

교량구조물의 상시계측 시스템

박 홍 석

(한국건설기술연구원 토목연구부)

1. 머리말

교량은 고대로부터 발전해온 구조물의 설계, 시공 및 안전에 관한 과학기술을 함축적으로 적용한 대표적 토목구조물이다. 그러나 인류의 경험과 이론의 지속적인 발전에도 불구하고 교량구조물의 실제거동을 예측하고 안전성을 평가하는 것은 아직까지 그리 쉽지는 않다. 왜냐하면 설계, 시공 및 공용조건에 이르기까지 각 과정에 여러 가지 불확실한 요소가 산재해 있기 때문이다.

교량의 설계시 사용되는 하중과 재료 및 구조거동에 대한 가정은 실제교량과 항상 부합되는 것이 아니며, 시공시에도 기후와 온도 및 재료의 변화 등 수많은 불확실성을 내재하고 있다. 또한, 공용기간 동안 끊임없이 가해지는 외부조건 변화와 이에 따른 교량 자체의 내부적 변화로 인해 기능 및 성능이 점진적으로 저하되거나 갑작스런 붕괴로 이어지는 등 구조적 안전성이 위협받고 있다. 이러한 위험들을 사전에 예방하기 위해서는 시공 중인 교량뿐만 아니라 공용 중인 교량에 대하여 현재의 성능과 상태를 정확히 파악하고, 미래의 상태를 예측하여 필요에 따라 적절한 보수·보강시기를 결정할 수 있는 효과적인 조사가 필수적이다.

그러나 교량구조물은 그 규모가 방대하며, 기존 인력에 의한 점검체계에서 요구되는 훈련된 전문가의 일관된 확보가 어렵고, 인력에 의한 점검에서 위험요소가 누락될 수 있는 가능성이 있으며, 점검자의 경험과 지식수준에 따라 판단기준이 달라질 수 있다. 이러한 이유로 최근 교량의 손상검출이나 상태변화 감지시스템의 도입이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 현장계측과 실험실 분석으로 교량의 특성변화를 분석하는 초기의 계측방법은 교량의 이상상태 발생시기와 특성변화 결과분석간의 시간차가 있기 때문에 교량의 심각한 이상이 있는 경

우 즉각적인 대처에 어려운 점이 있었다. 따라서 이를 해결하기 위해 자동적이고 지속적인 교량의 상태변화를 감지할 수 있는 계측시스템이 요구되었다. 교량의 계측은 크게 시공중 필요한 부위에 센서를 설치하여 이로부터 다양한 정보를 제공받아 시공성 및 안전성을 확보하기 위한 데이터로 활용하는 시공중계측과 전체 구조계를 형성하는 부재 단위의 유지관리와 전체 구조계의 거동을 관리하고자 하는 유지관리계측으로 나눌 수 있다. 여기서는 교량의 유지관리를 위한 상시계측시스템에 관해서만 언급하기로 한다. 교량의 상시계측시스템은 크게 다음과 같이 3가지 목적으로 실시된다.

(1) 유지관리 정보 제공

상시계측시스템으로부터 제공되는 각종 자료들은 교량 내하력평가의 중요 자료로 사용된다. 이러한 자료들은 안전진단을 실시하여도 얻기가 쉽지 않은 것들로서 교량의 사용성 및 안전성 평가에 매우 귀중한 정보가 된다.

(2) 통행 안전성 확보

교량에 과다하중이 작용하거나 이상변형이 발생되었을 때 또는 바람 등의 영향으로 지장을 초래할 때 등 통행의 안전성이 저하되는 사태가 발생되었을 때 경보시스템 등의 발동으로 차량 및 보행자의 안전한 통행을 확보하고자 한다.

(3) 특수교량 설계 및 해석기술 개발을 위한 정보 제공

차량이나 지진, 바람 등의 하중에 의한 교량거동을 측정·수록함으로써 특수교량 해석 및 설계에 귀중한 정보를 제공함과 동시에 설계시방서 및 제 기준 제정에 중요한 자료를 축적한다.

현재 우리나라는 교통량의 급속한 증가와 사회 발전에 따른 산업물량 및 여객의 원활한 수송을 위해 교량의 건설이 증가하고 있으며, 세계적으로도 이러한 필요에 의해 연육교와 같은 장대교량의 건설이 크게 증가하고 있다. 이에 따라 새로운 건

설계료 및 공법의 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 교량이 장대화되면서 사장교 및 현수교와 같이 장지간에 적절한 구조의 특수교량에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다. 국내에도 사장교인 서해대교, 자정식 현수교인 영종대교 및 타정식 현수교인 광안대교 등이 건설중이거나 완공되었으며, 특수교량에 대한 건설추세는 더욱 확대될 것으로 예상된다. 이러한 특수교량에 대한 유지관리는 그 중요성과 구조계의 차이로 인해 일반교량과 구분되며, 계측관련 기술의 발전과 연구로 인해 근래에 이르러 일부 장대교나 특수교량에 상시계측시스템을 설치하여 운용하고 있다.

구조물의 상시계측시스템에 관련된 연구는 크게 실험적연구와 해석적연구로 구분될 수 있다. 실험적연구는 실험실 내에서의 모형실험이나 실교량을 이용한 실험연구로 구분되며, 해석적 연구는 신호분석이나 패턴인식, 시스템인식기법, 전문가시스템, 그리고 인공지능망을 이용한 접근방법 등으로 구분될 수 있다.

2. 국내의 개발 동향

2.1 실험적 연구

(1) 상시계측 시스템 구성 및 주요 계측사항

상시계측 시스템은 크게 3부분으로 구성된다. 첫째는 지진계, 가속도계, 풍향풍속계, 변위계 등과 같은 측정센서로 교량구조물에 직접 부착된다. 두 번째는 교량의 인접 현장사무실에 설치되는 data acquisition and control system으로 센서로부터 오는 각종 자료의 입력 및 처리를 담당하게 되며 신호증폭기, 신호변환기, PC, 모뎀, 관련 소프트웨어 등으로 구성된다. 마지막으로 현장사무실에 설치된 시스템을 원격제어할 수 있으며 얻어진 자료들을 모뎀 및 디스켓, 테이프 등을 통하여 정리·보관하는 시스템으로 각 교량의 관할기관에 설치되며 PC, 모뎀, 관련 소프트웨어 등으로 구성된다(그림 1).

