마이크로웨이브 발열거푸집을 적용한 콘크리트의 조기강도 발현특성

Early Strength Development of Concrete Cured with Microwave Heating Form

고태훈* · 황선근 · 문도영 · 유정훈 · 송진우 · 고지수

Tae hoon Koh · Seon keun Hwang · Do young Moon · Jung hoon Yoo · Jin woo Song · Ji soo Ko

Abstract Technologies for rapid concrete curing using elevated temperature are important for saving cost and time when constricting concrete structures. Recently, a microwave heating form was developed. In this study the early strength of concrete cured by the developed form was experimentally investigated. Large scale mock up tests were conducted six times, and the results were analyzed based on the maturity theory. Logarithmic correlation curves were generated based on the measured strength and estimated maturity. It was confirmed that the strength development of the concrete cured by microwave heating form can be estimated by the equivalent age theory usually applied to steam-curing technology. By using the microwave heating form, one day at most is enough to get the required strength for the safe removal of forms, even in cold weather.

Keywords : Early strength, Curing, Microwave heating form, Maturity

초 록 콘크리트 공사에서 공기단축과 시공비 절감을 위하여 가장 핵심적인 기술 중 하나는 온도 제어 양생기술이다. 최근에 마이크로웨이브를 이용한 발열 촉진 양생방법이 개발되었다. 본 연구에서는 개발된 기술을 적용한 콘크리트의 조기 강도발현특성을 실험적으로 고찰하였다. 총 6차에 걸친 대형 Mock-up 실험을 수행하였으며 실험결과를 성숙도이론에 근거하여 해석하였다. 개발된 방법으로 양생된 콘크리트의 압축강도 발현과 성숙도는 로그함수의 관계를 나타내었으며, 일반적인 고온 증기 양생된 콘크리트에 적용되는 등가재령이론으로 강도에측이 가능한 것으로 확인되었다. 개발된 마이크로웨이브 발열거푸집에 의해 동절기에도 하루면 거푸집 탈형을 위한 소요강도를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 조기강도, 양생, 마이크로웨이브 발열거푸집, 성숙도

1. 서 론

콘크리트 구조물 시공기술의 주요한 개발방향 중 하나는 공기단축기술이다. 공기단축을 실현할 수 있는 다양한 방법이 있지만 조기소요강도 발현을 위한 콘크리트의 양생기간을 단축하는 것은 가장 근본적이며 혁신적인 기술분야에 해당된다. 콘크리트의 양생기간 단축은 시멘트의 수화도에 좌우된다. 양생기간 중 콘크리트가 인위적으로 고온에 노출될 때 시멘트의 수화도가 증진됨으로써 거푸집 탈형을 위한 조기소요강도 발현기간이 짧아지므로, 전체적인 공기단축과 동시에 거푸집 비용의 절감이 가능하게 된다. 이와 같이 콘크리트 타설초기 인위적으로 양생온도를 높이는 양생방법을 온도 제어 양생기술이라 한다[1].

다양한 콘크리트 양생기간 단축방법이 제안되었다. 현재 가장 범용적으로 사용되는 온도 제어 양생기술은 고온 증기 양생방법이다. 콘크리트제품 생산공장에서 공장제품의 생산기간 단축을 위하여 널리 적용되고 있으며, 토목 및 건축 현

장에서도 미리 설치된 제작장에서 고온 증기 양생방법을 적용하여 공기단축을 실현하고 있다[2]. 또한, 거푸집 자체에 온도 제어 기술을 적용한 개선된 온도 제어 양생기술도 개발되었다. 주로, 전열선을 이용한 양생방법이며, 강재 거푸집 및 콘크리트 내부 철근에 전열선을 부착하여 온도를 제어하는 방법으로 영하 20°C 이하 극한 환경에서의 시공사례가 보고되어 있다[3]. 최근에는 한국철도기술연구원은 마이크로웨이브 발열시스템을 거푸집에 적용하여 기존의 고온 증기 양생방법에 비해 전기적 효율성을 극대화한 발열거푸집을 개발하였다. 강재거푸집에 부착된 마이크로웨이브 발열시스템과 컨트롤러를 통해 양생온도를 제어하여, 시멘트의 수화를 촉진시켜 조기에 탈형을 위한 소요강도를 확보하는 방법이다.

