

교량 구조물 진단에의 음향방출기술의 적용

윤 동 진

한국표준과학연구원 방재기술연구센터

Application of Acoustic Emission Technique for Monitoring of Bridge Structures

Dong-Jin Yoon

KRISS, Failure Prevention Research Center

1. 서론

일반적으로 음향방출기술은 강(관형이나 실린더형)이나 프리스트레스 콘크리트로 만들어진 구조물의 비파괴검사에 매우 유용하다고 알려져 있다. 보강 콘크리트, 석조, 나무 또는 알루미늄과 같은 재료로 구성되어진 구조물도 역시 음향방출시험에 의해 검사가 되어지고 있다. 그러나 이러한 구조물에 대해 수행되어진 음향방출 연구는 그렇게 많지 않은 것이 현 실정이다. 특히 프리스트레스 또는 포스트 텐션 콘크리트 구조물은 전통적인 비파괴시험 방법에 의해 검사하는 것이 쉽지 않은 것으로 알려져 있다.¹⁾

음향방출기술의 토목공학 분야 응용의 주요한 잠재성은 교량, 댐, 수문, 탑, 건물, 크레인 그리고 유전시추시설 등과 같은 거대한 강 구조물을 진단하는데 있다고 볼 수 있다. 그러한 구조물들은 주로 피로 하중을 받는 구조이며 구조적으로 피로 균열을 증진시키는 형태라 할 수 있다. 이에 의한 파괴의 잠재성이나 여러형태의 파손들은 지난 수십년 동안 용접구조물의 많은 사용에 의해 점점 증가해

오고 있는 실정이다.

강구조물의 파손은 일반적으로 용접부위나 체결 또는 리벳 부위와 같은 연결부위에서 주로 발생하게 되며, 여기서 용접부위는 응력집중이나 불연속의 주요 매체가 된다. 이들 부위는 피로 응력의 존재하에서 발생하는 피로 균열의 발생원이라 할 수 있다. 또한 빈번한 것은 아니지만 피로 균열은 볼트 구멍이나 리벳 구멍 지역에서 구조물의 몸체로 생성 전파되는 경우가 많다. 한편 경우에 따라서는 강구조물은 저온 상태에서 취성을 나타내게 되는데 이러한 상태에 있는 부재는 상온에서의 경우보다 훨씬 더 낮은 응력하에서 파손될 우려가 있다는 점이다.

구조물 중 많은 부분을 차지하고 있는 고속도로의 경우 이에 대한 비파괴시험 대상이 크게 도로포장 부분과 구조물(주로 교량)로 나눌 수 있다. 그러나 비파괴시험 관련 연구 개발의 흐름은 상당한 부분이 교량의 진단으로 되어져 왔다. 이것은 교량이 구조적으로 붕괴될 경우 인명 손실과 연관되는 중요성 때문이라 할 것이다. 반면 도로포장 진단의 경우는 주 문제점이 보수나 도로상태의 불량 등으로 인한 도로상에서의 이동속도의 저하가 대부분이기

때문이다.²⁾

교량진단에 대한 비파괴시험의 경우 1992년 미국 연방도로국(FHWA) 주관하에 이를 주제로 한 회의를 개최하였으며, 여기서 추천된 가장 주요한 관심사는 파괴, 균열 또는 부식의 정도와 같은 구조물에서의 물리적인 비정상 상태를 검출하는 것으로 알려졌다.³⁾

2. 구조물 진단에서의 음향방출기술의 역할

2.1. 구조물에서의 음향방출의 본질

음향방출은 재료내의 변형 에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 순간적인 탄성파로서 정의되고 있다. 강과 같은 금속에서는 전위 운동이나 균열 전파를 포함한 여러 종류의 가능한 발생원으로부터 에너지가 생성될 수 있다. 이 중에서 단지 실제 방출된 에너지의 일부분만이 음향방출의 발생원으로 사용 가능하게 된다.

음향방출 에너지의 측정은 발생원에 대한 초기 과정을 인식하는 반면에 음향방출 신호는 다음과 같은 상황에 대해 영향을 받게 된다.

- 발생원에서의 에너지 방출율
- 발생원에 근접한 재료의 물성
- 센서로부터 발생원까지의 거리
- 구조물 부재의 형상

이들에 의해 발생된 파는 역학적인 파형으로부터 센서에서의 전기적인 신호로 변환될 때 또한 약간의 변형을 겪게 된다. 음향방출의 발생원을 한 점으로써 생각한다면, 새로이 발생된 방출파는 무한체를 통해 전파되는데 이때 처음에는 모든 방향으로 퍼지면서 구형으로 유지하다가 외부 공기와 만나게 되는 표면에서는 최종적으로 표면파로서 진행하게 된다. 이 파가 재료내부를 통해 음향방출 센서까지 전파할 때 음향방출 발생원으로부터의 음압을 약하게 만드는 요소에는 여러가지 요인이 있을 수 있다. 즉 산란, 흡수, 감쇠, 다른 매질을 통한 재 통과 등을 들 수 있다. 전형적인 많은 부분의 토목 구조물들은 복합재료를 제외하고는 등방성 재료가 많다. 따라서 등방성 재료에서의 음파 전파 특성은 재료의 고유 성질에 영향을 받지 않게 된다.¹⁾

2.2. 강구조 부재에서의 음향방출 특성

강 재료에 있어서의 주요한 세가지 음향방출 발생원으로 간주되는 것으로는 Luders 밴드 전파, 탄소파괴, 계재물의 분리파괴를 들 수 있다.⁴⁾ 이들은 주로 강이 응력을 받을 때 동반하는 엄청난 음향방출 발생의 원인이 된다. 이들 발생의 많은 부분은 짧은 주기를 가진 신호 형태, 즉 돌발형 신호로서 발생된다. 음향방출 발생은 다양한 종류의 연성 및 취성 구조 재료의 순수 변형 및 파괴 과정에 의해 산출된다.(Table 1)⁵⁻⁹⁾

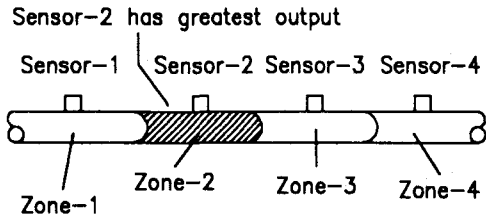
Table 1. Factors that influence acoustic emission detectability.

