

# 대형교량의 유지관리를 위한 전산화 모니터링 및 분석평가시스템

## Computer-Aided Monitoring and Assessment System for Maintenance of Grand Bridges

조 효 남<sup>1)</sup> · 임 중 권<sup>2)</sup> · 민 대 홍<sup>3)</sup> · 박 경 훈<sup>4)</sup>

Cho, Hyo Nam Lim, Jong Kwon Min, Dae Hong Park, Kyung Hoon

요 약 : 본 연구에서는 대형교량의 전산화 모니터링 및 분석평가(Monitoring and Assessment: M&A)를 위한 시스템모형과 소프트웨어의 개발에 대한 새로운 접근방법과 개념을 제안하였다. 제안된 시스템모형은 대형교량의 M&A를 위한 최적의 방법을 반영한 모형이다. 이를 위하여 교량의 확률적 분석평가를 위한 신뢰성 모형이 개발되었고, 일련의 현장재하시험으로부터 측정한 실용답에 기초한 교량의 안전성과 신뢰성의 평가를 위해 신뢰성에 기초한 내하력 평가방법을 확립하였다. 또한 제안된 모델에 기초하여 대형교량의 전산화 M&A를 위한 시범소프트웨어(prototype software)를 개발하여 실제 사장교에 적용하였다. 본 연구에서 개발된 시스템모형 및 시범소프트웨어는 향후 사장교나 현수교와 같은 장대교량의 전산화 유지관리 시스템의 개발에 활용될 수 있다.

ABSTRACT : This paper is intended to show some new approaches and concepts for the development of system model and prototype software for computer-aided Monitoring and Assessment(M&A) of grand bridges. The system model that incorporates optimal strategies for M&A of grand bridges is suggested. Reliability models are developed and a reliability-based capacity rating method is established for the evaluation of the bridge safety and reliability based on the real responses measured from a series of field load tests. Based on the proposed models, an integrated prototype software is then developed for computer-aided M&A of grand bridges under the environment of the graphic user interface, which is successfully applied to the M&A of an existing cable-stayed bridge. It may be stated that the system model and prototype software developed in this paper can be utilized

1) 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수, 공학박사  
2) 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사수료  
3) 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정  
4) 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 1999년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

and implemented in the development of the computer-aided M&A system for cable-stayed and suspension bridges.

핵심용어 : 대형교량, 모니터링, 분석평가, 신뢰성, 전산화유지관리, 건전성

KEYWORDS : grand bridges, monitoring, assessment, reliability, computer-aided maintenance, integrity

## 1. 서 론

사장교, 현수교, 세그멘탈 PC박스거더교 등과 같은 대형교량의 전산화 유지관리를 위한 모니터링 시스템의 개발은 최근 세계각국의 교량 엔지니어들에게 새로운 도전과제가 되고 있다. 교량의 손상이나 열화를 적당한 시기에 적절한 방법으로 보수하지 않는다면, 막대한 재보수 비용이 소요될 뿐만 아니라 파손 또는 붕괴를 초래하게되어 사회 및 경제적으로 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 모니터링시스템을 이용한 상시계측을 통해 교량의 이상거동을 감지하고 미리 적절한 유지관리를 수행함으로써 교량의 공용수명을 연장시키고 재산의 손실 및 인명피해를 감소시킬 수 있다. 최근 이러한 구조물의 유지관리는 저비용으로 전산시스템을 사용할 수 있는 새로운 기술의 개발로 인하여 세계적으로 전산화 유지관리를 위한 다양한 방법들이 활발히 연구되어지고 있다.<sup>(4,5,7,9,10,13,18)</sup> 그러나 센서 및 계측 기술의 발전에도 불구하고 모니터링시스템으로부터 얻은 계측데이터의 분석을 통해 구조물의 안전 및 신뢰성을 평가하는 합리적인 방법의 개발은 아직도 연구과제로 남아있다.

최근 국내에서는 신행주대교 및 성수대교 등과 같이 시공 또는 공용간 붕괴사고의 발생으로 교량의 유지관리에 대한 관심과 중요성이 그 어느 때보다 높아지고 있다. 이러한 사회적 요구로 사장교, 현수교, PC세그멘탈교 등과 같은 대형교량에 대하여 모니터링시스템과 관련한 많은 연구가 이루어져 왔다.<sup>(3,4,5)</sup> 그러나 국외와 마찬가지로 센

서 및 계측 기술의 발전에도 불구하고 계측데이터를 통해 구조물의 상태 및 건전성 평가를 위한 합리적인 방법은 특히 장기간 교량에 있어 아직 실용화 단계에 이르지 못하고 있는 실정이기 때문에 대형교량에 대한 실용적이고 합리적인 모니터링 및 분석평가(Monitoring and Assessment : M&A)시스템의 개발이 절실히 요구되는 실정이다.

본 논문에서는 대형교량에 적합한 전산화 M&A시스템의 모형을 제안하였고, 제안된 모형에 기초하여 GUI(Graphic User Interface)환경의 시범소프트웨어(prototype software)를 개발하였다. 개발된 시범소프트웨어는 사장교인 진도대교의 전산화 유지관리를 위하여 적용되었다. 특히 사장교와 현수교 같은 대형교량의 경우 안전성 및 건전성평가는 교량 시스템이 복잡하고 여용성이 높아 매우 어렵다.<sup>(11)</sup> 더욱이 손상평가기법인 SI(System Identification) 및 ANN(Artificial Neural Network) 등을 이용한 접근방법은 아직 연구단계에 있어 현 단계에서 복잡한 구조시스템에 적용하기는 쉽지않다. 따라서 본 논문에서는 실용적으로 확률통계기법을 사용하여 실시간 응답데이터에 의한 교량의 이상거동을 감지하고 장애거동을 예측할 수 있는 전산화 모니터링 모형을 제안하고, 현장재하시험을 통해 측정된 응답을 바탕으로 교량의 분석평가를 위해 요소신뢰성에 기초한 건전성평가 모형을 제안하였다.