이상과 같은 온도 제어 양생기술의 성공적인 적용을 위해서는 초기재령에서 콘크리트 강도의 평가가 매우 중요하다. 양생초기 소요강도가 발현되지 않은 상태에서 거푸집을 탈형하거나 동바리를 제거하였을 경우 구조물이 붕괴하는 등 심각한 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 콘크리트의 강도 발현을 평가하기 위한 가장 기본적인 이론은 성숙도(Maturity) 이론이며, 콘크리트 온도와 재령의 함수로 정의된다[4,5]. 양생 중 콘크리트의 성숙도와 강도발현과의 관계

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5661, E-mail : thkoh@krri.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.5.365>

를 도출하여 재령 별 콘크리트강도를 예측하는 방법도 제시되었다[6,7]. 이들 방법은 양생 중 콘크리트의 온도를 계측하여 TTF(Temperature-Time Factor)또는 등가재령을 계산하고 콘크리트 발현강도와 상관관계를 자료화하여 실제 타설 시 이를 활용하여 콘크리트 강도를 추정하는 방법이다. 이와 같은 방법은 콘크리트가 받는 온도이력에 근거하기 때문에 현재 개발된 온도 제어 양생기술, 즉 고온 증기 양생 및 전열선 양생 방법으로 양생되는 콘크리트의 강도발현특성을 규명하는데 효과적으로 사용되어 왔다.

본 연구의 목적은 한국철도기술연구원에서 개발한 마이크로웨이브 발열거푸집으로 양생한 콘크리트의 조기강도 발현특성을 규명하는 것이다[8]. 개발된 방법은 마이크로웨이브로 Fe Base의 마이크로웨이브 발열물질을 자극하여 열원으로 만들어 거푸집의 온도를 조절하며, 결국은 콘크리트의 온도를 제어하여 콘크리트의 강도를 촉진시키는 방법이기 때문에 강도발현특성을 위한 성숙도이론에 근거한 기존의 방법을 그대로 적용할 수 있다. 본 연구에서는 대형 Mock-up 시험체에 개발된 양생방법을 적용하고 코어 압축강도시험을 통하여 소요강도 조기 발현을 습윤양생과 비교 확인하며, 시험과정에서 계측한 온도 데이터를 기반으로 TTF와 등가재령을 근거로 조기강도예측을 위한 모델을 구축하였고 개발된 거푸집이 발열이력과 코어 강도 치와의 상호관계를 분석하여 간편하게 조기강도를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구의 성과는 실험실 환경에서 소규모의 시험체가 아닌 실규모에 해당하는 대규모 Mock-up 시험을 수행하였다는 점과 향후 개발 양생방법을 실구조물에 적용할 때 조기강도 예측을 위한 필수적인 자료를 획득한다는 것에 큰 의미가 있다.

2. 본 론

2.1 마이크로웨이브 발열거푸집 개요

본 논문에서 제시하고 있는 마이크로웨이브 발열거푸집은 마이크로파 발생장치로 거푸집 자체를 바로 가열하는 방식이 아니며, Fe Base의 마이크로웨이브 발열물질을 마이크로파에 노출시켜, 효율성을 극대화 시켰기 때문에 기존의 개발된 기술[9]과는 근본적으로 다르다.

Fe Base의 마이크로웨이브 발열물질은 전기적으로 부도체, 즉 중성이지만 분자구조 자체는 Fig. 1[10]과 같이 양극 및 음극으로 분류되어 분자의 한 쪽 끝은 양전하를 띠고 다른

Fig. 1 Scheme of dipole

한 쪽 끝은 음전하를 띠고 있는 분자 쌍극자로 되어있다.

이러한 물질에 전계를 가하면 물질을 구성하고 있는 모든 분자들의 양전하를 띤 부분은 음극을 향하고, 음전하를 띤 부분은 양극을 향하여 정렬하게 된다. 이때 전계의 방향이 바뀌면 앞서 정렬되어 있던 분자들은 전계의 방향을 따라 Fig. 2[10]와 같이 회전하여 재정렬하게 되며 재정렬하는 과정에서 분자간의 마찰이 일어나 열이 발생하게 된다. 따라서 전계의 방향을 연속적으로 바꾸어 주면 마찰열이 증가하여 물질의 전 부분이 가열되는 유전가열이 발생된다.