음향방출 신호의 진폭을 증가시키는 인자	음향방출 신호의 진폭을 감소시키는 인자
높은 강도	낮은 강도
높은 변형율	낮은 변형율
낮은 온도	높은 온도
이방성	등방성
비균질성	균질성
두꺼운 단면	얇은 단면
취성파괴	연성파괴
재료내의 불연속들	불연속이 없는 것
마르텐사이트 변태	확산에 의한 상변태시
균열의 성장	소성변형
주조 제품	단조제품
큰 결정 입도	작은 결정 입도
기계적으로 인가된 비틀림	열적으로 인가된 비틀림

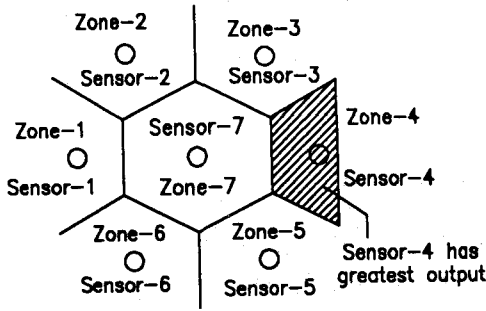
2.3. 위치표정기술¹²⁾

음향방출 발생원의 위치표정 기술의 근본적인 의미는 다른 비파괴시험 방법에 비해 큰 장점을 제공하는 것이라 할 수 있다. 즉 센서가 원하는 위치에 설치되기 때문에 실 시간 감시의 응용에 적용이 가능하게 되며, 대형 구조물과 같은 특수한 환경에도 적용이 가능하기 때문이다. 또한 다른 시험 방법에서 요구되어지는 센서와 불연속 지점(결함) 사이의 물리적인 근접성 등이 필요없다는 것이다.

일반적으로 원거리 센서를 사용하여서는 발생원의 특성을 알기가 쉽지 않다. 예를 들어, 어떤 환경 하에서 음향방출 발생의 심한 정도를 나타내기 위하여 사용되어진 음향방출 특성이 있을 경우 이것은 음향방출 위치표정기술과는 다른 방법으로 얻어



(a)



(b)

Fig.1. Zone source location based solely on sensor with highest output:

- (a) representative one-dimensional case
- (b) representative two-dimensional case

진 것이라 할 수 있다.

센서와 프리앰프를 통과한 전기적인 출력신호로부터 음향방출 발생의 위치를 찾아내는 데는 여러 가지 방법이 있다. 이들 기술은 대개 음향방출 발생원의 메카니즘의 형태에 따라 분류 되어진다. 첫째는 연속형 신호(누출, 마찰 등) 위치표정이며, 둘째는 돌발형 신호(균열 성장 등) 위치표정이라 할 수 있다. 즉 대부분의 위치표정기술은 주로 이들 두 범주 내에서 이루어 진다. Fig. 1은 최대 출력을 가진 센서를 이용한 전형적인 지역 위치표정기술의 원리를 보여주며, Fig. 2는 도달 시간차를 이용한 전형적인 1차원 위치표정기술을 보여준다.

2.4. 교량 진단의 개념¹³⁾

음향방출기술을 이용한 교량진단 전문팀 중의 하나인 Margan Physical Diagnostics에 따르면 교량진단을 위해 독자적인 기술, 즉 교량진단을 위한 효과적인 방법론 및 분석방법 등을 제시하고 있으며 해결 가능한 분야로서는 구조물의 손상이나 기능 저하 등으로부터 야기되는 문제들을 찾아내며 또한 그런 상황을 처리하는 가장 최선의 방법들을 제시할 수 있다는 것이다. 예를 들어 그들에 의한 교량진단의 개념은 다음과 같다.

결함 및 손상 지역의 위치표정

↓
손상 형태의 결정

- 균열
- 국부 응력집중 지역
- 케이블 프리스트레스 수준의 감소
- 콘크리트 강도, 파괴인성, 동결 저항 등의 저하
- 공동 및 계재물
- 전기화학 및 응력 부식
- 지지대의 운동 및 불안정성

↓
평가

- 손상 전파의 원인
- 손상 위험 수준
- 구조물 요소에 대한 응력 수준
- 운전 위험 정도

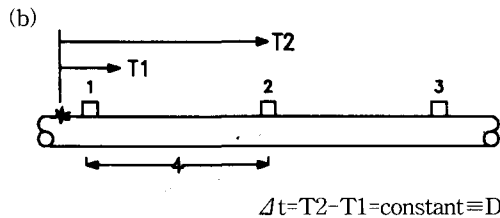
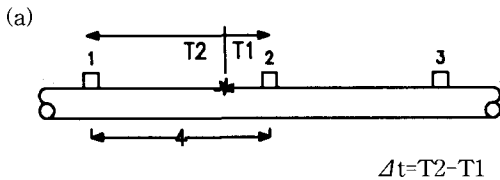


Fig. 2. Linear source location technique: (a) hit sequence, time difference measurement

$\Delta t = T_2 - T_1$; and (b) source outside of array
 $\Delta t = T_2 - T_1 = \text{constant} \equiv D$

