일정부분 보완이 가능함을 확인하였다.

3.2 유도가열 콘크리트의 압축강도 결과

Table 2에 배합 종류 및 양생 방법별 15시간 압축강도 시험결과를 나타내었으며, 각 배합에 따른 강도차이를 고려하기 위해 상온양생 콘크리트의 강도에 대한 비율도 함께 평가하였다. 한편, 양생 방법에 관계없이 W/C38 및 W/C44 배합의 28재령 압축강도는 약 42 MPa, 35 MPa을 상회하여 목표강도를 확보하였다.

Table 2. Compressive Strength Results at 15 h

Specimen	MTC	LTC		IHC	
	f_c (MPa)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$ (%)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$ (%)
W/C38	14.8	0.3	2	25.7	173
W/C44	12.1	0.2	2	16.2	135

*Compressive Strength Ratio to MTC Specimen
MTC, LTC: Curing at Ambient and Low-Temperature Chambers; IHC: Induction Heat Curing

물/시멘트 비가 38%에서 44%로 증가함에 따라 15시간 상온 양생된 MTC 시험체의 평균압축강도는 14.8 MPa에서 12.1 MPa로 약 18%만큼 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 물/시멘트비와 콘크리트의 압축강도가 반비례 관계를 보이는 일반적인 현상으로 확인된다(Neville, 1995; Mehta and Monteiro, 2006). 한편, 선행연구(Lee et al., 2019)의 결과와 마찬가지로, 별도의 인위적인 양생과정 없이 0 °C의 챔버에서 양생된 LTC 시험체의 경우 15시간 압축강도는 W/C38 및 W/C44배합에서 각각 0.3 MPa 및 0.2 MPa이며, 두 배합 모두 동일재령의 상온양생 콘크리트의 강도 대비 약 2% 수준으로 압축강도 시험 자체가 거의 불가능한 수준으로 강도발현이 진행되지 않았다. 따라서 Lee et al. (2019)은 선행연구에서, 콘크리트 타설 후 극 초기에는 -10 °C 이하 또는 영하의 동결온도 이하가 아닌 경우에도 약 5 °C 이하의 저온에서는 콘크리트 조기강도 발현이 거의 이루어지지 않는 것으로 설명하였다.

한편, 0 °C의 항온챔버에서 유도에 의한 거푸집 가열기법으로 15시간 양생한 IHC 시험체의 경우, W/C38 및 W/C44 배합에서 각각 압축강도 25.7 MPa 및 16.2 MPa의 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 각각 동일재령 상온양생 시험체 강도의 약 173% 및 135%에 해당하는 값으로, 저온의 외부환경에서도 유도가열에 의한 발열양생을 통해 상온양생 이상의 초기강도 확보가 가능함을 시사하는 결과이다. 이러한 결과는 양생초기 유도가열에 의한 거푸집 발열에 의해 고온의 환경이 제공이 되고, 이로 인해 초기 수화반응이 급격히 발생하기 때문이다(Neville, 1995). 또한, 물/시멘트비가 낮을수록 이러한 수화 가속효과가 증가하여 강도증진에 효율적임을 알 수 있다. 한편, 콘크리트표준시방서(MOLIT, 2016)에서는 한중 콘크리트의 양생 종료 때의 소요 압축강도를 일반적인 경우 5 MPa로 정의하고 있으며, 보통 단면의 소요 압축강도를 얻는 표준 양생일수를 3~4일로 제안하고 있다. 이를 통해 유도가열 기반 발열양생 기술을 활용할 경우, 1일 이내에 동절기 콘크리트 양생 종료를 위한 충분한 강도를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 유도가열시 전자파 유해성 평가 결과

전자파에 대한 유해성은 전파법 시행령 제 67조 2의 규정에 따라 전자파 적합성(EMC) 기준으로 평가한다. 본 연구에서 유도가열을 위해 사용한 전력변환장치의 경우 동작 주파수 40 kHz 장비로 EMC 3조 3항에서 정의하고 있는 “산업·과학·의료용 등 고주파 이용기기로서 9 kHz~400 GHz 주파수 범위의 무선주파수 에너지를 전자파 방사, 유도, 용량성 결합의 형태로 의도적으로 발생시켜 재료의 가공, 검사, 분석에 이용하는 기기”에 해당한다. EMC에는 이러한 기기의 자기장 적합성 기준치가 자속밀도(Magnetic Flux Density) 354.8 μT로 규정되어 있다.

