

음향방출 기술을 이용한 철근콘크리트 보의 휨 파괴 손상평가

김다위^{1*} · 이성로² · 박원석³

Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams Under Flexural Failure Mode Using Acoustic Emission Testing

David Kim^{1*} · Seonglo Lee² · Wonsuk Park³

¹Corresponding Author

David Kim

Tel : +82-31-670-5280

E-mail : davidkim@hknu.ac.kr

Received : September 29, 2022

Revised : February 24, 2023

Accepted : February 27, 2023

Abstract : In this study, a four-point bending test was conducted to assess and detect the damage to reinforced concrete structures using the acoustic emission (AE) technique. Based on the crack investigation results, flexural failure was classified into four stages and compared with the characteristic analysis results of AE parameters. The parametric characterization indicated that the activity of the primary AE signal was high in the early stage, and that of the second signal increased after the flexural cracks stabilized. Because the secondary AE signal included noise generated by friction, parameter-based analysis for damage assessment was performed using the primary signal; the secondary signal was used as complement. The activity analyses of the primary and secondary signals effectively classified crack propagation; however, determining the macrocracks and yielding of reinforcing bars had certain limitations. Nevertheless, applying the damage index with cumulative AE energy is a complementary technique for detecting and assessing structure damage that well detects the occurrence of macrocracks.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : reinforced concrete beam, flexural failure, acoustic emission, damage assessment

1. 서론

일반적으로 철근콘크리트 시설물의 유지관리는 정기적인 안전점검 및 안전진단을 통해 주로 육안조사에 의존한 상태평가를 실시하고 있으며, 일부 구간 또는 부재의 재하시험이나 비파괴시험 결과를 비교하는 방법으로 안전성 평가를 실시하고 있다. 콘크리트는 준취성(quasi-brittle) 복합재료로서 하중 변화 시 재료의 이방성과 체적 팽창 등으로 인해 복잡하고 미시적인 파괴특성이 나타난다¹⁾. 특히 원전 구조물과 같이 높은 안전성이 요구되는 시설물의 경우 정기적인 관찰을 통한 결함의 확인 외에도 재료 내부에서 발생하는 미시적 또는 비가시적 손상 등을 실시간으로 파악하여 미리 대응할 필요가 있다. 이에 대한 방법으로 다양한 비파괴시험 기법을 구조건전성모니터링(Structural Health

Monitoring, SHM)에 적용하는 시도가 진행되고 있다.

음향방출시험(Acoustic Emission Testing, AET)은 재료의 국부적 변형이나 손상 등 응력의 상태가 급격히 변화할 때 방출되는 에너지가 탄성과 형태로 전달될 때 표면에서 전기신호로 수집하는 비파괴시험 방법이다. AET는 이미 발생한 결함에 대하여 외부에서 에너지를 주입할 때의 응답을 계측하는 정적 불연속 신호가 아니라 자체에서 발생하는 에너지로부터 동적 연속 신호를 계측하기 때문에 결함의 발생과 위치 등 다양한 정보를 실시간으로 얻을 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 압력용기, 배관 등 다양한 산업시설의 손상감지 및 품질관리에 널리 적용되고 있으며, 초기 결함을 탐지하기 위한 상시 모니터링에도 유용한 방법으로 알려져 있다²⁾. 하지만 철근콘크리트 구조물은 재료의 비균질성 및 감쇠, 철근의 배근 등 탄성파의 전파 특성이

¹한경대학교 사회안전시스템공학부 강사 (School of Social Safety Engineering, Hankyong National University)

²목포대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Mokpo National University)

³목포대학교 토목공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Mokpo National University)

달라지는 요인이 존재한다. 특히 공용 중 시설물의 경우 AET의 높은 민감도로 인해 기계 설비나 동적 하중에 의해 발생하는 배경잡음(background noise)을 결합 신호로 오판할 수 있기 때문에 신뢰성 높은 식별 및 분석 기법이 요구된다.

