

鋼橋梁의 安全診斷과 維持補修方法

尹 楨 邦*

Safety Evaluation and Maintenance Methods for steel Bridges

C. B. Yun*

1. 머릿말

교량, 항만, 발전소 등의 토목구조물들은 사회기간시설로서, 구조적 노후, 예기치 못한 사고 등으로 사용이 중단되는 사태가 발생될때, 경제적, 사회적으로 큰 손실과 혼란이 야기될 수 있는 매우 중요한 구조물이다. 따라서, 이 구조물들은 계획, 설계, 시공단계에서만이 아니고 사용중에도 엄격히 유지관리되어야 한다. 특히, 교량은 국가의 교통망을 잇는 중요한 구조물이다. 그러나, 국내의 기설교량들은 최근의 폭주하는 교통량의 증가와 장기간의 사용에 의한 노후화로 인하여 심각한 손상을 받은 경우가 많아서, 이들 교량의 보수, 교체에 막대한 비용이 소모되는 단계에 이르렀다. 이는 국내에서만인 문제가 아니며, 미국의 경우 FHWA(Federal Highway Administration)의 보고에 따르면, 약 578,000여개의 도로교중 약 42%가 손상을 입어 심각한 상태에 있는 것으로 보고된 바 있다. 따라서, 국내·외적으로 교량의 유지관리에 관한 기술의 연구개발과 함께 집중적인 투자가 요구되고 있다.

현대의 교량은 이의 재료에 따라 크게 강교량과 콘크리트교량으로 구분되고, 그중 강교량은 특히 장시간교량의 경우 시공과정에서 품질관리가 쉽다는 측면에서 선호되어 왔으나, 유지관리측면에서는 부식이나 피로손상의 누적과 같은 난점이 존재한다.

여기서는 강교량의 유지관리, 특히 안전진단에 관하여 토의하려 한다.

교량의 유지관리는 크게 안전진단, 보수, 복구 및 교체의 분야로 대별해 볼 수 있다. 그림 1과 같은 여러가지의 안전진단방법을 통해 추정된 실제 교량의 구조적 상태를 바탕으로, 잔여사용기한동안의 경제성을 고려하여 보수, 복구 및 교체될 구조 및 방법을 선정하게 된다. 기설 교량의 안전진단에는 보통 다음의 3단계가 포함된다.

- 1) 하중과 구조강성의 지속적 관찰 및 계측
- 2) 구조물의 현재 재하력 평가
- 3) 누적손상정도의 추정

위의 작업에는 실험을 통한 계측기술, 구조해석 기술, 실험결과를 분석하는 기술 등 매우 다양한 기술을 필요로 한다. 따라서, 토목공학내의 제반기술만이 아니고 기계, 재료, 전자·계측공학 등 다방면에 걸친 기술협력이 요구되는 분야라 할 수 있다.

안전진단의 종류

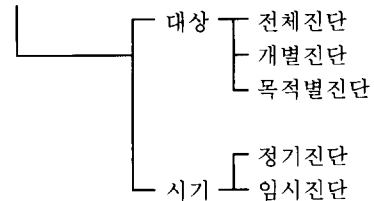


그림 1. 안전진단의 종류

* 비회원, 한국과학기술원 토목공학과

2. 안전진단방법의 개요

교량의 유지관리분야에서 안전진단은 유지관리 계획의 자료를 제공하는 분야라는 측면에서 비중이 매우 큰 분야이다. 안전진단에 사용되는 계측방법들은 정확도가 우수하고, 경비가 저렴하고, 오래도록 유지되며, 설치가 용이하고, 아울러 교량의 사용에 지장을 주지 않아야 하는 조건들을 만족시켜야 한다. 현장계측을 통해 검토되는 사항은 일반적으로 다음과 같다.

- a. 실제 교량의 응력, 변형율, 균열-크기와 위치, 변형등의 외적상태
- b. 교량의 내하력
- c. 피로등의 시간경과에 따른 축적된 손상의 평가
- d. 교량의 잔유수명 추정
- e. 하중의 시간적 변동상황
- f. 교량안전도에 대한 확률적 평가를 위한 극한 하중상태

각 항목은 그 필요성에 따라, 적절한 방법을 선택하여 평가된다. 이때 사용되는 실험적 방법은 크게 그림 2와 같이 3 가지 경우로 분류할 수 있다.

