유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 압축강도 특성

Compressive Strength of Heat-Cured Concrete based on Induction Heating

이진복* · 김경택** · 안치형*** · 백제훈**** · 신현오*****

Lee, Jinbok*, Kim, Kyeongtack**, Ahn, Chi-Hyung***, Back, Jeihoon****, and Shin, Hyun-Oh*****

Abstract

A heat curing method was developed for concrete by using induction heating, which is a non-contact technique that operates on the principle of electromagnetic induction. The aim was to protect the concrete from freezing and achieve appropriate rate of strength gain in cold weather. The effects of the types and thicknesses of metallic forms, temperature variation curves, and addition of steel fibers on the compressive strength of concrete were evaluated. Test results indicated that no strength gain occurred when the concrete was kept in a low-temperature chamber at 0 °C. The concrete specimens that were cured using induction heating exhibited a strength gain ratio (122%-188% of the concrete cured at ambient temperature) that was comparable to that of the concrete specimens cured in a high-temperature chamber.

Key words : Induction Heat Curing, Form Type, Temperature Variation Curve, Steel Fiber

요 지

본 연구에서는 동절기 콘크리트의 동해를 방지하고, 강도발현 성능을 확보하기 위해 전자기 유도에 의한 비접촉식 가열방식인 유도가열을 활용한 콘크리트 발열양생 기법을 개발하였다. 거푸집 종류 및 두께, 온도이력곡선의 형태, 강섬유 혼입률에 따른 발열양생 후 압축강도 특성을 평가하였다. 실험결과 0 °C 저온양생 콘크리트의 15시간 압축강도는 1 MPa 미만으로 강도발현이 전혀 진행되지 않아 동절기 발열양생의 필요성을 확인하였다. 유도가열에 의한 발열양생의 경우 고온가열양생과 비슷한 수준의 강도 발현율을 보였으며, 상온양생 대비 약 122-188%의 강도 발현율을 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 유도가열 양생, 거푸집 종류, 온도이력곡선, 강섬유

1. 서 론

동절기 양생의 어려움으로 인해 콘크리트 타설을 하지 않음으로 공기지연 문제가 발생하며, 가열양생 시에도 현장에서 온도관리의 어려움으로 품질관리의 문제가 발생한다. 콘크리트 표준시방서에서는 일 평균기온이 4 °C 이하가

예상되는 조건일 때는 콘크리트가 동결할 염려가 있으므로 한중콘크리트로 시공할 것을 명시하고 있으며, 초기 동해를 방지하기 위해 소요압축강도(5-15 MPa)가 확보될 때까지 콘크리트의 온도를 5 °C 이상으로 유지하도록 하고 있다 (MOLIT, 2016). 이에 따라 동절기 효과적인 콘크리트 양생을 위해 국내외에서는 가열양생 방법으로 열풍기 및 갈탄

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

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

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

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

****한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 조교수(E-mail: jhbaek@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

등을 활용하는 공간 가열법, 발열용 시트 등을 활용한 표면 가열법, 열선 매립, 증기양생, 마이크로웨이브 발열 거푸집 활용 방법 등이 제시되었으나, 환경, 안전, 품질 및 경제적인 측면에서 한계가 있는 실정이다(KCI, 2015).

따라서 동절기 콘크리트 양생에 필요한 안전하고 균일한 발열양생 방법에 대한 연구가 필요하며 본 연구에서는 유도 가열(Induction Heating)을 이용한 콘크리트 발열양생 기법을 개발하고 그 성능을 평가하고자 하였다. 유도가열은 전도성 물체에 유도되는 와전류손실(Eddy Current Loss)을 이용하여 물체를 가열하는 비 접촉식 가열방법으로 철강·금속 분야 및 반도체 업계에서 주로 활용이 되고 있으며, 최근에는 일반 가정에서 조리용 가열기구로도 많이 활용이 되고 있는 기법이다. 유도가열 기법은 가열 속도가 매우 빠르고 온도 조절이 간편하며, 열을 직접 공급하지 않고 전자기 유도를 통해 피열물 자체를 가열하므로 손실이 적고 효율이 좋은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2002; Shin and Woo, 2012).