특수교량을 중심으로 상시계측 시스템에서 계측할 사항들은 교량의 거동 및 내구성과 안전성에 큰 영향을 미치는 인자들로서 지진, 바람, 구조물의 가속도, 처짐 등이 있다.

(가) 지진

한반도는 비교적 지진에 안전한 지대로 알려져 있으나, 지진활동이 전혀 없는 지역은 아니다. 설계 당시의 기록에 의하면 남해대교는 설계시 지진을 고려하지 않았으나 50 gal(0.05 g)에 대한 안전

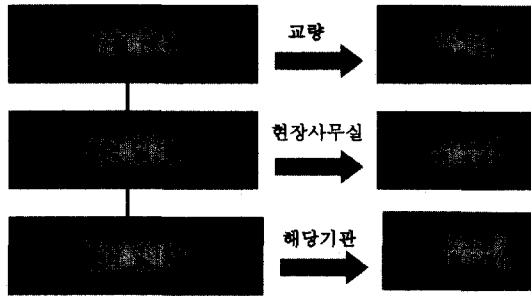


그림 1. 상시계측 시스템의 구성도

검토가 이루어져 있으며, 돌산대교는 98 gal (0.1 g)에 대해 설계시 고려되어 있고, 진도대교는 지진에 대한 검토가 없었다. 비록 한반도에 지진활동이 미약하기는 하나 상당 규모의 지진이 발생한 경우가 있고(홍성지진, 진도 5.0), 도로교설계기준에 내진설계가 의무화되어 있으며, 일단 지진 발생시에 피해가 큰 점을 감안하여 3개의 교량에 모두 지진계를 설치하여 계측하고 있다.

(나) 바람

사장교, 현수교 등 특수교량은 지간이 길고 케이블로 지지된 유연한 시스템으로 바람에 의한 영향이 중요하다. 특히 우리나라는 태풍의 영향이 직접적으로 받는 지역이므로 고도의 내풍안정성이 요구되고 있으며 통행안전상으로도 바람의 계측은 매우 중요하다. 각 교량의 설계조건을 검토해 보면 남해대교는 기본풍속이 25 m/sec이며, 진도와 돌산대교는 10 m 높이 평균시간풍속 53 m/sec로 설계되어 있다.

(다) 가속도

구조물의 가속도는 구조물의 동적특성을 파악하는 가장 기본적인 핵심적인 계측항목으로 고유진동수, 모드형상, 감쇠비 등을 산정하는데 사용된다. 특히 구조물의 손상이 바로 동적특성의 변화에 반영되기 때문에 가능한 여러 주요 부위의 가속도를 계측하여 분석하는 것이 건전성 평가에 중요 자료로 사용될 것으로 판단된다. 이러한 가속도는 가속도계(accelerometer)를 부착하여 측정되며 주탑과 측경간, 중앙경간의 보강형 등에 설치된다. 그림 2는 대표적인 교량의 가속도 시간이력과 power spectrum을 나타낸 것이다.

(라) 처짐

처짐은 구조물의 거동을 파악하는 가장 직접적인 항목으로서 과다하중 작용시 그 영향을 바로 알 수 있다. 측정은 중앙경간의 중앙점에 대해 실시하는 것이 일반적이는데 해상에 가설된 남해대교, 진도대교, 돌산대교, 서해대교, 영종대교의 경우에

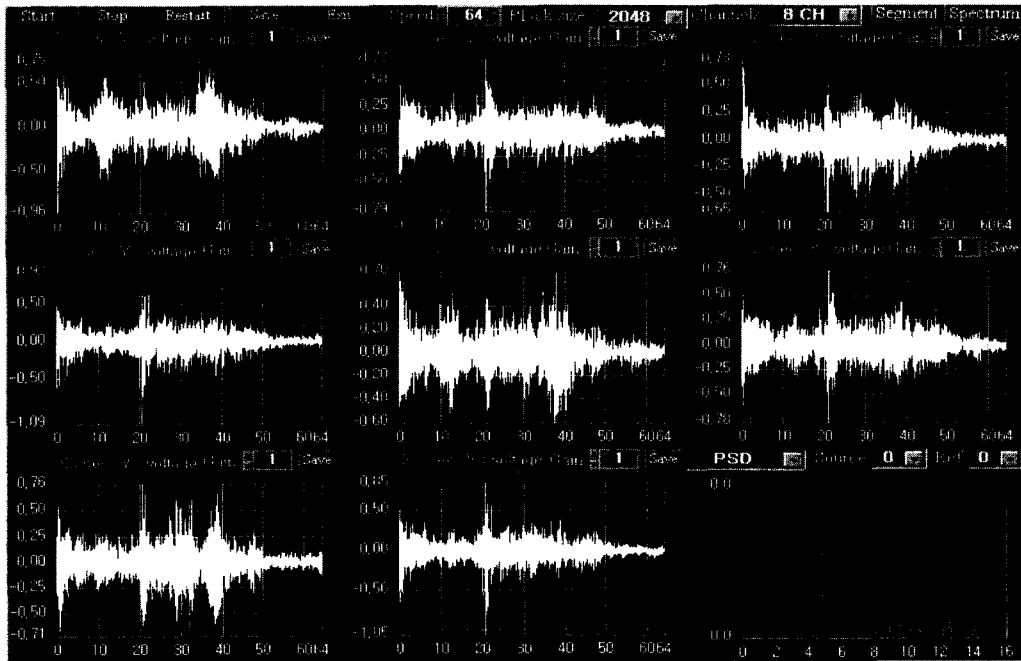


그림 4 가속도의 시간이력과 power spectrum

중앙경간 밑에 고정된 기준점을 설치하는 것이 불가능하기 때문에 광학이나 레이저 등을 이용하여 처짐을 측정한다.

(2) 국내의 상시계측 시스템 운영현황

국내에서 이용되고 있는 교량의 계측 및 모니터링 시스템은 주로 장대교량의 완공 후 유지관리를 위해 적용되어 왔고, 일반 중소교량에 대해서는 근접지 공사시 또는 기존 노후교량의 안전관리를 위해 적용되어 왔다. 특히 성수대교 붕괴사고 이후 시설물의 안전관리에 관한 특별법이 제정되는 등 유지관리에 대한 관심이 고조되어 건설교통부에서는 특수교량(사장교, 현수교)에 계측 시스템을 구축·운용하여 유지관리에 만전을 기하도록 하였다. 이것을 계기로 국내에서는 시공중이거나 공용중에 있는 장대교량에 계측 시스템이 본격적으로 도입되기 시작하였다. 여기서는 이들 계측 시스템에 대한 개요를 소개한다.