## 2. 전산화 모니터링 및 분석평가 시스템

Wieland<sup>(17)</sup>는 완전하게 자동화된 M&A시스템의 개발은 현실적으로 불가능함을 밝힌 바 있다. 자동화 M&A시스템이 개발되었다 하더라도 교량의

의 안전한 관리를 위해서는 1)교량 관리책임자의 상시 육안점검; 2)전문가에 의한 주기적인 특별점검; 3)육안점검 및 측정을 통해 얻어진 데이터의 분석평가; 4)교량의 안전성 평가 등과 같은 추가적인 분석평가 및 관리업무가 교량의 통제와

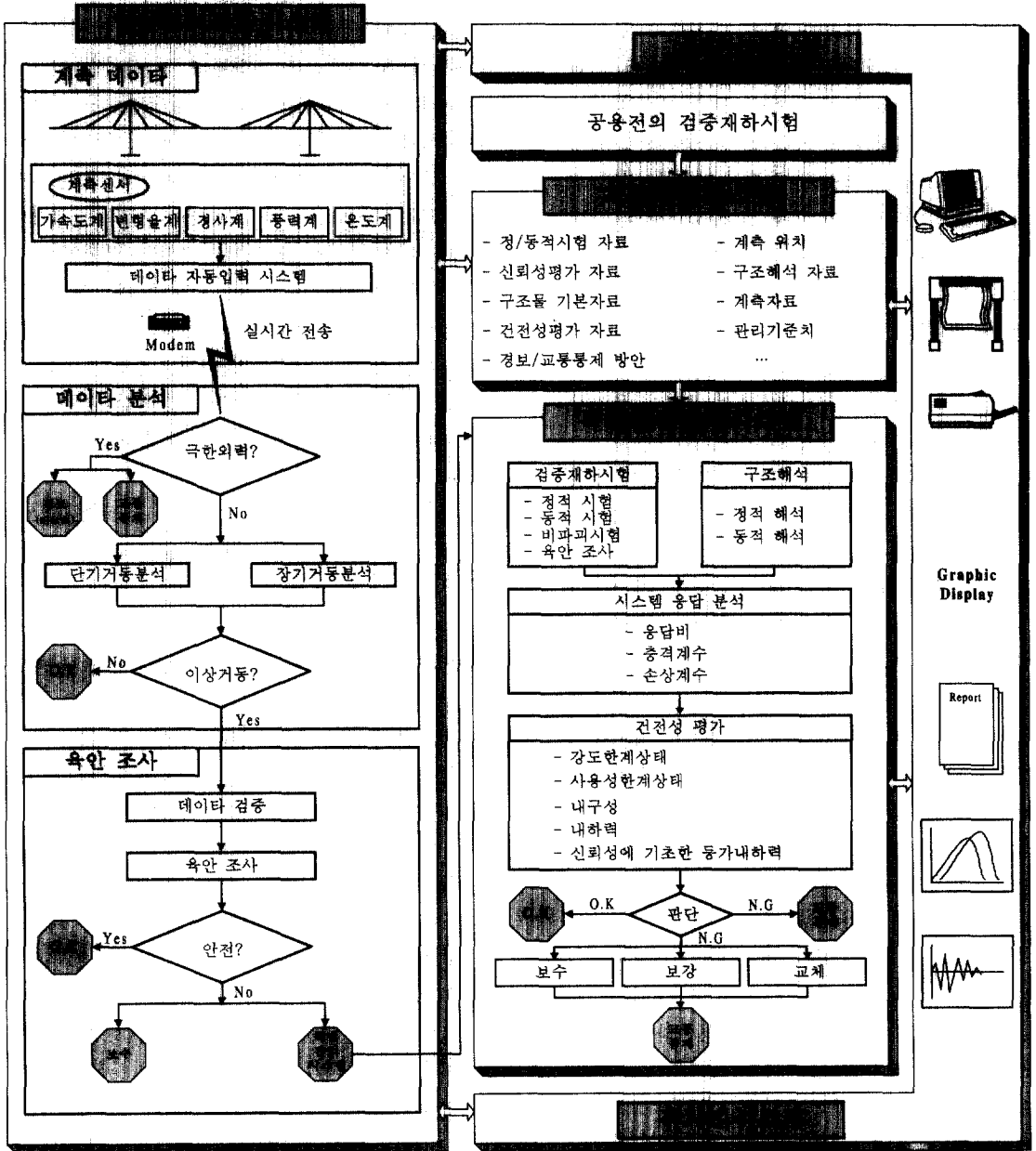


그림 1. 대형교량의 전산화 유지관리시스템 모형

유지관리를 위해 필요하기 때문이다. 또한 사장교와 현수교 같이 복잡한 시스템으로 구성된 교량의 보다 정확한 안전성평가를 위해서는 자동화된 전산화 M&A뿐만 아니라 교량의 운영을 책임지고 있는 교량 관리자의 일상적인 정밀육안점검과 교량 전문가의 주기적인 특별점검도 필요하다. 따라서 교량의 안전한 관리를 위해 부분적 자동화를 구현하며 실제 적용 가능한 M&A시스템이 개발되어야 한다. 이러한 관점에서 보다 실용적이고 합리적인 대형교량의 전산화 M&A를 위한 이상적인 시스템모형을 그림 1과 같이 제안하였다. 그림 1에 보인 것과 같이 제안된 시스템모형은 일상모니터링시스템(General Monitoring System: GMS), 특별분석평가시스템(Special Assessment System: SAS), 자료관리시스템(Data Management System: DMS), 그리고 전후처리(Pre- & Post-Process: PPP)시스템의 4가지 모듈로 이루어진다.

교량의 M&A를 구성하는 두 가지 중요한 모듈은 센서를 통해 자동적으로 측정된 자료를 바탕으로 일상적인 교량의 모니터링 및 유지관리에 이용되는 GMS와 교량의 건전성평가를 위한 세부모듈로 구성된 SAS이다. GMS는 주형의 변형률이나 케이블의 진동 등과 같은 교량의 주요위치로부터 측정된 실용답의 최대치를 비교적 간단한 확률통계적인 분석을 통해 교량의 이상거동을 감지하기 위한 시스템으로 단기이상거동감지와 장기거동예측의 두 가지 단위 모듈로 세분화된다. SAS는 교량의 건전성평가를 위한 시스템으로 GMS에 의해 이상거동이 감지된 조건하에서 전문가나 교량 관리자의 판단하에 수행될 수 있다. 그림 1과 같이 이 시스템은 검증재하시험, 구조해석, 응답특성의 해석, 신뢰성/건전성 평가 및 교량 유지관리를 위한 의사결정 등의 단위모듈로 구성된다. 이러한 시스템의 실제 적용을 위해서는 개통직후에 측정된 초기 응답 데이터뿐만 아니라 저장된 모든 응답데이터를 이용한 표준데이터의 구성이 필요하다. 개통전 또는 교량의 현재상태를 파악하기 위

해서 공용중 수행되는 검증재하시험은 교량의 응답 및 거동특성을 얻기 위해서 필수적이다. 이상 응답을 감지하기 위해서는 고유진동수, 구조의 댐핑, 계산치와 측정치의 용력 응답비 등 구조물의 주요변수를 평가하는 것이 중요하다.

