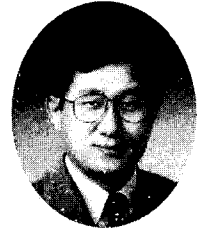


특 집

유지 관리 모니터링 최신 기술

유지 관리 모니터링 기술의 현황과 발전 방향 - Monitoring Techniques of Concrete Structure Maintenance : State of the Art Survey -



박석균*

1. 서 론

앞으로의 세상은 더욱 다양한 환경 조건 변화와 요구 수준 향상 등의 문제까지 복합화되면서, 구조물의 유지 관리에 대해서도 여러 의미에서 지금까지 경험하지 못한 새로운 문제가 대두될 것으로 예상되고 있다. 특히, 철도·도로 등의 교통·수송 시스템, 수도·전력·가스과 같은 파이프라인 시스템 등의 기반 시설물은 비록 단기간 사용이 중지되더라도 사회 활동과 생활에 막대한 영향을 미치기 때문에 용이하게 성능을 복구하거나 향상시킬 수 없는 상태에 처하게 된다.

이와 같은 상황을 개선할 대책으로서 신설 구조물에 대해서는 내구성이 뛰어난 기능성이 높은 구조물을 건설하는 일이고, 기설 구조물에 대해서는 성능 개선을 포함한 적절한 유지 관리를 행하여 장수명화를 도모하는 일이다. 이러한 개선 대책의 효율성을 높이기 위해 최근에는 구조물의 비용을 신설시 뿐만 아니

라 공용(供用)시의 유지 관리를 포함한 라이프사이클 코스트(LCC)로 고려해야 한다고 하는 사고 방식이 확대되면서, 종래의 '대중요법형'에서 '건강진단형'의 점검 기술이 필요하게 되었다. 이 경우, 일상 점검으로서 육안 검사에 추가하여 구조물의 상태를 재현성 있는 측정 기술로 조사, 기록하는 모니터링 기술의 필요성이 크게 대두되고 있다.

이와 같은 진단 기술의 변화 추세에 능동적으로 대처하고 국내 진단 기술의 발전을 위해, 유지 관리 관련 모니터링 기술의 최근 동향을 정리해보았다.

2. 유지 관리와 모니터링

최근 일본토목학회에서 발간된 「콘크리트 구조물 유지관리지침(안)」 등에 기초한 콘크리트 구조물의 일반적인 유지 관리 개념과 흐름을 <그림 1>에 나타내었다. 전체적인 흐름을 간단히 설명하면, 우선 대상이 되는 구조물에 대해서 초기 점검을 행하고, 각 점검 구분(A: 예방 보전을 기초로 한 유지 관리, B: 사후 보전을 기초로 한 유지 관리, C: 육안 관찰을 주체로

* 정회원, 대전대학교 토목공학과 교수

변형 등의 물리량을 관측하고, 이 관측치를 다양한 신호 처리 기법을 이용해 분석함으로써, 대상물에 축적된 손상 정도를 파악해 건전성을 판정하는 기술을 의미한다고 보아야 할 것이다.

3. 성능 개선과 모니터링

구조물에 요구되는 성능은 크게 나누어 내하, 처짐, 내진, 내피로, 수밀성, 대인 안전성, 미관 등이다. 이들을 회복·증강시키기 위한 성능 개선(rehabilitation) 개념도를 <그림 2>에 나타내었다. 여기서, 성능 개선이란 성능 저하된 부재·구조물 등의 성능을 보수·보강·개수에 의해 당초의 공용 수준 이상으로 회복시키는 것을 말한다. 열화에 따라 성능은 저하되었지만, 이를 성능 개선에 의해 초기 성능까지 혹은 건설 후 더욱 높아진 요구 성능 수준으로까지 끌어올리는 것 등이 포함된다. 당연한 일이지만, 성능 개선은 구조물에 요구되는 기능·성능에 따라 판정되고, 잔존 내용 기간에 대해 합리적인 대책이 강구되어야 한다. 이를 위해서는 판정을 위한 데이터를 부여한다는 점에서 점검시와 상세 조사 단계에서의 비파괴 검사를 포함하는 모니터링의 역할은 극히 중요하다.