진도대교는 3경간 연속 강상형 사장교 형식으로서 장·단기 및 정·동적 거동을 파악하여 교량의 공용기간 동안 노후손상 과정을 모니터링할 수 있는 장기계측 시스템(현대건설, 1996)을 구축, 운영하고 있다. 진도대교에서 구축된 장기계측 시스템은 66개의 정·동적 센서와 3대의 동적 시스템 및 1대의 정적 시스템으로 구성(표 1)되어 있으며, 데이터수집 및 경보체계를 구성하고 있어 계측값이 관리기준값을 초과하는 경우 경보를 발하도록 구

성되어 있다.

남해대교의 경우에는 교량에 설치되어 있는 자동계측 시스템(현대건설, 1997)에 연결하여 계측기기를 제어하고, 센서로부터 데이터를 수집·변환 및 분석하여 교량 구조물의 손상유무 및 현재상태를 파악하고, 비상시 경보를 발할 수 있는 모니터링 프로그램의 개발을 목표로 하였다(그림 3). 이 프로그램은 기설치된 계측기기의 제어 및 시그널 전송을 담당하는 통신모듈, 신호수집과 변환을 담당하는 신호처리모듈, 그리고 마지막으로 시그널을 분석하고 교량의 현상태를 파악하는 지식기반모듈로 구성되어 있다(표 2).

한편, 돌산대교의 경우 대상 교량에 작용하는 하중에 의한 거동을 상시·실시간으로 측정하고, 동시에 측정데이터를 계측 시스템에 설치된 해석프로그램에 입력·분석함으로써 교량의 현재상태와 앞으로의 예상거동을 신속하게 판단하여 교량의 구조적인 안전성을 확보하기 위한 계측 시스템(대림산업, 1997)이 구축되어 있다(표 3). 또한, 3차원 컴퓨터 그래픽을 포함한 데이터베이스 프로그램을 구축하여 교량의 이력(일상점검, 정밀점검 및 유지보수이력)을 전산화하여, 점검 주기에 따라 점검할 내용을 컴퓨터가 자동적으로 관리해줌으로써 사용자가 효율적으로 교량을 관리할 수 있도록 하였다.

그 외 교량에 설치된 계측 시스템으로는, 세그멘탈교량(FCM 구간)에 대한 시공 및 유지관리 계

표 1 진도대교의 계측항목 및 용도

장비명	수량	모델	설치위치	용도
정적변형률계	32	VK-4100	주탑, 보강형	정적변형률 측정
동적변형률계	6	AWC-8B	보강형	동적변형률 측정
경사계	4	MODEL 6203	교각, 보강형	주형 및 교각의 2방향 경사도 측정
풍향풍속계	2	MODEL 05103	주탑상부, 보강형 상부에서	풍향·풍속 측정
3축가속도계	2	PCB-D56 A27	교대, 교각	지진발생시 교량에 작용하는 3방향 지진가속도 측정
1축가속도계	20	PCB-393 A03 PCB-393 M52	케이블, 주탑, 보강형	통과차량, 바람 및 지진에 의한 진동가속도 측정
정적계측 시스템	1	Micro-10	주탑하부 주형 및 중앙부	교량의 주요 부위에 설치된 계측기를 컴퓨터와 연결하여 실시간으로 계측기로부터의 자료를 저장, 처리 및 분석함으로써 유지관리시 교량의 안전성을 평가하는데 중요자료 제공
동적계측 시스템	3	HP-E1301 A75000 Series B VXI System		

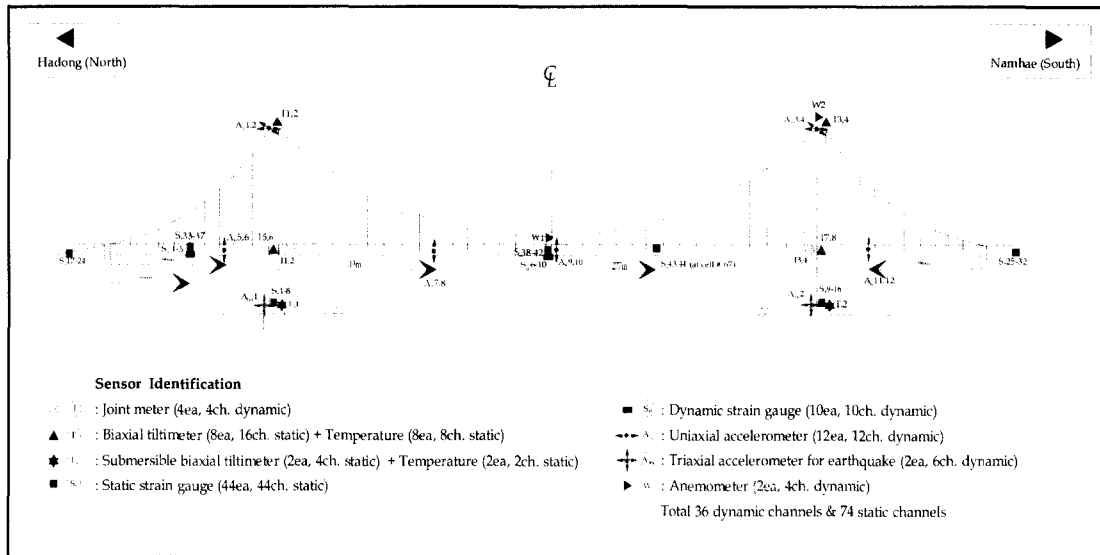


그림 6 남해대교의 장기계측 시스템

표 2 남해대교의 계측항목 및 용도

장비명	수량	모델	설치위치	용도
지진계	2	FBA-23	교각	지진발생시 3방향 지진가속도 측정
가속도계	12	FBA-11	바닥판 및 주탑	통과차량, 바람에 의한 진동가속도 측정
풍향풍속계	2	MODEL 27005	주탑상부 및 바닥판 중앙부	풍향 및 풍속 측정
경사계	10	711-1	주탑의 상하부	주탑의 경사도 측정
정적변형률계	44	SM-5A	주탑하부, 앵커블럭 및 박스거더 내부	정적변형률 측정
동적변형률계	10	AWC-8B	박스거더 내부	동적변형률 측정
조인트미터	2	P-16B	신축이음부	신축이음부의 거동 측정

