

적외선 화상기법을 이용한 시멘트 모르타르 특성의 실험적 평가

An Experimental Study for Characteristics Evaluation of Cement Mortar Using Infrared Thermography Technique

권성준* · Maria, Q. Feng**
Kwon, Seung-Jun · Maria, Q. Feng

Abstract

Recently, NDTs (Non-Destructive Techniques) using infrared camera are widely studied for detection of damage and void in RC (reinforced concrete) structures and they are also considered as an effective techniques for maintenance of infrastructures. The temperature on concrete surface depends on material and thermal properties such as specific heat, thermal conductivity, and thermal diffusion coefficient. Different porosity on cement mortar due to different mixture proportions can show different heat behavior in cooling stage. The porosity can affect physical and durability properties like strength and chloride diffusion coefficient as well. In this paper, active thermography which uses flash for heat induction is utilized and thermal characteristics on surface are evaluated. Samples of cement mortar with W/C (water to cement ratio) of 0.55 and 0.65 are prepared and physical properties like porosity, compressive strength, and chloride diffusion coefficient are evaluated. Then infrared thermography technique is carried out in a constant room condition (temperature 20~22°C and relative humidity 55~60%). The mortar samples with higher porosity shows higher residual temperature at the cooling stage and also shows reduced critical time which shows constant temperature due to back wall effect. Furthermore, simple equation for critical time of back wall effect is suggested with porosity and experimental constants. These characteristics indicate the applicability of infrared thermography as an NDT for quality assessment of cement based composite like concrete. Physical properties and thermal behavior in cement mortar with different porosity are analyzed in discussed in this paper.

Keywords : NDT, Infrared thermography, cement mortar, porosity, quality assessment

요 지

최근 들어 적외선을 이용하여 콘크리트 구조물의 결함 또는 공동 등을 평가하려는 비파괴 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이는 유지관리기법의 중요한 부분을 이루고 있다. 적외선 화상분석(Infrared Thermography)을 콘크리트 표면에 적용할 경우, 콘크리트의 표면온도는 표면을 구성하는 재질과 열적특성(비열, 열전도율, 열전달율)에 따라 그 응답이 다르게 나타나게 된다. 서로 다른 배합을 가지는 시멘트 모르타르에서는 공극률이 다르게 구성되고, 표면에서 공극률의 차이는 열에 노출된 뒤, 냉각되는 과정에서 열적 거동이 다르게 평가된다. 한편 이러한 공극률은 강도 및 염화물 확산계수와 같은 역학적/내구적 특성에 영향을 주기도 한다. 본 연구에서는 외부에서 열을 가하여 측정하는 능동방식(active type)을 이용하여, 표면의 온도변화를 분석하였다. 물-시멘트비 55%와 65%인 시멘트 모르타르 시편을 제작하였으며, 공극률, 압축강도, 염화물 확산계수 등의 물리적 특성값들이 평가되었다. 이후 동일한 실내조건(온도 20~22°C, 습도 55~60%)에서 적외선 화상분석 기법을 적용하였다. 시간의 경과에 따라 공극을 많이 포함하는 시편의 경우, 표면 온도가 상대적으로 증가하였으며, 온도가 일정해지는 시점(임계시점)이 단축되고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 콘크리트와 같이 공극과 골재를 가지고 있는 복합재료의 품질 평가에 적용할 수 있음을 시사한다. 한편 공극률과 실험상수를 고려하여, 공극률에 따라 변화하는 임계시간에 대한 계산식을 제안하였다. 본 논문에서는 시멘트 모르타르의 공극률의 변화에 따른 물리적 변화와 이에 따른 열특성 변화가 논의될 것이다.

핵심용어 : 비파괴 기법, 적외선 화상분석, 시멘트 모르타르, 공극률, 품질 평가

1. 서 론

최근들어 비파괴 기법(Non-Destructive Technique; NDT)중 하나인 적외선을 이용한 온도변화 분석기법(thermography)은

다양하게 적용되고 있으며, 화상처리 분석기술은 전송장치(protocol)와 컴퓨터 주변기기의 발달을 통해 처리 시간이 짧아짐에 따라, 빠르게 발전하고 있다. 이러한 기술은 주로 항공기나 금속표면의 공극 및 품질관리를 위해서는 상업화되

*정회원 · 교신저자 · University of California, Irvine 객원연구원 · 공학박사 (E-mail : jjuni98@yonsei.ac.kr)
**University of California, Irvine 투목공학과 교수 (E-mail : mfeng@uci.edu)

어 적극적으로 사용되고 있지만(Steven *et al.*, 2007a), 콘크리트와 같이 골재와 공극이 혼재되어 있는 복합재(composite)에 대해서는 매우 제한적으로 적용되고 있다. 주로 단순 적외선 온도측정법(passive thermography)이 주로 사용되어 왔으나, 최근에 품질관리 측면에서는 가열온도측정법(active thermography)의 사용이 증가하고 있다(Steven *et al.*, 2007a; 2007b; 2006). 매우 짧은 순간에 열을 가한 뒤, 온도 변화를 측정하는 플래시 타입(flash thermography)에서는 표면이 공간적으로 균일하게 가열되고, 그동안 적외선 카메라가 온도 변화를 측정하게 된다. 표면이 균일하여 온도변화가 예측 가능하다 하더라도, 내부에 공극이나 불연속면이 있는 경우, 온도거동은 다르게 평가된다. 매우 제한적이지만, RC (Reinforced Concrete) 구조물의 결함 검출을 위하여 시험적으로 이러한 연구가 진행되고 있다(Tanaka, 2005).