유도가열을 이용한 발열양생에 대한 연구는 국내외에서 사례가 전무한 실정이나 접근 방법에 있어서 마이크로웨이브 양생과 다소 유사한 성격을 띠고 있다. Leung and Pheeraphan (1995)은 마이크로웨이브 가열양생 시간에 따른 실험을 통해 7일 양생 시의 강도 차이가 일반양생과 비교하여 우수함을 제시하였으며, 경제적인 부분에 있어서도 탁월함을 제시하였다. Neelakantan et al. (2013)은 상온 조건과 마이크로웨이브를 활용한 가열양생 조건에서의 초기재령 강도를 비교하였으며, 28일 강도 예측에 효율적인 다중 선형 회귀 모델을 제시하였다. Prommas and Rungsakthaweeul (2014)은 마이크로웨이브를 활용한 양생시간에 따른 수분손실과 압축강도에 관계를 제시하였다. Makul et al. (2014)은 에너지 절약, 양생기간 단축 등과 같은 이점을 극대화하기 위한 마이크로웨이브 가열양생에 대한 검토를 진행하였으며, 마이크로웨이브 가열양생 효율이 시멘트나 콘크리트에 의한 유전손실과 직접적인 영향이 있음을 제시하였다. Kong et al. (2016)은 마이크로웨이브 양생 시 시멘트기반 재료의 수화 및 미세구조를 분석하였으며, 마이크로웨이브 기반 가열양생 콘크리트의 압축강도 증진이 천이대(Interfacial Transition Zone, ITZ)의 개선에서 기인함을 확인하였다.

국내의 선행연구로 Koh et al. (2014, 2015)은 동절기 시공 기간 단축을 목적으로 마이크로웨이브 발열 거푸집을 활용한 Mock-up 실험을 수행하였으며, 성숙도 이론에 근거하여 강도를 분석하여 제시하였다. 이를 통해 발열거푸집으로 양생된 콘크리트의 압축강도 발현모델을 제시하였으며 이러한 양생방법이 동절기에 효과적임을 확인하였다.

기존 국내외 선행연구는 마이크로웨이브 기반 가열양생과 타 가열양생 방법에 따른 콘크리트의 강도 비교 및 양생기간 단축에 대한 효율성을 검증하였으나 가열방법에 따른 최적가열곡선이나 콘크리트 단면의 균일한 온도분포를 유도하기 위한 기법은 제시되지 않은 한계가 있다. 따라서

본 연구에서는 동절기 촉진양생에 있어 거푸집 내부 콘크리트의 균일한 온도분포 및 최적가열곡선을 검토하고 강섬유 혼입을 통한 내부 유도 효율을 제시하며 다양한 조건을 고려한 실험을 통해 유도가열 양생의 효율성을 제안하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서는 유도가열을 활용한 발열양생 콘크리트의 압축강도 특성을 평가하였으며, 대상 구조물로는 원형의 수직부재인 교각의 교각부를 선정하였다. 일반적으로 전자기 유도 현상에 의해 코일을 폐회로 형태로 배치하는 경우 효율이 가장 우수하며(Kwak et al., 2000), 교각의 경우 수직 방향으로 타설이 진행되므로 폐회로 형태의 코일을 활용하기에 가장 효율적인 구조물로 판단을 하였다.

