

열화상 기법을 이용한 콘크리트 구조물 결함 검출시 열원의 효율 비교 및 결함검출 능력 향상

The Efficiency of External Heat Sources for Infrared Thermography Applied
Concrete Structures and the Improvement of the Defect-identification

심준기* 문도영** 정란*** 이종세**** 지광습*****
Sim, Jun-Gi Moon, Do-Young Chung, Lan Lee, Jong-Seh Zi, Goangseup

Abstract

The purpose of this paper is to find an efficient heat source to amplify the surface temperature of damaged concrete structures for infrared thermography. we compare two different heat sources of far-infrared lamp and halogen lamp each other for their efficiency. The two heat sources were applied to the concrete specimens. Two different concrete specimens were used: one was the concrete containing internal void and the other was wrapped with partially unbonded fiber reinforced polymer sheet. it was found that the far-infrared lamp was more efficient than the halogen lamp. In addition, we propose a new algorithm to make the damage zone displayed clear in the image obtained from the thermographic operation. The algorithm is a combination of Gauss filtering process and the Prewitt mask operation.

요 지

본 논문의 목적은 열화상 비파괴 검사기법을 적용시 손상된 콘크리트 구조물의 표면온도를 증폭시키기 위해 사용되는 외부 열원의 효율성을 알아보기 위함이다. 원격외선램프와 할로겐램프의 적용성과 효율성을 서로 비교하였다. 이를 위해 전술한 두 개의 열원을 콘크리트의 내부공극과 FRP시트의 비부착 결합 시험체에 적용하였다. 본 연구결과, 원격외선램프가 할로겐램프보다 더 효율적인 것으로 파악되었다. 또한, 손상영역을 효과적으로 검출하기위해서 가우스 필터와 프리윗 마스크 화상처리기법을 혼합한 알고리즘을 제안하였다.

Keywords : Infrared thermography, heat source, internal void, unbonded FRP sheet, Image processing

핵심 용어 : 적외선 열화상 기법, 열원, 내부공극, FRP시트 비부착, 화상처리기법

* 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정

** 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 연구교수

*** 정희원, 단국대학교 건축공학과 정교수

**** 정희원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 정교수

***** 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수

E-mail : g-zi@korea.ac.kr 02-3290-3324

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근, 토목 구조물의 유지 관리를 위한 비파괴 검사법으로 열화상 기법이 각광받고 있다. 열화상 기법은 고가 장비인 열화상 카메라를 사용하여 대상 물체를 직접적으로 접촉하지 않고 비파괴적으로 검사하기 때문에 적은 인력으로 빠른 시간 안에 넓은 부위를 검사할 수 있다. 이러한 장점은 규모가 큰 토목 구조물에 대한 검사를 수행할 때 매우 유리하다⁽¹⁾⁽²⁾.

열화상 기법으로 콘크리트 구조물의 결함을 검출하는 기본 원리는 내부 결함을 갖는 콘크리트 표면에 열을 가한 후, 자연 냉각되는 과정에서 방출되는 결함 부위와 건전 부위의 서로 다른 적외선량을 적외선 열화상 카메라로 검출하여 시각적인 열화상이나 대상 부위의 표면온도의 차이로 콘크리트의 결함을 식별하는 것이다⁽⁴⁾.

Stanley와 Balendran(1994)은 콘크리트 구조물의 결함을 검사하는 일반적인 방법인 해머테핑(Hammer tapping), 리바운드 해머 시험법(Rebound hammer testing), 초음파 시험(Ultrasonic testing), 탄성과 기법(Impact echo)과 최신 기법인 열화상 기법을 비교하였다. Stanley와 Balendran(1994)은 기존 방법들로 콘크리트 내부 결함을 검사하는데 많은 시간과 인력이 요구되지만 열화상 기법의 경우, 고가의 열화상 카메라로 인하여 초기비용은 많이 들지만 넓은 지역을 적은 인력으로 빠르게 검사할 수 있어, 대형 구조물에 적합하다고 주장하였다⁽³⁾.

Brown과 Hamilton(2003, 2007)은 최근 널리 사용되고 있는 FRPшит 보강 콘크리트의 결함 검출에 있어서 열화상 기법을 사용할 경우 FRPшит의 두께가 얇기 때문에 FRPшит와 콘크리트 사이의 비부착 결함의 검출에서 우수하다고 밝혔다⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾.

일반적으로 열화상 기법에서 널리 쓰이는 열원으로는 자연광, 할로겐램프가 있다. 자연광을 이용하는 경우는 수동적인 열화상 기법으로 인위적인 열원 장치를 요구하지 않아 편리하지만 열화상 기법으로 구조물의 결함을 검출시 당일 일조량과 주변 환경의 기후에 영향을 많이 받으므로 적용이 쉽지 않다⁽²⁾

⁽⁵⁾. 이와 달리 할로겐램프는 적용이 간편하여 인위적으로 대상물체를 가열하는 능동적인 열화상 기법에서 열원으로 널리 쓰인다⁽²⁾⁽⁹⁾. 그러나 할로겐램프의 경우 전력에서 사용되는 에너지가 대부분 빛에너지를 생산하는데 쓰이고 열에너지는 적어 열원의 효율이 낮아 능동적인 열화상 기법 적용시 이를 보완할 수 있는 방법이 요구된다.

한편, 6-14 μ m 파장대를 가지고 있는 원적외선램프는 열에너지 발생효율이 할로겐램프에 비하여 상대적으로 높은 특성을 가지고 있어, 그 가능성이 주목된다.

