특 집

일본에서의 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 현황 및 최신기술

Current Status of Nondestructive Inspection and Recent Measuring Technologies for Existing Concrete Structures in Japan

안태호* *Tae-Ho Ahn*
카나다 히사시** *Kanada Hisashi*
우오모토 타케토*** *Uomoto Taketo*

1. 서 론

현재 일본 사회기반시설의 정비에 있어서 중요한 과제는 기존 구조물을 효율적으로 유지 관리하는 것에 있다. 향후 일본에서는 인구 감소와 더불어 건설 분야의 기술자 역시 크게 감소되어질 것으로 추정하고 있으며 또한 일본 고도 성장기에 건설된 수십 년이 경과한 구조물들이 점차적으로 보수 보강이 증가되어지므로 종래 기술자에 의한 점검으로는 한계가 있을 것으로 판단하고 있다.

이러한 실례로 1995년에 발생한 한신 대지진에서의 많은 피해, 1999년에 발생한 산요 신간센의 터널 라이닝 콘크리트 박락 사고, 2004년 내진 낙교 방지장치의 앵커 볼트 시공 문제 및 레디믹스트 콘크리트의 불법 가수 문제 등 여러 문제점들이 2007년 오늘날까지 일본 매스컴을 흔들고 있다. 결국 이러한 사건들의 여파로 콘크리트 구조물의 열화나 보수 문제가 일본 사회에서도 점차적으로 주목을 받게 되었지만, 한편으로는 유지 관리의 중요성, 진단업무의 어려움을 여실히 보여주고 있는 실례라고 할 수 있다.

특히 토목 구조물은 그 성질상 조사범위가 넓고 환경조건이나 입지조건이 열악한 경우가 많아 조사에 많은 노력과 비용이 드는 문제점이 있다. 따라서 현재 일본에서는 일본 국토 교통성의 통지에 나타내듯이 이러한 대책들 중의 하나로서 비파괴 검사와 같은 객관적인 검사의 중요성을 강조하고 있는 실정이다. 본고에서는 주로 토목 구조물을 대상으로 하는 일본에서의 비파괴검사의 현황과 그 전망 및 최신 기술에 대하여 소개하기로 한다.

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

2. 비파괴 검사의 현황과 문제점

2.1 각종 검사와 비파괴 검사

콘크리트 구조물은 건설부터 유지 관리에 이르기까지 매우 많은 단계에서 검사를 하고 있다. 이러한 검사들은 반드시 비파괴 검사뿐만이 아니라 여러 검사들을 포함하고 있다. JIS(일본공업규격)에서는 비파괴 시험, 비파괴 검사 용어의 정의를 아래와 같이 정의하고 있다.

(1) 비파괴 시험(nondestructive testing) JIS Z 2300(0301)
소재나 제품을 파괴하지 않고, 파손의 유무, 그 존재 위치, 크기, 형상, 분포 상태 등을 조사하는 시험

(2) 비파괴 검사(nondestructive inspection) JIS Z 2300(0302)
비파괴 시험의 결과로부터, 규격 등에 의한 기준에 따라서 합격 여부를 판정하는 방법

이러한 정의로 볼 때 분명한 것은 비파괴 검사는 비파괴 시험을 실시해 기준에 적합한 것인지 아닌지를 판정하는 방법이다. 즉 비파괴로 단지 시험이나 계측을 실시하는 작업은 비파괴 검사라고 엄밀하게 말할 수는 없는 것이다. 그러나 구조물의 외관, 치수 등을 육안, 사진, 측량 등으로 측정해 설계 도면과 접합한지 아닌지를 조사하는 일도 비파괴 검사의 일종으로 생각할 수는 있다. 따라서 이러한 점들을 고려하여 콘크리트 제조부터 유지 관리에 이르기까지의 각 종 검사를 정리하여 예를 들면 〈표 1〉과 같이 정리 할 수 있다. 〈표 1〉에는 일반적으로 비파괴 검사라고 불리지 않는 것도 포함되어 있는 것을 볼 수 있다. 폭넓게 콘크리트 구조물을 손상시키지 않고 측정을 실시해 합격 여부의 판정을 실시하고 있는 경우와 코어에 의한 검사를 제외하면 모두 비파괴 검사의 범주에 포함 시킬 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 콘크리트 구조물의 검사 예

시기	검사항목	필요한 측정	검사방법	비고
제조시	재료시험	각 재료의 품질	JIS등의 검사	물리·화학시험
	콘크리트 품질	콘크리트 배합 등	굳지 않은 콘크리트 시험 경화 콘크리트 물성시험	물리시험
	계량	각 재량의 단위질량	계량	
	혼합	혼합정도	토크(전류치) 측정	슬럼프의 추정도 가능
	각종 치수	거푸집 배치	측량, 트랜싯 등	도면과의 조합
	배근(PC강재 포함)	커버콘크리트, 철근간격 철근치수	측량, 노기스 등 노기스 등	도면과의 조합
타설전	철근접합	압접 이음새	초음파측정	
		기계 이음새	토크 등	
	운반	펌프 압송성 재료분리의 정도	가압 블리딩 실험 블리딩 실험	배합결정시에 행하는 경우가 많다
	타설 직전검사	슬럼프	슬럼프 시험	굳지 않은 콘크리트 시험
		공기량, 온도	공기량 측정기, 온도계	
		강도 (샘플)	강도 시험	각종 조기판정방법
		수분량 측정	RI, 기타	수분량 추정
타설·양생	고정화	충전도	밀도 측정, RI	댐 등에서는 RI 측정도 있음
		충전상황	적외선, RI	거푸집 등의 밖으로부터
	양생	재료분리의 정도	체가름시험	
		내부온도	열전대	일반적
		표면온도	적외선	거푸집 표면온도
		콘크리트응력	몰탈게이지, 광센서	타설 양생시의 응력측정
완성시	각종치수	단면치수	측량, 트랜싯 등	
	배근 (PC강재 포함)	커버 콘크리트	초음파, 임펙트에코, 레이더 레이더, 전자유도법, X선	배면 등이 지반에 접하는 경우 최외곽만
		철근간격	레이더, 전자유도법, X선	한계 있음
		철근치수	전자유도법	최외곽만
	구조물전체	전체강성	진동시험	진동수, 진폭 등 계측
	외관	열화징조	유관검사, 사진	녹, 균열
		이상 부분 (가시)	디지털카메라, 적외선, 레이저	균열, 콜드 조인트 등
		이상 부분 (비가시부)	타음, 적외선, 레이더, 초음파, X선	표면으로부터 보이지 않는 부분 (내부, 배면 공동 등을 포함)
경년시	응력, 변형	전체변형	측량, 트랜싯 등	
		국부변형	다이얼게이지, 변형계	
		진동	가속도계, 도플러 변위계	적분하는 것으로 변위도 측정
		응력	몰드 게이지, 광파이버	내부, 표면응력
	강도, 강성	콘크리트 강도	코어시험 인발법, 슈미트법등	가장 일반적 신뢰성의 문제
		탄성계수	코어시험 초음파 전파속도, 변형	
	균열, 박리	분포 (가시부)	디지탈카메라, 적외선	
		균열폭 (가시)	디지탈카메라, 적외선	직접측정도 가능
		깊이	초음파	깊으면 철근에 영향이 있음
		발생	AE	피로 등, 상시 계측
	유해물질 침투깊이	중성화 깊이	코어시험	
		염화물 이온 깊이	코어시험	모두 코어로 분석
		산 등의 깊이	코어시험	
	투수, 투기성	유해이온 분포	멀티스펙트럼법	콘크리트 표면만
		투기성	간이투기계수측정	
	철근 부식	부식 부분	자연전위	측정시의 부식 부분
		부식 정도	자연전위, 전류량 해석	정기적 측정이 필요