발열거푸집도 2.45GHz 마이크로웨이브에 의한 Fe Base의 마이크로웨이브 발열물질의 유전가열을 이용하는 것으로서, 강재 거푸집 외부에 발열소재를 밀착시켜 부착한 후 마이크로웨이브를 사용하여 발열소재를 가열하고, 발열소재로부터 발생된 열에너지가 강재 거푸집을 통해 콘크리트에 전달되어 콘크리트의 양생을 촉진하는 기술이다(Fig. 3)[11]. 이 기

Fig. 2 Scheme of dipole movement

Fig. 3 Scheme of microwave heating form

술은 강재 거푸집 외부에 고온의 증기를 접촉시켜 열에너지가 강재 거푸집을 통해 콘크리트에 전달되는 증기양생과 유사한 방법으로, 증기의 열에너지 대신 마이크로웨이브 발열 소재를 통해 발생된 열에너지가 콘크리트에 전달되는 것이다. 이때 발열소재를 가열시키는 마이크로파는 강재거푸집 외부에 설치된 공진박스 내에서만 발생하기 때문에 콘크리트에 영향을 주지 않는다. 즉, 마이크로웨이브에 의해 콘크리트 내부의 수분을 건조시켜 시멘트 수화에 악영향을 미치는 것이 아니라 증기양생과 동일하게 60°C 정도의 열에너지만을 공급하여 현장타설 콘크리트에서도 시멘트의 초기 수화를 촉진하는 것이다.

2.2 발열온도이력에 따른 조기강도

2.2.1 실험개요

개발된 발열거푸집의 조기강도 발현특성을 평가하기 위하여 발열온도이력이 서로 다른 6차의 Mock-up 실험을 수행하였다. 레미콘 현장 타설 중에는 일반적인 절차에 의하여 진동 다짐을 시행하였다. 모든 실험에서 타설 후 3시간 동안은 전양생을 실시하였다.

6차의 실험 중 5차까지의 실험은 발열거푸집을 적용한 실험으로, 거푸집 탈형을 위한 소요강도 5MPa[12]를 확보할 수 있는 발열이력을 도출하기 위하여 발열이력을 변수로 반복 수행되었다. 1차부터 4차까지의 실험은 최고온도와 거푸집 탈형 후 보온조치를 달리하여 실험을 수행하였으며, 5차는 4차와 동일한 조건으로 재차 실험하였다. 5차에 걸친 실험에서 거푸집의 발열이력에 대한 설명은 2.2.2장에 상세하게 제시하였다.

6차 실험은 비교를 위한 실험으로 발열거푸집을 적용하지 않고, 일반습윤양생을 적용한 실험이다. 일반적인 강재거푸집을 이용하였으며, 타설 후 3시간의 전양생 후에는 양생포를 덮고 살수작업을 통해 습윤상태를 유지하고, 타설 후 5일에 거푸집을 탈형하였다. 1차에서 5차까지는 3시간 동안 전양생된 콘크리트를 12시간 동안 발열양생하고, 7시간 동안 발열거푸집을 존치시킨 후에 탈형하였다.

Fig. 4는 길이 2m, 폭 1m, 높이 2m의 콘크리트 Mock-up

Fig. 4 Form works

Table 1 Mix proportions of concrete

f_{ck} (MP)	W/B	S/a	Mix Amount (kg/m ³)					
			W	C	S	G	FA	SG
24	52.3	49.3	169	142	867	908	65	116

시험체 시공을 위한 거푸집 준비작업을 나타낸 것이다. 시험체에는 온도 및 건조수축에 저항하기 위한 보강근으로서, 직경 10mm의 철근을 20cm 간격으로 배근하였으며, 사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다.

시험체 내부에는 Fig. 5와 같이 총 2개의 열전대 온도계를 중심부와 표면에 설치하였으며, 초기에는 1분마다 후기에는 1시간마다 온도를 측정하였다.