이에 본 논문에서는 기존에 주로 사용되던 할로겐램프와 원적외선 램프를 열원으로 이용한 열화상 기법을 적용하여, 콘크리트 내부에 인위적으로 생성시킨 내부 공극과 콘크리트 표면에 보강된 FRPшит의 비부착 결함의 검출을 시도하였다. 이와 같은 시도는 각 열원별 열화상 기법의 특성을 파악하는데 유익하며, 손상의 특성, 즉 손상 깊이, 분포 등에 따라 효과적인 열원을 비교평가할 수 있는 기초자료를 획득하는데 의미가 있다.

본 논문에서는 전술한 바와 같이 두 종류의 열화상 실험이 수행되었다. 첫 번째 실험은 임의의 깊이와 크기를 갖는 내부 공극을 가진 콘크리트 내부 공극 시험체를 할로겐램프와 원적외선램프를 열원으로 가열한 후 자연냉각 상태에서 열화상 촬영을 통해 내부 공극을 검출하는 실험이다.

두 번째 실험은 CFRPшит와 GFRPшит가 보강된 시험체에 비부착 부위를 생성시킨 후 할로겐램프, 원적외선램프 열화상 실험을 수행하고 FRPшит가 열에 민감함을 고려하여 추가적으로 일조량이 적은 자연광을 열원으로 사용시 결함의 검출 여부를 검토하였다.

각 실험의 비교·분석은 표면온도와 열화상에 대하여 수행되었다. 그러나 기존의 열화상 처리 기법의 한계 때문에 열화상이 선명하지 않아 비교·분석이 곤란한 문제가 있었으며, 이를 해결하기 위하여 개선된 화상 처리 기법을 적용하여 열화상을 비교·분석하였다.

논문의 2장은 실험의 개요와 결과분석방법을 설명

하고 있으며, 3장은 내부 공극 검출 실험의 결과를 4장은 FRP쉬트의 비부착 부분 검출 실험 결과를 나타내고 있다. 결론은 5장에 제시하였다.

2. 열화상 기법 적용 결함 검출실험

2.1 시험체

내부 공극 결함 검출을 위한 시험체는 Fig. 1(a)와 같은 과정으로 공극 크기의 스티로폼을 각 깊이 별로 매립후 콘크리트를 타설하고 28일 양생후 시편 뒷면의 작은 구멍으로 용제인 MEK 약품을 주입하여 스티로폼을 제거하여 제작되었다. 한 개의 시험체는 동일한 깊이에 4개 직경의 공극을 갖도록 제작되었으며 Fig. 1(b)와 같이 3개의 깊이 별로 제작하였다. Table 1은 내부 공극 시험체의 요약이다.

Table 2는 FRP쉬트의 비부착 시험체의 요약이다. FRP쉬트의 비부착부 검출은 쉬트 자체의 방사율의 영향을 크게 받는다⁽¹⁰⁾. 이에 본 실험에서는 Fig. 2(a)와 같은 제작 과정으로 서로 다른 크기의 비부착 부위를 선정하여 표면처리 하지 않은 FRP쉬트와 방

사율이 0.8~0.95인 흑색 도료로 표면처리한 FRP 쉬트의 두가지 시험체를 제작하여 서로 비교하였다.

Fig. 2(b)와 같이 총 4개의 시험체가 제작되었으며, 2개는 GFRP, 2개는 CFRP쉬트를 표면에 접착하여 제작하였다. 각 시험체는 4개의 서로 다른 크기(직경이 2, 4, 6, 8cm)의 비부착 부분을 갖도록 제작되었다. 이때, 비부착 부분은 FRP쉬트의 접착

Table 1 콘크리트 내부 공극 시험체 요약

시편명	표면으로부터 공극 깊이(mm)	공극의 지름X높이(mm)
CID1-2	10	20X10
CID1-4	10	40X10
CID1-6	10	60X10
CID1-8	10	80X10
CID2-2	20	20X10
CID2-4	20	40X10
CID2-6	20	60X10
CID2-8	20	80X10
CID3-2	30	20X10
CID3-4	30	40X10
CID3-6	30	60X10
CID3-8	30	80X10

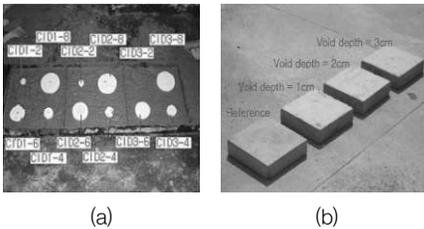


Fig. 1 내부 공극 콘크리트 시험체 (a) 제작 과정 (b) 완성된 시험체

Table 2 FRP쉬트 비부착 시험체 요약

시편명	비부착 부위	비고
CFCD-1	1	CFRP쉬트
CFCD-2	2	
CFCD-3	3	
CFCD-4	4	
GFGD-1	1	GFRP쉬트
GFGD-2	2	
GFGD-3	3	
GFGD-4	4	
SCFCD-1	1	표면처리 CFRP쉬트
SCFCD-2	2	
SCFCD-3	3	
SCFCD-4	4	
SGFGD-1	1	표면처리 GFRP쉬트
SGFGD-2	2	
SGFGD-3	3	
SGFGD-4	4	

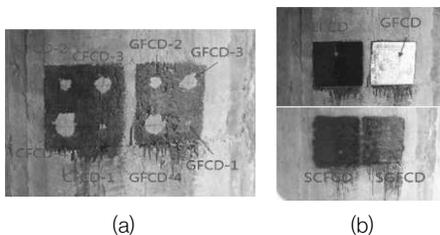


Fig. 2 교각 표면에 설치된 FRP 비부착 시험체 (a)제작 과정 (b)부착이 완료된 상태

비부착크기: 1 < 2 < 3 < 4

시 비부착 부분에는 접착제를 도포하지 않는 방법으로 제작하였으나, 실제 교각 표면에 직접 설치하는 관계로 표면이 고르지 않아서 비부착면이 계획한 대로 형성되기 보다는 불규칙적으로 분포하게 되었다. 원 실험의도와는 차이가 있지만 실제 시공 상황을 잘 반영하는 상태이므로 본 기법의 실제 적용성 측면에서 의미가 있을 것으로 생각된다. Table 2의 비부착 부위의 숫자는 비부착부의 상대적인 크기를 의미한다.