콘크리트 구조물에 AET를 활용한 연구는 주로 반복 재하 시험으로 AE 신호를 계측하고, 일반강도의 콘크리트에 손상이 발생할 때 음향방출 신호가 활성화되는 특성을 이용한 파라미터 기반 해석이 수행되었다³⁻⁷⁾. 대부분의 연구에서는 AE 신호의 배경잡음과 마찰에 의한 영향을 해석 과정에서 추가적으로 필터링하거나 문턱전압(threshold voltage)을 높이는 방법을 적용하는데, 이 방법은 콘크리트와 철근의 부착 균열과 같이 인장 및 휨 균열에 비해 상대적으로 작은 진폭으로 나타나는 경우 효과적인 방법이다⁸⁾. 하지만 반복하중이 작용할 때 균열 면의 마찰로 인해 발생하는 AE 신호는 구분하여 해석하는 것이 효과적이고, Park 등⁹⁾은 재하 시 발생하는 신호와 제거(unloading) 시 발생하는 신호를 구분하여 특성을 비교하는 방법을 제안하였다. 또한 고강도 콘크리트 보의 손상평가와 관련한 최근의 연구는 AE 파라미터 중 AE 에너지를 이용한 PSC 교량 내부 긴장재의 건전성 평가에 초점이 맞춰져 있다^{10,11)}. AE 에너지를 이용한 손상지표는 Sagasta 등¹²⁾의 연구를 통해 신뢰성이 입증되었고, 누적 AE 에너지와 콘크리트의 소성변형에너지의 상관관계를 기반으로 하는 손상지수는 작용 하중의 휴지기가 발생한 후에도 이전의 상태와 비교할 수 있기 때문에 상시 모니터링에 적용하기에 유용한 기법이다¹³⁾.

본 연구에서는 반복하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보의 4점 휨 시험을 통해 휨 거동 단계별 AE 신호를 취득하였고, 균열조사도 함께 실시하였다. AE 신호는 하중이 작용하는 1차 신호와 하중이 제거되는 2차 신호로 분류하였고, AE 파라미터의 발생빈도를 비교하는 활성화도 분석을 수행하였다. AE hit의 활성화도 분석 결과, AE 신호의 특성만으로는 휨 거동 시 주 균열이 형성되고 철근이 항복할 때의 상태 변화를 명확하게 구분하는데 한계가 있음을 확인하였다. 이에 대한 해결방안으로 AE 에너지 기반 손상지수 해석을 이용하여 상호 비교하고 검증함으로써 손상평가의 신뢰성을 개선하는 방법을 제안하였다.

2. 실험 및 손상평가 기법

2.1 휨 파괴모드 분류

휨 하중을 받는 철근콘크리트 보의 재료적 손상 및

Table 1. Classification of flexural failure mode³⁾

Mode	Classification
I	micro-cracks nucleation and propagation
II	macro-cracks formation
III	macro-cracks stable propagation
IV	main rebar's yielding and macro-cracks opening

강성 저하 시 균열과 변위의 형태로 상태변화가 나타나고 단계별로 구분할 수 있다. Park 등⁹⁾은 휨 이론을 적용하여 하중의 크기에 따라 5단계로 분류하였는데, 콘크리트에 균열이 발생하지 않은 상태, 인장측 콘크리트의 인장응력이 파괴계수에 도달하기 전 미세균열의 성장, 인장응력이 파괴계수에 도달하여 인장균열의 성장, 양단부의 사인장 균열의 성장, 철근의 항복 및 파괴의 순서이다. 반면 Jiao 등³⁾은 AE 센서가 하중이 작용하는 순간부터 내부에서 발생하는 비가시성 미세 균열까지 측정할 수 있는 특성을 반영하여 균열의 발생 및 상태에 따라 Table 1과 같이 4단계로 분류하였다. 본 연구에서도 균열의 상태에 따라 4단계 휨 파괴모드를 적용하였고, 각 단계의 상태는 다음과 같다.

1단계(Mode-I)는 하중이 작용했을 때 미세균열이 형성되고 전파되는 단계로 외부에서 콘크리트의 인장응력이 파괴계수에 도달하지 않아 전단면이 유효한 상태이다. 2단계(Mode-II)는 주 균열이 형성되는 단계로 인장응력이 파괴계수에 도달하여 중립축 하부는 보강 철근만 전인장에 저항하는 상태이다. 또한 이미 발생한 미세균열이 중립축을 넘어 압축부까지 성장하지만, 철근의 저항력으로 인해 균열의 폭은 크지 않는 상태이다. 3단계(Mode-III)는 주 균열이 안정적으로 전파되는 단계로 균열의 폭이 증가하고 전단력과 휨모멘트의 복합작용으로 인해 사인장 균열이 발생할 수 있는 상태이다. 마지막 4단계(Mode-IV)는 철근이 항복하여 주 균열이 열리는 단계로, 균열 폭의 열림과 함께 압축부의 파괴가 진행되고 심각한 변형이 발생하는 상태이다.