압축강도는 시험체로부터 직경 10cm, 높이 1520cm의 원형코어를 채취하여 UTM을 이용하여 시험하였다(Fig. 6 참조). 압축강도의 측정은 발열 촉진양생이 완료되는 초기시점(타설 후 22시간 후)과 타설 후 180일이 지난 시점에 측정하였다. 초기 압축강도 측정은 1차에서부터 5차까지 모든 시험체에서 코어를 분리하여 실험하였으며, 180일의 압축강도 측정은 대표적으로 발열양생과 일반습윤양생 콘크리트의 압

Fig. 5 Test specimen and temperature monitoring position

Fig. 6 Compressive strength test

축강도를 비교하기 위해서 1차와 6차 실험체에서 코어를 분리하여 실험을 수행하였다. 압축강도 산정 시 코어 높이에 대한 보정을 수행하였다[13].

2.2.2 발열이력

모든 시험체는 동일하게 콘크리트 타설 후 3시간동안 약 20°C온도에서 전양생을 실시하였다. 전술한 바와 같이, 거푸집의 발열이력에 따른 강도특성을 분석하기 위하여 5차에 걸쳐 발열이력 중 최고설정온도(Max. Temp.)와 거푸집 탈형 후 보온조치 방법을 변수로 하였다. 모든 경우에 발열거푸집의 발열시간은 12시간으로 동일하게 하였다. 발열시간(heating time)은 발열거푸집의 온도상승에 필요한 시간과 최고설정온도의 지속시간의 합을 의미한다. 발열거푸집의 발열속도를 측정된 결과 1시간 동안 15도 상승하는 것으로 확인되었다. 따라서 온도상승시간은 설정온도와 대기온도의 차에 따라 달라지며, 나머지 시간동안은 설정온도가 지속된다. 이때 4차와 5차 시험에서는 최고온도와 보온조치 방법이 모두 동일하게 사용되었다. Table 2는 시험체에 적용된 발열이력을 정리하여 나타내고 있다. 6차 실험 시험체는 일반습윤양생 되었다. 3시간의 전양생 후 충분히 물을 뿌리고, 수분의 손실을 막기 위하여 비닐과 양생포를 덮어 양생하였다.

Table 2 Curing cycle* for the tests

		Max. Temp. (°C)	Heating time (hr)	Insulation
Heat curing	1 st	55	12	Curing blanket
	2 nd	55	12	Air cap
	3 rd	40	12	Vinyl (0.5mm)
	4 th	45	12	Vinyl (0.5mm)
	5 th	45	12	Vinyl (0.5mm)
Moisture curing	6 th	-	-	Curing blanket

*Curing Cycle

Fig. 7 Temperature changes measured at the surface of concrete structure

Fig. 8 Temperature changes measured at the center of concrete structure

인할 수 있다. 발열 최대온도가 40°C~45°C인 3차에서 5차까지의 온도측정결과는 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 6차의 경우는 발열거푸집을 적용하지 않은 경우로 발열거푸집을 적용한 경우에 비하여 표면온도가 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 콘크리트 타설 후 80시간까지의 Mock-up 시험체 중심부 온도측정결과를 나타내고 있다. 발열양생의 중심부 온도가 일반습윤양생의 중심부 온도 보다 10~25°C 이상 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 콘크리트 외부 즉, 발열거푸집으로부터 공급되는 발열온도에 콘크리트 자체의 내부 수화온도가 더해져 일반습윤양생에 비해 내부온도가 크게 상승하였기 때문이다. 발열 최대온도를 55°C로 설정하고 단열 에어캡(Air cap)을 이용하여 철저한 보온조치를 한 2차 Mock-up 시험체의 중심부 온도가 가장 높은 것을 볼 수 있다. 3차와 6차의 중심부온도는 각각 60시간과 50시간까지 측정 후 온도계 손상으로 이후의 온도측정은 불가능하였다. 이상의 온도측정결과는 이후 제시될 발열거푸집이 콘크리트의 성숙도에 미치는 영향을 분석하기 위한 온도자료로 활용하였다.

