

열유도 장치와 적외선 열화상을 이용한 철근부식탐지 비파괴 평가기법

Non Destructive Technique for Steel Corrosion Detection Using Heat Induction and IR Thermography

권성준¹⁾ 박상순^{2)*}
Kwon, Seung Jun Park, Sang Soon

Abstract

Steel corrosion in concrete is a main cause of deterioration and early failure of concrete structures. A novel integration of electromagnetic heat induction and infrared (IR) thermography is proposed for nondestructive detection of steel corrosion in concrete, by taking advantage of the difference in thermal characteristics of corroded and non-corroded steel. This paper focuses on experimental investigation of the concept. An inductive heater is developed to remotely heat the embedded steel from concrete surface, which is integrated with an IR camera. Concrete samples with different cover depths are prepared. Each sample is embedded with a single rebar in the middle, resulting an identical cover depth from the front and the back surfaces, which enable heat induction from one surface and IR imaging from the other simultaneously. The impressed current (IC) method is adopted to induce accelerated corrosion on the rebar. IR video images are recorded during the entire heating and cooling periods. The test results demonstrate a clear difference in thermal characteristics between corroded and non-corroded samples. The corroded sample shows higher rates of heating and cooling than those of the non-corroded sample. This study demonstrates a potential for nondestructive detection of rebar corrosion in concrete.

Keywords : Concrete, Corrosion, Heat Induction, Impressed Current Method, IR Thermography, NDE

1. 서론

철근의 부식은 RC (Reinforced Concrete) 구조물 열화의 주된 원인이 되며, 구조물의 안전성에 큰 영향을 준다 (Kwon et al., 2009, Broomfield, 1997). 부식이 발생한 RC 구조물은 초기에 미관의 저하에서 부식이 진전하여 균열의 발생, 피복콘크리트의 탈락, 내하력의 저하 등을 야기하게 되므로 매립된 철근의 부식여부를 평가하는 것은 매우 중요한 연구 분야이다 (Song et al., 2006; Song and Kwon, 2009; Broomfield, 1997; 송하원 등, 2009). 본 연구는 전자기 열 유도 및 적외선 열화상기법을 통하여 매립된 철근의 부식여부를 평가하는 새로운 시도의 연구이다. 부식된 철근과 보통 철근은 단면적의 변화에 따라서 열적거동이 다르게 평가되므로 열특성 변화를 이용하여 부식 여부를 판단할 수 있다 (노영숙 외, 2008). 매립된 철근의 부식여부를 평가하기 위하여, 많

은 비파괴 연구 (Andrade and Alonso, 1996; Morris et al., 2002) 및 규격들이 제시되었으나 (ASTM, 1999), 콘크리트의 일부를 파괴하여 철근을 노출시켜야하는 단점을 가지고 있다. 또한 이러한 부식에 따른 철근의 열특성을 평가하기 위해 노출된 철근에 직접 전류를 가하여 부식된 철근의 열특성을 평가하려는 연구가 수행되었으나(건설교통부, 2004; Clemena and Mc Keel, 1978; 윤주형 외, 2006), 대규모 장비의 이동, 외부환경을 고려 등 많은 연구제한사항을 가지고 있다. 준공이전에 매립된 전기화학적 센서들은 부식 진전에 대한 정량적인 정보를 제공할 수 있으나 (조성형 외, 2010), 기존 구조물에는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 또한 콘크리트 표면으로부터 발산되는 열 또는 전자기 반사값을 이용하여, 콘크리트 매립철근의 부식을 탐지하는 연구는 지속적으로 수행되어 왔다 (Jane et al., 1998; Spicer et al., 1998).

1) 정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 조교수
2) 정회원, 상명대학교 건설시스템 공학과 조교수, 교신저자

* Corresponding author : parkss87@smu.ac.kr 041-550-5317

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

가열된 매립철근에 의해 콘크리트 표면으로 발산되는 열을 고려하여, 본 연구에서는 적외선 열화상 기법을 통해 콘크리트 표면의 열특성 변화를 평가하였다. 두가지의 다른 피복두께를 가지는 RC 시편이 준비되었으며, 촉진 실험방법 (Sakurada, 2008)을 통하여 부식량을 조절하였다. 열유도 방식 (Inductive heating)은 콘크리트의 부분적인 파괴 없이 가장 안전하고 빠르게 내부 철근을 가열할 수 있는 방법이며 (Maierhofer et al, 2006; Hillemeier, 1985), 내부 결함 탐지, 철근의 위치 파악 등을 위해 사용되었다. 본 연구는 내부에 매립된 철근의 부식을 감지하기 위한 기초적인 실험에 대한 연구이며, 추후 다량의 실험 및 현장 검증을 통하여 그 적용성이 확대될 것이다.

2. 실험계획 및 준비

2.1 RC 샘플의 제작

서로 다른 피복두께 및 부식량을 가지는 RC 시편들이 제조되었으며, 매립되지 않은 철근 역시 시험에 포함하였다. Table 1에서는 피복두께가 없는 철근에 대한 시편조건을 나타내고 있으며, Table 2에서는 RC 시편의 부식조

Table 1 Condition of bare rebar sample

Type (Number of sample)	Diameter and length	Corrosion condition
Bare rebar sample (5)	9.5 mm, 30.4 mm (3/8 in, 12 in)	Non corrosion
		16.6% Corroded (with rust)
		16.6% Corroded (w/o rust)
		28.6% Corroded (with rust)
		28.6% Corroded (w/o rust)