3. 교량 구조물의 감시를 위한 음향방출기술의 적용

3.1. 구조물의 음향방출 감시¹⁾

음향방출기술을 토목 구조물에 적용한 기록된 첫 사례중의 하나는 1971년의 수하중(water-loaded)을 받는 건물에 적용된 것이라 할 수 있다¹⁴⁾. 역시 같은 해인 1971년에 영국 육군에 의해서 이동용 군용 교량에의 건전성 검증 시험이 수행된 적이 있으며, 이 시험 동안에 하나의 교량 거더에 일차원 위치표정을 위해 사용된 여러 그룹의 센서들을 포함해서 7개의 음향방출 센서가 부착되었다¹⁵⁾. 이 검사에서는 하중 작용기간, 하중 정지기간, 그리고 반복 하중 시험의 조건중에 실시간으로 음향 방출 ring-down counts 분석을 수행하였다. 또한 추가적인 음향방출 신호 진폭분포 및 위치표정에 대한 정보를 얻기 위해 사후분석도 수행되었으며, 여기서 소성변형이 발생한 위치에 음향방출 발생원이 집중되어 나타난 결과를 보였다.

1972년에는 미국 샌프란시스코 근처의 Dumbarton lift bridge의 8개 케이블 검사에 음향방출시험이 적용되었으며, 같은해 Argonne National Lab. 에서는 Illinois interstate 80에 위치한 강교량에 대해 적용한 적이 있다¹⁶⁾. 또한 1973년에는 Kentucky Transportation Research Program 이란 프로젝트하에 연속 eyebar 트러스 교량에 대해 시도가 되었으며, 이 연구를 위하여 1 채널 음향방출 장비가 사용되었다¹⁷⁾.

이 이후의 음향방출시험의 적용 예는 미국 연방도로국(FHWA)의 주관하에 진행된 강구조물 교량에 대한 것이다. 이 프로젝트는 사용중인 교량의 진단에 사용할 목적인 전용 음향방출 시스템의 개발과 설치로 구성되어있다.^{18),19)} 이 과제는 초기에는 교량의 음향 스펙트럼을 결정하고 집약화된 음향방출 신호 분석용 시스템을 개발하는데 목표를 두었다.

1982년 이후에는 Kentucky Transportation Research Program에서 강구조물 교량에서의 균열 성장 상황을 검출하기 위한 음향방출 용접 감시기(acoustic emission weld monitor: AEWM)를 사용하여 왔다^{20), 21)} 그들은 강교량에서의 용접 부위에 대해 수많은 시험을 수행하였으며, AEWM을 사용

한 시험에서는 교량에서 존재하는 상당한 양의 기계적인 잡음을 제거하는데 아주 성공적인 결과를 얻기도 하였다. 음향방출 잡음의 양은 센서배열 주위의 구조적인 세부 형태와 교량을 통과하는 차량 하중의 양과 특성에 많이 의존하는 것으로 나타났다. 상판 빔, 스트링거, 그리고 상판 빔과 거더 볼트 연결부에 적용된 전형적인 예를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4에서는 콘크리트 상판과 상부 플랜지 연결부위로부터 발생하는 잡음을 제거하는 예를 보여 주며, 한개 내지 그 이상의 보조 센서(guard sensor)를 사용하여 이들 센서에 먼저 도달하는 음향방출 사건을 제거하는 잡음제거 기술을 사용하는 것을 보여주고 있다.

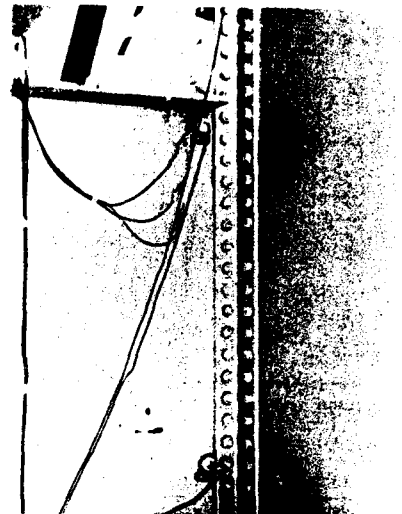


Fig. 3. Linear transducer array adjacent to a bolted angle splice on a bridge.

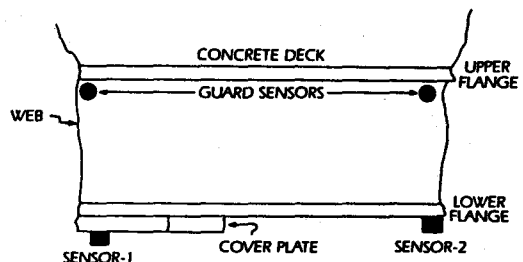
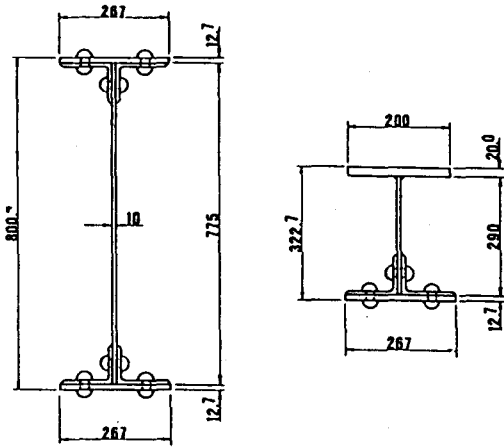


Fig. 4. Use of guard sensors on a steel girder bridge.



(a) original shape (b) shape for fatigue test
Fig. 5. Cross section of a 95-year-old girder.

