

# 지하철 RC구조물의 유지관리 및 '안전관리 시스템을 위한 시범구축

(Test Bed for Maintenance and Safety  
Management System of Subway RC Structures)



강 보 순

배재대학교, 건설환경철도공학과 교수

bskang@pcu.ac.kr

## 1. 서 론

최근 세계는 고유가시대, 에너지 자원부족 심화에 대비하기 위한 에너지 효율성이 높은 교통체계 구축 필요성 증대되고, 교토의정서에 대비하여 교통부문에서도 기후 및 환경을 고려하는 교통체계 구축 필요성 증대되어 선진국들은 먼저 시작 해온 온실가스 감축, 태양광 또는 풍력과 같은 신재생 에너지 등 저탄소 녹색성장을 확산해 본격적 수준으로 올리려는 새로운 국제적인 추세에 있으며 이러한 환경에서 우리정부도 저탄소 녹색성장의 우리나라의 교통시스템에서 철도비율을 점차 높이고 있으므로 철도 및 지하철의 보다 안전한 운행을 위하여 구조물의 안전관리 네트워크 시스템에 도입의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

본 논문은 사회기반 시설물중 가장 대표적인 운송수단

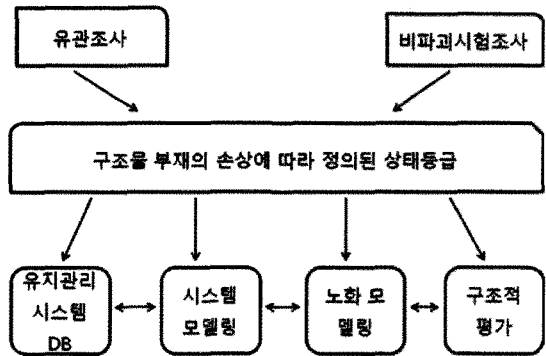
으로 대도시를 중심으로 건설이 지속적으로 이루어지고 이용률도 지속적으로 증가할 것으로 예상되는 지하철 RC 구조물의 안전관리 네트워크 시범구축의 예를 소개함으로써 향후 안전관리 계측시스템을 구축하는데 자료로 제시하고자 한다. 구조물의 사용성에서는 균열 상태와 처짐 변화 내지는 강성변화의 관찰이 아주 중요하다. 특히 철도교량, 슬래브궤도 및 침목과 같은 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트로 된 철도구조물은 공용기간에 계속되는 반복하중이 받게 되므로 사용조건에 대한 균열발전은 구조물의 강성을 감소시키고 처짐이 증가하는 현상을 가져오게 된다. 특히 이런 사용성의 문제를 간과하게 되면 급기야 콘크리트 구조물의 내구성 및 안정성에 심각한 문제가 될 수 있으므로 철도에서와 같은 반복되는 피로하중에 대한 지하철 철근 콘크리트 부재의 사용성 즉, 균열발전, 처짐 및 강성의 변화에 대하여 첨단 계측시스템을 통

한 실험적 연구결과를 보여주고자 한다.

## 2. 지하철 RC구조물의 유지관리시스템(비파괴 시험)

본 연구를 통하여 개발되는 부분은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째로 구조물 구성 부재를 대상으로 적합하고 의미 있는 손상의 개념을 정립하는 것이다. 구조물 각 부재의 단면손실 혹은 강도의 손실 등으로 정의된 부재의 손상은 쉽게 여러 방법으로 측정이 가능하다. 또한 구조물 각 부재와 구성재료의 노화와 연관된 여러 형태의 물리화학적 진행형태로 정의된 손상도 측정할 수 있다. 여기서 노화란, 예를 들면, 콘크리트 내 철근부식의 원인이 되는 염소이온의 콘크리트 내 확산 및 축적 혹은 강재에 있어서 피로저항의 소모 등으로도 설명할 수 있다. 보다 포괄적 개념에 있어서의 구조물 손상은 구조물 구성 부재가 그 사용목적에 있어서 완벽한 어떤 단계에서 하위의 개념으로 그 능력이 감소되는 현상이라고 정의할 수 있다. 지하철 RC 구조물에 있어서 다른 건설재료와 다른 구조물 구성부재 사이에는 서로 다른 그러나 명백한 손상의 정의가 요구된다.