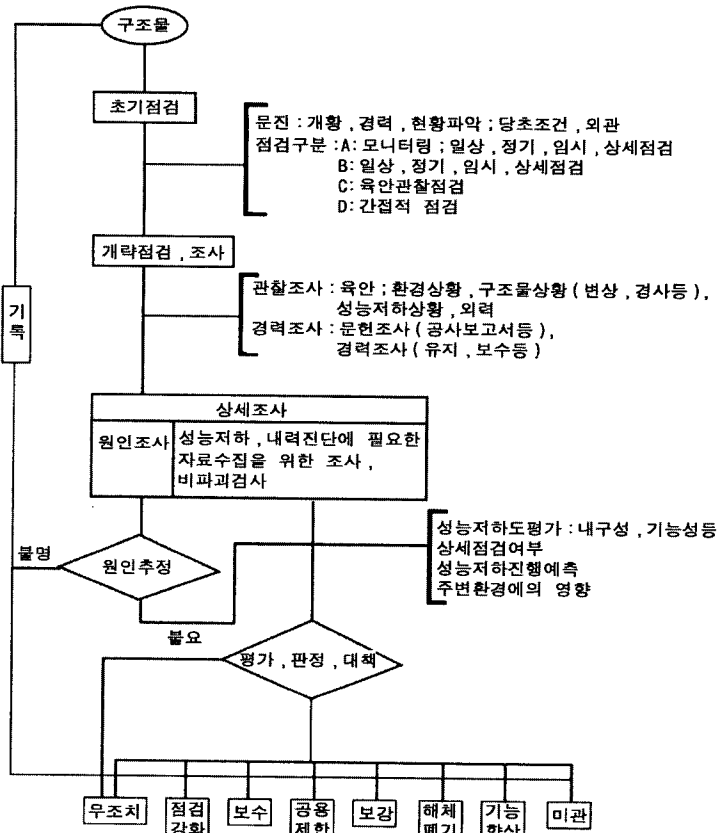


그림 1. 유지 관리 개념과 흐름도

한 유지 관리, D: 직접 점검할 수 없는 것)에 따라 개략 점검·조사를 행하여, 필요에 따라 상세 조사를 진행하는 것으로 되어 있다. 상세 조사에서는 성능 저하도라든가 내력 진단에 필요한 데이터를 수집하기 위해 다양한 비파괴 검사를 실시하고 성능 저하 원인을 조사한다. 이들 결과에 기초해서 평가하고, 성능 저하 예측 등을 기초로 대책을 강구한다. 성능 저하 예측의 목적은 대상이 된 구조물의 잔존 내용 연한의 추정, 성능 저하 판정, 상세 조사 빈도·방법의 결정, 성능에 영향을 주는 성능 저하 한계를 파악하는 일 등이다.

이상의 유지 관리에 대한 전체적인 흐름에서 모니터링은 주로, 점검 구분 A에 해당하는 것으로, 예방보전을 기초로 한 유지 관리에 초점을 두고 있음을 알 수 있다. 그러나, 유지 관리를 위한 모니터링 기술은 구조물 등의 대상물에 센서를 설치하여 음이나 진동,

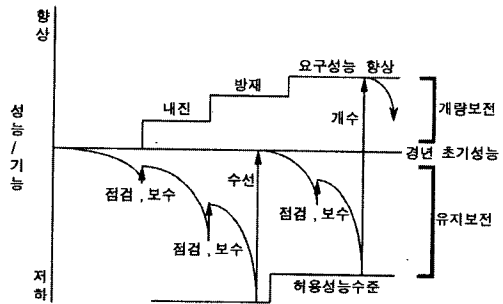


그림 2. 성능 개선 개념도

4. 모니터링과 비파괴 검사 기술

표 1. 각종 비파괴 시험법

콘크리트 구조물의 유지 관리 모니터링에 이용될 수 있는 각종 비파괴 검사법을 그 원리에 따라 크게 분류하면 다음과 같다.

- ① 광학적, 시각적인 기계 장치를 이용해서 구조물 표면 상태에서부터 정보를 얻는 것
- ② 파(波), 열, 전기 등 고체중을 전파하는 성질을 이용해서 콘크리트 내부 및 배면 정보를 얻는 것
- ③ 콘크리트의 국부를 파괴하여 정보를 얻는 것

이 분류에 따라 기존의 비파괴 검사법을 정리하면 <표 1>과 같이 된다. 위에서 ① 광학적 방법에 관해서는 화상 정보 처리 기술의 진보, 기억 장치 용량의 비약적인 증가를 고려하면 디지털 화상 등을 이용하는 방법 등 육안 관찰 검사를 대체하는 방법의 연구 개발이 진전되고 있다. ②의 고체중을 전파하는 성질을 이용하는 방법은 가장 비파괴 시험다운 방법으로 연구도 많이 행하여지고 있다. 단, 측정 원리가 다양하고 각각 다른 측정 환경에 영향을 받아 이들 방법에 모두 정통하기는 매우 어렵다. ③의 국부 파괴법은 직접 콘크리트의 물리적 특성과 화학적 성질에 관련되기 때문에 명확한 정보를 얻을 수 있다. 작업성등의 문제와 화학적 성질을 면밀히 분석할 경우는 고가의 장비가 필요하여 그다지 자주 사용되고는 있지 않지만, 실제적인 기술이기 때문에 장비와 시험법의 간편화 등의 연구가 진행될 필요가 있다고 판단된다. 이 외에도 표에는 언급하지 않았지만, 초음파법 + 반발경도법 등의 복합법이나, 일반적인 변위계측법 등이 있다.

다음은 이들 방법 중에서 일부 방법의 모니터링 적용 및 개발 사례를 간단히 소개한다.

3.1 광학적, 시각적 방법

(1) CCD 카메라에 의한 균열 검출 장치

조사 대상 개소에 가까이 접근하기 곤란한 경우에 사용되는 보어 스코프, 화이버 스코프 등 원래 의료용으로 개발된 장비가 미소 공극 등의 검사에 사용되고

