

콘크리트 구조물의 손상 평가를 위한 능동/수동 결합형 NDT 신기술 개발

2008. 08. 14.

주관연구기관 / 한국표준과학연구원
협동연구기관 / 한국과학기술원

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “콘크리트 구조물의 손상 평가를 위한 능동/수동 결합형 NDT 신기술 개발”의 최종 보고서로 제출합니다.

2008. 8. 14.

주관연구기관 : 한국표준과학연구원
원 장 정 광 화
협동연구기관 : 한국과학기술원
총 장 서 남 표

■ 총괄연구책임자 / 책임연구원	윤 동 진	AE 및 총괄
■ 주관연구기관 참여연구원 / 책임연구원	윤 동 진	AE 실험 및 총괄
/ 책임연구원	허 용 학	파괴/구조
/ 선임연구원	김 영 길	소프트웨어
/ 선임연구원	서 대 철	구조/AE
/ 책임연구기관	김 동 진	구조실험
/ 석사후연수원	김 정 희	실험 및 분석
/ 석사후연수원	한 병 희	AE 신호처리
■ 협동연구기관 참여연구원 / 교 수	곽 효 경	Active법 총괄
/ 교 수	윤 정 방	SAW 총괄
/ 연 구 원	김 재 홍	SAW 실험 및 분석
/ 연 구 원	민 지 영	신호전파해석
■ 참여기업		
(주)토팩엔지니어링건축사사무소 / 전 무	한 태 식	현장 지원 및 협조
(주)해원까지종합건축사사무소 / 이 사	노 홍 기	현장 지원 및 협조
(주)한국건설관리공사 / 팀 장	이 진 익	현장 지원 및 협조

요 약 문

I. 제 목

콘크리트 구조물의 손상 평가를 위한 능동/수동 결합형 NDT 신기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

교량과 같은 토목구조물에서 가장 널리 사용되는 구조재료인 콘크리트는 불균질하고 취성이 강한 재료이기 때문에 갑작스런 붕괴의 가능성이 있다. 많은 콘크리트 구조물이 노후화되고 설계 당시에서 예견하지 못했던 과하중을 반복하여 받는 경우가 발생하면서 노후화된 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위하여 다양한 비파괴 기술을 이용한 구조물 감시 기술에 대한 관심이 증대되고 있다.

음향방출은 재료의 국부적 변형에서 기인하는 탄성파의 방출과 전파의 과정으로, 음향방출을 이용한 비파괴 검사는 재료 내부에서 발생된 손상을 감지할 수 있으며 상대적으로 넓은 범위를 감시할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구의 최종 목표는 “콘크리트 구조물의 손상 모니터링 및 현장 측정을 위한 능동/수동 비파괴 검사 신기술 개발”이며, 최종 목표를 달성하기 위하여 주관기관에서 1 세부과제인 Passive 기술 개발, 협동기관에서 2 세부과제인 Active 기술 개발을 담당하였다. 본 연구는 손상이 진행 중인 콘크리트에서의 음향방출 발생특성을 규명하여, 이를 근거로 콘크리트 교량 구조물의 건전성 평가를 위한 음향방출 진단 시스템을 개발하고 진단 알고리즘 및 절차를 제시하는데 목적이 있다.

한편 표면탄성파를 이용한 Active 기술 개발을 통하여서는 균열의 깊이를 측정하기 위한 신호 해석 기법, 이를 정량화하기 위한 판정 알고리즘, 그리고 현장 응용을 위한 시스템 구성 방안을 최종 결과물로 제시하고자 한다. 이를 위하여 실험실 규모의 하중 부가 실험 및 파괴 실험을 통해 AE 및 SAW 신호 특성을 취득하고 콘크리트 구조물에 적합한 현장용 프로토타입 장비를 구성한 후 현장 실험을 통해 적용성을 검증하는 것 까지를 연구 범위로 하였다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

[1차년도]

- 콘크리트 파괴거동 단계 분류
- 파괴 단계별 음향방출 신호원 분석
- 시편실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호 취득
- 파동전파 해석을 통한 콘크리트에서의 균열 깊이에 따른 표면탄성과 특성 분석
- 표면탄성과 출력 특성에 맞는 신호처리기법 연구
- 콘크리트의 특성을 고려한 표면탄성과 발신 및 수신 시스템 조사

[2차년도]

- 시편실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호 취득
- 정상신호와 이상신호의 신호패턴 분석
- 이상거동 판정을 위한 음향방출 분석 알고리즘 개발
- 시편 실험을 통한 콘크리트의 균열 깊이별 표면탄성과 신호 취득
- 균열 깊이별 신호 특성 분석 및 균열 깊이 판정 기법 개발

[3차년도]

- 현장실험을 통한 적용성 평가 및 보완
- 실험을 통한 철근 콘크리트의 균열 깊이별 표면탄성과 신호 취득
- 철근의 영향을 고려한 균열 깊이 판정 기법 개발
- 현장 응용을 위한 프로토타입 AE 및 표면탄성과 시스템 구성

Ⅳ. 연구개발결과

[1차년도]

- 손상의 진행여부에 따른 정상신호와 이상신호에 대한 데이터 확보
- 콘크리트에서의 손상평가를 위한 AE key parameter 제시
- 콘크리트 건전성 평가를 위한 알고리즘 및 진단 절차 연구
- 철근 콘크리트 휨 이론에 근거한 콘크리트의 파괴 거동을 고찰하고 파괴 거동을 3단계로 분류하였음
- 콘크리트의 파괴 단계별로 음향방출 신호의 원인을 추정한 결과 콘크리트의 음향방출 신호는 균열신호와 마찰신호로 구분하였음.
- 신호처리기법 및 표면파 실험법의 정립을 목적으로 검증된 유한요소 해석 과정

을 적용하여 표면파의 인공균열 반사파와 진행파 거동 분석

- 표면파 (Rayleigh Wave)의 기본특성치인 콘크리트에서의 표면파의 속도를 현장 계측으로부터 구하기 위해 시간-주파수 기법인 연속웨이블릿 변환을 이용하는 표면파 속도 측정용 신호처리 기법을 개발함
- Surface Wave Transmission Function을 현장 계측으로부터 구하기 위한 주파수 영역 신호처리 기법인 Self-Calibrating 기법 개발

[2차년도]

- 철근콘크리트 빔에 4-point 굽힘시험 시, 단계적인 하중 인가에 따른 음향방출 신호 특성 분석 및 콘크리트 파괴신호와 각종 AE parameter 분석
- 음향 방출 시험법으로 감지한 각종 신호를 분석한 후, 각 단계별로 측정한 음향 방출 신호를 정상신호와 이상신호의 패턴을 확인
- 표면파 투과 실험을 통하여 획득된 신호로부터 균열 깊이별 신호 특성을 분석하고, 이로부터 균열 깊이와 관련된 특성치인 스펙트럼 에너지 투과비를 정의
- 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이와의 상관관계를 이용하여, 균열 깊이를 판정할 수 있는 기법을 개발하고, 이를 실험을 통하여 검증함.
- 표면파의 투과율에 대해 해석적인 검토를 수행하였고, 철근을 따라 전파되는 탄성파로 인해 표면파의 투과율이 증가됨을 확인.

[3차년도]

- 철근 콘크리트 구조물의 내부 손상평가를 위해 단계별 반복 재하시 발생하는 음향방출 신호분석 기술 및 판단 알고리즘 개발
- 콘크리트 빔 건전성평가를 위한 프로토타입 4-CH AE 진단시스템 구성
- 콘크리트 빔/슬래브의 균열깊이추정을 위한 에너지투과 표면탄성파 기법 개발 및 휴대용 프로토타입 측정 시스템 개발

V. 연구개발결과의 활용계획

- 개발된 기술은 다양한 분야의 구조물에서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 각 구조체에 맞게 적용이 될 수 있도록, 지속적인 적용성 향상 연구가 수행되어야 하며 이에 따라 적합한 접근 방법이 구축되면 더욱 우수한 안전성 감시 및 측정기술로 자리 잡을 것이라 판단된다. 특히 본 기술은 새로운 적용 기술에 해당하므로 향후 현장 기술자들의 다양한 실 구조물에서의 적용 등을 통해

know-how나 경험적인 지식의 구축이 매우 중요할 것으로 생각되며, 국내 실정과 해당 구조체에 맞는 D/B를 계속 구축해 나가는 것이 바람직하다고 본다.

- 또한 이 기술의 활용도는 산업설비에서의 대형구조물이나 원자력 발전설비의 콘크리트 구조물 등의 안전 관리 차원에서도 활용될 수 있으므로 그 사용 영역은 매우 넓다고 볼 수 있다.
- 본 과업을 통하여 개발되는 기술은 현장 실 구조물의 안전 진단에 있어서 파괴의 조짐을 음향방출을 통하여 직접적으로 감시하고, 균열의 깊이를 정량적으로 측정함으로써 한 단계 정밀하고 진보된 기법으로서 아주 유용하게 적용될 것으로 판단된다.
- 따라서, 본 연구에서 개발된 내용은 앞으로 한국도로공사, 시설안전기술공단, 주택공사, 철도청, 안전진단 전문기관, 설계회사, 건설회사 등이 현장에서 유용하게 활용할 수 있도록 이들 결과를 학술발표 및 실제 홍보를 통하여 활용 가능하도록 할 예정이다.

S U M M A R Y

I . Title

Development of the Passive/Active New Nondestructive Testing Techniques for Damage Monitoring and *In-situ* Measurement of Concrete Structures

II . Objectives and Necessity

Concrete is a structural material that is most widely used to civil structures such as bridges. Concrete structures have possibility of sudden failure, since concrete is non-homogeneous and brittle material. The development of non-destructive techniques to evaluate deterioration of concrete structure is one of the most important issues for an effective maintenance.

Acoustic emission is the process associated with the emission and propagation of strain waves, resulting from localized modifications of materials. AE is a powerful non-destructive testing technique capable of detecting damage that occurs inside the material that may not be detectable on the surface.

The final goal of the project is to develop the passive/active new nondestructive testing techniques for damage monitoring and *In-situ* measurement of concrete structures. In order to accomplish this work, passive techniques could be studied by KRISS members, whereas active technique could be studied by KAIST members.

The objective of the study is to develop AE diagnosis system and algorithm for assessing integrity of concrete bridge structures. For this, AE characteristics of concrete beam under various cyclic loading was investigated by experiments, and based on the experimental result, AE key parameters for evaluating damage activity of concrete were suggested.

Active techniques, is used by elastic waves, would provide signal analysis method for measuring crack depth, quantitative algorithm and Measuring systems for real application. Objective of the year is to carry out AE evaluation for passive techniques in indoor experiments, and is to study the behavior and analysis for elastic wave of the concrete in active techniques.

III. Contents and scopes

- Acquisition of AE signals depending on the failure stages in the test.
- Analysis of signal pattern between normal and abnormal signals
- Development of AE algorithm for analyzing abnormal behavior
- Acquisition of elastic waves depending on the crack depth in the test.
- Characterization of the signals depending on the crack depth
- Development of the diagnosis method to find the crack depth
- Characterization of elastic waves depending on the crack depth in the RC

IV. Results

- AE parameter and failure signals of concrete were acquired using AE test and stepwise load method.
- The patterns of normal and abnormal signals were classified after AE signal analysis.
- AE algorithm for evaluating abnormal signal was suggested. It will be used to develop concrete AE system as the important materials.
- Beam and slab-type concrete specimens with various crack depth were prepared. Then crack depth of concrete was measured by the experiment.
- The signal characteristics were analyzed using surface wave transmission method. Spectrum energy transmission ratio, that related to crack depth, was defined.
- A evaluation technique of crack depth was developed and proved using relationship between spectrum energy transmission ratio and crack depth.
- Computer simulation for surface wave transmission ratio was performed. In case of RC, surface wave transmission ratio was increased by elastic wave propagated along rebar.

V. Applications

- As a newly developed non-destructive technique, AE diagnosis system for concrete structures can help more reliable maintenance by providing

additional information for safety evaluation. In addition, AE diagnosis system can be applied to not only bridge structures but also other concrete structures of industrial infrastructures and nuclear power plant etc.

- For applying AE technique practically in real concrete structures, continuous research for application with field experience is needed to increase the reliability of this technique.
- This work will be useful techniques to make a diagnosis of structure safety, to make a monitor concrete against cracks and fracture, and to measure quantitative crack depth.

목 차

제 1 장 서 론	15
제 1 절 연구개발의 필요성	15
제 2 절 연구개발의 목적 및 범위	18
1. 최종 목표와 범위	18
2. 당해연도 연구개발의 목표와 범위	19
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	20
제 1 절 국내 기술개발 현황	20
제 2 절 국외 기술개발 현황	22
1. 콘크리트에서의 음향방출 관련 기술개발 현황	22
2. 표면탄성파를 이용한 콘크리트 손상 관련 기술개발 현황	24
3. 연구결과의 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치	25
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	27
제 1 절 서 론	27
제 2 절 수동형 비파괴 평가 기술 개발	28
1. 서 론	28
2. 음향방출 기술과 콘크리트 손상 거동	30
3. 철근 콘크리트 빔의 반복 하중에 따른 음향방출 발생 거동	42
4. 철근 콘크리트 빔의 단계별 하중 재하시 음향방출 발생 거동	66
5. 철근 콘크리트 슬래브의 단계별 하중 재하시 음향방출 발생 거동	95
6. 음향방출 파라미터 추출 및 손상평가 알고리즘	120
7. 4-채널 음향방출 시스템 운영프로그램 및 하드웨어 개발	134
제 3 절 능동형 비파괴평가 기술 개발	153
1. 서 론	153
2. 스펙트럼 에너지 투과법을 이용한 콘크리트의 균열 깊이 측정	154
3. 표면파 투과 함수를 이용한 철근 콘크리트의 균열 깊이 측정	178

4. 균열깊이 추정용 프로토타입 표면탄성과 측정시스템 구성	208
제 4 절 현장 적용 검증 실험	211
1. 서 론	211
2. 쌍계교에 대한 비파괴검사	211
3. 금당교에 대한 비파괴검사	243
4. 현장적용을 위한 절차서	255
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	258
제 1 절 연구개발목표의 달성도	258
1. 연구개발 수행진도율	258
2. 연구개발 목표의 달성도	259
제 2 절 관련분야의 기술발전에의 기여도	260
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	261
제 1 절 활용계획	261
제 2 절 기대효과	262
1. 기술적 측면	262
2. 경제·산업적 측면	262
3. 타 산업에 미치는 효과	262
제 3 절 향후 전망	263
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	264
제 1 절 음향방출 기술	264
제 2 절 표면탄성과 기술	265
제 7 장 참고문헌	267

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction	15
Section 1. Background and necessity of the project	15
Section 2. Objective and scope of the project	18
1. Final objective of the project	18
2. Objective and scope of the year	19
 Chapter 2. Development and research activities related with the project ..	 20
Section 1. Domestic research	20
Section 2. International research	22
 Chapter 3. Results and contents of research and development	 27
Section 1. Introduction	27
Section 2. Development of passive NDE techniques	28
1. Introduction	28
2. AE behavior of damage in crete	30
3. AE behavior by fatigue loading in the RC beam	42
4. AE behavior by stepwise cyclic loading in the RC beam	66
5. AE behavior by stepwise cyclic loading in the RC slab	95
6. AE parameter selection and damage evaluation algorigthm	120
7. Development of 4-CH AE system	134
Section 3. Development of active NDE techniques	153
1. Introduction	153
2. Crack depth measurement using spectrum energy transmission techniques ..	154
3. Crack depth measurement using surface wave transmission function ...	178
4. Prototype system for crack depth measurement	208
Section 4. Field application for concrete bridge in service	211

1. Introduction	211
2. NDT in the Ssanggye bridge	211
3. NDT in the Geumdang bridge	243
4. Procedure for field application	255
Chapter 4. Achievement and contribution of the project	258
Section 1. Achievement of the project	258
1. The rate of progress for the project	258
2. Achievement of the goal	259
Section 2. Contribution to related research fields	260
Chapter 5. Application and plans for the project	261
Section 1. Application	261
Section 2. Expectation	262
1. Technical parts	262
2. Economic and industrial part	262
3. The effect on the other fields	262
Section 3. Prospect for the works	263
Chapter 6. International technical information during research	264
Section 1. AE techniques	264
Section 2. Elastic wave techniques	265
Chapter 7. References	267

여백

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성

우리나라는 1990년대 중반의 성수 대교와 같은 대형 국가 기간 시설 구조물의 붕괴 사고 이후 구조물의 안전 문제가 심각한 사회 문제로 대두되었으며, 이에 따라 대형 구조물의 안전성 확보에 대한 사회적 관심의 증대와 함께 서해대교, 남해대교, 올림픽대교, 돌산대교 등 장대교량을 중심으로 상시계측 시스템이 운용되고 있다. 이러한 상시계측 시스템 운용 사례 및 관련 연구를 살펴보면 구조물 전체 시스템의 동적 거동 계측을 이용한 이상 발생 유무의 탐지에 집중되고 있다. 그러나 토목 구조물과 같은 복잡한 구조계의 경우에 국부적으로 이상이 발생할 경우 전체 거동 계측을 이용한 방법으로는 그 유무를 탐지하기 매우 어려운 단점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로 국부적 손상의 발생 유무를 모니터링하고, 이를 정량적으로 측정할 수 있는 기술의 개발이 매우 필요하다.

콘크리트 구조물은 시공 또는 공용 중에 다양한 원인으로 의한 균열이 발생된다.(그림 1 참조) 균열은 구조물의 안전성, 내구성, 사용성 모두에 직접적으로 영향을 주고 구조 성능 또한 저하시키는 가장 큰 요인이다. 특히 공용 중인 콘크리트 구조물에 진전하는 균열이 발생하게 될 경우, 최악의 상황에서는 급작스런 붕괴로 이어질 수 있는 만큼 진전하는 균열의 발생 유무를 탐지할 수 있는 기술이 필요하지만, 현재로서는 이를 탐지할 수 있는 효과적인 기술이 개발되지 않아 그 필요성이 절실한 상황이다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 음향방출 (Acoustic Emission; AE)기술을 이용한 Passive 기술을 개발하고자 한다. 한편 균열의 진전이 발생한 후 균열의 깊이가 어느 정도까지 진행되었는지를 알아보는 것은 구조물의 안전성 여부를 점검하는데 있어서 매우 중요한 지표이다. 따라서 진전하는 균열의 발생이 탐지되면 현장에서 즉석으로 균열의 깊이를 측정할 수 있는 기술이 필요하다. 현재 균열의 깊이를 측정하기 위해 현장에서 사용할 수 있는 대표적인 장비는 PUNDIT과 같은 것들이 있다. PUNDIT은 초음파의 전파속도를 측정하여 균열의 깊이를 추정할 수 있도록 고안된 장비이다. 그러나 PUNDIT의 사용설명서에도 나와 있듯이 콘크리트

와 같이 비균질한 재료에서는 초음파 속도법을 이용하는 경우 결과에 대한 왜곡이 있어 현장에서 측정한 값에 대한 신뢰성이 매우 낮아 현장 기술자들이 큰 어려움을 겪고 있는 실정이며, 이에 대한 대안적인 방법이 매우 절실하다. 이에 따라 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 표면탄성파(Surface Acoustic Wave; SAW)를 이용한 Active 기술을 개발하고자 한다.

따라서 본 연구는 상기에 기술한 바와 같이 콘크리트 구조물에서 발생하는 국부적인 손상을 모니터링하고, 이를 현장에서 정량적으로 측정할 수 있는 Passive/Active 비파괴 신기술의 개발에 그 목표가 있다.

음향방출 기술은 다른 비파괴검사법에 비해 상대적으로 넓은 영역의 검사가 가능하며 공용상태에서의 실시간 계측이 가능하다는 장점이 있어 결함탐지에 적합한 비파괴기법으로 최근 관심이 모아지고 있다. 특히 콘크리트 구조물의 균열 및 손상 감시에 음향방출기술을 적용할 필요성이 최근 국내/외 연구진에 의하여 많이 제기되고 있다. 결함의 진전 등으로 인해 에너지의 순간적 방출이 발생하면 그 중 일부가 탄성파로 변환되어 부재를 타고 전파하는데 바로 이러한 탄성파를 음향방출이라고 하며 이를 센서로 취득하여 취득된 신호를 근거로 결함의 위치를 추정하고 결함의 상태를 평가하는 기술을 음향방출기술이라 한다. 이러한 방법의 특징은 구조물의 공용 중에 자연 발생하는 결함신호를 취득하는 비가역적 수동형 (Passive) 방법이라는 것이다. 또한 부재를 타고 전파하는 탄성파를 취득하는 것이기 때문에 센서가 결함과 어느 정도 거리를 두고 있어도 결함을 탐지해낼 수 있으므로 상대적으로 넓은 범위의 감시가 가능하다. 따라서 이 기법을 이용하면 구조물 내의 균열 발생 위치 탐지에 매우 유효하게 적용할 수 있다.

한편 표면 탄성파를 이용한 균열의 깊이 측정은 초음파 속도법을 이용한 기존의 방법이 콘크리트의 골재나 철근과 같이 파동의 경로를 왜곡하는 요소가 있는 경우 균열의 깊이를 판정하기 매우 어려워진다는 한계를 극복하기 위한 대안으로 최근 미국을 비롯한 기술 선진국에서 연구가 활발하게 이루어지고 있는 방법이다. 이 방법은 기계적인 충격 등을 이용하여 신호를 발생시키고, 이 신호를 균열이 발생된 부위에 통과시킨 후, 신호를 수신하고 전파된 표면탄성파의 에너지와 주파수 (또는 파장) 성분을 분석하여 균열의 깊이를 추정하는 능동형 (Active) 방법으로 최초 파동의 도달시간 정보를 이용하여 깊이를 추정하는 전파 경로에 매우 의존적인 기존 방법의 한계성을 극복할 수 있는 방법이다. 또한 이 방법은 표면에서 발생된 파동

에너지의 70%가 표면파로 전달되며, 또한 전파거리에 따른 기하학적 감쇠가 실제 파보다 훨씬 작기 때문에 상대적으로 넓은 영역을 검사할 수 있는 장점이 있다. 따라서 콘크리트 부재의 균열 등과 같이 표면이나 표면부근에서 발생하는 균열을 조사하는데 매우 효과적으로 적용할 수 있다.

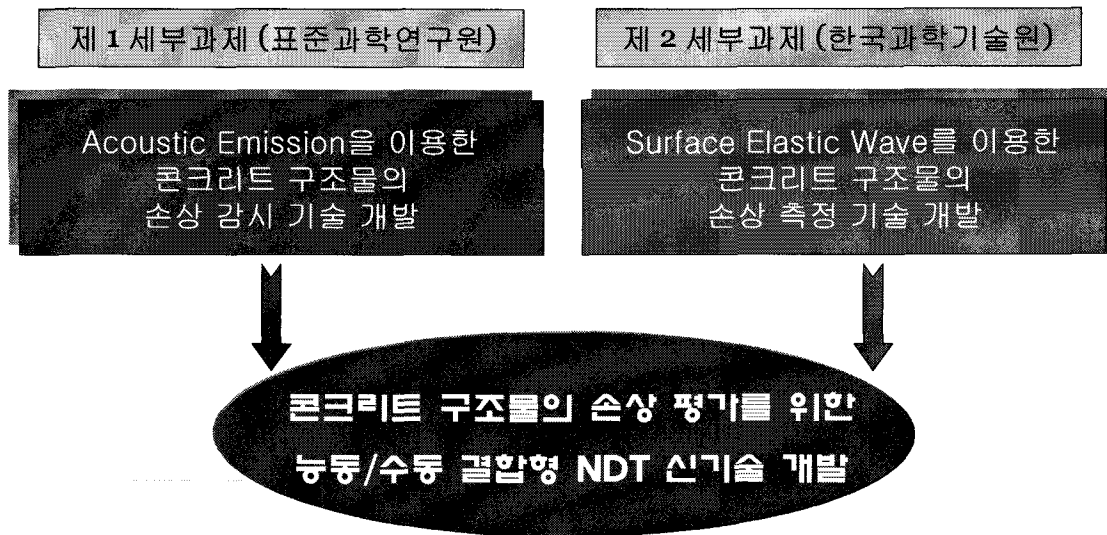
따라서, 수동형 AE 기술과 능동형 표면탄성과 기술을 이용하여 콘크리트 구조물의 국부 모니터링과 현장에서 균열의 깊이를 측정하는 능동/수동 결합형 NDT 신기술의 개발은 상기와 같은 유효성 때문에 기술적으로 매우 중요하다고 할 수 있다.

비파괴 신기술이 개발되면 구조물의 건전성을 평가함에 있어서 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있다. 만약 이러한 정보를 건전성 평가기술과 접목하여 건전성 평가를 수행할 경우 보다 신뢰성 높은 구조물의 건전성 평가를 이룰 수 있고, 평가 결과에 따라 합리적으로 보수·보강을 실시함으로써 수명 비용(Life Cycle Cost; LCC)의 절감 및 유지관리 예산을 효율적으로 집행할 수 있도록 하여 매우 큰 비용의 절감이 기대된다. 또한 산업 파급 효과가 매우 큰 사회간접자본인 대형 구조물의 사고를 미연에 방지할 수 있도록 하는 구조물 건전성 모니터링 기술과 접목한다면 급격한 대형 사고를 예방할 수 있기 때문에 국가 산업의 안정적 운용에 큰 기여가 가능하므로 본 기술의 개발이 매우 중요하다고 할 수 있다.

제 2 절 연구개발의 목적 및 범위

1. 최종 목표와 범위

본 연구의 최종 목표는 “콘크리트 구조물의 손상 모니터링 및 현장 측정을 위한 능동/수동 비파괴 검사 신기술 개발 (Development of the Passive/Active New Nondestructive Testing Techniques for Damage Monitoring and *In-situ* Measurement of Concrete Structures)”이며, 최종 목표를 달성하기 위하여 주관기관에서 1 세부과제인 Passive 기술 개발, 협동기관에서 2 세부과제인 Active 기술 개발을 담당한다. 연구 최종 목표와 각 세부과제 별 목표는 아래와 같다.



연구 최종 목표와 각 세부과제 별 목표

본 연구에서는 콘크리트에서의 음향방출 발생특성에 대한 데이터, 위험도 평가를 위한 신호분석 알고리즘을 얻기 위한 연구를 수행하게 되며 이를 근거로 하여 현장에 음향방출 기술을 적용하기 위한 장비 설치 및 신호처리 절차서, 그리고 이상 신호 판정 기준 등의 최종 결과물로 제시하고자 한다. 한편 표면탄성파를 이용한 Active 기술 개발을 통하여서는 균열의 깊이를 측정하기 위한 신호 해석 기법, 이를 정량화하기 위한 판정 알고리즘, 그리고 현장 응용을 위한 시스템 구성 방안을

최종 결과물로 제시한다. 이를 바탕으로 최종 목표의 성격을 설정하면 현장 또는 실무에서 사용 가능한 실용화 NDT 기술의 개발이라는 것이다. 이를 위하여 실험실 규모의 하중 부가 실험 및 파괴 실험을 통해 AE 및 SAW 신호 특성을 취득하고 콘크리트 구조물에 적합한 현장용 프로토 타입 장비를 구성한 후 현장 실험을 통해 적용성을 검증하는 것 까지를 연구 범위로 하였다. 따라서 최종 목표의 성격은 이론적 아이디어와 시작품 개발 그리고 공정 개발 등 실용화를 위한 종합적 성격의 연구에 해당된다.

2. 당해연도 연구개발의 목표와 범위

▶ 연구 목표

- 음향방출 기술의 현장 적용을 위한 절차서 개발 및 적용성 검증
- 현장 응용을 고려한 균열 깊이 측정 Active 기술 개발

▶ 주요 내용 및 범위

- 사용자 편의를 위한 현장 적용 절차서 및 프로토타입 장비 개발
- 현장실험을 통한 적용성 평가 및 보완
- 실험을 통한 철근 콘크리트의 균열 깊이별 표면탄성과 신호 취득
- 철근의 영향을 고려한 균열 깊이 판정 기법 개발
- 현장 응용을 위한 프로토 타입 시스템 구성 및 현장 적용 실험

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

콘크리트 구조물에 대한 음향방출 시험의 적용은 국내에서는 본 연구진이 지난 수년간 시도한 것 외에는 전무한 실정이다. 콘크리트 재료에 대한 균열 진전 및 특성 연구는 몇 차례 시도된 적은 있으나, 사회기반시설물의 안전성 평가를 위해 콘크리트 교량에의 적용 시도는 없는 것으로 조사되었다.

한편, 콘크리트 균열 깊이 측정에 관한 국내에서의 연구는 여러 연구진에 의하여 연구되었으나 외국의 기술을 답습하고 있는 실정이며, 대부분이 초음파속도법을 이용한 전파시간의 지연 현상을 이용하여 균열 깊이를 측정하고 있다. 또한, 표면파에 관한 연구는 국내에서도 상당 부분 진행되어 왔으나, 지질학적 또는 지진과 관련된 지반공학적 측면에서 접근되었다. 최근 들어, 표면파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사도 시도되고 있으나, 주로 콘크리트의 강성 또는 강도를 추정하는데 초점을 두고 있다.

따라서, 콘크리트 구조물의 손상 평가를 위해 음향방출 기법과 표면파 기법을 단계적으로 적용하는 본 연구는 국내에서 처음 시도되는 기술이다. 최근 수년간 본 연구진이 국내외에서 발표한 대표적인 연구 결과를 아래에 열거하였다.

- Assessing Damage in Corroded Reinforced Concrete Using Acoustic Emission
 - J. of Engineering Mechanics, 2000
- Detecting the Extent of Corrosion in Concrete Beam with Acoustic Emission
 - Transportation Research Record, 2000
- 철근 콘크리트 보의 손상 진전에 의해 발생하는 음향방출 신호 특성
 - 비파괴검사학회 논문집, 2003
- 음향방출을 이용한 콘크리트 구조물의 건전성 평가
 - 콘크리트학회 학술발표회, 2003
- New Approach Method For Assessing Integrity Of Concrete Structures Using AE - Far East Conference on Non-Destructive Testing(FENDT), 2003

- Efficient use of Lamb waves and their wavelet coefficients for damage detection of steel plates
 - SPIE's Int'l Symp. on NDE and Health Monitoring, 2005
- Statistical Detection method for time of arrival and frequency of waves
 - SPIE's Int'l Symp. on NDE and Health Monitoring, 2005
- Crack activity assessment by acoustic emission event pattern analysis in concrete structures
 - SPIE's Int'l Symp. on NDE and Health Monitoring, 2006
- Development of New Algorithm for Health Monitoring of Concrete Structures
 - SPIE's Int'l Symp. on NDE and Health Monitoring, 2006
- Acoustic Emission Parameter Analysis for Assessing Integrity of Concrete Structure
 - 2nd Conference on ANDE, Pusan, Korea, 2007
- Acoustic Emission Diagnosis System and Wireless Monitoring for Damage Assessment of Concrete Structures
 - European NDT for Safety, Prague, Czech, 2007
- Development of AE Diagnosis System for Assessing Deterioration of Concrete Structures
 - SMSST-07, Chonhing & Nanjing, China, 2007
- Smart Acoustic Emission System for Wireless Monitoring of Concrete Structure
 - SPIE's Int'l Symp. on NDE and Health Monitoring, 2008

제 2 절 국외 기술개발 현황

1. 콘크리트에서의 음향방출 관련 기술개발 현황

하중을 받는 콘크리트에서의 음향방출 연구는 Rusch¹⁾에 의해서 처음으로 수행되었다. Rusch는 파괴극한하중의 70~85% 이하의 하중반복시 Kaiser effect가 나타남을 보였으며, 비슷한 시기에 L'Hermite^{2),3)} 역시 콘크리트에서의 음향방출 신호를 취득하였다.

1965년 Robinson⁴⁾은 더욱 예민한 장비를 사용하여 이전까지 음향방출이 검출된 바 없는 낮은 하중을 받는 콘크리트에서도 음향방출신호가 나타남을 보임으로써 초기 미세균열 성장을 감시할 수 있게 하였다. 1970년, Wells⁵⁾는 더욱 예민한 음향방출 검출장치를 개발하여 2~20 kHz의 주파수대역에서의 음향방출 신호를 취득하였다. 또한 Green⁶⁾은 처음으로 위치표정기법을 이용하여 콘크리트에서의 음향방출이 재료 내부의 파괴과정과 연관이 있음을 명확하게 보여주었으며 손상의 위치를 추정하였다. 이것은 음향방출이 파괴의 징후를 감지함으로써 파괴를 예측할 수 있음을 보여준 성과라 할 수 있다.

이후 콘크리트에서의 음향방출에 대한 연구는 파괴 역학적 접근, 콘크리트에서의 균열종류에 대한 연구, 균열위치표정, 콘크리트 강도와 음향방출의 관계, 건조수축, 섬유보강 콘크리트, 고강도 콘크리트, 온도균열, 철근과 콘크리트의 부착 및 철근의 부식 등 다양한 분야에서 연구가 이루어졌다.

Evans et al.⁷⁾, Morita and Kato⁸⁾⁹⁾, Nadeau et al.¹⁰⁾, Lenain and Bunsell¹¹⁾, K. Izumi et al.¹²⁾ 등은 음향방출과 에너지 해방률과 같은 파괴역학적 인자들간의 관계에 대하여 연구하였다. 그러나 이러한 연구는 모두 실험적 방법에 의한 결과들로 음향방출과 파괴역학적 인자들간의 기본적인 관계는 아직 알려지지 않고 있다.

음향방출 분석에 있어서 현재 가장 관심을 끌고 있는 분야는 파괴진행영역의 위치표정이라고 할 수 있다. 최근에 들어서 음향방출 분석에 있어서 복합적인 신호처리기술이 도입됨에 따라 미세균열의 체적과 방향 그리고 형태를 음향방출을 통하여 판정하려는 연구가 수행된바 있으며, 이러한 기법은 콘크리트 내부의 파괴진행에 대한 상세한 정보를 제공할 수 있는 잠재력이 있는 분야이다. 이와 관련한 연구

로는 Okada et al.¹³⁾, Berthelot and Robert¹⁴⁾, Niwa et al.¹⁵⁾, Maji and Shah¹⁶⁾ 등의 논문이 있다.

교량과 같은 콘크리트 구조물의 주요부재에 음향방출기술의 적용된 연구사례를 살펴보면, 1992년 K. Miyano et al.¹⁷⁾은 현장에서 수중 콘크리트의 손상검출에 음향방출기술을 적용한 바 있으며 1993년에는 K. Matsuyama et al.¹⁸⁾이 콘크리트 부재에서 잡음환경 하에서의 2차원 위치표정기법을 적용한 연구가 있다. 1995년 S. Yuyama et al.¹⁹⁾은 철근콘크리트보를 대상으로 휨 실험을 수행하여 인장균열, 전단 균열 및 철근탈락시의 음향방출 신호를 취득하였다. 계속하여 Y. Murakami and S. Yuyama²⁰⁾는 음향방출을 이용한 철근콘크리트의 노화도 평가를 등급화하려는 시도를 하였으며, S. Yuyama et al.²¹⁾은 철근콘크리트 보의 구조안전성 평가에 음향방출기술을 적용하기 위하여 반복하중을 재하하는 철근콘크리트 보 실험을 수행하고 음향방출을 이용한 철근콘크리트보의 구조안전성평가기법을 제안하였다.

1997년 Ohtsu et al.²²⁾은 배합비와 시편의 상태에 따른 음향방출 특성을 취득하여 콘크리트의 초기손상 평가 가능성을 시사하였고, Matsuyama et al.²³⁾은 콘크리트 압축강도 실험을 통해 음향방출 신호를 취득하여 콘크리트의 특성과 음향방출 간의 관계를 정립하였다. Shigeishi et al.²⁴⁾은 음향방출을 이용한 철근콘크리트 보의 파괴과정 등급화를 시도하였으며, Sakata and Ohtsu²⁵⁾는 음향방출기법과 초음파기술을 이용한 철근콘크리트 손상도 등급화를 시도하였다. 또한 Hearn and Shield²⁶⁾는 철근 콘크리트 보와 프리스트레스트 콘크리트 보에 대한 음향방출 실험을 수행하여 휨 균열 성장에 의한 음향방출 신호를 취득하였다.

1998년 Z. Jun and H. Stang²⁷⁾는 섬유보강 콘크리트의 피로거동 관찰에 음향방출기술을 응용하였고, 같은 해 Ohtsu et al.²⁸⁾은 정량적인 음향방출 평가를 위한 moment tensor 분석기법을 제안하였다. Ohtsu et al.²⁹⁾은 2002년 이 기법을 이용하여 철근 콘크리트 보의 손상평가기법을 제시하였다.

1999년 Ohtsu et al.³⁰⁾은 경계요소법과 음향방출을 이용하여 혼합모드 파괴에 대한 균열해석을 시도하였다.

2000년 D. J. Yoon et al.³¹⁾은 철근이 부식된 콘크리트에서의 음향방출특성에 대한 연구를 수행하였고, Mirmiran and Philip³²⁾은 철근 콘크리트 보와 섬유보강 콘크리트에서의 음향방출 거동을 비교하였다. 또한 K. Wu et al.^{33),34)}은 모르타르와 콘크리트 그리고 철근 콘크리트에서 파괴진행시 음향방출특성에 대한 비교연구를

발표한 후 이어서 2001년 골재의 크기가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향을 음향방출을 이용하여 고찰하였다.

2001년 Labuz et al.³⁵⁾은 준 취성(quasi-brittle) 파괴가 발생하는 재료에서 파괴가 임박했을 때의 음향방출 거동에 대한 연구를 수행하였으며, Shigeishi and Ohtsu³⁶⁾는 모멘트 텐서 분석을 통한 콘크리트에서의 균열인식기법을 제안하였고, 같은해 Ohtsu and Watanabe³⁷⁾는 음향방출을 이용하여 콘크리트의 정량적인 손상 평가를 위한 연구를 수행하였다. 특히 Shigeishi et al.³⁸⁾은 교량 현장에서의 장기감시에 음향방출을 적용하기 위한 연구를 수행하여 파괴의 징후를 예견하는데 있어서 음향방출이 적용될 수 있다는 가능성을 보여주었으며, Yuyama et al.³⁹⁾은 철근 콘크리트 슬래브의 피로손상 평가를 위해 음향방출기술을 적용하였다. 최근까지도 Yuyama 교수의 연구팀과 Ohtsu 교수의 연구팀은 콘크리트의 정량적인 손상 평가를 위한 연구 결과들⁴⁰⁻⁴²⁾을 지속적으로 발표하는 등 활발한 연구가 진행 중이다. 한편 B. Kim과 W. J. Weiss⁴³⁾는 섬유보강 콘크리트의 정량적 손상 평가를 위한 연구를 발표하였다.

2. 표면탄성파를 이용한 콘크리트 손상 관련 기술개발 현황

콘크리트 구조물에 발생하는 균열에 대한 평가는 초음파속도법 등을 이용하여 시도되었다. Knab 등⁴⁴⁾은 초음파의 파동의 비행시간을 측정하여, 균열에 의해 왜곡된 초음파의 경로를 고려함으로써 균열의 깊이를 추정하였다. 또한, Sansalone 등⁴⁵⁾도 충격 가진으로 발생시킨 응력과 중 체적파의 도달시간이 균열에 지연되는 현상을 이용하여 균열 깊이를 측정한 바 있다. 그러나 이와 같은 응력파의 전달시간 지연 현상을 이용하는 방법은 Popovics 등⁴⁶⁾이 지적하였듯이, 선단의 모양 등 균열의 형태에 따라 오차를 발생시키는 단점이 있다.

표면파를 이용하는 기법은 위와 같은 단점을 극복하기 위해, 균열면을 투과하는 표면파의 에너지를 측정하여 균열 깊이를 산정한다. 표면파의 투과 특성을 이용하여 콘크리트 균열 깊이를 산정하기 위한 앞선 연구들은 주로 자기보정 표면파 투과 함수의 특정한 계수 값에 해당하는 주파수를 선정하여 해당 주파수와 균열 깊이와의 상관 관계식을 구하고, 이를 이용하여 균열 깊이를 평가하는 방법을 사용하

였다. Hevin et al.⁴⁷⁾은 표면과 투과 함수를 측정하고 이 함수의 계수 값이 주파수에 따라 감소하게 될 때 감소가 끝나는 주파수를 차단 주파수(cut-off frequency)라 정의하였으며, 차단 주파수를 이용하여 균열의 깊이를 산정하려고 하였다(cut-off frequency method; CF Method). 즉, 실험체의 레일리파 속도를 측정하여 이를 차단 주파수로 나눈 후 파장을 구하고, 각 균열 깊이에 대한 차단 주파수의 파장과 실제 균열 깊이와의 상관 관계식을 도출하여 균열 깊이를 평가하고자 하였다. Scala와 Bowles⁴⁸⁾는 항공기에 사용되는 알루미늄 합금 블록의 표면 균열 깊이를 측정하기 위하여 표면과 투과 함수의 계수가 급격하게 감소하는 부분을 선형 근사하고, 이 선형 근사된 직선이 주파수축과 만나는 점을 절단 주파수(intercept frequency)로 정의한 후, 절단 주파수와 각 균열 깊이의 상관관계를 구하여 균열 평가에 이용하였다. 그러나 이와 같이 투과 계수의 특정한 주파수에서의 변화 특성을 이용하는 방법들은 균열과 관련된 주파수를 선정하기 위한 계수 값의 변화가 명확한 경우에만 적용할 수 있다는 단점이 있다. 즉, 측정된 표면과 투과 함수가 측정상의 오차나 잡음의 영향으로 오차가 포함되어 있을 경우에는 절단 주파수나 차단 주파수의 선정이 어렵거나 경우에 따라서는 불가능할 수도 있으며, 만약 선정이 가능하다고 하더라도 이를 이용하여 구한 균열의 깊이는 큰 오차를 수반하게 된다⁴⁶⁾.

표면과 투과 기법은 자기 보정 기법을 이용하여 투과 함수를 구한 뒤, 이 투과 함수가 가지는 스펙트럼을 계산하여 균열 깊이를 추정하는 방법이다. 센서와 부재 사이에 상대적인 움직임 없이 일체로 거동할 경우에는 일관성 있는 결과를 얻을 수 있지만, 실제로는 센서와 구조체의 접촉상태에 따라 측정 결과에 변동이 있게 된다. Achenbach 등⁴⁹⁾은 이를 해결하기 위하여 자기 보정 기법을 제안하였으며, 표면과 투과 함수 측정에 있어서 매우 유효한 방법임을 입증하였다. 이후에 이 기법은 Popovics 등⁴⁶⁾, Song 등⁵⁰⁾ 등에 의하여 콘크리트의 균열 문제로 적용되어, 주파수에 따른 투과된 표면파를 산정함으로써 균열 깊이를 측정하였다.

3. 연구결과의 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

음향방출 기술은 재료의 파손기구를 연구하거나 내부에 존재하는 결함을 검출하

는 기술로 최근 많은 관심을 끌고 있다. 이는 광범위한 부분에 대해 표면에서는 검출되지 않는 재료의 내부 손상을 검출할 수 있다는 큰 장점이 있기 때문일 것이다. 콘크리트 및 토목 분야에서는 다른 분야에 비해 적은 수이지만 최근 많은 연구자들에 의해 콘크리트 재료나 구조물에의 적용이 되어 왔다. 대체적으로 이전의 연구 분야들은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫째는 균열 선단에서 전개되는 파괴진행 영역(fracture process zone, FPZ)에 대해 파괴 메커니즘을 규명하거나, 균열의 위치 또는 균열의 전파과정을 설명하는 것이었다. 두 번째 연구 분야는 음향방출 기술을 실제 구조물의 안전성 진단의 개념에서 구조물의 건전성을 평가하거나 손상을 검출하는데 초점이 두어졌다. 이 분야에 대한 국내·외의 관심도는 매우 고조되고 있으나 아직까지 실용기술은 개발되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구의 지속적이며 급속한 연구개발의 진행은 향후 안전진단 관련 분야에의 새로운 진단 기법으로 촉망을 받을 것으로 사료된다.

표면탄성파를 이용한 균열 깊이 측정에 관한 연구는 기존에 상용화되었던 초음파 속도법의 어려움에 대한 대안으로 최근 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히, 이 분야의 연구는 미국 노스웨스턴 대학교(Northwestern University)과 일리노이 주립 대학교(University of Illinois, Urbana-Champaign)에서 연구가 많이 이루어지고 있는데, 콘크리트에 대한 연구는 노스웨스턴 대학교의 연구가 현재 가장 앞서 있다. 그들의 연구는 콘크리트 구조물에서 균열의 깊이를 측정하기 위해 다양한 실험적/수치 해석적 방법에 기초를 두었고, 연구 결과에서 알 수 있듯이 기존의 방법을 대체할 수 있는 큰 가능성을 보여주었다. 그러나 현재까지의 연구는 실용적으로 이 방법을 사용할 수 있도록 균열의 정확한 깊이를 판정하는 기술에 대해서는 확립되지 않은 상태이며, 철근의 영향을 포함한 연구 결과는 아직 나오지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서 이 부분에 대한 연구를 수행하면 결과에 따라 현장에서 즉시 사용할 수 있는 기술이 되리라 판단된다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 서 론

콘크리트 구조물의 손상 모니터링 및 현장 측정을 위한 능동/수동 비파괴 검사 신기술 개발을 목표로 하는 본 연구에서는 음향방출 기술을 이용한 수동형 비파괴 기술 개발과 표면탄성파를 이용한 능동형 비파괴 기술 개발로 나누어 연구를 수행하였다.

1차년도에 실내 시편 실험을 통한 음향방출 위험도평가 핵심기술 도출을 목표로 콘크리트 파괴거동 단계를 분류하였고, 파괴 단계별로 음향방출 신호원을 분석하였으며, 각종 시편실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호를 취득하였다. 또한 콘크리트 표면탄성과 해석을 위한 거동 연구와 파동 전파 해석을 통한 콘크리트에서의 균열 깊이에 따른 표면탄성과 특성 분석, 표면탄성과 출력 특성에 맞는 신호처리기법 연구, 콘크리트 특성을 고려한 표면탄성과 발신 및 수신 시스템 조사를 연구하였다.

이후 2차년도에서는 시편실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호의 취득 실험을 수행하여, 정상신호와 이상신호의 신호 패턴을 분석하고, 이상거동 판정을 위한 음향방출 분석 알고리즘 개발하였다. 또한 콘크리트 균열 깊이별 표면탄성과 신호취득, 균열 깊이별 신호 특성 분석, 균열 깊이 판정 기법 개발, 파동 전파해석을 통한 철근 콘크리트에서의 균열 깊이에 따른 표면탄성과 특성분석을 수행하였다.

마지막으로 3차년도에서는 콘크리트 슬래브 구조에 대한 음향방출 발생 거동을 고찰하기 위해 슬래브 시편에 대한 실내시험을 수행하였으며, 현장적용 검증 실험을 위해 실제 교량에서 하중재하에 따른 각종 신호분석과 AE parameter 분석을 실시하였다. 또한 사용자 편의를 위한 현장 적용 절차서를 확립하고, 프로토타입 장비의 개발과 음향방출 기술의 현장 적용을 위한 절차서 개발 및 적용성 검증에 관한 연구를 수행하였으며, 현장 적용을 고려한 균열 깊이 측정 Active 기법을 개발하기 위한 실험을 통한 철근 콘크리트 균열 깊이별 표면탄성과 취득, 철근의 영향을 고려한 균열 깊이 판정 기법 개발, 현장 응용을 위한 프로토타입 시스템 구성 및 현장 적용 실험을 수행하였다.

제 2 절 수동형 비파괴 평가 기술 개발

1. 서 론

콘크리트 구조물의 손상 평가를 위한 능동/수동형 비파괴 검사 신기술을 개발하기 위한 본 연구는 음향방출 기술을 이용한 수동형 비파괴 기술 개발과 표면탄성파를 이용한 능동형 비파괴 기술 개발로 분류할 수 있다. 음향방출기술을 이용한 수동형 비파괴 검사 기술은 콘크리트의 손상 정도 및 파괴 진행에 따른 음향방출 신호의 발생 특성을 규명하고, 콘크리트 구조물의 손상 평가에 최적화된 음향방출 장비를 개발하는데 최종 목적이 있다. 이를 위한 수동형 비파괴 평가 기술 개발의 연차별 연구 목표 및 내용은 다음과 같다.

① 1차년도

○ 연구 목표

- 실내 시편 실험을 통한 음향방출 위험도 평가 핵심 기술 도출

○ 연구 내용

- 콘크리트 파괴거동 단계 분류
- 파괴 단계별 음향방출 신호원 분석
- 시편 실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호 취득

② 2차년도

○ 연구 목표

- 이상거동 판정을 위한 음향방출 신호분석/평가 알고리즘 개발

○ 연구 내용

- 시편 실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호 취득
- 정상신호와 이상신호의 신호 패턴 분석
- 이상거동 판정을 위한 음향방출 분석 알고리즘 개발

③ 3차년도

○ 연구 목표

- 음향방출 기술의 현장 적용을 위한 절차서 개발 및 적용성 검증

○ 연구 내용

- 사용자 편의를 위한 현장 적용 절차서 개발
- 수동형 비파괴평가를 위한 프로토타입 장비 개발
- 현장 실험을 통한 적용성 평가 및 보완

1차년도 에서는, 음향방출 위험도 평가를 위한 핵심기술을 도출하는데 목표를 두고 연구를 진행하였다. 철근 콘크리트의 휨 이론(Flexural Theory)을 적용하여 콘크리트 구조물의 파괴 거동을 분석하고 파손 진행의 단계를 3단계로 분류하였으며, 콘크리트에서의 음향방출 신호원을 분석하여 파괴 진행의 각 단계별 신호원을 추정하였다. 또한 콘크리트의 파손 단계별 음향방출 신호의 실제 패턴을 파악하기 위하여 콘크리트 보 시험편을 제작하고 다양한 하중 수준에서의 음향방출 취득 실험을 수행하였다. 한편, 당해연도에는 3차년도 완성을 목표로 하고 있는 콘크리트 구조물에 최적화된 음향방출 장비를 개발하기 위한 기초 연구를 수행하여 기본 설계를 수행하였다.

또한 2차년에서는, 콘크리트에서 이상거동 판정을 위한 음향방출 신호 분석·평가 알고리즘 개발에 목표를 두고 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 콘크리트가 파괴에 이르기까지의 다양한 하중단계에서의 음향방출 발생 특성을 취득하기 위한 음향 방출시험을 수행하였고, 이 실험을 결과를 가지고, 각종 신호분석과 AE parameter 분석을 통해 전형적인 정상신호와 이상신호를 구분함으로써, 이상신호를 판단하는데 근거가 되는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 향후 자체 개발 예정인 콘크리트용 음향방출 장비를 구현하는데 있어서, 중요한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

마지막으로 3차년도 에서는, 음향방출 기술의 현장 적용을 위한 절차서 개발 및 적용성 검증에 목표를 두고 연구를 진행하였다. 특히 본 연구에서는 콘크리트 슬래브 구조에 대한 음향방출 발생 거동을 고찰하기 위해 슬래브 시편에 대한 실내시험을 수행하였으며, 현장적용 검증 실험을 위해 실제 교량에서 하중재하에 따른 각종 신호분석과 AE parameter 분석을 실시하였다. 또한 이들의 현장 실용화를 위한 판단 알고리즘 및 프로토 타입 AE 진단 시스템을 개발하였다.

2. 음향방출 기술과 콘크리트 손상 거동

가. 음향방출 기술의 개요

일반적으로 음향방출(acoustic emission, AE)은 “재료 내부의 국부적인 신호원으로부터 에너지의 급격한 해방으로 인해 발생하는 일시적인 탄성파가 나타나는 현상(the class of phenomena whereby transient elastic waves are generated by the rapid release of energy from localized sources within a material)”⁵¹⁾이라 정의된다. 이러한 탄성파는 재료를 통해 전파하며, 표면에 도달하게 되면 압전센서에 의해 감지될 수 있다. 대부분의 재료에서 발생하는 음향방출은 탈구, 꼬임, 상변화, 균열의 발생과 전파 등과 같은 돌이킬 수 없는 변화로부터 기인한다.

음향방출기술(AE, Acoustic Emission)은 다른 비파괴검사법에 비해 상대적으로 넓은 영역의 검사가 가능하며 공용 중 감시, 실시간계측이 가능하고 균열의 위치를 탐지할 수 있다는 등의 장점이 있어 결함탐지에 적합한 비파괴기법으로 최근 관심이 모아지고 있다. 결함의 진전 등으로 인해 에너지의 순간적 방출이 발생하면 그 중 일부가 탄성파로 변환되어 부재를 타고 전파하는데 바로 이러한 탄성파를 음향방출이라고 하며 이를 센서로 취득하여 취득된 신호를 근거로 결함의 위치를 추정하고 결함의 상태를 평가하는 기술을 음향방출기술이라 한다. 이러한 방법의 특징은 특정 신호를 보내어 이를 다시 취득하는 대개의 비파괴적 시험법과는 달리 구조물 사용 중 자연 발생하는 결함신호를 취득하는 비가역적 방법이라는 것이다. 또한 부재를 타고 전파하는 탄성파를 취득하는 것이기 때문에 센서가 결함과 어느 정도 거리를 두고 있어도 결함을 탐지해낼 수 있으므로 다른 비파괴시험법에 비해 상대적으로 넓은 범위의 감시가 가능하다.

일반적으로 콘크리트는 강재의 경우보다 상당히 많은 미세 균열진전이 발생하며 재료의 특성상 어느 정도의 균열발생은 필연적이지만 철근의 탈락이나 균열의 지나친 성장은 부재의 강성을 약화시킨다. 또한 콘크리트는 크리프(creep)나 건조수축(shrinkage) 또는 중성화 등의 강성저하를 유발하는 현상이 매우 장기적으로 천천히 진행되는 특성을 가지므로 재료의 노화도 평가기법이 요구되는 재료이다. 따라서 콘크리트의 균열 및 노화도 평가에 음향방출기술을 적용할 필요성이 최근 제기

되고 있다. 이러한 기술이 개발되면 보다 효율적이고 신뢰도 높은 진단이 가능하며 이를 중요한 구조물의 취약부재에 대한 상시감시 등에 적용할 경우 위험경보체계를 갖추는 것도 가능할 것으로 전망된다.

콘크리트의 경우 음향방출은 주로 다음의 세 가지 원인으로부터 발생하는 것으로 알려져 있다⁵²⁾.

- ① 균열 성장
- ② 콘크리트와 철근 사이의 미끄러짐
- ③ 섬유 보강 콘크리트의 섬유의 파손

재료의 비탄성적인 변형이나 균열로 인해 음향방출 이벤트(AE event)가 발생하게 되면 응력과(stress wave)의 형태로 재료 내부 또는 표면을 전파하여 센서 부착 부위에 도달하게 되고, 센서는 그에 따른 표면의 움직임을 감지하여 전기적 신호로 변환하게 된다. 이렇게 취득된 음향방출 신호는 크게 연속형 신호(continuous emission)와 돌발형 신호(burst emission)로 나뉘어 질 수 있다. 연속형 신호는 음향방출 이벤트가 급격히 발생하여 일정한 신호수준을 연속적으로 유지하는 상태로 금속의 소성변형 등과 같은 경우에 발생한다. 돌발형 신호는 독립적이고 불연속적인 신호의 형태로 균열성장이나 취성 재료의 파괴 등의 경우에 발생하게 된다. Fig. 2-1은 음향방출의 원리를 나타낸 그림이고 Fig. 2-2는 연속형 신호와 돌발형 신호의 전형적인 형태를 나타낸 것이다.

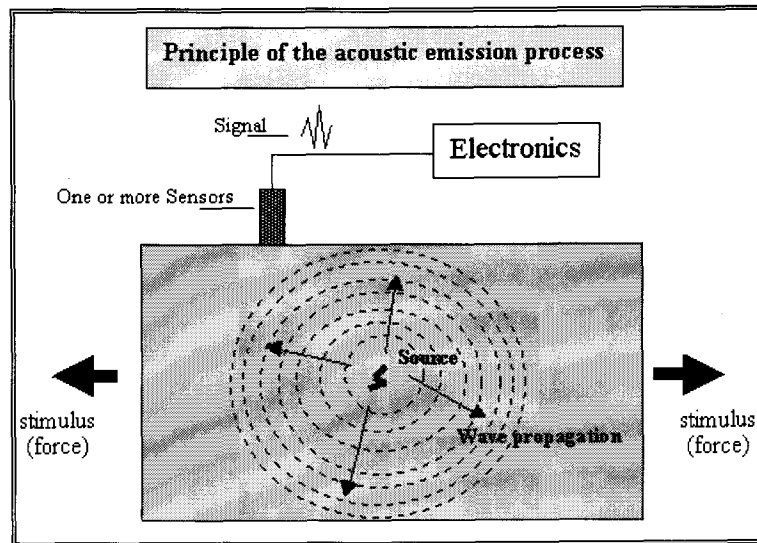


Fig. 2-1 Principle of the acoustic emission process

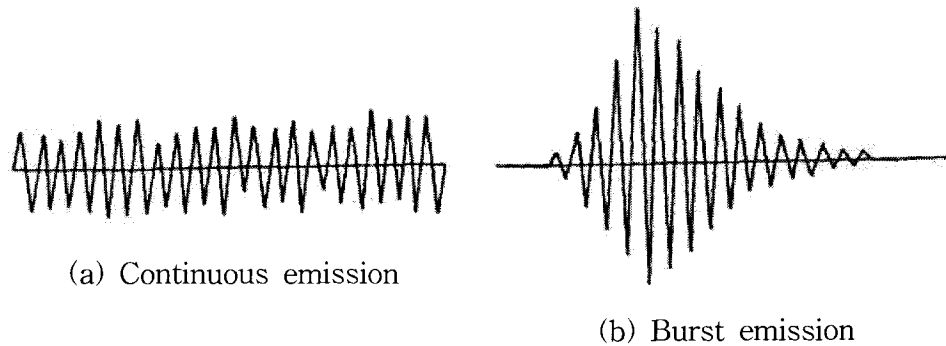


Fig. 2-2 The two basic types of acoustic emission signals

콘크리트에서 발생하는 음향방출은 매우 넓은 주파수 대역을 지니며, 장비의 발달과 함께 50 kHz에서 2 MHz까지의 주파수 대역까지 측정이 이루어지고 있다. 음향방출의 낮은 주파수 대역은 시험장비나 주변 환경으로부터 발생하는 잡음(background noise)이 문제가 되는 경우가 많다. 한편 높은 주파수 대역으로 갈수록 잡음신호는 감소하는 반면 신호의 감쇠가 커지게 되어 취득 가능한 신호의 전파거리가 짧아지게 된다. 따라서 잡음과 감쇠를 고려하여 센서의 종류와 부착위치를 선택하여야 한다. 음향방출 신호를 취득하는 압전센서는 특정 주파수 대역의 신호만을 받아들이는 공진형 센서와 넓은 주파수 대역의 신호를 받아들이는 광대역형 센서가 있는데, 재료의 특성을 고려하는 센서의 선택이 필요하다. 본 연구에서는 지난 연구 경험을 바탕으로 콘크리트에서의 전파 특성 및 잡음 특성을 감안할 때 150 kHz의 공진형 센서(R15)가 가장 적합한 것⁵³⁾으로 판단하고 연구를 진행하

였다.

나. 음향방출 파라미터

Fig. 2-3⁵⁴⁾은 콘크리트에서 발생하는 하나의 전형적인 음향방출 이벤트(AE event)를 나타낸 것이다. 압전소자로부터 취득된 음향방출 신호는 매우 작기 때문에 전기적 증폭의 과정을 거치게 되는데 콘크리트의 경우 통상 80~100 데시벨(decibels, dB)의 증폭이 이루어진다. 증폭된 신호는 기본적으로 일정한 수준의 연속형 신호의 형태로 잡음(background noise)이 깔리게 되는데 이러한 잡음 사이에 Fig. 2-3과 같은 돌발형 신호가 나타나게 된다.

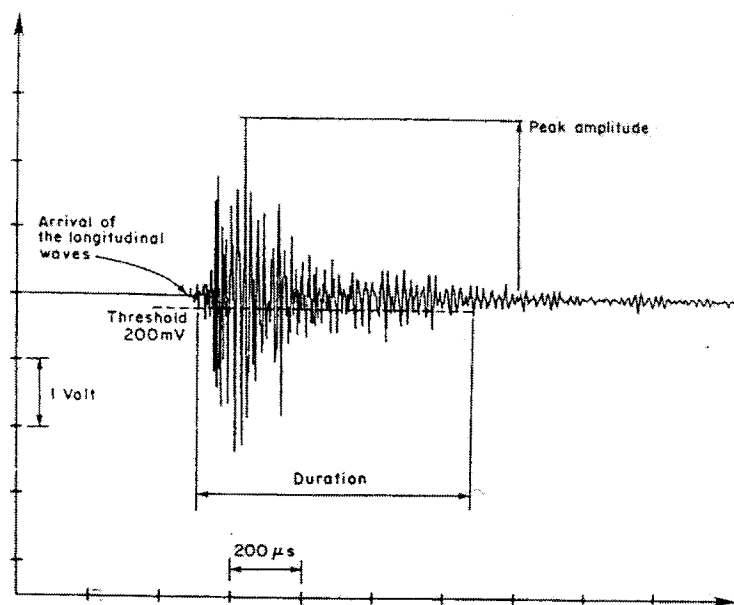


Fig. 2-3 A typical acoustic emission signal from concrete ⁵⁴⁾

Fig. 2-3과 같이 background noise level을 벗어나는 돌발형 신호는 문턱값(threshold)을 사용하여 구분하게 된다. 즉 문턱값보다 낮은 수준의 신호는 잡음으로 간주하여 무시하고 문턱값을 벗어나는 신호가 나타나게 되면 이를 받아들이는 것이다. 이 때 문턱값을 넘어가는 하나의 파장을 음향방출 카운트(AE count or ring-down count)라 하는데 카운트와 카운트 사이의 시간이 일정한 시간 이내에

발생하는 경우 이러한 카운트의 집합을 하나의 음향방출 이벤트(AE event or AE hit)로 간주하게 된다. 이렇게 얻어진 하나의 AE event에 대하여 다음과 같은 음향방출 파라미터(AE parameters)를 추출하여 신호에 대한 평가가 이루어진다.

- ① AE count (ring-down count) - 음향방출 신호가 정해진 문턱값을 초과한 횟수(Fig. 2-4 참조)
- ② AE event (AE hit) - 하나의 돌발형 신호를 의미함. 앞선 event의 마지막 count가 발생한 이후 미리 정해진 시간(hit definition time)보다 긴 시간동안 count가 발생하지 않을 경우 하나의 돌발형 신호가 끝난 것으로 간주하여 하나의 event가 끝난 것으로 판단함 (Fig. 2-4의 경우 3개의 event가 발생하였음)
- ③ Rise time - 첫 번째 count의 발생시간으로부터 첨두진폭(peak amplitude)이 발생하기까지의 시간
- ④ Signal duration - 하나의 AE event의 지속시간, 즉 최초의 count로부터 마지막 count까지의 시간 간격
- ⑤ Peak amplitude - 하나의 AE event에서 발생한 count 중 최대 진폭
- ⑥ Energy - 하나의 돌발형 신호에서 amplitude vs. time curve의 아래쪽 면적

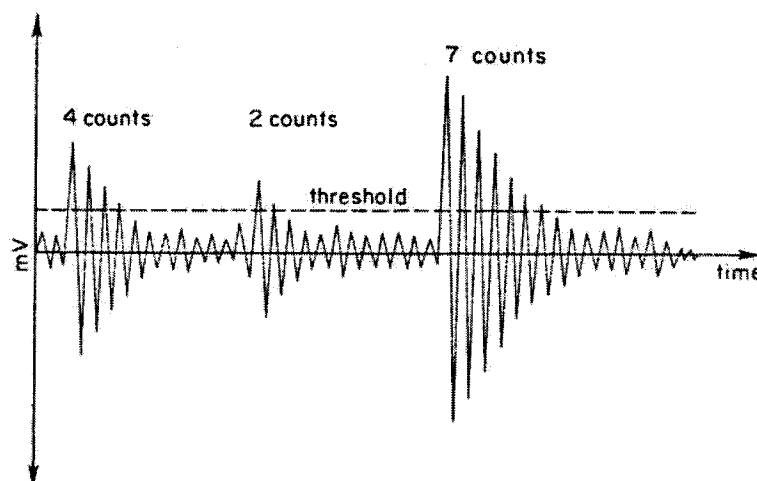


Fig. 2-4 The principle of acoustic emission counting (ring-down counting)

다. 콘크리트의 파괴 거동 단계 분류

철근 콘크리트에 대한 휨 이론(Flexure Theory for Reinforced Concrete)은 보의 모멘트 저항력을 도출하기 위하여 세 가지 기본 가정에 근거를 두고 있다. 이들 가정은 증가하는 모멘트 하에서 보 단면의 거동을 고찰하기 위하여 사용할 수 있으며, 보다 단순화된 해석을 위하여 ACI에서는 몇 개의 가정을 추가하였다. 이들 가정은 다음과 같다.

1. 휨 하중이 가해지기 전에 휨 축에 대하여 직각인 단면의 평면은 휨 하중이 부가된 후에도 평면을 유지한다.
2. 중립축으로부터 동일한 거리에 있는 철근과 콘크리트의 변형률은 서로 같다.
3. 콘크리트와 철근의 응력은 콘크리트와 철근의 응력-변형률 곡선을 이용하여 변형률로부터 계산할 수 있다.
4. 휨 강도의 계산에 있어서 콘크리트의 인장 강도는 무시한다(ACI Section 10.2.5).
5. 콘크리트는 최대 압축 변형률이 한계값에 도달하였을 때 파괴되는 것으로 가정한다(ACI Section 10.2.3).
6. 콘크리트의 압축에 대한 응력-변형률 관계는 응력-변형률 곡선 또는 사각형, 사다리꼴, 포물선 등, 압축 강도 실험의 결과와 실질적으로 일치하는 형태로 가정할 수 있다(ACI Section 10.2.6).

Fig. 2-5는 철근 콘크리트 단순보에 대한 4점 휨 정적 파괴실험을 통해 얻어진 모멘트-곡률 곡선(Moment-Curvature Diagram⁵⁴⁾)을 나타낸 것이다. 여기에서의 모멘트와 곡률은 4점 휨 시험편에서 순수 휨 모멘트(pure bending moment)가 부가되는 보 중앙부에서의 값이며, 특히 곡률(Curvature, $1/r$)은 측정된 변형률로부터 다음 Eq. (1)과 같이 계산된 값이다.

$$\frac{1}{r} = \frac{\epsilon}{y} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 r 은 Fig. 2-5에 도시된 바와 같이 휨 하중에 의해 변형된 보의 곡률 반지름이며, y 는 변형률이 측정된 위치에 대한 중립축으로부터의 거리이다. Fig. 2-5에 나타나 있듯이 철근 콘크리트 단순보의 파괴 단계는 그림의 B와 D점을 기준으로 3단계로 구분할 수 있으며, 휨 거동의 단계별 특성을 설명하기 위하여 각 단계를 대표하는 A, C, E점에서의 균열 및 변형률 상태를 Fig. 2-6에 나타내었다. Fig. 2-7은 J. G. McGregor⁵⁵⁾에 의한 전형적인 철근 콘크리트 단순보의 균열 양상을 나타낸 것이다.

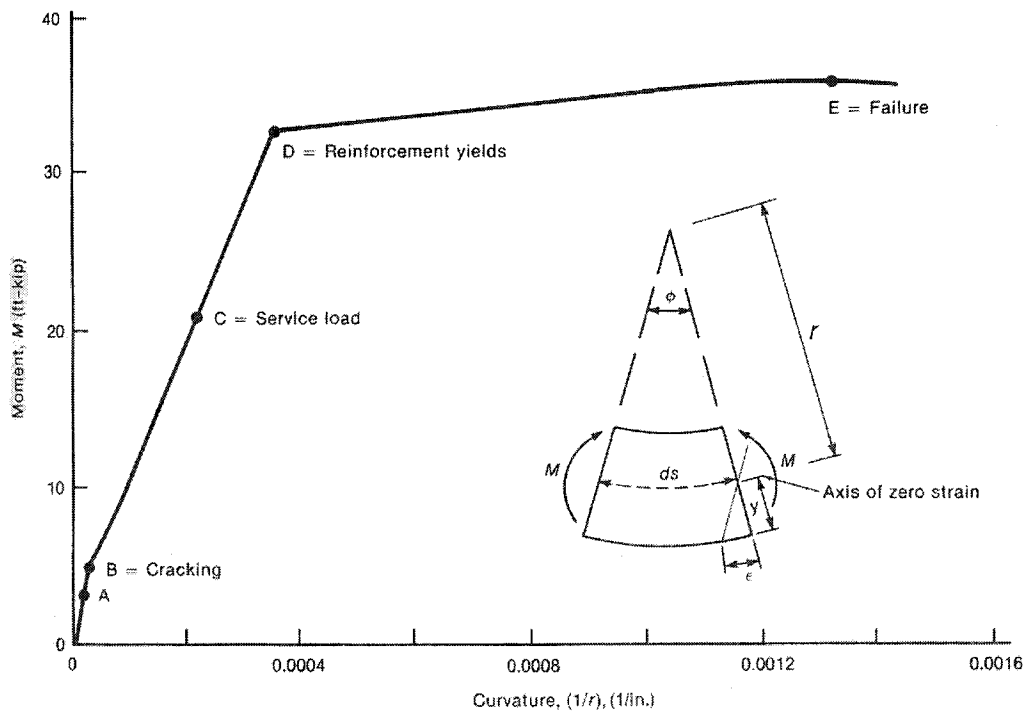
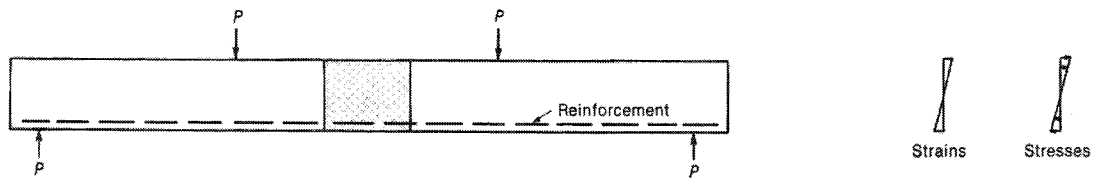
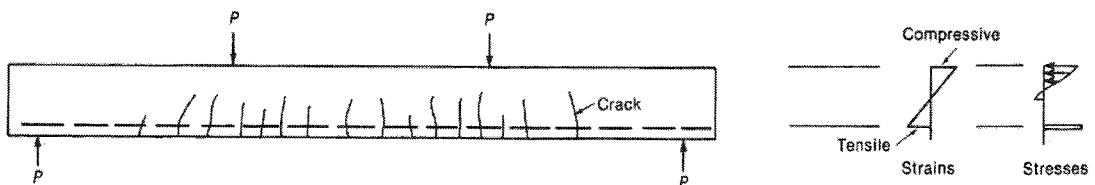


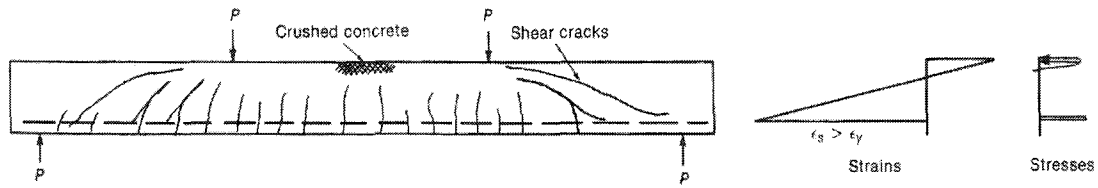
Fig. 2-5 Moment-curvature diagram for reinforced concrete beam⁵⁵⁾



(a) Stage A - before cracking



(b) Stage C - after cracking, before yield, service load



(c) Stage E - failure

Fig. 2-6 Cracks, strains, and stresses in reinforced concrete beam⁵⁵⁾

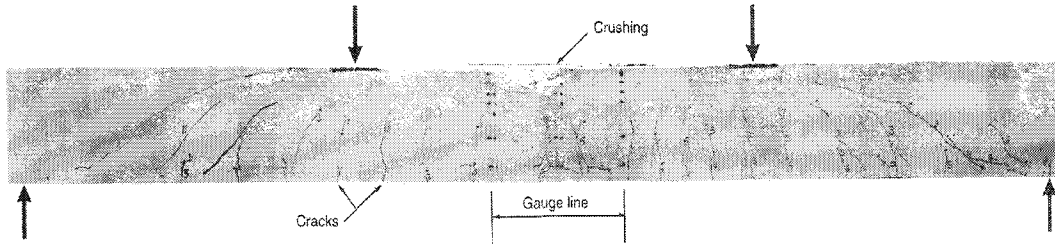


Fig. 2-7 Reinforced concrete beam after failure⁵⁵⁾

Fig. 2-5의 A점에서는 Fig. 2-6 (a)에 나타나 있듯이 균열이 발생하지 않는다. 이 단계에서의 변형률은 매우 작으며, 기본적으로 선형적인 응력 분포를 보인다. 단면에 부가되는 모멘트는 인장측 콘크리트를 포함하는 전 단면에 분포되며 따라서 모멘트-곡률 곡선상에서 가장 큰 기울기, 즉 강성을 갖는다.

보의 바닥, 즉 인장측의 응력이 콘크리트의 인장강도에 도달하게 되는 지점이 Fig. 2-5의 B점이며, 이 때 균열 발생이 시작된다. 균열이 생성되면 콘크리트가 부담하던 인장력은 철근으로 전달되며, 모멘트에 저항하는 콘크리트의 유효 단면이 감소하게 된다. 그 결과 Fig. 2-5의 B-C-D 구간의 기울기와 같이 보의 강성은 다소 감소하게 되지만 거의 선형적이다. 이 상태의 응력 분포 및 균열 양상은 Fig. 2-6 (b)와 같다. 이 구간이 일반 구조물의 정상적인 사용하중 범위에 해당되며, 이 시기에 발생하는 균열은 휨 균열(flexural crack)이라 하여 구조물의 사용에 지장을 주지 않는 허용 균열에 포함된다.

부가 하중이 Fig. 2-5의 D점을 지나게 되면 철근이 항복점에 도달하게 된다. 일단 철근의 항복이 발생하게 되면 작은 모멘트의 증가에도 곡률은 급격히 커지는 상태가 된다. 이 때의 응력과 변형률은 Fig. 2-6의 (c)와 같다. 이 단계에서는 보 중앙부의 휨 균열 이외에도 보의 지점 부근에서 사인장 균열(shear crack)이 발생하게 되며 보 중앙 압축부의 압축파괴(crushing)가 발생하면서 보가 파괴된다. 이러한 과정을 살펴보면 콘크리트 자체는 그다지 연성이 있는 재료가 아니지만 파괴

직전의 철근 콘크리트는 상당한 연성을 가지고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 철근 콘크리트 보의 거동은 3단계로 구분될 수 있으며, 이 중 1-2 단계(Fig. 2-5의 A-B-C-D 까지)의 거동은 사용하중 하에서 나타나는 정상적인 거동이며 3단계(Fig. 2-5의 D-E)의 거동이 파괴 진행시 나타나는 거동이라 할 수 있다. 음향방출의 관점에서 특기할 만한 것은 정상적인 거동에서도 휨 균열의 발생을 허용한다는 점이며 따라서 음향방출 신호가 발생하게 된다는 것이다. 따라서 강재를 비롯한 일반적인 다른 재료의 경우에서처럼 음향방출 신호의 발생 유무만으로 손상을 평가할 수 없다는 특징이 있다. 그러나 정상 거동과 파괴 거동의 차이에 따른 신호 발생 특성 및 양상의 차이를 규명한다면 손상 평가가 가능할 것이다.

라. 콘크리트에서 음향방출 전파 특성

음향방출 기술을 적용하기 위해서는 대상 재료에서 음향방출 신호의 속도, 감쇠 등의 전파 특성을 인지하고 있어야 한다. 이러한 특성은 장비의 설정에 필요하며 또한 측정 계획의 수립 및 취득된 신호의 해석에 있어서도 부착된 센서의 유효 측정 범위를 결정하는 중요한 변수이기 때문이다. 윤동진 등⁵³⁾은 콘크리트 구조물에서 선형 및 지수형 센서 배열을 이용한 전파 실험을 수행하여 콘크리트에서의 음향 방출 전파 특성을 제시한 바 있으며 여기에서는 그 내용을 정리하였다.

Fig. 2-8은 음향방출 신호의 전파 거리에 따른 감쇠곡선을 나타낸 것이다. 그림에서의 x축은 신호원으로부터의 거리를 나타내며 y축은 음향방출 신호의 크기를 대표하는 첨두진폭을 나타낸다.

서로 다른 크기의 탄성파를 발생시키는 4가지의 신호원을 사용한 실험에서 가장 작은 신호를 발생시키는 pulsor와 가장 큰 신호를 발생시키는 large spring hammer의 첨두진폭은 약 40 dB정도의 차이를 보였으며, 어느 경우이든 log-log graph 상에서 선형적인 감쇠율을 나타내고 있다. 신호의 amplitude에 따라 취득 가능한 전파거리는 달라졌으나 1.6 m 거리의 센서에서는 거의 신호를 얻을 수 없었으며 대체로 실용적인 전파거리는 대략 1 m 정도로 판단된다. Fig. 2-9는 균열 신호와 가장 흡사한 것으로 알려진 pencil break에 의해 얻어진 파형들을 나타낸 것으로 위에서부터 아래로 갈수록 먼 거리에서 잡힌 파형이다. 감쇠가 크고 부피가 큰 콘크리트의 특성상 반사파가 잡히지 않아 비교적 깨끗한 파형을 얻을 수 있었

다. 파형분석 결과 상대적으로 진폭이 작고 속도는 빠른 종파와 진폭이 크고 속도가 느린 표면파로 분류할 수 있었다. 전파 속도는 종파가 2,800~3,000 m/sec이고 표면파가 2,000 m/sec로 측정되었다. 종파는 진폭이 매우 작기 때문에 현장 적용시 검출이 어려울 것으로 판단되며 따라서 표면파의 속도를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

콘크리트에서 음향방출 신호의 감쇠가 매우 커서 유효 전파거리가 1m 이하라는 사실은 콘크리트 건전성 평가에 음향방출 기술을 적용하기 위한 접근방법에 중요한 방향을 제시한다. 우선 지금까지 압력용기 및 강교량 등에 음향방출 기술을 적용하는데 일반적으로 사용되어 온 위치표정기법이 콘크리트 구조물에서는 비효율적이라는 점이다. 대부분의 콘크리트 구조물은 매우 규모가 큰데 1m 간격으로 센서를 배치하려면 엄청나게 많은 수의 센서가 필요하기 때문이다. 이러한 특성은 한편으로는 매우 유용한 장점을 시사하게 되는데, 음향방출기술의 토목구조물 적용에 있어서 가장 심각한 문제로 대두되었던 잡음문제로부터 자유로워질 수 있다는 점이다. 따라서 센서의 선택에 있어서 잡음이 적고 감쇠가 큰 고주파수 영역보다는 잡음이 많고 감쇠가 적은 저주파수 영역의 센서를 선택할 수 있으며, 콘크리트에서는 150 kHz 공진형 센서를 사용하는 것이 가장 적합할 것으로 판단된다.

마. 콘크리트에서 음향방출 신호원

음향방출은 재료 내부의 국부적 신호원으로부터 다양한 원인에 의해 급격히 해방된 에너지의 일부가 탄성파의 형태로 나타나는 것이며, 이러한 에너지 해방은 일

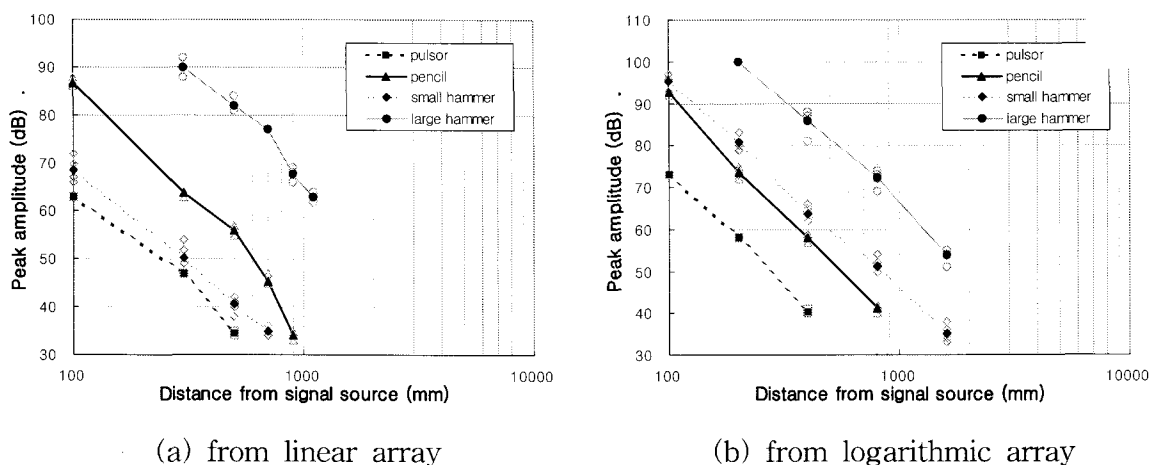


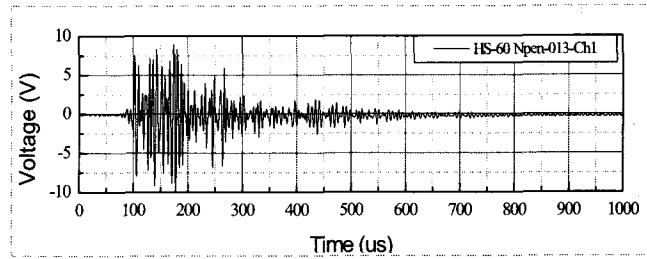
Fig. 2-8 The attenuation curve of acoustic emission signals in concrete⁴⁶⁾

반적으로 탈구, 꼬임, 상변화, 균열과 같이 돌이킬 수 없는 변화에 원인을 두고 있다. 사용하중이 반복적으로 부가되는 콘크리트 구조물에서 음향방출의 원인은 궁극적으로는 균열과 같은 국부적 파손이라 할 수 있지만, 이는 다시 균열의 발생 및 전파에 의한 신호와 균열이 열리고 닫히면서 균열면의 거친 부분이 마모되면서 발생하는 마찰신호로 구분할 수 있다.

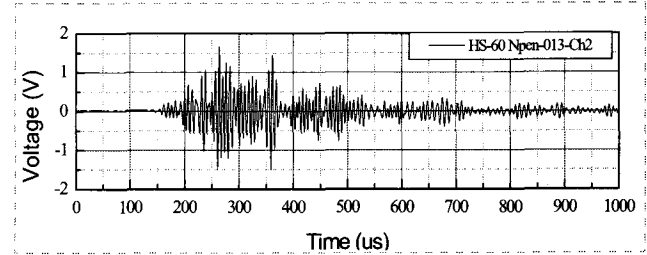
앞 절에서 살펴본 바와 같이 철근 콘크리트 부재는 정상적인 사용하중 범위에서도 휨 균열이 발생하며 이는 설계에서부터 고려된 균열이므로 증립축을 벗어나지 않는 범위에서는 허용되는 균열이다. 이러한 휨 균열은 이론적으로 최초에 하중이 부가되었을 때 발생하며 일단 한

번 경험한 하중이 반복적으로 부가되어도 거의 성장하지 않은 채 열림과 닫힘만을 반복하게 된다. 따라서 균열에 의한 음향방출 신호는 최초의 하중부가에 발생한 후 더 이상 발생하지 않을 것으로 추정할 수 있다.

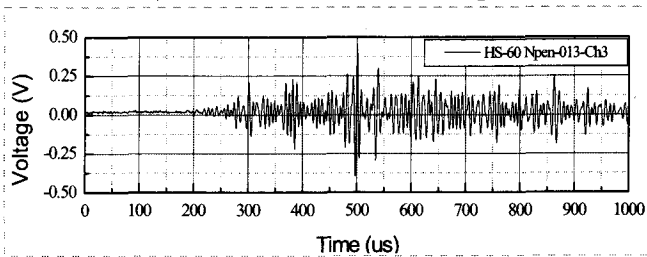
한편 콘크리트라는 재료는 동일한 결정구조를 가지는 균질인 재료가 아니라 모래, 자갈, 시멘트풀 등이 혼합된 복합재료이므로 최초 발생한 휨 균열의 균열면(crack face)은 매끈하지 않고 매우 거칠다. 따라서 균열면의 닫힘 뿐 아니라 열림이 진행되는 중에도 균열면의 거친 부분에서는 마찰이 발생하며 그에 따라 균열



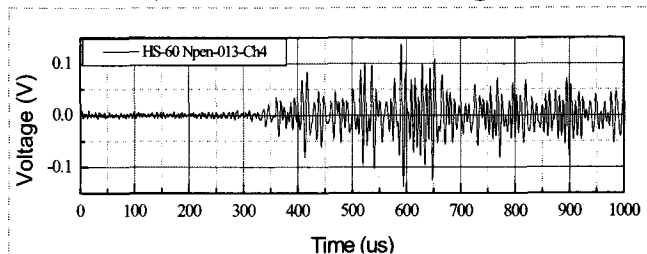
(a) Ch. 1, 0.1 m far from the signal source



(b) Ch. 2, 0.3 m far from the signal source



(c) Ch. 3, 0.5 m far from the signal source



(d) Ch. 4, 0.7 m far from the signal source

Fig. 2-9 The waveform analysis in concrete⁴⁶⁾

면상의 요철 부분에서는 국부적인 파쇄가 발생할 것이다. 이러한 균열 면의 마찰 및 국부적 파쇄는 음향방출 발생의 또 다른 원인이 되며, 특히 마찰면의 국부적 파쇄는 규모의 차이만 있을 뿐 균열의 발생 및 전파와 동일한 현상인 만큼 이들 신호를 구별한다는 것은 불가능하다고 할 수 있다.

이러한 상태에서 일정 수준의 사용하중이 반복적으로 부가되게 되면 균열면의 요철부위는 점차 마모되어 국부적 파쇄 및 마찰면의 면적은 감소될 것을 예측할 수 있으며 그에 따라 음향방출 신호의 발생 빈도 및 크기는 감소하게 될 것이다. 허용 하중을 벗어나지 않는 일정 수준의 하중이 충분히 반복된 부재에 역시 허용 하중 범위 내에서 보다 큰 하중이 부가되면 콘크리트 부재는 그 하중에 상응하는 새로운 휨 균열이 발생하게 되며 위와 같은 균열면 마모의 과정을 다시 거치게 될 것이다. 한편 허용하중 한도 이내의 범위에서도 상대적으로 큰 하중과 작은 하중이 임의로 작용되는 경우 균열이 열리는 크기가 다르기 때문에 상대적으로 큰 하중에서 더욱 많은 신호가 나타날 것을 예측할 수 있다.

결과적으로 철근 콘크리트에서 음향방출 신호의 발생 원인은 균열의 발생 및 전파 그리고 균열면의 마찰 및 국부적 파쇄로 정리할 수 있으며, 신호 자체의 특성만으로 이들 신호를 구분하는 것은 불가능한 것으로 판단된다. 또한 음향방출이라는 현상의 특성상 이들 신호의 발생 빈도나 에너지 등을 정량적으로 추정하거나 평가하는 것은 불가능하다. 따라서 음향방출을 이용하여 콘크리트의 손상을 평가하기 위해서는 가급적 다른 조건들은 동일하게 유지하면서 손상 전후의 신호 패턴에 대한 상대적인 비교를 하는 방법과 통계적인 접근법이 효과적일 것으로 판단된다.

3. 철근 콘크리트 빔의 반복 하중에 따른 음향방출 발생 거동

가. 서 론

콘크리트 부재의 거동 및 그에 따른 음향방출 신호원에 대하여 검토한 결과를 바탕으로 콘크리트가 파괴에 이르기까지의 다양한 하중단계에서의 음향방출 발생 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 철근 콘크리트 보 시험편을 이용한 실내 실험을 수행하였다. 하중단계별로 반복적으로 재하하는 이유는 실제 구조물의 경우 이미 충분한 횡수의 반복하중을 받아 왔기 때문에 휨 균열은 이미 충분히 발달한 상태이며 그 때의 신호가 전형적인 정상신호로 간주될 수 있다고 판단하였기 때문이다. 본 실험에서는 특히 각 하중단계별로 미세균열이 발생하기 시작하는 초기의 신호와 반복하중이 가해져서 균열이 충분히 성장한 이후의 신호를 취득하여 정상상태에서의 신호특성을 분석하고 이를 파손이 진전될 때 발생하는 이상신호의 특성과 비교하여 그 차이점을 분석하는데 주안점을 두었다.

나. 실험장비

Fig. 2-10은 실험에 사용된 음향방출 실험장비의 구성을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 장비의 목록 및 역할은 다음과 같다.

- ① AE sensors - AE sensor는 150 kHz 주파수 대역의 공진형 센서(R15, 150 kHz resonant frequency)를 사용하였다. 토목구조물에서 주로 사용되는 센서는 R30 (300 kHz resonant frequency)과 R15센서가 주로 사용되는데, 콘크리트의 경우 강재에 비해 감쇠가 심하므로 상대적으로 전파거리가 긴 낮은 주파수 대역의 센서를 선택하였다.
- ② Pre-amplifier - 센서로부터 취득된 신호는 예비증폭기(pre-amplifier)를 사용하여 40 dB로 증폭하였다.
- ③ AE system - 신호의 처리 및 저장에 사용된 AE system은 PAC 사의 MISTRAS를 사용하였다. 신호취득을 위한 문턱값(threshold)은 background noise level보다 약간 위인 28 dB로 설정하였다.
- ④ Oscilloscope - 음향방출 파형을 취득하기 위하여 2대의 4 channel digital

oscilloscope(LeCroy 9354A)를 사용하였다.

- ⑤ Signal source - 센서 감도 및 장비 확인을 위하여 pencil lead break를 모의 신호원으로 사용하였다.

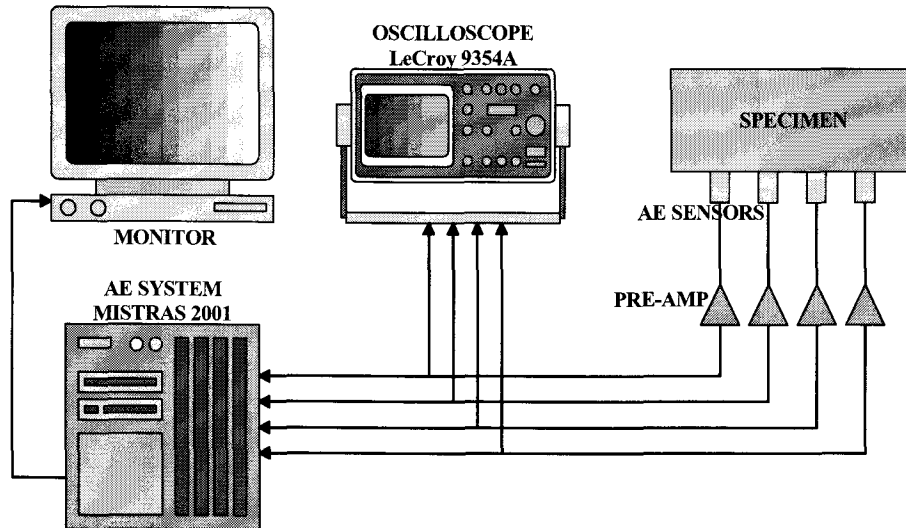


Fig. 2-10 Acoustic emission data acquisition system

다. 시험편

실험을 위하여 단철근 직사각형 콘크리트보 시험편을 제작하였다. Fig. 2-11은 제작된 시험편의 치수와 재하위치 그리고 센서 부착위치를 나타낸 것이다. 시험편은 파소철근보로 제작되었으며, 4점 휨 시험을 수행하였다. 시험편의 제원은 다음과 같다.

▷ 시험편 제원

- 보의 치수 : Height× Width× Length = 150× 100× 1100 (mm)
- 철근 : 1D19 without stirrup
- 콘크리트 강도 : $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$
- 철근 공칭 항복점 : $\sigma_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$
- 철근비 : $p = 0.02392$ ($p_{\min} = 0.00467 < p < P_{\max} = 0.02909$, O.K.)
- 중립축위치 : $a = \frac{A_s \sigma_y}{0.85 \sigma_{ck} b} = 42.21 \text{ mm}$, $c = a/0.85 = 49.65 \text{ mm}$

· 공칭극한 휨 모멘트 : M_n, M_u

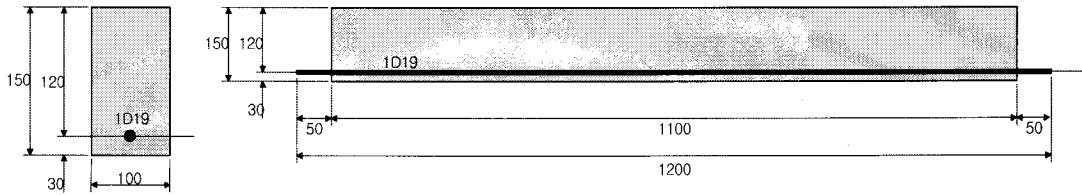
$$M_n = A_s \sigma_y (d - a/2) = 85,150.32 \text{ kgf-cm}$$

$$M_u = 0.85 M_n = 72,377.77 \text{ kgf-cm} = 0.7238 \text{ ton-m}$$

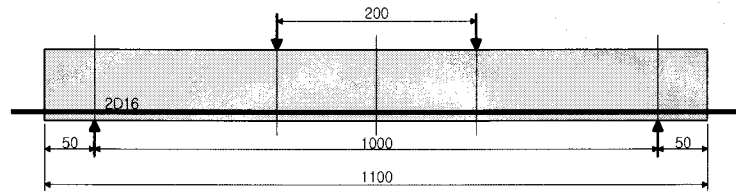
· 극한하중 : P_n, P_u

$$P_u = \frac{4M_u}{(L-a)} = 3.6 \text{ ton} \approx 36.0 \text{ kN}$$

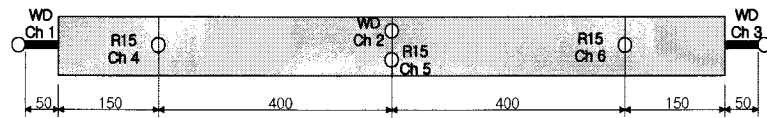
$$P_n = P_u/0.85 = 4.2 \text{ ton} \approx 42.0 \text{ kN}$$



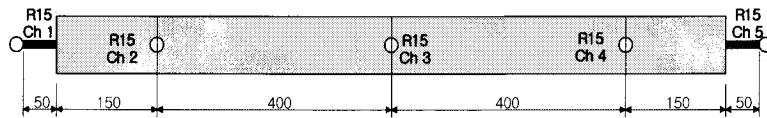
(a) specification



(b) loading point



(c) sensor location for the first specimen



(d) sensor location for the second and third specimen

Fig. 2-11 Reinforced concrete beam specimen

센서의 부착위치는 보 중앙부와 양 단부에서 최대전단력이 발생하는 위치(지점으로부터 d 만큼 떨어진 위치)의 세 지점을 선정하였으나 경우에 따라 추가적인 센서를 부착하였다. 시험편 종류별로 3개의 시험편에 대하여 실험을 수행하였는데, 첫 번째 시험편의 경우 R15 (150 kHz resonant frequency) 센서와 함께 다양한 주파수 대역의 신호를 함께 취득하기 위하여 3개의 광대역센서 (WD, 100~1,000 kHz range)를 사용하였다. 또한 두 번째와 세 번째 시험편은 노출된 철근의 양 단부에

각각 하나씩의 R15 센서를 부착하였다.

라. 시험하중 및 시험방법

본 실험을 수행하기에 앞서 반복재하실험의 하중반복횟수를 결정하기 위하여 예비실험을 수행하였다. 예비실험은 설계극한하중(P_u)을 기준으로 1~10% 범위의 하중을 신호발생율이 일정한 수준을 유지할 때까지 반복 재하 하였다. 콘크리트 파괴거동과 음향방출 거동의 관계에서 예측한 바와 같이 최초 하중이 부가되자 상대적으로 활발한 음향방출이 관찰되었으나 하중부가가 반복될수록 신호발생율은 감소하여 약 300 cycle의 하중반복 후 안정된 신호발생율을 유지하였다. 이를 근거로 단계별 재하실험의 하중반복횟수를 1,000회로 설정하였다.

Table 2-1 Loading scheme of experiment

loading step	applied load range (kN)	load vs. ultimate load (%)	Note
pre-test	0.36~3.6	1~10	To determine no. of loading cycles
step 1	14.4~21.6	40~60	Dead load considered, simulated small vehicles
step 2	14.4~28.8	40~80	Dead load considered, simulated medium vehicles
step 3	14.4~36.0	40~100	Dead load considered, simulated large vehicles
failure test	displacement control 0→6mm, 0.5mm step		Overload applied to failure

본 실험은 3 단계의 하중에 대하여 반복재하실험을 수행한 후 파괴실험을 수행하는 순서로 진행하였다. 하중단계별 반복재하실험은 시험편의 설계극한하중을 기준으로 Table 2-1과 같은 하중단계를 적용하여 실험을 수행하였으며, 각 하중단계별로 0.5 Hz의 sine 파 형태로 1,000회의 반복재하가 이루어 졌다. 파괴실험은 변위 제어 상태로 파괴가 발생할 때까지 0.5 mm 단위로 반복적으로 변위를 증가시키고, 최대 하중점에서 300 초의 휴지기를 두는 사다리꼴 파형으로 하중을 부가하였다.

500 kN 용량의 hydraulic actuator(MTS)를 사용하여 하중을 가하였다. 시험에 사용된 시험편 사진은 Fig. 2-12에, 시험기에 장착된 모습을 Fig. 2-13에 나타내었다. Table 2-2~4는 3개의 시험편에 대하여 각각 수행한 시험별 시험 조건을 나타낸 것이다.

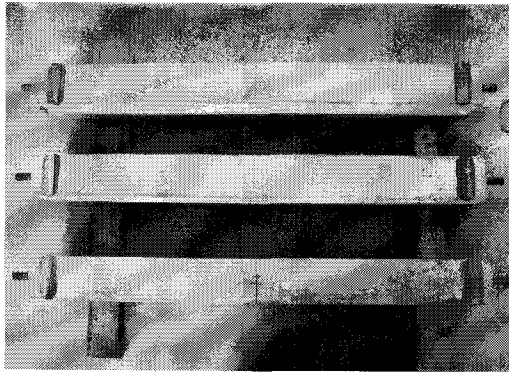


Fig. 2-12 Test specimens

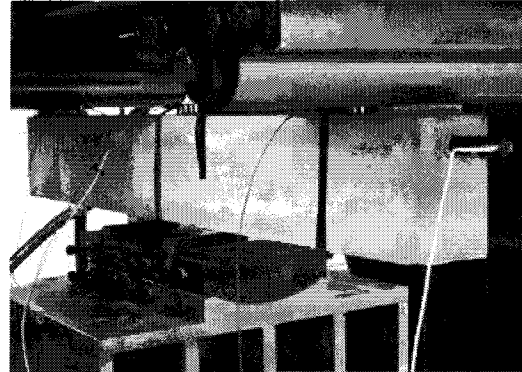


Fig. 2-13 Four-point bending test setup

Table 2-2 Test conditions : Reinforced concrete 1st specimen (RC1)

Test ID	Applied Load : from-to (range)		비고
	unit : kN	unit : %	
RC1-01.dta	0.4-3.6 (3.2)	1-10 (9)	pre-test, 1000 cycle, 0.5→1Hz
RC1-02.dta	0.72-7.2 (6.48)	2-20 (18)	holding time 20 sec, 2Hz
RC1-03.dta	1.8-18 (16.2)	5-50 (45)	holding time 300 sec, 2Hz
RC1-1.dta	14.4-21.6 (7.2)	40-60 (20)	holding time 180 sec, 2Hz
RC1-2.dta	14.4-28.8 (14.4)	40-80 (40)	holding time 180 sec, 2Hz
RC1-3.dta	14.4-36.0 (21.6)	40-100 (60)	holding time 180 sec, 2Hz
RC1-4.dta	14.4-21.6 (7.2)	40-60 (20)	
RC1-5.dta	0.72-7.2 (6.48)	2-20 (18)	
RC1-6.dta			failure test

Table 2-3 Test conditions : Reinforced concrete 2nd specimen (RC2)

Test ID	Applied Load : from-to (range)		비고
	unit : kN	unit : %	
RC2-0A.dta	1.44-14.4 (12.96)	4-40 (36)	pre-test, trapezoidal load, 5cycle
RC2-0B.dta			pre-test, sine load, 1,000 cycle
RC2-0C.dta			pre-test, trapezoidal load, 5cycle
RC2-1B.dta	14.4-21.6 (7.2)	40-60 (20)	sine load, 1,000 cycle
RC2-2B.dta	14.4-28.8 (14.4)	40-80 (40)	sine load, 1,000 cycle
RC2-3B.dta	14.4-36.0 (21.6)	40-100 (60)	sine load, 1,000 cycle
RC2-4A.dta	14.4-28.8 (14.4)	40-80 (40)	trapezoidal load, 5cycle
RC2-4A1.dta			trapezoidal load, 5cycle, retest
RC2-5A.dta	14.4-21.6 (7.2)	40-60 (20)	trapezoidal load, 5cycle
RC2-5A1.dta			trapezoidal load, 5cycle, retest
RC2-FAIL.dta			failure test

Table 2-4 Test conditions : Reinforced concrete 3rd specimen (RC3)

Test ID	Applied Load : from-to (range)		비고
	unit : kN	unit : %	
RC3-0A.dta	1.44-14.4 (12.96)	4-40 (36)	pre-test, trapezoidal load, 5cycle
RC3-0B.dta			pre-test, sine load, 1,000 cycle
RC3-0C.dta			pre-test, trapezoidal load, 5cycle
RC3-0C1.dta			retest
RC3-1B.dta	14.4-21.6 (7.2)	40-60 (20)	sine load, 1,000 cycle, 시험 중반 Ch. 4&5 부근 균열 성장한 듯
RC3-2B.dta	14.4-28.8 (14.4)	40-80 (40)	sine load, 1,000 cycle
RC3-3B.dta	14.4-36.0 (21.6)	40-100 (60)	sine load, 1,000 cycle, specimen failed during the test (Ch. 1&2)

마. 실험결과

1차년도에는 상기에 기술한 바와 같이 3개의 시험편을 대상으로 동일 시험조건에 대하여 음향방출 신호 발생특성을 얻기 위한 실험을 수행하였다. 각 시험편별로 예비하중을 부가한 후 낮은 하중, 중간 하중, 높은 하중 범위의 하중을 1,000회 반복해서 부가하는 본 실험을 수행하였으며 마지막으로 파괴 실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 각 실험별 데이터는 다음과 같다.

