

토목, 건축 구조물의 모니터링 시스템 개발 및 적용 현황

임 홍 철

(연세대학교 건축공학과)

1. 구조물 모니터링 시스템의 필요성

토목, 건축 구조물은 설계 또는 시공상 오류에 의한 결함이나 외부환경 등으로 인하여 시간이 경과함에 따라 그 성능을 상실하거나, 인명과 재산을 위협하는 붕괴사고를 일으킬 수 있다. 구조물의 사용성을 유지하고 증대시키기 위해서는, 올바른 설계 및 시공과 함께 시공 후 구조물의 적절한 유지 관리를 위한 모니터링 시스템(monitoring system)이 요구된다. 구조물의 안전성 확보 및 사용성 증대에 관한 기술의 개발은, 전세계적으로 노후 구조물의 수가 증가하는 현실에서 시급히 해결되어야 할 과제로 부각되고 있다. 특히, 국내에서는 신 행주대교 공사 중 주탑 및 상판 붕괴, 성수대교 상판 붕괴, 삼풍백화점 건물 붕괴 등으로 사고 예방적 차원에서의 효율적인 모니터링 시스템 개발이 필요한 실정이다.⁽¹⁻³⁾

구조물 모니터링 시스템은 구조물의 변위, 변형, 진동, 하중, 균열 등 그 상태를 측정하고 얻은 데이터를 처리하는 것을 운용의 기본 내용으로 하고있다. 이는 특정 시간과 위치에서 구조물의 상태를 파악하는 비파괴검사와 실시간 측정이라는 점에서 대비된다. 초음파법이나 전자파법도 주기적으로 검사를 실시할 경우, 구조물의 상태 파악(condition assessment)에 효과적일 수 있으나,^(4,5) 보다 장기적이고 상시 유지 관리를 위해서는 모니터링 시스템이 유용하다.⁽⁶⁻⁸⁾

모니터링 시스템에서의 데이터 획득은 전기저항식 센서인 변형 계측기(strain gauge)와 변위계 등과 같은 정적 센서, 그리고, 가속도 센서와 지

진계 등과 같은 동적 센서로 이루어지며, 광섬유를 이용한 계측이 최근 들어 토목, 건축 구조물에 시도되고 있다.^(9,10) 구조물의 종류에 따라 전기저항식 센서를 이용하여 측정할 수 있는 계측 데이터는 표 1과 같다.⁽³⁾

모니터링 시스템이 적용될 수 있는 측정분야는 토목 구조물의 경우, 교량 주부재의 응력, 변형, 접합부의 균열, 처짐과 차량하중, 풍하중에 의한 진동 등이고, 건축 구조물의 경우 건물 주부재의 응력, 변형, 콘크리트 보의 균열 혹은 철골접합부의 균열 등 건물에 구조적인 영향을 미치는 것과 진동, 처짐, 온도 등 사용성에 관한 것으로 구분된다.

모니터링 시스템을 이용하여 상시계측을 하는 목적은 구조물의 이상 거동을 감지하고 미리 적절한 유지 관리를 함으로써, 구조물의 공용수명을 연장시키고 사회 및 경제적으로 큰 영향을 미치는 구조물의 파손 또는 붕괴를 미연에 방지하는

표 1 전기저항식 센서의 구조물별 계측 데이터 항목

구분	항 목
교량	지진하중, 풍하중, 차량하중, 응력, 처짐, 지점 변위, 굴절각, 수직진동, 수평진동, 교각진동, 경사, 왜곡, 침하
건물	지진하중, 풍하중, 적재하중, 응력, 처짐, 수평변위, 수직변위, 수평진동, 수직진동, 화재감시
터널	지보공 축력, 휨모멘트, 전단력, 락볼트 축력, 지하수위 지반변위, 내공변위, 천단침하, 수평진동, 수직진동
흙 구조물	지반침하, 측방유동, 지하수위, 간극수압 침하, 변형, 허빙, 보일링, 주변구조물 경사, 진동

데 있다. 이 글에서는 먼저 장기 계측을 위한 모니터링 시스템의 구성에 대하여 알아보고, 전기저항식 센서, 광섬유 센서, 그리고 Global Positioning System (GPS)의 3가지 모니터링 시스템을 살펴본다.

