

특집

구조물 안전 진단

스마트 기술을 이용한 구조물과 안전진단 기술

손 훈*

(한국과학기술원 건설 및 환경공학과)

1. 머리말

2009년 10월 19일, 총 길이 18.4 km, 주경간거리 800 m, 세계 5위 규모의 사장교인 인천대교가 개통되었다(그림 1). 산업계에서는 이를 한국 토목의 우수성을 상징하는 구조물이 될 것이라며 극찬하였다. 최근 한국 토목산업은 해외의 대형 공사를 맡게 되면서 자동차, 반도체, 조선 등의 주요 수출종목과 대등한 양적 성장을 이루었다. 토목산업은 그 규모가 거대하고 많은 비용이 소요되며, 그 부가가치 또한 엄청나다. 인천대교의 경우 건설비용이 2조 5천억원으로 신형 소나타가 2천만원 안팎인 것을 생각하면 그 규모를 짐작할 수 있다. 더욱이 최근에 인천대교가 개통에 따라 수도권 남부 교통과 물류환경이 크게 개선되어 연간 4천8백억원의 물류비용이 절감될 것으로

예상된다. 또한 관광 산업 및 인근 송도 신도시 개발과 관련된 효과까지 고려한다면 인천대교의 생산유발 효과는 3조 8천9백억 원, 고용유발은 4만 8천여명에 이를 것으로 분석되고 있다. 이에 맞물려 인천대교의 성공적인 건설로 인하여 한국 건설업체의 해외 공사 수주 비율이 더 높아질 것으로 기대된다.

이처럼 훌륭한 구조물을 건설하는 것도 중요하지만, 이에 못지않게 그 관리 또한 경제적, 사회적 측면에서 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 사회기반시설은 우리의 일상생활과 직접적인 연관성이 있기 때문에 토목 구조물이 붕괴되면 그 피해 또한 상상을 초월한다. 국내에서는 94년 성수대교, 95년 삼풍백화점 붕괴사건과 2005년 허리케인 카트리나로 인한 미국 뉴올리언스 제방 붕괴가 그 대표적인 예이다. 뉴올리언스 제방 붕



그림 1 인천대교



그림 2 미네소타 I-35W 교량 (7명 사망, 60여명 부상)

* E-mail : hoonsohn@kaist.ac.kr / (042) 350-3625

피로 인한 침수로 만 여명의 사망자가 발생하였고 2000억 달러의 재산피해가 발생한 바 있다.

사회기반시설 구조물뿐만 아니라 항공기, 철도, 선박 등의 기체 결함으로 인한 사고 또한 큰 인명피해와 사회 경제적 손실을 가져온다. 운항 중인 비행기의 경우, 항공기 동체의 조그마한 손상은 승객과 승무원의 생명과도 직결되는 문제이다. 따라서, 이에 대한 대처 기술 개발은 기계 및 항공우주공학에서도 뜨거운 감자로 대두되고 있다.

구조물 안전진단기술은 구조물의 붕괴로 인한 대규모의 피해를 방지하기 위해, 구조물의 손상을 탐지하기 위한 기술을 연구하고 개발하는 분야이다. 구조물의 손상을 감지하여 이에 미리 대처하고 그 영향을 줄인다면 구조물의 붕괴로 인한 대규모의 경제적 및 인명피해를 최소화 할 수 있을 것이며 보다 안정적인 구조물의 사용성을 보장받을 수 있다.

2. 최신기술 개발동향

기존의 스마트 기술을 이용한 구조물 안전진단 기법들은 구조물의 손상이 없을 때 획득된 기저자료들과 새롭게 측정된 자료들을 비교하여 구조물의 손상을 감지하는데 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 이러한 안전진단 방법론들은 구조물에 가해지는 다양한 환경 변화 및 사용 상태의 변화에 대한 영향을 고려하지 않고 있기 때문에