2.2 실험 및 계측 시스템

철근콘크리트 보의 휨 거동에 의해 발생하는 균열을 조사하고 각 파괴모드에 대한 음향방출의 특성을 분석하기 위하여 4점 휨 시험(four-point bending test)을 실시하였다. 시험체의 콘크리트 압축강도는 60 MPa이고, Fig. 1과 같이 300 mm×200 mm×3,000 mm (h×w×l) 크기이다. 보강 철근은 항복강도 400 MPa (SD400)으로 D16의 하부 인장철근과 D10의 상부 압축철근, 전단보강근을 사용하였다. 또한, 사인장 균열의 영향을 최소화하기 위하여 양단부의 전단보강근은

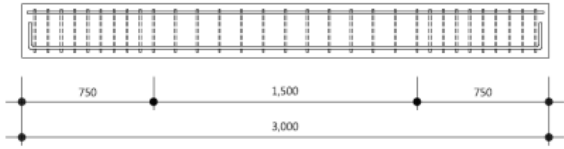


Fig. 1. Schematic diagram of longitudinal section of RC beam.

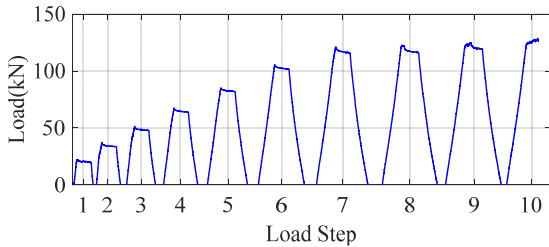
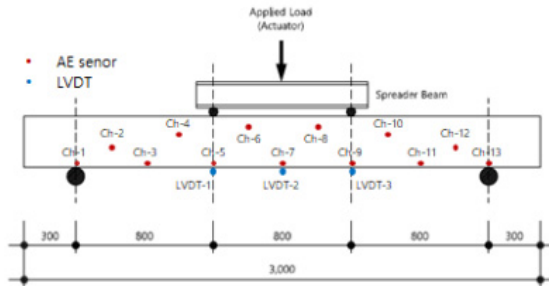


Fig. 2. Load protocol.



(a) Test set-up



(b) Sensor configuration

Fig. 3. Layout of four-point bending test.

75 mm 간격으로 배치하였다. 작용 하중은 1,500 kN 용량의 액츄에이터에 연결된 스프레더 보를 통해 집중하중이 Fig. 2와 같이 반복하중으로 작용하였다. 또한, 하중재하 방법은 1.5 mm의 변위를 단계별로 증가시키는 변위제어방식이고, 각 단계의 최대 하중에 도달하면 정지(holding) 상태에서 균열의 발생과 폭을 측정하였다.

AE 센서는 특성에 따라 신호가 왜곡될 수 있으므로 재료의 특성과 시험의 목적을 고려하여 적절한 선택이 필요하다. 특정 주파수 대역의 감도를 극대화하기 위한 공진형(resonant type)은 재료의 균열이나 취성 재료의 파괴와 같이 독립적이고 불연속적인 돌발형(burst) 신호의 활성도 분석에 적합하고, 넓은 주파수 대역에

활용 가능한 광대역형(broadband type)은 연속형 신호에 대한 파형 분석 등에 적합하다. Yuyama 등⁴⁾은 콘크리트의 경우 공진형 AE 센서가 적합하며 전체 구조물과 같이 넓은 범위는 60 kHz, 부재와 같이 좁은 범위는 150 kHz를 사용하고, 40 dB의 문턱전압을 설정할 것을 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 150 kHz 공진형 센서를 사용하였고, AE 신호의 감쇠를 고려하여 Fig. 3과 같이 보의 측면에 총 13개(Ch-1~13)를 배치하였다.

2.3 음향방출 파라미터 분석 및 손상평가 기법

AE 신호의 전체 파형을 기록하여 분석하는 방법은 측정 데이터의 양이 너무 많아 비효율적이므로 파형 정보를 변수화한 파라미터를 사용하여 분석하는 것이 일반적이다. AE 파라미터는 Fig. 4와 같이 큰 진폭을 가진 돌발형(burst) 신호를 중심으로 정의하며, 문턱전압을 기준으로 배경잡음과 음향방출 신호를 분류한다. 문턱전압을 초과한 하나의 파장(pulse)은 count이고, 일정 시간 동안 추가적인 count가 발생하지 않는다면 1회의 돌발형 신호인 AE hit가 발생한 것으로 정의한다. AE hit는 첫 번째 count에서 최대 진폭(peak amplitude)이 발생하는 count까지 걸리는 시간(rise time)과 마지막 count까지의 지속시간(duration)에 대한 정보를 포함하고 있으며, AE 진폭과 지속시간이 형성하는 포락선의 면적이 AE 에너지이다.