실험변수 상세를 Table 1에 나타내었으며, 주요 변수로는 거푸집 종류, 거푸집 두께, 양생 최고온도 및 최고온도 유지시간을 고려하였다. 또한, 거푸집 가열 후 열전달을 통한 콘크리트 발열양생 뿐만 아니라, 콘크리트 내부에 혼입되는 전도성 재료의 직접 유도가열을 통한 발열양생 성능 향상 효과를 추가적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 최근 콘크리트 인장 보강용으로 활발히 활용되고 있는 강섬유(Steel Fiber, SF)가 혼입된 콘크리트의 유도가열 후 압축강도 성능을 함께 평가하였다. 강섬유는 콘크리트 혼입 전, 재료 자체의 유도가열에 의한 발열 효율을 평가하기 위해 사전 실험을 수행하였다. 거푸집에 의한 영향을 제거하기 위해 비 전도체인 유리로 제작된 메스실린더에 강섬유를 채우고 유도가열 장비를 통해 가열하면서 내부 강섬유 온도 변화를 열화상 카메라로 촬영하여 확인하였다(Fig. 1). 실험결과 강섬유는 본 연구에서 사용된 유도가열 장비의 코일 형태 및 주파수 대역에서 10분 이내의 빠른 시간에 50 °C 이상의 높은 발열 성능을 보였으며, 따라서 콘크리트 내부에 직접 가열을 위한 전도체로서 적합함을 검증하였다.

Table 1. Test Variables

Specimen	Form	Max. Temp.	Note
S4-5h-60	Steel-4 mm	60 °C-5h	Mix 1
S4-5h-70	Steel-4 mm	70 °C-5h	
S4-5h-80	Steel-4 mm	80 °C-5h	
S4-7h-70	Steel-4 mm	70 °C-7h	
A4-5h-70	Aluminium-4 mm	70 °C-5h	
S8-5h-70	Steel-4 mm	70 °C-5h	Mix 2 (SF 2%*)
S4-5h-70-SF	Steel-4 mm	70 °C-5h	

*Addition of 2% Steel Fibers by Concrete Volume

Fig. 1. Preliminary Test for Heating Performance of Steel Fibers by Induction Heating

2.2 사용재료

본 연구에서는 교량의 교각부를 대상구조물로 하였으므로, Table 2와 같이 현장에서 교각용 한중 콘크리트로 사용이 되고 있는 배합을 기본배합(Mix 1)으로 선정하였다. 거푸집의 종류 및 발열양생 곡선에 의한 영향을 평가하기 위한 모든 실험체에서는 본 기본배합을 적용하였다. Table 2에서 나타난 바와 같이 S4-5h-70-SF 실험체는 강섬유 혼입에 따른 유도가열 양생 성능을 평가하기 위하여 기본배합에 2%의 갈고리형 강섬유(Hooked-End Steel Fiber)를 혼입한 배합(Mix 2)을 적용하였다.

Table 2. Concrete Mix Proportions

Mix	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				SP (%)	SF (%)
			W	C	S	G		
Mix 1	38.3	47.9	176	460	800	894	0.3-0.6	-
Mix 2							0.9-1.2	2.0

W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; S: Washed Sand; G: Gravel; SP: Super Plasticizer (wt%); SF: Hooked-End Steel Fiber (vol.%)

본 연구에서는 밀도 3.15 g/cm³, 비표면적 3000 cm²/g, 평균입경크기 13.2 μm의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement)를 사용하였다. 굵은골재는 최대치수 25 mm, 밀도 2.67 g/cm³, 조립률 6.12의 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 밀도 2.56 g/cm³, 조립률 2.99의 자연사를 사용하였다. 강섬유는 길이(*l*) 30 mm, 지름(*d*) 0.5 mm, 형상비(*l/d*) 60의 갈고리형 강섬유를 사용하였으며, 밀도, 인장강도 및 탄성계수는 각각 7.85 kg/m³, 1100 MPa, 200 GPa 이었다.

