

강판형교에서의 효율적인 결함검출을 위한 AE기법의 적용

An Effective Application of AE Technique for the Detection of Defects in Steel Girder Bridges

김 상 호¹⁾ · 윤 동 진²⁾ · 이 상 호³⁾ · 김 형 석⁴⁾ · 박 영 진⁵⁾
Kim, Sang Hyo Yoon, Dong Jin Lee, Sang Ho Kim, Hyung Suk Park, Young Jin

요 약 : 본 연구에서는 음향방출기술을 적용한 실내모형실험을 통하여 강판형교의 피로 취약부위에서의 결함을 효과적으로 검출할 수 있는 AE기법을 제시하였다. 잔존수명의 산정에 의해 부재간의 상대적인 취약도를 비교·분석하면 교량의 안전점검시 점검대상의 우선순위와 범위를 결정할 수 있어 보다 효율적인 AE기술의 적용이 가능함을 알 수 있었다. 경제적이고 효율적인 AE기술의 적용을 연구하기 위하여 실시한 실험을 통한 주파수 분석 결과 차량통행시 잡음은 100~200 kHz사이에 집중되었고 균열에서의 AE신호는 400~500 kHz 사이에 편중됨을 알았다. 따라서 R30 센서가 강판형교의 결함검출에 적합한 센서라고 판단되었다. 균열을 도입하여 실험한 결과 모의 AE발생원에 의해 결정된 위치표정방법이 실제 균열이 발생할 때에도 잘 적용되며, 하중의 증가와 균열의 진전길이 등을 AE신호의 발생빈도와 비교한 결과 거의 선형적으로 비례함이 밝혀졌다. 그리고, 강교량과 같은 대형구조물에 적합한 경제적이고 효율적인 위치표정방법도 실험을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT : In this study, an effective application method of AE technique for the detection of fatigue crack in multi-girder steel bridges has been proposed. The applicability has been examined through the laboratory works with bridge model. The proposed analytical method which evaluates the remaining fatigue lives of structural members may improve the rational determination of the priority of inspection for structural members assuming to have fatigue cracks. Laboratory tests for the application of AE technique to steel girder bridges show that the frequency bands of traffic noise are in the range between 10

- 1) 정희원, 연세대학교 토목공학과
- 2) 한국표준과학연구원 방재기술연구소
- 3) 정희원, 연세대학교 토목공학과
- 4) 현대건설주식회사 토목설계실
- 5) 코오롱건설주식회사 기술연구소

본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

show that the frequency bands of traffic noise are in the range between 100~200 kHz and the AE signal raised from fatigue cracks is concentrated around 400~500 kHz. Therefore, R30 sensor is proved to be the most suitable for the detection of cracks in steel girder bridges. A linear proportionality between the crack propagation and the frequency of AE signals has been obtained. In addition, an economic and effective source location method for steel girder bridges was studied through experiments.

핵심용어 : 강판형교, 결합검출, 피로균열, 잔존수명, 음향방출(AE)기술, 음향방출신호, 위치표정방법

KEYWORDS : steel girder bridge, detection of defect, fatigue crack, remaining life, acoustic emission method(AE method), AE signal, source location

1. 서론

현재 국내에서 교량의 구조적 안전성 확보와 공용내하력 산정을 위해 실시하고 있는 안전진단 방식은 전체 구조계의 역학적 거동파악에 그 주안점을 두고 있어, 부재내부, 용접부, 복잡한 연결부위 등 육안점사시 시야가 미치지 못하는 부분에 존재하는 결함은 파악하기 어렵다. 따라서, 교량의 안전성 확보를 위해 보다 신뢰할 수 있는 안전점검 및 진단기법개발의 필요성이 인식되고 있어 기존의 교량안전진단법이 지니고 있는, 한계성을 보완할 수 있는 비파괴검사법의 도입이 활발히 추진되고 있다.

비파괴검사법으로는 초음파탐상법, X-선법 등 여러가지가 있으나 음향방출(Acoustic Emission, AE)기술은 내부의 미시적 변형이나 파괴거동의 규명에 뛰어난 특성때문에 그 동안 압력용기, LNG탱크, 베어링 등의 결합검출에 많이 이용되어 왔다. 탄성파를 이용하여 결함의 위치와 성장을 탐사하는 AE기술은 다음과 같은 한계성으로 인하여 교량에 있어 기발견된 균열의 성장감시용으로 이용되고 있으나, 미지의 피로균열검출에 대한 적용은 아직까지 초보적인 연구단계에 머물러 있었다. 첫째, 균열이 성장할 때 발생하는 탄

성파는 장애물이나 전파거리에 의해 급격히 감소하는 특성이 있다. 이로 인하여 규모가 거대하고 여러 부재들이 복잡하게 연결된 구조물인 교량에서는 AE센서의 배열에 어려움이 있다. 둘째, 교량에는 차량의 통행으로 발생하는 연속적인 잡음으로 인하여 균열신호와와의 분리에 난점이 있다.

따라서 본 연구에서는 상세부재별 잔존수명의 산정 등을 통해 부위별 취약도를 판정하여 실교량에서의 안전진단을 위한 비파괴검사의 우선순위와 센서배치의 최적범위를 결정할 수 있는 효과적이고 합리적인 방법을 연구하였다. 또한, AE기술을 이용한 효과적인 결합검출기법을 연구하기 위하여 도로교표준시방서에 준하여 설계·제작된 모형교량을 대상으로 실험을 실시하였다. 실험내용은 먼저 여러 가지 조건으로 AE신호를 취득하여 강판형교에서의 AE신호전파특성을 분석하여 효과적인 균열신호 취득조건에 대하여 연구하였으며, 차량의 통행시 발생하는 잡음과 균열에서 발생하는 AE신호를 수집·분석하여 잡음의 분리방법을 연구하였다. 그리고 효율적인 위치표정방법을 정립하기 위하여 다양한 방식으로 센서를 배열하고 신호취득조건을 변화시켜 대상교량에 적용·실험하였으며, 피로균열에 대한 취약부위에 유압하중장치로 실제 균열을 도입하면서 위치표정의

정확성을 검증하여 현장에서 공용중인 실교량에 대해 적용할 수 있는 효과적인 비파괴검사방법을 제시하였다.

2. 피로잔존수명산정을 통한 취약부위 판정방법

본 연구에서는 교량의 효율적인 유지관리를 위한 점검시 취약부위의 판정을 위한 해석적 방법으로서 잔존수명의 개념을 도입하였다. 여러 위치에서 상세부위별로 잔존수명을 계산하면 피로파괴에 대한 절대적인 안전성의 판정은 물론 상대적인 취약도의 비교가 가능하므로 각 부위별 점검의 비중과 시기를 보다 합리적으로 결정할 수 있다.