분 류	점검 방법	점검 대상
광학적, 시각적 방법	육안 관찰, 사진, 디지털카메라	변형, 표면 균열, 박리, 박락, 유리석회용출, 누수, 녹에 의한 변색
	레이저 레이저스피클	변위, 변형률, 진동, 파동 변형률 분포
	광케이블	파손, 변형률
진파(傳播) 성질을 이용하는 방법	진동계측법	탄성 거동, 상대적 균질성
	타음법	표면 부근 골재 분리(honey-comb), 공동, 들뜸, 박리, 동탄성계수, 두께, 내부 결함, 구조물 기초 깊이
	충격탄성파법 (충격공진법)	부재 균질성, 동탄성계수, 내부 결함, 내부 공극, 표면 균열 깊이
	초음파법	균열 발생 모니터, 파괴 진행, 성능 저하도 (코어 시험), 응력 이력 추정
	AE법	내부 결함(공동 등), 포장·라이닝 두께 및 배면 공동, 강제 위치
	레이더법	표면 박리, 누수, 표면 부근 다짐 불량부, 스크리트 법면 배면 공동
	적외선법	판 두께, 배근 상태, 철근 직경, 피복, 공동, 골재 분리(honey-comb), PC 그라우트 충전 상황
	방사선법	배근 상태, 피복, 철근 직경
	전자유도법 (외류법) (외진류법)	강제 부식 상황, 강제 부식 속도
	투수시험 투기시험	투수성 투기성
국부 파괴에 의한 방법	인발법	압축 강도
	관입저항법	
	Break-off법	
	Pull-off법	
	반발경도법	
	응력해방법	응력 측정, 잔류 응력, 초기 응력
표본검사법 (화학적검사법)	탄산화 깊이, 화학 조성 분석 등을 위한 SEM, TEM, AEM, EPMA 등을 이용한 시험	

있다. 또한, 표면 결함을 기록·검출하는 데에는 비디오 카메라, CCD(Charged Coupled Device) 카메라 등이 이용되고 있다. 일반 카메라로도 검출은 가능하고, 콘크리트의 경우에는 1샷의 피사체 크기를 50 cm X 50 cm 정도로 하면 0.1 mm 폭의 균열은 검출 가능하다고 한다. CCD 카메라란 피사체를 광학 렌즈를 통해 감광부에 있는 CCD 센서로 광전(光電) 변환해 화상 정보를 디지털 신호로 출력하는 것이다. 교량 검사를 위해 <그림 3>에 나타낸 것과 같이 접근이 곤란한 개소에 대한 촬영 장치도 개발되어 있다. 자동 화면 처리 방법도 가능하고, 폭 0.05 mm 이상의 콘크리트 균열은 검출 가능한 것으로 알려져 있다.

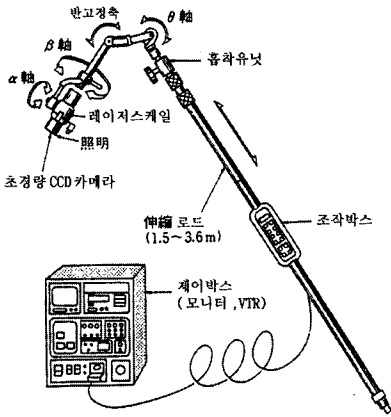


그림 3. CCD 카메라에 의한 균열 검출 장치



사진 2. 고가도로(교량) 상판 레이저 계측 차

(2) 자동 균열 해석 시스템

포장 도로나 터널 라이닝 표면, 교량 상판 등의 아스팔트와 콘크리트 구조물의 균열 조사를 행하기 위해 일본의 (주)코마츠(小松)제작소와 코마츠엔지니어링(주)에서는 <사진 1>과 같은 레이저와 비디오 기술을 응용한 계측 시스템을 개발하였다.

계측 차는 탑재된 계측 장치에 따라 포장이나 구조물의 표면에 레이저광을 횡단 방향으로 주사(走査, 이동)하여 표면 성상 영향에 따라 변화된 반사광의 양을 광 센서로 검출, 전기 신호로 변환해서 자기 테이프에 기록해 가는 것으로, 차량 주행에 의해 연속해 2차원 화상 데이터를 구축할 수 있다. 이후, 수록된 화상 데이터를 가변 슬릿법에 의해 균열의 길이, 폭, 방향을 자동적으로 추출할 수 있다. 평가 시스템으로 처리한 결과를 실제 화상 상에 겹쳐서 균열을 폭별로 색지워 출력시킬 수 있다. 특히, 종래의 시각 판독에서는 해석하기 어려운 균열 폭을 정확하고 용이하게 출력할 수 있다.

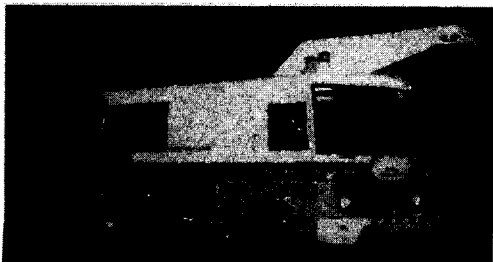


사진 1. 포장 도로용 레이저 계측 차

이와 동일한 원리를 이용한 것으로, <사진 2>에서와 같이 상판의 하부면 균열을 검출 해석하는 시스템을 일본의 (제)수도고속도로기술센터 및 공단, 코마츠엔지니어링(주)에서 공동 개발해 상기 시스템보다 먼저 현장에 적용하고 있다. 레이저 헤드, 스캐너, 광 검출 센서로 구성되는 레이저 계측 장치를 탑재하여, 로봇팔로부터 계측할 상판 면에 레이저 빔 스폿트를 조사(照射)하며 매초 3.3 km의 고속으로 주사 가능하고, 실시간으로 모니터(기록 저장 병행)하면서 작업할 수 있다.