본 논문에서 제안한 M&A시스템의 최종 목적은 통행가능차량의 적절한 판단과 목표안전수준을 확보하기 위한 안전한 교량통제 및 실시간 이상거동감지를 통해 교량의 안전과 상태평가를 기초로 하여 예방유지관리를 위한 최적의 의사결정을 내리는 것이다. 물론 예기치 않은 강풍과 지진이 사장교 또는 현수교와 같이 유연한 장지간 교량에 심각한 피해를 줄 수도 있다. 그러나 강풍이나 지진은 다른 국가와 비교해서 국내에서는 발생빈도가 낮고 이러한 자연적인 요인보다는 교통량에 따른 공용간 손상이나 열화가 상대적으로 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 장지간 교량의 공용중 교통하중하에서 안전성 확보를 M&A시스템의 주요 주제로 한다.

## 2.1 일상모니터링시스템(GMS)

### 2.1.1 데이터 처리

정확히 측정된 계측데이터를 통해서만 신뢰성 있는 데이터분석이 이루어지므로 일반적으로 계측시스템은 GMS의 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 계측기의 네트워크 구성, 데이터 처리 및 분석은 일반적으로 많은 비용이 소요되므로 설치전에 경제성을 고려하여야 한다. 또한 교량의 모든 요소들을 모니터링할 수 없으므로 계측은 교량의 거동 및 건전성평가를 위한 중요 위치로 최소한 제한하여 실시되어야 한다. 상시 영구계측시스템의 경우 계측시스템 자체의 유지관리 또한 중요하므로 센서는 단순하고 신뢰성 및 안정성이 높고 품질이 좋아야 한다. 센서, 피복, 기록계 등은 탈락, 부식, 기계적 손상을 입지 않도록 보호되어야 하며 센서의 수는 한두 개가 파손되더라도 모니터링을 위한 계측에 있어 신뢰도에 영향을 미치지

않을 정도의 여유는 있도록 설치되어야 한다. 데이터는 다년간에 걸쳐 수집되어야 하므로 일정시간후의 유지관리 및 교체비용과 초기설치비용 사이의 경제성을 고려하여야 한다.

모든 계측데이터는 일상유지관리를 위해서 시간당 최대치를 구하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 강풍 또는 지진 등으로 인한 과도한 응답이 발생할 경우에는 해당 사건으로 인한 모든 계측데이터가 측정, 기록되어야 한다. 이러한 사건의 기록은 만약 각 교량요소에 대한 초과응답과 관련된 일정한 기준치들이 설정되어 있다면 쉽게 수행될 수 있다. 기준치는 검증재하시험 및 정·동적해석을 기준으로 하여 산정될 수 있는데 만약 계측치가 이러한 기준치를 초과할 확률이 높아질 경우 예방차원에서 GMS에 의해 교통의 부분통제나 통행금지 등의 경고가 작동될 수 있다.

### 2.1.2 데이터 해석

실시간 교량의 계측은 현재 시점의 교량상태뿐만 아니라 계측데이터의 확률적 분석을 통해 장래의 구조거동을 예측하여 구조물의 신뢰도를 확

보하는데도 목적이 있다. 이러한 목적을 위하여 보다 합리적이고 실용적인 단기이상거동감지와 장기거동예측을 위한 모형을 개발하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 교량거동의 감지를 위한 결정 및 평가의 방법은 간단하다. 일정시간간격동안 계측된 데이터는 설계치에 상응하는 계측치를 초과하면 시스템은 교량에 대한 적절한 모니터링 및 교량의 안전통제를 위하여 경고메시지를 주게 된다.

단기이상거동감지를 위해서 정상응답을 초과한 과도한 변형은 정상상태하에서 결정된 표준데이터와 새롭게 계측된 데이터의 상위 5% 평균의 변화정도에 따라 결정된다. 정상상태의 실용답은 교량의 개통직후 하루, 일주일 혹은 한달 등의 일정기간동안의 데이터를 측정하여 데이터베이스화해서 시스템에 사용된다. 시스템을 위해 채택된 의사결정기준은 표 1과 같다. 계측데이터가 정상상태의 계측치보다 20%이상 초과한 상태가 지속된다면 교량관리자는 현장점검을 수행하여 이상유무를 확인한 후 SAS를 실행할 수 있다.

장기거동예측은 일정한 시간간격동안의 최대치를 계측하여 극치통계분석을 통해 평가하는데, 단

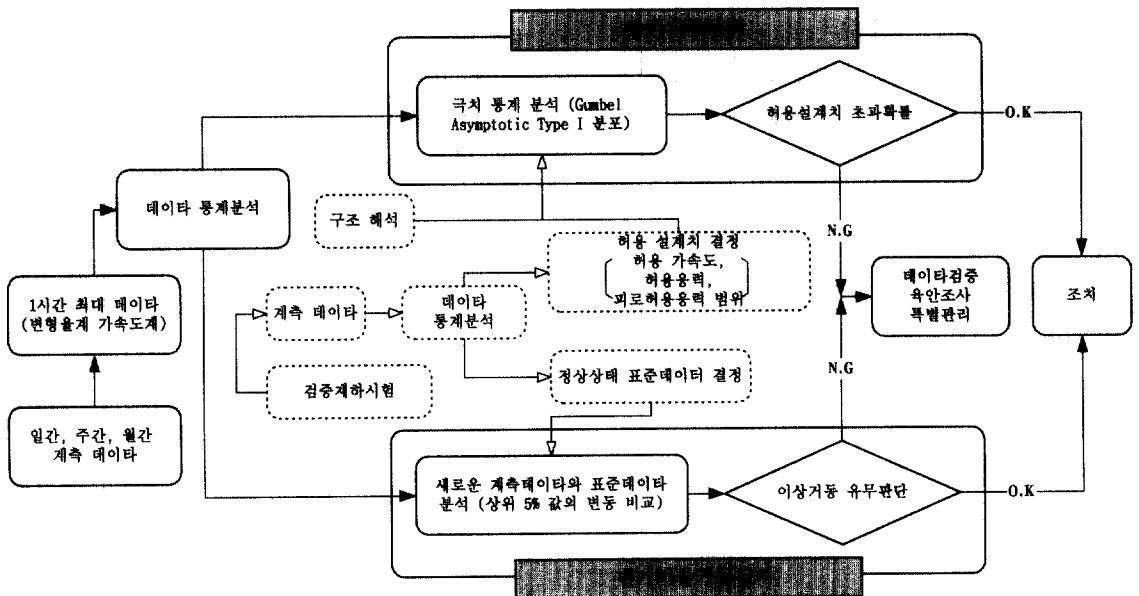


그림 2. 장·단기 거동의 해석순서

표 1. 상시계측데이터에 따른 의사결정기준

단기이상거동감지	장기거동예측	관리지침
새 계측데이터의 표준데이터에 대한 상위 5%값의 초과 비율	설계허용치 초과확률 (신뢰성 지수: $\beta$ )	
10% 이하	$10^{-3}$ (3.10)이하	일상관리
10% ~ 20%	$10^{-2}$ 초과 ~ 0.05이하	데이터 검증 / 육안조사
20% 이상	0.05(1.65)초과	데이터 검증 / 육안조사 특별관리