(주) 표 중의 것은 비파괴 시험이라고는 볼 수 없는 것을 나타낸다.

2.2 성능 대조법과 검사의 중요성

일본에서는 2001년 이후 일본 토목학회 시방서등에 성능 대조형이라는 항목이 개정되어 그 결과 종래의 규정에서는 허용되지 않았던 재료, 구조, 시공 등을 용이하게 실시할 수 있게 되었다. 그러나 이 경우 사전에 사용하는 재료, 구조, 시공 등과 대조를 엄밀하게 실시하게 되었을 뿐만 아니라 각 작업 단계에서 그 성능을 확인하기 위한 방법으로 검사가 상당히 중요하게 되었다. 즉, 검사시 각 항목들이 요구 성능을 만족하는지 합격 여부가 결정되어지며 불합격으로 판정되어질 경우 당연히 모든 작업을 다시 시행 하지 않으면 안 되게 된 것이다. 따라서 비파괴에 의한 시험결과가 이러한 판정 여부의 방법으로써 더욱더 중요한 비중을 차지하게 되는 결과가 되어졌다.

비파괴 검사라고 하면 외부로부터 명확하게 콘크리트 구조물의 내부를 알 수 있는 것 같이 생각하기 쉽지만, 이러한 검사도 콘크리트타설 후 내부를 상세하게 조사하는 것은 매우 어렵다〈그림 1〉. 최신의 여러 가지의 비파괴 시험을 구사해도 철근 콘크리트 구조물의 경우 콘크리트 표면으로부터 10수cm 정도까지의 깊이 밖에 상세한 정보를 얻을 수 없다. 철근의 치수·배치의 경우를 예를 들어도 설계도면과의 조합을 실시할 수 있는 것은 현재의 기술에서는 십자형 철근의 2층까지 정도 밖에 조사할 수 없다. 또한 여러 층으로 철근이 배근 되어 있는 대형 구조물(교각 등)의 경우에는 표층의 철근 밖에 비파괴로서는 조사할 수 없는 한계가 있다. 따라서 대형 구조물의 경우에 있어서는 콘크리트 타설 전의 치수, 커버콘크리트, 배근 검사 등을 세밀하게 실시하는 것 또한 상당히 중요하다. 즉 비파괴 검사의 중요성이 나날이 증가되어지고 있는 것은 사실이지만 비파괴 검사만으로 구조물의 모두를 체크할 수 없는 것을 충분히 인식해 두는 것이 필요하다.

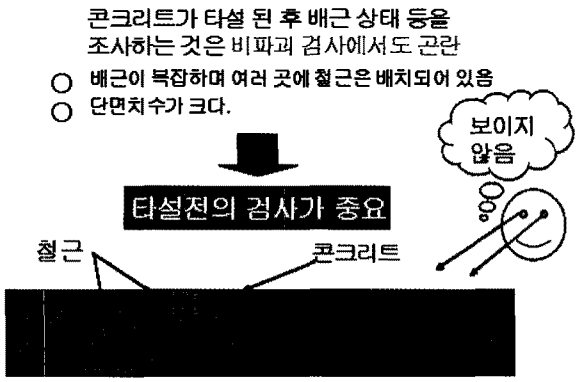


그림 1. 콘크리트 타설 전 검사의 중요성

2.3 시공 결함에 따른 사회적 요구의 증대

최근 일본에서는 2003년 아사히 신문과 NHK로 레디믹스 콘크리트의 가수 문제, 낙교 방지용 앵커 볼트 시공 결함 등이 방송되어 한때 크게 화제가 되었었다. 이후 일본에서는 국토 교통성 등에서 전반적인 대책을 제안하고 실시되게 되었는데 그 내용은 다음과 같다.

콘크리트 가수 문제의 경우, 일본 국토 교통성으로 부터 나온 「레디믹스 콘크리트의 품질 확보」(2003년 10월 2일 국관 기술 제 185호)에 의하여 굳지 않은 콘크리트 단위 수량 측정이 의무화 되어졌는데 이것은 레미콘의 타설량이 1일당 100m^3 이상의 직할 공사에 대해서 〈표 2〉와 같은 기준으로 타설의 가부를 판정하는 것이었다. 이러한 규제는 당시 어떤 의미로는 획기적인 대책이었으며, 또한 일본에서 단위 수량 측정을 위한 새로운 여러 가지 비파괴 시험 방법이 개발되는 계기가 되었다. 아직 콘크리트 샘플링의 문제 등에 있어 불법 가수에 대해서는 반드시 유효하지 않은 경우도 있지만 이러한 규제는 보다 바람

표 2. 2003년 10월 2일 국관 기술 제185호의 개요

굳지 않은 콘크리트의 타설량이 1일당 100 m^3 이상의 직할 공사
1) 시방배합의 단위 수량 상한치를 규정
조골재 최대 치수 20 ~ 25 mm : 175 kg/m^3 이하
조골재 최대 치수 40 mm : 165 kg/m^3 이하
2) 수분량 측정 빈도
2회/일 (오전 1회, 오후 1회) 또는 100 ~ 150 m^3 마다 1회
3) 측정 결과의 반영(아래의 표 참조))
4) 단위 수량 관리에 대한 기록을 서면과 사진에 의해 제출

수분양 측정치	결과에의 대응
배합설계 ± 15 kg/m^3 이내	• 그대로 시공(문제없음)
배합설계 ± 15 ~ 20 kg/m^3	• 수분량 변동의 원인 조사 • 레미콘 제조자에게 개선 지시 • ± 15 kg/m^{3}이내에서 안정될 때까지 3대 마다 1회의 측정 실시
배합설계 ± 20 kg/m^3 넘는 경우	• 레미콘을 타설 하지 않고 가지고 돌아가게 함 • 수분량 변동의 원인 조사 • 레미콘 제조자에게 개선 지시 • 전 운반차량 측정을 실시해 ± 20 kg/m^{3}이내가 되는 것을 확인 • 상기 ± 15 ~ 20 kg/m^{3}에 준함

직한 방향으로 나아가고 있다는 판단 하에서 많은 사람들이 향후의 동향에 주목하고 있는 실정이다.