2.3 실험방법

2.3.1 유도가열 실험

Fig. 2에 본 연구에서 사용한 유도가열 장치 및 시험체 설치모습을 나타내었다. 유도가열기는 전원공급장치, 온도

조절을 위한 온도 제어기, 코일 및 열 발생기로 이루어져 있으며, 코일 내부에 있는 전도체를 와전류 손실에 의해 발생된 열로 비 접촉 상태에서 직접 가열하게 된다. 본 연구에서 사용된 유도가열기는 최대출력 7 kWh, 주파수 40 kHz의 성능을 가지며, 코일은 예비실험을 통해서 높이 300 mm의 거푸집을 균등하게 가열할 수 있도록 75 mm의 등간격으로 3턴을 가지도록 설계되었다. 온도 제어기는 설정된 목표 온도에 따라 Proportional Integral Derivative Control (PID) 제어 방식에 따라 전원공급장치에서 발생하는 출력을 조절하여 Fig. 3과 같은 다양한 형태의 발열양생 곡선을 얻을 수 있도록 설계되었다. 제어기에서 기준이 되는 온도는 제어의 정확성을 위하여 콘크리트와 접하는 거푸집 내부면의 온도로 설정하였다. 제어기 조절부와 동일한 위치 및 콘크리트 중앙부에도 열전대(Thermocouple)를 별도로 삽입하여 콘크리트 내부의 온도분포를 계측하였다. 또한, 콘크리트 표면 및 거푸집 표면을 열화상 카메라로 촬영하여 온도분포를 추가적으로 검증하였다.

Fig. 2. Test Setup and Equipment

Fig. 3. Temperature Variation During Curing (IHC and HTC)

본 연구에서는 동결기 및 녹이기 콘크리트의 양생 성능 향상을 검증하고자 하였으므로, 유도가열 실험은 0°C의 하온·하습 챔버에서 진행되었다. 모든 변수에 대해서 12개의 지름 150 mm × 높이 300 mm의 압축강도 공시체를 제작하였으며, 양생과정에서의 수분 손실을 방지하기 위해 표면을 아크릴 판으로 밀봉하여 양생을 실시하였다. 각각 3개의 실험체를 유도가열양생(IHC), 고온가열양생(HTC), 상온양생(MTC), 저온양생(LTC)의 방법으로 총 15시간 동안 양생 후, 압축강도를 평가하였다.

유도가열양생 시험체에 적용된 가열온도 곡선은 Fig. 3과 같다(KCI, 2015). 콘크리트 타설 후 3시간 동안 전 양생을 실시하고, Table 1의 변수에서 설정한 최고온도(60~80 °C)까지 유도가열을 통해 거푸집을 가열하였다. 그 이후 변수에 따라 최고온도를 5시간 및 7시간 동안 유지하였으며, 가열속도와 동일하게 온도를 상온까지 감소시키고 마지막으로 약 1-2시간 동안 상온에서 존치시켜 후 양생을 실시하였다. 고온가열양생 시험체는 유도가열과 동일한 온도의 가열 챔버에서 양생되었으며, 상온양생 및 저온양생 시험체는 각각 20 °C 및 0 °C 챔버에서 양생되었다. 모든 시험체는 동일한 시간(15시간) 동안 양생을 실시한 이후 탈형 및 KS F 2405 (2010)에 준하여 압축강도 시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 유도가열 콘크리트 온도이력 측정결과

유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 대표적인 온도이력 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 거푸집으로 스틸 4 mm, 최고온도 70 °C를 5시간 동안 유지하여 가열시킨 S4-5h-70 시험체의 결과이며, Fig. 4(b)는 S4-5h-70와 동일한 거푸집 및 가열 조건이지만 콘크리트에 강섬유 2%를 추가적으로 혼입한 시험체의 온도이력 결과이다. 한편, 예비 실험을 통해 코일 내부에 열전대만을 삽입한 상태에서도 열전대 자체의 유도에 의한 발열은 없음을 확인하였다.