(3) 교량 점검용 모니터 차

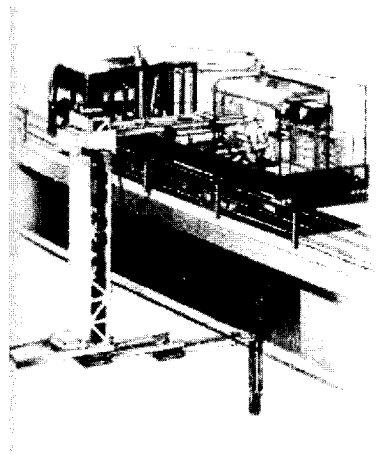


그림 4. 교량 점검용 모니터차

일본의 (주)미츠이(三井)조선에서 <그림 4>와 같이 교량 위로부터 TV 카메라로 상판 밑을 모니터링할 수 있는 점검 차량을 개발하였다. 범용형 4톤 트럭을 개조하여 점검 장치를 적재하여, 그림에서와 같은 방식으로 줌 기능에 의해 균열까지 모니터 화상으로 확인 가능하다. 점검시 도로 점유 폭은 2.4 m로 충분하다.

(4) 안전 감시 시스템

CCD 카메라나 레이저 등의 계측 기기를 이용해서 구조물의 거동을 자동적으로 감시하는 시스템이다. 일본의 요코가와(横河)브릿지가 개발한 것으로 <사진 3>에서와 같이 레이저와 위치 센서가 2차원적인 변위를 계측한다. CCD 카메라는 1대로 다수의 포인트를 2차원적으로 동시 계측이 가능하고, 2대를 조합하면 사진 장치의 원리를 응용해서 3차원 계측도 가능하다.

전화회선 등으로 사무실과 온라인으로 연결하여, 계측 데이터와 예측치와 비교 검토하는 등 종합적인 감시 시스템의 구축도 가능하다. 옵션인 경보 장치를 조합하면 현장 주변에 위험을 감지하는 것도 가능하다. JR東일본, 나가오카(長岡)기술과학대학과 공동으로 법면을 감시하는 시스템도 실용화 예정에 있다.

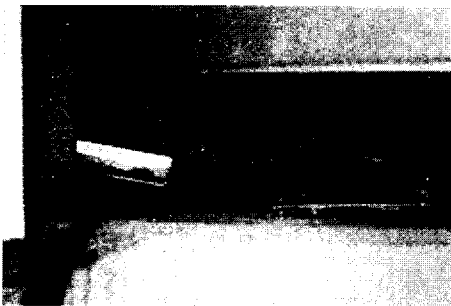


사진 3. 거더에 설치한 레이저 발신기와 위치 센서

(5) 터널 라이닝 변상(變狀) 추적 시스템

일본의 토우카이(東海)여객철도(주)와 (재)철도종합기술연구소에서 터널의 유지 관리를 위한 정기적인 모니터링을 위해 재래 철도용으로 <그림 5>와 같이 터널 변상을 추적하는 장치를 현재 개발 중에 있다.

촬영은 이미 개발되어 있던 연속 주사 화상 촬영 카메라를 이용하는 것으로 하고, 요구되는 조도(照度)의 확인, 카메라의 자동 초점 기능을 주로 한 개발, 촬영한 화상으로부터 변상 증별을 판별하고 전개도의

작성이 가능한 장치 개발에 전념했다. 본 시스템의 중심이 되는 것은 케도나 터널 등의 철도 교유의 장대 설비 촬영용으로 개발한 연속 주사 화상 촬영 장치 ConSIS이다. 연속 주사 화상이란 촬영 차량 상에 탑재된 라인 센서 카메라에 의해 주행하면서 터널 라이닝면을 주사해 얻을 수 있는 화상이다. ConSIS를 이용하면, 30 km/h 정도의 속도로 주행하면서 1 mm 정도의 고해상도의 라이닝면 전개 화상을 연속해서 얻을 수 있어 균열, 단차 및 누수 등의 검출이 가능하다.

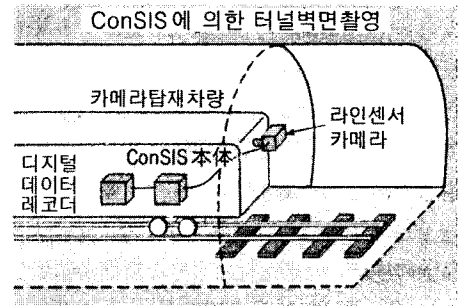


그림 5. ConSIS에 의한 터널 벽면 촬영

(6) 레이저를 이용한 콘크리트 표면의 화학 조성 측정

<그림 6>에 나타낸 바와 같이 YAG 레이저를 이용해서 콘크리트 표면을 2 GW/cm²의 대단히 높은 에너지로 가열하여 콘크리트를 증발시켜 콘크리트의 화학 조성을 광학적 분석 장치에 의해 측정하는 방법에 관한 연구가 행하여지고 있다. 이에 의해 탄산화 영역과 염분 침투 영역, 골재 조성 등이 면(面) 정보로서 얻어질 수 있게 된다. 원 위치 측정을 위한 포터블기도 개발되고 있다.