(1) 첫 번째 시험편 : RC1

첫 번째 시험편인 RC1의 본 실험 및 파괴 실험시 R15 센서에서 취득한 음향방출 신호 발생양상을 Fig. 2-14~17에 나타내었다. 각 그림의 맨 윗줄은 채널별 누적 hit 수와 채널별 peak amplitude를 나타낸 것이고 그 아랫줄들은 각 채널별 hit 발생양상으로 Ch. 5가 보의 중앙부에 부착된 센서로부터, Ch. 4와 6은 보의 양 단부에 부착된 센서로부터 얻은 hit이다. 그림의 좌측 열은 발생한 하나의 hit별 peak amplitude를 하나의 점으로 표시하였고 우측 열은 시간대별 hit 발생율을 나타낸 것으로 하나의 bar는 20초(10 cycle)동안 발생한 hit 수의 개수를 나타낸다.

Fig. 2-14~16에서 나타나는 동일한 양상은 첫째 보의 양 단부에 부착된 센서보다 보 중앙부에서 월등히 많은 신호가 발생된다는 점과 둘째 하중 부가 초기의 높은 신호발생율이 반복하중이 부가되면서 감소한다는 점이다. 이러한 양상은 철근 콘크리트 보의 하중 단계별 거동 특성에 대한 고찰 및 신호원 분석에서 예측한 결

과와 일치하는 결과라 할 수 있다.

먼저 양 단부의 센서보다 보 중앙부에서 월등히 많은 신호가 발생한다는 것은 실험을 통해 부가한 사용하중의 범위에서는 보 중앙부에서 균열과 관련된 활동이 많다는 것을 의미한다. 철근 콘크리트 보의 거동 특성에 대해 살펴본 바로는 정상적인 사용하중 하에서 철근 콘크리트 보에는 보 중앙부에 휨 균열이 발생하게 되므로 이러한 현상은 예측과 일치하는 결과라 할 수 있으며 Fig. 2-17의 파괴 실험 결과에서는 실험 중 센서가 떨어진 Ch. 4번을 제외한 Ch. 5번과 Ch. 6번의 신호 발생 횟수가 유사하게 나타난다는 결과로부터 다시 한 번 이를 확인할 수 있다. 파괴 시점에서는 지점 부근에 사인장 균열이 발생하므로 지점부의 음향방출이 활발하게 된다. 하중 부가 초기의 높은 신호발생 빈도가 하중이 반복됨에 따라 감소하는 것은 음향방출 신호원 분석에 의한 예측과 일치하는 현상이라 할 수 있다. 즉 하중 부가 초기에는 휨 균열의 발달과 함께 마찰면의 거칠기가 심해 많은 신호가 발생하다가 휨 균열 성장이 멈추고 마찰면의 거칠기가 완화되면서 일정 수준의 신호발생 빈도를 유지하는 것으로 추정된다.

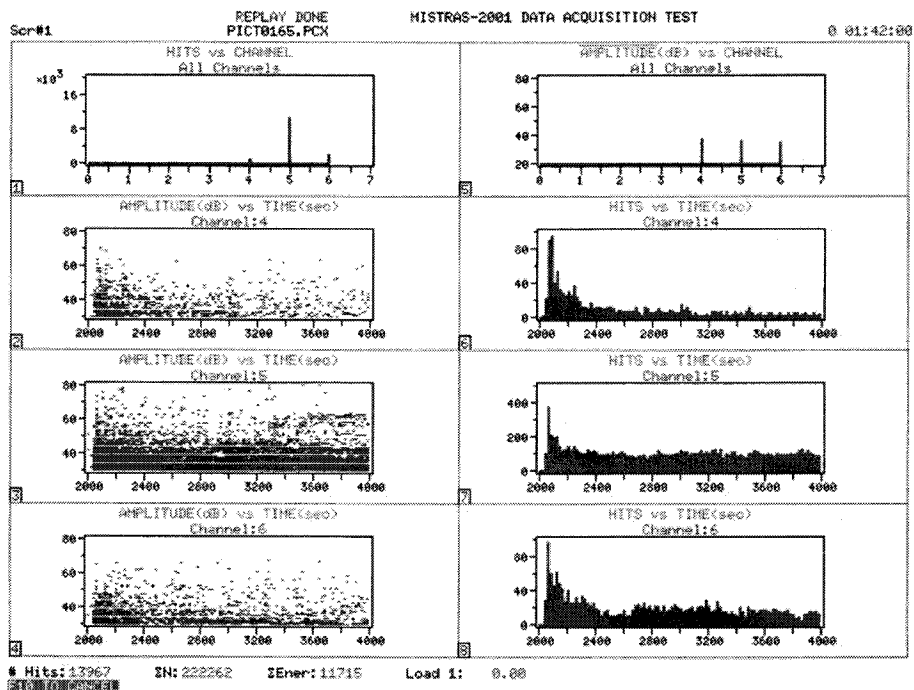


Fig. 2-14 AE hit occurrence pattern under low level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-1 test

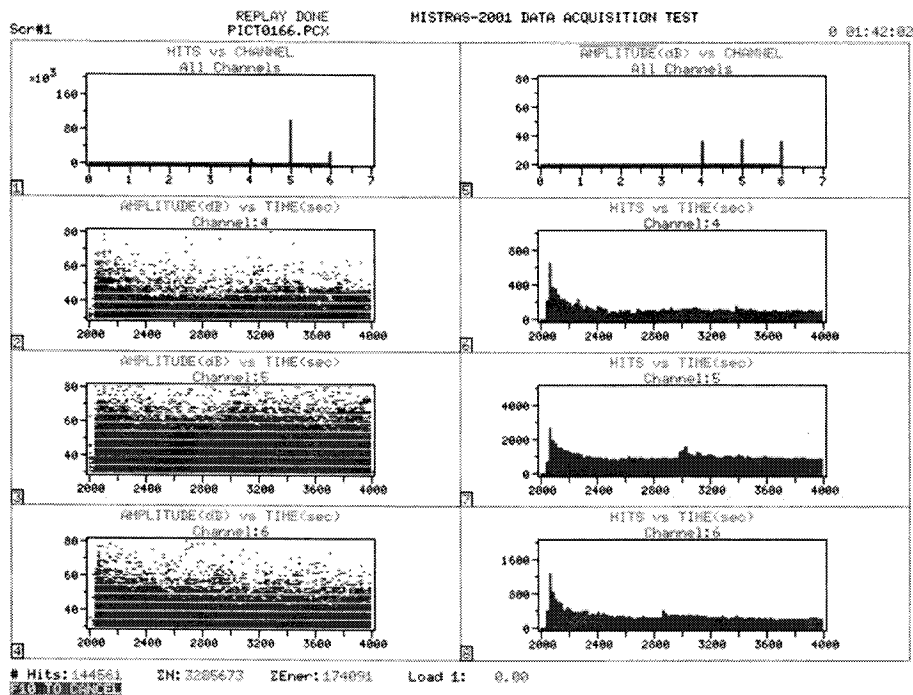


Fig. 2-15 AE hit occurrence pattern under middle level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-2 test

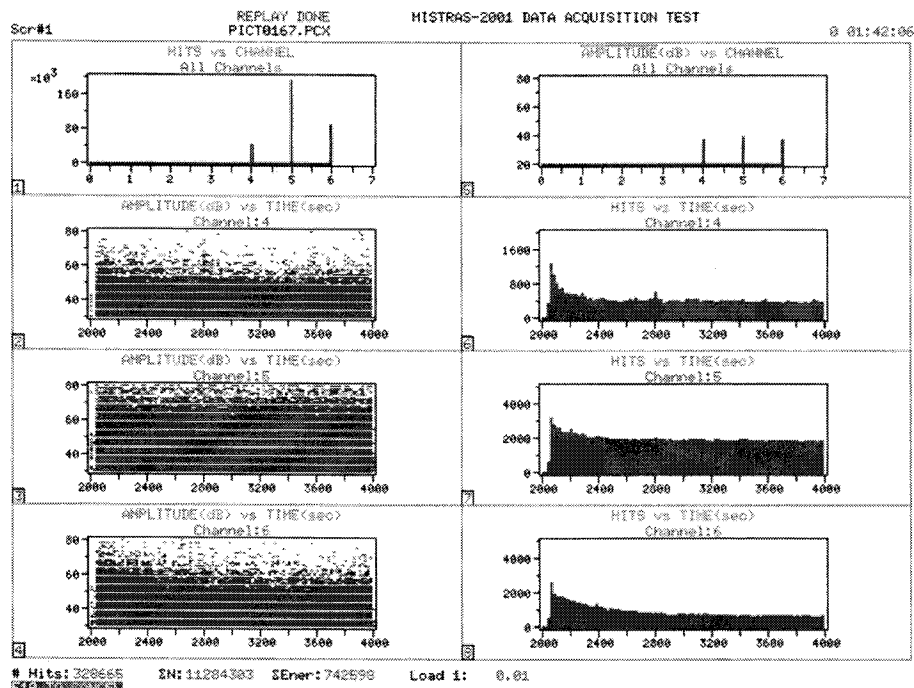


Fig. 2-16 AE hit occurrence pattern under high level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-3 test

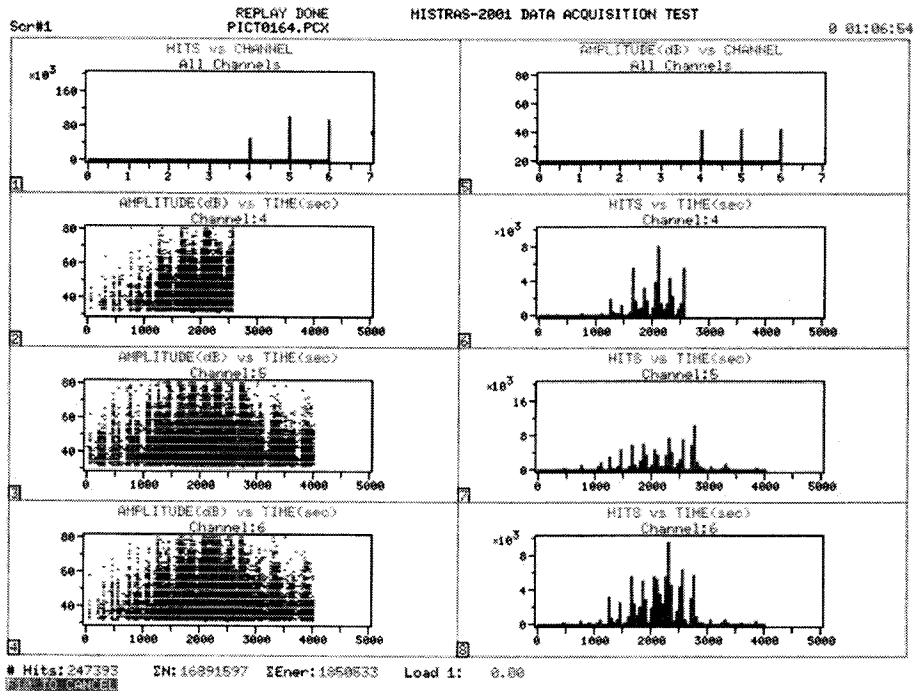


Fig. 2-17 AE hit occurrence pattern during failure test for RC1 specimen : RC1-6 test

Fig. 2-14~16의 우측 열 센서별 신호 발생 빈도를 살펴보면 하중의 증가에 따라 초기 신호 발생 빈도 뿐 아니라 안정화된 이후의 신호 발생 빈도 역시 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 하중 부가 초기의 신호 발생 빈도는 하중 범위의 증가에 따라 첫 10 cycle이 부가되는 동안 보 중앙부(Ch. 5)에서는 400, 3,000, 3,000회의 hit 수, 즉 40, 300, 300 (hit/cycle)이고 보 단부에서는 Ch. 4에서 10, 70, 130 (hit/cycle), Ch. 6에서 10, 70, 270 (hit/cycle)로 나타났다. 한편 음향방출 신호의 발생이 안정화된 하중 부가 후기의 발생 빈도는 보중앙부 Ch. 5에서 10, 100, 200 (hit/cycle)이고 보 단부에서는 Ch. 4에서 1, 10, 40 (hit/cycle), Ch. 6에서 2, 30, 80 (hit/cycle) 정도로 나타났다. 균열 발달이 이루어지는 하중 부가 초기 뿐 아니라 신호 패턴이 안정화되는 하중 부가 후기에서도 이처럼 하중의 증가에 따라 신호 발생 빈도가 증가하는 이유는 균열 열림의 크기가 하중의 크기에 따라 증가하기 때문으로 추정할 수 있다. 균열이 크게 열릴수록 마찰이 이루어지는 균열 면이 커지고 그에 따라 마찰에 의해 발생하는 음향발생 hit 수도 더욱 많아지는 것이다.

1회의 하중주기가 반복되는 동안의 음향방출 신호 발생 특성을 알아보기 위하여 첫 번째 시험편에서 취득한 데이터의 초기 3 cycle 동안의 신호와 후기 3 cycle 동

안의 신호를 확대하여 Fig. 2-18~23에 도시하였다.

Fig. 2-18~19는 낮은 하중범위에서 초기와 후기의 음향방출 신호 발생 빈도를 나타낸 것이다. 하중 범위가 작기 때문에 전체적으로 신호 발생율이 낮게 나타나지만 하중 부가 초기인 Fig. 2-18에서는 하중이 증가할 때 상대적으로 많은 신호가 나타나며 특히 하중이 peak에 이르는 시기에 가장 많은 신호가 발생되고 있다.

Fig. 2-20~23은 중간 및 높은 하중 범위에서의 초기와 후기의 신호 발생 빈도를 나타낸 것이다. 하중 부가 초기의 데이터인 Fig. 2-20와 Fig. 2-22에서는 하중 증가시와 감소시에 모두 많은 양의 신호가 나타나고 있으나 하중 부가 후기의 데이터인 Fig. 2-21과 Fig. 2-23에서는 하중 증가시의 발생 신호는 현저히 줄은 반면 하중 감소시의 신호는 처음보다 줄기는 했으나 여전히 많이 나타나고 있다. 특히 이 시기에 나타나는 음향방출은 하중 감소가 시작될 때 보다 오히려 하중이 충분히 감소되어 저점에 도달하는 시기에 오히려 활발한 신호 발생이 나타나고 있다. 이러한 현상은 하중 부가 후기, 즉 균열면의 마찰 거동이 안정화된 시기에 나타나는 신호는 균열 면간의 마찰신호임을 확인시켜 주는 증거로서 균열이 닫히는 순간 가장 많은 마찰이 발생한다는 사실과 일치한다. 따라서 균열이 닫히는 순간, 즉 반복 하중이 저점에 도달하는 순간 음향방출 신호의 발생이 중지되는 것이다.

이러한 현상은 정량적인 평가가 어려운 음향방출 기술의 특성을 고려할 때 균열의 활동성을 평가하는 새로운 방향을 제시한다는 점에서 의미를 갖는다. 즉, 동일한 상황에서 하중의 증가기와 감소기에 나타나는 신호의 발생 빈도를 상대비교함으로써 균열의 활동성 여부를 판단할 수 있음을 시사하는 것이다.

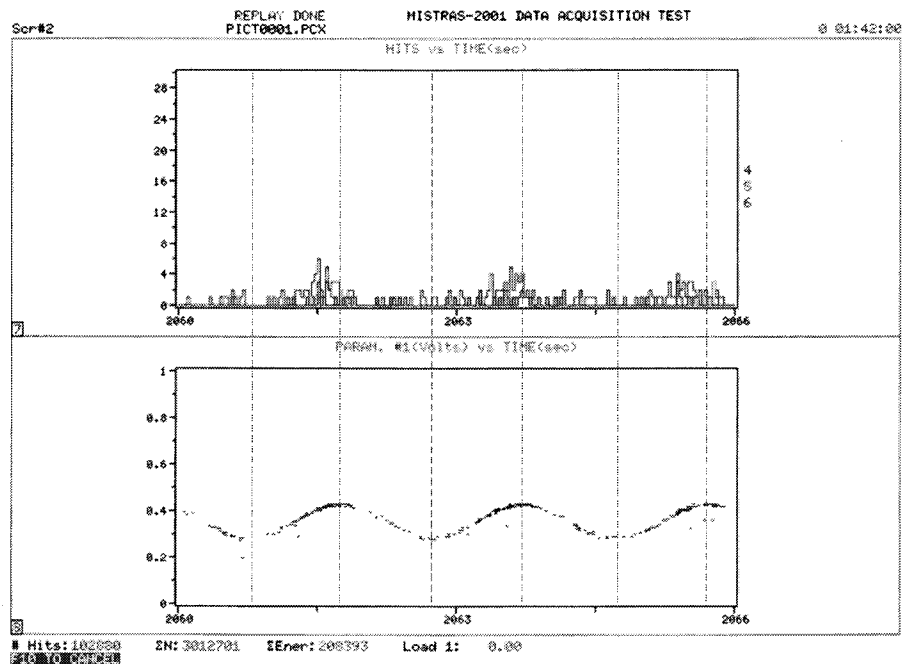


Fig. 2-18 AE hit occurrence at crack developing stage under low level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-1 test

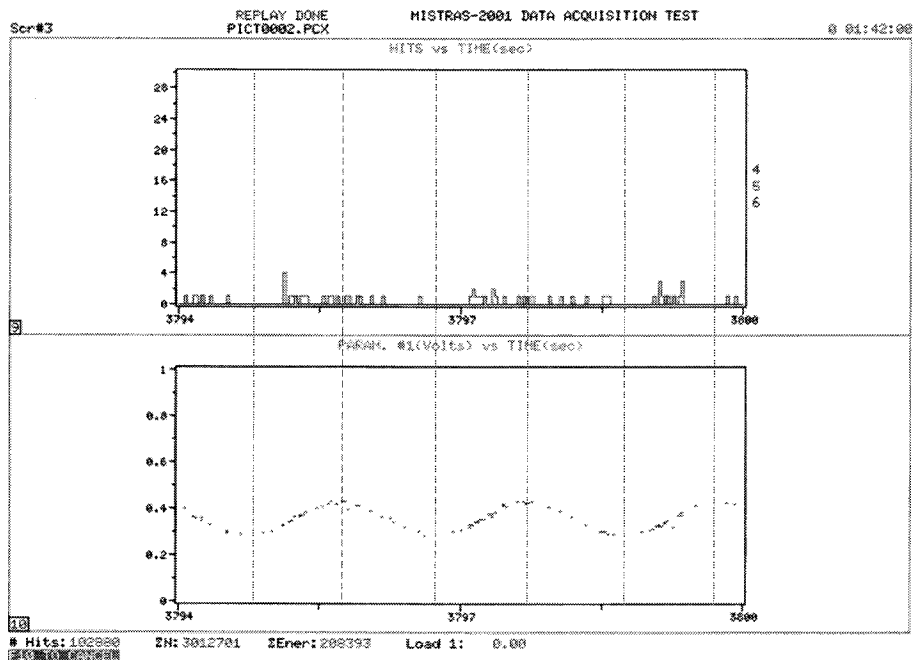


Fig. 2-19 AE hit occurrence at stabilized stage under low level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-1 test

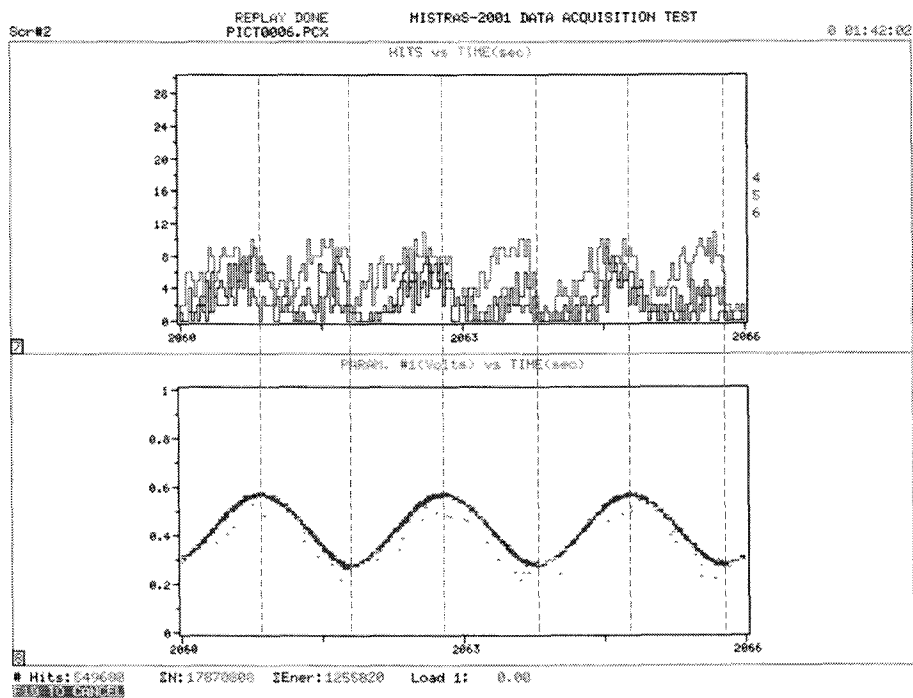


Fig. 2-20 AE hit occurrence at crack developing stage under middle level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-2 test

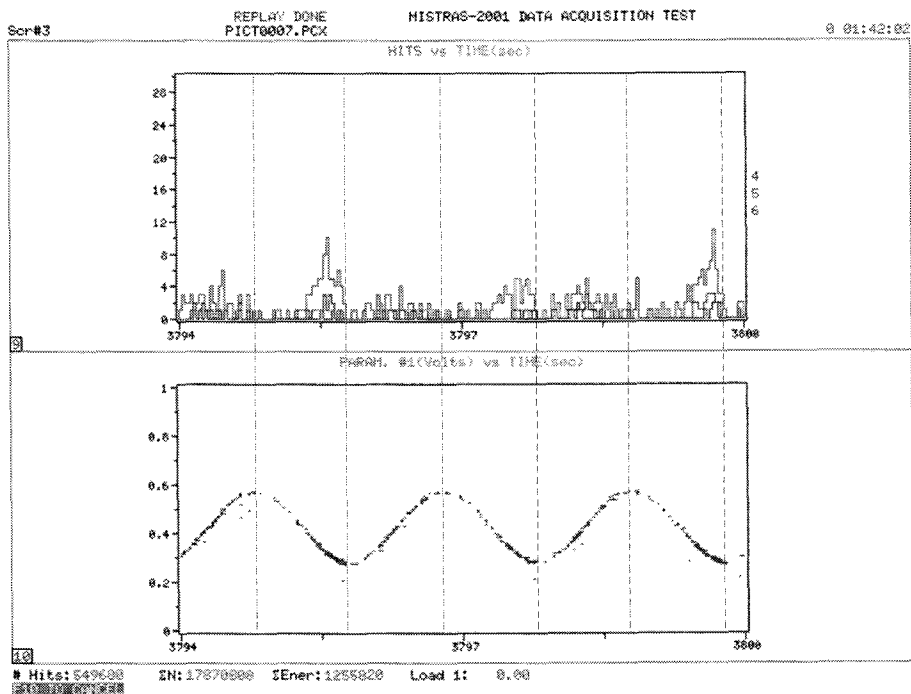


Fig. 2-21 AE hit occurrence at stabilized stage under middle level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-2 test

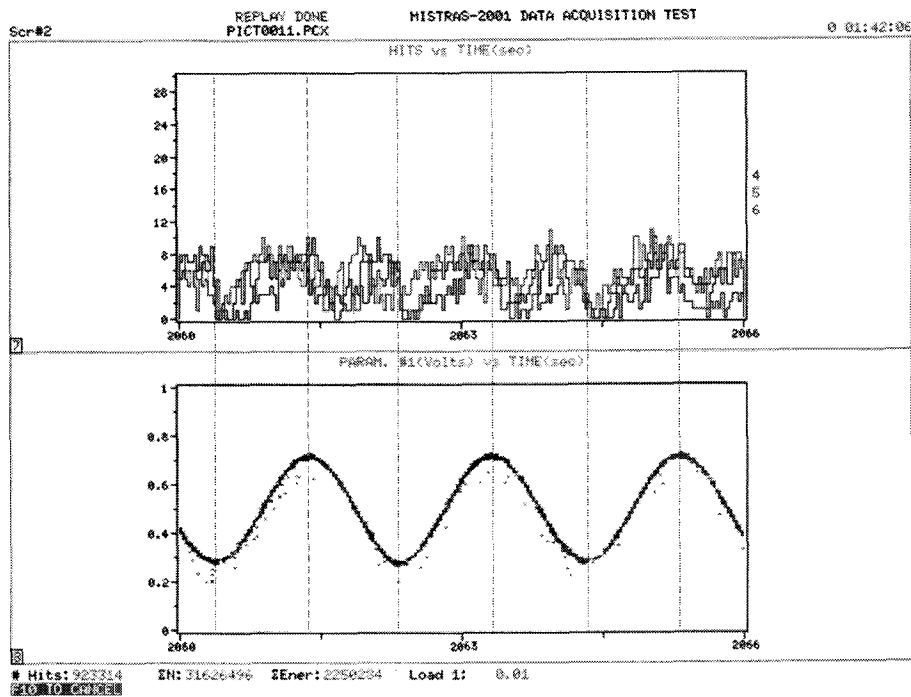


Fig. 2-22 AE hit occurrence at crack developing stage under high level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-3 test

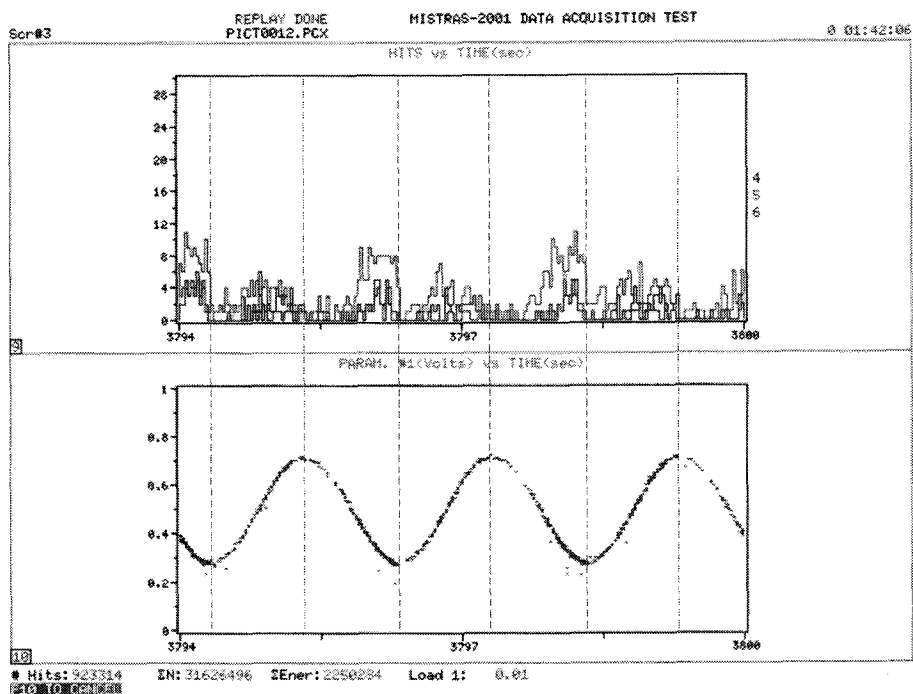


Fig. 2-23 AE hit occurrence at stabilized stage under high level cyclic loading for RC1 specimen : RC1-3 test

(2) 두 번째 시험편 : RC2

첫 번째 실험 결과로부터 콘크리트의 균열 활동성을 평가할 수 있는 몇 가지 결과를 얻었으며, 이러한 신호 패턴의 재현성을 확인하기 위하여 동일 조건의 시험편에 대한 실험을 추가로 수행하였다. 여기에서는 두 번째 시험편인 RC2에 대한 동일 조건 실험으로부터 얻어진 그래프를 정리하였다.

두 번째와 세 번째 시험편에서는 보의 양 단부에 노출된 철근에 양 끝에 각각 1개씩 2개의 R15 센서를 추가로 설치하였다. 이후에 그려진 모든 그래프에서 Ch. 1과 Ch. 5는 보의 양단 철근에 부착된 센서로부터 취득된 신호를 나타낸 것이며 Ch. 2와 Ch. 4는 보의 양 단부 콘크리트에 부착된 센서로부터 취득된 신호를, Ch. 3은 보 중앙부에 부착된 센서로부터 취득된 신호를 나타낸다. Fig. 2-24~28은 낮은 하중, 중간 하중, 높은 하중 범위에 대한 반복하중 부가실험 및 파괴 실험을 통하여 취득된 채널별 신호 발생 빈도를 나타낸 것이며 특히 Fig. 2-25는 낮은 하중 범위의 반복 하중을 부가하는 동안 취득된 신호를 이용한 신호원의 위치표정 결과를 나타낸 것이다. 전 실험에 걸쳐 첫 번째 시험편의 결과와 비교할 때 재현성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 하중 수준별로 행해진 3회의 실험에 대하여 하중증가기와 하중감소기의 신호 발생 빈도를 비교한 그래프를 Fig. 2-29~34에 나타내었다.

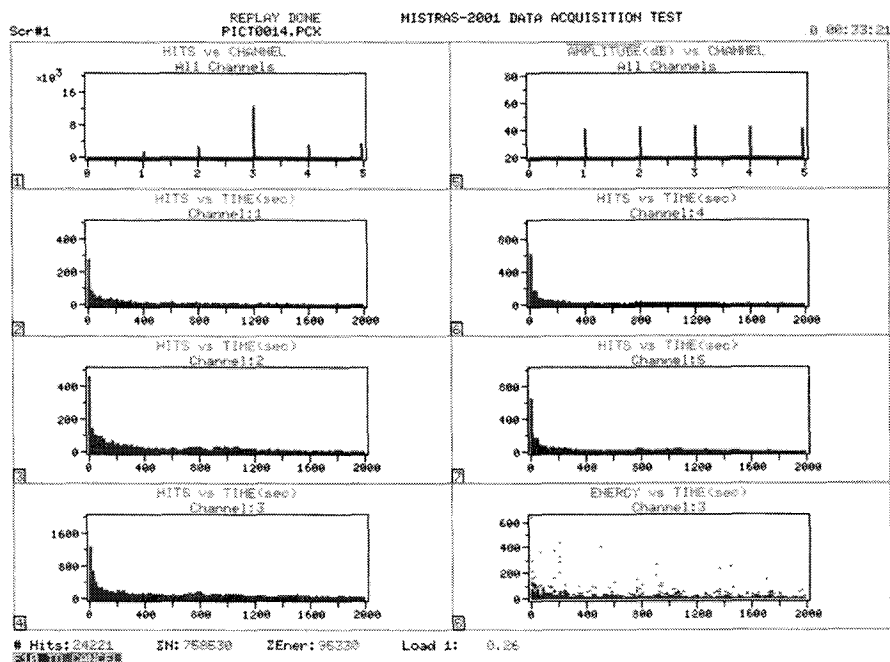


Fig. 2-24 AE hit occurrence pattern under low level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-1 test

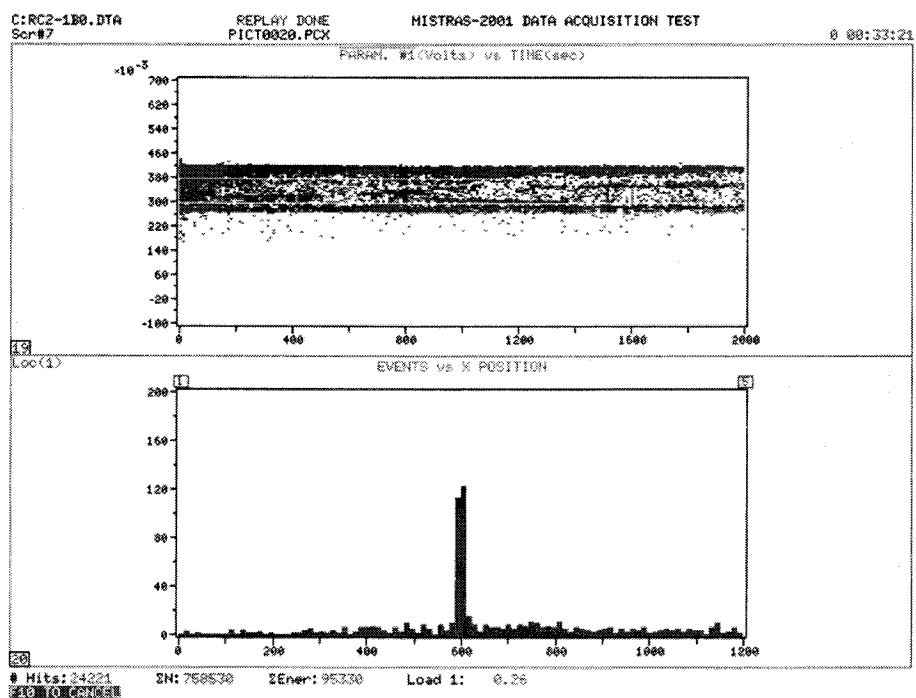


Fig. 2-25 AE source location during the low level cyclic loading test for RC2 specimen : RC2-1 test

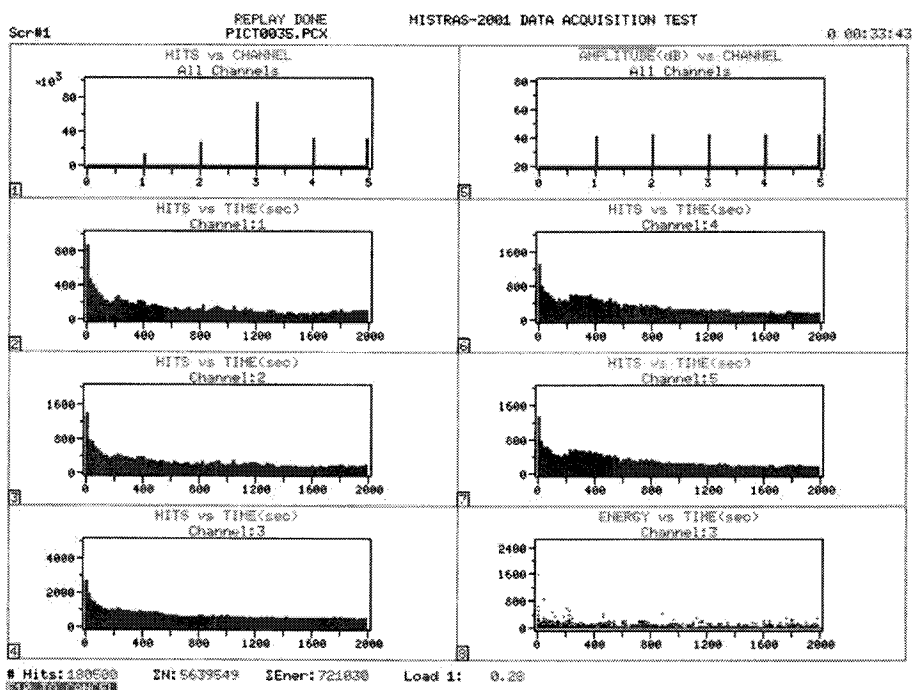


Fig. 2-26 AE hit occurrence pattern under middle level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-2 test

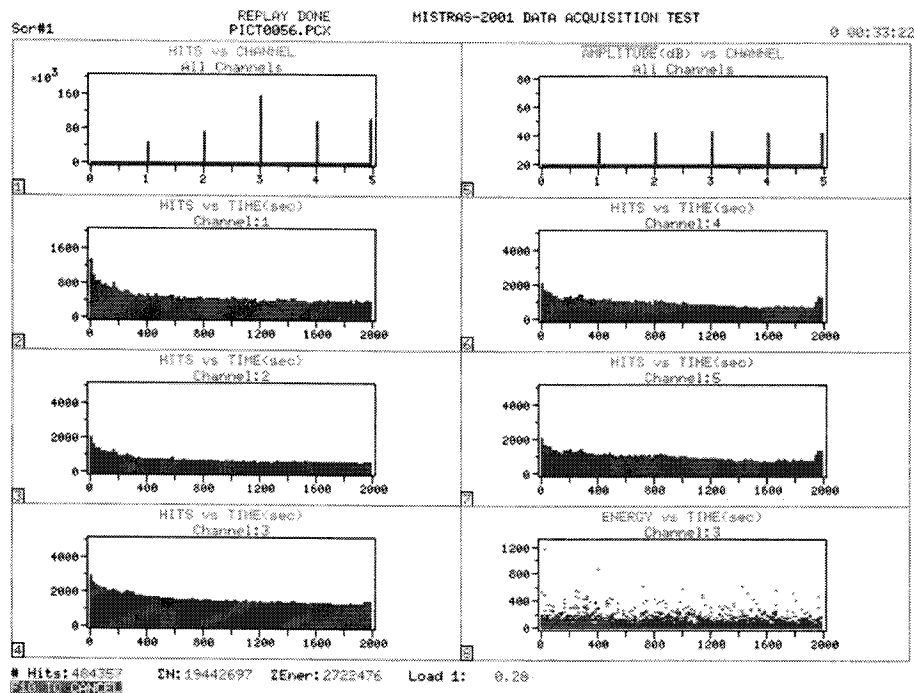


Fig. 2-27 AE hit occurrence pattern under high level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-3 test

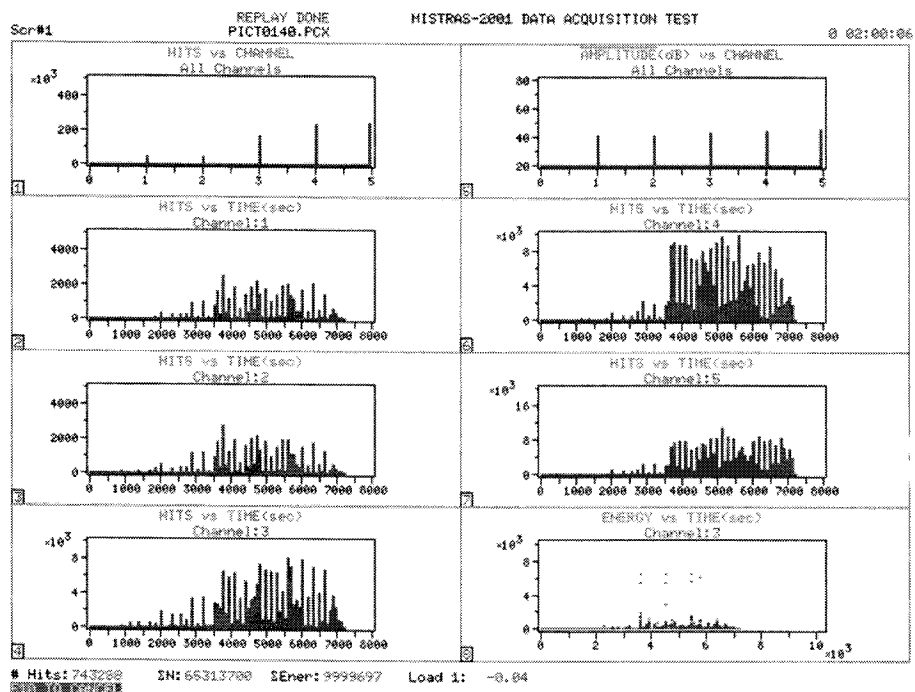


Fig. 2-28 AE hit occurrence pattern during failure test for RC2 specimen : RC2-fail test

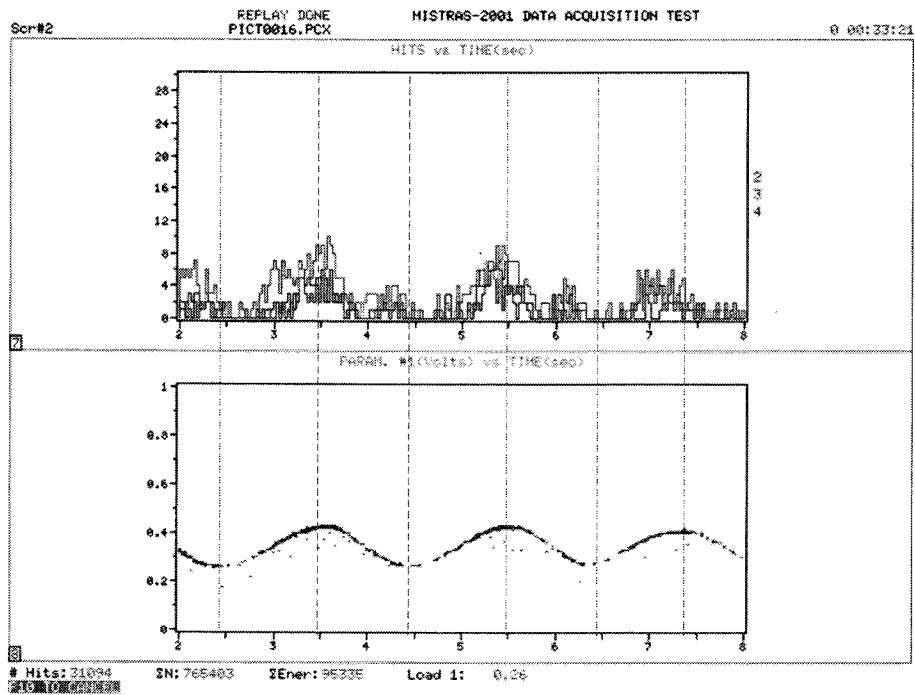


Fig. 2-29 AE hit occurrence at crack developing stage under low level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-1 test

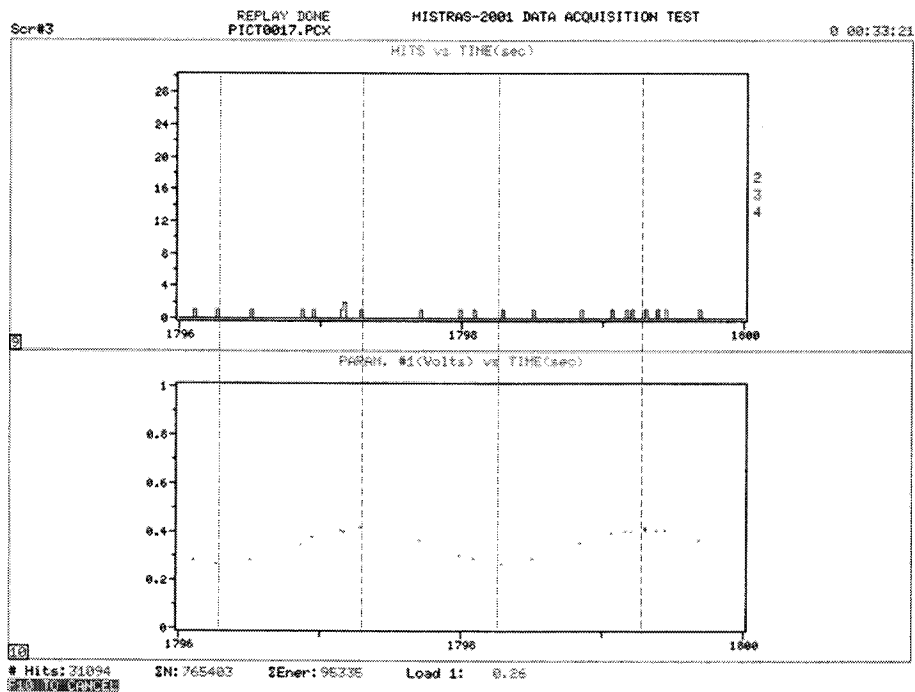


Fig. 2-30 AE hit occurrence at stabilized stage under low level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-1 test

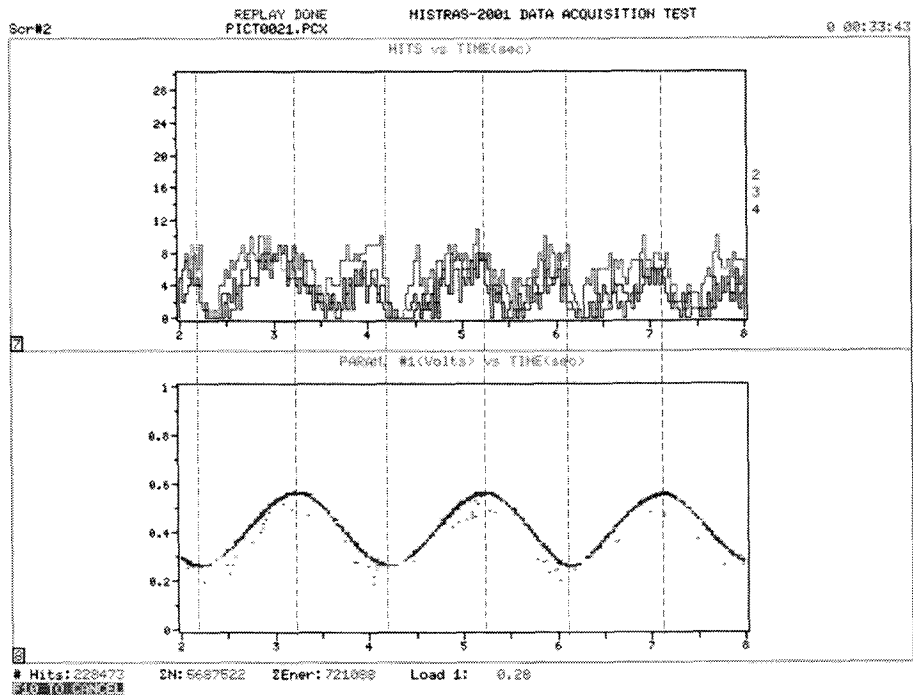


Fig. 2-31 AE hit occurrence at crack developing stage under middle level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-2 test

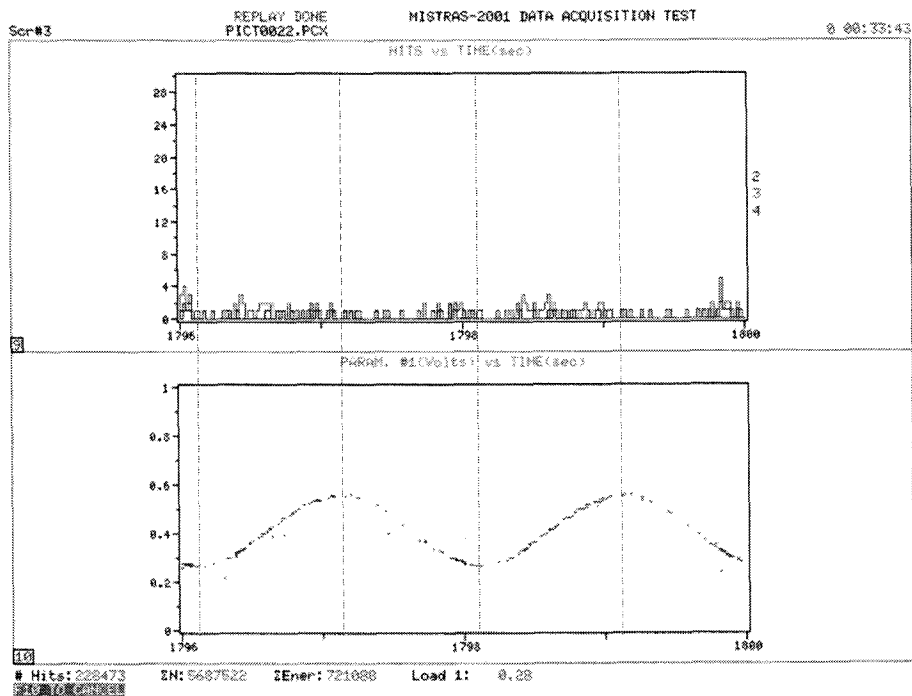


Fig. 2-32 AE hit occurrence at stabilized stage under middle level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-2 test

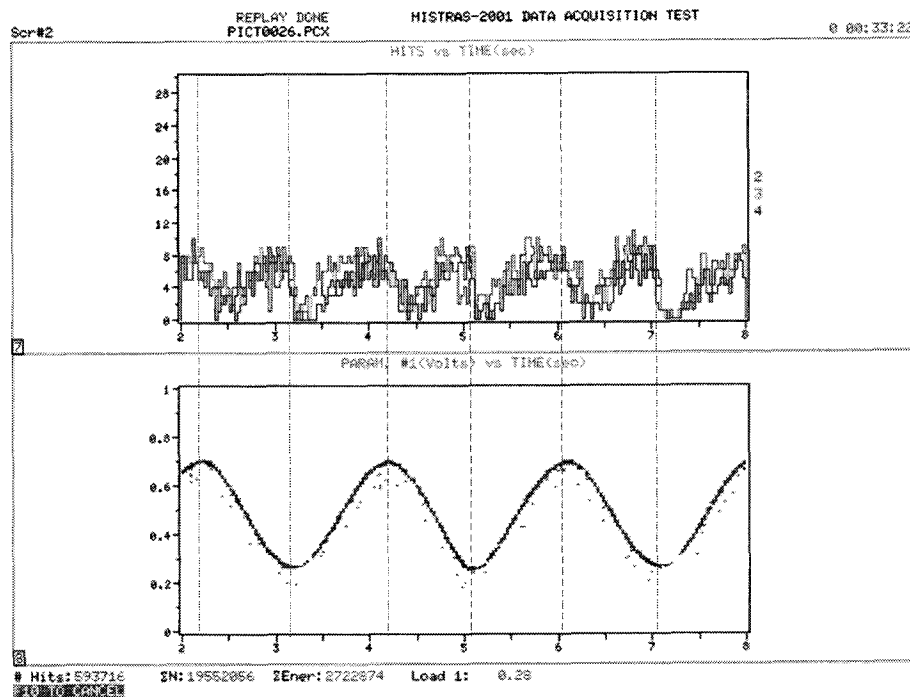


Fig. 2-33 AE hit occurrence at crack developing stage under high level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-3 test

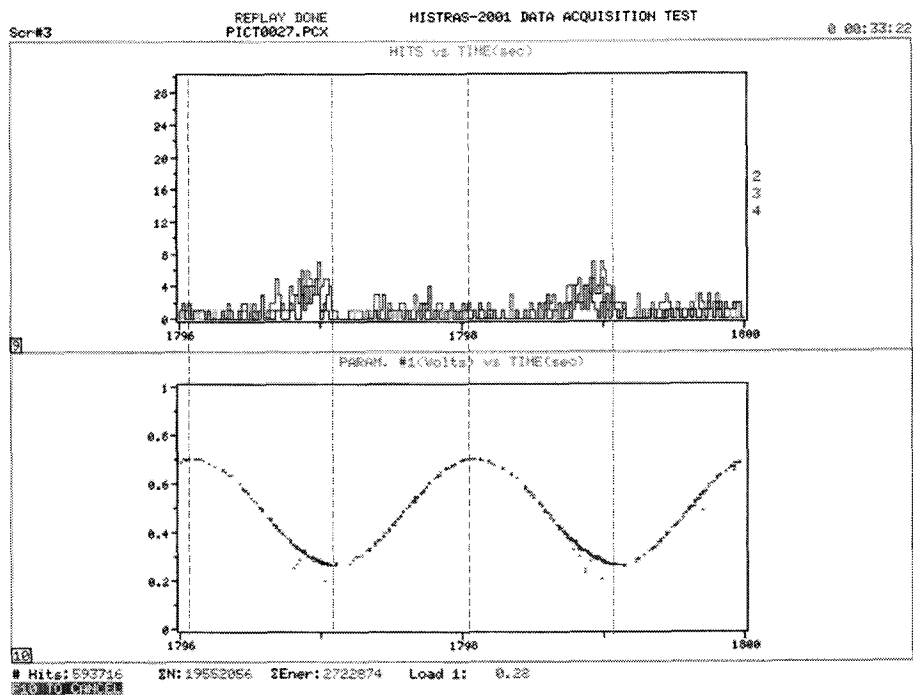


Fig. 2-34 AE hit occurrence at stabilized stage under high level cyclic loading for RC2 specimen : RC2-3 test

(3) 세 번째 시험편 : RC3

실험 결과의 재현성 확인을 위한 3개 시험편에 대한 동일조건 실험의 결과 중 세 번째 시험편에 대한 실험 결과를 Fig. 2-35~42에 나타내었다. 세 번째 시험편의 경우 전체적인 신호 발생의 패턴은 첫 번째 및 두 번째 시험편의 결과와 유사하였으나 높은 하중 범위의 반복하중을 부가하는 실험을 수행하는 도중 시험편의 파괴가 발생하였다. 세 번째 시험편에서 3단계 하중을 부가한 결과인 Fig. 2-37의 경우 Ch. 1과 2의 신호발생빈도가 2회에 걸쳐 증가되는 시기가 나타났으며 대략 600 cycle 이후 급격한 신호 증가가 나타나면서 시험편이 파괴되었다. 이러한 상황은 의도한 바는 아니었으나 반복하중에 의해 시험편이 자연스럽게 파괴되는 과정에서 발생하는 AE 신호를 관찰할 수 있었다는 점에서 매우 의미있는 결과이다. 사인장 균열에 의해 파손이 발생한 단부에 부착된 Ch. 2 센서에서는 파괴가 발생하기 이전인 약 150 cycle 부근에서부터 파괴의 징조로 AE 신호의 발생빈도가 높아지고 있으며 이후에도 이전 시험편의 동일한 하중단계에서의 신호와 확연히 구분되는 높은 신호발생빈도를 나타내고 있다. 특히 파괴 직전의 100 cycle이 반복되는 동안에는 Ch. 2와 함께 보 중앙부에 부착된 센서인 Ch. 3에서도 신호발생빈도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

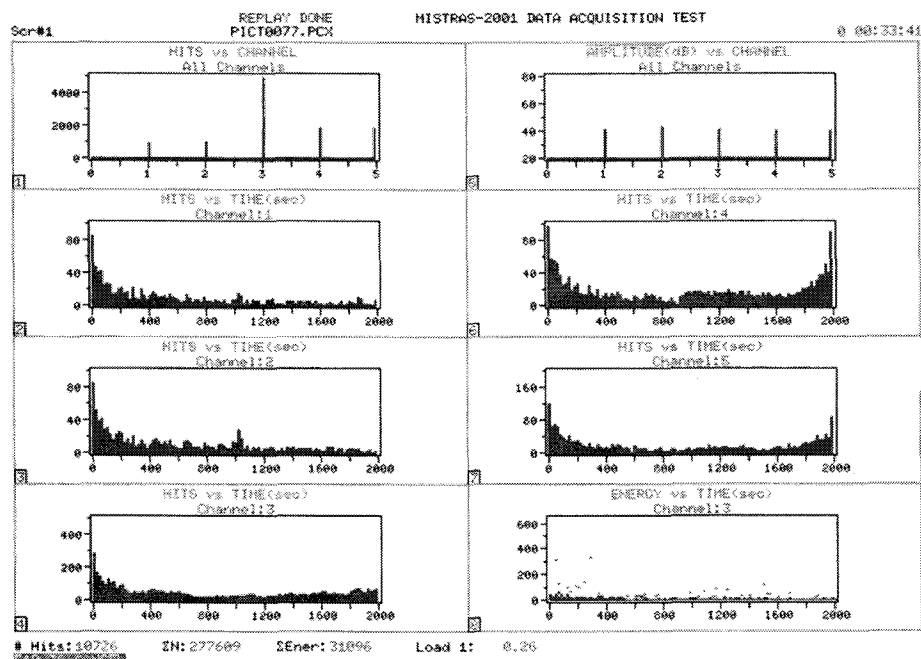


Fig. 2-35 AE hit occurrence pattern under low level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-1 test

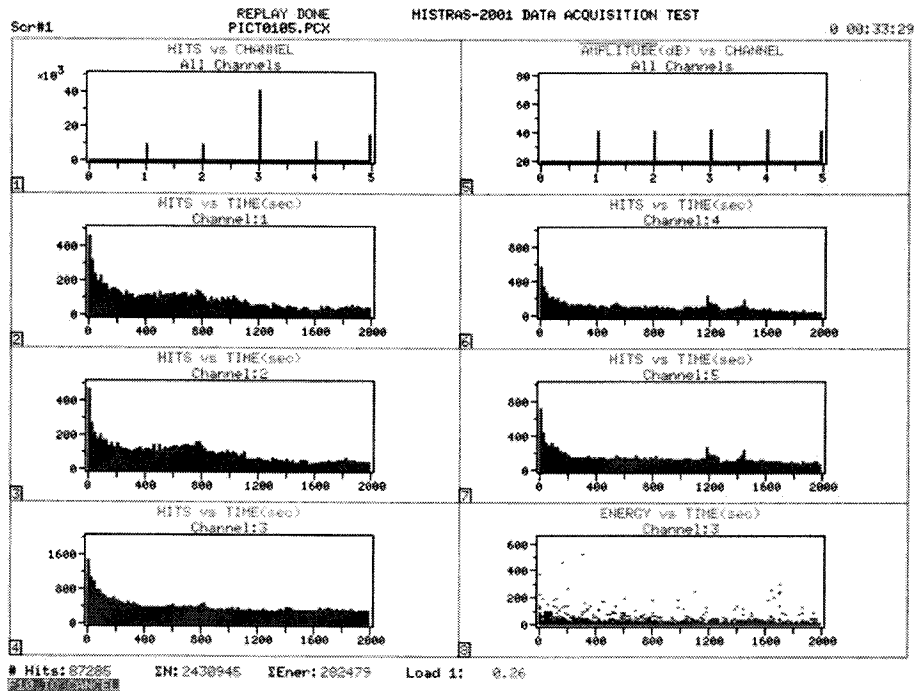


Fig. 2-36 AE hit occurrence pattern under middle level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-2 test

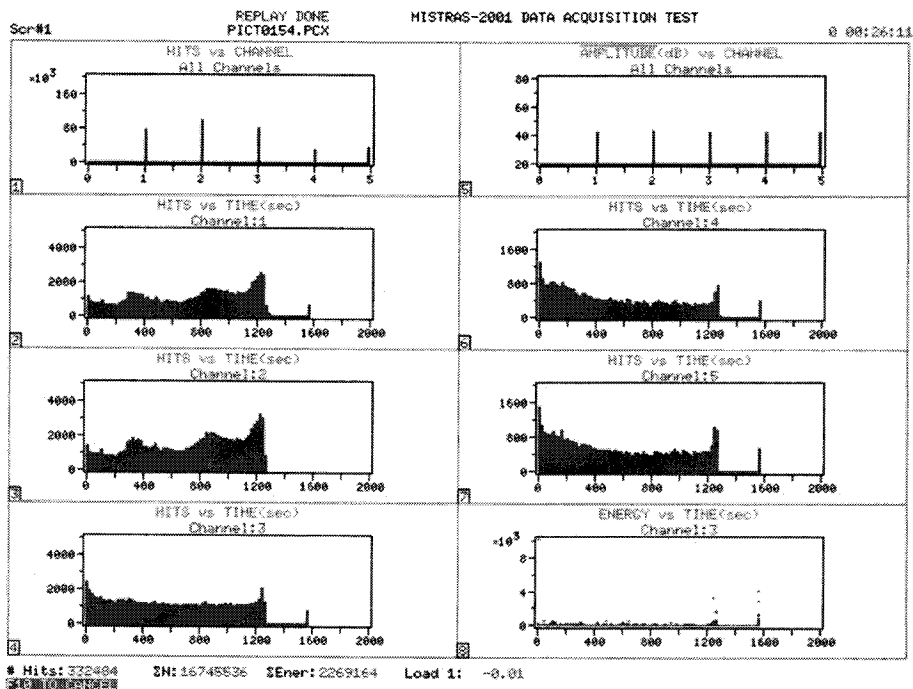


Fig. 2-37 AE hit occurrence pattern under high level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-3 test

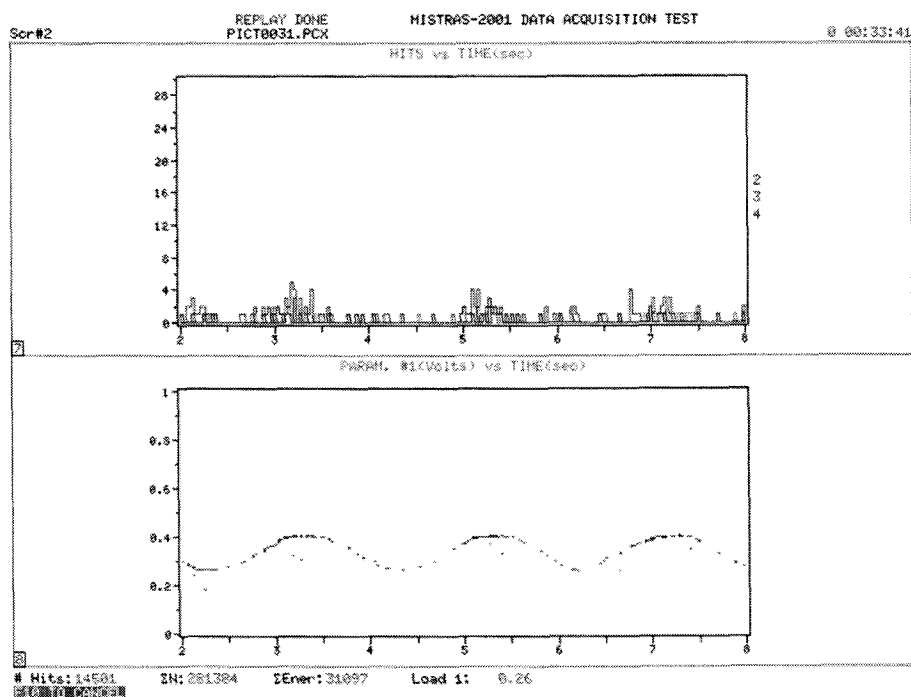


Fig. 2-38 AE hit occurrence at crack developing stage under low level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-1 test

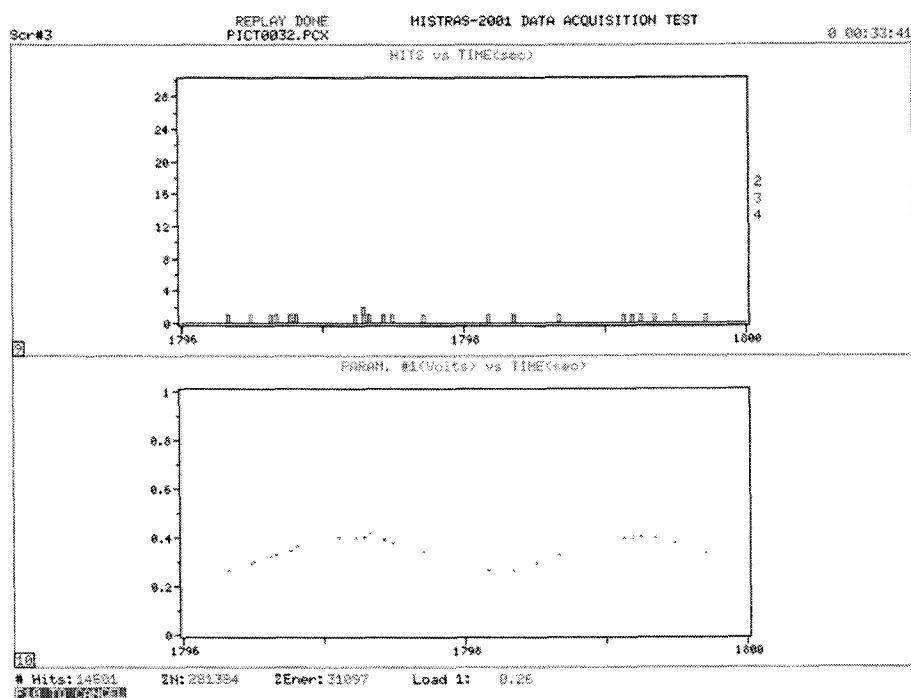


Fig. 2-39 AE hit occurrence at stabilized stage under low level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-1 test

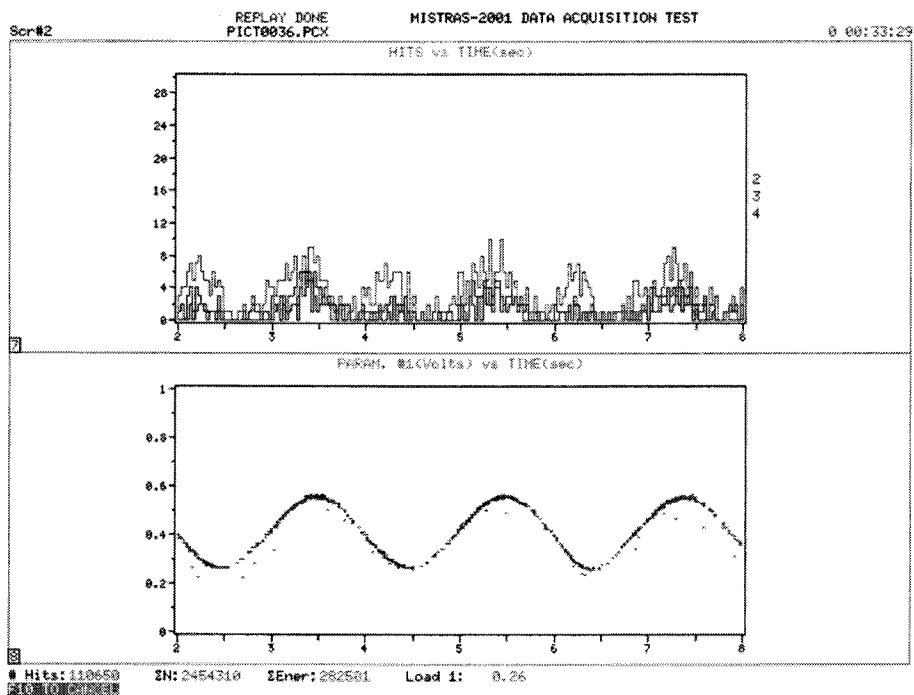


Fig. 2-40 AE hit occurrence at crack developing stage under middle level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-2 test

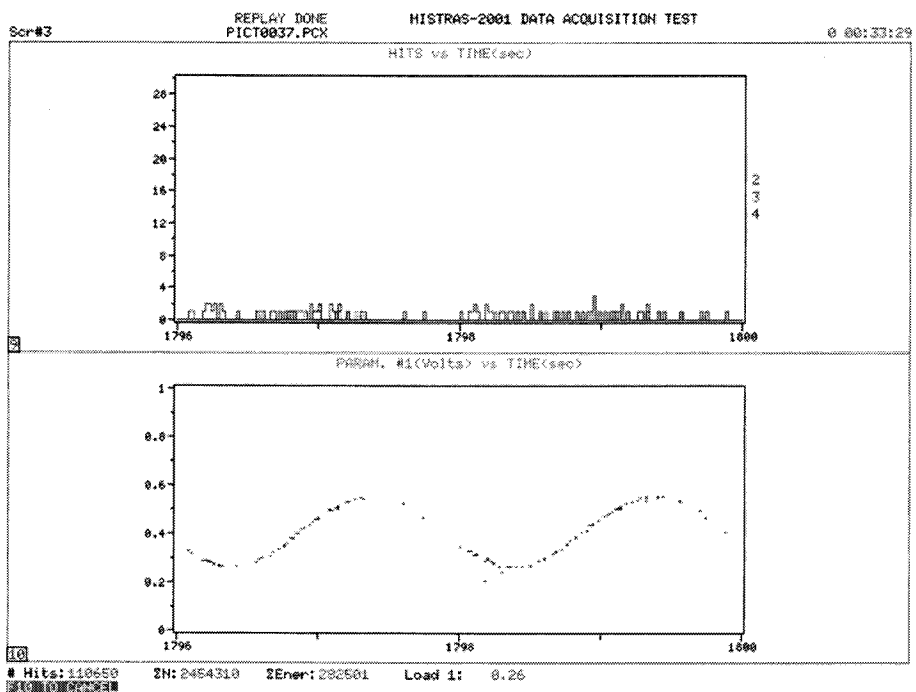


Fig. 2-41 AE hit occurrence at stabilized stage under middle level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-2 test

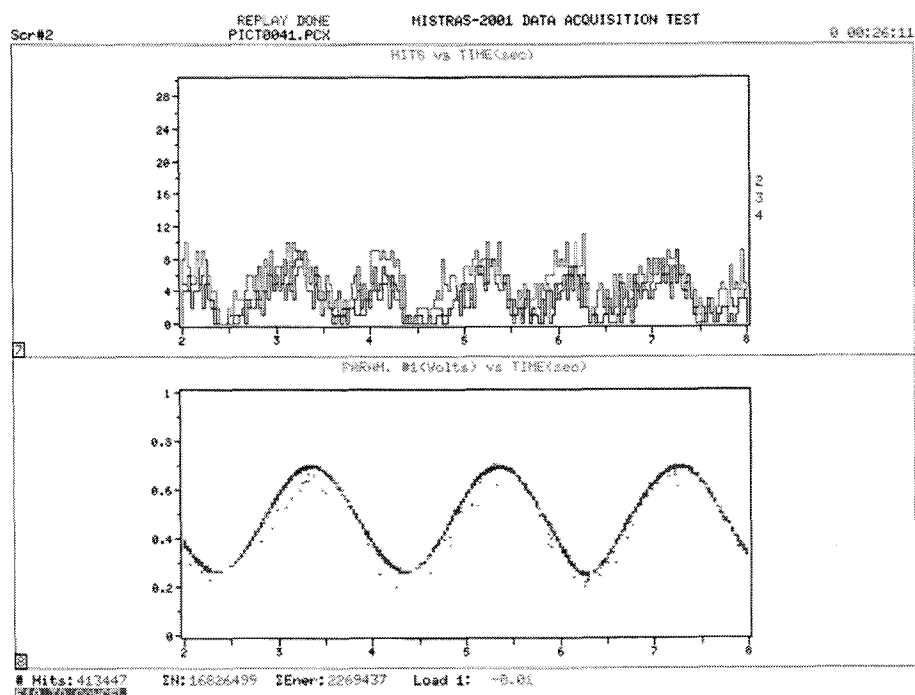


Fig. 2-42 AE hit occurrence at crack developing stage under high level cyclic loading for RC3 specimen : RC3-3 test

4. 철근 콘크리트 빔의 단계별 하중 재하시 음향방출 발생 거동

가. 서 론

본 연구에서는 철근 콘크리트 빔에서의 이상거동 판정을 위한 음향방출 신호 분석·평가 알고리즘 개발에 목표를 두고 연구를 진행하였으며, 콘크리트가 파괴에 이르기까지의 다양한 하중단계에서의 음향방출 발생 특성을 취득하기 위한 음향방출시험을 수행하였다. 본 실험 결과로부터 각종 신호분석과 AE parameter 분석을 통해 전형적인 정상신호와 이상신호를 구분하였으며, 이상신호를 판단하는데 근거가 되는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 향후 자체 개발 예정인 콘크리트용 음향방출 장비를 구현하는데 있어서, 중요한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

나. 시험편

실험을 위하여 전단보강재가 있는 두 종류 (Type B 와 Type C)의 철근 직사각형 콘크리트 보를 제작하였다. Fig. 2-43 과 Fig. 2-44는 제작된 두 가지 시험편의 치수와 재하위치 그리고 센서 부착위치를 나타낸 것이다. 4점 휨 시험을 수행하였는데, 시험 재원은 다음과 같다.

① 시험편 type B - 전단철근이 있는 4-철근 직사각형 콘크리트 빔

- 보의 치수 : Height×Width×Length = 225×125×2000 (mm)
- 철근 : 2D16 with stirrup (9D6)
- 콘크리트 강도 : $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$
- 철근 공칭 항복점 : $\sigma_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$
- 철근비 : $p = 0.01430$ ($p_{\min} = 0.00467 < p < P_{\max} = 0.02909$, O.K.)
- 중립축위치 : $a = \frac{A_s \sigma_y}{0.85 \sigma_{ck} b} = 47.31 \text{ mm}$, $c = a/0.85 = 55.66 \text{ mm}$
- 공칭극한 휨 모멘트 : Mn, Mu

$$Mn = A_s \sigma_y (d - a/2) = 198,259.23 \text{ kgf-cm}$$

$$Mu = 0.85 Mn = 168,520.35 \text{ kgf-cm} = 1.6852 \text{ ton-m}$$

· 극한하중 : P_n, P_u

$$P_u = \frac{4Mu}{(L-a)} = 6.1280 \text{ ton} \simeq 61.3 \text{ kN}$$

$$P_n = P_u/0.85 = 7.2094 \text{ ton} \simeq 72.1 \text{ kN}$$

② 시험편 type C - 전단철근이 있는 철근콘크리트 빔

· 보의 치수 : Height×Width×Length = 300×200×3400 (mm)

· 철근 : HD10@100 with stirrup

· 콘크리트 강도 : $\sigma_{ck} = 230 \text{ kgf/cm}^2$

· 철근 공칭 항복점 : $\sigma_y = 400 \text{ kgf/cm}^2$

· 철근비 : $p = 0.018695$ (O.K.)

· 공칭극한 휨 모멘트 : M_n, M_u

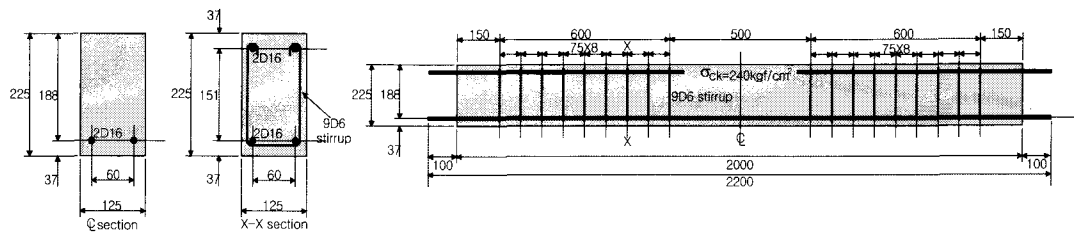
$$M_n = A_s \sigma_y (d-a/2) = 188404 \text{ kgf-cm}$$

$$M_u = 0.85M_n = 160,1434 \text{ kgf-cm}$$

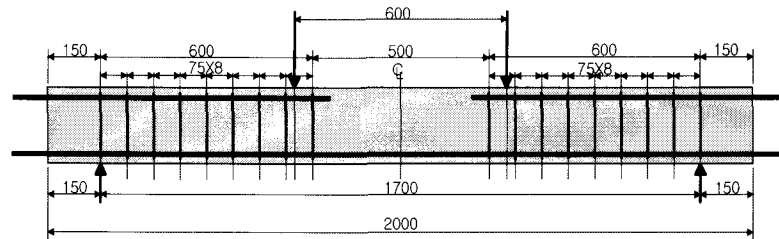
· 극한하중 : P_n, P_u

$$P_u = 2.28 \text{ ton}$$

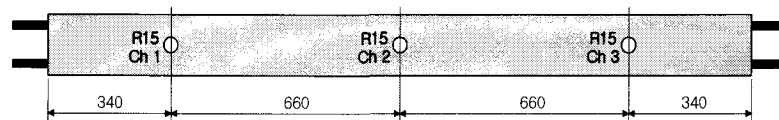
$$P_n = 1.938 \text{ ton}$$



(a) specification

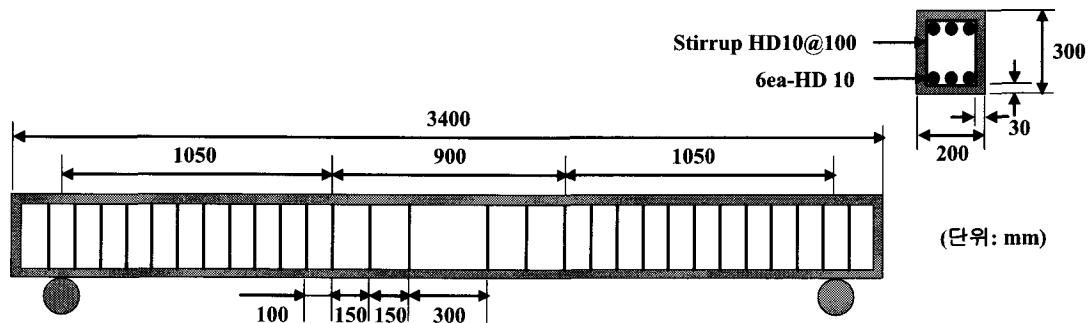


(b) loading point

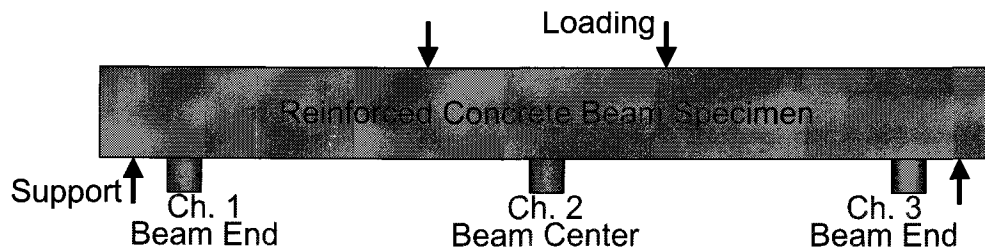


(c) sensor location

Fig. 2-43 Concrete specimen (type B)



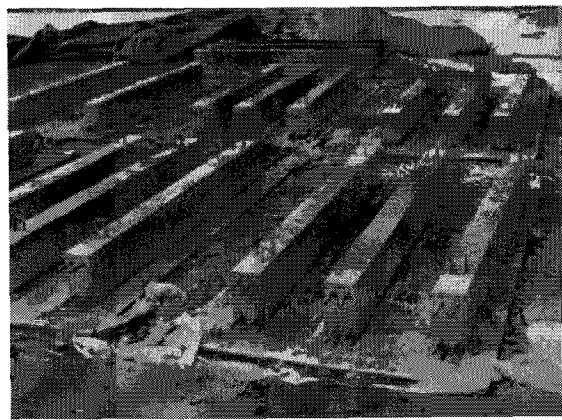
(a) specification



(b) sensor location

Fig. 2-44 Concrete specimen and sensor location (type C)

Fig. 2-45는 Type B와 Type C 시편을 나타낸 사진이다. (a)는 Type B 콘크리트의 시편 제작 직후의 사진이며, (b)는 Type C 콘크리트 시편의 음향방출 시험 전후의 상태를 나타낸 사진이다. Type B 콘크리트 시편을 이용하여, 첫 번째로 1000회의 동일한 sine 파장을 갖는 반복적인 주기 하중을 인가하면서 음향방출 신호를 취득하였고, 두 번째로 단계적인 주기 하중을 파괴시 까지 인가하면서 음향방출을 연계하여 실험하였다. 그리고 type C 콘크리트 시편을 이용하여, 단계적인 10-주기 하중을 인가하면서 음향방출 신호를 취득한 후에, 콘크리트 파괴시험을 수행하면서 음향방출 신호를 취득하였다.



(a) Type B concrete



(b) Type C concrete

Fig. 2-45 Photographs of the concrete specimens

다. 시험하중 및 시험방법

(1) 반복적인 주기하중을 인가한 음향방출 시험

본 실험을 수행하기에 앞서 반복재하실험의 하중반복횟수를 결정하기 위하여 예

비실험을 수행하였다. 예비실험은 설계극한하중(P_u)을 기준으로 1~10% 범위의 하중을 신호발생율이 일정한 수준을 유지할 때까지 반복적인 하중을 인가하였다. 1차년도 연차보고서에서 연구된, 콘크리트 파괴거동과 음향방출 거동의 관계에서 예측한 바와 같이 최초 하중이 부가되자 상대적으로 활발한 음향방출이 관찰되었으나 하중부가가 반복될수록 신호발생율은 감소하여 약 300 cycle의 하중반복 후 안정된 신호발생율을 유지하였다. 이를 근거로 단계별 재하실험의 하중반복횟수를 1,000회로 설정하였다.

본 실험은 시험편별로 3 단계의 하중에 대하여 반복재하실험을 수행한 후 파괴실험을 수행하는 순서로 진행하였다. 하중단계별 반복재하실험은 시험편의 설계극한하중을 기준으로 Table 2-5와 같은 하중단계를 적용하여 실험을 수행하였다.

Table 2-5 Loading scheme of whole experiment

loading step	applied load range (kN)		load vs. ultimate load (%)	Note
	Type A	Type B		
pre-test	0.36~3.6	0.6~6	1~10	To determine no. of loading cycles
step 1	14.4~21.6	24.0~36.0	40~60	Dead load considered, simulated small vehicles
step 2	14.4~28.8	24.0~48.0	40~80	Dead load considered, simulated medium vehicles
step 3	14.4~36.0	24.0~60.0	40~100	Dead load considered, simulated large vehicles
failure test	displacement control 0→6mm, 0.5mm step			Overload applied to failure

각 하중단계별로 1,000회의 반복재하가 이루어 졌는데, 반복하중의 처음과 마지막의 5 cycle은 Fig. 2-46의 (a)와 같이 최대하중이 가해진 상태에서 정지상태를 유지하였으며, 나머지는 Fig. 2-46의 (b)와 같이 0.5 Hz의 sine 파형을 부가하였다. 처음과 마지막의 5 cycle에 대하여 최대하중이 가해진 상태에서 정지상태를 유지한 이유는, 반복하중에 의한 미세균열 성장이 이루어지기 전과 후의 신호에 대하여 하중 증가시 발생한 신호와 하중 감소시 발생한 신호를 구분하기 위해서이다.

하중범위가 20%인 경우는 자동차와 같은 소형 차량을, 하중범위가 40%인 경우는 소형트럭과 같은 중형 차량을, 그리고, 하중범위가 60%인 경우는 대형 트럭과

같은 대형 차량을 모사한 것으로, 각각의 하중범위에서 AE 신호를 취득하였다. 표 1의 step 1, 2, 3은 cyclic loading test의 하중 범위를 보여주는 것이며, cyclic loading test를 수행한 다음, failure test를 수행하면서 AE 신호를 취득하여, 그 결과를 분석하였다.

파괴실험은 단계적으로 하중 범위를 높여주면서, 철근 콘크리트 빔을 파괴될 때까지 수행하였고, 이 과정에서의 AE 신호를 취득하였다. 변위제어 상태로 파괴가 발생할 때까지 0.5 mm 단위로 반복적으로 변위를 증가시키고, 최대 하중점에서 300 초의 휴지기를 두어 Fig. 2-46의 (c)와 같은 파형으로 하중을 가하였다. 음향방출 신호의 처리 및 저장을 위하여 Fig. 2-47에 나타낸 것과 같이 6 channel AE system (MISTRAS, PAC)이 사용되었으며, 파형 취득을 위하여 4 channel digital oscilloscope (LeCroy)가 사용되었다.

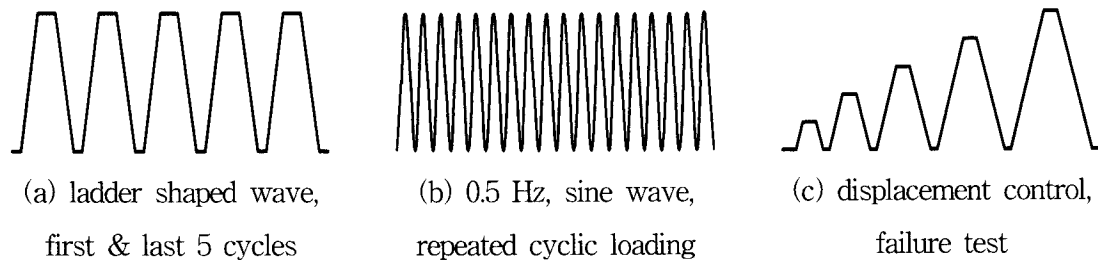


Fig. 2-46 Wave shapes of applied load

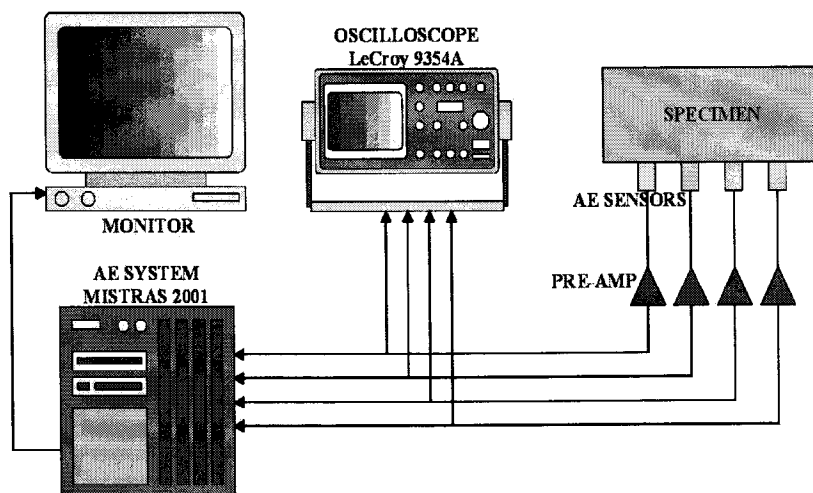


Fig. 2-47 AE system

음향방출센서는 공진주파수가 150 kHz 인 PAC사의 모델 R15 센서 3개를 사용하였는데, 센서의 부착위치는 기본적으로 보 중앙부와 양 단부에서 최대전단력이 발생하는 위치(지점으로부터 d 만큼 떨어진 위치)의 세 지점을 선정하였으나 경우에 따라 추가적인 센서를 부착하였다. 시험편 종류별로 각각 3개씩의 시험편에 대하여 실험을 수행하였는데, Type B 시험편의 경우 R15 (150 kHz resonant frequency) 센서를 3개 사용하였고, Type C의 경우에는 프리엠프가 내장되어 있는 R6I센서 3개를 부착하여 실험하였다. 3개를 사용하였는데, 빔의 정 중앙에 1개의 센서를 부착하고, 이를 중심으로 400 mm 간격으로 좌우에 각각 1개씩 부착하였다. 센서로부터 취득된 신호는 pre-amplifier에 의해 40 dB로 증폭되었다. 500 kN 용량의 hydraulic actuator (MTS)를 사용하여 하중을 인가하였다.

(2) 단계적인 10-주기하중을 인가한 음향방출 시험 및 최종 파괴시험

본 연구에서는 기본적으로 4-point bending test를 적용하였는데, 먼저 하중 제어를 통해 cyclic loading test를 수행한 후에, 변위 제어를 통해 파괴시 까지 하중을 인가하면서 음향방출 시험을 수행하였다. Fig. 2-48은 10-주기 하중의 load profile 과 콘크리트 파괴시험 중에 나타난 시간에 대한 하중 변화를 도시한 그림이다. Cyclic loading test에서 하중 인가 속도와 하중 제거 속도는 10 kN/min 이었고, Holding time은 3 min으로 하였다.

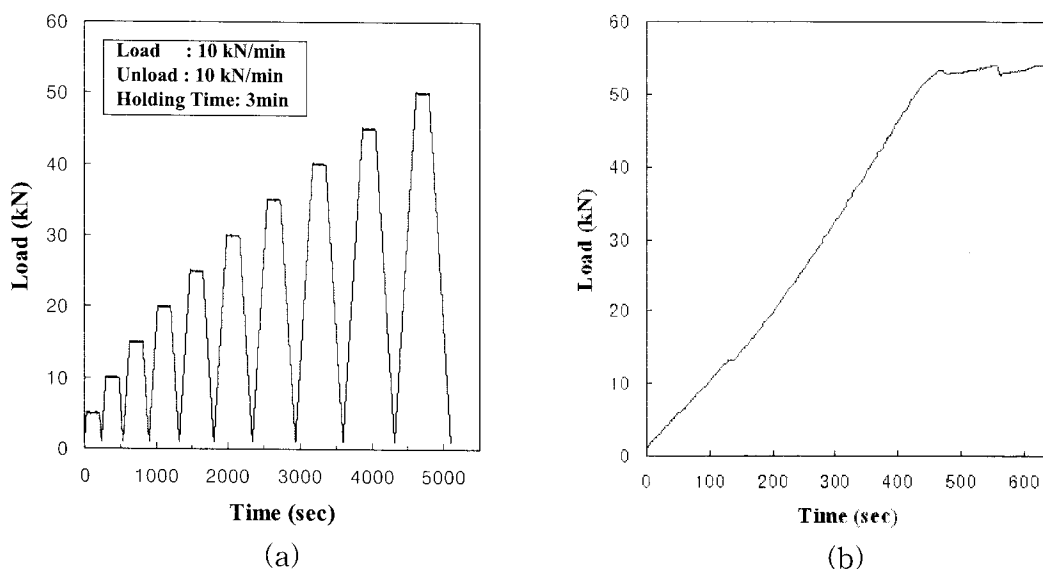
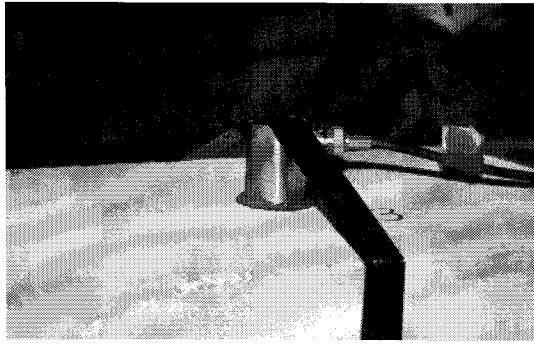
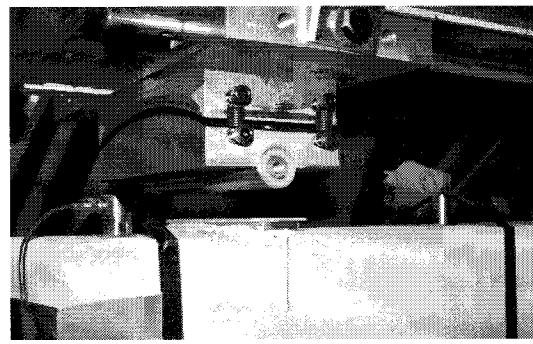


Fig. 2-48 Load profiles for (a) the cyclic load test and (b) failure test



(a) sensor on the concrete



(b) specially-designed jig

Fig. 2-49 Attached sensor and jig for 4-point bending test

Fig. 2-49는 콘크리트에 부착된 센서의 사진과 본 실험에 사용하기 위해 특별히 제작된 4-point bending test용 지그를 나타냈었다. 실험에는 프리엠프가 내장되어 있는 R6I 센서를 이용하였고, 3개의 센서를 콘크리트 표면에 잘 부착한 후, 프로그램 되어있는 MTS 컨트롤러에 의해 하중을 인가하면서, 동시에 음향방출신호를 취득하였다. Fig. 2-50은 MTS에 놓여있는 콘크리트 시편의 모습 (실험전) 과 실제로 실험을 진행하고 있는 사진을 나타내었다. 본 실험은 MTS와 음향방출 시스템이 동일한 시간에 작동해야 하므로, 다소 어려운 점이 있었고, 실험 중간에 콘크리트 균열을 촬영해야 하므로 다소 어려운 점이 있었다.



(a) before test



(b) during test

Fig. 2-50 Photographs of concrete specimen on MTS

라. 실험 결과

(1) 반복적인 주기하중을 인가한 음향방출 시험

Type B 콘크리트 시편에 대한 반복하중 부가실험을 통해 얻어진 음향방출 데이터를 Fig. 2-51~2-56에 나타내었다. Fig. 2-51~2-56은 각각 step 1~3까지의 하중 단계별로 1,000회의 반복하중이 가해지는 동안에 발생한 AE 신호의 hit수를 채널별로 나타낸 것이다. 각 그림에 도시한 데이터는 그 중 대략 1~900 회까지의 하중반복에서 취득한 데이터를 나타내고 있다. 각 그림은 2열로 배열되어 있는데, 하중부가 초기의 활발한 신호발생이 안정화된 300 cycle을 기준으로 좌측은 1~300 회까지의 하중반복에 대한 데이터를, 우측은 301~900 회까지의 하중반복에 대한 데이터를 나타내었다. 각각의 그래프는 x-축을 100등분하여 각 구간별로 AE 신호 발생 횟수를 합친 것으로, 각 그림의 좌측 그래프의 y-축은 3회, 우측 그래프의 y-축은 6회의 반복하중이 부가되는 동안에 발생한 hit 수를 누적하여 나타낸 것이다.

각각 3개의 하중단계별로 모든 경우에 있어서 부가된 반복하중은 시편에 처음으로 가해지는 하중이었으며 따라서 반복하중이 부가된 초기에는 부가된 하중의 크기에 부합하는 수준의 미세균열이 성장할 것을 예상하였고 하중이 반복되면서 적절한 수준의 균열성장이 완료되면 신호발생율은 일정한 상태를 유지할 것으로 예측하였다. 예상대로 모든 경우에 있어서 반복하중을 가한 초기에 활발한 음향방출이 이루어지다가 반복횟수가 300회를 지나면서 더 이상 신호발생빈도가 낮아지지 않으면서 1,000회의 하중이 반복될 때까지 일정한 신호발생빈도를 유지하며 안정화되는 모습을 보였다. 한편 6개의 시험편에 대하여 일관되게 나타나는 또 하나의 특성은 부가된 하중의 크기가 클수록 안정화된 상태에서의 신호발생빈도가 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

미세 균열의 성장이 이루어지는 하중부가 초기와 미세 균열 성장이 완결된 하중부가 후기의 AE 신호의 발생특성을 좀 더 상세히 살펴보기 위하여 6개의 시험편에 대하여 각각의 하중단계별로 하중부가 초기의 3 cycle과 후기의 3 cycle 동안에 취득한 AE hit를 Fig. 1-57~62에 도시하였다. 각각의 그림은 4개씩의 그래프를 포함하고 있는데 위에서부터 순서대로 단부-중앙부-단부에 부착된 센서로부터 취득된 신호이고 마지막 그래프는 하중을 나타낸 것이다. 여기에서 주목할 점은 하중부가 초기의 신호발생빈도가 안정화된 후기의 신호발생빈도보다 크다는 점 이외에도,

균열성장이 이루어지고 있는 하중부가 초기에는 1 cycle의 하중이 부가되는 과정에서 하중이 증가하는 동안의 하중발생빈도가 하중이 감소하는 동안의 하중발생빈도보다 크다는 점이다. 이러한 결과는 철근콘크리트 보의 파손단계와 음향방출 거동에서 균열신호와 마찰신호에 기인한 것이라 할 수 있다.

