

### 건축구조물에의 적용현황 및 전망 The Application and Future Trend of the Nondestructive Tests to the Building Structures



이 상 민\*

#### 1. 서 론

구조물은 인간의 요구에 의하여 설계 시공되므로 구조물이 완성된 후, 사용자가 안전하고 쾌적하게 이용할 수 있는 성능(performance)과 안전성(safety)을 유지하여야 한다. 그러나 대부분의 콘크리트구조물은 사용기간 동안 끊임없이 반복되는 기상현상과 하중작용의 영향으로 구성재료가 노후되어 가므로 설계성능을 서서히 상실하여 간다. 따라서 구조물의 건전성과 잔존수명을 증진시키기 위해서는 구성재료의 물성과 구조부재의 거동변화에 대한 정밀계측을 통하여 구조물의 이력을 관리하여야 하지만 아직까지는 콘크리트의 내구성과 구조물의 파괴 안전율에 대한 사용자의 지나친 과신으로 노후구조물의 유지관리가 미흡한 실정이다.

특히 건축구조물은 토목구조물과는 달리 천정재, 마감재, 내부장식재(interior), 급배수설비, 공조설비, 위생설비, 전기설비, 냉난방설비등과 같은 각종 설비가 배치되어 있어 육안으로 직접 구조부재의 손상정도를 확인하기 어려운 것이 특징

이다. 그러나 구조 요소의 손상은 창틀, 조적벽체, 마감재 및 외부타일과 같은 비구조 요소의 균열, 박리, 파손 등을 동반하므로 건축구조물의 경우 비구조 요소의 손상평가에 의하여 구조부재의 건전성에 대한 경고나 파손징후를 간접적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 건축구조물의 특성을 토대로 본고에서는 국내외에서 철근콘크리트 건축구조물의 건전성 평가에 적용되고 있는 주요 비파괴시험법의 적용현황을 간략히 기술하고자 한다.

#### 2. 건축구조물의 공용년수

최근 콘크리트구조물의 공용년수에 대하여 여러가지 이론들이 제시되어 있으나 건축구조물의 경우, 설계, 시공 및 유지관리가 정상적이라고 할 때 평균 50년이라고 평가하는 것이 일반적이다. 이는 인간의 수명인 50년~100년에 필적하는 수치일 뿐만 아니라 우리나라에서 발생하는 자연재해(홍수, 태풍)의 발생주기와도 일치한다. 따라서 공학적인 개념에서 콘크리트 자체의 내구년한은 최소 50년~100년 이상이라고 추측되나 구조물의 용도, 기능, 주변환경 및 경제적 가치에 따라 최소

\* 정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원, 광복

한의 공용년수를 정의하는 것이 타당하다고 판단된다. 한편 표 1은 일본 건설성에서 제시한 감가상각 자산을 고려한 건축구조물의 평균 공용년수를 참고자료로 제시한 것이다.

표 1 감가상각 자산을 고려한 건축물의 공용년수(년)

사용 용도	RC구조	조적구조	강구조 t > 4mm	상구조 4 > t > 3mm
사무실	65	50	45	34
주택·학교	60	45	40	30
극장	50	45	35	28
호텔·병원	47	42	33	26
발전소	45	40	35	28
공장*	45	40	35	26
창고*	35	34	29	26

\* 유지관리상태 및 주변조건에 따라 변동가능함

### 3. 건축구조물의 건전성 평가

#### 3.1 건축구조물의 특수성

건축구조물은 토목구조물과는 달리 수많은 구조부재와 비구조 부재로 구성된다. 뿐만 아니라 동일 건축물 내에서도 사용용도에 따라서 작용하중 및 유지관리상태가 큰차이를 보이기 때문에 손상부의 국부적인 점검만으로는 전체 구조물의 건전성을 종합적으로 평가하기 어려운 경우가 많은 것이 특징이다. 또한 개인소유 건축물의 경우 재료열화 및 구조파손이 점진적으로 진행되고 있다 하더라도 소유자와 입주자의 경제적, 심리적 이해관계가 상반되어 정밀진단 및 건전성 증진을 위한 각종 보수공사의 실시가 지연되기도 한다.