이 절에서는 선정된 형식의 교량을 대상으로 4가지 경우의 교통조건에 대하여 각각 잔존수명을 산정하여 부재간의 상대적인 피로취약도를 비교하였다. AASHTO 시방서에서는 피로트릭 한 대를 재하시켜 응력범위를 구하고 교량의 형식과 시간에 따른 응력주기를 고려하여 잔존수명을 산정하는 방식을 제시하고 있으나⁽¹⁾, 본 연구에서는 일일교통량, 차종혼입률, 주행속도와 차간거리 등의 통행특성을 보다 잘 반영할 수 있는 모의분석기법을 이용하여 응력범위를 결정하여 잔존수명을 산정하였다.

공용중인 교량에 대한 피로손상도를 추정하기 위한 잔존수명은 일반적으로 다음 식으로 계산할 수 있다⁽²⁾.

$$Y_f = \frac{f \cdot K \times 10^6}{T_a (R_s \Delta \sigma_r)^3} - a \quad (1)$$

여기서,

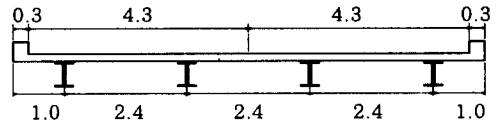
- Y_f = 잔존피로수명(년)
- = 1.0(안전수명계산시),
- f = 2.0(평균수명계산시)
- K = 상세부상수
- T_a = 추정된 수명기간동안 외측차선에서의

일평균트럭량

- R_s = 신뢰성계수
- $\Delta \sigma_r$ = 응력범위
- a = 교량의 공용년수

이다.

대상교량은 지간이 30m인 2경간 연속교 형식의 강판형교로서 도로교표준시방서의 허용응력설계법에 따라 설계하였으며, 작용하중으로는 사하중과 활하중, 충격하중을 고려하였고 설계응력이 허용응력(2,100kg/cm²)에 근접하도록 단면을 조정하였다. 또한 내·외측거더를 동일하게 선정하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 대상교량의 횡단면도를 나타낸다.



단위 : m

그림 1. 대상교량의 횡단면도

현재 교량의 공용년수는 10년, 교통량의 성장률은 6%로 가정하였으며 $f = 2.0$ 을 사용하였고 T_a 는 교량의 공용년수와 교통량성장률에 근거하여 기제시된 표를 이용하여 계산하였다⁽¹⁾. 일일교통량과 총차량혼입률 등의 교통조건에 따른 취약도의 분석을 위하여 4가지 경우의 교통조건에 대하여 각각 잔존수명을 산정하였다. 검토대상부위는 지간의 중앙부위이고, 거더간의 상대적인 취약도도 비교하기 위하여 외측거더와 내측거더로 나누어 분석하였다.

교량상의 검토대상부위에서의 차량하중에 의한 응력이력의 분석을 위해서는 모의발생된 차량행렬을 적정한 이동간격에 따라 연속적으로 이동시키며 발생하는 하중효과의 변화를 분석하였다. 이동하는 차량행렬에 대한 응력변화의 분석은 격자구조해석모델을 통하여 작성한 하중영향면을 이용하였다. 이때 대상교량에 대한 재하시험결과가 있다면 그에 따라 해석모형이 적절히 보정되어야

할 것이다.

표 1. 검토대상부위에서의 등가응력범위

(단위 : kg/cm²)

교통조건	등가응력범위	
	외측거더	내측거더
일일교통량 10000대, 중차량혼입률 15%	419.1	288.8
일일교통량 18000대, 중차량혼입률 30%	447.7	308.8
일일교통량 10000대, 중차량혼입률 15%	420.2	298.4
일일교통량 18000대, 중차량혼입률 30%	447.8	309.9
대상교량에 대해 AASHTO 시방서에 준하여 계산된 응력범위	464.8	294.8

대상부위에서의 등가응력범위와 계산된 잔존수명은 각각 표 1과 표 2와 같으며 이를 토대로 산정한 각 상세범주별 잔존수명은 표 4와 같다. 표 2에는 참고로 AASHTO 시방서에 준하여 계산된 잔존수명도 정리되어 있다. 표 2에서 K는 상세부상수이며, 표 3은 우리나라 도로표준시방서와 AASHTO 시방서에서 분류한 상세범주별로 정한 상세부상수를 나타낸 것이다.

표 2. 검토대상부위에서의 잔존수명

(단위 : 년)

교통조건	외측거더	내측거더	외측거더*	내측거더*
일일교통량 10000대, 중차량혼입률 15%	1.01K	3.06K	0.98K	3.85K
일일교통량 18000대, 중차량혼입률 15%	0.57K	1.73K	0.55K	2.15K
일일교통량 10000대, 중차량혼입률 30%	0.62K	1.89K	0.49K	1.94K
일일교통량 18000대, 중차량혼입률 30%	0.34K	1.04K	0.27K	1.08K

* : AASHTO 시방서에서 제시한 방법에 의해 계산된 잔존수명값

표 3. 상세범주에 따른 상세부상수²⁾

상세범부	A	B	B'	C	D	E	E'	F
상세부상수 (K)	68	33	17	12	6	2.9	1.1	2.9

표 4. 상세범주별 잔존수명

(단위 : 년)

상세범주	A	B	B'	C	D	E	E'	F
상세부상수 (K)	68	33	17	12	6	2.9	1.1	2.9
10000대* 15%**	외측거더	58.7	23.3	7.2	2.1	-	-	-
	내측거더	198.1	91.0	42.0	26.7	8.4	-	-
18000대* 15%**	외측거더	28.8	8.8	0.1	-	-	-	-
	내측거더	107.6	47.1	19.4	10.8	0.4	-	-
10000대* 30%**	외측거더	32.2	10.5	0.5	-	-	-	-
	내측거더	118.5	52.4	22.1	12.7	1.3	-	-
18000대* 30%**	외측거더	13.1	1.2	-	-	-	-	-
	내측거더	60.7	24.3	7.7	2.5	-	-	-

* : 일일교통량, ** : 중차량혼입률

- : 잔존수명이 0보다 작은 부위

대상교량에 대한 등가응력범위와 잔존수명의 분석결과 내측거더는 외측거더의 약 70%의 응력범위가 발생하였고, 외측거더의 잔존수명은 내측거더의 약 33% 수준으로 계산되었다. 반면 AASHTO 시방서에 의한 분석결과와 내측거더는 외측거더의 약 65%의 응력범위가 발생하였고, 외측거더에서는 내측거더의 약 25% 수준의 잔존수명값을 얻을 수 있었다. 피로트럭 한 대만을 교량의 가장 불리한 위치에 재하하여 응력범위를 구하는 AASHTO 시방서에 의한 분석결과는 내측거더에 비해 외측거더의 취약도가 과장되어 산출되었으나, 본 연구에서 채택한 모의분석기법은 교량에서의 실제적인 통행특성을 반영하므로 거더간의 상대적인 취약도가 현실성있게 산출된 것으로 판단된다. 그러나 모의분석기법에서 요구되는 다소 복잡한 계산절차를 고려하면 특별한 구조형식이 아닌 교량에서는 AASHTO 시방서에 준한 평가도 비교적 합리적인 결과를 제시하며 상대적인 취약도 비교에는 큰 문제점이 없다고 판단된다.

