적외선 열화상을 이용한 숏크리트 보강사면의 비파괴점검

The Non-destructive Inspection Using Infrared Thermal Technique on Reinforced Slopes by Shotcrete

신 창 건* 이 송** 안 상 로***

Shin, Chang-Gun Lee, Song Ahn, Sang-Ro

Abstract

It needs to Prevent damage as aging shotcrete itself exists as a dangerous component to comuting vehicles or infrastructure due to scaling, spaling, and loosening. However, it is hard to make an approach owing to a steep slope and high work, and there has been indicated a limit that it is difficult to grasp the internal condition of shotcrete on the surface. This study aimed to research internal defects that cannot be observed from the surface, by measuring a subtle thermal transfer on the shotcrete surface by using infrared thermography for overcoming such a technical limit. As a result of conducting an inspection through an analysis on measured data and fieldwork using an endoscope camera, it was impossible to accurately determine the wet part because of an excessive coating of shotcrete, yet, This study is proposed effictively extract a void part of the inside with non-destructive and non-touching method.

요 지

박리, 박락 및 들뜸현상과 같은 결함으로 노후화된 숏크리트 자체가 통행차량이나 시설물에 위험요소로 존재함으로써 이에 대한 피해예방이 요구되는 실정이다. 그러나 급격한 경사와 고소작업 등으로 인해 접근이 곤란하며, 외관상으로는 숏크리트 내부 상황 파악이 힘들다는 한계가 지적되고 있다. 본 연구에서는 이러한 기술적 한계를 극복하고자 적외선 열화상을 이용하여 숏크리트면의 미소한 열이동을 측정해 표면에서 관찰할 수 없는 내부의 결함을 조사하고자 하였다. 현장조사, 측정자료 분석과 내시경 카메라를 이용한 현장조사 작업을 통해 검증을 실시한 결과 숏크리트의 과도한 피복으로 인해 습윤부의 정확한 판정은 불가하였으나 내부의 공동부위를 비파괴·비접촉 방식에 의해 효과적으로 추출할 수 있었다.

Keywords : Reinforced slopes, Shotcrete, Infrared thermal, Structure management

핵심 용어 : 보강사면, 숏크리트, 열적외선, 구조물 유지관리

* 정회원, 한국시설안전기술공단 기술개발실 팀장

** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 한국시설안전기술공단 기술사업단 단장

E-mail : scugeo@uos.ac.kr 02-2210-2515

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2007년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근들어 집중호우 및 기상변화에 따라 절개면의 붕괴로 인해 인명피해와 재산피해가 급격히 증가하고 있다. 절개면의 표면이 노출된 사면과는 달리 시멘트 모르터로 표면이 보강된 숏크리트 보강사면은 육안으로 결함정도의 파악이 어렵다. 특히 박리, 박락 및 들뜸현상과 같은 결함으로 노후화된 숏크리트 자체가 차량통행이나 시설물에 위험요소로 존재함으로써 이에 대한 피해예방이 절실히 요구되고 있다. 그러나 급격한 경사와 고소작업 등으로 인해 접근이 곤란하며, 외관상으로는 숏크리트 내부 상황의 파악이 힘들다는 한계가 지적되고 있어 점검자의 안전성과 효과적인 결과판단이 가능한 기술개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 상기 문제점을 해결하고자 비파괴·비접촉 진단기법 중 하나인 적외선 열화상을 이용해 고소작업 등의 접근성이 불리한 공용중인 숏크리트 보강사면의 점검·진단에 적용하고자 한다.

2. 적외선 열화상기법

2.1 개요

열 적외선 영상이란 대상물을 열 적외선 영상장치로 촬영해 표면의 미소한 온도차이로부터 물체의 성질이나 물체내부의 상황에 대해서 비접촉, 비파괴로 조사하는 기법을 말한다. 열적외선 영상장치는 물체의 가시상을 영상화하는 보통의 촬영과는 다르고 물체의 온도를 영상화할 수가 있다. 일반적으로 적외선 열화상은 건축물과 지하구조물에 적용되어 왔으나 본 기술을 절토사면 안전관리 분야에 확대 적용함으로서 안전하고 신속하게 보수·보강이 필요한 결함부위의 추출이 가능할 것으로 본다.