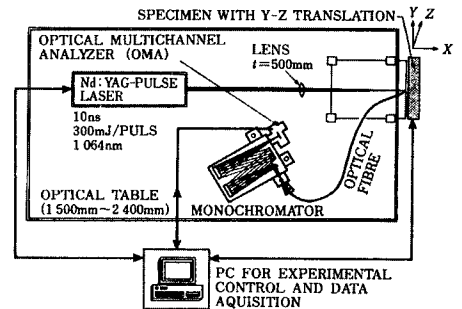


그림 6. 레이저를 이용한 콘크리트 표면의 화학 조성 측정

3.2 전파(傳播) 성질을 이용하는 방법

(1) 댐 및 파일 기초 진단 계측 시스템

〈그림 7〉에 미국에서 검토 중인 충격탄성파법 및 표면파(SASW)법의 개요를 나타내었다. 미시진주의 로저뎀 여수로는 콘크리트의 동해로 인한 성능 저하에 따라 슛크리트를 이용한 보수 작업을 실시하기 위해, 종래, 코어 채취 시험이나 육안에 의해 정기적인 성능 저하 조사를 행하여 왔지만, 그 대상 영역이 크기 때문에 이들 방법을 병용한 조사로 변경하려 하고 있다.

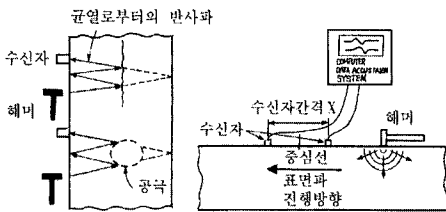


그림 7. 충격탄성파법 및 표면파법의 개요

로스엔젤레스·그린철도 고가교에서는 큰 직경의 파일 기초가 채용되고 있지만, 그 안전성을 보증하기 위해 콘크리트 타설 전에 기초 케이싱 내부에 계측점을 설치하는 CSL법이 채용되었다. 〈그림 8〉에 CSL법의 개략을 나타내었다. 이 방법은 PVC 파이프라 불리는 물로 채워진 튜브를 대각으로 배치하여 그 내부를 초음파 발신 장치와 수신 장치가 상하 이동함에 의해 파일의 성능 저하 위치를 계측하는 것이다. 본 방법은 건전 콘크리트 부위와 결함 부위와의 계측 결과차가 명료하여 결함위치의 판단이 용이하다. 콘크리트 타설 전에 PVC 파이프의 설치가 허용되는 경우에 가능하다.

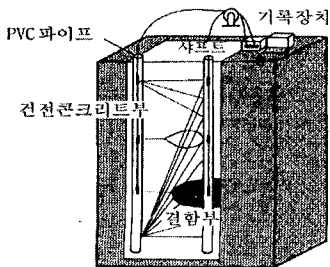


그림 8. CSL법의 개요

또한, 〈그림 9〉는 일본의 가지마(鹿島)건설이 개발한 콘크리트 파일 파손 진단 계측 시스템으로, AE법을 이용한 것이다. 조사는 파일 근처를 보강해 AE 센서를 부착한 도파봉(導波棒)을 삽입해 여진 등으로 발생한 AE파를 측정한다. 복수의 파손 개소를 같은 정도로 계측할 수 있다.

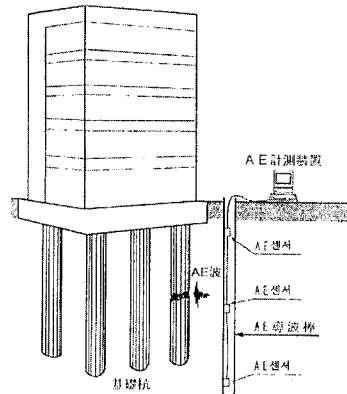


그림 9. AE법에 의한 파일 파손 진단 시스템

(2) 포장 진단 계측 시스템

FWD(Falling Weight Deflection meter)라는 일종의 충격탄성파법을 이용하여 포장의 건전도를 진단하는 기술로서, 일본에서는 FWD 연구회를 통해 본 기술을 보급하고 있다. FWD란 노면에 추를 낙하시켜 충격 하중을 주어 그 때에 발생하는 포장 표면의 처짐 형상을 측정한다. 처짐 형상을 컴퓨터에서 해석하여 포장을 구성하는 각 층의 지지력을 평가하거나 각 층의 재료 특성을 추정한다. 1지점당 측정 시간은 2~3분으로 측정 속도가 빠르고 정도도 높아 동일 지점 측정 오차는 2% 정도이다. 〈사진 4〉는 가지마(鹿島)도로에서 개발한 계측 장치이다.



사진 4 FWD 방식에 의한 포장 진단 계측 장치

(3) 터널 라이닝 및 도로 포장 배면 공동 점검 시스템

〈사진 5〉는 터널 라이닝 콘크리트 두께와 배면 공동 유무를 지중 레이더로 연속적으로 검사하는 시스템으로, 일본 미쯔이(三井)조선에서 개발하여 독자적인 파동 신호 처리 기술에 의해 높은 분해 성능과 투과 능력을 갖는 검사 결과를 얻고 있다. 검사는 지중 레이더를 계측 위치에 간단히 설치할 수 있는 유압 작용 팔을 탑재한 전용 차로 한다. 콘크리트 벽면에 송신 안테나로부터 전자파를 발신하면 콘크리트는 투과하지만 균열이나 공동 등의 전기적 성질이 다른 면에서는 일부가 반사하는 전자파의 성질을 이용한다. 이 데이터를 컴퓨터로 해석 처리하여, 50 cm 간격 정도의 라이닝 두께와 공동의 상황을 도표화해서 출력한다. 두께 10~80 cm의 무근 콘크리트에 대응하는 각종 안테나로 도로나 철도 외에 도수로 등 각종 터널에 적용 가능하다.