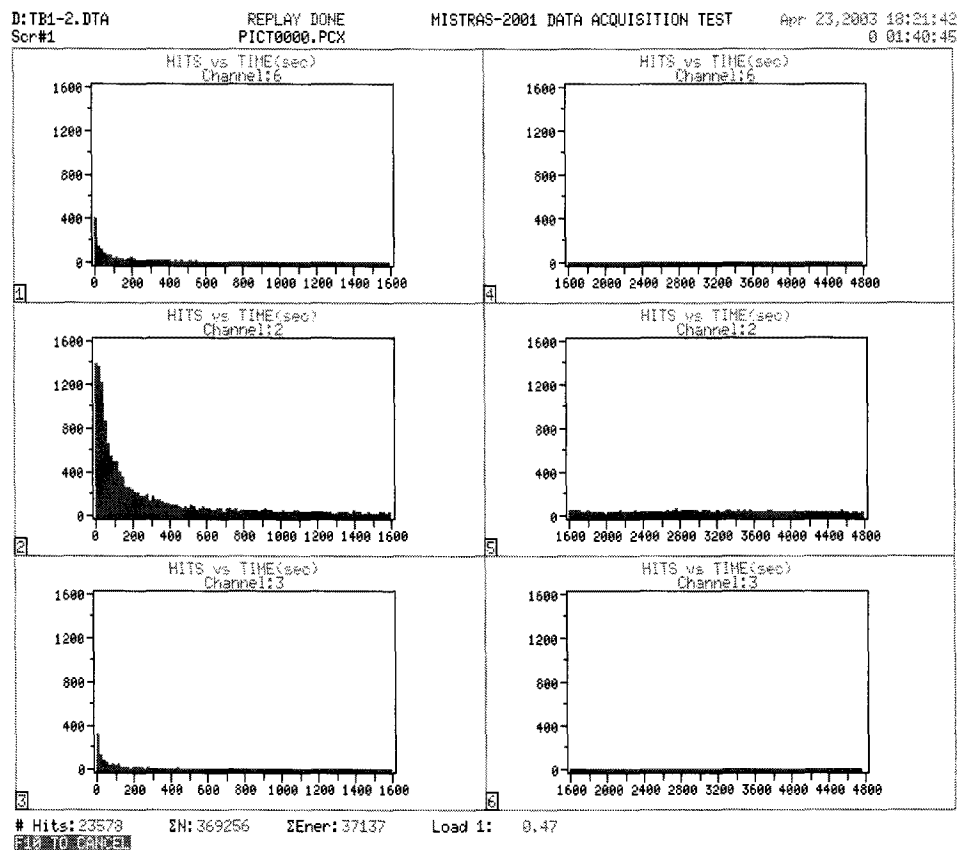


Fig. 2-51 AE data during step 1 cyclic loading, type B 1st specimen

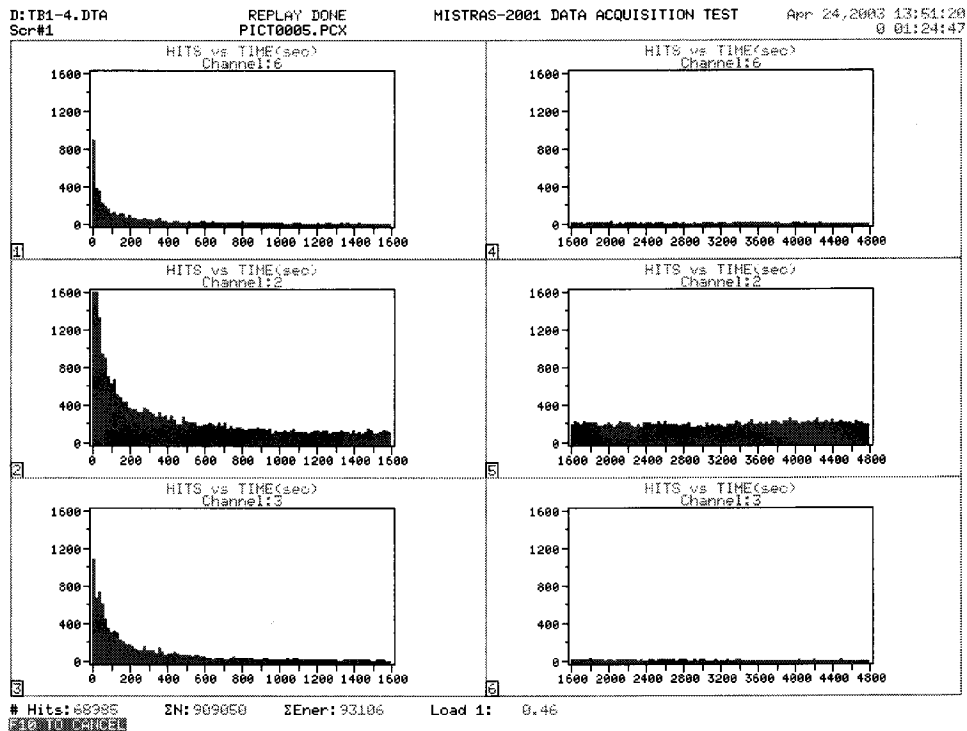


Fig. 2-52 AE data during step 2 cyclic loading, type B 1st specimen

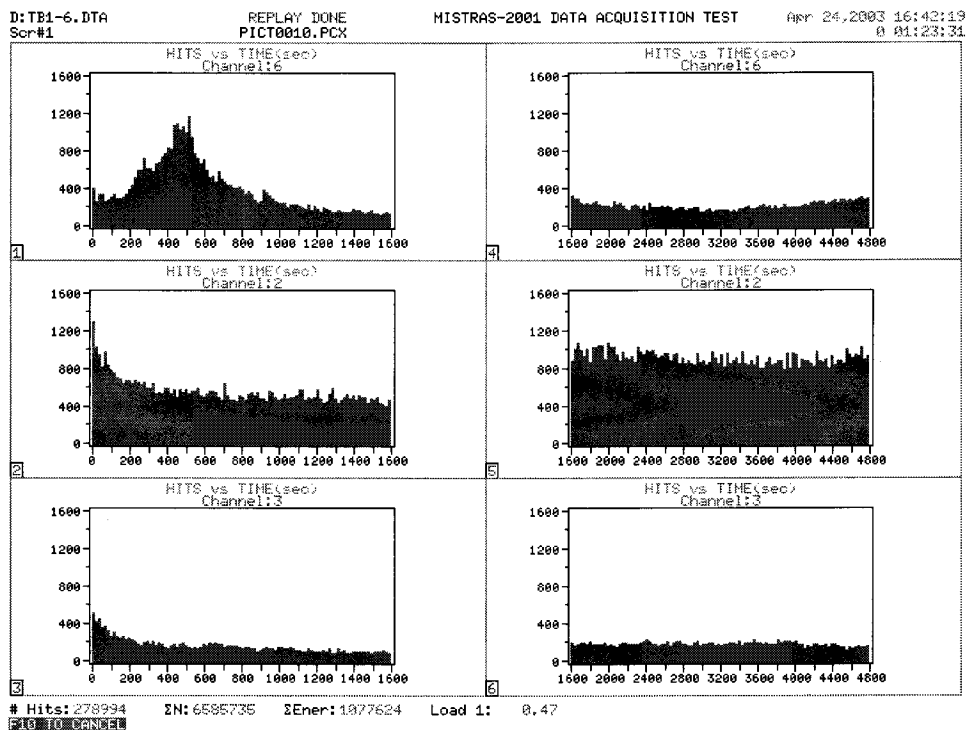


Fig. 2-53 AE data during step 3 cyclic loading, type B 1st specimen

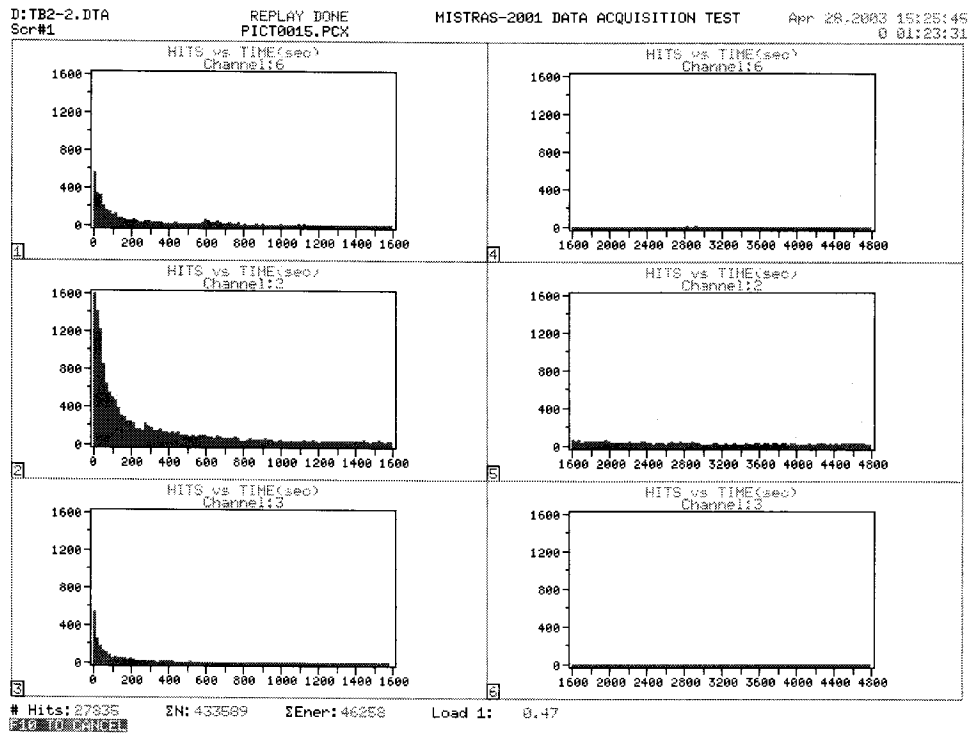


Fig. 2-54 AE data during step 1 cyclic loading, type B 2nd specimen

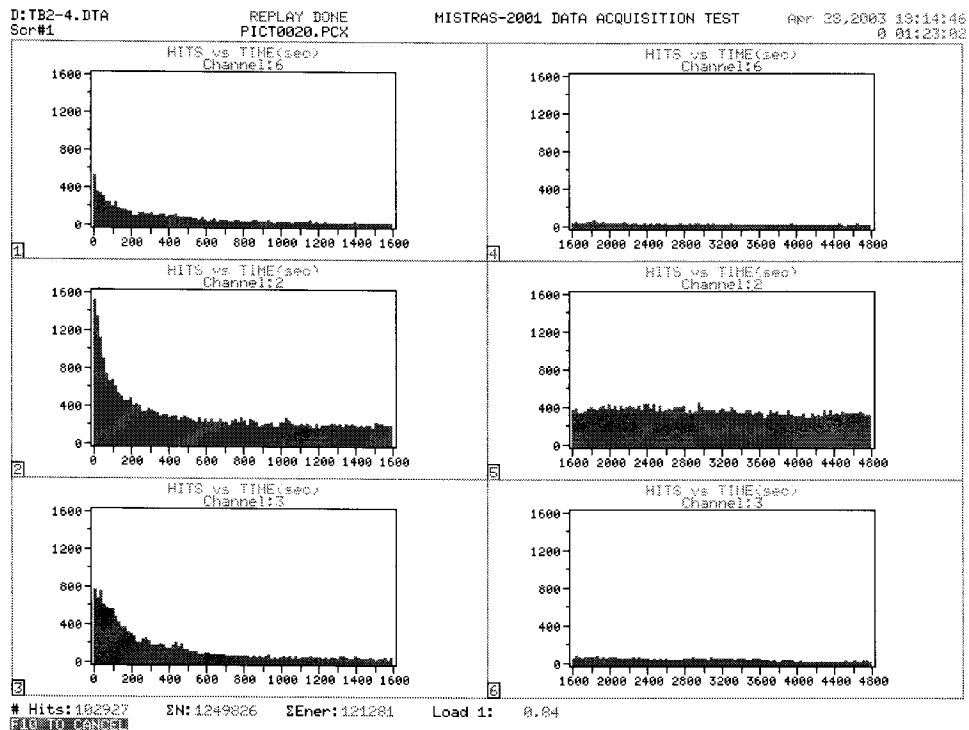


Fig. 2-55 AE data during step 2 cyclic loading, type B 2nd specimen

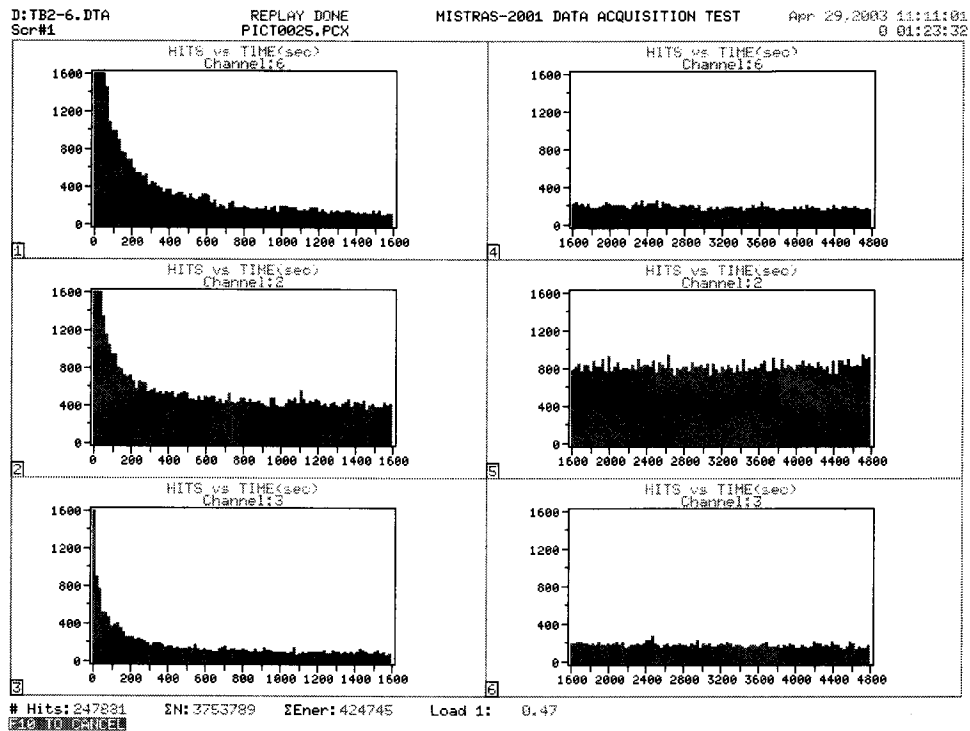


Fig. 2-56 AE data during step 3 cyclic loading, type B 2nd specimen

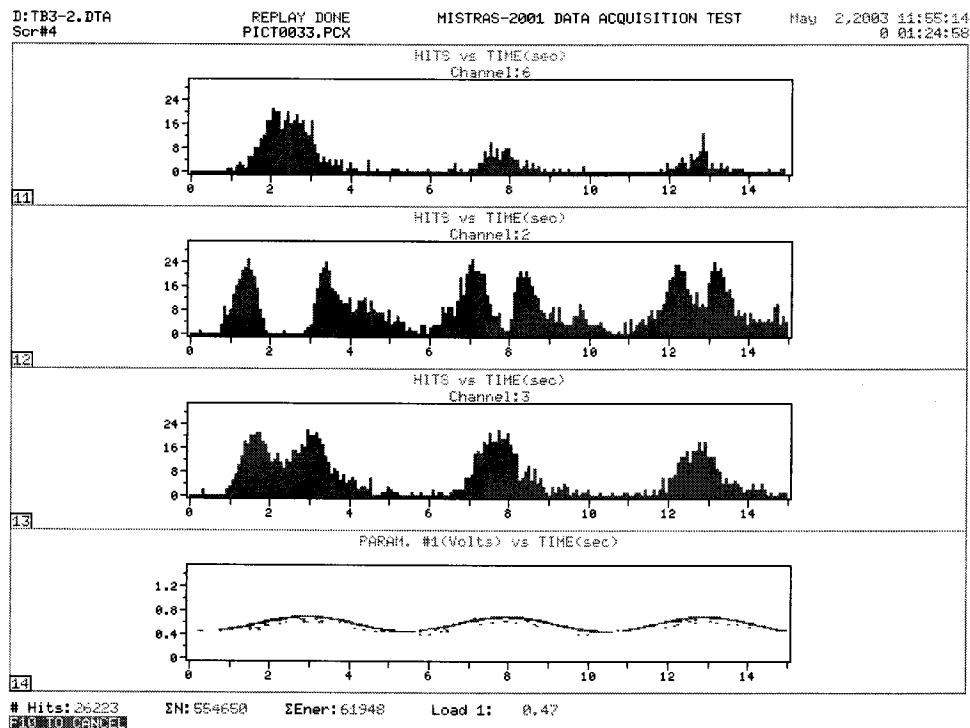


Fig. 2-57 Initial AE data during cyclic loading : loading step 1, type B 3rd specimen

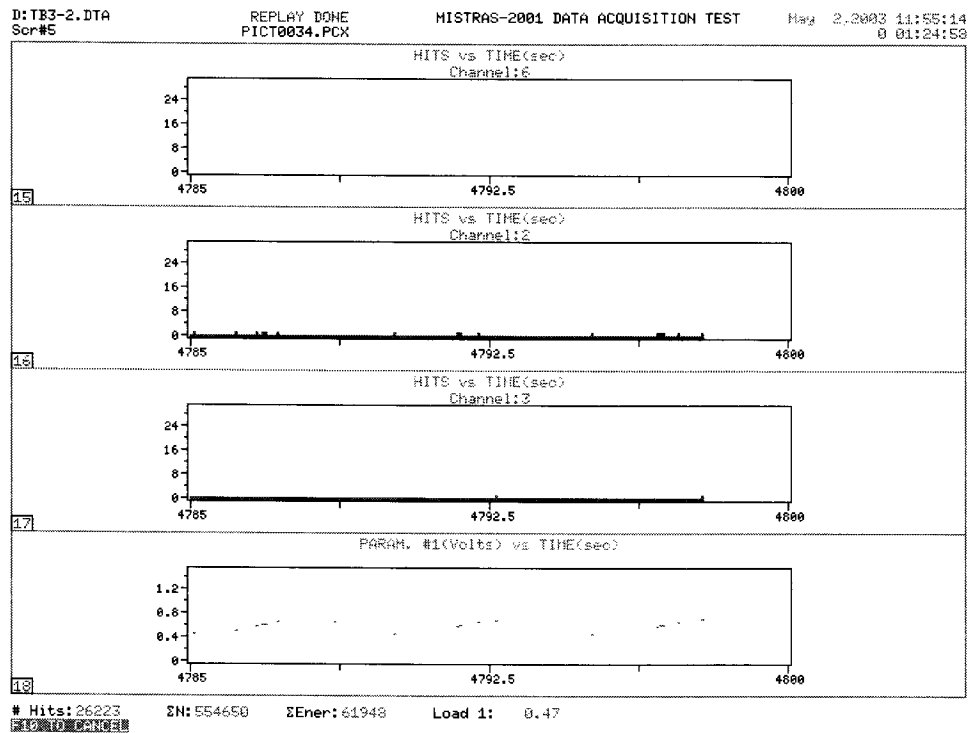


Fig. 2-58 Stabilized AE data during cyclic loading : loading step 1, type B 3rd specimen

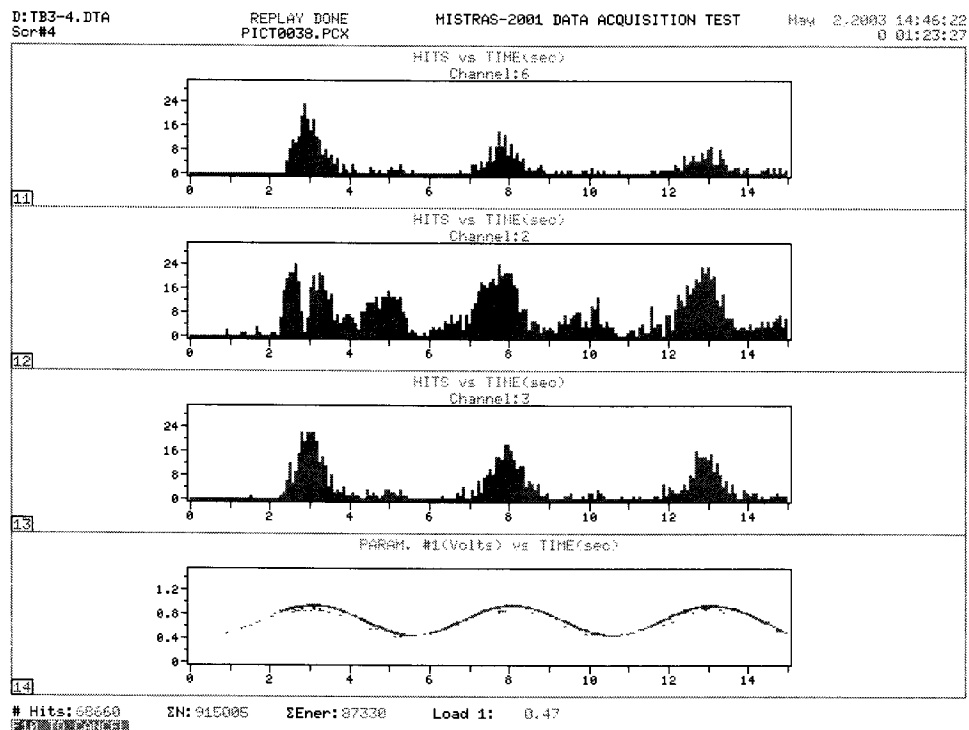


Fig. 2-59 Initial AE data during cyclic loading : loading step 2, type B 3rd specimen

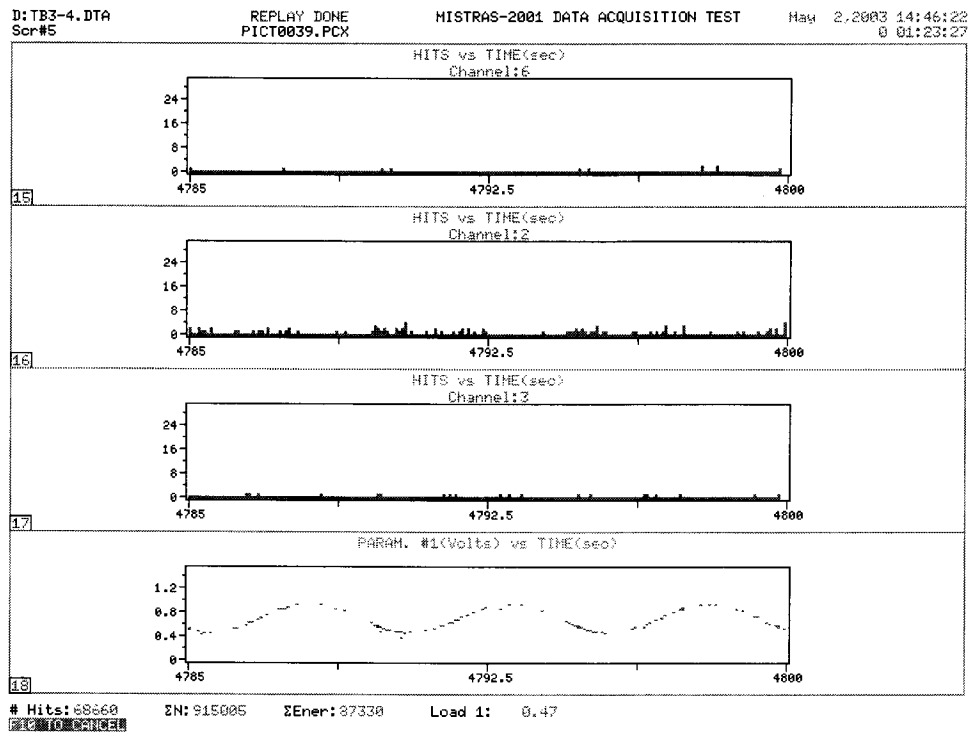


Fig. 2-60 Stabilized AE data during cyclic loading : loading step 2, type B 3rd specimen

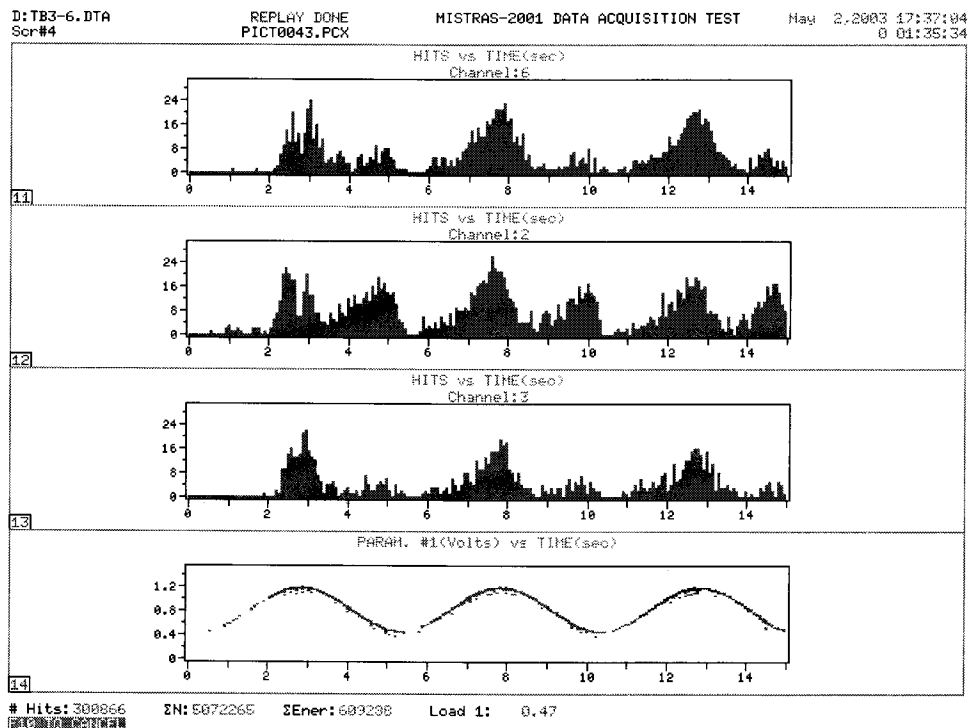


Fig. 2-61 Initial AE data during cyclic loading : loading step 3, type B 3rd specimen

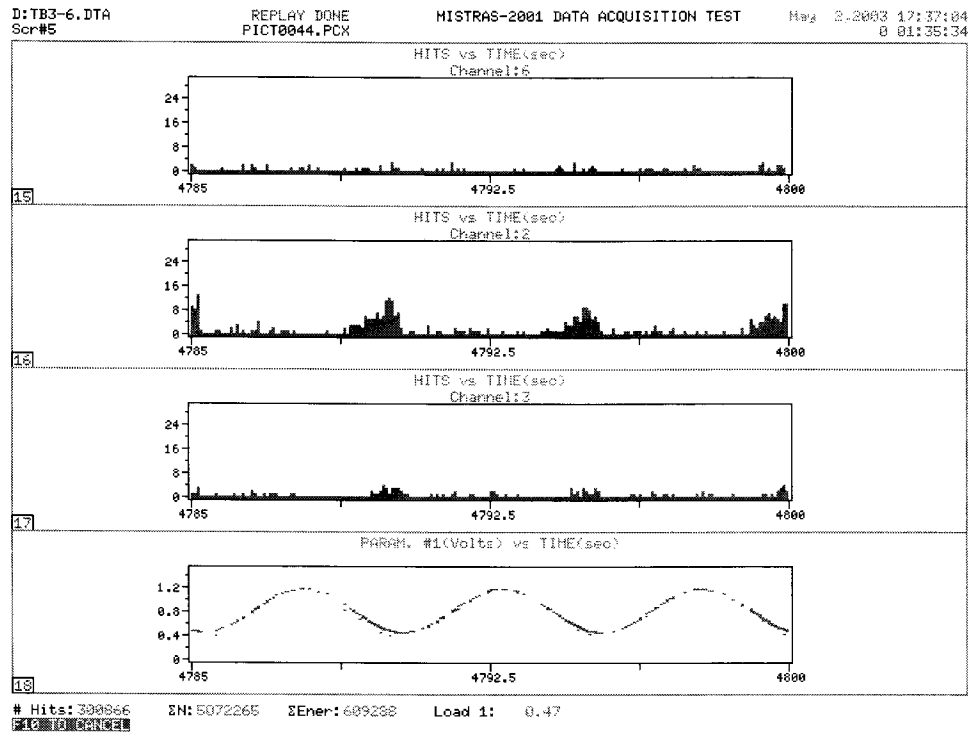
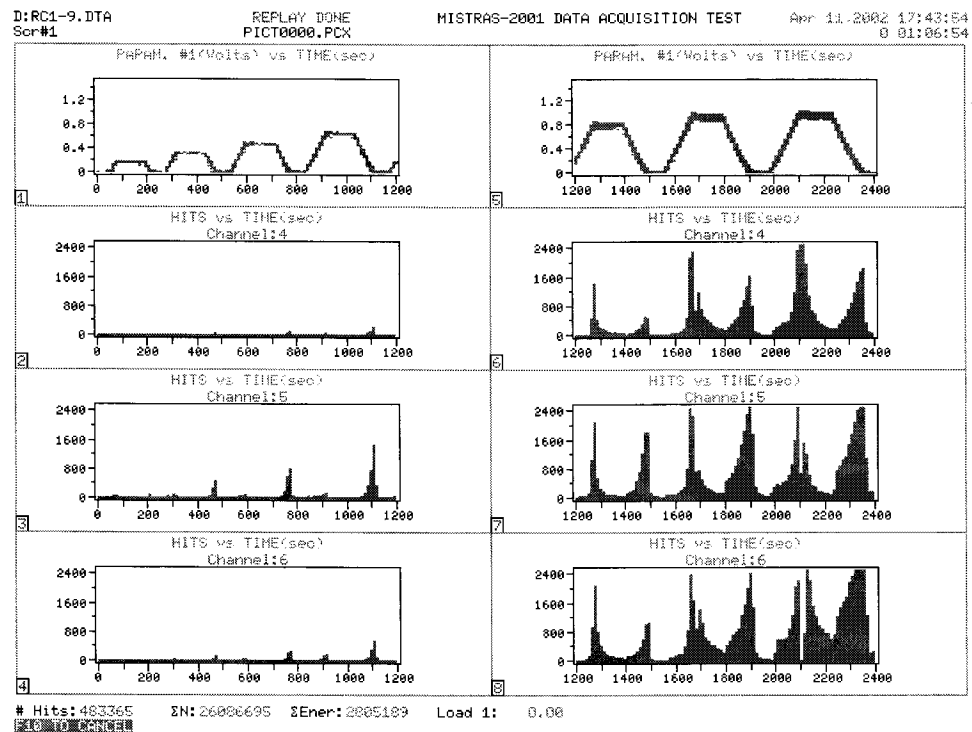


Fig. 2-62 Stabilized AE data during cyclic loading : loading step 3, type B 3rd specimen



(a)normal condition

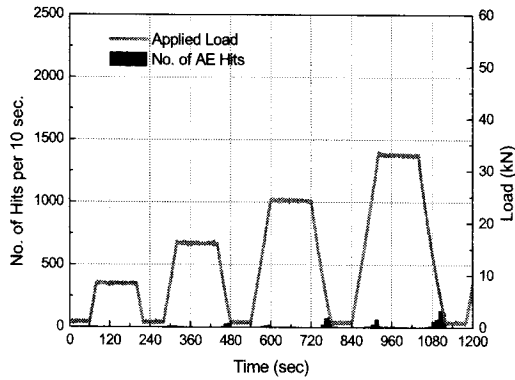
(b)crack developing

Fig. 2-63 AE hit and load change during failure test

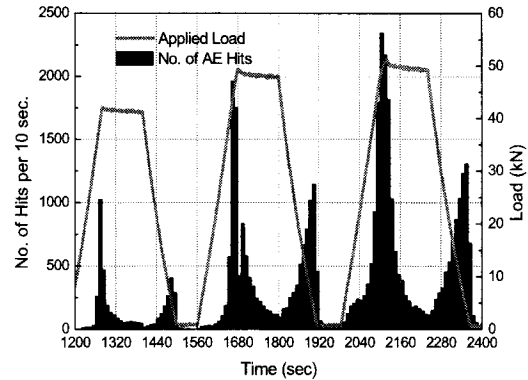
Fig. 2-63은 failure test를 수행하는 동안에 발생한 시간에 따른 센서별 AE hit 수를 도시한 것이다. Failure test는 cyclic loading test를 마친 후 수행한 것으로, cyclic test와 달리 하중을 계속 증가시키면서 시편이 파괴될 때까지 수행하였다. Fig. 2-63 (a), (b) 모두에서 맨 위에 도시한 것이 실제 인가된 하중변화이다. Fig. 2-63 (a)의 4단계 하중은 철근콘크리트의 설계시 고려된 최대 극한 하중 이내의 하중이 인가된 것이고, Fig. 2-63(b)는 최대 극한 하중을 초과한 하중이 인가된 것이다. Fig. 2-63에 비해 (b)의 AE hit 빈도가 더 빠르게 증가함을 확인할 수 있었다.

Fig. 2-64와 Fig. 2-65는 극한하중을 기준으로 (a)에는 극한하중 이하의 하중이 가해진 4번째 cycle까지의 하중과 신호발생빈도를, (b)에는 극한하중을 초과하는 하중이 가해진 5번째 cycle부터 파괴직전인 7번째 cycle까지의 하중과 신호발생빈도를 나타낸 것이다. Fig. 2-64는 파괴가 발생한 보 단부에 부착된 Ch. 1 센서로부터 취득된 신호를, Fig. 2-65는 보 중앙부에 부착된 Ch. 2 센서로부터 취득된 신호를 각각 표시하였다. 하중을 감안하면 Fig. 2-64와 Fig. 2-65의 (a)는 모두 정상신호가 발생되어야 하며, 그에 따른 신호취득결과도 신호발생빈도가 낮고 primary AE peak가 secondary AE peak보다 작거나 같은 상태를 나타내고 있다.

한편, Fig. 2-64와 Fig. 2-65을 비교하면, Fig. 2-64의 (b)는 primary AE peak가 secondary AE peak보다 현저히 크게 나타나는데 반해 Fig. 2-65의 (b)는 secondary AE peak가 오히려 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 반복 재하실험의 결과와 부합하는데, 보 단부에서 파괴를 유발하는 균열의 성장이 이루어지고 있음을 드러내는 결과이다. 또한 하중의 증가에 따른 보 중앙에서의 신호발생빈도(Fig. 2-65)의 증가율에 비해 파괴가 발생한 보 단부에서의 신호발생빈도(Fig. 2-64)가 더욱 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서 고찰한 철근콘크리트 보의 파괴거동으로부터 설명되어질 수 있다. 휨을 받는 콘크리트 보는 정상적인 거동일 경우 보의 중앙부에서 최대 휨 모멘트가 발생하게 되므로 보 단부에 비해 상대적으로 활발한 음향방출이 이루어진 것이며, 파괴에 임박하여서 나타나는 현상으로 보여진다.

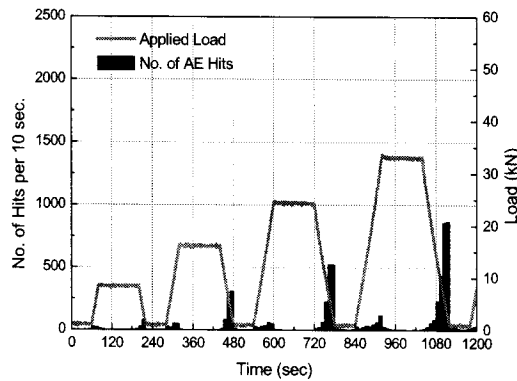


(a) under ultimate load

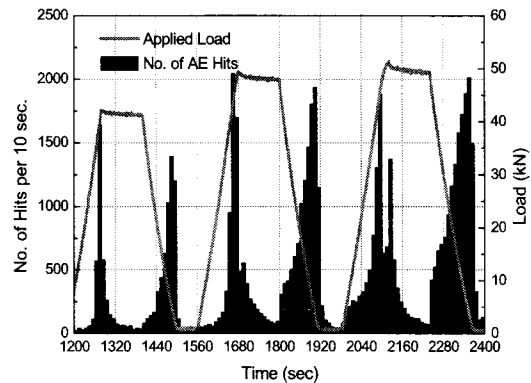


(b) just before the fracture

Fig. 2-64 AE hit rate at the beam end (Ch. 1 sensor-fractured part) during the fracture test



(a) under ultimate load



(b) just before the fracture

Fig. 2-65 AE hit rate at the beam center (Ch. 2 sensor) during the fracture test

철근 콘크리트 보 시험편을 이용한 반복재하실험과 파괴시험 결과를 종합하면 철근 콘크리트 구조물에서 가해진 하중에 대한 건전성 유무를 판정하는데 유용한 세 가지 음향방출 특성을 제시할 수 있다. 그것은 가해진 하중에 대한 신호발생율의 변화추이, primary AE peak와 secondary AE peak의 비교 그리고 보 중앙부와 단부의 신호발생율의 변화이다. 이러한 특성을 고려할 때 Fig. 2-64와 Fig. 2-65의 (a)를 정상신호의 전형으로, Fig. 2-64와 Fig. 2-65의 (b)를 이상신호의 전형으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 음향방출을 이용하는 콘크리트 구조물의 하중이력의 추정, 건전성 평가 및 상시감시를 통한 붕괴 예상 등의 가능성을 보여주고 있다.

(2) 단계적인 주기하중을 인가한 음향방출 시험

Fig. 2-66은 단계적인 10-주기 하중하에서 발생하는 AE hit와 amplitude를 하중 변화와 함께 도시한 것이다. CH-1은 1번 채널에서, CH-2는 2번 채널에서, 그리고 CH-3은 3번 채널에서 얻은 AE 결과를 의미한다. 1번 채널 (시편 끝단부) 과 3번 채널 (시편 끝단부)에 비해, 2번 채널 (시편 중앙부)에서 더 많은 신호가 나타남을 알 수 있는데, 이는 4-point bending test에서 중앙부에 응력과 strain 변화가 집중되어 많은 균열을 유도하였기 때문으로 생각된다. 각 stage에서 하중이 증가할 때의 발생한 AE 신호를 primary AE peak라 정의하고, 하중이 감소 할 때 나타나는 신호를 다시 나타나는 AE 신호라는 점에서 secondary AE peak라 칭하고 있다. 실험 초반부에서, 하중이 가해져 미세균열 또는 인장균열의 성장이 이루어지는 상태인 primary AE peak가 secondary AE peak보다 현저히 높게 나타난다. 이에 반해 반복재하에 의해 균열의 성장이 완료되어 신호발생빈도가 안정된 실험 후반부에는 secondary AE peak가 primary AE peak와 거의 같거나 오히려 크게 나타나고 있는데, 이것은, secondary AE peak가 균열 면간의 마찰에 의해 나타난다는 것을 입증하는 결과이다.

Fig. 2-67은 stage-3, stage-6, 그리고 stage-9에서 AE hit수와 하중변화를 함께 도시한 그림이다. Stage-3은 실험 초반부, stage-6은 실험 중반부, 그리고 stage-9는 실험 후반부를 대표하여 설명하고자 한다. 실험 초반부 (stage-3)에는 하중이 제거될 때에 비해, 하중이 인가될 때, AE 신호가 많이 나타났고, 실험 중반부 (stage-6)에는 하중이 인가될 때와 하중이 제거될 때, AE 신호가 비슷하게 나타났음을 알 수 있다. 또한 실험 후반부 (stage-9)에는 하중이 인가될 때에 비해 하중이 제거될 때 더 많은 AE 신호가 나타났을 알 수 있었다. 하중이 인가될 때 발생한 AE 신호는 새로운 균열의 생성에 기인한 것이고, 하중을 제거될 때 발생한 AE 신호는 새로운 균열에 의해 발생한 신호라기보다는 기존에 발생한 균열이 하중의 제거에 의해 발생한 균열마찰에 기인한 현상으로 보인다. 실험 초반부에는 새로운 균열이 나타나는 현상이 지배적으로 나타나기 때문에 하중을 인가할 때 더 많은 AE 신호가 발생하였고, 실험 중반부에는 균열의 생성과 기존 균열의 마찰 현상이 비슷한 빈도로 나타났고, 실험 후반부에는 하중을 제거될 때 이미 발생된 균열이 하중의 제거에 의해 닫히는 과정에서 균열 마찰에 기인한 AE 신호가 더 많이 나타난 현상으로 사료된다.

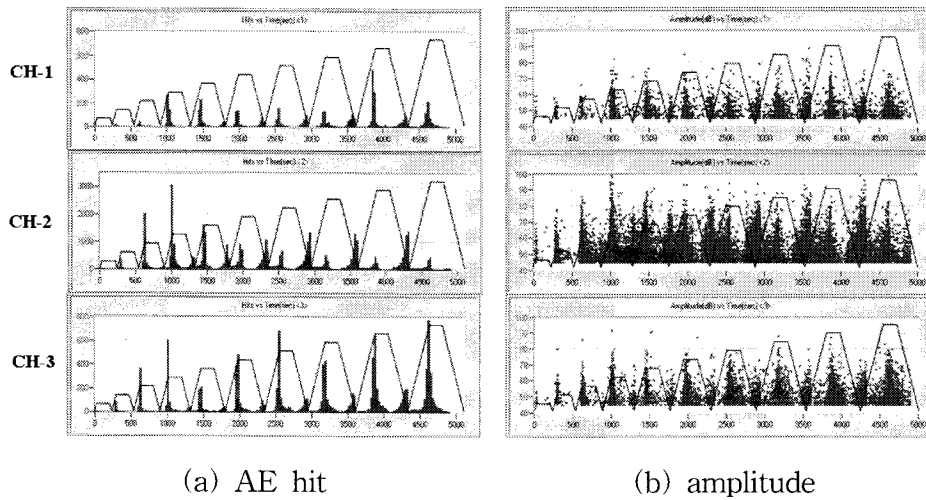


Fig. 2-66 AE hit and amplitude as a function of elapsed time

Fig. 2-65와 Fig. 2-66에 나타난 이러한 현상은 콘크리트 구조물 안전성 평가에 있어 중요한 기준으로 적용될 수 있다. 콘크리트 구조물에서는 이미 일상적인 하중을 충분히 반복하여 받은 상태이므로 다수의 균열이 존재하게 된다. 따라서 정상적인 상태에서는 secondary AE peak의 신호패턴을 나타낼 것이다. 그러나 만약 primary AE peak가 secondary AE peak보다 현저히 크게 나타난다면 그것은 대상 구조물이 지금까지 경험해보지 못한 큰 하중을 받았거나 또는 새로운 균열이 발생하고 있다는 것을 의미하고, 이를 이상신호 패턴으로 부를 수 있다. 따라서 secondary AE peak가 나타나는 신호패턴을 정상신호의 한 전형으로 primary AE peak가 많이 나타나는 신호패턴을 이상신호의 한 전형으로 간주할 수 있다.

Fig. 2-68은 실험 후반부 즉, stage-9에서 각 채널별로 나타난 AE 결과 하중변화를 도시한 그림이다. CH-1과 CH-3는 콘크리트 시험편의 양 끝단이며, CH-2는 시험편의 중앙부이다. 양 끝단 (CH-1과 CH-3)에서는 하중이 인가될 때 AE 신호가 현저히 증가하였음을 알 수 있고, 반면에 시험편의 중앙부 (CH-2)에서는 하중이 제거될 때 AE 신호가 증가됨을 알 수 있다. 이것은 하중을 충분히 받은 시험편의 중앙부에서는 균열이 새로이 생성되는 것보다 이미 발생한 균열의 마찰에 기인한 현상이 지배적으로 나타나기 때문이고, 시험편의 양 끝단에서는 새로이 생성되는 균열이 더 많기 때문에 나타난 현상으로 생각된다.

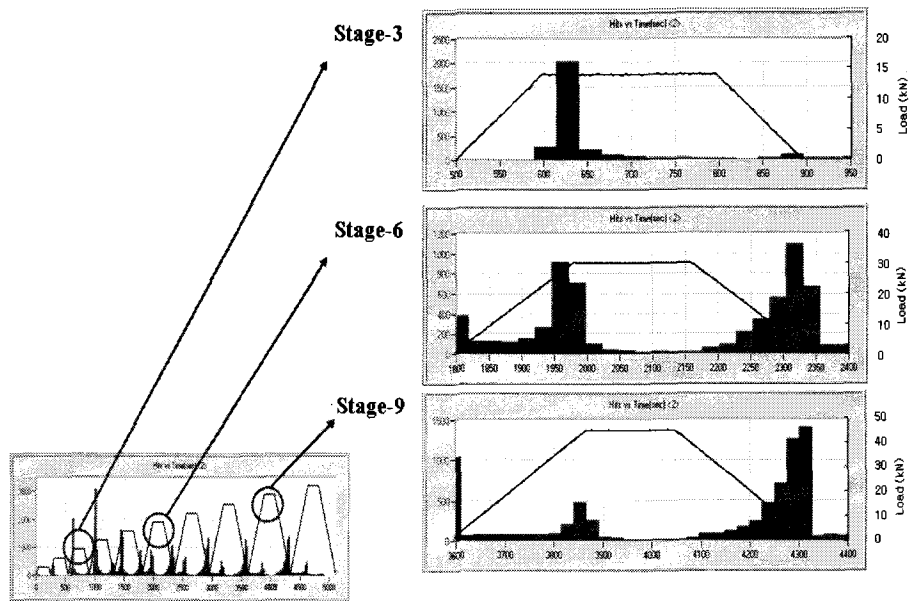


Fig. 2-67 Comparison of AE hit occurrence coming from three stages

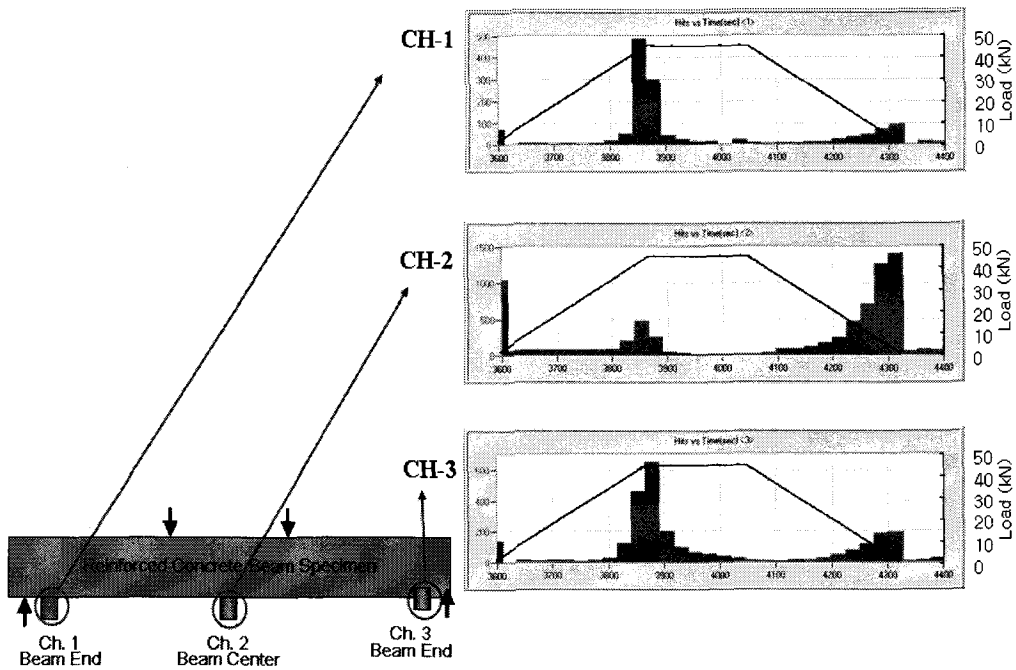


Fig. 2-68 Comparison of AE hit occurrence depending on sensor location (at 9-stage)

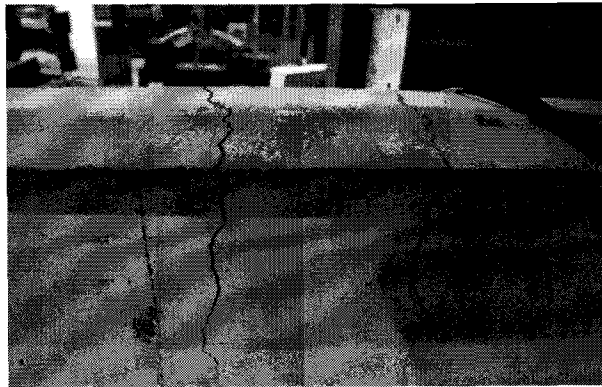


Fig. 2-69 Traditional cracks in the concrete beam

Fig. 2-69는 4-point bending test 후에 CH-2 부근 (시편의 중앙부)에서 발생한 전형적인 균열을 나타낸 사진이다.

Fig. 2-70은 3-stage에서 나타난 AE 신호를 duration과 amplitude의 cross plot으로 도시한 그림이고, Fig. 2-71은 9-stage에서의 duration과 amplitude를 도시한 그림이다. 두 그림 모두에서, 좌측 상단의 그림은 전체신호를 도시한 것이고, 우측 상단의 그림은 하중을 인가할 때 나타난 신호이며, 좌측 하단의 그림은 휴지기(holding time)에서 발생한 신호이고, 우측 하단 그림은 하중을 제거할 때 발생한 신호를 각각 의미한다. 3-stage에서는 하중을 인가할 때, AE 신호가 더 많았으며, 9-stage에서는 하중을 제거할 때의 AE 신호가 더 많았다.

Fig. 2-72 ~ Fig. 2-74는 3-stage, 6-stage 그리고 9-stage에서의 2번 채널에서 감지된 AE energy와 amplitude를 도시한 그림이다. 3-stage에서는 하중 제거시 보다 하중을 인가할 때 더 많은 AE 신호가 나타났고, 6-stage에서는 하중 제거시와 하중을 인가시의 AE 신호가 유사하게 나타났으며, 9-stage에서는 하중을 인가할 때보다 하중을 제거할 때의 AE 신호가 더 많았음을 보여주고 있다.

Fig. 2-75는 채널 2번에서 발생한 시간에 따른 rise time과 하중 변화를 보여주고 있고, Fig. 2-76에서는 채널 2번에서 발생한 시간에 따른 count와 하중 변화를 보여주고 있으며, Fig. 2-77에서는 채널 2번에서 발생한 시간에 따른 AE amplitude와 하중 변화를 보여주고 있고, Fig. 2-78에서는 채널 2번에서 발생한 시간에 따른 AE Energy와 하중 변화를 보여주고 있다. 이들의 결과는 앞에서 언급한 내용과 같은데, 모든 결과에서, 3-stage에서는 하중이 제거될 때 보다 하중이 인가될 때 더 많은 AE 신호가 발생하였고, 6-stage에서는 하중이 제거될 때와 하중이 인가될

때의 AE 신호가 비슷하였으며, 9-stage에서는 하중이 인가될 때 보다 하중이 제거될 때 더 많은 AE 신호가 발생하였다.

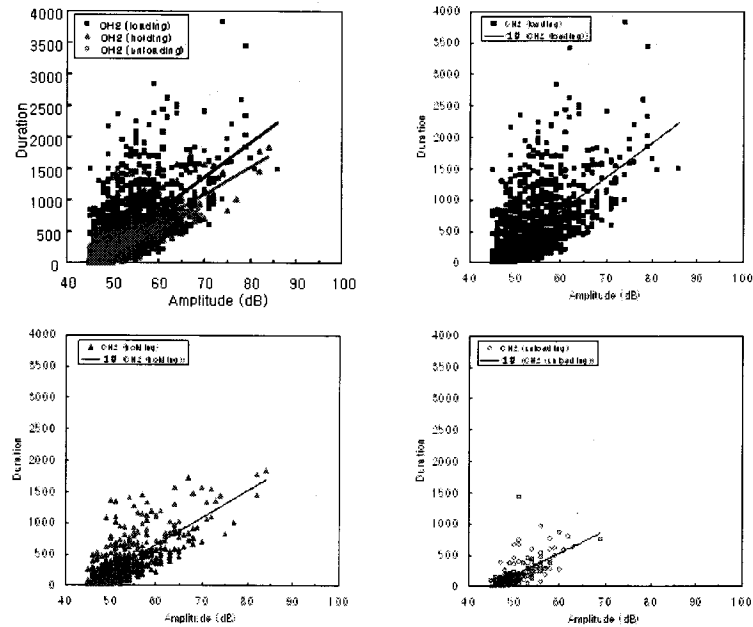


Fig. 2-70 Cross plot of duration vs. amplitude (3 stage)

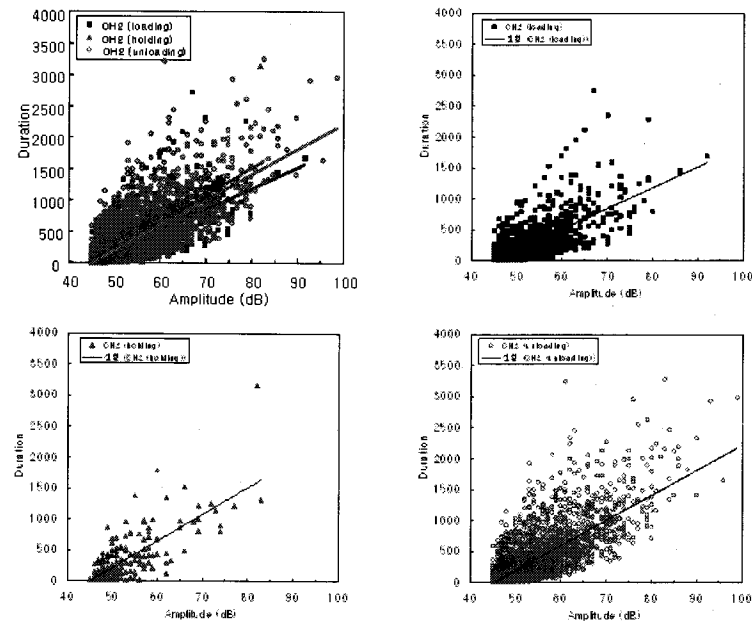


Fig. 2-71 Cross plot of duration vs. amplitude (9 stage)

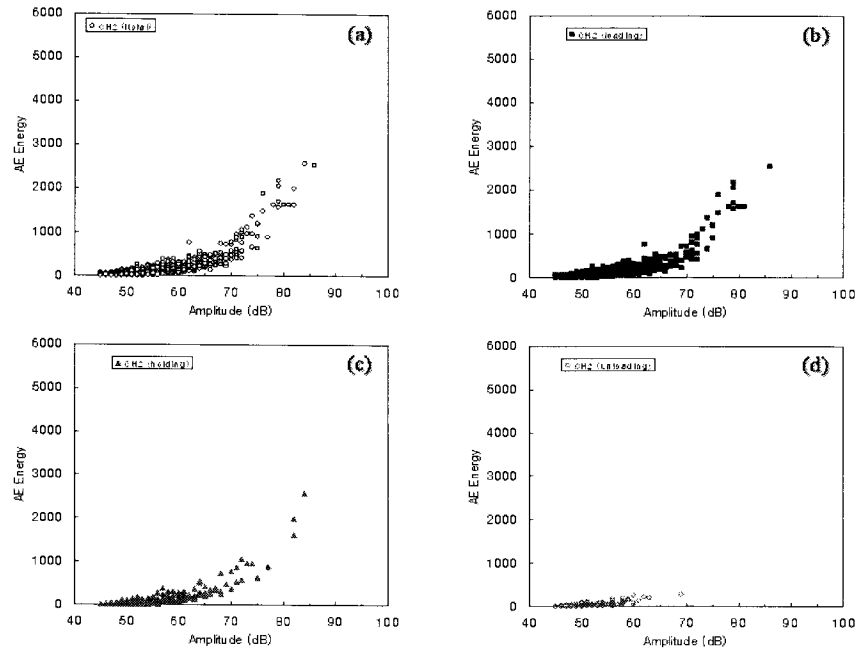


Fig. 2-72 AE energy vs amplitude at channel 2 (3 stage)

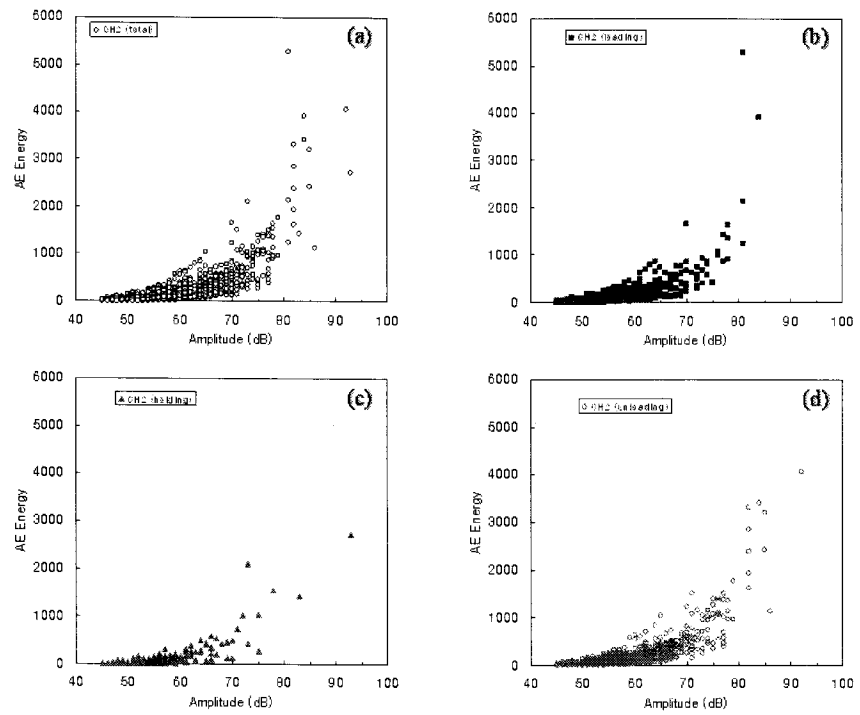


Fig. 2-73 AE energy vs amplitude at channel 2 (6 stage)

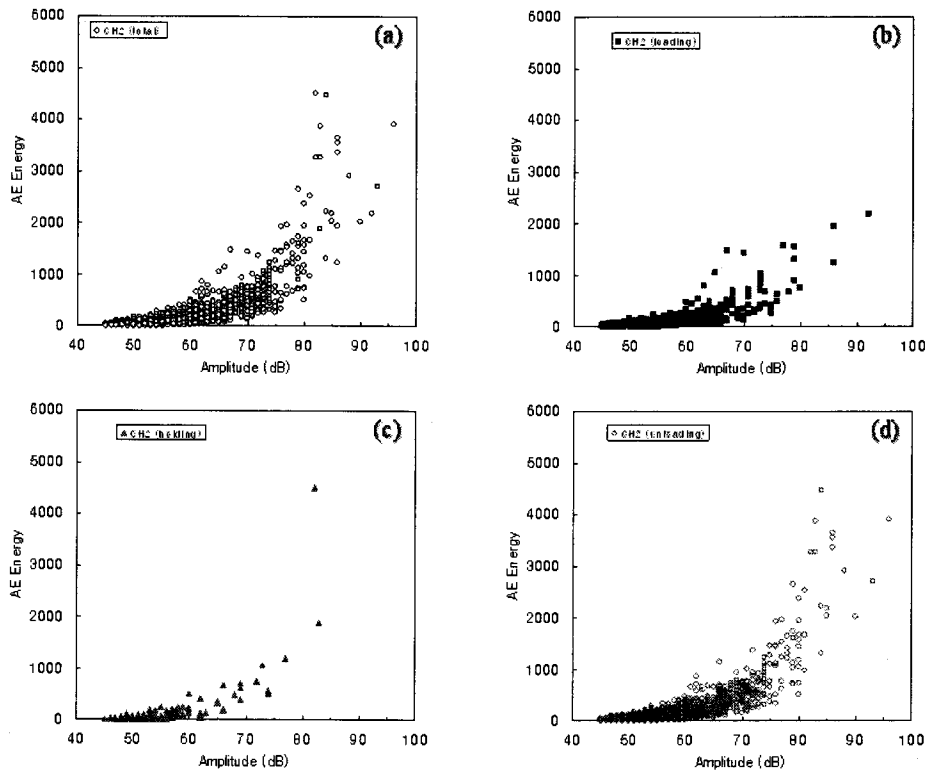


Fig. 2-74 AE energy vs amplitude at channel 2 (9 stage)

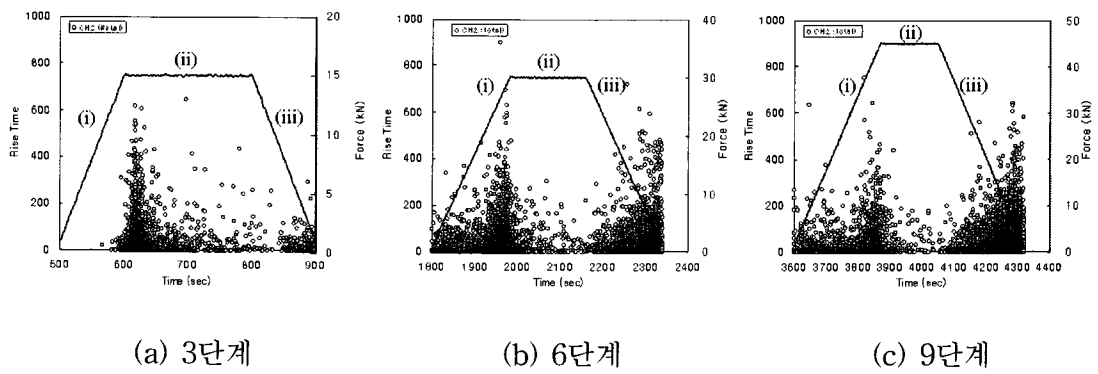


Fig. 2-75 Rise time vs time at channel 2

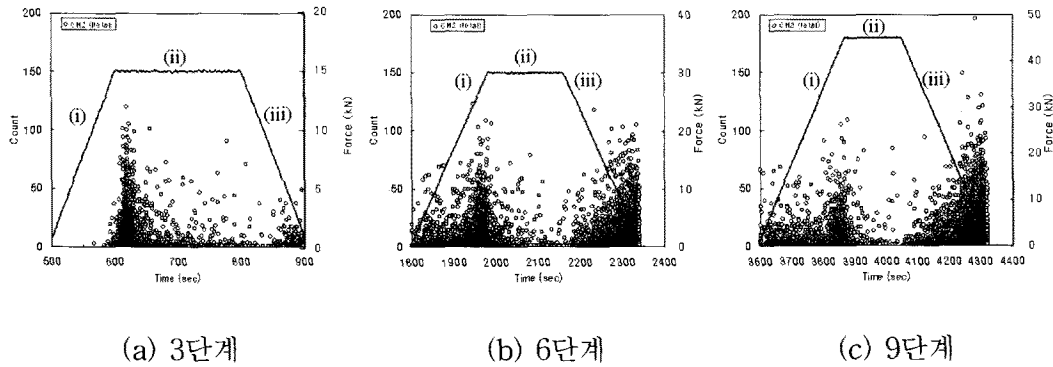


Fig. 2-76 Count vs time at channel 2

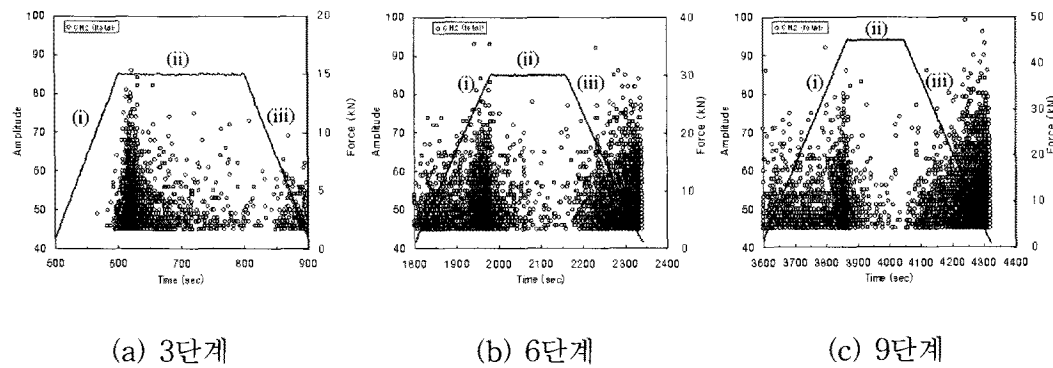


Fig. 2-77 Amplitude vs time at channel 2

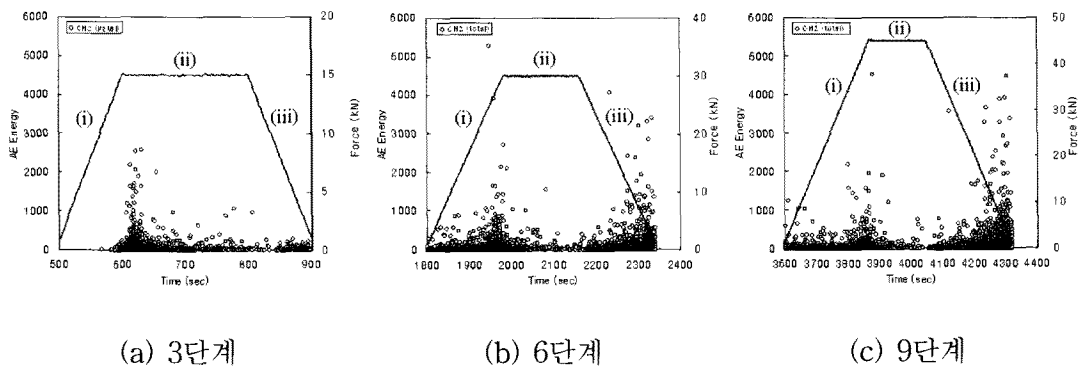


Fig. 2-78 AE energy vs time at channel 2

Fig. 2-79는 하중이 인가될 때 (loading)의 AE hit수와 휴지기 (holding)일 때의 AE hit 수 그리고, 하중이 제거될 때 (unloading)의 AE hit수를 각 stage 단계별로 도시한 그림이다. 하중을 인가할 때와 휴지기의 AE hit수는 초기에는 급격히 증가

하다가 4-5 단계에서 급격히 감소하고, 이후 일정해 지는 경향을 보였는데, 이는 초기에는 새로운 균열이 많이 발생하였다가 실험 중반부 이후로는 새로운 균열의 생성 속도가 둔화되는 있음을 보여주고 있다. 반면에 하중을 제거할 때의 AE hit수는 stage 단계가 증가함에 따라 계속적으로 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 이미 생성된 균열의 닫힘에 의한 마찰에 기인한 AE 신호이므로 생성된 균열이 누적되어 이들의 닫힘 현상도 계속적으로 증가하기 때문에 나타난 현상으로 생각된다.

Fig. 2-80은 하중 변화에 따른 각 stage의 AE hit 비 (AE hit ratio)를 도시한 그림이다. 여기서, Ratio (Stage n/Stage n-1)은 전단계의 AE hit 수와 현 단계의 AE hit 수의 비를 의미하는 것인데, stage 1 으로 표시된 것은 2단계의 AE hit수를 1단계의 AE hit 수로 나눈 값을 의미하며, stage 2 로 표시된 것은 3단계의 AE hit수를 2단계의 AE hit 수로 나눈 값을 의미한다. Fig. 2-80 (c) unloading에서 stage level 1의 값이 표시되지 않는 이유는 하중을 제거할 때의 stage1에서 AE hit수가 0이 되기 때문에 나눌 수가 없었다. Fig. 2-80에서 (a) loading, (b) holding, 그리고, (c) unloading의 모두에서 AE hit 비는 감소하는 경향을 보였다가 실험 중반부 (중간 stage)에서 일정한 값을 유지하는 것을 확인하였다. 이는 이상 신호와 정산신호를 판별하는 알고리즘에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

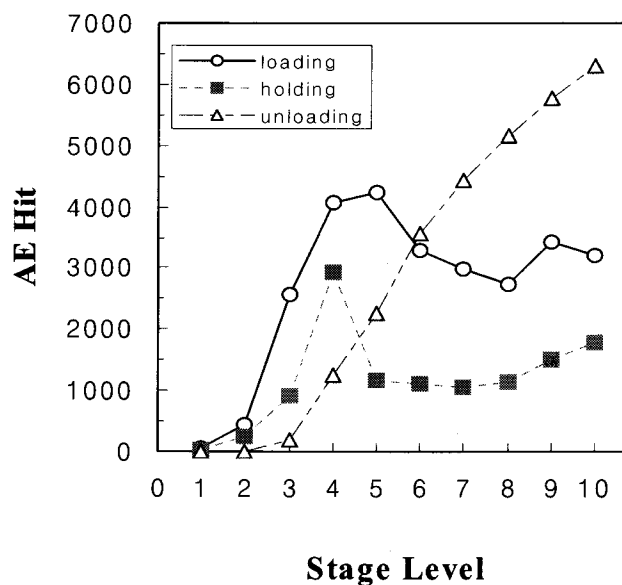


Fig. 2-79 Comparison AE hit at each stage depending on loading change

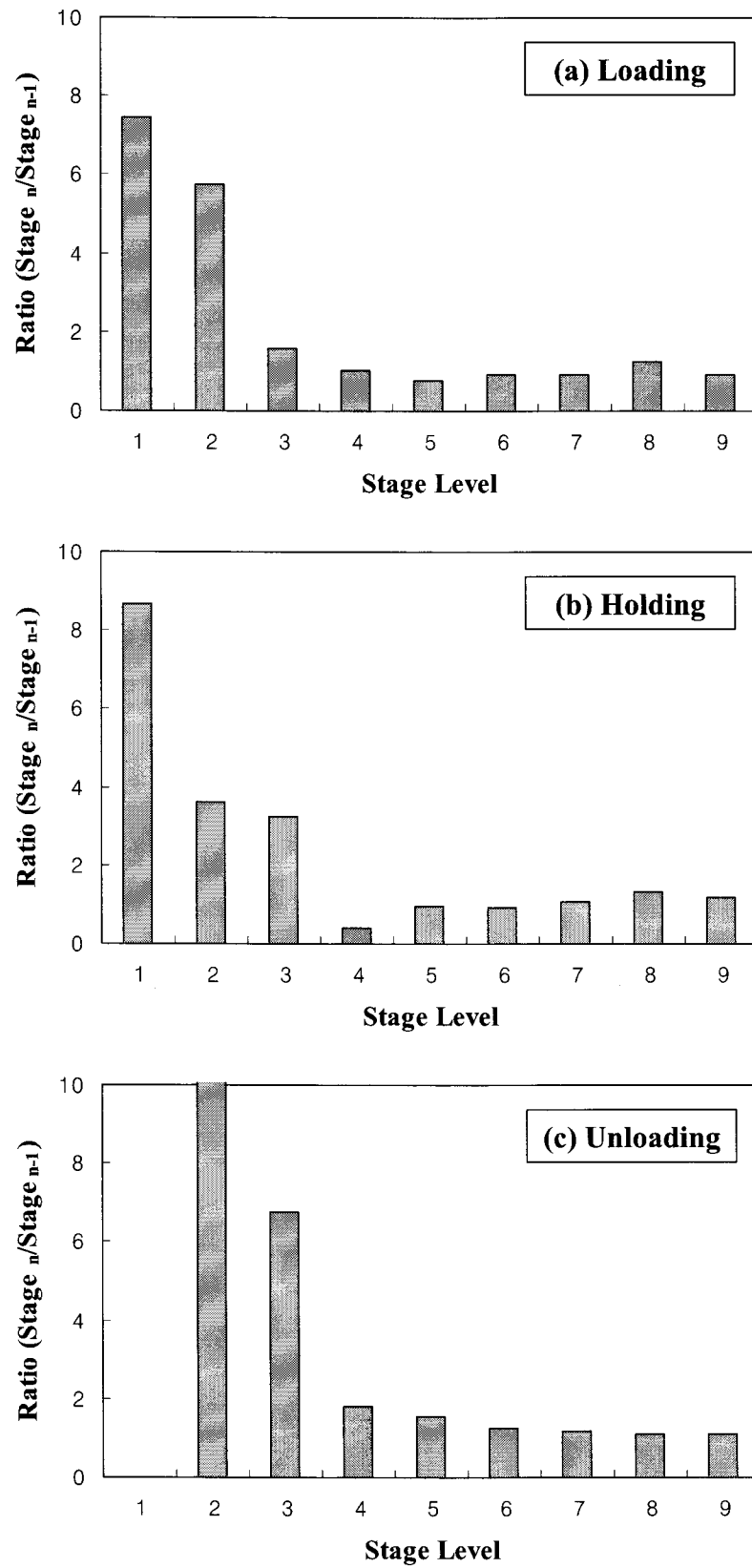
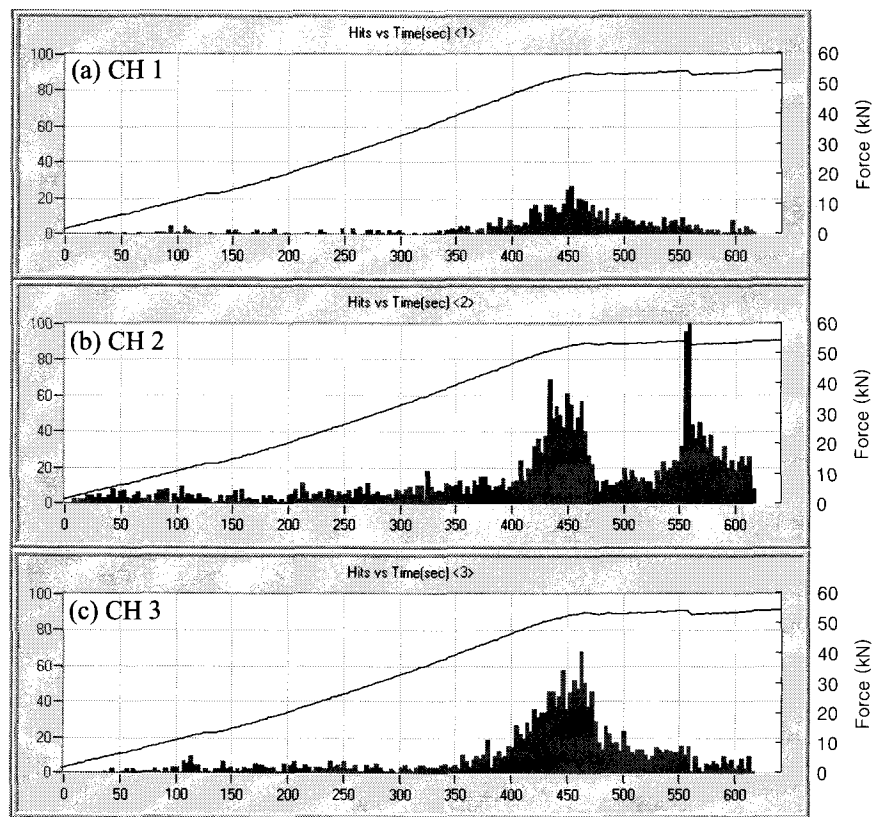


Fig. 2-80 AE hit ratio at each stage depending on load change

Fig. 2-81은 단계적인 10-주기 하중 시험 (10-cyclic loading test) 후에 수행한 콘크리트 파괴 시험 (failure test)후의 각 채널에서 발생한 AE hit수와 하중 변화를 함께 도시한 그림이다. 세 경우 모두에서 항복점 근처에서 많은 AE 신호를 보였는데, 이는 항복점 근처에서 많은 균열이 생성되었음을 의미한다. 그리고 채널 1번의 AE hit 수가 채널 2번과 3번에 비해 작게 나타났는데, 이는 채널 1번과 2번 사이에 생성된 균열의 수가 채널 2번과 3번 사이에 생성된 균열에 수에 비해 적기 때문에 나타난 현상으로 사려된다. (Fig. 2-81 (d)). Fig. 2-81 (d)는 콘크리트 파괴시험 후의 균열 상태와 시편의 센서 부착위치를 표시한 그림이다.



(d) Tested concrete specimen and sensor location

Fig. 2-81 AE hit at each channel in failure test

5. 철근 콘크리트 슬래브의 단계별 하중 재하시 음향방출 발생 거동

가. 서 론

본 실험에서는 철근 콘크리트 빔 실험에 이어 빌딩, 주차장 등과 같이 슬래브 구조로 되어 있는 건축구조물에 대한 건전성 평가를 위해 음향방출 기술 적용 실내 실험을 수행하였다. 따라서 길이 대 폭 비율이 각각 3.9 및 5.2 인 슬래브 시편을 준비하였으며 4 점 굽힘시험 하에서 단계별 하중 재하에 따른 음향방출 발생 거동을 관찰하였다.

나. 시험편

실험을 위하여 아래와 같이 길이 대 폭 비율이 각각 3.9 및 5.2 인 철근 콘크리트 슬래브를 제작하였다. Fig. 2-82와 Fig. 2-83은 제작된 시험편의 치수와 재하 위치, 철근의 위치 및 배근 상태, 그리고 센서의 부착위치를 나타낸 것이다. 3점 휨 시험을 위한 시험편의 제원은 다음과 같다.

▷ 시험편 제원

- 보의 치수 : Height × Width × Length = 200 × 800 × 3100 (mm)
- 철근 : 11D13@50 mm (with stirrup 2D10@70 mm)
- 콘크리트 강도 : $f_c = 25.2 \text{ MPa}$
- 철근 공칭 항복점 : $f_y = 392 \text{ MPa}$
- 철근량 : $A_s = 1,404 \text{ mm}^2$

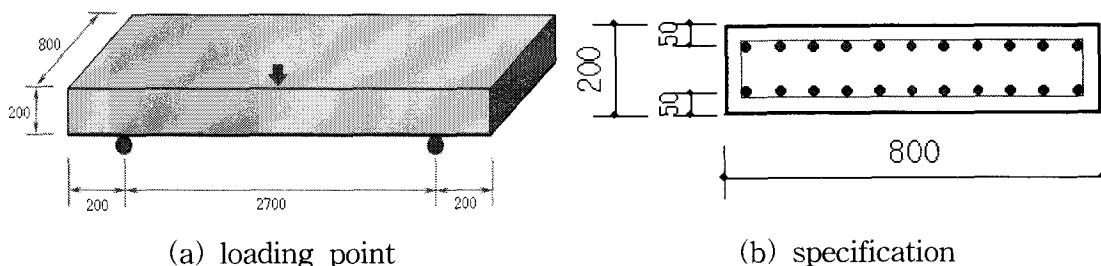


Fig. 2-82 Concrete slab specimen

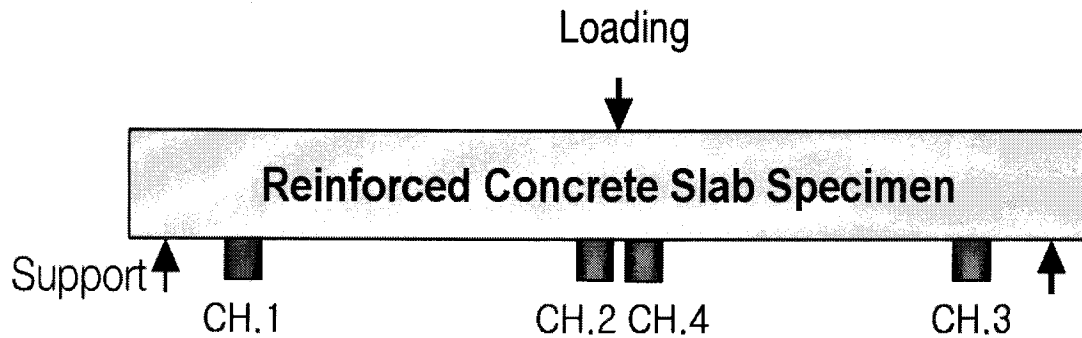


Fig. 2-83 Sensor location

음향방출 센서는 프리앰프가 내장되어 있는 PAC사의 모델 R6I (60 kHz resonant frequency) 센서 3개를 슬래브 중앙부에 1개, 양 단부에 각각 1개씩 세 지점을 선정하여 부착하였으며, 차후 센서 간의 특성 변화를 고찰하기 위해 추가적으로 R15I (150 kHz resonant frequency) 센서 1개를 중앙부에 부착하였다. R6I 센서를 CH.1~3에 부착하였고 추가적으로 부착한 R15I 센서는 CH.4에 부착하였다. 또한 CH.1과 CH.3은 중심으로부터 횡방향 1 m 간격으로 CH.2와 CH.4는 종방향 0.2 m 간격으로 부착하였다.

Fig. 2-84는 센서의 부착 위치를 나타낸 사진이며 Fig. 2-85는 콘크리트 슬래브에 부착된 센서와 센서를 고정시키기 위한 마그네틱 홀더를 부착한 모습을 나타낸 사진이다.

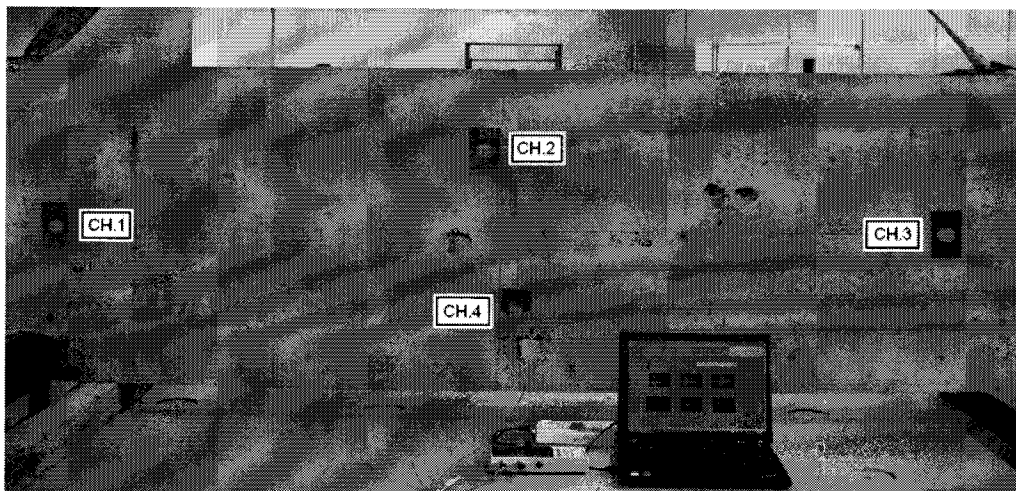


Fig. 2-84 Sensor location

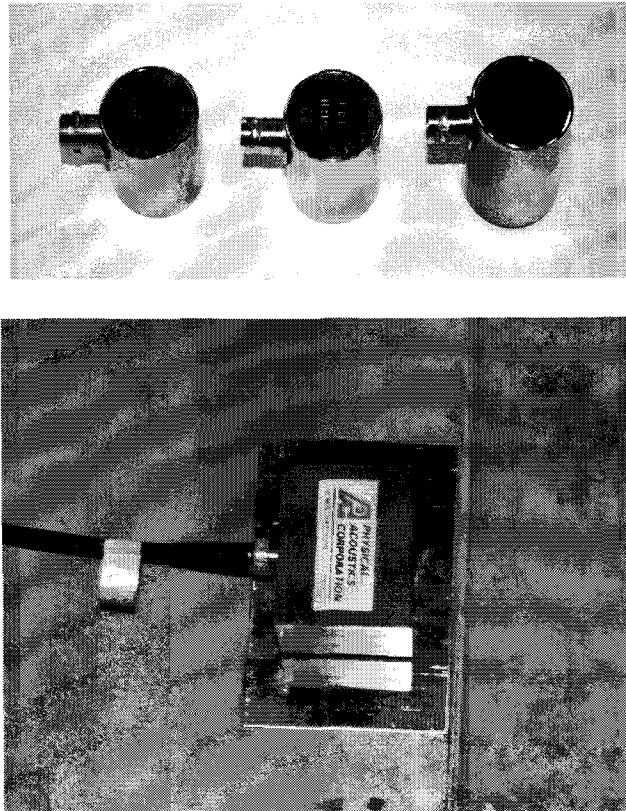


Fig. 2-85 Sensor & magnetic holder

다. 실험장비

- (1) AE sensors - AE sensor는 60 kHz 주파수 대역의 프리앰프가 내장된 공진형 센서 R6I (60 kHz resonant frequency)와 R15I(150 kHz resonant frequency)를 사용하였다. 토목구조물의 경우 강재에 비해 감쇠가 심하므로 비교적 전파거리가 낮은 주파수 대역의 센서를 선택하였다.
- (2) AE system - 신호의 처리 및 저장에 사용된 AE system은 Fig. 2-86과 같은 PAC 사의 DiSP with AEwin을 사용하였다. 신호취득을 위한 문턱값(threshold)은 background noise level보다 약간 위인 45를 사용하였다.
- (3) Oscilloscope - 음향방출 파형을 취득하기 위하여 1대의 4 channel digital oscilloscope(LeCroy 9354A)를 사용하였다.
- (4) Signal source - 센서 감도 및 장비 확인을 위하여 pencil lead break를 모의 신호원으로 사용하였다.

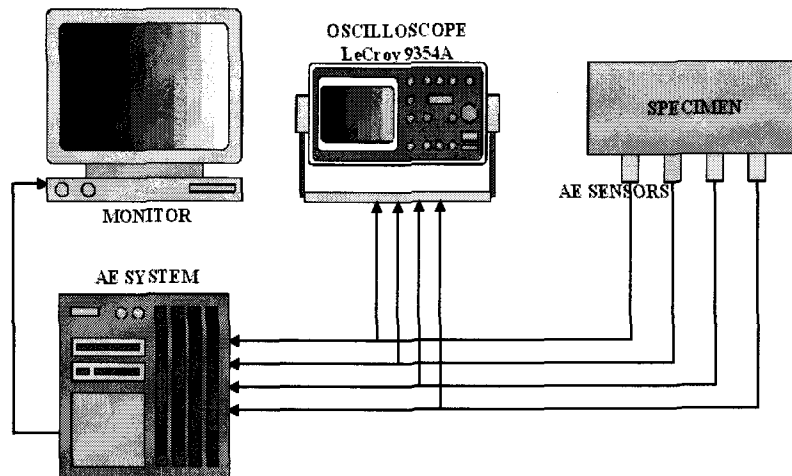


Fig. 2-86 AE system

라. 시험하중 및 시험방법

본 연구에서는 500 kN 용량의 hydraulic actuator(MTS)를 사용하여 3-point bending test를 적용하였으며, 먼저 콘크리트 시편의 손상 범위 내에서 음향방출 실험을 실시하기 위하여 두 차례에 걸친 pre-load를 가하여 균열을 유도한 후 세 번째 하중을 인가할 때 본 실험을 실시하였다. 본 실험은 pre-load 단계에서 최대 90 kN의 하중을 받아 어느 정도의 균열이 존재하는 콘크리트 시편에 대해 하중 제거를 통한 stepwise cyclic loading test 방식으로 최대 110 kN 까지 하중을 인가하면서 음향방출 시험을 수행하였다. 또한 본 실험에서는 단계적인 주기 하중을 9 step에 걸쳐 최대 110 kN 까지 재하 한 이후에 이미 받았던 크기가 같은 하중인 80 kN, 60 kN, 40 kN을 다시 한 번 재하 함으로써 그 변화를 비교하는 실험을 추가로 실시하였다. Table 2-6은 실험 단계별 하중의 크기 및 실험 시간을 나타낸 표이며 Fig. 2-87은 본 실험에서의 12-주기 하중의 load profile과 콘크리트 파괴시험 중에 나타난 시간에 대한 하중 변화를 도시한 그림이다. Cyclic loading test에서 하중 인가 속도와 하중 제거 속도는 30 sec / 10 kN 이었고, holding time은 1 min 으로 하였다.

Fig. 2-88(a)는 MTS에 놓여있는 콘크리트 시편의 모습(실험전)과 본 실험에 사용하기 위해 특별해 제작된 3-point bending test용 지그를 나타낸 사진이며 Fig. 2-88(b)는 하중재하 도중에 콘크리트 시편에 균열이 발생한 모습을 나타내었다.

Table 2-6 Loading scheme of experiment

stage	applied Load (kN)	loading time (sec)	unloading time (sec)	비 고
1	10	30	30	
2	20	60	60	
3	30	90	90	
4	40	120	120	
5	50	150	150	
6	60	180	180	
7	70	210	210	
8	100	300	300	
9	110	330	330	
10	80	240	240	80 kN reload
11	60	180	180	60 kN reload
12	40	120	120	40 kN reload
loading time : 30 sec / 10 kN				
holding time : 1 min				
unloading time : 30 sec / 10 kN				

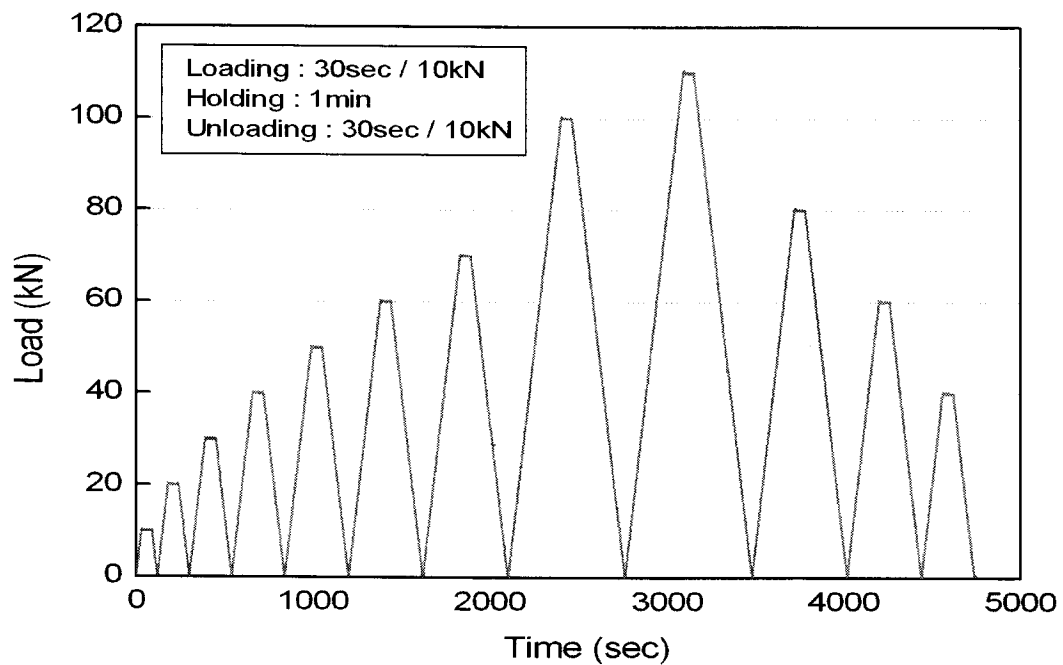
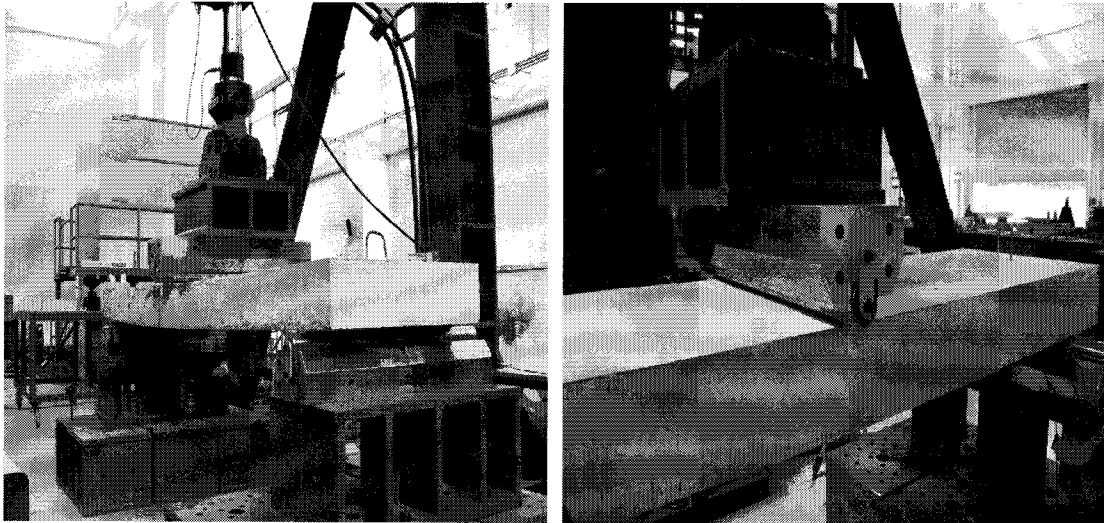


Fig. 2-87 Load profiles for the cyclic load test



(a) before test

(b) during test

Fig. 2-88 Photographs of concrete slab specimen

마. 실험결과

Fig. 2-89와 Fig. 2-90은 단계적인 12-주기 하중을 받는 동안 슬래브의 중앙인 CH.2에서 발생하는 AE hit와 amplitude를 하중변화와 함께 도시한 그림이다. 전년도에서 각 stage에서 하중이 증가할 때 발생하는 AE 신호를 primary AE peak라 정의하고, 하중이 감소할 때 발생하는 AE 신호를 secondary AE peak라 칭하기로 하였는데 3차년도에서 역시 실험 초반부에 하중이 가해져 미세균열 또는 인장균열의 성장이 이루어지면서 primary AE peak가 secondary AE peak보다 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이후 실험 후반부로 갈수록 하중의 반복 재하에 의한 균열의 성장이 완료되어 신호발생빈도가 안정되어 감에 따라 secondary AE peak가 primary AE peak보다 높게 나타남으로써 균열 면간의 마찰에 의한 신호라는 것을 알 수 있었다. 또한 실험 초반부에서 후반부로 갈수록 전체적인 AE hit 발생 빈도가 증가하는 것은 균열 열림의 크기가 하중의 크기에 따라 증가하고 그 균열면의 마찰에 의해서 발생하는 AE hit 수가 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 2-91은 실험을 실시하는 동안 시편으로부터 얻은 Strain data를 나타낸 값으로 실제로 재하한 하중상태와 시편내부에서 일어나는 변형상태의 양상이 거의 일치되고 있음을 알 수 있었다. 이는 실제 현장에서 하중의 재하상태나 크기를 정확하게 알 수 없을 경우 역학적 거동을 가장 잘 반영해 줄 수 있는 매우 중요한 근거가 될 수 있으리라 판단된다.

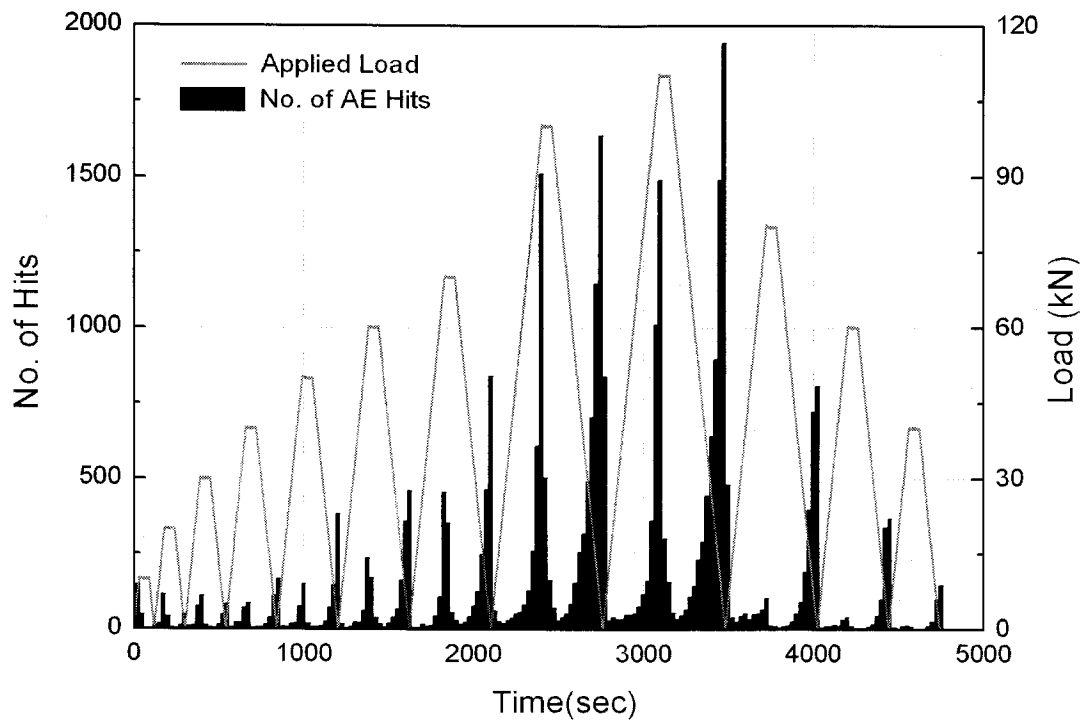


Fig. 2-89 AE hit rate at the slab center (CH.2 sensor) during the fracture test

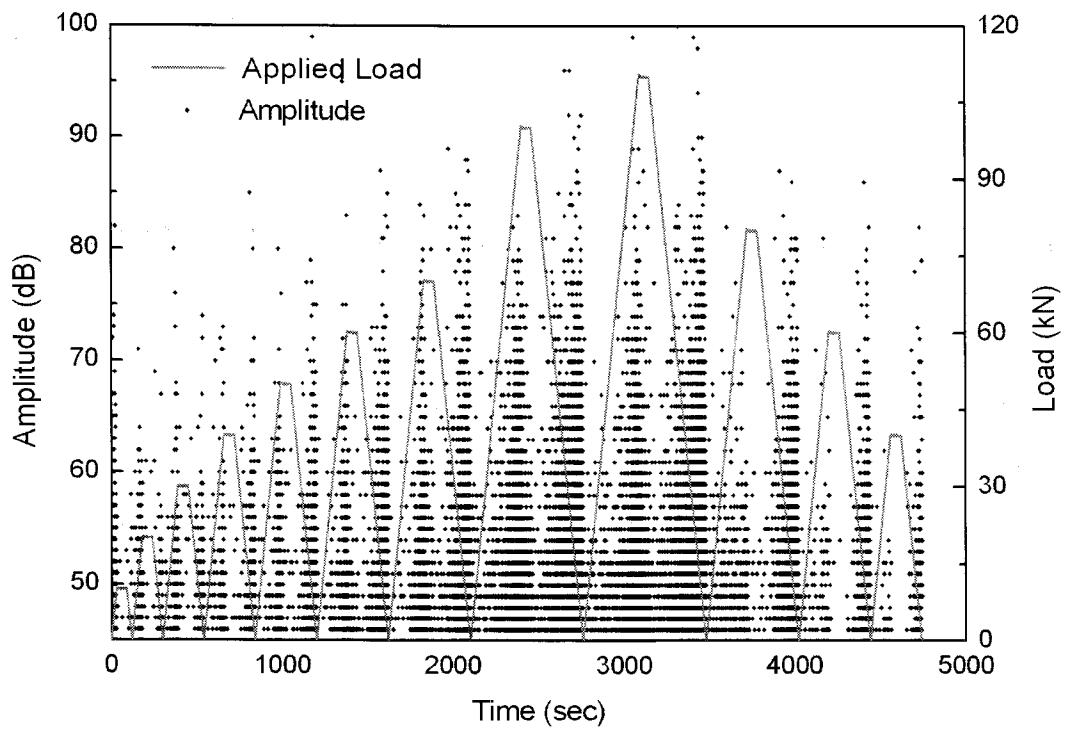


Fig. 2-90 AE amplitude at the slab center (CH.2 sensor) during the fracture test

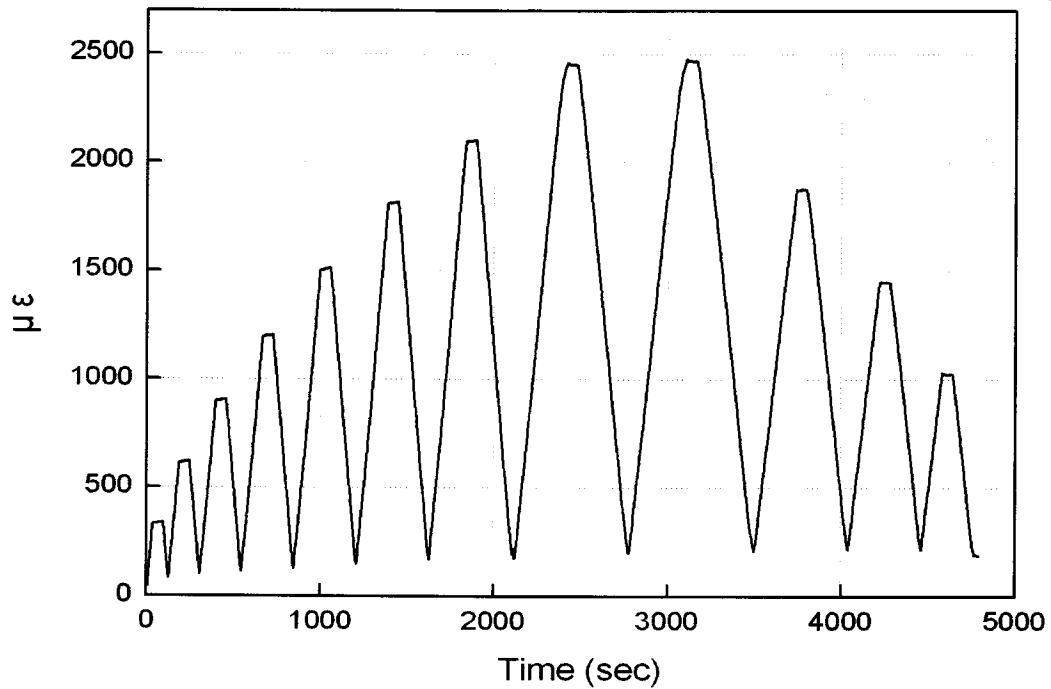


Fig. 2-91 Strain measurement for each stage

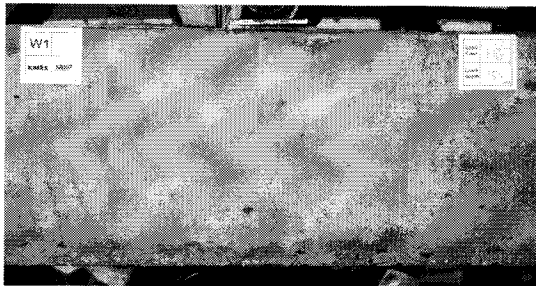


Fig. 2-92 Cracks at the initial stage

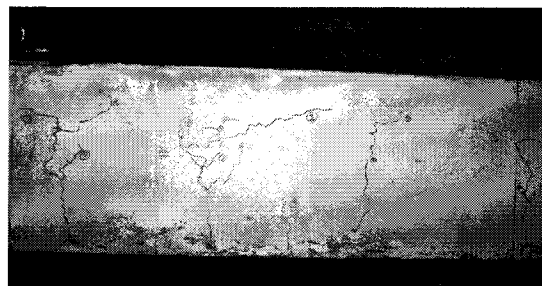


Fig. 2-93 Cracks at the last stage

Fig. 2-92와 Fig. 2-93은 Fig. 2-88 (b)와 같이 하중을 재하 함으로써 콘크리트 슬래브에 균열이 진전하는 양상을 나타내는 것으로 Fig. 2-92는 하중 초기 단계에서 슬래브의 중앙부 측면에서 균열이 생기기 시작하는 모습을 나타내는 사진이며 Fig. 2-93은 하중 마지막 단계에서 균열의 범위가 슬래브의 중앙에서 단부 쪽으로 확대되어 다수의 균열이 존재하는 시편의 모습을 나타내는 사진이다.

Fig. 2-94는 stage-1, stage-3, stage-5 그리고 110 kN의 최대하중을 받은 이후에 80 kN, 60 kN, 40 kN의 하중을 다시 한 번 부가했을 때의 stage-10, stage-11, stage-12 에서의 AE hit수와 하중변화를 함께 도시한 그림이다. stage-1 에서는 하

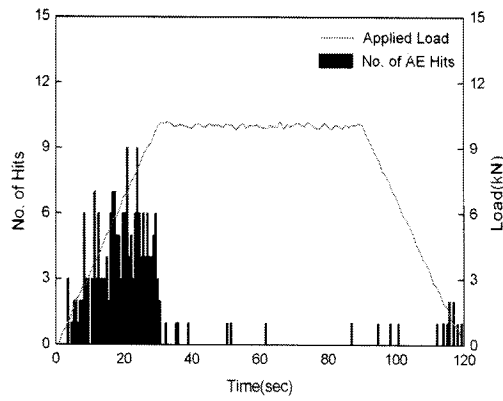
중을 재하 할 때가 제거할 때에 비해 AE 신호가 많이 나타났고 stage-3에서는 하중을 재하 할 때와 제거할 때 비슷한 AE 신호를 나타냈으며 stage-5 단계에서는 하중 재하 시 보다 하중 제거 시에 AE 신호가 현저히 많이 나온 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 초기에 하중을 재하 함으로써 전에는 없었던 새로운 균열이 생기면서 균열면간의 마찰에 의해 AE 신호가 발생했으며 점차 하중이 증가하면서 새로운 균열의 생성과 이미 존재하는 균열에 의한 균열면의 마찰에 의한 신호발생 빈도가 비슷해지면서 stage-3과 같이 하중 재하 시와 하중 제거 시에 비슷한 신호 발생율을 나타냈고 실험 후반부로 갈수록 하중 재하시의 새로운 균열의 생성 보다는 이미 발생한 균열의 마찰에 의한 신호의 발생으로 하중 제거 시에 더 많은 AE 신호가 발생한 것으로 사료된다.