열 적외선 장치를 이용해 숏크리트 면을 촬영하면 배후 지반의 상태에 따라 표면의 온도가 다르게 나타난다. 일반적으로 공기의 부피 열용량은 흙에 비해 대단히 작기 때문에 모르터 배후에 공동부가 있는 경우에는 외부온도에 민감히 반응하며, 가열은 쉽고 감열은 서서히 나타난다. 반대로 물의 부피 열용량은 대단히 크기 때문에 습기가 많은 부위는 가열·감열속도가 늦은 특성을 가지고 있다. 한편, 상온부근의 물체표면에서는 적외선(파장 3~14㎛)에 의한 열방사가 이루어지므로 열적외선영상장치를 이용해 이 열방사량을 면적으로 감지해 영상화하여 숏크리트면의 온도분포를 단시간에 효율적으로 획득할 수 있다. Fig. 1은 일반적인 열적외선 시스템을 나타내고 있다. Table 1은 열적외선 영상법의 주된 활용범위를 나타낸 것이며, 열적외선 영상법의 주요 특징은 다음과 같다.

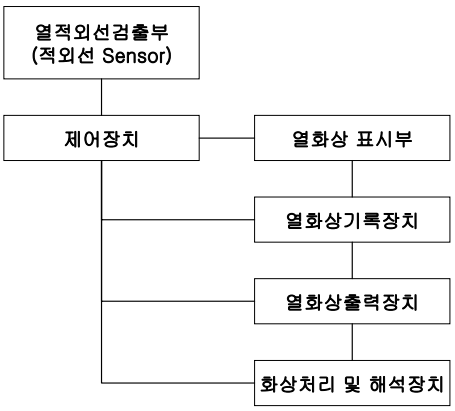

Fig. 1 열적외선 영상 시스템

① 측정대상물의 온도를 비접촉으로 계측할 수 있다.
② 온도분포로서 영상화된 상태로 표시되기 때문에 평면적인 관찰이 용이하다.
③ 야간에도 관찰이 가능하다.
④ 온도정보의 기록, 관리가 용이하다.

Table 1 열적외선 영상장치의 주요 활용범위

활용분야	주요활용방법
의 료	체온측정
전 자 · 전 기	전기기구의 신뢰성 시험 및 이상조사
전 력	발전소 등의 설비보존, 점검
기 상	위성을 이용한 기상관측
건 축	건축물의 점검
기 타	화산관측, 지질조사, 해수온도조사

2.2 적외선에 의한 온도측정

적외선은 파장이 약 0.72~1000㎛까지의 전자파로 가시광선의 장파장에서 마이크로파의 단파장까지의 총칭이다. 이 적외선은 물질의 온도와 밀접한 관계가 있어, 절대온도(-273℃)이상의 모든 물체는 연속적으로 적외선을 방사하고 있다. Planck법칙에 의하면 흑체(Black Body)의 방사 Power(단색방사 발산도)는 식(1)에 의해 얻어질 수 있다(Mikael A. Bramson, 1987).

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5}(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} (W/cm^2 \cdot \mu m) \quad (1)$$

여기서, λ : 파장(㎛)
T : 흑체의 절대온도
C_1 : 3.7402×10^{-12}(W · ㎠)
C_2 : 1.4388(㎝ · ℃)

여기에서 흑체는 입사한 적외선을 완전히 흡수하는 물체로, 바꾸어 말하면 어느 온도에 있어서 다른 어떤 물체보다 방사하는 에너지가 큰 물체라고 볼 수 있다.

방사율은 흑체에 대한 방사(흡수)의 효율이라고 정의되므로 흑체의 방사율은 1이 된다. 일반적인 물체는 방사율이 1보다 적으며, 측정물에 대해 그 방사율 보정을 해야만 한다. Emissivity에 의한 방사율 보정은 이를 의미하고 있다. 또한 식(1)을 전파장으로 적산하면 전방사 발산도가 얻어지고 식(2)와 같이 온도의 4제곱에 비례하는 것을 알 수 있다(김영근 외, 1997).

$$W = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} W_\lambda d\lambda = \sigma T^4 (W/㎠) \quad (2)$$

여기서, σ : Stefan-Boltzmann의 정수
(5.673×10^{-12} W/㎠ · ℃)

2.3 측정장비

본 연구에서 사용된 적외선 열화상 촬영장비는 미국 FLIR System사의 Thermal Cam SC2000을 사용하였으며, 촬영장비의 성능사양은 Table 2와 같다.