Table 2 Condition of RC samples

Type (#of sample)	Geometry (L×W×H)	Cover depth	Diameter & Length	Corrosion condition
Non corroded (2)	Block shape 240×64×115 mm (9.5×2.5×4.5 in)	1.0in (25.4mm)	9.5 mm, 30.4 mm (3/8 in and 12 in)	Non Corroded
	Block shape 240×90×115 mm (9.5×3.5×4.5 in)	1.5in (38mm)		
Corroded (2)	Block shape 240×64×115 mm (9.5×2.5×4.5 in)	1.0in (25.4mm)	9.5 mm, 30.4 mm (3/8 in and 12 in)	10% Corroded
	Block shape 240×90×115 mm (9.5×3.5×4.5 in)	38 mm (1.5 in)		

건 및 제원을 나타내고 있다. RC 시편들은 앞면, 뒷면이 동일한 피복두께를 가지도록 제조되었는데, 이는 앞면에서 열유도 코일이 가열을 하게 될 경우, 뒷면에서 온도의 증가 및 감소를 동시에 적외선 카메라로 측정할 수 있도록 고려한 것이다.

2.2 촉진부식방법 (ICM: Impressed Current Method)

IC (Impressed current) 방법을 통하여 촉진부식실험을 수행하였다 (Sakurada, 2008). 철근의 양끝단에 직류전압을 걸어서 전위차를 유도하였으며, 통과하는 전류를 측정하였다. 양극(+)은 매립된 철근에 접지되었고, 음극(-)은 염화물 수용액 내의 구리판에 접지되어 전류의 흐름을 유도하였으며, 촉진기간동안 생성되는 부식량을 평가하기 위해서 식 (1)과 같은 Faraday 법칙이 사용하였다.

$$M = \frac{C}{zF} \int q dt \quad (1)$$

여기서, M 은 부식량(mol), z 는 철의 이온수(=2), F Faraday의 수 (=96,500 C), q 는 전류(A), t 는 측정시간 (sec), C 는 실험상수이다. 1 mol의 철(Fe)은 55.847 g이므로, 부식이 발생한 중량은 식 (1)을 통해 도출할 수 있다. Fig. 1(a)는 IC 방법의 개요도를 나타내고 있으며, Fig. 1(b)는 실험중인 RC 시편을 나타내고 있다. Fig. 2에서는 촉진실험을 끝낸 뒤의 시편의 상태를 나타내었다.

2.3 열유도 장치 (Heat Induction) 및 적외선 장치

매립된 콘크리트내부의 철근을 비파괴적으로 가열하는 방법으로 열유도 가열방식 (Heat Induction)이 적용되었다. 열유도 방식은 전자기 유도에 의해 전도성 금속을 가열하는 방식인데, 금속 내부에 맴돌이전류(Eddy current)가 발생하게 되며, 금속의 저항은 Joule 열을 발생시키게 된

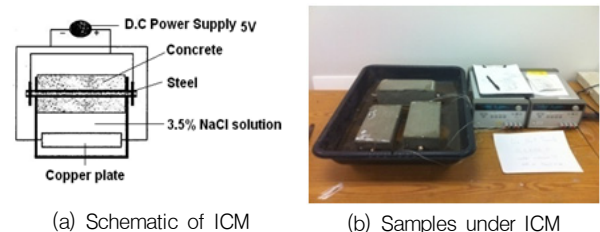
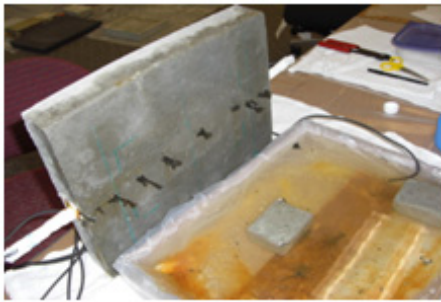


Fig. 1 Accelerated corrosion of concrete samples using ICM

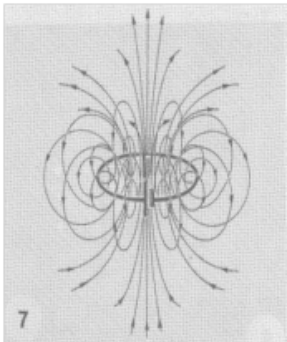


(a) Corrosion in bare rebar



(b) Cracking due to corrosion

Fig. 2 Corrosion in samples



(a) Mechanism of heat induction (b) Heat induction machine

Fig. 3 Electromagnetic induction heating and equipment

다. 주로 열유도 장치는 전자기 장치로 구성이 되는데, 고 주파의 교류를 사용하고 있으며, 상대적으로 큰 상대투자율 (Relative permeability)을 가진 금속의 전자기 이력의 손실에 따라 열이 발생하기도 한다. 교류의 주파수는 물체의 크기, 금속 종류, 가열 코일과 가열되는 물체의 상호작용, 투과 깊이에 영향을 받는다. 열유도의 작용 및 실험장비의 사진을 Fig. 3에 나타내었으며, 열유도 장비의 제원을 Table 3에 나타내었다. 콘크리트 내부의 매립된 철근을 비파괴적으로 가열하는 방법은 열유도방법이 유일하다고 알려져 있으며, 강한 교류 전자기장을 직접적으로 콘크리트 표면에 가하게 되고 매립되어 뒤에 있는 철

Table 3 Features of induction heating equipment

Model	HX-25KWHF
Input voltage	220V AC/ 50-60 Hz / 2 Phase
Input voltage range	180-245 V AC
Input watt	15 KVA Max
Output oscillation frequency	30 KHz-100 KHz
Output oscillation current during heating period	200 A-600 A
Output oscillation current during retaining period	200 A-600 A
Heating time	1-99 sec
Retaining time	1-99 sec
Cooling time	1-99 sec
Duty cycle	> 80 % (30 C, room temp)
Cooling water design	0.06-0.12 MPa 7.5 Liter/min
Connection cable	3.5 meter
Weight	25 Kg
Main machine size	535 × 200 × 450 mm
Head machine size	315 × 200 × 350 mm

근이 가열되는 것이다 (Hillemeier, 1985).