이러한 적외선 특성을 이용하여 콘크리트에 대해 많은 연구가 진행 중이다. 주로 내부의 공극 또는 결함 탐사 목적으로 적외선 탐사기법이 이용되고 있지만(심준기 등, 2008; 박석균 2003; 윤영호 등 2003; Maierhofer *et al.*, 2006), 아직도 정량적으로 해결해야 될 문제점을 가지고 있다. 그 이유는 열전도 또는 확산이 금속에 비해, 너무나 낮으므로 지속적으로 열이 가해져야 하고(Spicer *et al.*, 1998), 재료 자체가 골재와 공극 등이 혼재되어 있으므로 정량화하는데 어렵기 때문이다(Steven *et al.*, 2007a). 또한 실제 시공 중인 구조물의 경우에는 표면 상태에 따라서 열특성의 차이가 발생하게 되므로, RC 구조물에 대한 정량적인 열화상 평가는 매우 어려운 실정이다. 한편 이러한 기법은 매립된 철근을 가열하여 매립된 철근의 위치 평가에도 사용되기도 하며(Hillemeier, 1984) 부식이 발생할 경우, 철근과 콘크리트의 부착면에 공극이 발생하게 되므로 철근 부식탐지에 시험적으로 이용되고 있기도 하다(Spicer *et al.*, 1998). 세라믹 재료의 경우, 표면이 매우 고르므로, 초기 미세균열 탐지를 위하여, 적용된 경우가 있지만, 매우 제한적인 수준이라고 할 수 있다(CAMDI, 2008).

콘크리트 내부의 공극은 구조적, 내구적 특성과 아주 밀접하게 연계되어 있는데, 공극을 통하여 열화인자의 유입이 발생하게 되고, 수분을 보관하거나 발산하는 저장고 역할을 하므로, 콘크리트 품질 평가를 위해서 매우 중요한 인자라고 할 수 있다(박상순 등, 2009; Song and Kwon, 2007). 이러한 공극은 역학적 특성 뿐 아니라 내구적 특성과도 직접적으로 관련지어 질 수 있으므로 주된 열화지표로 사용되고 있다. 표면에 공극을 많이 가지고 있는 콘크리트의 경우, 짧은 시간에 열에 노출되면, 공극량에 따라서 표면의 열특성 변화가 발생하게 된다.

본 연구는 적외선 열화상 기술을 이용하여 콘크리트의 품질 평가에 대한 적용성을 평가하는 것이다. 이를 위해, 두가지 배

합을 가진 시멘트 모르타르에 대하여, active thermography 방식을 이용하여, 짧은 시간에 강한 열을 가한 뒤, 시간에 따라 변화하는 열특성을 분석하였다. 시편의 물리적 성질을 파악하기 위해, 동일배합의 시편을 대상으로 압축강도, 공극률, 그리고 염화물 확산계수가 평가되었다. 한편 공극률에 따라 변화하는 임계시간(온도감소후 온도가 일정해지는 시간)의 평가를 위한 예측식을 제안하였다. 본 논문에서는 시편의 배합특성에 따라 변화하는 적외선 열특성 변화와 물리적 특성(공극률, 압축강도 및 염화물 확산계수)의 변화가 분석된다.

2. 시멘트 모르타르 실험 및 결과

2.1 배합 및 실험계획

본 연구에서는 2가지 물-시멘트비를 가지는 시멘트 모르타르를 대상으로, 공극률 및 압축강도, 염화물 확산계수가 실험되었다. 재령 28일에 KS규격(KS F2405)에 따라 압축강도를 수행하였으며, 수중양생 91일 재령의 콘크리트에 대하여, 공극률 및 염화물 확산계수가 측정되었다. 강도, 공극률 그리고 염화물 확산계수는 역학적 및 내구적 평가를 하기 위해 매우 중요한 인자들이다. 염화물 확산계수는 NTBUILD 492에 따라 비정상상태의 실험을 수행하였으며, 공극률은 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry)를 통하여 공극률을 수행하였다. 건설부재에서는 콘크리트가 대부분 사용되고 있다. 그러나 본 연구에서는 골재에 대한 열특성 변화를 배제하기 위해, 시멘트 모르타르를 사용하였으며, 콘크리트에 대한 영향은 추후 연구가 수행될 것이다. Table 1에서는 시험시편에 대한 배합표를 나타내었다. 시멘트 특성 및 모래의 특성은 Table 2 및 Table 3에 나타내었다.

2.2 물성특성 실험 결과

전술한대로 본 논문에서는 염화물 확산계수, 공극률, 그리고 압축강도가 측정되었는데, 그 결과를 Table 4 및 Fig. 1에 정리하였다. 본 연구에서 적용된 적외선 기법을 이용한 시멘트 모르타르의 특성평가의 최종목표는 실제 공용중인 RC 구조물의 특성평가에 적용하는 것이다. 그러므로 공극률 및 수화물의 양이 거의 일정한 상태인 91일 장기 존치된 시편에 대한 공극률 및 확산계수를 사용하였다. 아쉽게도 91일에 대한 압축강도 실험결과는 없었으므로, 재령 28일에 압

Table 1. Mix proportions for test

W/C (%)	Flow (cm)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	Air (%)
55	30	267	485	1,353	1.00
65	30	267	407	1,445	1.54

Table 2. Composition and properties of cement

Type	Composition (%)							Properties			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Setting time (hour : min)	
Ordinary Portland Cement	21.5	5.10	3.04	61.3	2.85	2.21	1.93	3.15	3,450	Initial 4:10	Final 5:50

Table 3. Properties of sand

Specific density (g/cm ³)	Absorption (%)	Unit weight (g/cm ³)	Fineness modulus
2.60	1.05	2.81	2.65

Table 4. Results for characteristics of cement mortar samples

W/C	Diffusion coefficient (×10 ⁻¹² m ² /s) at 91days	Porosity (%) at 91days	Compressive strength (MPa) at 28days
55%	6.82	15.50	30.7
65%	11.26	20.97	23.1

축강도 결과를 Table 4에 수록하였다.