후자의 경우에는 일본 국토 교통성으로 부터 시작으로 하여 일본 도로 공단 등이 그 실태 조사를 실시하였으며 조사 방법으로는 초음파에 의한 앵커 볼트 길이 검사를 실시했다. 그 결과 〈그림 2〉에 나타나듯이 낙교방지 장치를 기존의 철근 콘크리트 교각 등에 부착할 때 앵커 볼트의 길이가 불량인 경우가 다수 (2,862개 : 불량률 평균 1.5%) 존재하는 것으로 판명되었다. 이후 일본 국토 교통성에 의한 「직할 국도, 고속 도로 등에 있어서의 낙교방지 장치 등의 앵커 볼트 조사 결과」 최종보고를 (2003년 11월 14일) 다음과 같이 하였다. 「향후의 재발 방지를 위해 청부업자에 대해 초음파탐상기에 의한 전수 조사를 의무화 하는 것과 동시에 검사에 대해서도 중간 기술 검사 등을 활용, 전수 검사를 실시하는 것으로 한다.」 일본에서 종래에 이러한 확인 절차가 전 볼트에 대해서 행해지지 않았던 것으로 볼 때 이러한 검사를 실시하게 된 것은 안전을 위해 한 걸음 더 전진한 것으로 평가받고 있는 실정이다. 이미 설치가 종료된 낙교 방지공사에 있어도 초음파에 의한 볼트 길이 검사는 기존 비파괴 검사 기술을 용이하게 활용 할 수 있는 검사이기에 현재 대부분 현장에서 채택되고 있다. 다만 이러한 방법에서도 콘크리트 내부의 철근을 절단 해 버렸을 경우에는 대처할 수 없는 것은 분명하다.

3. 비파괴 검사에서의 여러 가지 문제점

비파괴 검사의 유효성에 대해서는 이미 여러 가지의 문헌을 통해 보고되어 지고 있다. 그러나 아직까지 해결되어야 할 문제점이나 개선되어야 할 점 또한 많은 것도 사실이다. 여기에서는 향후 이 분야에서 해결해야 될 문제들에 대하여 간략하게 논의하기로 한다.

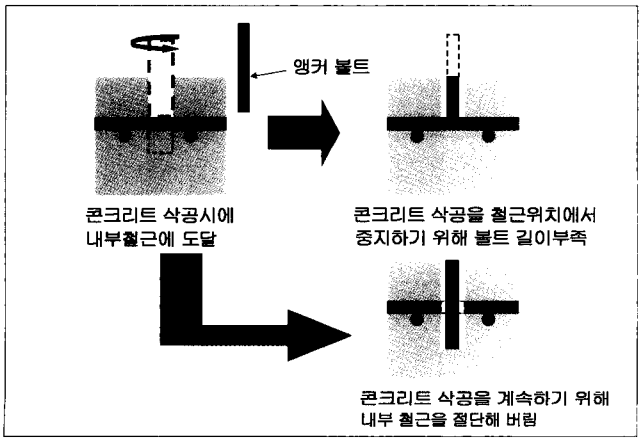


그림 2. 앵커 볼트 설치용 삭공시의 문제점

3.1 측정 정도와 오차

비파괴 시험에는 다양한 원리가 사용되고 있다. 같은 계측 항목이어도 원리가 다르면 측정 방법이나 검출결과 또한 다른 경우가 많이 있다. 예를 들면 초음파로 콘크리트 내부에 있는 공극을 조사하는 경우, 사용하는 탄성파의 주파수에 따라서 그 측정 정도가 다른 경우도 있다. 즉 보다 높은 주파수이면 일수록 높은 정도로 계측을 할 수 있지만, 콘크리트와 같이 내부에 기포나 골재 등이 혼입해 있으면 이러한 것에 의한 반사가 발생해 극히 얕은 깊이의 정보 밖에 얻을 수 없게 된다. 이것을 피하기 위해서는 저주파로 계측 하는 것이 필요하게 되는데 이럴 경우에는 작은 결함 등은 탐사할 수 없는 결점이 있게 된다. 따라서 이 때문에 측정 정도는 감소되게 될 수밖에 없다. 이러한 문제는 많은 계측기기에 존재하고 있지만 현재는 대부분 한 가지 방법으로 사용하고 있어 어느 정도의 주파수 영역대를 가지는 센서를 조합한 계측기기를 제작해 보다 정확도가 높은 계측기술을 개발할 필요가 있을 것으로 보인다.

또한 원리를 충분히 숙지하고 있지 않으면 잘못된 결과를 얻는 경우도 발생한다. 〈그림 3〉은 콘크리트 내부에 기울기의 공동이 존재하는 경우의 초음파 계측 결과이다. 당연한 일이지만 콘크리트 표면으로부터 단지 거리를 계측하면 실제보다 얕은 위치에 공동이 존재할 것 같은 결과가 된다. 이것은 탄성파가 보다 얕은 부분에 존재하는 공동으로 반사되기 위해서 생기는 현상으로, 보정을 하면 올바른 깊이로 변환할 수 있다. 그러나 실제 계측에서는 이러한 보정을 실시해야 할 것인가 아닌가의

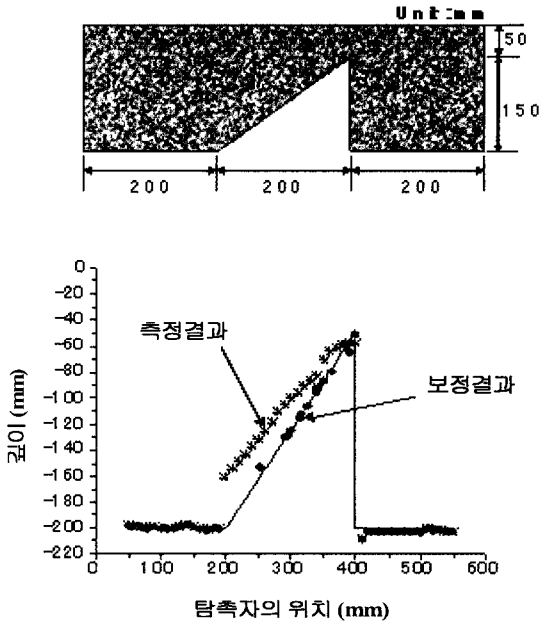


그림 3. 초음파에 의한 내부 공동의 비파괴 시험 결과[1)]

판단이 어려우며 이것이 오차를 낳는 원인의 하나가 되고 있는 실정이다.