2.2 기본 장비 구성

본 논문의 열화상 실험을 위해 사용된 열화상 카메라(FLIR사의 A40M)는 상온 30°C에서 0.8°C의 작은 온도 차이도 구분할 수 있는 높은 온도 민감도를 갖고 있으며 320×240 픽셀의 해상도로 미세한 픽셀 단위의 분석이 가능하다. 사용된 열화상 카메라의 기본 사양은 Table 3과 같다.

본 실험에서 사용된 열원으로서는 전력 2000W급의 할로겐램프(halogen lamp), 전력 800W급의 원적외선램프(far infrared lamp)를 사용하였다.

빛 또는 열이 방사되는 순간부터 분산이 발생하는 관계로, 열원별 객관적 비교를 위해서 각 열원의 전력은 수직 5cm 거리에서 평면인 벽을 각 열원으로 가열 할 때, 벽에 닿는 빛의 면적으로 나누어 Table 4와 같이 정량화하였다. Table 4에 제시된 바와 같이, 본 실험에서 사용한 할로겐램프의 단위면적당 전력은 원적외선램프에 비하여 25% 더 크다.

Table 3 열화상 카메라 사양

순간시야각 (mrad)	온도민감도 (°C)	스펙트럼 범위 (μm)	이미지 주파수 (Hz)
1.3	0.8 (대기온도 30°C에서)	7.5~13	50~60

Table 4 열원별 단위면적별 전력

열원	단위면적별 전력(kW/m ²)
할로겐램프	8
원적외선램프	6.4

2.3 실험방법

2.3.1 콘크리트 내부 공극

콘크리트 내부 공극 검출 열화상 실험에서는 할로겐램프와 원적외선램프를 열원으로 수직 5cm 거리에서 콘크리트 내부 공극 시험체를 3분 가열 후, 자연냉각 상태에서 3분 동안 열화상 촬영을 수행하였다.

2.3.2 FRP쉬트 비부착

FRP쉬트 비부착 검출 열화상 실험에서는 할로겐램프와 원적외선램프를 열원으로 수직 5cm 거리에서 FRP쉬트 시험체를 3분 가열 후, 자연냉각 상태에서 3분 동안 열화상 촬영을 수행하였다.

또한, FRP쉬트는 열에 민감하기 때문에 내부 공극의 예처럼 근접 가열이 필요하지 않을 수도 있으므로 할로겐램프를 열원으로 사용해서 수직 2m 거리에서 FRP쉬트 시험체를 가열한 직후의 열화상 촬영을 수행하였다. 추가적으로 FRP쉬트가 오후 4시경으로 온도가 낮은 자연광을 받는 동안의 열화상 실험을 참고하였다.

2.4 결과분석방법

2.4.1 표면온도분석

각각의 시험체에 대한 표면온도 정보는 Fig. 3과

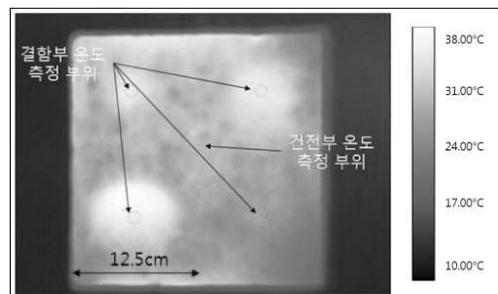


Fig. 3 열화상 온도 부위(결함부, 건전부 온도)

같이 결합부와 건전부의 위치를 선정하였으며 절대 온도로 얻어진 표면온도를 섭씨온도로 전환해서 그 래프로 정리하여 비교분석하였다.

2.4.2 열화상 분석 및 화상처리

본 열화상 분석은 손상된 시험체로부터 나오는 적외선을 열화상 카메라로 검출하여 얻은 320×240 픽셀의 해상도인 열화상 이미지로부터 육안으로 결함을 식별한 것이다.

콘크리트 내부 공극의 경우 열원으로 결합 검출 가능성이 가장 높은 공극 깊이 1cm인 시험체를 3분 가열한 직후의 열화상으로 각각의 열원별 내부 공극 결합의 검출을 비교-분석하였다.

FRP쉬트 비부착 시험체의 경우 열원으로 시험체를 3분 가열한 후, 3분 동안 자연냉각된 열화상으로 각각의 열원별 비부착 결합의 검출을 비교-분석하였다. 또한, 열원으로 2m 거리에서 FRP쉬트 시험체를 가열한 직후의 열화상과 자연광에 노출되었을 때의 열화상으로 FRP쉬트의 비부착 결합을 검출하였다.

일반 열화상으로 결함을 검출시 결합부와 건전부의 구분이 용이하지 못하고 열원으로 할로겐램프와 원적외선램프를 이용한 열화상 결과를 명확히 구분하기 위하여 열화상에 화상처리를 수행하였다.