본 연구에서 이용한 적외선 촬영장비는 Thermal Wave Imaging Inc. 제품으로 적외선 카메라는 320×256화소를 가지고 있으며, passive type (수동열 측정) 뿐 아니라 크세논 램프튜브를 이용하여 2.5 ms의 짧은 시간에 열을 가하여 열의 이력을 추적하는 active type 성능을 포함하고 있다. 초당 2.5 frame의 사진을 찍도록 설정하였으며, MosiQ 프로그램을 통하여 데이터 처리를 수행하였다. 본 장비는 시멘트 모르타르의 성능평가를 위해 시험적으로 사용된 사례가 있다 (권성준과 Maria, 2010).

3. 철근부식 탐지에 대한 실험결과

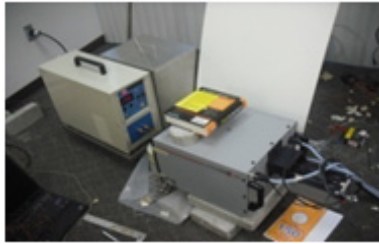
3.1 철근 실험 (Bare bar)

본 절에서는 부식 전후의 철근에 대하여, 적외선 열화상(IR thermography) 측정값을 비교하도록 한다. Fig. 4에서는 실험장면을 나타내고 있으며, Fig. 5에서는 IR 열화상 사진을 나타내고 있다. 하나의 철근 시편에 대해, 길이방향으로 5곳의 위치에서 측정을 수행하였으며, 그 평균값을 사용하였다. Fig. 4와 같이 열유도 코일을 통한 가열과 적외선 카메라를 통한 온도측정을 동시에 수행할 수 있다. Fig. 5에서는 밝은 부분이 상대적으로 높은 온도를 나타내고 있는 부분이다.

각 철근에서 측정된 평균온도를 Fig. 6 및 Fig. 7에 비



(a) Front view



(b) Back view

Fig. 4 IR Thermography test setup for bare rebar



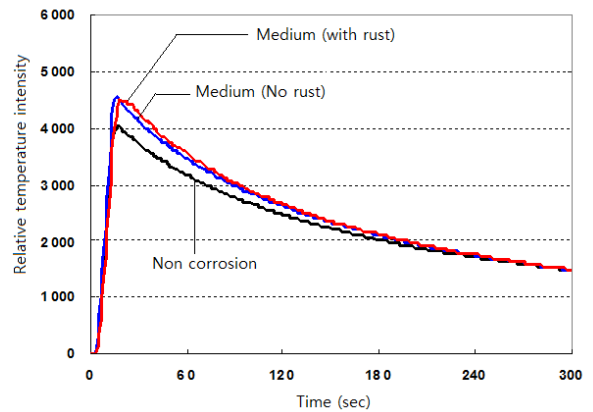
Fig. 5 IR Thermography on steel

교하였다. 대상 철근은 부식전의 시편 (Non corrosion), 16.6%의 부식시편 (Medium), 28.6%의 부식시편 (Heavy)로 분류하여 비교하였다.

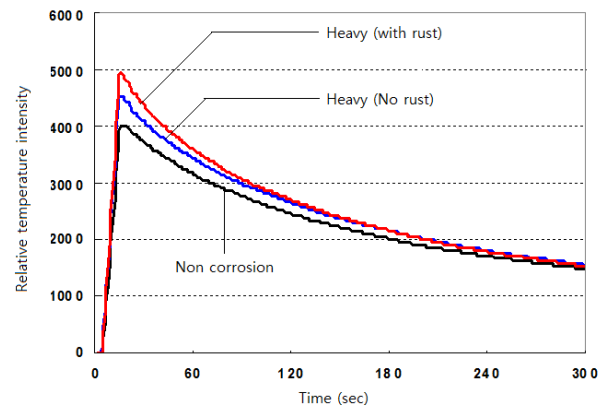
가열조건은 코일로부터 28 mm (1.5 in) 거리를 두었고, 10초간 가열을 수행하였으며, 전체 온도측정시간은 5분으로 설정하였다. 측정시의 y축값은 상대온도강도 (Relative temperature intensity)로서 온도와 비례관계에 있다.

Fig. 6 및 Fig. 7에서와 같이, 부식된 철근은 비부식된 철근에 비해 빨리 가열되고, 빨리 냉각되는 특성을 보이고 있다. 가열 및 냉각이 선형거동을 한다고 가정하면 가열속도 및 냉각속도를 도출할 수 있다. 가열속도는 가열 시간동안의 최대온도 변화로, 냉각속도는 냉각시간 (가열 중지부터 시험종료까지)에 따른 최대 온도변화로 정의하였다. 가열 및 냉각속도를 부식률에 따라 도시하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 부식이 증가함에 따라 가열 및 냉각속도가 증가하였으며, 녹을 제거하지 않은 상태 (with rust)에서 이러한 경향은 더욱 크게 나타났다. 부



(a) 16.6 % corroded bare rebar - Medium



(b) 28.6 % corroded bare rebar - Heavy

Fig. 6 Comparison with relative temperature intensity between corroded and non corroded rebar