3.2 측정 결과의 표시

측정 결과를 표시하는 방법으로서 대부분의 기기에서는 파형 등 직접 측정한 데이터를 그대로(예를 들면 파형 그 자체) 표시하고 있는 경우가 많다. 그러나 이러한 방법으로는 측정 원리부터 결과까지 숙지하고 있는 기술자 이외에는 결과를 알기 쉽지 않으며 제삼자에 의해 비파괴 검사를 실시하는 것도 어려워진다. 이 문제를 해결하기 위해서는 계측 결과를 알기 쉽게 표시하는 계측기의 개발이나, 실제 측정된 데이터를 해석하는 소프트웨어의 개발 또한 급선무이다. 결과적으로는 이러한 개발이 비파괴 시험 결과를 보다 이용하기 쉽게 하는 방법이기도 하다.

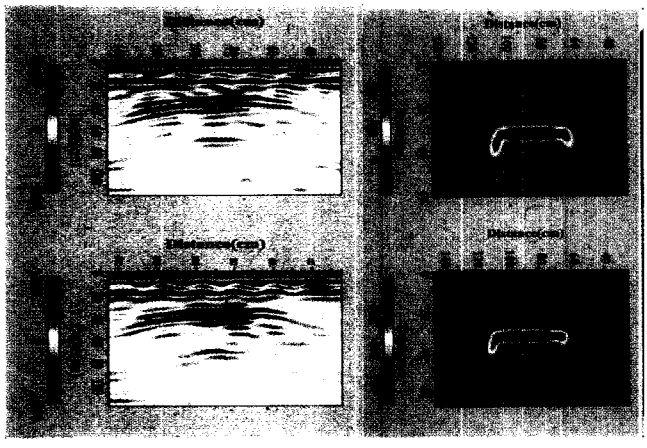
〈그림 4〉는 레이더를 이용해 콘크리트중의 철근 및 공동을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 왼쪽 그림은 횡축의 계측 위치와 레이더의 원파형을 나타낸 것이며, 오른쪽은 계측 파형으로부터 분석을 하여 그림을 복원시킨 결과를 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 왼쪽의 측정 결과로는 차이점을 명확하게 알기 어려우나, 오른쪽의 복원 해석 결과를 보면, 공동과 철근의 배치 차이를 뚜렷이 알 수 있게 된다. 이와 같이 비파괴 시험시 측정 결과데이터를 해석하는 소프트웨어가 제작되어져 병행 되어진 다면 비파괴 검사시 오류를 범하는 것도 방지할 수 있다.

3.3 매크로와 미크로

기존의 콘크리트 구조물의 비파괴 검사로서 이용되고 있는 수법은, 기계, 금속 그 외의 분야에서 개발된 원리를 그대로 이용하고 있는 것이 많은 실정이다. 따라서 이 때문에 구조물 내부의 각종 결함, 균열 등을 탐사하는 수법이 현재까지 많이 이용되어져 왔다. 그러나 대형 콘크리트 구조물의 경우에는 국부적인 결함 등만을 조사해서는 안전성이나 사용성을 체크할 수 없으며 결국 구조물에 요구되는 각종 성능을 검사하기 위해서는 단계 마다 다른 정보가 필요하게 된다.

〈그림 5〉는 그 일례로서 일본 토목 학회의 콘크리트 표준시방서에서 구조물 성능 평가시 요구되고 있는 각종 요구 성능 및 항목에 있어서의 필요한 정보를 정리하여 나타 낸 것이다. 이 그림으로부터 분명하게 알 수 있는 것은 구조물 성능 평가시 각 항목에 있어서의 필요한 정보에 차이가 나는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 또한 〈표 1〉과 비교하면 명확하게 기존 콘크리트 구조물의 요구 성능을 조사하기 위해서는 다양한 비파괴 시험이 필요하며 더 나아가 그 측정결과를 고려한 해석 등을 실시하여야지만 각 성능을 정확하게 체크할 수 있는 것을 알 수 있다. 즉, 하나만의 비파괴 계측만으로 구조물의 모든 성능 평가 검사가 끝나는 것이 아닌 것을 쉽게 이해할 수 있다.

종래 행해져 온 비파괴 검사의 대부분은 콘크리트 구조물의 국부적인 결함 검출 등에 집중되어져 왔다〈그림 5〉. 그러나 기존 콘크리트 구조물의 유지 관리 전체를 생각하여 볼 때 토목 구조물에 있어서의 비파괴 검사 역할은 〈그림 6〉에 나타내듯이 구조물 전체적인 성능에 대해서도 검사할 수 있어야 할 것이다. 그러나 아직까지 비파괴 검사는 아무래도 국부적인 결함 검출에 집중하는 경향이 있는 것이 사실이며 따라서 앞으로 토목, 건설 분야에 있어서 비파괴 검사의 역할은 구조물 전체적인 문제부터 국소적인 문제까지를 커버할 수 있어야 할 것이다. 물론 구조물의 전체적인 성능(안전성, 사용성 등)을 조사하기 위해서는 비파괴 시험 뿐만이 아니라 구조 계산 등이 필요하지만



(위쪽 : 철근이 교차되어지게 배치되어 그 아래에 공동이 존재하는 경우, 왼쪽 : 원파형, 오른쪽 : 복원 결과, 아래 쪽 : 철근이 상하에 배치되어 그 아래에 공동이 존재하는 경우, 왼쪽 : 원파형, 오른쪽 : 복원 결과)

그림 4. 레이더법에 따르는 콘크리트 내부의 철근과 공동의 검출[2)]