본 논문에서 쓰인 화상처리기법은 열화상에 가우스 필터링(Gauss low-pass filtering)을 수행한 프리윗 마스크 화상처리기법(Prewitt mask image processing)이다. 프리윗 마스크 기법은 이미지를 Fig. 4(c)의 3×3마스크로 분리하여 Fig. 4(a,b)의 마스크와 이미지의 픽셀을 곱하여 더한 값을 저장하고 이를 계산된 이미지의 중심 픽셀에 할당하여 윤곽선을 검출하는 알고리즘이다. 본 기법은 픽셀 간의 거리를 단위 거리로 한 중앙차분식과 동일하다. 즉, 손상의 윤곽선을 검출하기 위해 이미지의 변화가 급격하게 일어나는 지점을 중앙차분법에 의해 검출하게 된다. 본 프리윗 마스크 기법은 화상처리 기법들 중에서 방향성 윤곽 강조 기법으로 이미지처리

응답시간도 빠른 편이다⁸⁾. 윤곽선 검출을 위해 중앙차분 기법을 사용하기 때문에 차분식에 의해 이미지 변동의 미분치를 계산할 때 민감하게 영향을 미칠 수 있는 noise를 제거하는 것이 중요하다. 이를 위해 프리윗 마스크 기법 적용 전에 가우스 필터링을 수행해서 픽셀 간 이미지 변화를 식(1)과 같은 가중치를 도입하여 평활화했다. 이 가중치가 도입되어 수정된 이미지에 식(2)와 (3)의 절차를 거쳐 차분을 계산한다.

$$W(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(x^2+y^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$G_x(x, y) = (f(x-1, y+1) + f(x, y+1) + f(x+1, y+1)) - (f(x-1, y-1) + f(x, y-1) + f(x+1, y-1)) \quad (2)$$

$$G_y(x, y) = (f(x+1, y-1) + f(x+1, y) + f(x+1, y+1)) - (f(x-1, y-1) + f(x-1, y) + f(x-1, y+1)) \quad (3)$$

$$E_m(x, y) = \sqrt{(G_x(x, y))^2 + (G_y(x, y))^2} \Rightarrow |G_x(x, y)| + |G_y(x, y)| \quad (4)$$

-1	0	1	-1	-1	-1	(x-1, y-1)	(x, y-1)	(x+1, y-1)
-1	0	1	0	0	0	(x, y-1)	(x, y)	(x, y+1)
-1	0	1	1	1	1	(x-1, y+1)	(x, y+1)	(x+1, y+1)
			(a)	(b)		(c)		

Fig. 4 프리윗 (a) X절편, (b) Y절편 마스크 (c) 픽셀연산 3×3 마스크

여기서, 식(1)은 가우스 필터링에서의 5×5 마스크의 가중치이며 σ 는 표준편차로서 입력상수이다. 식(2)와 식(3)은 각각 이미지와 프리윗 마스크의 X, Y 마스크에 해당하는 좌표값과 연산한 결과이다. 차분으로 얻어진 기울기의 크기는 식(4)와 같이 각 성분의 절대값의 합으로 근사화되었다. 본 화상처리 순서도는 Fig. 5와 같다.

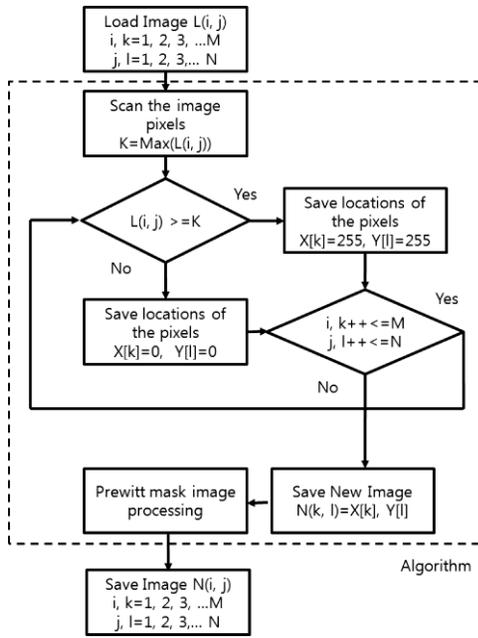


Fig. 5 화상처리 순서도

3. 내부 공극 콘크리트 실험 결과

3.1 표면온도분석

3.1.1 할로겐램프

Fig. 6(a,b,c)는 전술한 콘크리트 시험체를 할로겐램프로 가열한 경우의 표면온도이다. 표면온도분석결과, 깊이 1cm에 공극이 위치하고 공극의 크기가 상대적으로 큰 CID1-6, CID1-8의 표면온도는 건전부보다 높은 것으로 결함이 구분되었다. 그러나 공극의 크기가 상대적으로 작은 CID1-2, CID1-4의 경우는 결함부의 표면온도가 건전부보다 낮아 결함구분이 되지 않았다.

공극의 위치가 깊이 2cm인 CID2-6, CID2-8의 경우 표면온도 분포로 각각의 결함을 명확하게 구분되지 않았다. CID2-2, CID2-4는 건전부의 표면온도보다 낮은 것으로 결함이 식별되지 않았다.