각 상세범주별로 4가지 경우의 교통조건에 대하여 잔존수명을 산정한 결과 모든 경우에서 상세

범주 E, E', F의 잔존수명은 0보다 작았으며, 상세범주 C와 D도 다른 부위에 대하여 상대적으로 취약하였다. 따라서 교량의 설계단계에서부터 이런 상세부위는 되도록 피하여 설계하는 것이 바람직할 것이며 사용중인 교량의 점검시에는 이런 취약부위는 좀 더 세심하고 주의깊게 조사하여야 할 것이다.

본 연구에서는 도출된 잔존수명을 바탕으로 각 부위별 점검의 주기를 다음과 같이 분류해 보았다.

잔존수명이 매우 짧게 평가된 부위는 피로손상에 취약하고 현재 피로균열이 내재되어 있을 가능성이 큰 부위이므로 세심하고 집중적인 점검과 필요에 따라서는 상시계측을 통한 관리도 요구되며, 잔존수명이 짧은 부위는 아직까지는 피로에 대하여 건전하다고 할 수 있으나 피로손상의 발생가능성이 상대적으로 높으므로 주의를 기울여 점검해야 한다고 판단된다. 그리고, 비교적 긴 잔존수명을 가지는 부위는 피로손상의 가능성이 상대적으로 적으므로 특별히 노후된 교량이 아닌 경우 일반적인 육안검사만으로도 안전에는 큰 문제가 없다고 판단된다.

물론 점검주기는 교량의 관리상태나 현장의 교통여건 등 여러 가지 요인들을 고려하여 결정해야 하지만 위와 같은 결과를 토대로 기초적인 자료의 제시가 가능하다면 좀 더 일관성있는 안전점검계획의 수립이 가능하고 AE기술과 같은 정밀 비파괴검사법을 보다 효율적으로 적용할 수 있다고 판단된다.

3. 실험을 통한 AE신호분석

본 연구에서는 강판형교에서 발생하는 여러 가지 결합인자들을 고려하여 실험실내에서 여러 형태의 모사실험 및 결합검출기법을 연구하고자 실물모형을 제작하여 실험하였으며, 차량통행시 발생하는 잡음의 분리방법을 연구하기 위하여 실험장에서 차량에 의한 잡음을 취득하여 분석하였다. 실험에 사용된 모형교량의 제원은 표 5와 같고

제작된 모형의 모습은 그림 2와 같다.

표 5. 모형제작된 교량의 제원

(단위 : mm)

구 분	상부플랜지	하부플랜지	복부판	보강재
치 수 (W×t×H)	160×9×5000	340×18×5000	1250×9×5000	60×8×1250

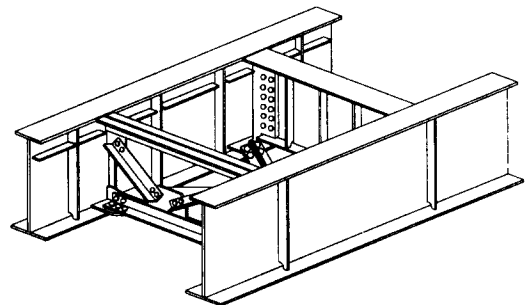
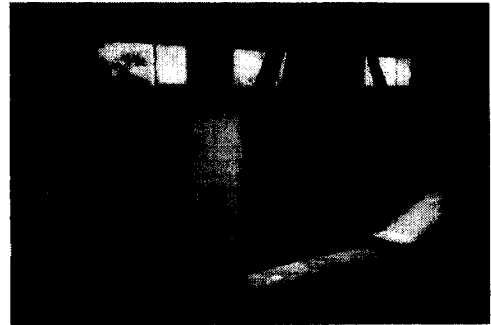


그림 2. 실내실험용으로 모형제작된 강판형교의 모습

3.1 실험장치

AE신호는 센서를 통하여 취득된 후 프리앰프를 통하여 증폭되고 AE신호시스템에 의해 처리되었다. 센서는 150kHz에서 공진주파수를 갖는 공진형센서(R15 : PAC), 300kHz에서 공진주파수를 갖는 공진형센서(R30 : PAC), 500kHz에서 공진주파수를 갖는 공진형센서(R50 : PAC) 그리고, 550kHz에서 -60dB의 최대감도를 갖는 광대역형센서(WD : PAC)가 사용되었고, 프리앰프에서는 60dB로 신호를 증폭하였다.

프리앰프에 의해 증폭된 신호는 AE신호시스템 (SPARTAN 2000)에 의해 취득·분석되었으며, 이 신호는 또한 디지털오실로스코프(LeCroy 9354A)를 사용하여 기록한 후 파형 및 주파수 분석에 사용하였다. 모형교량에 균열을 도입하기 위해서는 유압하중장치(10ton)가 사용되었으며 이 때 가해지는 하중의 변화는 전압으로 변환시킨 후 AE신호시스템에 입력시킴으로써 실시간으로 기록되었다. 실험에 사용된 장치들의 개요는 그림 3과 같다.

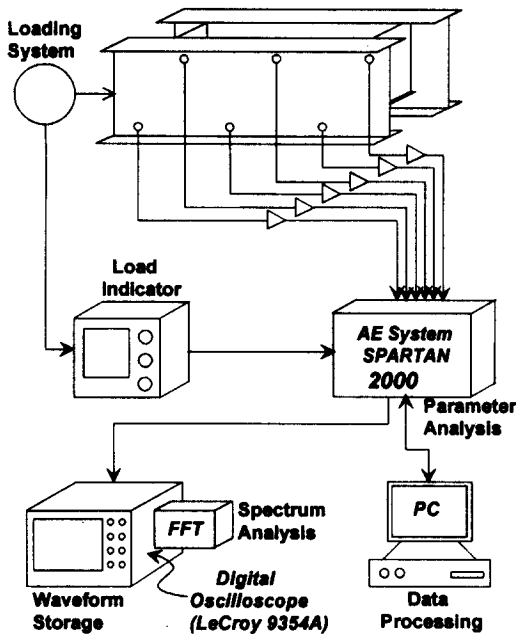


그림 3. 실험장치의 개요도

3.2 AE신호 전파특성분석

탄성파는 그 특성상 재질에 따라 전파속도가 달라지기 때문에 AE측정기술에서는 검사대상체의 형태나 재질이 바뀔 경우 그 시험대상체에 맞는 독립적인 교정시험을 해야 한다⁽³⁾. 따라서 본 연구에서는 강판형교에서의 신호전파특성을 분석하기 위하여 모형교량의 복부판에 센서를 설치하

여 거리에 따른 신호의 감쇠, 진행경로의 차이, 장애물에 대한 영향 등을 실내실험을 통하여 분석하였다.