2.2.3 온도측정결과

Fig. 7은 콘크리트 타설 후 60시간까지의 Mock-up 시험체 콘크리트 표면의 온도측정결과를 나타내고 있다. 1차의 측정결과는 계측오류로 인하여 획득할 수 없었으므로 2차부터 6차까지의 결과만을 나타내었다. 2차의 온도그래프에서 볼 수 있듯이 발열거푸집의 최대 발열온도가 55°C인 경우 콘크리트 표면의 온도는 75°C 이상까지 상승하는 것을 확

2.3 코어강도 결과 및 분석

2.3.1 압축강도 고찰

Fig. 9는 콘크리트 양생 후 재령 22시간과 재령 180일의 코어강도를 나타내고 있다. 6차의 일반습윤양생의 경우 재령 22시간의 강도는 거푸집 탈형이 불가하여 코어강도가 아닌 시험체 타설과 동시에 제작되고 동일한 조건에서 양생된 일반공시체의 평균압축강도 측정결과이다. 일반습윤양생(6th)의 초기 평균강도가 2.3MPa인데 반하여 발열거푸집 1차 및 2차의 압축강도 평균은 10MPa로, 거푸집 탈형을 위한 소요강도 5MPa의 두배를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 철도기술연구원에서 개발한 발열거푸집의 조기강도 발현 효과를 분명하게 확인할 수 있다. 그러나, 발열거푸집을 적용하더라도 발열이력에 따라 강도발현이 큰 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉, 발열거푸집 최고온도가 가장 낮은 40°C인 경우(3rd)에는 평균압축강도가 3.8MPa에 불과하며, 45°C인 경우(4th)에는 8MPa로 나타났다. 이를 5차 실험을 통하여 재확인 결과 압축강도 결과는 9MPa인 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합할 때, 콘크리트의 강도가 발열거푸집의 최고온도에 매우 민감하게 영향 받는 것을 확인할 수 있으며, 45°C 이상의 발열거푸집 온도가 거푸집 조기 탈형을 위한 소요강도 5MPa 이상을 확보하는데 유효한 것으로 판단된다. 그러나, 최고온도가 55°C의 경우 콘크리트 내부의 온도가 70°C를 상회할 수 있으며, 이 같이 높은 온도는 콘크리트의 미세구조적 관점에서 바람직하지 않다는 지적이 있다[14]. 따라서, 본 연구에서 적용된 구조물의 규모와 콘크리트 배합조건, 외부환경조건에서 가장 바람직한 발열거푸집의 최고온도는 45°C인 것으로 판단된다.

또한, 재령 180일의 장기강도의 변화를 비교하였을 때, 발열거푸집은 25.8MPa인데 반해 일반습윤양생은 29.7MPa로 확인되었다. 결과적으로 축진양생된 콘크리트 장기강도가 설계강도(24MPa)를 기준으로 일반양생 콘크리트에 비하여 약 16% 강도가 적게 발현되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상을 Carino *et al.*[5]은 “Crossover Effect”라고 명명하였으며, 초기 수화과정에서 높은 양생온도를 받은 콘크리트의 초기강도는 큰데 반해 장기발현 강도가 낮은 현상을 의미한다.

Fig. 9 Compressive strength results for core samples

2.3.2 성숙도 이론의 적용과 검증

성숙도 이론은 양생 시 온도와 시간이 강도발현에 미치는 복합적인 영향을 분석하기 위하여 정립되었다[5]. 성숙도는 시간과 온도의 함수로 정의할 수 있는데, 서로 다른 양생이력을 갖고 있다고 하더라도 동일한 성숙도를 갖는 콘크리트이면 동일한 강도가 발현된다는 것이다. 이 이론에 근거하여 다양한 콘크리트의 목표강도와 특성에 맞는 고온 증기 양생이력 이 도출되었다[14].

성숙도 이론에 가장 많이 인용 사용되고 있는 표지(Index)는 시간-온도 계수(Time-Temperature Factor, TTF)와 등가재령(Equivalent age)이다. TTF는 Sau[6]의 연구에서 비롯되었으며, 식 (1)을 통해 결정할 수 있다.

