

근적외선 분광법에 의한 콘크리트 진단방법

Application of Near-Infrared Spectroscopy for Inspection of Concrete



안태호*
Tae-Ho Ahn



金田尚志**
Hisashi Kanada



魚本健人***
Taketo Uomoto

개 요

콘크리트의 비파괴 검사법으로는 초음파법, 전자파 레이더법, 적외선법, 방사선투과법, 충격 탄성파법 등 여러 가지 방법들이 현재 응용되어지고 있는 실정이다. 이러한 방법들은 균열의 깊이, 철근의 열화 및 위치 등 콘크리트 표면 근처의 물리적인 정보를 얻을 수는 있지만 화학적인 정보를 얻을 수가 없다. 최근 콘크리트 표면과 접촉하지 않으며 콘크리트의 성분을 검출할 수 있는 방법으로 새롭게 고안되는 것이 근적외선 분광법을 이용한 콘크리트의 진단 기법이다. 이러한 분광기술은 리모트센싱, 농업, 식품, 의료, 공업제품 등의 분야에 도입되어 비파괴 검사, 제품 관리 등에 사용되고 있으며, 본 연구에서는 이러한 방법을 콘크리트 분야에 적용하였다.

1. 서 론

현재 일본의 사회기반시설의 정비에 있어서 중요한 과제는 기존 구조물을 효율적으로 유지, 관리하는 것에 있다. 향후 일본에서는 인구 감소와 관련하여 건설 분야의 기술자 역시 크게 감소되어질 것으로 추정하고 있으며 수십년 경과한 구조물의 보수, 보강이 점차적으로 증가되어지므로 종래 기술자에 의한 점점으로는 한계가 있을 것으로 판단되고 있다.

토목 구조물은 그 성질상 조사 범위가 넓고 환경조건이나 입지 조건이 열악한 경우가 많아 조사에 많은 노력과 비용이 든다. 따라서 현장의 경우에 있어서는 구조물에 접촉하지 않으면서 단시간 내에 콘크리트의 화학적 정보를 얻을 수 있는 방법이 있다면 각광 받을 것이며, 이러한 방법은 기존의 비파괴 검

사법과는 차별화된 우수한 특성을 가지는 방법일 수도 있다. 본고에서는 현재 필자가 소속하고 있는 도쿄대학 콘크리트연구실에서 진행하고 있는 분광기술(근적외선 분광법)을 응용한 차세대형 비접촉, 비파괴형의 검사방법에 대해 소개하고자 한다.

2. 근적외선 분광법의 도입

2.1 근적외선 분광법의 장점

최근 콘크리트 구조물의 열화 조사 및 진단에 있어 많은 비파괴 검사법이 개발되고 있는 실정이다. 예를 들면 콘크리트의 들뜸과 박리는 적외선법으로, 균열의 깊이는 초음파법, 철근위치는 레이더법, X선법 등으로 다양한 비파괴검사 방법들이 응용되고 있다. 그러나 현재 제안되고 있는 검사 방법이 대부분 콘크리트의 균열, 내부공극, 철근위치 등 콘크리트 표면에 근접한 물리적 정보를 얻을 수 있지만 콘크리트 성분 및 열화인자 등 화학적 정보를 얻는 것은 힘든 실정이다. 따라서 이러한 정보를 얻기 위해서는 코어 등에 의하여 샘플을 채취한 후 현장 또는 실험실에서 각종 시편의 성분 분석을 행하게 된다. 그러나 이러한 방법들은 검출 샘플마다 각각 분석 하여야 하며 분석에 따른 시간이 또한 상당히 소비되는 경향이 있다. 따라서 여기서는 이러한 문제점들을 고려한 근적외선 분광법의 소개와 이 방법의 장점을 정리하기로 한다.

- (1) 콘크리트 표면의 성분 분포상황을 비접촉, 비파괴적으로 측정할 수 있다.
- (2) 검출 대상 성분마다 다른 시험이 필요 없으며, 한 번의 스캔과정으로 여러 성분을 동시에 분석 가능하다.
- (3) 근적외광을 조사하고, 그 반사광을 검출하는 측정 방법으로 화학 약품을 사용하지 않고 측정면의 전처리가 필요하지 않기 때문에 무공해, 저에너지, 환경부하가 적은 검사방법이다.

* 정회원, 도쿄대학 사회기반학과(일본) 박사과정
than@iis.u-tokyo.ac.jp

** 도쿄대학 생산기술연구소(일본) 조수

*** 도쿄대학 생산기술연구소(일본) 교수

(4) 검출 대상 성분의 분광 특성을 파악해 두면, 현장에서 빠른 결과를 얻을 수 있기 때문에 검사의 효율 및 비용 절감을 기대할 수 있다.

2.2 근적외선 분광법의 원리

지구상의 모든 물질은 고유한 방법으로 전자파(빛)를 흡수, 반사하는 성질을 가지고 있다. 이러한 성질을 분광 특성이라 하며 분광 특성으로부터 성분이나 농도를 측정하는 방법을 분광법이라 한다. 분광법에는 근적외선 분광, 적외선 분광, 라만 분광 등이 있다. 적외선분광은 시멘트 등 경화체의 분석에 적용된 사례도 있지만, 본 연구에서는 이미지에 의한 영상가시화를 실현하기 위해서 가시영역에 가까운 근적외선 분광법을 이용 한다. 근적외광은 <그림 1>과 같이 가시영역과 적외광 사이에 있어서, 그 구별은 다양하지만 일반적으로 780 ~ 2,500 nm의 범위를 근적외광(NIR)이라고 하며, 콘크리트 들뜸과 박리의 검출에 사용하는 적외선 카메라는 보통 3.5 ~ 5.1 μm의 파장대에서 측정하고 있다.