공극 위치가 깊이 3cm인 경우 CID3-8이외에는 모두 건전부보다 표면온도가 낮았다. 결함부의 표면

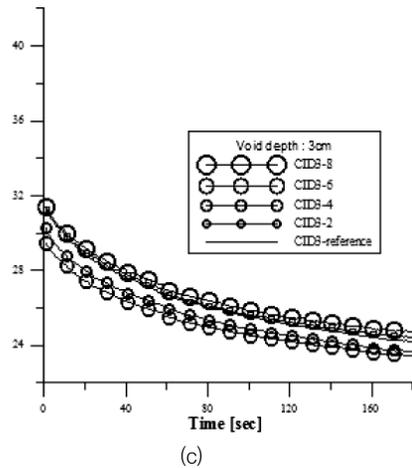
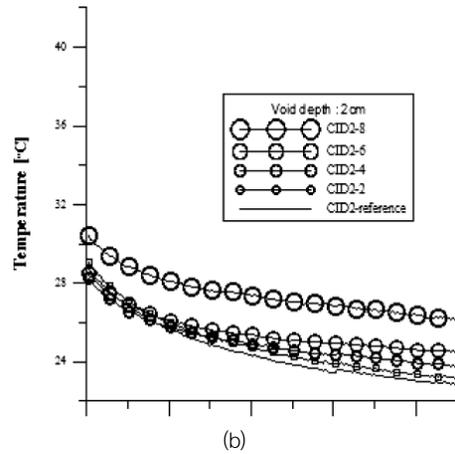
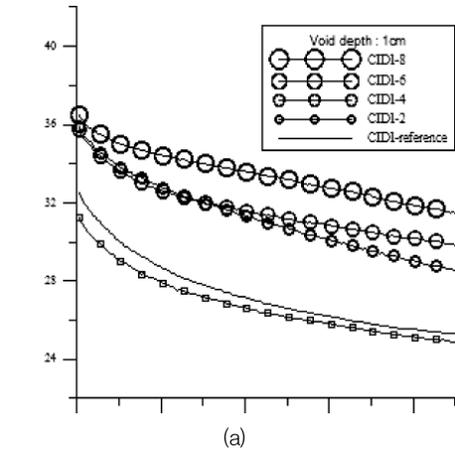


Fig. 6 할로겐램프를 열원으로 사용한 경우의 공극시험체의 표면온도변화: (a)1cm, (b)2cm, (c)3cm

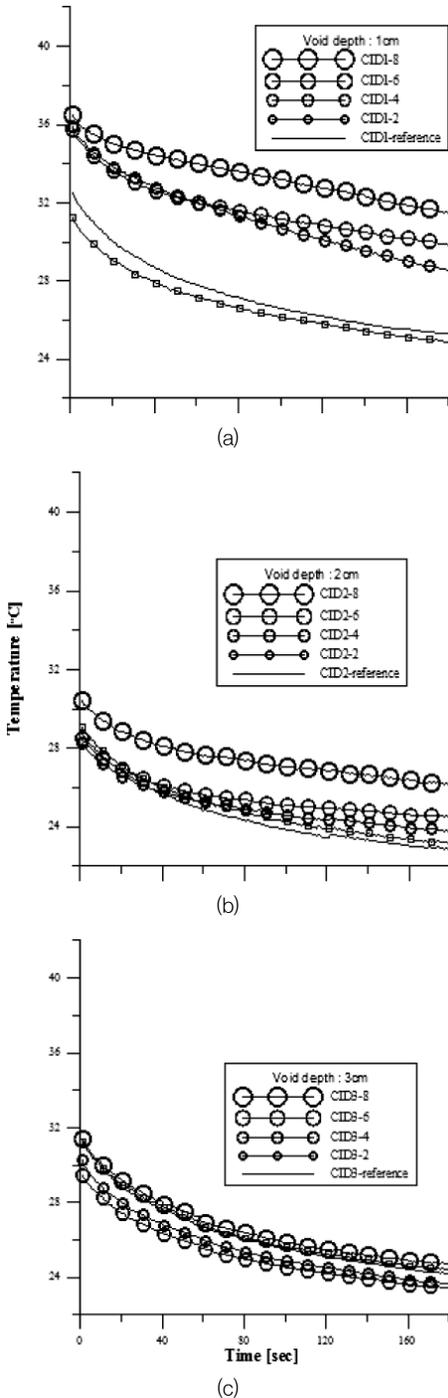


Fig. 7 원적외선램프를 열원으로 사용한 경우의 공극시험체의 표면온도변화; (a)1cm, (b)2cm, (c)3cm

온도가 건전부보다 낮은 경우에는 결함의 크기에 상관없이 표면온도의 변화가 불규칙적이었다.

이와 같이 할로겐램프의 경우 공극 깊이별 공극 크기의 표면온도가 일관되지 않아 결함의 위치가 표면에 가깝고 그 크기가 큰 경우를 제외하고는 표면 온도 분석만으로는 결함 구분이 명확하지 않았다.

3.1.2 원적외선램프

Fig. 7(a,b,c)는 원적외선램프를 열원으로 사용한 경우로 공극의 위치가 깊이 1cm인 경우 공극 지름이 가장 큰 CID1-8의 표면온도가 가장 높았으며 공극 지름의 크기 순서대로 CID1-6, CID1-4, CID1-2의 표면온도가 낮아졌다. 이는 할로겐램프를 열원으로 한 경우와 비교하여 각 공극 지름의 크기별 구분이 용이한 것을 알 수 있다.

공극 깊이 2cm인 경우의 표면온도 양상을 나타내는데 공극 지름별로 CID2-8, CID2-6, CID2-4, CID2-2 순으로 표면온도가 낮게 나타났다.

그러나 공극 깊이 3cm인 경우 할로겐램프의 경우와 마찬가지로 공극 지름 8cm인 경우인 CID3-8을 제외하고 나머지는 확인이 불가하였다.

원적외선램프를 사용했을 때 할로겐램프를 사용했을 때보다 결함의 식별력이 더 우수했고 약 2cm 깊이에 위치한 2~8cm 지름의 공극을 식별이 가능하였다.