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t \quad (1)$$

여기서, $M(t)$ 는 재령 t 에서 TTF(°C-hours), T_a 는 Δt 시간 동안의 평균온도(°C), T_0 는 기준온도로서 일반적으로 -10°C, Δt 는 시간간격(hour)이다. 따라서 TTF에서는 기준온도 -10°C 이하의 온도에서 수화가 불가능한 것으로 간주한다.

한편, Freiesleben Hansen and Pedersen[7]은 기준온도에서의 등가재령을 식 (2)와 같이 제시하였다. 이 식은 재료 고유 특성 치에 해당하는 E 의 함수로 제시되는데 이 값은 물-시멘트비 등에 따라 달라진다.

$$t_e(T_r) = \sum_0^t \exp \left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_r} - \frac{1}{273 + T_a} \right) \right) \Delta t \quad (2)$$

여기서, T_r 는 기준 양생 온도로서 20°C로 하였으며, $t_e(T_r)$ 는 기준 양생 온도에서의 등가재령(Hour), E 는 활성화 에너지(Activation Energy, J/mol), R 는 일반기체상수(Universal Gas Constant)로 8.3144J/mol/K이다.

본 장에서는 1차부터 5차까지 수행된 발열거푸집 실험의 콘크리트 표면온도데이터로부터 표면콘크리트의 성숙도를 TTF와 등가재령으로 각각 계산하고 각 Mock-up 시험체로부터 채취된 코어 압축강도와 상관을 분석하였다.

Fig. 10은 TTF와 코어 압축강도와의 상관관계를 나타내고 있다. 회귀분석을 통한 로그함수 추세선과 상관식을 나타내었으며, 상관계수 값은 0.904이다. 한편, Fig. 11은 등가재령과 강도와의 관계를 로그함수로 나타내고 있으며, (a)는 E 가 33.5kJ/mol (b)는 E 가 48.0kJ/mol 인 경우를 나타내고 있다. E 값이 클수록 높은 양생온도에서 성숙도가 크게 증가하는 특징이 있다. 또한, Carino *et al.*[4]에 의하면, 물-시멘트비가 0.45일 때 E 값의 범위는 30kJ/mol~64kJ/mol이며, 물-시멘트비가 0.6일 때, E 값은 31kJ/mol~56kJ/mol 범위에 있다고 보고한 바 있다. 등가재령방법에서 E 값이 48.0kJ/mol일 때 실험치와 상관계수 값이 0.98로 가장 우수한 것으로 확인되었다. 이때 등가재령과 코어강도와의 상관관계식은 다음 식 (3)과 같다.

$$S8.0Ln(t_e) - 36.6 \quad (3)$$

Fig. 10 TTF vs. strength curve

TTF 방법이 코어강도와 낮은 상관도를 나타내는 이유는 성숙도를 온도와 시간의 곱으로 정의하기 때문에 콘크리트나 양생방법의 특수성을 고려하는데 제한이 있기 때문으로 판단된다. 한편, 등가재령 방법은 Arrhenius 식에 근거하기 때문에 콘크리트의 재료 또는 발열방법의 특성을 고려하여 활성화 에너지 계수인 E 값에 따라 다양한 관계식을 정의할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 발열거꾸집으로 양생된 콘크리트의 조기강도예측을 위해서는 등가재령을 이용한 방법이 적합하다고 판단된다. 또한 등가재령과 코어강도와 의 상관관계식 (3)은 상관도가 우수하므로 해당 배합에 대하여 강도를 예측하는데 실질적인 사용이 가능하다고 판단된다.

2.4 중앙부 콘크리트의 조기강도 예측

발열면과 중앙부는 온도에 큰 차이가 발생하며 성숙도에 도 큰 차이가 있다. 따라서 본 발열거꾸집을 적용할 때 표면뿐 아니라 중앙부 콘크리트에 대한 강도를 예측하는 것이 안전성의 평가와 해석을 위하여 중요하다. Fig. 12는 그림 Fig. 11(b)를 수정한 그래프이다. 횡축을 로그스케일로 수정하고, 축 최대치를 1000hrs로 수정하였다. 이 그래프를 통해 중심부 콘크리트의 등가재령을 구할 수 있으며, 점선을 따라 압축강도를 예측할 수 있다. 2차 시험에서 타설 후 60시간, 4차 시험에서 타설 후 22시간, 6차 시험에서 타설 후 40시간의 중앙부 콘크리트의 압축강도 예측치는 1.8MPa, 6.1MPa, 19.4MPa임을 알 수 있다. 모든 실험에 대하여 22시간, 40시간 및 60시간의 중심부 콘크리트 강도예측결과를 Table 3에 정리하였다.