단위 시멘트량이 많아지면서, 야기되는 내부공극의 감소는 역학적, 내구적 성능 개선으로 발전하게 된다. 강도측정 결과(Fig. 1(b))는 전형적인 물-시멘트비의 증가에 따른 강도 감소결과를 나타내고 있다. 한편 공극률과 확산계수의 결과에서는(Fig. 1(b)), 물-시멘트비가 낮을수록 공극률과 염화물 확산계수의 감소를 확인할 수 있다. 물시멘트비가 55%에 65%로 증가함에 따라, 강도는 75.2% 수준으로 감소하였으며, 공극률 및 확산계수는 135% 및 165% 수준으로 증가하였다. 공극률의 증가에 따른 강도의 감소, 확산계수의 증가는 기존의 여러 문헌에서 실험적, 해석적으로 고찰되었다(송하원 등 2005, Maekawa *et al.*, 1999).

3. 적외선 열화상기법(thermography)를 이용한 열특성 분석

3.1 기본 이론

아주 넓은 금속 박판이 아주 짧은 시간에 일정하고 높은 온도에 노출되면, 표면의 온도($T_{surf}(t)$)는 가열 시간($t=0$)이 후, 식 (1)과 같이 주어진다(Shepard *et al.*, 2007a).

$$T_{surf}(t) - T_{surf}(0^-) = \frac{Q}{\sqrt{k\rho c \pi t}} \quad (1)$$

여기서, k 는 열전도(thermal conductivity), c 는 비열(heat capacity), ρ 는 물체의 비열을 나타낸다. Q 는 입력된 에너지 플럭스이고, $T_{surf}(0^-)$ 는 가열이 시작된 순간 표면온도를 나타낸다. 양변을 로그로 취하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다 (Carslaw and Jaeger, 1959).

$$\ln(\Delta T(t)) = \ln\left(\frac{Q}{e\sqrt{\pi}}\right) - 0.5\ln(t) \quad (2)$$

여기서, e 는 열유출율(thermal effusivity= $\sqrt{k\rho c}$)이다. 로그축으로 도시하게 되면 식 (2)는 기울기 -0.5를 가지는 직선으로 구성되며, 그 절편은 입력에너지와 열유출율에 의해 결정된다. 이러한 특성은 열전달에 있어서 표면 공극이나 결함을 가지는 물질의 거동을 정의하는데, 유용하게 사용되기도 한다 (Krapez *et al.*, 1994, Carslaw and Jaeger, 1959).

본 논문은 공극내의 공기와 콘크리트와의 기본적인 열전도 및 확산특성의 차이에 기반을 둔 것이다. RC 구조물을 대표하는 강재와 콘크리트, 그리고 공기의 열특성을 표로 정리하면, Table 5와 같이 나타낼 수 있다.

3.2 측정장비의 개요

본 연구에서 적용한 장비는 Thermal Wave Imaging Inc. 제품으로 적외선 카메라는 300×256 화소율을 가지고 있으며, 5 kJ의 용량을 가지고 있는 두 개의 크세논 램프 튜브(xenon lamp tube)를 이용하여 열을 발산시킨다. 지속시간은 2.5 ms로 매우 짧은 시간동안 빛을 발산한 뒤, TSR (Thermographic Signal Reconstruction) 기법을 통하여 raw data, 1st derivative, 2nd derivative가 자동적으로 구축되도록 고안되었다. 데이터 취득시간은 180 sec이며, 초당 2.5 frame의 사진을 찍도록 설정하였다. Fig. 2에서는 측정 장비의 개요 및 장비의 사진을 나타내었는데, 시편은 우측의 후드안에 존치하게 되며 외부 및 모니터를 통하여 시편의 적

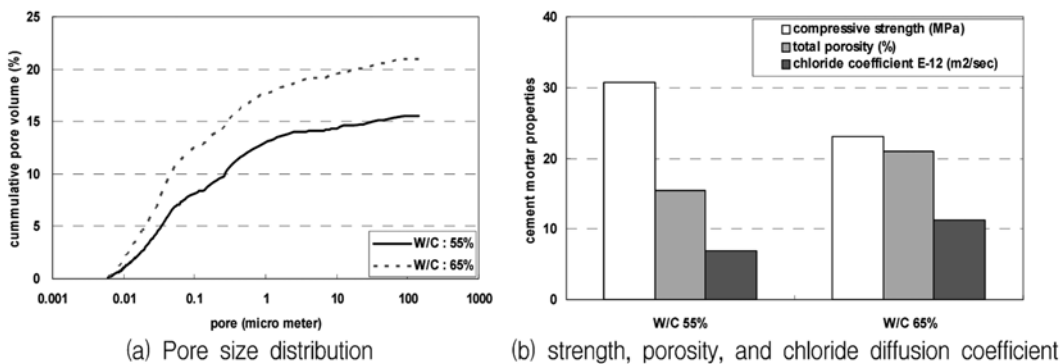


Fig. 1 Results of physical test results (strength, porosity, and chloride diffusion coefficient)