사진 5. 레이더법을 이용한 터널 공동 점검 차

또한, 〈사진 6〉은 같은 원리를 이용해 긴기(近畿) 지방건설사업소에서 도로 상판 배면 공동을 정기적으로 계측하기 위해 사용 중인 점검 차이다.



사진 6. 레이더법을 이용한 도로 공동 점검 차

3.3 국부 파괴에 의한 방법

(1) 탄산화에 의한 염소의 이동 현상 모니터링

표본검사법(화학적검사법)의 적용 사례로서, 실제 현장 구조물의 표본을 사용한 검사는 아니지만 본 사례와 같이 현장 구조물에 대해서도 적용이 가능하기 때문에, 전자선 마이크로 분석 장치(EPMA)를 이용해 모르타르 내의 탄산화에 의한 염소의 이동·농축 현상을 모니터링하여 분석한 결과를 소개한다.

〈사진 8〉은 정상 상태에서 염화물이 혼입된 모르타르 단면을 EPMA로 측정된 결과로서, 탄산화가 되지 않은 상태이므로 염소(밝은 색 부분)는 거의 균등하게 분포되어 나타나고 있다.

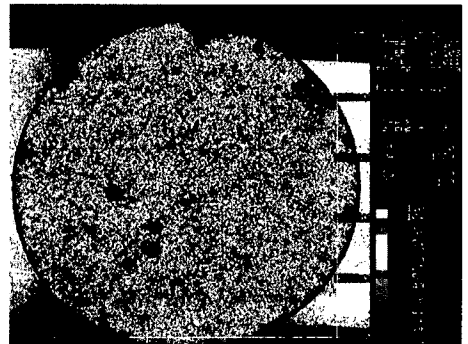


사진 8. 탄산화 전 EPMA 측정 결과

〈사진 9〉는 〈사진 8〉의 시험체에 대하여 탄산가스 농도 10% 환경 하에서 2주간 축진 탄산화시킨 후의 측정 결과로서, 어두운 색 부분은 염소 농도가 낮고, 밝은 색 부분은 역으로 높게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

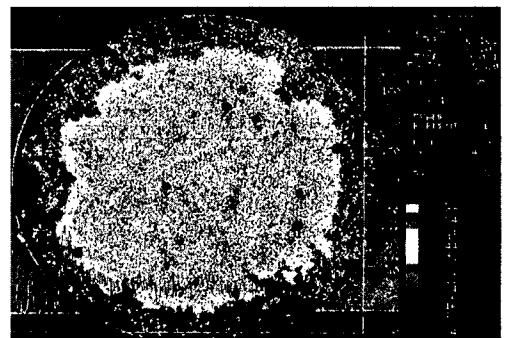


사진 9. 탄산화 2주 후 EPMA 측정 결과

〈사진 10〉은 촉진 탄산화 8주 후의 시험체에 대한 측정 결과로서 어두운 색 부분이 더욱 확대되고, 그 한편에서 밝은 색 부분이 축소되어 있다. 또한, 페놀 프탈레인 시약 분무법에 의한 탄산화 착색 실험 결과와 비교해 본 결과, 탄산화 영역과 비탄산화 영역의 경계부와 본 측정 결과(〈사진 10〉)의 색상에 의한 경계부가 거의 일치되어 나타나, 탄산화에 의해 염소의 이동이 이루어졌음을 명백히 알 수 있다.

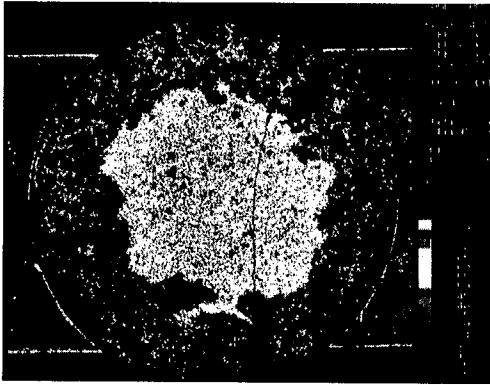


사진 10. 탄산화 8주 후 EPMA 측정 결과

〈사진 11〉은 〈사진 10〉의 단면을 화상 처리하여 염분의 농축도를 같은 농도선 분포를 이용하여 나타내었다. 단면 내의 평균 농도는 1이다. 비탄산화 영역에서는 당초 혼입된 염분 농도보다 최고 약 2.5배 농축되어 있다. 바로 이 염분이 고농도로 농축된 부분에 철근이 위치하면, 부식은 급속히 진행하게 될 것임을 알 수 있다.

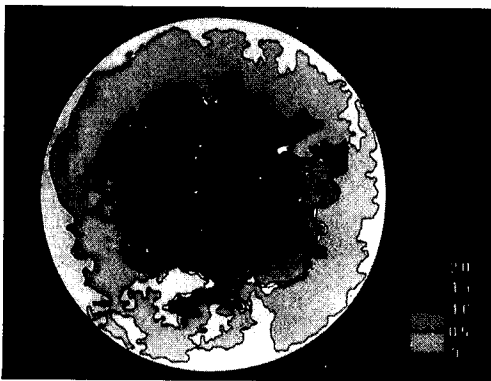


사진 11. <사진 10>에 대한 화상 처리 결과

5. 모니터링과 스마트 구조물

생물과 같이 환경 조건 변화에 따라 스스로 그 기능을 바꾸어 적응하는 재료, 소위 스마트 재료(‘인텔리전트 재료’라고도 함)에 관심이 높아지고 있다. 무생물인 재료로 주위의 환경 변화를 검지(檢知)하여, 스스로 진단하고, 스스로 조절·적응하거나 손상을 스스로 복구·복원하는 능력, 수명을 판단하는 능력, 학습하는 능력, 즉 지적 능력을 가질 수 있다면, 안전성, 건전성, 신뢰성이 대폭 향상되어 그야말로 모니터링 효과가 극대화될 수 있을 것이다.