3.2. 음향방출 신호를 이용한 리벳연결 I-girder 철도 교량의 최대응력 평가²²⁾

이 연구에서는 아주 오래된 리벳연결 거더 교량의 최대응력 평가를 위한 음향방출 시험의 적용성이 조사되었다. 그 결과 실험치와 이론치에서의 좋은 일치를 얻게되었다. 시험에 사용된 두 형태의 거더는 이중으로 대칭된 단면을 갖고 있으며 거더의 플랜지는 두개의 앵글과 하나의 덮개판으로 구성되어 있다. Fig. 5(a)는 95년이 지난 거더의 단면을 나타내며, Fig. 5(b)는 피로 하중하에 시험된 거더의 단면을 나타내고 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 해당 변형률에 대한 누적된 음향방출 count를 초기 부분에 대해 확대된 크기로 나타내었다. 여기서 그래프 상에서 기울기가 점차적으로 변하기 때문에 음향방출 count의 변화하는 기울기 시점을 결정하기란 쉽지가 않다. 결과적으로 기울기의 천이점은 두개의 연장된 선상의 교점으로서 결정하였다. 즉 이

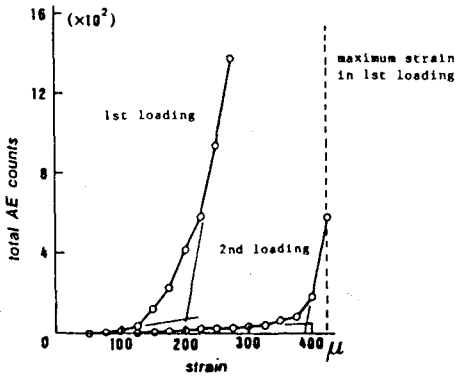
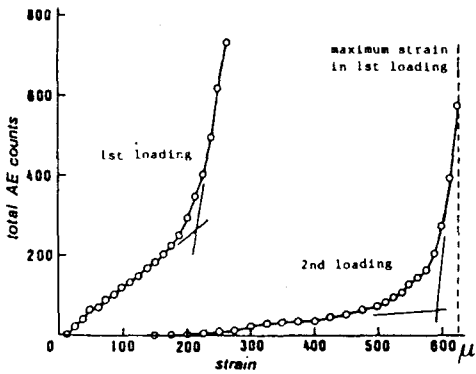


Fig. 6. Estimation of maximum stress (95-year-old girder).

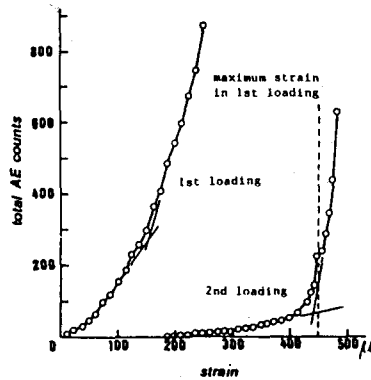
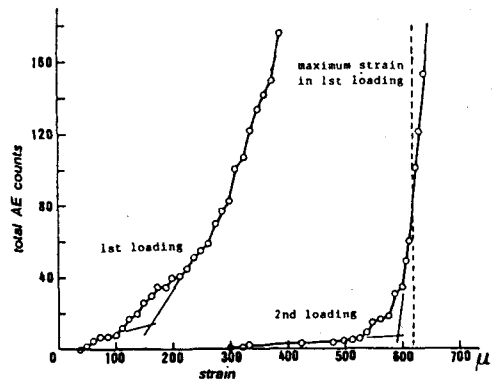


Fig. 7. Estimation of maximum stress (60-year-old girder).

Table 2. Maximum stress (Theory and AE results).

Test girder	Absolute maximum mo. (kN)	Maximum mo. at measuring points (kN)	Section modulus (mm ³)	Impact coefficient	Calculated maxi. stress (MPa)	Max. stress by AE tests (MPa)
95 year old	270	239 or 247	6.74×106	1.30	46.2 or 47.6	43.2
60 year old	158	153 or 156	5.45×106	1.31	36.6 or 37.5	32.4

교점의 변형율을 최대 변형율의 값으로서 정의하였다. 이 최대 변형율에 Young's 계수를 곱하게 되면, Kaiser effect에 근거하는 최대응력의 값이 구해지게 된다. 95년이 지난 거더와 60년이 지난 거더에 대한 최대 응력값은 각각 43.2와 32.4 MPa로 얻을 수 있었다. 그리고 거더에 가해진 최대 하중에 대한 차량통행 기록에 따라서 최대 재하 하중을 적용하였으며, 이론적인 최대응력값은 차량의 하중 지점을 고려한 설계 정보로부터 산출하였다. 이들 가정에 근거하여 이론적인 최대응력값은 Table 2에서 보는 바와 같이 계산되어졌다.

3.3. 음향방출을 이용한 고속도로 교량에서의 피로 균열의 검출²³⁾

Kentucky transportation research proram 연구진들은 개발된 AE system을 1982년 Kentucky 교의 I-24 bridge에 첫 시험 적용을 하였다. 이 교량은 상판 빔에서 노출된 굽힘 균열들을 가지고 있었으며, 감시하였던 5개 부분 중에서 단지 한 곳에서만 음향방출에 의한 결함 판정을 얻을 수 있었다. 이 시험 지역에서 상판 빔 상부 플랜지와 tie-chord에 상판 빔을 연결하는 볼트 앵글 접목판 사이의 web에 여러개의 2-3 인치 길이를 가진 균열이 존재하였다. 이 결함 부분은 상판 빔이 정상적인 차량 하중 작용하에 있는 동안 2 시간 반씩 여러번 계속 감시를 하도록 하였다. 음향방출 발생 정도는 교량 위를 통과하는 차량의 무게와 양에 비례하여 나타났었다. 볼트 접목 부분에서의 엄청난 양의 잡음 데이터는 결함에 의한 유효한 음향방출 데이터에 비해 약 1000 대 1 정도가 되었으며, 여기에 사용된 AEWM 시스템은 이들 방대한 양의 잡음 신호를 제거할 수 있었다. 이들 교량에 대해 22개월간에 걸친 4 종류의 음향방출 감시 시험으로부터 유효한 음향방출 발생 빈도의 양이 점진적으로 줄고 있음

을 알 수 있었으며, 균열 진전 속도 역시 측정을 한 결과 시간에 따라 감소함을 발견하였다. 1984년에 수행된 마지막 시험으로서는 균열 부분에 대한 48 시간의 연속 감시로서 그 결과 결함에 의한 음향방출의 발생은 검출되지 않았다.