두 번째로 각 구조물의 구성부재에 있어서 손상의 개념이 정의된 후에는 이를 관찰할 수 있는 물리적인 측정도구가 개발 혹은 정의 되어야 한다. 바로 이러한 물리적 측정수단은 비파괴 시험을 통하여 얻을 수 있으며 구조물 손상의 정의와 비파괴 시험이 측정하는 물리량 사이의 상관관계가 비파괴 시험을 통한 구조물의 손상을 측정 가능하게 한다. 이것은 곧 비파괴 시험자료의 해석이고 나아가 이러한 해석은 상태등급의 형태로 전환되어야 한다. 이러한 절차를 통하여 얻어진 상태등급은 그 외형이 단순하여 데이터 축적이 용이 할 뿐만 아니라 정량적 기초를 통하여 객관성 있게 얻어졌다는 점에서 그 사용성과 의미가 크다고 하겠다. 이러한 정량적 기초를 가진 상태등급이 유지관리 시스템에 활용 되어질 때 정량적인 노화 모델링이 가능해지고 이를 통한 부재의 노화속도 측정도 의미 있어질 것이



〈그림 1〉 지하철 RC구조물 진단과 유지관리시스템과의 관계

다. 또한 구조물의 각 구성부재의 상태에 관한 평가를 이용하여 구조물 전체의 건전도 평가도 가능할 것이다.

위 그림은 정량적인 상태등급의 결정 및 저장과 이를 이용한 노화모델링 등 새롭게 제안된 지하철RC 구조물의 진단방법과 유지관리시스템과의 관계를 도시한다. 여기서 상태등급은 여러 측정수단으로부터 결정되는 구조물 부재의 노화 및 손상과 명백히 연관된다. 특히 구조물의 손상 정도에 따라서 정의되는 상태등급은 이러한 손상을 측정할 수 있는 비파괴 시험들로부터 결정될 수 있다. 더욱 중요한 점은 구조물 부재의 노화나 손상을 측정할 수 있는 어떠한 시험방법들도 상태등급 결정에 활용할 수 있고 또 이렇게 결정된 정보를 지하철 RC 구조물의 유지관리 시스템에 전달할 수 있는 점이라 하겠다. 구조물 부재의 손상과 이를 측정할 수 있는 각각의 새로운 기술 혹은 시험방법을 연관시킴으로써 구조물의 진단과 관리에 합리적인 통합이 이루어질 수 있다.

### 2.1 콘크리트표면의 전기저항법

지하 콘크리트 구조물의 상태등급을 탐지 할 수 있는 계측장비 및 비파괴 시험장비 정의 및 개발에 중점을 두며 사용 가능한 모든 비파괴 장비들과 새롭게 정의된 상태등급과의 맵핑에 관한 연구가 진행되었다. 비파괴 시험장비들과 이들의 측정특성 그리고 새롭게 정의된 상태등급에 관한 카탈로그가 연구의 결과물로 제공되었다.

(표-1) 콘크리트표면의 전기저항법

비파괴시험	콘크리트표면의 전기저항
활용	콘크리트표면 보호막(실러, 멤브레인)의 유효성 측정
열화/노화	실러의 마모/열화 염소이온에 대한 보호막으로써 실러의 유효성 상실 정도
결과	염소이온의 콘크리트 내 확산, 철근부식
측정방법	콘크리트표면을 물에 적신 뒤 4분 후 1/8 in. 떨어진 콘크리트 표면의 전기저항 측정
해석/경계 값	Resistance > 200 k-ohm: Effective penetrating sealer Resistance < 200 k-ohm: Ineffective penetrating sealer
상태등급	보호단계: Resistance > 200 k-ohms 노출단계: Resistance < 200 k-ohms

표 1은 콘크리트표면에서의 전기저항측정에 관한 카탈로그를 보인다. 비파괴시험의 활용과 열화/노화 측정특성, 현재 활용되는 시험결과의 해석방법과 이를 이용한 상태등급의 탐지방법 등이 열거되어있다. 표 2에서와 같이 지하 콘크리트 구조물에 활용 될 수 있는 모든 비파괴 장비들에 관하여 완벽한 카탈로그가 과업의 결과물로 제공되었다.