이번 실험에서 추가로 진행한 stage-10, stage-11, stage-12를 살펴보면 세 단계 모두에서 하중 재하시보다 하중 제거시에 현저한 AE 신호 발생을 보였으며 하중의 크기를 80 kN에서 60 kN, 40 kN으로 감소시킴에 따라 하중의 범위가 작아지면서 신호 발생율도 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 하지만 하중 재하시는 최대 하중을 받기 전 stage와 비교 할 때 신호 발생율이 매우 낮게 나타남으로써 예상대로 일정 크기의 하중을 받은 이후에 다시 같은 크기의 하중을 받았을 때는 신호 발생 빈도가 상대적으로 적게 나타남으로써 이는 실제 건물의 주차장이나 슬래브 형식의 콘크리트 구조물에서 하중이력을 추정하거나 건전성을 평가하는데 매우 유용한 자료가 될 것이다.

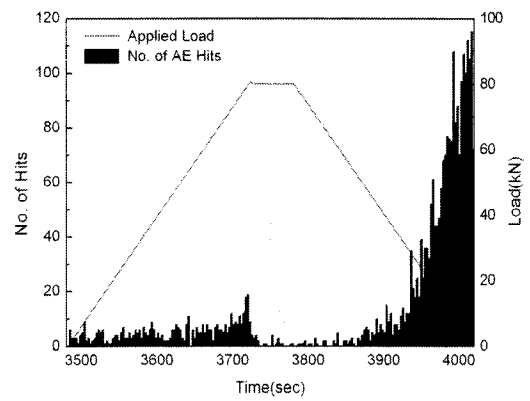
Fig. 2-95와 Fig. 2-96은 콘크리트 슬래브에서 센서위치에 따른 각 채널을 분석하기 위한 stage-6(60 kN)과 stage-11(60 kN-reload), stage-4(40 kN)와 stage-12(40 kN-reload)를 비교한 시간에 따른 하중변화와 AE 신호 발생율을 분석한 결과이다. CH.2는 슬래브의 중앙에 부착한 센서이며 CH.1과 CH.3은 단부에 부착한 센서이다. 각 단계에서 슬래브의 양 단부에 부착된 센서보다 중앙부에 부착된 센서에서 훨씬 많은 AE 신호율이 발생했는데 이는 실험을 통해 슬래브의 중앙부에 재하한 하중에 의한 균열의 활동과 밀접한 관련이 있는 것으로 보이며 콘크리트 시편의 특성상 휨 거동과 일치되어 발생하는 결과라고 할 수 있다. 또한 stage-4와 stage-6에서 하중 재하시에 CH.2와 CH.1,3의 AE 신호 발생율이 거의 비슷하게 발생하는 것은 휨 거동에 따라 중앙부에서 발생하기 시작한 균열이 점차 단부쪽으로 균열 범위가 확대되어 균열이 생성되고 있다는 것을 유추할 수 있었다.

반면 하중 제거시에 발생하는 secondary AE peak가 중앙부에서만 현저히 많이 발생하고 있으며 단부쪽에 위치한 CH.1, 3에서는 AE 신호율이 매우 작게 나타나는 것으로 보아 CH.2가 위치한 중앙부에서 손상의 정도가 심하다는 결과를 입증할 수 있었다. 따라서 하중의 증가와 감소시에 나타나는 신호의 발생 빈도를 상대적으로 비교함으로써 균열의 활동성을 평가할 수 있음을 시사하고 있다.

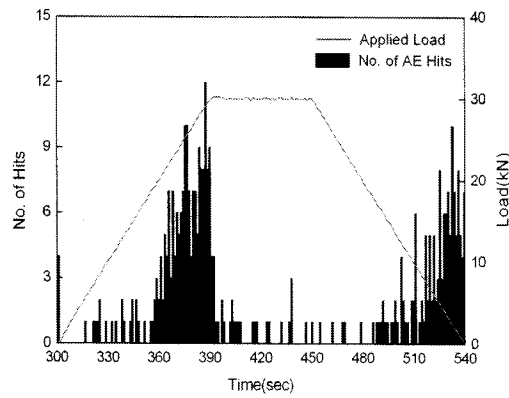
Fig. 2-97~Fig. 2-102는 stage-1, stage-3, stage-5 그리고 stage-10, stage-11, stage-12의 CH.2에서 나타난 AE 신호를 duration과 amplitude의 관계를 cross plot로 나타낸 그림이다. 또한, Fig. 2-103~Fig. 2-108은 stage-1, stage-3, stage-5 그리고 stage-10, stage-11, stage-12의 CH.2에서 나타난 amplitude 와 AE energy를 cross plot으로 나타낸 그림이다. 각 stage에서 좌측 상단의 그림은 전체 신호를 도시한 것이고, 우측 상단의 그림은 하중을 인가할 때, 좌측하단의 그림은 휴지기(holding time)동안 발생한 신호를, 우측하단의 그림은 하중을 제거할 때 발생한 신호를 나타내는 것이다. 이를 고찰하여 보면 stage-1에서는 하중을 제거할 때 보다 하중을 인가할 때에 AE 신호가 많이 나타나고 있으며 하중을 제거할 때 AE 신호가 거의 나타나지 않고 있음을 볼 수 있었다. 또한 30 kN의 하중을 준 stage-3에서는 하중을 인가할 때와 제거할 때에 신호 발생 빈도가 거의 비슷한 수준을 나타냈으며 이보다 더 큰 50 kN을 재하 시킨 stage-5에서는 하중을 인가할 때 보다 하중을 제거할 때에 큰 신호들이 훨씬 많이 발생하였다. 하중을 제거할 때 신호가 많이 나옴으로써 앞에서 언급한 hit 발생 분석과 함께 시편의 손상 정도를 유추할 수 있었다. 또한 80 kN, 60 kN, 40 kN의 하중을 reload 시킨 stage-10, stage-11, stage-12에서는 하중 재하 시 하중의 크기를 감소시킴에 따라 신호의 발생율도 적어졌지만 하중 제거 시에 여전히 큰 신호들이 많이 나타나고 있음을 관찰할 수 있었다.



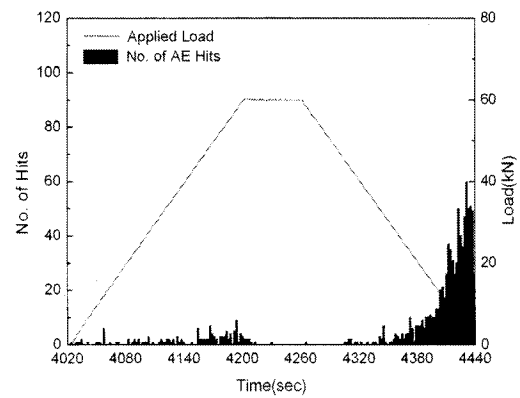
(a) Stage-1 (10 kN)



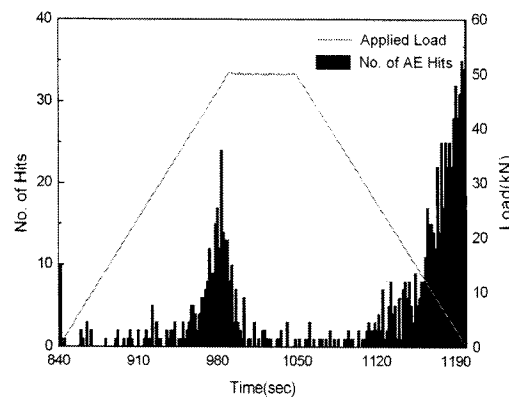
(d) Stage-10 (80 kN-reload)



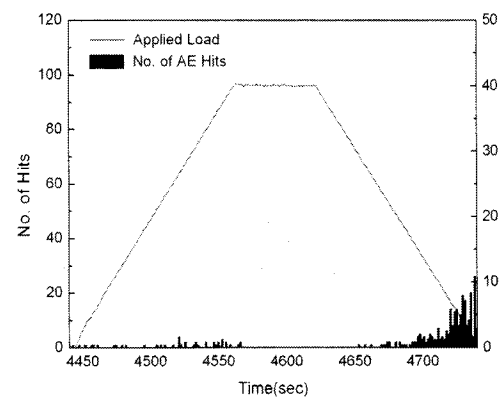
(b) Stage-3 (30 kN)



(e) Stage-11 (60 kN-reload)

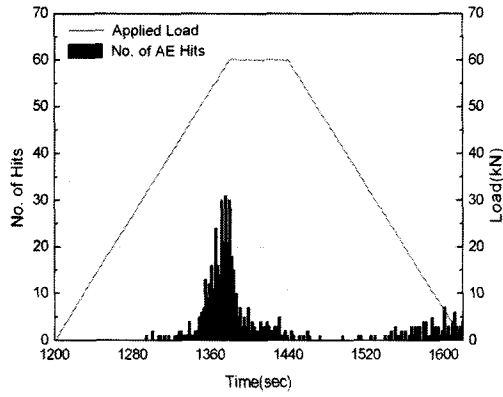


(c) Stage-5 (50 kN)

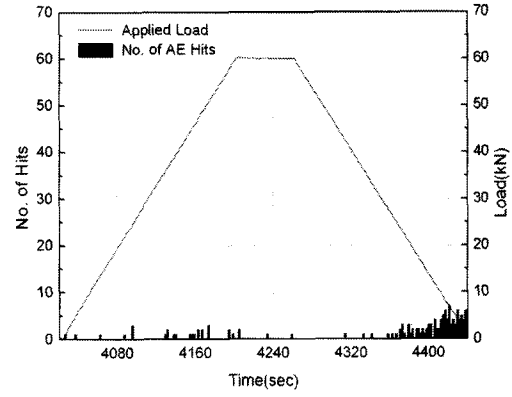


(f) Stage-12 (40 kN-reload)

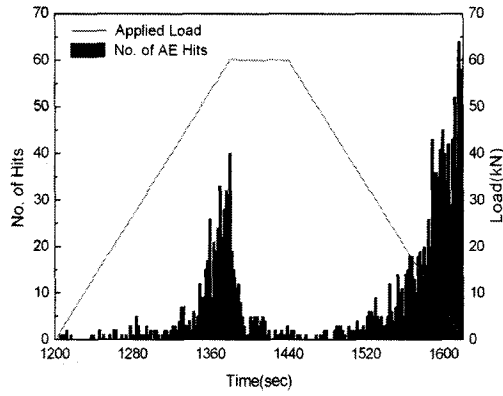
Fig. 2-94 AE hit occurrence pattern during test



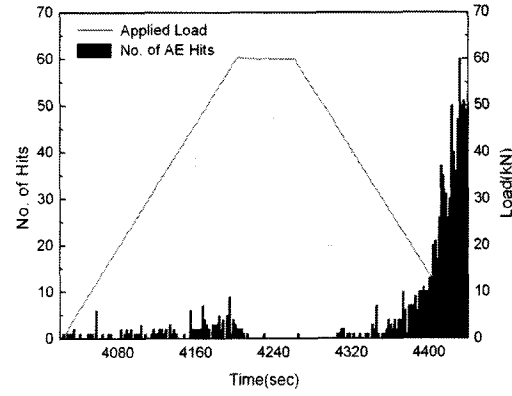
(a) CH.1 (stage-6)



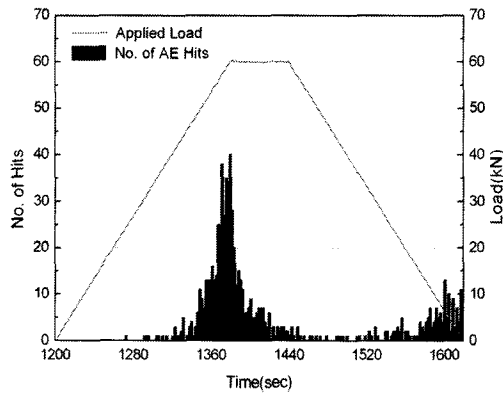
(d) CH.1 (stage-11)



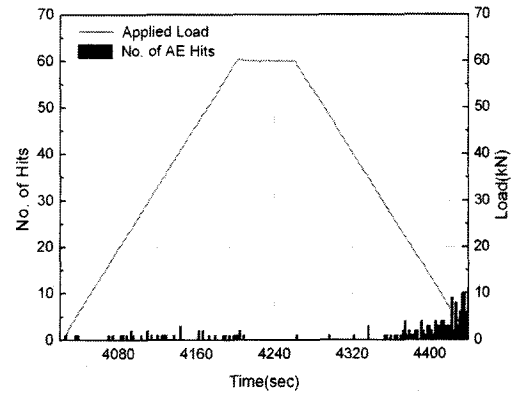
(b) CH.2 (stage-6)



(e) CH.2 (stage-11)

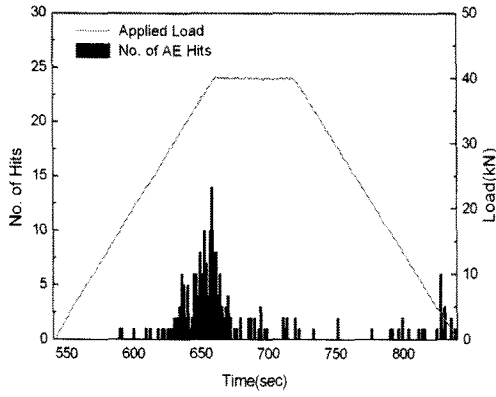


(c) CH.3 (stage-6)

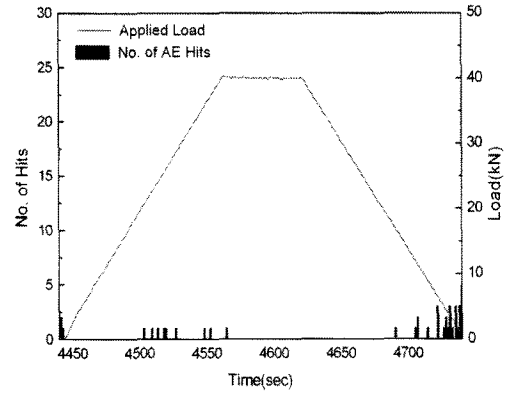


(f) CH.3 (stage-11)

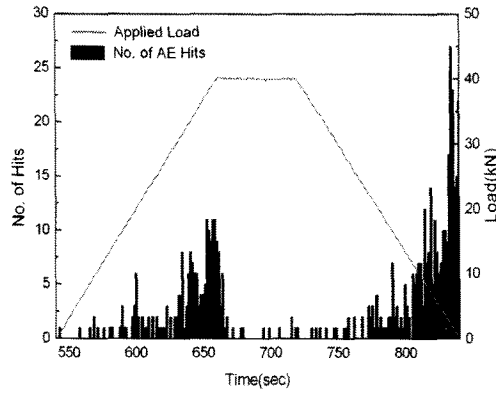
Fig. 2-95 Comparison of AE hit occurrence depending of sensor location
stage-6 (60 kN) & stage-11 (60 kN reload)



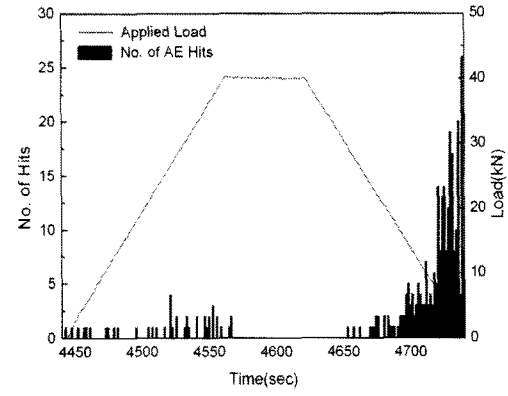
(a) CH.1 (stage-4)



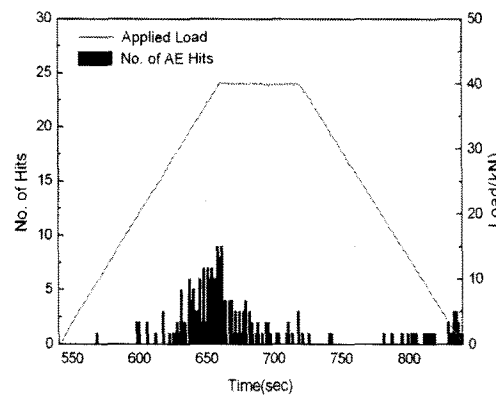
(d) CH.1 (stage-12)



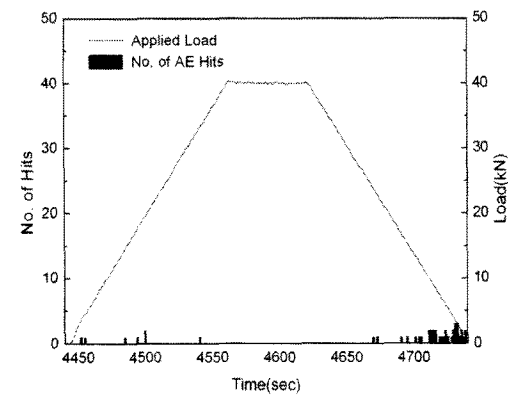
(b) CH.2 (stage-4)



(e) CH.2 (stage-12)



(c) CH.3 (stage-4)



(f) CH.3 (stage-12)

Fig. 2-96 Comparison of AE hit occurrence depending of sensor location
stage-4 (40 kN) & stage-12 (40 kN reload)

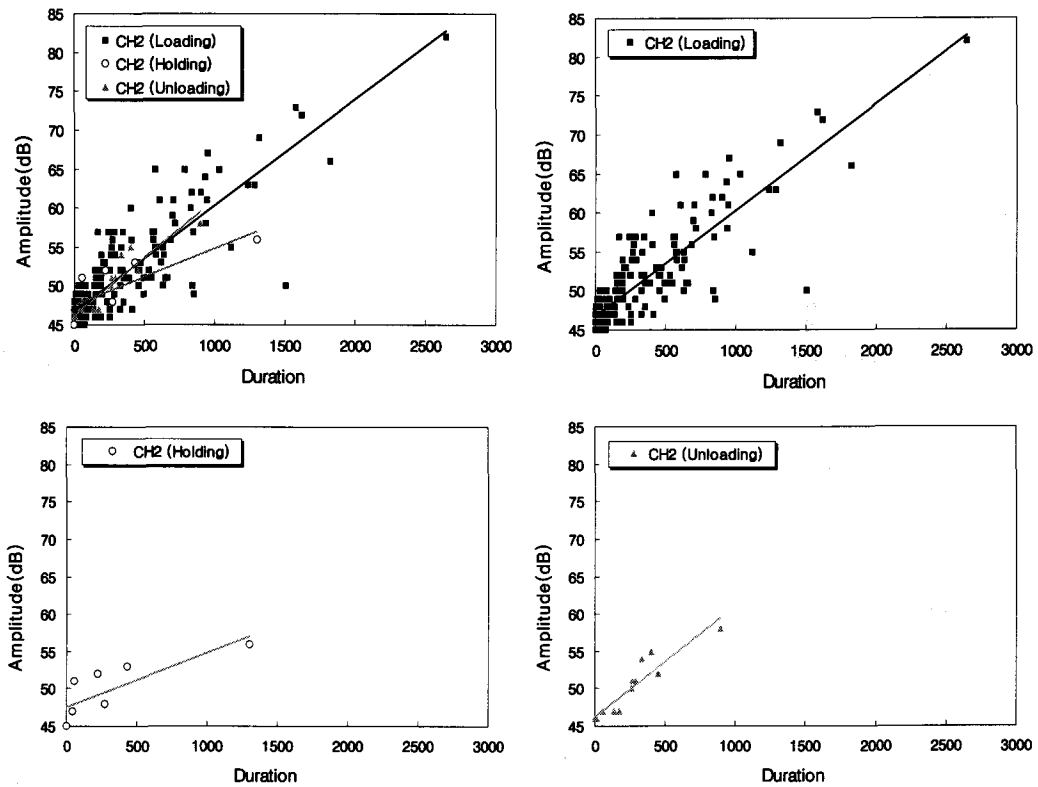


Fig. 2-97 Cross plot of duration vs. amplitude (stage-1 / 10 kN)

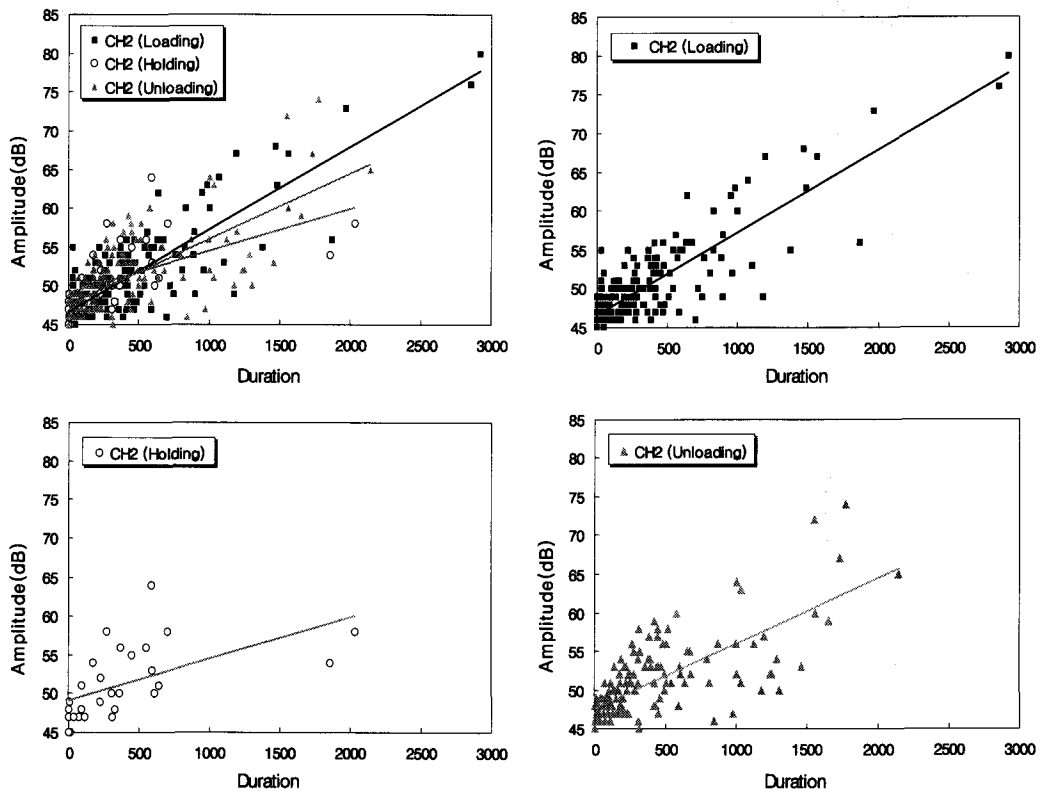


Fig. 2-98 Cross plot of duration vs. amplitude (stage-3 / 30 kN)

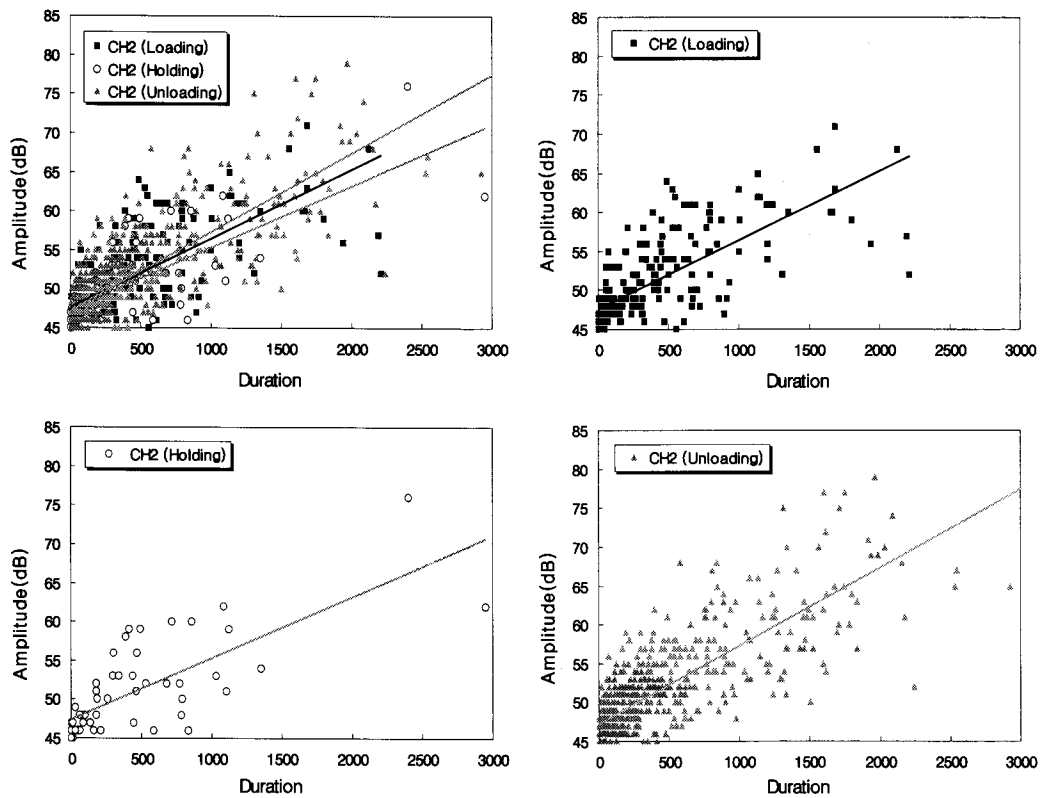


Fig. 2-99 Cross plot of duration vs. amplitude (stage-5 / 50 kN)

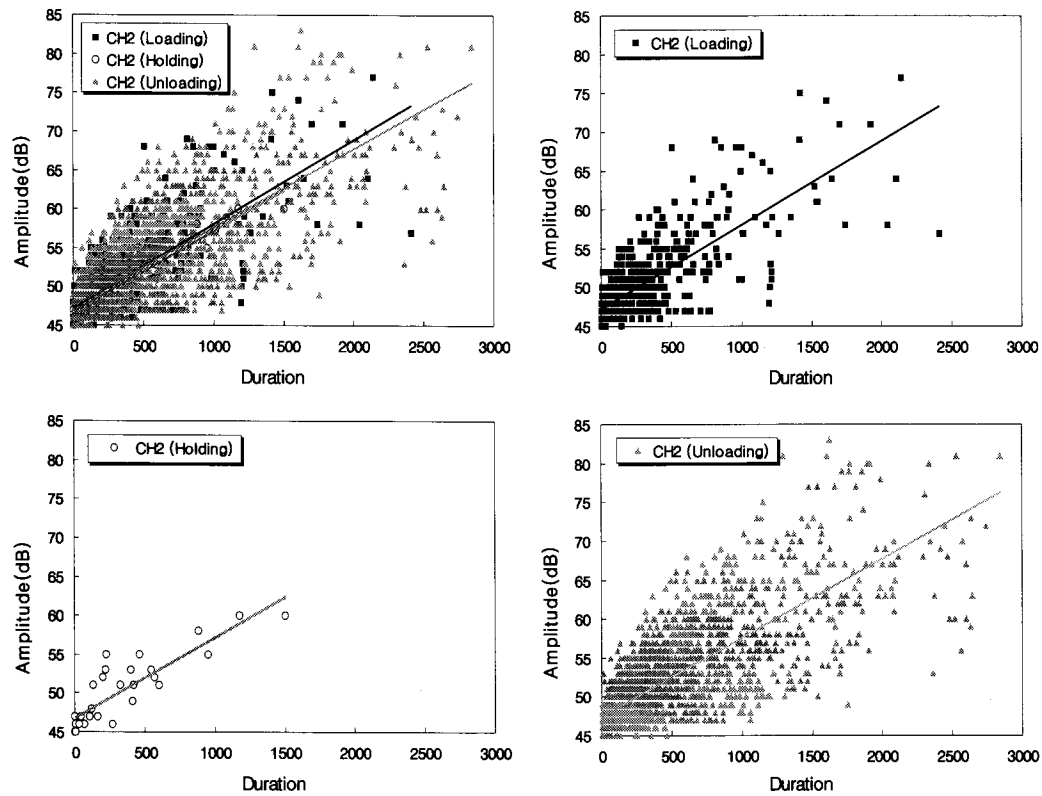


Fig. 2-100 Cross plot of duration vs. amplitude (stage-10 / 80 kN reload)

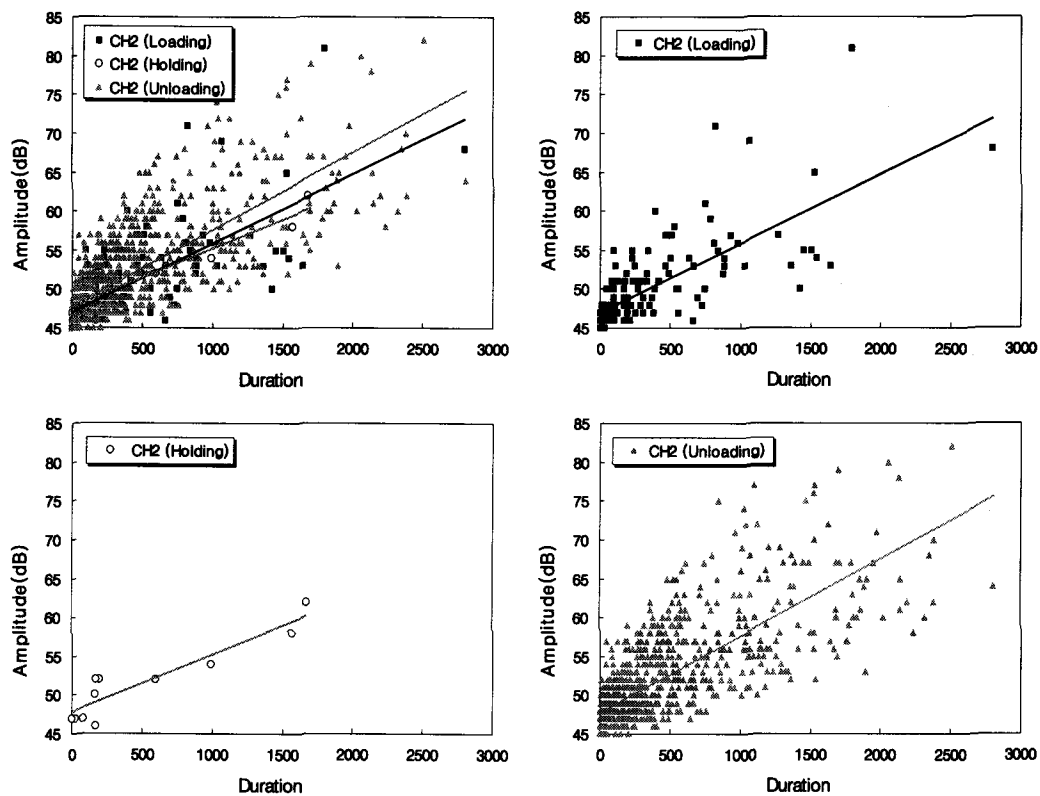


Fig. 2-101 Cross plot of duration vs. amplitude (stage-11 / 60 kN reload)

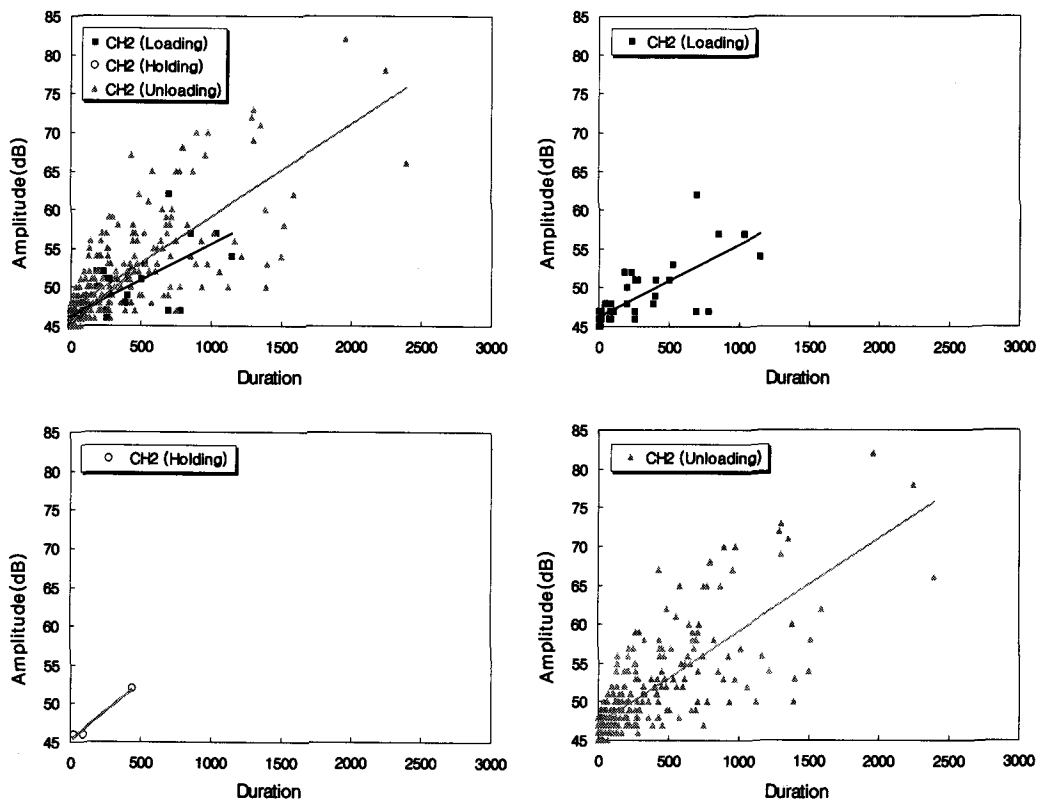


Fig. 2-102 Cross plot of duration vs. amplitude (stage-12 / 40 kN reload)

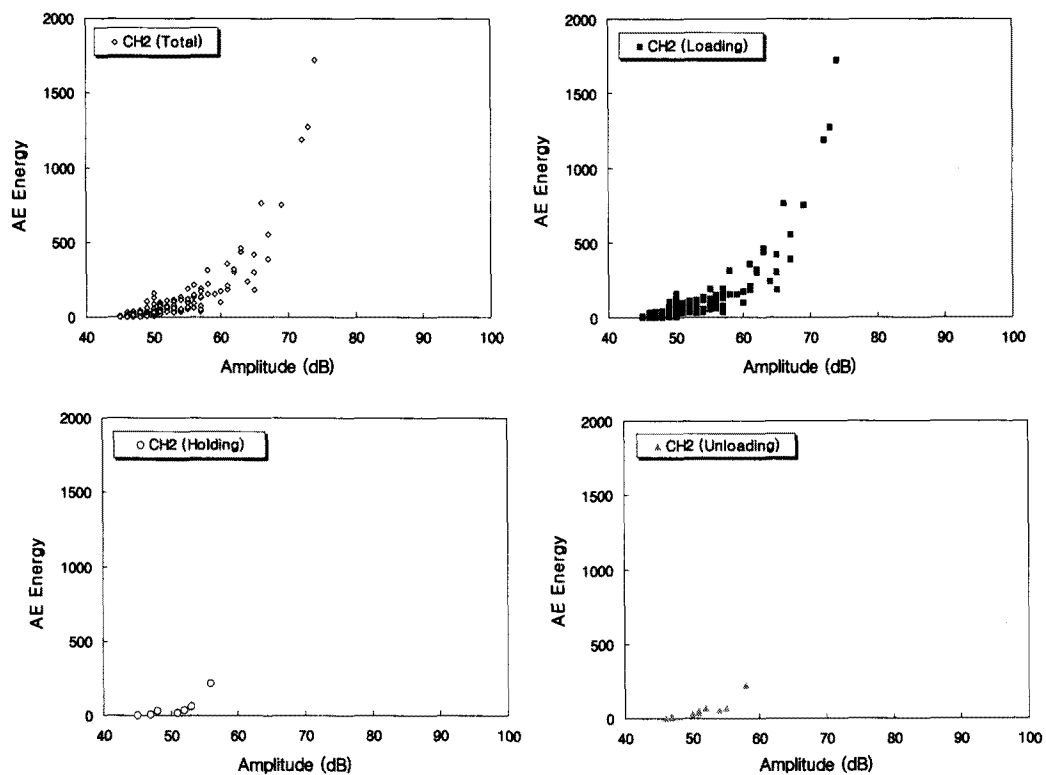


Fig. 2-103 Cross plot of amplitude vs. AE energy (stage-1 / 10 kN)

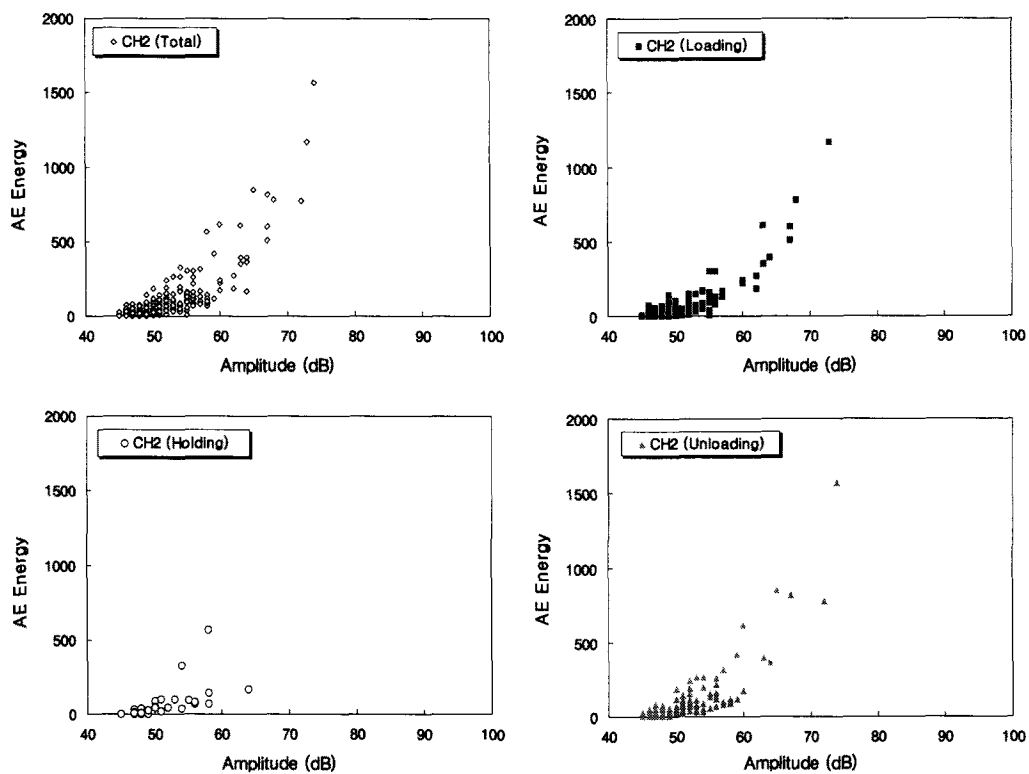


Fig. 2-104 Cross plot of amplitude vs. AE energy (stage-3 / 30 kN)

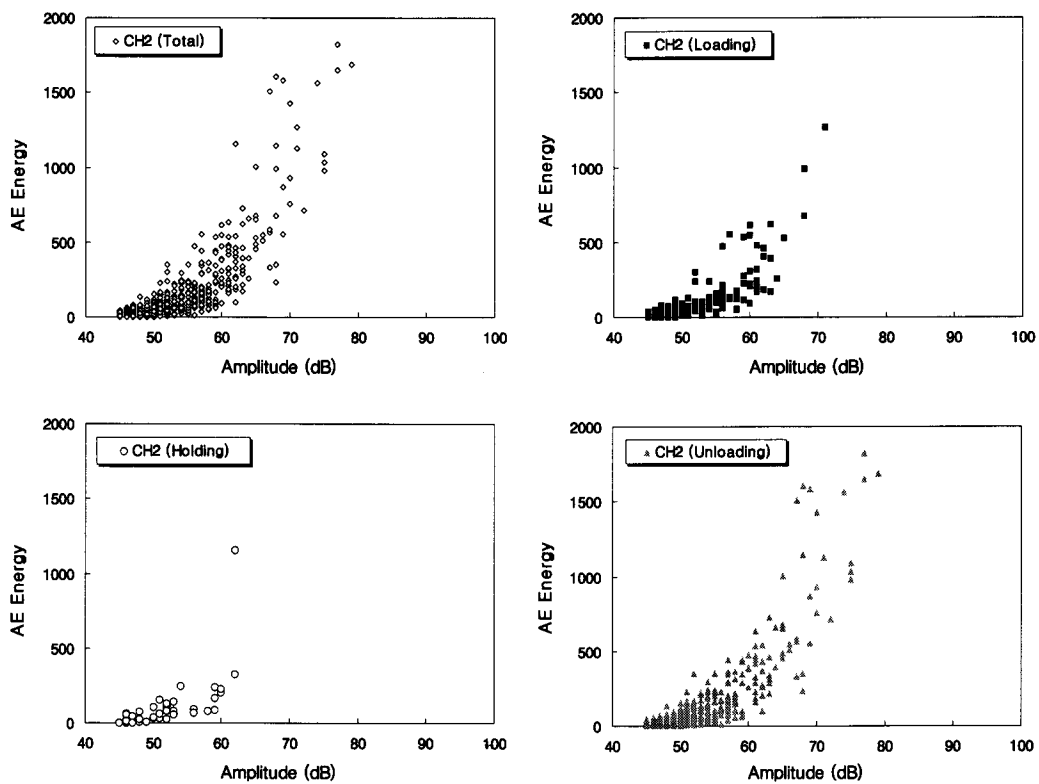


Fig. 2-105 Cross plot of amplitude vs. AE energy (stage-5 / 50 kN)

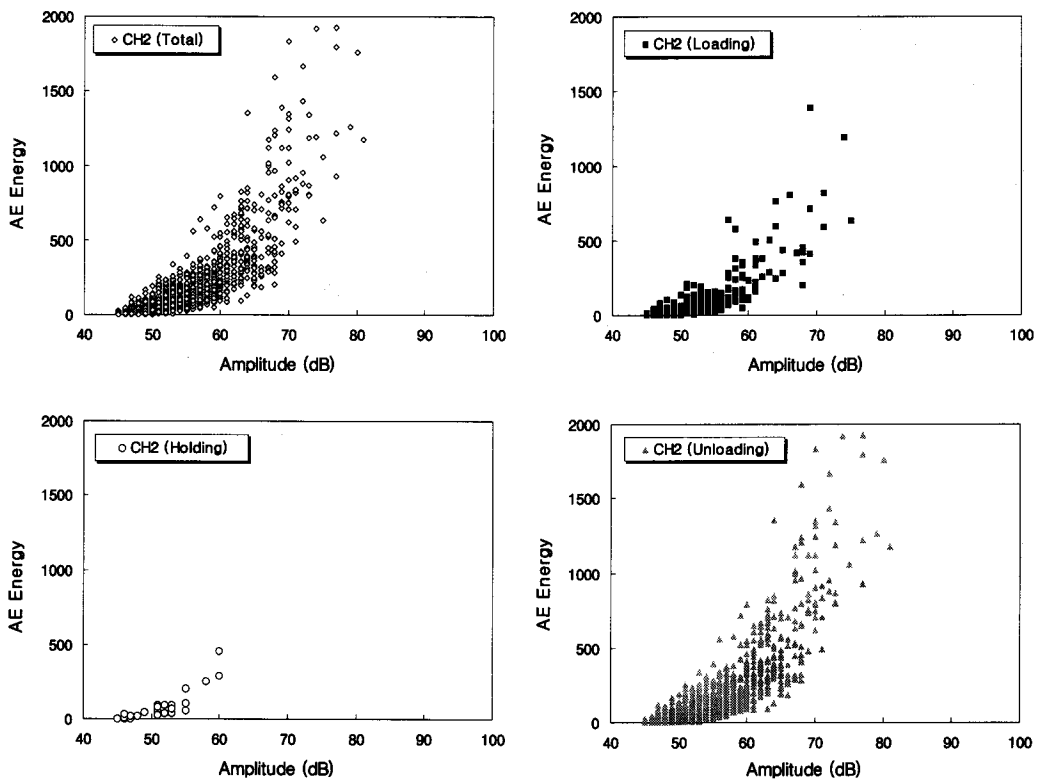


Fig. 2-106 Cross plot of amplitude vs. AE energy (stage-10 / 80 kN)

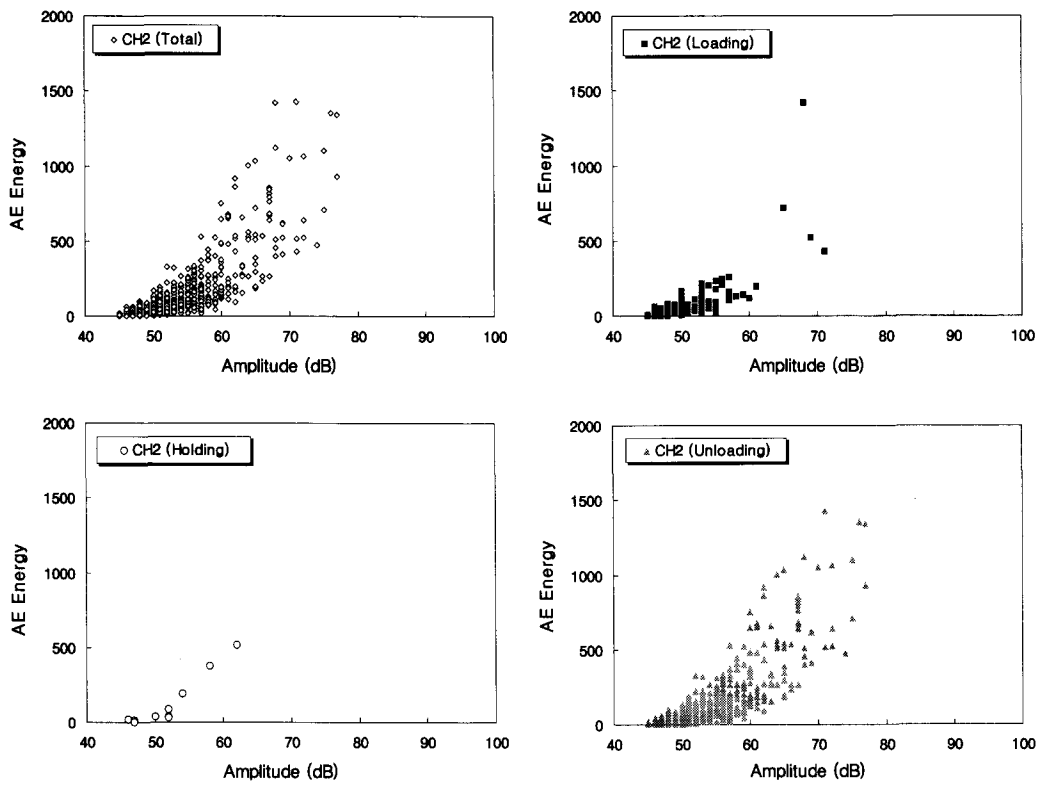


Fig. 2-107 Cross plot of amplitude vs. AE energy (stage-11 / 60 kN)

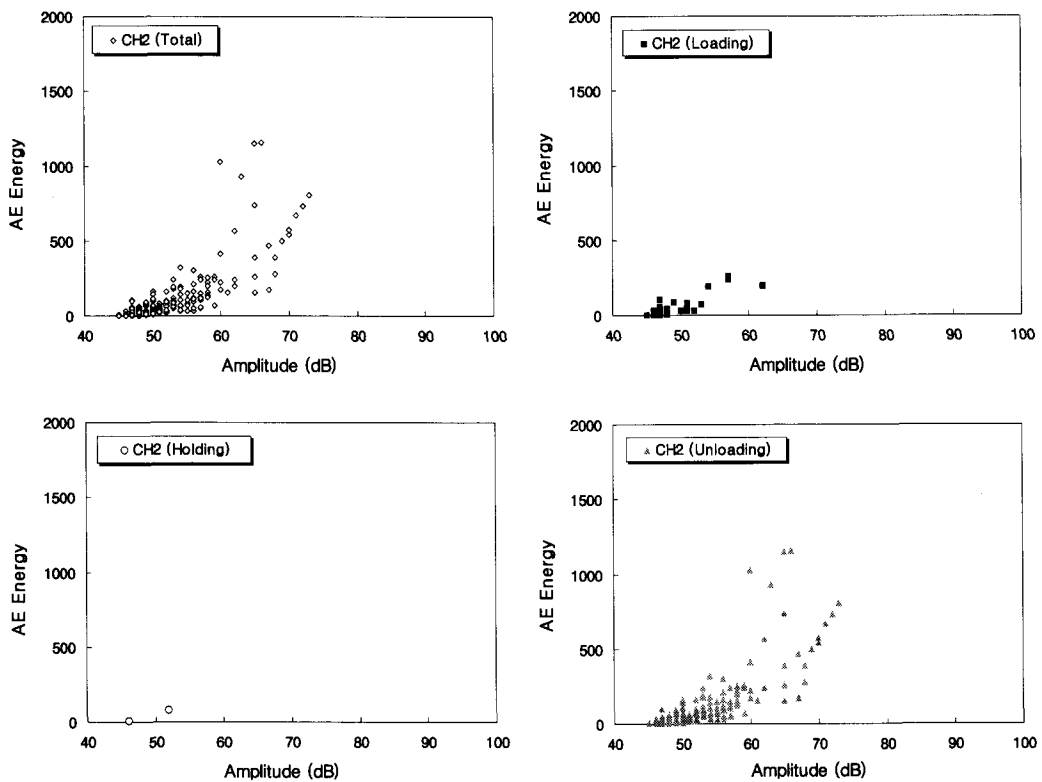


Fig. 2-108 Cross plot of amplitude vs. AE energy (stage-12 / 40 kN)

Fig. 2-109는 stage-1, stage-3, stage-5의 CH.2에서 발생한 시간에 따른 rise time과 하중과의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 2-110은 시간에 따른 count와 하중과의 관계를 나타낸 것이다. 또한 Fig. 2-111은 시간에 따른 AE energy와 하중과의 관계를, Fig. 2-112는 시간에 따른 하중과 amplitude의 관계를 보여주고 있다. 이를 살펴보면 각 그림의 stage-1에서는 하중이 재하될 때 AE 신호가 많이 발생하고 있고, stage-3에서는 하중의 재하시와 제거시에 비슷한 정도의 AE 신호가 발생하고 있으며, stage-5에서는 하중 제거시에 AE 신호가 많이 발생하였다. 이는 앞서 언급한 AE hit 분석과 거의 일치되는 결과를 보여줌으로써 음향방출 신호를 이용하여 콘크리트의 건전성을 평가하는데 있어 하중에 대한 AE hit 분석 뿐 만 아니라 rise time, duration, count, AE energy, amplitude 등의 인자들과 같은 AE parameter를 이용함으로써도 AE 신호 분석에 있어 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 2-113은 하중이 인가될 때(loading)의 AE hit수와 휴지기(holding)시의 AE hit수, 그리고 하중이 제거될 때(unloading)의 AE hit수를 각 stage 단계별로 도시한 그림이다. 3단계까지는 loading의 AE hit수가 holding, unloading보다 약간 많거나 비슷한 경향을 보이거나 4단계부터는 unloading시의 AE hit 수가 holding, unloading시보다 훨씬 증가하는 경향을 보였다. 이는 이미 두 번의 하중을 받은 시편에 대해 같은 크기의 하중을 재하함으로써 새로운 균열의 생성 속도가 둔화되었으며 unloading시 AE hit수가 많은 것은 이미 생성된 균열의 닫힘에 의한 마찰에 의한 것으로 사료된다. stage-8에서 loading시와 unloading시에 급격히 AE hit수가 증가한 것은 전에 받았던 하중의 크기를 초과한 새로운 크기의 하중을 재하함으로써 새로운 균열이 생성되고 이들의 닫힘 현상도 계속적으로 증가하기 때문에 unloading시에도 AE hit수가 증가한 것으로 보인다. 역시 reload 단계인 stage-10, 11, 12에서도 unloading 시의 AE hit수가 여전히 많이 나타남으로써 앞서 언급한 손상정도를 유추할 수 있음을 다시 한번 보여주고 있다.

Fig. 2-114는 하중변화에 따른 각 stage의 AE hit ratio를 도시한 그림으로 여기서 ratio는 전 단계의 AE hit 수와 현 단계의 AE hit수의 비를 의미하는 것이다. level 1은 2단계의 AE hit 수를 1단계의 AE hit 수로 나눈 값으로 그 값을 1을 기준으로 분석하였다. 또한 stage-9, 10, 11은 80kN, 60kN, 40kN의 하중을 다시 한번 재하시킨 reload 단계로써 이들의 비교는 무의미하기 때문에 reload 단계 이전의 하중 재하시 받은 같은 크기의 하중보다 한 단계 적은 단계를 비교하여 나타내었

다. 즉, stage level-9는 stage-10(reload-80kN)과 stage-7(70kN)의 AE hit 수의 비, stage level-10은 stage-11(reload-60kN)과 stage-5(50kN)의 AE hit 수의 비, stage level -11은 stage-12(reload-40kN)와 stage-3(30kN)의 AE hit 수의 비를 나타낸 것이다.

여기서 주목할 만 한 점은 reload 단계에서의 loading시에는 모두 1보다 작은 값을 나타내고 unloading시에는 모두 1보다 큰 값을 나타내었다. 이를 고찰하여 보면 loading시 일정 크기의 하중을 받고 난 뒤에 그와 비슷하거나 약간 더 큰 하중을 받을지라도 그 이후에는 AE hit 수의 발생비율이 현저히 줄어드는 경향을 보이지만 그만큼 손상을 받은 이후의 unloading시에는 ratio가 1보다 모두 큰 값을 나타내며 AE hit 수가 처음 하중을 받을 때 보다 훨씬 많이 발생하는 결과를 통해 실제 교량과 같은 구조물의 손상 정도를 파악할 때 매우 유용한 정보로 활용할 수 있으리라 사료된다.

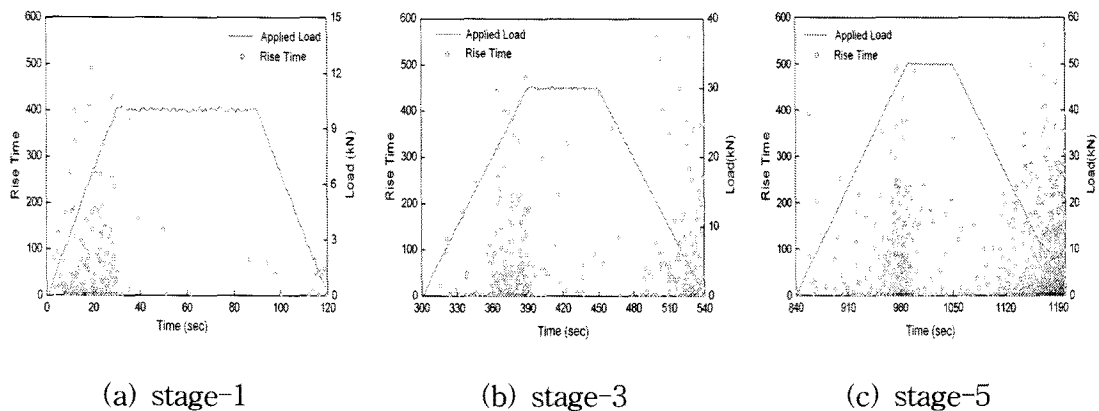


Fig. 2-109 Rise time vs time at channel 2

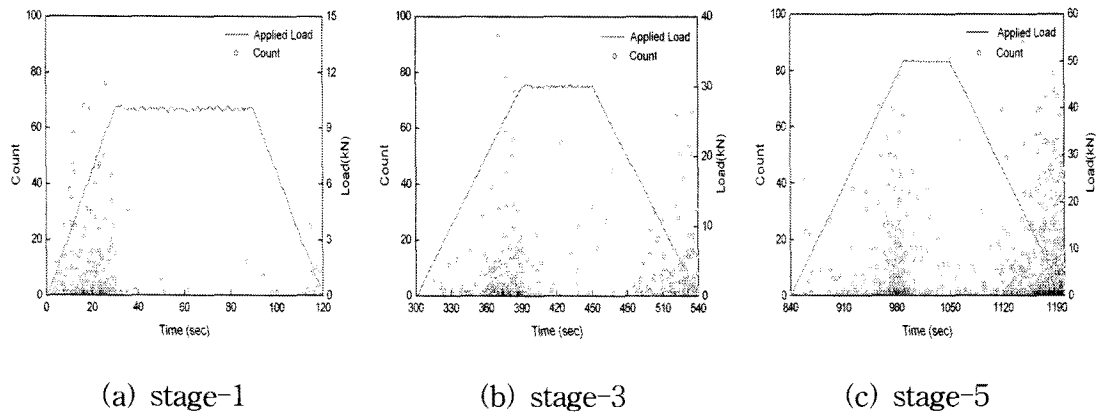


Fig. 2-110 Count vs time at channel 2

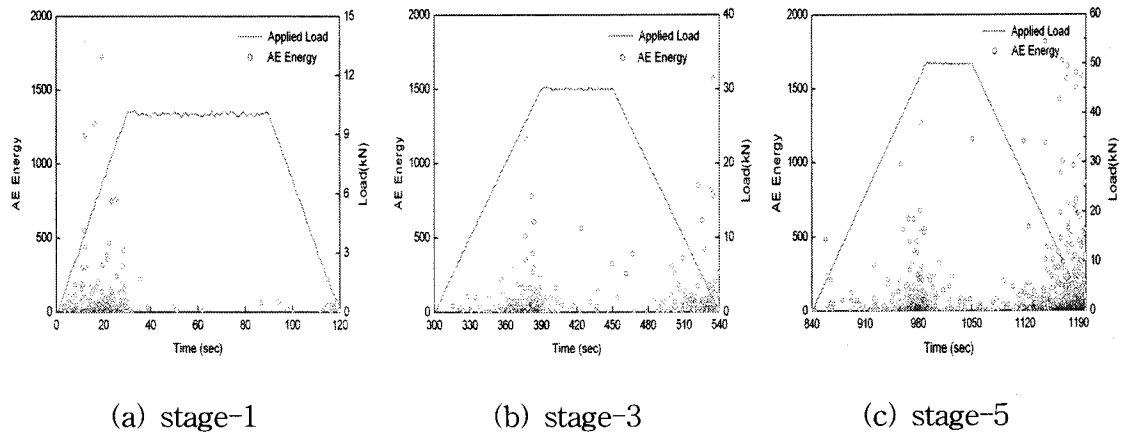


Fig. 2-111 AE Energy vs time at channel 2

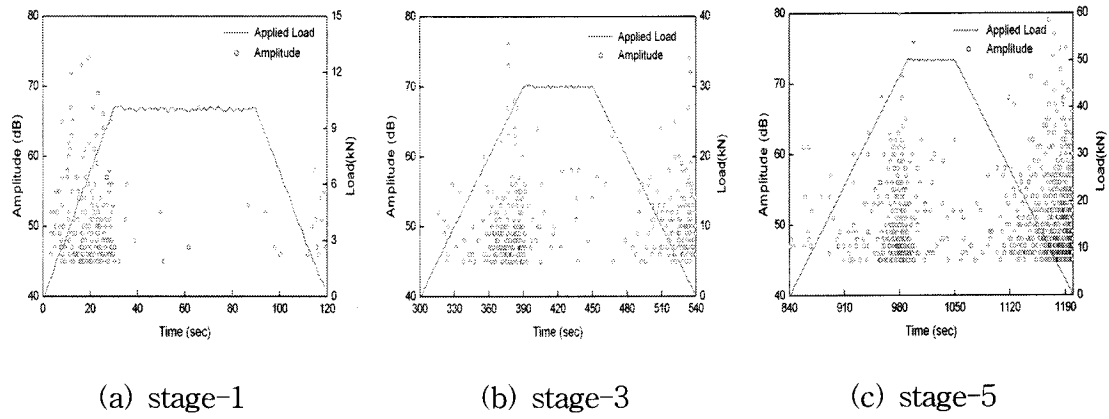


Fig. 2-112 Amplitude vs time at channel 2

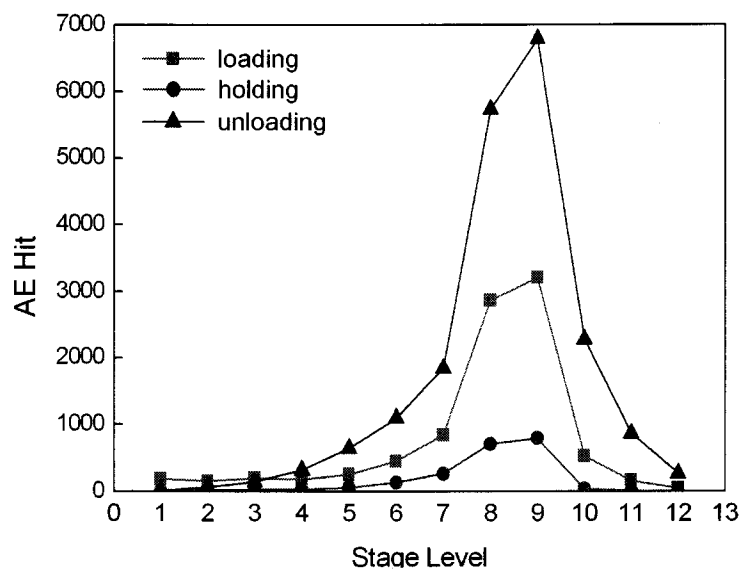


Fig. 2-113 Comparison AE hit at each stage depending on load change

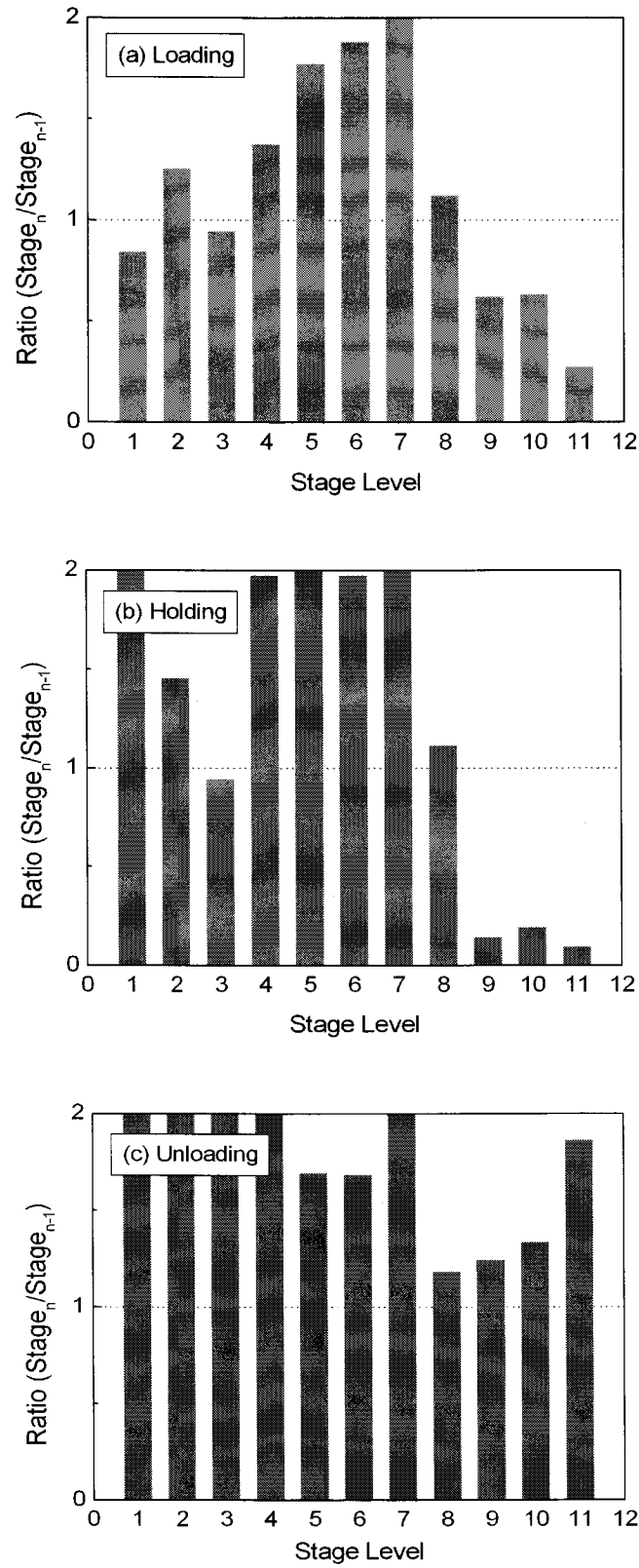
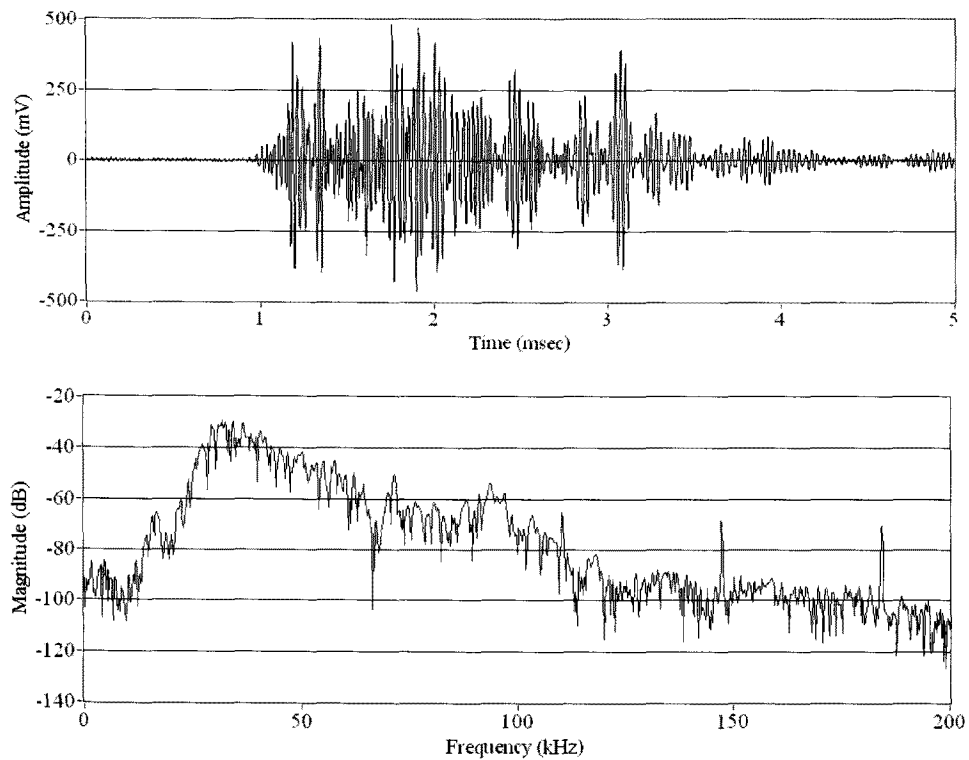
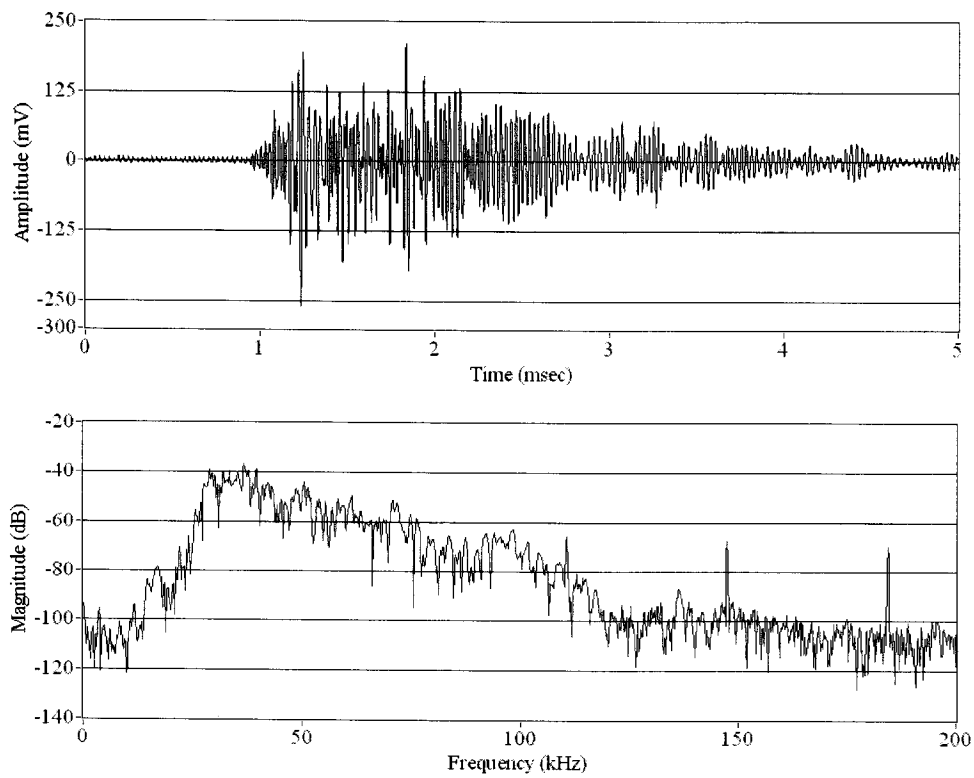


Fig. 2-114 AE hit ratio at each stage depending on load change

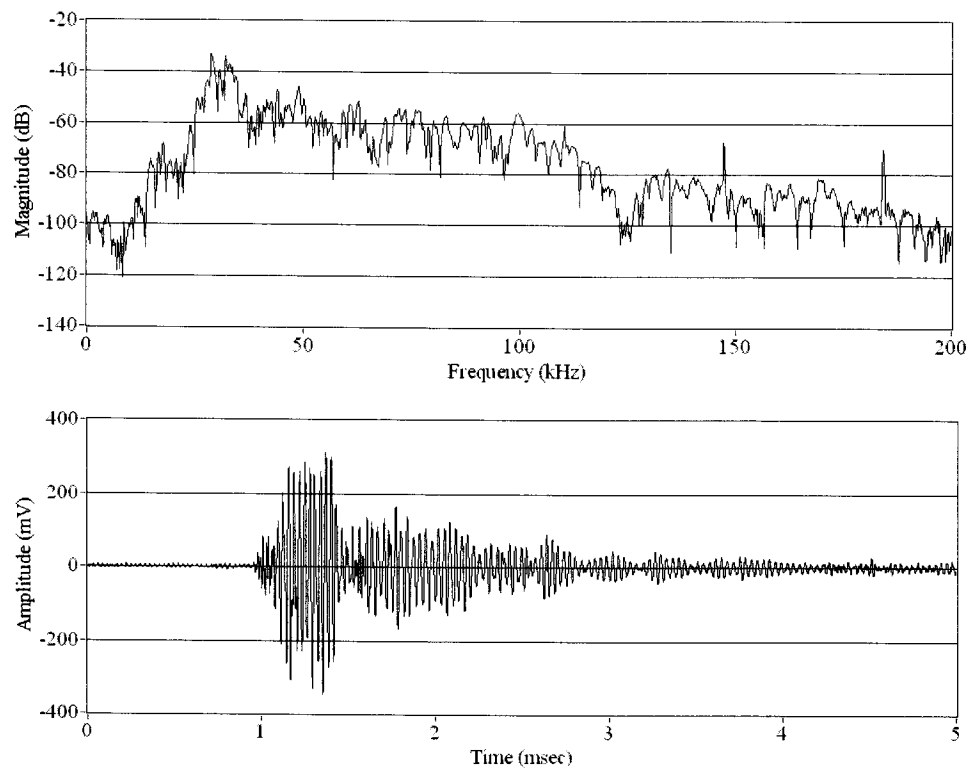
Fig. 2-115는 콘크리트 시편에 부착된 CH.2 센서로부터 수신된 균열발생에 대한 AE 파형을 나타낸 그림이며 (a) loading, (b) holding, (c) unloading시의 주파수 스펙트럼, Fast Fourier Transform(FFT)의 결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 수신된 신호들은 대체로 공진 특성을 나타내며 30~100 kHz 근방의 성분을 가지는 주파수 특성을 보였으며 센서위치로부터 신호발생원까지의 거리가 짧아 고주파수의 감쇠가 비교적 덜 된 것으로 보였다.



(a) loading (stage-8 / 100 kN)



(b) holding (stage-7 / 70 kN)



(c) unloading (stage-7 / 70 kN)

Fig. 2-115 Typical AE waveform & spectrum(FFT) for each loading condition

6. 음향방출 파라미터 추출 및 손상평가 알고리즘

가. 개 요

음향방출을 이용한 콘크리트 구조물의 상시감시는 파손이 우려되는 부위에 음향방출 센서를 설치하고 지속적으로 신호 발생 경향을 감시(monitor)하여 위험이 감지되면 경고를 할 수 있는 방식이다. 그러나 콘크리트의 경우 앞서 실험결과에서도 알 수 있듯이 안전에 문제가 없는 정상적인 재하상황에서도 일정한 수준의 음향방출이 발생되므로 단순히 신호의 발생이라는 사실만으로는 안전성에 대한 평가가 어려우며, 따라서 정상 거동 하에서 발생하는 음향방출 신호인 정상신호와 손상의 진전이나 파괴가 임박했을 때 발생하는 이상신호를 구분하여 줄 필요가 있다.

안전진단 방식에 음향방출 기술을 적용하는 경우, 정기적 또는 비정기적으로 행하는 구조물 정밀 안전 진단시에 재하시험 등을 통해 음향방출 신호패턴을 파악하고 이로부터 대상구조물의 건전성을 평가하는 방식이다. 이 경우 손상유형별 음향방출 신호패턴에 대한 데이터베이스가 필요하며 현장 상황에 적합한 음향방출 시스템의 개발이 필요하다.

현재 제품화되어 있는 음향방출 검출 시스템(AE detection system)은 일반적으로 알려진 음향방출 파라미터, 즉 파형의 기본적인 정보만을 제공하며 그 결과에 대한 평가는 전적으로 사용자가 판단하고 있다. 그러나 음향방출 신호에 대한 분석 및 평가에는 재료 및 음향방출에 대한 전문가적 지식이 요구되는 분야이므로 상시감시나 안전진단을 통한 위험감지를 현실화하기 위해서는 자동화된 평가기법의 개발 및 이를 구현하는 음향방출 시스템과 운영 소프트웨어의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 실험을 통하여 다양한 하중상태에서의 음향방출 신호패턴을 취득하여 분석한 결과 정상신호와 이상신호를 구분할 수 있는 요인들을 확인하였다. 본 절에서는 이를 근거로 정상신호와 이상신호를 구분할 수 있는 요인들을 AE key parameter라는 이름으로 제시하고 이 인자들에 대한 평가기준 및 평가알고리즘을 제시하였다. 또한 이를 이용한 콘크리트 건전성 평가절차를 제시하였다.

나. 철근 콘크리트 빔의 손상평가를 위한 AE key parameters

실험을 통해서 얻어진 콘크리트에서의 음향방출 정상신호와 이상신호의 차이는 다음의 세 가지로 정리할 수 있다.

- ① 하중 증가시와 하중 감소시의 음향방출 거동의 비교
- ② 가해진 하중에 대한 신호발생율의 변화추이
- ③ 보 중앙부와 단부의 신호발생율의 변화

이러한 차이를 평가하기 위해서는 하중을 기준으로 하는 채널별 신호발생율 및 primary and secondary AE hit를 수치화하고 이를 평가할 인자(parameter)들을 설정할 필요가 있다. 일반적인 음향방출 검출 시스템에서 제시하는 AE parameter는 하나의 돌발형 신호(AE hit)를 기준으로 각 돌발형 신호에 대한 발생시간(time), 첨두진폭(peak amplitude), 오름시간(risetime), 지속시간(duration), count(number of AE counts) 등의 인자들로서 돌발형 신호의 파형에 대한 간략한 정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 이러한 AE parameter를 이용하여 정상신호와 이상신호를 판단하기 위하여 부가하중을 기준으로 하는 새로운 인자들을 제시하고자 하며 이를 콘크리트 건전성 평가를 위한 AE key parameters라 칭하였다.

다양한 하중조건하에서 발생하는 음향방출 신호를 이용하여 콘크리트의 건전성을 평가하기 위해서는 가해진 각각의 하중에 대하여 발생한 음향방출 거동에 대한 정보를 수집하는 것이 가장 기본적인데, 이렇게 하기 위해서는 음향방출 신호의 취득과 함께 가해진 하중에 대한 정보를 동시에 취득할 필요가 있다. 하중에 대한 정보는 다양한 방법으로 대상부재의 역학적 거동을 측정하거나 가해진 하중을 직접 측정하는 방법이 있을 수 있다. 하중조건에 대한 통제가 가능한 실내실험의 경우라면 하중계(load cell)를 사용할 수 있으며, 하중의 직접측정이 불가능한 현장실험의 경우라면 역학적 거동을 가장 잘 반영할 수 있는 위치에 변형률계(strain gauge)나 변위계 등을 부착하여 이 신호를 AE system에서 AE 신호와 함께 동시에 받을 수 있도록 하여야 한다. 이렇게 취득된 하중신호는 AE key parameter의 추출과 평가의 기준이 된다. 한편 대상구조물의 구조형식과 규모에 따라 하중에 대한 측정값의 의미는 달라지므로 이를 일반화하기 위해서는 하중 측정값을 설계극한하중을 기준

으로 무차원화 하는 것이 적절할 것으로 생각된다. 가해진 하중에 대한 정보를 대 표하는 값으로 본 연구에서는 다음과 같은 무차원화된 인자를 제안하고자 한다.

$$\circ \text{Load Ratio (하중비)} : LR = \frac{\Delta L}{L_f} = \frac{L_p - L_v}{L_f}$$

여기에서, L_p : 최대하중

L_v : 최소하중

ΔL : 하중범위 = $L_p - L_v$

L_f : 설계극한하중

하중의 측정으로부터 1회의 재하(one loading cycle)가 감지되면 재하의 시작과 끝 그리고 최대하중의 발생시간이 기록되며 그 시간동안에 발생한 신호들에 대한 AE key parameter의 분석을 하게 된다. 본 연구에서는 1회의 재하 및 주기재하에 대한 음향방출 거동의 평가를 위하여 다음과 같은 AE key parameter를 제안하고자 한다.

◦ AE hit 분석을 위한 AE key parameter

◦ Primary AE hit : $H_i = \Sigma hits$ during load increasing

- 하중이 증가하는 동안에 발생한 AE hit의 수

◦ Secondary AE hit : $H_d = \Sigma hits$ during load decreasing

- 하중이 감소하는 동안에 발생한 AE hit의 수

◦ AE hit rate : $HR = \Sigma hits$ per loading cycle

- 1회의 하중에 의해 센서별로 취득된 AE hit의 수

◦ AE hit rate at beam center : HR_c

- 1회의 하중에 의해 보 중앙부 센서에서 취득된 AE hit의 수

◦ AE hit rate at beam edge : HR_e

- 1회의 하중에 의해 보 단부의 센서에서 취득된 AE hit의 수

◦ Secondary hit rate : $SHR = H_i / H_d$

- 하중감소시 발생한 hit 수에 대한 하중증가시 발생한 hit 수의 비

- AE hit rate considering load range : $HRC = HR / LR$
 - 하중비를 고려한 AE hit rate
- AE hit rate ratio of beam end to center : $HRL = HR_e / HR_c$
 - 보 중앙부와 단부에서의 AE hit rate의 비율
- AE count 분석을 위한 AE key parameter
 - Primary AE count : $C_i = \Sigma AE \text{ counts during load increasing}$
 - 하중이 증가하는 동안에 발생한 AE count의 수
 - Secondary AE count : $C_d = \Sigma AE \text{ counts during load decreasing}$
 - 하중이 감소하는 동안에 발생한 AE count의 수
 - AE count rate : $CR = \Sigma AE \text{ counts per loading cycle}$
 - 1회의 하중에 의해 센서별로 취득된 AE hit의 수
 - AE count rate at beam center : CR_c
 - 1회의 하중에 의해 보 중앙부 센서에서 취득된 AE hit의 수
 - AE count rate at beam end : CR_e
 - 1회의 하중에 의해 보 단부의 센서에서 취득된 AE hit의 수
 - Secondary count rate : $SCR = C_i / C_d$
 - 하중감소시 발생한 count 수에 대한 하중증가시 count 수의 비
 - AE count rate considering load range : $CRC = CR / LR$
 - 하중비를 고려한 AE count rate
 - AE count rate ratio of beam end to center : $CRL = CR_e / CR_c$
 - 보 중앙부와 단부에서의 AE count rate의 비율
- Total AE hit ratio 분석을 위한 AE key parameter
 - Total AE hit ratio during loading
 - : $R_L = HS_n / HS_{n-1}$ during load increasing
 - 하중이 증가하는 동안에 발생한 AE hit ratio
 - Total AE hit ratio during holding

∴ $R_H = HS_n/HS_{n-1}$ during holding

- 하중이 증가하는 동안에 발생한 AE hit ratio

◦ Total AE hit ratio during unloading

∴ $R_U = HS_n/HS_{n-1}$ during unloading

- 하중이 감소하는 동안에 발생한 AE hit ratio

◦ Cross plot 파라메타 분석을 위한 AE key parameter

◦ Peak amplitude vs energy duration

◦ Peak amplitude vs energy

◦ Rise time vs energy duration

AE key parameter는 크게 AE hit 분석을 위한 것과 AE count 분석, 그리고 AE hit ratio를 위한 것으로 구분할 수 있다. AE count는 음향방출 신호가 설정된 문턱값을 넘은 횟수를 의미하며, AE hit와 AE hit ratio는 센서에서 검출한 하나의 돌발형 신호를 의미하는 것으로 하나의 AE hit에는 하나 이상의 AE count가 포함되어 있다. 돌발형 신호의 크기가 크다면 하나의 AE hit에 많은 수의 AE count가 포함되며 신호의 크기가 작은 경우 하나의 AE hit가 단지 하나의 AE count만으로 구성될 수도 있다. 따라서 동일한 형태의 분석에 대하여 AE hit 분석과 AE count 분석, 그리고 AE hit ratio를 각자 수행함으로써 좀 더 효과적이고 상세한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

음향방출 신호의 평가에 있어서 가장 어려운 문제는 정량적인 평가가 어렵다는 점이다. 그 이유는 손상의 진전으로부터 해방된 에너지의 일부만이 탄성파로 변환되며 또한 그 중 센서가 부착된 특정 위치를 통과해가는 탄성파만을 검출해내는 음향방출기술의 특성 때문이다. 또한 음향방출 신호는 대상체의 형상, 신호원으로 부터의 거리 등에 따라 신호의 양과 크기가 달라지므로 절대치를 사용한 정량적인 평가는 불가능하다. 이러한 점을 고려하여 콘크리트 건전성 평가를 위한 AE key parameter는 모두 상대적인 비교를 통한 상태평가가 이루어지도록 하였다.

실험결과에 따르면 하중 증가시와 하중감소시의 음향방출 거동이 정상신호와 이상신호에서 차이가 있었다. 이를 평가하기 위한 AE key parameter가 Primary and

secondary AE hit/count(H_p, H_d, C_p, C_d)와 secondary hit/count rate(SHR, SCR), 그리고 AE hit ratio이다. 하중부가에 의해 발생한 AE hit/count의 비율로 나타냄으로써 완전히 상대적인 인자인 SHR 과 SCR 은 적절한 기준값을 초과하는지 여부에 의해 정상과 위험을 판정할 수 있을 것이다.

콘크리트의 파괴가 임박하였을 때 가장 먼저 눈에 띄는 음향방출 거동은 음향방출 신호의 발생빈도가 매우 급격하게 높아진다는 점이다. 이러한 측면에서의 평가를 위해서 도입된 AE key parameter가 AE hit/count rate(HR, CR)이다. 그러나 정상거동 상태에서도 음향방출 신호발생율은 하중에 따라 비례적으로 달라지므로 이를 보정하기 위하여 도입된 인자가 AE hit/count rate considering load range(HRC, CRC)이다. HRC 와 CRC 에 의한 건전성평가 역시 적절한 기준값의 초과 여부에 의하여 판정될 수 있지만 음향방출 신호발생율(AE hit/count rate)은 대상 구조물의 상태에 따라 다를 수 있으므로 절대적인 기준치를 제시하기는 어려우며 현장에서 설계극한하중 이하의 낮은 하중을 이용한 재하실험을 통해 예비실험을 수행하여 결정하여야 할 것이다.

콘크리트 휨 부재는 파괴가 임박했을 때 사인장균열의 발달이 두드러지며 따라서 보 단부에서의 음향방출 거동이 활발한 것으로 실험결과 확인되었다. 이러한 평가를 위한 AE key parameter가 HR_e, HR_c, CR_e, CR_c 과 HRL, CRL 이다. HRL 과 CRL 역시 완전히 상대적인 인자로서 적절한 기준치의 초과 여부에 의해 위험성에 대한 판정이 가능할 것이다.

다. 콘크리트 구조물에 대한 AE 알고리즘

Fig. 2-116은 음향방출기술을 이용한 콘크리트 보의 건전성평가 알고리즘의 개요도를 나타낸 것이다. 건전성 평가는 크게 다음의 세 단계를 통해 이루어진다.

- ① 음향방출 신호취득 및 AE parameter 추출
- ② AE key parameter 추출
- ③ AE key parameter 종합평가를 통한 위험도 판정

(1) 음향방출 신호취득 및 AE parameter 추출

본 단계는 센서로부터 수신되는 음향방출 신호 중에서 문턱값을 넘어서는 돌발형 신호를 구분하여 취득하고 그로부터 hit, count, peak amplitude, risetime, duration 등의 기본적인 AE parameter를 구하는 과정으로 일반적인 AE 시스템의 신호취득과정과 유사하다.

그러나 AE parameter와 함께 하중신호를 필수적으로 취득해야한다는 점에서 일반적인 AE 시스템과는 차별성이 있다. 여기에서 얻어진 신호에 대한 정보는 센서 별로 하나의 돌발형 신호(hit)마다 각각의 AE parameter를 구하는 방식으로 저장되며 하중에 대한 정보 역시 하나의 parameter로써 돌발형 신호마다 취득하게 된다. 일반적인 AE 시스템을 사용할 경우 하중정보는 외부입력을 통해 얻을 수 있다.

(2) AE key parameter 추출

실험을 통하여 취득된 AE parameter는 대상체에 가해진 loading cycle별로 분류되어 1회의 loading 및 cycle load 횟수마다 AE key parameter를 추출해 내는데 사용되게 된다. AE key parameter의 추출 및 평가는 평가 방법에 따라 네 가지로 분류된다.

- ① 하중신호 분석(strain/load ratio analysis) : 얻어진 하중신호로부터 loading cycle을 구분하고 loading cycle별로 최고점(L_p)과 최저점(L_v)을 평가하여 하중범위(ΔL) 및 하중비(LR)를 구한다. 또한 매 loading cycle마다 cycle의 시작시간 및 종료시간 그리고 최고점 발생시간을 기록하여 각 loading cycle에 해당하는 AE key parameter를 추출하는 기준으로 사용한다.
- ② 하중감소시 신호발생을 분석(secondary hit/count rate analysis) : 하중신호 분석을 통해 구분된 loading cycle 발생/종료 및 최고점 발생시간을 적용하여 하중증가시 발생한 hit/count(H_i, C_i)와 하중감소시 발생한 hit/count(H_d, C_d)를 추출한다. 이로부터 평가용 parameter인 SHR 과 SCR 을 산정하는 과정이다.
- ③ 음향방출 신호발생을 분석(AE hit/count rate analysis) : 하중신호 분석을 통

해 구분된 loading cycle 발생/종료시간을 적용하여 AE hit rate(HR) 또는 AE count rate(CR)를 구한다. 또한 하중신호 분석결과로부터 얻어진 하중비(LR)를 적용하여 평가용 parameter인 작용하중을 고려한 신호발생율(HRC, CRC)을 산정한다.

- ④ 센서 부착 위치에 따른 신호발생율 분석 : 위 ㉓의 분석을 통해 얻어진 신호발생율(HR)을 보 중앙부에 부착된 센서를 기준으로 양 단부의 센서로부터 취득된 신호발생율과의 비(HRL, CRL)를 산정하여 평가하는 과정이다.

AE key parameter는 신호패턴을 나타내는 parameter와 평가용 parameter로 구분할 수 있다. $H_p, H_d, C_p, C_d, HR, CR$ 등은 작용하중에 대한 신호패턴을 대표하는 지표이며, 이로부터 도출된 $SHR, SCR, HRC, CRC, HRL, CRL$ 은 신호패턴의 상대적 특성을 나타내는 평가용 지표이다. 이들 평가용 지표는 AE key parameter database로부터 도출되는 기준값들과 비교함으로써 대상 부재의 위험도를 평가하게 된다.

(3) AE key parameter 종합평가를 통한 위험도 판정

위 (2)의 단계로부터 도출된 평가용 지표는 하나의 loading cycle에 대하여 각각 위험도 평가를 하게 되는데 경우에 따라서는 하나의 loading cycle에 대하여 서로 상반된 위험도 판정을 내릴 수 있다. 예를 들면 작용된 하중이 매우 낮은 경우 HR, CR 등은 매우 낮은데도 불구하고 그 때문에 SHR, SCR 은 터무니없이 큰 값이 나타날 수도 있다. 왜냐하면 신호발생율이 너무 낮아서 하중 감소시에 신호가 전혀 발생하지 않거나 한 두개 정도의 신호만이 나타난다면 하중 증가시에 비록 수개의 신호만 발생한다고 해도 SHR, SCR 은 상당히 큰 값이 나올 수 있기 때문이다. 이러한 경우가 있기 때문에 최종적인 위험도의 판정을 위해서는 다양한 평가용 지표를 종합적으로 검토하여 판단을 내릴 필요가 있다.

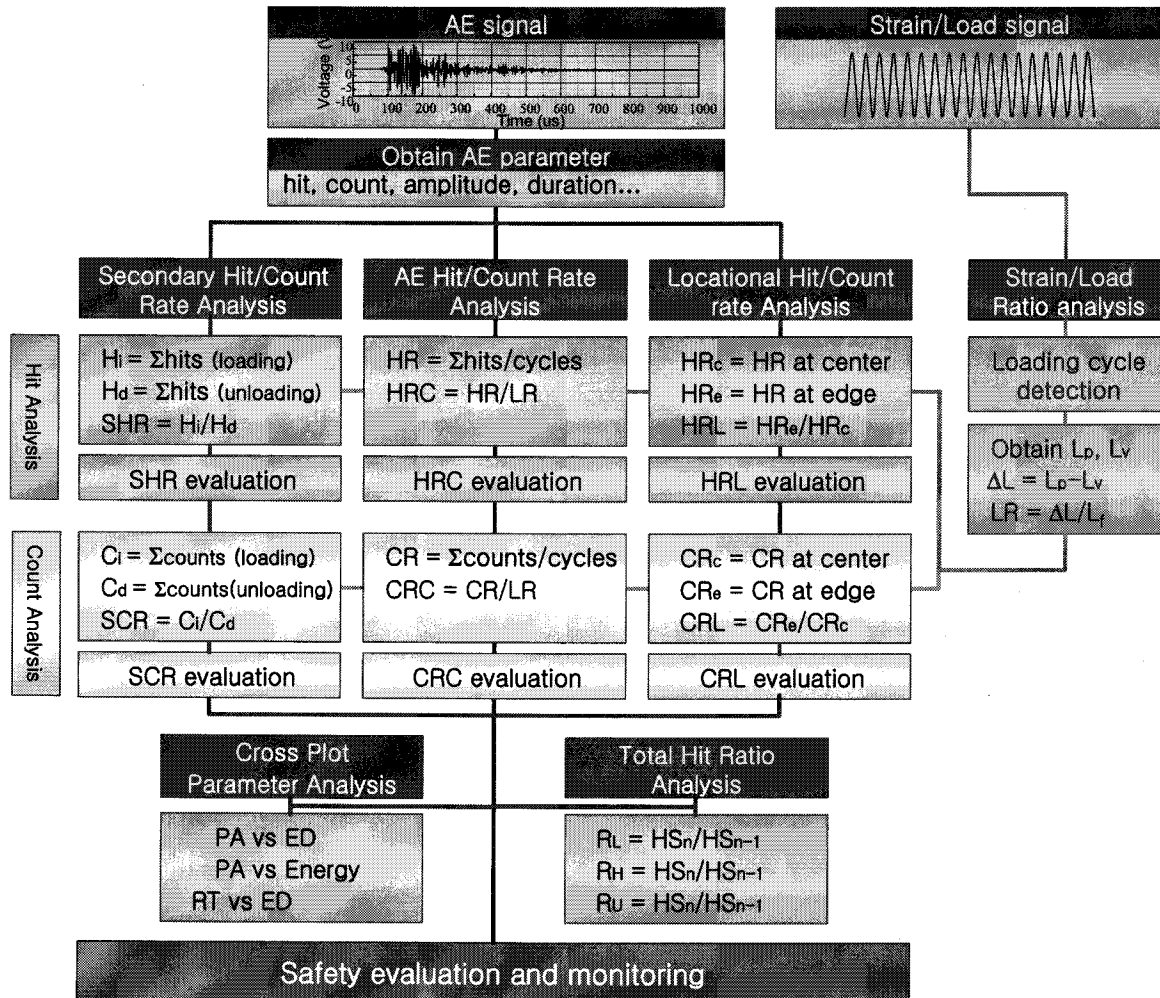


Fig. 2-116 Algorithm of AE for concrete structure

라. AE Key Parameter 추출 프로그램

구조물의 손상 평가를 위한 실험은 대상 교량 및 구조물 형태에 따라 대량의 AE 데이터가 생성될 수 있다. AE 데이터의 효율적인 관리 및 AE key parameter의 추출, 구조물 건전성 평가를 위해서는 측정 사이클에 따른 데이터의 분류는 물론 AE 데이터와 하중 데이터의 연동, 그리고 평가 알고리즘에 의한 AE key parameter의 생성을 프로그램화 하여 자동적으로 구할 필요가 있다.

Fig. 2-117은 AE key parameter 추출 프로그램의 주 화면이다. 데이터를 프로그램으로 읽어올 때 AE 데이터와 로딩 데이터의 구분 및 읽어온 데이터의 목록을 주 화면에 표시하여 데이터 로딩 상태를 알기 쉽게 하였다.

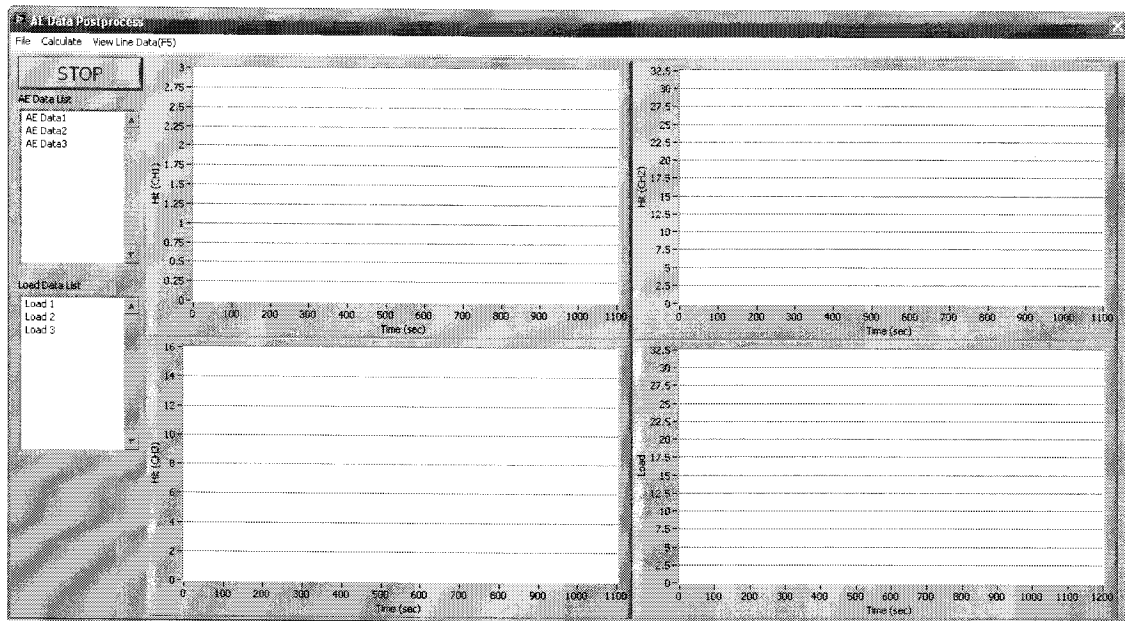


Fig. 2-117 Main window of AE key parameter calculation program

AE key parameter 추출을 위해서는 AE 데이터와 하중 데이터를 구분하여 프로그램에 로드할 필요성이 있다. Fig. 2-118은 데이터 로딩 시 데이터의 종류를 구분하여 로드할 수 있도록 사용자가 선택가능한 창을 띄운 모습이다.

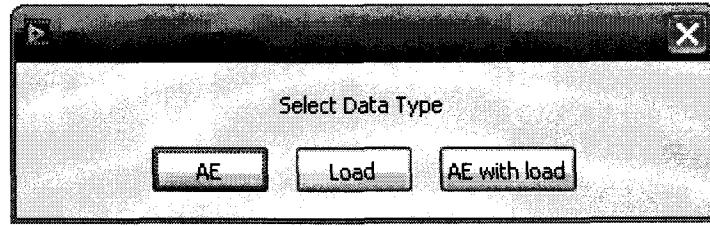


Fig. 2-118 Data open option for data match AE and LOAD data

Fig. 2-119는 읽어 들인 모든 데이터의 hit-time 그래프와 하중 그래프를 주 화면에 표시하한 모습이다. 실험 사이클별 AE parameter plot 및 AE key parameter 추출 작업을 마우스 오른쪽 버튼을 이용한 팝업 메뉴를 이용하여 제어 가능하도록 하였다. 주 화면에는 읽어 들인 모든 실험 사이클별 데이터의 Hit 데이터와 하중 데이터를 표시하여 AE key parameter 추출에 앞서 올바른 데이터를 읽어 들였는지 또한 미리 알 수 있도록 하였다.

Fig. 2-120~Fig. 2-122는 AE parameter의 평가를 위한 3개의 그래프를 사용자가 선택을 통하여 주 화면과는 다른 별도의 화면을 통하여 표현한 모습이다. 콘크리트 구조물 실험에서 주요 평가 항목인 hit - time, count - time, amplitude - duration 그래프 등을 사용자가 선택하여 표시할 수 있다.