특히 학교, 공장 및 공공건물의 경우는 사용기간중 관련법규가 완화 또는 수정되어 사용용도를 변경하거나 단계적으로 증축함으로써 구조물의 손상원인이 되기도 하며, 아파트와 빌라등의 주거용 건물 그리고 상가건물은 사용자가 임의로 내부구조를 개보수하여 구조물의 안전성 및 설비의 기능저하를 초래하기도 한다.

따라서 건축구조물의 건전성을 종합적으로 진단하기 위해서는 구조부재의 정적 동적하중 저항성 이외에도 처짐, 비틀림, 박리, 침하, 함몰, 누수

등과 같은 구조사용성, 설비의 기능성 및 주변환경의 영향이 동시에 평가되어야 한다.

#### 3.2 건축구조물의 건전성 평가체계

비파괴시험법을 이용한 건축구조물의 건전성 평가체계는 크게 예비조사, 현장조사, 구조해석 및 종합평가로 구분되며, 예비조사 및 현장조사 단계에서 점검하여야 할 주요 조사항목은 표 2와 같다.

표 2 건축구조물의 건전성 평가를 위한 주요조사항목

조사단계	주요내용	세부조사항목
예비조사	건물개요	건물명, 소재지, 주용도, 준공년월, 설계자, 시공자, 시공기간, 시공방법
	건물규모	구조형식, 기초형식, 면적, 층수(지상, 지하), 층고
	관련도서	설계도, 구조개산서, 지반자료, 준계측자료, 시공일지, 측량자료, 관련법규, 사진자료
	건물이력	용도변경, 중·개축유무, 보수유무, 사용상황, 내외장재의 설치상태, 화재등의 인재발생유무
	주변환경 조사경위	지형, 지반진동, 배수, 배기열, 화학적 침식 조사동기, 경위, 관계자 의견, 예산확보상황, 책임소재, 주요 손상부 및 손상정도
현장조사	사용상태	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용이력 : 각종 기기설치 상황, 손상부 및 노후정도, 하중이력, 누수상태</li> <li>• 직용하중 : 적재하중, 고정하중, 진동하중, 충격하중의 변동</li> <li>• 환 기 : 대기오염정도, 각종 부식환경의 접촉유무, 배기열, 배기가스</li> </ul>
	기초·지반	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기 초 : 형식과 형상의 적절성, 손상유무</li> <li>• 지 반 : 지층구조, 지반물성, 지지역, 장단기침하특성, 토압</li> <li>• 지 하 수 : 수위변동 특성, 수질, 절로유무</li> </ul>
	구성재료	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 콘크리트 : 현장강도, 중성화, 표면상태, 균열상황, 박리 및 파손정도, 염화물함유량, 화학성분</li> <li>• 강 재 : 부식정도, 녹, 용접부손상, 경도 조적재 : 재료강도, 손상정도</li> <li>• 타 감 재 : 변형정도, 부식강도, 박리유무</li> </ul>
	구조부재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단면특성 : 부재치수, 절단배근상태(주철근, 배력철근, 스티럽), 절단직경, 절근이음및 정착깊이, 피복두께, 어차부재의 파손</li> <li>• 변 형 : 처짐, 균열, 비틀림, 파손, 경사, 평탄강, 장기작동, 부동침하, 함몰</li> <li>• 하중능력 : 강성, 연성, 하중적합성</li> <li>• 진동특성 : 고유주기, 진동모드, 진폭</li> </ul>

## 4. 건축구조물에 대한 비파괴시험법의 적용 현황

### 4.1 적용대상 건축구조물

일반적으로 구조물의 life cycle은 설계, 시공, 공용,유지관리로 구분되며, 기존 구조물의 경우 life cycle의 전단계에서 발생한 손상요인이 잠재적으로 누적되어 전체 구조물의 안전성, 사용성 및 기능을 감소시키게 된다. 비파괴시험법은 기존 구조물의 손상을 최소화하면서 콘크리트 구조물의 구성재료와 구조부재에 발생한 손상정도를 평가하는 물리 화학적 및 역학적 계측기법으로 구조물의 손상원인 구명에 필요한 실측자료를 도출하기 위하여 적용한다. 비파괴시험법에 의한 건전성 평가대상 건축구조물은 크게 ① 부실시공된 구조, ② 노후구조, ③ 용도변경 및 증개축 구조, ④ 화재, 주변환경, 기상작용, 과재하중에 의한 손상구조, ⑤ 부속설비의 기능이 저하된 구조, ⑥ 보수보강후 성능평가가 요구되는 구조등으로 구분되며, 세부내용을 기술하면 다음과 같다.