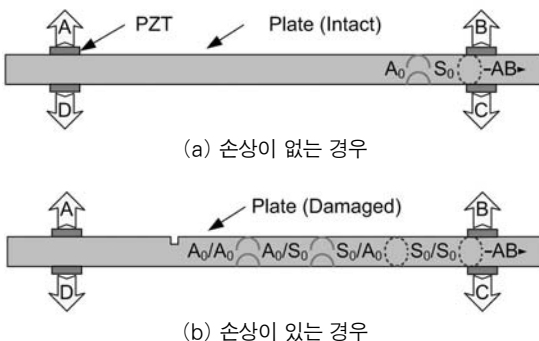


그림 3 불연속 면에서의 모드변위

실제 구조물에 적용하기에는 어려움이 있다. 구조물의 손상을 진단하는 시점에서 구조물 주변의 온도, 습도 등의 환경영향으로 인해 측정된 신호가 초기 측정된 기저자료와 비교해 변화가 생길 수밖에 없다. 이는 결과적으로 정상적인 구조물임에도 불구하고 구조물에 손상이 존재한다고 오보할 수도 있는 가능성이 있다는 것을 의미한다. 이와 반대로, 구조물에 손상이 있음에도 불구하고 구조물이 안전하다는 판단을 함으로써 추후 더욱 심각한 문제를 야기할 수도 있다.

기존의 방법론들이 가지는 이와 같은 단점을 극복하기 위해 기저자료에 의존하지 않고 특정 시점에서 얻은 자료만으로 구조물의 손상유무를 판단 할 수 있는 즉시적 손상 감지 기법이 제안되었다(그림 3). 이 기법은 램파가 구조물의 손상 부위를 만날 경우에 발생하는 모드변위를 시간 영역에서 추출함으로써 즉각적인 손상감지가 가능한 기법으로 학계의 큰 주목을 받았다.

이 기법은 각각의 유도파들의 반사, 회절, 굴절 등으로 인해 파의 중첩, 상쇄가 발생하여 측정결과 해석과, 복잡한 구조물에 적용하는데 어려움이 있다는 단점을 가지고 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 획득된 자료를 주파수 영역으로 변환시켜 모드변위를 감지하는 기법이 개발되었다. 이 기법은 기존의 무기저 기법을 에너지 관점에서 해석하므로 손상의 위치, 숫자 등에 구애받지 않고 국지적 구조물의 손상을 감지할 수 있다는 장점도 가지고 있다.