모의 AE발생원으로는 연필심파괴(pencil lead break), AE펄스(pulser), 유리모세관파괴(glass capillary) 등이 있으나 본 연구에서는 균열 신호와 가장 유사하고 현장실험에 적합한 연필심 파괴방법-샤프파 같은 모양의 펜슬브레이커(pencil breaker)의 심이 부러질 때 발생하는 신호를 이용-을 주로 사용하였으며, 실내실험의 신뢰도를 높이는 목적으로는 AE펄스를 이용하였다. 거더의 복부판에 부착한 센서의 배치모습은 그림 4에 나타내었고 거리에 따른 신호의 감쇠특성은 그림 5에 나타내었다. 그림 4에서 점선부분은 후면의 보강재를 나타내고 실선은 전면에는 수직 보강재, 후면에는 브레이싱과 다이아프램이 있음을 나타낸다.

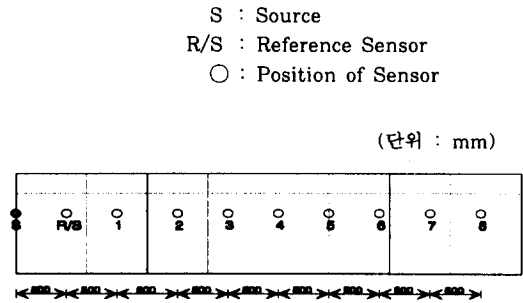


그림 4. 신호감쇠측정을 위한 센서의 위치

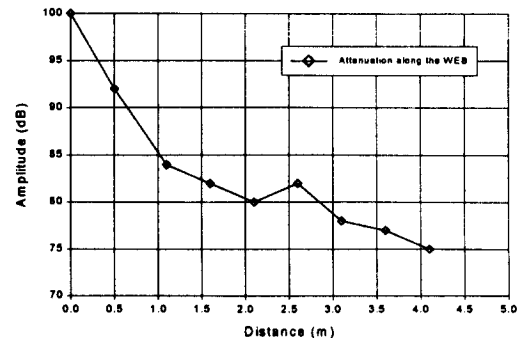


그림 5. 거더 복부판부분에 대한 신호감쇠특성

실험결과 그림 5에서 보듯이 탄성파의 전파특성 중의 하나인 처음 근거리에서의 심한 감쇠현상 및 보강재의 영향으로 초기에 심한 감쇠특성을 보인 후 다이어그램을 지나면서 또 한 번의 심한 감쇠를 나타낸다. 그 이후에는 보강재가 있더라도 상대적으로 완만한 감쇠를 보이다가 보강재가 있는 바로 윗 부분에 센서가 있는 곳에서는 의외로 신호가 더 크게 나타나는 현상을 보였다. 이는 보강재의 낮은 끝 부분에서 반사되어 오는 신호가 중첩이 되어 신호의 진폭이나 에너지가 다소 크게 나타나는 것으로 추정된다. 이 이후에는 보강재나 브레이싱을 통과할 때에도 완만한 감쇠 현상을 나타내었다. 즉 약 5m 까지의 신호 감쇠량이 약 25dB수준이므로 미소한 신호의 경우 그 이상의 거리에서는 감지가 불가능할 수도 있을 것으로 판단된다. 그리고, 전파속도의 측정결과 평균속도가 약 5000m/s 부근의 값을 가지고 있으며, 이 결과로 미루어 강판형교에서는 전형적인 형태인 판형(두께 약 10mm 전후)에서 존재하는 판파(plate wave 또는 Lamb wave) 모드가 지배적인 것으로 나타났다. 이 실험결과, 파가 구조물을 진행하는 동안 신호의 진폭이 감쇠하는 경향(attenuation effect)은 물론, 신호의 선단부에서의 오름시간(rise time)값이 급격히 늘어남을 볼 수 있는데, 이는 판형에서 존재하는 판파의 전형적인 분산특성(dispersive wave)이라 할 수 있다.

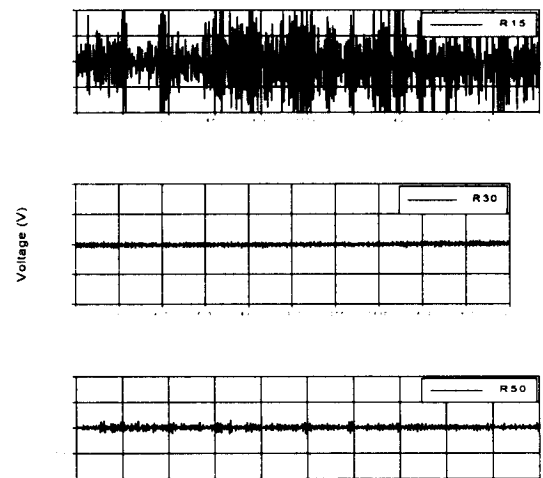
5.3 최적센서 결정을 위한 실험

공용중인 교량에서의 결함이나 이상 상태를 감지하기 위해서는 균열, 부식, 파괴 등의 손상에 대한 신호를 정상시 발생하는 주위잡음신호(Background Noise : BGN)로 부터 잘 분리해내는 것이 매우 중요한 작업이다. 따라서 본 실험에서는 실제 교량에서 차량 통행시 발생하는 여러 가지의 잡음에 대한 신호와 실제 균열의 성장시 발생하는 신호를 취득하여 결함에서 발생하는

신호와 분리할 수 있는 방안을 연구하였다.

실험은 교통량이 상대적으로 많고 전형적인 강판형교 구간을 가진 대상교량의 지간중앙에서 북부판의 가운데 지점에 주파수특성이 서로 다른 4종류의 센서(R15, R30, R50, WD)를 같은 장소에 부착하여 잡음신호에 대한 센서의 주파수특성의 영향을 고찰하도록 하였다. 그리고 균열에서 발생하는 신호의 특성을 분석하기 위해서는 실내에서 모형교량에 노치를 낸 후 유압하중장치를 이용하여 보강재와 북부판사이에 인장력을 발생시켜 보강재단부에 균열을 도입하였다.

그림 6은 주파수 특성이 다른 4종류의 센서를 사용했을 때 교량에서 차량통행시 발생한 대표적인 잡음원의 각 센서에 대한 파형을 보여주고 있다. 파형의 모습에서도 보듯이 광대역형 센서에 의한 파형은 저주파수와 고주파수 성분을 공유하고 있는 것을 볼 수 있으며, 공진형 센서에 의한 파형은 공진주파수 범위의 성분만을 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 차량통행시 발생하는 잡음과 실제 균열의 성장시 발생하는 AE신호중 대표적인 파형에 대한 각각의 주파수 스펙트럼(Fast Fourier Transform : FFT)결과를 나타내고 있다.