(1) 콘크리트의 경화지연 또는 강도발현 저하가 발생하였거나 거푸집 및 지보재의 조기철거로 초기변형과 균열발생등 부실시공이 예상되는 신설 구조

(2) 동절기에 시공된 구조

(3) 준공후 장기간 경과하여 철근부식, 콘크리트의 중성화, 유리석회 노출 및 파손이 현저한 노후구조

(4) 용도변경 및 증개축을 실시하고자 하는 구조

(5) 화재가 발생하였거나 고온환경하에 있는 구조 또는 반복 진동하중 및 충격하중을 받는 구조

(6) 국부적으로 비구조 요소의 변형과 파손이 장기 진행되는 구조나 이상유이 심한 구조

(7) 주변에 대형공사가 진행되고 있거나 지반침하, 횡방향 활동등에 의한 구조손상이 현저한 구조

(8) 화학적 침식환경 또는 염해가 예상되거나 누수나 방수불량으로 사용성이 저하된 구조

(9) 보수 및 보강효과를 평가하고자 하는 구조

### 4.2 비파괴시험의 적용현황

#### 4.2.1 콘크리트의 물성평가

##### (1) 콘크리트의 강도 추정

콘크리트의 강도는 철근콘크리트 건축구조물의 건전성 평가시 가장 필수적인 평가항목으로 일반적으로 반발경도법과 초음파속도법이 적용되고 있다.

반발경도법은 슈미트 햄머의 측정자료에 타격각도, 재령, 구속효과에 대한 보정이 요구되며, 콘크리트의 함수율과 표면상태에 따라 강도편차가 크게 발생하는 단점이 있으나 사용하기가 편리한 방법이다. 현재 보통콘크리트용(측정범위 150~600 kg/cm<sup>2</sup>), 저강도콘크리트용(측정범위 50~150 kg/cm<sup>2</sup>), 경량콘크리트용(측정범위100~600 kg/cm<sup>2</sup>), 매스콘크리트용(측정범위 600~1,000kg/cm<sup>2</sup>) 슈미트 햄머가 시판되고 있다. 측정 전 반드시 콘크리트 표면건조 및 연마를 실시하여야 하며, 골재의 타격을 피하여야 한다.

초음파속도법은 반발경도법과는 달리 콘크리트 내부의 강도평가가 가능하지만 골재치수, 함수율, 보강철근의 유무(또는 직경)에 따라 측정값이 매우 민감하게 변화하므로 측정자의 경험과 기술, 경우에 따라서는 이들 영향인자에 대한 보정이 요구되는 방법이다. 초음파의 전달방법에 따라 직접 측정법과 간접측정법으로 구분되나 직접측정법이 신뢰도가 높으므로 슬래브를 제외한 기둥, 거더, 벽체구조는 직접측정법을 적용하는 것이 바람직하다. 최근 비파괴 강도의 신뢰성을 높이기 위해서 반발경도법과 초음파속도법을 동시에 사용하는 조합추정법이 실무에 적용되고 있다.

##### (2) 콘크리트의 중성화 깊이 추정

중성화는 화학적 반응에 의한 콘크리트의 점진적인 알칼리성 상실현상이므로 자체적으로는 콘크리트의 강도저하에 큰 영향을 미치지 않으나, 결합조직 약화에 따른 강성저하, 철근부식 및 균열등의 손상을 동반하므로 구조물의 내구성능을 감소시키는 주요 인자로 평가된다.

중성화 속도는 시멘트와 골재의 종류, 혼화제의 특성, 배합비, 환경조건, 표면상태등에 따라서 큰 차이가 있으나 보통환경하에서 초기 10년동안 약 1~2cm 진전하는 것이 일반적이다. 중성화 깊이

의 측정방법으로는 시차열분석법(화학적분별로 반응온도가 다르므로 온도변화에 따른 콘크리트의 중량변화로 부터  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  와  $\text{CaCO}_3$  의 양을 측정하는 방법), X선 회절시험법 및 1% 페놀프탈레인용액 도포법등이 있으나 이중 페놀프탈레인용액 도포법이 많이 적용되고 있다. 실험시 콘크리트시편의 기계적으로 절단된 면을 이용하는 것보다 자연적으로 파단된 면을 이용하는 바람직하다.

