

## 열화상카메라의 최적 공극탐지를 위한 민감도 분석

### A Sensitivity Study for Optimized Void Detection of Infrared Camera

박진형\* · 최현호\*\* · 지광습\*\*\* · 조호남\*\*\*\*

Park, Jin Hyung · Choi, Hyun Ho · Ji, Goangseup · Cho, Hyo Nam

#### 1. 서론

자동화 유지관리로봇에는 비접촉식 비파괴검사시스템이 필요하며 이미 육안으로 확인 가능한 손상은 머신비전(Machine Vision) 등으로 자동화가 추진 중에 있다. 뿐만 아니라, 내부 및 보수·보강 구조체의 계면에 존재하는 손상 검출을 위한 신뢰도 높은 대용량·비접촉식 비파괴 검사 시스템 개발이 절실한 실정이다. 하지만 이를 위한 열화상카메라는 장비의 소형성과 대용량·비접촉식의 특징을 지니고 있으나 환경요인에 민감한 단점이 있어서 열화상 정보의 감도증진을 위한 기법개발과 각종 손상과 열화상정보의 상관관계 및 적용조건에 관한 연구가 필요한 실정이다. 이에 지금까지 열화상카메라를 이용한 실험을 통해 최적의 조건을 찾아내기 위한 연구<sup>3),4)</sup>가 수행되어 오고 있으나, 조건이 다른 경우에 대한 결과를 알아내기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 구조체의 외부 및 내부 손상에서 발산되는 적외선을 열화상카메라로 감지하는 방법에 대한 최적의 조건을 찾아내기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 2. 적외선 시뮬레이션

실제 실험에 앞서 실험에 필요한 변수들의 개략도는 아래의 그림 1과 같다. 열화상카메라가 감지할 수 있는 최소온도차는 일반적으로 30℃ 상태에서 0.10℃이다. 이러한 최소온도차 이상의 값을 가지고 공극 주변에서 발산되는 적외선을 열화상카메라로 감지하기 위해서 필요한 조건들을 알아보기 위하여 다양한 변수들을 고려하여 시뮬레이션을 수행한다. 먼저 가열온도(T), 가열시간(t), 가열범위(w), 공극깊이(h), 그리고 공극크기(a, b)를 고려한 모델링을 만들었고 각 시뮬레이션 변수들에 따른 민감도를 분석하였다.

##### 2.1 모델링<sup>5)</sup>

콘크리트 시편에 표면 근처에 인위적인 타원형의 공극을 만들어 가열온도, 가열시간, 공극깊이, 그리고 공극크기 등 다양한 변수들의 최적값과 범위 등을 알아보기 위해 구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 그림 2와 같이 모델링을 하였다. 공극의 중심을 기준으로 대칭형(symmetric)의 2차원 모델에 콘크리트 시편의 표면을 공기 중에서 10cm 떨어진 곳에서 가열을 하도록 모델링을 하였다. 일정 시간  $t_1$  동안 일정온도  $T_1$ 으로 가열을 하다가  $t_1$ 시간이 지난 후에는 가열을 중지하고 실내온도 상태를 유지하도록 모델링을 하였다. 모

표 1. 콘크리트와 공기의 열물성치<sup>1),2)</sup>

재 료	밀 도	열전달율	비 열
콘크리트	2300 kg/m <sup>3</sup>	2.67 J/m · sec · °C	1088.36 J/kg · °C
공기	1.29 kg/m <sup>3</sup>	2.36 J/m · sec · °C	1011.76 J/kg · °C

\* 학생회원 · 한양대학교 토목공학과 석사과정 · 공학박사 · E-mail: kajws@hanyang.ac.kr  
 \*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 계약교수 · 공학박사 · E-mail: padre@hanyang.ac.kr  
 \*\*\* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail: g-zi@korea.ac.kr  
 \*\*\*\* 정회원 · 한양대학교 건설환경시스템공학과 정교수 · 공학박사 · E-mail: ryfid@hanyang.ac.kr

텔링에 사용된 콘크리트와 공기의 밀도(density), 비열(specific heat), 그리고 열전달율(heat conductivity)은 표 1과 같다.