사회기반 시설을 구축하는 다양한 토목·건축 분야의 주요 구조 부재에 이러한 재료를 이용한 소위 스마트 구조물(smart structure)과 같은 지적 구조 시스템을 도입함으로써, 지진이나 태풍 등의 자연 재해와 예지하기 곤란한 재해에 대한 생명·재산 보전 등의 안전성 향상이 크게 기대되고 있다. 토목·건축 분야에서는 소위 파괴 예지 센서로서 건전성 모니터링(health monitoring)의 기능만이라도 실현될 수 있다면, 상기의 안전성 향상뿐만 아니라 내구성이나 노후화 점검에도 유효하여 구조물의 장수명에 따른 라이프사이클코스트 저감에 큰 효과를 볼 수 있다. 특히, 직접 육안 조사하기 어려운 기둥이나 보의 접합부, 지중·수중 구조물(터널, 파일 등) 등 비파괴로 검사하기 어려운 경우나 원자로 등 인간이 접근할 수 없는 구조물에는 매우 필요하다고 볼 수 있다.

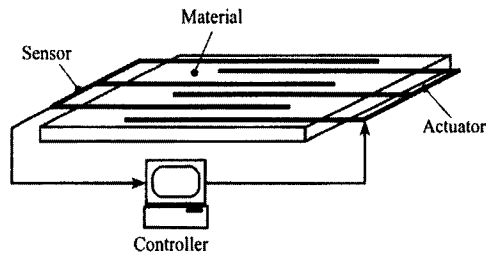


그림 10. 스마트 재료

복합 재료를 스마트(지적)화하기 위해서는 환경의 변화를 검지하는 ‘센서’, 센서 신호를 판단하고 명령하기 위한 제어 신호를 출력하는 ‘컨트롤러’, 제어 신호에 따라 구조 기능을 바꾸는 ‘액추에이터’가 필요하다. 이를 위해, 센서, 컨트롤러, 액추에이터 기능을 갖는

기능 재료와 강도를 중시하는 구조 재료를 융합해 일체화한 복합 재료를 창조함으로써 <그림 10>과 같은 스마트 재료를 실현할 수 있다.

5.1 관련 연구 개발 현황

지적 구조 시스템 또는 지적 구조 재료의 관련 연구 개발은 현재 연구를 시작한 상태이며, 건설 분야에서도 아직 초기 단계여서 센서 기능과 자기 복구 기능을 함께 갖는 재료의 개발은 아직 보고되고 있지 않다.

(1) 탄소 섬유와 유리 섬유단을 보강재로 한 강화 프라스틱

탄소 섬유(CF)와 유리 섬유(GF)의 섬유단(다발)이 에폭시 수지 또는 비닐 에스테르 수지 등을 매트릭스 재료로 한 복합 재료(CFGFRP)도 구조재료로서의 기능과 변형을 센서로서의 기능을 동시에 갖는 것으로 보고되고 있다. CFGFRP 재료는 그 구성 재료의 탄소 섬유단이 도전성 재료이고, 또 탄소 섬유의 한계 신장률이 유리 섬유보다 작기 때문에, 하중을 증가시키면 CFGFRP재는 파단되지 않지만, 탄소 섬유는 완전히 파단되어 전기 저항치는 무한대로 큰 값이 된다. 또한, 하중을 제거하면 CFGFRP재는 거의 원래대로 복원되지만, 파단된 탄소 섬유는 원래 상태로는 돌아가지 않아 전기 저항치가 원래 상태보다 큰 값을 나타낸다. 이로부터 사전에 하중-변형률-전기 저항의 잔유치 관계를 조사해 두면 전기 저항 잔유치로부터 부재에 작용한 최대 하중 혹은 구조 부재의 최대 변형률을 무응력 상태에서 추정할 수 있게 된다. 또한, 전기 저항치가 무한대로 될 때를 경보토록 하면 CFGFRP가 파괴되기 전에 파괴를 예지할 수 있다. 탄소 섬유의 한계 신장률을 여러 가지 다르게 함으로써 파괴 예지의 감도를 조정할 수 있게 된다.

이들 재료는 이미 실용화가 도모되고 있어, 은행의 현금 창구등의 경비 방법용 인텔리젼트 기능으로서 금고실 벽과 천장, 바닥에 제일 많이 이용되고 있다.

(2) 콘크리트의 파괴 검지

미국 뉴욕주립대학에서는 도전성 재료인 강(鋼) 및 카본 단섬유를 혼입한 소위 섬유 보강 콘크리트 및 섬유 보강 모르타르의 소형 공시체에 대해서 인장, 압축, 휨, 반복 재하 시험을 행하여, 전기 저항치 변화를

확인함으로써 이들 재료가 콘크리트의 건전성 모니터 링으로서 사용할 수 있음을 확인하고 있다.