측 시스템을 구축하여 구조물의 거동과 손상을 자동적, 연속적, 장기적으로 모니터링 함으로써 정밀

한 시공관리를 시행하고자 한 서울 외곽도로 건설 공사구간 중의 김포대교와 안양고가교를 들 수 있

표 3 돌산대교의 계측항목 및 용도

장비명	수량	모델	설치위치	용도
풍향풍속계	2	Wind Observer Windmaster	서쪽 주탑 상부, 상관 중앙	풍향·풍속 측정
3축가속도계	2	SEIKA SB1/SB2	주탑기초, 교대부근	지진가속도 측정
1축가속도계	19	Kistler, SEIKA SB2	교량상판($\pm 2g$), 주탑상부($\pm 1g$), 케이블(SB2)	진동가속도 측정
치짐계	3	PSM-R	상관 중앙경간의 1/4, 1/2, 3/4 지점	레이저를 이용한 변위측정
경사계	4	HLPLANAR NS 5/PI	주탑의 상하부	주탑의 경사변화 측정
변형률계	12	P200	27번 셀과 57번 셀	강재의 응력변화 측정
온도계	2	GCA-100S	서쪽 주탑하부	대기온도 측정

으며, 그 외 신행주대교, 강변도시고속도로 PSC교량, 한남대교, 양화대교 및 정암교에 시공중 안전관리를 목적으로 계측 시스템이 도입된 바 있다.

특히 최근에는 국내에서도 장대특수교량 건설의 활성화에 따라 영종대교, 광안대교, 서해대교, 봉안교, 강화대교, 고산육교, 상진대교, 신거제대교 등에 시공중 정도관리 또는 완공후 유지관리를 위한 계측 시스템이 도입 혹은 도입예정에 있다.

2.2 해석적 연구

(1) 신호처리

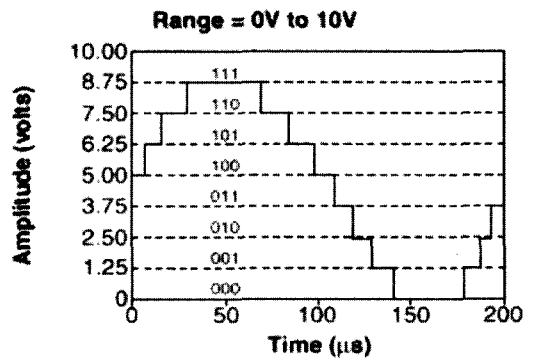
센서로부터 전달되는 아날로그형 신호는 일단 증폭, 필터링, 그리고 디지털로 변환되어 원격중앙처리장치로 전송되거나 현장의 데이터 저장장치에 저장된다. 그러나 이 디지털 데이터는 단지 전기신호로서 우리가 필요한 공학적 의미를 갖는 데이터로 변환이 필요하게 된다. 이러한 일련의 과정을 신호처리(signal processing)라고 하며 다시 수집(acquisition)과 추출(generation)로 대별된다. 앞에서 언급한 세 가지 과정 즉, 증폭에서 디지털로 변환이 수집에 해당되며 이는 주로 데이터 수집장치의 기능과 성능에 좌우된다. 그러나 구조물의 형태, 측정값의 종류, 모니터링의 목적에 따라 증폭률(gain value), 수집빈도(sampling rate), 기간(duration)이 달라져야 하며, 하드웨어의 고유 노이즈(white noise), 환경 노이즈(ambient noise) 등을 감안한 필터링 알고리즘의 선택이 고려되어야 한다.

교량진동에서와 같이 저주파의 진동신호를 해석하는데 있어 필연적으로 발생하는 고주파 및 노이즈를 제거하고 원하는 신호만을 가지고 해석을 하려면 필터링 및 많은 신호처리기술이 필요하고 또한 주파수 영역상에서 적분을 하기 위한 A/D 변환 및 FFT 알고리즘에 대한 이해가 필요하다. 다

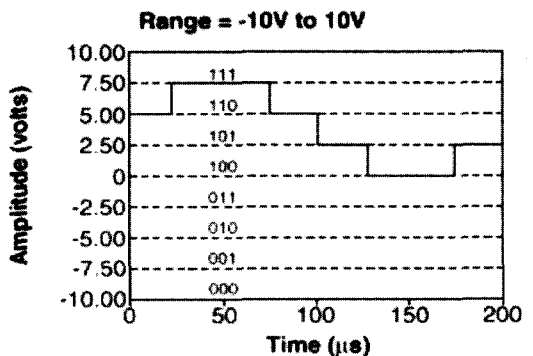
음은 신호처리를 위한 용어에 대하여 간략히 언급하였다.

(가) 입력 분해능(input resolution)

분해능이란 데이터 획득 시스템이 최소로 표현해 낼 수 있는 값이다. 막대를 자로 쓰기 위해서 눈금을 매겼는데, 그 눈금의 최소 간격이 읽을 수 있는 길이의 최소 단위임을 생각해 보면 쉽게 이해가 될 것이다. 데이터 획득 시스템의 분해능이란 일반적으로 아날로그-디지털 변환기(A/D converter)의 분해능을 말한다. 비트 값으로부터



(a) 분해능 1.25 V



(b) 분해능 2.5 V

그림 4 분해능 정밀도의 영향

실제적인 분해능을 구하는 식은 아래와 같으며, 그림 4는 3비트 A/D 변환의 예이다. $2^3 = 8$.

$$\text{Resolution} = \text{one part in } 2^{(\#\text{bits})}$$

(나) 샘플링률(sampling rate)

초당 받아들이는 데이터 갯수를 의미하는 것으로, 모든 연속신호는 등간격으로 표본화된 이산적 값으로 완벽하게 표현 및 재구성될 수 있다. 단, 이 때 샘플링률은 신호에 포함된 최고 주파수 성분의 2배 보다 커야 한다. 그림 5는 어떤 5Hz의 sine wave를 서로 다른 샘플링률로 샘플링한 경우의 신호형태의 예를 나타낸 것이다.

(다) 에일리어싱(aliasing) 현상

고속으로 회전하는 프로펠러를 바라볼 때 그 회전속도가 빨라지면 우리 눈에는 오히려 느리게 돌거나 반대 방향으로 도는 것처럼 보이게 되는데, 이 현상의 원인은 우리 눈의 잔상 처리 속도가 느리기 때문에 발생하는 에일리어싱 현상 때문이다. 이와 마찬가지로 고속의 아날로그 신호를 한정된 샘플링 속도를 갖는 장비를 이용하여 획득하게 되면 이러한 현상이 발생할 수 있다. 즉, 입력되는 신호의 주파수가 샘플을 취하는 장비의 샘플링률로 가능한 한계 주파수(nyquist frequency) 보다 높은 경우에는 언제나 에일리어싱이 발생하게 되어 한계주파수 이상의 주파수 성분에 대해서는 올바른 측정이 되지 않으며 오히려 느린 주파수 성분으로 인식되는 오류가 발생한다. 그림 6은 에일리어싱 현상을 보여주는 예이다.