### (3) 콘크리트의 구성성분 및 배합추정

신설된 구조물의 경우, 콘크리트의 경화가 지연되거나 설계기준강도 이하의 강도발현이 발생할 때 원인구경을 위하여 적용되는 화학적 검사법이다. X선 회절시험(정성분석, 정량분석), 주사현미경(SEM), Porosimeter, 편광현미경등을 이용하여 콘크리트의 구성원소, 광물성분, 조직, 공극분포, 등가 염화물량( $\text{Cl}^-$ 량)등을 측정하여 콘크리트의 배합을 역추정하는데 이용한다. 굵은골재를 포함하여 콘크리트 시편을 유발분쇄하는 방법과 굵은골재를 제거한후 모르타르만의 성분을 분석하는 방법이 있으나 타설된 레미콘의 시방배합표가 있는 경우는 굵은골재를 제거한후, 모르타르만의 광물성분을 분석하는 것이 역추정된 배합의 신뢰도가 높은 것으로 평가되고 있다.

## 4.2.2 철근배근 및 부식상태 조사

### (1) 철근배근 및 피복두께 조사

건축구조물의 철근배근 및 피복두께 조사에는 전자파주사법(RC Radar)과 전자파유도법(Profometer)이 적용되고 있다. 측정장비에 따라 정밀도의 차이는 있으나 통상철근깊이 20cm 이하, 철근직경 6mm 이상에만 적용 가능한 것이 특징이다. RC Radar는 철근간격과 피복두께가 그래픽으로 출력되므로 사용이 편리하나 철근직경과 피복두께가 크거나 철근간격이 촘촘한 경우 측정결과와 해석이 어려우므로 철근배근상태와 피복두께의 확인목적 이외에 철근직경을 확인하고자 하는 경우는 작용응력이 낮은 부분에 대하여 육안으로 직접 확인하는 것이 바람직하다.

### (2) 철근부식 조사

철근의 부식조사법은 전기화학적 특성을 이용

한 전위차조사법(potential wheel)이 적용되고 있다. 본 방법은 철근주변부에 발생한 미세전압을 측정하여 부식상태를 추정하는 것으로 측정오차가 큰 것이 단점이다. 따라서 해수나 폐수와 접하고 있는 건물이나 노후가 심한 건축구조의 경우는 부식된 철근시편을 절단하여 현미경으로 직접 녹의 두께와 철근단면적의 결손정도를 실측하는 것이 효과적이다.

연구자료에 의하면 보통환경하에서 콘크리트의 중성화에 의한 RC부재의 철근부식율은 0.2~0.3 mm/yr 내외이며, 주철근의 단면적이 1.5% 부식하면 부재의 단면내력이 감소하기 시작하여 단면적의 4.5%가 부식할 경우 휨부재의 저항하중이 12% 감소하는 것으로 보고되고 있다.

한편 그림 1은 콘크리트의 pH와 강재부식율과의 상관관계를 도시한 것이다.

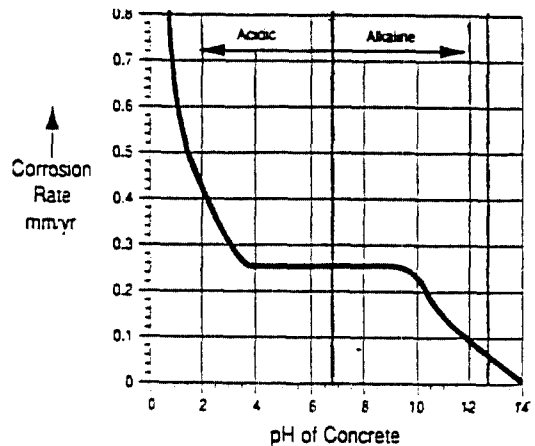


그림 1 콘크리트의 pH-강재부식율의 상관관계

### 4.2.3 콘크리트의 내부결함 및 균열깊이 조사

콘크리트의 내부결함 및 공동조사에는 충격탄성파법(Impact Echo), 균열깊이 조사에는 초음파속도법이 적용된다. 충격탄성파법은 부재표면에 충격하중을 가한 후, 반사파의 특성을 FFT analyzer를 이용하여 해석함으로써 내부결함을 추정하는 방법이며, 초음파속도법은 콘크리트의 내부균열의 깊이에 따라 초음파의 도달시간이 변화되는 원리를 이용하는 방법이다. 건축구조의 경우

기계기초와 같이 매시브한 구조체나 옹벽, 벽체와 같이 배면을 확인하기 어려운 구조체에 적용하고 있다.