5.2 향후 연구되어야 할 분야

앞으로 토목·건축 분야에서 지적 구조 시스템의 실용화를 목표로 해결해야 할 기술 과제로서는 다음과 같은 사항을 들 수 있다.

(1) 센서 기능재의 개발

이미 제안되고 있는 파괴 검지등의 기능 재료 외에 보다 간편하고 신뢰성이 높은 센서 기능을 갖는 구조 재료의 개발이 기대된다. 특히, 인장 파괴에 대한 센서 기능을 나타내는 재료는 보고되고 있지만, 압축 파괴에 대한 센서 기능을 갖는 재료의 개발은 늦어지고 있고, 특히 콘크리트등 압축 파괴를 무시할 수 없는 구조 부재는 대단히 많아 이들 니즈(needs)는 크다.

(2) 액츄에이터의 개발

지진, 태풍, 인위적인 진동 등으로부터 구조물의 동요를 억제하는 면진, 제진, 건물의 강성을 변화시키는(가변 강성 기능) 등의 기능을 가진 액츄에이터 개발이 필요하다.

(3) 자기 복구 기능

구조 재료 스스로가 파손된 부분을 복구하는 기능 재료의 개발이 가까운 장래에 필요해져오고 있다. 이미 콘크리트 균열 보수등의 아이디어는 몇 가지 보고되고 있지만, 아직 실용화 단계에 이르고 있지는 않다.

6. 결 론

이상에서 기술한 바와 같이 향후의 성능 저하 진단 기술은 종래의 '대중요법형'에서 구조물의 공용 개시 단계에서부터 정기적으로 구조물의 건전성을 파악하는 '건강진단형'으로 바뀌어가고 있는 추세에 있다. 더욱이 먼 장래에는 스마트 구조물과 같은 지적 구조 시스템까지 등장하게 될 것이다. 이는 최근 들어 사회간접 자본의 합리적이고 효율적인 운용을 위해 구조물의 비용을 신설시 뿐만 아니라 공용(供用)시의 유지 관리를 포함한 라이프사이클코스트 측면에서 고려해야 한다고

하는 사고 방식이 확대되고 있기 때문이다.

그러나, 국내의 현실은 아직도 보수·보강 혹은 개축·갱신을 전제로 하여 검토하는 '대중요법형' 진단 기술에 크게 의존하고 있는 실정이다. 특히, 비파괴 검사 기술등은 국내 현실에 맞는 효과적이고 기술 지향적인 연구 성과도 제대로 이루어지고 있지 않은 현실에서 외국의 관련 지침에 의존하고 있고, 심지어는 장비회사가 "매뉴얼대로만 하면 되지"하는 안이한 인식조차 갖고 있다. 이러한 상황 하에서는 세계가 모니터링이라는 건강 진단형 점검 기술 체제로 전환되고 있는 시대적 흐름에 뒤쳐질 수밖에 없다.

따라서, 앞으로는 현재 실용화되고 있는 모니터링 기술의 대부분을 차지하는 비파괴 검사 기술등의 분야에 대해 정부와 학·협회를 중심으로 한 적극적인 관심과 지원 하에 보다 체계적이고 단계적인 연구 개발에 전력을 추구하고, 그 성과물도 현장 중심의 활용을 목표로 하여 다각적인 노하우를 축적해 나아갈 필요가 있다. 그럼으로써 국내 구조물의 효율적이고 효과적인 유지 관리 기술의 발전을 한층 앞당겨 나아갈 수 있을 것이다. □

참고문헌

1. 山本嶺男編著, 헬스모니터링, 共立出版(株), 1999, 8
2. 日經コンストラクション編, 補修·補強의實踐手法, 日經BP社, 1996.

3. 콘크리트構造物の維持管理指針(案), 土木學會, 1996. 5.
4. 筑摩 榮 外 1人, トンネル覆工變狀を追跡する, 土木學會誌, Vol.82, 1997. 8.
5. 寺田啓治 外 1人, 自動ひびわれ解析システム, 土木學會誌, Vol.83, 1998. 3.
6. 日本建築學會, 鐵筋コンクリート造建築物の耐久性調査·診斷および補修指針(案)
7. 魚本健人, 土木構造に期待される近未來コンクリート, 콘크리트工學, Vol.31, No.1, 1993. 11.
8. 伊東良活, 콘크리트構造物の非破壞試驗法の現状, 콘크리트工學, Vol.36, No.6, 1998. 6.
9. 杉田, 스마트コンポジット-VI, 日本複合材料學會誌, Vol. 23, No.5, 1997.
10. 河合研至, 콘크리트部材における劣化成分의濃度變化とその發生機構に關する研究, 東京大學大學院工學系研究課 博士學位論文, 1990.
11. H.Wiggenhauser, LIBS for Non-destructive Testing of Element Distributions on Surface, Proc. of NDT-CE'97, 1997.
12. Olson, L.D. and Sack, D.A., Non-destructive Evaluation of Concrete Dams and Other Structures, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol.2457, 1995.
13. 토목기술강좌-토목구조물 설계 및 유지관리(II)-, 대한토목학회, Vol.6, No.2, 2000. 3.
14. 박석균, 콘크리트의 화학적 검사법에 의한 내구성진단기술, 콘크리트학회지, Vol.11, No.3, 1999. 7.