Fig. 4에서 열전대 RT는 0 °C 저온 챔버의 공기온도를 측정한 결과이며, 실험변수에 관계없이 실제 계측된 온도는 약 -1~4 °C 정도의 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 일반적인 열전대의 온도 오차 범위를 감안할 때, 겨울환경 모사를 위한 실험실 온도 제어가 적절히 이루어진 것으로 판단되었다. 다만 6시간 주기로 실험실 온도가 5 °C 이상으로 다소 상승한 것은 냉동기의 동결방지를 위한 제상기능의 작동으로 인한 것이며, 온도 증가량이 크지 않아 실험에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. 열전대 LT의 경우, 0 °C 챔버에서 가열양생 없이 저온에서 양생한 콘크리트 시험체의 중앙부 온도를 나타내고 있다. 실험결과 초기에는 콘크리트 자체의 온도로 인해 약 18-22 °C의 온도분포를 보이지만 이후 온도가 지속적으로 감소하여 약 46시간 이후부터는 챔버 내부의 온도와 동일하게 유지되는 것을 확인할

수 있었다. 이는 겨울철 별도의 열 공급 없이 외부 환경에서 자연 양생된 콘크리트에 동해가 발생할 가능성이 있음을 시사하는 결과이다.

Fig. 4(a)에서 전자기 유도에 의해 직접 가열되는 거푸집의 온도 상승 속도가 콘크리트 내부의 온도 상승 속도보다 빠른 것을 확인할 수 있으며 이는 최고온도 유지 시간이 끝나는 시점(약 10:30h)에서 역전이 되어 온도 하강 구간에서는 거푸집의 온도 하강 속도가 콘크리트 내부보다 더 빠른 것을 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 4(b)에서 보이는 바와 같이 강섬유가 2% 혼입된 시험체에서는 거푸집과 콘크리트 중앙부 온도차가 최고온도 시작점(약 5:30)에서 비슷해지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 거푸집과 콘크리트와의 온도차이가 강섬유 비보강 시험체보다 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 콘크리트 내부에 다량으로 혼입된 강섬유가 전자기 유도에 의해 직접 가열되었으며, 또한 거푸집에서 발생한 열의 전도성을 향상시켰기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 실험변수에 관계없이 거푸집과 콘크리트 내부의 온도차이가 크기 않음을 알 수 있으며 이는 지름 150 mm의 공시체 양생에 있어서 유도가열을 통한 양생이 콘크리트 전단면을 골고루 발열시킬 수 있음을 시사하는 결과이다.

(a) Specimen_S4-5h-70

(b) Specimen_S4-5h-70-SF

Fig. 4. Temperature Measured during Induction Heat Curing

3.2 유도가열 콘크리트의 압축강도 결과

Table 3에 양생 방법별 압축강도 시험결과를 나타내었으며, 각 배합에 따른 강도차이를 고려하기 위해 변수별 비교는 상온양생 콘크리트의 강도에 대한 비율로 평가하였다(Figs. 5-6). 모든 변수에서 외부 열 공급 없이 0 °C 챔버에서 양생을 실시한 LTC 시험체의 15시간 압축강도는 0.3-0.6 MPa로 나타났으며, 이는 동일시간 동안 상온에서 양생한 콘크리트 강도의 약 2-3.5%로 강도 발현이 전혀 진행되지 않았음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 콘크리트 표면 관찰(Fig. 7) 및 앞선 Fig 4의 콘크리트 내부 온도 결과로부터도 확인할 수 있다. 일반적으로 콘크리트가 -10 °C 이하에서 동결되었을 경우 강도 발현이 되지 않는 것으로 알려져 있으며(Mehra and Monteiro, 2006), 본 연구결과 영하의 동결 온도가 아닌 경우에도 약 5°C이하의 저온에서는 콘크리트의 강도 발현이 거의 이루어지지 않음을 알 수 있다. 한편, ACI 306 (1988)에서는 부재의 단면이 300 mm 이하인 경우 타설 및 유지를 위한 콘크리트의 최소 온도를 13 °C로 제한하고 있다.