Table 2 촬영장비 성능

측정범위	-40~500℃
측정오차	± 2%
측정감도	0.1℃이하
분광범위	7.5~13㎛

3. 숏크리트 보강사면 적용이론

열적외선영상법에 의한 숏크리트면의 노후화 진단은 모르터 표면 온도를 검출하여, 상대적인 표면온도의 규칙성에 의해서 배면지반의 상태를 추측하는 방법이다. 콘크리트 모르터는 낮에는 일사에 의해 따뜻해지고 야간에는 외기에 의해서 차갑게 된다. 이와 같이 외적인 영향을 받아 숏크리트면은 손상이나 용수, 모르터 두께 등 비열의 차이나 열전도율의 차이에 의해 열이동이 차이가 생겨 배후 지반에 몇 개의 규칙성을 갖는 표면온도 분포를 나타낸다. Fig. 2~Fig. 3은 낮과 야간에 숏크리트 표면에서의 열 이동을 모델화한 것이다.

3.1 일사시간 및 야간의 표면온도

숏크리트면은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 태양에너지의 영향을 받으며, 이 에너지는 숏크리트 표면에 일부는 흡수되고 일부는 반사된다. 모르터층에 흡수된 열은 온도경사에 의해서 지반으로 이동된다. 이때 숏크리트 배후에 공동이나 습기가 많은 부위가 존재하면 열의 이동에 변화가 생겨 표면온도에 차이가 발생한다. 때문에 배후에 공동이 존재하는 경우에는 열의 이동이 공기층에 의해 방해되므로, 건전부와 비교하여 표면온도가 높아진다. 한편, 물은 열용량이 크다는 특징을 가지고 있어 습기가 많거나 물이 존재하는 경우는 배후지반으로의 열 이동이 촉진되어 건전부와 비교하여 표면온도가 낮게 된다. 반면 토사나 견고한 암반의 경우에는 공기나 함수율에 의해서 위와 유사한 경향이 나타난다.

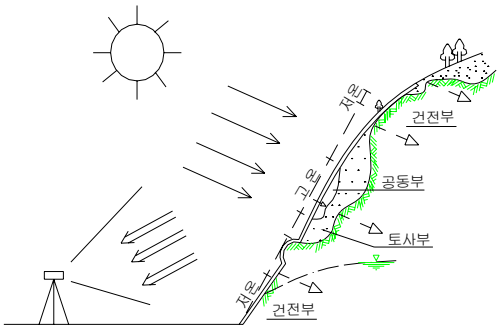

Fig. 2 주간의 숏크리트면의 열 이동

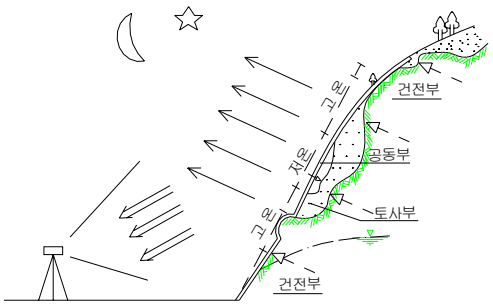

Fig. 3 야간의 숏크리트면의 열 이동

한편, 숏크리트면에 축적된 열 에너지는 Fig. 3에서 나타낸는 바와 같이 기온이 저하함에 따라 모르터 표면에서 공기중으로 열이 방사되므로 표면온도는 서서히 저하한다. 이러한 냉각과정에서도 숏크리트 배후에 공기나 습기가 많은 층이 존재하면 축적된 열량이 차이나 열전도율, 비열의 차이로부터 열 이동의 차이가 생긴다. 즉, 배후에 공동이 존재하는 경우에는 지반으로의 열 공급이 차단되기 때문에 건전부와 비교하여 급격히 표면온도가 낮아지는 경향을 보이며, 습기가 많은 층은 열용량이 크기 때문에 온도가 쉽게 낮아지지 않는 경향을 보인다.