그림 4 센서의 작동과 신호전송을 위한 전선

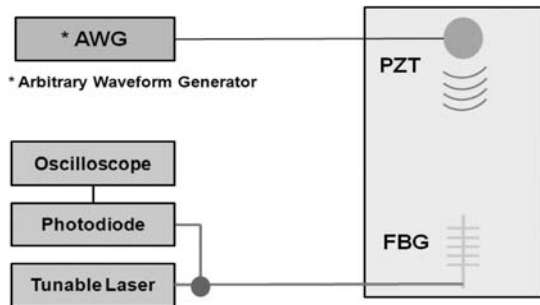


그림 5 FBG 센서를 통한 램파의 측정

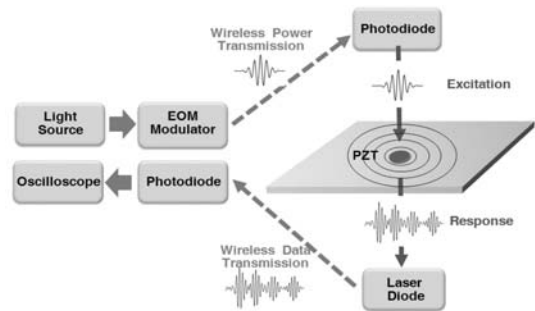


그림 6 레이저를 이용한 구조물 가진과 신호측정

한국의 경우, 구조물 안전진단 기법이 주요 초장대 교량, 원자력 발전소, 초고층 빌딩, 항공기 등에 적용되고 있다. 예를 들어, 2004년에 완공된 영종대교의 경우, 가속도계, 레이저 변위계, 스트레인 게이지 등 약 400개의 센서가 케이블 및 상판과 교각에 설치되어 구조물 모니터링에 이용되고 있다. 하지만 이와 같은 거대한 구조물의 손상을 더욱 정밀하게 모니터링 하기 위해서는 더 많은 수의 센서가 부착되어야 한다. 센서의 수가 증가됨에 따라 에너지 공급과 측정 데이터의 전송을 위해서, 각 센서에 해당되는 수만km 전선의 수도 증가하게 된다. 수백 수천 가닥의 전선들은 그 부피와 무게도 문제가 되지만 이를 관리하고 유지 보수하는 데도 많은 어려움이 따를 수밖에 없다(그림 4). 더욱이 경량화를 최우선 목표로 삼고 있는 항공기 분야에 있어서는 이와 같은 문제가 큰 걸림돌이 되고 있다.

구조물 안전진단은 사람이 접근하기 어려운 부분에서도 제 기능을 수행해야 한다. 구조물의 손상을 감지하는 것도 중요하지만 이러한 구조물에 설치되어 있는 센서들에 효율적으로 에너지를 공급하고 센서로부터 측정된 데이터를 얻는 것 또한 중요한 문제이다.

따라서 보다 효과적으로 구조물의 손상을 모니터링 하기 위해서 전선을 경량화 하거나 전선의 수를 줄이는 노력이 필요하다. 이러한 연구의 일환으로, 광섬유 센서를 이용하여 구조물 안전 진단에 필요한 신호를 측정하는 기법이 개발되고 있다(그림 5). 광섬유 센서는 얇고 무게가 가벼우

며, 구조물의 표면이나 내부에 삽입이 용이하므로 많은 수의 광섬유 센서가 설치되더라도 그 무게나 부피가 구조물에 큰 영향을 미치지 않는다. 또한 신호 감쇠량이 적어 깨끗한 신호를 보다 멀리 전송할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 이러한 장점을 가진 광섬유와 PZT 센서의 융합 기술은 그동안 거론되어 오던 거대한 구조물 안전진단의 한계점을 뛰어넘을 수 있는 새로운 돌파구로 제시되고 있다.

한걸음 더 나아가, 우리 연구진은 레이저를 이용하여 센서에 에너지를 공급할 뿐 아니라 센서가 측정한 신호를 전송할 수 있는 기술도 개발하고 있다(그림 6). 이 기술의 경우, 센서에 에너지를 공급하거나 측정된 신호를 전송하기 위한 전선이 필요 없이 레이저를 이용하여 센서를 작동시키고 센서가 측정한 데이터를 수집할 수 있다. 레이저 장비를 탑재한 무인 헬기 등을 이용하여 사람이 접근하기 어려운 위치의 센서를 작동시킬 수 있어 현재 안전진단 기법이 가지고 있는 접근성과 전선으로 인한 적용성 문제등의 한계점을 극복할 수 있을 것으로 보인다.

레이저 스캐닝 장비를 이용하여 구조물의 손상을 시각적으로 나타낼 수 있는 기술은 센서의 부착이 어려운 구조물을 모니터링 하는데 활용될 수 있다(그림 7). 접촉식 센서의 경우 그 응답이 모니터링 하려는 구조물의 표면 재질 및 상태와 센서와의 접촉상태에 크게 의존한다. 이러한 접촉식 센서의 특성 때문에 정밀 측정이 필요한 진동측정 분야나 구조물 안전 진단에는 제약이 많