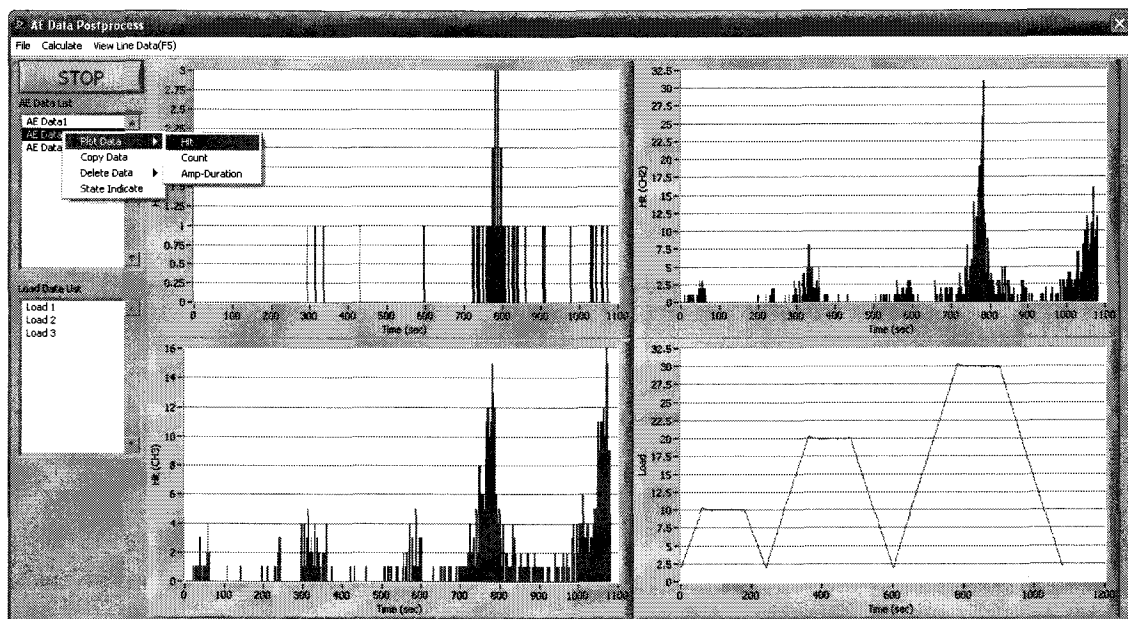


Fig. 2-119 Hit and load plot of all step

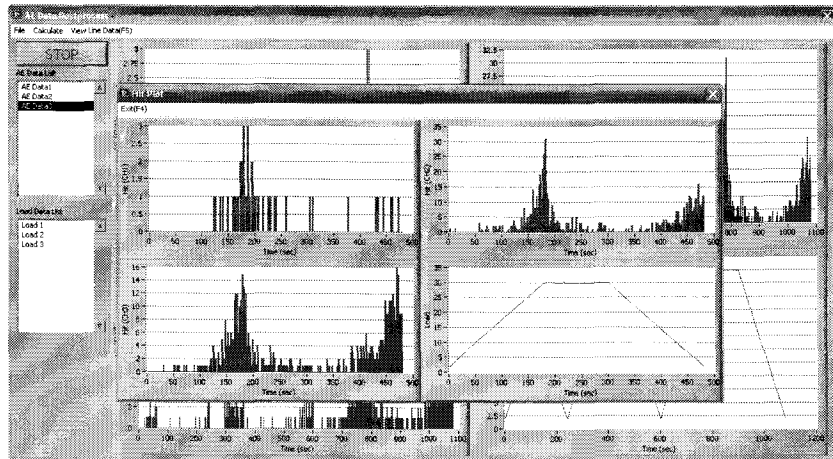


Fig. 2-120 Sub-window for hit-time plot of selected cycle

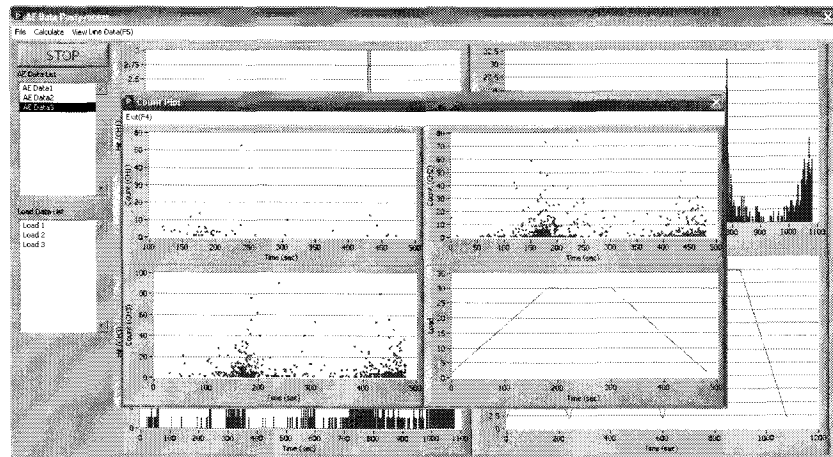


Fig. 2-121 Sub-window for count-time plot of selected cycle

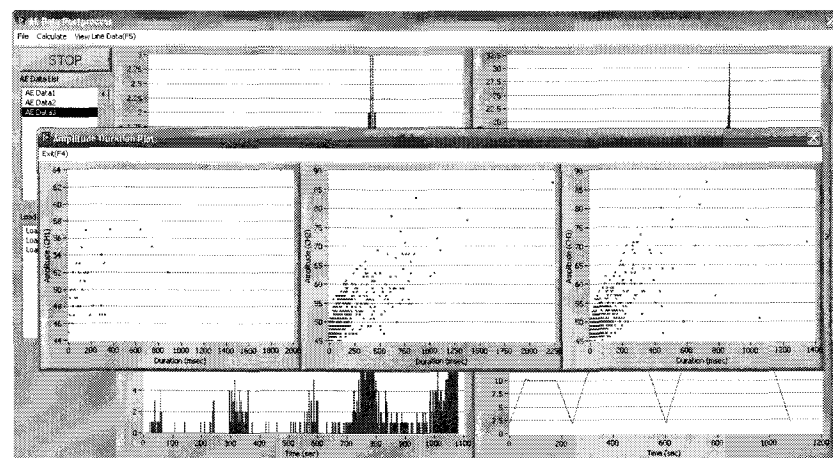


Fig. 2-122 Sub-window for amplitude-duration plot of selected cycle

경우에 따라, 후처리에 의한 필요 데이터 외에도 데이터 후처리를 통하지 않은 측정 데이터의 원본이 필요할 경우가 있다. 결과 데이터의 신뢰성 확인 혹은 AE key parameter외의 전문적인 지식을 갖춘 사람의 경우 원본 데이터의 참고를 통한 더욱 정확한 안전계수의 평가가 가능하므로 원본 데이터를 별도의 화면을 통하여 표시할 수 있도록 하였다. Fig. 2-123은 라인 데이터를 별도의 화면에 표시한 모습이다.

AE 평가에 있어 전문적인 지식이 있다면 AE parameter plot과 하중 관계 그리고 AE 데이터 디스플레이를 통하여 구조물 건전성의 평가가 가능하지만 관련 지식 및 정보가 부족한 상태에서는 평가가 곤란하다. AE key parameter를 이용하여 전문지식이 부족하여도 실험 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 다음의 과정이 필요하다.

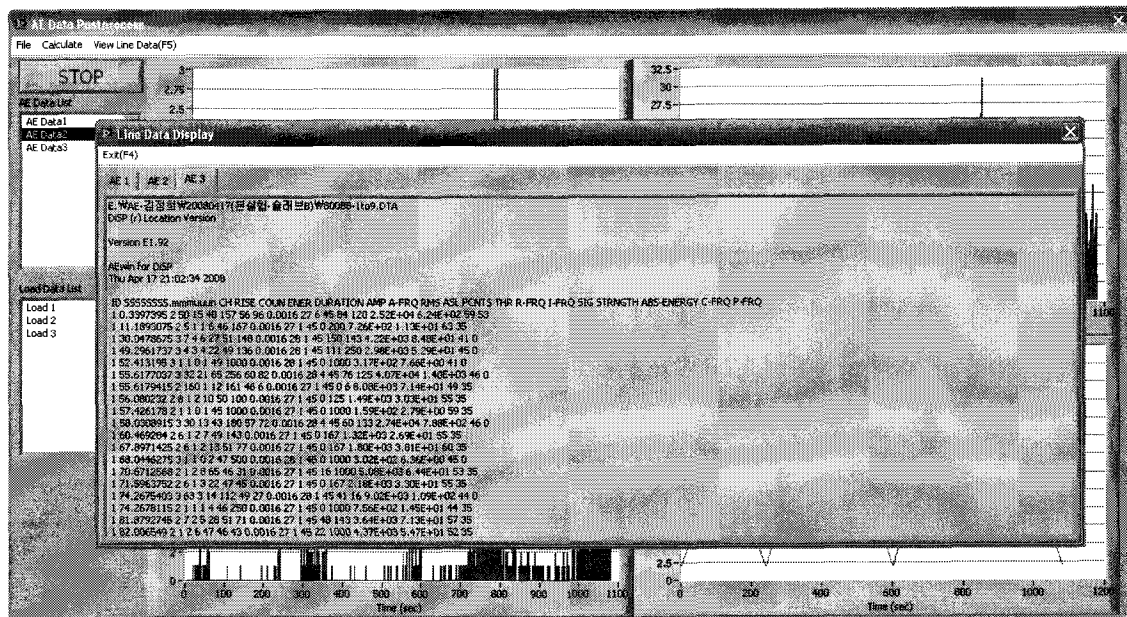


Fig. 2-123 Sub-window of raw data of selected step

Fig. 2-124는 본 단원에서 정의한 손상 평가 알고리즘을 이용하여 구해진 AE key parameter의 값을 표시하고 있다. 하중 데이터를 하중 증가구간과 최고하중 유지구간, 하중 감소구간으로 구분하여 표시하여 데이터의 구분을 명확하게 하였으며, 프로그램에 의하여 분리된 하중 구간과 연계하여 AE 신호를 구분한 뒤 AE key parameter의 생성과 평가용 지표를 parameter database와 비교하여 구조물의

손상 상태 평가를 자동적으로 사용자에게 표시하여 준다.

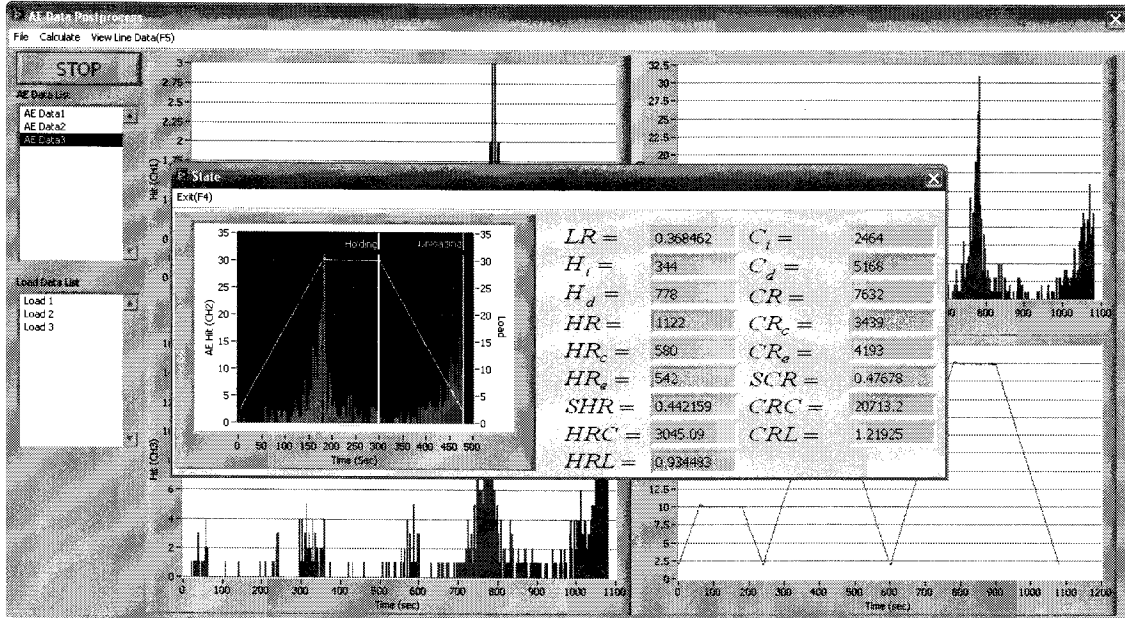


Fig. 2-124 AE key parameter indicator

7. 4-채널 음향방출 시스템 운영프로그램 및 하드웨어 개발

가. 서 론

(1) 개발 목적

개발하고자 하는 콘크리트용 음향 방출(AE, Acoustic Emission) 시스템의 목적은 콘크리트 구조물에서 발생하는 음향 방출 신호를 검출하고 이를 분석하여 콘크리트 구조물의 안전성을 평가하고자 하는 것이다. 이를 위해서는 음향 방출 신호를 수집할 수 있는 데이터 수집 장치(DAQ, Data Acquisition Board)와 수집한 데이터를 처리하여 분석할 수 있는 소프트웨어가 필요하다.

기존의 음향 방출 시스템도 이와 같은 구성으로 이루어져 있기 때문에 이들을 콘크리트 구조물 안전성 평가에 응용할 수 있다. 그러나 기존의 음향 방출 시스템의 경우 이를 콘크리트 구조물에 응용하기 위해서는 음향 방출 기술에 대한 전문적인 지식을 가지고 시스템 및 프로그램을 운용하여야 한다. 이는 기존의 장비가 단순한 데이터 취득 및 기본적인 분석 기능만을 제공하므로 이들 기능을 응용하여 콘크리트의 안전성을 평가하기 위한 데이터 분석 및 평가가 어렵기 때문이다. 그러므로 현장에서 근무하는 안전 진단 실무자가 기존 장비를 적용하기에는 무리가 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 과제에서는 콘크리트 구조물 안전성 평가에 적합한 자동화된 분석 프로그램을 개발하고자 하였다.

(2) 개발 범위

콘크리트용 음향 방출 시스템이 하드웨어와 소프트웨어로 구성되어 있으므로 연구 개발 또한 크게 하드웨어와 소프트웨어 부분으로 구분하여 진행하였다. 이들의 부분별 최종 개발 범위는 아래와 같다.

(가) 하드웨어

일반적인 경우 음향 방출 신호의 크기가 미세하기 때문에 이를 그대로 신호 처리 데이터로 사용할 수 없다. 그러므로 이를 처리 가능한 신호로 증폭하는 기능을 하드웨어로 구현하여야 하며, 수신하여 증폭한 음향 방출 신호를 디지털 신호로 변환하여 분석 프로그램으로 전달하는 기능도 하드웨어로 구현하여야 한다. 본 과제

에서 개발하고자 하는 음향 방출 시스템의 하드웨어 요구 사항은 Table 2-7과 같으며 이 같은 기능을 구현하기 위한 하드웨어의 구성은 Fig. 2-125와 같다.

Fig. 2-126은 실제로 개발된 프로토타입 4-CH AE System을 나타낸 그림이며 상용화시 장비의 최소화를 위하여 최대한 portable하게 제작할 수 있도록 하였다.

Table 2-7 Features of hardware

항목	세 부 사 양	비 고
Channel No.	▪ 4 Channel (AE 3Ch, 변위센서 1Ch) A/D 변환	
Sampling Rate	▪ 20MHz 이상	
데이터 수집방법	▪ 일반 personal computer에서 ADC 보드 사용	
센서 연결 방법	▪ BNC Cable을 이용하여 압전 센서 연결	

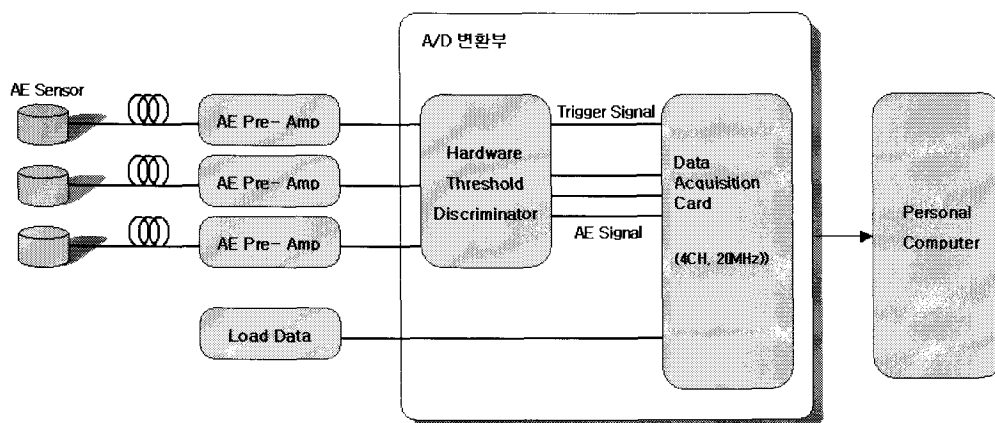


Fig. 2-125 Structure of the hardware

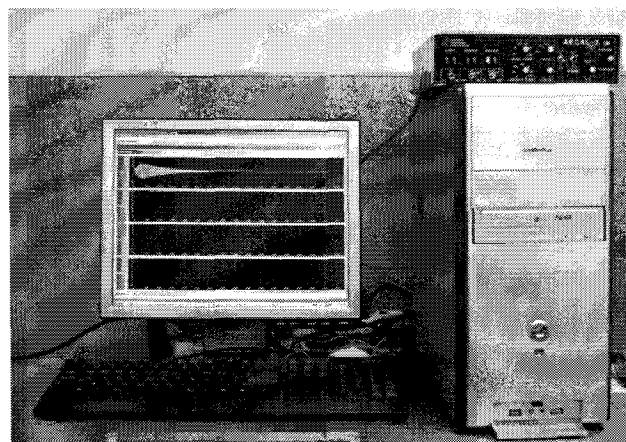


Fig. 2-126 4-CH AE System

(나) 소프트웨어

음향 방출 시스템의 소프트웨어는 크게 음향 방출 이벤트 데이터를 수집하는 과정과 수집한 데이터를 처리하는 과정으로 이루어진다. 음향 방출 이벤트를 정확히 수집하기 위해서는 예상되는 이벤트의 조건에 적합하도록 DAQ 보드를 적절히 제어할 수 있어야 한다. 음향 방출 신호 처리에 필요한 정보들을 유실 없이 수집하기 위해서는 DAQ 보드를 제어하여 정확한 시간에 충분한 속도로 충분한 양의 데이터를 수집하여야 하기 때문이다. 수집한 음향 방출 이벤트 데이터는 대상 콘크리트 구조물 대한 안전성 평가에서 필요로 하는 파라미터들을 얻기 위하여 신호 분석 과정과 평가 과정을 거친다. 음향 방출 신호에서 추출한 파라미터들로부터 안전성을 평가하는 방법이 대상에 따라 달라지므로 본 과제에서는 콘크리트 구조물에 대하여 특화를 시도하였다. 소프트웨어의 주요 세부 기능은 다음과 같으며, 소프트웨어의 구성은 Fig. 2-127과 같다.

- 데이터 취득, 운영 소프트웨어로 구성
- DAQ Board 제어
- Raw Data를 AE Event Data로 변환
- AE Event Data를 이용한 AE Parameter 분석
- 사용 편의를 고려한 GUI 기반의 운영 환경 구현
- AE Raw data, AE Parameter 저장 및 호출

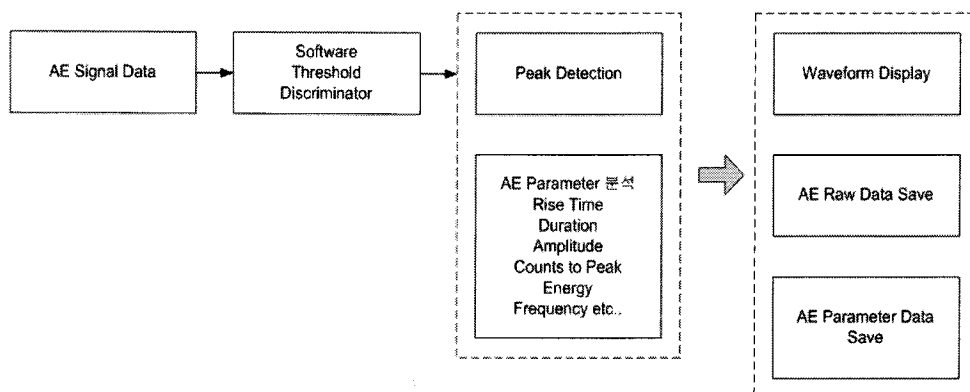


Fig. 2-127 Structure of the software

나. 데이터 취득을 위한 하드웨어 및 소프트웨어

(1) 개요

Fig. 2-128은 음향 방출 신호 데이터 취득을 위한 하드웨어의 구성도를 나타내고 있다. 개발한 AE 시스템은 범용 PC에 DAQ 보드를 장착하여 구현하였다.

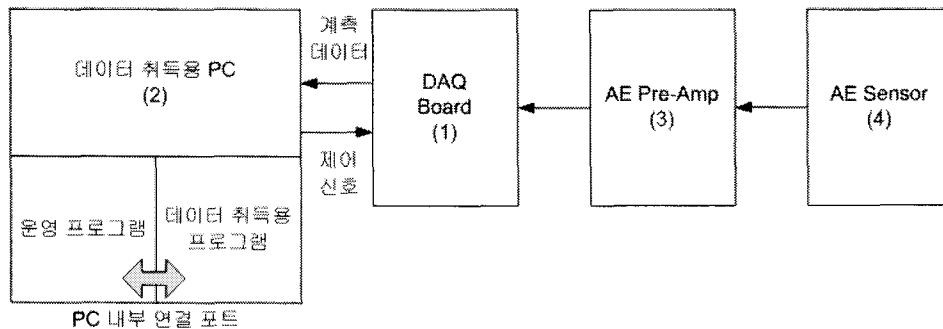


Fig. 2-128 Block diagram of the system

하드웨어를 구성하는 요소들은 다음과 같다.

DAQ Board(1) : AE 신호를 디지털 데이터로 변환하여 수집한 후 PCI 버스를 통해 PC로 전송한다.

운영 PC(2) : 시스템 제어, 데이터 취득 및 도시 기능을 수행한다. DAQ Board에 의한 데이터 취득을 위한 프로그램은 LabVIEW를, 취득한 데이터의 처리, 분석, 관리 및 화면 도시를 위한 프로그램은 Delphi를 사용하여 작성하였다.

AE Pre-Amp(3) : AE Sensor로부터 얻어지는 전기 신호의 전압이 매우 미약하므로 데이터 처리에 적합한 신호 레벨로 이를 증폭한다.

AE Sensor(4) : 공진형 센서로 대략 150 kHz 주파수의 신호를 수신한다.

최적의 작동 조건을 구현하기 위해서는 단독형 장비로 개발하는 것이 보다 바람직하나 이 경우 하드웨어 구성, 시스템 제어, 사용자 인터페이스 및 결과 도시 등에 많은 작업을 필요로 하므로 개발 과정이 어렵다. 반면 범용 PC를 사용하면 최적 조건의 시스템 구성에는 한계가 있으나 PC의 많은 하드웨어 및 소프트웨어 자원을 손쉽게 사용할 수 있으므로 개발이 용이하다는 장점이 있다.

하드웨어 작동에는 운영 프로그램과 데이터 취득용 프로그램이 필요하다. PC에 의해 수행된다. 데이터 취득용 프로그램은 AE Sensor로부터 수신한 음향 방출 신

호를 정확히 감지하여 이를 디지털 신호로 변환할 수 있도록 DAQ 보드를 제어한다. 운영 프로그램은 전반적인 하드웨어 제어와 더불어 DAQ 보드에서 디지털 신호로 변환한 음향 방출 신호 데이터를 PC 내부 메모리도 불러들이고 그 결과를 화면상에 파형으로 도시하여 사용자에게 보여주는 기능을 수행한다.

(2) 구성 요소 특성

본 과제에서 개발한 시스템은 크게 음향 방출 신호를 수신하는 음향 방출 센서, 수신한 음향 방출 신호를 증폭하는 전단 증폭기(pre-amplifier), 4 개의 아날로그 신호 입력 채널을 가지고 있으며 음향 방출 신호를 디지털 데이터로 변환하여 주는 DAQ 보드(Data Acquisition Board), 이로부터 수집한 신호를 분석하여 음향 방출 이벤트를 추출하는 LabVIEW 응용프로그램, 그리고 추출한 음향 방출 이벤트를 사용자에게 보여주는 운영 프로그램으로 구성되어 있다. Fig. 2-129는 개발한 시스템을 구성하는 각 구성 요소와 이들의 연결 상태를 나타낸 그림이다. 각 구성 요소의 특성은 Table 2-8과 같다.

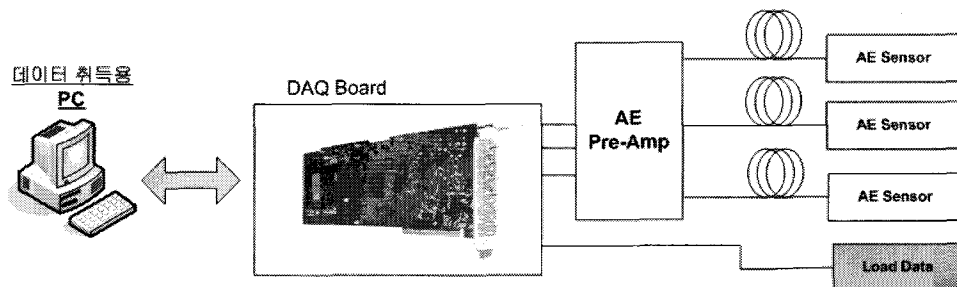
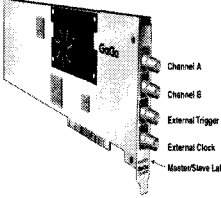


Fig. 2-129 Components of the system and connection

Table 2-8 Features of the components

항목	관련그림	세 부 사 양
계 측 프로그램		- 계측 프로그램 개발툴 : LabVIEW Version 8.2 - 응용 LabVIEW는 Graphic 환경을 제공하는 소프트웨어 개발 툴로서 DAQ 제어와 신호 취득 및 분석 알고리즘 구현에 매우 효율적인 환경을 제공해주어 계측과 하드웨어 제어 분야에서 많이 사용되고 있음
운 영 프로그램		운영 프로그램 개발 툴 : DELPHI
DAQ보드		- GAGE CS8244 - Input Channel : 4 CH. - External Trigger 1 - Clock Port 1 - 사용법 : Master/Slave 방식으로 복수로 연결하여서 사용 가능 - Sampling Rate : 50 MS/s - A/D Resolution : 12 bit
AE Pre-Amp		- 기능 AE Sensor에서 수신한 전기 신호가 작기 때문에 AE Pre-amplifier를 사용하여 신호를 증폭하여 DAQ로 전달 - 특성 : 40/60 dB 선택 가능(Single/Difference 입력 선택도 가능함)
AE Sensor		- 센서종류 : 공진형 센서 - 동작주파수 : 50~200 kHz 범위

(3) 데이터 취득용 소프트웨어

(가) 기능

- AE 데이터 취득
- 데이터 분석

(나) 프로그램 구성 및 순서도

AE 센서에서 신호가 발생하면 DAQ Board에서 4,096 개의 데이터로 취득한 후 Peak Search 분석을 통해 도출된 Peak 성분 데이터와 4,096 개의 Raw 데이터는 내부 통신 포트를 통해 운영 프로그램으로 전송한다. Fig. 2-130은 AE 이벤트 데이터를 수집하는 과정을 나타내고 있으며 Fig. 2-131은 이를 위한 내부 처리 과정의 순서도이다.

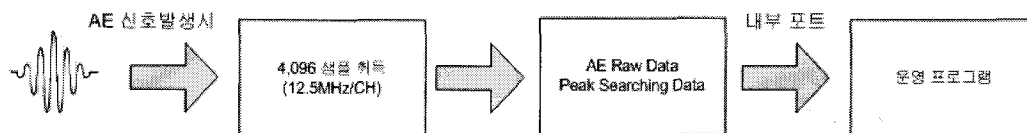


Fig. 2-130 Process for AE event acquisition

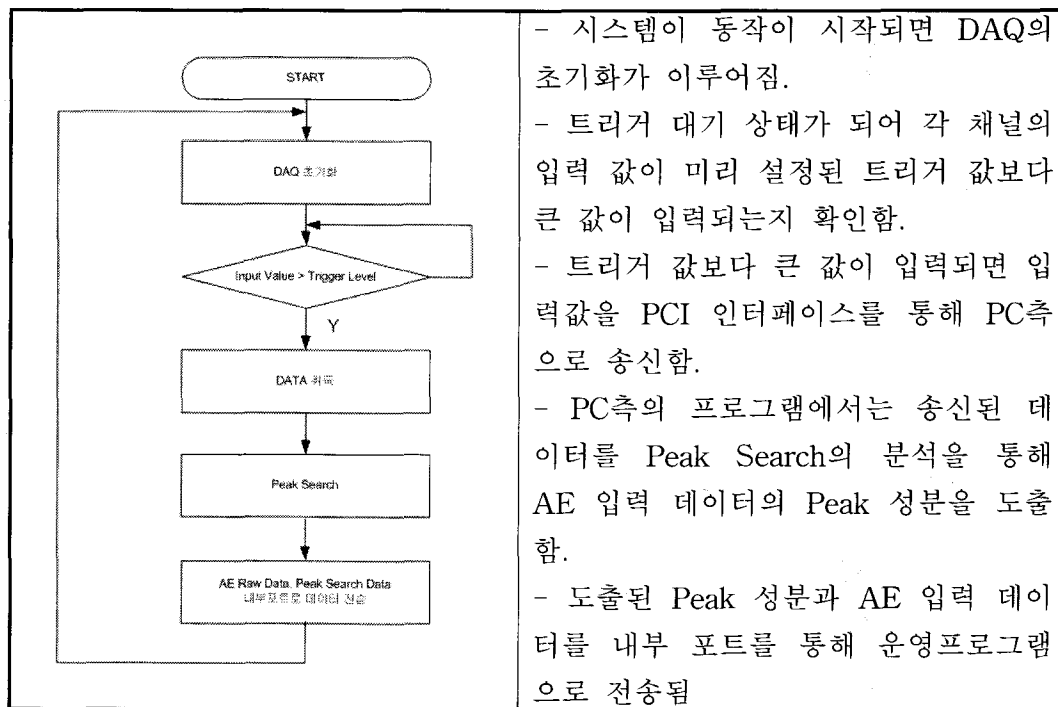


Fig. 2-131 Flowchart for AE event detection

(다) 프로그램 컴포넌트의 구성(Hierarchy)

AE 진단시스템의 데이터 취득에 적용되는 응용프로그램은 Fig. 2-132와 같은 계통 구조를 가지고 있다. 이들은 DAQ 보드를 제어하는 라이브러리, 음향 방출 신호를 감지하기 위해 필요한 제어 라이브러리를 LINK 하여 사용하는 단위 프로그램, 단위 프로그램들을 연계시켜 운영하는 통합 모듈로 구성되어 있다.

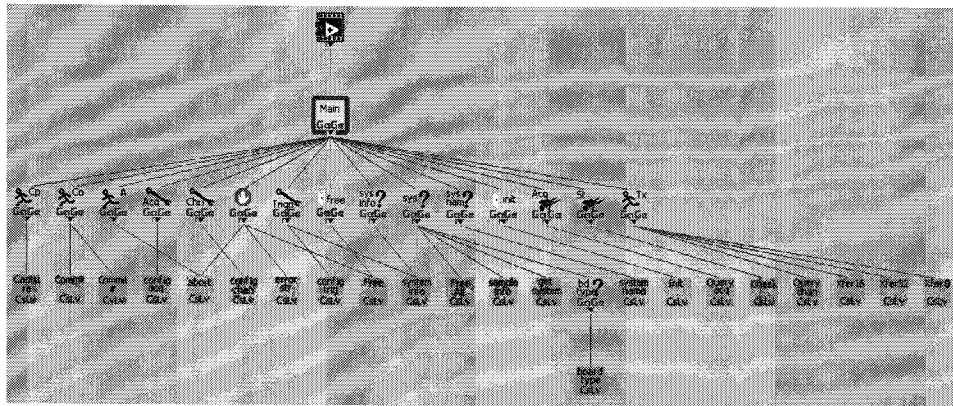


Fig. 2-132 Hierarchical structure of data acquisition program

(라) 운영 화면

취득용 프로그램의 화면 구성은 크게 그래프 표시부, DAQ 보드 설정부, 데이터 수집 상태 점검부, 시스템 정보 표시부, 내부 연결 포트 설정부로 구성되어 있으며, Fig. 2-133은 취득용 프로그램의 실제 메인 화면이다.

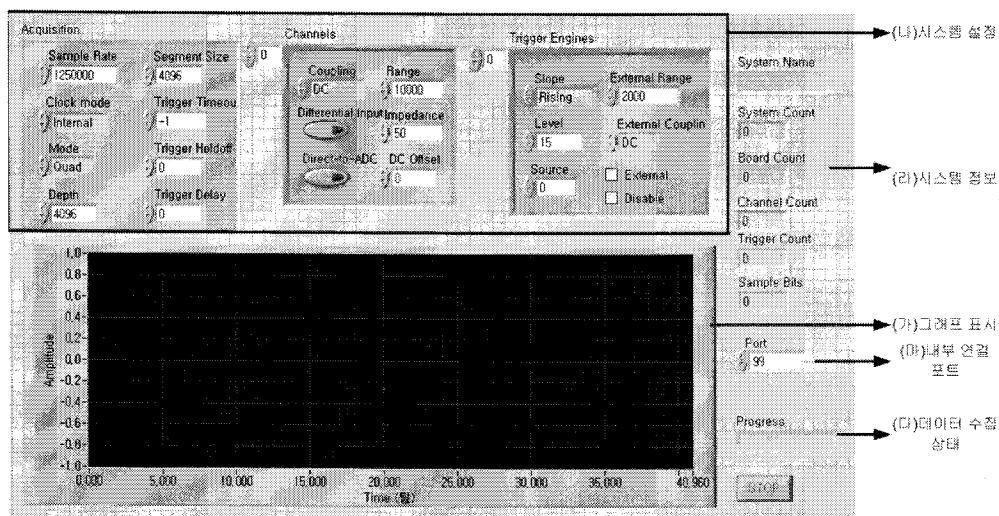


Fig. 2-133 Main screen of data acquisition program

- 그래프 표시부(가)

DAQ를 통해 취득된 AE Signal 데이터를 이용하여 AE Event를 운영자가 쉽게 인지할 수 있도록 그래프로 표시한다. 그래프는 DAQ의 1, 2, 3, 4 채널 각각에서 취득한 데이터를 표시할 수 있다.

- 데이터 수집 상태 표시부(나)

데이터 수집 진행 과정을 나타내주는 부분으로 자세한 기능은 Table 2-9와 같다.

Table 2-9 State of the data acquisition progress

항목	세 부 기 능
Progress	▪ Waiting/Triggered/Transfer - Waiting : AE 신호를 감지하기 위한 대기상태 유지 - Triggered : AE 신호가 Trigger Level 이상으로 입력 되었을 경우 신호를 데이터로 변환함 - Transfer : 변환된 데이터를 PC로 전송
STOP	▪ 프로그램의 START/STOP 상태를 선택

- DAQ 보드 설정부(다)

DAQ 보드 설정부는 운영프로그램으로 데이터 수집 장치인 DAQ를 제어할 수 있도록 하드웨어 환경을 설정하는 항목들을 포함되어 있으며, Table 2-10은 이를 위한 항목과 범위를 보여주고 있다.

Table 2-10 Settings to control DAQ board

항 목	세 부 기 능
Sample Rate	▪ Acquisition 주기 설정 [5, 10, 25, 50MHz로 선택]
Input Range	▪ 신호의 입력범위를 설정 [± 1 : 2000 , $\pm 5V$: 10000]
Trigger Slope	▪ Positive/Negative Slope Trigger
Trigger Level	▪ Trigger Level을 넘어서는 신호에 대하여 AE Event 처리
Trigger Source	▪ 채널별로 발생시키고자 하는 트리거 기준 선택
Segment Size	▪ Sample 개수를 선택 [1024, 2048, 4094, 8192, 16384]
Mode	▪ 동작하고자 하는 채널 모드 선택[Single, Dual, Quad]

(라) 시스템 정보

DAQ Board의 현재 정보를 사용자에게 보여줌으로써 정상적인 시스템 동작 여부를 점검할 수 있는 기능을 제공한다.

(마) 내부 연결 포트 설정

운영 프로그램으로의 데이터 전송을 위한 연결 포트를 설정한다.

다. 음향 방출 신호 처리를 위한 소프트웨어

(1) 기능

- AE Parameter 분석 및 그래프 도시
- DataBase 운영 (TXT 저장, 호출)
- AE 데이터 그래프 도시

(2) 프로그램 구성 및 순서도

음향 방출 시스템에 의한 작업은 크게 데이터를 수집하는 과정과 수집한 데이터를 분석하는 과정으로 대별할 수 있다. 전반 과정은 하드웨어에 의한 작업이 주를 이루며 실시간으로 이루어져야 한다. 반면 후반 과정은 전반 과정에서 수집한 데이터를 이용하여 필요한 정보를 얻는 과정으로 일종의 후처리 과정으로 볼 수 있다.

음향 방출 신호 처리 소프트웨어는 후반 과정으로 데이터 취득용 프로그램의 내부 연결 포트를 통해 전송된 데이터로부터 AE 파라미터를 분석한 후 채널별로 분석한 데이터를 그래프로 도시하는 기능을 수행한다. 또한 AE 이벤트가 발생한 시간 순서대로 데이터베이스에 raw data 및 AE 파라미터를 저장한다. Fig. 2-134는 음향 방출 신호 처리 프로그램의 구성도이며, Fig. 2-135는 처리 순서도이다.

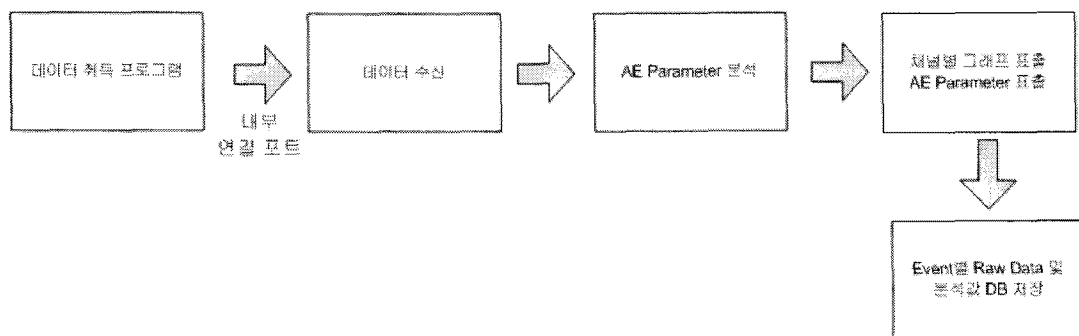


Fig. 2-134 Block diagram of AE signal processor software

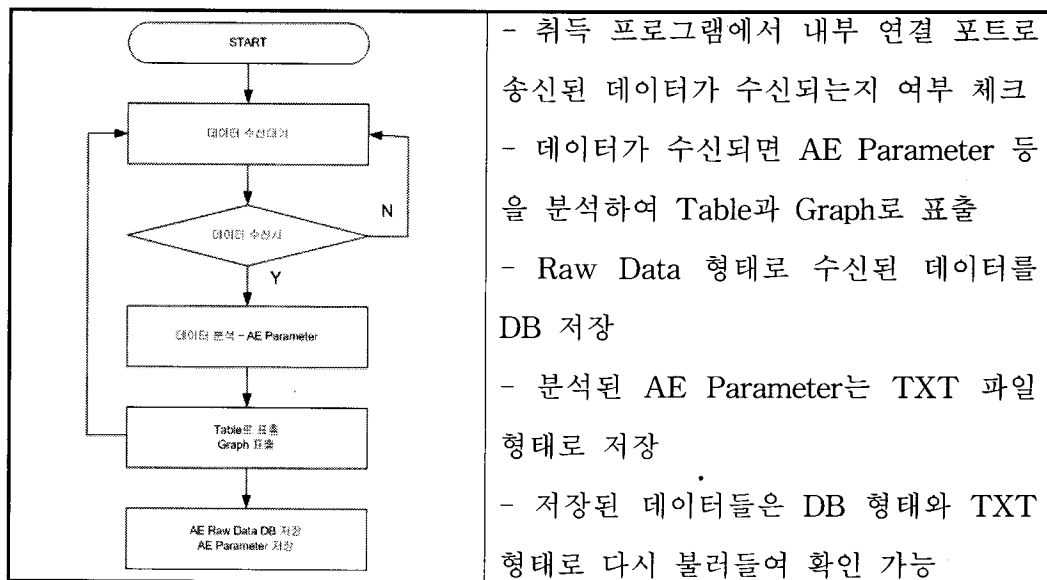


Fig. 2-135 Flowchart of process for AE signal processing

(3) AE Parameter 연산

AE 센서로부터 취득된 신호 중 임의의 Threshold를 넘어가는 신호에 대하여 음향방출 Event를 추출하게 되는데, 이렇게 얻어진 하나의 AE Event에 대하여 다음과 같은 AE Parameter를 추출하여 신호에 대한 평가가 이루어진다.

① AE Event : 하나의 돌발형 신호를 의미하며 앞선 event의 마지막 count가 발생한 이후 미리 정해진 시간(Hit Definition Time : HDT)보다 긴 시간동안 count가 발생하지 않을 경우 하나의 돌발형 신호가 끝난 것으로 간주하여 하나의 event가 끝난 것으로 판단함.

② Counts : 음향 방출 신호가 정해진 Threshold level을 초과한 횟수를 말함.

③ Duration : 하나의 AE Event의 지속시간

$$\text{Duration} = (\text{Peak Stop Point} - \text{Peak Start Point}) / (1/\text{Sampling Rate})$$

④ Rise Time : 첫 번째 count의 발생시간으로부터 Peak Amplitude가 발생하기까지의 시간

$$\text{Rise Time} = (\text{Peak Amplitude Point} - \text{Peak Start Point}) / (1/\text{Sampling Rate})$$

⑤ Peak Amplitude : 하나의 AE Event에서 발생한 count 중 최대 진폭

⑥ Counts To Peak : 하나의 AE Event에서 Peak Amplitude까지의 count

Counts To Peak = (Counts - Peak Amplitude Point까지의 Count 수)

- ⑦ Energy : ((Peak Stop Point-Peak Start Point) * Peak Amplitude) / 2
- ⑧ Average Frequency : (AE Counts) / (Duration)
- ⑨ Reverberation Frequency : (AE counts - Counts to peak) / (Duration - Rise Time)
- ⑩ Initiation Frequency : (AE Counts to peak) / (Rise Time)

(4) 화면 구성

(가) 메인 화면

메인 화면은 메뉴 바를 가지며 상위 메뉴는 File, Setup, Acquire, Search로 구성하였다. File 메뉴에서는 AE Parameter의 저장, 호출 등의 기능을 수행한다. Setup 메뉴에서는 사용자가 보고자 하는 화면의 구성 및 설정 과정을 호출한다. Acquire 메뉴에서는 시스템의 동작/정지 등의 기능을 수행할 수 있다. 그리고 Search 메뉴에서는 데이터베이스에 저장된 AE 데이터를 다시 불러들여 Replay하는 데 필요한 데이터를 검색하는 기능을 수행한다. Fig. 2-136은 메뉴 구성도이다.

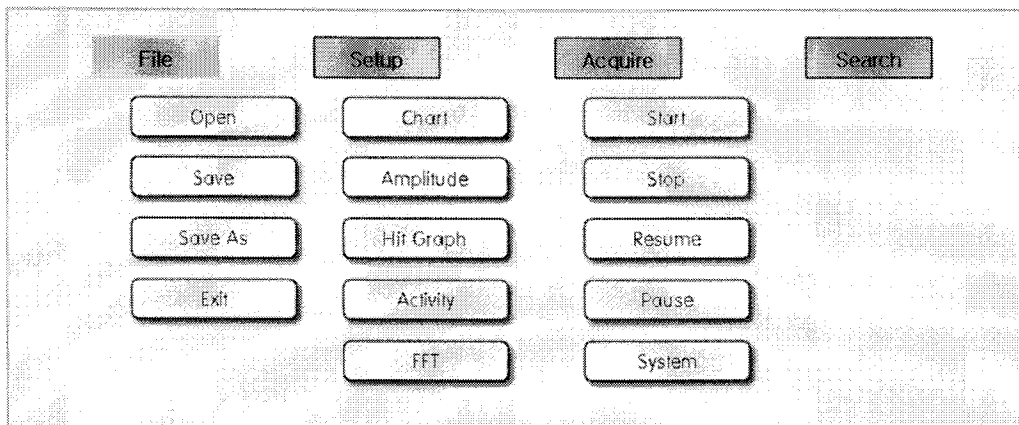


Fig. 2-136 Structure of main menu

메인 화면은 탭 구조로 구성하였으며 보고자 원하는 탭을 선택하면 이에 해당하는 화면이 메인 화면에 나타난다. Setup 메뉴는 각 탭에서 필요한 파라미터들을 설정하기 위한 설정 창을 불러오는 기능을 수행하며 복수 선택이 가능하다. Acquire 메뉴의 서브 메뉴는 두 가지 기능을 갖는다. 데이터 수집 시에는 Start, Stop 기능

으로, DB 데이터 호출 시에는 Resume, Pause 기능으로 작동한다. Fig. 2-137은 메인 메뉴의 작동 상태를 캡처한 화면이며 Fig. 2-138은 waveform 화면을 캡처한 화면이다.

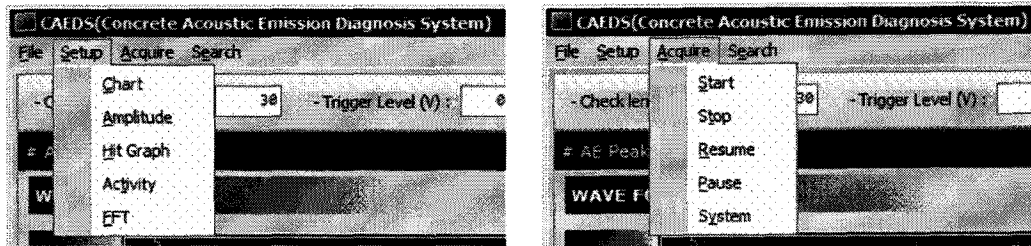


Fig. 2-137 Screen capture of main menu

(나) Waveform 화면

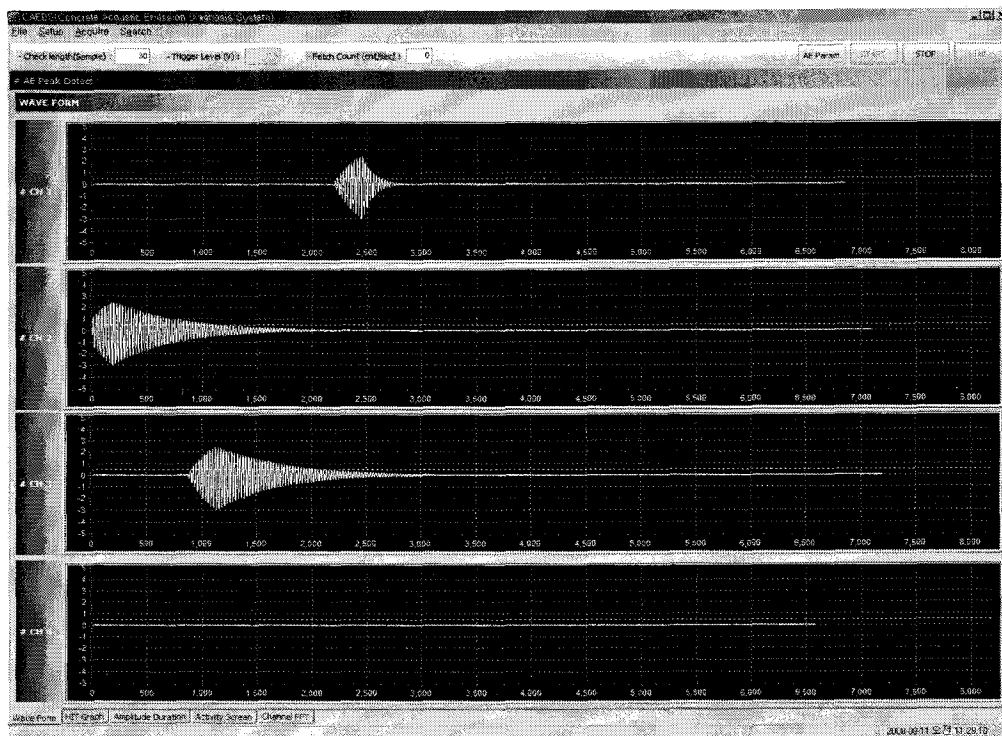


Fig. 2-138 Waveform screen

- DAQ Board로부터 AE Data를 수신 받는 기능을 수행하는 화면으로서, 화면 Open과 동시에 DAQ Board의 초기화 작업을 진행한다.
- START 버튼을 Click하면 데이터 수집을 시작한다.

- 수신된 Raw 데이터는 Chart에 Display된다.
- 데이터를 수신함과 동시에 AE Parameter 연산 및 Hit 정보 수집, Database 저장 등을 수행한다.
- 데이터의 수집은 별도의 Thread를 통해서 수행한다.
- Acquisition Thread - AE Parameter Thread- DataBase Thread, Hit Graph, Amplitude & Duration, Activity Screen, Channel FFT 화면 Tab으로 구성하였다.
- AE Parameter 정보 이외의 데이터는 STOP 버튼을 눌러 데이터 수집을 종료한 후 확인할 수 있다.
- Fig. 2-139는 Waveform 화면 설정을 위한 창으로 chart의 X, Y 축 범위를 설정한다. 범위는 Channel별로 조절할 수 있으며, X, Y축의 범위를 설정한 후 확인버튼을 눌러 해당 내용을 적용한다.

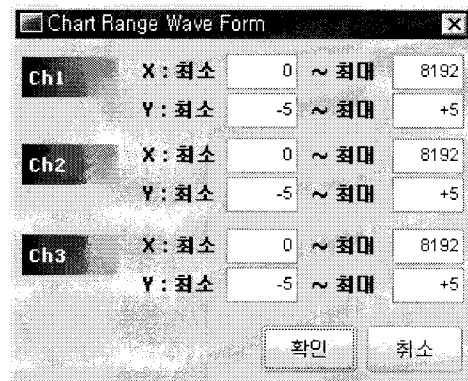


Fig. 2-139 Setup for waveform

(다) Parameter 추출 화면

DAQ를 통해 취득된 AE Signal 데이터를 이용하여 AE Event의 Parameter값을 분석하여 표시한다. 표시되는 내용은 발생시점, Counts, Rise Time, Duration, Amplitude, Counts To peak, Energy, Average Frequency, Reverberation Frequency, Initial Frequency, Threshold 등이다. Fig. 2-140은 파라미터 추출 결과를 도시하는 화면이며 Fig. 2-141은 AE hit 정보를 나타내는 화면이다.

No	Ch > Time	AE Counts	Duration	Thresh Hold	Rise Time	Peak Count	Amplitude	Energy	Average F	Reverberation F	Duration F
1	CH1 > 2008-08-11 13:25:59.375	312	325.03999	0.5	0.00	1	2.41999	9,820.29226	959.88187500	956.86537500	0.00000
2	CH2 > 2008-08-11 13:25:59.375	313	266.03199	0.4	0.00	2	1.93359	7,896.19141	767.90550000	763.44430000	0.00000
3	CH3 > 2008-08-11 13:25:59.375	314	357.94399	0.55	0.00	3	2.63869	10,812.26315	1,055.87056250	1,052.48551250	0.00000
4	CH1 > 2008-08-11 13:25:59.718	313	326.19999	0.5	194.44	116	2.70264	11,018.55036	959.65175000	1,495.59675000	596.98506250
5	CH2 > 2008-08-11 13:25:59.718	314	266.92799	0.4	155.552	117	2.16211	8,614.93031	767.72140000	1,196.47740000	477.26805000
6	CH3 > 2008-08-11 13:25:59.718	315	358.77599	0.55	213.884	118	2.97290	12,120.51543	1,055.63692500	1,645.15642500	656.24395675
7	CH1 > 2008-08-11 13:26:01.312	313	326.19999	0.5	326.19999	197	2.33643	9,525.60742	959.65175000	0.00000	0.00000
8	CH2 > 2008-08-11 13:26:01.312	314	266.92799	0.4	280.92799	199	1.86914	7,620.40394	767.72140000	0.00000	0.00000
9	CH3 > 2008-08-11 13:26:01.312	315	358.77599	0.55	358.77599	199	2.57907	10,478.10816	1,055.61692500	0.00000	0.00000
10	CH1 > 2008-08-11 13:26:04.312	313	326.19999	0.5	326.19999	241	2.45361	10,003.38086	959.65175000	0.00000	0.00000
11	CH2 > 2008-08-11 13:26:04.312	314	266.92799	0.4	266.92799	242	1.96289	8,002.70469	767.72140000	0.00000	0.00000
12	CH3 > 2008-08-11 13:26:04.312	315	358.77599	0.55	358.77599	243	2.69897	11,003.71895	1,055.61692500	0.00000	0.00000
13	CH1 > 2008-08-11 13:26:08.500	260	276.76001	0.5	370.76001	226	2.05473	7,089.60105	960.26000000	0.00000	0.00000
14	CH2 > 2008-08-11 13:26:08.500	261	216.60301	0.4	216.60801	227	1.67578	5,671.88164	768.20900000	0.00000	0.00000
15	CH3 > 2008-08-11 13:26:08.500	262	297.83601	0.55	297.83601	228	2.30420	7,768.96125	1,056.26600000	0.00000	0.00000
16	CH1 > 2008-08-11 13:26:13.734	95	58.28	0.5	96.28	92	1.18652	1,457.64404	966.63600000	0.00000	0.05000
17	CH2 > 2008-08-11 13:26:13.734	96	78.624	0.4	78.624	91	0.94922	1,156.11523	773.30080000	0.00000	0.00000

Fig. 2-140 Screen for AE parameter table

(라) Hit Graph 화면

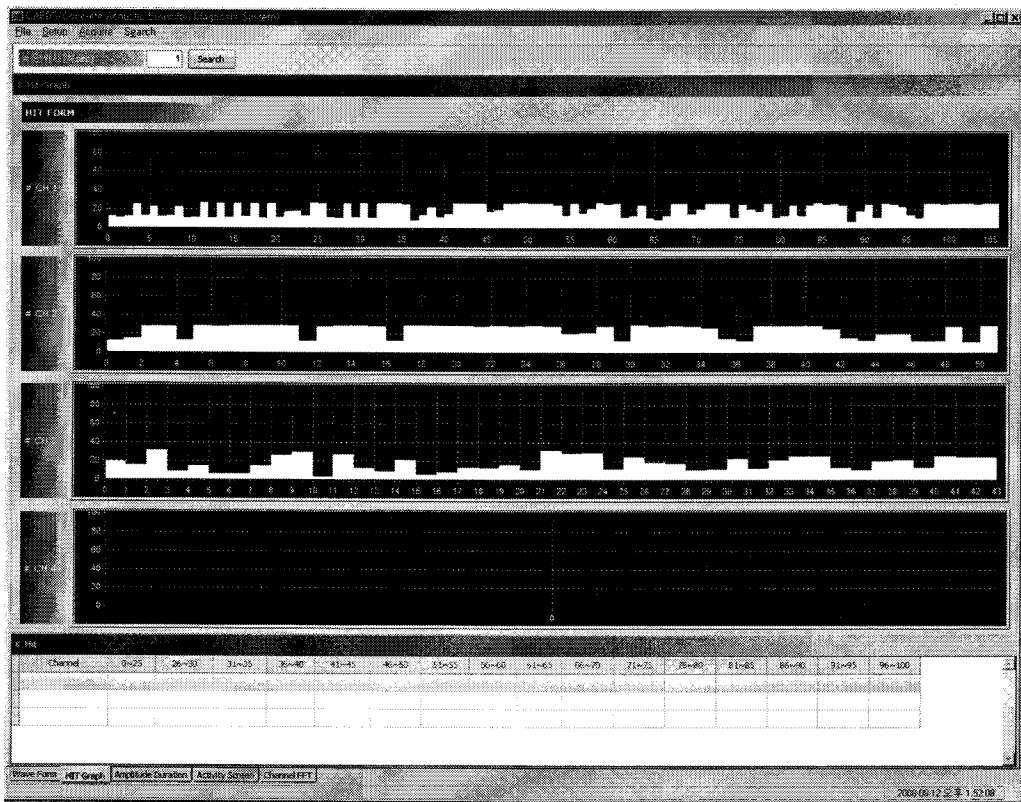


Fig. 2-141 Screen for AE hit diagram

- 수집된 AE 데이터의 Hit 정보를 Display하는 화면이다.
- 상단 Chart 1, 2, 3에 AE 신호 수집 데이터에 대한 Hit 정보를 Display하고 Chart 4에 변형률계의 추이를 Display하도록 구성하였다.
- 하단의 Grid는 Hit 정보의 분포 정도를 수치 자료로 Display한 것이다.
- Fig. 2-142는 Hit Graph 화면 설정을 위한 창으로 Hit Chart의 X, Y 축 범위를 설정한다. X 축 항목은 Hit 정보를 수집하는 시간 단위를 설정하며 이의 기본 단위는 초다. Y 축 항목은 Event당 총 Hit수를 나타낼 범위를 설정하는 것으로 Y 축의 스케일에 결정한다. 확인 버튼을 누르면 변경된 설정 값이 반영되어 화면을 재구성한다.

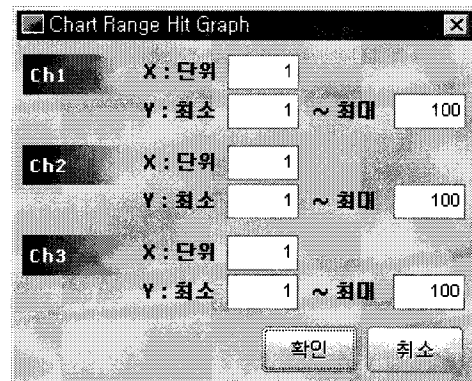


Fig. 2-142 Setup for hit graph

(마) Amplitude & Duration 화면

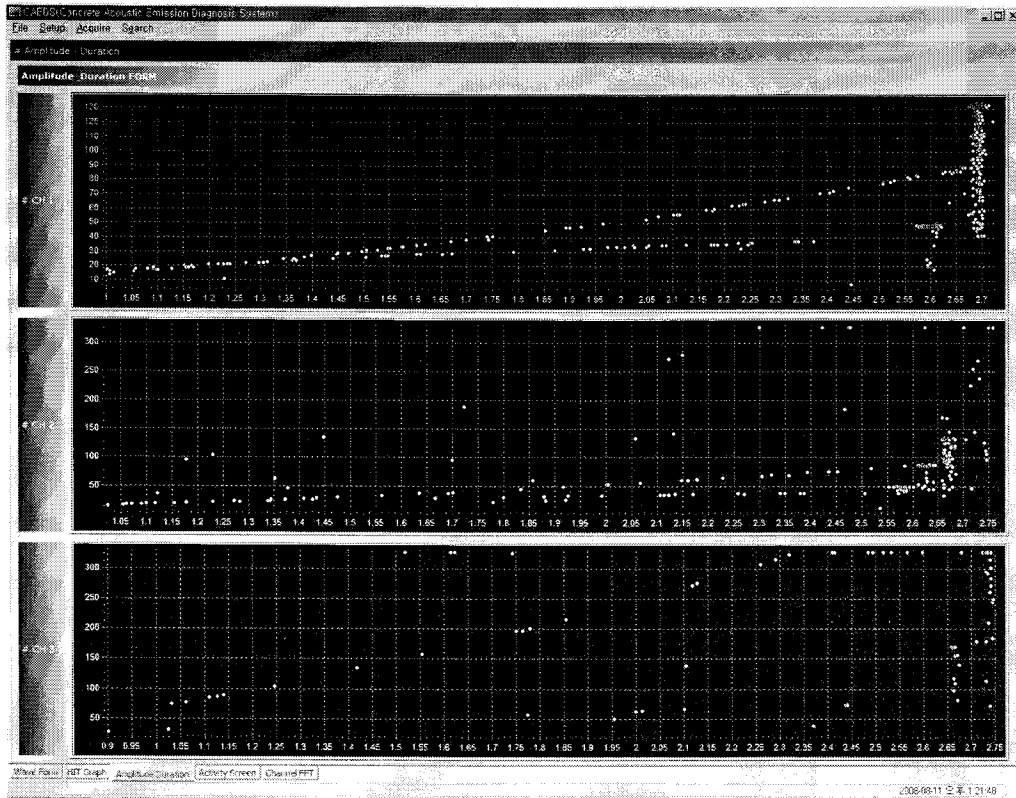


Fig. 2-143 Screen for graph of amplitude vs. duration

- Amplitude 와 Duration의 관계를 나타내는 화면(Fig. 2-143)이다.
- Y 축은 Duration을 나타낸다.
- X 축은 Amplitude를 나타낸다.
- Fig. 2-144는 Hit Graph 화면 설정을 위한 창으로 Amplitude & Duration 화면에서의 Chart의 범위를 설정한다. X 축은 Amplitude의 범위를 설정한다. Y 축은 Duration의 범위를 설정한다. 확인 버튼을 누르면 변경 사항이 적용된다.

Fig. 2-144 Setup for graph of amplitude vs. duration

(바) Activity Screen

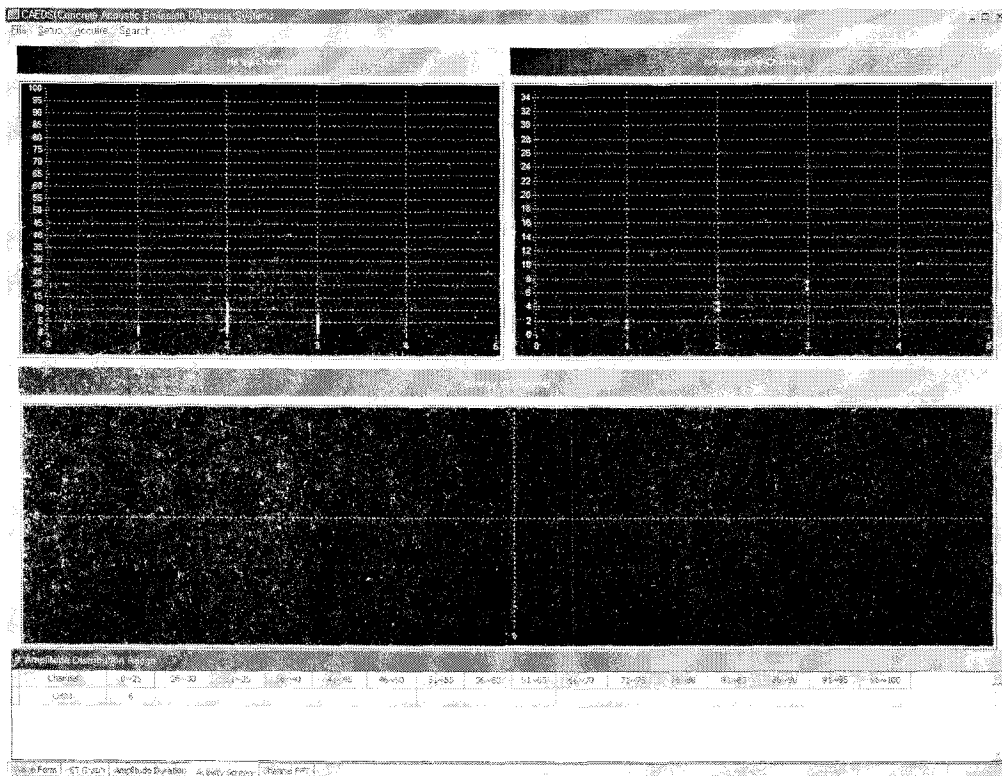


Fig. 2-145 Screen for activity

- Activity Screen으로 각 채널별 Hit 정보를 유형별로 분류하여 Display한다.

(Fig. 2-145)

- 상단 좌측 Chart는 채널별로 발생한 Hit수를 Display한다.- X축 : Channel- Y축 : Hit 수

- 상단 우측 Chart는 채널별로 발생한 Hit의 최대값을 표시한다.- X축 : Channel- Y축 : 최대 Hit 수

- 하단의 Grid는 Hit Graph 화면의 Grid와 동일한 내용을 Display한다.

- Fig. 2-146은 Activity 화면 설정을 위한 창으로 Activity Screen의 Chart별 표현 범위를 설정한다. 확인 버튼을 누르면 변경 사항이 적용된다.

Fig. 2-146 Setup for activity

(사) Search 화면

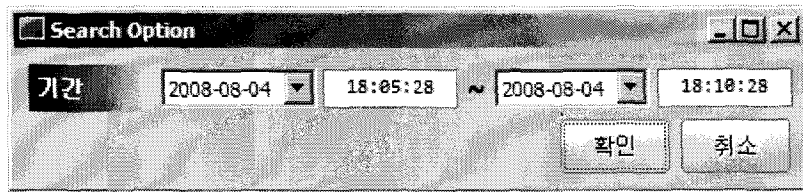


Fig. 2-147 Screen for data search

- 데이터베이스에 저장된 AE Raw 데이터 및 AE Parameter 연산결과를 조회하기 위해 조회 조건을 입력하는 화면이다. (Fig. 2-147)
- 조회조건은 수집 일시를 초 단위 까지 입력할 수 있다.
- 날짜는 반드시 선택해야 하는 항목이나 날짜를 선택하지 않아도 기본 값으로 조회가 가능하다.

라. DataBase

AE 시스템을 위해 사용한 데이터베이스는 SQL[Structured Query Language]언어로써 사용자와 관계형 데이터베이스를 연결시켜 주는 표준 검색 언어이다. 데이터베이스에서 쓰이는 언어 중에서 가장 널리 알려지고 많이 사용되고 있으며 다양한 플랫폼에 사용이 가능하고 커널 thread를 이용하여 Multi thread를 지원하고 대용량의 DB를 구현하는데 용이하다. 데이터베이스 내부는 Physical Database와 Logical Database 부분으로 나눌 수 있으며 그 구성은 다음과 같다.

(1) Physical

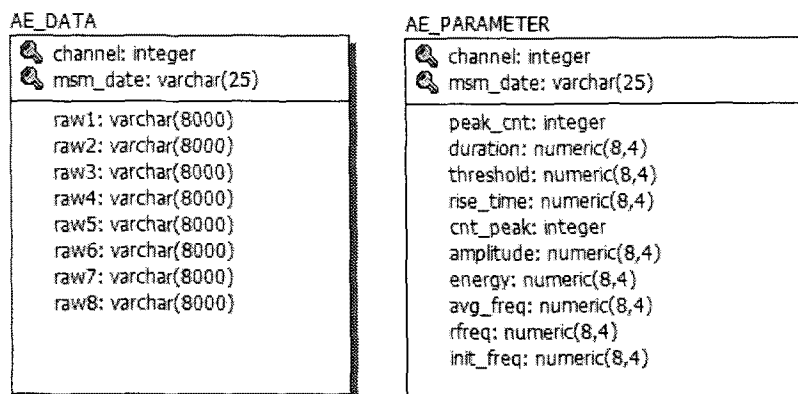


Fig. 2-148 Physical structure of database

(2) Logical

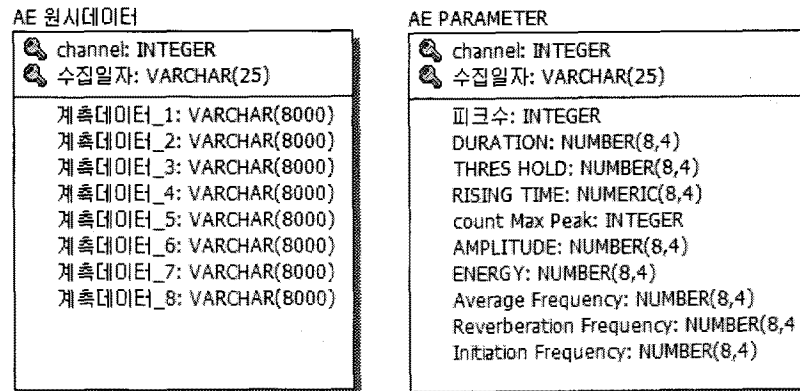


Fig. 2-149 Logical structure of database

(3) Data Table 관리

▪ AE Data Table

Table 2-11 Fields of database for AE data table

No	필드명	데이터 Type	Length	Description
1	Channel	Int		채널 정보를 저장한다.
2	Msm_date	Varchar	25	계측시점의 시간을 1/100 초 단위로 저장한다.
3	Raw1	Varchar	8000	
4	Raw2	Varchar	8000	
5	Raw3	Varchar	8000	AE 원시데이터를 저장한다.
6	Raw4	Varchar	8000	AE 원시데이터의 Segment size를 최대 8192로 설정하고 해당 원시데이터를 8000 Byte 씩 나누어 저장한다.
7	Raw5	Varchar	8000	
8	Raw6	Varchar	8000	SOL Server가 한 필드에 저장할 수 있는 최대 길이는 8000 Byte가 한계이다.
9	Raw7	Varchar	8000	
10	Raw8	Varchar	8000	

▪ AE Parameter Table

Table 2-12 Fields of database for AE parameter table

No	필드명	데이터 Type	Length	Description
1	Channel	Int		채널 정보를 저장한다.
2	Msm_date	Varchar	25	계측시점의 시간을 1/100 초 단위로 저장한다.
3	Peak_cnt	Int		전체 Peak의 개수
4	Duration	Numeric	8, 4	Threshold Level을 넘은 Peak 사이의 시간
5	Threshold	Numeric	8, 4	신호 계산 유효 Level
6	Rise_time	Numeric	8, 4	Max Peak 까지의 시간
7	cnt_peak	Int		Max Peak)까지의 AE Count
8	Amplitude	Numeric	8, 4	Max Peak의 값
9	Energy	Numeric	8, 4	((End Peak - Start Peak) * Amplitude) / 2
10	Avg_freq	Numeric	8, 4	AE Count / Duration
11	Rfreq	Numeric	8, 4	(AE Count - Counts to Peak) / (Duration / Rise Time)
12	Init_freq	Numeric	8, 4	Counts To Peak / Rise Time

제 3 절 능동형 비파괴평가 기술 개발

1. 서 론

표면파를 이용한 능동형 비파괴검사 기술은 콘크리트의 손상 정도, 즉 균열의 깊이를 콘크리트에서 가진시킨 표면파를 이용하여 측정하는데 목적이 있다. 최종적으로 콘크리트 구조물의 손상 평가에 최적화된 표면파 실험의 프로토타입을 개발하기 위한 능동형 비파괴평가 신기술 개발의 연차별 연구 목표 및 내용은 다음과 같다.

- 1차년도 연구 목표

- 콘크리트 표면파 해석을 위한 거동 연구

- 1차년도 연구 내용

- 파전달 해석을 통한 콘크리트 균열 깊이에 따른 표면파 특성 분석
- 표면파 출력 특성에 맞는 신호처리 기법 연구
- 콘크리트의 특성을 고려한 표면파 발신 및 수신 시스템 조사

- 2차년도 연구 목표

- 콘크리트의 균열 깊이 측정을 위한 능동형 비파괴검사 개발

- 2차년도 연구 내용

- 시편 실험을 통한 콘크리트의 균열 깊이별 표면파 신호 취득
- 균열 깊이별 표면파 신호의 특성 분석
- 균열 깊이 판정을 위한 기법 개발
- 파전달 해석을 통한 철근 콘크리트 균열 깊이에 따른 표면파 특성 분석

- 3차년도 연구 목표

- 현장 적용을 고려한 균열 깊이 측정 능동형 비파괴검사 기술 개발

- 3차년도 연구 내용

- 실험을 통한 철근 콘크리트의 균열 깊이별 표면파 신호 취득

- 철근의 영향을 고려한 균열 깊이 판정 기법 개발
- 현장 응용을 위한 프로토타입 시스템 구성 및 현장 적용 실험

본 연구의 1 차년도에는 콘크리트에서 전달되는 표면파의 특성을 파전달 해석 및 실험을 통해서 파악하고, 이에 적합한 비파괴검사 시스템을 구성하였다. 또한, 안정적인 표면파의 발현을 위한 여러 충격 가진 장치도 검토하였다. 검증된 충격 가진 장치와 측정 장치를 바탕으로, 2 차년도에는 표면파의 투과율을 이용한 콘크리트 균열의 깊이를 측정하는 기법을 제안하였다. 또한, 3 차년도에도 콘크리트 내부에 위치하는 철근의 영향을 고려하여 균열 깊이를 추정할 수 있는 기법을 추가적으로 제안하였다. 제안된 균열 깊이 측정 기법은 파전달 해석과 실내 실험을 통해 타당성을 검증하였고, 이를 바탕으로 실제 현장에서 적용 가능한 프로토타입 시스템을 제시하였다.

2. 스펙트럼 에너지 투과법을 이용한 콘크리트의 균열 깊이 측정

가. 스펙트럼 에너지 투과비의 유도

균열 깊이 추정을 위한 스펙트럼 에너지 투과법(spectral energy transmission method)은 (1) 자기 보정 기법을 이용하여 표면파 투과 함수를 측정하는 부분과 (2) 측정된 투과 함수로부터 스펙트럼 에너지 투과비를 산정하는 부분으로 구성된다. 실험을 통한 표면파의 투과 함수 측정은 점가진원에 의하여 생성된 파동을 균열 면을 기준으로 전방과 후방의 표면에 부착한 두 개의 센서를 통하여 계측하고 이를 주파수 영역에서 신호 처리함으로써 얻을 수 있다.

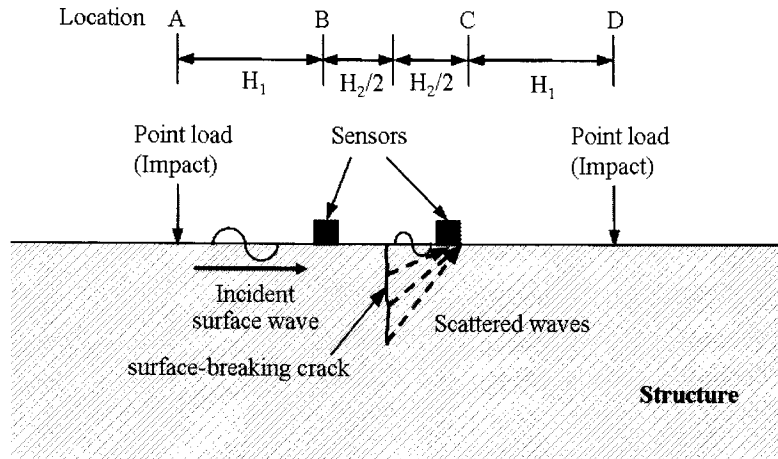


Fig. 3-1 Self-compensating surface wave measurement

탄성체의 표면에 두 개의 센서가 Fig. 3-1과 같이 균열을 중심으로 동일한 거리만큼 떨어져 위치하는 경우를 생각해 보자. 센서들과 동일선상에 위치한 A점에 충격을 가하면 가진된 파동은 고체 내부와 표면을 따라 진행하여 가진 위치와 가까운 센서(B점)와 표면 균열을 거쳐 C점에 위치한 센서에서 탐지된다. 이 때, A점에서 가진되어 B점에서 획득된 신호의 주파수 영역 응답은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{AB}(f) = S_A(f)T_{AB}(f)R_B(f) \quad (3-1)$$

여기서, $Y_{AB}(f)$ 는 B점에 위치한 센서로부터 획득된 파형의 푸리에 변환이며, $S_A(f)$ 는 가진원에 의한 A점에서의 주파수 응답 함수이고, $R_B(f)$ 는 B점을 지나가는 파동을 B점에 위치한 센서로 측정하였을 때의 센서의 주파수 응답이며, $T_{AB}(f)$ 는 파동의 A점과 B점 사이에서의 투과 함수(transmission function, TRF)이다. 파가 진행할 때 에너지의 일부가 소산되어 파의 진폭은 감소하게 되며, 투과 함수는 이러한 파의 기하학적 감쇠 특성을 포함하고 있다. 마찬가지로, $S_A(f)$ 에 의하여 생성된 파동을 C점에 위치한 센서로 측정하였을 때는 다음 식 (3-2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y_{AC}(f) = S_A(f)T_{AB}(f)T_{BC}(f)R_C(f) \quad (3-2)$$

여기서, $T_{BC}(f)$ 는 $T_{AB}(f)$ 를 정의할 때와 똑같이 B점과 C점 사이의 파동의 투과 함수이며, 마찬가지로 $R_C(f)$ 는 같은 방식으로 정의되는 C점에 위치한 센서의 주파수 응답 함수이다.

한편, 식 (3-1)과 식 (3-2)에서의 S_i 와 R_j 는 각각 충격 가진의 미지 변동에 따른 효과와 센서 특성 및 콘크리트 부재와의 접촉상태에 따른 효과를 포함하고 있으며, 특히 식 (3-2)의 $T_{BC}(f)$ 를 구하기 위해서는 S_i 와 R_j 뿐만 아니라 $T_{AB}(f)$ 도 제거하여야 한다. 따라서 이러한 항들을 제거하고 $T_{BC}(f)$ 를 구하기 위해서는 동일한 충격 가진원을 이용하여 D점에서 가진하고, 이로부터 생성된 파동을 C점과 B점에서 측정하여 $Y_{DC}(f)$ 와 $Y_{DB}(f)$ 의 상보적인 두 세트를 구성하여야 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$Y_{DC}(f) = S_D(f)T_{DC}(f)R_C(f) \quad (3-3)$$

$$Y_{DB}(f) = S_D(f)T_{DC}(f)T_{CB}(f)R_B(f) \quad (3-4)$$

B점과 C점 사이의 투과 함수인 $T_{BC}(f)$ 와 C점과 B점 사이의 투과 함수인 $T_{CB}(f)$ 는 대칭 조건에 의하여 동일한 파동 경로와 동일한 기하학적 감쇠를 가지는 상호적인 관계이므로 $T_{BC} = T_{CB}$ 로 가정하고, 식 (3-1)부터 식 (3-4)를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$|T_{BC}(f)| = \sqrt{|T_{BC}(f)T_{CB}(f)|} = \sqrt{\frac{Y_{AC}(f)Y_{DB}(f)}{Y_{AB}(f)Y_{DC}(f)}} \quad (3-5)$$

식 (3-5)는 신호의 강도, 접촉 상태, 거리 등에 대한 정보가 필요 없으므로 이러한 요인에 대한 추가적인 보정 과정이 필요하지 않기 때문에 자기 보정

(self-compensating)이라 한다. 투과 함수 $|T_{BC}(f)|$ 는 B점에 입사된 파동이 B점과 표면 균열 사이를 지나 C점에 투과되었을 때 입사파의 투과파에 대한 주파수별 크기의 비를 나타낸다. 이때 재료는 등방성 재료로 가정하고, 매질을 전파하는 파동은 센서에 의해 영향을 받지 않는 것으로 가정한다. $|T_{BC}(f)|$ 는 완전 투과일 경우는 1의 값을 가지고 투과되는 파가 없을 경우에는 0의 값을 가지므로, 이론적으로는 반드시 0과 1사이에 그 값이 존재하게 된다. 따라서 이를 균열의 깊이와 연관시켜 생각해보면 균열이 없을 경우에는 1의 값을 가지는 반면에 균열이 깊어질수록 그 값이 1보다 작아지게 됨을 알 수 있다.

측정된 투과 함수에 근거하여 균열 깊이를 추정하기 위해서는, 투과 함수 내에서 균열 깊이에 민감한 특성을 추출하여 이 특성치를 균열 깊이와 연관 짓는 과정이 필요하다. 앞선 연구에서 밝혀졌듯이 표면파 투과 함수는 균열의 깊이에 따라 변화하는 특성이 있으나, 주파수에 의존적인 성질을 가지고 있다. 이러한 표면파 투과 함수의 주파수 의존성은 잡음이나 측정 오차 등에 매우 큰 영향을 받으며, 이에 따라 균열 깊이 추정에 있어서 어려움을 야기하게 된다. 본 연구에서는 이러한 주파수 의존성을 없애기 위하여 에너지 개념을 도입하였다. 표면파 투과 함수는 균열이 깊어짐에 따라 주파수별로 비율은 다르지만 감소하는 경향이 있으며, 이에 따라 임의의 균열 깊이에서의 투과 함수의 총 에너지는 다른 깊이에서의 에너지와 구별된다고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 이 총 에너지를 균열 깊이 d_1 에서 측정된 투과 함수(T_{BC})의 스펙트럼 에너지(E)로 정의하고 식 (3-6)과 같이 투과 함수 그래프 아래의 면적으로 구할 수 있도록 하였다.

$$E(d_1) = \int_{f_L}^{f_U} T_{BC}(f; d_1) df \quad (3-6-A)$$

또는 이산 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E(d_1) = \sum_{i=N_L}^{N_U} T_{BC}(f_i; d_1) \Delta f \quad (3-6-B)$$

여기서 f_U 와 f_L 은 스펙트럼 에너지를 구하기 위한 투과 함수의 적분 구간으로 각각 N_U 와 N_L 번째에 해당하는 주파수이다. 이 적분 구간은 스펙트럼 에너지의 크기에 직접적으로 영향을 끼치기 때문에 일관성 있는 결과를 얻기 위해서는 적분 구간의 선택에 있어서 일정한 기준이 있어야 한다. 본 연구에서는 주파수의 상한과 하한 구간을 결정하기 위해 표면과 투과 함수의 신호 일관성 지수(signal consistency index; $SC(f)$)를 도입하였다.

한편, 임의의 깊이에서 측정된 스펙트럼 에너지를 균열 깊이와 연관시키기 위해서는 정규화 과정이 필요하며, 다음과 같이 스펙트럼 에너지 투과비(spectral energy transmission ratio)를 통하여 정규화를 한다.

$$R(d) = \frac{E(d)}{E(d_0)} = \frac{\int_{f_L}^{f_U} T_{BC}(f; d) df}{\int_{f_L}^{f_U} T_{BC}(f; d_0) df} \quad (3-7)$$

여기서 $R(d)$ 는 균열 깊이 d_0 를 기준으로 한, 균열 깊이 d 에 대한 스펙트럼 에너지 투과비이며, 이 때 기준이 되는 균열 깊이 d_0 는 균열이 없는 상태에 해당한다. 또한 f_U 와 f_L 은 적분 변수이며, 식 (3-7)의 계산값에 매우 큰 영향을 미친다. 이는 추후에 다시 자세하게 설명하겠다. 이론적으로 $R(d)$ 는 0과 1 사이의 값을 가진다. 1은 파가 진행하는 경로에 균열이 없음을 의미하며, 균열의 깊이가 깊어질수록 0의 값으로 접근하게 된다.

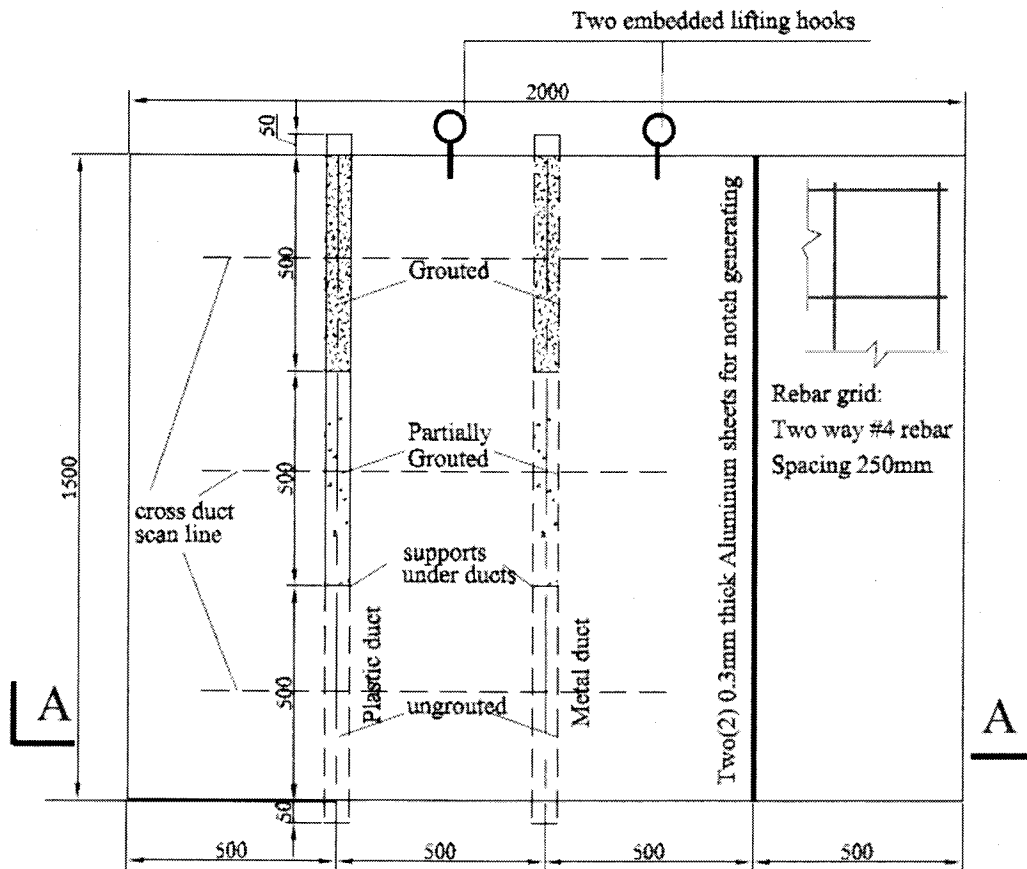
스펙트럼 에너지를 이용하여 균열 깊이를 추정하는 본 방법은 기존의 CF 기법이 나 TOFD 기법과는 달리 균열 깊이 추정 과정에서 파동의 속도를 필요로 하지 않기 때문에 파의 속도를 구하기 위한 추가적인 실험이 필요 없는 등의 장점이 있다. 뿐만 아니라, 에너지 기반의 방법이기 때문에 균열 깊이를 추정하는 과정에서 주파수 의존성이 없으며, 스펙트럼 에너지 비를 이용하여 균열 깊이를 직접적으로 추정할 수 있다.

나. 스펙트럼 에너지 투과비에 대한 검증 실험

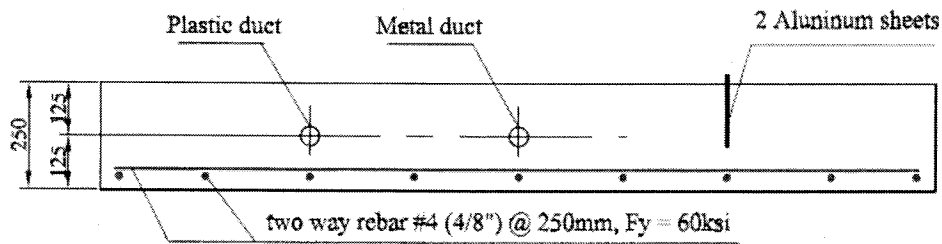
(1) 검증 실험을 위한 시편 준비

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 미국 University of Illinois, Urbana-Champaign 토목/환경공학과의 John S. Popovics 교수 연구진의 협조를 얻어 검증 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 시편은 Fig. 3-2에서 나타낸 바와 같은 철근 콘크리트 슬래브이다. 철근 콘크리트 슬래브는 가로 1.5 m, 세로 2.0 m, 두께 0.25 m의 크기로 제작되었으며, 사용된 콘크리트의 28일 압축 강도는 42.3 MPa이었다. 초음파 속도 측정법(UPV)을 이용하여 측정된 P-파의 속도는 4100 m/s였고, 표면파의 속도는 2250 m/s였다. 균열은 콘크리트를 타설하기 전에 0 mm에서 150 mm 까지 선형적으로 증가하는 0.3 mm 두께의 알루미늄 시트를 그리스를 바른 후 슬래브 폭 방향으로 삽입하여, 정확한 균열 깊이와 균열 선단을 가진 균열을 생성하였다.

표면파 투과 측정을 위한 실험 장치의 구성은 Fig. 3-3에서 보듯이 가진기와 센서, 오실로스코프, 그리고 데이터의 저장 및 분석을 위한 컴퓨터로 구성된다. 콘크리트에서의 표면파를 생성하기 위하여 서로 다른 직경을 가진 강구를 준비하였다. 그러나 예비 실험 결과 공의 직경에 따른 투과 함수의 차이가 크지 않아, 이에 따라 12 mm 직경의 강구로만 본 실험을 수행하였다. 한편, 센서는 접촉식 소형 가속도계를 사용하였다. 센서간의 거리(H_2)를 30 cm, 가진 위치와 인근 센서와의 거리(H_1)를 15 cm로 두었으며, 균열은 두 센서의 중앙점에 위치한다. 데이터 획득 과정은 우선 A점에서 강구를 이용하여 충격 가진시켜 표면파를 생성하면, 생성된 표면파는 B와 C점에 위치한 접촉식 센서에 순차적으로 측정되게 된다. 측정된 신호는 오실로스코프로 전달되며, 이 데이터는 신호 분석을 위하여 연결된 컴퓨터에 저장된다. 다음으로 D점에서 충격 가진한 후에 상기의 과정을 되풀이 한다.



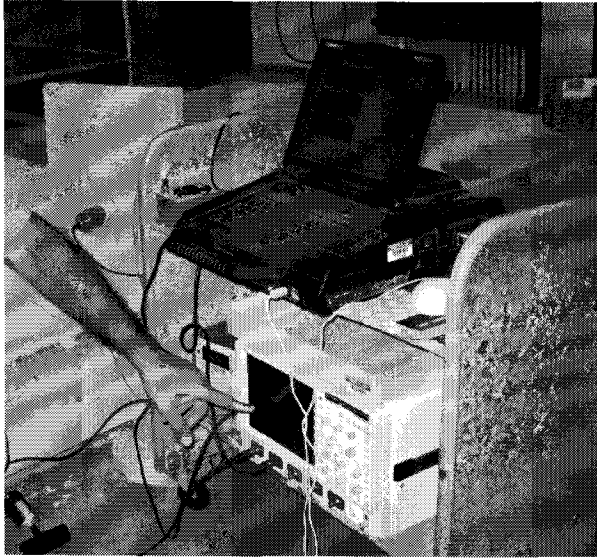
(a) Plan View of Slab No.1



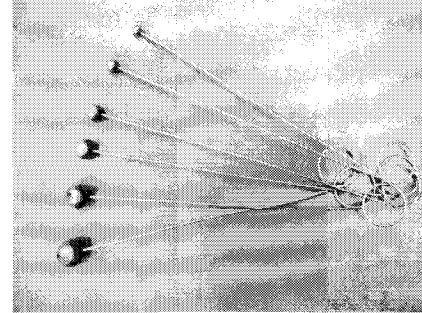
(b) Section A-A of Slab No.1

Spray oil on both sides of the aluminum sheets before casting concrete

Fig. 3-2 Concrete slab specimen with a varying-depth crack



(a) data acquisition system



(b) steel ball for impact

Fig. 3-3 Experimental apparatus

(2) 실험 결과 및 분석

우선 균열이 없는 상태를 포함하여 30 mm에서 150 mm까지 20 mm씩 증가하는 균열에 대해 자기 보정 기법을 이용하여 투과 함수를 구하여 보았다. Fig. 3-4와 Fig. 3-5는 균열이 없을 때와 균열 깊이가 30 mm일 때 취득된 표면파의 시간 영역 신호이다. 균열 깊이 측정을 위한 기존의 방법 중 하나인 time-of-flight of diffracted P-waves 방법(TOFD)은 응력과 신호의 성분 중 가장 빨리 도달하는 성분을 P-파로 가정하고, 이 P-파의 전파 시간 차이를 이용하여 균열의 깊이를 추정하는 방법이다. 이 방법은 P-파 속도가 얼마나 정확한가에 따라 균열 깊이 추정의 정확성이 달라지고, 무엇보다 P-파의 도달 시점을 정하기 위한 트리거 확인이 매우 어려운 단점이 있다.

한편, 주파수 영역에서의 자기 보정된 표면파 투과 함수를 구하기 위하여 획득된 신호들에 식 (3-1)부터 식 (3-5)를 적용하였으며, 구한 투과 함수의 예를 Fig. 3-6과 Fig. 3-7에 나타내었고, 모든 경우를 Fig. 3-8에 나타내었다. Fig. 3-8에서 알 수 있듯이, 0-50 kHz의 범위 내에서 균열이 깊어짐에 따라 투과 함수가 감소하는 경향을 보인다. 임의로 선택된 주파수에 대해 균열 깊이에 따른 투과 정도를 추출

한 결과 Fig. 3-9와 같이 균열이 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보이긴 하나 투과 정도가 주파수에 따라 달라지는 주파수 의존성으로 인하여 기존의 차단 주파수 (cut-off frequency; CF) 기법을 사용하기엔 어려움이 존재한다. 예를 들어, 10.01 kHz에 해당하는 투과율은 균열 깊이가 깊어짐에 따라 급격한 감소를 보이나 35.89 kHz는 큰 변화를 보이지 않는다. 레일리파 속도가 2250 m/s일 때 기존의 CF 기법을 이용하여 추정한 균열 깊이의 제곱근오차(root mean square error; RMSE)를 Fig. 3-10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 추정치가 정확한 균열 깊이에 비하여 매우 큰 오차를 나타내고 있는 것을 알 수 있었으며, 이로부터 기존의 CF 기법은 균열 깊이 추정에 있어서 신뢰성이 높지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유로 스펙트럼 에너지 기반의 균열 깊이 추정 기법을 제안하게 되었다.

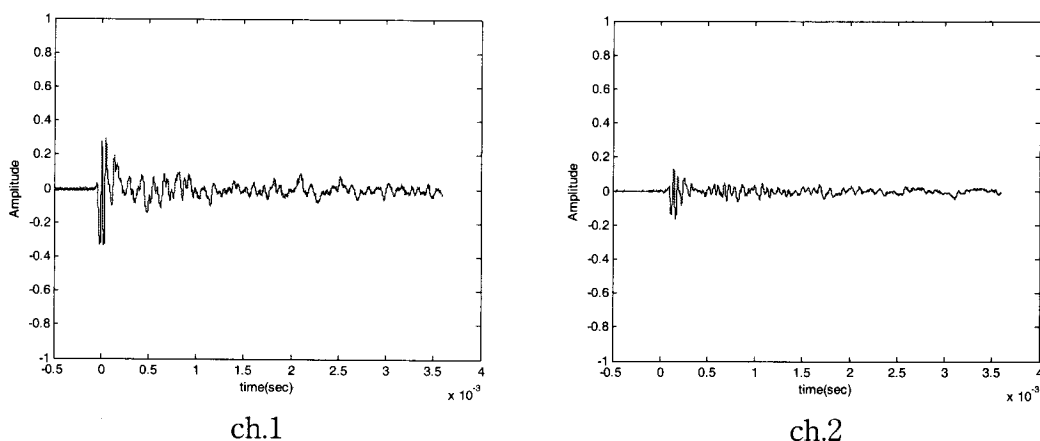


Fig. 3-4 Raw signal on the path with no crack

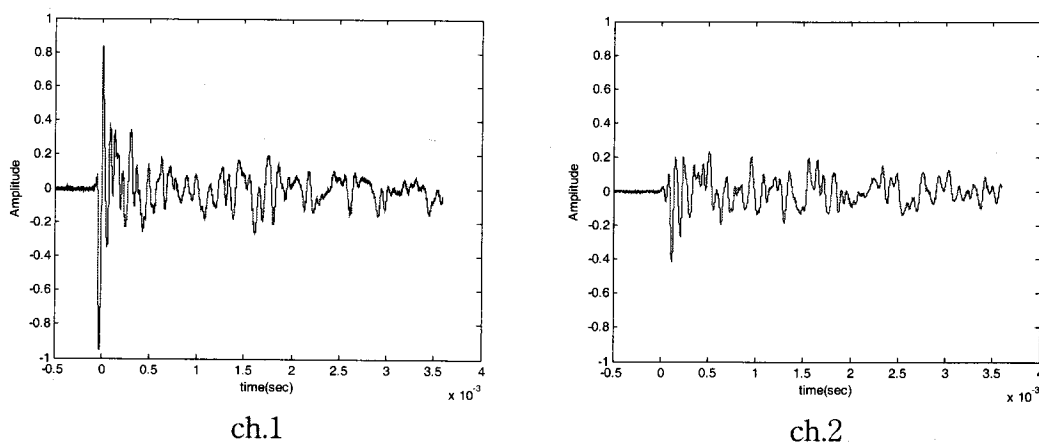


Fig. 3-5 Raw signal on the path with the crack depth of 30 mm

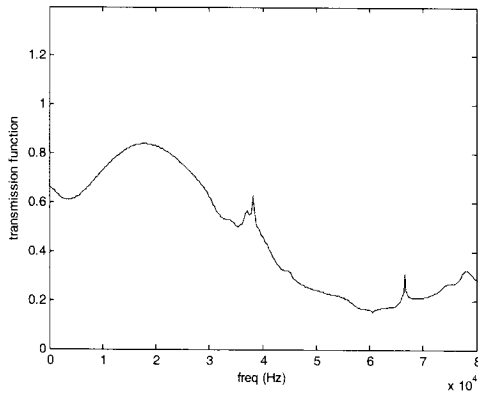


Fig. 3-6 TRF (crack-free)

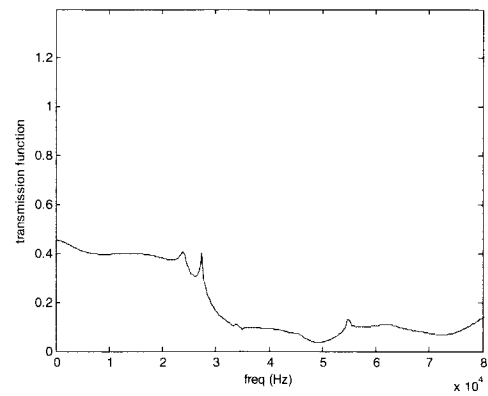


Fig. 3-7 TRF (30 mm-crack)

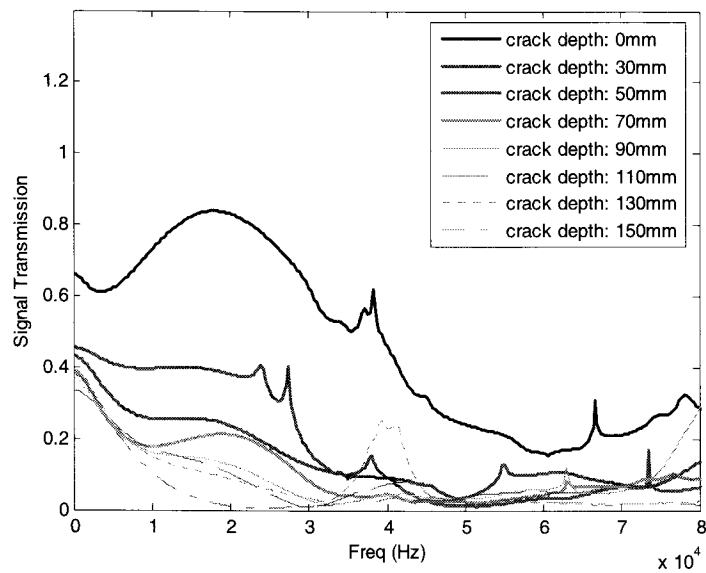


Fig. 3-8 Transmission function according to the crack depth

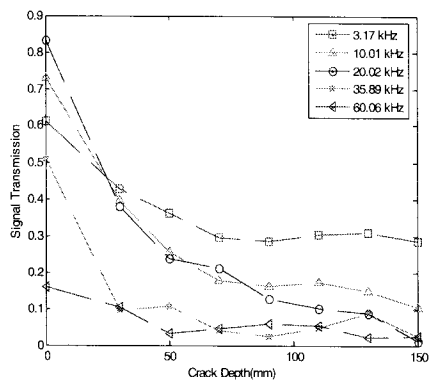


Fig. 3-9 Transmission function according to the frequency

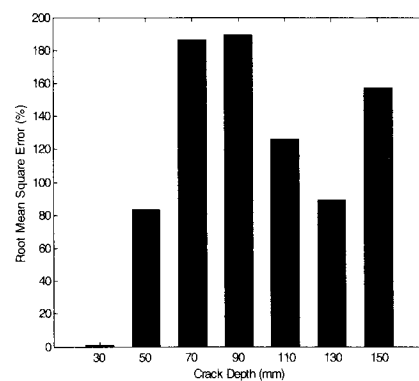


Fig. 3-10 Determined crack depths based on cut-off frequency method

앞 절에서 밝혔듯이, 식 (3-6)과 식 (3-7)에서 적분 구간의 상한 변수인 f_U 와 하한 변수인 f_L 은 신뢰성 있는 균열 깊이 추정과 일관성 있는 스펙트럼 에너지의 계산에 있어서 매우 중요한 변수이다. 이는 균열 깊이에 따른 표면과 투과 함수를 오직 실험적으로만 구할 수 있기 때문에 스펙트럼 에너지의 크기가 계산에 포함된 주파수 성분의 숫자에 매우 의존하기 때문이다. 뿐만 아니라, 비일관성 잡음이 표면과 투과 함수에 포함되어 있는 경우 낮은 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio; SNR)로 인하여 추정의 신뢰성이 낮아지게 된다. 따라서 스펙트럼 에너지의 측정에 있어서 일관성을 가지며, 신뢰성이 높은 결과를 얻기 위한 주파수 대역의 결정 방법이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 신호 일관성 지수를 적용하였다.

신호 일관성 지수인 $SC(f)$ 를 구하기 위해서는 균열이 없는 위치에서 5회의 반복 실험을 수행하여야 하며, 이로부터 $SC(f)$ 는 다음 식을 이용하여 구한다.

$$SC(f) = \frac{\sqrt[5]{T_{BC1}^{d_0} T_{BC2}^{d_0} T_{BC3}^{d_0} T_{BC4}^{d_0} T_{BC5}^{d_0}}}{(T_{BC1}^{d_0} + T_{BC2}^{d_0} + T_{BC3}^{d_0} + T_{BC4}^{d_0} + T_{BC5}^{d_0})/5} \quad (3-8)$$

이 값은 투과 함수와 마찬가지로 각 주파수에 대해 0 과 1 사이의 값을 가진다. 0에 가까운 값을 가질수록 획득된 신호 사이에는 일관성이 존재하지 않음을 의미한다. 스펙트럼 에너지를 계산하기 위한 적분 구간인 f_U 와 f_L 은 평균 투과 함수 상에서 신호 일관성 지수가 특정한 값 (예를 들자면, 0.99) 이상이 연속적으로 나타나는 구간의 상한과 하한으로 결정한다. 단, 해석의 일관성을 위하여 주파수 영역의 상한과 하한인 f_U 와 f_L 은 균열이 없는 상태에서 결정하며, 이 값을 동일한 재료적 성질을 가진 재료 내에서는 일관성 있게 사용하도록 한다. 즉, 균열부에서의 스펙트럼 에너지 계산 시에는 동일한 부재 내에 균열이 없는 부위에서 측정한 f_U 와 f_L 을 식 (3-7)에 대입하여 구하도록 한다.