3.2 일일 온도변화

숏크리트면의 온도변화는 1일 동안 낮에는 상승하고, 밤에는 하강하는 거의 일정한 순환과정을 거친다. 이 과정은 배면의 상태에 따라서 열의 흡수율, 방사율이 다르므로 온도변화에 차이를 보인다.

3.3 화상판독 및 결과정리

열화상의 판독은 계측과정에서도 어느 정도 가능하지만 상세한 검토는 육안조사 결과와 종합적으로 실내에서 실시하는 것이 대부분이다. 현장에서 계측한 열화상은 저장장치에 기록되며, 실내에서 열화상의 판독은 기록매체에 기록된 열화상을 재생하여 보충조사결과와 종합적으로 비교·분석하며, 열화상의 판독과 결과정리의 순서는 다음과 같다.

① 열화상 Image가 여러 개일 경우에는 판독 작업을 용이하게 하기 위하여 위치관계 확인을 한다.

② 특이한 온도변화를 보이는 부위 추출을 위해서 2시간의 열화상을 모두 나열하여 상호비교하면서 특이한 온도변화를 나타내는 부분을 추출한다. 그리고 손상 종류에 대한 대표적인 온도변화로부터 특이한 온도변화를 부위에 대해서 표기를 한다. 이때 2시간 동안의 온도차이 화상을 작성하면 손상범위의 결정이 용이하다.

③ 판독한 손상부와 육안조사 결과를 바탕으로 열화상 판독도를 작성한다.

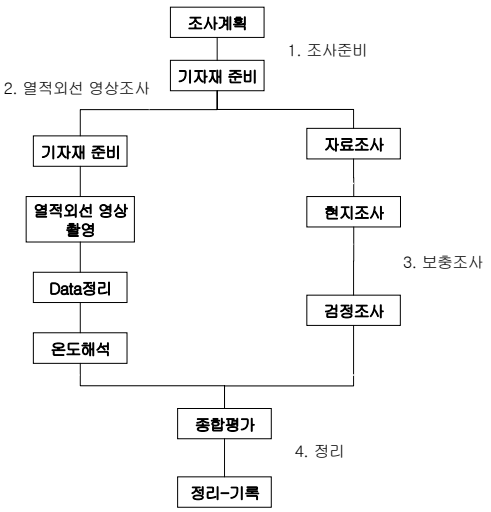

Fig. 4 열적외선 영상촬영 조사 흐름도

4. 현장조사

본 대상사면은 OO노선 도로변 교대 좌측부에 위치하며, 사면상부는 이면도로로 사용되고 있고 현장전경과 숏크리트 표면상태는 Fig. 5와 같다. 배후지반은 숏크리트 표면의 형상이 심하게 굴곡된 것으로 미루어 볼 때 암반으로 추정할 수 있으며, 시설물 경과년도를 파악할 수 없는 관계로 표면상태를 육안으로 관찰한 결과 시공 후 상당기간 경과된 것으로 보였다. 따라서 모르터 배면에 수 개소의 결함 존재가 예상되므로 본 기법의 적용성 검증지역으로 적절할 것으로 판단되었다.

Fig. 5 대상사면 전경

대상사면을 AM 10:00~PM 5:00까지 2~3시간 단위로 열화상을 촬영하였다. Table 3은 측정시간별 평균온도 증가율 및 측정시간별 평균온도 편차를 나타내는 것으로 분석지점 선정시 판단 기준으로 사용하였다. Fig. 6~Fig. 9는 측정시간별 열화상을 나타내는 것으로 표면온도가 평균온도에 비해 큰 차이를 보이거나 평균증가율과 큰 격차를 나타내는 온도변화 부위를 A, B, C, D지점으로 나누어 표면온도 변화를 관찰하였다.