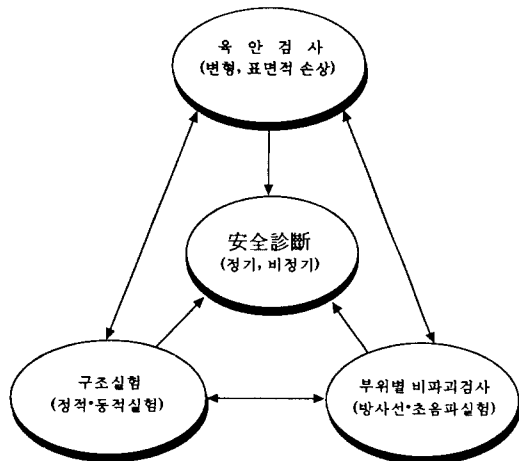


그림 2. 교량 안전도진단의 실험적 방법

그림 2에 보인 방법들은 공통적으로 광의의 비파괴검사방법(Non-destructive Test)에 포함된다. 비파괴검사란 시험체에 손상을 주지않도록 간접적인 방법이나, 탄성범위내의 계측을 통해 구조체의

상태를 추정하는 방법이다. 이 방법들의 특성을 정리하면 아래와 같다.

첫번째, 육안검사방법은 표면적인 균열이나 부식등과 구조형상의 변화 등을 조사하는 방법으로 사용된다. 이 방법은 구조물의 전반적인 상황과 구조물의 국부적 결함도 아울러 검토할 수 있는 경제적인 방법이라는 장점이 있다. 그러나, 구조물의 내부적인 결함이나 피로손상을 조사하는 방법으로는 부적합한 방법이다. 두번째, 국부적인 비파괴검사방법은 간접적인 방법으로 Microwaves, Lasers, X-rays and gamma ray등의 파장 300 mm(microwaves) 10-14mm(gamma ray)의 파동중에서 적절한 파장의 것을 선택하여, 이 파동의 응답특성으로부터 교량의 결함을 조사하는 방법이다. 이 방법은 국부적인 재료의 결함을 조사하는 방법으로, 콘크리트의 균열이나 강교량의 용접부의 결함을 조사하는 방법으로 적합하다. 그러나, 구조전반의 위험도와 연관시키기에는 충분하지 못하다는 단점이 있다. 세번째, 변위 및 진동측정방법은 직접적으로 구조계의 변위나 진동상태를 계측하여 분석하는 방법으로 구조전반에 대한 물리량의 변화를 직접 찾아낼 수 있는 장점이 있으나, 국부적인 손상을 직접 측정하지 못하는 단점이 있어왔다. 그러나, 측정된 물리량으로부터 국부적인 손상을 도출해내는 방법이 점차로 발달함에 따라 앞으로 유용한 방법으로 정착하리라 판단된다.

계측을 통해 구해진 데이터를 바탕으로 안전진단에서 필요한 구조강성계수의 변화량을 추정하기 위해서는 아래와 같은 기술과 연계되어야 한다.

- a. 극한상태에 놓여있는 부재나 요소를 추정하는 기술
- b. 재난의 원인을 분석하는 기술
- c. 계속적으로 교량의 기능을 모니터하는 기술
- d. 파괴의 위험을 감지하고 경고하는 기술
- e. 다른 교량의 설계나 위험도의 지침작성을 위한 통계적 데이터 작성 및 처리기술

3. 비파괴검사기술

비파괴 검사법에서 사용되는 방법들은 Liquid Penetration Test, Laser, X-ray, Gamma-Ray등을 사용하는 방법, Electricity, Magnetism을 사용하는 방법, Sonic, Ultra-sonic Test등으로 매우 다양하다. 강교량의 경우는 용접부의 손상이 주로 문제가 되

는데, 용접부의 표면과 내부에 대해 각각 용접표면은 육안조사와 Magnetic, Liquid Penetration방법이 주로 사용되고, 용접내부는 방사선 투과나 초음파 탐상이 주로 사용된다. 용접부표면검사 방법으로 대표적인 Liquid Penetration Test는 약품을 용접표면에 발라 약품이 용접부에 스며드는 정도를 파악하는 방법이며, 용접내부의 결함을 조사하는 방사선 투과나 초음파 탐상방법은 그림 3과 같이 파장의 굴절정도를 파악하여 용접부의 결함을 찾아내는 방법이다. 비파괴 검사에 의한 응답을 해석하여 길이가 긴 부재의 물성치나 결함을 찾아내는 대표적인 방법으로는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves)방법이 있다.