3.2 열화상 분석 및 화상처리

결함의 존재유무 뿐만 아니라 공학적인 목적상 결함 면적을 확인하고 판정해야 하는 경우가 종종 발생한다. 이 작업을 위해 대상 표면의 온도분포를 화상으로 표현한 열화상이 사용될 수 있다. Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)는 각각 할로겐램프 및 원적외선램프를 외부 열원으로 사용하여 가열한 후 진행되는 표면 온도변화를 촬영한 것이다.

열화상으로 검출된 결함의 형상이 모호하여 결함의 크기 구분이 어려운 점을 해결하기 위하여 2.4.2절에서 제시된 기법을 적용하였다. 그 결과 Fig. 8(d)

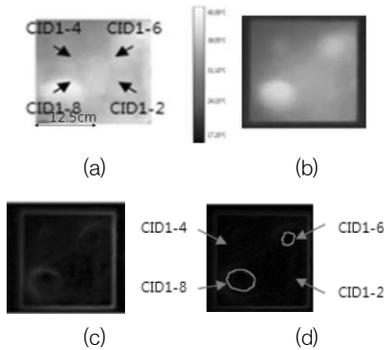


Fig. 8 할로겐램프 열원 공극 깊이 1cm (a)원본열화상, (b)회색열화상, (c)프리윗 마스크 처리, (d)가우스 필터링 후 프리윗 마스크 처리

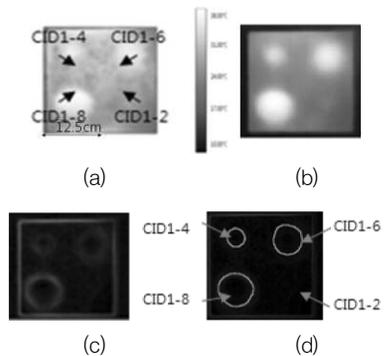


Fig. 9 원적외선램프 열원 공극 깊이 1cm (a)원본열화상, (b)회색열화상, (c)프리윗 마스크 처리, (d)가우스 필터링 후 프리윗 마스크 처리

와 Fig. 9(d)와 같이 분명하게 구분된 결함의 경계를 얻을 수 있었다. 가우스 필터링으로 평활화 작업을 수행하지 않은 통상적인 프리윗 기법을 사용할 경우는 Fig. 8(c)와 Fig. 9(c)와 같이 경계에 형상이 불분명하였다. 여기서 가우스 필터링 가중치의 표준편차 σ 는 0.35로 선정하였다.

4. FRP쉬트 비부착 실험 결과

4.1 표면온도분석

4.1.1 할로겐램프

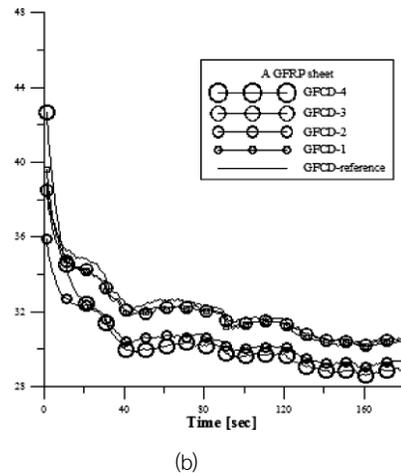
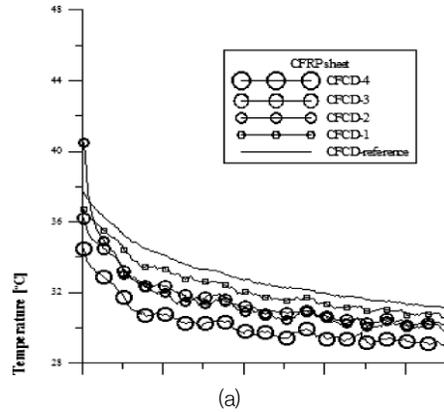


Fig. 10 할로겐램프 열원 표면온도 결과 (a)CFRP쉬트, (b)GFRP쉬트

Fig. 10(a,b)은 CFRP쉬트와 GFRP쉬트의 비부착 결함에 대해서 할로겐램프를 열원으로 사용한 표면온도의 결과이다. CFCD-4와 CFCD-1의 구분이 명확한 반면 비부착 크기가 2와 3인 CFCD-2와 CFCD-3의 경우는 결함의 구분이 되지 않았다. GFRP쉬트의 경우 전체적으로 불명확한 표면온도 양상을 보였다.