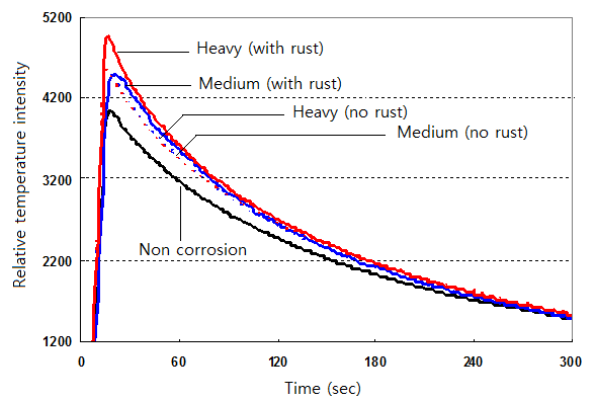


Fig. 7 Comparison with corroded and non corroded steel

식량과 heating/cooling rate의 정량적인 관계도출을 위하여 회귀분석을 수행하면 다음과 같은 분석식을 도출할 수 있다.

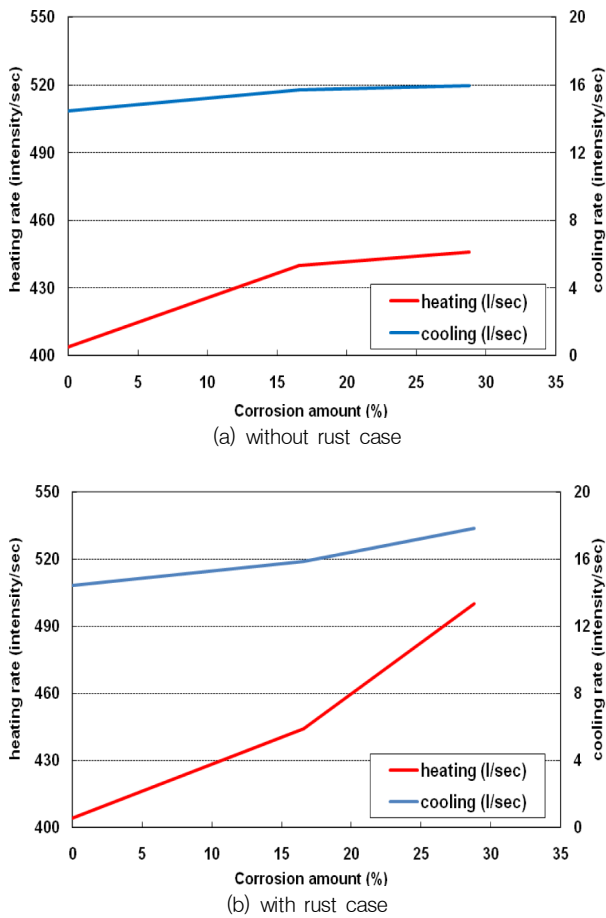


Fig. 8 Comparison with heating and cooling rate

$$H = 8.2425 \sqrt{COR} + 405, R^2 = 0.997 \text{ (without rust)} \quad (2)$$

$$C = 2.3212 \sqrt{COR} + 508, R^2 = 0.994 \text{ (without rust)} \quad (3)$$

$$H = 0.1191 COR^2 + 405, R^2 = 0.987 \text{ (with rust)} \quad (4)$$

$$C = 0.0341 COR^2 + 508, R^2 = 0.979 \text{ (with rust)} \quad (5)$$

여기서, H, C 는 각각 heating rate, cooling rate을 나타내고 있으며, COR 은 부식량 (%)를 나타내고 있다.

부식이 철근에 발생하면, 철근의 단면적은 감소하게 되며, 이에 따라 단위길이당 저항이 증가하게 된다. Joule's First Law에 따라 도체를 통과하는 전류에 의해 발생하는 열은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다 (KICT, 2001).

$$Q = I^2 R t \quad (6)$$

여기서, Q 는 일정 전류(I)와 시간(t)에 의해 발생된 열, R 은 전기저항을 나타낸다.

증가된 저항은 일정한 전기장에서 온도를 증가시키게 되므로, 가열시간에 부식된 철근이 비부식된 철근에 비해 높은 온도를 나타내게 된다. 부식된 철근 주위의 녹(rust)은 일시적인 단열효과를 나타내게 되고 가열시간 동안 열손실을 감소시키게 되므로 가열구간에서는 더 높은 온도를 나타내게 된다. 철근 주위의 녹은 다공성이며, 조밀하지 못한 화학적 합성물을 포함하고 있다. 이러한 녹은 넓은 비표면적으로 냉각면적을 넓혀주므로 빠른 냉각속도를 보이고 있으며, 철근의 단면적이 감소되어 열을 보유하고 있는 열용량 (heat capacity)이 감소하게 되므로, 냉각속도가 빠르게 된다.

3.2 RC 시편 실험 (Embedded rebar)

본 절에서는 RC 시편을 이용하여 열특성 변화를 분석하도록 한다. RC 시편의 부식률은 0%와 10%의 두가지 경우이며, 피복두께는 25 mm (1.0 in), 38mm (1.5 in)의 두가지 경우를 고려하였다. 철근 실험과 마찬가지로 철근길이 방향으로 5개의 균등한 점을 선정하고 측정된 시간에 따른 온도변화를 평균하여 하나의 값을 사용하였다. 가열코일을 콘크리트 표면에 밀착하여 실험을 수행하였으므로, 피복두께가 가열거리가 된다.