Table 3 측정시간별 온도증가율 및 편차

위치	AM 10:00	증가율 (%)	온도편차 (℃)	PM 1:00	증가율 (%)	온도편차 (℃)	PM 3:00	증가율 (%)	온도편차 (℃)	PM 5:00	증가율 (%)	온도편차 (℃)
A지점	6.0	-	-1.7	19.4	323.3	11.7	18.7	-3.6	-2.2	13.2	-29.4	-2.0
B지점	8.8	-	1.1	21.5	244.3	13.8	16.1	-25.1	-4.8	10.5	-34.8	-4.7
C지점	9.1	-	1.4	21.1	231.9	13.4	18.6	-11.8	-2.3	12.4	-33.3	-2.8
D지점	8.4	-	0.7	20.0	238.1	12.3	21.5	7.5	0.6	15.0	-30.2	-0.2
식생	5.1	-	-2.6	13.6	266.7	5.9	13.5	-0.7	-7.4	11.0	-18.5	-4.2
박리	5.5	-	-2.2	24.2	440.0	16.5	24.9	2.9	4.0	16.4	-34.1	1.2
건전부	7.7	-	0.0	20.0	259.7	12.3	20.9	4.5	0.0	15.2	-27.3	0.0

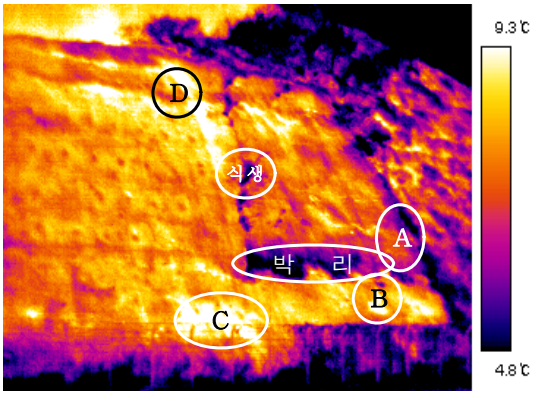

Fig. 6 AM 10:00 열화상

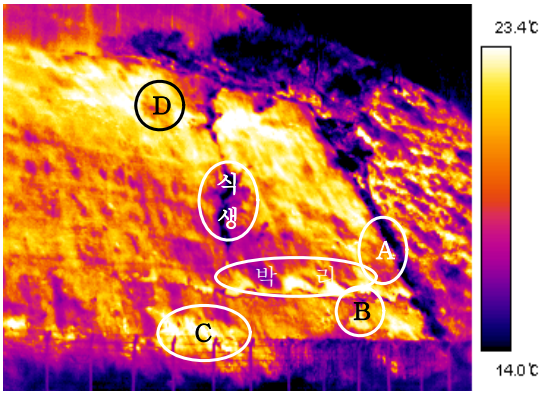

Fig. 7 PM 1:00 열화상

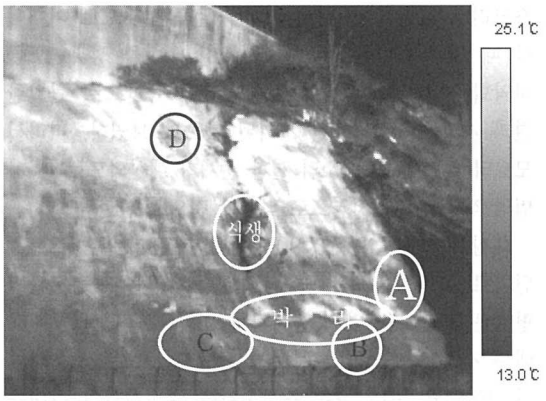

Fig. 8 PM 3:00 열화상

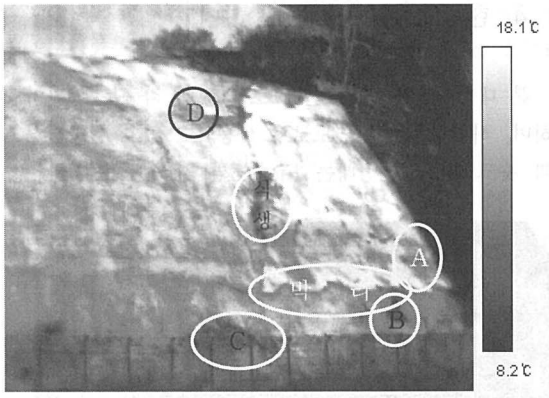

Fig. 9 PM 5:00 열화상

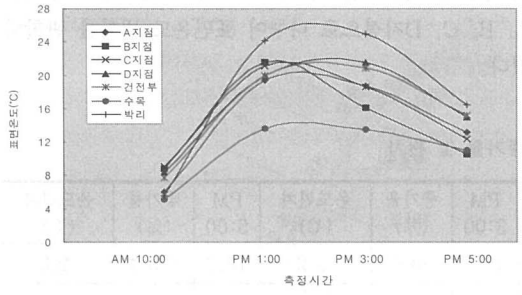