2차 발열양생에서, 타설 후 22시간의 표면 콘크리트의 강도가 13.8MPa이었지만 중심부의 강도는 0.9MPa에 지나지 않고 이후 급격히 증가하여 40시간에 14.4MPa, 60시간에 19.4MPa에 달하는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기에는 중심부 온도가 발열거꾸집의 영향을 받지 않다가 이후 수화반응과 함께 발열거꾸집의 영향으로 급격하게 강도가 발현되기 때문이다.

(a) $E=33.5\text{kJ/mol}$ (b) $E=48.0\text{kJ/mol}$

Fig. 11 Equivalent age vs. strength curves

Fig. 12 Strength prediction procedure by equivalent age for 2nd, 4th and 6th cases(at the center of concrete structure)

2.5 발열이력곡선 하부면적을 이용한 조기강도 예측

이상의 성숙도 이론에 의하면 시공중인 콘크리트의 온도 측정 없이는 강도예측이 불가능하다. 물론, 온도해석 등 해석적인 방법을 통해 강도예측을 할 수는 있지만 이를 위해

Table 3 Estimated strength by equivalent age for all test cases (at the center of concrete structure)

Curing method		Equivalent age (hrs)			Estimated strength (MPa)		
		22	40	60	22	40	60
Heating curing	1 st	99	451	808	0.1	12.3	17.0
	2 nd	108	587	1100	0.9	14.4	19.4
	3 rd	76	307	600	0	9.2	14.6
	4 th	122	476	1015	1.8	12.7	18.8
	5 th	100	478	930	0.2	12.8	18.1
Moisture curing	6 th	75	208	-	0	6.1	-

Fig. 13 Relationship between heating energy (area) and compressive strength

서는 발열거푸집의 온도해석모델을 구축하고 실험을 통해 검증해야 하는 등 많은 노력이 필요하다. 본 장에서는 발열거푸집의 발열이력으로부터 간편하게 콘크리트의 조기강도에 예측이 가능한 발열이력-강도 예측식을 제시하고자 한다. Fig. 13은 발열거푸집에 의한 발열곡선의 하부면적(Table 2)과 타설 후 22시간에서의 압축강도결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 발열곡선의 하부면적과 압축강도와는 선형관계를 나타내고 있으며, 상관계수가 0.94에 이른다. 그래프에 제시된 선형회귀식은 임의의 발열이력을 적용하였을 때, 재령 1일 이내의 표면 강도를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다. 즉, 본 연구에 적용된 동일한 콘크리트 배합이고, 발열곡선의 하부면적인 발열에너지가 500°C-hrs~700°C-hrs 범위에 해당되는 경우에 Fig. 13에 제시된 식이 유효하다.

3. 결 론

본 연구에서는 최근에 개발된 마이크로웨이브 발열촉진양생기술을 적용한 콘크리트의 강도발현특성에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 본 실험적 연구를 통해 획득한 결론은 다음과 같다.

1) 본 발열거푸집을 적용한 콘크리트의 재령 22시간에서

의 발현강도가 일반습윤양생된 콘크리트에 비하여 최소 2배 이상 큰 것을 확인하였다.

2) 본 실험에서 사용된 콘크리트 배합에 대하여, 발열거푸집 최고온도 45°C에서 12시간의 발열이면 22시간 이내에 거푸집 탈형을 위한 소요강도 5MPa 확보가 가능한 것으로 확인되었다.

3) 다만, 장기강도는 일반 습윤양생 보다 약 16% 적게 발현되는 것으로 확인되었지만 설계강도 이상의 강도가 발현되는 것을 확인하였다.