기이상거동감지와 같은 데이터를 사용한다. 본 연구에서는 Gumbel type I 분포<sup>(8)</sup>가 극치통계분석을 위해 사용되었으며 이는 교량응답의 특정허용치 초과확률을 산정할 수 있다. 여기서 허용치는 허용용력 또는 피로허용범위, 허용변위 또는 허용진동수 등이다. 이 시스템에 의한 결정기준은 표 1에 나타내었다. 계측데이터가 정상상태보다 5%이상 클 때 현장점검을 수행하며 이상유무를 확인한 후 교량 관리자는 SAS의 실행을 고려할 수 있다.

## 2.2 특별분석평가시스템(SAS)

교량의 위험단면에 설치된 센서를 통해 미세한 이상거동은 GMS에 의해 감지될 수 있다. 이러한 이상거동의 직접적인 원인과 파생되는 결과들은 해석적으로 밝혀지지 않으며 현재의 기술력으로는 자동으로 해석할 수 없는 실정이다. 또한 교량의 안전성 및 건전성평가를 위한 체계적인 방법은 특히 장경간 사장교나 현수교의 경우에 아직 실용적이지 못하다. 따라서 실시간 계측데이터를 사용한다보다 합리적이고 신뢰성 있는 접근방법이 교량 상태를 해석하기 위해서 필요하다. 본 논문에서는 완전 자동화는 아니지만 부분적으로 교량의 안전을 제어하는 성능을 갖도록 개발된 특별분석평가시스템(SAS)을 제안하였다.

SAS는 교량의 건전성과 구조적 안정성의 보다 정확한 평가를 위해 사용되도록 구성되어 있다. 만약 어떠한 사건이 발생했다라도 GMS가 아무런

경보도 없다면 육안조사를 통한 점검이 필요하다. 그러나 만약 경보가 발생한다면 교량에 어떤 국부적·전체적 손상 또는 파괴가 일어났는지를 체크하게 될 것이다. 이 경우에 만약 교량의 중대한 손상이나 파괴의 징후가 육안조사에 의해 감지된다면 광범위한 정·동적 하중재하시험을 고려하여야 한다. GMS에 의해서 장단기를 막론하고 어떠한 이상거동이 감지되어지고, 육안점검을 통해 어떤 문제가 감지된다면 교량관리자는 교량의 구조적 손상정도 또는 파괴의 발생가능성을 조사하기 위해 SAS를 실행할 수 있다.

SAS는 그림 1에 나타낸 바와 같이 검증재하시험, 구조해석, 시스템 응답해석, 그리고 건전성평가 등의 단위 모듈로 구성되어 있다. 좀더 정확한 평가를 위해 만약 필요하다면 SAS에서 정·동적 현장재하시험이 이루어질 수 있고 전문가의 판단 또한 평가에 고려될 수 있다. 또한 SAS는 SI, ANN 그리고 전문가시스템 등과 같은 향상된 평가방법이 가까운 미래에 실용화된다면 이러한 방법들에 의해 평가된 손상지표를 첨가할 수도 있다.

### 2.2.1 시스템 응답해석(System Response Analysis)

일반적으로 응답비, 손상계수, 충격계수는 계산된 해석치에 대한 계측된 응답의 비율로부터 얻어지는 교량 시스템의 응답특성으로 구성된다. 일반적으로 사장교와 같은 장경간교량에서 충격계수의 영향은 단경간교량과 비교해 크게 중요하지 않기

때문에<sup>(2)</sup> 본 시스템에서는 주요 평가요소로 고려하지 않았다.

정·동적 해석모델 역시 SAS에 포함되는데 SI나 ANN 등에 의한 손상평가방법은 여전히 연구 단계에 있고, 사장교와 같은 복잡한 교량구조물의 손상계수의 정확한 해석이나 수치적 평가는 현재 기술력의 한계로 인해 매우 어려운 실정이다. 따라서 장경간교량의 손상이나 강도저하를 평가하기 위해서 다른 방법을 모색하여야 한다. 본 논문에서는 측정된 용력의 계산된 용력에 대한 비율로 정의된 응답비가 교량의 열화나 강도 저하, 또는 손상상태를 측정하는 중요한 평가요소로 고려되었다.<sup>(15)</sup> 따라서 응답비의 추정을 위한 수치모델이 시스템에 포함되었다. 실제의 사장교는 많은 수의 케이블과 다이어프램, 텍 리브 등을 포함하는 높은 여유성을 가진 시스템이기 때문에 정상적인 상태에서는 실제의 응답이 구조해석시의 값보다 작을 것으로 기대된다. 상판 중앙에서의 휨모멘트나 케이블의 인장력과 같은 단위하중에 의한 응답비는 계산치에 대한 계측치의 비로 쉽게 얻어질 수 있다. 그러나 휨과 축력을 받는 경우와 같은 조합하중에 의해 지배되는 요소에서의 응답비는 각각의 조합에 대하여 계측치를 분석하여 결정할 수 있다.

대형교량의 안전성 및 건전성평가를 통한 유지관리지침으로 표 2와 같은 시험적인 규정이 노후된 교량의 신뢰성 및 내하력 평가를 통한 유지관리 의사결정 기준으로 제안되었다.<sup>(16)</sup>

표 2. 교량관리를 위한 의사결정 범위

신뢰성 지수( $\beta$ )	내하율(RF)	유지관리
$\beta \geq 3.0$	$RF \geq 1.0$	주기적 조사
$2 \leq \beta < 3$	$0.75 \leq RF < 1.0$	육안 조사
$1 \leq \beta < 2$	$0.57 \leq RF < 0.75$	보수/보강
$\beta < 1.0$	$RF < 0.57$	교체

## 2.2.2 건전성평가(Integrity Assessment)

일반적으로 구조물의 강도와 하중효과는 불확실한 랜덤변수이므로, 확률통계적인 방법을 도입하여 구조물의 파괴확률 및 안전도를 추정하는 것이 보다 합리적이다. 따라서 본 논문에서는 신뢰성에 기초한 방법을 사장교의 건전성을 평가하는데 적용하였다. 또한 표준화된(Codified) 내하력 산정방법뿐만 아니라 신뢰성에 기초한 비표준화된(Non-codified) 내하력평가방법이 제시되었다. 신뢰성에 기초한 모델은 극한한계상태, 내구성한계상태, 그리고 사용성한계상태를 포함한다. 여기서 제안된 한계상태모형은 저자<sup>(10,11)</sup>에 의해 여러 종류의 실제교량에 대해서 광범위하게 연구된 바 있다. 교량의 안전을 평가하기 위한 실제적인 구조신뢰성방법으로는 적용하는데 보다 간편하고 효과적인 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 방법을 주로 적용하였다. 신뢰성 해석을 위한 저항 및 하중효과의 불확실성은 문헌<sup>(12,14,16)</sup>의 이용 가능한 정보와 전문가의 판단에 기초하여 주관적으로 평가되어진다. 그리고 이러한 불확실성은 좀더 신뢰성 있는 데이터가 축적될 때마다 Bayesian기법을 이용하여 개선시킬 수 있다.