2. 모니터링 시스템의 구축 및 구성

2.1 모니터링 시스템의 구축

구조물의 상태, 결함, 손상 등을 파악하기 위해 모니터링 시스템은 센서를 통해 객관적이고 연속적인 데이터를 자동적으로 얻을 수 있으며, 이를 위해서는 크게 센서, 신호처리 장비 및 기술, 그리고, 정보처리 기술의 구축이 필요하다.^(11, 12)

센서는 구조물의 상태를 직접 측정하는 역할을 하는 것으로 센서의 종류 선택 및 설치 위치에 따른 오류는 모니터링 전반에 걸쳐 영향을 준다. 사용할 센서의 성능, 개수 및 위치에 대한 검토와 측정값의 종류에 대한 계획이 필요하며, 장기간의 모니터링을 위하여 센서의 내구성을 고려해야 한다. 센서의 종류를 크게 3가지로 분류 할 수 있는데, 전기저항식 센서와 최근에 주목받고 있는 광섬유 센서가 있으며, 위성을 이용한 Global Positioning System(GPS)로부터도 데이터를 획득할 수 있다.⁽¹³⁻¹⁵⁾

신호처리 장비 및 기술은 센서에 의해 측정된 현재 상태 판단의 근거가 되는 신호의 특성값을 얻어내는 데 있으며, 특성값 검출을 위한 알고리즘 개발과 신호오류(noise)의 처리가 요구된다. 정보처리 기술은 신호처리의 결과를 토대로 구조

물의 상태를 판단하는 것으로 구조물 자체, 거동 및 진단에 대한 정보 등 전문가적 지식이 필요하며, 이를 컴퓨터화 하기 위해서는 Artificial Intelligence(AI)기법을 사용한 지식모형의 구축이 필요하다.

2.2 모니터링 시스템의 구성

모니터링 시스템의 구성은 크게 하드웨어인 감시기기와 소프트웨어인 데이터처리로 나눌 수 있다. 하드웨어는 구조물의 계측을 위한 센서부, 데이터 전송부, 데이터 기록부로 구성되며, 소프트웨어는 구조물을 유지 관리하기 위해서 구성된 정보 및 전산 시스템으로 데이터 처리, 분석, 관리 기능을 수행한다. 그림 1은 모니터링 시스템의 구성을 나타낸 것이다.⁽³⁾

3. 전기저항식 센서를 이용한 구조물 모니터링 시스템

3.1 전기저항식 센서의 종류 및 기능

전기저항식 센서는 크게 정적, 동적 센서로 구분될 수 있으며, 교량의 모니터링을 위해 사용되는 전기저항식 센서의 종류와 측정할 수 있는 요소는 표 2와 같다.⁽⁸⁾

3.2 남해대교 장기 계측 측정 사례

남해대교는 각 부위에 설치된 센서를 통해 교량의 상시감시 및 이상 징후의 조기발견을 하기 위한 효과적인 감시체계를 구축하여 안전상에 문제가 있거나 이후 문제를 유발할 소지가 있는 교