(표-2) 콘크리트 구조물의 비파괴시험장비와 상태등급

상태 등급				
1	2	3	4	5
보호단계(Protected)	노출단계(Exposed)	취약단계(Vulnerable)	진행단계(Attacked)	파괴단계(Damaged)
콘크리트 투수성 측정장비: Surface water absorption & Surface air flow				
철근의 피복두께 측정장비: Magnetic Flux				
실러의 유효성 측정장비: Surface electrical resistance				
멤브레인의 유효성 측정장비: Ultrasonic pulse velocity				
	콘크리트 내 염소이온농도 측정장비: Specific ion probe, Acid titration			
		철근부식 측정장비: Half-cell potential, Linear polarization		
			콘크리트 건전도 측정장비: Ultrasonic velocity	
			콘크리트 박리, 탈락, 공극 측정장비: GP Radar, Infrared thermography, Sounding	

## 2.2 유지관리 전략

비파괴시험은 한 가지의 콘크리트의 물리·화학적 특성을 측정하고 이로 인하여 예측된 두 상태등급 중 한 가지 상태등급이 결정된다. 즉 여러 가지 비파괴시험들의 복수적인 활용으로 5개의 모든 상태등급의 진단이 가능하다. 건설된 지 얼마 안 되는 콘크리트 구조물에 대해서는 보호막의 유효성과 유해요소의 침투 등을 측정 할 수 있는

장비가 필요하고, 건설된 지 얼마간의 시간이 흐른 구조물에 대해서는 열화/노화 메커니즘의 진행을 알 수 있는 장비가 필요하며, 오랜 시간이 경과한 구조물에 대해서는 콘크리트의 균열, 탈락, 박리 등 피해 정도를 탐지 할 수 있는 장비가 필요하다. 표 8은 콘크리트 구조물에 활용 가능한 비파괴장비와 상태등급을 보인다. 상태등급은 보호막의 유효성, 유해요소의 침투여부, 열화과정의 진행, 그리고 콘크리트부재의 피해 등과 같은 콘크리트 구조물의 특성에 따라서 정의되기 때문에 각각의 비파괴 장비는 5개의 상태등급 스케일에서 그 위치가 정해질 수 있다.

한 가지의 비파괴장비는 한 가지의 노화 및 열화 과정에 있는 콘크리트 구조물에 있어서 두 가지의 상태등급만을 결정 할 수 있다. 콘크리트 구조물의 완벽한 진단을 위해서는 모든 열화 및 노화 과정에 해당하는 5개의 모든 상태등급 스케일에서 비파괴장비의 조화로운, 전략적인 활용이 필요하다. 이러한 결과물이 표 2에 도시되어 있으며 사용 가능한 모든 비파괴장비와 이와 연관된 열화 및 노화 과정에 관하여 그 활용전략이다.

## 3. 대상계측 시스템 개요

### 3.1 대상역사

대상역사는 교량 및 지하구조물 2곳으로 먼저 교량은 4호선 지상정차장으로 총길이 220m로 1988년 12월에 준공되어 현재까지 운용되고 있으며, 선로는 복선이며 상부구조는 라멘형식이며, 교각은  $\pi$ 형과 파일기초로 구성되어 있다. 현장조사결과 슬래브 상면의 균열이 심한(0.3mm)곳은 주입공법으로 보수·보강이 이루어진 상태이다. 다른



<그림 2> 설치된 계측기의 위치

(표-3) 계측기의 종류 및 수량

계측기의 종류	수량
균열계	5EA
온도계	2EA
변형률계	6EA
치짐계	1EA
우량계	1EA
계측관리 컨트롤 시스템	1EA

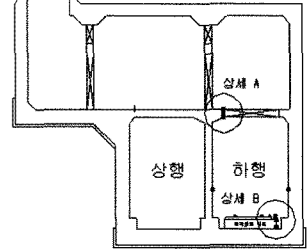
한곳은 4호선 지하정차장으로 Box 구조물로 환기구 및 콘크리트도상에 균열이 발생되었다.