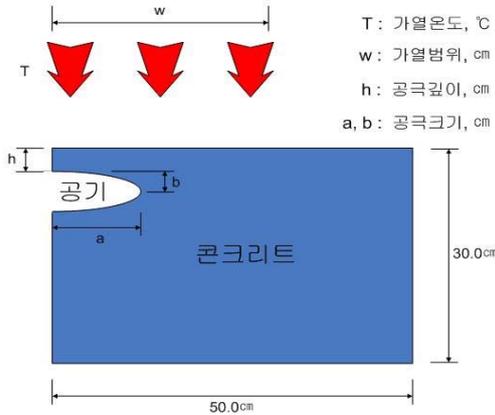


그림 1. Visual modeling

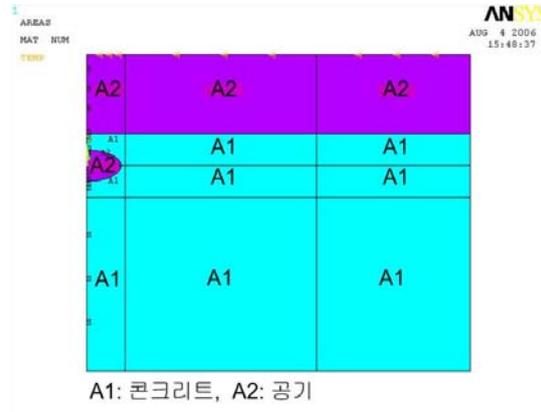


그림 2. ANSYS modeling

### 3. 시뮬레이션 조건별 결과

구조해석 프로그램 ANSYS 프로그램을 사용하여 다음과 같은 각각의 변수에 대해서 각 시간에 대한 온도분포와 온도차이 등을 분석해 보았다.

#### 3.1 가열온도

가열온도의 차이(40℃ ~ 200℃)를 두었을 때, 표 2에서 보는 바와 같이 각 온도의 시간대별 최대온도와 공극중심 표면온도와와의 차이(이하  $\Delta T$ )의 비율이 30분 가열 시 가열온도 60℃일 때 0.30℃(0.5%), 가열온도 80℃일 때 0.47℃(0.6%), 120℃일 때 0.82℃(0.7%), 그리고 200℃일 때 1.51℃(0.8%), 1시간 가열 시 가열온도 60℃일 때 0.36℃(0.6%), 가열온도 80℃일 때 0.56℃(0.7%), 120℃일 때 0.97℃(0.8%), 그리고 200℃일 때 1.79℃(0.9%) 거의 비슷하게 나왔다. 다시 말해, 온도에 따른  $\Delta T$ 가 가열해 주는 온도에 비례하여 증가한다. 이번 연구에서 가열온도는 일반적으로 가열방법이 용이하면서 열화상카메라로 온도차를 감지할 수 있는 수준인 80℃를 적용한다.

표 2. 가열온도별 최대표면온도와 공극중심 표면온도와의 차이

가열온도	최대온도	$\Delta T$ (가열온도대비)	최대온도	$\Delta T$ (가열온도대비)
	가열시간 30분		가열시간: 1시간	
60℃	36.47℃	0.30℃ (0.5%)	39.32℃	0.36℃ (0.6%)
80℃	43.02℃	0.47℃ (0.6%)	47.50℃	0.56℃ (0.7%)
120℃	56.12℃	0.82℃ (0.7%)	63.86℃	0.97℃ (0.8%)
200℃	82.33℃	1.51℃ (0.8%)	96.58℃	1.79℃ (0.9%)

가열범위: 30cm, 공극깊이: 1.0cm, 공극의 반경: 2.0cm, 0.50cm

#### 3.2 가열시간 및 가열 후 촬영가능시간

가열시간의 차이(15분 ~ 6시간)를 두었을 때, 표 3에서 보는 바와 같이 실험에 적합한 1시간 이내 결과를 살펴보면 가열 후 적외선 촬영에 필요한 온도차의 범위와 촬영가능시간이 30분을 가열했을 경우에는 약 107초~724초, 45분을 가열했을 경우에는 145초~1,037초, 그리고 1시간을 가열했을 경우에는 96초~1,021초이다. 따

표 3. 가열 후 열화상카메라 촬영가능 시간대별 온도차

가열시간	30분	45분	1시간
대기시간	107초 ~ 724초	145초 ~ 1,037초	96초 ~ 1,021초
온도차, $\Delta T$	0.34 $^{\circ}\text{C}$ ~ 0.47 $^{\circ}\text{C}$	0.30 $^{\circ}\text{C}$ ~ 0.53 $^{\circ}\text{C}$	0.33 $^{\circ}\text{C}$ ~ 0.56 $^{\circ}\text{C}$

가열온도: 80 $^{\circ}\text{C}$ , 가열범위: 30cm, 공극깊이: 1.0cm, 공극의 반경: 2.0cm, 0.50cm

라서, 1시간 이내의 가열시간의 경우에는 2분 이내부터 10~12분 이내에 열화상카메라로 촬영 시 적외선 감지에 필요한 온도차를 구하는데 문제가 없다. 시간이 늘어날수록 온도차와 촬영가능시간의 폭이 넓어지지만 가열하는 시간에 비하여 그 증가는 큰 차이를 보이지 않는다.

### 3.3 가열범위

가열범위의 차이(10cm ~ 49cm)를 두었을 때, 그림 3과 같이 가열온도 80 $^{\circ}\text{C}$ , 가열시간 30분, 공극깊이 2.0cm, 공극크기 2.0cm, 0.50cm인 경우에는 가열범위가 20cm미만이면 적외선 촬영에 필요한 온도차가 33분경에 0.19 $^{\circ}\text{C}$ 로 0.10 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도차를 감지할 수 있는 열화상카메라가 감지하기에 작은값을 가진다. 그러므로, 적외선 촬영을 통한 온도의 차이를 알아보기 위해서는 20cm 이상의 가열범위를 가져야 한다.

### 3.4 공극깊이

공극깊이의 차이(0.5cm ~ 4.0cm)를 두었을 때, 그림 4와 같이 가열온도 80 $^{\circ}\text{C}$ , 가열시간 30분, 가열범위 30cm, 공극크기 2.0cm, 0.50/0.25cm인 경우에는 공극이 2cm 깊이에 있을 때 온도차가 42분경에 0.09 $^{\circ}\text{C}$ 로 공극의

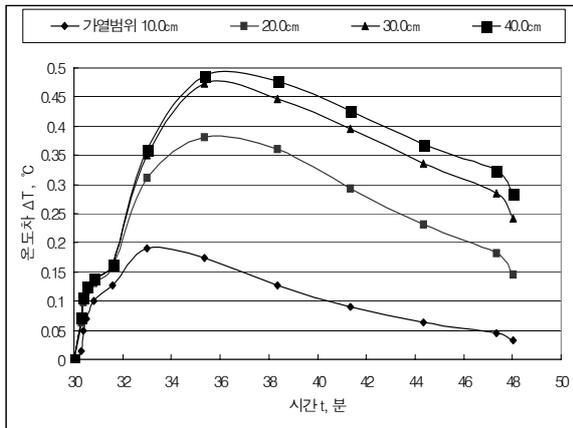


그림 3. 가열범위별 시간에 따른 온도차

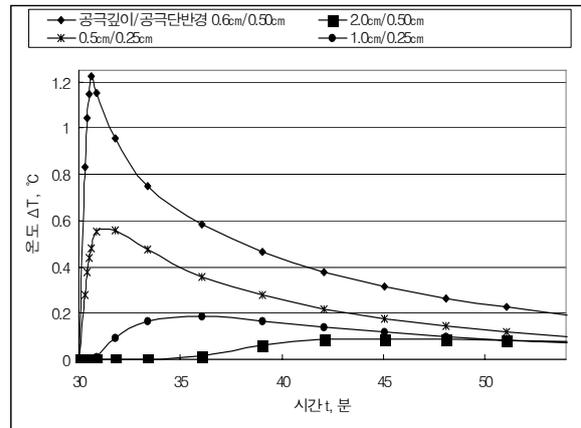


그림 4. 공극깊이별 시간에 따른 온도차

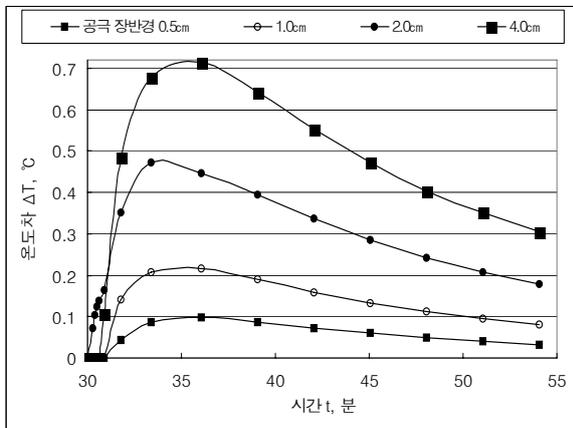


그림 5. 공극 장반경별 시간에 따른 온도차

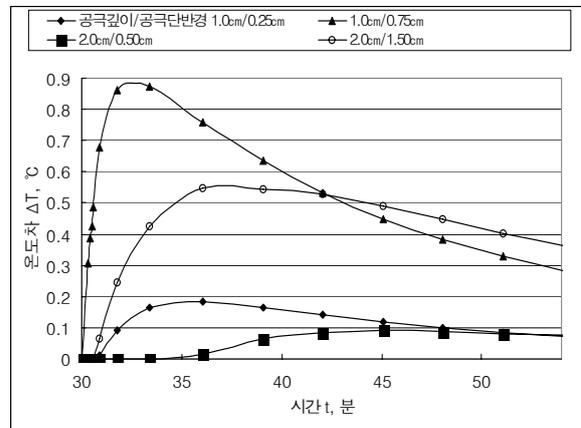


그림 6. 공극 단반경별 시간에 따른 온도차

효과가 거의 나타나지 않았다. 공극깊이 1.0cm/공극단반경 0.50cm일 때 33분경에 0.47℃, 공극깊이 0.60cm/공극단반경 0.50cm일 때 31분경에 1.22℃로 공극깊이/공극단반경의 비가 작을수록 온도차는 확연히 나타나게 된다. 하지만, 공극깊이 1.5cm/공극단반경 0.50cm일 때 40분경에 0.19℃로 공극깊이/공극단반경의 비가 2이상이면, 온도차가 거의 발생되지 않아 열화상카메라를 이용한 감지가 불가능하다.

### 3.5 공극크기

공극크기의 차이(0.25cm ~ 4.0cm)를 두었을 때, 그림 5와 같이 가열온도 80℃, 가열시간 30분, 가열범위 30cm, 공극깊이 1.0cm, 공극의 단반경 0.50cm인 경우에는 장반경이 1.5cm일 때 33분경에 0.37℃ 그리고 장반경이 2.0cm일 때 33분경에 0.47℃로 공극장반경 1.5cm이상이면 열화상카메라로 촬영할 때 좋은 결과를 얻을 수 있는 공극 장반경 길이로 판단된다. 또한, 단반경의 경우에는 그림 6에서 보는 바와 같이 가열온도 80℃, 가열시간 30분, 가열범위 30cm, 공극깊이 1.0/2.0cm, 공극의 장반경 2.0cm인 경우에는 공극깊이 2cm이고 공극단반경 0.10cm일 때는 42분경에 0.27℃인 반면에, 공극깊이 2cm이고 공극단반경 0.50cm일 때는 42분경에 0.09℃로 공극깊이가 표면으로부터 2cm이상이고 단반경의 2배 이상일 때에는 온도차가 매우 작게 나타난다. 따라서 공극크기는 장반경의 길이보다는 단반경의 길이와 공극깊이가 더 중요한 변수로 판단된다.

## 4. 결론 및 추후 연구방향

열화상카메라를 이용하여 적외선을 감지하는데 필요한 변수들과 그에 대한 최적값으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가열시간이 30분일 때에는 가열온도가 80℃이상, 가열시간이 1시간일 때에는 60℃이상 이어야 한다는 것을 알 수 있었다.
2. 가열 후 콘크리트 시편표면 최대온도와 공극중심 표면온도와의 차이를 촬영할 때, 열화상카메라의 촬영가능시간은 가열시간과 가열온도에 따라 약 1분30초~15분 정도라는 것을 알 수 있었다.
3. 가열범위는 20cm이상을 가열해야 하며, 공극의 깊이는 2.0cm이내 존재하는 것이 열화상카메라로 감지가 가능하다는 것을 알 수 있었다.
4. 콘크리트 시편의 공극크기는 장반경보다 단반경이 중요하며, 단반경의 경우 공극깊이의 1/2이상이어야 열화상카메라로 촬영 시 감지가 가능한 수준이라는 것을 알 수 있었다.

이상과 같은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제적인 실험연구를 진행할 것이며, 향후 열화상카메라로 평면방향의 콘크리트 내부 손상을 검출하는 연구에 적용할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단융합건설기술개발사업 “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발”(과제번호: 05 첨단융합 B01)의 연구내용 중 일부이며, 이에 대한 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 한국콘크리트학회 편저 (2005) 콘크리트구조설계기준·해설, 한국콘크리트학회
2. P. Kumar Metha and Paulo J.M. Monteiro (2006) CONCRETE Microstructure, Properties, and Materials, Mc Graw Hill
3. 윤영호, 전명훈, 박지영, 이정민, 정 란 (2003) 인공공동 시험체를 이용한 적외선 열화상법에 의한 콘크리트 공동탐지에 관한 기초연구, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회논문집 p.169~174
4. 이주영, 이현호 (2000) 적외선카메라를 이용한 섬유쉬트 보강공사의 결함검지기술, 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제20권, 제1호, p.501~504
5. 태성에스엔이 FEA사업부 (2006) ANSYS Heat Transfer Analysis, (주)태성에스엔이, 개정4판