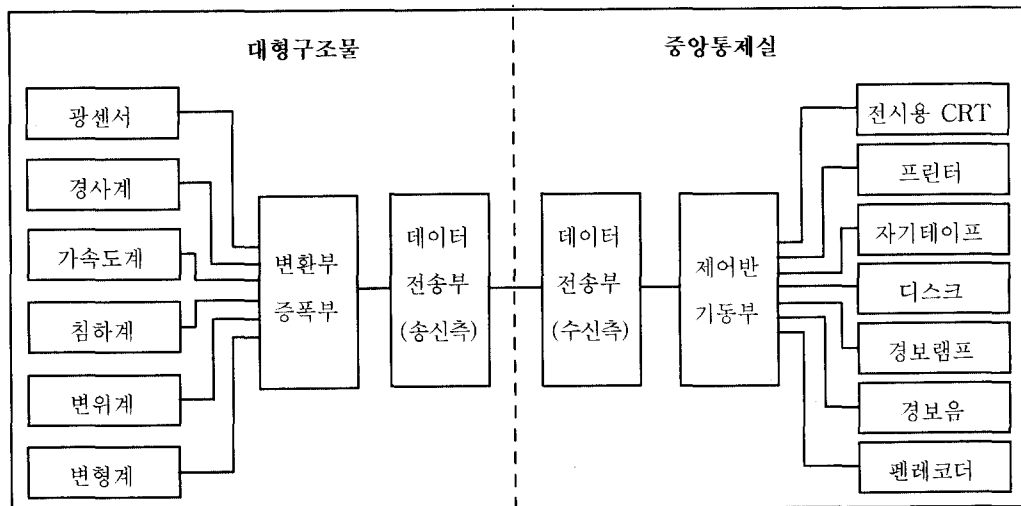


그림 1 모니터링 시스템의 구성도

표 2 전기저항식 센서의 종류 및 측정요소

구분	종 류	측정요소
정 적 센 서	변형 계측기 (strain gauge)	구조물의 변형률
	처짐계	처짐량
	균열 변위계	균열폭
	지점 변위계	지점 변위량
	경사계	교각경사
	침하계	교각침하
동 적 센 서	지진계	지반, 기초 가속도
	가속도계	진동특성, 교통하중
	동적 변형 계측기 (dynamic strain gauge)	동적 변형률
	속도센서	진동속도
	풍향풍속계	풍향, 풍속

량 부위에 대해서 보수, 보강 대책을 수립할 수 있는 효과적이며 경제적인 교량의 유지 관리를 하고자 구축되었다.

모니터링 시스템은 교량의 국부적인 상태 변화와 전체적인 거동특성을 파악하기 위하여 정적 및 동적 센서를 적절히 혼용하여 설치하였다. 정적 센서는 주기적인 안전진단 및 정보 수집에 활용할 수 있도록 주탑 및 상판의 정적인 변형과 주부재의 응력을 측정하여 교량의 전체적인 안전성을 파악한다. 동적 센서는 차량하중 및 풍하중에 의한 상시진동과 지진하중 및 기타 특이한 진동으로 인한 교량의 동적거동을 파악하여 교량의 동적인 특성, 내하력 및 안전성을 검토하는 할 수 있다. 센서의 수량과 설치위치의 선정은 교량의

표 3 계측항목 및 센서 설치 위치

계측항목	설치위치
주탑기초의 경사각측정	주탑기초 상단부 : 2개의 이축 경사계
주탑의 경사각측정	주탑기둥 : 8개의 이축 경사계
주탑하단부의 주케이블 앵커부 및 주형 내부의 정적 변형률 측정	주탑하부 : 16개의 정적 변형률계 케이블 앵커부 : 16개의 정적 변형률계 중앙 단면 주형내부 : 10개의 변형률계
주형 및 주탑의 가속도 측정	주탑의 상부 및 주형내부 : 8개의 가속도계

구조적 특성, 안전진단 결과와 계측결과의 활용목적에 따라 선정되었으며, 계측항목과 센서의 설치 위치는 표 3에 요약되어 있다.⁽⁸⁾

4. 광섬유 센서를 이용한 구조물 모니터링 시스템

광섬유 센서는 지난 15년 동안 항공분야 등에서 전문적으로 응용되기 시작했고, 최근에 토목, 건축 분야에 그 적용이 시도되고 있다. 광섬유 센서는 균열, 변형, 온도, 진동 등 여러 가지 변수를 측정할 수 있으며, 에너지 손실이 거의 없기 때문에 측정 범위가 수 백 km까지 길어질 수 있고, 전자파의 장애가 없으며, 외부환경에 노출되어도 부식에 강하다. 이러한 장점 외에도 광섬유 센서가 변형 계측기(strain gauge)에 비해 갖는 장점이 표 4에 정리되어 있다.⁽¹⁶⁾

광섬유 센서의 종류는 크게 3종류로 빛의 세기 변화를 이용하는 센서, 빛의 파장변화를 이용하는 센서 및 빛의 간섭원리를 이용하는 센서로 분류할 수 있다.