AEWM은 기계적 잡음이 심한 5개의 교량에서 9번의 시험을 통해 성공적으로 사용이 되어졌다. 결국 이 시스템은 항공기, 교량, 해양 시추설비, 압력 용기, 선박, 잠수함, 크레인 등과 같은 대형이거나 복잡한 구조물에 대한 정밀 진단 형태의 비파괴검사를 경제적으로 수행하는데 사용될 수 있는 큰 잠재력을 보여주었다. 더우기 의문시 되는 결함의 위치에 대한 짧은 시간내의 평가는 교량 건설자나 검사자들에게 있어서는 보수 및 진단 결정시에 경제적으로 매우 도움이 되리라 생각된다.

3.4. NDT 방법을 이용한 강교량의 잔존 피로 수명의 평가²⁴⁾

강교량의 잔존 피로수명을 평가하기 위하여 독일의 BAM 연구진들과 관련 연구기관 종사자들은 음향방출기술을 포함한 여러 종류의 비파괴시험 방법을 동원하여 교량 진단을 시도하였다. 여기서 적용된 방법을 조사해 보면 다음과 같다.

- 엄밀한 관찰
- 차량 통과시의 변형을 측정
- 기하학적인 검사
- 비파괴시험 검사
- 음향방출시험 분석
- 선정된 재료 시험

이들 적용 방법 중 음향방출시험에 관련된 사항은 다음과 같다. 일반적으로 실험실 시험의 경우 때때로 반복 하중하에서의 크랙의 전파를 쉽게 관찰할 수 있다. 따라서 강교량과 같은 실제 구조물에서도 음향방출시험 분석을 통해 이들 피로 균열 검출

에 대한 적용·가능성의 희망이 있다고 볼 수 있다. 만약 균열이 존재하는 구조물 부재에서의 응력 수준이 이전 응력 수준보다 더 높게 작용한다면 균열은 진전하게 될 것이다. 반면 균열의 크기는 매우 작아서 - 구조물편에서는 다행이지만 - 어떤 경우에는 최대 응력 수준하에서도 균열이 전파되지 않는 경우도 있을 수 있다. 교량 진단에 관해서 음향방출시험은 균열이나 결함이 활발하게 작용하고 있을 경우에 검출 능력이 좋아지기 때문에 이 방법은 어찌 보면 결함의 검출 및 평가를 위해서는 기존의 다른 비파괴시험 방법과 연계하여 적용하는 것이 훨씬 효율적인 것으로 생각된다.²⁵⁾

본 연구진은 1994년 처음으로 음향방출시험을 Stubenrauch 교량의 tension rod에 적용하였으며 이 시험에서는 어떤 종류의 결함도 찾지 못하였다. 즉 Fig. 8에서 보는 바와 같이 3개의 센서(특수형의 마이크로폰)를 부착하여 시험을 하였는데 균열 전파를 나타내는 신호를 찾지는 못하였다. 이에 대한 이유로는 큰 균열을 성장시키기에는 상대적으로 낮은 응력을, 하중이 30 N/mm²을 넘지 않았음, 적용하였기 때문으로 생각된다. 따라서 이의 연장 연구로서 음향방출시험 분석의 잠재성을 확인하기 위하여 더 많은 연구가 진행중에 있다.

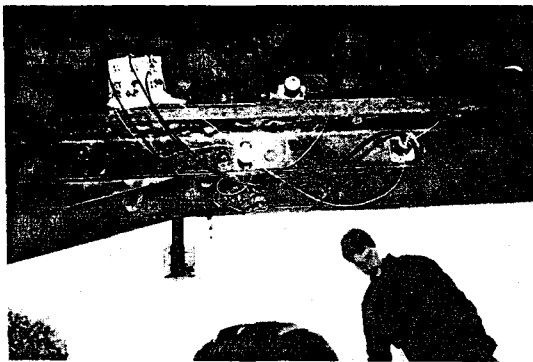


Fig. 8. Acoustic emission analysis at the Stubenrauch-bridge Berlin.

3.5. 교량에서의 음향방출 측정²⁶⁾

대형 프리스트레스 콘크리트 교량에서의 측정

약 50 m의 길이를 가지는 개개의 스패ن을 가진 교량의 경우 수많은 프리스트레스 케이블로 구성되어 있는데 경우에 따라서 부적절하게 주입된 것이

있을 수가 있다. 이런 형태의 시험에서는 신호대 잡음비(SNR)를 최적화하기 위하여 센서를 가능한 한 의심이 나는 케이블에 가깝게 설치하게 되며, 또한 차량 운행에 따른 잡음으로부터 가능한 멀리(대략 교량의 아래 부분에서 I-빔 높이의 중간) 설치를 하게 된다.