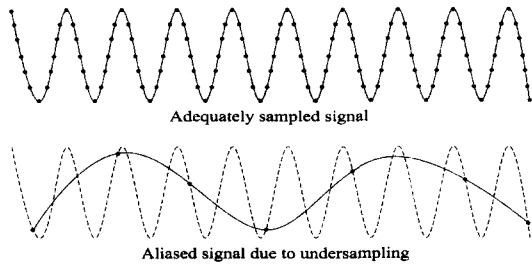


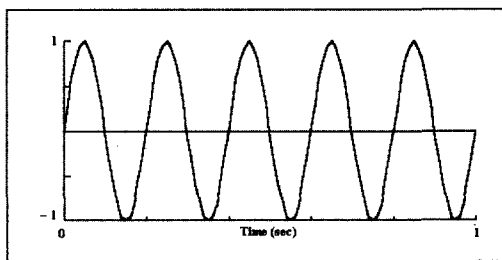
그림 6 에일리어싱 현상의 예

(라) 필터(filters)

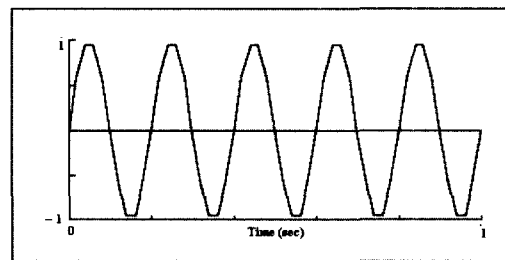
필터란 신호에 포함된 일정범위의 주파수 성분을 줄이는 데 사용되는 회로이다. 필터는 특정 주파수 대역내의 신호강도를 줄이고(attenuate), 그 이외의 주파수 대역의 신호 성분은 거의 변화시키지 않고 바로 통과시킨다(그림 7).

(2) 분석기법

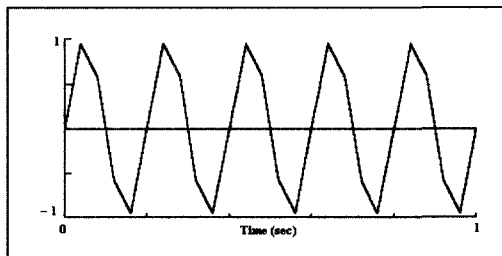
국내의 경우 최근 몇 년간 신설 또는 공용중인 주요교량에 계측 시스템을 도입하여 장기 또는 상시계측을 통한 구조물 건전도 감시 시스템(structural health monitoring system)을 구축하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 현재까지 국내의 주요교량에 설치된 계측 시스템은 센서가 설치된 위치에서 발생된 신호의 이력을 분석하여 교량의 상태를 파악하는 신호기반감시(signal-based monitoring)로서, 추출된 신호를 분석하여 교량의 상태를 평가하는데 필요한 구조적인 지식을 갖춘 전문가가 반드시 필요하며, 교량의 전체적인 손상 감시를 위해서는 충분한 수량의 센서를 배치하여



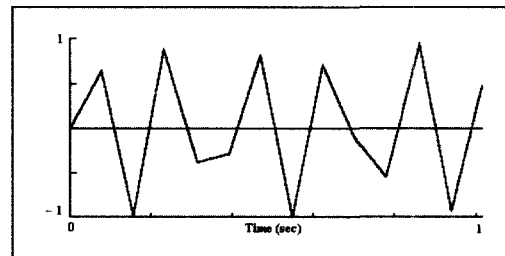
5 Hz sine wave sampled with Srate of 100 Hz (5x20)



5 Hz sine wave, sampled with Srate of 50 Hz (5x10)



5 Hz sine wave, sampled with Srate of 25 Hz (5x5)



5 Hz sine wave, sampled with Srate of 12.8 Hz (5x2.56)

그림 5 서로 다른 샘플링률로 샘플링한 경우의 신호형태

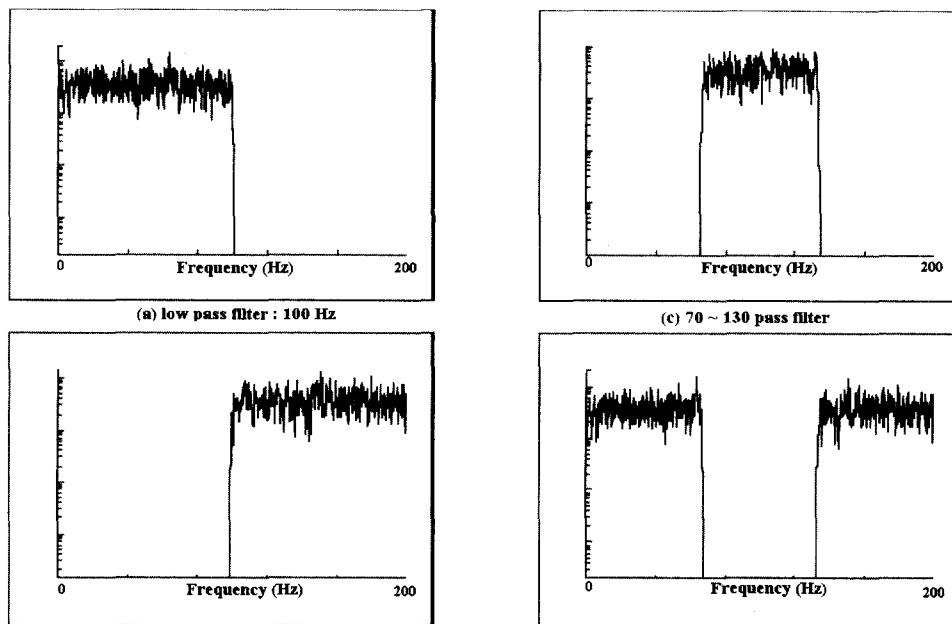


그림 7 랜덤신호의 필터링 결과

야만 효과를 볼 수 있다. 그러나 이 경우에 있어서 결함이 발생한 위치에 센서가 배치되어 있지 않으면 손상감지가 어려우며 방대한 수량의 센서를 설치한다는 것은 분석데이터의 양, 신호처리 용량, 그리고 경제적 측면에서 볼 때 거의 불가능하다 할 수 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 최근에는 계측 분석의 전문화 및 자동화를 위한 전문가 시스템 (expert system)과 구조적인 지식에 대한 사전 데이터베이스를 구축함으로써 소수의 센서로부터 계측된 신호를 교량의 전체적인 상태파악에 이용하는 지식기반감시(knowledge-based monitoring)의 필요성이 대두되고 있다. 지식기반감시란 교량에 있어서 어떤 부위의 손상이나 구조적인 변화가 다른 부위의 거동에 영향을 미치는 특성을 이용하여 한정된 수량의 계측기로부터 얻어진 자료로서 교량의 전체적인 상태를 파악하는 방법이다.