### 1) 강도한계상태

신뢰성해석을 위한 강도한계상태모형의 수치해석결과에 대한 고찰은 참고문헌<sup>(11)</sup>에 상세하게 기술되어 있다. 여기서는 단지 신뢰성을 평가하기 위한 모델에 대해서 간략히 요약하였다.

대상구조물인 사장교나 현수교의 케이블 요소에 대해서는 선형한계상태모형을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\cdot) = P_{TR} - (P_{TD} + P_{TL}) \quad (1)$$

여기서,  $P_{TR}$ =실저항;  $P_{TD}$ ,  $P_{TL}$ =사하중과 활하중 각각에 의한 실하중효과를 나타낸다.

사장교나 현수교의 주형 및 주탑의 경우 축력의 영향을 무시할 수 없으므로 휨과 축방향력을 동시에 고려할 수 있는 LRFD 시방서<sup>(1,6)</sup>에 기초하여 안전도 및 내하력평가를 위한 한계상태방정식을 식(2)와 같이 실용적으로 제안하였다.

$$g(\cdot) = 1 - \left\{ \frac{P_{CD} + P_{CL}}{P_{CR}} + C_m \frac{M_D + M_L}{M_{CR} \left( 1 - \frac{P_{CD} + P_{CL}}{P_e} \right)} \right\} \quad (2)$$

여기서,  $P_{CR}$ =단면의 실좌굴강도;  $M_{CR}$ =단면의 실저항모멘트;  $P_e$ =Euler 좌굴강도;  $C_m$ =등가모멘트계수;  $P_{CD}$ ,  $M_D$ =축력 및 모멘트에 대한 사하중 효과;  $P_{CL}$ ,  $M_L$ =축력 및 모멘트에 대한 활하중 효과, 이때  $P_{CR}$ ,  $M_{CR}$ ,  $P_{CD}$ ,  $P_{CL}$ ,  $M_D$ ,  $M_L$  등은 각종 불확실량에 대한 편기를 고려한 값이다.

## 2) 내구성한계상태

일반적으로 강재의 경우 내구성 문제를 일으키는 것은 주로 부식이다. 이러한 부식문제는 최근의 도장기술의 발전으로 주기적인 도장관리에 의해 충분히 구조물의 건전성을 확보할 수 있을 것으로 판단되기 때문에 특별한 건전성 평가모형의 개발이 불필요할 것으로 판단된다. 그러나 교량구조요소중 콘크리트요소의 경우에는 내구성이 고려되어야 한다.

내구성 한계상태모형은 콘크리트 균열폭, 염분 침투 및 중성화 정도 등의 측정에 기초한 내구성 평가를 위해서 다양한 한계상태를 고려할 수 있으나, 본 논문에서는 콘크리트부재의 내구성을 평가하기 위하여 균열폭에 대한 한계상태모형만을 제안하였다. 균열내구성의 한계상태함수는 허용균열폭  $W_R$ 과 사하중과 활하중 각각에 의한 실제 랜덤(random)균열폭  $W_D$ ,  $W_L$ 의 항으로 식(3)과 같

이 나타낼 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$g(\cdot) = W_R - (W_D + W_L) \quad (3)$$

여기서,  $W_R = W_{Rn} \cdot N_{Rw}$ ;  $W_D = W_{Dn} \cdot N_{Dw}$ ;  $W_L = W_{Ln} \cdot N_{Lw}$ , 이때,  $W_{Rn}$ 은 시방서에 의한 한계균열폭이고  $W_{Dn}$ ,  $W_{Ln}$ 은 사하중과 활하중 각각에 의해 측정된 균열폭이며  $N_{Rw}$ ,  $N_{Dw}$ ,  $N_{Lw}$ 는 각각  $W_{Rn}$ ,  $W_{Dn}$ ,  $W_{Ln}$ 을 추정하는데 있어서 불확실량과 편기를 조정하기 위한 보정계수를 나타낸다.

## 3) 사용성한계상태

사용성이란 부재 또는 구조물의 사용상 요구되는 기능을 발휘할 수 있는 능력을 일컫는 말로서, 사용성평가 항목에는 구조물의 초기변위(캠버), 동적처짐과 진동수, 차량에 생기는 가속도, 진동수(승차감), 파손사고로 인한 2차적 사고의 공중안전성(주로 고가교) 등과 같은 것들이 있다.

사용성평가항목 전반에 걸친 본 논문의 신뢰도 평가방법을 캠버, 처짐, 상대변위와 진동수에 대하여 식(4)~(7)과 같은 한계상태함수로 나타내었다.<sup>(4)</sup>

$$\text{- 캠 버 : } g(\cdot) = C_a - C \quad (4)$$

$$\text{- 처 짐 : } g(\cdot) = \Delta_a - \Delta \quad (5)$$

$$\text{- 상대변위 : } g(\cdot) = \delta_a - \delta \quad (6)$$

$$\text{- 진 동 수 : } g(\cdot) = f_a - f \quad (7)$$

여기서,  $C$ ,  $\Delta$ ,  $R$ ,  $\delta$ ,  $f$ =응답확률변량;  $C_a$ ,  $\Delta_a$ ,  $R_a$ ,  $\delta_a$ ,  $f_a$ =시방서 허용한계(확정량) 또는 허용확률변량을 나타낸다. 사용성 평가기준의 국내외 자료를 수집하여 규정치 수립에 대한 기초적 검토를 수행하고, 건전도평가시스템의 사용성 한계치로써 사용할 수 있다.