측정 결과로서는 각각의 차량에 의한 통과시 "hissing" 소리가 났으며, 이것은 젖은 도로 표면을 차가 달릴 때 발생하는 잡음과 비슷한 신호였다. 5-15 kHz 범위의 주파수 범위를 가지고 있는 이 신호는 아마도 주기적인 "rattling" 음을 발생하는 형태며, 딱딱한 도로 표면위를 스노우 체인을 착용한 차량이 운행할 때 나는 소리와 거의 비슷하였다. Fig. 9는 이 때 발생한 불규칙한 형태를 가진 개개의 peak들로서 구성되어 있는 신호를 보여주고 있으며, 전형적인 차량속도인 66 km/h 에서의 타이어 회전 속도에 해당하는 주기를 가지면서 반복되고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 이들 잡음은 주위의 건물에서 발생된 자갈들이 타이어 표면의 홈 사이에 끼어서 회전시에 발생된 것이라고 결론을 지을 수 있었다.

Fig. 10은 차량의 통행중에 빈번히 발생되는 반면 차량 통행이 없는 중간의 상대적으로 조용한 순간에도 가끔 발생하는 전형적인 음향방출 신호들이다. 이들 신호들은 파괴시 나타나는 잡음신호 같이 나타나며 실험실 시험의 콘크리트에서도 관측된 신호와 유사하였다. 차량의 통과시에는 도로 표면위의 대부분 조그만 자갈에 의해 부딪힘에 의해서 야

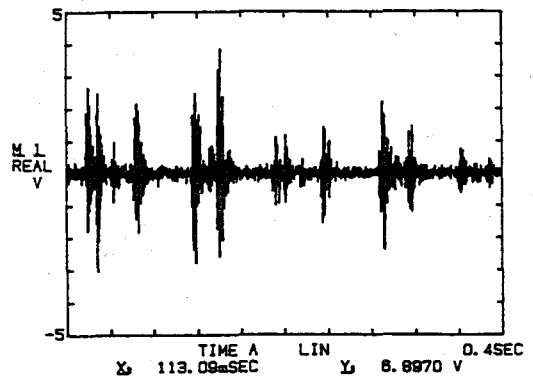


Fig. 9. "Rattling" noise due to tires with pebbles.

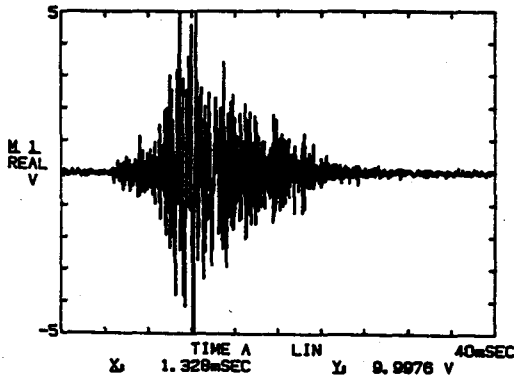


Fig. 10. "Fracture" signal near prestressing cables (mainly 8-14 kHz).

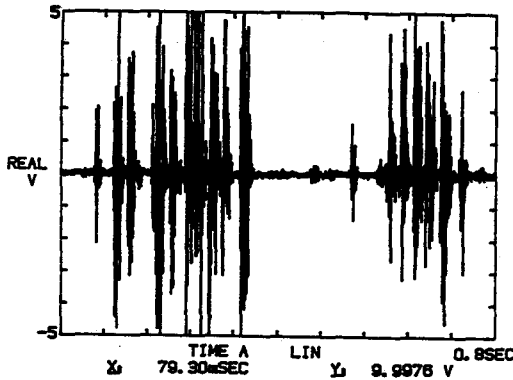


Fig. 11. "Creaking" signal near prestressing cables (mainly 8-12 kHz).

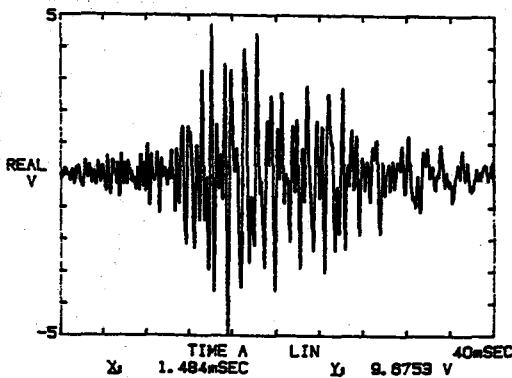


Fig. 12. "Ringing" signal near prestressing cables (mainly 0.3-2 kHz).

기된다고 볼 수 있다. 그러나 차량 통행이 없는 조용한 기간에 관측된 신호들은 교량 그 자체에서의 구조적인 손상 과정에 의해 발생하는 것임을 암시한다. 또한 중량 차량의 통과 바로 후의 조용한 순간에 Fig. 11에서 보는 것과 같이 "creaking"으로 표현될 수 있는 신호들과, Fig. 12에서 보는 것과 같이 "ringing"으로 표현될 수 있는 신호들이 가끔 관측되어졌다.

박스-거더 교량에서의 균열의 측정

우연한 경우에 교량 보수 작업자들 중의 한 명이 박스 거더 교량에서 매우 크고 놀랄만한 소리를 내는 균열의 실제 발생을 관찰하게 되었다. 이 균열은 약 수 미터의 길이와 1 mm보다 작은 폭의 크기를 가지고 있었으며, 마이크로미터를 사용하여 차량 하중에 의한 균열 폭의 동적인 변화를 측정 가능하였을 정도였다.

본 시험 측정의 목표는 이 균열이 아직도 음향적으로 활동적인지 아닌지를 알아보기 위한 것이었다. 즉 사용 중에 균열에 의한 음향방출이 발생하는지 관찰하기 위한 것이었다. 부착된 센서의 위치는 균열로부터 10 m 멀리 떨어진 곳은 물론 균열 선단에 대해 균열 중앙에서 아주 가까운 거리, 10 cm,로 설정을 하였다. 이 위치는 항상 박스의 내부이며 차량이 통과하는 도로 표면 아래의 1 m 지역에 부착을 하도록 하였다. 통과 차량에 의한 저주파수 잡음이 매우 심하였기 때문에 이들 잡음을 피하기 위하여 탐촉자는 AC175L을 사용하였으며 또한 100 dB의 총 증폭과 125-250 kHz의 밴드패스 필터를 사용하였다.