### 3.2 계측위치 선정, 계측항목 및 계측결과

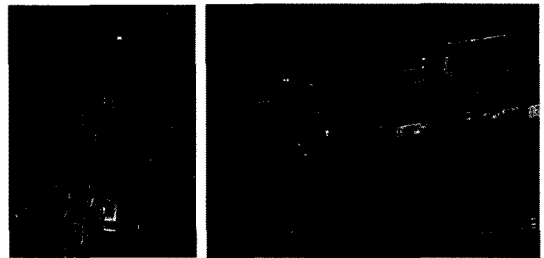
#### 3.2.1 4호선 지하정차장 교량

계측위치의 선정은 현장조사결과 중앙 지점의 균열발생이 심한 2곳과 균열주입공법으로 보수·보강(그림 2)이 이루어진 1곳 그리고 슬래브와 슬래브의 접합점 1곳 마지막으로 슬래브 측면 지역의 균열발생이 심한 곳을 선정하여 균열계를 설치하였으며 강성변화의 측정을 위한 콘크리트의 압축변형과 인장변형을 측정할 수 있는 변형률계 8곳, 교량의 전체거동 특성을 파악하기위해 처짐을 측정할 수 있는 처짐계 1곳을 선정하여 그림 2와 같이 나타내었다. 또한 온도가 구조물에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 온도계를 설치하였다. 표 3은 계측기의 종류와 수량을 나타내었다.

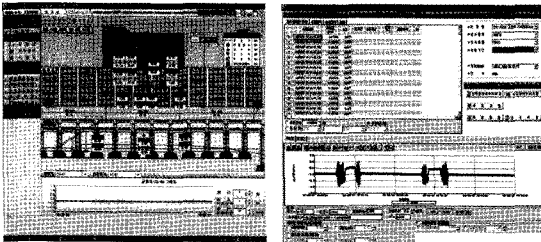
콘크리트도상 B구간	균열계	●	3
	변형률계	■	4
	가속도계	▲	1
	데이터 로거	○	1
환기구 A구간	균열계	●	4
	변형률계	■	4
	데이터 로거	○	1