3. 근적외선 분광법으로부터 열화 인자의 검출

3.1 콘크리트의 열화에 의한 근적외선 스펙트럼의 변화

콘크리트 열화 기구를 고려하여 볼 때 내, 외력 작용에 의한 파괴나 골재(자갈, 모래)의 변질 등을 제외하면 시멘트 자체 수화물의 변화 또는 외부에서 열화인자가 시멘트수화물을 침투하는 것에 의해 열화가 대부분 진행되게 된다. 골재의 경우에 있어서는 근적외선 부분에서 특수한 분광 특성을 가지고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 열화에 의한 부분을 시멘트수화물(페이스트 부분)의 스펙트럼 변화에 주목 하였다.

철근콘크리트 열화에 있어서 제일 문제가 되는 것은 철근의 부식이다. 강재는 알칼리 상태에서 부동태 피막을 형성하여 쉽게 부식되지 않지만 콘크리트 중성화로 인한 pH 저하로 인해 부식이 쉬워지게 된다. 또한 연안지역의 콘크리트 구조물에서는 비로 인한 염분 등이 콘크리트에 침투하여 철근부식의 열화 등이 문제가 되기도 한다. 따라서 본고에서는 강재 부식의 원인인 중성화, 염분의 침투, 더 나아가 콘크리트의 화학적 열화로써 하수시설이나 온천지대에서 문제가 되고 있는 황산열화 등의 열화인자(물질)의 검출 방법을 소개하고자 한다.

<그림 2>는 콘크리트의 열화 인자에 의해 근적외선 스펙트럼이 어떻게 변화하는지를 나타낸 것으로, 정상적인 콘크리트와 비교하여 보면 열화에 의해 특정 파장의 흡광도가 증가, 저하하는 현상을 확인할 수 있다.

3.2 중성화에 의한 근적외선 스펙트럼의 변화

에너지 [eV]	1200	120	12	1.2	0.12	0.012
파수 [cm ⁻¹]	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²
파장	1nm	10nm	100nm	1 μm	10 μm	100 μm
영역	X선	자외선	가시광선	적외선	마이크로파	

그림 1. 빛의 파장과 종류¹⁾

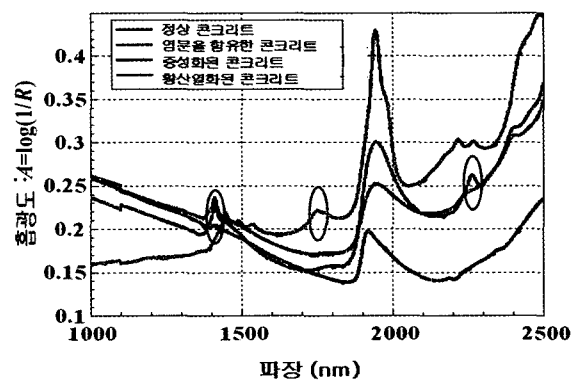
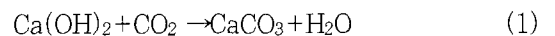


그림 2. 콘크리트의 열화에 따른 근적외선 스펙트럼의 변화

중성화에 의한 시멘트 페이스트의 근적외선 스펙트럼 변화를 비교하기 위해 수산화칼슘과 탄산칼슘의 스펙트럼을 <그림 3>에 나타내었다. 중성화로 인해 1,410 nm에서 흡광도가 저하하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 식(1)과 같이 탄산가스의 작용에 의해 시멘트페이스트내의 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변화하기 때문이다.



이러한 경우 1,410 nm의 흡광 피크는 -OH기 신축진동의 제 1 배음에 귀속하여 중성화에 의해 알칼리성을 잃기 때문에 이 파장대의 흡광피크가 저하 되게 된다.

3.3 염분량에 의한 근적외선 스펙트럼의 변화

시멘트페이스트 내에서 염분량(염화나트륨을 혼입한 공시체 제작)의 증가를 <그림 4>에 나타내었으며, 2,266 nm를 정점으로 독립적인 흡광피크가 관측 되었다.