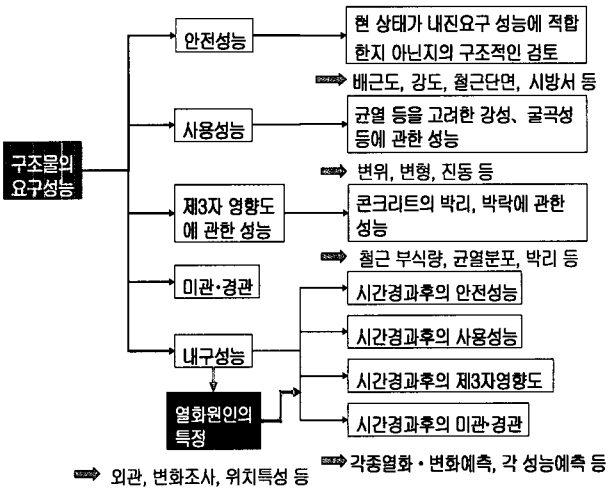


그림 5. 구조물 성능 평가를 위한 각종 검사

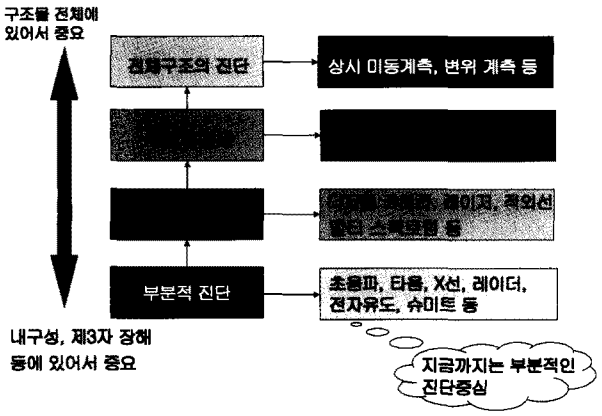


그림 6. 구조물의 진단과 비파괴 검사

성능을 평가하는 데 있어서는 비파기 검사의 중요성 또한 큰 비중을 차지하는 것을 알 수 있다.

4. 새로운 계측 방법의 개발

지금까지 일본에서의 비파괴 검사 현황에 대하여 간단히 알아보았다. 이후에는 이러한 구조물 진단을 위한 새로운 비파괴 계측 방법에 관한 최근 연구 동향을 알아보도록 한다. 종래에 측정할 수 없는 각종 계측 가운데 콘크리트의 화학적인 정보를 비파괴로 계측하는 수법이 향후 더욱더 중요하게 되어질 것으로 판단되며 이와 더불어 비접촉형 비파괴 검사의 중요성 역시 증가되어질 것으로 보여진다. 특히 앞 절에서도 언급하였지만 〈그림 6〉에 나타낸 내구성에 관한 성능은 향후 구조물이 어떻게 변화하는지를 추정할 필요가 있으며, 이것은 화학적 정보가 없으면 실행하기 힘든 부분들이다. 따라서 샘플을 구조물로부터 채취해 시간을 들여 실내에서 분석하는 것도 필요하지만 현장의 경우에 있어서는 구조물에 접촉 하지 않으면서 단시간 내에 광범위를 계측할 수 있다면 가장 바람직하다고 말할 수 있다. 더욱이 이러한 새로운 계측 방법은 작업효율의 개선과 비용을 절감할 수 있는 방법이기도 하다. 다음은 현재 필자가 소속하고 있는 도쿄대학 콘크리트 연구실에서 진행하고 있는 차세대형 비접촉형 비파괴 검사기술들을 간략하게 소개하기로 한다.

4.1 근적외선 분광법에 콘크리트의 열화분석법[4,5]

최근 콘크리트 구조물의 열화 조사 및 진단에 있어 많은 비파괴 검사법이 개발되고 있는 실정이다. 예를 들면 콘크리트의 들뜸과 박리는 적외선 법으로, 균열의 깊이는 초음파법, 철근위치는 레이더법, X선법 등 다양한 비파괴검사 방법들이 응용 되고 있다. 그러나 현재 제안되어지고 있는 검사 방법이 대부분 콘크리트의 균열, 내부공극, 철근위치 등 콘크리트 표면에 근접한 물리적 정보는 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 새로운 근적외선 분광법의 소개와 이 방법의 장점을 소개하기로 한다. 근적외선 분광법의 원리는 다음과 같다. 지구상의 모든 물질은 고유한 방법으로 전자파(빛)를 흡수, 반사하는 성질을 가지고 있다. 이러한 성질을 분광특성이라 하며 분광 특성으로부터 성분이나 농도를 측정하는 방법을 분광법이라 한다. 분광법에는 근적외선 분광, 적외선 분광, 라먼 분광 등이 있다. 적외선분광은 시멘트등 경화체의 분석에 적용된 사례도 있지만, 본 연구에서는 이미지에 의한 영상가시화를 실현하기 위해서 가시영역에 가까운 근적외선 분광법을 이용 한다. 근적외광은 〈그림 7〉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 ㎛의 파장대에서 측정하고 있다. 다음은 근적외선 분광법의 장점을 간단히 정리한 것이다.

(1) 콘크리트 표면의 성분 분포상황을 비접촉, 비파괴적으로 측정할 수 있다.
(2) 검출 대상 성분마다 다른 시험이 필요가 없으며 한번의 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 검사 방법이다.

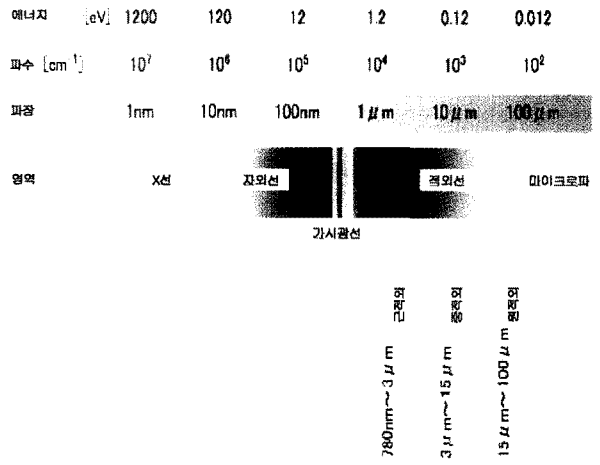


그림 7. 빛의 파장과 종류[3]

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

일반적으로 철근 콘크리트 열화에 있어서 제일 문제가 되는 것은 철근의 부식이다. 강재는 알칼리 상태에서 부동태피막을 형성하여 쉽게 부식되어지지 않지만 콘크리트 중성화로 인한 pH 저하로 인해 부식이 쉬워지게 된다. 또한 연안지역의 콘크리트 구조물에서는 비로 인한 염분 등이 콘크리트에 침투하여 철근부식의 열화 등이 문제가 되어 지기도 한다. 따라서 강재 부식의 원인인 중성화, 염분의 침투, 더 나아가 콘크리트의 화학적 열화로써 하수시설이나 온천지대에서 문제가 되고 있는 황산열화 등의 열화인자(물질)의 검출 방법을 근적외선 분광법을 이용하여 〈그림 8〉과 같이 분석할 수 있게 된다. 〈그림 8〉은 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.