Fig. 10 측정시간-표면온도 변화

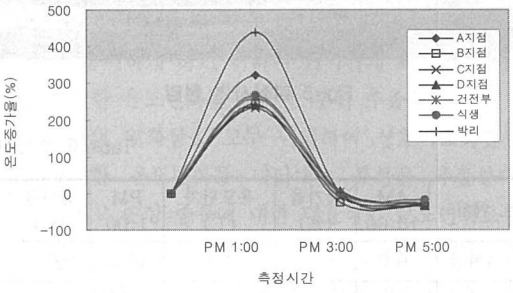

Fig. 11 측정시간-표면온도 증가율

Fig. 10과 Fig. 11은 분석지점별 평균온도에 따른 표면온도 변화와 증가율을 나타낸 것으로 각 부위별 표면온도 변화양상은 건전부와 평균온도와 비슷한 변화를 나타내며, 건전부를 기준으로 상향과 하향 두 가지의 양상을 보였다. 따라서 온도변화가 큰 A, D지점을 공동부로 온도변화가 평균온도에 비해 변화가 작은 B, C 지점은 습윤부로 설정하였으며, 실내분석에서 설정된 결함부위는 검증조사에서 진위여부를 확인에 이용하고자 하였다.

5. 검증조사

검증조사는 숏크리트 표면을 드릴링 한 후 내시경을 이용해 배후면의 상태를 조사하는 과정으로 이루어졌다. Fig. 12~Fig. 13은 내시경조사에 의한 내부결함 상황을 나타낸 것이다. 앞서 실내결과에서 결함부위로 예상된 습윤부는 드릴링 실시결과 표면누수 부위를 제외한 결함예상 부위에서 결함부위 검출 가능한 두께라 알려져 있는 15㎝~20㎝보다 큰 30㎝이상으로 나타나 내시경에 의한 조사를 실시하지 못하였다. 따라서 지나친 피복이 습윤부로 판정하는데 오인요소로 작용한 것으로 판단된다.

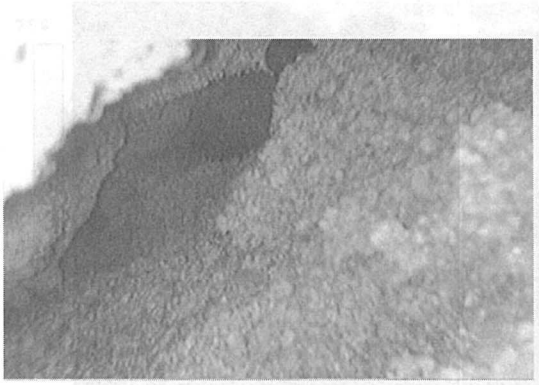

Fig. 12 A지점 공동현황

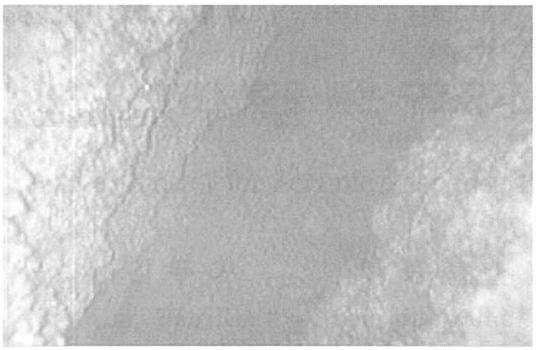

Fig. 13 D지점 공동현황

한편 공동부로 예상된 결함부위는 그림과 같이 대부분 배면과 콘크리트가 밀착되어 있지 않은 것으로 보여 열화상 분석결과와 일치하는 것으로 나타났다.