4.1.2 원적외선램프

Fig. 11(a,b)은 CFRP쉬트와 GFRP쉬트의 비부착 결함에 대해서 원적외선램프를 열원으로 사용한

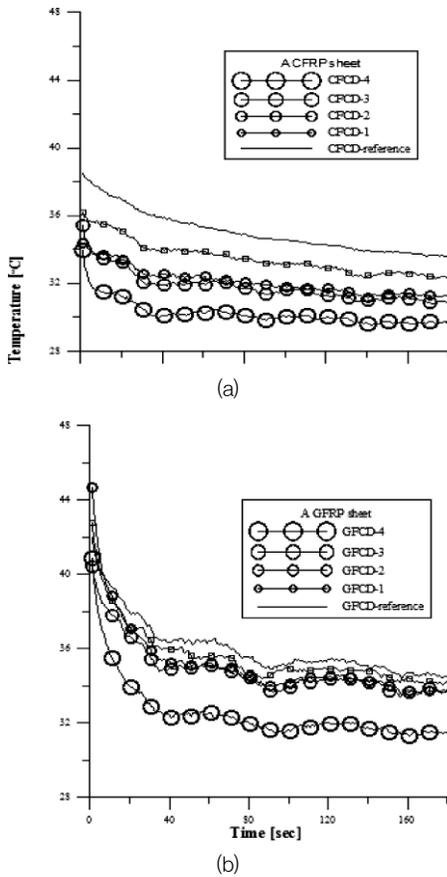


Fig. 11 원적외선램프 열원 표면온도 결과 (a)CFRP시트, (b) GFRP시트

경우에서 표면점에서 측정된 온도이다. CFCD-1과 CFCD-4의 구분은 명확하였으나 CFCD-2와 CFCD-3의 구분은 모호하였다. GFRP시트의 경우에서도 GFCD-1과 GFCD-4의 구분은 명확하였으나 GFCD-2와 GFCD-3의 구분은 모호하였다. 원적외선램프를 이용한 결과에서도 결함의 크기별 표면온도가 일관되지 않았다.

4.1.3 열원간 표면온도분석 비교 결과

FRP시트의 비부착 결함 검출을 위해 할로겐램프와 원적외선램프를 열원으로 표면온도를 분석한 결과, 원적외선램프를 열원으로 사용할 경우 할로겐램프

보다 비부착 결함구분이 용이하였다. 그러나 두 열원 모두 결함의 크기에 따른 결함부의 표면온도가 일관되지 않아 결함 구분이 어려웠다.

4.2 열화상 분석 및 화상처리

표면온도분석으로 구분되지 않았던 결함을 검출하기 위해 열화상 분석을 수행하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 각 열원으로 시험체를 가열후 3분 동안 자연 냉각한 열화상이다. Fig. 12(a), Fig. 13(a), Fig. 13(b)에서 표면온도분석에서 결함이 구분되지 않았던 결함크기 2와 3이 구분되었다. 전체적으로 불명확한 표면온도 양상을 보였던 Fig. 12(b)에서도 결함 결함크기가 가장 큰 GFCD-4가 열화상으로 검출되었다. 열화상으로도 Fig. 13의 원적외선램프가 Fig. 12의 할로겐램프보다 결함 구분이 우수하였다.

FRP시트의 비부착은 콘크리트 내부 공극과 반대로 결함부의 온도가 건전부보다 낮은 온도로 검출되었다.

이에, 추가적으로 열화상 실험시 FRP시트의 취약점인 방사율의 영향을 검토하였다. FRP시트와 방사율 0.8~0.95인 흑색 도로로 표면처리한 FRP시트에 열효율이 낮은 할로겐램프로 가열직후의 열화상

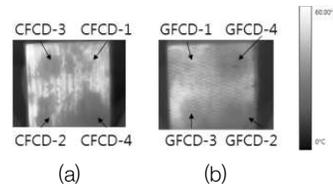


Fig. 12 할로겐램프 열원 열화상 결과 (a)CFRP시트, (b) GFRP시트

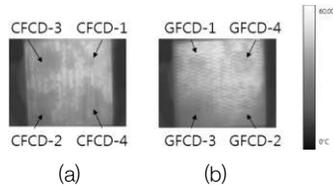


Fig. 13 원적외선램프 열원 열화상 결과 (a)CFRP시트, (b)GFRP시트

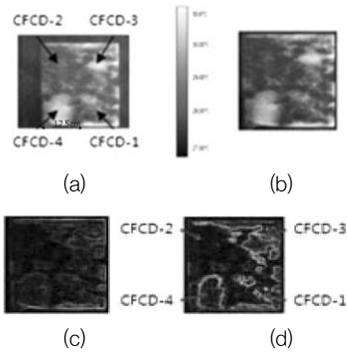


Fig. 14 할로겐램프 열원, CFRP시트 (a)원본 원본열화상, (b) 회색열화상, (c)프리윗 마스크 처리, (d)가우스 필터링 후 프리윗 마스크 처리

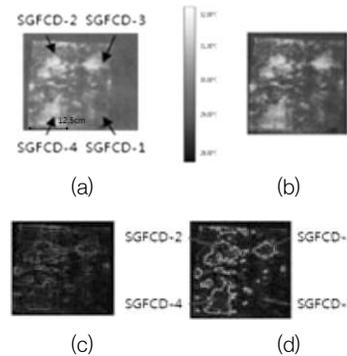


Fig. 17 할로겐램프 열원, 표면처리한 GFRP시트 (a)원본열화상, (b)회색열화상, (c)프리윗 마스크 처리, (d)가우스 필터링 후 프리윗 마스크 처리

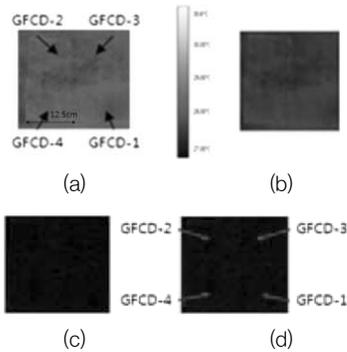


Fig. 15 할로겐램프 열원, GFRP시트 (a)원본 열화상, (b)회색 열화상, (c)프리윗 마스크 처리, (d)가우스 필터링 후 프리윗 마스크 처리

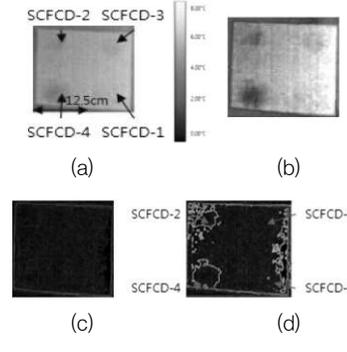


Fig. 18 오후 4시경 자연광을 열원으로 사용한 표면처리 CFRP 시트 (a)원본열화상, (b)회색열화상, (c)프리윗 마스크 처리, (d) 가우스 필터링 후 프리윗 마스크 처리