Table 5. Relevant thermal properties for steel, concrete, and air (Spicer *et al.*, 1998)

Type	Steel	Concrete	Air
Thermal conductivity (cal·sec ⁻¹ ·cm ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0.101	0.00449	6.262×10 ⁻⁵
Specific heat (cal·g ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0.120	0.513	0.240
Density (g·cm ⁻³)	7.8	2.403	1.18×10 ⁻³
Thermal diffusivity (cm ² ·sec ⁻¹)	0.108	0.00364	0.221
Thermal effusivity (cal·cm ⁻² ·°C ⁻¹ ·sec ^{-1/2})	0.307	0.0744	1.33×10 ⁻⁴

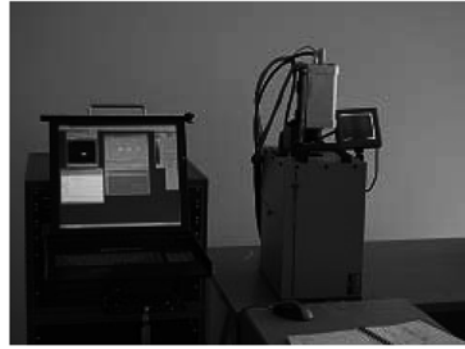
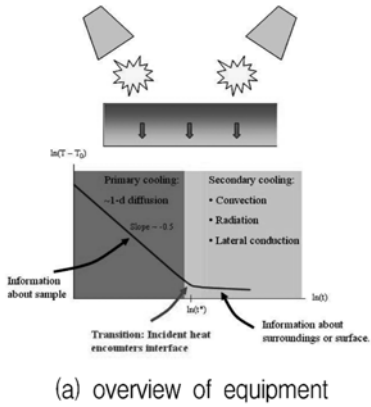


Fig. 2 Test Equipments for Infrared Thermography

외선 화상변화를 관측하도록 고안되었다.

3.3 콘크리트 특성실험과 적외선 화상분석 결과 분석

1) 시편의 준비 및 적외선 촬영

각 시편은 배합에 대하여 2개를 준비하였으며, 10×20 cm, 두께 2 cm의 원주형 시편을 사용하였다. 시편은 91일간 수중 양생되었으며, 1주간 온도 20~22°C, 상대습도 R.H. 55~60%의 조건에 존치된 후 실험을 수행하였다. 각 시편에 대하여 16개의 측정점을 임의로 선정하였으며 두 개의 시편 이므로 총 32개의 측정값의 평균을 사용하여 배합을 대표하도록 하였다.

2) 적외선 측정결과의 분석

Table 4에서 알 수 있듯이, 공기의 열확산계수는 60배 정도 콘크리트보다 크다. 표면에 공극이 많은 시편의 경우 미

세하지만 작은 비열을 가지고 모르타르 표면에 열확산이 빠르게 발생하게 된다. 전술한대로 금속박판의 경우, 표면 또는 내부의 결함은 flash 이후 변화하는 열특성을 적외선 카메라로 관측하여 평가할 수 있는데(Shepard 2007a,b), 이렇게 측정할 수 있는 가장 큰 근거는 매우 큰 열전도 및 열확산 특성을 가지고 있기 때문이다. 콘크리트의 경우, 금속에 비하여 매우 적은 열특성을 가지고 있으며, 공극과 골재를 포함하고 있으므로, 이러한 기법을 적용하기에 매우 어려운 것이 사실이다

Flash 이후 시간의 변화에 따라 변화하는 적외선 카메라 측정결과를 Fig. 3에 나타내었는데, 시간의 경과와 배합차이에 따라 시각적으로 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다.

위와같이 시간에 따라 변화하는 적외선 화상정보를 정량적으로 분석하기 위해, 화상 해석 프로그램인 Mosaic program을 이용한 하였다. 이 프로그램은 최대 하나의 시편에 대해 16