6. 결 언

본 연구에서는 물체의 미소한 온도변화를 적외선 검출로 측정이 가능한 열적외선 영상장치를 이용해 숏크리트 보강사면에 적용해 활용성을 검토하였다. 대상사면을 측정시간별 표면온도를 분석해 결함부위를 선정하였으며, 열화상 분석에 의한 결함부위 추출의 적정성을 판단하기 위해 검증조사를 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 실내분석에 의한 시간별 온도변화 양상을 분석하고, 현장 확인으로 적용성을 검토한 결과 표면온도 변화로 예상한 결함부위 중공동부가 일치되어 접근성이 불리해 조사가 어려웠던 상부사면의 공동부 추출법으로서 적절한 것으로 판단된다.
2) 열화상의 온도변화를 이용해 결함부위를 판정함에 있어 현장여건이 충분히 반영된 해석이 실시되어야 한다. 이 과정에서는 분석자의 숙련도, 촬영각도 및 장소에 따라 오판의 가능성이 크게 작용해 해석결과가 큰 차이를 보일 수 있어 객관성이 떨어지는 문제점이 나타났다.
3) 시공 특성상 모르터의 두께는 일정치 않으며, 열양상은 모르터 두께에 따라 변화양상이 다르게 분포되는 경향을 보여 이에 대한 보정방법의 개발이 필요하다. 한편 모르터 두께가 일반적인 시공두께의 1.5~2배 이상일 경우 습윤부와 비슷한 온도변화 양상을 나타냈다.
4) 검출 가능한 결함요소가 특정한 결함으로 한정적인 관계로 결함부위에 대한 보수·보강 목적으로의 사용성은 높이 평가할 수 있으나 종합적인 사면의 안정성 검토를 위한 방법으로는 보완사항과 전문성축적이 필요할 것으로 판단된다.
5) 열화상 기법을 효율적으로 이용하기 위해서는 결함부에서의 온도변화 경향과 분포, 오인요인 판별에 대한 자료가 충분히 축적 되어야 측정결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.
6) 본 기법을 활용해 숏크리트 보강사면의 객관적인 상태를 파악하기 위해서는 배후지반의 역학적 특성 및 지질학적 특성을 파악할 수 있는 기법과 접목되어야 종합적인 분석이 가능할 것으로 판단되며, 추후 종합적인 분석기법에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김영근, 장정범, 김영진 "적외선 열화상기법을 이용한 콘크리트 터널 라이닝의 비파괴 시험에 관한 연구", 한국암반공학회지, Vol. 7, 1997, pp.75~83.
2. 이종영, 신창건, 장범수, 손종철 "적외선 열화상에 의한 숏크리트 보강사면의 비접촉·비파괴 시험", 한국지반공학회, 봄 학술발표회 논문집. 2004.
3. Mikael A. Bramson "Infrared Radiation-A Hand Book for Application", 1987, pp. 21~22.
4. M.R. Clark, D.M. M.C.Forde "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges", NDT&E International, Vol. 36, 2003, pp. 265~275.
5. Glenn A. Washer "Developments for non destructive evaluation of highway bridges in USA", NDT&E International, Vol. 31, No. 4, 1998, pp. 245~249.
6. FLIR Systems, "ThermaCamTM Researcher Operating Manual", 2001.
7. 町田泰法, 竹内俊昭, 曹根好徳, "熱赤外線リモートセンシングによる吹付け法面の地下水調査", 日本應用地質學

會, 平成 3年度 研究發表會 講演論文集, 1991, pp. 9~12.
8. 村山秀幸, 門田俊一, 川村國夫 "赤外線放射 溫度計を用いた岩盤斜面調査術に關する基礎研究", 第 34回 岩盤力學に關するシソポジユウム講 演論文集, 1991, pp 26~30.

(접수일자 : 2006년 3월 23일)