염분량이 증가하면 2,266 nm의 흡광도가 증가하지만 이러한 기본스펙트럼에서는 염분량의 차이를 명확하게 판별할 수가 없

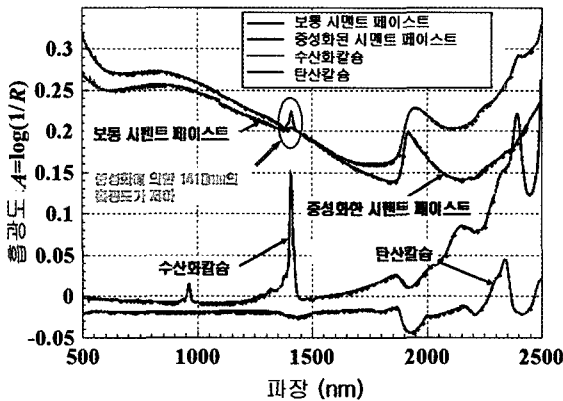


그림 3. 중성화에 의한 근적외선 스펙트럼의 변화

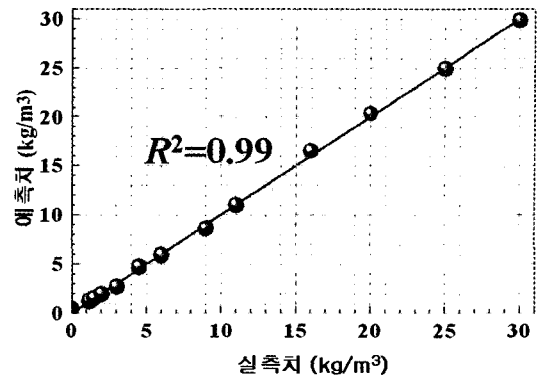


그림 6. 예측치와 실측치의 관계

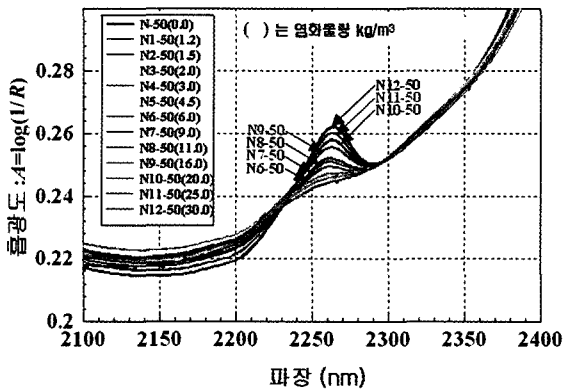


그림 4. 염화물에 따른 근적외선 스펙트럼의 변화

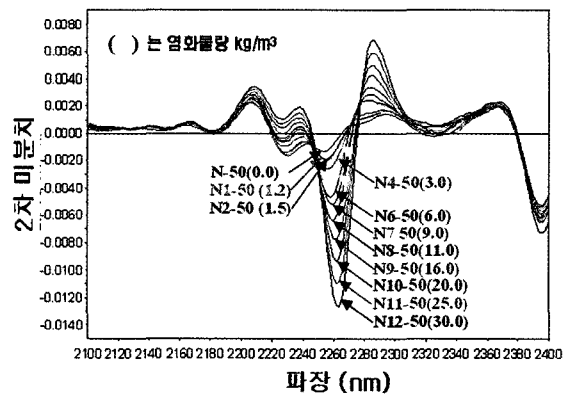


그림 5. 2차 미분스펙트럼

다. 따라서 여기서 2차 미분처리를 실시하면 <그림 5>와 같은 결과를 얻을 수 있게 된다. 2차 미분스펙트럼 값은 음수가 되지만 기본스펙트럼과 같은 흡광피크 파장에서 최대치를 나타내게 되며, 2차 미분스펙트럼을 도입하는 것으로 염분량의 차이에 따른 영향을 명확하게 알 수가 있게 된다.

염화나트륨 자체는 근적외선 영역에서 흡광피크를 갖고 있지 않다. 그러나 염화물량이 높아지면 2,266 nm부근에서 흡광도가 높아지는 현상이 나타나며, 이것은 염화나트륨 이외의 염화물을

사용한 실험 결과로부터 CI 작용에 의해 시멘트수화물의 진동 모드가 변화하는 것이 원인을 확인할 수 있었다.

다음에는 측정된 스펙트럼 강도와 염분 농도의 관계를 조사하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 2차 미분치와 시멘트페이스트 중의 염화물량을 설명하는 변수로서 단회귀분석을 실시하면 스펙트럼 특성으로부터 추정되는 염화물량 c 는 파장 i 에 있어서 2차 미분스펙트럼 A''_i 를 이용하여 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c = K(0) + K(1) \cdot A''_i \quad (2)$$

식(2)를 검량선이라고 하고, 최소 자승법에 의해 데이터와 검량선의 자승차가 최소가 되도록 절편 $K(0)$, 기울기 $K(1)$ 를 구하면 식(3)을 얻을 수 있다.

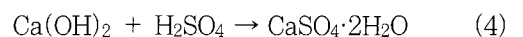
$$c = 0.79 - 2461 \cdot A''_{(2266)} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3)$$

식(3)에 2,266 nm에 있어서의 2차 미분치를 대입하면 염화물량 c 가 추정된다. 결론적으로 Y축에는 식(3)에서 추정된 염화물량 예측치, x축에는 실측치(염화물량)로 하여 그래프를 그리면 <그림 6>과 같은 관계를 얻을 수 있게 된다.

예측치와 실측치 사이에 $R^2=0.99$ 정도의 높은 상관관계가 나타난다. 따라서 2,266 nm에서의 분광 특성으로부터 정밀도가 높은 염분량을 추정할 수 있는 것을 확인 할 수 있다.

3.4 황산염화에 의한 근적외선 스펙트럼 변화

황산에 의한 콘크리트 열화는 석회석등을 사용한 경우를 제외하면 황산과 시멘트 수화물과의 반응에 기인한다(식 (4)).



이와 같이 시멘트수화물은 황산과의 반응에 의해 황산칼슘이 수화물($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)을 생성 한다. <그림 7>에 황산염화에 의

한 시편과 황산칼슘이수화물의 스펙트럼 변화를 나타내었다. 스펙트럼 강도는 다르지만 황산 열화 한 시멘트페이스트는 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 의 스펙트럼과 동일한 유형을 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 황산열화 한 시멘트페이스트와 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 의 흡광피크를 비교하면서 일반적인 시멘트페이스트에서는 없으면서 흡광피크가 정확하게 관측되는 1,750 nm를 특정 파장 부분으로 선택할 수 있다. 따라서 식(4)의 반응으로 수산화칼슘이 소비되어 알칼리성이 없어지게 되며, <그림 8>에서 보는 것과 같이 황산으로 열화한 시멘트페이스트에서는 1,410 nm의 흡광 특성이 소실되는 것을 확인할 수 있다

3.5 특정 파장대의 선정

콘크리트의 열화인자인 중성화, 염화물농도, 황산열화에 대하여 근적외선 분광법을 적용하여 검출이 가능한 것을 실험 결과로부터 확인할 수 있었다. 따라서 열화인자를 검출하기 위해 문헌 및 실험 결과로부터 다음과 같이 특정파장 부분을 선택할 수 있다.