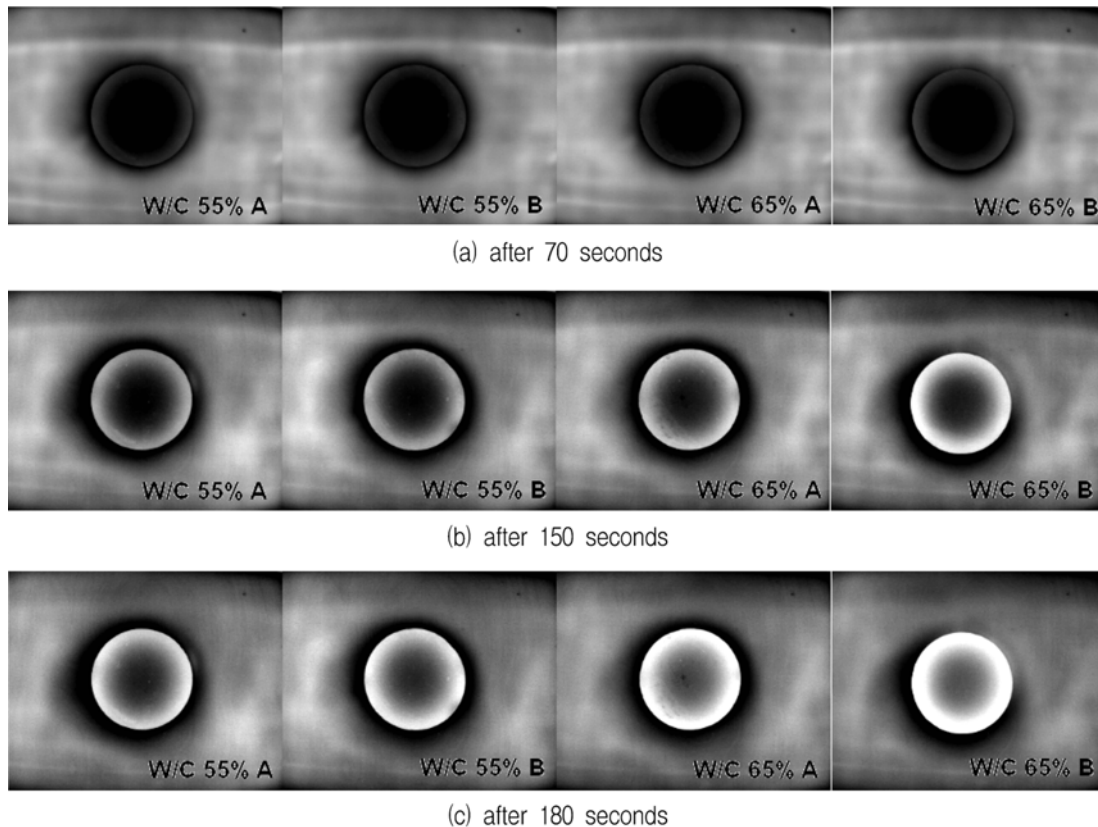


Fig. 3 Thermography with cooling stage

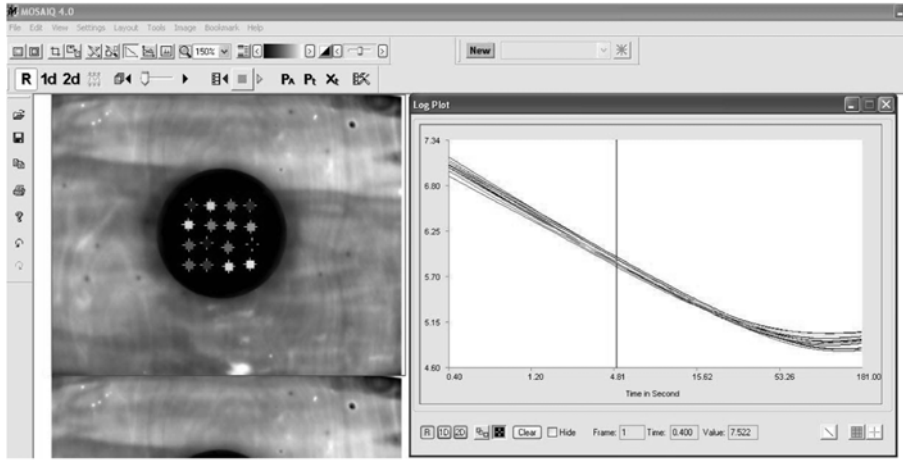


Fig. 4 Thermography sampling through mosaic program (16 spots for 1 mortar sample)