콘크리트는 경화초기부터 내부에 수많은 미세 균열을 가지고 있는 재료이므로 사용하중(service load) 상태에서는 내구성이나 방수성에 문제가 발생하는 경우를 제외하고 구조체의 내하력을 크게 저하시키지 않는 범위내에서 균열발생이 인정되고 있는데 일반적으로 누수의 위험성이 있는 건축구조물의 경우는 0.06mm(0.04mm 이상에서 누수가 시작되며 0.2mm 이상에서는 100% 누수됨), 보통환경하에 있는 철근콘크리트구조의 경우 0.2mm, 매우 양호한 환경의 경우 0.3mm를 허용하고 있다.

#### 4.2.4 표면박리 및 누수조사

최근 개발된 적외선탐사법(thermal video)이 적용되고 있다. 본 방법은 대상구조물에 적외선을 투사시켜 구조물의 손상정도 및 재질에 따라 달라 나타나는 표면온도 분포를 정밀센서로 감지하고 이를 열화상으로 변환시켜 평가하는 방법이다. 건축물의 외장타일 박리, 콘크리트균열, 누수위치와 누수경로, 굴뚝의 온도분포, 건축설비의 열손실, 냉동창고의 단열상태, 배설관로의 파손상태, 동력회로의 안전성 조사 등에 적용되고 있다. 장비가 고가인 것이 단점이나 시설물의 표면상태 평가에 효과적인 방법이다.

#### 4.2.5 기타 비파괴시험법

철근콘크리트 건축구조물의 건전성 평가를 위하여 적용되고 있는 시험법으로는 유압 jack을 이용한 타일부착강도 측정법, 직경 1mm의 조사공을 천공한후 내시경에 의한 내부균열, 누수 및 결함평가법, 레벨을 이용한 슬래브의 평탄성 측정법, 광파측량기를 이용한 변형측정법, 보링에 의한 지반물성 측정법등이 실무에 적용되고 있다.

#### 4.2.6 R/C부재의 정적·동적거동및 내하력 평가

(1) 재하시험에 의한 실측 변형률 및 처짐의 평가

재하시험은 철근콘크리트 건축구조물의 실측거동 평가를 위하여 실시한다. 최대 휨응력과 전단응력의 발생위치에 변형률게이지 및 처짐측정기를 설치하고, 하중단계별 하중-변형률관계, 중립축의 변화 및 하중-처짐관계를 도출하여 실측거동과 이론거동을 비교하는 방법이다. 작용하중으로는 일반 건축물의 경우 적재가 용이한 물건(시멘트포, 물통, 블럭)등을 사용하는 것이 효과적이며, 지하주차장이나 창고구조는 설계하중을 고려하여 적절한 차량하중을 재하시킨다. 하중작용단계별 실측거동과 하중제거 후 잔류처짐을 반드시 측정하여 대상구조물의 건전성 및 노후도 평가에 반영하여야 한다. 한편 표 3은각국의 시방서에서 규정하고 있는 재하시험법 및 잔류처짐에 의한 구조 건전성 평가기준을 제시한 것이다.

#### (2) 진동특성의 평가

진동하중을 받는 공장건물, 학교 실험실동, 기계기초,외부진동에 의하여 손상이 진행되고 있는 건물구조 및 미소진동에 민감한 전자부품 제조실등의 건전성 평가를위해서 진동실험을 수행한다. 본 시험은 구조물에 작용하고 있는 진동원의 진폭과 주파수를 고려하여 측정센서를 선정하는 것이 중요하며, 실험으로 부터 건물 슬래브구조의 진동모드, 고유진동수, 진동주기, 대수감쇄율 등을 실측하고 이론값과 비교하여 동적거동 및 진동특성을평가하는데 목적이 있다.