Fig. 5. Effects of Maximum Curing Temperature and Duration

Fig. 6. Effects of Concrete Form Type, Thickness and Steel Fiber Content

Fig. 7. Concrete Specimens after Testing

유도가열과 동일한 고온(60-80 °C)의 챔버에서 양생한 HTC 시험체의 경우 상온양생 콘크리트 압축강도의 166-212%의 강도 발현율을 보이는 것으로 확인되었다. 유도가열을 통해 거푸집 발열 양생을 실시한 IHC 시험체의 경우 상온양생 콘크리트 압축강도의 122-188%의 강도 발현율을 보이는 것으로 확인되어 양생초기 발열양생을 통해 동결기 콘크리트의 조기강도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

Table 3. Compressive Strength Results

Specimen	MTC	LTC		HTC		IHC	
	f'_c (MPa)	f'_c (MPa)	$f'_c/f'_{c(MTC)}$ (%)*	f'_c (MPa)	$f'_c/f'_{c(MTC)}$ (%)*	f'_c (MPa)	$f'_c/f'_{c(MTC)}$ (%)*
S4-5h-60	12.7	0.3	2.2	21.0	166	19.8	157
S4-5h-70	15.4	0.4	2.4	27.2	177	25.9	168
S4-5h-80	15.7	0.3	2.1	29.4	187	26.4	167
S4-7h-70	14.7	0.3	2.3	29.0	197	26.7	182
A4-5h-70	17.9	0.4	2.2	30.9	173	21.8	122
S8-5h-70	14.0	0.3	2.4	29.7	212	25.1	179
S4-5h-70-SF	16.7	0.6	3.5	28.8	172	31.5	188

*Compressive Strength Ratio to MTC Specimen

MTC, LTC, HTC: Curing at Ambient, Low, and High-Temperature Chambers; IHC: Induction Heat Curing

Fig. 5에서 양생을 위한 최고온도를 60, 70, 80 °C로 증가시킨 경우, HTC 시험체의 강도 발현율은 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 유도가열 시험체인 IHC의 강도 발현율은 70 °C에서는 60 °C와 비교하여 약 7% 증가한 반면, 80 °C로 온도를 더 상향 시킨 경우에도 70 °C와 동일한 강도 발현율을 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 따라서 유도가열을 위한 최적의 온도를 70 °C로 결정하였다. 최고온도 유지시간을 5시간(70 °C-5h)에서 7시간(70 °C-7h)으로 증가시킨 경우, HTC 및 IHC에서 강도 발현율이 각각 12% 및 8% 증가하여 콘크리트 적산온도 개념에 부합하는 결과를 나타내었다.

Fig. 6에서는 거푸집 종류, 두께 및 강섬유 혼입에 의한 압축강도 결과를 비교하였다. 거푸집으로 동일한 두께의 스틸과 알루미늄을 사용한 경우, HTC에서는 강도비의 차이가 약 2%로 거의 비슷한 것으로 나타났으며 이는 고온의 챔버에서 양생하는 경우 가열된 공기가 콘크리트 전체를 골고루 양생시키므로 거푸집 종류에 의한 영향이 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 유도가열 양생을 실시한 IHC에서는 알루미늄 거푸집을 적용한 경우 스틸 거푸집에 비해 강도 발현율이 27%만큼 감소하였으며, 이는 유도가열에서 1차 전류가 2차에 전달되는 효율이 2차측 가열체의 투자율(permeability)에 비례하며, 알루미늄의 투자율(1이하)이 스틸의 투자율(5,000이상)에 비해 매우 작기 때문이다. 스틸 거푸집의 두께를 4 mm에서 8 mm로 증가시킨 경우 HTC 및 IHC의 강도 발현율이 약 20%, 6%만큼 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 강섬유 2%를 콘크리트에 혼입하여 유도가열로 양생을 실시한 경우 강도 발현율이 약 12%만큼 증가하였으며, 다른 변수와는 다르게 동일한 온도의 가열양생 챔버에서 양생한 HTC 시험체 보다 높은 강도 발현율을 나타내었다. 이는 앞선 온도이력 결과(Fig. 4)에서도 확인할 수 있는바와 같이 콘크리트 내부의 강섬유가 전자기 유도에 의해 직접 가열되고, 추가적으로 거푸집 가열을 통해 발생한 열의 전도성을 향상시켰기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유도가열을 활용한 콘크리트 발열양생기술을 개발하였으며, 거푸집 종류, 두께, 강섬유 혼입 및 발열양생 이력에 따른 콘크리트 압축강도 특성을 평가하였다. 그 결과 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 0 °C 저온의 챔버에서 양생을 실시한 콘크리트 공시체의 경우, 콘크리트 중앙부 온도가 초기 약 20 °C에서 4-6시간 이후부터는 외기 온도와 같아지는 결과가 확인되었으며, 압축강도 발현 역시 거의 이루어지지 않는 것으로 나타났다.
- (2) 지름 150 mm의 콘크리트 공시체의 경우, 전자기 유도에