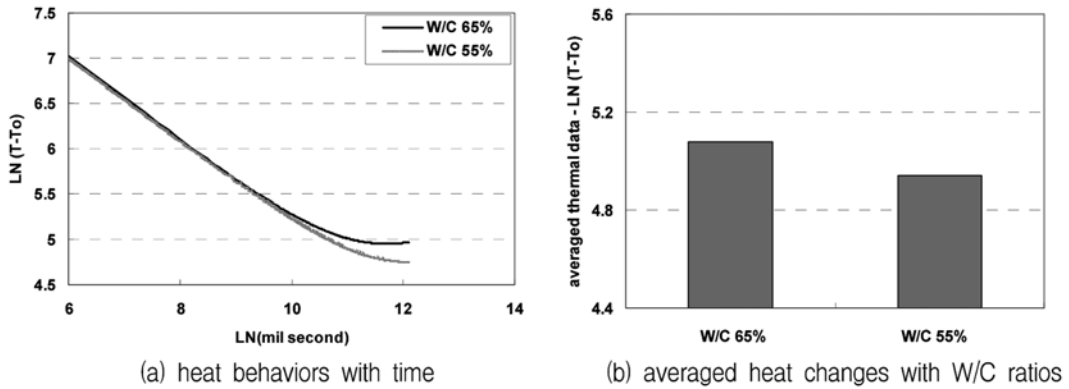


Fig. 5 Results of thermography with different W/C ratios

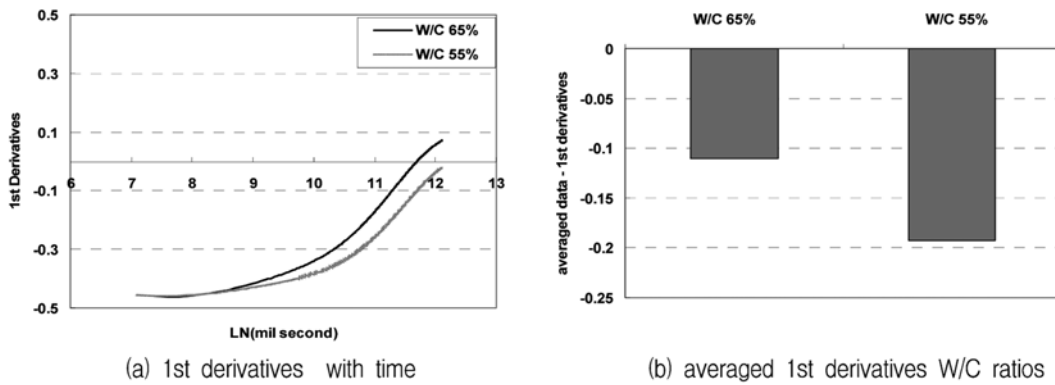


Fig. 6 Results of 1st derivatives with different W/C ratios

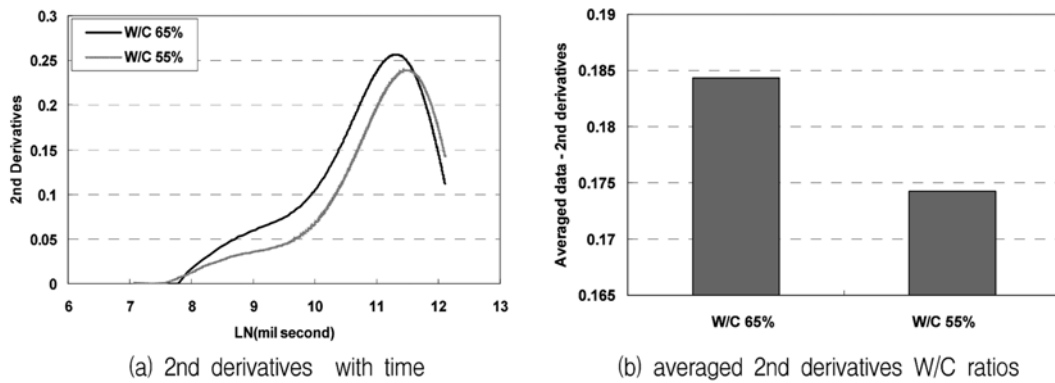


Fig. 7 Results of 2nd derivatives with different W/C ratios

개에 정보를 분석할 수 있으며, Raw data뿐 아니라, 시간에 따른 1st derivatives와 2nd derivatives를 분석할 수 있도록 고안된 것이다. Fig. 4에서는 W/C 55% 시편에 대하

여, 16개 측정점을 측정하여 시간에 따라 변화하는 온도변화를 Mosaic program에서 나타내었다.

Fig. 5~Fig. 7은 raw data(temperature), 1st derivatives,

2nd derivatives와 각각의 평균값을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 측정된 적외선 측정값은 Mosaic program을 이용하여, Fig. 5~7과 같이 분석될 수 있는데, 각 경우에서 평균값은 측정시간인 180초 동안 변화하는 값의 평균을 구한 것이다.

Fig. 5~Fig. 7에서 알 수 있듯이, 두가지 배합에 따라 제조된 시편에 대하여, 시간에 따른 열특성 변화를 확인할 수 있다. 짧은 시간의 섭상에 의해서는 표면이 가열된 콘크리트는 초기 수초간에서는 열특성 차이가 크게 발생하지 않지만, 이후 시편의 반사효과(back wall effect)가 발생하는 임계시간(t^*)의 차이가 발생하고 이후의 온도변화도 다르게 평가된다. 식 (3)에서는 열확산계수(α)와 임계시간(t^*)과의 관계를 나타내고 있다(Maldague, 1993; Krapez *et al.*, 1994).

$$\alpha = L^2 / (\pi t^*) \quad (3)$$

여기서, L 은 시편의 두께이다.

열확산계수가 클수록 임계시간은 단축되는데, 공극이 많은 시편의 경우 공기가 콘크리트에 비하여 열확산계수가 크므로 임계시간이 단축되고 있음을 알 수 있다. Fig. 5 및 Fig. 6에서 알 수 있듯이, W/C 55%인 시편에 대해선 3.31분의 임계시간이 W/C 65%에서는 2.17분으로 감소됨을 알 수 있다. 이는 공극이 많은 시편의 경우, 공기를 더욱 많이 가지게 이로 인해, 전체 대표면적의 확산계수가 커지므로, 임계시간이 감소하는 것이다. Fig. 8에서는 50 sec, 70 sec, 150 sec, 그리고 180 sec 시점에서 측정된 단면의 적외선 contour와 온도경사를 나타내고 있다.

Fig. 8에서 TSR은 온도에 대한 입력강도로서 온도와 정비례의 관계가 있는 변수인데, 전 단면에 걸쳐서 물시멘트비가 높은 시편(W/C 65%)이 상대적으로 높은 온도를 가지고 있음을 알 수 있다. 더워진 공기와 접하고 있는 바깥부분에서 온도의 최대값이, 중심부에서 온도의 최소값이 관측되었다. 한편 시간이 증가함에 따라 후드안의 공기가 냉각되고 이에 따라 모든 시편에서의 온도 측정값이 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.4 평균화 기법을 사용한 열확산 변화 및 임계시간의 변화

열확산계수는 금속과 같이 일정한 균질한 매질에서는 하나의 특성값을 갖지만, 콘크리트와 같이 복합재의 경우는 하나의 상수로 나타내기 어렵다. 잔골재를 포함한 수화물과 공극 내의 공기는 큰 열특성 차이를 가지기 때문이다. 본 절에서는 간단하게 평균화 기법을 사용하여, 단위깊이에 대한 대표체적(REV: representative element area)의 열확산을 식 (4)와 같이 가정하였다.

$$\bar{\alpha} = (1-p)e_1\alpha_1 + pe_2\alpha_2 \quad (4)$$

여기서, $\bar{\alpha}$ 는 대표면적(REV: representative element area)에서 공기와 수화물을 포함한 시멘트 모르타르의 전체 열확산계수, p 는 대표체적내의 공기체적비(fractile)로서 공극률, α_1 는 콘크리트의 확산계수, α_2 는 공기의 확산계수, e_1 및 e_2 는 콘크리트 및 공기에 대한 실험상수이다. Table 4의 콘크리트의 열확산계수는 공기를 포함하고 있는 전체 콘크리트의 확산계수이므로, 공극률이 없는 시멘트 모르타르의 확산계수를 가정하기 위하여, e_1 을 고려하였다. 한편 e_2 는 대기상태의 공기