〈그림 5〉 계측기의 위치, 종류 및 수량



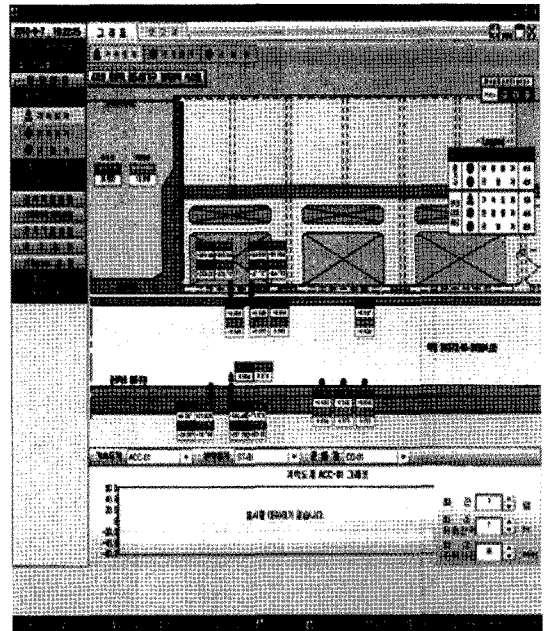
〈그림 6〉 설치된 계측기



〈그림 3〉 지하철교량 감시시스템 〈그림 4〉 지하철감시시스템의 균열측정결과

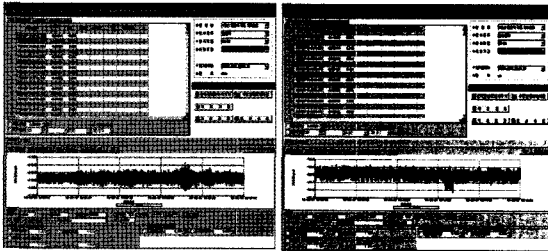
#### 3.2.2 4호선 지하정차장 Box 구조물 및 콘크리트 도상

계측기의 선정을 두고 가장 중요하게 고려한 점은 계측기의 내구성 및 정밀도 측정범위, 분해능, 노이즈의 영향 등으로 계측의 목적과 결과에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 요소이다. 따라서 재질이 석영으로 부식되지 않아 장기계측에 적합하며, 센서로서 기능을 수행하는데 측정값이 무선 송신기 등과 같은 전자적 잡음에 의하여 방해, 간섭을 받지 않아 안정성이 높으며 직경이 1mm 보다 작으므로 측정범위와 정도에 따라 광범위하게 센서가 사



〈그림 7〉 지하Box 및 콘크리트도상 감시시스템 성능개선 및 실용화

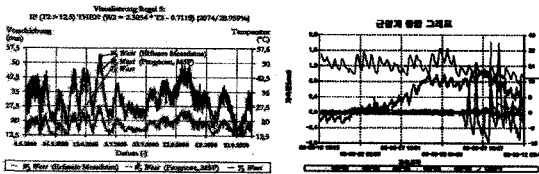
용될 수 있고 구조물 거동에 영향을 거의 미치지 않는 장점이 있는 광섬유 브래그 격자 센서(Fiber Bragg Grating Sensor)를 선정하였다.



(그림 8) 콘크리트 궤도의 변형률 (그림 9) 환풍기의 균열계 데이터 및 그래프

### 3.3 온도영향의 대한 보정

다음 그림 10은 독일의 한 교량 실시간-변위-온도 계측 그래프이고 그림 11은 지하철 지상역 교량의 실시간-균열-온도의 계측그래프이다. 온도와 구조물의 상관관계를 보여주는 그래프로서 온도의 변화에 따라 실제 계측되어지는 변위값 역시 온도와 유사하게 변화함을 보여주고 있다. 따라서 현재 계측되어지는 대상역사도 온도가 균열 폭 및 변위들에 미치는 영향이 크므로 온도계를 설치함으로써 온도영향에 따른 보정이 수행되어야만 한다.



(그림 10) 독일교량의 시간-변위 (그림 11) 지상역 교량의 실시간-온도 계측그래프

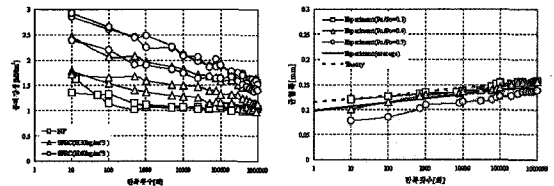
### 3.4 계측 데이터의 처리

시설물 안전관리 네트워크의 가장 큰 장점인 시설물의 상태 및 주변의 상황이 유지관리담당자를 거치지 않고 신속하게 취합되어 결정권자에게 보고됨으로써 즉각적인 대응과 조치가 가능하게 하는 것이기 때문에 국가주요시설물인 수리시설물, 철도시설물, 도로시설물등과 마찬가지로 실시간 원격계측시스템으로 구축하여 수집된 데이터를 자동계측 프로그램에 의한 분류, 분석 하여 안전관리 기준을 적용하게 되며 위험시 SMS, E-mail 등을 통하여 사용자에게 신속한 정보가 가능하도록 구성되었다.

## 4. 계측항목의 활용

### 4.1 균열 발전 및 강성변화

그림 12(b)에서는 반복되는 다양한 사용하중하에서 균열이론식과 균열실험경험식을 실험결과와 함께 종합적으로 비교할 수 있도록 한 그래프에 나타내었다. 점선은 위에서 언급한 철근과 콘크리트의 부착특성을 고려하여 유도된 균열발전의 이론치이고 표시가 있는 3가지 다른 선들은 다양한 진폭을 갖고 있는 사용하중에 대한 실험결과들이며 실선은 이 실험결과들의 평균치이다. 계산치는 실험치보다 위에 있으므로 안전한 측면에서 사용될 수 있는 이론식이다. 따라서 위의 식을 바탕으로 실제 계측이 이루어지는 구조물의 균열발전을 볼 수 있을 것이다. 다만, 위의 식은 변수가 적은 실험실에서 나온 결과들이지만 실제 계측이 이루어지는 역사는 다양한 외부요인이 존재함으로 인해서 결과 값이 달라질 수 있을 것이다.