에 의한 거푸집 가열을 통해 공시체 전단면이 균일하게 발열되었으며, 상온양생 대비 122-188%의 우수한 강도 발현율을 나타내었다.

- (3) 강섬유 보강 콘크리트($\nu_f=2\%$)의 경우 전도체의 일종인 강섬유가 콘크리트 내부에서 직접 유도가열됨으로 인해 공시체 전단면의 온도분포 균질성이 더욱 향상되었으며, 강도 발현율 역시 향상되는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 콘크리트 가열양생 시 최고온도 70 °C에서 가장 우수한 강도발현 성능을 보여주었으며, 최고온도 지속시간이 증가할수록 강도 발현율이 높아지는 것으로 확인되었다.
- (5) 거푸집의 종류에서는 스틸 재질의 거푸집이 알루미늄 재질의 거푸집보다 전자기 유도에 의한 발열 성능이 우수하였으며, 거푸집의 두께가 증가할수록 발열양생 콘크리트의 강도 발현율이 향상 되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C152012-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- ACI 306R. (1988). *Cold weather concreting*. American Concrete Institute.
- Kim, Y.J., Kim, K.H., and Shin, D.C. (2002). Electromagnetic indirect induction fluid heating system using series resonant PWM inverter and its performance evaluations. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 48-53.
- 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.
- Koh, T., Moon, D., Bae, J., and Yoo, J. (2015). Compressive strength development model for concrete cured by microwave heating form. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, pp. 669-676.
- Kong, Y., Wang, P., Liu, S., and Gao, Z. (2016). Hydration and microstructure of cement-based materials under microwave curing. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 114, pp. 831-838.
- Korea Concrete Institute (KCI). (2015). *KCI PM303.1-15: Concrete Curing*. Seoul: KCI.
- KS F 2405. (2010). *Standard test method for compressive strength of concrete*. Korean Agency for Technology

and Standards.

- Kwak, I.G., Byun, J.K., Choi, K., and Hahn, S.Y. (2000). Optimal design of the induction heating coil using transient design sensitivity analysis. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers B*, Vol. 49, No. 5, pp. 327-337.
- Leung, C., and Pheeraphan, T. (1995). Very high early strength of microwave cured concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 136-146.
- Makul, N., Rattanadecho, P., and Agrawal, D.K. (2014). Applications of microwave energy in cement and concrete: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 37, pp. 715-733.
- Mehta, P.K., and Monteiro, P.J. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (3rd ed.). McGraw-hill.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016). *Concrete standard specification*.
- Neelakantan, T.R., Ramasundaram, S., Shanmugavel, R.,

and Vinoth, R. (2013). Prediction of 28-day compressive strength of concrete from early strength and accelerated curing parameters. *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 1197-1201.

- Prommas, R., and Rungsakthaweekul, T. (2014). Effect of microwave curing conditions on high strength concrete properties. *Energy Procedia*, Vol. 56, pp. 26-34.
- Shin, D.C., and Woo, H.G. (2012). A study on the electrical fan heater using high efficiency induction heating. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 24-30.

Received	October 31, 2019
Revised	November 1, 2019
Accepted	November 6, 2019