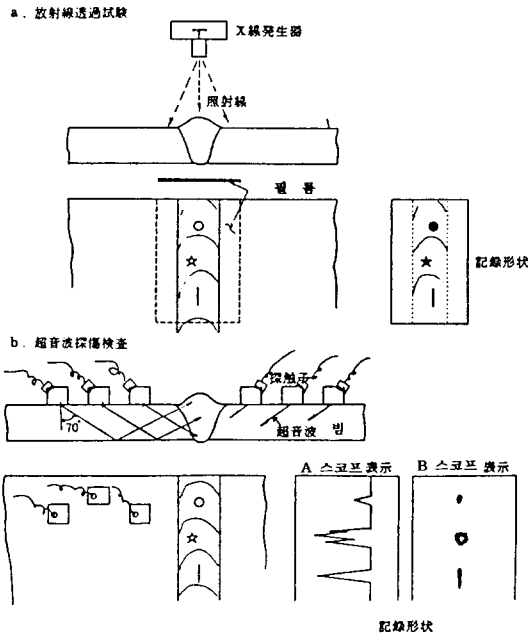


그림 3. 용접내부결함탐색방법

4. 교량의 거동측정방법

교량의 거동을 계측함으로써 교량의 안전도를 평가하는 방법은 구조거동을 직접 관찰함으로써 교량에 대한 구조공학적인 평가가 직접적으로 이루어질 수 있다는 장점이 있다. 이 방법은 실험과정에서 교량에 가하는 하중의 형태에 따라 크게 정적방법과 동적방법으로 분류된다.

정적인 방법으로는 그림 4의 WIM (weigh-in-

motion)방법등과 같이 차량등을 이용하여 하중을 재하하고, 이를 변형도계측기(Strain Gage, 광학계측기등)로 변형도를 계측한 후, 영향선(Influence Line)이나 재하력에 대한 평가계수로 환산하여 나타내는 방법이다.

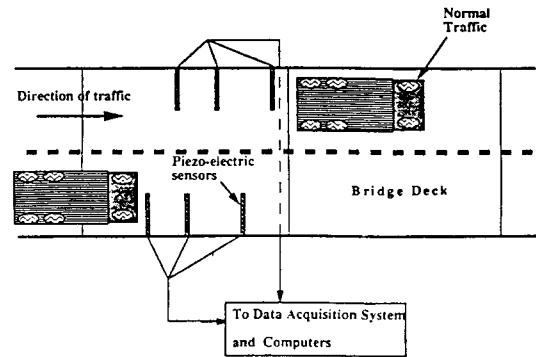


그림 4. 활하중 측정을 위한 Weigh-in-Motion

동적인 실험방법으로는 교량의 자유진동특성을 구하는 방법이 주로 사용된다. 이 방법은 동적하중을 가하고, 그 응답을 계측하여 교량의 고유진동수, 감쇠비, 진동모우드를 구하는 과정으로 이루어진다. 동적인 실험방법은 상시미동측정방법과 강제진동실험방법등이 있다. 강제진동실험방법은 가해지는 하중에 따라 충격하중실험, Sine파 실험(Sweep Sine Test)로 크게 나누어진다. 이렇게 구해진 동적거동에 대한 데이터(신호)는 다음절에서

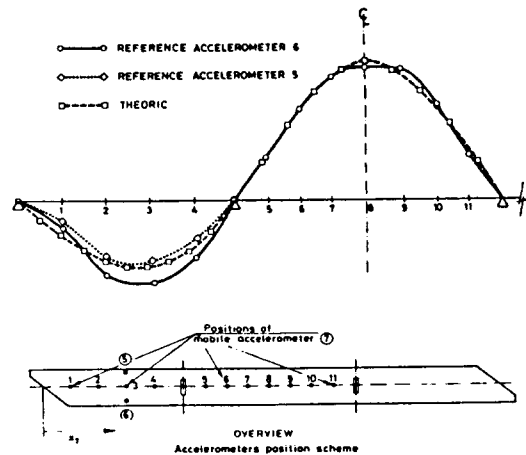


그림 5. 동적특성 추정을 위한 가속도계 설치와 구해진 모우드 형상의 예

설명될 다양한 신호처리 방법을 통해 계속오차로 인한 신호의 불확실성을 감소시키고, 목적하는 구조계수 값을 추정하는 과정을 통해 안전진단에 필요한 데이터로 확보된다. 그림 5는 교량에 설치된 가속도계와 그로부터 구해진 모우드 형상의 예이다.