(그림 12) 반복횟수에 대한 강성 변화 및 균열발전의 이론 및 실험치 비교

다음 식 1 은 사용피로하중 하에 대한 균열이론식을 도출하였으며 식 2 는 사용피로하중 하에 대한 균열 실험경험식이다.

$$w(N) = 2 \left[ \Delta f_{sr} \frac{f_{sr}}{E_c} \frac{d_c}{8} \frac{1+b}{f_{ck} A(N)} \right]^{\frac{1}{1+b}} \quad (식 1)$$

$$w(N) = w(0) + k \log N \quad (식 2)$$

$w(N)$  : 사용피로하중회수 N에 대한 평균 균열폭

$w(0)$  : 첫 하중 재하 시 균열폭

$f_{ck}$  : 콘크리트 설계기준강도,  $f_{sr}$  : 균열발생단면의 철근응력

$d_c$  : 철근직경,  $E_c$ ,  $E_s$  : 콘크리트 및 철근의 탄성계수

$n$  : 탄성계수비,  $k$  : 실험상수(0.00767)

$a=0.31$ ;  $b=0.30$  : 일반적으로 사용하중에서 사용되는 부착상수

### 4.3 강성에 따른 구조물의 잔존수명예측

콘크리트 구조물의 내구성 및 안정성에서 강성의 감소는 심각한 문제가 될 수 있다. 구조물의 균열발생전과 균열발생 후를 비교하였을 때 균열후의 강성은 현저하게 감소하게 된다. 따라서 강성의 정의는 균열전과 균열후로 나누어질 수 있다. 식 3과 4는 일반적인 균열발생전과 균열발생후의 강성으로서 모멘트-곡률을 통한 휨 강성의 변화를 비교분석함으로써 구조물의 건전도 및 안정성을 평가할 수 있으며 마지막으로 잔존수명을 예측하고자 한다.

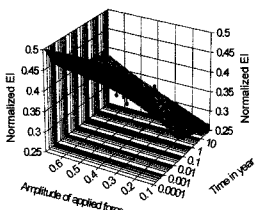
$$\text{균열발생전: } EI_{eff} = \frac{M_{cr}}{\kappa_{cr}} \quad (\text{식 3})$$

$$\text{균열발생후: } EI_{eff} = \frac{1}{\kappa} \left[ \frac{M_y - M_{cr}}{\kappa_y - \kappa_{cr}} (\kappa - \kappa_{cr}) + M_{cr} \right] \quad (\text{식 4})$$

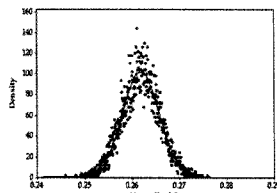
$EI_{eff}$  : 유효강성,  $\kappa_{cr}$  : 균열 발생시의 곡률  
 $M_{cr}$  : 균열 발생시의 Moment,  $\kappa$  : 곡률  
 $\kappa_y$  : 철근 항복시의 곡률,  $M_y$  : 철근 항복시의 Moment

그림 13은 시간에 따른 휨강성 변화에 대한 그래프로서 X축은 힘의 진폭으로 설계최소하중과 설계최대하중의 비 ( $P_{min}/P_{max} = 0.1; 0.4; 0.7$ )이며 Y축은 Normalized EI로 시공 직 후 최대 0.5로 시작하게 되며 Z축은 시간의 축으로 잔존수명을 예측한다.

100년 후의 진폭의 크기에 따라 진폭이 0.7은 Normalized EI값이 0.4로 진폭이 0.4는 Normalized EI값이 0.325로 진폭이 0.1은 Normalized EI값이 0.26으로 떨어지게 된다. 이는 0.1의 진폭은 52%의 건전도를 0.4의 진폭은 66%의 건전도를 0.7의 진폭은 80%의 건전도를 보이는 것으로 건전도와 잔존수명을 예측할 수 있다.