3.5.1 중성화 : 1,410 nm

-OH 신축진동의 제 1배음에서 시멘트수화물중의 수산화칼슘이 1,410 nm의 파장대에서 근적외광을 흡수한다. 따라서 중성화되지 않는 부분은 1,410 nm 파장대에서 근적외선을 흡수하지만, 중성화한 부분은 흡수피크가 발생하지 않는다. 따라서 이러한 흡광피크의 유무로 콘크리트의 중성화를 판단한다.

3.5.2 염분량 : 2,266 nm

실험 결과로부터 시멘트페이스트 내에서 염분량이 증가함에 따라 2,266 nm의 흡광 특성이 높아지는 현상을 확인할 수 있었으며, 이 파장대의 흡광도와 염화물량의 상관관계가 높은 결과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.5.3 황산열화 : 1,750 nm

시멘트수화물 내에서 수산화칼슘이 황산과 반응해 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 가 생성된다. 흡광피크는 근적외선 부근에서 여러 개를 확인할 수 있지만 일반적인 시멘트페이스트에는 없으며, 흡광피크가 명확하게 나타나는 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 의 흡광피크인 1,750 nm의 파장대를 선택하였다. 따라서 상기 3가지의 열화인자에 관하여 검정을 행하였으며, 이러한 열화로부터 생성되어진 성분이 근적외선 파장대에서 특수한 분광 특성을 가지고 있어 검출 또한 가능한 것을 알 수 있었다.

4. 근적외선 분광이미지 시스템에 의한 열화인자 분포상황

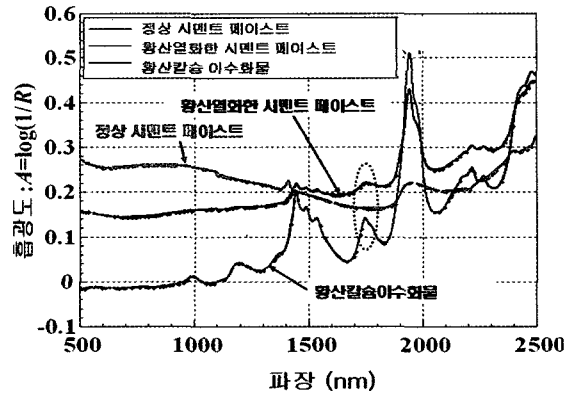


그림 7. 황산열화에 의한 근적외선 스펙트럼의 변화

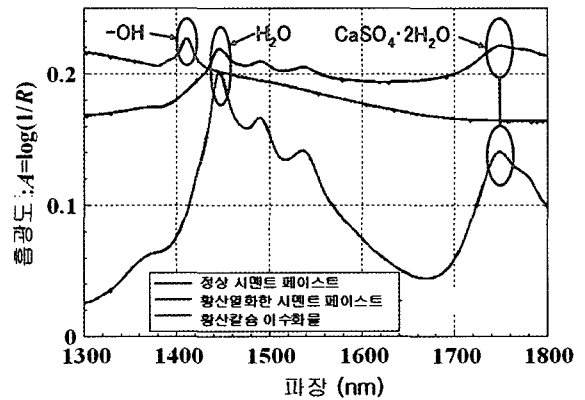


그림 8. 황산열화에 의한 흡광피크의 변화

종래의 근적외선 분광 분석계에 의한 스펙트럼 측정에서는 한곳의 측정 밖에는 할 수 없었다. 따라서 토목 구조물과 같이 검사범위가 넓은 경우, 정점 측정에서는 지금까지 하여온 각종 성분 분석법과 비교하기에는 장점이 적고 효과적이지 않으므로 여러 부분의 성분 분포를 현장에서 간이로 측정하기 위해서는 근적외선 분광 이미지 시스템을 도입해야 한다.

4.1 근적외선 분광 이미지 시스템 개요

<그림 9>와 같이 분광기와 근적외선 CCD카메라를 결합한 근적외선 분광이미지 시스템을 제작하였다. 근적외광을 측정면에 조사하고 그 반사광을 분광기로 분광된 화상을 근적외 CCD 카메라를 사용하여 촬영하는 방법으로 각 파장의 분광 화상을 얻을 수 있다. 본 시스템은 주사형(라인 센서형) 분광 이미지 시스템으로 <그림 10>과 같은 구조로 되어 있다. <그림 10>의 주사형 분광이미지 시스템은 측정 대상의 전체적인 스펙트럼 정보를 동시에 측정할 수 있으며 시스템 구성 원리는 다음과 같다. 먼저 이미지 분광기와 근적외선 CCD 카메라를 결합하고, 광원에서 나오는 근적외광을 대상물에 조사한다. 그 후 X축으