중량 차량의 통과 동안에 고주파수 성분이라 할 수 있는 음향방출 신호의 ringdown count rate를 측정하였으며, 세 군데의 센서 위치에서, 동시 측정 은 아니지만, 그에 따른 peak reading도 관찰하였다. 이때 발생한 각 센서 위치에서의 ringdown count rate에 대한 결과는 다음과 같았다.

Transducer location	Counts per minute > 1 V threshold
10 cm from crack center	110, 660, 380, 420, 690
10 cm from crack tip	540, 930, 3330, 3720, 2320
10 m from crack	10, 60, 30, 70, 80

결과에서 보듯이 위치에 따른 큰 차이는 차량 통과 잡음에 기인한 기본적인 count rate가 상대적으로 낮게 (10-80 cpm) 나타났음을 보여주며, 반면 균열의 경우에는 매우 큰 신호를 발생하고 있으며 주로 균열의 선단에서 지배적이었음을 나타내어 준다. 균열 선단에서 생성된 큰 신호들은 상대적으로 균열의 전진한 표면과 거칠은 표면 사이의 마찰에 기인함은 물론 새로운 파괴 과정에 의한 것으로 판단된다. 이들 근거에 대한 뒷받침으로는, 실험실 실험을 통해 이미 알고 있는 지식이지만, 오래된 균열은 일반적으로 균열 내부표면 사이의 접촉 손실과 연삭 마모 때문에 덜 강한 마찰 잡음을 발생시킨다는 사실이다.²⁷⁾

3.6. 음향방출 모조 무선통신 시스템²⁸⁾

음향방출 신호가 한 지역에서 다른 곳으로 무선으로 신뢰성있게 전송될 수 있는지를 확인하기 위하여, 다음의 실험실적 실험이 수행되었다. 알루미늄 판 위에서 연필심 파괴에 의해 발생된 모의 음향방출 신호는 무선통신을 통해 송신되어지며 수신기에서 수신 후 재생 및 기록을 하도록 하였다. 이들 실험 구성에 대한 개략도를 Fig. 13에 나타내었다. 음향방출 센서로서는 상용 음향 센서를 사용하였으며 알루미늄 판위에 부착한 후 실험실내의 단거리 무선 송신기에 연결하였다. Fig. 14는 음향 센서로부터 직접 기록된 음향방출 신호와 수신기로 받아 재생한 신호와의 비교를 나타내고 있다. 이 신호는 0-500 Hz 밴드 폭을 가진 무선 링크를 통해 송신된 것이다. 상용의 음향방출 장비는 이보다 훨씬 높은 주파수 범위에서 처리되는 반면에 본 실험의 제한된 밴드 폭은 단지 peak RMS 전압치를 송신할 수 있었다. Fig. 14에서의 수신 데이터는 그림에서의 앰프 후단에서 기록된 데이터보다 잡음이 더 작게 나타나고 있는데, 이는 광대역 필터 (DC-95MHz)를 사용한 후치 앰프에서는 잡음이 더 심한 반면 매우 낮은 레벨의 송신 신호는 송수신 장치에서 잘 처리되었기 때문이다. 고주파수 범위에서 무선 송수신 기능을 사용하기 위해서는 더 큰 밴드 폭을 가지는 시스템이 요구되는데, 한편으로는 신호가 발생원에서 디지털화 및 기록이 될 수 있어야 하고 그리고 협대역 링크를 통해 낮은 속도로

송신될 수 있어야 한다. 후자의 경우 100 μs 의 데이터를 1 초에 전송하는데 10,000 대 1의 시간 변화가 요구된다. 실제에서는 요구되지 않지만 저주파 플로팅의 사용이 가능한 이들 디지털화 및 저장 과정이 본 실험에서 사용되었다.

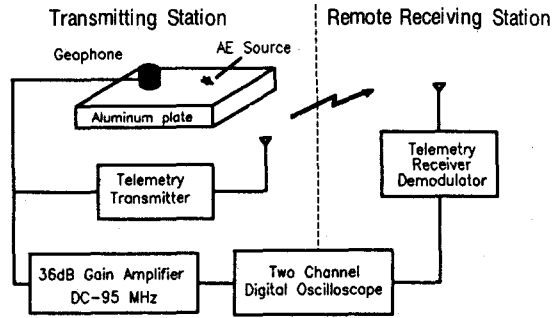


Fig. 13. Schematic of laboratory radio telemetry acoustic emission system.

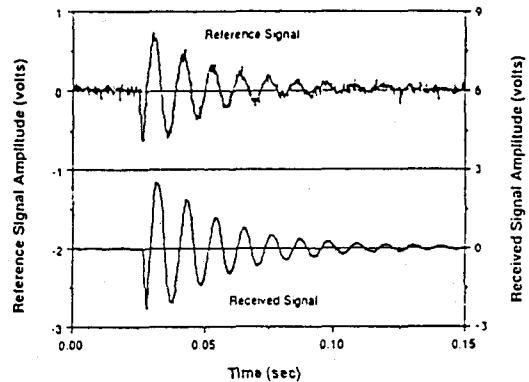


Fig. 14. Comparison of acoustic emission signals obtained directly from local transducer and from remote radio telemetry receiver.