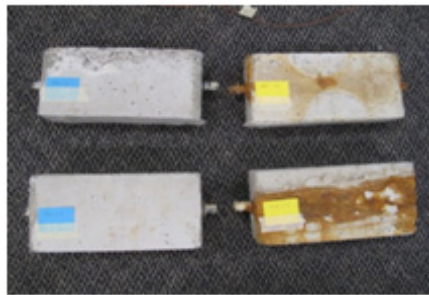
3.2.1 25mm in 피복두께의 RC 시편 (10% 부식률)

피복두께 25 mm (1.0 in) RC 시편과 시험 장면을 Fig. 9(a)와 (b)에 각각 나타내었다. RC 시편내부의 철근을 500 A 조건으로 90초간 가열하였으며, 610초 동안 냉각을 하였다. IR 열화상은 가열 코일 반대편에서 측정되었다.

Fig. 10(a)와 (b)에서는 가열후 700초 경과시의 IR thermography image를 나타낸 것이다. 밝은 부분이 높은 온도를 나타내고 있으며, 610초 경과 이후에도 내부에서 발산되는 열이 계속 측정되고 있음을 알 수 있다.

앞선 실험과 마찬가지로 다섯 곳의 위치에서 측정된 온도강도는 하나의 값으로 평균화되었으며, 이를 Fig. 11에 도시하였다. 결과로부터 부식된 철근을 가지고 있는 RC 시편에서 높은 온도강도가 측정되었으며, 빠른 가열속도가 평가되었다. Fig. 12에서는 가열 및 냉각속도의 비교를 나타내고 있다.

Fig. 12에서 알 수 있듯이 부식된 철근을 가진 RC 시편에서 높은 가열속도를 나타내고 있으며, 냉각속도에서

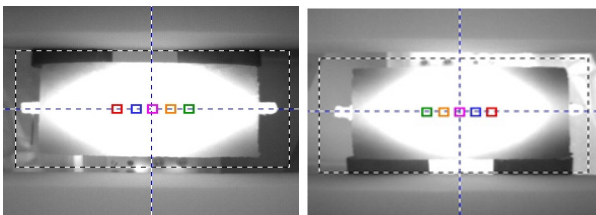


(a) RC samples (1.0 in cover depth)



(b) Test setup

Fig. 9 Photos of RC samples and test setup



(a) 0% Corroded sample

(b) 10% Corroded sample

Fig. 10 IR Thermography in RC sample (25 mm cover depth)

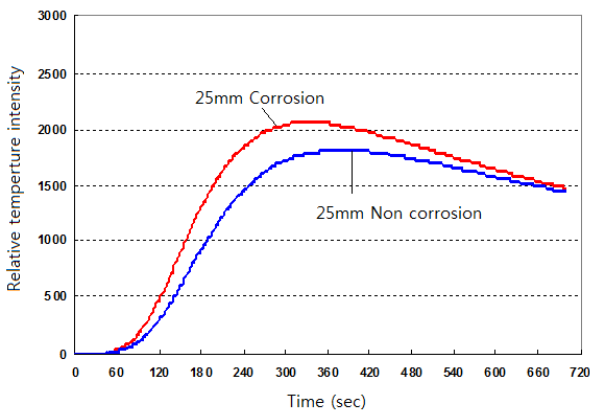


Fig. 11 Averaged relative temperature intensity in RC samples (1.0in cover depth)

는 큰 차이를 보이지 않았다. 철근 및 RC 시편에 대한 시험결과를 검증하기 위해, 480초간 가열시간을 가지고 960초 동안 냉각시간을 가진 시험이 다시 수행되었다. 본

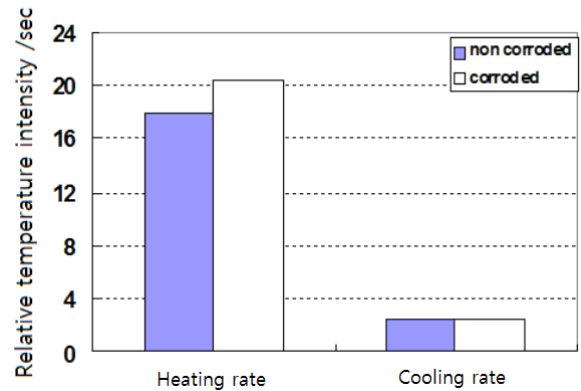
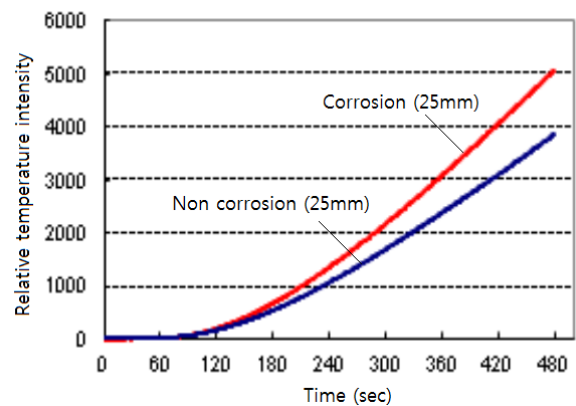
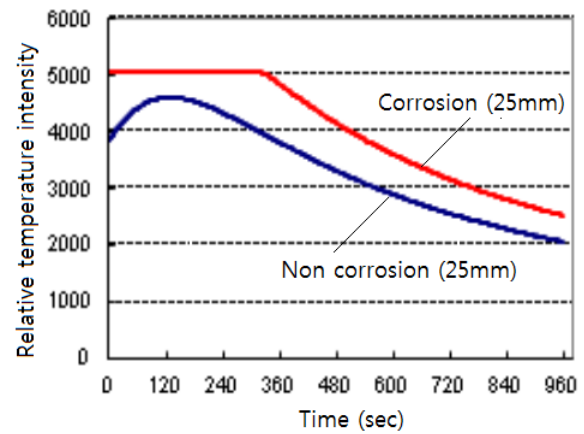


Fig. 12 Heating and cooling rate (25mm cover depth)



(a) 480 sec Heating period



(b) 960 sec Cooling period

Fig. 13 Relative temperature intensity in RC sample (25mm)

시험에 이용한 IR 장비의 최대 측정시간이 1,200초이므로 가열 및 냉각시의 온도측정을 각각 수행하였다. Fig. 13에서는 가열 (480초) 및 냉각 (960초) 단계에서 각각 측정된 온도강도 결과를 나타내고 있다.