한편, 주파수 영역의 결정을 위한 신호 일관성 지수의 기준 값은 스펙트럼 에너지의 일관적인 계산에 있어서 매우 중요한 영향을 미치는데, 앞선 연구에서는 0.99 이하의 값을 가지는 주파수 영역은 잡음 성분이 포함되어 있을 가능성이 높으므로

이 값 이상을 사용하도록 제안하였으나, 본 연구에서는 주파수 의존성이 없는 에너지를 사용하므로, 신호 일관성 지수의 기준 값에 따른 스펙트럼 에너지 투과비의 변화율을 조사하여 이로부터 스펙트럼 에너지 투과비의 계산에 있어서 가장 적합한 신호 일관성 지수의 기준값을 결정하고자 하였다.

각각의 균열 깊이에 해당하는 스펙트럼 에너지 투과비를 Fig. 3-11에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 균열 깊이와 스펙트럼 에너지 투과비가 매우 긴밀한 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. 또한, 신호 일관성 지수 값이 0.85에서 0.95 사이의 값을 가지는 경우에는 스펙트럼 에너지 투과비의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이 범위 내에서는 균열 깊이에 따라 투과비가 균열 깊이에 따라 현저한 차이를 보이며, 특히 균열의 깊이가 100 mm 정도까지는 투과비가 급격하게 감소함으로써 스펙트럼 에너지 투과비가 균열 깊이의 측정에 있어서 매우 민감한 지표임을 알 수 있다. 따라서 주파수 대역을 결정하기 위해 0.85에서 0.95 사이의 신호

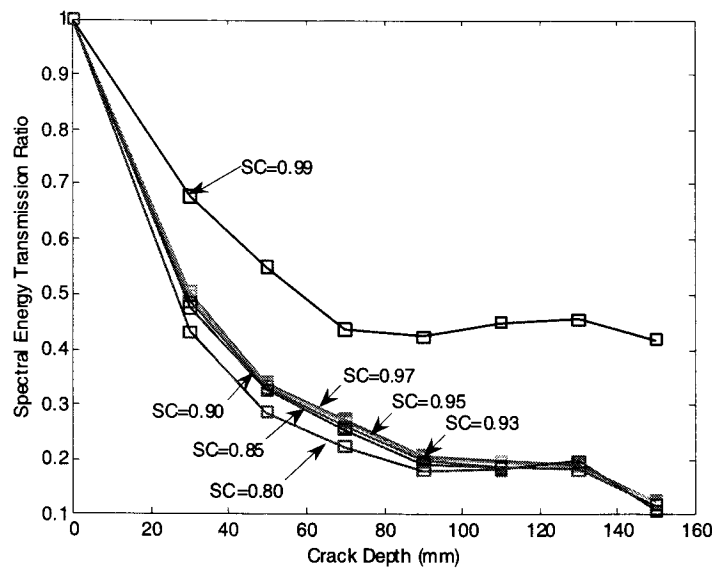


Fig. 3-11 Spectral energy transmission ratio according to the signal consistency index

앞에서 보인 바와 같이 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이와의 상관 관계를 바탕으로 현장에서의 균열 깊이 추정에 사용할 수 있다. 따라서 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이의 상관 관계식을 실험 데이터를 사용하여 균열 깊이를 간편하

게 추정할 수 있게 하고자 한다. Fig. 3-11에서 알 수 있듯이, 신호 일관성 지수 값이 0.85에서 0.95 사이에 있는 경우는 주파수 대역에 따른 스펙트럼 에너지 투과비의 변화가 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 따라서 관계식을 결정하기 위한 회귀 분석에 사용된 실험 데이터는 신호 일관성 지수 값 0.95에 해당하는 주파수 대역으로 결정하였으며, 이에 따른 주파수의 하한치 f_L 은 0 이고 상한치 f_U 는 32.5 kHz 이다.

스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이와의 상관 관계식은 2변수 지수 함수 모델을 이용하여 결정하였다.

$$R(d) = a^{bd} \quad (3-9)$$

여기에서 상수값 a 와 b 는 회귀 분석에 의하여 결정되는 값이다. 회귀분석 결과 Fig. 3-12에서 나타낸 바와 같이 0.9968로 매우 높은 상관 계수 값을 가지는 함수 값을 구할 수 있었으며, 이때의 각 상수 값은 a 는 0.9843, b 는 1.156이었다. 제안된 모델식이 측정치를 잘 나타내는 것을 알 수 있다.

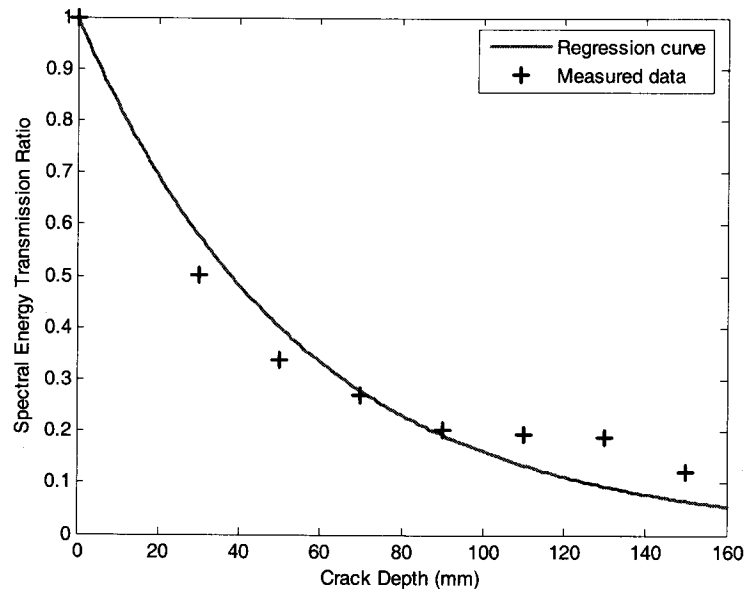


Fig. 3-12 Regression between spectral energy transmission ratio and crack depth

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위하여 기존의 방법과 비교하여 보았다. 이를 위하여 추가적인 실험을 수행하였으며, 실험 데이터는 동일한 실험체에서 회귀 분석에 사용되지 않은 다른 균열 깊이로부터 획득하였다. 실험으로부터 얻은 표면파 투과 함수는 Fig. 3-13과 같다. 비교를 위하여 사용된 방법은 시간 영역 방법인 TOFD 방법과 주파수 영역 방법인 CF 방법을 사용하였다. 비교 결과 Fig. 3-1에서 알 수 있듯이, TOFD 방법은 유효한 범위 내의 결과를 주는 것을 알 수 있는 반면에 CF 방법으로 구한 결과는 매우 큰 오차를 수반하고 있음을 알 수 있다. 또한, 모든 방법들 중에서 제안된 방법이 가장 정확한 값에 근접하는 결과를 주고 있다. 이는 제안된 스펙트럼 에너지 방법이 균열 깊이 측정에 매우 유효하며, 신뢰성이 우수한 방법임을 입증한다.

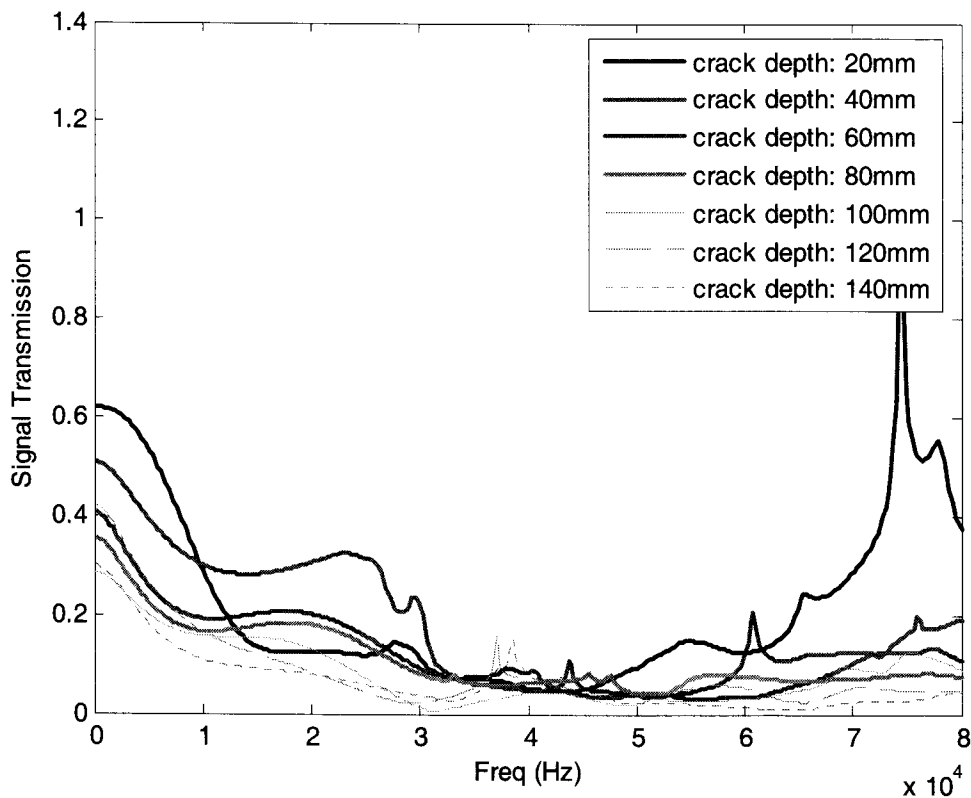


Fig. 3-13 Surface wave transmission for verifying the proposed method

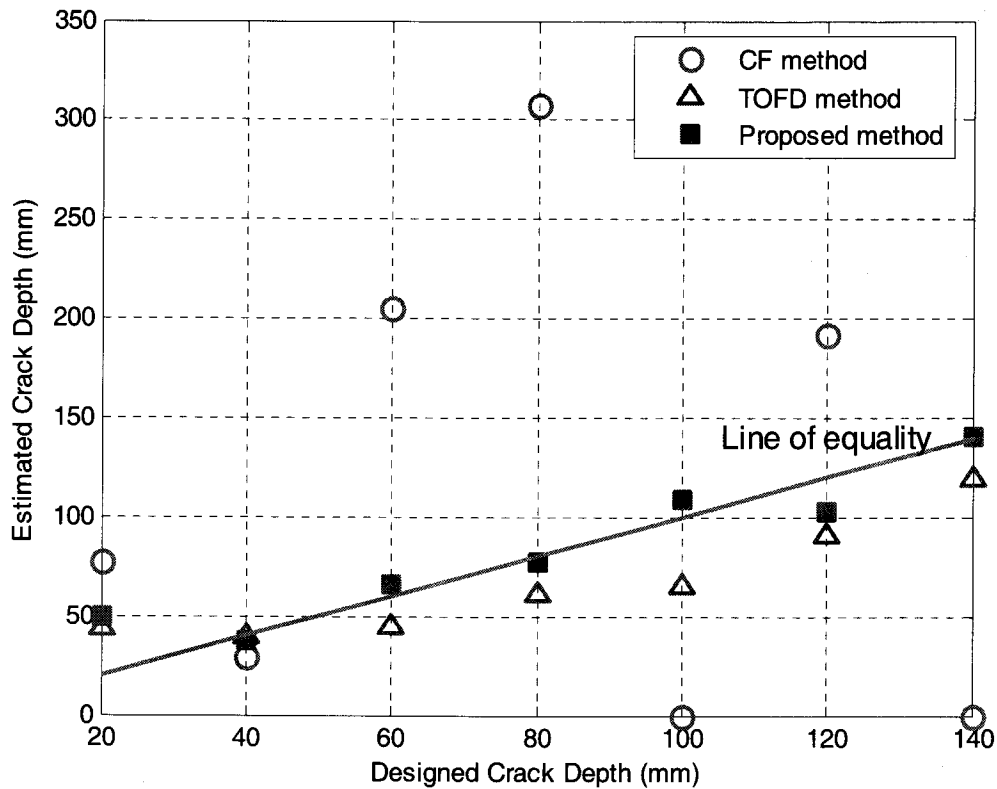


Fig. 3-14 Comparison of the determined crack depth

다. 콘크리트의 재료적 특성과의 상관관계

(1) 현장 특성에 대한 고려

앞 장에서 논의 되었듯이, 균열 깊이를 추정하기 위한 스펙트럼 에너지 투과법은 기존에 제안되어 있는 두 가지 방법에 비해 결과에 대한 정확성이 높을 뿐만 아니라, 주파수에 대한 의존성이 없고, 종파나 표면파의 속도에 대한 추가적인 실험이 필요하지 않기 때문에 현장에서 간편하게 균열 깊이를 추정할 수 있는 장점이 있다. 또한, 본 연구에서 사용하는 자기 보정 표면파 투과 함수는 센서의 간격이 동일한 경우에 투과 함수의 형태는 오직 균열 깊이에만 관련되며, 재료적인 차이에는 영향을 받지 않는다는 연구도 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서도 제안된 스펙

트럼 에너지 투과비와 균열 깊이와의 상관 모델이 콘크리트의 재료적 특성에 의존하지 않고, 오직 균열 깊이만의 함수라는 것을 실험을 통해 검증하였다.

한편, 콘크리트는 일반적으로 물, 시멘트, 모래, 자갈 등으로 이루어진 복합재이다. 콘크리트의 재료 및 기계적 특성에 영향을 미치는 요인이 많이 있지만, 특히 복합재인 콘크리트를 구성하는 재료의 배합 비율에 가장 큰 영향을 받는다. 콘크리트의 품질과 성능 평가에도 매우 중요한 인자인 일축 압축 강도 역시 물/시멘트 비와 잔골재/굵은 골재의 비율 등에 큰 영향을 받는다. 따라서 콘크리트의 재료적 특성이 스펙트럼 에너지 투과비에 미치는 영향을 알아보기 위해, 콘크리트의 재료적 특성을 구성 재료의 배합비만의 함수로 가정하였으며, 이를 위하여 다양한 배합비와 다양한 균열 깊이를 가진 콘크리트 실험체를 제작하여 연구를 수행하고자 한다.

(2) 실험 준비

콘크리트의 재료적 특성과 관계없는 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이 사이의 일반화된 관계를 도출하기 위하여, 다양한 배합비를 이용하여 콘크리트 시편을 제작하였다. 또한, 다양한 배합비와 함께 다양한 깊이의 균열을 생성하였다. 이를 Table 3-1에 정리하였다.

한편, 실험체의 크기는 반사파의 영향을 최소화하여 생성된 파동이 표면파의 성분이 지배적이 될 수 있도록 하였으며, 이를 위하여 가로 40 cm, 세로 40 cm, 두께 15 cm의 크기로 제작되었다. 모든 시편은 타설 후에 진동 다짐을 실시하였으며, 28일간 온도와 습도가 조절되는 양생실에서 수중 양생을 실시하였다. 또한, 타설 과정에서 균열을 생성하기 위하여 0.1 mm 두께의 OHP 필름을 준비하여 양면에 그리스를 바른 뒤 슬래브의 폭 방향으로 삽입하였다.

Table 3-1 Concrete slab specimen with varying mix-proportions

시편	배합비 (c:w:fa:ca)	균열깊이 (mm)	강도 (MPa)
SP1-1	1.0:0.38:1.55:2.11	4	40.2
SP1-2		5	
SP2	1.0:0.38:1.55:2.11	20.5	38.5
SP3-1	1.0:0.38:1.55:2.11	21	37.9
SP3-2		27.5	
SP4-1	1.0:0.38:1.55:2.11	35	42.2
SP4-2		40	
SP4-3		44	
SP5	1:0.5:0.5:2.0	76	36.8
SP6-1	1:0.65:2.7:3.6	22.5	30.7
SP6-2		70	29.8
SP7	1:0.65:3.1:3.2	68	33.5

기존의 인공 균열 생성 방식은 얇은 알루미늄 판이나 합성수지로 만들어진 판을 삽입하는 방식을 사용함으로써, 균열면에서 외력의 완전한 소멸 상태가 되지 않아 실제 균열을 모사하기에는 다소 어려움이 있었다. 그러나 OHP 필름을 이용하는 경우에는 필름 자체가 연성이 매우 크기 때문에 자유로운 형상을 만들 수 있고, 따라서 생성된 균열이 실제 균열과 매우 유사한 형상을 가지게 된다. 또한 타설 후에 필름의 제거 과정이 없기 때문에 부분적으로 접촉된 면이 존재하여, 실제 균열에서 발생하는 부분 접촉면과 유사성이 높다고 할 수 있다. 본 실험에서 생성된 균열은 Fig. 3-15(b)에서 보는 바와 같이 실제 균열과 유사한 형상을 가짐을 확인할 수 있다.

표면과 투과 함수 측정을 위한 실험 장치의 구성은 앞 장에서 소개된 바와 같이 가진기와 센서, 오실로스코프, 그리고 데이터의 저장 및 분석을 위한 컴퓨터로 구성되며, 한편, 가진 장치는 입력의 일관성을 위하여 쇄공이 아닌 시중에서 쉽게 구할 수 있는 비비탄총(air-shot gunt)을 사용하여 높은 일관성을 가지는 신호를 획득할 수 있도록 하였다. 센서는 접촉식 소형 가속도계를 사용하였으며, 센서간의 거리(H_2)는 5 cm, 가진 위치와 인근 센서와의 거리(H_1)는 10 cm로 두었다. 균열은

두 센서의 중앙에 위치하며, 데이터의 획득 과정은 앞 장과 동일하다. 한편, 균열이 없는 상태의 기준 스펙트럼 에너지 투과비를 결정하기 위하여 동일한 실험체 내에 균열이 없는 곳에서 base-line을 정하여 데이터를 획득하고, 이를 이용하여 Baseline 스펙트럼 에너지로 이용하였으며, 이를 Fig. 3-15(b)에 나타내었다.

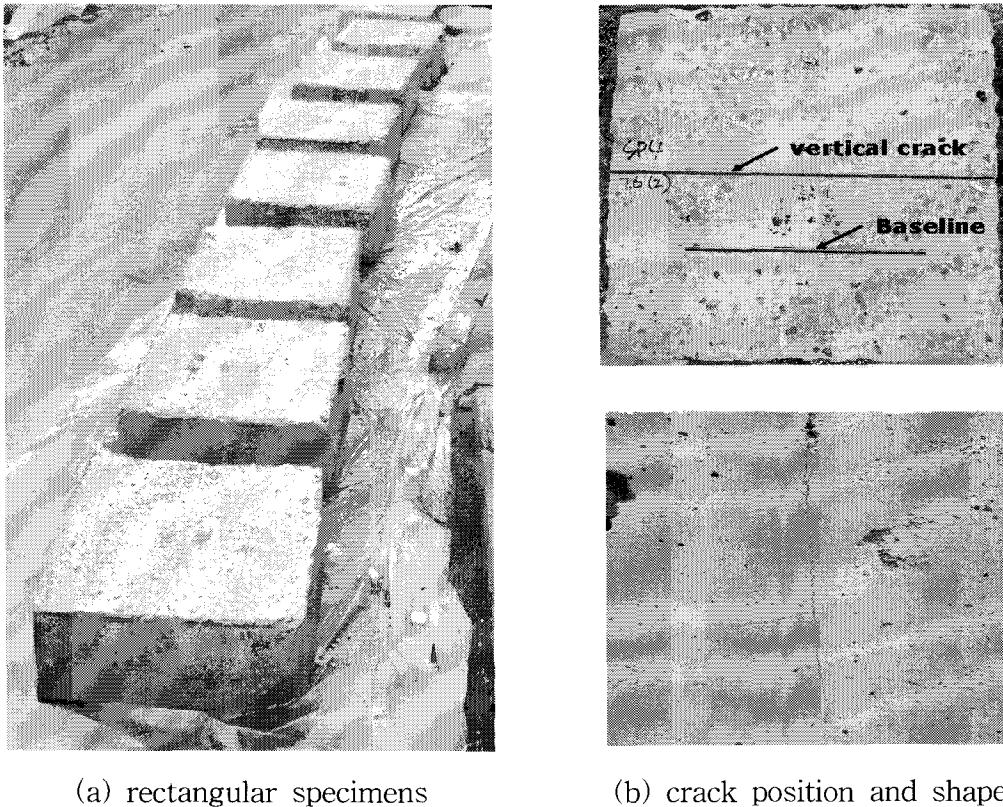


Fig. 3-15 Produced concrete slab specimens

(3) 실험 결과 및 분석

스펙트럼 에너지 투과비를 결정하기 위하여 표면과 투과 실험을 수행하였으며, 취득된 시간 영역 신호의 예를 Fig. 3-16에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 시간 영역에서 획득된 신호에서 파동이 균열을 통과하기 전에는 매우 큰 진폭을 가진 표면파 성분이 명확하게 구분이 되는 반면에, 균열을 통과한 후에 취득된 신호에서는 진폭의 크기가 균열면에 의한 반사와 산란으로 인하여 작아진 것을 확인

할 수 있다. 그러나 진폭의 크기를 정량화하여 균열 깊이와의 상관관계를 맺기에는 어느 시점의 진폭을 기준으로 하느냐에 따라 그 값이 달라져 기준을 정하기에는 어려운 점이 있음을 알 수 있다. 특히, 앞선 연구에 따르면 최대 진폭이 발생하는 시점이 균열의 깊이에 따라 차이가 있으며, 이 경우 최대 진폭 발생 시점의 위상 정보가 균열의 깊이를 측정하기 위해서 필요하다고 연구된 바 있다.

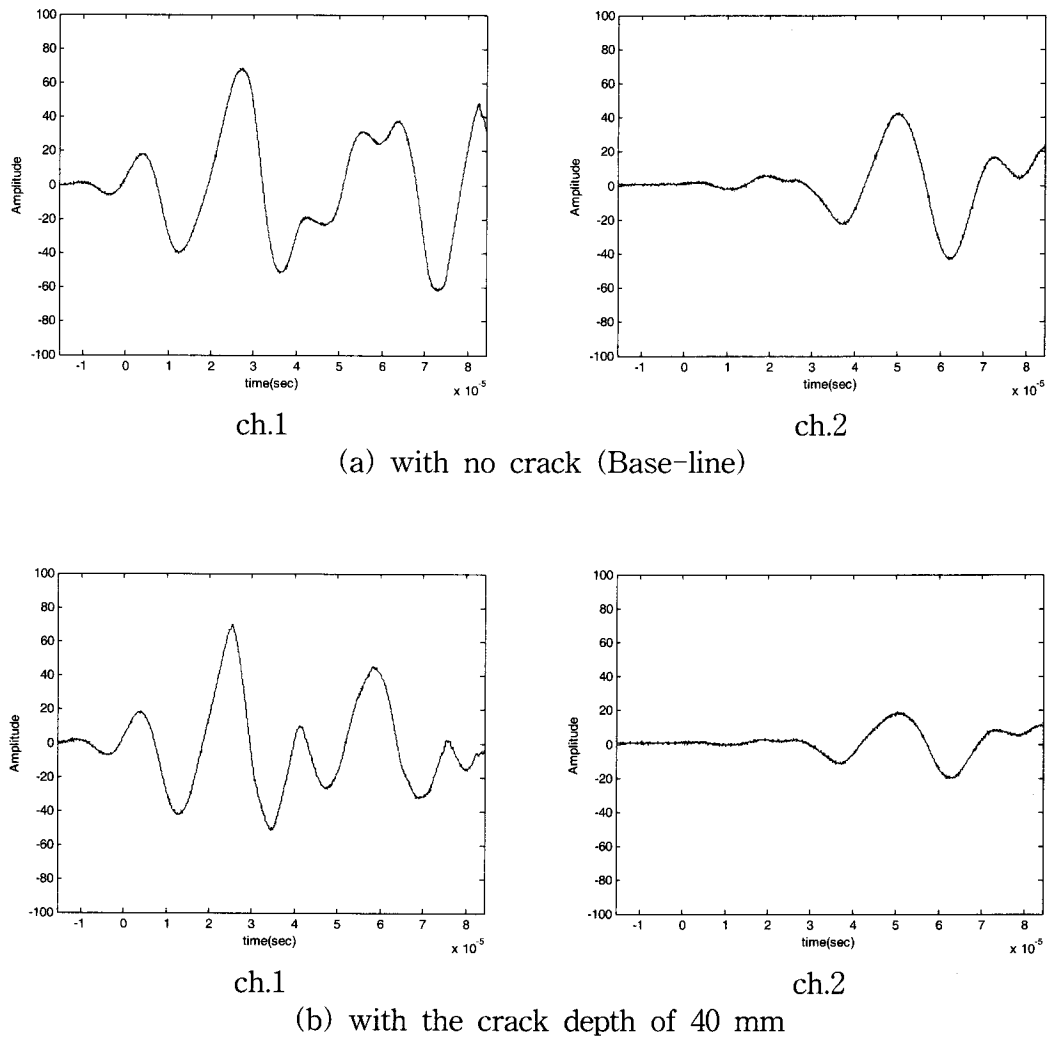


Fig. 3-16 Typical measured surface waveform for the case of SP4-2

한편, 본 연구의 제안 방법인 스펙트럼 에너지 투과비를 이용하기 위하여 주파수 영역에서의 자기 보정된 표면파 투과 함수를 구하였으며, 구하여진 투과 함수의 예

를 Fig. 3-17에 나타내었고, 이를 균열이 없는 상태인 base-line에서 구한 기준 투과 함수와 함께 함께 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 균열이 발생한 경우 균열이 없는 경우에 비해 전체적으로 투과 함수가 감소함을 알 수 있으며, 이로부터 표면과 투과 함수의 에너지가 균열 깊이와 매우 깊은 연관성이 있음을 다시 한번 확인할 수 있다. 그러나 기존의 방법인 차단 주파수 방법을 적용하고자 할 경우 표면과 투과 함수의 변화 발생하는 특정 주파수를 선정하는 것은 그림에서 알 수 있듯이 매우 어려움을 확인할 수 있다. 특히, 최고 진폭이 발생하는 주파수와 평활한 영역이 나타나는 주파수 대역, 그리고 급격한 변화가 발생하는 주파수가 실험에 의하여 구해진 표면과 투과 함수에서는 일정하게 나타나지 않으나, 균열 깊이에 따른 전체 에너지의 변화는 눈에 띄게 차이가 나타나는 것이 확인된다.

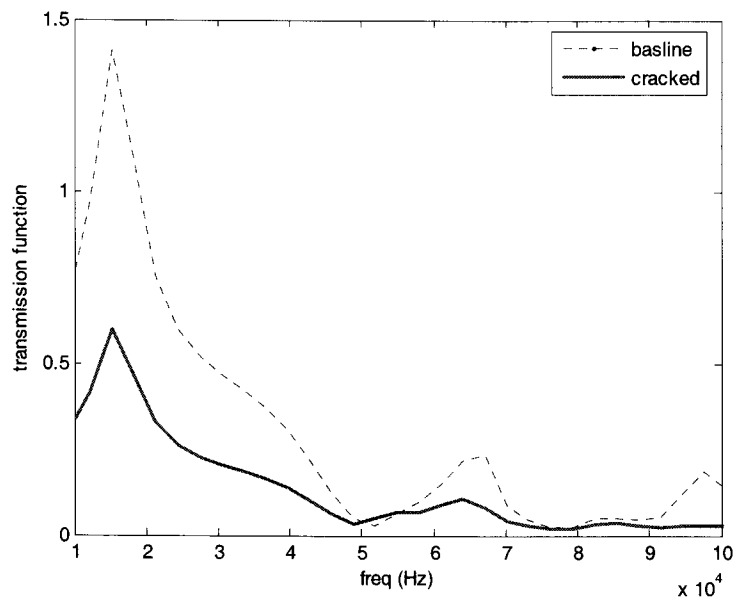


Fig. 3-17 Measured surface wave transmission function (40 mm crack)

측정된 표면과 투과 함수로부터 스펙트럼 에너지를 구하기 위해, 각 base-line에서의 신호 일관성 지수를 통해 적분 구간의 상/하한 주파수를 결정하였다. 또한, 이로부터 각각의 균열 깊이에 대한 스펙트럼 에너지 투과비를 base-line에서의 에너지와 균열 상태에서의 에너지로부터 정규화 과정을 통하여 결정하였다. 그 결과를 앞 장에서 도출된 결과와 중첩하여 Fig. 3-18에 나타내었다.

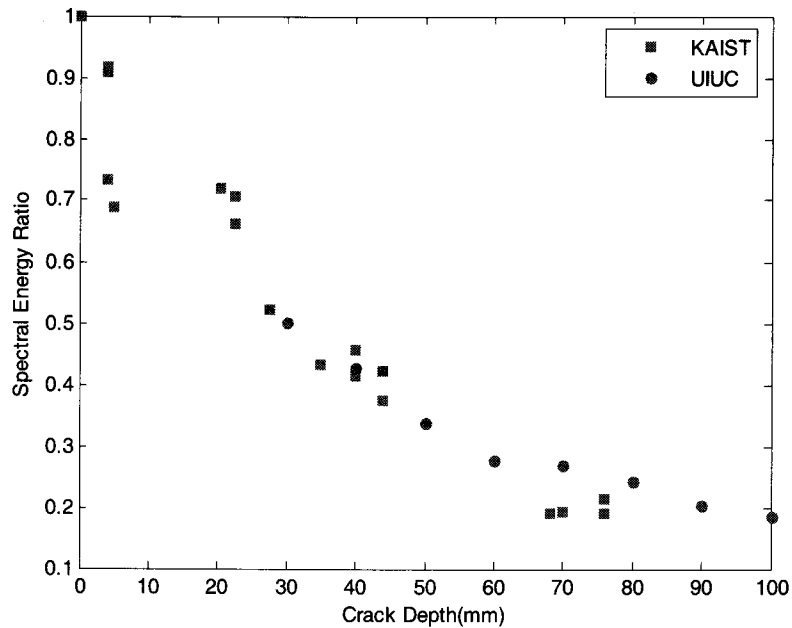


Fig. 3-18 Measured spectral energy transmission ratio

위 그림에서 보는 바와 같이, 스펙트럼 에너지 투과비는 콘크리트의 재료적 특성의 차이가 있음에도 불구하고 비슷한 균열 깊이에서는 투과비 역시 비슷한 값을 보인다. 따라서 스펙트럼 에너지 투과비는 콘크리트의 재료적 특성에 무관하고 오직 균열 깊이의 차이에 의해서만 결정되는 것을 알 수 있다. 특히, 균열 깊이가 100 mm 정도까지는 스펙트럼 에너지 투과비의 감소가 급격하게 일어나는 것을 확인할 수 있으며, 제안된 방법을 이용할 경우 이 구간에서의 균열 깊이 추정에 매우 우수한 감도를 나타낼 것임을 예측할 수 있다. 콘크리트에서 발생하는 균열은 철근의 위치까지 관통하는지에 관한 정보가 콘크리트의 내구성과 안전성 평가에 있어서 매우 중요한 역할을 하게 된다. 일반적인 콘크리트의 피복 두께는 50-100 mm의 범위에 있으므로, 제안된 방법을 이용할 경우 균열이 철근의 위치까지 관통하였는지에 관한 정보를 효과적으로 알 수 있으며 이는 콘크리트의 건전성 평가에 있어서 제안된 방법이 유효한 정보를 줄 수 있는 방법이라는 것을 의미한다.

실제 측정한 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이와의 관계를 정량화하여 이를 현장에서 적용할 수 있도록 하기 위해서는 두 변수 사이의 관계식이 필요하다. 이를 위하여 최소 자승 회귀분석을 통하여 관계식을 구하였다. 사용된 회귀 모델은

앞 절에서와 같이 2 개의 매개 변수를 식 (3-9)과 같은 지수형태의 모델이다.

$$R(d)=a^{bd} \quad (3-9)$$

여기에서 상수값인 a와 b는 회귀 분석에 의하여 결정되는 값이다. 한편, 회귀 분석 결과를 Fig. 3-19에 앞 장에서 구한 모델과 같이 나타내었으며, 이 모델의 상수 a 값은 0.9807이고, b 값은 1.029이며, 이때의 상관 계수는 0.9244로 실험 결과와 모델이 매우 높은 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 또한, 앞에서 구한 모델 식과 수정된 모델 식이 거의 차이가 없어 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이의 상관관계가 콘크리트의 재료적 특성 차이에 무관하게 결정이 된다는 것을 확인할 수 있다. 한편, 두 모델식에서 나타나는 약간의 차이점은 실험 조건에 따른 측정 상 오차에 의한 것으로 판단된다.

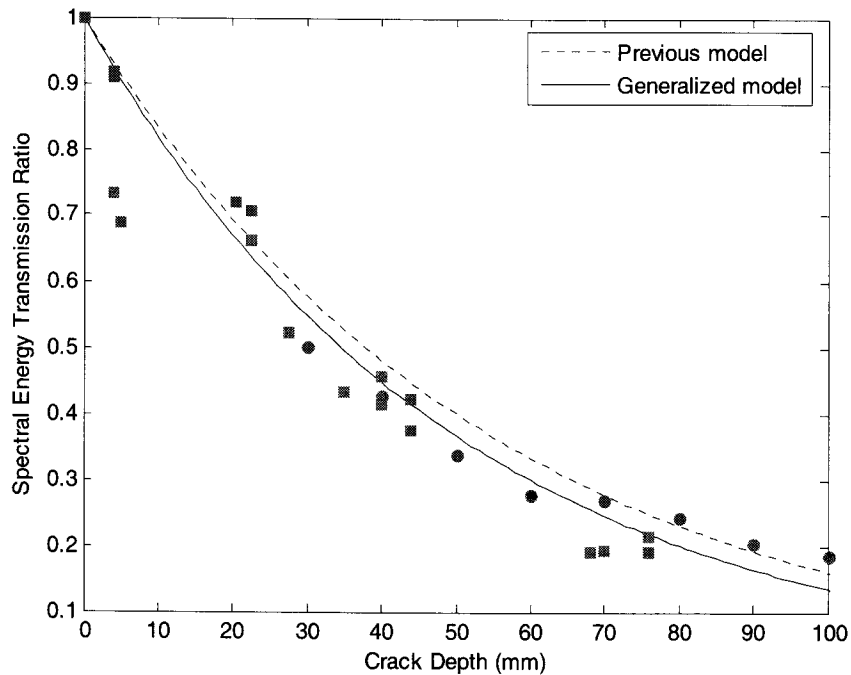


Fig. 3-19 Updated regression between spectral energy transmission ration and crack depth

제안된 관계식의 유효성과 정확성을 판단하기 위해 스펙트럼 에너지 투과비를 통해 구한 균열 깊이와 실제 균열 깊이 사이의 오차를 Fig. 3-20에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 본 장에서 제안한 관계식은 균열 깊이가 100 mm 이내일 경우 -14 mm부터 17 mm 범위의 오차를 보이며, 이는 해당 구조체가 콘크리트 구조물임을 감안할 때 매우 높은 정확성을 가진다고 볼 수 있다.

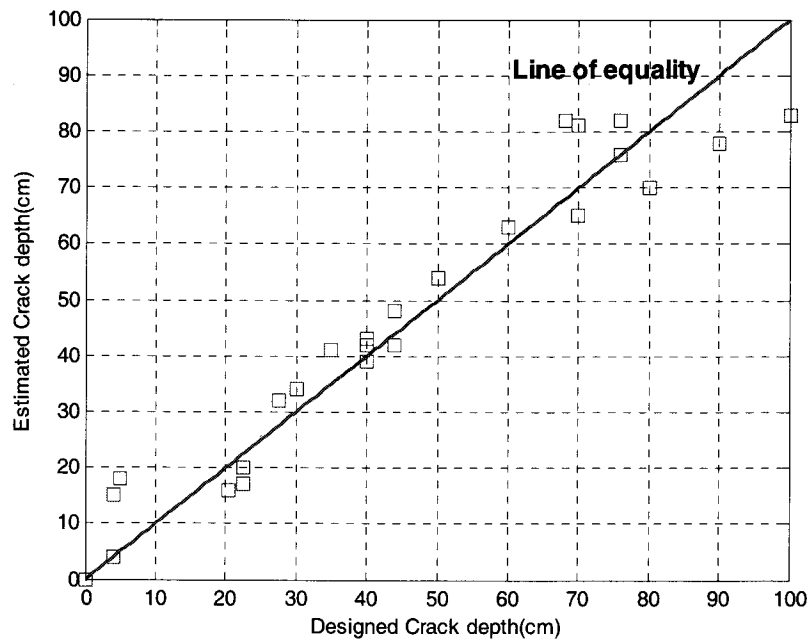


Fig. 3-20 Comparison between the determined and the designed crack depths

라. 스펙트럼 에너지 투과법에 대한 소결

본 연구 과제를 통해서, 콘크리트 슬래브에서 발생한 균열의 깊이를 추정하기 위해 자기 보정 표면파 투과 측정 데이터를 이용하는 비파괴 균열 깊이 추정 기법인 스펙트럼 에너지 투과법을 제안하였다. 측정된 표면파 투과 함수의 균열 깊이에 따른 주파수 의존성을 없애고자, 주파수에 무관한 스펙트럼 에너지를 유도하였으며, 이로부터 스펙트럼 에너지 투과비를 정의하여 균열 깊이에 직접적으로 이용하고자 하였다. 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해 0 mm에서 150 mm까지 선형적으

로 변화하는 균열 깊이를 가진 슬래브에서 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 스펙트럼 에너지 투과비가 균열 깊이만의 함수이며, 균열 깊이 변화에 매우 민감함을 알 수 있었다. 특히, 스펙트럼 에너지 투과비는 균열 깊이가 100 mm 이하인 경우에는 그 값의 변화가 매우 급격하게 일어나며, 100 mm 초과 150 mm 이하인 경우에는 변화의 양상이 다소 완만해지는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, 신호 일관성 지수 값이 0.85와 0.95 사이일 경우에는 스펙트럼 에너지 투과비의 값의 변동이 크지 않은 것을 알 수 있었으며, 따라서 균열 깊이를 추정하고자 할 때의 신호 일관성 지수 값은 위의 범위 내에서 선택하면 일관성 있는 결과를 얻게 된다는 것을 알 수 있었다.

또한, 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이와의 상관 관계식을 실험 데이터의 회귀분석을 통하여 구하였으며, 이 상관 관계식의 유효성을 검증하고자 기존의 두 가지 방법과 비교 실험을 수행하였다. 실험 결과 제안된 방법이 기존의 방법에 비하여 균열 깊이 추정에 있어서 매우 정확하고 신뢰성 높은 결과를 주는 방법임을 확인할 수 있었으며, 따라서 제안된 방법이 현장에서의 균열 깊이 추정에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

그리고 제안된 방법의 현장 적용성 향상을 위하여 콘크리트의 재료적 특성을 고려한 스펙트럼 에너지 투과비와 균열 깊이와의 상관관계에 대하여 소개하였다. 이를 위하여 다양한 배합비와 강도를 가지는 콘크리트 슬래브에 인위적인 균열을 발생시켜 자기 보정 표면과 투과 측정을 수행하고, 이로부터 스펙트럼 에너지 투과비를 구하여 균열 깊이와의 연관성을 살펴보았다. 실험 결과 각 콘크리트 슬래브가 서로 다른 재료적 특성을 가지고 있음에도 불구하고 스펙트럼 에너지 투과비는 균열 깊이에 따라 일관적으로 감소하는 경향을 보였으며, 앞서 사용된 모델식과 큰 차이가 없었다. 이에 따라 스펙트럼 에너지 투과비는 콘크리트의 재료적 특성과 상관없이 오직 균열 깊이에만 의존하는 함수임을 알 수 있었다. 따라서 제안된 실험식을 이용하고, 스펙트럼 에너지 투과비를 측정하면 현장에서 콘크리트의 재료적 특성에 대한 고려 없이 즉석에서 균열 깊이를 추정할 수 있음을 알 수 있으며, 이는 제안된 방법이 매우 실용성이 높은 방법임을 증명한다.

3. 표면파 투과 함수를 이용한 철근 콘크리트의 균열 깊이 측정

가. 파전달 해석을 이용한 모델식 구성

가진 후 발생한 표면파는 매질을 따라 전파되면서 파동의 진폭이 점점 감소되어 가는 감쇠(attenuation) 현상이 발생한다. 이와 같은 현상은 응력파의 구형 발산(geometric spreading), 고유 감쇠(intrinsic attenuation), 그리고 매질의 불연속면에 의한 에너지의 산란(scattering)에 의해 발생한다. 식 (3-10)은 세 원인에 의한 표면파의 감쇠량을 표현한 것으로, 여기서 진폭의 비율($\text{amp}_2/\text{amp}_1$)은 대응하는 위치(r_2 또는 r_1)에서 측정된 응력파의 주파수 대역에 따라 산정할 수 있다.

$$\frac{\text{amp}_2}{\text{amp}_1} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{-n} \exp(-\alpha(r_2 - r_1)) T(\bullet) \quad (3-10)$$

구형 발산, 즉 파면의 확장에 의한 진폭은 감소는 파면의 형태에 따라 결정된다. 평면을 따라 전파되는 2차원 응력파의 경우 $n=0$, 원통형 파면을 갖는 경우 $n=0.5$, 구형 파면을 갖는 경우에는 $n=1.0$ 의 계수로 계산할 수 있다. 고유 감쇠는 재료의 미세 구조 내부의 마찰 또는 점성에 의해 파동 에너지가 감쇠되는 현상이다. 그러나 고유 감쇠의 양은 일반적으로 구형 발산의 1% 이하로 발생하여 매우 적으므로, 내구성에 큰 문제가 없는 경우 무시할 수 있다. 마지막으로 매질에 존재할 수 있는 불연속면에 의해 발생하는 파동 에너지의 산란은 투과 함수 $T(\bullet)$ 로 표현할 수 있다.

본 연구에서 사용하는 충격 가진 표면파의 경우 원통형 파면을 보여주므로, 구형 발산은 $n=0.5$ 의 지수로 표현할 수 있다. 따라서 불연속면의 크기에 따른 표면파의 감쇠량을 측정하면, 매질에서 불연속면으로 나타나는 손상 정도를 추정할 수 있다. 이와 같은 특성을 이용하여, Mendelsohn 등은 조화함수를 바탕으로 동적 탄성문제에 대한 해를 구하여 금속 재료의 균열을 평가하였다. 본 연구에서는 충격 가진 표면파를 이용하여 콘크리트 균열의 깊이를 추정하기 위해, 유한 요소 해석을 이용하여 과도파를 시뮬레이션하여 그 적용성을 검토하고 투과 함수를 정의하고자 한다.

상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit 6.5를 이용하여 Fig. 3-21과 같은 인공 균열(notch)을 통과하는 충격 가진 표면파를 시뮬레이션 하였다. 유한요소 모델의 옆면과 바닥면은 반사파가 표면파의 측정위치에 영향을 주지 못하도록 매질을 충분히 크게 모델링 하였고, 유한요소는 2 mm 정사각형의 평면 변형을 요소 1,750,000 개를 사용하였다. 또한, 인공균열은 20 mm 깊이, 1 mm 균열 폭의 삼각형 형태로 모사하였다.

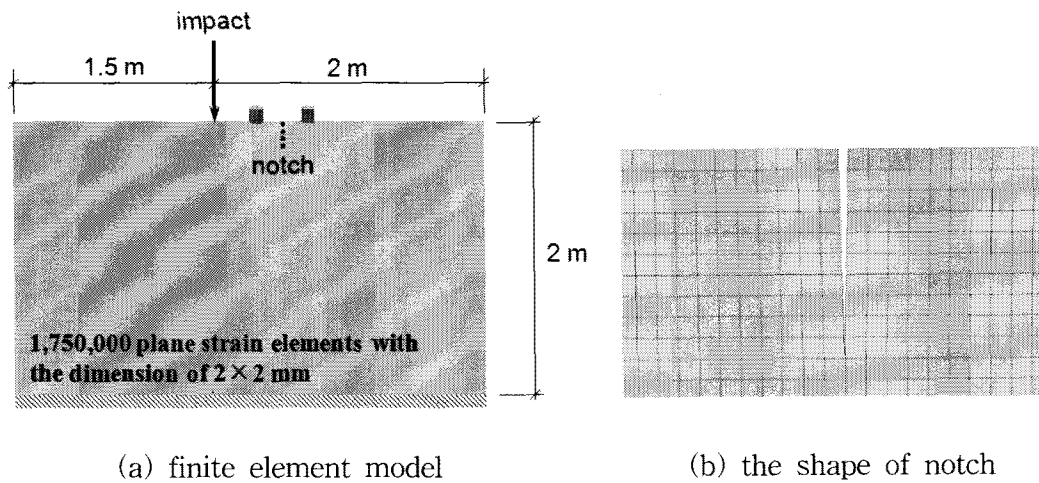


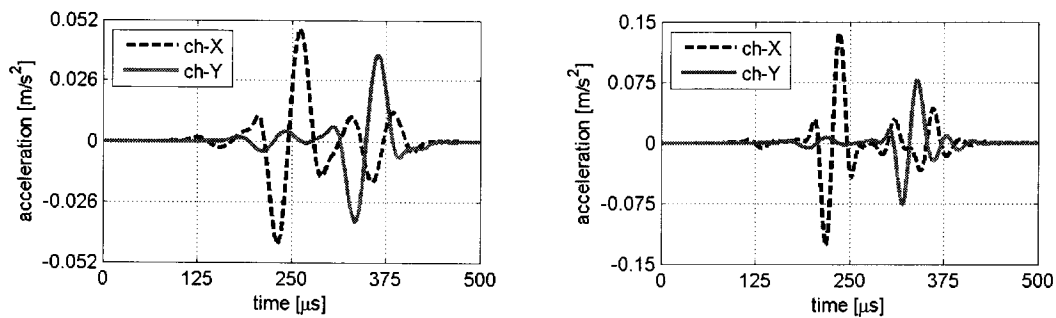
Fig. 3-21 Finite element model with a notch

주파수에 따른 투과 함수의 특성을 확인하기 위해, 4 가지 형태의 충격 가진 함수를 이용하였다. 충격 가진 함수의 형태는 1 차년도 중간 보고서에서 확인할 수 있듯이, 오염진동을 발생시킬 가능성을 줄이기 위해 네제곱 삼각함수를 사용하였고, 4 개의 접촉시간을 선택하여 가진 되는 표면파의 주파수를 조정하였다. 또한, 투과 함수는 탄성 재료의 특성 중 포아송 비에만 영향을 받으므로 Table 3-2와 같이 12 가지의 시뮬레이션을 준비하였다.

Table 3-2 Finite element simulation of surface waves

material properties			contact time			
density	Young's modulus	Poisson's ratio	100 μ s	60 μ s	40 μ s	20 μ s
2400 kg/m ³	30 GPa	0.3	A	B	C	D
2400 kg/m ³	30 GPa	0.2	I	J	K	L
2400 kg/m ³	30 GPa	0.1	P	Q	L	S

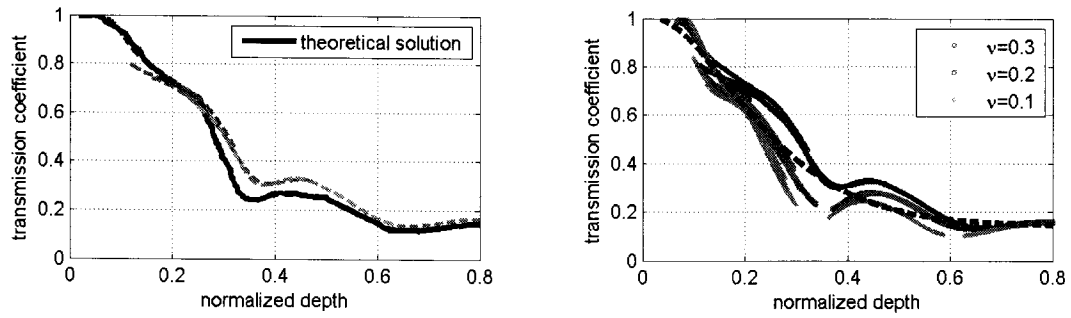
이와 같은 동적 해석은 많은 계산량이 요구되어 협동연구기관인 한국과학기술원 건설 및 환경공학과에 설치되어 있는 클러스터를 이용하여 병렬처리로 수행되었다. Fig. 3-22는 A와 B 경우에 해당하는 파형으로, 균열을 투과하면서 표면파의 에너지가 감소함을 정성적으로 확인할 수 있다.



(a) Case A: the contact time of 100 μ s (b) Case B: the contact time of 60 μ s

Fig. 3-22 Simulated surface waveform by finite element analysis

수치해석을 통해 얻은 결과는 정규 깊이(normalized depth)에 따른 투과 함수로 정리할 수 있다. 이를 위해, (1) 획득한 표면파 파형에 대해 고속 푸리에 변환(FFT)를 수행하고; (2) 인공균열의 깊이를 해당 파장으로 나누어 정규깊이를 산정한 후; (3) 각 정규 깊이에서의 진폭비로써 투과 함수를 계산하여 그래프를 그린다. Fig. 3-23은 수치해석에 의한 해를 조화함수를 바탕으로 구한 이론해와 비교 검증한 것으로, 콘크리트의 재료 특성을 고려한 일반화된 그래프이다.



(a) verification with the cases of A/B/C/D

(b) model regression

Fig. 3-23 Developing model regression considering the properties of concrete

그림에서 확인할 수 있듯이 포아송비가 0.3인 A/B/C/D의 경우 결과는 이론해와 일치하므로, 과도파에 의한 스펙트럼 누수는 투과 함수에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 나아가, 콘크리트의 재료 특성을 고려하기 위해 콘크리트의 포아송비의 범위, 즉 0.1-0.3에 대한 투과 함수의 변동도 크지 않아서 하나의 회귀 분석식으로 표현할 수 있다. 따라서 정규 깊이와 투과 함수의 모델식은 선형 회귀 분석을 이용하여, 결정 계수가 0.946으로 제일 큰 로그 함수를 기저 함수로 선정하여 결정하였고, 식 (3-11)은 구성된 투과 함수의 모델식이다.

$$T\left(\frac{d}{\lambda}\right) = \exp\left(-16.4\left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 + 33.9\left(\frac{d}{\lambda}\right)^3 - 20.3\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 + 0.559\left(\frac{d}{\lambda}\right)\right) \quad (3-11)$$

나. 주파수 응답 함수 기반 자기 보정 기법

본 연구와 같이 현장 적용을 고려하여 접촉식 센서를 사용하는 경우, 앞서 설명한 자기 보정 기법이 필요하다. 자기 보정 기법은 입사파와 투과파의 자기 스펙트럼 비율을 지구물리학의 신호 처리 고전 이론에 따라 대칭성을 이용하여 보정하는 방법이다. Fig. 3-24는 자기보정 기법을 적용하기 위한 센서배치도이다. 고전적인 자기보정 기법에 대한 유도는 앞부분을 참조하기 바란다.

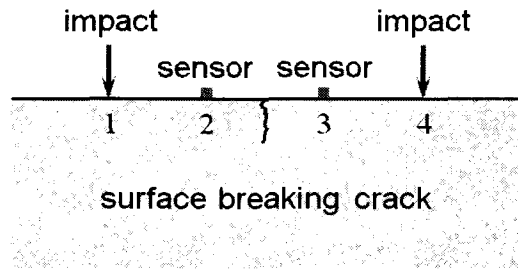


Fig. 3-24 Schematic of surface wave transmission measurement

주파수 응답 함수 기반 자기 보정 기법은 Fig. 3-25와 같이 설계된 DUT를 바탕으로 유도할 수 있다. 여기서 정방향 신호는 입사파 $A(f)$ 와 투과파 $B(f)$ 로 표현되고, 역방향 신호는 입사파 $C(f)$ 와 투과파 $D(f)$ 로 표현된다. 균열을 포함하는 두 센서 사이 콘크리트 재료의 주파수 응답함수는 $H(f)$ 로 모사하여, 이상적으로 양방향 신호는 $B(f)=H(f)A(f)$ 와 $D(f)=H(f)C(f)$ 로 정식화할 수 있다. 한편, $U(f)$ 와 $V(f)$ 는 센서의 부착 정도, 신호 감도 등에 따른 센서의 응답 함수를 의미하고, 측정할 때 스며들어올 수 있는 잡음은 $M(f)$ 과 $N(f)$ 으로 표현할 수 있다.

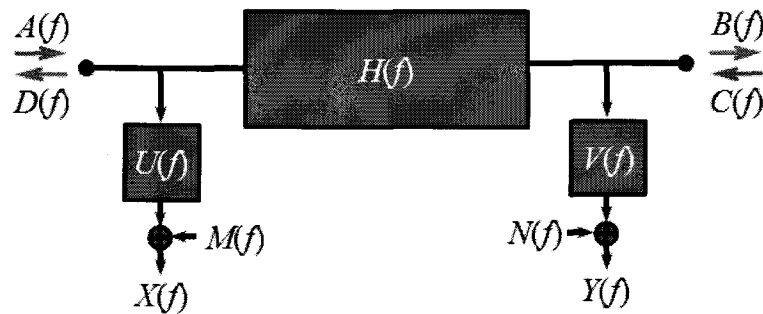


Fig. 3-25 Device-under-test for surface wave transmission measurement

만약 정방향과 역방향 표면파 측정 실험 시 센서의 부착 조건이 유지된다면, 센서의 응답함수는 소거될 수 있다. 정방향 신호의 경우, 두 센서에서 측정된 신호는 다음의 식으로 표현된다.

$$X^F(f) = U(f)A(f) + M(f) \quad (3-12)$$

$$Y^F(f) = V(f)B(f) + N(f) \quad (3-13)$$

먼저 H1-추정량을 산정하기 위해, 자기 스펙트럼 밀도(auto-spectral density)와 상호 스펙트럼 밀도(cross-spectral density)를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$G_{XX}^F = (X^F)^* X^F = |U|^2 |A|^2 + U^* A^* M + M^* U A + |M|^2 \quad (3-14)$$

$$G_{XY}^F = (X^F)^* Y^F = U^* A^* V B + U^* A^* N + M^* V B + M^* N \quad (3-15)$$

그리고 다음 식처럼 스펙트럼 밀도를 누적하면 비일관성 잡음을 제거할 수 있다.

$$\sum G_{XX}^F = |U|^2 |A|^2 + |M|^2 \quad (3-16)$$

$$\sum G_{XY}^F = G_{UV} G_{AB} \quad (3-17)$$

이에 따라 계산된 정방향 표면과 측정 실험에 의한 H1-추정량은 다음 식과 같이 계산된다.

$$H_1^F = \frac{\sum G_{XY}^F}{\sum G_{XX}^F} = \frac{G_{UV} G_{AB}}{|U|^2 |A|^2 + |M|^2} = H G_{UV} \frac{1}{|U|^2 + |M|^2 / |A|^2} \quad (3-18)$$

위의 식에서 확인할 수 있듯이, H1-추정량에서 잡음 M(f)는 아직 제거되지 않고 있다.

한편, Hlog-추정량을 사용하여 다음의 식과 같이 측정신호 각각에 대해서 응답 함수를 계산하면 다음의 식으로 표현된다. 그리고 응답함수의 로그값을 누적하면 잡음 신호를 제거할 수 있다.

$$H^F = \frac{Y^F}{X^F} = \frac{VB+N}{UA+M} = H \frac{V}{U} \frac{1+N/VHA}{1+M/UA} \quad (3-19)$$

$$H_{\log}^F = \frac{1}{n} \sum \log H^F = \log \left(H \frac{V}{U} \right) \quad (3-20)$$

두 가지 형태의 추정량은 잡음 신호를 어느 정도 제거할 수 있지만, 센서의 응답 함수 $U(f)$ 와 $V(f)$ 는 여전히 제거되지 않는다. 이를 제거하기 위해, 역방향 신호에 대해서도 H1-추정량과 Hlog-추정량을 유도하면 다음과 같다.

$$X^B(f) = U(f)D(f) + N(f) \quad (3-21)$$

$$Y^B(f) = V(f)C(f) + M(f) \quad (3-22)$$

$$H_1^B = \frac{\sum G_{YX}^B}{\sum G_{YY}^B} = \frac{G_{VU}G_{CD}}{|V|^2|C|^2 + |N|^2} = HG_{VU} \frac{1}{|V|^2 + |N|^2/|C|^2} \quad (3-23)$$

$$H_{\log}^B = \frac{1}{n} \sum \log H^B = \log \left(H \frac{U}{V} \right) \quad (3-24)$$

마지막으로, 균열을 포함한 콘크리트 재료의 주파수 응답 함수는 양 방향 실험 결과를 바탕으로 산정할 수 있다. 즉, Hlog-추정량의 합과 H1-추정량의 곱을 이용하면 주파수 응답 함수를 계산할 수 있다.

$$H_{\log} = H_{\log}^F + H_{\log}^B = 2 \log H \quad (3-25)$$

$$H_1 = H_1^F H_1^B = H^2 \frac{|U|^2|A|^2}{|U|^2|A|^2 + |M|^2} \frac{|V|^2|C|^2}{|V|^2|C|^2 + |N|^2} \quad (3-26)$$

주파수 응답 함수의 진폭은 Hlog-추정량을 이용하여 산정할 수 있는데, 기여도 함수의 값이 0.67 이상인 경우 잡음에 의한 계통 오차(systematic error)를 소거할 수 있다. 그러나 Hlog-추정량은 개별적인 주파수 응답 함수에 로그 함수를 적용함

으로써 신호의 위상을 왜곡시킨다. 그러므로 신호의 위상은 잡음에 독립적인 H1-추정량을 이용하여 산정할 수 있다. 결과적으로 주파수 응답 함수의 진폭과 위상은 다음의 수식으로 계산된다.

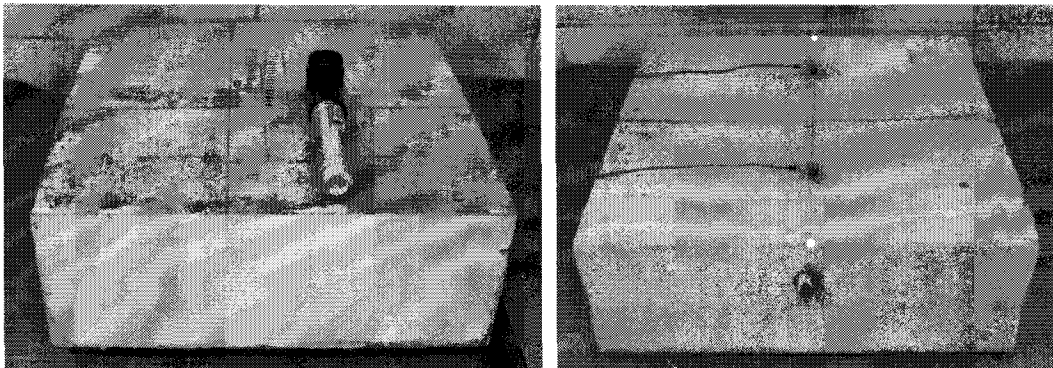
$$a_H(f) = \exp\left(\frac{1}{2} \operatorname{Re}\{H_{\log}(f)\}\right) \quad (3-27)$$

$$\theta_H(f) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}\{H_1(f)\}}{\operatorname{Re}\{H_1(f)\}} \quad (3-28)$$

다. 제안된 기법의 검증 실험

제안된 주파수 응답함수 기반 자기보정 기법을 검증하기 위해, 400 mm × 400 mm × 150 mm 크기의 콘크리트 시편을 준비하였다. 콘크리트 시편은 타설 후 28 일 동안 수중 양생하였고, 한 종류는 무근 콘크리트, 다른 한 종류는 10 mm 지름의 철근 하나를 피복 두께 50 mm에 배치한 철근 콘크리트 시편으로 제작하였다. 인공 균열은 1 mm 두께의 투명 용지를 이용하여 몰드에 결합시킴으로써 발생시켰다. 굳은 콘크리트에서 형성된 균열의 균열 폭은 약 1.2 mm 측정되었다.

Fig. 3-26은 EP21과 ER20 콘크리트 시편으로, 균열로부터 100 mm 떨어진 위치에 센서를 설치하였고, 센서로부터 100 mm 떨어진 위치에 충격 가진 하여 표면파를 발현시켰다. 총 20 회의 충격 가진 표면파를 측정하여 비일관성 잡음을 제거하고자 하였다.



(a) plain concrete (EP21)

(b) reinforced concrete (ER20)

Fig. 3-26 Plain and reinforced concrete specimens with a notch

Table 3-3은 사용된 콘크리트 시편의 정보를 나타낸 것으로, 여기서 초음파 속도는 ASTM C597-02에 따라 측정하였다. 또한, 레일리와 속도는 Gauss-웨이블렛 변환을 통해 결정하였다.

Table 3-3 Specification of concrete specimens with a notch

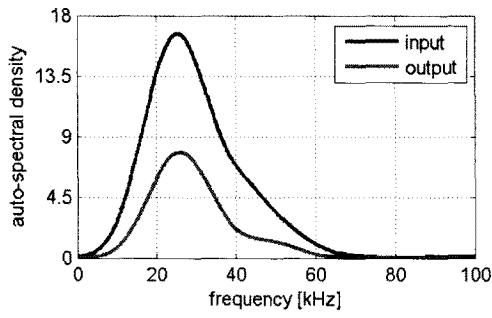
Lable	Plain concrete			Concrete with a re-bar		
	EP00	EP21	EP44	ER00	ER20	ER40
Notch depth [mm]	-	21	44	-	20	40
Mix-proportion	0.38:1:1.55:2.11			0.54:1:2.13:2.96		
Age [months]	34			4		
Rayleigh wave velocity [m/s]	2250			2300		
Ultrasonic pulse velocity [m/s]	3940			4100		

† The mix-proportion is expressed with the weight ratio of water, cement, sand, and gravel in sequence (W:C:S:G) and the maximum size of aggregates is 19 mm.

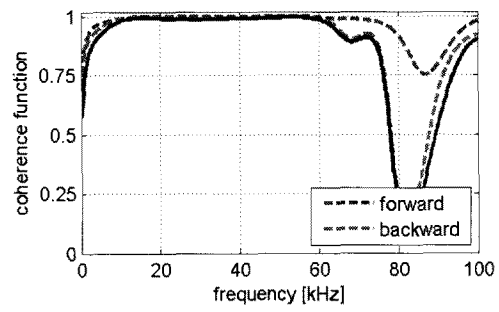
(1) 무근 콘크리트에서의 표면파 감쇠

무근 콘크리트에서 25 kHz의 중심주파수를 갖는 표면파를 발현시켜 측정하여 제안된 기법에 따라 투과 함수를 산정하였다. 세 가지 경우, 즉 인공균열이 없는 경우 EP00, 균열 깊이가 21 mm인 경우 EP21, 그리고 균열 깊이가 44 mm인 경우 EP44에 대해 측정하였다.

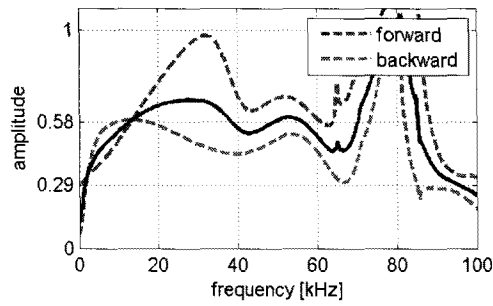
Fig. 3-27, Fig. 3-28, Fig. 3-29의 (a)는 입사파와 투과파의 자기 스펙트럼 밀도로 전체적인 투과 함수를 파악할 수 있다. 그러나 단순한 자기 스펙트럼 밀도의 비율로 투과 함수를 산정할 경우 잡음에 대한 처리가 부정확하고, 위상에 대한 정보를 구할 수 없다. 따라서 제안된 기법을 사용하여, 즉 Hlog-추정량을 이용하여 주파수 응답 함수의 진폭(c)과 H1-추정량을 이용하여 주파수 응답 함수의 위상(d)을 산정할 수 있다. 잡음에 대한 처리는 각 그림 (b)의 기여함수를 이용하여, 산정된 주파수 응답 함수의 유효함을 판단할 수 있다. 이를 바탕으로 측정한 위상 속도는 각 그림 (f)와 같이 산정된다.



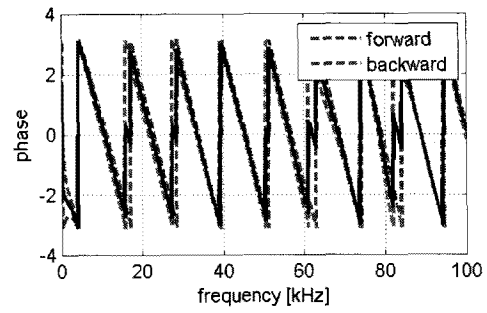
(a) geometric mean of auto-spectral density



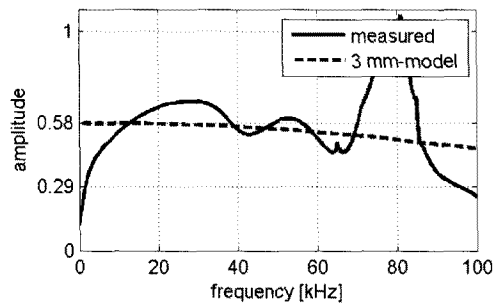
(b) coherence function



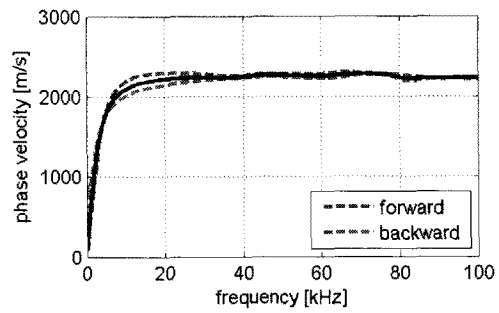
(c) amplitude of the FRF



(d) phase of the FRF

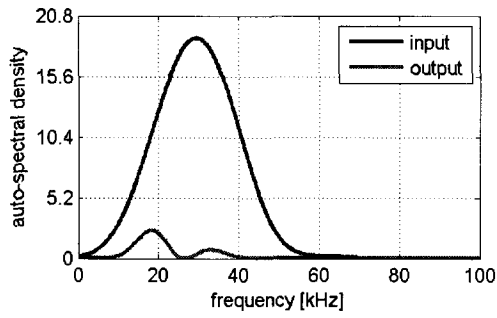


(e) the best fit of the model

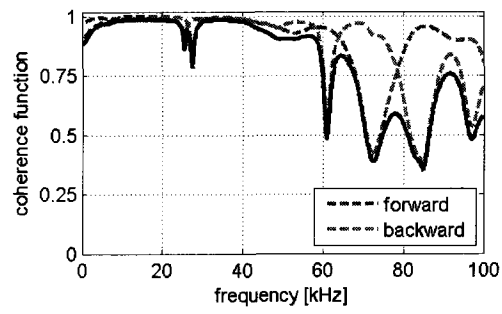


(f) phase velocity profile

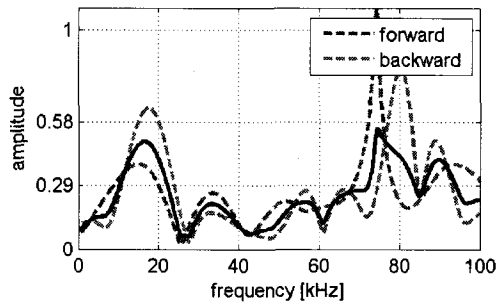
Fig. 3-27 Surface wave transmission on the plain concrete specimen of EP00



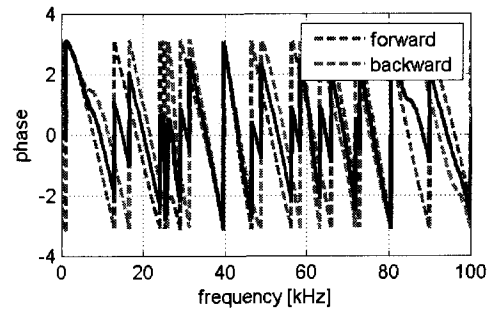
(a) geometric mean of auto-spectral density



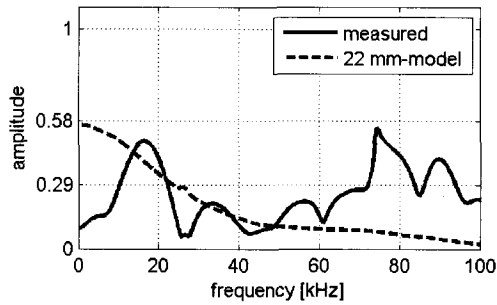
(b) coherence function



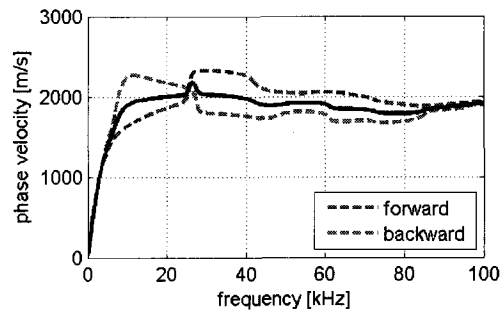
(c) amplitude of the FRF



(d) phase of the FRF

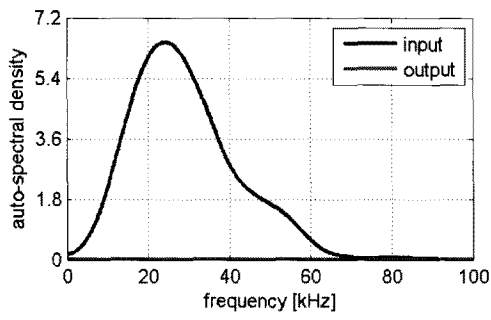


(e) the best fit of the model

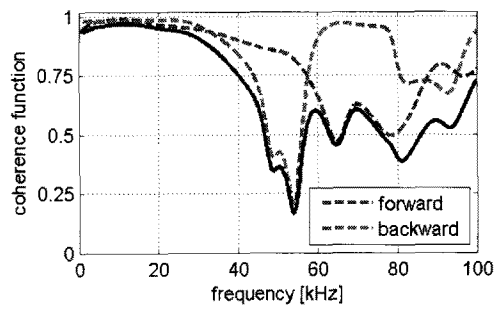


(f) phase velocity profile

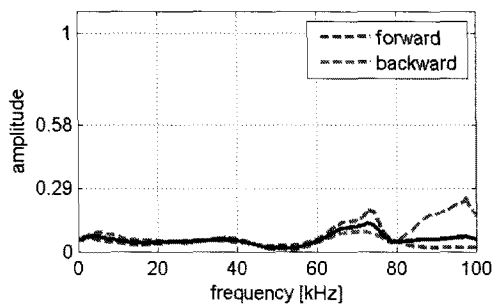
Fig. 3-28 Surface wave transmission on the plain concrete specimen of EP21



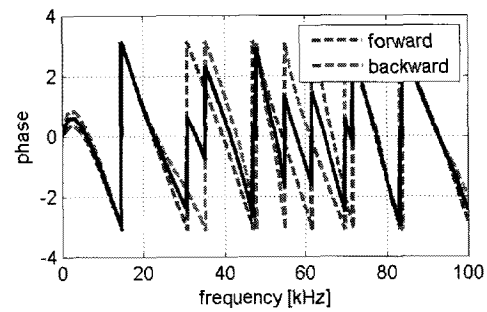
(a) geometric mean of auto-spectral density



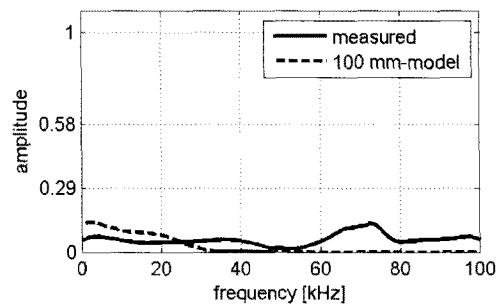
(b) coherence function



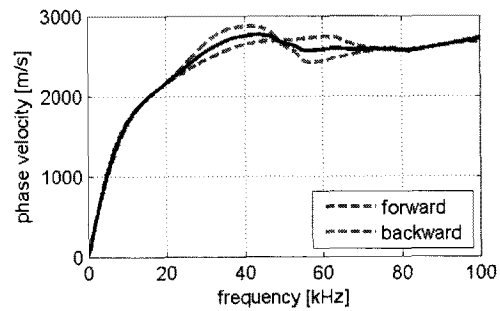
(c) amplitude of the FRF



(d) phase of the FRF



(e) the best fit of the model



(f) phase velocity profile

Fig. 3-29 Surface wave transmission on the plain concrete specimen of EP44

마지막 결과인 각 그림의 (e)는 앞서 유한 요소 해석을 통해 산정한 투과 함수의 모델식을 바탕으로, 측정된 표면파의 투과 함수를 평가한 것이다. 그림 (e)에서 점선은 측정된 표면파의 투과 함수와 가장 비슷한 모델을 찾아 함께 도시한 것이다. 즉, 식 (3-29)로 표현할 수 있는 오차 함수의 최소값에 해당하는 균열 깊이가 측정된 파형에 가장 적합한 것으로 판단하여, 그에 해당하는 투과 함수 모델을 도시한 것이다.

$$SSE(d) = \sum \left(\left(\frac{300 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} \right)^{-0.5} T\left(\frac{d}{\lambda}\right) - a_H(\lambda) \right)^2 \quad (3-29)$$

여기서, 센서의 배치를 고려하면 구형 발산을 위한 지수는 0.58로 계산되며, 투과 함수의 모델식 $T(d/\lambda)$ 는 앞서 유한 요소 해석 결과를 바탕으로 정의하였다. 측정된 주파수 응답 함수의 진폭과 모델식 오차의 제곱합으로 정의된 오차함수는 Fig. 3-30과 같이 각 균열깊이에 대해 분포된다.

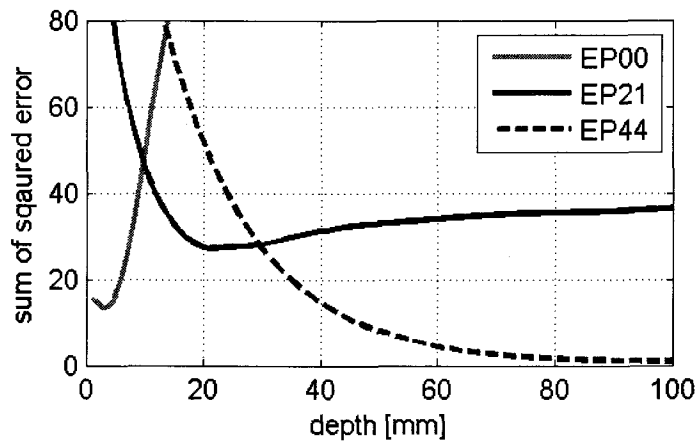


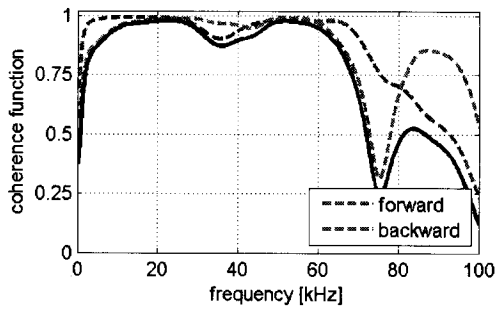
Fig. 3-30 Evaluating the surface wave transmission of plain concrete specimens

결과적으로, EP00 경우에 측정된 표면파 투과 함수는 3 mm의 균열 깊이로, EP21 경우는 22 mm의 균열 깊이로, EP44의 경우에는 100 mm의 균열 깊이로 측정되었다. EP00의 경우 내부에 있는 손상 또는 내구성의 저하가 3 mm의 균열과

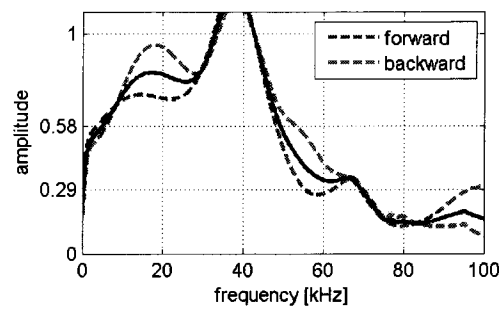
같은 영향을 표면파의 감쇠에 미치는 것이다. EP21의 경우 비교적 정확히 균열 깊이를 측정하고 있고, EP44의 경우 다소 깊게 균열을 측정하는데 이는 가진된 표면파의 주파수가 적정방위를 넘어섰기 때문이다. 즉, 앞서 도시된 모델식의 그래프에서 정규깊이가 0.3 이상에서는 투과 함수의 민감도가 현격히 떨어진다. EP44의 경우 정규깊이는 다음과 같이 계산되어, $d \cdot f / V = 44 \text{ [mm]} \cdot 20 \text{ [kHz]} / 2250 \text{ [m/s]} = 0.39$ 이미 적정 측정 범위를 넘어선다. 따라서 이 경우에는 좀 더 낮은 주파수의 충격 가진을 이용하여 균열의 깊이를 측정해야 한다.

(2) 철근 콘크리트에서의 표면파 감쇠

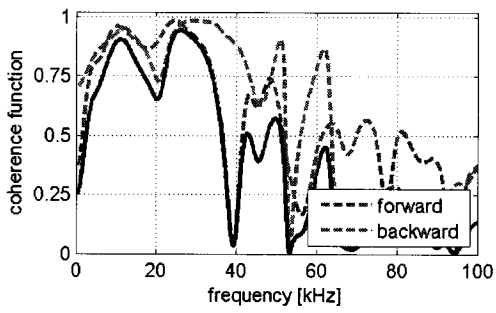
철근 콘크리트 시편에서도 이전과 같은 기법을 이용하여 균열 깊이 측정을 시도하였다. Fig. 3-31은 측정된 표면파를 이용하여 산정한 기여 함수 및 주파수 응답 함수의 진폭을 도시한 것이다. 특이한 점은 그림 (b)에서 볼 수 있듯이, 균열이 없는 경우에 투과 함수가 구형 발산을 따르지 않는다는 점이다. 무근 콘크리트 시편에서는 구형 발산에 해당하는 값인 0.58이었던 투과 함수가, 철근 콘크리트 시편에서는 전체적으로 크게 나타나고 있다. 이는 철근을 따라 더 많은 응력과 에너지가 전달됨에 따라 증가된 것으로 판단된다. 따라서 앞서 무근 콘크리트에서 균열 깊이를 산정하는 것처럼 모델식과 측정된 투과 함수를 직접 비교하여 손상을 평가하는 것은 불가능하다. 이와 같은 경우, 즉 철근 콘크리트 부재에서 손상을 평가하기 위해서는 다른 형태의 기법이 필요하다.



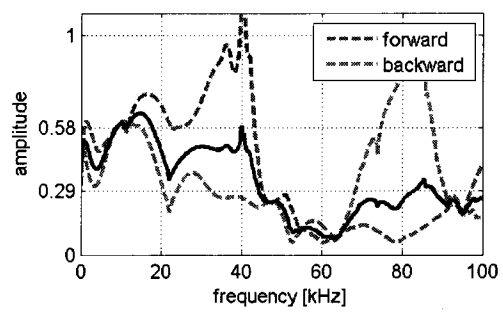
(a) coherence function of ER00



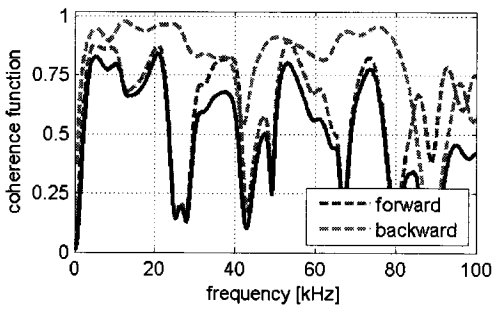
(b) amplitude of the ER00-FRF



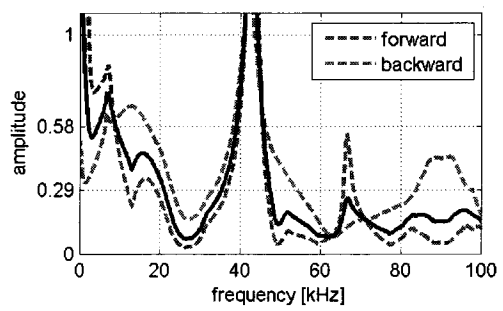
(c) coherence function of ER20



(d) amplitude of the ER20-FRF



(e) coherence function of ER40



(f) amplitude of the ER40-FRF

Fig. 3-31 Surface wave transmission on the reinforced concrete specimens

철근 콘크리트의 경우에는 철근으로 인한 표면파 투과 함수의 왜곡으로 기저 투과 함수를 바탕으로 평가할 수 있다. 즉, 균열이 없는 경우의 투과 함수에 대한 균열이 있는 경우의 투과 함수를 비교함으로써 균열에 의한 표면파의 감쇠 정도를 측정하는 것이다. 식 (3-30)은 이를 도식화한 것으로, $a_0(\lambda)$ 는 균열이 없는 ER00의 투과 함수로서 각 파장의 기준이 된다.

$$SSE(d) = \sum \left(T\left(\frac{d}{\lambda}\right) - \frac{a_H(\lambda)}{a_0(\lambda)} \right)^2 \quad (3-30)$$

위의 오차함수를 이용하여 두 철근 콘크리트 시편의 균열 깊이를 측정하면, 다음 그림과 같이 평가할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 ER20의 경우 18 mm, ER40의 경우 28 mm로 균열 깊이를 평가하였다.

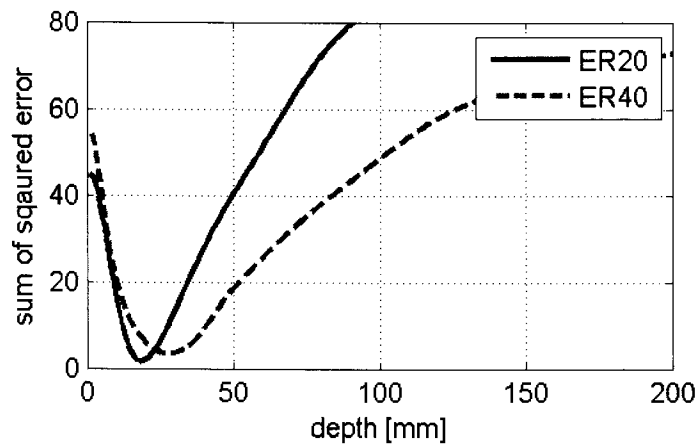
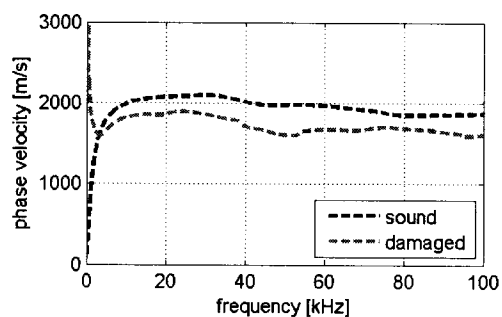
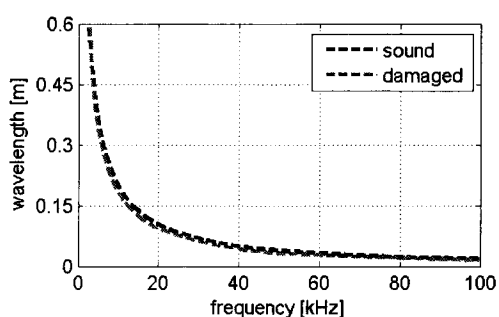


Fig. 3-32 Evaluating the surface wave transmission of RC specimens

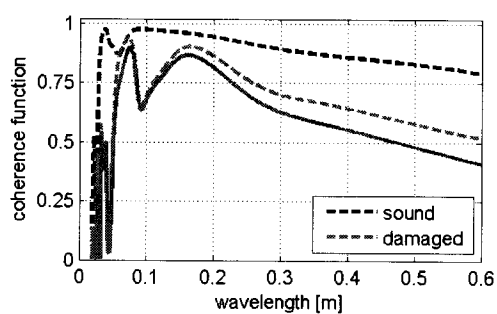
위와 같이 균열 깊이를 평가하기 위해서는, 표면파의 투과 함수를 파장영역에서 평가하여 투과 함수를 계산하여야 한다. 다음의 그림은 두 철근 콘크리트 시편에 대한 파장 영역 해석 과정이다.



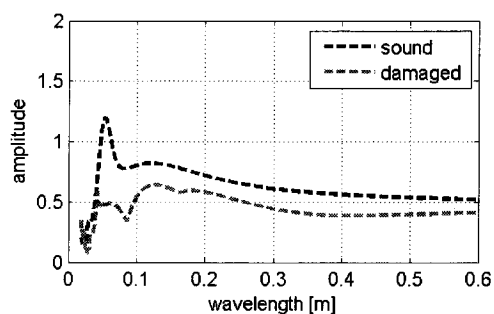
(a) phase velocity profile



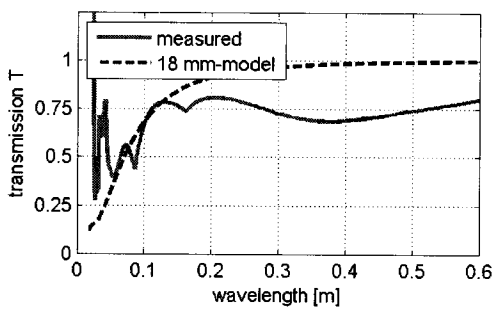
(b) frequency-to-wavelength



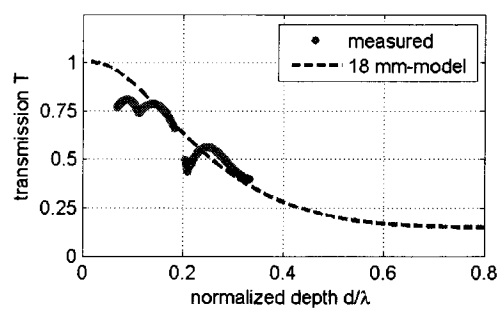
(c) coherence functions



(d) amplitudes of the FRF

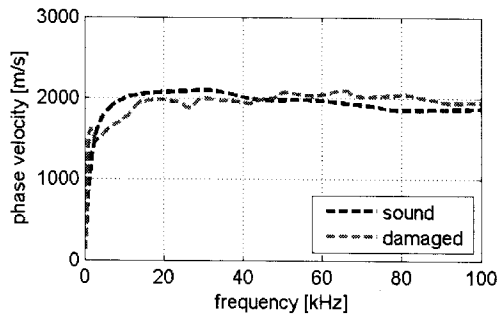


(e) transmission by wavelength

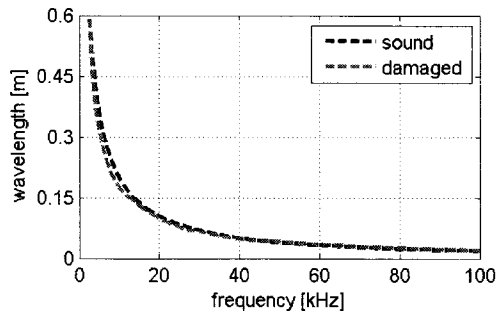


(f) transmission by the normalized depth

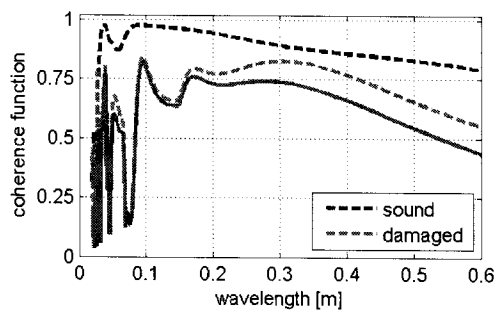
Fig. 3-33 Comparative evaluation for the reinforced concrete specimen of ER20



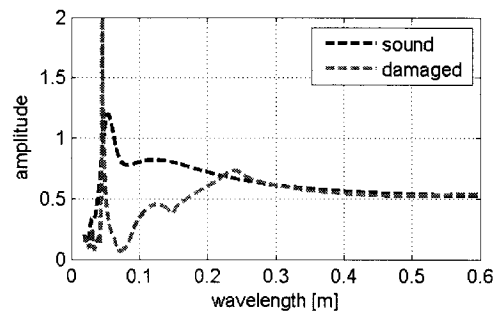
(a) phase velocity profile



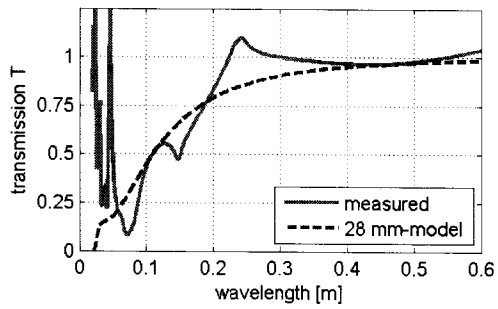
(b) frequency-to-wavelength



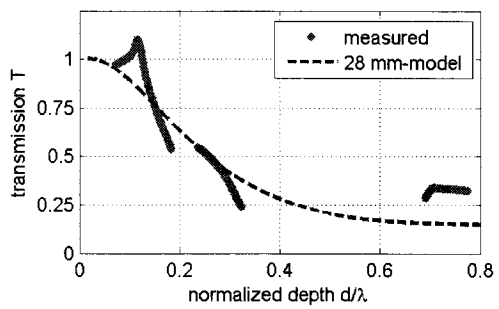
(c) coherence functions



(d) amplitudes of the FRF



(e) transmission by wavelength



(f) transmission by the normalized depth

Fig. 3-34 Comparative evaluation for the reinforced concrete specimen of ER40

(3) 실제 균열에 대한 적용 - 실물 크기 모형 시험 (mock-up test)

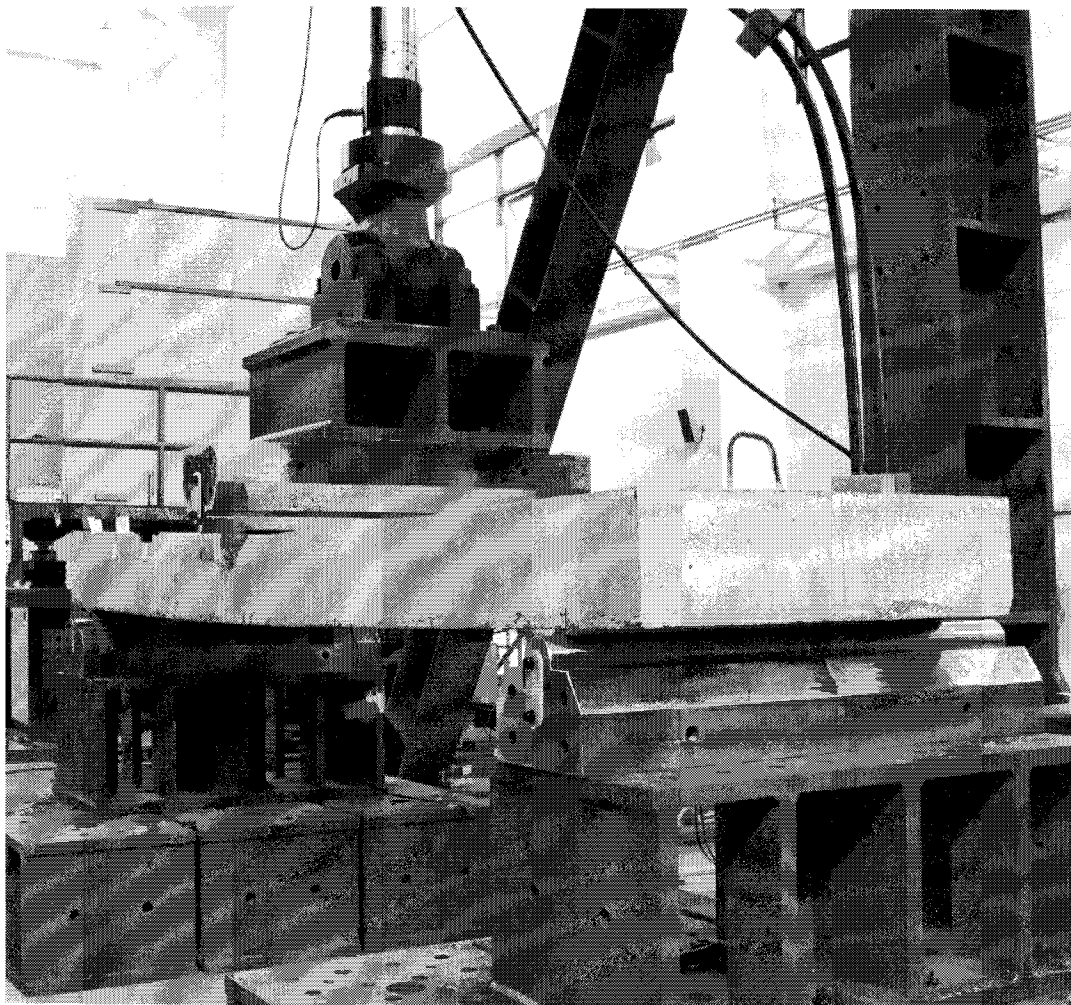
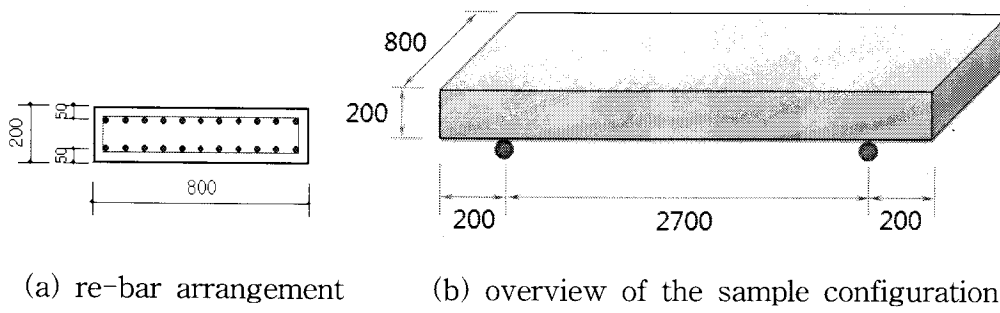
지금까지 수행한 인공 균열(notch)에 대한 실험의 연장선상에서 실제 균열(crack)에 대해 깊이 측정을 시도하였다. 콘크리트 보의 하중 재하 실험을 통해 휨 균열을 유발시켰다. 콘크리트 보는 3.1 m의 지간 거리를 갖도록 설치하였고, 보의 단면은 높이 200 mm, 너비 800 mm를 갖도록 설계하였다. 또한, 지름이 13 mm인 철근 11 개를 인장측과 압축측에 각각 배치하여 전체적으로 철근비가 1.74%를 갖도록 배근하였고, 여기서 피복 두께는 50 mm로 설정하였다. Fig. 3-4는 철근 콘크리트 보에 사용된 재료의 특성 및 제원을 정리한 것이다.

Fig. 3-4 Specification of the reinforced concrete beam for mock-up test

Concrete		Reinforced bars	
Properties	Value	Properties	Value
Mix-proportion [†]	0.55:1:3.17:3.51	Yield strength	400 MPa
Curing age	33 days	Tensile re-bar area	13.94 cm ²
Compressive strength	25.2 MPa	Compressive re-bar area	13.94 cm ²
Rayleigh wave velocity	2199 m/s	Total re-bar ratio	1.74%

[†] The mix-proportion is expressed with the weight ratio of water, cement, sand, and gravel in sequence (W:C:S:G). The maximum size of aggregates is 25 mm and the mixed AE water reducer is 1.18% of the cement weight.

다양한 깊이의 균열을 유발시키기 위해, 다음 그림과 같이 3점 하중을 재하시켰다. 500 kN 용량의 MTS 유압기를 이용하여 철근 콘크리트 보의 휨 파괴를 유도하였다. 따라서 보의 중앙부에서 유발된 휨 균열은 단면에 수직으로 형성되었다. 한편, 극한 강도법으로 계산한 철근 콘크리트 보의 휨강도는 74.7 kN·m으로 산정되었고 그에 따른 극한 하중은 111 kN으로 계산된다. 콘크리트의 균열은 13.4 kN·m, 즉 19.9 kN에서 균열이 발생하기 시작한다.



(c) making real cracks by three-points loading

Fig. 3-35 Mock-up test for evaluation real flexural cracks

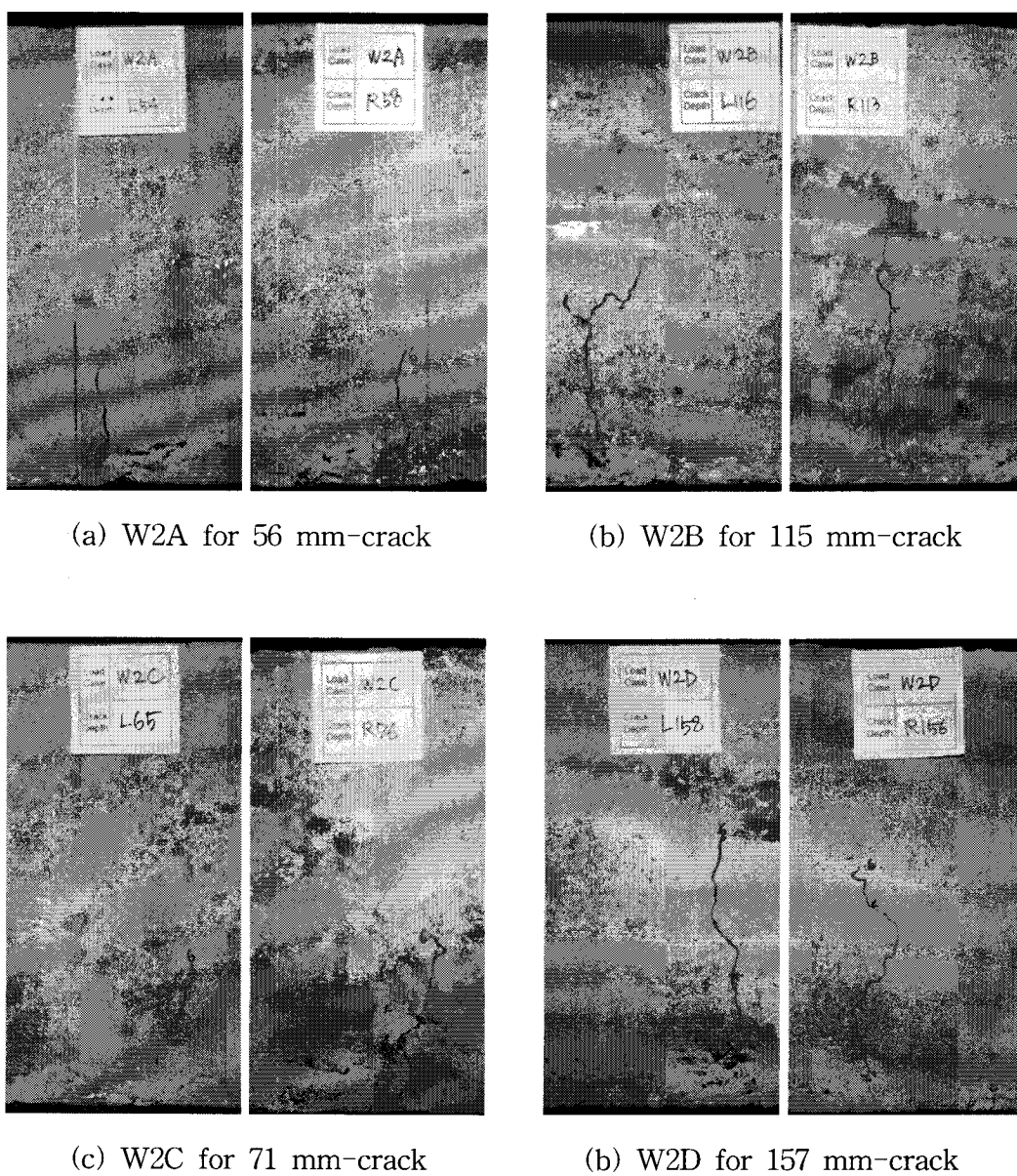
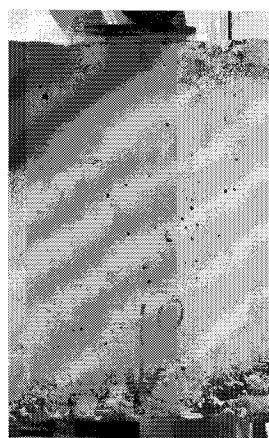


Fig. 3-36 Crack shape on the reinforced concrete beam

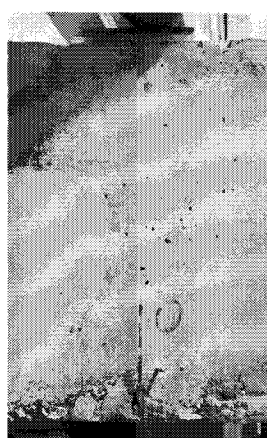
Table 3-5 Apparent crack depth on the reinforced concrete beam

Crack depth	W2A	W2B	W2C	W2D
Measured on the left side [mm]	54	116	65	119
Measured on the right side [mm]	58	113	76	107
Apparent depth – average [mm]	56	115	71	113

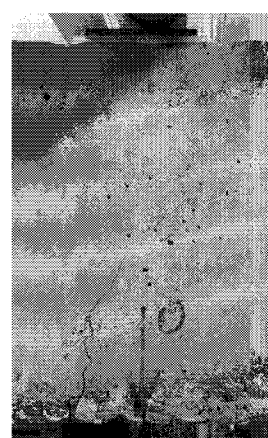
본 실험에서는 30 kN의 하중을 가하여 균열을 유발시켜, 다양한 균열에 대해 표면과 실험을 통해 균열 깊이를 측정하였다. 이때 재하 속도는 10 kN/min로 설정하여 충격이 아닌 정적 거동을 유발하였다. 총 4개의 균열 W2A, W2B, W2C, W2D 이 Fig. 3-36과 같이 유발되었으며, 양쪽 측면에서 측정한 균열의 깊이는 표 3-5에서 정리하였다. 콘크리트의 균열은 하중을 재하시키면 열리고, 하중을 제거시키면 닫힘으로써 균열폭을 조절할 수 있다. Fig. 3-37은 균열폭을 제어하기 위한 각 상태를 도시한 그림이다.