4. 결론

교량의 상태를 전체적으로 평가하기 위해서는 우선 무엇을 측정해야 하는지 그리고 비파괴시험을 위한 대상 지역이 선정되어졌는지가 중요하다. 다양한 기존의 비파괴시험 방법들 중에서 음향방출 기

술은 교량에서의 결함을 검출하고 감시하는데(주로 강 및 콘크리트 요소) 매우 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 우리는 결함을 가진 구조물은 음향적으로 비정상적인 징후를 나타낸다는 것을 이미 알고 있다. 그러나 교량 진단에서의 주요 관심사는 이런 형태의 구조물에서는 어떻게 음향방출 신호가 발생이 되며, 무엇이 가장 귀중한 정보인지를 알아야 할 것이다. 교량에 대한 음향방출기술의 적용시 문제점 및 해결책을 정리하여 보면 다음과 같이 크게 네가지로 요약할 수 있다. 즉 잡음 제거 기술, 발생원의 규명, 가능한 한 정량적인 결과, 그리고 결과에 대한 신뢰도라 할 수 있다.

참고 문헌

1. R. K. Miller and P. McIntire, (1987) *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing (Vol.5)*, ASNT, 326-345.
2. R. A. Livingston, (1994) "Future Direction in NDE Research for Highway," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 13, 2099-2106.
3. FHWA (1993) *Proceedings of the Conference on Nondestructive Evaluation of Bridges*, FHWA-RD-93-040A.
4. H. N. G. Wadley, C. B. Scruby and J. H. Speake, (1980) "Acoustic Emission for the Physical Examination of Metals", *International Metals Review*, 41-64.
5. H. L. Dunegan, D. O. Harris and A. S. Tetelman, (1970) "Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Techniques," *Materials Evaluation*, 28, 221-227.
6. R. O. Ritchie and J. F. Knott, (1973) "Mechanism of Fatigue Crack Growth in Low Alloy Steel," *Acta Metallurgica*, 639-648.
7. J. R. Frederick, (1970) "Acoustic Emission as a Technique for Nondestructive Testing," *Materials Evaluation*, 28, 43-47.
8. D. O. Harris and H. L. Dunegan, (1973) *Continuous Monitoring of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Technique*, Dunegan Research Corporation.
9. H. L. Dunegan and A. T. Green (1971) "Factors Affecting Acoustic Emission Response from Materials," *Materials Research and Standards*, 1-4
10. A. A. Pollock, (1973) "Acoustic Emission Amplitude - Acoustic Emission 2," *Non-destructive Testing*, 264-269.
11. L. J. Graham and G. A. Ahlers, (1974) "Spectrum Analysis of Acoustic Emission in A533-B Steel," *Materials Evaluation*, 32, 34-37.
12. R. K. Miller and P. McIntire, (1987) *Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing (Vol.5)*, ASNT, 136-154.
13. G. Muravin, (1994) *Bridging the Safety Factor*, Margan Physical Diagnostics
14. R. G. Liptai, P. O. Harris, R. B. Engle and C. A. Tatro, (1971) "Acoustic Emission Techniques in Materials Research," *J. of Nondestructive Testing*, 263-264.
15. A. A. Pollock and B. Smith, (1972) "Stress-Wave Emission Monitoring of a Military Bridge," *Nondestructive Testing*, 348-353.
16. *Formal Proposal for Acoustic Emission of Steel Highway Bridges*. (1973) Argonne, IL: Argonne National Laboratory.
17. T. Hopwood, (1976) *Acoustic Emission, Fatigue, and Crack Propagation*. Report No. 457, Kentucky Bureau of Highways
18. P. H. Hutton and J. R. Skorpik, (1975) *Acoustic Emission Methods for Flaw Detection in Steel in Highway Bridges, Phase I*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-78-97
19. P. H. Hutton and J. R. Skorpik, (1978) *Acoustic Emission Methods for Flaw Detection in Steel in Highway Bridges, Phase II*. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-78-98
20. D. W. Prine and T. Hopwood, (1985) "Improved Structural Monitoring with Acoustic Emission

- Pattern Recognition," Proceedings of the 14th Symposium on Nondestructive Evaluation, San Antonio.
21. T. Hopwood, (1985) "Acoustic Emission Structural Monitoring in Noisy Environments Using Event Based Processing," Proceedings of the International Conference on Fatigue, Corrosion Cracking, Fracture Mechanics and Failure Analysis, OH, 277-282.
 22. H. Otsuka, H. Hikosaka, H. Miyatake and S. Nakamura, (1992) "Estimation of Maximum Stress in Old Railway Riveted I-Girder Bridges Using Acoustic Emission Signals," J. of Acoustic Emission, 10, S13-17.
 23. D. W. Prine and T. Hopwood, (1985) "Detection of Fatigue Cracks in Highway Bridges with Acoustic Emission," J. of Acoustic Emission, 4, S304-306.
 24. K. Brandes, J. Herter and R. Helmerich, (1995) "Assessment of Remaining Fatigue Life of Steel Bridges Assisted by Adaptive NDT," Proceedings of International Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Germany, 1233-1240.
 25. J. H. Carlyle and T. Halkyard, (1994) "Using Acoustic Emission to Test Aging Steel Bridges," ASNT 1994 Spring Conference, New Orleans, 169-171.
 26. H. Hick, H. Willer, E. Winter and F. Simacek (1992) "Acoustic Emission Measurements on Bridges," J. of Acoustic Emission, 10, 67-70.
 27. H. Hick, T. Schmeskal, R. Schwara, S. Zagiczek, C. Werbik and J. Nemet (1983) "Untersuchung zur sicherheitstchnischen Überwachung sowie zur Fehlerauffindung mittels Schallemissionsanalyse für Bauwerke aus Spannbeton," OEFZS-Bericht A0404-PH-365/83.
 28. R. E. Green and C. H. Hoepfner, (1993) "NDE Telemetry System for Highway Bridges,"