### 5. 향후 전망

최근 대형 건설사고, 불량 레미콘 파동, 천연골재의 고갈, 설계기준의 변화등이 발생하면서 각종 고성능 콘크리트의 개발과 아울러 기존 구조물의 건전성 평가를 위한 체계적인 비파괴시험법의 정립이 절실히 요구되고 있다. 국내의 경우 구조물 유지관리분야의 기술은 아직까지 미흡한 수준이나, 선진국의 추세로 볼때 향후 시공분야와 대등한 규모로 성장할 것이 예상되고 있다. 건설시장 개방에 따른 건설분야의 국제화 및 선진화를 주도하기 위해서는 유지관리분야에 대한 보다 과감한 연구개발 및 투자가 실시되어야 할 것으로 판단된다.

표 3 각국의 시방서 규정

시방서 규정	재하시험방법	판정기준
ACI 318-77	0.85(1.4×고정하중+1.7×적재하중)에서 자중을 뺀 하중을 24시간 지속 재하시킨 후, 최대처짐 a를 측정한다. 측정 후 즉시 하중을 제거하고 24시간 경과 후 산류처짐 b를 측정한다(신설구조물의 경우 재령 56시간 이전에는 재하시험을 실시하지 않는다).	(a) $a \leq \ell_c^2 / (20,000 h)$ 인 경우 → 건전 (b) $a \geq \ell_c^2 / (20,000 h)$ 인 경우 • $b \leq 0.25 a$ (RC 구조), • $b \leq 0.20 a$ (PC 구조) → 건전 (c) PC 구조 이외의 구조가 (a),(b) 모두 만족하지 않을 경우, 재시험을 실시하여 재하시험에 의하여 명백한 파괴징후가 나타나지 않거나 $b \leq 0.80 a$ 인 경우 구조가 건전한 것으로 판단함.
RILEM No.53	재하하중은 시험목적에 따라 임의로 선정한다. 일반적으로 전설개하중의 1.4배에서 자중을 뺀 하중을 16시간 지속재하한 후, 최대처짐 a를 측정하고, 즉시 하중을 제거하여 16시간 이상경과 후 산류처짐 b를 측정한다.	(a) 콘크리트의 재령 56일 이상 경과 후, 최초의 재하시험에서 • $b \leq 0.25 a$ (RC 구조) • $b \leq 0.20 a$ (PC 구조) → 건전 (b) 기존구조물의 경우 • $b \leq 0.125 a$ (RC 구조) • $b \leq 0.100 a$ (PC 구조) → 건전 (c) 약재령에서는 재하시험을 실시하지 않음.
JASS 5-1958 A법	설계 적재하중(활하중)을 4시간 지속재하하여 최대처짐을 측정한다. 하중제거 후, 1시간 경과시 잔류처짐을 측정한다.	잔류처짐이 최대처짐의 15% 이내이면 구조가 건전한.
JASS 5-1958 B법	설계 적재하중(활하중)의 2배를 재하한 직후의 처짐을 측정된 후, 하중제거 직후의 잔류처짐을 측한다.	산류처짐이 최대처짐의 10% 이내이면 구조가 건전한.
건설부 건축설계기준	ACI 318-77과 동일	ACI 318-77과 동일

참 고 문 헌

1. 磯畑 脩 監修, "實務者のための建物診断,"丸善株式會社, 1990, pp.1~234.
2. 日本コンクリート工學協會, 콘크리트構造物의 壽命豫測と耐久性設計に關するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工學協會 耐久性設計研究委員會, 1988, pp.1~70.
3. 建築技術, 建物の劣化診断と補修 改修工法, 建築技術, Vol.4, 増刊, 1991, pp.20~155.
4. Malhotra, V.M. and Carino, N.J., "CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press," 1991, pp.1~316.

5. Emmons, P.H., "Concrete Repair and Maintenance Illustrated, Construction Publishers and Consultants," 1993, pp.1~114.
6. 대한건축학회, "건축물의 안전진단과 보수보강," 대한건축학회 세미나논문집, 1993, pp.6~267.
7. 쌍용양회 진단기술실, 구조물 안전진단 기술지침서, 쌍용양회(주), 1993, pp.1~65.
8. 白石 成人, "構造物のライフタイムリスクの評価," 日本土木學會, 構造工學シリーズ 2, 1988, p.1~288.
9. 小林 一輔, "コンクリート構造物の早期劣化と耐診断," 森北出版株式會社, 1991, pp.1~217. □