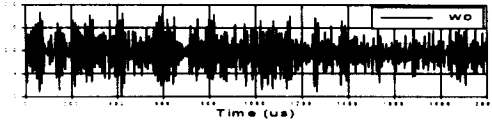


그림 6. 차량통행시 발생하는 대표적인 파형

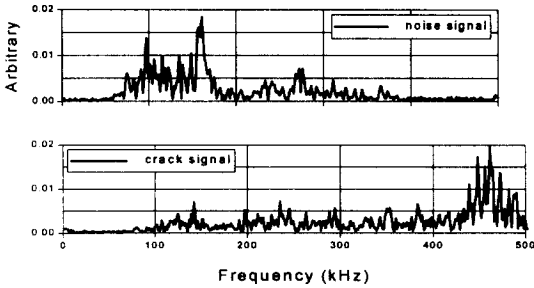


그림 7. 잡음과 균열신호에서 얻은 주파수 스펙트럼 결과

그림에서 보듯이 잡음의 신호는 대체로 100kHz에서 200kHz 사이의 성분을 가지는 주파수특성을 보이고 있고, 균열의 신호는 400kHz에서 500kHz 사이의 성분을 가지는 주파수특성을 보이고 있다.

따라서 본 연구에서는 R30 센서이면 강교량에서 발생하는 대부분의 잡음 신호는 잘 제거되고 균열신호는 무리없이 취득할 수 있다고 판단된다. 물론 R50 센서가 보다 균열신호에 민감하지만 이 센서가 취득하는 신호는 500kHz대의 고주파수이므로 감쇠가 심하여 상대적으로 먼거리에서 발생한 신호를 놓치지 않기 위해서는 센서의 간격을 좁혀야 한다. 그러나 이는 보다 많은 센서의 배열이 필요하므로 효율적인 위치표정에 적합하지 않다고 사료된다.

4. 결함검출을 위한 위치표정기술 적용

본 연구에서는 강판형교의 위치표정에 적합한 최적의 조건을 결정하기 위해 위치표정방법, 센서의 종류, 속도 그리고 문턱값(threshold)을 다양하게 변화시켜 실제균열의 신호와 유사한 연필심

파괴와 유압하중장치를 이용하여 모형교량에 균열을 도입하며 위치표정실험을 실시하였다.

4.1 모의 AE발생원을 이용한 위치표정실험

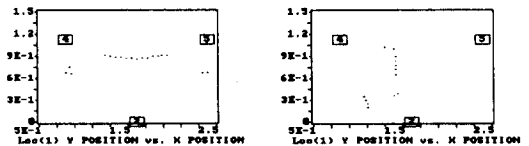
실험방법은 수평보강재와 수직보강재를 따라 10cm간격으로 연필심파괴방법을 사용하여 표정의 정확도를 측정하였다. 실험은 표 6과 같이 2가지 종류의 센서를 이용하여 6가지 경우에 대하여 실시하였다.

표 6. 연필심파괴를 이용한 위치표정실험

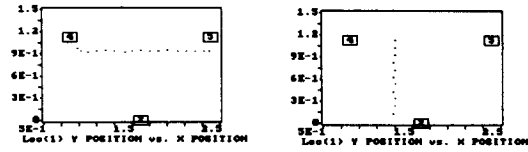
	위치표정방법	센서종류	전파속도 (m/s)	문턱값																			
실험1	삼각형	R15	3000	45																			
실험2	삼각형	R15	5050	실험3	삼각형	R15	5050	60	실험4	삼각형	R30	3120	60	실험5	삼각형	R30	3600	45	실험6	사각형	R30	3600	45
실험3	삼각형	R15	5050	60																			
실험4	삼각형	R30	3120	60																			
실험5	삼각형	R30	3600	45																			
실험6	사각형	R30	3600	45																			

(1) R15 센서를 이용한 실험

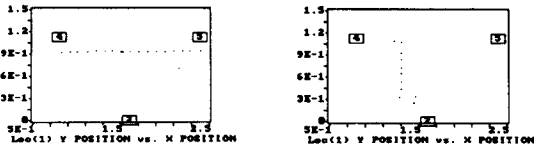
150kHz에서 공진주파수를 갖는 공진형센서(R15 : PAC)는 감쇠가 적어 비교적 먼거리까지도 신호를 놓치지 않고 위치표정이 가능하지만 잡음과 같은 낮은 주파수의 잡음이 많이 발생하는 공용중인 교량에서는 표정이 어려운 단점이 있으나 여러 가지 조건에 대한 자료수집을 위하여 우선 이 센서를 사용하여 실험을 실시하였다. 실험 결과는 그림 8과 같다.



(a) 실험 1



(b) 실험 2



(c) 실험 3

그림 8. R15 센서를 사용한 연필심파괴에 의한 위치표정실험결과 (x, y 축의 단위 : m)

그림 8(a)에서 보는 바와 같이 실험 1에서는 수평보강재를 기준으로 한 실험결과는 비교적 위치표정은 잘 되었으나 양 끝쪽의 신호는 오표정되었고 전체형상이 U자처럼 중앙부에서의 신호는 실제위치보다 조금 아래쪽에 표정되었다. 그리고 수직보강재를 기준으로 한 실험에서는 그림과 같이 상단부의 위치표정은 잘 되었으나 하단부에서의 신호는 좌측으로 편중되게 표정되었다. 이는 강판형교에서 R15 센서를 사용할 경우 속도 3000m/s는 적절하지 않기 때문에 발생한 현상으로 분석되었다.

그림 8(b)와 같이 실험 2에서는 실험 1에 비하여 위치표정이 거의 완벽하게 이루어졌다. 이 실험결과 강판형교에서 R15 센서를 사용할 경우 속도는 5050m/s로 하는 것이 적당하다고 판단된다. 이는 3.2절에서 언급한 바와 같이 강판형교에서의 지배적 파형인 판파의 특성에 기인한 것으로 생각된다.

실험 3에서는 그림 8(c)와 같이 수평보강재쪽의 신호는 이상적으로 표정되었으나 수직보강재의 상단부와 하단부에서는 약간의 오표정이 되었다. 이는 문턱값을 너무 크게 하여 나온 결과로 사료된다.

실험 1, 2, 3의 결과로부터 강판형교에서 R15

센서를 이용하여 위치표정할 때에는 속도 5050m/s, 문턱값 45dB가 가장 적당한 조건임이 나타났다.

(2) R30 센서를 이용한 실험

300kHz에서 공진주파수를 갖는 공진형센서(R30 : PAC)는 감쇠가 비교적 심해 센서간의 간격이 커지면 신호전달이 어려운 단점이 있으나 잡음과 같은 낮은 주파수의 신호는 취득하지 않으므로 공용중인 교량에서의 실험에 적당하다고 판단된 센서이다. 판파는 전파매질의 두께와 주파수 등에 따라 전혀 다른 속도로 전파하는 특성이 있으므로 본 실험에서는 우선 강판형교와 같은 판형구조물에서 R30 센서에 적합한 신호의 속도를 찾기 위하여 두 센서에 동일한 신호를 전달시킴으로써 도달시간차를 측정하는 4번의 실험을 실시하였다. 실험결과는 표 7과 같다.