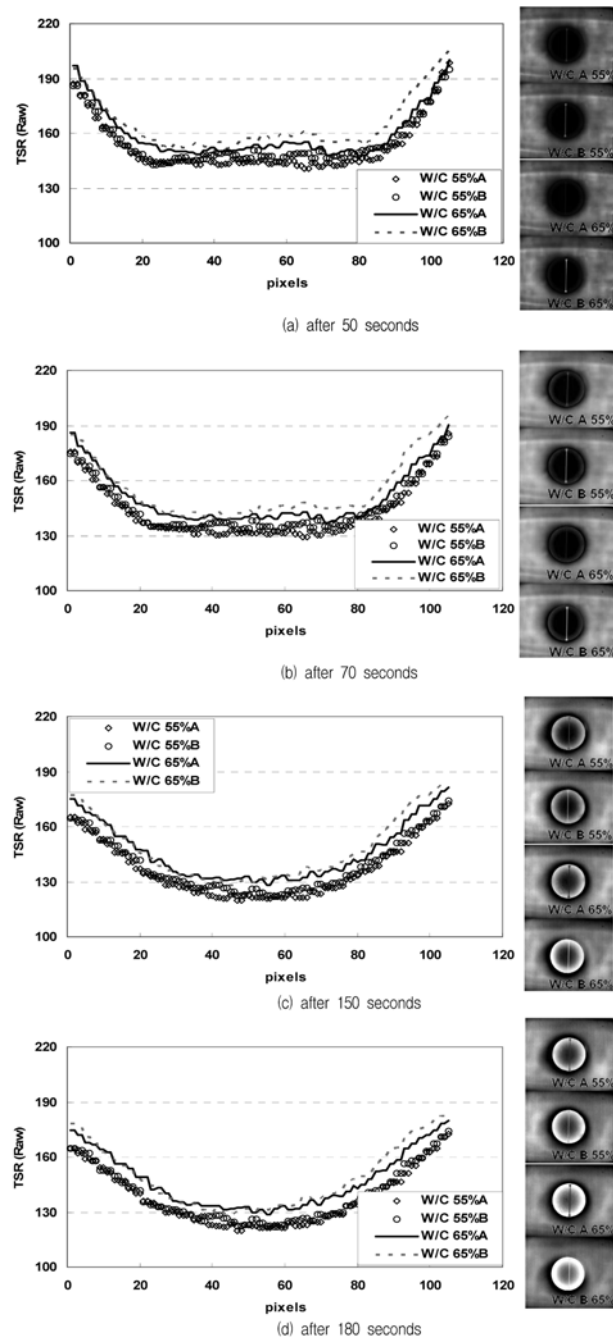


Fig. 8 Heat variation on surface with different time

가 아닌, 콘크리트 표면의 작은 공극에서의 공기량이므로, 이를 가정하기위해, e_2 를 가정하였다. 이 경우, 식 (3)은 임계시간(t^*)에 대하여, 식 (5)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$t^* = \frac{L^2}{\pi[(1-p)e_1\alpha_1 + pe_2\alpha_2]} \quad (5)$$

이 경우, t^* 는 0.08 및 0.15로 가정하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었는데, 공극률 변화에 따른 임계시간의 감소를 나타내고 있다. 계산결과 임계시간은 W/C 55%에서는 228 sec로, W/C 65%에서는 185 sec로 산정되었는데, 공극률의 증가에 따른 임계시간의 감소를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 좀 더 다양한 공극률을 가진 시편에 대하여, 실험이 수행되어 식(5)에 대하여 보완이 이루어질 예정이다.

한편, 각 배합에 따라 물리적 특성(공극률, 염화물 확산계수, 압축강도)과 열특성의 변화를 도시하면 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 특성은 공극을 가지고 있는 시멘트

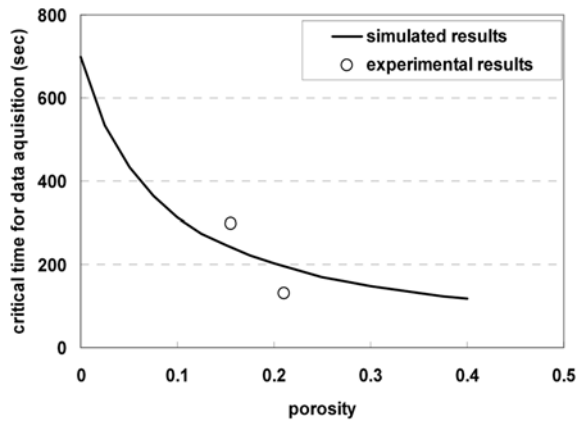


Fig. 9 Comparison of critical time with simulated and experimental results

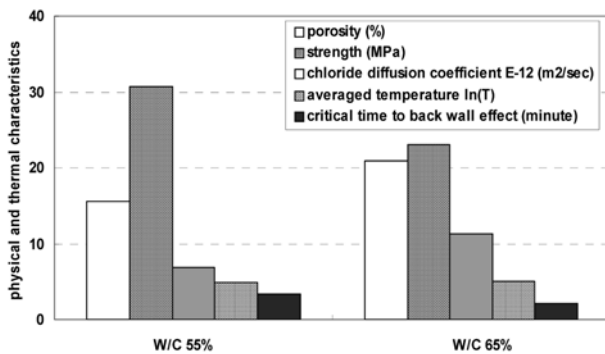


Fig. 10 Physical and thermal characteristics with different W/C ratios

계 건설재료의 품질 평가에 기초적인 자료로 사용될 수 있으며, 다양한 배합의 시편에 적용할 경우, 보다 합리적인 비파괴 품질평가방법이 될 것으로 평가된다.