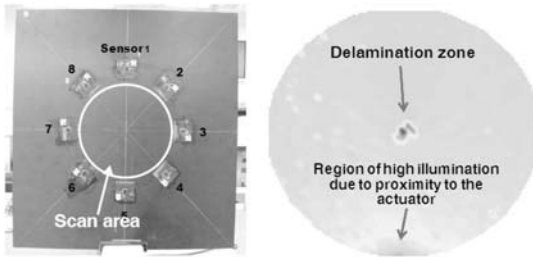


그림 7 레이저 스캐닝장비를 이용한 복합재료의 손상감지

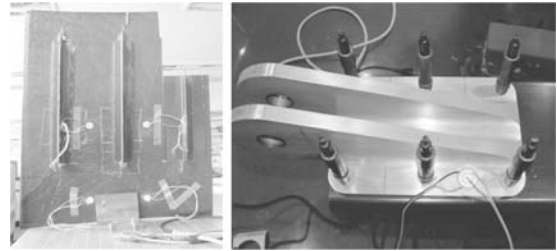


그림 8 항공기 복합재료 및 구조에의 적용

이 따른다. 따라서 이러한 단점을 해결하고자 레이저를 이용한 스캐닝 장비가 주목받고 있다. 스캐닝 장비를 이용하여 여러 지점에서의 신호를 측정 한 후, 이들 신호를 종합적으로 처리하고 분석하면 특정 위치에서 가진 된 초음파 신호의 전파를 시각적으로 볼 수 있으며 각종 신호처리 기법을 통해 손상의 유무를 판단할 수 있다.

실제 구조물은 온도에 의한 영향, 바람에 의한 영향, 작용하중 등으로 인해 시간에 따라 계속적으로 변화하는 환경 하에 놓여있다. 따라서 실제 구조물의 손상에 관한 응답만을 정확하게 감지하는 것은 매우 어려운 작업이다. 데이터 정규화 기법은 시간에 따라 변화하는 실제 환경이 실제 구조물에 미치는 영향을 구조물로부터 얻은 신호에서 제거할 수 있는 신호처리 기법이며 실제 구조물이 가질 수 있는 손상들을 보다 명확히 찾아낼 수 있는 방법이다. 따라서 손상이 없는 상태의 신호 결과와 외부 요인에 의한 변화된 상태의 신호 결과를 데이터 정규화 과정을 거친 후 비교 분석함으로써 보다 정확히 구조물의 손상을 감지할 수 있다.

3. 항공분야 적용

항공기는 온도, 습도, 바람 등 다양한 환경의 변화를 받고, 그 환경 또한 지상에서는 쉽게 겪을 수 없을 정도로 가혹하다. 이러한 환경에 반복적으로 오래 동안 노출된 항공기는 쉽게 손상을 입을 수 있고, 작은 손상으로 인해 엄청난 인명피해를 초래 할 수도 있다. 따라서 운항중인 항공기를

실시간으로 모니터링 하는 기술이 필수적이며 이에 관련된 기술이 최근 뜨거운 감자로 대두되고 있다.

이러한 흐름에 따라, 그동안 개발된 다양한 손상감지 기법을 항공기에 적용하려는 연구가 활발히 진행 중이다. 경량화를 최우선으로 여기는 항공분야에서는 일반 금속 재료보다 강도가 강하고, 무게는 가벼운 복합재료를 사용하며, 점차 항공기를 부품에서 복합재료의 비중이 증가하고 있다. 복합재료는 일반 금속 재료와 달리, 균일하지 않으며, 방향에 따라 다른 물리적 특성을 보여 금속재료에 적용하였던 손상감지 기법들을 그대로 적용하는데 어려움이 있다. 하지만 현재 단순한 복합재료 평판뿐만 아니라, 실제 항공기에 사용되는 다양한 구조의 복합재료 부품을 이용한 연구가 진행 중에 있다(그림 8). 우리 연구진은 미국 보잉사 및 국내 국방과학 연구소와의 협동 연구를 통해 다양한 성과를 내고 있다.

4. 원전시설분야 적용

우리나라와 일본, 중국 등 아시아 지역의 경우에는 급증하는 전력수요를 충족시키기 위한 원전시설 건설이 활발하게 추진되고 있다. 미국의 경우 104개에 이르는 기존 설비 대부분의 연령이 30년을 초과하여 교체 수요만으로도 최대 시장이 될 것으로 예상된다. 또한 동남아시아, 중동 등의 지역에서 최근 원자력 도입에 대한 구체적인 계획이 발표 및 추진되고 있다. 지난 2009년 12월 한국은 400억 달러로 세계 최대 원자력발전

소 프로젝트를 수주하였고, 향후 원자력 발전소에 대한 수요가 급증할 것으로 예상된다.