가열시간을 증가시킨 경우 역시 철근으로 실험한 결과와 같은 경향을 보여주고 있다. Fig. 13(a)는 부식된 RC

시편에서 더 높은 온도가 측정되었으며, 급격한 온도변화를 보이고 있다. Fig. 13(b)에서는 냉각기간동안의 온도변화를 나타내고 있는데, 마찬가지로 부식된 RC 시편에서 빠른 냉각속도를 보이고 있다. 본 장비의 최대 허용온도강도는 11,240정도이므로, 상대온도강도인 5,000이상의 측정값을 나타낼 수 없었고 포화상태로 도시되었다.

3.2.2 38mm 피복두께의 RC 시편 (10% 부식률)

본 실험에서는 38mm (1.5 in) RC 시편에 대하여 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 처음에는 90초간 가열을 시작하였으며, 610초의 냉각시간을 고려하였다. Fig. 14(a)와 (b)는 90초 가열후 700초 경과시의 IR 열화상 사진을 나타내고 있다. 앞선 Fig. 10에서 처럼 밝은 부분이 높은 온도를 나타내고 있다.

Fig. 14를 Fig. 10과 비교해보면, 피복두께가 높은 콘크리트의 경우 내부로부터 발산되는 열이 매우 작음을 알 수 있다. 이는 콘크리트 피복두께의 증가로 인해, 가열코일과의 거리가 멀어져서 가열온도가 낮게 되고 또한 깊은 콘크리트 두께로 인해 밖으로 전도된 열이 감소되기 때문이다. Fig. 15에서는 38mm(1.5 in) RC 시편에 대한 상대온도강도의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 15에서 온도 증가구배를 관찰해보면, 부식된 38mm

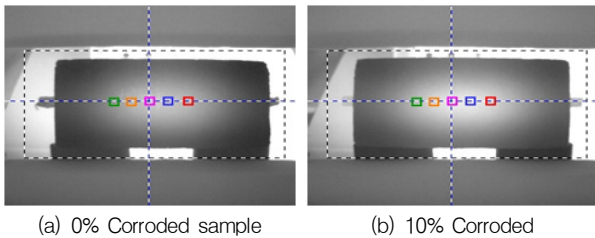


Fig. 14 IRT in RC sample (38mm (1.5 in) cover depth)

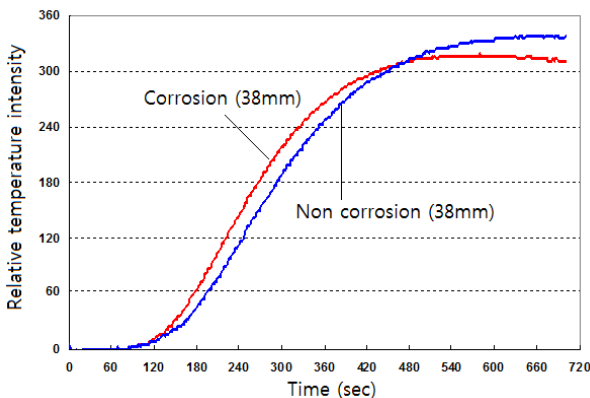


Fig. 15 Heat intensity of RC sample (1.5in)

(1.5 in)의 RC 시편에서 더 높은 온도구배를 확인할 수 있다. 그러나 부식된 시편에서는 540 sec에서 최대 온도가 평가된 것이 비하여 부식되지 않은 시편에서는 지속적인 온도증가가 발생하였다. 이에 대하여 두 가지 실험조건을 가지고 추가적인 시험이 수행되었다. 두 가지의 실험조건은 Table 4와 같다.

Fig. 16에서는 Test A에서의 결과를 나타내고 있다. 실험결과 이전실험, 즉 Fig. 15와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 가열속도는 다르게 나타났으나, 온도최고치는 비부식 RC 시편에서 나타났다.

그 이유는 여러 가지로 추론될 수 있지만, 피복두께가 증가하면서 전기장의 힘이 낮아지고, 부식된 피복두께의 지름만큼 전기장 발생 가열 코일과 거리가 멀어짐에 기인한다고 할 수 있다. 부식량이 크고 피복두께가 비교적 큰 경우는 가열시간을 증가시키는 것이 바람직하다.

가열시간을 3배 증가시킨 실험 B에서는 Fig. 17(a)와 같이 뚜렷한 가열속도의 변화를 측정할 수 있었다. 가열구간인 480sec동안 부식된 시편에서는 상대온도강도가 거의 1,000에 이르렀으며 이는 비부식된 시편의 상대온도강도의 1.6배에 해당하는 것이다. 960sec의 냉각구간에서는 철근실험에서와 같은 뚜렷한 냉각속도의 차이를 확인할 수 없었다. 이는 상대적으로 큰 피복두께로 인해 온도증가량이 적으며, 피복 콘크리트의 Heat block효과가 크기 때문으로 추측된다.