4. 결 론

본 연구에서는 적외선 thermography 기술을 시멘트 모르타르에 적용하여 그 적용성을 평가하였으며, 역학적, 내구적 특성을 비교하였다. 시멘트 모르타르와 같은 복합재료에서는 열화상분석을 적용하기가 쉽지 않지만, 온도 및 습도가 일정한 실내환경에서 실험이 수행되고, 또 굽은골재가 없는 경우에 대해서는 적외선 thermography를 이용한 품질 평가가 가능하리라고 판단된다. 짧은 시간의 열 공급 이후, 공극률이 큰 시편(20.975%: W/C 65%)에서 측정된 결과는 낮은 시편(15.50%: W/C 55%)에서 측정된 결과에 비하여, 온도 측정결과가 높게 평가되었다. 이는 공극에 포함되어 있는 공기가 콘크리트의 열전도보다 높으므로 열이 더욱 빠르게 확산된 것이다. 1st derivative의 분석에 의하면 back wall이 나타나기 시작하는 임계시점도 공극률이 작은 시편에서 단축되는 것을 확인할 수 있었다. 한편 대표체적내에, 공기와 콘크리트의 열확산계수, 그리고 공극률의 변화를 이용하여, 시멘트 모르타르의 임계시간이 감소되는 식을 제안하였다.

다양한 배합의 시편이 확보되고, 이러한 기법을 적용한 자료가 축적된다면, 적외선 열화상 기법은 공극률과 관련된 내구특성을 간접적으로 평가할 수 있는 비파괴 기법으로 발전할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 박상순, 권성준, 김태상(2009) 시멘트 모르타르의 공극률과 내구 특성과의 관계에 대한 실험적 연구, *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제29권, 제2A호, pp. 171-179.
- 박석균(2003) 레이더법과 적외선 법을 이용한 콘크리트 시공 이음부 공극의 비파괴 검사, *한국콘크리트학회 논문집*, 한국콘크리트학회, 제15권, 제3호, pp. 425-432.
- 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규(2005) 혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제25권, 제1A호, pp. 213-223.
- 심준기, 지광습, 이종세(2008) 근적외선과 열화상 기법을 이용한 콘크리트 내부 공극 검출, *한국콘크리트학회 봄 학술발표회*, 한국콘크리트학회, pp. 1021-1024.
- 윤영호, 전명훈, 박지영, 이정민(2003) 인공공동 시험체를 이용한 적외선 열화상법에 의한 콘크리트 공동탐지에 관한 기초연구, *한국콘크리트학회 봄 학술발표회*, 한국콘크리트학회 pp. 169-174.
- Carlsaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1959) Early detection by simulated infrared thermography, *Advances in Signal Processing for Non-destructive Evaluation of Materials*, X.P. Maldague, Ed., Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp. 303-321.
- CAMDI-Center for Advanced Monitoring and Damage Inspection (2008) *Nondestructive Evaluation of Armor Samples*, Army Program Executive Office, University of California, Irvine
- Hillemeier, B. (1984) Location of reinforcement by induction-thermography, *SPIE Vol520 Thermosense VII*, pp. 197-206.
- Krapez, J.C., Balegeas, D., Deom, A., and Lepoutre, F. (1994) Early detection by simulated infrared thermography, *Advances in Signal Processing for Nondestructive Evaluation of Materials*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 303-321.
- Korean Standard (2005) *Method of Test for Compressive Strength of Concrete*, KSF 2405.
- Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T. (1999) *Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London and New York.
- Maldague, X.P.V. (1993) *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer Verlag, London, pp. 48-53.
- Maierhofer, C.H., Arndt, R., Rollig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., and Hillemeier, B. (2006) Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 393-401.
- NORDTEST (1999) *Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments*, NT BUILD 492.
- Shepard, S.M. Hou, J., Ahmed, T., and Lhota, J.R. (2006) Reference-free interpretation of flash thermography data, *Insight*, Vol. 48, No. 5, pp. 298-301.
- Shepard, S.M. Hou, J., Lhota, J.R., and Golden, J.M. (2007a) Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance, *Optical Engineering*, Vol. 46, No. 5, 051008-1-6.
- Shepard, S.M., Lhota, J.R., and Ahmed, T. (2007b) Flash thermography contrast model based on IR camera noise characteristics, *Non-destructive Testing and Evaluation*, Vol. 22, Nos. 2-3, pp. 113-126.
- Spicer, J.W.M., Osiander, R., Aamodt, L.C., and Givens, R.B. (1998) Microwave thermoreflectometry for detection of rebar corrosion, *SPIE*, Vol. 3400, 0277-786X, pp. 402-409.
- Song, H.-W. and Kwon, S.-J. (2007) Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, Vol. 37, Issue 6, pp. 909-915.
- Tanaka, H. (2005) Detection of concrete exfoliation by active infrared thermography, *Railway Technology Avalanche*, No. 10, October, pp. 59.

(접수일: 2009.7.31/심사일: 2009.8.14/심사완료일: 2009.11.18)