여기서 보다 주목해야 할 부분은 계속기술인데, 이는 안전진단뿐만 아니라 정보화시공분야에서도 매우 중요한 사항으로 교량의 시공, 유지관리 모두에서 핵심기술이다. 이러한 계속기술이 타 분야와 복합화된 형태가 종합계측체계(Integrated Sensor Systems)이다. 이 체계는 각종 센서를 적절히 통제하고, 계측결과를 취합하며, 컴퓨터와의 연계를 통해 구조해석결과와 비교하는 등의 복합적인 기능이 수행되도록 조직된 것으로, 현장에서의 안전도 진단 데이터의 효용성을 높이고, 추정결과와 정확도를 향상시키도록 돕게 구성된다.

5. 신호처리와 손상도추정방법

각종 계측기(가속도계, 속도계, 변위계등)를 통해 구해진 신호는 그 자체로는 큰 의미가 없다. 이 신호들을 적절한 방법으로 처리하여, 정확성을 높이고, 원하는 값(고유진동수, 진동모우드 등)으로 환산하는 방법을 포괄적으로 신호처리라 하고, 특히 후자의 경우를 System Identification이라 한다.

신호처리의 방법으로는 PCA(Principle Component Analysis), Pattern Recognition, Feature Extraction 등의 방법이 사용된다. 이 방법들은 구체적으로는 통계적 추정방법, Fuzzy 이론, Neural Network 이론등의 다양한 방법이 결부되어 사용되고 있다.

System Identification분야의 대표적인 경우가 결함추정방법(Failure Detection 또는 Damage Estimation)이다. 이 방법은 구조물의 변화, 특히 동적 구조모형의 구조계수들의 변화를 추정하는 방법으로, 먼저 구조물의 동특성을 구해내고, 이를 통해 구조물의 결함이나 균열 등에 의한 구조계수의 변화정도를 추산하는 방법이다. 이 방법들은 기존의 구조실험방법에 의한 안전진단의 방법이 국부적 구조변동성을 나타내는 데에는 미흡했던 점을 보완하여, 구조 각 부분의 변동성(결함, 손상등)으로 환산해내는 방법이라 할 수 있다. 현재 이 분야에서 다양한 연구가 수행중이다.

6. 교량 안전진단 사례 및 기술동향

6.1 국내 사례

지금까지의 국내 교량의 유지관리체제는 문제가 발생한 교량구조물들을 위주로 이의 안전진단과 대응책강구의 방법으로 진행되어 왔으며, 기타 교량에 대해서는 다소 형식적이고 단순한 점검만이 수행되어 온 것이 현실이다. 더우기 전문인력의 부족, 안전진단 기술의 낙후 및 경험부족, 유지관리 예산의 절대부족, 관리자측의 인식결여 등 여러가지 이유때문에 체계적이고 합리적인 안전진단이 수행되지 못하여 왔다.

시간이 30m이내의 단경간 교량에 대한 안전진단은 건설부, 지방자치단체 등 관할 관청이 주도하여, 오래전부터 실시되어왔다. 이 작업은 외관조사와 비파괴조사를 실시하고, 구조계산을 통하여 얻은 결과를 토대로 구조물의 내하력을 산정하는 방법으로 추진되었다⁹⁾. 외관조사에서는 교량의 각 부분별 여러 손상평가기준을 제시하였으며, 비파괴조사에서는 차량재하를 통한 정적 및 동적시험 및 해석방법을 보여주었다.

돌산대교, 진도대교, 남해대교 등을 비롯한 장대교량들에 대하여서 근래에 들어 안전진단이 수행되었다¹⁰⁻¹²⁾. 용접부위의 균열조사를 위하여 Checking hammer를 이용한 음향검사방법과 침투액을 사용한 침투탐상방법을 도입하였으며, 케이블의 장력추정을 위한 시험과 차량재하시험을 통한 정적, 동적시험 결과를 해석결과와 비교함으로써 구조물의 내하력 평가와 더불어 피로, 내풍, 내진에 대한 안전도를 평가하였다. 특히, 남해대교 안전진단의 경우, 정적 시험을 통하여 응력과 처짐에 대한 영향선을 구하여 유한요소법으로 구한 해석결과와 비교함으로써 이들을 이용한 구조물의 안전진단 가능성을 보여주었으며, 차량주행시험, 단차낙하시험, 상시미동시험 등 여러 동적시험방법들의 장·단점을 비교, 제시하였다. 진도대교 안전진단의 경우에는 확률론적 구조신뢰도에 입각한 구조물의 내하력 평가방법을 도입하였다.