4.1.1. 현장에서의 근적외선 분광법에 의한 콘크리트의 열화 측정

1) 콘크리트 표면 염분분포의 측정

연안지역의 콘크리트 구조물은 대기 중으로부터 염분이 콘크리트 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 염분투수상황을 추정할 수가 있다. 종래방법에서는 콘크리트 표면의 염분 농도를

사진 1. 콘크리트 표면의 염분량 검사

측정하는 방법이 없으므로, 스크래칭 방법으로 조사를 행하고 있다〈사진 1〉.

또한 내부 염분투수상황을 조사하는 경우에도 무작위적으로 콘크리트 코어를 채취하여 실험실로 돌아가 염분 분석을 시행하는 상황이다. 코어 채취로부터 〈그림 9〉와 같이 콘크리트 구조물의 표면 염분량을 측정할 수 있으나, Fick의 확산방정식의 C0 값을 얻을 수 없어 내부의 염부 투수상황을 예측할 수 없다. 그러나 근적외선 분광법 이미지를 응용한 경우에는 가장 농도가 높은 위치의 코어를 지정하여 채취할 수가 있게 되므로, 종래의 무작위적인 코어채취와 비교하여 구조물에 필요없는 손실을 주지 않으며 시간을 절약할 수 있는 효율적인 검사가 가능하게 된다.

2) 콘크리트 내부 조사

근적외선 분광법을 이용할 경우 콘크리트 표면의 분석 이외에도 내부조사도 가능하다. 〈사진 2〉와 같이 파이버센

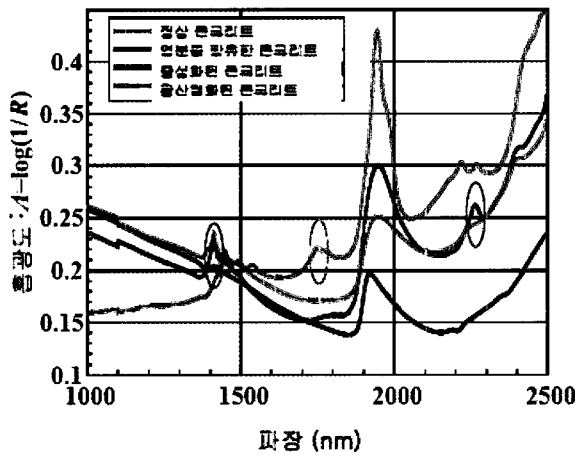


그림 8. 콘크리트 열화에 따른 근적외선 스펙트럼의 변화

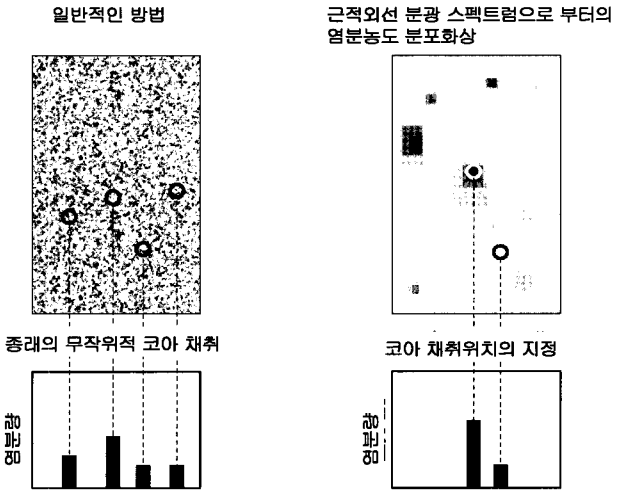


그림 9. 근적외선 분광법 이미지를 이용한 코어 채취

사진 2. 파이버 센서형 근적외선 분광 분석계

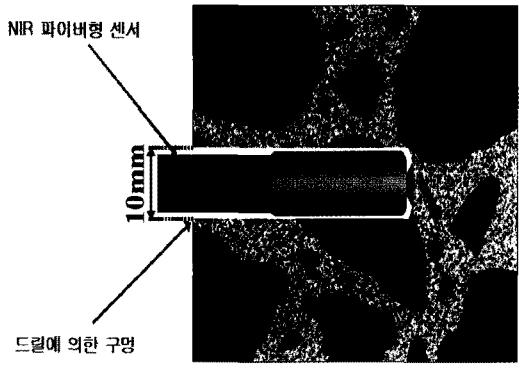


그림 10. 드릴 구멍을 이용한 내부의 근적외선 스펙트럼의 측정

서형 근적외선 분광 분석계를 적용할 경우, 드릴을 사용하여 콘크리트에 작은 구멍을 내어 임의의 깊이의 근적외선 스펙트럼을 측정할 수가 있다. 〈그림 10〉에서는 직경 10 mm의 구멍을 뚫어 현장에서 콘크리트의 내부 염화물량의 추정, 중성화깊이, 황산화 부식 깊이 등을 동시에 측정하는 것을 나타내었다.

3) 콘크리트용 도막재의 품질 평가

콘크리트용 도막재나 강구조물용 도료는 근적외선 영역에서 특수한 흡광 피크를 가진다. 이러한 특수한 경향을 이용하여 근적외선 분광법으로부터 품질체크, 막이 벗겨진 부분의 검출까지도 가능하다. 일반적으로 콘크리트 표면 보호용 도막도료는 정상으로 도포가 되었는지 육안으로 검사하기가 어렵다〈사진 3〉. 이러한 재료는 고가이면서 규정량(3배 희석)의 물에 희석해 사용되지만 드물게 희석 배율이 높은 상태로 도포되는 일이 있으며 이러한 경우 부착력이 떨어지는 주원인이 되기도 한다. 따라서 이러한 시편들은 근적외선 분광특성과 근적외선 분광 이미지법을 이용하여 분석하면 〈그림 11〉과 같이 도막재 농도가 높은 부분은 어둡게 촬영되며 농도가 낮은 부분이나 무도포의 경우에는 밝게 촬영 되어지는 것을 알 수 있다.