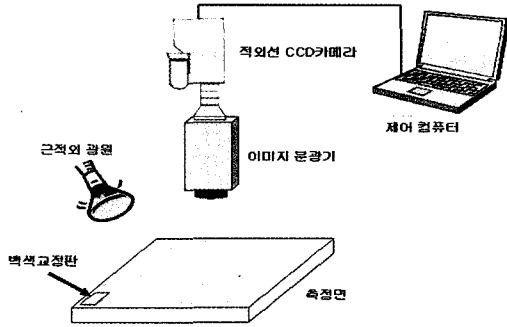


그림 9. 근적외선 분광이미지 시스템

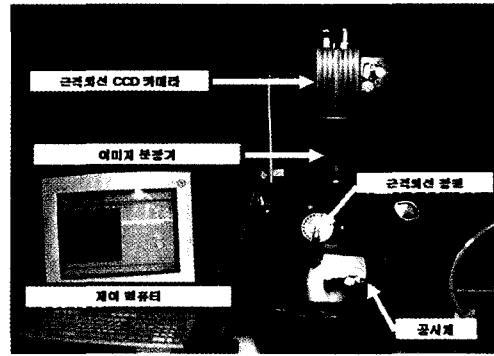


사진 1. 실내 실험 모습(중성화 부분의 검출)

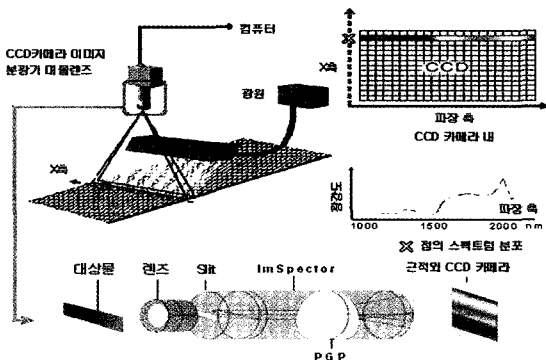


그림 10. 분광 이미지 시스템의 구조^{3,4)}

로 나타나는 선이 이미지 분광기에 촬영되어지고, CCD 카메라 안의 검출 소자는 격자모양으로 나열되어져 근적외광을 받아들인다. 여기서 세로축이 X축이며, CCD의 가로축은 파장 축으로 된다. 그 후 각 픽셀의 수광 강도를 파장순서에 의해 그래프화하면 X점에서의 스펙트럼 분포를 나타낼 수 있다.

4.2 근적외선 분광 이미지에 의한 중성화 측정

콘크리트 중성화 부분 검출시 1,410 nm를 특정 파장영역으로 선택하여 이 파장의 분광 화상을 얻는다. 중성화되지 않는 부분은 1,410 nm의 근적외광을 흡수하기 때문에 어렵게 촬영되는 반면 중성화된 부분은 밝게 촬영이 된다. <사진 1>은 실내 실험의 상황을 나타낸 것이다. 측정면은 시멘트페이스트 경

화체(40×40×160 mm)을 대기 중 양생하여 경화체의 단면을 잘라낸 것(대기에 접하고 있는 면이 중성화 된 것)과 중성화를 촉진시킨 콘크리트 공시체를 이용하였다.

<그림 11>의 왼쪽 그림은 1,410 nm 에서의 분광 화상이며, 오른쪽 그림은 같은 단면을 연마하여 EPMA(X선 마이크로 분석)분석을 실시한 결과이다. 왼쪽 그림의 백색 부분이 중성화된 부분이며, 오른쪽 그림의 백색 부분은 탄소농도가 높은 것을 나타내고 있는데, 이것은 EPMA 분석결과와 분광 화상에 의한 결과가 일치하고 있는 것을 보여주고 있다. <그림 12>의 왼쪽 그림은 1,410 nm에서의 콘크리트 공시체 분광화상이다. 분홍색 부분은 중성화된 부위(흡광도가 낮음)를 나타내며, 검은 부분은 중성화 되지 않는 부분(흡광도가 높음)을 나타내고 있다. 이러한 부분에서 골재와의 판별을 명확하게 하기 위해서 화상처리로 골재는 흑색을 착색하였다. 오른쪽 그림은 근적외 분광 이미지 시스템으로 촬영한 후에 측정면에 페놀프탈레인 용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정한 것으로, 이것 또한 중성화 부분과 분광화상이 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 특정 파장에서는 시멘트페이스트 중 수산화칼슘이 빛을 흡수하기 때문에 그림과 같은 분광화상을 촬영 할 수 있게 된다.

4.3 근적외선 분광 이미지에 의한 염분 침투부의 검출

염분 침투부 검출에 있어서는 2,266 nm를 특수 파장대로 선

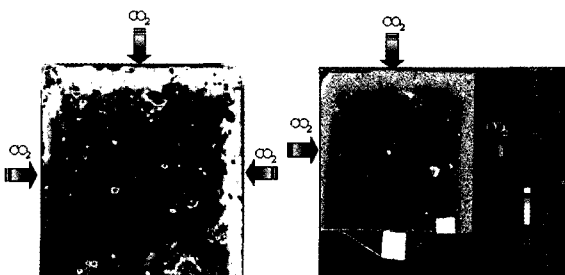


그림 11. 중성화 부분의 검출(시멘트페이스트 공시체)

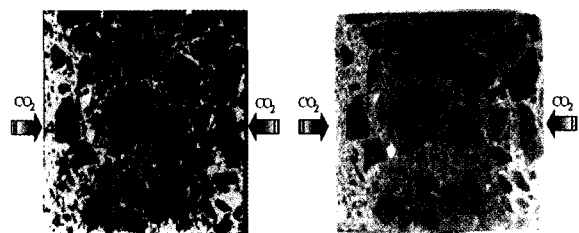


그림 12. 중성화 부분의 검출(콘크리트 공시체)

택하였으며, 측정면은 시멘트페이스트 공시체(40×40×160 mm)를 10% 염분수에 담근 후 절단한 단면을 사용하였다.