Table 4 Conditions for additional test (1.5 in cover depth)

	Cover depth (Corrosion %)	Heating period	Gap	Cooling period
Test A	1.5 (0%)	180 sec	0 sec	900 sec
	1.5 (10%)			
Test B	1.5 (0%)	480 sec	60 sec	960 sec
	1.5 (10%)			

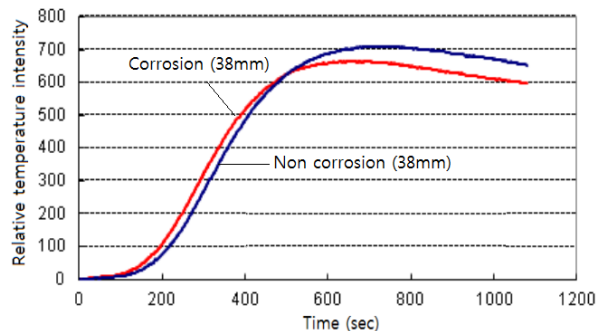
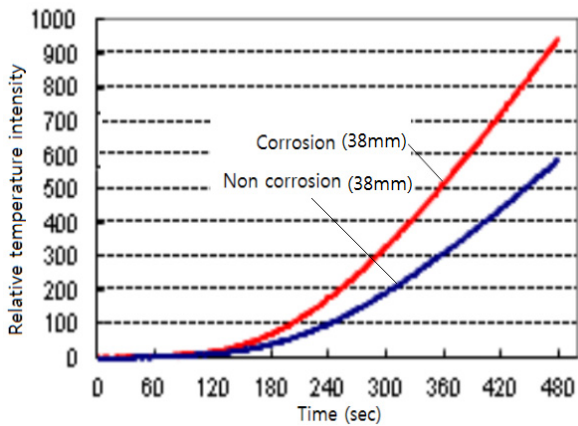
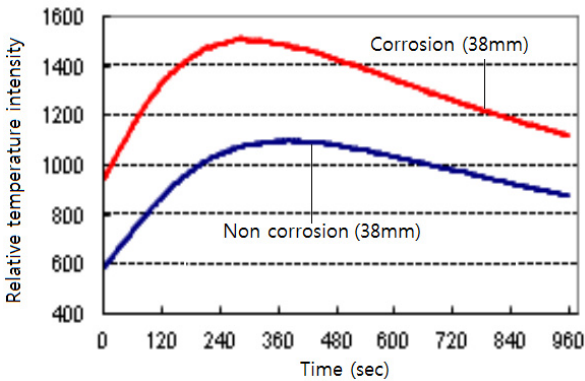


Fig. 16 Iteration 1 relative temperature intensity plot (Test A)



(a) 480 heating period



(b) 960sec cooling period

Fig. 17 Iteration 1: relative temperature intensity plot (Test B)

최종적으로 25mm (1.0 in) 및 38mm (1.5 in) RC 시편에서는 철근가열실험과 비슷한 경향을 가열구간에서 가지고 있음을 확인하였으나, 냉각구간에서는 큰 차이를 확인할 수 없었다. 부식으로 인해 단면이 감소된 철근이 주위에 녹을 가지고 있을 경우, 온도변화가 크고 그 증감률이 비부식된 철근에 비하여 큼을 알 수 있었다. 피복두께가 1.0 in 인 시편에서는 부식된 RC 시편이 쉽게 가열되고 상대적으로 작은 피복두께의 영향으로 열전달이 빠르게 발생하게 된다. 1.5 in의 RC 시편의 경우, 1,000 정도의 상대온도강도를 가질 수 있도록 충분히 가열한 경우, 가열된 철근과 같은 경향을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 IR Thermography 장치와 열유도장치를 통합함으로써, 부식량에 따른 열거동 특성을 평가하였다. 평가 결과, 부식 또는 비부식된 철근의 열특성을 기반

으로 철근 부식을 파악할 수 있는 비파괴 기법의 가능성을 실험적으로 규명하였다. 본 연구에서는 실내실험에 대한 연구만이 수행되어 부식/비부식 철근을 열전도 및 IRT 기법을 적용하여 파악할 수 있는 가능성을 제시하였다. 그러나 일반적으로 토목구조물은 40mm 이상의 피복두께를 가지고 있으므로 토목구조물에 직접적인 적용은 현상대로는 한계를 가지고 있다. 추가 연구와 현장적용을 통하여 Baseline의 구축, 오차범위의 설정 등에 대한 추가 연구가 필요하다.

철근 실험으로부터, 최고온도는 부식량에 따라 변화가 발생함을 확인하였다. 또한 부식된 철근에서 높은 온도증가가 발생하였으며, 철근주위의 녹은 철근이 가열되는 구간에서 단열재 역할을 하고 있음을 실험적으로 규명하였다. 냉각구간에서는 부식된 철근이 더욱 빠르게 냉각되었는데, 그 이유는 몇 가지로 다음과 같은 이유로 설명이 가능하다. 일정한 전기장 내에서는 부식으로 인해 적은 단면적을 가진 철근이 빨리 가열되게 된다. 조약하게 형성된 철근주위의 녹은 냉각구간에서 열을 보존하지 못하며, 넓은 단면적으로 인해, 열을 더욱 빨리 빼앗기게 된다.

RC 실험으로부터, 부식된 철근을 가진 시편에서 높은 온도증가를 나타내었으며, 가열속도 역시 철근체적의 감소 및 녹의 단열효과로 인해 높게 평가되었다. 그러나 피복콘크리트의 전달저해효과로 인해 냉각속도에서는 큰 차이를 확인할 수 없었다.

RC 실험에서는 열거동의 경향은 유도된 열이 충분히 철근을 가열하여 표면 밖으로 전파될 경우에 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 1.0 in의 피복두께의 경우, 단지 90 sec의 가열시간으로도 충분히 철근과 비슷한 열거동이 재현되었으나, 1.5 in의 경우는 480 sec의 가열시간을 확보하여 표면으로부터 1,000 이상의 상대온도강도가 측정될 때, 비슷한 경향이 관찰되었다.