사진 3. 도막재 도포후의 가시영역 화상

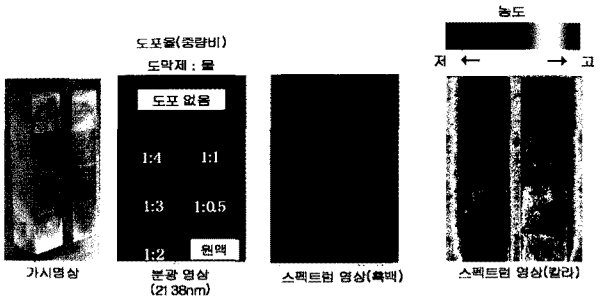


그림 11. 근적외선 이미지 시스템으로부터 도막재의 농도분포의 검출

4.2 에너지 분산형 이동형 형광 X-선 분석 장치에 의한 콘크리트의 온사이트 분석[4, 5]

형광 X-선 분석은 새로운 기술은 아니며, 이미 원소 분석의 한 방법으로서 널리 이용되고 있다. 경원소보다는 중원소 분석에 적절하며, 검출되는 형광 X-선의 파장으로부터 원소를 확인할 수 있으며 X-선의 강도로부터 원소를 정량할 수 있는 기술이다. 콘크리트와 관련해서는 시멘트의 형광 X-선 분석방법이 JIS에 명시되어져 있으며 Ig.loss, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 등의 정량분석 또한 기술되어져 있다.

실구조물의 경화 콘크리트를 샘플로서 채취해 열화 물질을 정량 분석하는 것도 가능하지만 시험실에서 측정하는 것을 고려한다면 다른 분석 방법과 비교해도 이점은 적은 편이다. 이 장치는 시험실 거치형으로 장치 내부에 시료를 세트할 필요가 있어 대형시편이나 다른 형태의 시료를 측정할 수 없는 단점이 있었다. 그러나 최근 소형이면서 이동이 가능한 고성능 형광 X-선 분석 장치가 개발되어 온사이트 분석에 활용이 가능해졌다. 이 경우 측정 대상을 직접 비파괴적으로 분석할 수 있으며 이것을 콘크리트 구조물의 조사에 적용한다면 매우 유효한 검사 방법이 될 수 있다. 본 연구는 이러한 연구의 기초 연구로서 현장에 있는 콘크리트 중의 염화물량 측정 가부를 검증하는 것을 주목적으로 실험하였으며 그 결과 형광 X-선 분석법에 의해서도 정확한 분석을 해낼 수 있는 것을 보여준다.

4.2.1 현장에서의 형광 X-선 분석에 의한 염화물량의 측정

1) 염화물 침투 깊이의 측정

이동형 형광 X-선분석장치의 장점은 현장에서 직접 구조

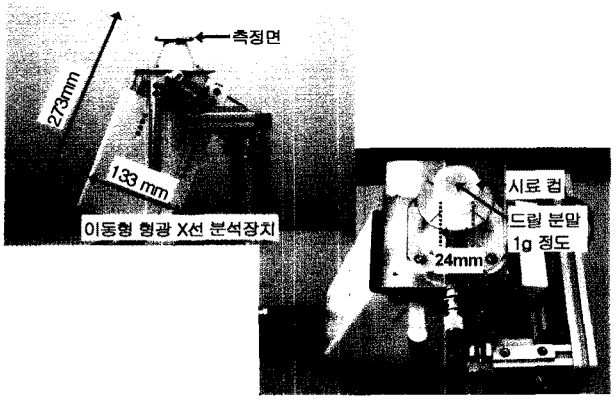
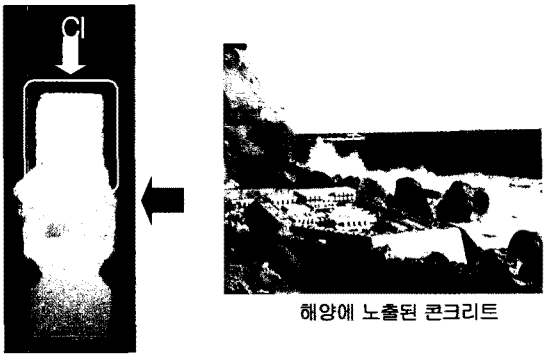


사진 4. 드릴 분말의 분석 방법

물을 측정할 수 있는데 있다. 실제 콘크리트 구조물의 염화물량 측정은 드릴 분말이나 코어 콘크리트를 채취해 전위차 적정이나 EPMA에 의한 분석을 행하고 있지만 이동형 형광 X-선 분석 장치에 의해 드릴가루〈사진 4〉나 코어 콘크리트를 직접 측정하면 현장에서 단시간에 염화물량의 정량 분석이 가능해진다. 시험시 드릴가루의 시료 중량을 0.5g, 1.0g, 2.0g, 3.0g, 4.0g으로 변화시키고 분석을 실시했지만 시료 중량에 따라서 형광 X-선 스펙트럼은 거의 변화하지 않았다. Cl분석에만 주목한다면 1g정도의 드릴 분말로도 분석이 가능할 것으로 보인다. 종래 염소 분석 방법이 10g정도의 시료를 필요로 하는데 비하여 더 소량이 요구되며, 실구조물로부터 샘플을 채취할 때에도 유리하다. 또한 콘크리트를 직접 측정할 수 있는지를 검증하기 위해서 연안에 노출된 공시체의 염분 침투깊이의 측정을 시도했다. 측정시료는 〈사진 5〉와 같이 연안에서 노출된 콘크리트 공시체를 절단한 것을 이용했다. 샘플의 단면 형광 X-선 분석은 〈사진 6〉과 같이 이동형 형광 X-선 분석 장치의 검출부를 측정면으로 설정하는 것으로 가능해진다. 〈그림 12〉는 측정된 형광 X-선 스펙트럼을 검량선에 대입해 추정된 염화물량과 같은 공시체를 전위차 적정(JCI법)으로 측정한 것을 비교한 결과이다. 기존의 방법과 비교해 같은 경향을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 전위차 적정법과 비교해 시료의 조정도 필요없고 비파괴적으로 측정할 수 있었다. 또한 측정 시간이 큰 폭으로 단축되어 현장에서의 계측도 가능해진 것을 알 수 있다. 그러나 X-선의 조사 지름이 작고 골재의 영향을 크게 받았기 때문에 실용화하기 위해서는 조사 지름의 검토가 필요한 부분이 있다.