〈그림 13〉의 왼쪽 그림은 2,266 nm의 분광 화상이며, 2,266 nm의 분광 화상을 취득하여 보았더니 염분 농도가 높을수록 어둡게 촬영되었으며, 염분 수 침투에 인하여 단면은 어둡게 촬영되었다. 오른쪽 그림은 같은 시편의 단면을 연마해 EPMA 분석을 실시한 결과로 백색부분은 Cl농도가 높은 것을 나타내고 있다. 따라서 염분수에 담겨진 면에서 염분 농도가 높은 것을 확인할 수 있다. 분광화상은 각 파장대에 있어서의 각 픽셀의 스펙트럼 강도이다. 따라서 화상 해석을 실시하는 것으로도 농도 분포를 산출할 수가 있다. 〈그림 14〉는 〈그림 13〉의 왼쪽 그림을 화상분석 실시한 것으로 흡광도와 염분량의 관계로부터 염분농도 분포 산출이 가능하다. 그림에서 보면 염분수가 침투된 면의 염분농도가 높으며, 균열에 따라 염분이 침투하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 〈그림 13〉의 EPMA 측정 결과와 같은 결과임을 알 수 있다. 따라서 콘크리트 중성화 부분의 검출과 동시에 염분과 관련된 것도 근적외선 분광 이미지 시스템으로부터 검출가능한 것을 확인할 수 있었다.

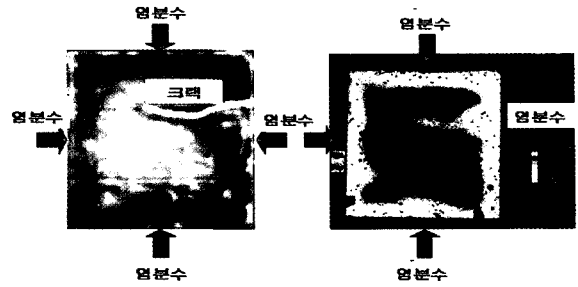


그림 13. 염분 침투부의 검출(시멘트페이스트 공시체)

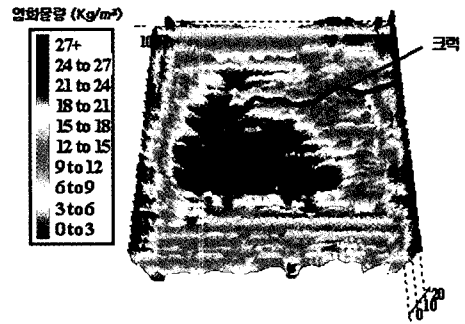


그림 14. 염분 침투시 시멘트페이스트 공시체의 염화물 농도 분포도

5. 근적외선 분광법의 현장에서의 응용

근적외선 분광법을 이용한 콘크리트 열화인자의 검출, 정량분석, 농도분포의 화상화가 가능한 것을 지금까지 언급하였다. 같은 방법으로 근적외선 스펙트럼으로부터 다른 성분의 검출도 가능하며, 현재까지는 이러한 시험 장치의 성능 문제부터 실내시험에 이르기까지 유효성을 평가 및 확인하는데 까지 이르렀다. 향후 현장에서의 측정에 응용하는 경우에는 분광기술의 이점을 활용하여 종래의 방법보다 효율적으로 측정이 가능할 것으로 판단되며, 지금부터는 이러한 가능성에 대하여 알아보도록 한다.

5.1 콘크리트 표면 염분분포의 측정

연안지역의 콘크리트 구조물은 대기 중으로부터 염분이 콘크리트



사진 2. 콘크리트 표면의 염분량 검사

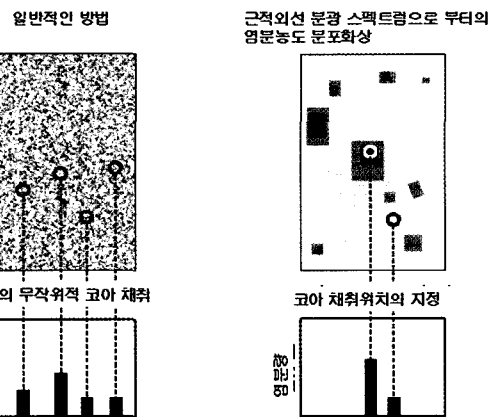


그림 15. 근적외선 분광법 이미지를 이용한 코어 채취

리트 표면부터 침투하여 내부 철근 부식 발생 및 구조물의 내구성 등이 저하되게 된다. 외관상으로는 안전하게 보이나 내부까지 염분이 침투한 경우도 종종 있게 된다. 이러한 경우 콘크리트 표면의 염분량을 파악할 수 있다면 확산방정식으로부터 내부 염분투수 상황을 추정할 수 있다. 종래 방법에서는 콘크리트 표면의 염분농도를 측정하는 방법이 없으므로, 스크래칭 방법으로 조사를 행하고 있다(사진 2). 또한 내부 염분투수 상황을 조사하는 경우에도 무작위적으로 콘크리트 코어를 채취하여 실험실로 돌아가 염분 분석을 시행하는 상황이다. 코어 채취로부터 〈그림 15〉와 같이 콘크리트 구조물의 표면 염분량을 측정할 수 있으나, Fick의 확산방정식의 CO 값을 얻을 수 없어



사진 3. 파이버 센서형 근적외선 분광 분석계

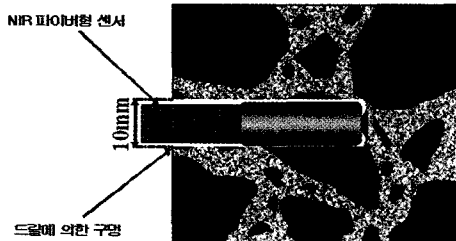


그림 16. 드릴 구멍을 이용한 내부의 근적외선 스펙트럼의 측정

내부의 염분 투수 상황을 예측할 수 없다. 그러나 근적외선 분광법 이미지를 응용한 경우에는 가장 농도가 높은 위치의 코어를 지정하여 채취할 수 있게 되므로, 종래의 무작위적인 코어 채취와 비교하여 구조물에 필요 없는 손실을 주지 않으며 시간을 절약 할 수 있는 효율적인 검사가 가능하게 된다.