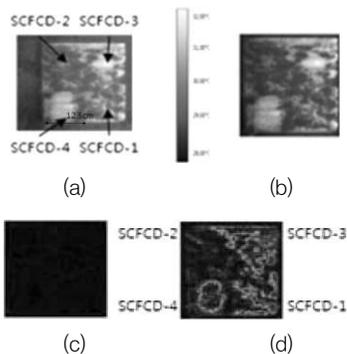


Fig. 16 할로겐램프 열원, 표면처리한 CFRP시트 (a)원본열화상, (b)회색열화상, (c)프리윗 마스크 처리, (d)가우스 필터링 후 프리윗 마스크 처리

에 FRP시트에 적합한 표준편차를 0.28로 설정한 가우스 필터링후 프리윗 마스크 기법으로 화상처리처리를 수행하였다. 그 결과, CFRP시트의 경우 Fig. 14(d) 및 Fig. 16(d)와 같이 표면처리여부와 관계없이 결함이 검출되었다. 그러나 GFRP시트의 경우는 표면처리하지 않은 Fig. 15(d)에서는 결함이 검출되지 않았으나 표면처리한 Fig. 17(d)와 같이 결함의 형상이 검출되었다. 즉, GFRP시트의 결함을 열화상으로 검출시에는 방사율이 0.8~0.95인 흑색도료로 표면처리가 필요하다.

전술한 할로겐램프보다 열효율이 낮은 열원으로 결함 검출여부를 검토하기위해 일조량이 적은 자연광을 열원으로 이용하여 표면처리한 CFRP시트의 비

부착 결합을 검출하였다. 그 결과, CFRP쉬트의 경우는 Fig. 18(a)과 같이 대기온도에 의한 별도의 큰 일조량이 없음에도 CFRP쉬트의 비부착 결합이 건전부보다 낮은 온도로 검출되었다. Fig. 18(d)와 같이 본 화상처리방법으로 결합부 검출이 가능하였다.

5. 결 론

1) 적외선 열화상의 응답증진을 위해 할로겐램프와 원적외선램프의 효율성을 공극 결합과 FRP비부착 결합 시험체를 이용해서 비교한 결과 두 시험체 모두 원적외선램프의 효율성이 높은 것으로 확인되었다.

2) 가열 후 자연냉각을 진행하면서 열화상을 획득한 결과 공극 시험체의 경향과 FRP 비부착 시험체의 경향이 반대로 얻어졌다. 공극 시험체의 경우 공극이 위치한 결합부의 표면온도가 주변 건전부의 온도보다 높았던 반면, FRP비부착 시험체에서는 비부착 부위의 온도가 건전부보다 더 낮은 경향을 보였다.

3) 결합 부위를 시각적으로 명확히 구분하기 위해 가우스 필터링 기법에 의해 가중치를 부여한 후 프리윗 마스크기법을 적용한 기법을 제안하였다. 이 기법을 적용한 결과 결합부를 명확히 식별할 수 있었으며, FRP 비부착과 같은 비정형 결합의 경우에도 성공적으로 적용될 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업 “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발”(과제번호: 05첨단융합B01)과 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(2009-0072714)의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 깊은 감사의 말씀 올립니다.

참고문헌

1. 지광습, “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트

비파괴 검사 시스템 개발”, 교량검사로봇개발사업단 최종 연구보고서(2009).

2. 심준기, 지광습, 박진형, 조효남, 이종세, “토목 구조물의 손상 검출을 위한 적외선 열화상 기법의 적용 사례 분석”, 한국구조물진단학회 논문집, 제12권 3호, 2008, pp.71-83.
3. Stanley C. C. and Balendran R. V., “Developments in Assessing the Structural Integrity of Applied Surfaces to Concrete Buildings”, Structural Survey, Vol. 12, No.4, 1994, pp.4-9.
4. Gailius A. and Zukauskas D., “Determination of Concrete Structural Defects by Infrared Spectrum Analysis”, ISSN 1392-1320 Materials Science (Medziagotyra), Vol. 9, No.1 2003, pp.106-110.
5. Clark M. R., McCann D. M. and Forde M. C., “Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges”, NDT & E International, Vol. 36, No.4, June 2003, pp.265-275.
6. Starnes M. A. and Carino N. J., “Active infrared thermography for NDT of concrete structures strengthened with fiber reinforced polymer”, Materials Evaluation, Vol.63, No.1, January 2005, pp.56-63.
7. Brown J. R. and Hamilton III, “NDE of Reinforced Concrete Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Composite using Infrared Thermography”, nfraMation the thermographer's conference 2003.
8. Raman M. and Sohal J. S., “Performance Evaluation of Prewitt Edge Detector for Noisy Images”, GVIOP Journal, Vol. 6, 2006, pp. 39-46.
9. Brown J. R. and Hamilton H. R., “Heating Method and Detection Limits for infrared Thermography Inspection of Fiber-Reinforced Polymer Composites”, Vol. 104, No.5, September-October 2007, pp. 481-490.
10. Starnes M. A. and Carino N. J., “Active infrared thermography for NDT of concrete structures strengthened with fiber reinforced polymer”, Materials Evaluation, Vol. 63, No.1, January 2005, pp.56-63.

(접수일자 : 2009년 6월 8일)

(1차수정일자 : 2009년 7월 27일)

(심사완료일자 : 2009년 8월 17일)