<그림 13> 시간에 따른 휨강성 변화



<그림 14> 지하철 콘크리트 구조물에 대한 휨강성의 몬테칼로 모의시험

### 4.4. 내구연한 100년 후 지하철 콘크리트 구조물에 대한 휨강성의 신뢰성해석 모의시험

그림 14는 연한 100년 후 콘크리트 구조물에 대한 휨강성의 몬테칼로 모의시험에 관한 그래프이다.

규격화한 휨강성(EI)은 시공 직 후로부터 최대치= 0.5로 설정하고 100년 후 피로하중의 진폭의 크기(최소하중  $P_{min}$  /최대하중  $P_{max} = 0.7$ )인 경우 규격화한 휨강성(EI)이 0.262를 감소되어 잔존수명이 실험치와 거의 일치하므로 신뢰성을 갖고 있음을 알 수 있다. 따라서 신뢰성 해석을 통한 비교분석을 통해 내구연한에 대한 안전관리지표를 검증하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 운용중인 지상역 및 지하철역 RC 구조물에 대하여 유지관리 및 안전관리 네트워크 시스템 구축 방법의 적용 예를 소개하였다. 유지관리경우 구조물의 손상 정도에 따라서 정의되는 상태등급은 이러한 손상을 측정할 수 있는 비파괴 시험들로부터 결정될 수 있다. 더욱 중요한 점은 구조물 부재의 노화나 손상을 측정할 수 있는 어떠한 시험방법들도 상태등급 결정에 활용할 수 있고 또 이렇게 결정된 정보를 지하철 RC 구조물의 유지관리시스템에 전달할 수 있으므로 구조물 부재의 손상과 이를 측정할 수 있는 각각의 새로운 기술 혹은 시험방법을 연관시킴으로써 구조물의 진단과 관리에 합리적인 통합이 이루어질 수 있게 하였다. 안전관리에서는 지하철에서 주로 발생할 수 있는 반복횟수가 높은 피로하중 하에 RC 구조물의 균열 및 강성특성을 이용하여 안전관리 네트워크 시스템을 구축하기 위해 이론 및 실험을 통해 먼저 검증된 균열식을 이용하여 실험경험식과 비교분석하여 피로하중에 대한 균열의 발전을 계측에 안전관리 기준으로 활용할 수 있도록 하였으며, 동적 강성을 이용 구조물의 건전도와 잔존수명을 예측함으로써 지하철 구조물의 안전관리 네트워크 시스템에 도입할 수 있도록 하였다. 향후 지하철 콘

크리트궤도에 대한 추가적인 시범구축이 완성되어 지하철 RC구조물에 대한 지상 및 지하시범구축이 완료되면 합리적이고 체계적인 지하철에 대한 유지관리 및 안전관리 네트워크 시스템의 구축이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(06건설

### 감사의 글

핵심(B05)에 의해 수행되었습니다.

1. 건설교통부, 한국건설기술연구원 (2002), "지하철 구조물의 재

### 참고문헌

1. 료, 설계, 시공 통합시스템 구축에 관한 연구".
2. 이정석, 김용수, 안상로 (2007), "센서기반 국가 주요 기반시설물 안전관리 네트워크 구축", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집 pp.171-174.
3. 김기수, 김훈, 안상로 (2008), "안전관리네트워크용 광섬유센

서의 토목분야 응용사례", 대한토목학회지 제56권 제6호 통권 제338호 pp.25-30.

4. 강보순 (2005), "사용피로하중에 대한 철근콘크리트 구조물의 균열특성", 한국철도학회 논문집 제8권 제6호 pp.495-499.
5. J. Wang: Intrinsic Damping : Modeling Techniques for Engineering Systems, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 135 No. 4-6, 2009
6. Kang, B.S. : Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärkter Stahlbeton unter Schwellbeanspruchung. Dissertataion, Ruhr-Universität Bochum, 1998.
7. M. M. Rafi and A. Nadjai: Evaluation of ACI 440 Deflection Model for Fiber-Reinforced Polymer Concrete Beams and Suggested Modification, ACI Materials Journal, Vol 106 4-6, 2009