(a) crack closed



(b) crack opened



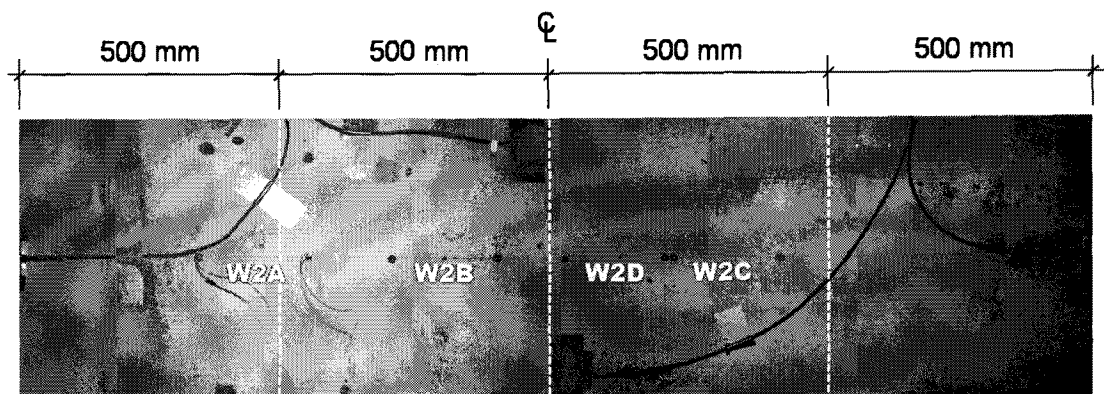
(c) re-bars yielding

Fig. 3-37 States of the cracks

표면파 측정 실험은 Fig. 3-38과 같이 이전 실험과 동일하게 수행하였다. 그러나 인공 균열 보다 깊은 균열에 대한 실험을 위해 강구를 이용하여 충격 가진 시켰다. 아래 그림은 균열을 투과하는 표면파를 측정하기 앞서, 손상이 없는 상태에서 기저 투과 함수를 측정하고 있는 사진이다. 또한, 4 개의 균열 위치에 플라스틱 마운트를 접착시킨 후 가속도계를 연결하여 표면파를 측정하였다.



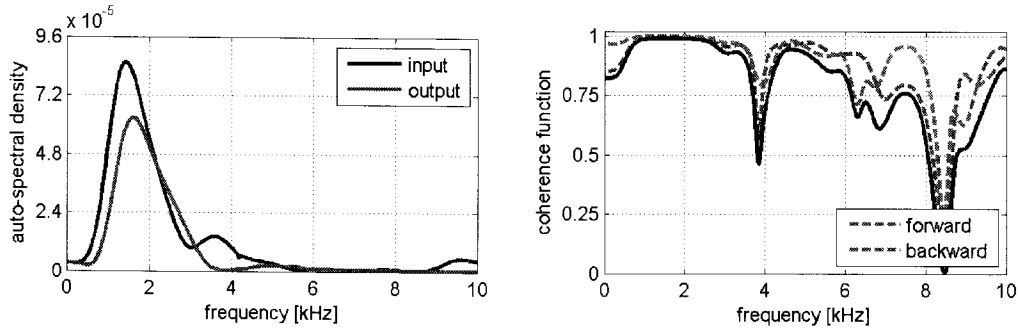
(a) Apparatus and measuring the basis transmission



(b) Measuring position for 4 investigated cracks

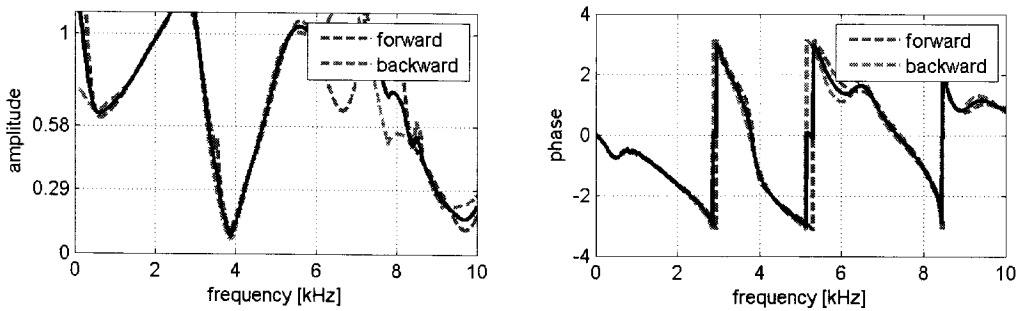
Fig. 3-38 Surface wave measurement on the reinforced concrete beam

먼저 손상이 없는 철근 콘크리트 보에서 측정된 기저 투과 함수는 Fig. 3-39와 같다. 자기 스펙트럼 밀도에서 확인할 수 있듯이, 강구를 이용하여 충격 가해진 표면과는 1 kHz에서 7 kHz 정도의 주파수 대역폭을 갖는다.



(a) geometric mean of auto-spectral density

(b) coherence function

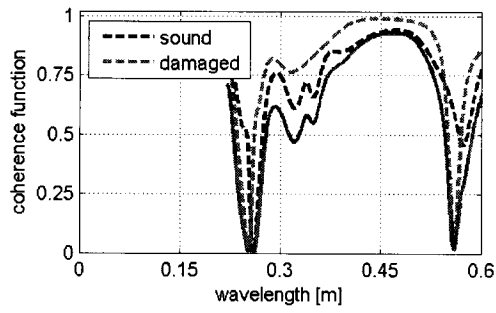


(c) amplitude of the FRF

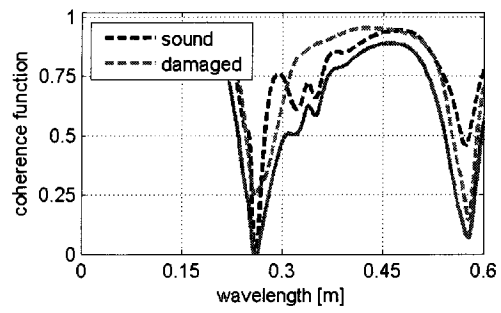
(d) phase of the FRF

Fig. 3-39 Measured basis transmission function

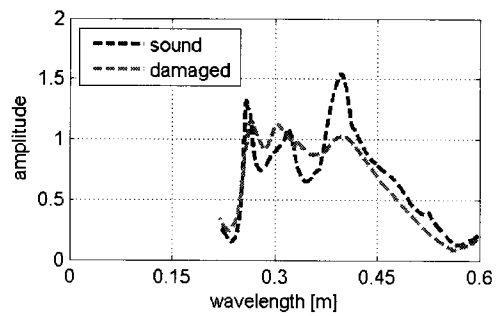
Fig. 3-40은 균열이 열렸을 때 측정된 표면파의 기여 함수 및 투과 함수를 파장 영역에서 분석한 그림이다. 그리고 마지막 그림은 측정된 투과 함수와 가장 비슷한 모델식과 함께 도시한 것이다. 또한, Fig. 3-41은 동일한 균열에 대해 균열이 닫혔을 때 측정된 것으로, 측정 및 분석 방법은 동일하다. 여기서 W2I/W2J/W2K/W2L은 열린 균열 W2A/W2B/W2C/W2D에 대응한다.



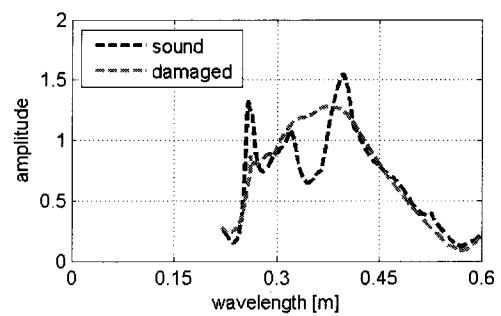
(a) coherence functions of W2A



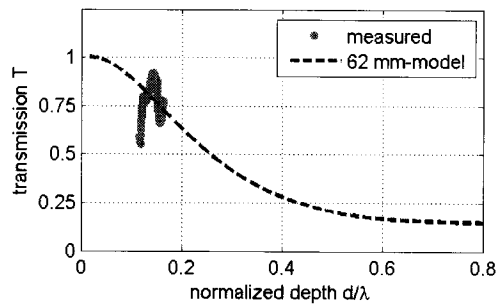
(d) coherence functions of W2B



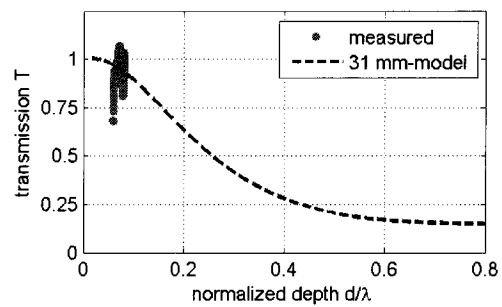
(b) amplitude of W2A



(e) amplitude of W2B

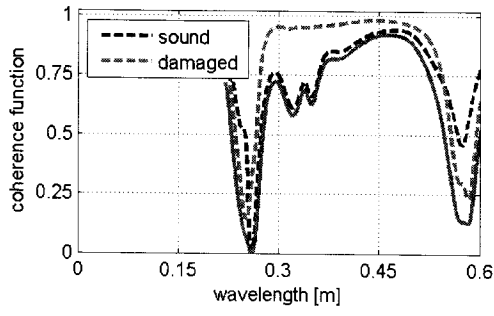


(c) transmission of W2A

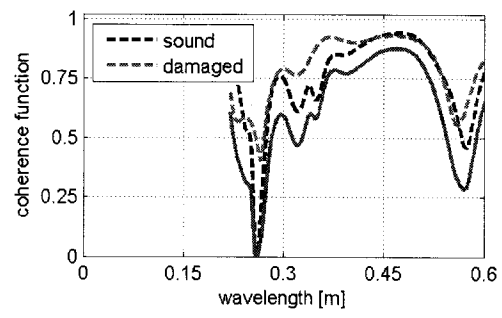


(f) transmission of W2B

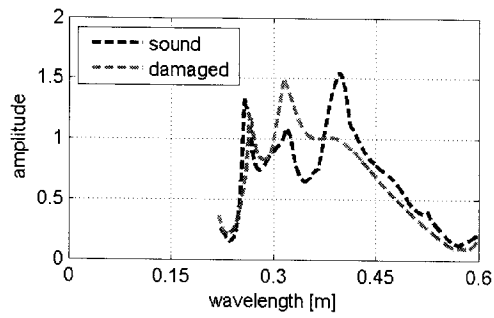
Fig. 3-40 Evaluation of opened cracks



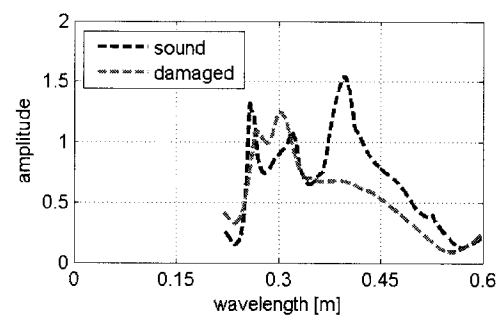
(g) coherence functions of W2C



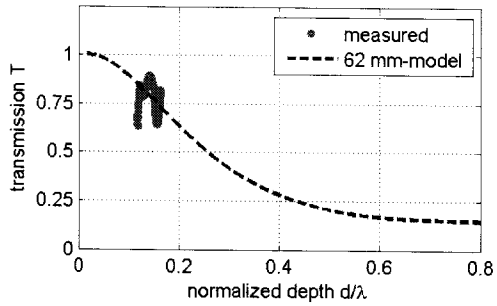
(j) coherence functions of W2D



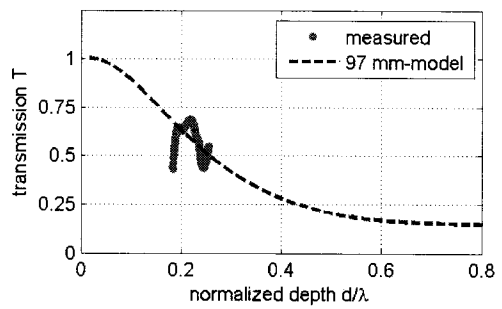
(h) amplitude of W2C



(k) amplitude of W2D

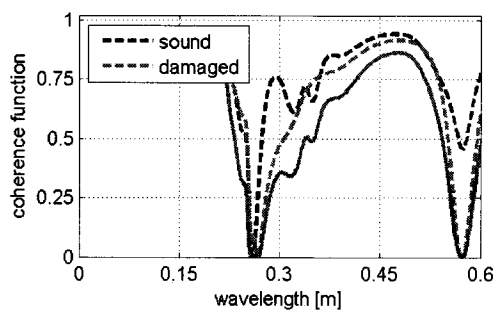


(i) transmission of W2C

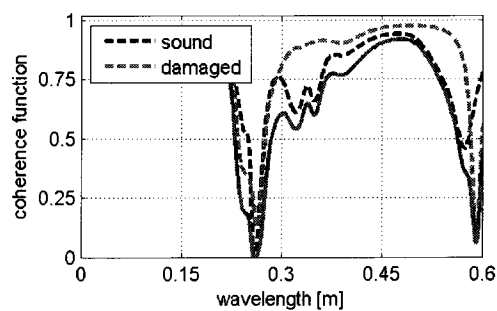


(l) transmission of W2D

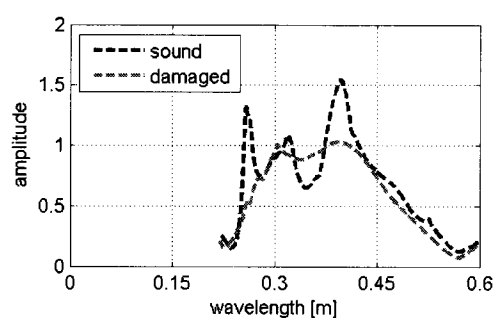
Fig. 3-40 Evaluation of opened cracks (continued)



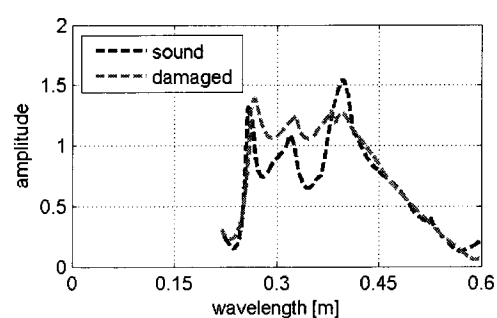
(a) coherence functions of W2I



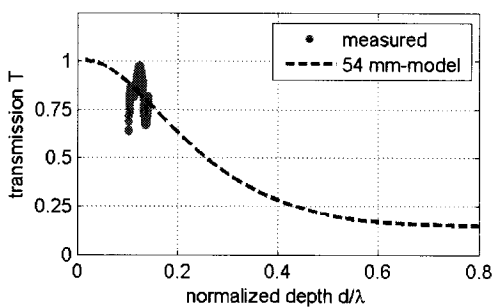
(d) coherence functions of W2J



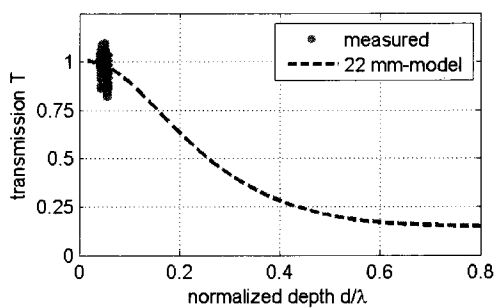
(b) amplitude of W2I



(e) amplitude of W2J

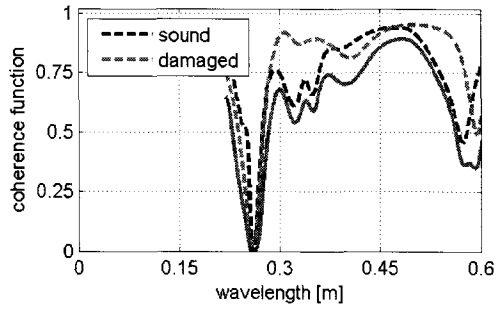


(c) transmission of W2I

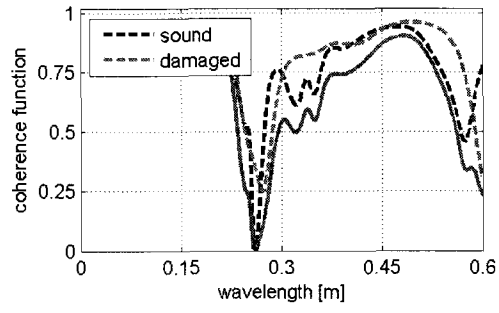


(f) transmission of W2J

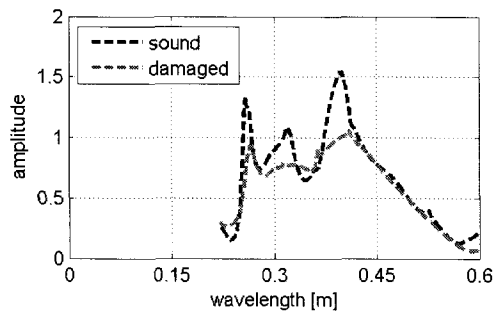
Fig. 3-41 Evaluation of closed cracks



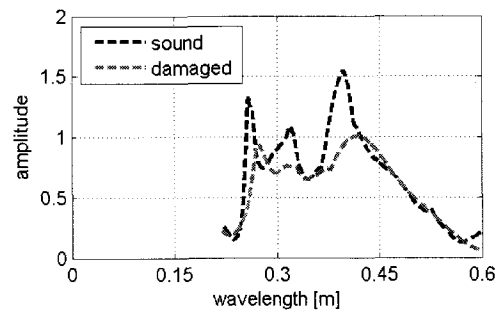
(g) coherence functions of W2K



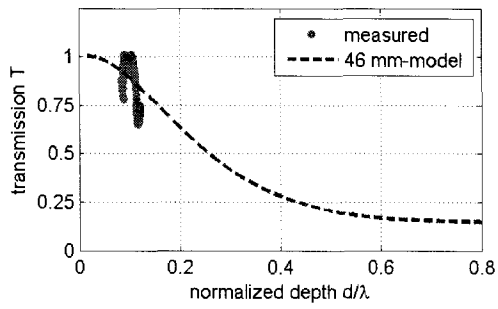
(j) coherence functions of W2L



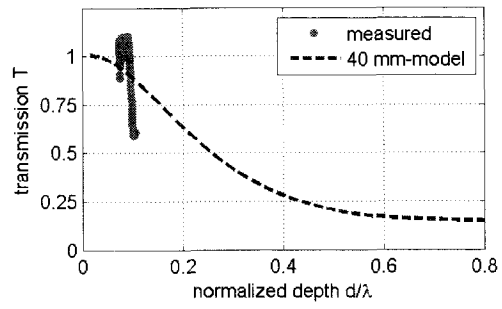
(h) amplitude of W2K



(k) amplitude of W2D



(i) transmission of W2K



(l) transmission of W2L

Fig. 3-41 Evaluation of closed cracks (continued)

측정된 표면과 투과 함수와 모델식의 비교를 위해 사용된 오차 함수는 앞 서 제안된 오차함수를 사용하였다. Fig. 3-42는 균열 깊이 결정을 위한 오차함수의 그래프이다. 이를 바탕으로 결정한 균열 깊이, 즉 오차함수가 최저일 때의 균열 깊이는 Table 3-5에서 정리하였다.

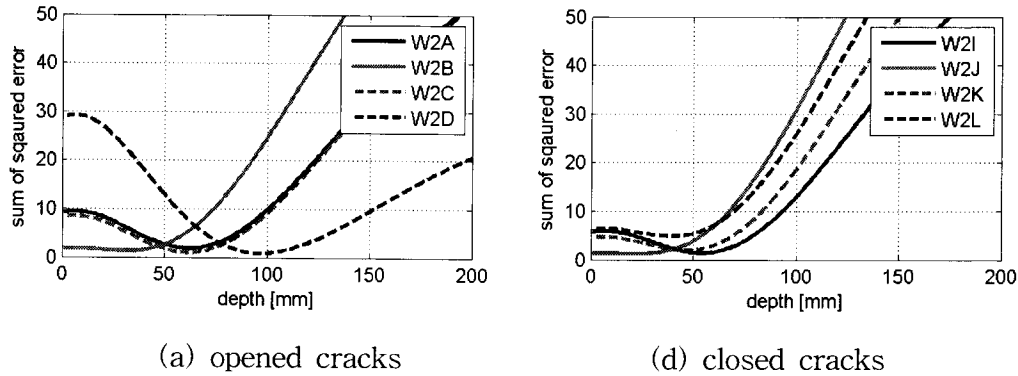


Fig. 3-42 Sum-of-squared-error for evaluating crack depths

Table 3-5 Determined crack depths by the surface wave transmission

Label (opened/closed)	W2A/W2I	W2B/W2J	W2C/W2K	W2D/W2L
Apparent depth [mm]	56	115	71	113
Opened cracks [mm]	62	31	62	97
Closed cracks [mm]	54	22	46	40

W2B/W2J의 경우 표면과 기법을 사용하여 측정한 균열 깊이와 겹보기 균열 깊이의 차이는 비교적 크지만, 다른 경우에는 수용할 만한 결과를 주고 있다. 그러나 균열이 닫혔을 때에는 측정되는 균열 깊이가 얕아진다. 이는 균열이 닫힘으로써 균열면에서 부분적으로 매질의 접촉이 발생하여 접촉면으로 응력과 에너지가 전달되어 발생하는 것으로 추정된다. 여기서 오차 함수 또한 균열이 닫힘에 따라 50 mm로 최소값이 수렴되어 감을 확인할 수 있다. 이는 피복 두께와 일치하는 값으로, 인장축의 철근과 콘크리트의 부착 파괴로 발생한 영구 슬립으로 인해 균열이 더 이상 닫히지 못한 것이다.

라. 주파수 응답 함수 기반 자기보정 기법에 대한 소결

레이리파의 투과 함수는 균열과 같은 콘크리트의 손상에 민감하게 반응한다. 그러므로 레이리파의 투과 함수를 이용하여 측정한 균열 깊이로 손상 지수를 표현함으로써 콘크리트 구조물의 손상을 평가할 수 있다. 본 연구 과제에서는 실질적으로 슬래브 또는 포장에 존재하는 균열의 깊이를 평가하고자 개선된 자기 보정 기법을 제안하여 적용하였다. 개선된 자기 보정 기법은 비일관성 잡음이 제거되고, 센서 접촉에 의한 불균등 측정 오차를 제거할 수 있다. 개선된 자기 보정 기법에 의해 산정된 주파수 응답 함수의 진폭은 표면파 투과 함수와 일치하며, 동시에 표면파의 전달 속도도 분석할 수 있다. 무근 콘크리트에 손상이 없는 경우 측정된 표면파의 투과 함수는 구형발산과 일치함을 확인하였다. 또한, 균열이 있는 무근 콘크리트에서 측정된 표면파 투과 함수는 구형발산과 수치해석으로 구한 균열 깊이 모델식과 일치하였다. 한편, 철근 콘크리트의 경우 철근에 의한 응력파의 산란으로 인해 손상이 없는 시편에서 측정한 표면파의 투과 함수도 구형 발산과 일치하지 않는다. 따라서 이러한 경우 손상이 없는 영역에서 기저 투과 함수를 측정한 후, 이를 바탕으로 균열의 깊이를 추정할 수 있다. 마지막으로 실제 크기 모형 실험을 수행하여 실제로 발생한 휨 균열을 측정하였고 그 타당함을 확인하였다.

본 연구 과제를 통해 개발된 기법은 발생된 균열의 형상에 따라 약간의 제약이 따른다. 균열의 간격이 10 cm보다 작게 유발되어 균열이 군집되어 있는 경우와 사인장 균열과 같이 단면에 비스듬히 발생한 균열에 대해서는 오차를 유발할 수 있으므로 적용에 세심한 주의가 필요하다. 또한, 표면파와 같은 응력파의 전달 특성에 영향을 미칠 수 있는 콘크리트 내부의 함수비의 영향에 대해서도 고려할 필요가 있다. 이러한 경우에 대해 오차를 줄일 수 있는 보정 계수에 관한 연구가 추가적으로 필요하다.

4. 균열깊이 추정용 프로토타입 표면탄성과 측정시스템 구성

지금까지 설명하였듯이, 콘크리트 손상 평가를 위한 능동형 비파괴검사는 표면파의 투과 함수를 측정하여 수행한다. 여기서는 표면파 투과 함수 측정, 즉 능동형 비파괴검사를 위해 구성된 프로토타입 시스템을 설명하고자 한다. 본 연구에서 제안된 프로토타입 시스템은 Fig. 3-43과 같이 2-채널 표면파 측정 시스템(2-channel surface wave measurement system)으로 구성되었다. Fig. 3-44는 실제로 구성된 시스템을 이용하여 측정 실험을 수행한 사진이다.

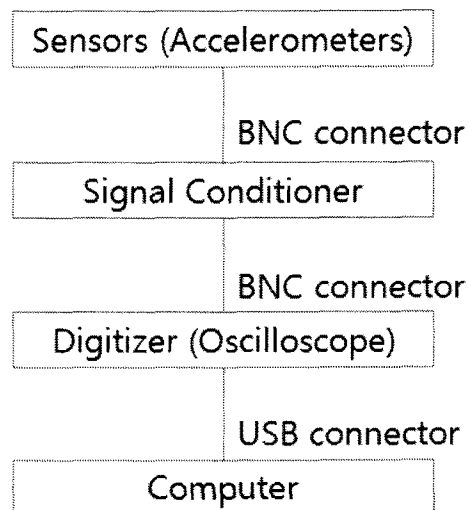


Fig. 3-43 Outline of 2-channel surface wave measurement system

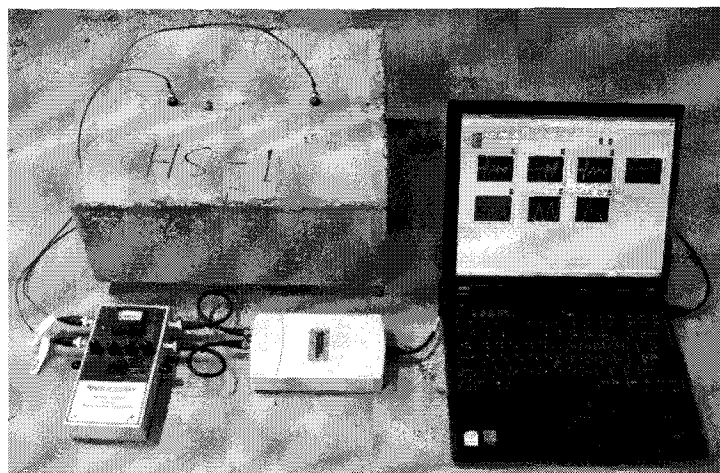
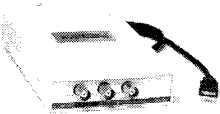
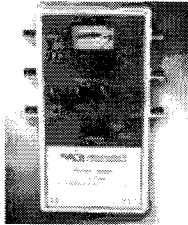


Fig. 3-44 Pictures of the developed prototype system

위의 프로토타입 시스템은 경제적이고 손쉽게 구성할 수 있도록 설계되어, 비파괴검사의 적용성을 크게 향상시킨다. 구성된 프로토타입 시스템에 사용된 세부 특성은 다음 표와 같다.

Table 3-6 Specification of the developed prototype system

항목	관련그림	세 부 사 양
계 측 프로그램		- National Instrument, Corp.; LabVIEW version 8.5: 동적 신호 취득을 위한 프로그램 개발 툴 - LabVIEW는 그래픽 환경 인터페이스를 제공하는 개발 툴로써 동적 신호 취득에 효과적인 기능을 제공하여 하드웨어 제어 분야에 널리 사용되고 있음.
디지털라이저		- National Instrument, Corp.; USB-5133 digitizer: 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위한 디지털라이저: - 입력 채널 2 개와 외부 트리거 1 개 - 최대 샘플링 속도: 100 MHz - 디지털 신호 분해능: 8 bits
신호 조절 장치		PCB Piezotronics, Inc.; PCB 480B12: 가속도계의 구동을 위한 전원 공급 및 신호 증폭 기능을 내장한 신호 조절 장치
가속도계		- PCB Piezotronics, Inc.; PCB 352A60: 콘크리트 표면파의 가속도 성분을 측정하기 위한 가속도계 - 공진 주파수: 95 kHz 이상 - 측정 범위(± 3 dB): 5 Hz - 60 kHz

표면파를 이용한 콘크리트 손상의 평가를 위한 계측 프로그램은 앞의 표에서 설명한 바와 같이, LabVIEW 8.5를 이용하여 개발하였다. 두개의 채널에서 측정된 신호에 대해서, 누적하여 자기 스펙트럼 밀도 함수를 기본적으로 계산하여 보여준다. 또한, 그에 따른 기여 함수도 디스플레이하며, 간단하게 발생 시간을 이용한 겹보

기 표면과 속도도 자동으로 산정된다. 다음의 그림은 본 연구 과제를 통해 개발된 프로그램의 프런트패널을 캡처한 것이다.

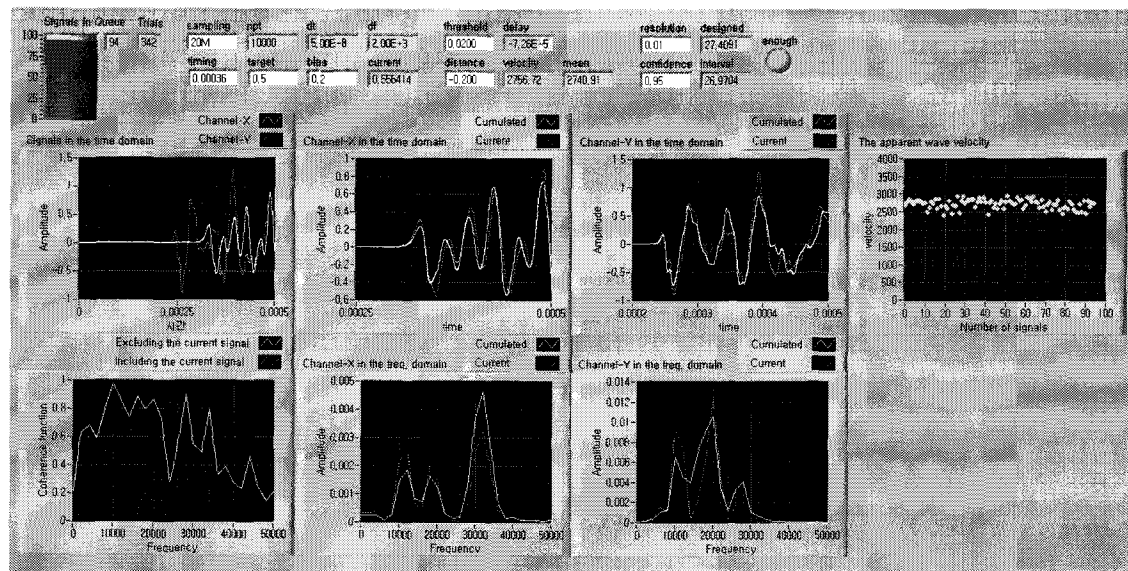


Fig. 3-45 Front pannel of the developed prototype system

이와 같이 개발된 프로토타입 시스템을 이용하면, 표면파를 이용한 콘크리트 손상 평가가 가능하다.

제 4 절 현장 적용 검증 실험

1. 서 론

콘크리트 구조물의 손상 평가를 위한 비파괴검사 기법의 타당성을 실제 구조물에 적용하여 확인하기 위해, 공용 중인 두 교량을 선정하여 실험을 수행하였다. 실험의 순서는 결합형 비파괴검사의 계획대로, 음향방출을 이용하여 콘크리트 구조물의 손상, 즉 균열 유무를 판단하고 발생한 위치를 파악한다. 확인된 균열에 대해서는 표면파의 투과 함수 측정을 통해 콘크리트 구조물의 손상 정도, 즉 균열의 깊이를 평가하였다.

이와 같은 비파괴검사를 적용하여 콘크리트 교량의 손상 평가 결과를 비교하기 위해서, 손상이 많은 교량과 손상이 거의 없는 두 교량을 선정하였다. 먼저 손상이 많은 교량으로는 1969년 준공되어 약 40 년간 사용된 철근 콘크리트 T형 거더교로 설계된 순창 쌍계 1교이다. 쌍계교는 앞서 교량의 안전성 평가 일환으로 입증 재하 시험을 수행하여, 현재 많은 손상이 유발된 상태이다. 그리고 손상이 거의 없는 교량으로는 한국도로공사의 시설 유지관리 연구의 목적으로 건설된 중부내륙 고속도로 시험구간 내의 여주 금당교로 선정하였다. 금당교는 프리스트레스트 콘크리트 교량으로 I형 거더교와 박스 거더교, 두 형식으로 구성되어 2002 년 시공되었다. 금당교의 경우 시험구간으로 차량의 통행이 적어 현재 시공 직후와 거의 동일한 상태로 유지되고 있다.

2. 쌍계교에 대한 비파괴검사

가. 쌍계교의 제원 및 상태

총연장 75 m의 쌍계1교는 1969 년 준공된 철근콘크리트 T형 거더교로, 현재는 대체 교량이 설치되어 철거 예정에 있다. 다음 그림 Fig. 4-1에서 확인할 수 있듯이, 지방도 구간에 위치한 왕복 2차선의 교량으로 DB-13.5 설계하중으로 건설된 소형 교량이다. 쌍계교의 형식 및 구체적인 사양은 Table 4-1에 정리하였고, Fig.

4-2는 T형 거더의 대표 단면도이다.



(a) front view of Ssanggye bridge



(b) side view of Ssanggye bridge

Fig. 4-1 Overview of Ssanggye bridge

Table 4-1 Structural specification of Ssangye bridge

구 분	내 용
교 량 명	쌍계 1교
위 치	전라북도 순창군 쌍치면 쌍계리
설 계 하 중	DB-13.5
교 폭	7.5m (5경간 단순:5@15m)
연 장	75.0m
상부구조형식	RC T-BEAM
난 간	콘크리트 난간
신축이음	MONO CELL
교량받침	평면받침
시 공 사	일흥건설주식회사
관리주체	남원국도유지관리사무소
준공년도	1969년 12월

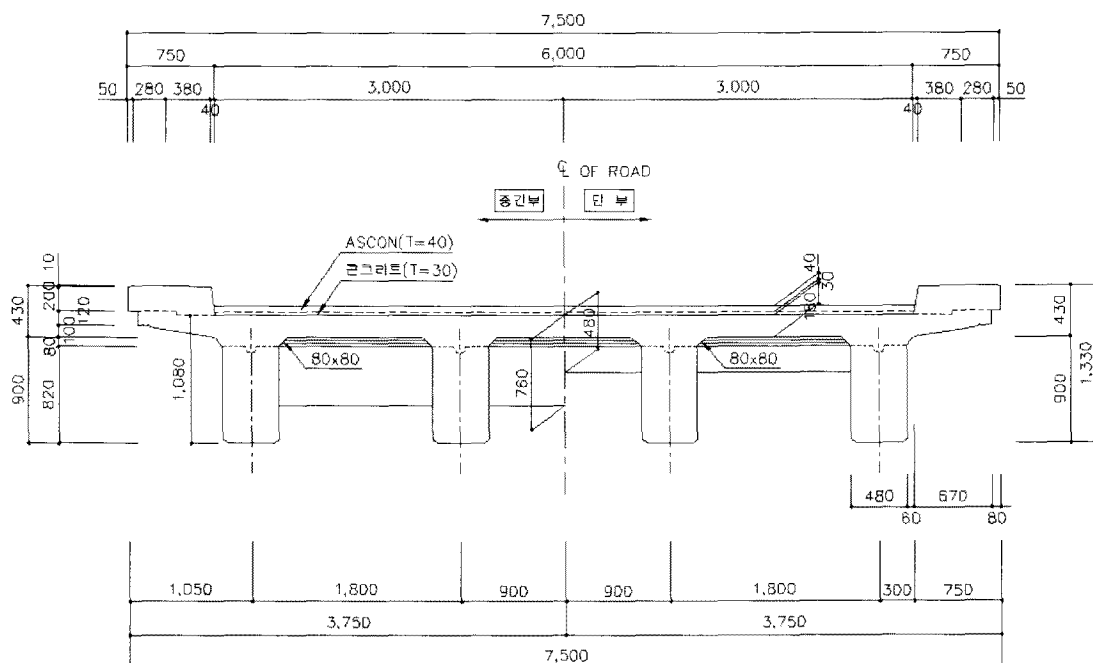


Fig. 4-2 Structural drawing of Ssanggye bridge

본 연구과제의 실험에 앞서, 한국건설교통기술평가원에서 지원하는 (사)한국콘크리트학회 주관 ‘사회기반시설물 평가 중점연구단’에서는 쌍계1교를 대상 교량으로 설정하여 교량 구조물의 평가 기술 체계화를 위한 실험을 수행하였다. 교량의 평가는 다음의 세 단계로 진행되었다: (1) 외관 조사를 바탕으로 상태 평가; (2) 차량 하중 재하 시험 및 동적 실험을 통한 건전도 평가; (3) 반력 프레임(reaction frame)을 이용한 입증 재하 시험(proof loading test).

건설교통부 제정 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침(2003)에 따라 티엠이엔씨(주)에서 외관 조사를 바탕으로 수행한 상태 평가 결과 쌍계교는 C 등급으로 산정되었다. 상태 평가 C 등급은 안전 등급에서 주요 부재에 경미한 결함 또는 보조 부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요 부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태를 의미한다. 또한, 안전 점검 상태 평가의 내구성 조사 중 초음파속도법을 이용한 비파괴검사를 통해 측정된 콘크리트의 압축강도는 23.5 MPa로 추정되었다.

나. 음향방출을 이용한 비파괴 검사방법

(1) 시험조건 및 시험방법

‘사회기반시설물 평가 중점연구단’에서는 쌍계교에 대한 입증 재하시험을 마지막으로 수행하였는데, 반력프레임과 유압장치를 이용하여 거더의 중앙부에 하중을 작용시켜 콘크리트 구조물의 실제 내하력을 측정하였다. 따라서 입증 재하시험이 수행된 첫 번째 경간(span-1) 슬래브의 거더에는 현재 매우 큰 손상이 유발되어 있다. Fig. 4-3은 교량의 시험대상 경간인 span-1과 span-4의 위치를 나타낸 그림이며 Fig. 4-4는 입증 재하시험으로 손상이 매우 심한 span-1의 거더와 약 40 년간 과적 차량의 통과로 손상을 입은 span-4의 거더에 존재하는 균열 사진이다. 따라서 본 연구 과제에서는 손상이 심한 경우와 일반적인 손상이 있는 경우를 고려하여, 두 슬래브에 위치하는 외측 거더에서 비파괴검사를 실시하였다.

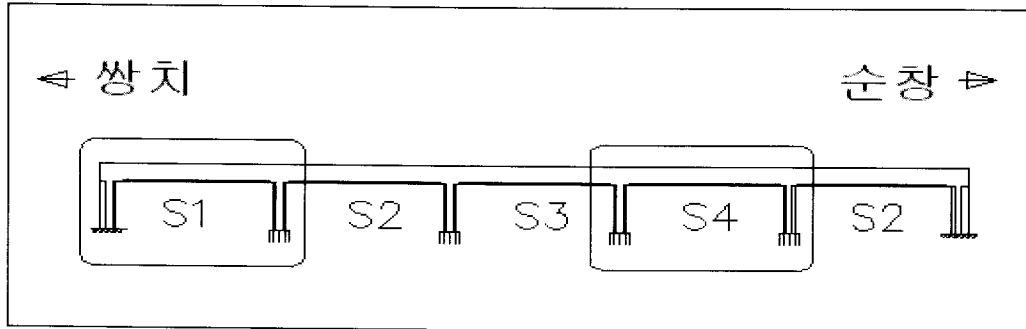
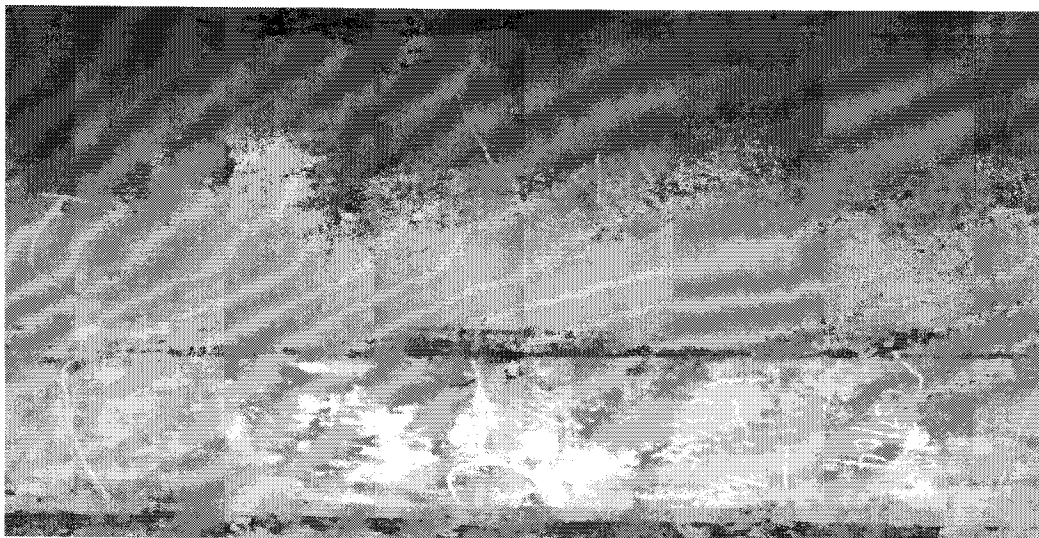


Fig. 4-3 Span location of the bridge



(a) exterior girder in span-1, seriously damaged by proof loading test



(b) exterior girder in span-4, damaged by heavy traffic

Fig. 4-4 Damage pattern of Ssanggye bridge

Fig. 4-5는 센서의 부착위치를 측면에서 본 경우 Fig. 4-6은 정면에서 본 경우를 나타내었다. 본 교량은 점검통로가 설치되어 있지 않아 Fig. 4-7~Fig. 4-10과 같이 표면 그라인더, 센서부착작업, 케이블링 작업, pencil lead break test 등의 작업을 교량점검차를 이용하여 실시하였다. 실험장비는 제 3 장 제 2 절에서 언급한 실내 실험 장비와 동일한 것을 사용하였으며 신호취득을 위한 문턱값(threshold)은 background noise level보다 약간 높게 설정하였다. span-1의 경우 CH.1과 CH.2는 38 dB, CH.3은 39 dB로 설정하였으며 span-4의 경우 상대적으로 background noise level이 낮게 측정되어 30 dB로 설정하여 실험을 실시하였다.

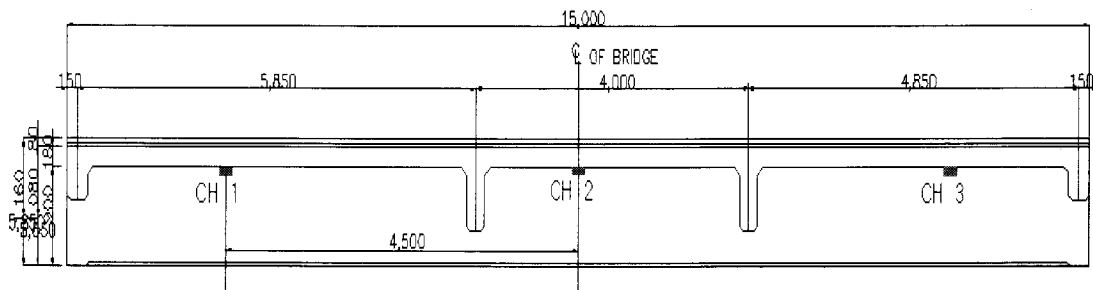


Fig. 4-5 Sensor location at side view

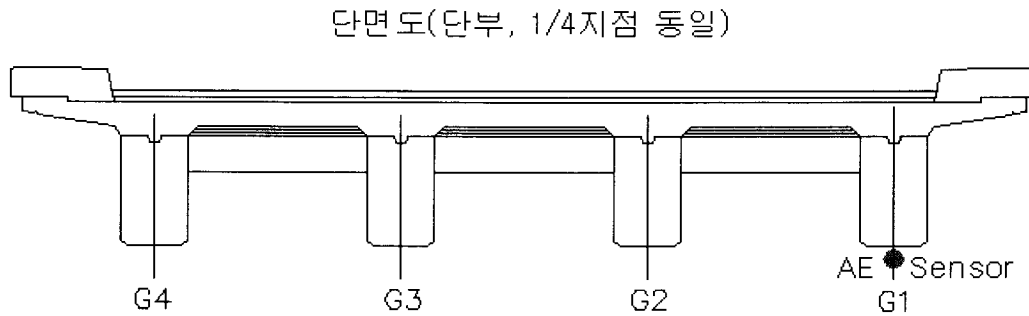


Fig. 4-6 Sensor location at front view



Fig. 4-7 Bridge inspection vehicle

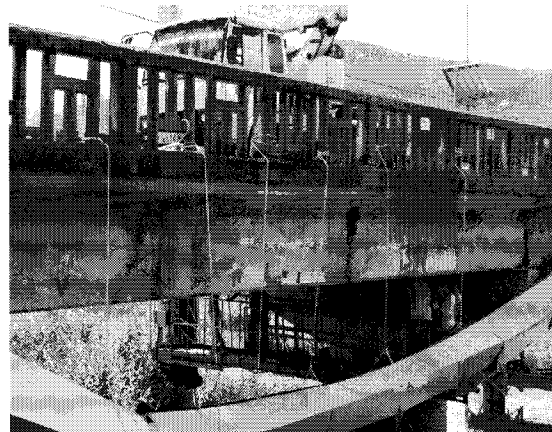


Fig. 4-8 Sensor attaching work



Fig. 4-9 Sensor calibration test

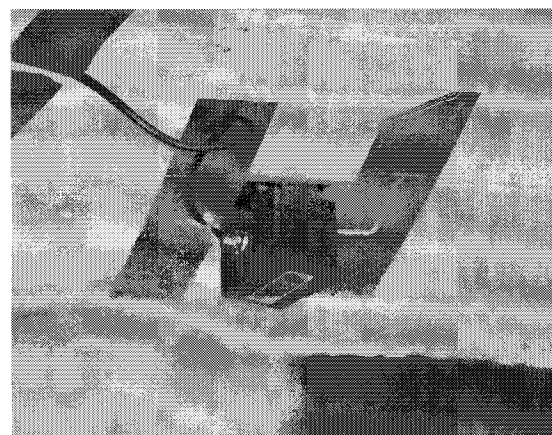


Fig. 4-10 Magnetic holder & sensor

(2) 시험하중 및 시험방법

대상 교량에 대해 하중재하 시험을 차량 진입 위치별로 수행하였으며, 좌측 거더 위, 중앙선 위, 우측 거더 위 등 세 가지 진입 경로를 선정한 후 각 경간의 시점과 종점을 기준으로 진입 및 진출함으로써 단계별 하중 재하를 구현하였다. Table 4-2에서 보는 바와 같이 span-1은 8가지의 하중 종류로, span-4는 6가지의 하중 종류로 각각 재하하였다. 하중 크기는 9 ton 중량의 구조 작업차와 25 ton 중량의 덤프트럭 두 대를 조합하여 각각의 하중조건으로 재하하였다.

Fig. 4-11은 9 ton 중량의 구조작업차가 step-1의 unloading 구간을 통과하고 있는 사진이며, Fig. 4-12는 step-4에서의 24 ton 덤프트럭과 9 ton 트럭의 동시 진입 장면을, Fig. 4-13는 step-8에서의 24 ton 덤프트럭의 중압 진입 장면을 보여준다. Fig. 4-14는 span-1 구간에 두 대의 트럭을 사용하여 step-4의 경우로 재하하

고 있을 동안 AE 계측하는 모습을 나타내는 사진이다.



Fig. 4-11 Span-1 / step-1(9L)



Fig. 4-12 Span-4 / step-4(24L9R)

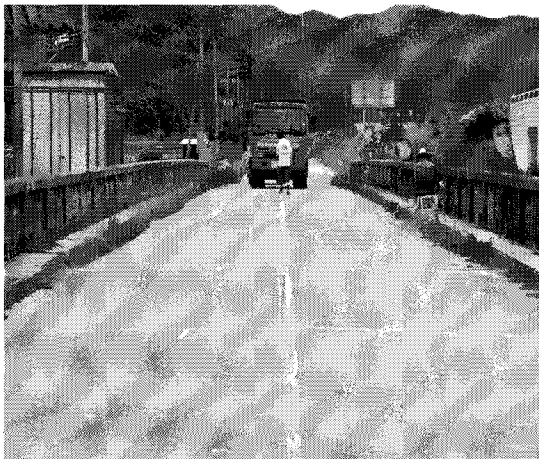


Fig. 4-13 Span-1 / step-8(24C)



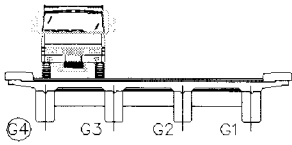
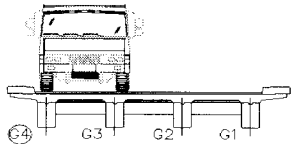
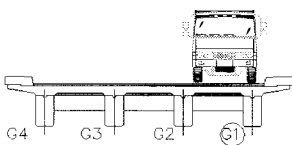
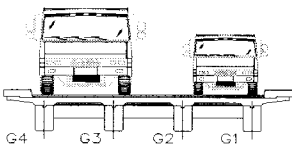
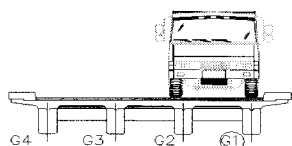
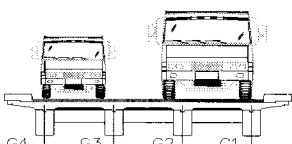
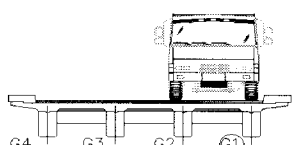
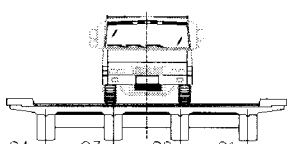
Fig. 4-14 AE measurement at site

(3) Span-1의 결과 분석

Fig. 4-15는 대상교량의 span-1에서 각각의 하중경우로 재하 하였을 때 중앙에 위치한 CH2에서의 시간에 따른 AE hit 발생율과 하중과의 관계를 나타낸 그림이다.

이를 고찰하여 보면 하중의 크기가 증가함에 따라 loading시 뿐만 아니라 unloading시에도 신호 발생 빈도가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. step-1, 2에서는 하중 범위가 작기 때문에 전체적으로 신호 발생율이 낮게 나타나고 있으나 하중의 크기가 증가할수록 상대적으로 많은 AE 신호가 나타나고 있었다. step-3, 4에서 볼 수 있듯이 전 단계에 비해 큰 하중을 부가 할수록 loading 과 unloading시

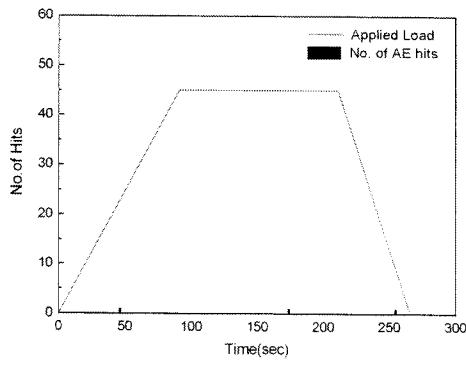
Table 4-2 Loading scheme of experiment

step	span-1	span-4	하중재하 위치표시
1	9L	9L	
2	24L	24L	
3	9R	9R	
4	24L9R	24L9R	
5	24R	24R	
6	9L24R	9L24R	
7	24R-1		
8	24C		
9 : 9 ton 중량의 구조작업차, 24 : 24 ton 중량의 덤프트럭 L : Left(거더 G4위에 차량의 오른쪽바퀴 위치), R : Right(거더 G1위에 차량의 왼쪽바퀴 위치), C : Center loading : 약 1분동안 시속 5 km/hr로 진입 (차량 진입 후 경간 중앙에 정지시까지) holding : 2분동안 정지 (경간 중앙에서 뒷바퀴 중 앞쪽 바퀴가 위치하도록 정지) unloading : 약 1분동안 시속 5 km/hr로 진출(정지종료 후 차량이 진출시까지)			

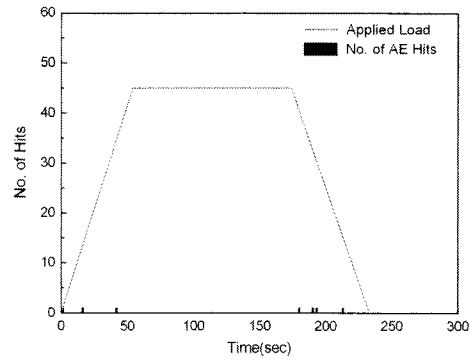
모두 신호 발생 빈도가 크게 나타나고 있으며 loading 시 훨씬 많은 신호가 나타나고 있는 것으로 보아 하중을 재하 시킴으로써 새로운 균열이 생성되면서 발생하는 AE 신호라 판단된다. 또한 unloading시 하중을 제거시킴에 따라 loading시 생긴 균열이 닫히면서 그 균열면의 마찰에 의해서 약간의 AE 신호가 발생한 것을 알 수 있다. 이후 step-5, 6에서는 step-3, 4보다 더 큰 하중이 부가됨에 따라 Loading시 생기는 AE 신호 발생 빈도가 현저히 증가하였으며 unloading시 역시 균열이 거의 닫힐 무렵 신호 발생 빈도가 커짐에 따라 균열이 크게 열릴수록 마찰이 이루어지는 균열 면이 커지고 그에 따라 발생하는 음향방출 hit수도 더욱 커짐에 따라 실내 실험에서 확인했던 사실이 실제 교량에서도 일치하는 결과라는 것을 입증할 수 있었다.

Fig. 4-15 (g), (h)는 실내 실험에서 수행했었던 동일한 방법으로 실험을 실시하기 위해 설정했던 최대 하중을 재하한 이후에 일정 크기의 하중을 다시 한번 재하함으로써 AE hit 발생을 비교해 보는 실험으로 step-7은 step-5와 동일한 크기의 하중을 재하 했을 때이고 step-8은 24 ton 중량의 트럭을 중앙선 위에 재하시켜 도로의 정중앙을 따라 이동시킴으로써 신호 발생율을 취득한 결과이다. 실내 실험을 통해서 예상했던 대로 이미 한번 하중을 받은 경간에 대해서는 다시 하중을 가할 때 primary AE peak의 발생 빈도가 급격히 감소하였으며 unloading시에는 이미 존재하는 균열면의 마찰에 의한 AE 신호 발생이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 특히 이 시기에 나타나는 음향방출은 하중 감소가 시작될 때 보다 오히려 하중이 충분히 감소되어 저점에 도달하는 시기에 오히려 활발한 신호가 나타나고 있었다. 이러한 현상은 하중 부가 후기, 즉 균열면의 마찰거동이 안정화된 시기에 나타나는 신호로써 균열 면간의 마찰신호임을 확인시켜 주는 확실한 증거로 균열이 닫히는 순간 가장 많은 마찰이 발생한다는 사실과 일치함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 음향방출의 기술은 국내 현존하는 수 많은 교량에 대해서 균열의 활동성을 평가할 수 있는 비파괴 검사 방법으로 매우 유용하게 활용할 수 있는 기초가 될 것이다.

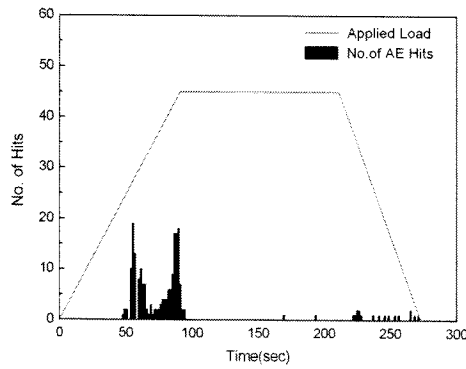
Fig. 4-16은 span-1에서 센서의 위치에 따른 하중과 AE hit 발생빈도를 분석한 결과이며 CH.2는 span-1의 G1 거더에 부착한 센서이며 CH.1과 CH.3은 단부에 위치한 센서이다. 트럭하중은 쌍차 방향(span-5 → span-1)으로 진행하면서 약 1분에 걸쳐 진입했으며 경간의 정 중앙에서 1분 동안 휴지기(holding time)를 가졌으며 역시 1분에 걸쳐 진출하며 각 단계의 AE hit 신호를 취득하여 분석하였다.



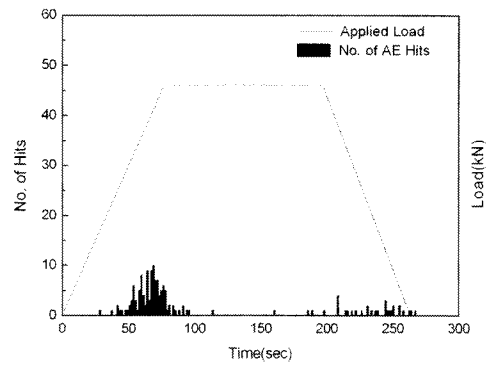
(a) Step-1(9L)



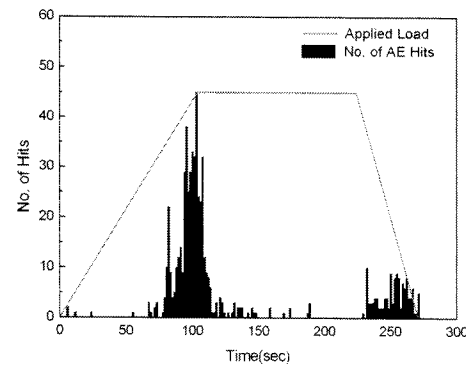
(b) Step-2 (24L)



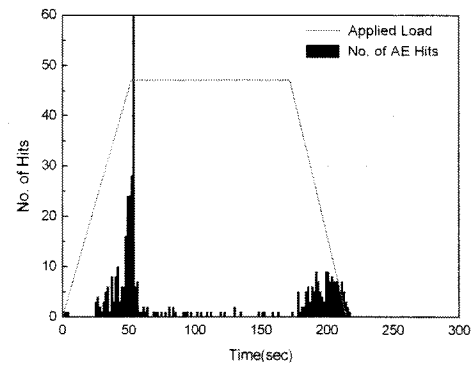
(c) Step-3 (9R)



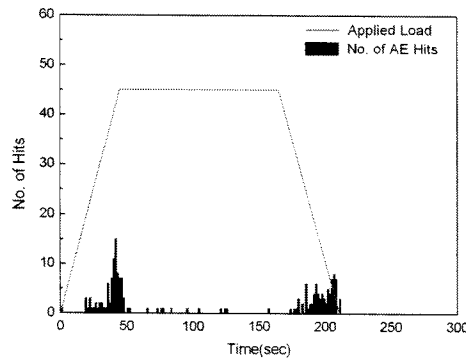
(d) Step-4 (24L9R)



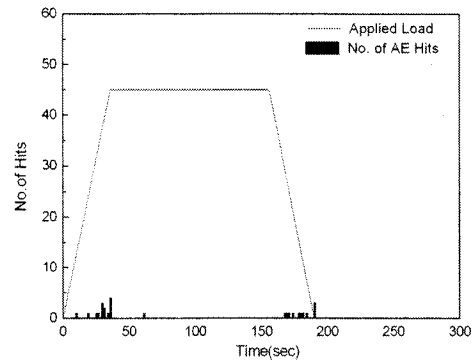
(e) Step-5 (24R)



(f) Step-6 (9L24R)

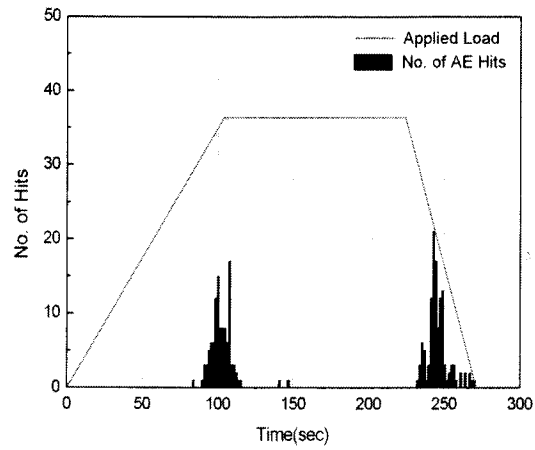


(g) Step-7 (24R-1)

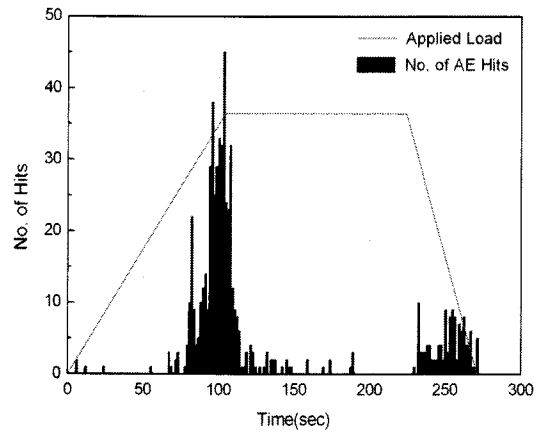


(h) Step-8 (24C)

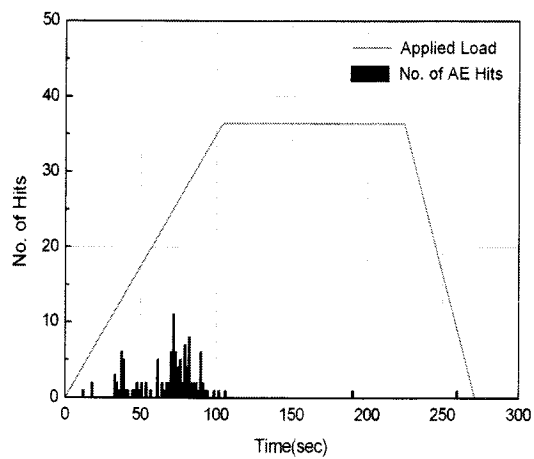
Fig. 4-15 AE hit occurrence pattern of each step (span-1)



(a) CH.1



(b) CH.2



(c) CH.3

Fig. 4-16 Comparison of AE hit occurrence depending of sensor location
(span-1, stage-5)

CH.3 방향에서 트럭이 진입함에 따라 가장 먼저 CH.3에서 미세균열 및 인장균열의 생성과 함께 AE 신호 발생을 보였으며 트럭이 정 중앙에 가까워지면서 CH.2에서도 AE 신호의 발생을 보였다. 이때 CH.2 센서가 부착된 중앙에서 휴지기를 가지기 위해 정지함으로써 하중재하 정점에 도달하는 시점에서 가장 많은 AE 신호가 나타났으며 holding time에서는 예측했던 대로 신호가 거의 나타나지 않았다. 이후 1분의 휴지기를 거쳐 CH.1 쪽으로 트럭이 이동함으로써 CH.3의 위치와는 거리가 멀어짐으로써 센서가 주파수를 취득하는 전파거리를 벗어남으로써 CH.3에서는 신호가 거의 나타나지 않았고 CH.2와 CH.1에서는 저점 부근에 AE hit 신호 발생이 두드러지는 경향을 보였으며 이는 열렸던 균열이 다시 닫히면서 균열면간의 마찰에 의한 신호발생이라는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4-17~Fig. 4-20은 span-1에서 step-3의 AE 신호를 duration과 amplitude의 cross plot으로 나타낸 그림이다. step-3에서는 하중을 제거할 때에 비해 하중을 인가할 때 많은 AE 신호를 나타냈으며 그 신호의 길이와 크기가 모두 큰 것으로 보아 큰 신호가 들어온 것을 알 수 있었고 step-5의 경우에도 역시 여전히 하중을 재하할 때가 큰 신호들이 많았다. 이에 반해 step-7은 step-5의 하중을 reload 시킨 경우로 전체적인 신호 발생율이 적었으며 이는 앞에서 언급한 hit분석의 결과를 다시 한 번 입증하는 결과였다. 또한 step-8에서의 적은 신호는 재하 하중의 크기와 관련이 있는 것으로 보인다.

Fig. 4-21과 Fig. 4-22는 각각 step-3과 step-5에서의 AE 신호를 amplitude와 AE energy의 관계를 cross plot으로 나타낸 그림이다. 이는 앞서 언급한 duration과 amplitude의 cross plot와 비슷한 양상을 보임으로써 실내실험에서 언급했던 것과 마찬가지로 AE 신호를 분석하는데 있어 여러 가지의 AE parameter로도 분석이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4-23은 하중의 직접적인 측정이 불가능한 현장 실험에서 교량의 역학적 거동을 가장 잘 반영할 수 있는 변형률계(strain gauge)를 부착하여 얻은 strain data를 나타낸 대표적인 그림이다. 이는 실험 전 추측했던 것과 거의 일치되는 결과를 보여주고 있다. 콘크리트 교량의 건전성을 평가하는데 있어 가해진 하중에 대한 음향방출 거동을 분석하는 것이 가장 기본이 되며 이렇게 취득된 하중신호는 AE parameter로써 매우 중요한 자료가 될 것이다.

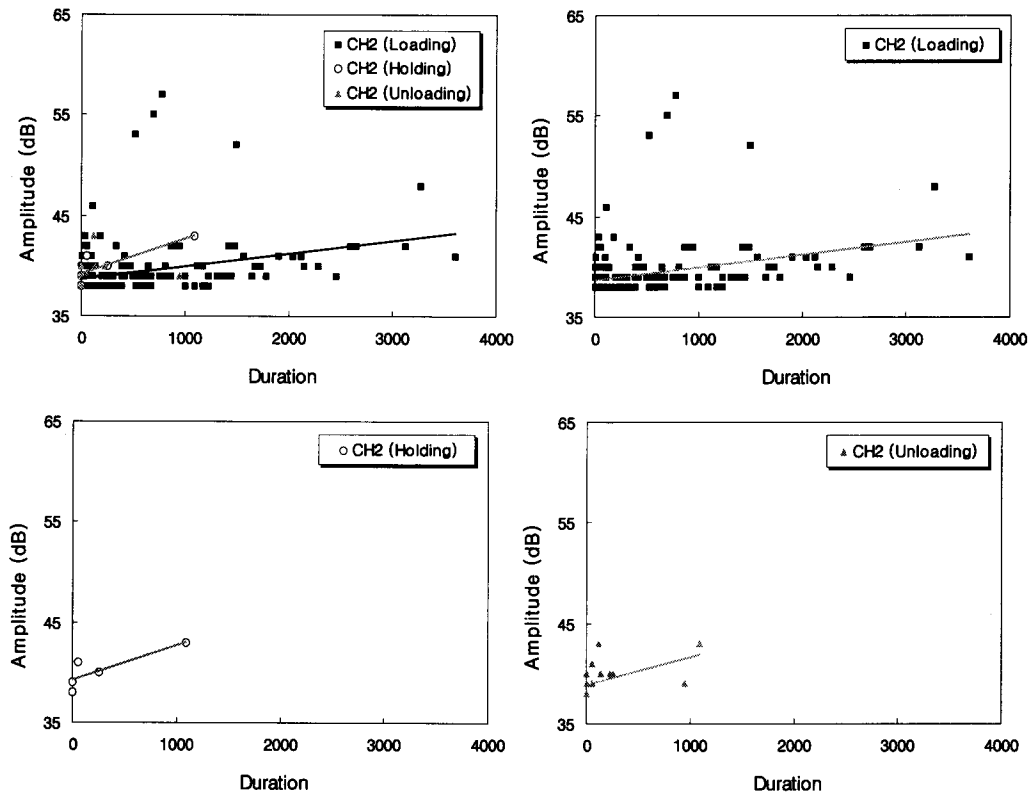


Fig. 4-17 Cross plot of duration vs. amplitude (step-3 / 9R)

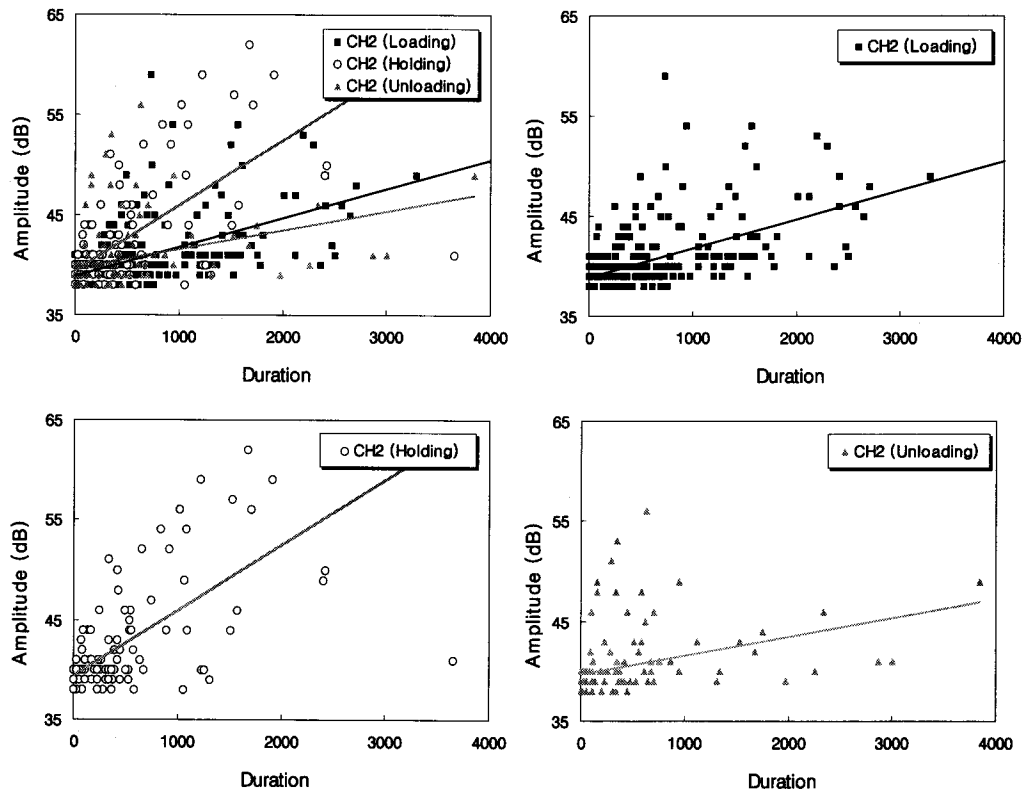


Fig. 4-18 Cross plot of duration vs. amplitude (step-5 / 24R)

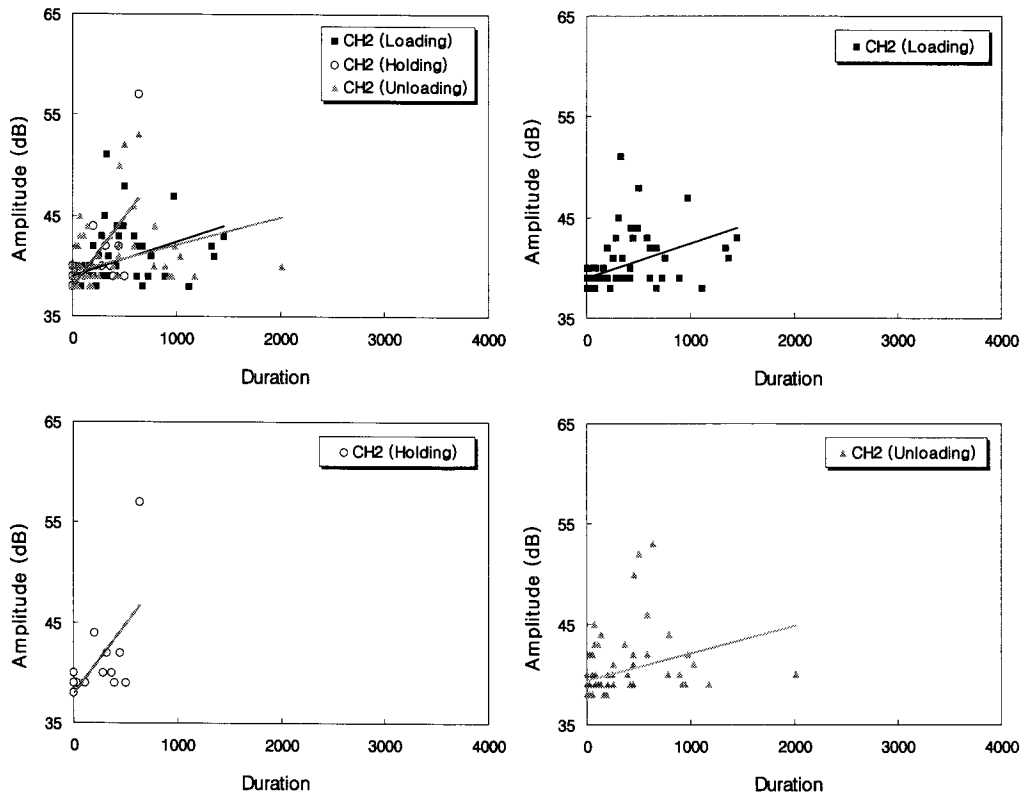


Fig. 4-19 Cross plot of duration vs. amplitude (step-7 / 24R-1)

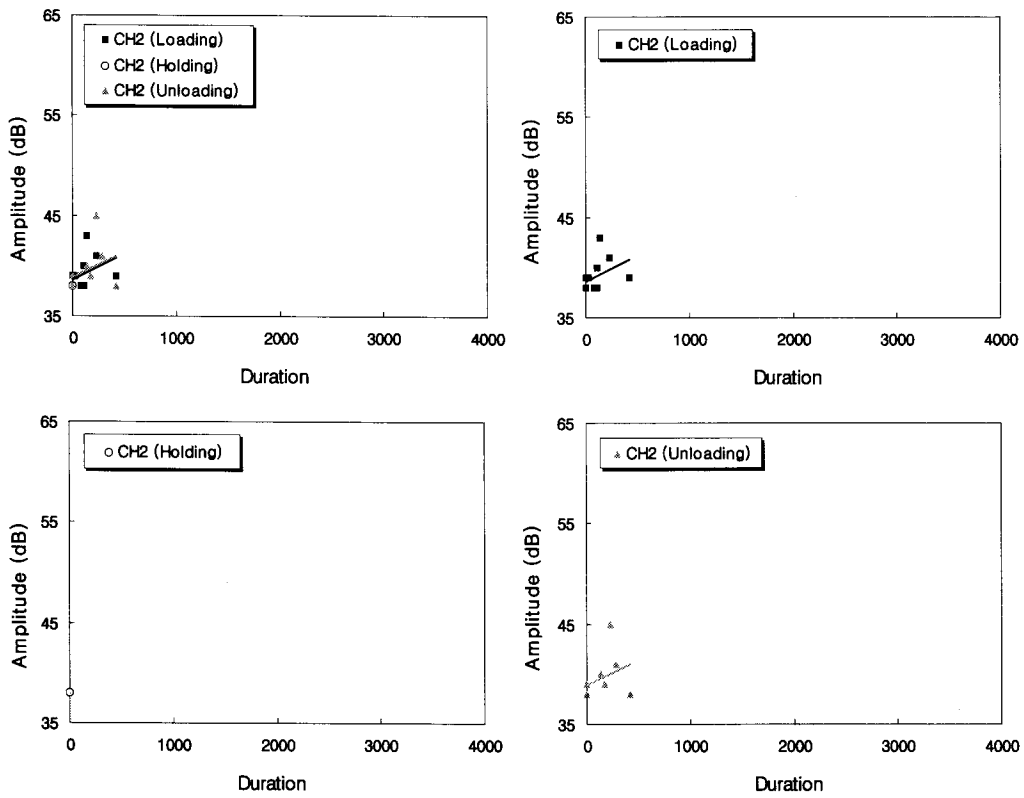


Fig. 4-20 Cross plot of duration vs. amplitude (step-8 / 24C)

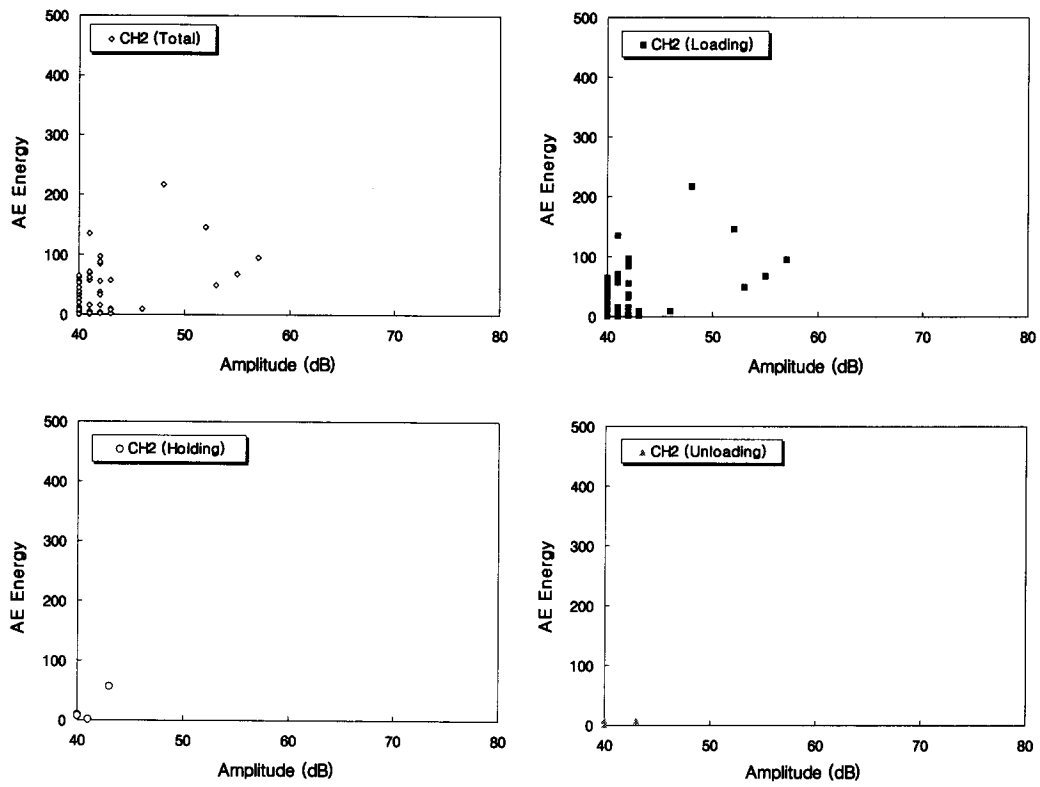


Fig. 4-21 Cross plot of AE energy vs. amplitude (step-3 / 9R)

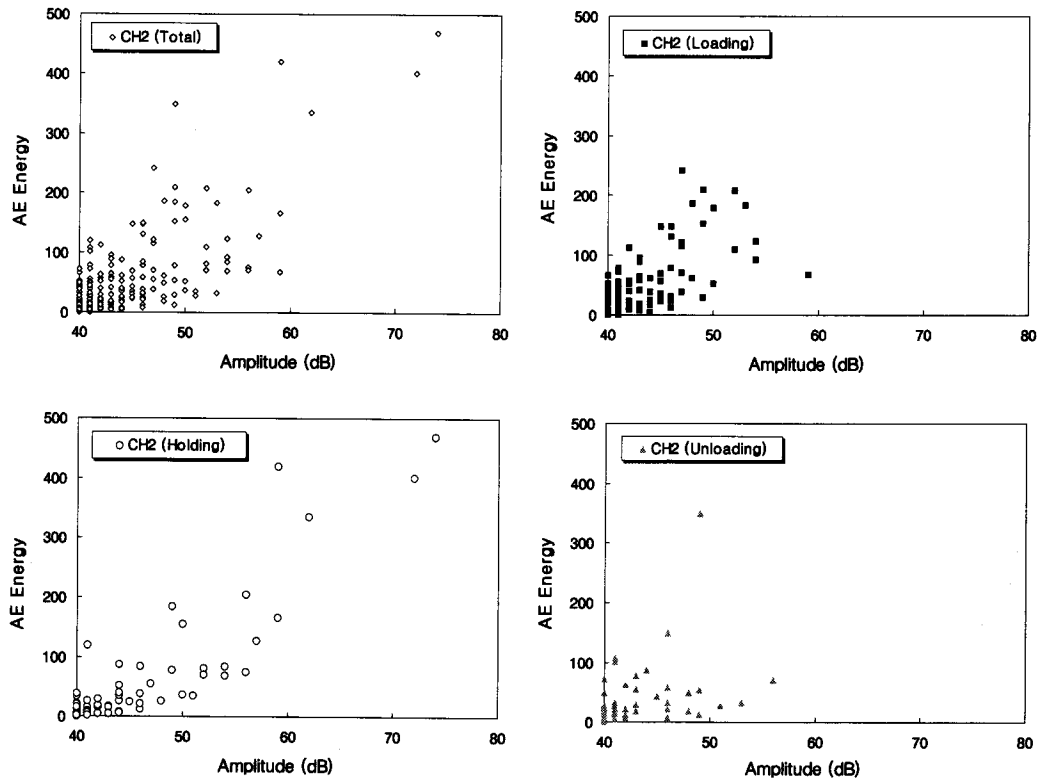
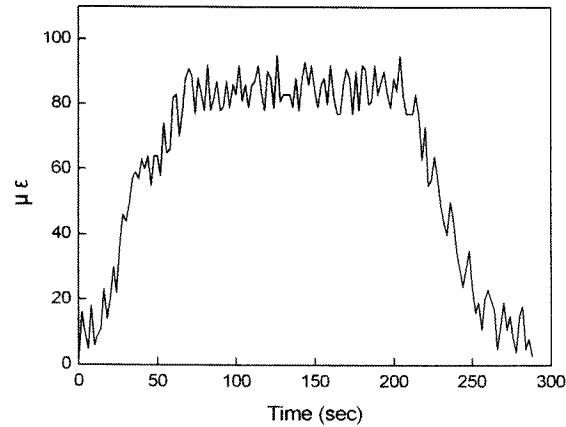
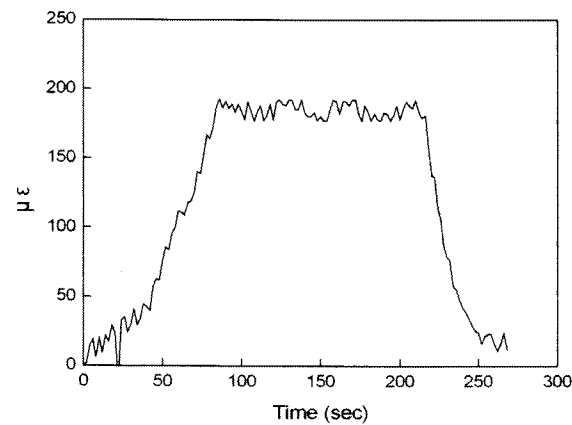


Fig. 4-22 Cross plot of AE energy vs. amplitude (step-5 / 24R)



(a) step-3 (9R)



(b) step-5 (24R)

Fig. 4-23 Strain measurement for each step

Fig. 4-24는 하중변화에 따른 각 step의 AE hit ratio를 비교한 그림이다. loading시 stage level-3과 stage level-5에서 급격한 증가 양상을 보인 것은 앞서 hit 분석에서 언급했던 대로 step-3의 AE hit 수가 step-4의 AE hit 수보다 현저히 많이 나타남으로써 step-4의 하중의 크기가 step-3의 하중의 크기와 크게 차이가 나지 않음을 유추하였는데 역시 같은 결과를 보여주고 있었다.

Fig. 4-25는 하중의 변화에 따른 각 step의 AE hit ratio를 나타낸 그림이다. stage level-1부터 stage level-5까지는 정상적인 하중 step을 거친 단계들의 비교를 나타낸 것이며 stage level-6은 reload 단계를 거친 step-7과 step-8의 ratio를 나타낸 것이다. Loading시 stage level-3과 stage level-5에서 1보다 작은 값을 나타낸 것 역시 앞서 설명한 것과 같이 step-3에서의 AE hit 수가 step-4의 AE hit

수보다 오히려 많이 나타났기 때문에 1을 넘지 않았다. Holding시 stage level-1, 2에서 값이 표시되지 않은 것은 step-2의 holding시 hit수가 0이기 때문에 표시되지 않았다. Unloading시 stage level-1 역시 값이 표시되지 않은 것은 step-1의 hit수가 0이었기 때문에 표시되지 않았다.

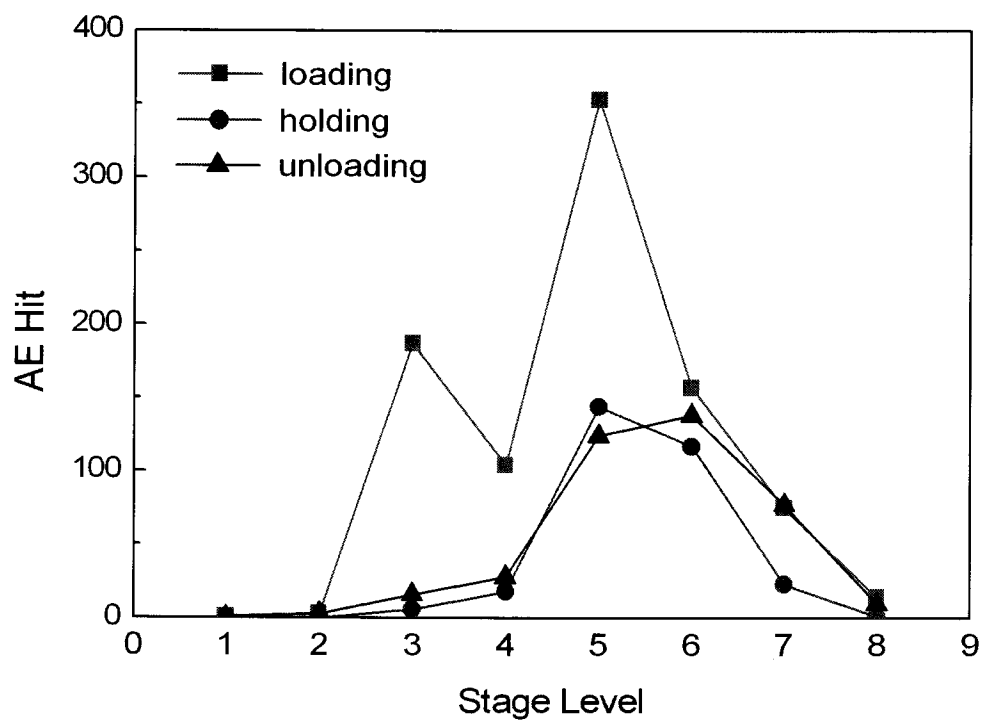


Fig. 4-24 Comparison AE hit at each stage depending on load change

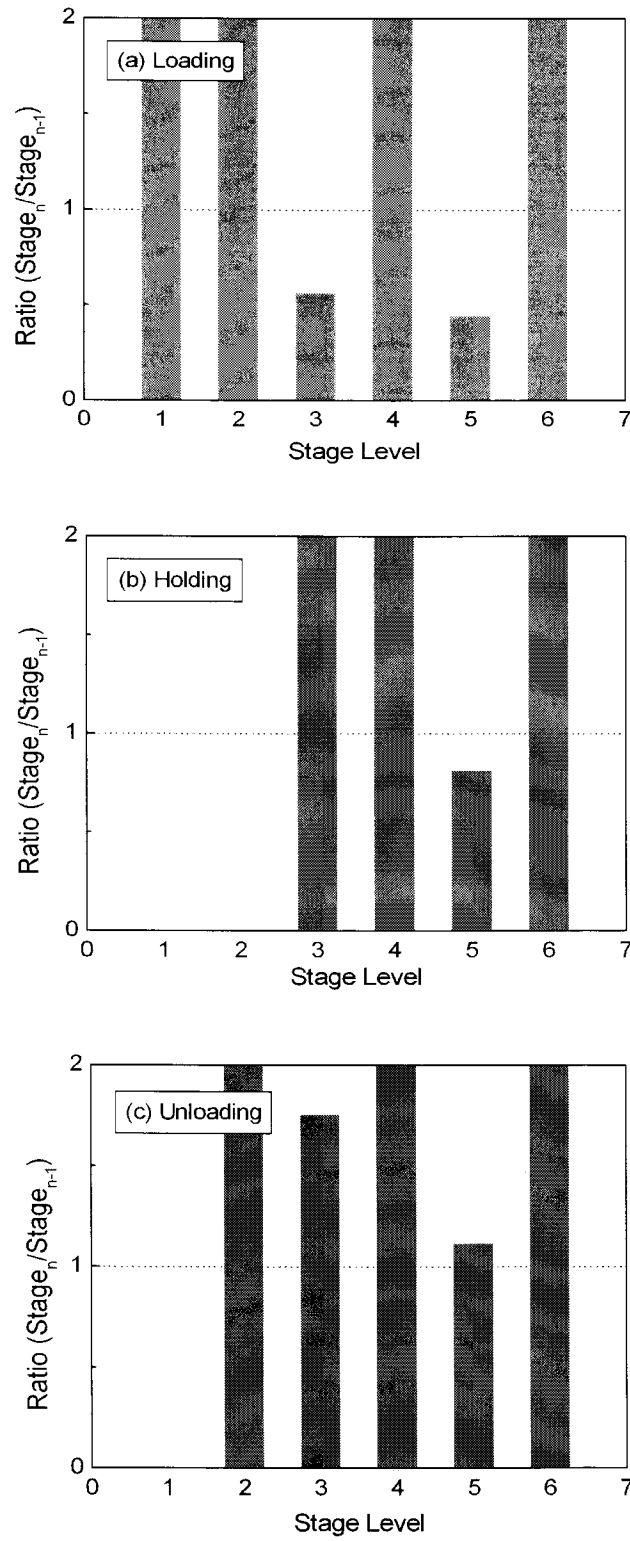


Fig. 4-25 AE hit ratio at each stage depending on load change

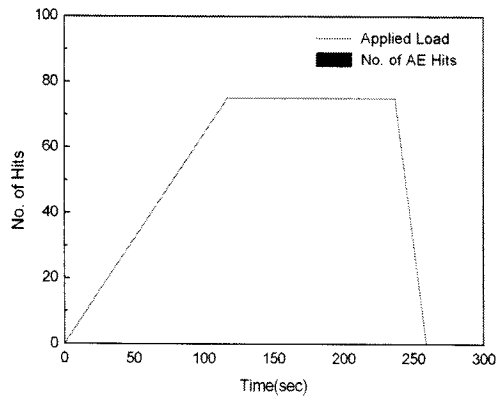
(4) Span-4 결과 분석

Span-4 역시 span-1과 동일한 하중조합으로 실험을 실시했으며 경간의 중앙에 위치한 CH.2에서 나타난 하중과 AE 신호 발생율의 결과를 Fig. 4-26에 나타내었으며 전반적으로 span-1에서와 비슷한 경향을 보였다.

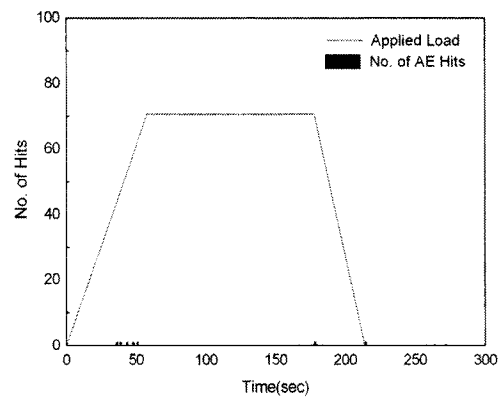
step-1과 step-2에서 AE 신호발생이 거의 없는 것으로 보아 1, 2단계에서의 하중조합으로는 span-4에 미치는 영향이 매우 적은 것으로 보이며 step-3에서 AE 신호발생 빈도가 크게 증가한 것으로 보아 이전에 받았던 하중보다는 큰 하중을 받은 것으로 보이며 step-4에서 다시 신호 발생율이 매우 적은 것으로 보아 이는 직전에 받았던 step-3의 하중의 크기와 비슷하거나 약간 큰 하중이 지나간 것으로 추정되며 이는 하중의 loading 단계에서 신호가 급격히 감소한 것으로 입증 할 수 있었다. 또한 step-3단계에서 secondary AE peak가 크게 나온 것으로 보아 loading 단계에서 균열이 생긴 이후에 그 균열 마찰에 의해서 다소 높은 신호 발생율을 보였으나 step-4단계에서 unloading 단계에서 신호가 거의 나타나지 않음으로써 벌어진 균열면간의 마찰에 영향을 미칠 만큼의 하중의 크기가 가해지지 않아 신호가 거의 나타나지 않았으며 휨 균열 성장이 멈추고 마찰면의 거칠기가 완화되면서 일정 수준의 신호발생 빈도를 나타내는 것으로 추정된다.

다시 step-5의 loading단계에서 AE 신호가 두드러지게 나타나는 것으로 보아 step-3에서 받은 하중보다는 큰 하중이 가해진 것으로 사료된다. 역시 step-6에서도 step-4와 마찬가지로 직전에 받은 step-5와 비슷한 하중이 가해졌던 것으로 추정된다. 특히 step-3단계에서의 loading 단계에서 AE hit가 두 부분으로 나뉘어 분리되어 나타나는 현상은 차량이 진입하여 holding time을 가지기 위해 정지하는 시점에서 트럭의 바퀴에 따른 영향으로 경간의 정 중앙에 트럭의 뒷부분에 위치한 2개의 바퀴 중 앞쪽 바퀴에 맞춰 정지하기로 했는데 앞부분의 신호는 차량의 앞바퀴가 지나갈 때 나타난 신호이며 뒷부분의 신호는 차량의 뒷바퀴 중 앞쪽 바퀴가 CH.2 위에 위치함으로써 나타난 신호이다.

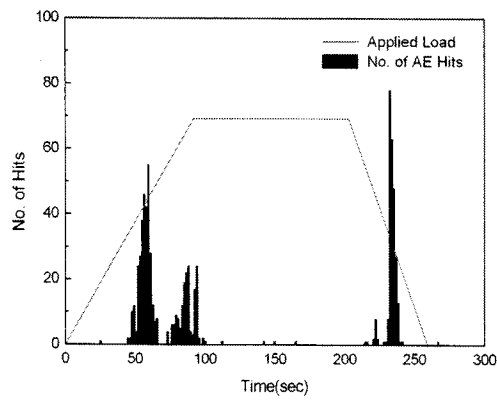
따라서 AE 음향방출 방법으로 균열의 활동성 여부를 판단하여 건전성 평가에 활용할 뿐 만 아니라 그 위치까지 추정할 수 있는 비파괴 검사 방법이라고 할 수 있다.



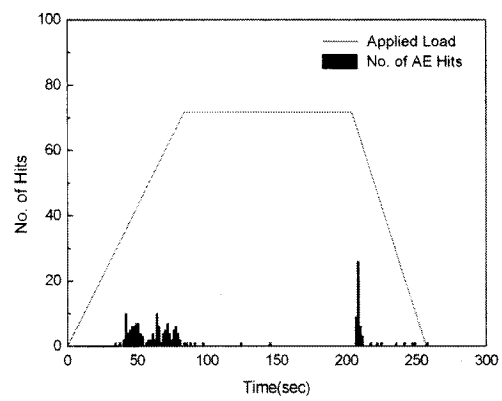
(a) Step-1 (9L)



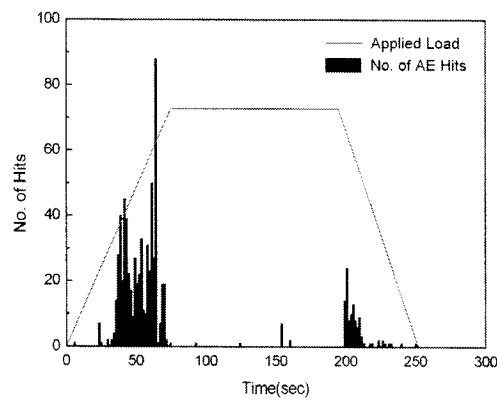
(b) Step-2 (24L)



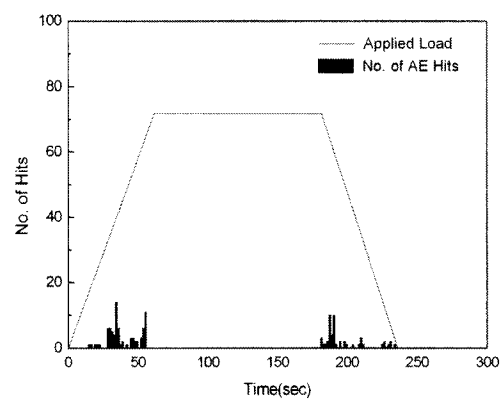
(c) Step-3 (9R)



(d) Step-4 (24L9R)



(e) Step-5 (24R)



(f) Step-6 (9L24R)

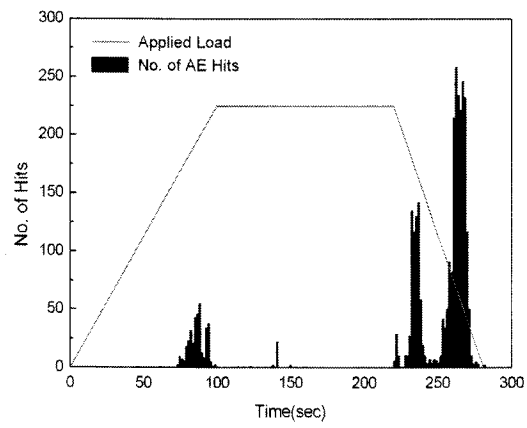
Fig. 4-26 AE hit occurrence pattern of each step (span-4)

Fig. 4-27은 step-3에서 각 센서의 위치별로 CH. 1, 2, 3을 비교한 결과를 나타낸 것으로 span-1과 유사한 경향을 나타내었다.

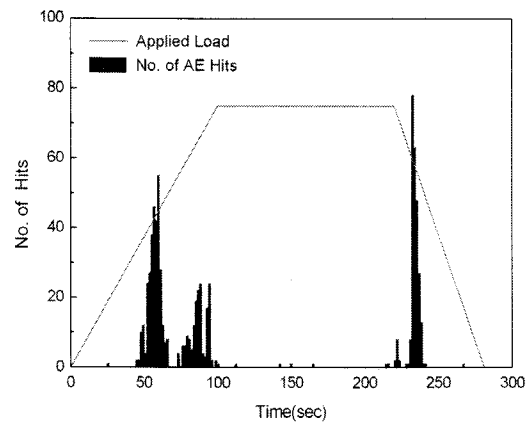
차량이 중앙부분으로 진입하면서 센서의 위치에 따라 CH.3에서 가장 먼저 AE 신호를 나타냈으며 차례로 CH.2, CH.1에서 시간 간격을 두고 AE 신호를 나타내기 시작하였으며 AE 신호를 나타낼 때 두 부분으로 나뉘어 신호가 나타남으로써 span-1에서 설명했던 바와 같이 여기에서도 바퀴의 위치에 따른 영향을 확인할 수 있었다.

Fig. 4-28과 Fig. 4-29는 span-4에서 step-3과 step-5의 duration과 amplitude의 관계를 cross plot로 도시한 그림이다. 두 단계 모두에서 loading 시기인 하중을 인가할 때가 하중을 제거할 때 보다 많은 신호를 나타냈으며 step-5의 하중 인가시기가 step-3의 인가시보다 큰 신호들이 많이 나타났음을 알 수 있었다. 이는 하중의 범위가 커짐에 따른 영향으로 보이며 특이할만한 점은 보이지 않았다.