5.2 콘크리트 내부 조사

근적외선 분광이미지에서는 표면성분상황을 얻을 수는 없다. 여기에 <사진 3>과 같이 파이버 센서형 근적외선 분광분석계를 적용할 경우, 드릴을 사용하여 작은 구멍을 내어 임의의 깊이의 근적외선 스펙트럼을 측정할 수 있다. <그림 16>에서는 직경 10 mm의 구멍을 뚫어 현장에서 콘크리트의 내부 염화물량의 추정, 중성화깊이, 황산화 부식 깊이 등을 동시에 측정하는 것을 나타내었다.

5.3 콘크리트용 도막재의 품질 체크

콘크리트용 도막재나 강구조물용 도료는 근적외선 영역에서 특수한 흡광피크를 가진다. 이러한 특수한 경향을 이용하여 근적외선 분광법으로부터 품질 체크, 막이 벗겨진 부분의 검출까지도 가능하다. 일반적으로 콘크리트 표면 보호용 도막도료는<사진 4 참조> 정상으로 도포가 되었는지 육안으로 검사하기가 어렵다.

따라서 <표 1>과 같은 도막재를 모르타르에 도포하여 실험을

표 1. 도포재의 성상

사용재료	주성분				
지반흡수조정제	에틸렌 초산 비닐 공중합체 에멀전				
	도포배율 (배)				
무도포	4.0	3.0	2.0	0.67	원액



사진 4. 콘크리트용 도막재 도포 작업

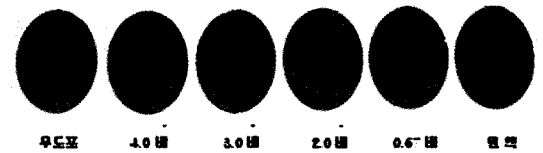


사진 5. 도막재 도포후의 가시영역 화상

행한 경우 근적외선 분광법에 의한 검사 결과는 다음과 같다. 이러한 재료는 현재 고가이므로 규정량(3배 희석)의 물에 희석해 사용되지만 드물게 희석 배율이 높은 상태로 도포되는 일이 있으며 이러한 경우 부착력이 떨어지는 주요 원인이 되기도 한다. <사진 5>는 도막재 도포 후의 가시영역에서의 화상으로 이와 같이 육안검사로서는 규정 희석량으로 도포되고 있는지를 확인할 수 없다. 그러나 이러한 시편들을 근적외선 분광법으로 분석을 하면 <그림 17 및 18>과 같은 결과를 얻을 수 있다.

<그림 17>은 희석 배율별 도막재의 근적외선 스펙트럼이다. 근적외선 영역에서 몇 개의 흡광피크를 확인할 수 있지만, 도막재 농도와 흡광 피크의 관계가 가장 명확한 2,138nm를 특수

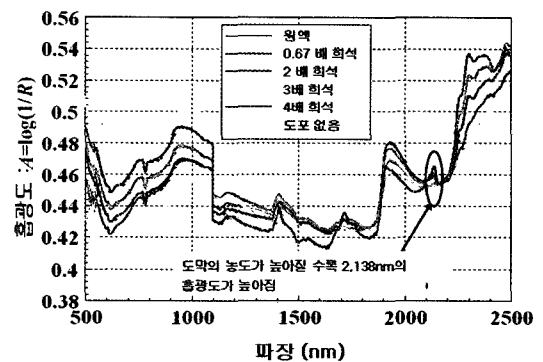


그림 17. 도포배율에 따른 도막재의 근적외선 스펙트럼

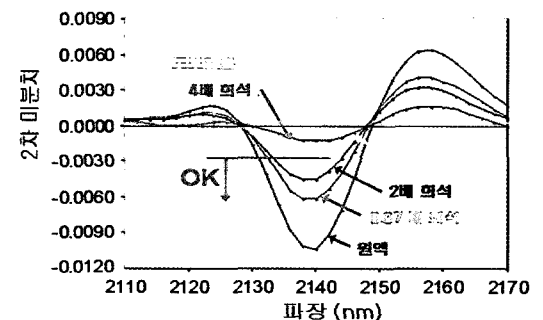


그림 18. 희석배율에 따른 도포재의 2차 미분 스펙트럼

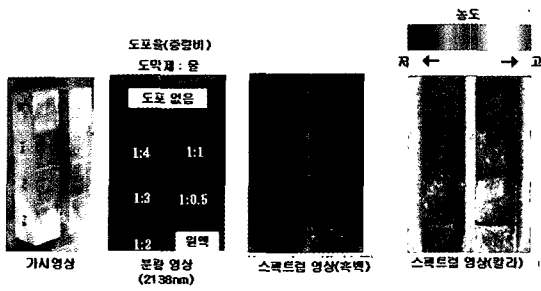


사진 6. 근적외선 이미지 시스템으로부터 도막재의 농도분포의 검출

과장대로서 선택하였다. <그림 18>은 이러한 재료를 이용하여 희석 비율별 도막재의 2차 미분 스펙트럼을 나타낸 것으로, 2차 미분 처리에 의해 도막재의 농도차가 명확하게 나타나게 된다. 이러한 결과는 3배 희석을 기준으로 하는 2차 미분 스펙트럼을 지표로 한 품질관리가 가능하게 한다.