이 실험결과 문턱값이 60dB일때의 속도는 약 3120m/s로 나타났고 문턱값이 45dB일때의 속도는 약 3600m/s로 측정되었다.

실험 4는 R30 센서를 사용하여 속도는 3120m/s, 문턱값은 60dB로 하여 삼각형위치표정방법으로 실시하였고, 실험 5는 동일한 조건에서 속도만 3600m/s로 바꾸어 실시하였다. 그리고 실험 6은 보다 적절한 위치표정방법을 찾기 위하여 사각형위치표정방법을 적용하였다. 실험 결과는 그림 9와 같다.

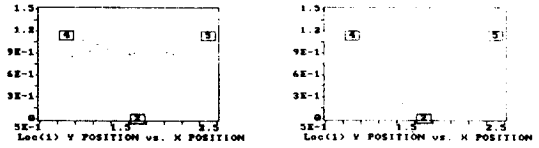
그림 9(a)와 같이 실험 4의 결과 R15 센서를 이용할 때와 같이 아주 정확한 위치표정은 되지 않았으나 수직보강재쪽의 신호는 비교적 일관되게 표정하였고 실험 5에서는 그림 9(b)와 같이 수평보강재쪽과 수직보강재쪽 모두에서 일관된 표정값을 얻을 수 있었다. 그러나 사각형 위치표정방법을 사용한 실험 6에서는 그림 9(c)와 같이 매우 불량한 표정값이 나왔다. 이 실험에서는 전체 복부판에 대해 삼각형위치표정 때와 같은 수의 센서를 사용하였는데 이 경우 세로방향의 센서간격에 비해 가로방향의 센서간격이 너무 커서 큰 오차가

표 7. R30 센서를 이용한 속도측정결과

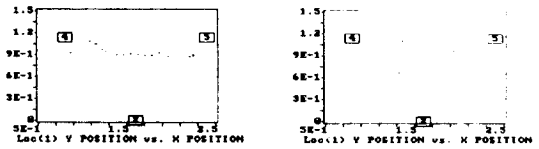
TEST No.	도달시간 (sec)	CH.	오름시간 (μ sec)	진폭(dB)	전파속도 (m/s)
T1 (문턱값=45)	10.94902	5	60	92	3819
	10.94944	4	168	78	
	29.04642	5	58	87	
	29.04686	4	140	74	3608
	44.56895	5	57	84	
	44.56941	4	124	71	
	04.52842	5	60	88	3578
	04.52886	4	140	74	
	19.38590	5	60	87	
19.38635	4	141	74	3574	
01.44627	4	54	81		3922
01.44668	5	1070	73		
12.11022	4	52	83		
12.11062	5	1071	76	3951	
26.54141	4	150	80		
26.54181	5	1643	74		
40.23614	4	147	80	3980	
40.23654	5	1445	73		
04.29209	4	60	78		
04.29249	5	1412	73	3988	
02.87246	5	35	87		3311
02.87294	4	77	74		
29.43362	5	51	90	3197	
29.43412	4	77	75		
44.86921	5	36	87		
44.86973	4	38	73	3059	
45.25269	5	35	85		
45.25322	4	36	71		
04.10073	5	28	87	3048	
04.10124	4	39	73		
57.62299	4	29	76		3094
57.62352	5	634	70		
21.03235	4	29	78		
21.03284	5	264	73	3259	
39.67927	4	25	74		
39.67979	5	1512	68		
52.45706	4	120	78	3059	
52.45758	5	908	72		
04.58591	4	115	76		
04.58643	5	1465	71	3089	
57.62299	4	29	76		3033
57.62352	5	634	70		
21.03235	4	29	78	3259	
21.03284	5	264	73		
39.67927	4	25	74		
39.67979	5	1512	68	3059	
52.45706	4	120	78		
52.45758	5	908	72		
04.58591	4	115	76	3089	
04.58643	5	1465	71		
57.62299	4	29	76		3033
57.62352	5	634	70		
21.03235	4	29	78		
21.03284	5	264	73	3259	
39.67927	4	25	74		
39.67979	5	1512	68		
52.45706	4	120	78	3059	
52.45758	5	908	72		
04.58591	4	115	76		
04.58643	5	1465	71	3089	

발생한 것으로 사료된다. 정확한 표정값을 얻기 위해서는 보다 많은 센서를 사용하여 센서간의 간격을 줄여야 하나 이는 효율적인 위치표정방법이 되지 못한다. 그러므로 교량과 같이 한 방향으로

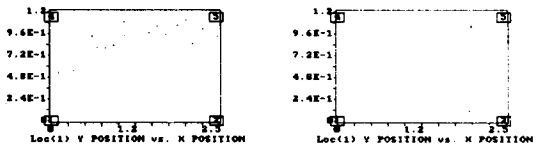
긴 형상을 가진 구조물에서는 삼각형위치표정방법이 가장 적합하다고 판단된다.



(a) 실험 4



(b) 실험 5



(c) 실험 6

그림 9. R30 센서를 사용한 연필심파괴에 의한 위치표정실험결과 (x, y축의 단위 : m)

4.2 균열발생에 의한 위치표정실험

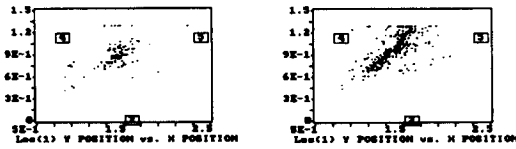
이 실험에서는 모의 AE발생원에 의한 위치표정실험을 기초로 유압하중장치를 이용하여 연구를 통하여 분석된 피로균열의 발생가능성이 가장 높은 수평보강재 단부와 수직보강재 단부에 실제 균열을 도입하여 실교량에서 균열이 성장할 때 발생하는 신호로 균열의 위치를 표정하였다. 실험방법은 R15 센서와 R30 센서를 사용하여, 모의 AE발생원을 이용한 위치표정실험에서 강관형교에 가장 적합하다고 판단되는 삼각형위치표정방법을 사용하였으며, 다음으로 적은 수의 센서를 이용하여 대략적인 위치표정이 가능한 일차원위치표정방법의 적용가능성을 시험하였다.