감사의 글

본 연구는 2011학년도 한남대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 저자는 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 콘크리트 구조물의 부식 및 공극감지를 위한 비파괴 시험기술 개발, 산학연 공동연구 개발사업 최종보고서, 한국건설교통기술 평가원, 2004, pp.1-64.
2. 권성준, M. Q. Feng, "적외선 화상기법을 이용한 시멘트 모르

- 타르 특성의 실험적 평가”, 대한토목학회 논문, vol. 30-1A, 2010, pp.53-59.
3. 노영숙, 정란, 박현수, “디지털 화상정보를 이용한 매립철근의 부식률 예측 모델”, 대한건축학회 논문집, vol. 24, No. 7, 2008, pp.77-84.
 4. 송하원, 이창홍, 이근주, “부식저항성 평가에 따른 균열 콘크리트의 부식전위 연구”, 구조물진단학회지, 2009, vol. 13, No. 1, pp.97-105.
 5. 율주형, 백인관, 조승호, 정란, “대기온도에 따른 적외선 열화상 처리기법을 이용한 철근의 부식률 측정기법”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, 2006, pp.233-236.
 6. 조성형, 임영철, Mohamed Ismail, 이환승, “비파괴 철근부식진단을 위한 매립형 미니센서 개발에 관한 기초적 연구”, 구조물진단학회지, vol. 14, No. 6, 2010, pp.179-187.
 7. American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM C876-91, 1999, pp.1-12.
 8. Andrade, C., Alonso, C., “Corrosion Rate Monitoring in the Laboratory and On Site”, Construction Building Materials, vol. 10, No. 5, 1996, pp.315-328.
 9. Broomfield J. P., Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair. London: E&FN 1997, 56-59.
 10. Clemena, G. G., McKeel, W. T., Detection of Delamination in Bridge Decks with Infrared Thermography, Transportation Research Record No. 664, 1978, pp.25-85.
 11. Hillemeier, B., “Location of Reinforcement by Induction-Thermography”, Thermal Infrared Sensing for Diagnostics and Control (Thermosense VII), SPIE Proceedings, vol. 520, 1985, pp.197.
 12. Kwon, S.-J., Na, U. J., Park, S.-S., Jung, S. H., “Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack : Probabilistic Approach for Chloride Diffusion”, Structural Safety, vol. 31, No. 1, 2009, pp.75-83.
 13. Maierhofer, C. H., Arndt, R., Rllig, M., Rieck, C., Walther, A., Scheel, H., Hillemeier, B., “Application of Impulse-Thermography for Nondestructive Assessment of Concrete Structures”, Cement and Concrete Composites, vol. 28, No. 4, 2006, pp.393-401.
 14. Morris, W., Vico, A., Vazquez, M., Sanchez, S. R., “Corrosion of Reinforcing Steel Evaluated by Means of Concrete Resistivity Measurements”, Corrosion Science, vol. 44, 2002, pp.81-99.
 15. Sakurada, S., Irie H., Yoshida Y., “Development of Reinforced Concrete Corrosion Amount Presumption Method by Ultrasonic Method”, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 2008, pp.1-6.
 16. Song, H.-W., Kwon, S.-J., “Evaluation of Chloride Penetration in High Performance Concrete using Neural Network Algorithm and Micro Pore Structure”, Cement and Concrete Research, vol. 39, No. 9, 2009, pp.814-824.
 17. Song, H.-W., Pack, S.-W., Lee, C.-H., Kwon, S.-J., “Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration”, J. of Restoration of Buildings and Monuments, vol. 12, No. 4, 2006, 265-284.
 18. Spicer, J. W. M., Osiander, R., Aamodt, L. C., Givens, R. B., “Microwave Thermoreflectometry for Detection of Rebar Corrosion”, Structural Materials Technology III: An NDT Conference, San Antonio, TX, SPIE: pp.402-409.
- (접수일자 : 2011년 11월 22일)
(수정일자 : 2012년 1월 10일)
(심사완료일자 : 2012년 1월 16일)

요 지

콘크리트내의 철근의 부식은 열화와 콘크리트 구조물의 조기파괴의 주된 원인이 된다. 본 연구에서는 비파괴 기법 중 전자기적 열유도방법과 적외선 열화상기법을 이용한 철근부식평가가 시도되었는데, 부식 또는 비부식된 철근의 열특성 차이를 이용한 것이다. 본 논문은 이러한 개념을 배경으로 수행한 실험적 연구이며, 유도전류를 통해 콘크리트 표면으로부터 내부 철근을 가열하고 외부의 적외선 카메라를 이용하여 표면의 온도변화를 관측한다. 피복두께가 다른 콘크리트 시편은 앞면과 배면의 피복두께를 동일하게 제조하여 앞면에서 가열과 배면에서의 온도측정을 동시에 할 수 있도록 고안되었다. IC (Impressed Current) 방법을 통하여, 철근 부식을 촉진하였으며, 적외선 화상을 통하여 온도가열과 냉각을 전 시험과정에 걸쳐 측정하였다. 본 실험을 통하여 부식/비부식 철근의 뚜렷한 온도변화를 확인하였으며, 부식된 시편에서 빠른 온도증가속도 및 냉각속도를 평가하였다. 본 연구는 콘크리트 매립철근의 비파괴적인 부식탐지의 가능성을 보여주고 있다.

핵심 용어 : 콘크리트, 부식, 열유도, 촉진부식, 적외선 열화상, 비파괴 평가