음향방출의 활성도 분석(activity analysis)은 AE 파라미터의 발생빈도를 비교하여 균열의 상태를 추정하는 기법이다. 반복하중이 작용하는 보에 하중이 작용할 때 발생하는 1차 신호는 균열과 연관성이 있고, 하중이 제거되면서 발생하는 2차 신호는 균열 면의 마찰과 관련이 있다. 따라서 각 신호에서 계측된 AE hit의 발생빈도를 비교하면 휨 거동에 의한 상태를 추정할 수 있다.

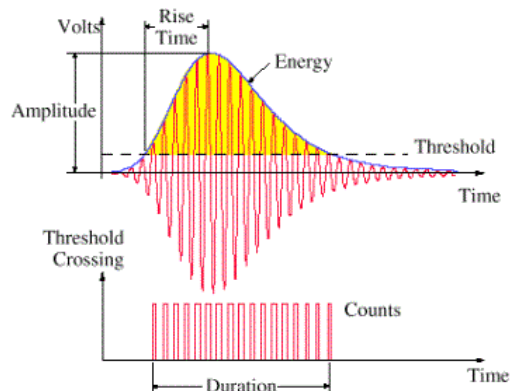


Fig. 4. A typical AE signal¹⁴⁾.

손상지수(damage index)는 콘크리트에 새로운 균열이 형성될 때 AE 에너지의 방출량이 증가하는 특성을 이용하여 누적 AE 에너지와 콘크리트의 소성변형에너지 사이의 상관관계에 기반한 손상평가 기법이다. 누적 AE 에너지는 균열의 강도와 관련이 있고, 에너지 기반 손상지수(ID^E)는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$ID^E = \frac{E^{AE}}{E_D^{AE}} \quad (1)$$

여기서, E^{AE} 는 각 하중 단계에서 방출된 AE 에너지이고, E_D^{AE} 는 시험 종료 시 누적된 총 AE 에너지이다.

3. 실험 결과

3.1 균열조사

철근콘크리트 보 경간 중앙의 변위(Δ_c)를 1.5 mm씩 증가시킨 휨 시험에서 파괴하중(P_u)은 약 130 kN이고, 8단계까지 관찰한 균열은 Fig. 5에 나타내었다. 또한, 최대 균열이 발생한 위치는 빨간색(# 번호)로 표시하였으며, 디지털 균열현미경을 이용하여 측정된 최대 균열의 폭은 Fig. 6에 도시하였다. 하중 1단계($\Delta_c = 1.5, 0.16P_u$)는 표면의 균열이 관찰되지 않았고, 2단계($\Delta_c = 3.0, 0.27P_u$)는 순수 휨(pure bending)을 받는 영역의 중립축 하부에 다수의 균열이 발생하였다. 3단계($\Delta_c = 4.5, 0.38P_u$)는 일부 균열이 중립축을 넘어 압축부로 전파되었고, 휨과 전단의 영향을 받는 영역에서 추가 균열이 관찰되었다. 이후 4단계($\Delta_c = 6.0, 0.50P_u$)는 대부분의 균열이 압축부까지 전파되었고, 5단계($\Delta_c = 7.5, 0.65P_u$)는 지점 근처에 추가 균열이 발생하였다. 6단계($\Delta_c = 9.0, 0.81P_u$) 이후로는 새로운 균열이 발생하지 않았지만 7단계($\Delta_c = 10.5, 0.93P_u$)까지 균열의 폭이 증가하였다. 8단계($\Delta_c = 12.0, 0.94P_u$) 이후 Fig. 7(a)의 응력-변형률 곡선과 Fig. 7(b)의 잔류변위(Δ_R)에서 확인할 수 있듯이 철근의 항복으로 인한 소성변형이 진행되었고, 균열의 폭이 급격히 증가하였다.

휨 파괴모드는 하중 단계별 균열 상태와 최대 작용 하중을 비교하면 다음과 같이 구분할 수 있다. 미세균열이 형성되고 전파되는 Mode-I은 약 $0.30P_u$ 인 하중 1~2단계에 해당하고, 주 균열이 형성되는 Mode-II는 약 $0.60P_u$ 인 하중 3~5단계에 해당한다. 또한 주 균열이 안정적으로 전파되는 Mode-III은 약 $0.90P_u$ 인 하중 6~7 단계이고, 철근이 항복하여 주 균열이 열리는 Mode-IV는 $0.90P_u$ 를 초과하는 범위이다.