## 4) 내하력평가



① 규준내하력평가

기존에 사용되어오던 내하력평가방법은 실험 중, 실험항 관련 불확실량의 정도, 측정응력에 대한 응답비 등을 명확하게 포함시키지 못하기 때문에 구조물의 실제적인 내하력평가가 어려운 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 검증재시험에서 얻은 실용답비( $K_S$ )와 실층격계수( $i$ )를 명확하게 포함시킨 개선된 하중저항계수법에 규정되어 있는 휨과 축력을 동시에 받는 부재의 설계식으로 사용되고 있는 조합상관식을 내하력평가식으로 개선하여 식(8)과 같이 제안하였다.<sup>(11)</sup>

$P_u \geq 0.2 \phi'_c P_n$  일 경우,

$$\frac{\gamma'_d P_d + \gamma'_l P_l K_c R F}{\phi'_c P_n D_{F_c}} + \frac{8}{9} \left( \frac{\gamma'_d M_d + \gamma'_l M_l K_b R F}{\phi'_b D_{F_b} M_n} \right) = 1 \quad (8a)$$

$P_u < 0.2 \phi'_c P_n$  일 경우,

$$\frac{\gamma'_d P_d + \gamma'_l P_l K_c R F}{2 \phi'_c P_n D_{F_c}} + \left( \frac{\gamma'_d M_d + \gamma'_l M_l K_b R F}{\phi'_b D_{F_b} M_n} \right) = 1 \quad (8b)$$

여기서,  $P_d, P_l$ =각각 사하중과 활하중효과로 인한 공칭압축력;  $P_c$ =압축좌굴강도;  $M_d, M_l$ =각각 사하중과 활하중효과로 인한 공칭휨모멘트;  $M_n$ =공칭휨강도;  $\phi'_c, \phi'_b$ =각각 압축과 휨에 대한 강도감소계수;  $\gamma'_d, \gamma'_l$ =각각 사하중과 활하중계수;  $K_c, K_b$ =각각 압축과 휨에 대한 응답비;  $D_{F_c}, D_{F_b}$ =각각 압축과 휨에 대한 노후손상계수;  $RF$ (Rating Factor)= $P_n/P_r$ =공용내하율, 이때,  $P_r$ 과  $P_n$ 은 각각 내하력과 공칭강도를 나타내며,  $RF$ 는 식(8)을 풀어서 쉽게 결정할 수 있다.

한편, 안전계수( $\phi'_c, \phi'_b, \gamma'_d, \gamma'_l$ )는 신뢰성이론에 근거하여 현행시방서의 안전수준을 점검한 후 공학적 판단하에 구조형식별로 보정(calibration)을 실시하여 결정되는 값이다. 그러나 본 논문에서는 하중 및 저항관련 안전계수를 실용적으로 도로교시방서에서 적용하고 있는 계수를 그대로 적용하였다.

② 등가내하력평가

지금까지 교량의 내하력은 대부분 규준식에 의하여 평가되어 왔으나 단면의 강도가 휨과 압축(또는 휨과 전단)의 상관조합단면력에 의해서 지배받는 경우나 교량의 시스템내하력을 평가하여야 할 경우, 규준식에 의한 방법은 적용할 수 없다. 본 논문에서는 규준식을 사용하지 않고서도 신뢰성지수  $\beta$ 를 이용하여 바로 교량의 보유내하력을 손쉽게 구할 수 있는 보다 실제적이고 합리적인 방법을 사용하였다.<sup>(11)</sup>

2.3 자료 관리 시스템(DMS)

시스템의 데이터관리를 위한 DMS는 모든 관련데이터들의 축적, 검증, 해석 또는 수정을 위해 효과적으로 다루어 질 수 있도록 하여야 한다. DMS의 일반적인 요구사항은 관련 참고문헌<sup>(18)</sup>에 잘 나타나 있다. 그림 1에서 DMS에 필요한 중요한 사항들을 요약하면 다음과 같다. 1)보수이력; 2)계측시스템으로부터 획득된 교량의 응답 및 외부환경적 하중; 3)구조물 기본 데이터; 4)시스템 응답특성; 5)현장 계측데이터; 6)현장 정밀조사 데이터; 7)전문가적 판단 및 의견 등

2.4 전·후 처리(PPP)

PPP는 시스템의 사용자와 친숙한 작업과 편의를 위한 모듈이 포함되어있어야 하는데, 소프트웨어 시스템은 사용자 중심의 GUI환경을 제공하고 사용자가 친숙한 Windows95 운영체제에서 다중작업이 가능하도록 개발되어야 한다.

### 3. 시범소프트웨어의 개발 및 응용

#### 3.1 적용대상교량

본 논문에서 개발된 전산화 M&A를 위한 시범 소프트웨어는 시범적으로 진도대교를 적용대상으로 고려하였으며 기타 대형교량에 확장, 응용될 수 있도록 구성되었다. 그림 3은 진도대교의 일반 단면을 나타내고 있다.<sup>(2)</sup>

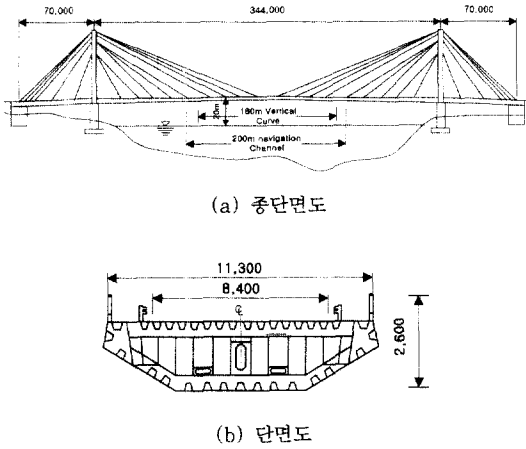


그림 3. 진도대교의 일반단면

#### 3.2 소프트웨어 시스템 구성

전산화 유지관리를 위한 시범소프트웨어는 제안된 M&A 모형에 기초하여 개발되었다. 또한 본 대형교량의 전산화 M&A 소프트웨어는 국내 주요 대형교량별로 각각의 시스템을 구성하고 종국적으로 이를 하나의 통합된 시스템에서 관리할 수 있도록 구성되어 있다. 하나의 독립된 시스템의 기본적인 구성은 다음 그림 4와 같고, 핵심적인 부시스템으로서 전술한 GMS와 SAS를 포함하고 있다.

전술한 바와 같이 GMS는 모니터링데이터를 평가하고 여러 가지 센서들로 구성된 계측시스템으로부터 전송된 계측데이터의 확률통계적 분석에 기초하여 단기이상거동감지와 장기거동예측 모듈을 통하여 이상거동을 감지하도록 구성되어 있다. GMS에 의해 이상거동이 감지되면 현장의 교량관리자와 제어센터의 기술자의 판단아래 그림 4와 같이 구조해석 모듈, 시스템응답 모듈, 신뢰성 및 건전성평가 모듈로 구성된 SAS를 실행시킬 수 있다. 교량의 신뢰성과 건전성평가는 정·동적 실험으로부터 얻어진 계측데이터를 통한 응답비해석과 구조해석모듈로부터 계산된 결과를 이용하여 산정할 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 교량의 최적 유지관리 의사결정을 수행하게 된다.

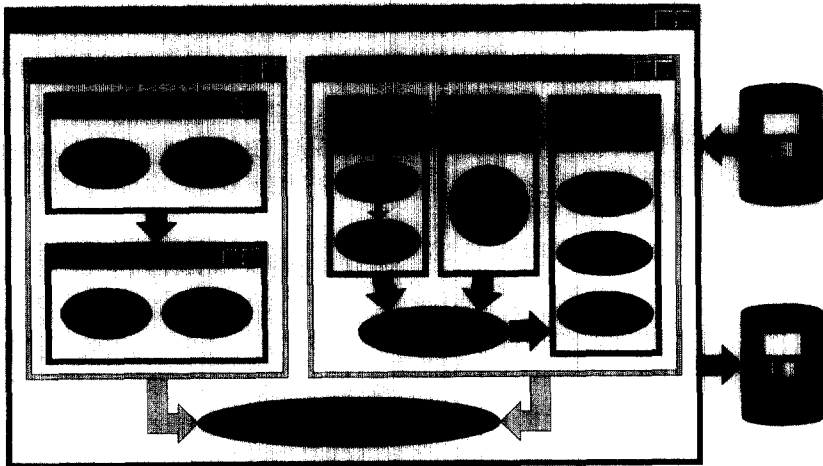


그림 4. 소프트웨어 시스템 구성도

### 3.3 소프트웨어 시스템 구축환경

본 연구에서 개발된 시범소프트웨어는 3.4절의 실행예에서 볼 수 있듯이 사용자중심의 GUI환경을 제공하고 있으며 Windows95 환경에서 개발되어 다중작업(multi-tasking)이 가능하도록 되어 있다. 시범소프트웨어에 사용된 프로그램의 MMI(Man Machine Interface)로는 Visual Basic5.0을 사용하였고 SDI(Single-Document Interface)를 이용한 대화식으로 구축되었다. 신뢰성해석을 위해서는 AFOSM 알고리즘이 사용되었고 신뢰성해석에 필요한 수학적 함수는 IMSL을 이용한 Fortran Power Station이 사용되었다. 또한 Active X 컨트롤을 이용하여 측정된 데이터를 통계적 방법을 이용하여 분석하고 이를 히스토그램으로 표현하는 등 각종 사용자 위주의 그래픽을 제공할 수 있도록 구성하였다. 구조해석을 위해서는 범용구조해석 소프트웨어인 SAP90을 데이터인터페이스 프로그램을 작성하여 주프로그램에 연결시켜 사용하였다.

### 3.4 프로그램의 실행결과 및 고찰

그림 5는 본 논문에서 개발한 시범소프트웨어의 초기실행화면으로 현재는 그 대상교량이 진도대교에만 국한되어 있지만, 차후 기타 교량의 전산화 유지관리의 수행을 위해 계속해서 발전시켜

나갈 수 있다. 초기실행화면에서 진도대교를 선택하고 시작버튼을 클릭하게 되면, 프로그램관리자에 해당하는 주화면이 나타나고 GMS와 SAS는 여기서 풀다운 메뉴 방식으로 선택이 가능하다. 그림 6은 GMS에 의한 교량 관리의 예를 보여주고 있다. 하단의 대화상자에는 교량의 상태를 나타내고 있고, 우측 하단의 대화상자에 점근형(asymptotic) 극치통계에 의한 해석결과가 이미 설정된 설계치 초과확률로써 보여주고 있다. 그림 7~10은 SAS에 의한 구조해석, 응답비해석 및 신뢰성과 건전성 평가의 실행예를 보여주고 있다. 그림 7은 사전에 계획된 하중재하위치에 따라 자동재하시험분석을 위한 구조해석 초기화면으로 하중의 크기와 케이블의 탄성계수를 변경시켜 구조해석을 수행할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 8은 입력된 조건에 따라 주프로그램에 연결된 구조해석프로그램이 자동실행된 화면을 나타내고 있다. 그림 9에서는 측정된 계측치와 구조해석모듈을 통해 구해진 해석치를 비교하여 자동적으로 응답비분석이 실행된 예를 보여주고 있으며, 그림 10에서는 앞선 해석을 바탕으로 한 목표신뢰성지수에 대한 신뢰성지수와 파괴확률 그리고 규준식 및 신뢰성방법에 의한 내하력평가결과를 보여주고 있으며 하단의 대화상자에서는 SAS의 실행에 따른 의사결정 결과를 나타내고 있다.

이러한 시범소프트웨어는 모니터링시스템에 의해 획득한 데이터로부터 교량의 신뢰성과 건전성

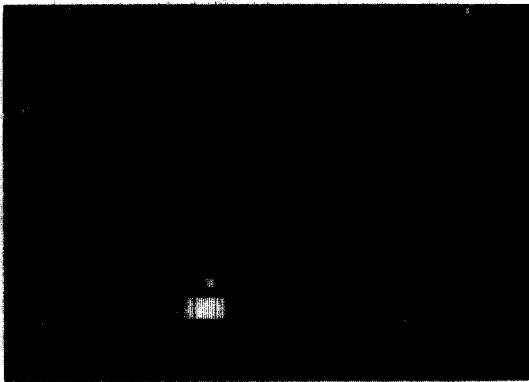


그림 5. 시작화면

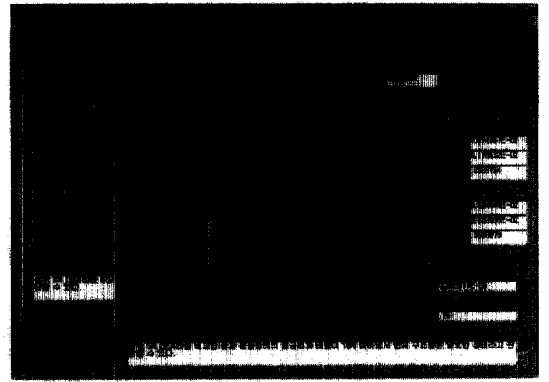


그림 6. GMS

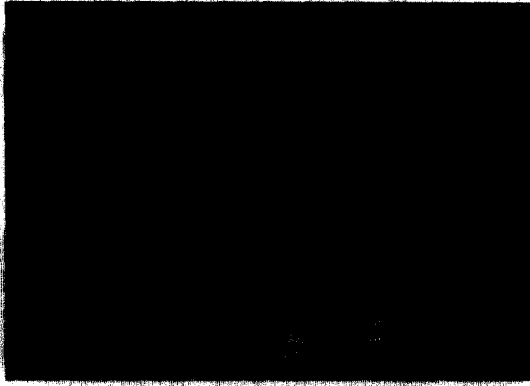


그림 7. SAS : 구조해석 초기화면



그림 8. SAS : 구조해석

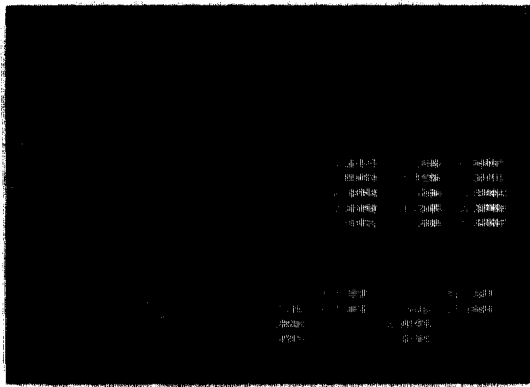


그림 9. SAS : 시스템 응답해석

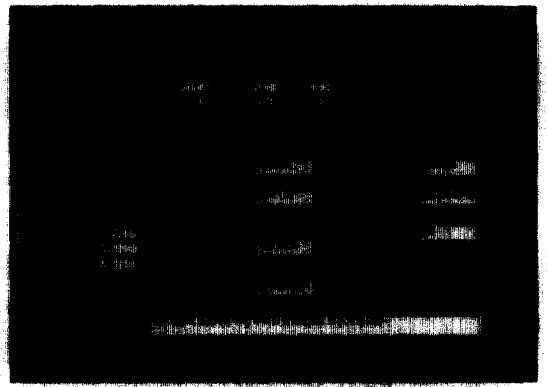


그림 10. SAS : 건전성평가

의 실시간 평가와 함께 교량의 검증재하시험에 의한 평가시스템으로부터 실시간 이상거동을 감지할 수 있음을 보이고자 하였다. 이러한 시스템은 사장교의 전산화 유지관리를 위해 센서와 계측시스템으로 연결되었다. 계측데이터를 기존 교량에 이미 설치된 계측시스템으로부터 얻어진 단기간의 계측치를 사용하였지만, 정상상태의 표준데이터는 공용후의 일정기간동안 계측된 데이터의 분석을 통해 얻어져야만 한다. 만약 SI, ANN 등과 같은 손상평가기법이 가까운 장래에 이용가능하게 된다면 현재의 시스템에 쉽게 적용될 수 있다. 이상에서 고찰한 바와 같이, 본 논문에서 제안한 유지관리 모형은 대형교량의 전산화 유지관리시스템의 개발을 위한 시범소프트웨어로써 이용할 수 있는 상태이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 사장교와 현수교 등 대형교량의 전산화 유지관리를 위한 시스템모형과 시범소프트웨어의 개발에 대한 새로운 접근방법과 개념을 제안하였다. 이를 바탕으로 대형교량의 전산화 유지관리를 위한 최적의 통합시스템을 제안하였으며, 제안된 모형에 기초하여 M&A를 위한 GUI를 이용한 시범소프트웨어가 사장교의 전산화유지관리를 위해 개발되었고 진도대교의 평가를 위해 적용되었다. 본 논문에서 개발된 시스템모형 및 시범소프트웨어는 향후 사장교나 현수교와 같은 대형교량의 전산화 유지관리시스템의 개발에 활용할 수 있을 것이다.

## 감사의 말

본 논문의 연구내용은 한국과학재단 핵심전문 연구(과제번호: 961-1203-011-2)의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 연구비를 지원하여준 한국과학재단에 진심으로 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) 건설교통부, 1996, 도로교표준시방서
- (2) 건설부, 1993, 진도대교 안전진단
- (3) 도로공사, 1997, 특수교량의 계측시스템 구축과 시공법 개발 연구(IV), 도로연구소
- (4) 이승재, 1994, 고속철도 교량의 전산화 유지관리를 위한 신뢰성에 기초한 건전성평가 모형, 한양대학교, 공학박사학위 논문
- (5) 조효남, 1998, 대형교량의 유지관리를 위한 계측, 모니터링, 통제시스템 개발, 한국과학재단, 96 핵심전문연구과제 최종보고서
- (6) AASHTO, 1994, AASHTO LRFD Bridge Design Specification.
- (7) Andersen, E. Y. and Pedersen, L., 1994, Structural monitoring of the Great Belt East Bridge, Strait Crossings 94, pp.189-195.
- (8) Ang, A. H-S. and Tang, W. H., 1984, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- (9) Chang, T. Y. P., J. Kuang, J. S., and Chang, C. C., 1995, Development of a Bridge Monitoring System, International Symposium on Public Infrastructures Systems Research, Seoul, Korea, pp.203-209.
- (10) Cho, H. N. and Lee, S. J. and Kang, K. K., 1994, Assessment of System Reliability and Capacity-Rating of Composite Steel Box-Girder Highway Bridges, Jour. of Stru. Mech. And Earthquake Eng., JSCE, No. 495/1-28, pp.13-20.
- (11) Cho, H. N., Lim, J. K. and Park, K. H., 1997, System Reliability and System Reliability-Based Carrying Capacity Evaluation of Cable-Stayed Bridges, 7th International Conference on Structural Safety and Reliability(ICOSSAR 97)(in press).
- (12) Ellingwood, B., Galambos, T. V., Mac Gregor, J. C. and Cornell, C. A., 1980, Development of a Probability-Based Load Criterion for the American National Standard A58, National Bureau of Standard SP-577, Washington D. C.
- (13) Moss, R. M. and Matthews, S. L., 1995, In-service Structural Monitoring a state-of-the-art review, the Structural Engineer, Vol. 73, No. 2, pp.23-31.
- (14) Nowak, A. S., 1994, Calibration of LRFD Bridge Code, J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 8, pp.1245-1251.
- (15) Nowak, A. S. and Tharmabala, T., 1988, Bridge Reliability Evaluation Using Load Tests, J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp.2268-2279.
- (16) Shin, J. C., Cho, H. N., and Chang, D. I., 1988, A Practical Reliability-Based Capacity Rating of Existing Road Bridges, Structural Eng. And Earthquake Eng., JSCE, Vol. 5, No. 2, pp.245s-254s.
- (17) Wieland, M., 1987, Instrumentation Aspects of Cable-Stayed Bridges, International Conference on Cable-Stayed Bridges, Bangkok, pp.983-996.
- (18) Yeung, K. C. et al, 1995, Wind And Structural Health Monitoring System (WASHMS) for Lantau Fixed Crossing-Part 1 : System Planning and Design, Bridges Into The 21st Century, pp.539-548.

(접수일자 : 1998년 7월 11일)