6.2 기술개발의 방향

미국, 유럽, 일본 등 선진국에서도 노후 교량의

수가 급증함에 따라 더욱 합리적이고 체계적인 안전진단 및 유지관리 기술의 개발을 위하여 큰 노력을 경주하고 있다. 현재 선진 각국의 추세를 보면, 교량의 유지관리비를 포함한 총 건설비용의 최소화의 필요성을 크게 인식하고 있다. 특히 장대 교량의 경우 초기계획, 설계, 시공단계에서부터 계측 및 모니터링과 안전진단을 위한 점검 및 유지보수 설비 등을 완벽하게 계획하고 설치하므로써 불가항력적인 자연재해를 제외하고는 구조물의 파손이나 파괴를 사전에 방지하여 대규모의 보수 및 복구작업이 없는 유지관리체계를 지향하고 있다¹⁷⁾.

아울러, 기존에 개발된 여러 안전진단 방법의 체계화 뿐만 아니라 구조신뢰성에 입각한 피로 및 내하력 평가방법의 개발, 좀더 정확한 동적시험 자료를 얻기 위한 계측기술의 개발, 구조계의 전반적 노후 손상도의 정의 및 평가방법의 개발, 정적-동적 시험자료의 병용에 의한 분석기법, 인공지능을 이용한 손상추정기법의 개발, 국부손상에 대한 비파괴 시험기법의 개발 등 다양한 방향으로 기술개발 및 투자가 이루어지고 있다.

7. 맺 음 말

여기서는 강교량을 중심으로 시설 교량구조물의 안전도 진단방법에 대하여 토의하였다. 산업활동의 기간이 되는 교량구조물의 안전성확보는 매우 중요한 일이며, 이를 위하여는 구조공학, 기계공학, 전자·계측공학 등 다방면의 첨단기술이 협조적으로 연구, 개발되고 운영되는 것이 요망된다. 아울러, 이러한 대형구조물들의 안전진단 및 보수·유지대책은 이들의 계획·설계 및 건설단계에서 부터 고려되어 필요한 합리적인 대책이 강구되어야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Andrzej S. Nowak : Diagnostic Procedures for Bridges, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Baltimore, Maryland, U.S.A., 1990
2. 鋼橋の維持管理のための設備 : 鋼構造シリーズ

1. 日本土木學會, 1987
3. 鋼上版の疲勞, 鋼構造シリーズ 4, 日本土木學會, 1990
4. R. W. Nichols : Non-destructive Examination in Relation to Structural Integrity, Applied Science Pub., London, 1979
5. Tsuneshichi Tanaka, Masahiro Jono and Kenjiro Komai : Current Research on Fatigue Cracks, Current Japanese Materials Research Vol. I, 1987
6. Tsuneshichi Tanaka, Satoshi Nishijima and Masahiro Ichikawa : Statistical Research on Fatigue and Fractures, Current Japanese Materials Research Vol. 2, 1987
7. John C. Wilson and Tao Liu : Ambient Vibration Measurements on a Cable-Stayed Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.20, 1991
8. Mahmood M. Samman and Mrinmay Biswas : Vibration Testing for Nondestructive Evaluation of Bridges. I : Theory, II : Results, J. of Str. Eng., ASCE, Vol.120, 1994
9. 교량내하력조사(구조물안전도연구) : 건설부 국립건설시험소, 1985, 12.
10. 남해대교의 안전진단 : 건설부, 1993, 10.
11. 진도대교의 안전진단(최종보고서안) : 한국건설기술연구원, 1993, 9.
12. 돌산대교 안전진단 용역(최종보고서) : 연세대학교 산업기술연구소, 1993, 9.
13. Inspection of Fracture Critical Bridge Members : Report No. FHWA-HI-88-038, 1986.
14. 민진기, 김형기, 홍규선, 윤정방 : 구조물 손상의 추정을 위한 Inverse Modal Perturbation, 대한토목학회 논문집, 제10권 제4호, 1990.12.
15. C-B.Yun, C-G.Lee and H-J.Lee : Parameter Estimations of Structural Dynamic Systems, ASCE Speciality Conference on Probabilistic Methods in Civil Engineering, Denver, USA, July, 1992.
16. K-S. Hong and C-B. Yun : Improved methods for frequency domain identifications of structures, Eng. Struct., Vol. 15, No. 3, 1993
17. 龜田弘行 外 : 土木構造物の診断, 山海堂, 1991.