이를 위해서는 계측된 신호로부터 전체적인 상태를 파악할 수 있는 분석기술이 필요한데, 아직까지 교량과 같은 토목구조물에 있어서는 적용이 잘 되지 않고 있다. 그러나 교량의 상시계측을 통한 구조물의 이상감지를 위해서는 이러한 분석기술의 발전이 필요하며, 현재 시도되고 있는 기법들을 살펴보면 다음과 같다.

(가) 시스템 인식기법(SI, system identification)

구조물의 시스템 인식기법에 관한 연구는 시스템을 해석하고 발생 가능한 거동을 예측하며 적합

한 구조진단 및 처방을 위하여 반드시 수행되어야 하는 중요한 부분으로 주로 구조물의 동적특성분석을 통해 접근하고 있다. 구조물의 동적특성을 해석하기 위해서는 대상 구조물에 대한 수학적 모형이 제기되어야 하는데, 이는 크게 실험적 접근법과 해석적 접근법으로 분류할 수 있다. 해석적 접근법은 구조물이 갖는 물성값을 바탕으로 유한요소법과 같은 다양한 해석기법을 통하여 구조물을 해석하는 방법이며, 실험적 접근법은 다양한 범위를 갖는 입력데이터를 대상 구조물에 가한 후 이에 상응하는 응답성분을 계측하여 입력데이터와 그에 따른 출력데이터간의 관계를 규명하는 방법이다. 이 중 해석적 접근법에서는 시스템의 물성값에 대한 정확한 정보를 얻지 못하는 경우, 그 정확성과 신뢰성에 문제가 발생하게 되는 단점을 지니고 있다. 시스템인식기법은 두 가지 접근법 중 실험적 기법으로 분류할 수 있으며, 기법상의 특징으로 인하여 '역문제(inverse problem)'라 불리기도 한다.

실제 구조물은 공용기간 중 발생하는 여러 가지 악조건 즉, 설계하중을 초과하는 과잉상재하중, 불리한 시공여건으로 인한 구조물의 강성저하, 염분 등에 의한 부재의 침식, 공해로 인한 환경요인의 악화 등에 의하여 설계시 기대했던 동적특성에 비해 강성이 저하되는 경우가 흔히 발생하게 된다. 시스템인식기법은 이러한 동적특성의 변화를 실험을 통하여 추정하고, 그 결과를 구조해석 및 진단에 응용하는 기법이라 할 수 있다.

본 기법은 실제 구조물에 적용됨으로써 구조모형의 수정 및 검증, 구조물 내에 발생하는 손상의 검출 등에 이용되고 있다. 이때 전자의 경우는 현장계측데이터를 이용하여 대상 구조물의 재료특성값을 추정하고 이러한 특성값을 반영하는 정확한 모형을 정립하는 과정을 의미하며, 후자는 구조물의 건전도를 평가하는 일종의 비파괴기법으로 계측데이터에서 발생하는 급격한 변화를 검출함으로써 손상의 발생위치와 정도를 파악하고 이를 구조모형과 수학적모형을 이용하여 해석하는 방법이다.

(나) 상시진동(ambient vibration test)을 이용한 장기계측 시스템

이제까지 교량의 동특성 분석은 교통 통제하에 행해지는 재하시험(controlled load test)에 의하여 동적 처짐, 동적 변형률, 가속도 등을 측정하고 이로부터 동적 증폭률, 충격계수, 고유진동주기 및 감쇠비 등을 분석하여 손상을 입지 않은 경우에 대한 특성값과 비교함으로써 교량의 내하력평가, 잔존수명예측 등에 이용하는 것이 일반적이었다. 그러나, 이는 상시교통하중에서 데이터를 수집할 수 없을 뿐 아니라, 매 실험시 교통을 통제해야 하므로 교통량이 많은 도심지 등에서는 적용에 많은 어려움을 가지고 있었다.

이러한 문제점을 극복하기 위한 하나의 대안으로서 공용중에 발생하는 상시교통하중(ambient traffic)을 이용한 구조물 상태평가 시스템(AVS, ambient vibration surveys)이 개발되기에 이르렀으며, 이는 시간영역법(time-domain method), 확률론 등과 이론적 교류를 거쳐 급속도로 발전되고 있다.

상시진동 모니터링 시스템은 정상적인 교통흐름 상태에서 주행차량, 풍하중 등에 의하여 발생하는 동적특성의 변화를 지속적인 모니터링을 통해 수집함으로써, 동특성계수의 변동을 추적하고 교량의 건전도를 평가하는 유지관리 시스템이다. 상시진동 모니터링 시스템은 풍하중, 미진, 교통하중 등과 같은 자연발생적 진동을 구조물의 안전성 평가에 이용하게 되며, 앞서 설명한 시스템인식기법에 기초하여 고유진동수, 모드형상, 감쇠비 등과 같은 모드변수를 결정하게 된다. 이 기법의 적용성에 대한 성공여부는 추정되는 모드변수가 얼마나 실제 손상에 관여하고 동특성값의 변화에 민감하게 반응하는가에 달려있다 하겠다.

상시진동에 의한 모드변수의 변화는 구조모형에 기초한 시스템인식기법에 의하여 이에 상응하는 강성변수의 변화로 전환될 수 있다. 이때 모드변수

의 인식가능한 자유도 수는 제한되어 있고 상시진동에 의하여 발생시킬 수 있는 모드의 수는 제한되어 있으므로, 이론적으로는 이들만으로 구조물 내에 발생하는 모든 상태변화를 완전히 계측할 수 없게 된다. 또한, 진동의 계측시 발생하는 측정노이즈, 계측데이터의 비선형성, 모형화시 발생하는 오차 등에 의하여 해석상 불확실성을 갖게 되므로 실제 계측결과의 신뢰도를 저하시키는 요인으로 작용하게 된다.

일반적인 경우 상시가진에 상용되는 진동수는 제한된 주파수대역의 낮은 범위를 가지며, 가진의 시간이력이 알려져 있지 않으므로 적용에 다소 문제점을 안고 있다. 이와 같은 현상으로 인하여 낮은 진동모드에 대해서만 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있는데, 이 범위의 모드는 손상에 대한 강성의 국부적 변화에 민감하기 때문에 전체적인 손상 발생위치를 판정함에 있어서 많은 어려움이 발생하게 된다.

상시교통하중을 이용한 모니터링 시스템은 근본적인 접근방법론상의 오류, 개발된 이론의 현장적용성 실험부족 등으로 인하여 신뢰할 만한 기술체계는 아직까지 정립되지 못한 실정이다. 본 기법의 적용성을 향상시키기 위해서는 현장재하시험을 통해 결과에 대한 신뢰도를 확보하여야 하며, 수치해석모형 등에서 얻은 동특성계수와 서로 비교·검토되어가는 연구가 진행되어야 한다.

(다) 신경망(neural network)을 이용한 상시계측 시스템

구조물에 대한 안전성 평가에 있어서 구조물 내에 발생하는 손상을 비교적 객관적이며 정량적으로 나타내는 방법인 시스템 인식기법은 많은 장점에도 불구하고 실제 대형구조물에의 적용시 많은 계산상의 노력이 요구되어 실시간 손상평가분야에서의 실용성에 많은 의문이 제기되고 있는 실정이다.

이의 대안으로 인간 뇌의 활동메카니즘이 대량의 복잡한 정보를 효율적으로 병렬처리 할 수 있다는 사실에 근거, 신경망을 이용한 구조물 손상평가기법이 최근 활발히 연구되고 있다. 본 기법은 다소 불완전한 데이터에 대해서도 상당히 만족할 만한 결과를 나타내고 있기 때문에 그 적용성이 뛰어나다 할 수 있으며, 이론적으로 뇌가 학습능력을 가지고 있다는 사실에 근거하므로 문제해결에 필요한 규칙의 개발이 필요없는 새로운 계산방법이라 할 수 있다. 최근 이러한 신경망이론은 구조물내의 손상평가, 음성이나 영상인식분야, 인공지능의 개발, 퍼지이론이나 유전알고리즘 등에 효율

적으로 응용되어 많은 발전을 거두고 있다.

신경망이론의 적용분야 중 하나인 신경망을 이용한 손상계측 시스템은 다음과 같은 과정을 거쳐 작동되게 된다. 우선, 신경망을 구성하는 각 유닛(뉴런)들은 의도하는 목적에 맞게 선택된 데이터세트에 의하여 학습(training)되는 과정을 거치게 된다. 이때 각 뉴런간의 연결강도와 임계값은 학습과정을 통하여 새롭게 갱신되며 각 특성값에 맞게 조정되는데, 학습된 신경망은 모든 뉴런간에 유기적 관계를 갖는 전체적인 하나의 체계가 형성하게 된다.

신경망을 이용한 손상평가기법의 이론적 전개과정은 다음과 같다. 어떠한 외적요인에 의하여 대상 구조물에 손상이 발생하게 되면 시스템 내의 동적 특성이 변화되며, 이러한 효과는 신경망으로 하여금 기존의 학습데이터 중 이와 유사한 특성을 갖는 데이터를 기억, 이 데이터에 의하여 학습받은 대표 시스템을 처리하여 출력데이터를 생산하게 된다. 이러한 신경망의 특성을 이용하여 구조물 내에서 발생하는 손상정도를 감지하고 그 위치를 파악할 수 있게 된다.

신경망의 학습과정은 모의 구조해석을 통한 여러 가지 손상발생 가능성에 대하여 구조물의 응답변위(변위, 응력 등)를 산정함으로써 시작된다. 이 응답들 중 적당한 값을 선정하여 신경망의 학습데이터 세트를 구축하게 되며, 이 학습 데이터 세트에 의하여 신경망은 학습되게 된다. 학습과정을 거쳐 완성된 신경망은 실제 구조물에의 적용시 학습과정에서 나타나지 않았던 데이터가 발생하여도 이를 학습과정 중 생성된 유사한 데이터 처리양식에 의하여 처리함으로써 손상도를 평가하게 된다.

그러나, 현재까지의 연구결과만으로는 신경망을 이용한 손상평가법에 몇 가지의 중요한 문제점이 발생하게 된다. 먼저 손상을 검출하기 위해서는 신경망을 학습시킬 데이터베이스가 구축되어 있어야 하며, 이들 데이터베이스는 실구조물에의 적용에 적당한가 하는 검토가 선행되어야 한다. 또한 실구조물의 적용에 있어서 한정된 소수의 계측결과로부터 구조물 전체에 대한 안정성평가를 기대할 수 없으며, 이는 많은 오차를 갖게 되어 우리가 기대하는 신뢰도를 갖지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 다양한 방식으로 학습패턴에 변화를 주어 신경망 구조의 적용성을 높여야 하며, 구조물의 파괴에 대한 주요부재의 기여도를 결정함으로써 각 부재에 적합한 데이터세트를 정립하는 것이 필요하다고 하겠다. 구조

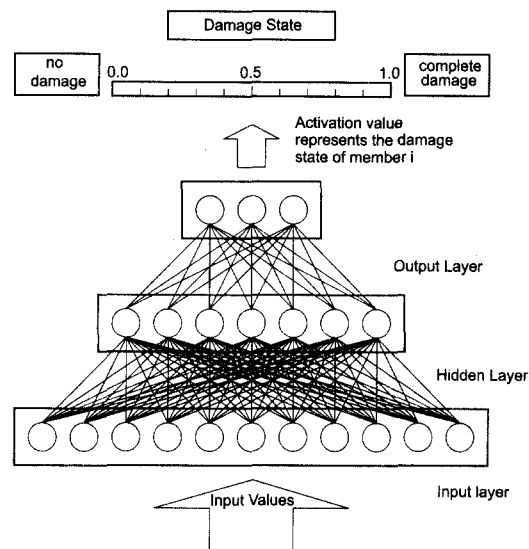


그림 8 구조물의 손상평가를 위한 신경망의 개념도

물의 손상평가를 위한 인공신경망의 개념은 다음 그림 8에 나타난 바와 같다.

3. 상시계측 시스템의 문제점 분석 및 향후 전망

교량과 같은 구조물에 상시계측 시스템을 설치하는 주된 목적은 구조물의 장기간 사용에 따른 점검자료의 객관성 확보와 보관 및 긴급사태 발생시 효과적으로 대처하기 위함이며, 궁극적으로 구조물건전도 감지 시스템을 구축하는데 있다. 이 시스템은 손상여부분석, 손상부위검출, 응답데이터를 이용한 구조물의 응답평가 등에 의한 NDE 기술이라 할 수 있다.

현재 국내에서는 다수의 교량에 상시계측 시스템을 설치하여 운영하고 있으나, 초기단계의 경험미숙과 관련기술의 확보가 어려웠던 관계로 시스템이 원활하게 운영되지 못하는 경우가 있으며, 현장에 계측관리사무소를 두고 상시계측 시스템을 운영하고 있는 교량의 경우, 설치시 외국기술에 대한 의존도가 높고 기술이전이 제대로 이루어지지 않고 있다는 문제점이 제기되고 있다. 또한, 계측기로부터 측정된 신호를 저장하여 일부 데이터에 대해 분석을 수행하고 있으나, 아직까지는 분석결과를 체계적으로 활용하지 못하고, 단지 저장만하고 있는 수준이라 볼 수 있다. 이러한 상황이 발생하게 된 주원인을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 상시계측에 관한 국내의 연구가 절대적으로 부족한 상황에서 일련의 구조물 붕괴사고를 경험

하며 준비되지 않은 상황에서 서둘러 상시계측 시스템을 도입하게 됨으로써, 설치하기만 하면 구조물의 이상거동이나 결함을 쉽게 발견할 수 있으리라는 잘못된 인식이 있었다.

(2) 공용중인 교량에 상시계측 시스템을 설치하는 경우, 구조물의 초기상태에서부터 계측 시스템을 설치하기까지의 이력을 모르기 때문에 분석시 기준점의 설정이 어렵다.

(3) 교량과 같은 대형 구조물에 분석기술을 활용하기 위해서는 하중전달체계나 구조계가 비교적 간단한 구조물을 대상으로 연구의 기반을 마련한 후, 점차 복잡한 구조물로의 적용을 모색하여야 하나, 국내의 상시계측 시스템은 도입 초기단계에서부터 너무 복잡한 구조물에 적용되었다.

(4) 상시계측 시스템이 신설교량에 설치·운영되는 경우, 일반적으로 교량의 설계수명은 50년 이상을 목표로 설계하지만, 계측기기의 수명은 이보다 훨씬 짧다. 또한 실험실내에서 사용하는 장비와 현장에서 사용하는 장비의 내구성 요구수준이 판이하게 다르나, 계측 시스템의 도입초기에는 이러한 부분이 간과되었다.

(5) 국내의 관련 기술자들간에 상시계측 시스템에 대한 기술적인 교류가 거의 없었고, 관련 지식의 공유가 부족하였다.

(6) 상시계측 시스템이 설치된 대부분의 구조물이 건전한 상태로 이상거동이 발생할 가능성도 낮으며, 발생한다고 하더라도 상당한 기간이 소요될 것이나 대부분의 관리자들이 시스템 설치 후 조급하게 어떤 성과를 기대하고 있다.

향후 상시계측 시스템의 보완사항으로는 경보수준의 설정을 들 수 있다. 경보신호가 작동될 수 있는 상황을 예시하면 다음과 같다.

- ① 측정응력이 허용응력을 초과할 때
- ② 작용응력과 반복횟수에 의한 피로손상이 허용피로한도를 초과할 때
- ③ 허용통과하중보다 큰 과적차량이 통과하는 경우
- ④ 허용풍속보다 큰 풍하중이 작용하는 경우
- ⑤ 시간이 경과함에 따라 과도한 변형이 발생하여 허용변형을 초과하는 경우
- ⑥ 교량의 진동이 공진 현상을 보이는 경우
- ⑦ 케이블 교량인 경우 텐던장력의 이상변화 현상이 발생하는 경우

- ⑧ 입력지진이 허용수준 이상인 경우
- ⑨ 교각·교대의 경사나 부등침하가 허용한도를 초과하는 경우
- ⑩ 가동단 이동량이 허용한도를 초과하는 경우
- ⑪ 선박이나 차량의 충돌 발생시
- ⑫ 이상 저온·고온시
- ⑬ 동적특성값의 이상변화
- ⑭ 부재의 거동이 허용한도를 초과하는 경우

또한 실제적인 모니터링 수행 중 신호처리 과정에서 센서를 통해 계측되는 신호가 상시의 신호와 비교하여 이상이 감지되었을 때, 이러한 이상 원인이 센서 혹은 모니터링 체계에 기인한 것인지, 아니면 구조적인 변화에 의한 것인지에 대한 판단이 먼저 수행되어야 한다. 이와 같은 이상원인이 우리가 관심을 갖게되는 구조적 변화인 경우, 그것이 손상을 반영한 것인지 또는 일시적인 구조계의 변동에 의한 것인지에 대한 분석이 수행되어야 한다.

이를 위해서는 대상구조물 자체에 관한 정보, 정확한 정적·동적 거동에 관한 정보 및 진단에 필요한 정보 등 전문가적인 지식이 바탕이 되어야 하며 더욱이 이를 컴퓨터화 하기 위해서는 인공지능 기법을 동원한 지식모형의 구축이 필요하다.

끝으로 구조물의 상시계측 시스템의 활용 측면에서 새로운 기법의 개발이나 시스템의 도입도 매우 중요한 의미를 가지지만, 최적의 센서종류, 수량 및 위치선정 그리고 구축된 데이터의 효과적인 활용방안에 대한 끊임없는 노력과 고민이 선행되어야 한다.

참 고 문 헌

- (1) 교량의 상시계측 시스템 현황과 관련기술 분석, 한국표준과학연구원, 1998
- (2) 고속철도 선로구축물 성능확보를 위한 구조물 계측 및 평가 시스템 개발(I), 한국고속철도건설공단, 1998
- (3) 진도대교 손상감지 시스템 구축 연구, 현대건설기술연구소, 1998, 11
- (4) 남해대교의 장기동특성 변동, 정대성 외, 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, 2000
- (5) 영종대교 시공중 및 유지관리 계측, 장정환 외, 구조제어 및 건전도 모니터링 기술현황 workshop, 2000
- (6) 행주대교의 시공중계측과 유지관리계측, 윤자걸 외, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1998