4) 성숙도 이론과 발현강도와와의 상관관계를 분석한 결과, Arrhenius 식에 근거하여 Hansen and Federsen이 제안한 등가재령식에서 활성화 에너지가 48kJ/mol일 때 발현강도와와의 상관도가 가장 우수한 것으로 확인되었다. 또한 이 분석결과에 근거하여 발현강도 예측을 위한 회귀식을 제시하였으며, 이를 이용하여 중앙부 콘크리트의 강도를 추정하였다. 발열거푸집이 적용되었을 때 중앙부 콘크리트의 발현강도는 일반습윤양생 방법에 비하여 최소 1.5배 높은 것으로 예측되었다.

5) 발열거푸집을 적용한 콘크리트 구조물의 표면부 콘크리트의 발현강도를 간편하게 예측할 수 있도록 실험결과를 발열이력곡선의 하부면적과 측정된 강도와와의 상관관계를 분석하였다. 분석결과, 발열이력의 하부면적에 해당하는 발열에너지와 측정강도의 선형관계를 확인하고 선형식을 제시하였다.

References

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) Specification on Concrete Construction, p.77.
- [2] A.K. Schindler (2004) Effect of temperature on hydration of cementitious materials, *ACI Materials Journal*, 101(1), pp. 72-81.
- [3] H.Y. Kang, S.G. Han, Y.S. Kim, J.S. Nam (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 KCI Journal*, Construction Articles, 21(2), pp. 62-66.
- [4] N.J. Carino and H.S. Lew (2001) *The Maturity Method: from Theory to Application*, Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington D.C., USA, p. 19.
- [5] N.J. Carino, H.S. Lew, C.K. Volz (1983) Early age temperature effects on concrete strength prediction by maturity method, *Journal of American Concrete Institute*, 80(2), pp. 93-101.
- [6] A.G.A. Saul (1951) Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure, *Magazine of Concrete Research*, 2(6), pp. 127-140.
- [7] P. F. Hansen, E.J. Pedersen (1977) Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete, *Nordisk Betong*, 1, pp. 21-25.
- [8] T.H. Koh, S.H. Hwang, S.S. Choi, K.H. Min, J.H. Yoo (2014) Application of accelerated heat curing technology to tunnel lin-

- ing concrete, *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp. 1133-1137.
- [9] W. Xuequan, D. Jianbo, T. Mingshu (1987) microwave curing technique in concrete manufacture, *Cement and Concrete Research*, 17(2), pp. 205-210.
- [10] C. Shibata (1993) *Industrial Microwave Power Engineering*, Denkishoin Publisher Co., Ltd., p. 8.
- [11] T.H. Koh (2014) Fast curing technology for concrete, special session, 2014 International Seminar on Innovations for Future Transportation.
- [12] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) Specification on concrete construction, pp. 111.
- [13] KS F 2422 (2007) Method of obtaining and testing drilled cores and sewed beams of concrete, Korean Agency for Technology and Standards, pp. 1-3.
- [14] H.J. Lee, S.D. Hwang, R. Khatib, H.K. Lee, K.H. Khayat (2012) Optimization of steam-curing regime for high-strength, self-consolidating concrete for precast, Prestressed Concrete Applications, *PCI Journal*, pp. 48-62.

접수일(2014년 5월 21일), 수정일(2014년 8월 14일),
게재확정일(2014년 9월 26일)

Tae hoon Koh : thkoh@ krri.re.kr
Korea Railroad Research Institute, Chuldo-banmulgwan-ro 176,
Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Seon keun Hwang : skhwang@ krri.re.kr
Korea Railroad Research Institute, Chuldo-banmulgwan-ro 176,
Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Do young Moon : dymoon@ ks.ac.kr
Dept. of Civil Engineering, Kyungshin University, Suyeong-ro 309,
Nam-gu, Busan 608-736, Korea

Jung hoon You : hoon0323@ gmail.com
JinYin.CO.Ltd., Chuldo-banmulgwan-ro 176, Uiwang, Gyeonggi-do
437-757, Korea

Jin woo Song : jwsong@ krri.re.kr
Korea Railroad Research Institute, Chuldo-banmulgwan-ro 176,
Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Ji soo Ko : koji85@ krri.re.kr
Korea Railroad Research Institute, Chuldo-banmulgwan-ro 176,
Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea