

# 열전달 시뮬레이션을 통한 최적공극탐지 차트개발

## Development of an Optimum Void Detection Chart using Heat Transfer Simulation

최현호\* · 박진형\*\* · 지광습\*\*\*

Choi, Hyun Ho · Park, Jin Hyung · Ji, Goangseup

---

### ABSTRACT

It is essential to develop a large capacity, non-contact nondestructive inspection system having high reliability to investigate repaired and strengthened structures. Nowadays, an infrared camera is widely used in non-contact nondestructive inspection system. Because an infrared camera is sensitive to the surrounding environment, it is necessary to improve a sensitivity of thermal image information and a relationship between defects and thermal image information .

In this papaer, presented is an optimum void detection chart for the optimum conditions to detect infrared rays from inside and outside defects like voids and cracks in concrete structures using extensive computer simulation. Sensitivity studies are performed with respect to variables influencing the temperature distribution such as heating temperature, heating time, and geometries of defect, etc. It may be stated that it could be successfully utilized for the non-contact nondestructive inspection system to detect defects in concrete structures.

---

### 1. 서론

최근 들어 내부 및 보수·보강 구조체의 계면에 존재하는 손상 검출을 위한 신뢰도 높은 대용량 · 비접촉식 비파괴 검사 시스템 개발이 절실한 실정이다. 이에 열화상카메라, 레이저, 그리고 초음파 등을 이용한 비파괴검사시스템이 다양하게 연구되고 있지만, 이를 위한 열화상카메라 등은 장비의 소형성과 대용량·비접촉식의 장점에도 불구하고 환경요인에 민감한 단점이 있어서 열화상 정보의 감도증진을 위한 기법개발과 각종 손상과 열화상정보의 상관관계 및 적용조건에 관한 연구가 필요한 실정이다. 지금까지 열화상카메라를 이용한 실험을 통해 최적의 조건을 찾아내기 위한 연구<sup>3),4)</sup>가 수행되어 오고 있으나, 조건이 다른 경우에 대한 결과를 알아내기 위해서는 각 경우마다 실험을 통해서 최적의 조건을 다시 구해야하는 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 구조체의 외부 및 내부 손상에서 발산되는 적외선을 열화상카메라로 감지하는 방법에 대한 시뮬레이션을 수행하여 최적의 조건을 찾아내기 위한 차트를 작성하였다.

---

\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 계약교수 · 공학박사

\*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 석사과정 · 공학학사

\*\*\* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 · 공학박사

## 2. 적외선 시뮬레이션

공극탐지를 위한 열화상카메라 실험에 필요한 변수들의 개략도는 아래의 그림 1과 같다. 열화상카메라가 감지할 수 있는 최소온도차는 일반적으로 30℃ 상태에서 0.08~0.10℃이다. 이러한 최소온도차 이상의 값을 가지고 공극 주변에서 발산되는 적외선을 열화상카메라로 감지하기 위해서 필요한 조건의 최적값을 알아보기 위하여 다음과 같은 다양한 변수들을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 가열온도(T), 가열시간(t), 가열범위(w), 공극깊이(h), 그리고 공극크기(a, b)를 고려한 모델링을 만들어 각 시뮬레이션 변수들에 따른 민감도를 분석하고 그 결과를 이용하여 차트를 작성하였다.

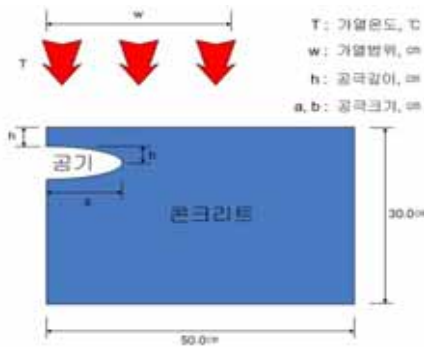


그림 1. Visual modeling

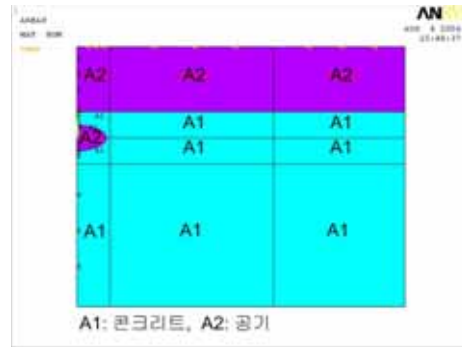


그림 2. ANSYS modeling

### 2.1 모델링<sup>5)</sup>

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

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

## 3. 시뮬레이션 조건별 결과 및 차트

구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 다음과 같은 각각의 변수에 대해서 최대온도차를 구하고 그 결과를 이용하여 차트를 작성하였다.

### 3.1 가열시간, 가열온도, 가열범위

가열시간과 가열온도 및 가열범위에 따른 최대온도차(이하  $\Delta T$ )가 아래의 그림 3, 4와 같다. 그림 3에서 가열(40°C~200°C)과 냉각(-20°C~10°C)에 따른  $\Delta T$ 의 결과를 살펴보면, 실내온도 25°C를 기준으로 각 가열시간에 대한 10°C와 40°C, -10°C와 60°C의  $\Delta T$ 가 부호만 다를 뿐, 그 절대값은 같다는 것을 볼 수 있다. 이는  $\Delta T$ 가 가열과 냉각에 따른 차이가 아니라 실내온도와 가열온도의 차이에 대한 절대값에 따라 결정된다는 알 수 있다. 그리고 가열시간 30분을 기준으로 열화상카메라가 감지할 수 있는 온도차인 0.10°C를 고려하면  $\Delta T$ 가 0.47°C인 80°C가 공극탐지를 위한 적정온도로 판단된다. 또한 가열시간에 있어서 180분 가열했을 때가 가장 큰  $\Delta T$ 를 나타내었으며, 가열온도 80°C를 기준으로 가열시간 60분에 0.56°C, 90분에 0.60°C, 그리고 120분에 0.62°C로 60분 이상이면  $\Delta T$ 의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 4에서 가열범위가 30cm 이상이면 가열범위에 따른  $\Delta T$ 의 차이가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 열화상카메라 촬영을 위해서는 가열온도 80°C와 가열시간 30분~60분, 그리고 가열범위 30cm 이상이 공극탐지를 위한 최적조건이라는 것을 알 수 있다.

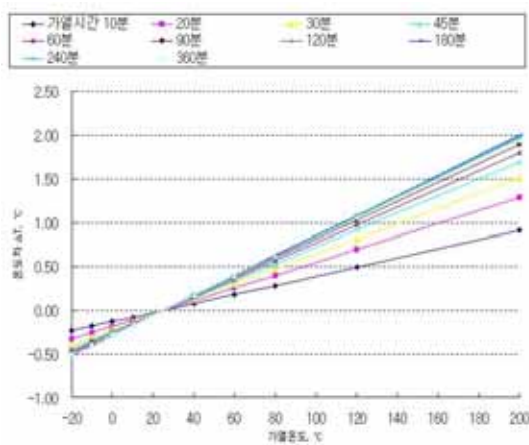


그림 3. 가열온도와 가열시간에 따른 최대온도차

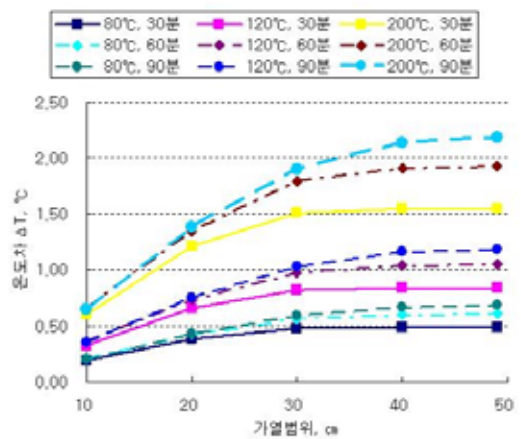


그림 4. 가열범위와 가열온도에 따른 최대온도차

### 3.2 공극깊이, 공극장반경, 공극단반경

공극깊이와 공극장반경, 공극단반경에 따른  $\Delta T$ 가 아래의 그림 5, 6과 같다. 공극이 표면에 가까울수록 공극장반경과 공극단반경이 클수록  $\Delta T$ 는 크게 나타났다. 그림 5에서 보는 바와 같이 공극깊이와 공극단반경의 비가 0.4와 0.8일 때의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 같은 비율을 가지더라도 (표면과 공극사이의 두께가 얇은) 공극깊이가 작을수록  $\Delta T$ 가 커졌다. 그리고 그림 6에서 공극깊이가 커질수록 공극장반경의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 따라서, 공극깊이가 얇고 그에 대한 공극단반경이 클수록 최대온도차가 커지며 공극깊이가 깊은 경우에는 그에 따라 공극장반경의 크기가 커져야 열화상카메라를 이용한 적외선 감지가 가능할 것이라는 것을 예상할 수 있다.

## 4. 결론 및 추후 연구방향

열화상카메라를 이용하여 적외선을 감지하는데 필요한  $\Delta T$ 에 영향을 미치는 변수들의 특성과 그에 대한 최적값으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

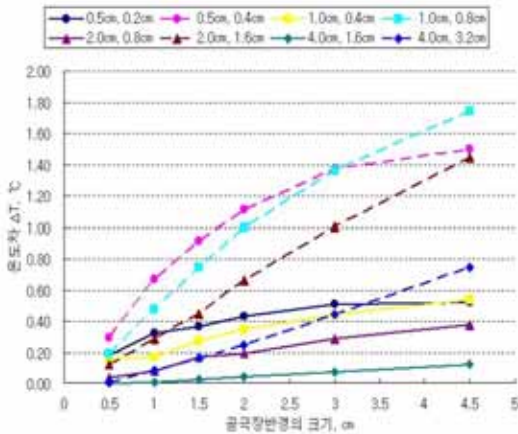


그림 5. 공극깊이와 공극크기에 따른 최대온도차

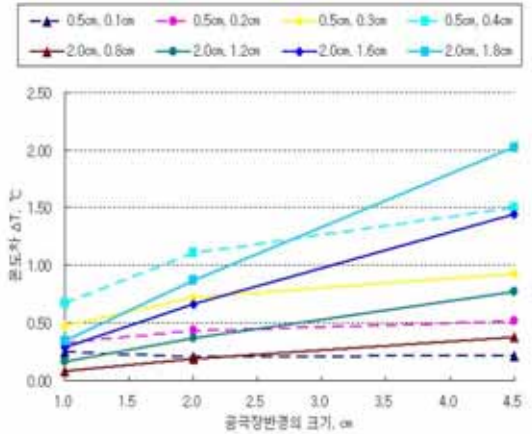


그림 6. 공극깊이와 공극크기에 따른 최대온도차

1. 가열시간은 3시간 이내이어야 하며, 그 중에서 30분~60분이 가장 적합한 가열시간이다.
2. 가열시간이 30분을 기준으로 가열온도가 80℃ 이상, 가열시간이 1시간일 때에는 60℃ 이상 이어야 한다는 것을 알 수 있다.
3. 가열범위는 100℃ 전후를 기준으로 공극중심을 기준으로 30cm 이상이어야 한다.
4. 공극깊이는 얕으면서 공극의 높이에 해당하는 공극단반경이 클수록, 공극깊이가 깊은 경우에는 공극단반경뿐만 아니라 동시에 공극장반경의 크기도 커야한다는 것을 알 수 있다.

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 섬유유트 보강공사의 결함검지기술, 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제20권, 제1호, p.501~504
5. 태성에스엔이 FEA사업부 (2006) ANSYS Heat Transfer Analysis, (주)태성에스엔이, 개정4판