원전시설에 대한 수요가 증가하면서, 원전시설의 안정성에 대한 의문 또한 증가하고 있다. 지금까지 국내외에서 일어난 크고 작은 원전 사고는 원전시설의 안전성에 대한 불안감과 함께 사회적 인각심을 불러 일으켰다. 특히 차세대 원전의 경우, 원전 설비 구조의 복잡화, 대형화, 고온화 경향에 따라, 기술적, 경제적인 요인들로 인해 기존의 비파괴 검사의 적용이 난해해질 것으로 예상된다. 따라서 원전설비의 상시적인 안전진단을 위한 기술개발과 실제 원전시설에 적용하는 연구가 필요하다.

원전 설비의 상시적인 안전진단을 위해서는 신호의 가진 및 측정과 관련된 연구가 선행되어야 한다. 원전 구조물은 그 특성상 고온과 방사능과 같은 극한의 환경에 노출되어 있다. 현재 개발된 구조물 안전진단 기법들은 센서를 구조물에 부착하여 이로부터 얻은 신호를 분석하는 방법을 이용하고 있다. 하지만 원전시설이 가지는 초고온 환경에서는 부착형 센서가 제대로 작동할 수 없다는 어려움이 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 레이저를 사용하여 구조물에 직접 유도파를 가진하고 그 응답을 측정하는 기법이 개발 중이다. 레이저를 이용한 가진 및 응답측정이 가능해질 경우, 센서를 구조물에 부착하지 않고도 구조물의 손상을 감지할 수 있어 고온에서의 부착형 센서의 한계점에 관한 문제를 해결할 수 있다. 또한 레이저 스캐닝 장비를 이용하여 가진 된 유도파의 진행을 시각화 시키는 기법을 실제 원전시설의 안전성 모니터링에 적용하는 연구도 진행 중이다.

5. 토목 분야 적용

교량은 구조물 자체의 노후화뿐만 아니라, 주변 환경에 의한 부식 또는 반복적인 사용하중으로 인한 피로 등에 의해서 손상을 입게 된다. 이러한 손상은 사용성의 저하를 야기하거나, 극단

적으로는 붕괴를 일으킬 수 있다. 교량의 사용성 저하로 인한 교통의 통제는 경제적으로 막대한 손실을 유발하고 시민들의 불편을 초래하며 교량이 붕괴될 경우 대규모의 인명피해까지도 발생될 수 있다. 이러한 문제들로 인해서 주요 교량에 대해서는 주기적으로 점검이 이루어지나 점검에 필요한 인력과 자원의 부족으로 점검주기가 제한되는 것이 현실이다. 또한 사람이 직접적으로 접근이 불가능한 부분의 안전점검은 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 주기적인 점검방식에 대한 대안 내지 추가적 방안으로써 손상의 발생단계에서도 이를 포착할 수 있는 상시 구조 건전성 모니터링 시스템의 필요하다. 특히 근래에는 교량의 사용기간이 길어지고 장대 교량의 건설이 많이 이루어짐에 따라 상시 구조 건전성 모니터링 시스템의 중요성이 더욱 커지고 있는 실정이다.

각종 구조물 안전 진단 기법을 실제 교량 구조물이 적용하려는 노력이 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 교량 또한 주변 환경과 사용하중의 영향을 많이 받기 때문에 기저자료와 현재 획득한 자료를 비교하여 구조물의 손상유무를 판단하는 기존 기술을 실제 교량 구조물에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 기저자료 없이 현재 상황에서 획득된 자료만을 이용하여 구조물의 손상유무를 판단할 수 있는 무기저 손상 검색 기법과 주변 환경의 영향을 배제하여 손상의 유무를 판단할 수 있는 데이터 정규화 기법이 실제 교량에 적용하였을 때 효과적이며 이를 위한 연구가 진행 중이다.