표 4 변형 계측기와 광섬유 센서의 비교

	변형 계측기 (strain gauge)	광섬유 센서
전자파 영향	전자파에 의한 노이즈 발생	전자파 장애 없음
크기	센서를 콘크리트에 매설시 균열 발생	지름 125 μm 정도의 광섬유 사용함으로 균열 발생 없음
내구성	내구성 결여 및 리드선 납땜 처리 문제	내구성 견고
경제성	여러 개의 센서 매설 필요	한 개의 라인으로 여러 개의 센서 역할을 할 수 있어 경제적
수명	외부환경에 의존적이고, 잠음이 발생할 우려가 높고, 수명이 짧다	외부충격과 외기에 노출시 부식에 강하며 수명이 길다(25년 이상)
원거리 신호 전달	리드선에서의 전자파 장애로 원거리 신호 전달이 곤란하여 많은 수의 sub-system이 필요	원거리 신호전달이 용이하여 sub-system의 개수를 줄일 수 있음

4.1 빛의 세기 변화를 이용하는 센서 시스템(Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)

빛의 세기 변화를 이용하는 센서 시스템은 빛의 양을 측정하며, 이것은 외부환경의 변화와 관련이 있고, 센서는 많은 양의 빛을 필요로 하므로 코어가 큰 다중모드 광섬유를 사용한다. 원래는 광섬유의 후방산란에 의한 감쇠원리를 사용하여 광섬유 케이블의 선로손실 이상유무를 파악하는 Optical Time Domain Reflectometry(OTDR)로 측정할 수 있다.⁽¹⁷⁾

균열을 센싱하는 부분에서 균열이 발생하게 되면, 균열 부위의 광섬유가 늘어나거나 파괴된다. 이러한 변화는 광섬유의 출력부분으로 전달되는 빛의 양이 줄어드는 것으로 감지된다.

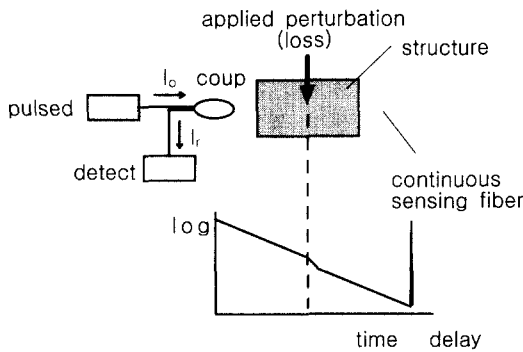


그림 2 빛의 세기 변화를 이용하는 센서 시스템의 개요도

4.2 빛의 파장 변화를 이용하는 센서 시스템(Fiber Bragg Grating Sensor, FBG Sensor)

빛의 파장 변화를 이용하는 센서 시스템은 광

섬유 코어에 자외선을 주사하면 주기적인 굴절률 변화를 갖는 브래그 격자(Bragg grating)를 이용한다. 이 브래그 격자는 광대역의 파장으로부터 온 특정 파장의 빛을 반사하며, 외부로부터의 변형률의 작용에 따라 격자사이의 거리가 변하게 되면 반사하는 파장을 바꿔게 한다. 이와 같은 원리를 이용하여 센서를 만들 수 있다. 이를 Fiber Bragg Grating(FBG) sensor라 한다. FBG sensor는 변형률 뿐만 아니라 온도도 측정할 수 있으며, 하나의 광섬유 안에 반사되는 파장을 달리하는 FBG sensor를 여러 개 만들 수 있다.

FBG sensor를 이용한 콘크리트 구조물의 변형과 벽체 온도 측정,^(9, 18-20) 그리고, 실제 교량의 적용이 시도되고 있다.⁽⁷⁾

4.3 빛의 간섭 원리를 이용하는 센서(Fabry-Perot, Michelson, Mach-Zehnder Interferometric Sensor)

빛의 간섭 원리를 이용하는 센서로는 구성방식에 따라 패브리-페롯(Fabry-Perot) 간섭형 센서, 마이켈슨(Michelson) 센서, 마하-젠더(Mach-Zehnder) 센서 등이 있다. 단일광원에서 입사된 레이저 광은 광섬유 연계기(coupler)를 통해 서로 다른 광섬유를 전파하게 된다. 외부로부터의 변형률의 작용에 따라 광경로 상에 변화를 겪은 광과 그렇지 않은 광이 다시 광섬유 연계기(coupler)를 통해 하나의 광섬유에서 만날 때 서로 다른 위상차로 인해 보강간섭과 상쇄간섭을 통하여 간섭파형을 만든다. 이러한 위상차로 변형률을 측정할 수 있으며, 위상차를 이용한 센서이므로 감도가 뛰어나다.