이와 같이 도포하는 도막재의 분광 특성을 사전에 조사해 두어 근적외선 분광 이미지법을 이용해 도포한 부분의 검사가 가능해진다. 특징적인 과장대의 분광 화상을 취득하면, 정상적으로 도포된 부분은 어둡고, 불량부위 또는 들뜸 부위는 밝게 촬영되기 때문이다. 본 실험에 사용한 공시체의 2,138 nm의 분광 화상을 취득하여 보면 <사진 6>과 같이 도막재 농도가 높은 부분은 어둡게 촬영되어 농도가 낮은 부분이나 무도포의 경우에는 밝게 촬영되어지는 것을 알 수 있다.

5.4. 맺음말

본고에서는 근적외선 분광법의 응용 예를 몇 가지 소개하였다. 근적외선 스펙트럼의 응용 및 해석의 경우에 있어 각각의 성분대 대하여 행하여지고 있는 경우가 있지만, 현재까지 토목 분야에서 실제 현장에 적용된 경우는 없다. 따라서 이러한 근적외선 분광 이미지법의 도입에 의해 보다 효과적인 검사가 더욱 더 기대된다. 여기에서는 토목 분야에 한해서 응용 예를 제시하였지만 근적외선 영역에서 특징적인 스펙트럼 특성을 가지는 성분이라면 검사 및 검출이 가능하기 때문에 향후 타 분야에서

표 2. 분광기술(근적외분광법, 이미지)의 장점

	종래 성분분석 방법	근적외 분광 기술 (근적외분광법, 이미지)
시료의 채취 방법	부분과파, 샘플링	비접촉, 비과파
분석 영역	정점	2차원 평면분포
분석 시간	길다	짧다
시험 방법	대상성분에 따른 각각의 시험 방법	다성분 동시 분석
약품 등의 사용	사용함	사용하지 않음
현장계측	가능하지 못한 경우 많음	현장계측에 응용 가능
측정면의 사선처리	필요한 경우가 많음	직접계측이 가능
장치	실험실 설치형이 많음	소형, 핸드 타입
분석 비용	높다	절감이 기대되어짐

의 적용성도 상당히 높을 것으로 보여진다. 예를 들어 도막 열화의 검출은 선박 도장의 분야에서도 응용 가능하기 때문이다. 현재 1,700 ~ 2,500 nm역의 근적외선 분광 이미지는 다른 분야에 있어서도 연구 보고가 거의 없으며 향후에도 지속적인 발전이 기대되는 분야이다.

6. 결론

근적외선 분광 기술의 콘크리트 검사 응용 예를 소개하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 근적외 분광법을 이용해 콘크리트의 열화 인자(중성화, 염분 침투, 황산 열화)를 검출할 수가 있었으며, 회귀 분석에 의해 작성된 검량선으로부터 염분량 등의 열화 인자 정량 분석이 가능한 것을 알 수 있었다.
- 2) 근적외선 분광 이미지 시스템을 도입, 고유 과장대에서 분광 화상을 촬영 하는 것으로서 열화 물질의 분포 상황을 화상 이미지로 얻을 수 있었으며, 이러한 화상 분석에 의해 열화 물질의 농도 분포 표시 또한 가능하였다. 종래의 성분 분석 방법 (EPMA등)에서 얻어진 분석 결과와 분광 이미지 시스템에 의해 얻어진 분석 결과는 일치 하였으며, 이러한 검사방법이 효과적인 것을 확인 할 수 있었다.
- 3) 현재 본 방법은 실내 실험에 있어서 검증 단계이지만 향후 실제 현장에서도 응용 가능성이 높은 것을 알 수 있었다.
- 4) 근적외선 영역에서 고유한 분광 특성을 가지는 성분이라면 동일한 수법으로 검출이 가능하기 때문에 중성화, 염분 침투, 황산 열화 이외의 열화 인자들에서도 검출이 가능하며 현재 연구 중이다. 종래의 성분 분석 방법과 비교하여 <표 2>와 같은 장점이 있으며 따라서 콘크리트의 열화 검사에 응용 시 검사 효율 향상 및 검사 비용의 절감이 기대 되어진다. 또한 이러한 방법은 콘크리트 구조물의 열화 조사로만 한정되지 않고 토목 분야 전체 혹은 다른 분야에 있어서도 분광 이미지에 의한 성분 분석 방법의 도입이 가능하리라고 예측된다.
- 5) 향후 실용화를 목표로 검사 장치의 개발이 가능할 것으로 보여진다. □

참고문헌

1. 倉敷紡績株式會社, 知識の部屋 赤外線の話, 2002.
2. F. M. Howari, P. C. Goodell, S. Miyamoto, "Spectral Properties of Salt Crusts Formed on Saline Soils", *Journal of Environmental Quality*, Vol.31, 2002, pp.1453~1461.
3. 川鐵テクノリサーチ株式會社, *Inspector 製品カタログ*, 2003.
4. 菱電商事株式會社, *Inspector 製品カタログ*, 2003.
5. 株式會社相馬光學, *Fiberspec 製品カタログ*, 2003.