Fig. 7에 거푸집 가열온도 80 °C 및 전력변환장치의 출력 140 V, 4 A 상태에서의 자속밀도 측정결과를 나타내었다. 실험결과, 실제 실험에서 사용한 가열 온도인 70 °C보다 높은 온도인 80 °C 가열조건에서 별도의 전자파 차단 검토를 하지 않은 경우에도 자속밀도 측정결과가 13.9 μT로 크지 않은 것으로 확인되었다. 이는 EMC 기준인 354.8 μT의 4% 수준으로, 별도의 조치를 취하지 않는 경우에도 현 장비를 콘크리트 유도가열에 활용하는데 전자파에 의한 문제는

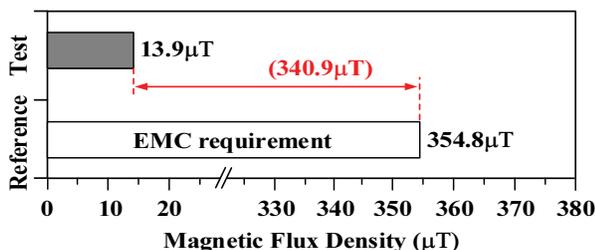


Fig. 7. Magnetic Flux Density of Induction Heating System

없을 것으로 판단되었다. 그러나 이러한 결과는 테스트용으로 제작된 소규모의 전력변환장치 및 거푸집으로 실험을 수행한 경우에 대한 결과이므로, 실제 건설현장에서 사용하는 규모의 장비 및 거푸집에 대한 전자파 적합성 검토가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 유도가열을 활용한 콘크리트 축진양생에 있어서, 거푸집의 크기에 따른 발열효율, 강도수준을 고려한 콘크리트 배합별 유도가열 양생 후 초기강도 평가 및 유도가열 시의 전자파 유해성을 평가하였다. 그 결과 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 거푸집 유도에 의한 콘크리트 가열양생에 있어서 콘크리트 단면적이 150 mm에서 300 mm로 증가할 경우 전단면의 고른 온도분포 성능은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 문제는 단면 내부에 추가로 유도 및 열전달이 가능한 재료를 넣어줌으로 인해 일정부분 보완이 가능함을 확인하였다.
- (2) 콘크리트 물/시멘트 비에 관계없이 5 °C 이하의 저온에서 양생된 콘크리트의 15시간 압축강도는 0.2~0.3 MPa로 초기강도 발현이 거의 진행되지 않음을 확인하였다. 상온양생 콘크리트의 경우, 물/시멘트 비의 증가에 따라 초기 압축강도는 감소하는 결과를 확인하였다.
- (3) 0 °C의 저온 챔버에서 거푸집 유도에 의해 가열 양생된 콘크리트의 15시간 압축강도 약 16.2~25.7 MPa로 한중 콘크리트의 양생종료 강도를 상회하였으며, 상온양생 콘크리트 대비 약 135%~173%의 강도 발현율을 나타내었다. 따라서 동절기 유도가열 양생을 통해 15시간 이내에 충분한 초기강도를 확보할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 물/시멘트비가 낮을수록 유도가열 기반 발열양생에 의한 수화 가속효과가 증가하여 초기강도 발현에 효율적임을 확인하였다.
- (5) 전자파 유해성 검토결과, 유도가열 양생 중 발생하는 자기장의 자속밀도는 전자파 적합성 기준의 5% 이하로 유해성이 없음을 확인하였다. 그러나 실제 현장 조건의 장비 및 거푸집을 활용하는 경우에 대해서는 별도의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술축진연구사업의 연구비지원(20CTAP-C152012-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- ACI Committee 306R. (1988). *Cold weather concreting*. American Concrete Institute.
- Kang, H.Y., Han, S.G., Kim, Y.S., and Nam, J.S. (2009). A new construction field of Kyeryong Construction & Industrial Co., Ltd. Richeville in Russia Khabarovsk: An application of concrete placement in severe cold weather environment. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 2, pp. 62-66.
- Kim, D.J., Choi, Y.S., Jeong, H.J., Shin, H.O., and Ahn, C.H. (2020). Analysis of temperature distribution of mold for curing concrete based on induction heating. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 34, No. 10, pp. 16-23.
- Koh, K.T., Cheong, H.M., Yoon, G.W., and Lee, J.H. (2005). Properties of concrete to curing temperature. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 1, pp. 22-27.
- Koh, T., Hwang, S., Moon, D., Yoo, J., Song, J., and Ko, J. (2014). Early strength development of concrete cured with microwave heating form. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 17, No. 5, pp. 365-372.
- Korea Concrete Institute (KCI). (2015). *KCI PM303.1-15: Concrete curing*. Seoul: KCI.
- KS F 2402. (2017). *Standard test method for concrete slump*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2405. (2010). *Standard test method for compressive strength of concrete*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Lee, J.B., Kim, K.T., Ahn, C.H., Back, J.H., and Shin, H.O. (2019). Compressive strength of heat-cured concrete based on induction heating. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 331-337.
- Mehta, P.K., and Monteiro, P.J. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials* (3rd ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016). *Concrete standard specification*.
- National Radio Research Agency (RRA). (2019). *Electro magnetic compatibility*.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete* (4th ed.). London, UK: Longman.

Received	October 28, 2020
Revised	October 29, 2020
Accepted	November 2, 2020