실제로, 위에서 언급된 기법의 적용성을 시험하기 위해 다양한 교량에 센서를 부착하여 실험을 수행하고 있다. 이 교량들은 한국도로공사에서 도로시설물 모니터링 연구에 사용할 수 있도록 특별히 허가된 교량들이다. 경기도 이천에 위치한 삼승교는 한국도로공사 시험도로 테스트 베드 교량의 하나로 강판형 I형 스틸 거더구조로 되어 있다. 삼승교는 현재 차량이 통행하고 있는 교량으로 사용하중의 영향을 함께 고려할 수 있다는 장점이 있다. 경기도 김포에 위치한 Ramp-



(a) 삼승교



(b) Ramp-G교



(c) 영종대교

그림 9 실제 교량에의 적용

G교는 박스형 스틸 거더구조를 가지고 있는데, 이 교량은 사용이 중지된 폐교량으로서 구조물에 임의로 손상을 가하여 그 영향을 직접 확인해 볼 수 있다. 인천공항고속도로에 위치한 영종대교는 현수교로서 인천대교와 함께 많은 차량이 통행하고 있는 교량이다. 영종대교에는 현재 약 400개의 다양한 센서들이 설치되어있고, 중앙통제실에서 각 데이터를 분석하여 실시간 모니터링을 시행하고 있어 데이터 정규화를 위한 충분한 자료를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 삼승교와 Ramp-G교는 무기저 손상감지 기법의 적용을 위해, 영종대교는 케이블에 설치된 센서에서 획득한 자료로 데이터 정규화 기법의 적용을 위한 연구에 이용되고 있다. 이들 구조물을 통한 실험을 통해 안전진단 기법들의 실구조물에 대한 적용성을 검토하였으나 상용화를 위해서는 아직도 넘어야 할 산들이 많으므로, 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

6. 맺음말

기술의 발달에 따라 교량, 항공기, 빌딩, 발전소 등의 구조물이 거대화 되고, 기존의 구조물들의 노후화가 진행됨에 따라 구조물의 손상은 사용성과 안정성에 영향을 주며 이는 사회 경제적으로 큰 문제를 야기할 수 있다. 구조물 안전진단 기술은 구조물의 손상을 미리 감지하고 이에 대한 대처를 하여 구조물의 사용성과 안정성 저하에 따른 문제를 미연에 방지 할 수 있는 기술로 그 중요성이 점차 대두되고 있다.

구조물이 겪는 다양한 환경과 사용하중 등에 의

한 측정 데이터의 변화로 인한 손상감지 시스템의 오작동 가능성, 실험실에서보다 복잡한 실 구조물에의 적용성의 문제로 인해 상용화를 위해서는 갈 길이 멀지만 활발한 연구를 통해 점차 가시적인 성과를 얻고 있다. 환경요인으로 인한 시스템의 오작동을 줄이기 위해 무기저 기법과 데이터 정규화 기법이 개발되었고 실제 항공기 구조물과 교량에 센서를 부착하여 그 적용성을 시험 중이다. 또한 센서의 개수 증가로 인한 전선문제를 해결하기 위해 레이저와 광섬유를 이용한 구조물 안전진단법 또한 연구가 활발히 진행 중이다.

스마트 기술을 이용한 구조물 안전진단 분야는 세계적으로 도입기에 있었다. 하지만 새로운 기술의 개발과 상용화를 위한 많은 엔지니어의 밤낮 없는 노력으로 성숙기에 접어들고 있다. 우리 연구진을 필두로 많은 신기법들이 제안되고 있고, 이를 실 구조물에 적용하기 위해 끊임없는 연구가 진행 중이다. 머지않은 미래에 사회기반 시설뿐 아니라 항공, 기계 분야에 이르기까지 사용자를 우선으로 생각하는 안전진단기술이 완숙기에 이를 것으로 기대한다. **KSNVE**

후 기

이 글은 국토해양부에서 출연한 U-Eco시티 기술개발사업과 방위사업청에서 출연하고 국방과학연구소(ADD)에서 위탁 시행한 구조건선성 모니터링 요소기술 연구사업, 구 한국과학재단(현 한국연구재단) 지정 KAIST 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC) 사업에서 연구된 결과와 연구진행 상황을 기초로 작성되었다. 각 기관의 연구관련 지원에 감사드립니다.