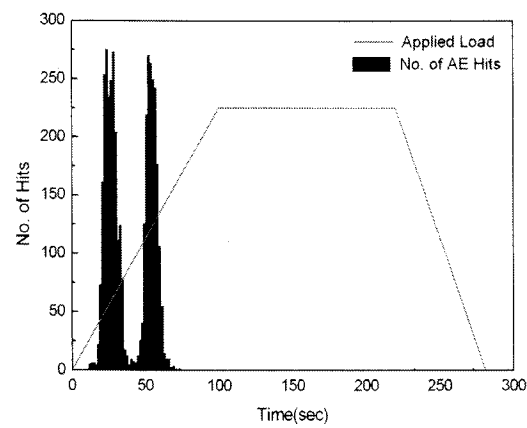
Fig. 4-30과 Fig. 4-31은 각각 step-3과 step-5에서의 AE 신호를 amplitude와 AE energy의 관계를 cross plot으로 나타낸 그림이다. 이것 역시 span-1에서 분석한 것과 같이 duration과 amplitude의 cross plot와 비슷한 양상을 보임으로써 실내 실험에서 언급했던 것과 마찬가지로 AE 신호를 분석하는데 있어 동일한 결과를 얻음으로써 여러 인자들의 AE parameter로도 분석이 가능하다는 것을 알 수 있었다.



(a) CH.1



(b) CH.2



(c) CH.3

Fig. 4-27 Comparison of AE hit occurrence depending of sensor location
(span-4, step-3 / 9R)

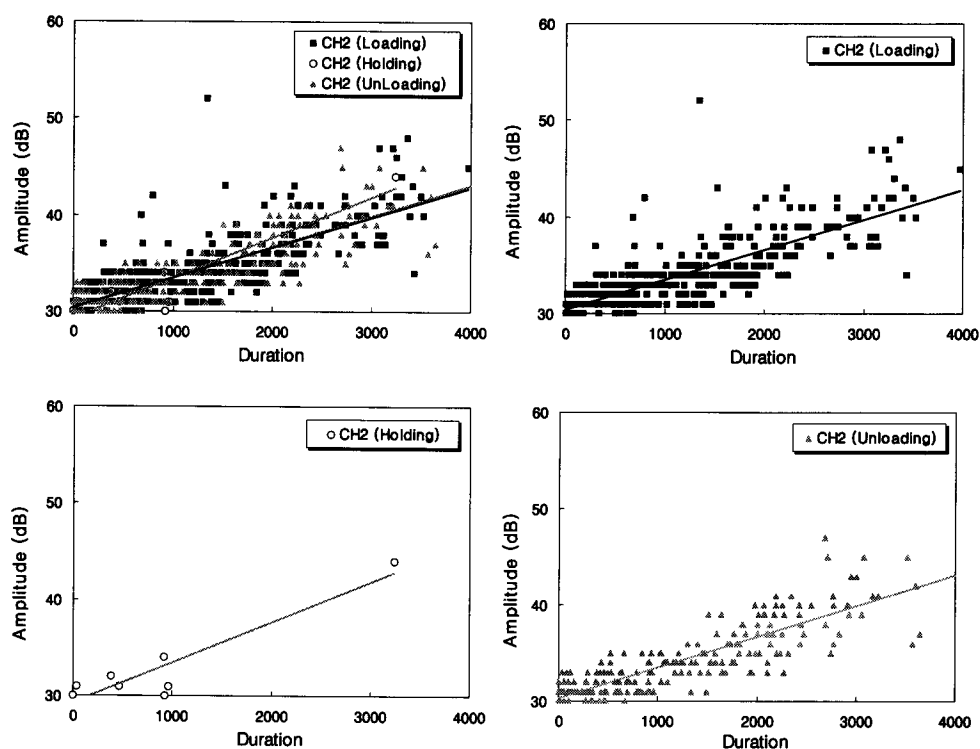


Fig. 4-28 Cross plot of duration vs. amplitude (step-3 / 9R)

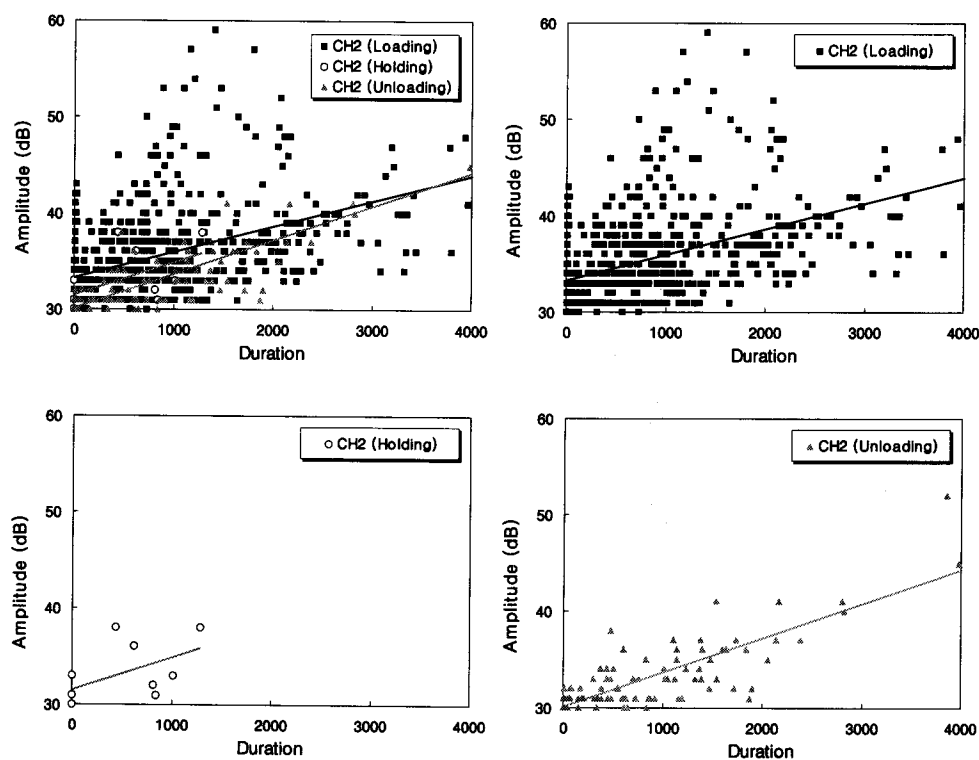


Fig. 4-29 Cross plot of duration vs. amplitude (step-5 / 24R)

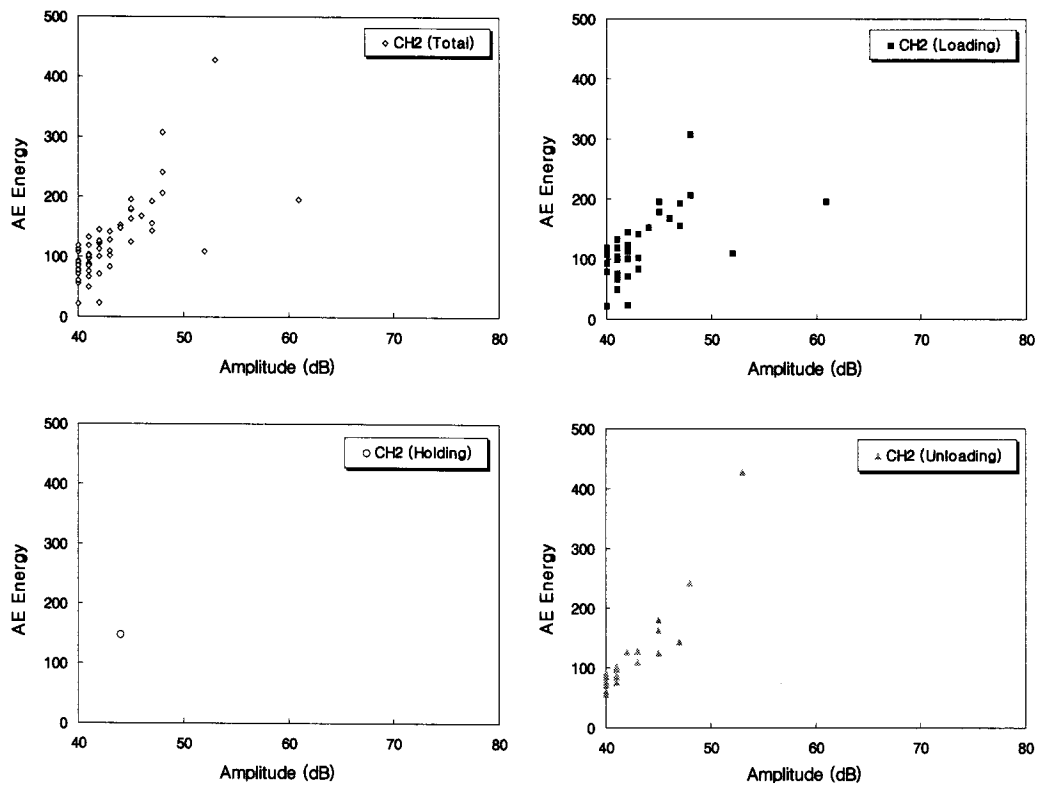


Fig. 4-30 Cross plot of AE energy vs. amplitude (step-3 / 9R)

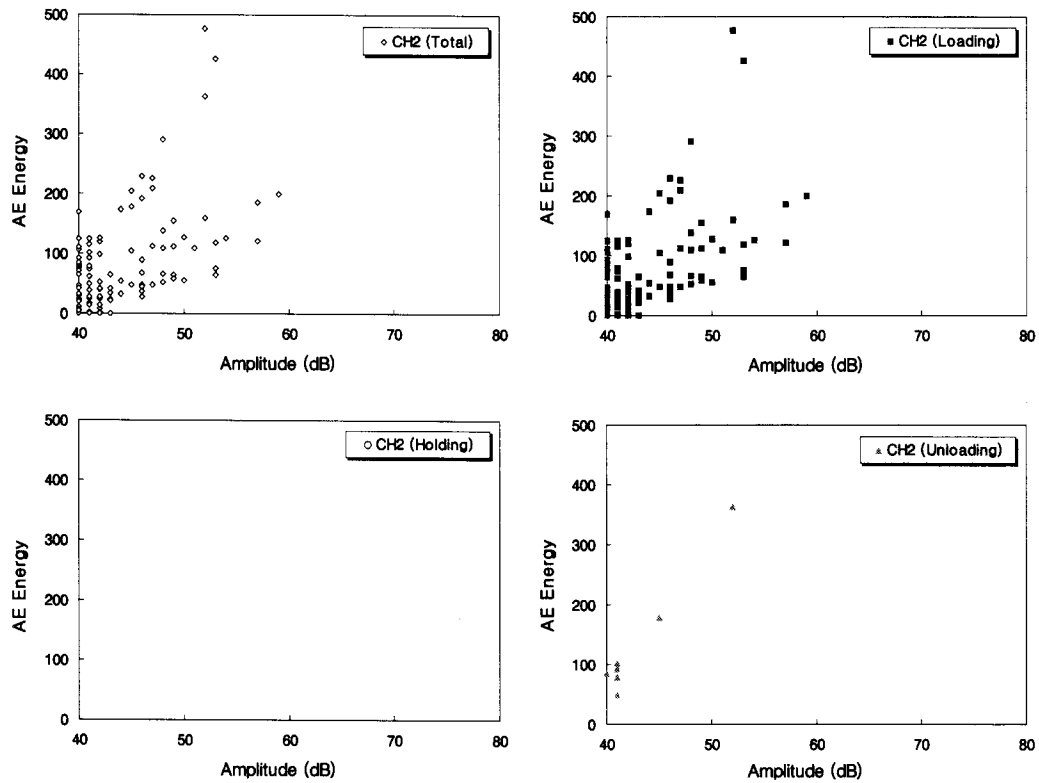


Fig. 4-31 Cross plot of AE energy vs. amplitude (step-5 / 24R)

Fig. 4-32는 하중변화에 따른 각 step의 AE hit ratio를 비교한 그림이다. loading과 unloading시 stage level-3과 stage level-5에서 급격한 증가 양상을 보인 것은 span-1의 ratio 분석에서 언급했던 것과 같이 step-3의 AE hit 수가 step-4의 AE hit 수보다 현저히 많이 나타남으로써 step-4의 하중의 크기가 step-3의 하중의 크기와 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있었다. 일정 크기의 하중을 받은 이후에 다시 크기가 비슷한 하중을 가하였을 경우 AE 신호가 현저히 적게 나옴으로써 하중의 크기 정도를 예측하는데 중요한 자료로 이용될 것이라 사료된다.

Fig. 4-33은 하중의 변화에 따른 각 step의 AE hit ratio를 나타낸 그림이다. Holding과 unloading시 stage level-1에서 값이 표시 되지 않은 것은 step-1의 holding과 unloading에서 AE hit 수가 0을 나타냈기 때문에 나눌 수 없었기 때문에 표시하지 않았다. Loading시 과 unloading시 stage level-3과 stage level-5에서 1보다 작은 값을 나타낸 것 역시 span-1에서 설명한 것과 같이 step-3에서의 AE hit 수가 step-4의 AE hit 수보다 오히려 많이 나타났기 때문에 1을 넘지 않았다.

Fig. 4-34는 교량의 span-4에 부착된 CH.2 센서로부터 수신된 균열발생에 대한 AE 파형을 나타낸 그림이며 loading, unloading시의 주파수 스펙트럼, Fast Fourier Transform(FFT)의 결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 수신된 신호들은 대체로 공진 특성을 나타내며 30 kHz 근방의 성분을 가지는 주파수 특성을 보였으며 신호발생원으로 거리가 멀어 실내실험에 비해 감쇠가 심하게 일어난 것을 알 수 있었다.

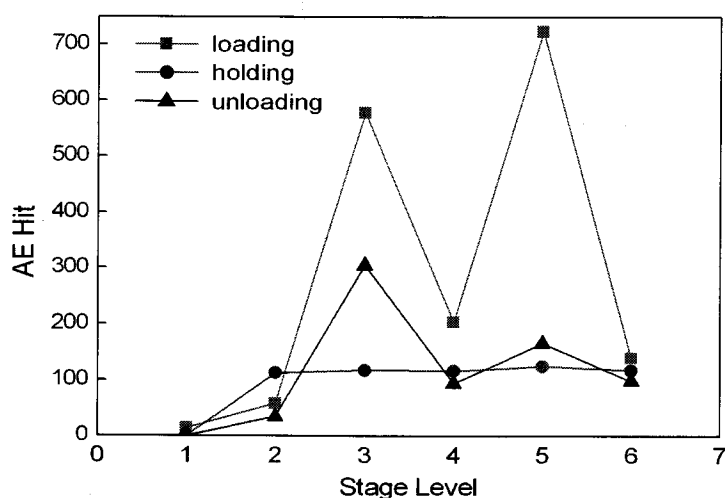


Fig. 4-32 Comparison AE hit at each stage depending on load change

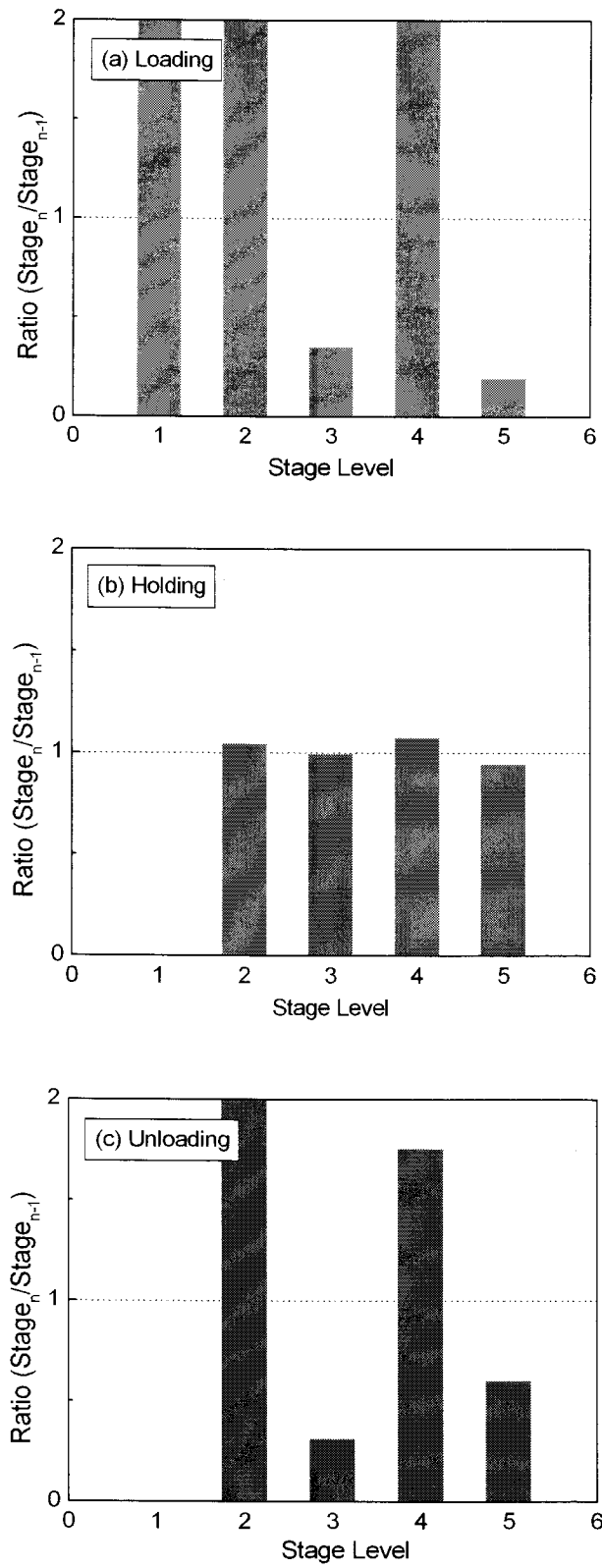
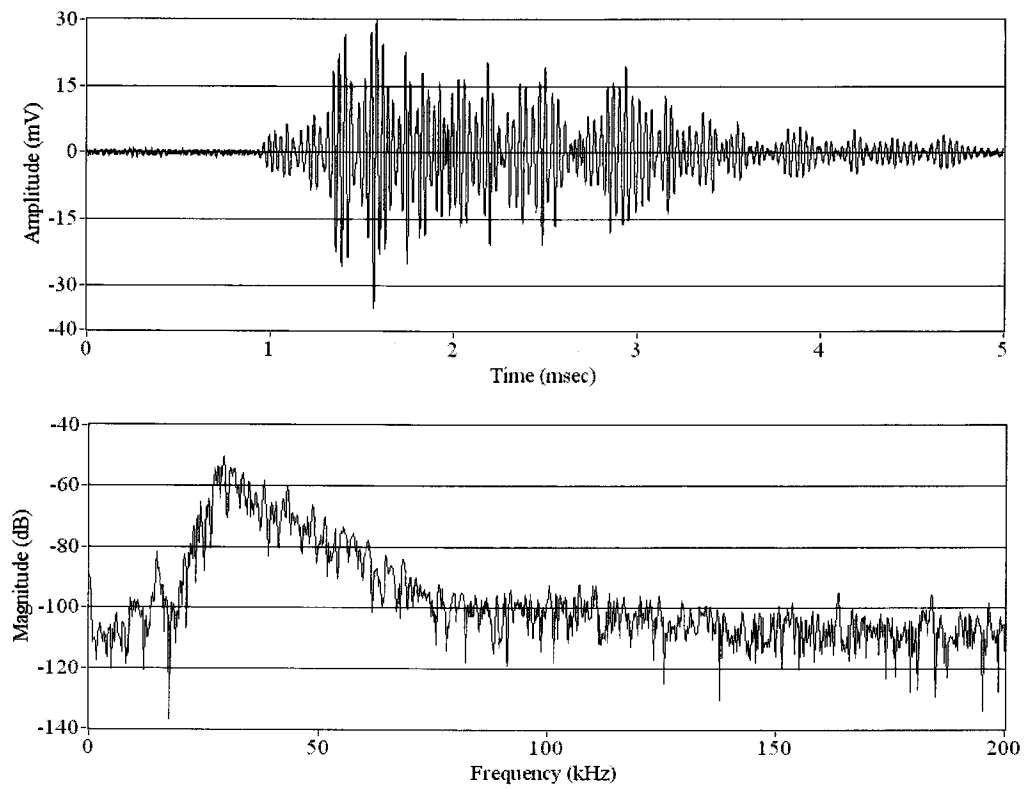
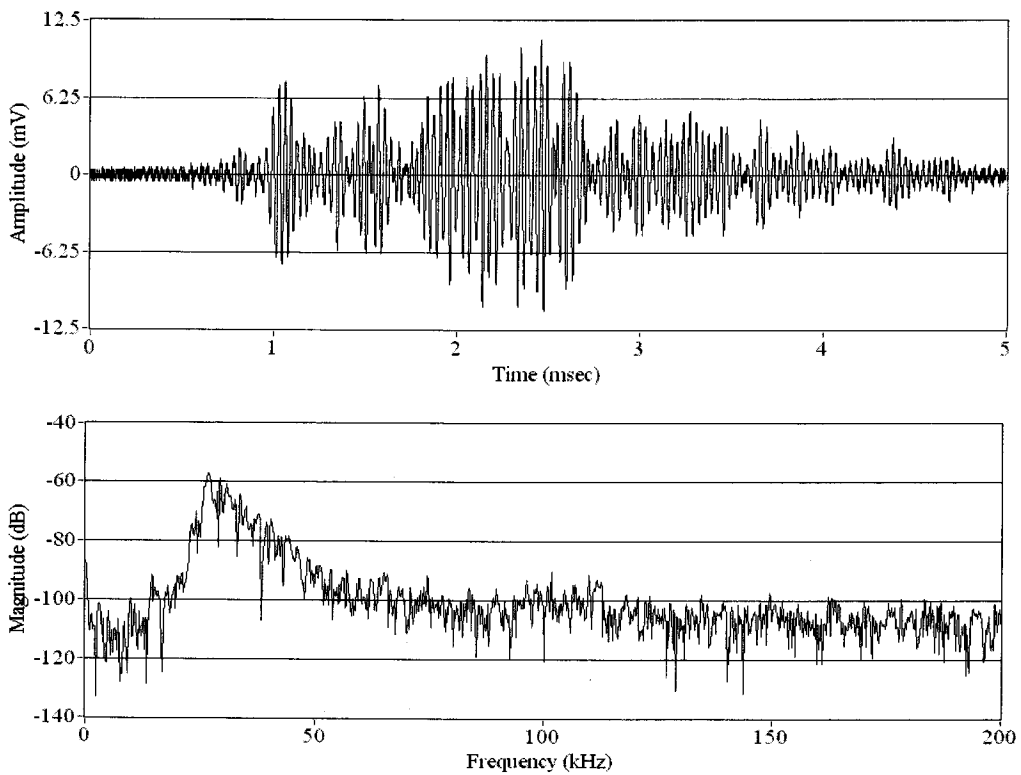


Fig. 4-33 AE hit ratio at each stage depending on load change



(a) loading (span-1 / step-3)



(b) unloading (span-1 / step-3)

Fig. 4-34 Typical AE waveform & spectrum(FFT) for each loading condition

다. 표면파를 이용한 비파괴검사

쌍계교에 있는 손상에 대해서 표면파 실험을 통해 균열 깊이를 측정하였다. 쌍계교의 거더에는 육안으로 쉽게 확인되는 주균열이 무수히 분포되어 있어, 본 연구 과제에서는 보재 부재인 슬래브의 균열을 평가하고자 한다. 슬래브에 있는 균열은 외관 검사를 통해 파악이 불가능하여, 본 연구 과제와 같은 비파괴검사로만 평가가 가능하다. 콘크리트 슬래브에 존재하는 균열을 찾고, 다음 그림과 같이 표면파를 측정하였다.



Fig. 4-35 Surface wave transmission experiment for Ssanggye bridge

콘크리트의 표면파는 그림과 같이 강구를 이용하여 충격 가진으로 발생시켰고, 본 연구 과제에서 구성한 프로토타입 시스템을 이용하여 표면파를 측정하였다. 가속도계를 이용하여 측정한 표면파는 1 MHz의 샘플링 속도로 저장하였다. 다음 그

림은 손상이 없는 콘크리트 슬래브와 균열이 있는 슬래브에서 측정된 표면파의 파형이다. 그림과 같은 표면파 측정을 각각 20 회씩 양방향으로 수행하였고, Fig. 4-37에서 측정된 표면파의 자기 스펙트럼 밀도를 도시하였다.

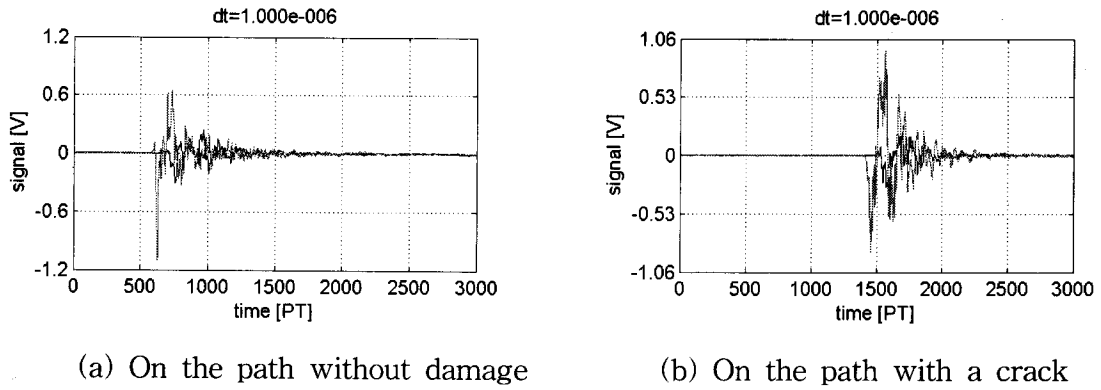


Fig. 4-36 Measured surface waveform on the slab

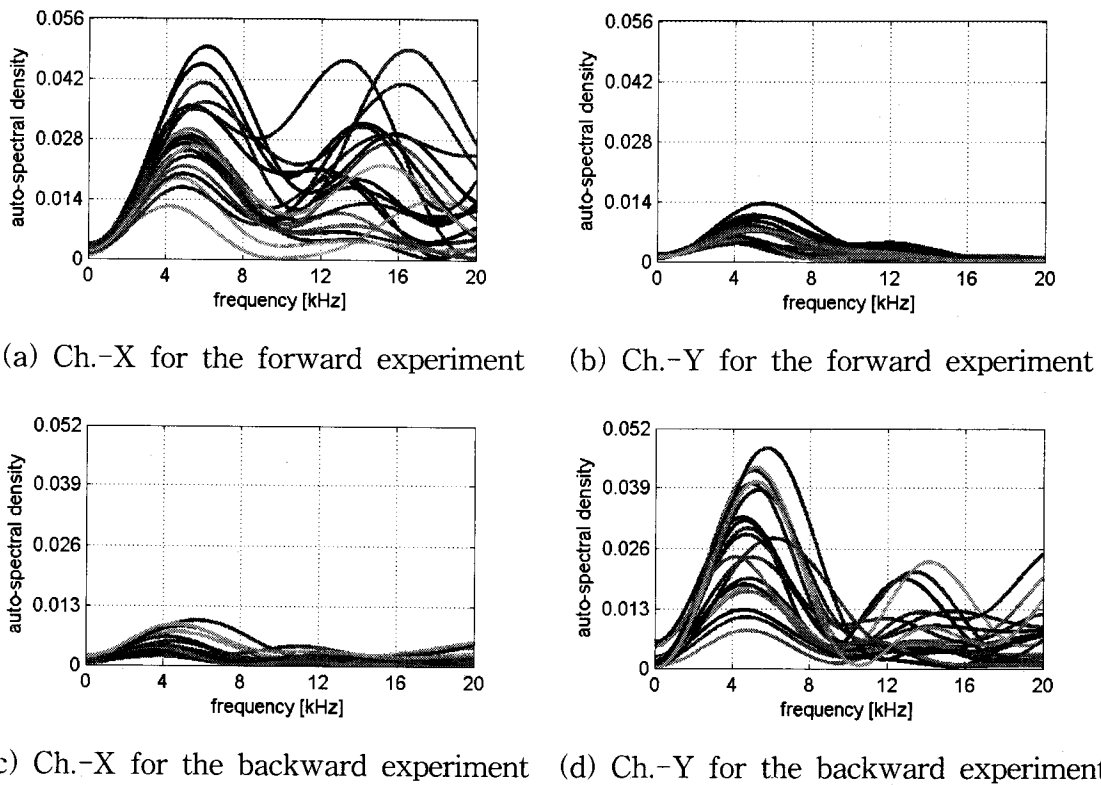


Fig. 4-37 Auto-spectral density on the path without damage

제안된 기법을 이용하여 측정된 표면파를 분석하면 다음의 그림과 같다. 결과는 표면파의 기여 함수와 투과 함수를 주파수 영역에서 도시하였다. 그림에서 직관적으로 확인할 수 있듯이, 균열을 투과한 표면파의 투과 함수는 손상이 없는 슬래브에서의 투과 함수에 비해 감소함을 확인할 수 있다.

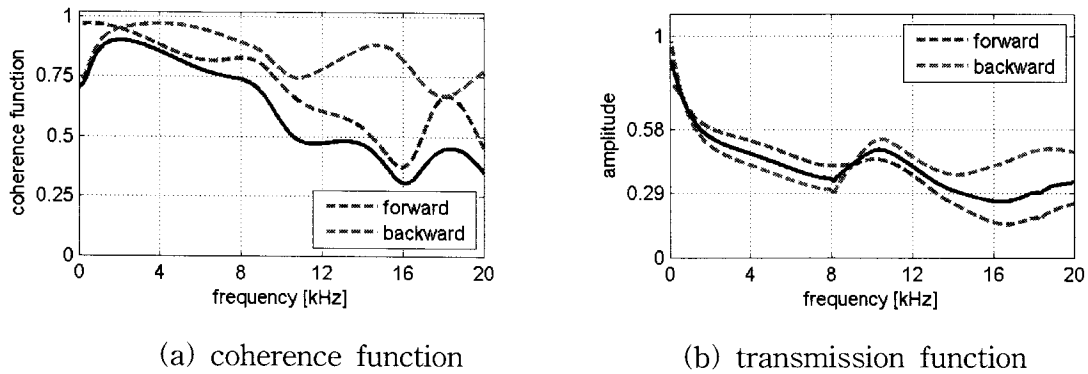


Fig. 4-38 Analysis of surface wave on the path without damage

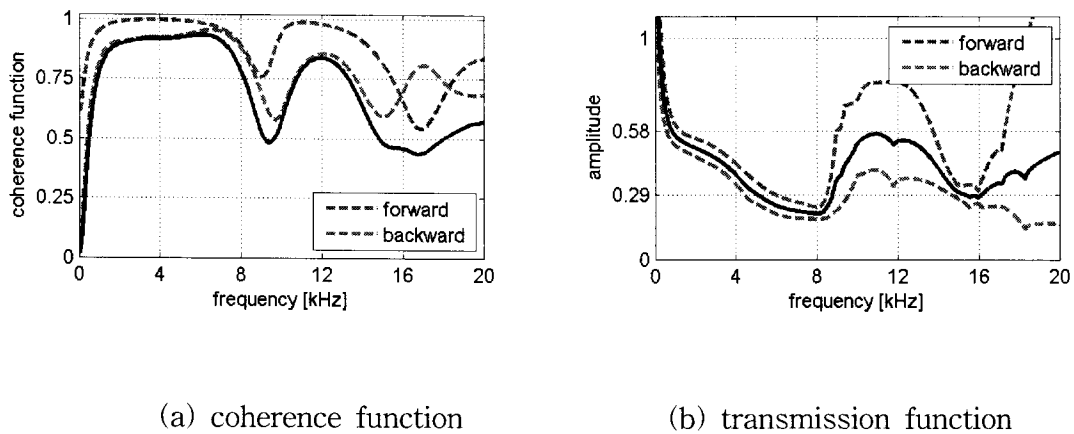


Fig. 4-39 Analysis of surface wave on the path with a damage

손상이 없는 슬래브에서 전달되는 표면파와 균열을 투과하는 표면파의 투과 함수를 비교하기 위해 파장 영역 해석을 수행하면 다음과 같다. 파장 영역에서 기여 함수와 투과 함수의 비율을 계산한 후, 수치해석을 통해 제안한 모델식과 비교하여 균열 깊이를 추정할 수 있다. 각 균열 깊이별 모델식과 투과 함수의 비율의 차이로

정의 되는 오차 함수는 Fig. 4-40(b)와 같으며, 여기서 최적의 모델식은 균열 깊이가 45 mm임을 확인할 수 있다. 측정된 투과 함수와 정규 깊이를 비교하면 마지막 그림과 같이 모델식과 일치함을 알 수 있다.

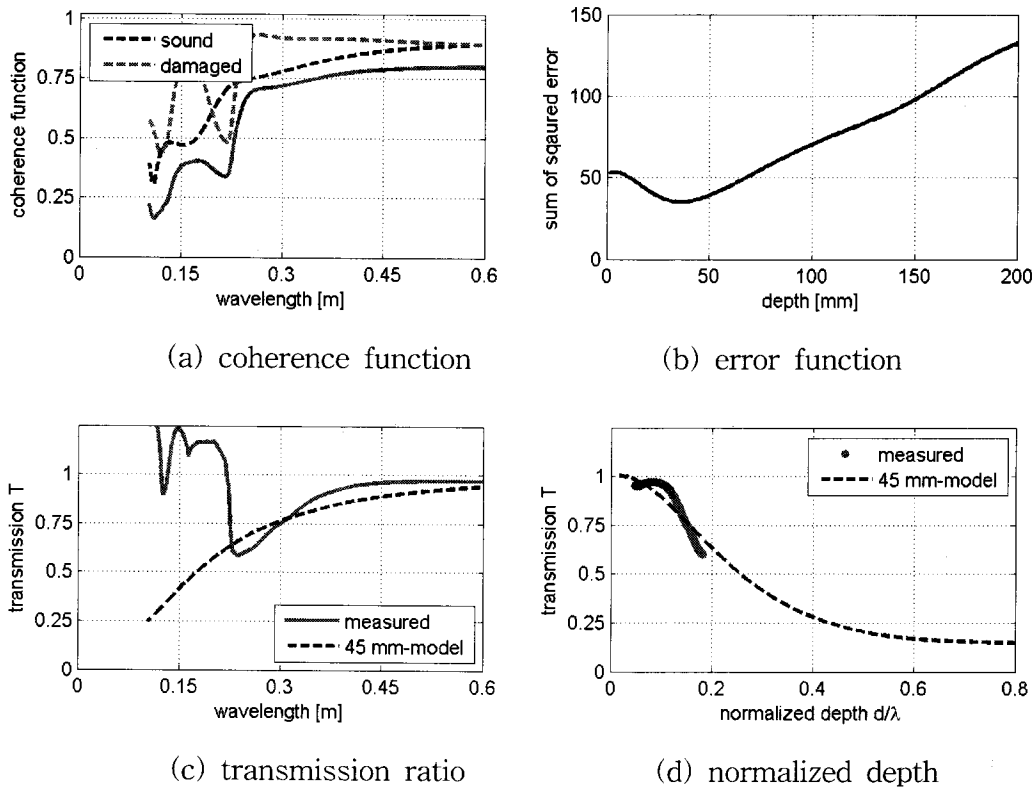


Fig. 4-40 Determination of the crack depth

정리하면, 두께가 180 mm 인 콘크리트 슬래브에 45 mm의 균열이 검출되었다. 이와 같은 균열은 하중의 횡분배를 시켜주기 위한 슬래브의 구조 거동으로 인해 교량의 종방향으로 분포하고 있다. 즉, DB-13.5의 설계 하중으로 건설된 쌍계교는 과적 차량의 통행 등 여러 요인으로 인해, 주 부재인 거더 뿐 만 아니라, 보조 부재인 슬래브에도 심각한 손상이 존재함을 확인하였다. 따라서 본 연구 과제를 통해 제안된 비파괴검사를 통해, 쌍계교는 외관조사에 의한 상태 평가에서 C 등급 (주요 부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태) 보다 심각한 손상을 입었다고 판단된다.

3. 금당교에 대한 비파괴검사

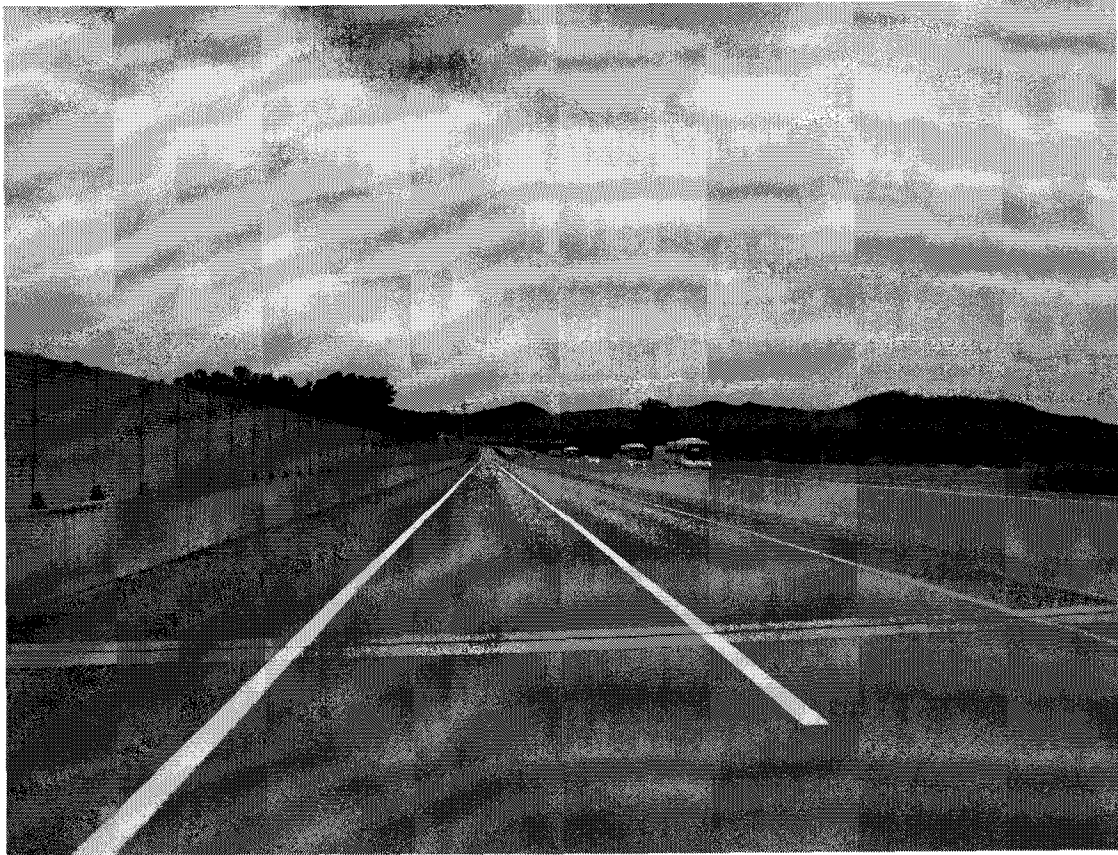
가. 금당교의 제원 및 현재 상태

중부내륙 고속도로에 위치한 금당교는 한국도로공사의 시험도로(KHC test road) 건설을 위해 2002 년 준공되었다. 금당교는 DB-24의 설계하중에 대해, 교폭 11.7 m, 총연장 272 m로 건설되었으며, 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 박스 거더 구간과 I형 거더 구간으로 구성되어있다. 다음 Table 4-3은 금당교 건설에 관한 구체적인 사항을 정리한 것이다.

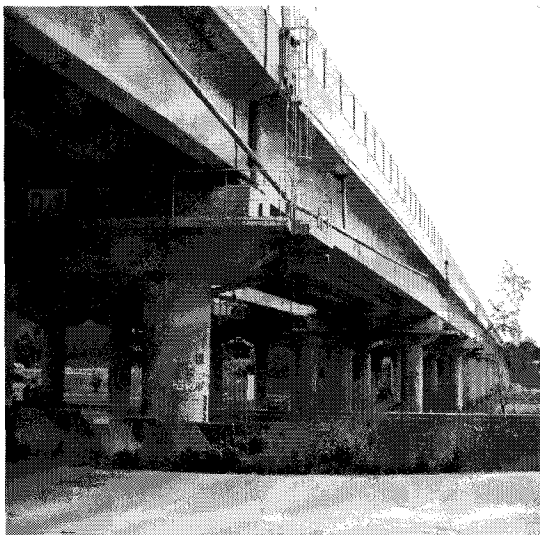
Table 4-3 Specification of Geumdang bridge

구 분	내 용
교 량 명	금당교
위 치	경기도 여주시
설계하중	DB-24
교 폭	11m
연 장	272m
시 행 자	한국도로공사
시 공 자	진흥기업주식회사 금강종합건설주식회사 경림종합건설주식회사
공사기간	2001년 4월 16일 ~ 2002년 10월 5일

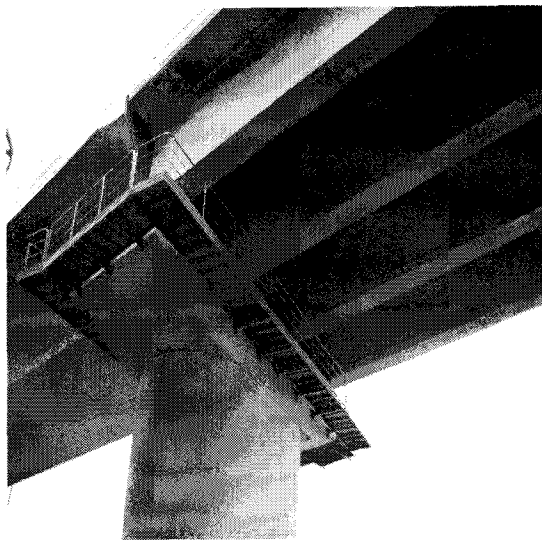
금당교는 고속도로 상에 위치하는 교량으로 갓길을 제외하고 편도 2차선으로 설계되었다. Fig. 4-41과 Fig. 4-42는 금당교의 도로 상태와 상부 및 하부 구조 형태와 금당교 전체 구간의 교량 형식에 대한 개요를 보여주고 있다. 또한 Fig. 4-43은 교량의 형식을 설명하는 그림으로 I형 거더 구간과 박스 거더 구간을 도면에 표시하였고, 양방향 화살표를 이용하여 전체 경간에 대한 지점 배치를 표시하였다.



(a) front view of the bridge

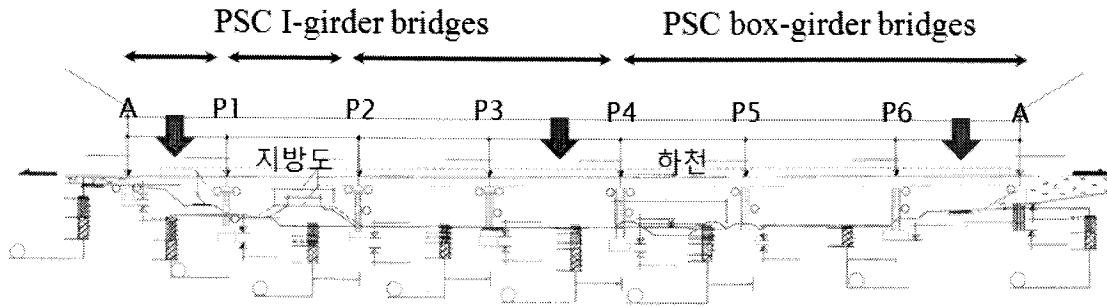


(b) side view of the bridge

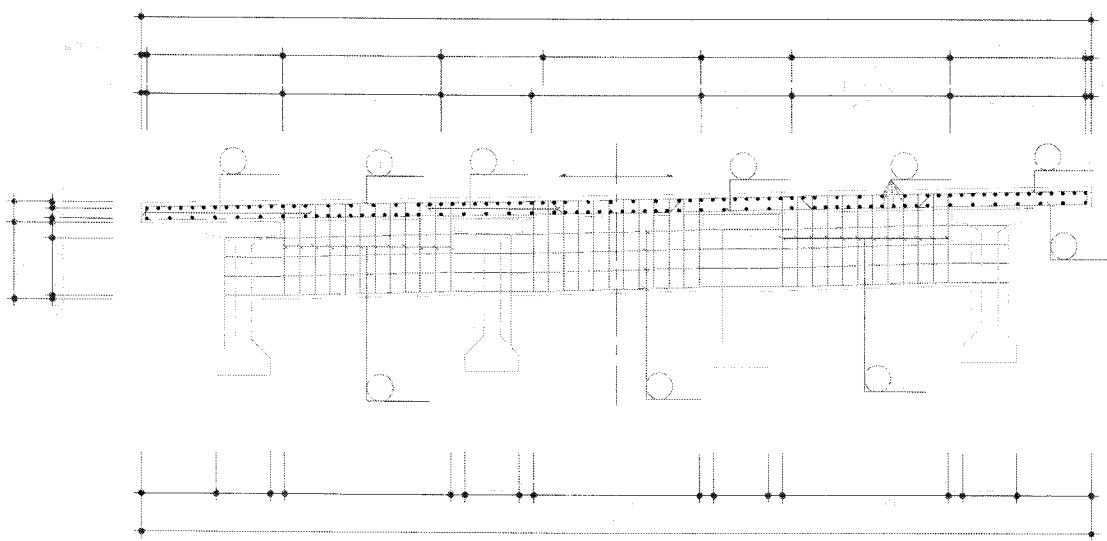


(c) girders of the bridge

Fig. 4-41 Overview of Geumdang bridge



(a) Structural types of the bridge



(b) Structural drawing of the bridge

Fig. 4-42 Structural overview of Geumdang bridge

나. 음향방출을 이용한 비파괴검사

(1) 시험조건 및 시험하중

Fig. 4-43은 금당교에서 AE 음향방출 시험을 실시하기 위한 경간을 표시한 그림이며 Fig. 4-44는 센서의 부착 위치를 측면에서 표시한 그림이다. Fig. 4-45와 Fig. 4-46에서 보는바와 같이 실험경간에 점검통로가 설치되어 있지 않아 구조작업차를 이용하여 표면 그라인더, 센서부착, 케이블링, pencil break test 등의 작업을 실시하였다. Fig. 4-47과 Fig. 4-48은 교량의 거더에 부착된 센서의 모습을 나타낸 사

진이다. 금당교 역시 실내실험에서 사용했던 동일한 장비로 실험을 실시하였으며 threshold는 background noise level을 고려하여 29 dB로 설정하여 실험을 실시하였다. Fig. 4-49~Fig. 4-52는 실제 하중재하 모습을 나타내는 대표적인 그림이며 Table 4.4와 같이 6종류의 하중 조합으로 재하하였다.

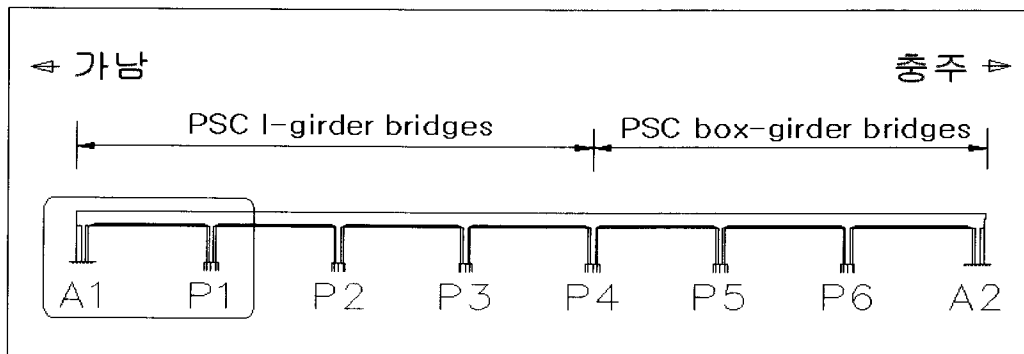


Fig. 4-43 Span location of the bridge

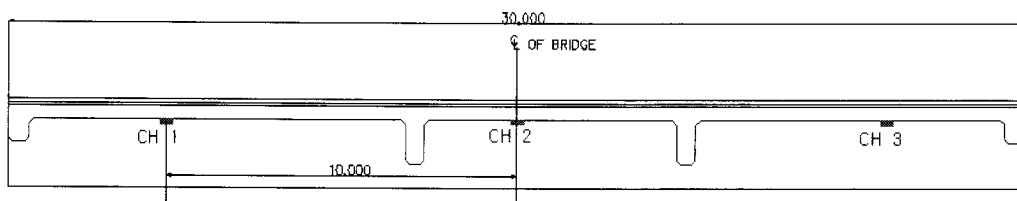


Fig. 4-44 Sensor location at side view



Fig. 4-45 Sensor attaching work



Fig. 4-46 Sensor attaching work



Fig. 4-47 Attached sensor

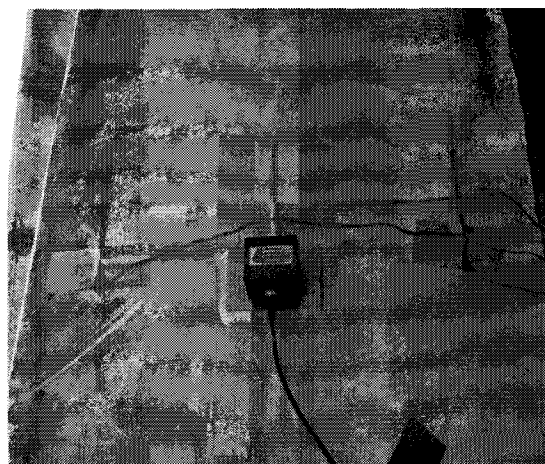


Fig. 4-48 Attached sensor



Fig. 4-49 Step-1 (24C)



Fig. 4-50 Step-3 (24R)

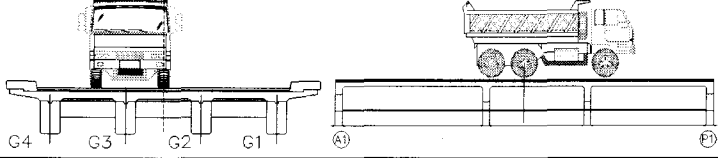
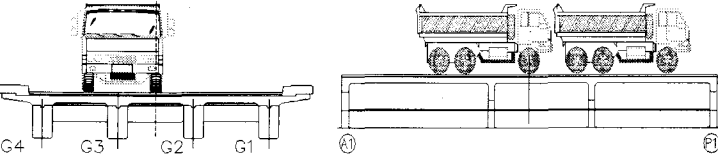
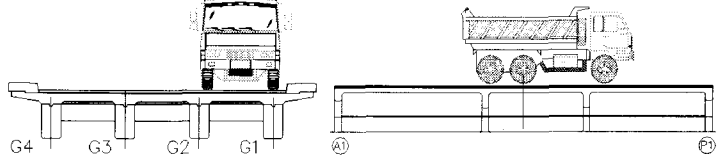
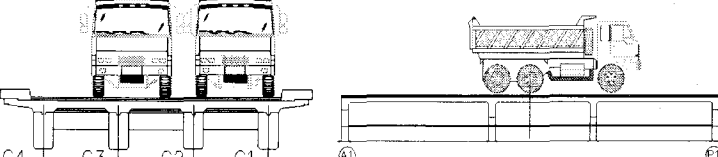
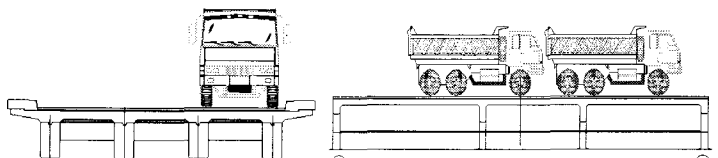
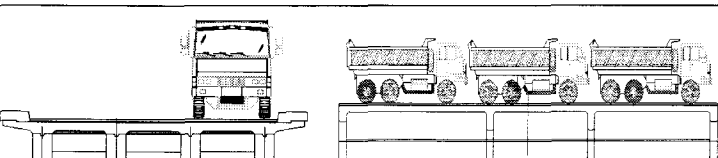


Fig. 4-51 Step-4 (24-24R-P)



Fig. 4-52 Step-4 (24-24-R-P)

Table 4-4 Loading scheme of whole experiment

Step	하중조합	하중 재하 위치표시
1	24C	
2	24-24C-S	
3	24R	
4	24-24R-P	
5	24-24R-S	
6	24-24-24R-S	
24 : 24ton 중량의 덤프트럭 1대 24-24 : 24ton 중량의 덤프트럭 2대 24-24-24 : 24ton 중량의 덤프트럭 3대 C : Center (도로중앙에 차량의 오른쪽바퀴 위치) R : Right (거더 G1위에 차량의 오른쪽바퀴 위치), S : Serial (2대 이상의 트럭을 일렬로 배치시켜 이동) P : Parallel (트럭 2대를 평행하게 배치시켜 이동) loading : 약 1분동안 시속 5 km/hr 로 진입(차량 진입 후 경간 중앙에 정지시까지) holding : 1분간 정지(경간 중앙에서 정지) unloading : 약 1분동안 시속 5 km/hr 로 진출(정지종료 후 차량이 진출시까지)		

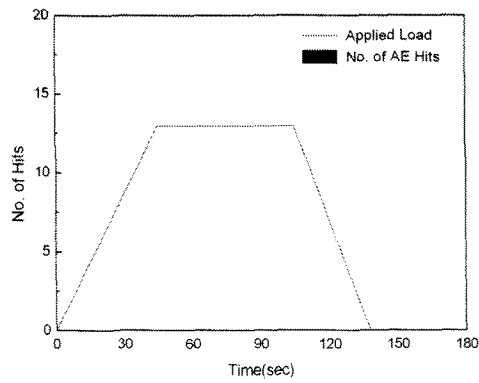
(2) AE 음향방출 시험 분석

금당교에서 실시한 CH.2에 해당하는 AE 음향방출 시험을 분석한 결과를 Fig. 4-53에 나타내었다. 쌍계교에 비하여 전체적으로 신호발생율이 적은 것으로 보아 예측했던 대로 손상이 적은 건전한 교량인 것을 확인할 수 있었다. step-1과 step-2에서 각 하중의 경우에 대해 음향방출 신호가 거의 나타나지 않아 교량에 미치는 하중의 크기가 매우 적어 균열이 생기기까지의 휨 거동이 거의 일어나지 않았음을 유추할 수 있었다. step-3에서는 24ton 중량의 트럭을 오른쪽 위에 위치시켜 센서를 부착한 거더 G1 위에서 트럭을 이동시킨 경우이다. 이때 트럭 하중에 의한 AE 신호를 나타냄으로써 Loading시 하중을 받아 균열이 생기면서 AE hit가 발생했으며 unloading시에도 열렸던 균열이 닫히면서 균열면의 마찰에 의해 loading시와 비슷한 신호 발생율을 보였지만 손상이 많은 쌍계교에 비하여 대체적으로 AE 신호 발생이 적었다. step-4에서는 step-3과 같은 하중조건에서 24ton 중량의 트럭 한대를 평행하게 추가로 재하시킨 상태임에도 불구하고 오히려 step-3보다 적은 AE 신호를 보였다. step-5와 step-6에서도 같은 위치에서 각각 2대와 3대를 일렬로 배열했을 경우이지만 step-5의 loading에서 더 많은 AE 신호를 나타냄으로써 음향방출 신호원을 분석하는데 있어 하중 재하의 위치가 큰 영향을 미친다는 것을 유추할 수 있었다. 또한 step-5에서 loading과 unloading시 신호가 거의 비슷하게 나옴으로써 생성된 균열과 이후 균열이 닫히면서 균열면의 마찰 신호빈도가 비슷하게 나타났으며 step-6에서는 unloading시 secondary AE peak가 더 높게 나타나 반복적인 트럭하중 재하에 의해 균열의 성장이 완료되어 신호발생빈도가 안정된 것으로 보인다. 또한 이 실험에서는 트럭이 정지한 이후에 다시 출발하는 시점이나 정지하는 시점에서 차량의 떨림으로 인한 AE 신호가 잡히는 경우가 있어 실험하는데 약간의 어려움이 있었으며 위와 같은 실험조건에서의 하중 크기로는 교량의 AE 신호원을 분석하는데 있어 큰 영향을 미치지 못했다.

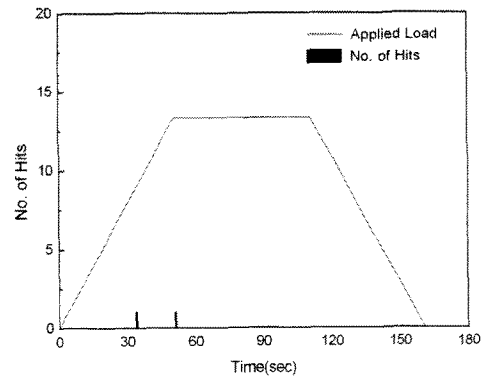
Fig. 4-54는 step-5에서 센서의 위치에 따른 각 채널별 시간에 대한 신호발생과 하중과의 관계를 나타낸 결과이다. 쌍계교에서와 마찬가지로 차량이 CH.1→CH.3 방향으로 이동함에 따라 CH.1에서부터 AE 신호가 나타나기 시작하여 차량이 경간 중앙으로 이동할수록 CH.2에서도 신호가 나타나며 정지이후에 차량이 CH.3 방향으로 이동할수록 센서로부터 거리가 멀어지는 CH.1에서는 신호가 잡히지 않으며

CH.2에서 잡히던 신호가 점차 CH.3에서 현저히 많이 나타나는 것으로 하중의 움직임에 따라 AE 신호원이 정상적으로 나타나고 있음을 알 수 있었다. 또한 세 가지 경우 모두에서 AE 신호발생 패턴은 정상적으로 나타났으며 발생 hit수가 매우 적은 것으로 보아 상대적으로 건전한 교량인 것을 다시 한번 확인할 수 있었다.

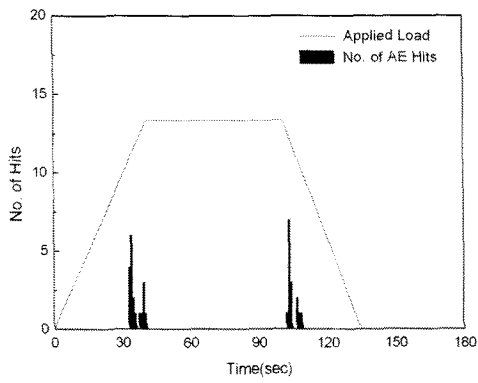
Fig. 4-55와 Fig. 4-56은 금당교에서의 step-4(24-24R-P)와 step-6(24-24-24R-S)의 AE 신호를 duration과 amplitude의 cross plot로 나타낸 그림으로써 앞서 언급한 hit 분석과 마찬가지로 대체적으로 발생하는 신호가 매우 적음을 확인할 수 있었다. step-4에서 하중 인가시에 하중 제거시 보다 약간 많은 신호를 보였고 step-6에서는 하중 제거시가 하중 인가시보다 약간 많은 신호를 나타냈으나 실험 조건과 같은 재하 하중의 크기로는 교량에 영향을 미치는 범위는 아니었다.



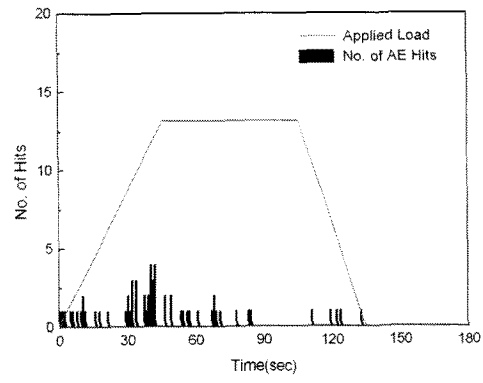
(a) Step-1 (24C)



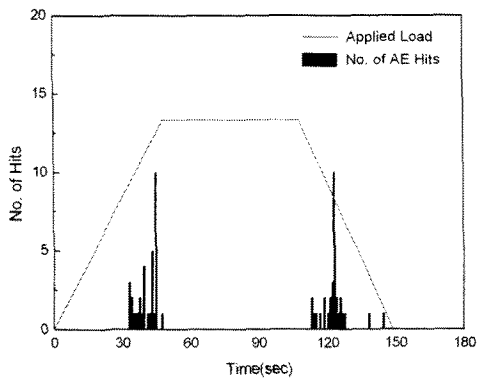
(b) Step-2 (24-24C-S)



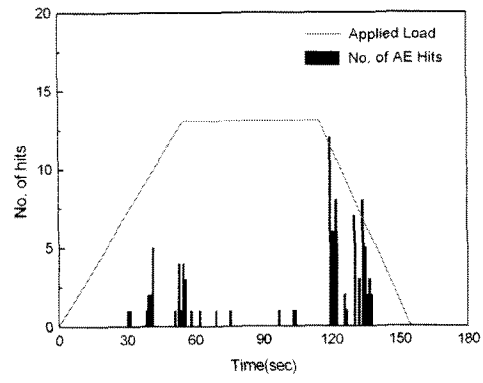
(c) Step-3 (24R)



(d) Step-4 (24-24R-P)

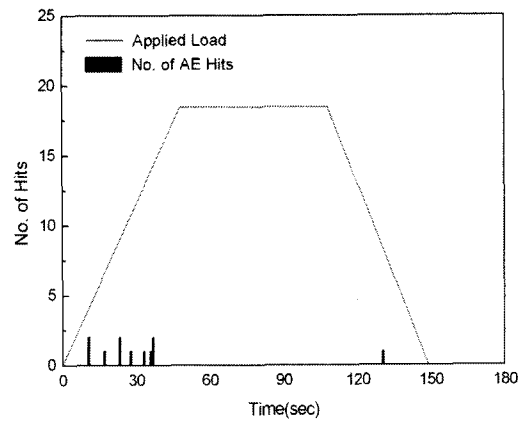


(e) Step-5 (24-24R-S)

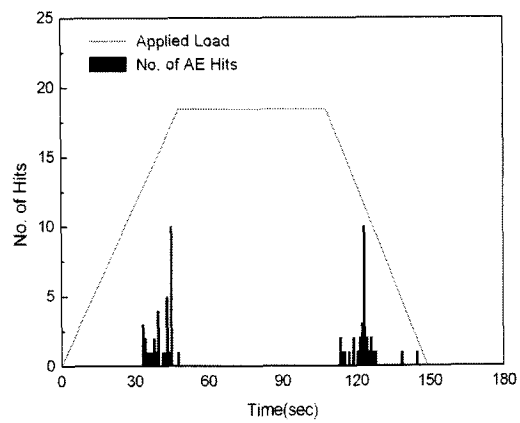


(f) Step-6 (24-24-24R-S)

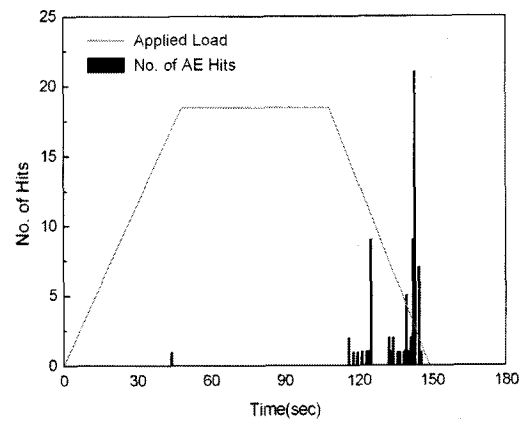
Fig. 4-53 AE hit occurrence pattern of each step



(a) CH.1



(b) CH.2



(c) CH.3

Fig. 4-54 Comparison of AE hit occurrence depending of sensor location
(step-5 / 24-24R-S)

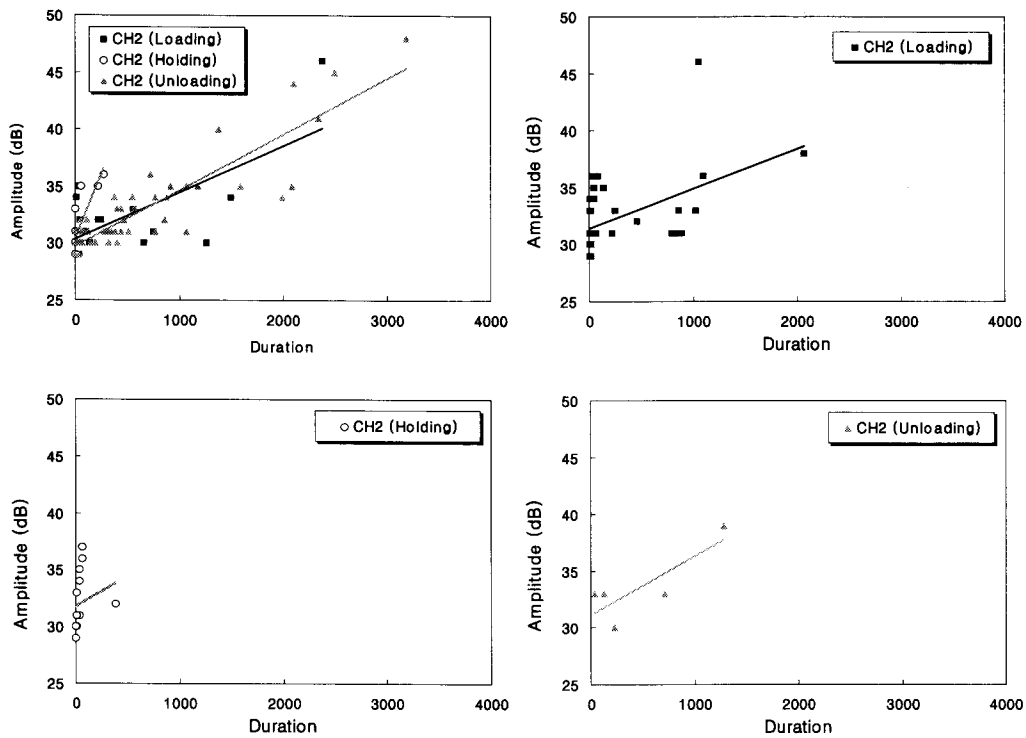


Fig. 4-55 Cross plot of duration vs. amplitude (step-4 / 24-24R-P)

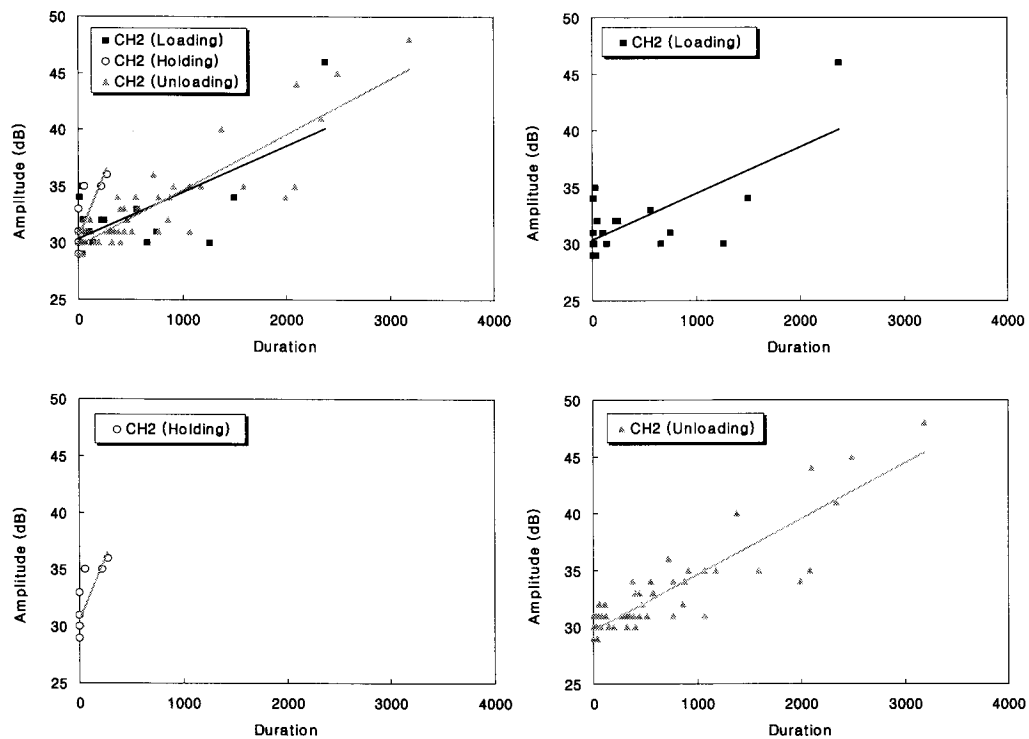


Fig. 4-56 Cross plot of duration vs. amplitude (step-6 / 24-24-24R-S)

다. 표면파를 이용한 비파괴검사

음향방출 실험을 통해 금당교는 매우 건전한 교량으로 손상이 없는 것으로 확인하였다. 음향방출 센서를 설치하면서 동시해 수행한 외관 조사를 통해서도 균열은 관찰되지 않았다. 다만, 다음 그림과 같이 표면의 백태는 관찰되나 그로 인해 거더의 내부까지 손상이 진전되지는 않은 것으로 확인되었다. 따라서 매우 건전한 금당교의 경우 표면파의 투과 함수를 이용한 비파괴검사는 필요치 않았다.



Fig. 4-57 Appearance of the girder

4. 현장적용을 위한 절차서

개발된 비파괴검사 기술의 현장 적용을 통해 얻은 경험을 바탕으로, 추후 시설물 유지관리자의 비파괴검사 실시를 위한 절차서를 다음과 같이 작성하였다. 사회기반 시설물의 안전성 평가를 위해, 콘크리트 부재에 대한 비파괴검사가 요구되는 경우 다음과 같은 절차를 따라 본 연구 과제를 통해 제안된 신기술을 적용할 수 있다.

가. 음향방출 실험의 적용

- (1) 콘크리트 구조물의 손상 평가를 실시하기 위한 대상 구조물에서 시험부위(빔, 슬래브 등)를 선정한다.
- (2) AE 계측 장비 및 센서, BNC cable, couplant, 철판, 마그네틱 홀더, pencil 등 실험에 필요한 항목들을 준비한다.
- (3) 대상 구조물의 표면에 센서를 부착하기 위해 센서 표면에 couplant를 발라 표면과 센서가 완전히 밀착 할 수 있도록 부착시킨다.
 - 대상 구조물이 콘크리트일 경우 센서 부착을 위해 그라인더, 사포, Cleaner 등을 사용하여 표면을 연마하여 매끄럽게 정리해 준다.
 - 특히 콘크리트 표면에서의 센서 부착은 콘크리트의 특성상 부착하는데 어려운 점이 있어 특별히 제작된 철판에 araldite(에폭시)를 발라 표면에 붙이고 필요시 다시 한 번 테이프로 고정시켜 접착력을 높여 준다. 그 다음에 마그네틱 홀더를 이용하여 couplant를 바른 센서를 표면과 잘 밀착시켜 주며 이때 마그네틱 홀더와 센서 사이에 공간이 생기지 않도록 잘 고정시켜 준다.
- (4) 센서와 케이블을 연결하고 AE 계측 장비와도 BNC cable로 각 채널에 연결시킨다.
 - 4 채널 AE 계측 장비 중 세 채널은 AE 신호를 받아 분석하고 나머지 하나의 채널은 strain 또는 load data 등 하중에 관련된 parameter와 연결시켜 data를 취득한다.
- (5) 케이블과 센서, 장비의 연결이 확인되면 계측 장비의 전원을 켜고 제공된 AE 진단 프로그램을 실행시킨다.

- (6) Pencil lead break test를 실시하여 센서의 감도를 확인하고 필요시 센서를 교체하거나 교정을 실시하며, 모든 채널에 대해 확인 후 background noise level을 고려한 문턱값(threshold)을 설정한다.
- (7) 대상교량에 따라 설정된 하중을 각 단계별(loading-holding-unloading)로 인가하면서 동시에 AE 신호와 parameter를 수집한다.
 - 트럭은 시험 대상 경간 시점에서 약 시속 5 km/hr 로 진입(loading)한 뒤 중앙에 정지하여 약 1~2 분 동안의 휴지기(holding)를 거쳐 다시 약 시속 5 km/hr 로 종점까지 진출(unloading)한다.
- (8) 시험 종료 후 저장된 AE data를 제공된 평가 알고리즘 및 기준에 따라 손상도 및 상태를 판정한다.

나. 표면파 실험을 통한 콘크리트 균열 깊이의 산정

- (1) 측정하고자 하는 콘크리트의 균열과 동일한 콘크리트 부재에서 손상이 없는 영역을 확보하여 표면파 측정을 준비한다.
- (2) 2-채널 표면파 측정 시스템을 이용하여, 손상이 없는 콘크리트 부재에 대한 충격 가진 표면파를 측정하여 기저 투과 함수를 결정한다.
 - 센서 사이의 간격은 200 mm, 충격 가진은 센서와 동일선 상에서 양 옆 100 mm 지점에서 강구를 이용하여 발생시킨다.
 - 양방향으로 충격 가진으로 발생시킨 콘크리트의 표면파를 측정하고, 고속 푸리에 변환(FFT) 등을 이용하여 주파수 영역에서 분석한다.
 - 자기보정 기법을 이용하여 파장에 따른 기저 투과 함수(basis transmission function)와 그에 따른 기여 함수(coherence function)를 산정한다.
- (3) 기저 투과 함수 결정과 동일한 방식으로, 대상 균열에 대한 표면파의 투과 함수를 결정한다.
 - 균열면에서 양쪽으로 100 mm 거리에 센서를 설치하고, 충격 가진은 센서와 동일선 상에서 양 옆 100 mm 지점에서 강구를 이용하여 발생시킨다.
 - 기저 투과 함수 결정과 같은 방식으로 파장에 따른 투과 함수와 그에 따른 기여 함수를 산정한다.
- (4) 제안된 모델식을 바탕으로 측정된 투과 함수를 평가하여 대상 균열의 깊이를

결정한다.

- 파장 영역에서 기저 투과 함수와 균열면에서 측정된 투과 함수의 비율을 계산하고, 그에 따른 기여 함수도 산정한다.
- 각 균열 깊이에 따라 아래의 모델식(식 3-11)과 투과 함수의 비율의 오차제곱합(sum of squared error)을 계산하고, 최소 오차제곱합을 갖는 균열 깊이로 측정값을 결정한다.

$$T\left(\frac{d}{\lambda}\right) = \exp\left(-16.4\left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 + 33.9\left(\frac{d}{\lambda}\right)^3 - 20.3\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 + 0.559\left(\frac{d}{\lambda}\right)\right)$$

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

1. 연구개발 수행진도율

일련 번호	연구내용	연구 개발 일정												진도 (%)
		1차년도				2차년도				3차년도				
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
1	콘크리트 파괴 거동 단계 분류 (고찰)													100
2	파괴 단계별 음향방출 신호원 분석													100
3	파괴 단계별 음향방출 신호 취득													100
4	파동전파 해석을 통한 SAW 특성 분석													100
5	표면탄성파 출력 특성에 맞는 신호처리 기법 연구													100
6	재료특성 고려한 SAW 발신 및 수신 연구													100
7	파괴 단계별 음향방출 신호 취득													100
8	정상신호와 이상신호의 신호 패턴분석													100
9	이상거동 판정을 위한 AE 분석 알고리즘 개발													100
10	시편 대비 균열 깊이별 표면탄성파 신호 취득													100
11	균열 깊이별 신호 특성 분석													100
12	균열 깊이 판정을 위한 신호 해석 기법 개발													100
13	파동 전파 해석을 통한 균열 깊이에 따른 표면탄성파 특성 분석													100
14	AE 현장적용 절차서 및 프로토타입 장비 개발													100
15	현장 실험을 통한 적용성 검증													100
16	균열 깊이별 표면탄성파 신호 취득													100
17	철근의 영향을 고려한 균열깊이 판정 기법 개발													100
18	현장용 프로토타입 시스템구성 및 현장실험													100

2. 연구개발 목표의 달성도

연 차	연구목표	달성도 (%)	주요 연구내용
1차년도	실내 시편 실험을 통한 음향방출 위험도평가 핵심기술 도출	100	- 콘크리트 파괴거동 단계 분류 - 파괴 단계별 음향방출 신호원 분석 - 시편실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호 취득
	콘크리트 표면탄성과 해석을 위한 거동 연구	100	- 파동 전파 해석을 통한 콘크리트 균열깊이에 따른 표면탄성과 특성 분석 - 표면탄성과 출력 특성에 맞는 신호처리 기법 연구 - 콘크리트의 특성을 고려한 표면탄성과 발신 및 수신 시스템 조사
2차년도	콘크리트에서 이상거동 판정을 위한 음향방출 신호 분석·평가 알고리즘 개발	100	- 시편실험을 통한 파괴 단계별 음향방출 신호 취득 - 정상신호와 이상신호 신호패턴 분석 - 이상거동 판정을 위한 음향방출 분석 알고리즘 개발
	콘크리트 균열 깊이 측정 Active 기법 개발	100	- 시편 실험을 통한 콘크리트의 균열 깊이별 표면탄성과 신호 취득 - 균열 깊이별 신호 특성 분석 - 균열 깊이 판정 기법 개발 - 파동전파 해석을 통한 콘크리트 균열 깊이에 따른 표면탄성과 특성 분석
3차년도	음향방출 기술의 현장 적용을 위한 절차서 개발 및 적용성 검증	100	- 사용자 편의를 위한 현장 적용 절차서 및 프로토타입 장비 개발 - 현장실험을 통한 적용성평가 및 보완
	현장 응용을 고려한 균열 깊이 측정 Active 기술 개발	100	- 실험을 통한 철근 콘크리트의 균열 깊이별 표면탄성과 신호 취득 - 철근의 영향을 고려한 균열 깊이 판정 기법 개발 - 현장 응용을 위한 프로토타입 시스템 구성 및 현장 적용 실험

제 2 절 관련분야의 기술발전예의 기여도

콘크리트 구조물의 손상 평가를 위한 능동/수동 결합형 NDT 신기술 개발 내용 중 당초 목표하였던 1차년도 연구 내용에 해당하는 기술의 개발이 성공적으로 마무리되었다. 국내에서 처음으로 시도되는 기술로서 국제적인 수준에서도 우수한 것으로 생각된다. 본 연구는 교량뿐 아니라 타 구조물에의 기술 활용도가 매우 높은 기술이며, 토목구조물 분야의 신기술로써 기술의 파급성이 매우 높을 것으로 예상된다. 1차년도 연구를 수행하면서, SCI 국외논문게재 2편, 국제학술발표 4건, 국내 학술발표 6건 등을 발표하면서, 국내외 연구자들에게 본 연구에 대한 많은 인식을 주었다.

전체적으로 본 연구를 시작하면서 계획하였던 현재까지의 목표는 충분히 달성되었으며, 일부 연구 분야에서는 연구 목표로 설정하지 않았던 프로토 타입의 음향방출 측정 장비 개발의 일부분에 대한 연구까지 추가로 수행하였다.

본 과제가 종료될 시점에서는 국내 콘크리트 교량 구조물의 손상 평가에 대한 획기적인 기술발전을 기대해도 좋다고 판단된다.

현재 이미 개발되었거나 향후 개발될 기술들은 다양한 분야의 구조물에서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 각 구조체에 맞게 적용이 될 수 있도록, 지속적인 적용성 향상 연구가 수행되어야 하며, 이에 따라 적합한 접근 방법이 구축되면 더욱 우수한 안전성 감시 및 측정기술로 자리 잡을 것이라 판단된다. 특히 본 기술은 새로운 적용 기술에 해당하므로 향후 현장 기술자들의 다양한 실 구조물에의 적용 등을 통해 know-how나 경험적인 지식의 구축이 매우 중요할 것으로 생각되며, 국내 실정과 해당 구조체에 맞는 D/B를 계속 구축해 나가는 것이 바람직하다고 본다. 결론적으로 본 과제를 통하여 개발되는 기술은 현장 실 구조물의 안전 진단에 있어서 기존 콘크리트 구조물에서의 손상정도 및 파괴의 조짐을 음향방출시험 결과를 통하여 직접적으로 평가하고, 균열의 깊이를 정량적으로 측정함으로써 한 단계 정밀하고 진보된 기법으로서 아주 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 활용계획

1. 활용계획

본 연구를 통하여 개발되는 능동, 수동 결합형 비파괴평가 기술은 현장 실 콘크리트 구조물에서의 내부 파괴의 조짐을 음향방출 기술을 이용하여 직접적으로 측정 및 감시하며, 더불어 표면파 투과 기법을 이용하여 균열의 깊이를 정량적으로 측정함으로써 한 단계 더 정밀하고 진보된 기법으로 공용중인 구조물의 안전진단에 아주 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

그러나 각각의 콘크리트 구조물의 특성에 맞게 적용이 될 수 있도록, 지속적인 적용성 향상 연구가 수행되어야 하며 이에 따라 적합한 접근 방법이 구축되면 더욱 우수한 안전성 감시 및 측정기술로 자리 잡을 것이라 판단된다. 특히 본 기술은 새로운 적용 기술에 해당하므로 향후 현장 기술자들의 다양한 실 구조물에의 적용 등을 통해 노하우(know-how)나 경험적인 지식의 구축이 매우 중요할 것으로 생각되며, 국내 실정과 해당 구조물에 맞는 데이터베이스를 계속 구축해 나가는 것이 바람직하다고 본다.

또한 본 연구에서 최종 개발된 기술은 다양한 분야의 구조물에서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 산업설비에서의 대형구조물이나 원자력 발전설비의 콘크리트 구조물 등의 안전 관리 차원에서도 활용될 수 있으므로 그 사용 영역은 매우 넓다고 볼 수 있다.

따라서 한국도로공사, 한국철도공사, 한국시설안전공단, 안전진단 전문기관 및 관련 회사 등과 협조하여, 본 연구에서 개발된 비파괴검사 기술을 보다 다양한 콘크리트 구조물에 적용하고자 한다. 향후 관련 기관에 본 연구 과제에서 제안된 비파괴검사 신기술을 홍보하고, 유지관리를 위한 조사 수행 시 본 연구에서 제안된 비파괴검사 기술도 동시에 적용하여 기존의 방법에 따른 결과와 비교 분석하도록 노력하고자 한다. 또한 이와 같은 일련의 적용성 연구를 통해 본 연구에서 개발된 내용을 학술발표 및 홍보를 통하여 현장에서 널리 활용 가능하도록 할 계획이다.

제 2 절 기대효과

1. 기술적 측면

먼저 기술적인 기대효과를 살펴보면, 첫째, 구조물의 모니터링 및 현장 측정 기술의 개선, 보완 또는 대체 기술 확보를 할 수 있을 것으로 기대되고, 둘째, 콘크리트 구조물의 특성에 맞는 새로운 음향방출기술이 개발될 수 있을 것이며, 셋째, 균열 깊이 검사 기술의 신뢰성 향상 및 기존 기술에 대한 대안을 확보할 수 있을 것이고, 넷째로, 외국 기술에 대한 기술 경쟁력 강화에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

2. 경제·산업적 측면

콘크리트 교량과 같은 대형구조물의 모니터링과 현장 측정 기술이 최근 사회적으로 관심이 되고 있는 infrastructure의 안전도 문제에 큰 기여를 할 수 있을 것이다. 또한 본 기술의 개발로써 국내 시장의 기술적인 파급효과는 물론 국내 기술로써 안전진단을 수행할 수 있음으로서 경제 산업적인 부분에 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

- 고급기술의 국내 개발로 기술도입비의 절감효과
- 체계화된 모니터링 기술 구축으로 유지관리비 절감
- 첨단 비파괴검사기술의 적용을 통한 국가기간 시설물의 안전성 확보
- 건설 분야의 신뢰 회복 및 사회적 불안요소의 해소

3. 타 산업에 미치는 효과

- 콘크리트의 특성에 맞는 음향방출기술 개발로 인한 관련 장비 업체의 발전
- 균열 깊이 검사의 신뢰성 향상으로 인한 관련 장비 업체의 발전
- 기계, 자동차, 항공 분야로의 기술 확대 적용 가능성 확보
- 원자력, 화력 등 발전설비 안전진단 분야 산업에의 기술 확대
- 안전진단 관련 소프트웨어 산업 발전에 기여

제 3 절 향후 전망

비교적 신기술이라 할 수 있는 본 연구개발의 결과는 주요 취약부위의 감시기술은 물론 기존의 안전진단 방법이나 유지·관리하는 기술의 수준을 향상시킴으로써 훨씬 더 정확하고 신뢰성 있는 관리의 틀을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이 기술의 활용도는 토목구조물뿐만 아니라 산업설비에서의 대형구조물이나 원자력 발전설비의 콘크리트 구조물 등의 안전관리 차원에서도 활용될 수 있으므로 그 사용 영역은 매우 넓다고 할 수 있다.

이렇게 다양한 분야의 구조물에 본 기술을 적용하기 위해서는 추후에 각 대상체에 적합한 접근 방법을 구축하고 지속적인 관리를 할 필요가 있다. 특히 이 기술은 새로운 적용 기술에 해당하므로 향후 실 구조물의 적용에서도 많은 know-how나 경험적인 지식이 중요할 것으로 생각되며, 국내 실정에 맞는 D/B를 계속 구축해 나가는 것이 바람직하다고 본다. 즉, 향후 실용화를 위한 추가 연구의 범위에 각 구조체에 대한 음향방출 특성 및 판단 알고리즘의 D/B를 체계적으로 구축함은 물론 이들에 대한 검증 실험을 지속적으로 수행함으로써 신뢰성 있는 신기술 적용화 성공을 이룰 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해 근본적으로 정부 또는 산업체에서의 실용화 사업을 위한 적극적인 지원이 반드시 필요할 것으로 사료된다.

따라서 본 기술이 안정된 기술로 자리 잡을 경우, 콘크리트로 구성된 교량 및 건물 등과 같은 대형구조물의 현장 건전성 평가에 필요한 신기술로서, 최근 사회적으로 관심이 되고 있는 infrastructure의 안전도 문제(인명피해, 경제적 충격 : 환산불가)에 큰 기여를 할 수 있을 것이다. 또한 본 기술의 개발로써 국내 시장의 기술적인 파급효과(장비개발의 촉진에 따른 수입대체효과)는 물론 국내 기술로써 안전진단을 수행(외화절감, 고용창출 효과)할 수 있으므로 경제 산업적인 부분에 크게 기여를 할 것으로 판단된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 음향방출 기술

음향방출 기술은 교량, 댐, 건물 등에 시도하려는 연구가 다소 있음을 확인하였으나, 아직 실용적인 기술이 확립되지 못한 상태이다. 음향방출 기술은 재료의 파손기구를 연구하거나 내부에 존재하는 결함을 검출하는 기술로 최근 많은 관심을 끌고 있다. 이는 광범위한 부분에 대해 표면에서는 검출되지 않는 재료의 내부 손상을 검출할 수 있다는 큰 장점이 있기 때문일 것이다. 콘크리트 및 토목 분야에서는 다른 분야에 비해 적은 수이지만 최근 많은 연구자들에 의해 콘크리트 재료나 구조물에의 적용이 되어 왔다. 대체적으로 이전의 연구 분야들은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫째는 균열 선단에서 전개되는 파괴진행영역(fracture process zone, FPZ)에 대해 파괴 메커니즘을 규명하거나, 균열의 위치 또는 균열의 전파과정을 설명하는 것이었다. 두 번째 연구 분야는 음향방출 기술을 실제 구조물의 안전성 진단의 개념에서 구조물의 건전성을 평가하거나 손상을 검출하는데 초점이 두어졌다. 이 분야에 대한 국내·외의 관심도는 매우 고조되고 있으나 아직까지 실용기술은 개발되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구의 지속적이며 급속한 연구개발의 진행은 향후 안전진단 관련 분야에의 새로운 진단 기법으로 촉망을 받을 것으로 사료된다.

음향방출기술을 콘크리트에 이용한 국외 연구의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

- Masayasu Ohtsu and Hiroshi Watanabe, “Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission”, *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issues 5-6, July-September 2001, Pages 217-224
- S. Yuyama, Z. -W. Li, M. Yoshizawa, T. Tomokiyo and T. Uomoto, “Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission”, *NDT & E International*, Volume 34, Issue 6, September 2001, Pages 381-387

- Masayasu Ohtsu, Masakatsu Uchida, Takahisa Okamoto, and Shigenori Yuyama, “**Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams Qualified by Acoustic Emission**”, *ACI Structural Journal*, Vol. 99 No. 4, pp. 411-417, 2002
- Byounggeon Kim and W. Jason Weiss, “**Using acoustic emission to quantify damage in restrained fiber-reinforced cement mortars**”, *Cement and Concrete Research*, Volume 33, Issue 2, February 2003, Pages 207-214

제 2 절 표면탄성과 기술

표면탄성파를 이용한 균열 깊이 측정에 관한 연구는 기존에 상용화되었던 초음파 속도법의 어려움에 대한 대안으로 최근 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히, 이 분야의 연구는 미국 Northwestern대학과 University of Illinois, Georgia Inst. Tech.와 같은 Major 대학에서 연구가 많이 이루어지고 있는데, 콘크리트에 대한 연구는 Northwestern 대학의 연구가 현재 가장 앞서 있다. 그들의 연구는 콘크리트 구조물에서 균열의 깊이를 측정하기 위해 다양한 실험적 / 수치해석적 방법에 기초를 두었고, 연구 결과에서 알 수 있듯이 기존의 방법을 대체할 수 있는 큰 가능성을 보여주었다. 그러나 현재까지의 연구는 실용적으로 이 방법을 사용할 수 있도록 균열의 정확한 깊이를 판정하는 기술에 대해서는 확립되지 않은 상태이며, 철근의 영향을 포함한 연구 결과는 아직 나오지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서 이 부분에 대한 연구를 수행하면 결과에 따라 현장에서 즉시 사용할 수 있는 기술이 되리라 판단된다.

표면탄성파를 이용한 균열 깊이의 산정에 관한 연구를 정리해 보면 다음과 같다.

- W.J. Song, J.S. Popovics, J.C. Aldrin, S.P. Shah, “**Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete**”, *Journal of Acoustical Society of America*, Volume 113, Issues 2, 2003
- A. Zerwer, M. A. Polak, J.C. Santamarina, “**Rayleigh Wave Propagation for the Detection of Near Surface Discontinuities : Finite Element Modeling**”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Volume 22, Issue 2, 2003

- W. Hassan, W. Veronesi, “Finite element analysis of Rayleigh wave interaction with finite-size, surface-breaking cracks”, *Ultrasonic*, Volume 41, 2003
- J.S. Popovics, W. Song, M. Ghandehari, K.V. Subramaniam, J.D. Achenbach, “Application of wave transmission measurements for crack depth determination in concrete”, *ACI Materials Journal*, Volume 97, 2000
- C.M. Scala, S.J. Bowles “Laser ultrasonics for surface-crack measurement using transmitted near-field Rayleigh waves”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Volume 18, 2000

제 7 장 참고문헌

- 1) H. Rusch, Physical Problems in the testing of concrete, *Zement-Kalk-Gips*, Vol 12, No. 1, 1959.
- 2) R. G. L'Hermite, What we know about the plastic deformation and creep of concrete, *RILEM Bull.*, Vol. 1, p. 21, 1959.
- 3) R. G. L'Hermite, Volume changes of concrete, *Proc. 4th Int. Symp. on Chemistry of Cement, Vol. II*, Washington, National Bureau of Standards, Washington, D. C., NBS, Monograph, No. 43, p. 659, 1960.
- 4) G. S. Robinson, Methods of detecting the formation and propagation of microcracks in concrete, *Proc. Int. Symp. on the Structure of Concrete*, Cement and Concrete Association, p. 131, 1968.
- 5) D. Wells, An acoustic apparatus to record emissions from concrete under strain, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 12, p. 80, 1970.
- 6) A. T. Green, Stress wave emission and fracture of prestressed concrete reactor vessel materials, *Proc. 2nd Interamerican Conf. on Materials Technology, Vol. I*, ASME, p. 635, 1970.
- 7) A. G. Evans, J. R. Clifton, and E. Anderson, The fracture Mechanics of mortars, *Cement Conc. Res.*, Vol. 6, p. 535, 1976.
- 8) K. Morita and K. Kato, Fundamental study on fracture toughness and evaluation by acoustic emission technique of concrete, *Rev. 32rd General Meet.*, Cement Association of Japan, Tokyo, p. 138, 1978.
- 9) K. Morita and K. Kato, Fundamental study on evaluation of fracture toughness of artificial lightweight aggregate concrete, *Rev. 33rd General Meet.*, Cement Association of Japan, Tokyo, p. 175, 1979.
- 10) J. S. Nadeau, R. Bennett, and S. Mindess, Acoustic emission in the drying of hardened cement paste and mortar, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 64, p. 410, 1982.
- 11) J. C. Lenain and A. R. Bunsell, The resistance to crack growth of asbestos cement, *J. Mater. Sci.*, Vol. 14, p. 321, 1979.

- 12) M. Izumi, H. Mihashi, and N. Nomura, Acoustic emission technique to evaluate fracture mechanics parameters of concrete, *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, Elsevier, p. 259, 1986.
- 13) K. Okada, W. Koyanagi, and K. Rokugo, Energy approach to flexural fracture process of concrete, *Trans. Jpn. Soc. Civil Eng.*, Vol. 11, p. 301, 1979.
- 14) J. M. Berthelot and J. L. Robert, Modeling concrete damage by acoustic emission, *J. Acoust. Emission*, Vol. 6, p. 43, 1987.
- 15) Y. Niwa, M. Ohtsu, and H. Shiomi, Waveform analysis of acoustic emission in concrete, *Memoirs of the Faculty of Engineering*, Kyoto Univ., Vol. 43, No. 4, p. 319, 1981
- 16) A. Maji and S. P. Shah, Initiation and propagation of bond cracks as detected by laser holography and acoustic emission, *Bonding in Cementitious Materials*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 114, p. 55, 1988.
- 17) K. Miyano et al., Evaluation of Joint Properties of Anti-washout Underwater Concrete by Acoustic Emission Measurement, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 10, No. 1/2, 1991/1992.
- 18) K. Matsuyama et al., Field Application of Acoustic Emission for the Diagnosis of Structural Detorioration of Concrete, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 11, No. 4, 1993.
- 19) S. Yuyama et al., Cracking Process Evaluation in Reinforced Concrete by Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 13, No. 1/2, 1995.
- 20) Y. Murakami and S. Yuyama, Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Reinforced Concrete Beams Deteriorated due to Corrosion of Reinforcement, *Progress in Acoustic Emission VIII*, The Japanese Society for NDI, 1996.
- 21) S. Yuyama et al., A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission, *Proceedings of the 13th International AE Symposium*, 1996.
- 22) M. Ohtsu, Y. Tomoda and T. Fujioka, Estimation of Initial Damage in Concrete by Acoustic Emission, *Fourth Far East Conference on NDT*, 1997.

- 23) K. Matsuyama et al., Application of AE to Evaluate Deterioration of Port and Harbor Structures, *Fourth Far East Conference on NDT*, 1997.
- 24) M. Shigeishi et al., "Observation of Damage Process in RC Beams Under Cyclic Bending by Acoustic Emission", *Fourth Far East Conference on NDT*, 1997.
- 25) Y. Sakata and M. Ohtsu, "Spectral Response and Acoustic Emission of Reinforced Concrete Members Under Fatigue Bending", *Fourth Far East Conference on NDT*, 1997.
- 26) Stephen W. Hearn and Carol K. Shield, Acoustic Emission Monitoring as a Nondestructive Testing Technique in Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 6, pp. 510-519, 1997.
- 27) Zhang Jun and Henrik Stang, Fatigue Performance in Flexure of Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 1, pp. 58-67, 1998.
- 28) M. Ohtsu, T. Okamoto, and S. Yuyama, Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission for Cracking Mechanisms in Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 95 No. 2, pp. 87-95, 1998.
- 29) Masayasu Ohtsu, Masakatsu Uchida, Takahisa Okamoto, and Shigenori Yuyama, Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams Qualified by Acoustic Emission, *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, pp. 411-417, 2002.
- 30) Masayasu Ohtsu, Y. Kaminaga and Muzo C. Munwar, Experimental and numerical crack analysis of mixed-mode failure in concrete by acoustic emission and boundary element method, *Construction and Building Materials*, Volume 13, Issues 1-2, pp. 57-64, 1999.
- 31) Dong-Jin Yoon, W. Jason Weiss, and Surendra P. Shah, Assessing Damage in Corroded Reinforced Concrete Using Acoustic Emission, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 3, pp. 273-283, 2000
- 32) Amir Mirmiran and Salam Philip, Comparison of acoustic emission activity in steel-reinforced and FRP-reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, Volume 14, Issues 6-7, pp. 299-310, September-October 2000.
- 33) Keru Wu, Bing Chen and Wu Yao, Study on the AE characteristics of fracture process of mortar, concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams, *Cement and Concrete*

Research, Volume 30, Issue 9, pp. 1495-1500, September 2000.

- 34) Keru Wu, Bing Chen and Wu Yao, Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique, *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Issue 6, pp. 919-923, May 2001.
- 35) Joseph F. Labuz, Sara Cattaneo and Li-Hsien Chen, Acoustic emission at failure in quasi-brittle materials, *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issues 5-6, pp. 225-233. July-September 2001.
- 36) Mitsuhiro Shigeishi and Masayasu Ohtsu, Acoustic emission moment tensor analysis: development for crack identification in concrete materials, *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issues 5-6, pp. 311-319, July-September 2001.
- 37) Masayasu Ohtsu and Hiroshi Watanabe, Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission, *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issues 5-6, pp. 217-224, July-September 2001.
- 38) M. Shigeishi, S. Colombo, K. J. Broughton, H. Rutledge, A. J. Batchelor and M. C. Forde, Acoustic emission to assess and monitor the integrity of bridges, *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issue 1, pp. 35-49, February 2001.
- 39) S. Yuyama, Z. -W. Li, M. Yoshizawa, T. Tomokiyo and T. Uomoto, Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission, *NDT & E International*, Volume 34, Issue 6, pp. 381-387, September 2001.
- 40) Masayasu Ohtsu and Hiroshi Watanabe, "Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission", *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issues 5-6, July-September 2001, Pages 217-224
- 41) S. Yuyama, Z. -W. Li, M. Yoshizawa, T. Tomokiyo and T. Uomoto, "Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission", *NDT & E International*, Volume 34, Issue 6, September 2001, Pages 381-387
- 42) Masayasu Ohtsu, Masakatsu Uchida, Takahisa Okamoto, and Shigenori Yuyama, "Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams Qualified by Acoustic Emission", *ACI Structural Journal*, Vol. 99 No. 4, pp. 411-417, 2002
- 43) Byounggeon Kim and W. Jason Weiss, "Using acoustic emission to quantify

- damage in restrained fiber-reinforced cement mortars", *Cement and Concrete Research*, Volume 33, Issue 2, February 2003, Pages 207-214
- 44) Knab, L. J. Blessing, G. V., and Clifton, J. R., "Laboratory evaluation of ultrasonics for crack detection in concrete", *ACI Journal*, Vol. 80, pp. 17-27, 1983.
 - 45) Sansalone M., Lin, J.-M., and Streett, W. B., "Determining the depth of surface-opening cracks using impact-generated stress waves and time-of-flight techniques", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 2, pp.168-177, 1998.
 - 46) Popovics, J. S., Song, W.-J., Ghandehari, M., Subramaniam, K. V., Achenbach, J. D., and Shah, S. P., "Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 2, pp. 127-136, 2000.
 - 47) Hevin, G., Abraham, O., Pedersen, H. A., and Campillo, M., "Characterisation of surface cracks with Rayleigh waves: a numerical model", *NDT&E International*, Vol. 31, No. 4, pp. 289-297, 1998.
 - 48) Scala, C. M. and Bowles, S. J., "Laser ultrasonics for surface-crack measurement using transmitted near-field Rayleigh waves", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Volume 18, 2000.
 - 49) Achenbach, J. D., Komsky, I. N., Lee, Y. C., and Angel, Y. C., "Self-calibrating ultrasonic technique for crack depth measurement", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, No. 2, pp. 103-108, 1992.
 - 50) W.J. Song, J.S. Popovics, J.C. Aldrin, S.P. Shah, "Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete", *Journal of Acoustical Society of America*, Volume 113(2), 2003.
 - 51) ASTM E610-82, *Standard definitions of terms relating to acoustic emission*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Vol. 2.03, p. 373, 1987.
 - 52) Sidney Mindess, Acoustic Emission Method, *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press, p. 317, 1991.

- 53) 윤동진 외, 콘크리트 교량구조물의 손상도 및 노후도 평가 전문가 시스템 개발
- 인위재해개발사업보고서, 과학기술부, pp. 18-21, 2003.
- 54) J. M. Berthelot, J. L. Robert, D. Bruhat, and J. P. Gervais, *Damage evaluation of concrete test specimens related to failure analysis*, private communications, 1987
- 55) J. G. MacGregor and J. K. Wight, *Reinforced Concrete - Mechanics and Design Fourth Edition*, Pearson Prentice Hall, pp. 103-115, 2005.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업의 최종 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031) 381-6311

한국표준과학연구원 TEL 042) 868-5332

한국과학기술원 TEL 042) 350-3621

R&D / 01-2005-0-049-1-000-01

콘크리트 구조물의 손상 평가를 위한 능동/수동 결합형 NDT 신기술 개발

■ 발행일 / 2008. 8. 14.

■ 발행처 / 한국표준과학연구원

대전광역시 유성구 도룡동 1번지

TEL : 042-868-5114 (대)

■ 인쇄처 / 신광사