표 8 균열도입에 의한 위치표정실험

실험	위치표정 방법	센서 종류	전파속도 (m/s)	문턱값	위치 (x, y축상의 위치 단위 : m)
실험7	삼각형	R15	3000	45	수평보강재단부 (x : 1.5, y : 1.0)
실험8	삼각형	R15	5050	45	수평보강재단부 (x : 1.5, y : 1.0)
실험9	삼각형	R30	3600	45	수평보강재단부 (x : 1.5, y : 1.0)
실험10	삼각형	R30	3600	45	수직보강재단부 (x : 1.2, y : 0.1)
실험11	일차원	R30	3600	45	수직보강재단부 (x : 1.2, y : 0.1)

(1) 삼각형위치표정

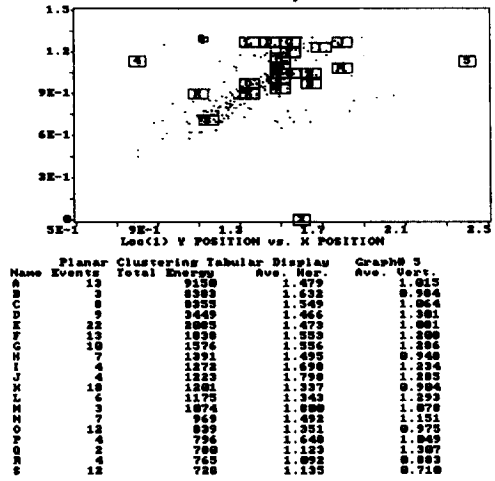
실험 7과 실험 8은 R15 센서를 사용하여 문턱값은 45dB로 동일하게 하고 속도는 각각 3000m/s, 5050m/s로 달리하여 삼각형위치표정 방법으로 수평보강재 단부에 균열을 도입하면서 실시하였다. 실험결과는 그림 10과 같다.



(a) 실험 7 (b) 실험 8
(x, y축의 단위 : m)
그림 10. 수평보강재단부에 도입한 위치표정결과

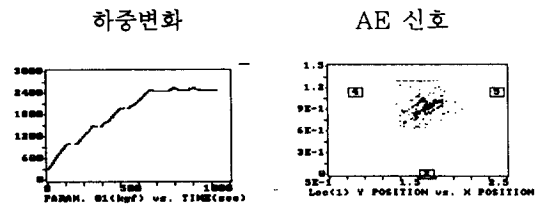
그림과 같이 균열이 도입된 수평보강재단부에서 AE신호가 집중되는 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 속도를 5050m/s로 조정된 실험 8에서 좀 더 균열의 위치에 근접하게 신호가 집중되었다. 실험결과 균열부위 뿐만아니라 주위에도 산발적인 신호들이 취득되었으나 이는 균열의 도입과정에서 생긴 잡음신호와 오프정값으로 다음 그림 11과 같이 신호의 발생빈도와 신호의 에너지량 순으로 분류함으로써 균열신호와 분리할 수 있었다.

그림과 같이 에너지량은 [A]지점에서 가장 높게 나왔고 신호발생빈도는 [E]지점에서 가장 높게 나왔다. [A], [B], [C], [D], [E], [F] 지점에서 신호발생빈도와 에너지량이 높게 나왔는데 이는 균열의 도입부 및 성장부와 일치하는 지점이다.



(x, y축의 단위 : m)
그림 11. 균열발생시 취득한 AE신호를 분류한 모습

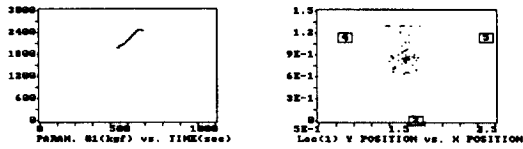
실험 9에서는 R30 센서를 사용하여 속도는 3600m/s, 문턱값은 45dB로 하여 삼각형위치표정 방법으로 수평보강재 단부에 균열을 도입하면서 실시하였다. 이 실험에서는 유압하중장치를 이용하여 균열을 성장시키면서 하중의 변화값도 실시간으로 취득함으로써 하중이 점진적으로 증가함에 따라 AE신호의 발생빈도차이를 비교할 수 있었다.



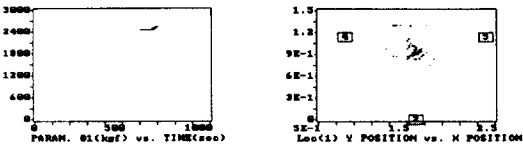
(a) 하중변화 0 ~ 2500kgf



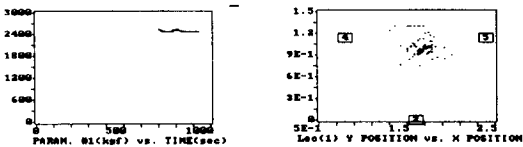
(b) 하중변화 0 ~ 2000kgf



(c) 하중변화 2000 ~ 2500kgf



(d) 하중변화 2400 ~



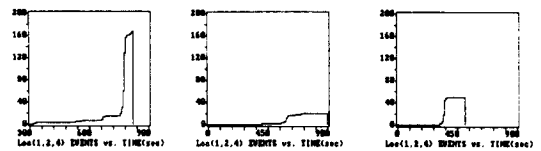
(e) 하중변화 2500kgf지속

그림 12. 하중단계에 따른 신호의 발생

실험결과와 그림 12와 같이 2000kgf 이전의 작은 하중에서는 AE신호가 거의 발생하지 않았으나 하중이 2000kgf를 넘기 시작하면서 급격히 많은 신호가 발생하였다. 그리고 2500kgf 정도의 하중이 지속될 때에도 많은 신호가 취득되었다.

실험 10에서는 실험 9와 동일한 조건으로 수직 보강재단부에 균열을 도입하면서 실제균열이 발생할 때의 신호로 위치표정실험을 실시하였다. 이 실험에서는 실험단계별 균열의 진전길이를 측정하며 1차, 2차, 3차에 걸쳐 균열의 성장에 따른

AE신호의 변화를 고찰하였다. 1차실험시에는 7mm, 2차실험시에는 1mm, 3차실험시에는 3mm의 균열성장량이 관찰되었다. 그림 13은 균열의 성장량에 따른 AE신호의 발생빈도를 보여준다. 이 실험은 동일부위에서 발생하는 균열을 대상으로 실시하였는데 1차실험에서는 비교적 작은 하중을 가해도 균열이 성장하였으나 2차, 3차 실험에서는 앞의 실험에서 가한 이전하중보다 더 큰 하중을 가해야만 균열이 성장하였다. 이는 Kaiser효과로써 설명할 수 있다.



(a) 1차실험

(b) 2차실험

(c) 3차실험

그림 13. 균열의 진전에 따른

실험결과와 균열의 진전길이와 AE신호의 발생빈도는 거의 선형적으로 비례함을 알 수 있었다. 이는 이미 발견된 균열을 감지할 때, 균열의 성장 정도를 확인할 수 있음을 나타내므로 음향방출기술은 교량의 안전점검을 위한 장기계측시 취약부위의 균열진전정도를 원거리에서 모니터링할 수 있는 기술로도 이용될 수 있다고 판단된다.

(2) 일차원위치표정

일차원위치표정은 일반적으로 이차원위치표정보다 정도는 떨어지나 교량과 같이 한 방향으로 긴 구조물에 대해 보다 경제적으로 적용될 수 있는 방법이다. 실험 11에서는 센서의 수를 이차원위치표정때 절반으로 줄여 일차원위치표정방법을 적용하였다. 센서는 북부판의 하단부에 등간격으로 배치하였다. 이 실험결과 그림 14에서와 같이 균열도입부에 히스토그램상의 높은 빈도로 AE신호의 집중도를 나타내었다. 비록 삼각형방법에 비해 정확한 이차원적인 위치표정은 되지 않

았으나 균열발생의 대략적인 위치표정이 가능하였다.