간섭 원리를 이용한 센서로는 콘크리트의 변형

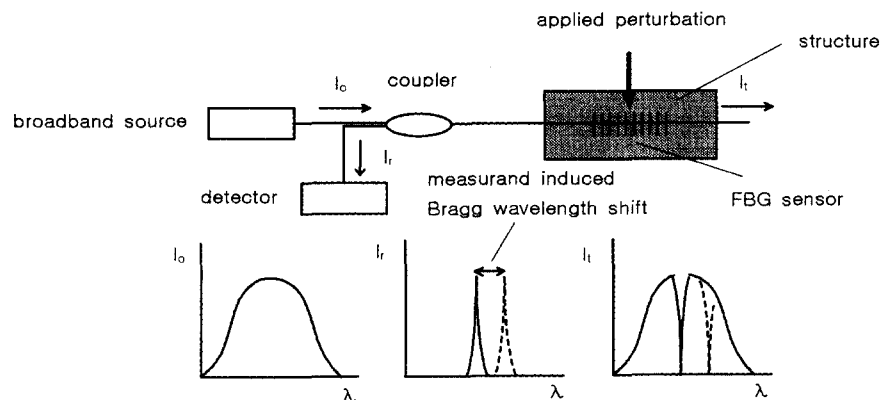


그림 3 빛의 파장 변화를 이용하는 센서 시스템의 개요도

측정,^(10, 14, 21) 그리고 콘크리트의 양생 과정 모니터링에 시도되었고,^(22, 23) 실제 구조물에 적용되기도 하였다.⁽¹⁶⁾

5. Global Positioning System (GPS)를 이용한 구조물 모니터링 시스템

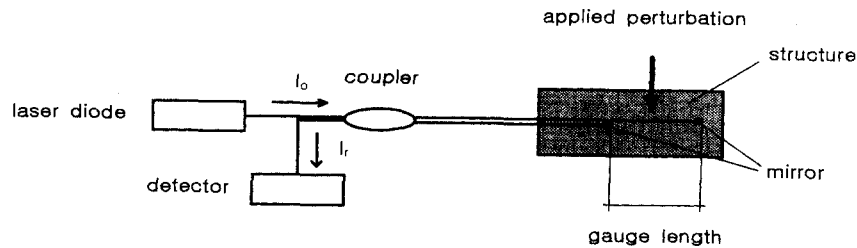
GPS는 고도 20,000 km 상공에 있는 위성군을 이용하여 지역에 상관없이 3차원 위치 및 시각을 결정하는 시스템으로 수신기까지 전파도달 시간으로 3차원 위치, 속도, 시각을 측정할 수 있으며, 무제한 수의 사용자가 이용이 가능하다. GPS 수신기는 위성으로부터 수신 받은 신호를 처리하여 수신기의 위치와 속도, 시간을 계산하는데 4개 이상 위성의 동시관측을 필요로 한다. 이것은 3차원 좌표와 시간의 4개의 미지수를 결정해야 하기 때문이다. 우주부분, 관제부분, 사용자부분의 3가지

영역으로 구성되어 있으며, 그 기본원리는 삼각측량의 원리를 사용한다.

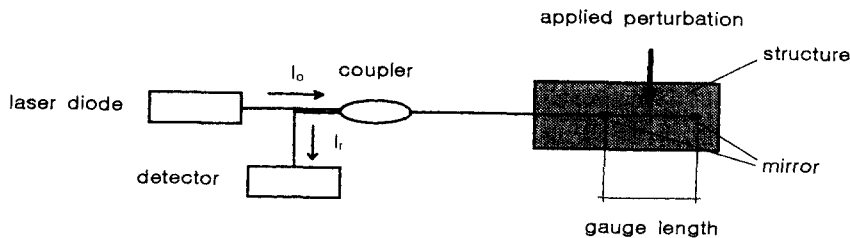
GPS 위치측정의 정확성을 떨어뜨리는 원인으로는 크게 3가지로 첫째, 구조적 요인으로 생기는 오차로 이것은 인공위성 시간오차, 전리층과 대류층의 굴절, 잡음, 다중경로 등이 있다. 두 번째로는 위성의 배치상황에 따른 기하학적 오차가 있으며, 마지막으로 가장 큰 오차원인인 Selective Availability(SA)가 있다.