2) 원소 분석에의 응용

현재 주로 사용 되고 있는 에너지 분산형 형광 X-선분석



(a) 해양에 노출된 콘크리트 공시체 단면

(b) EPMA 분석 결과(CI분포)

사진 5. 연안에 노출된 콘크리트 시편의 염화물 분포

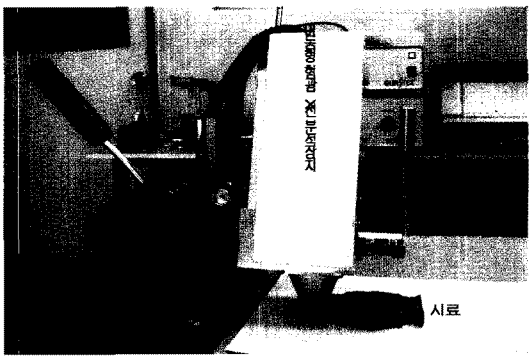


사진 6. 이동형 형광 X-선 분석에 의한 콘크리트 시편의 측정

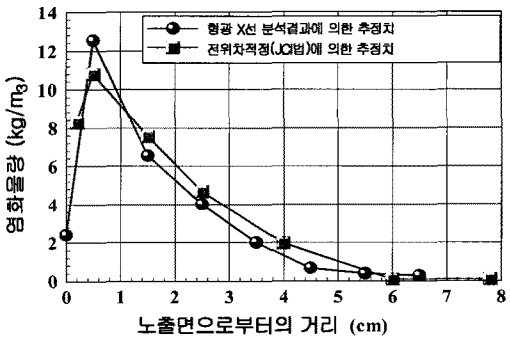


그림 12. 노출면으로 부터의 염화물량 분포

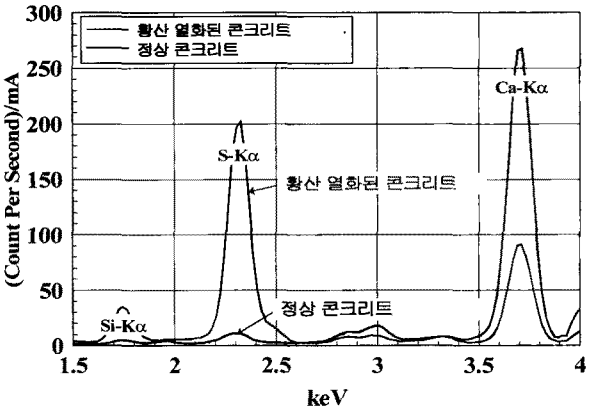


그림 13. 황산 열화에 의한 형광 X-선 스펙트럼의 변화

장치의 측정 가능 원소는 12Na ~ 92 U이다. 콘크리트중의 Cl 이외의 원소, 예를 들면, Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Fe 등의 분석도 가능하다. 그 예로써 〈그림 13〉은 황산 열화를 받은 콘크리트의 형광 X-선 스펙트럼을 보여주고 있다. 정상의 콘크리트와 비교하여보면 스펙트럼의 S-Kα(2.307 keV)의 카운트수가 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 동시에 황산 열화에 의해 페이스트부가 용출하여 골재가 노출되었기 때문에 규소의 카운트가 증가하며 칼슘의 카운트가 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 이처럼 콘크리트의 황산 열화부의 검사 등에 응용할 수도 있음을 알 수 있다.

3) 실구조물 측정시의 유의점

이동형 형광 X-선 분석 장치로 측정하고 있는 부분은 직경 3 mm정도이다. 따라서 드릴분말을 분석할 때에는 문제가 되지 않지만 콘크리트를 직접 측정하는 경우 직경 3 mm를 골재가 얼마나 차지하고 있는가에 따라 측정 결과가 달라질 수 있게 된다. 따라서 측정부위를 많이 설정해 평균을 취할 필요성이 있다. 현재 본 연구실에서는 기업체와 공동으로 분석 장치의 조사 지름을 확대하여 개발하는 것도 연구 중에 있다. 또한 형광 X-선은 공기층의 영향에 의해 샘플로부터 방사되는 형광 X-선이 감쇠한다는 단점이 있다. 따라서 측정 면에 요철이 있는 경우나 기포부를 측정하면 실제의 농도보다 측정치가 작아지므로 측정 부위는 평활한 면을 선택하는 것이 좋다. 이러한 단점들은 향후 계속적인 연구를 통해 보완해 나아가도록 할 것이다.

5. 결 론

오늘날 토목 콘크리트 구조물에 비파괴 검사의 이용이 점차적으로 증가하고 있으며 따라서 구조물의 유지관리 경우에 있어서 이러한 검사의 장점과 단점을 충분히 이해하고 활용하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있겠다. 최근 일본 사회에서도 각 분야에 있어 신뢰성 문제가 많이 부각되어지고 있으며, 토목 분야에 있어서도 예외는 아니라고 할 수 있다. 특히 토목 구조물의 검사 기술, 성능 저하 예측, 성능 저하 대책, 보수 보강 기술 등은 아직까지 경험적인 방법들에 많이 좌우되며 콘크리트 공학 분야에 있어서도 개척해야 할 새로운 영역이기 때문이다. 특히 이러한 유지 관리에 관한 기술은 기술변천을 포함한 폭넓은 지식과 경험이 요구되며, 제법 고등의 연구자, 기술자가 본격적으로 몰두하지 않으면 어려운 분야라고 할 수 있다. 따라서 사용자 및 기술자가 쉽게 접근할 수 있는 새로운 기술 개발과 이에 따르는 객관적인 검사 결과를 도출할 수 있는 연구 또한 필수적이라고 할 수 있을 것이다. 따라서 이후 현장에서 간편하게 비파괴 검사를 통하여 열화 원인분석 및 구조물전체를 진단할 수 있는 새로운 기술들이 한국에서도 활발히 개발되어지기를 필자들은 기대하고자 한다. 아울러 2007년 정해년을 맞이하여 일본 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 현황 및 최신 기술에 관한 소개가 한국 콘크리트 기술 분야의 발전에 조금이나마 도움이 되기를 기원하며, 올 한 해 동안에도 한국콘크리트학회 및 회원 여러분의 많은 축복과 보다 나은 발전을 기대하며 짧은 글을 마친다.

참고문헌

1. 材瀬 豊, 勝木 太, 魚本健人 "超音波法による内部空洞の可視法", コンクリート工學年次 論文集, Vol.26, 2004, No.1, pp. 1923 ~ 1928.
2. S. K. Park and T. Uomoto, *Estimation of thickness and width of void under concrete slab using radar image processing*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000, SEIKEN SYMPOSIUM Elserier, No.26, pp. 539 ~ 548.
3. 倉敷紡績株式會社, 知識の部屋 赤外線の話, 2002
4. H. Kanada, Y. Ishikawa T. Uomoto, *On-site Elemental Analysis of Concrete by Portable Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analyzer*, The Tenth East Asia- Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2006, pp. 279 ~ 284.
5. H. Kanada, T. H. Ahn, T. Uomoto "Non-destructive Inspection Methods for Componential Analysis of Concrete", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.18, No.2, 2006, pp. 933 ~ 936.