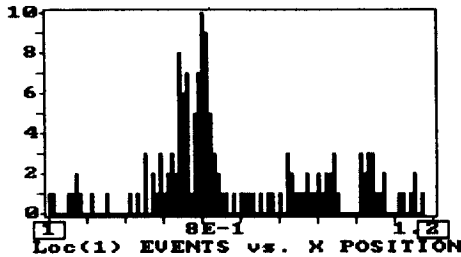


그림 14. 일차원방법에 의한 위치표정

교량과 같은 대형구조물에는 경우에 따라 우선 일차원위치표정으로 대략적인 결합의 위치를 파악한 다음 이차원위치표정으로 정확한 위치표정을 하는 것이 경제적이면서 효율적인 방법으로 판단된다. 특히 높이가 낮은 거더와 같이 길이 대 높이의 비가 큰 부재에서는 효과적으로 사용할 수 있는 위치표정방법이라고 사료된다.

4.3 AE기술을 이용한 효과적인 결함검출방법론

그 동안 경제성과 효율성의 제약으로 인하여 교량과 같은 대형구조물에는 그 적용의 제한성이 있어 왔다. 이 연구의 결과를 바탕으로 강교량에서 AE기술을 이용한 효과적인 결함검출의 방법론을 제시하여 보면 다음과 같다.

먼저, 점검의 대상교량이 정해지면 취약부위를 분석하고 동행특성을 파악하여 증가응력범위와 여러 계수들을 결정하여 잔존수명을 산정한다. 이를 토대로 AE기술의 적용대상부재와 적용범위를 결정하고 적용대상부재에 대하여 우선 일차원위치표정을 이용하여 균열의 존재여부와 대략적인 위치를 파악한 후, 삼각형방법으로 정확한 위치표정을 실시한다. 이와같은 과정을 통하여 미세균열의 탐사에 우수한 특성을 지닌 AE기술을 보다 경제적이고 효과적으로 강교량에 적용할 수 있다고 판단된다. 그림 15는 본 연구를 통해 얻어진 결

과를 바탕으로 강교량과 같은 거대구조물에 대하여 적용할 수 있는 경제적이고 효과적인 AE기술의 방법론을 흐름도를 이용하여 제시하였다.

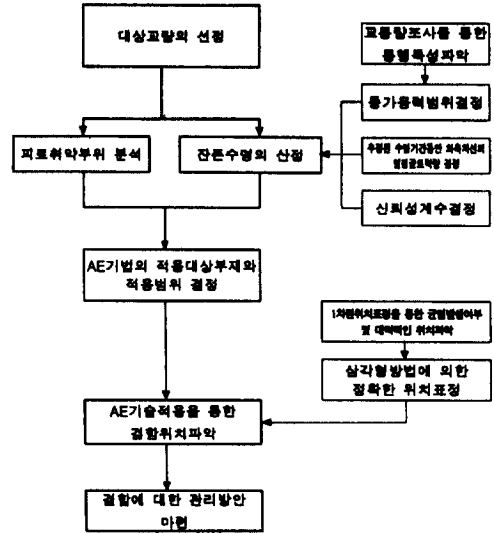


그림 15. AE기술의 효과적인 적용방법의 흐름도

5. 결 론

강관형교에서 피로균열에 취약한 부위에 대한 해석적 방법의 연구와 음향방출기술을 적용한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 교량에 대한 AE기술적용의 문제점으로 제기 되어왔던 통행에 대한 차량잡음의 제거문제와 AE신호의 감쇠에 따른 위치표정의 제한성에 관하여 모형교량을 통한 실내실험과 실교량에서 실시한 현장실험을 통하여 합리적인 적용기법을 제시하였다.
2. 부재간의 상대적인 취약도를 비교·분석할 수 있는 잔존수명을 산정하여 대형교량에 대한 안전점검시 점검대상의 우선순위를 결정하고, AE센서배치를 최소영역으로 축소하도록 하므로써 보다 효율적으로 AE기술을 적용할 수

있었다.

3. 삼각형위치표정방법이 강판형교의 구조에 가장 효율적이고 적합한 표정방법임이 실험을 통해 입증되었다. 그러나 본 연구에서는 교량과 같은 대형구조물에는 비교적 간편하고 표정영역이 넓은 일차원위치표정으로 대략적인 결함의 위치를 파악한 다음 삼각형위치표정으로 정확한 결함부위를 파악하는 경제적이면서 효율적인 방법을 제시하였다.
4. 현장 및 모형실험의 AE신호에 대한 주파수 분석결과 실험교량에서의 차량통행시 발생하는 잡음은 일반적으로 100~200 kHz 사이에 집중되었고 균열에서의 AE신호는 그 이상의 주파수범위에 편중되는 것을 알 수 있었다. 따라서 강교량에서의 결함검출을 위한 음향방출기술의 적용을 위한 최적센서는 센서의 감도 및 감쇠효과를 고려할 때 300kHz에서 공진주파수를 가지는 공진형센서라고 판단된다.

감사의 말

본 연구는 '95년 건설교통기술연구개발사업 "강교량의 안전진단을 위한 비파괴검사법 적용기술의 개발"의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- (1) American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide Specifications for Fatigue Design of

- Steel Bridges, 1989.(2) Moses, F., Schilling, C. G., and Raju, K. S., "Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges", NCHRP report 299, 1987. 11.
- (2) Moses, F., Schilling, C. G., and Raju, K. S., "Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges", NCHRP report 299, 1987
- (3) Beattie, A. G., "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation", Journal of Acoustic Emission, Vol. 2, 1983. 11, pp95-128.
- (4) Bogdanoff, J. L., and Kozin, F., "Effect of Length on Fatigue Life of Long Thin Continuous Components", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115, No. 7, 1989. 7, pp1441-1457.
- (5) Fisher, J. W., Fatigue and Fracture in Steel Bridges, A Willey-Interscience Publication, 1984.
- (6) Hick, H., Willer, H., Winter, E., and Simacek F., "Acoustic Emission Measurements on Bridges", Journal of Acoustic Emission, Vol. 10, 1992. 11, pp67-70.
- (7) Achenbach, J. D., Wave Propagation in Elastic Solids, Elsevier Science Publisher B. V., 1991.
- (8) 김상효, 이상호, "교량의 안전성 확보를 위한 비파괴검사법의 적용", 비파괴검사학회지, Vol. 15, No. 3, 1995, pp431-438.
- (9) 윤동진, "교량 구조물 진단에의 음향방출기술의 적용", 비파괴검사학회지, Vol. 15, No. 3, 1995, pp491-501.

(접수일자 : 1997. 6. 27)