그러나, Differential Global Positioning System (DGPS)를 이용하면 움직이는 물체에 있어서는 수 m, 정지한 물체에 있어서는 1m이내의 위치측정이 가능하다. DGPS는 현장에서 정확한 위치를 구할 수 있기 때문에 도로보수공사, 지하매설물 보수공사 등의 분야에 응용이 된다.

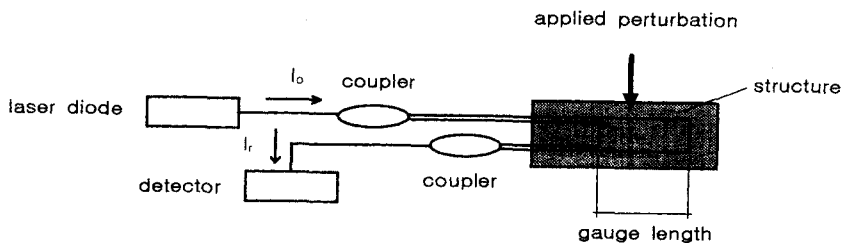
현수교나 고층건물 같은 구조물은 풍향이나 풍속 그리고 과대한 교통하중에 의하여 수 미터까지 거동하므로, DGPS를 현수교나 고층건물의 거



(a) 패브리-페롯 간섭형 센서



(b) 마이켈슨 센서



(c) 마하-젠더 센서

그림 4 빛의 간섭원리를 이용하는 센서 시스템의 종류

동에 적용시키는 것은 가능하다.^(15, 24) 구조적으로 중요한 의미를 지니는 지점에 대해 DGPS를 적용하면 구조물의 거동에 근접한 모니터링이 가능하며, 이와 같은 실시간 모니터링은 구조물 거동에 의한 위험경보와 구조물의 설계 등에 활용을 할 수 있다.

6. 맺 음 말

구조물 모니터링 시스템의 구성과 센서의 종류를 살펴보았다. 모니터링 시스템은 자체의 유지관리 또한 중요하므로, 센서는 단순하고 신뢰성 및 안정성이 높아야 하며, 센서의 설치 비용과 초기 설치비용의 경제성을 고려해야 한다.

구조물의 결함 및 손상을 발견하기 위한 모니터링 시스템의 설치, 사회기반시설의 효율적인 유지관리와 첨단 기술 개발을 통한 국내 산업발전에 기여할 수 있을 것이며, 이를 위해서는 효율적인 센서의 개발, 노이즈를 제거하는 신호처리 기법과 계측 데이터의 정보처리 개발이 필요하다.

감사의 글

이 글의 일부 내용 작성에 한국과학재단에서 설립한 지진공학연구센터의 연구비 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rhim, H. C., 1998, "Evaluation of Structural Integrity and Performance Using Nondestructive Testing and Monitoring Techniques," Proceedings of the 1st International Symposium on New Development in the Earthquake Hazard Mitigation Technology for Moderate Seismicity Regions, Korea Earthquake Engineering Research Center, Sponsored by Korea Science and Engineering Foundation, Seoul National University, pp. 134~143.
- (2) Chong, K. P., Scalzi, J. B. and Dillon, O. W., 1990, "Overview of Nondestructive Evaluation Projects and Initiative at NSF," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, pp. 422~431.
- (3) (주) 미래공간 홈페이지, 2000. 12. "www.mee.co.kr."

- (4) Rhim, H. C., 1995, "Radar Imaging of a Cylindrical Concrete Specimen for Nondestructive Testing," Experimental Techniques, Society for Experimental Mechanics, Vol. 19, No. 1, pp. 21~22.
- (5) Rhim, H. C., Buyukozturk, O. and Blejer, D. J., 1995, "Remote Radar Imaging of Concrete Slabs with and without a Rebar," Materials Evaluation, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 52, No. 2, pp. 195~299.
- (6) 임홍철, 2000, "콘크리트 구조물 상시 진단을 위한 광섬유 센서의 적용," 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 영남대학교.
- (7) Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R. M., Tadros, G., Rizkalla, S. H. and Guha-Thakurta, A., 1997, "Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring," Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 1, pp. 21~33.
- (8) 정혜교, 서주원, 박진우, 김도균, 2000, "콘크리트 구조물의 공사계측 기술현황," 콘크리트학회지, Vol. 12, No. 4, pp. 49~56.
- (9) Ansari, F., 1997, "State-of-the-art in the Applications of Fiber-optic Sensors to Cementitious Composites," Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 1, pp. 3~19.
- (10) 김기수, 1995, "구조물 유지관리를 위한 간섭형 광섬유 센서," 콘크리트학회 학술발표회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp. 355~359.
- (11) 김성곤, 2000, "Automated Remote Monitoring of Cable-supported Bridges," The 1st Workshop on Structural Health Monitoring and Assessment, Korea Earthquake Engineering Research Center, Sponsored by Korea Science and Engineering Foundation, Yonsei University, No. 18, p. 215.
- (12) 조효남, 임종권, 민대홍, 박경훈, 1998, "대형교량의 유지관리를 위한 전산화 모니터링 및 분석평가 시스템," 한국강구조학회 논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 369~374.
- (13) 김성곤, 1996, "구조물 손상발견을 위한 신호처리 기법," 대한토목학회 논문집, Vol. 16, No. 1, pp. 81~92.
- (14) de Vries, M., Arya, V., Meller, S., Masri, S. F. and Claus, R. O., 1997, "Implementation

of EFPI-based Optical-fiber Sensor Instrumentation for the NDE of Concrete Structures," Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 1, pp. 69~79.

(15) 박운용, 광두호, 정성모, 이홍규, 1996. "교량의 실시간 거동 모니터링을 위한 GPS의 적용," 동아대학교 대학원논문집, No. 24, pp. 287~299.

(16) 김기수, 이호준, 김종우, 2000. "광섬유 센서를 이용한 유지 관리 모니터링 기술," 콘크리트학회지, Vol. 12, No. 3, pp. 16~24.

(17) 임홍철, 이경근, 2000. "광학적 시간영역 반사시스템을 이용한 모르타르 보의 균열 탐사," 한국구조물진단학회 논문집, Vol. 4, No. 3, pp. 185~195.

(18) Rao, Y. J., 1999. "Recent Progress in Applications of In-Fibre Bragg Grating Sensors," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 297~324.

(19) Davis, M. A., Bellemore, D. G. and Kersey, A. D., 1997. "Distributed Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Structural Components," Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 1, pp. 45~57.

(20) Hirayama, N. and Sano, Y., 2000. "Fiber Bragg Grating Temperature Sensor for Practical Use," ISA Transactions, Vol. 39, No. 2, pp. 169~173.

(21) 권일범, 허용학, 박휘립, 김동진, 이동춘, 홍성혁, 문한규, 1999. "광섬유 마이켈슨 센서에 의한 RC보의 변형률 측정 및 파손의 검출," 한국구조물진단학회 논문집, Vol. 3, No. 3, pp. 223~236.

(22) Glii, B. and Simon, N., 2000. "Monitoring of Concrete at Very Early Age Using Stiff SOFO Sensor," Cement and Concrete Composites, Vol. 22, No. 2, pp. 115~119.

(23) Habel, W. R., Hofmann, D. and Hillemeier, B., 1997. "Deformation Measurements of Mortars at Early Ages and of Large Concrete Components on Site by Means of Embedded Fiber-optic Microstrain Sensors," Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 1, pp. 81~102.

(24) Lovse, J. W., Teskey, W. F., Lachapelle, G. and Cannon, M. E., 1995. "Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology," International Journal of Surveying Engineering-American Society of Civil Engineers, 121(1), pp. 35~40.