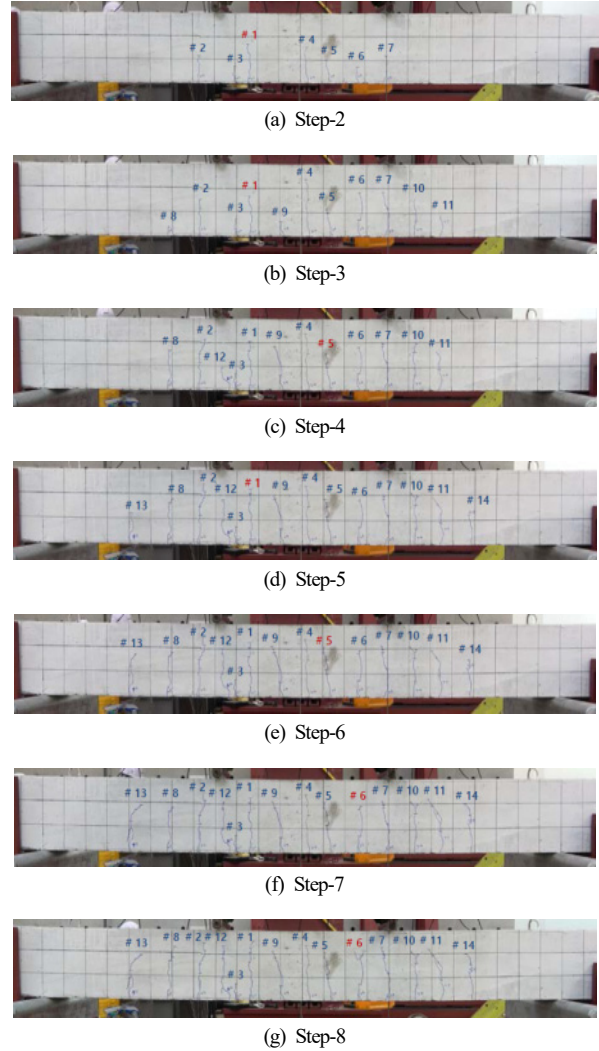


Fig. 5. Crack patterns of specimen.

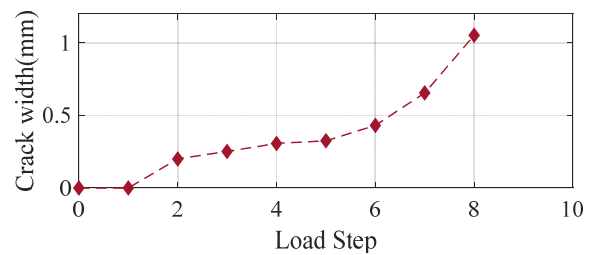


Fig. 6. Maximum crack width.

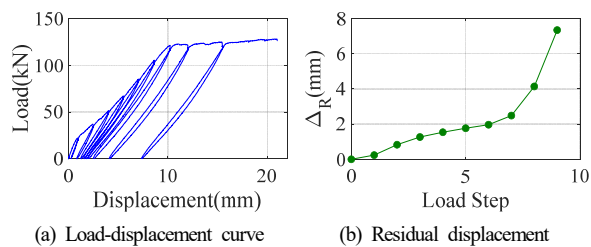


Fig. 7. Load-displacement curve and residual displacement.

3.2 음향방출 파라미터의 활성화도 분석

음향방출 파라미터 중 AE hit는 하나의 돌발형 신호이기 때문에 발생빈도를 분석하면 균열의 상태를 파악할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있다. 철근콘크리트 보의 측면에 설치된 AE 센서 중 4개를 선택하여 각 하중 단계별 1차(primary) 및 2차(secondary) 신호, 전체 신호(all)의 AE hit 발생빈도의 분석 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 보의 중앙부는 휨모멘트만 작용하는 영역으로 휨 거동으로 인한 활성화도를 파악하기에 적합한 위치이므로 중립축 하부(Ch-7)와 상부(Ch-8)에 배치된 AE 센서에서 취득한 신호를 분석하였고, 휨모멘트와 전단력이 최대인 경계영역(Ch-9)과 최대 전단력과 상대적으로 작은 휨모멘트가 작용하는 영역(Ch-11)의 AE

센서에서 취득한 신호를 분석하였다.

미세균열이 형성되고 전파되는 Mode-I ($\leq 0.30P_u$)의 하중 1단계는 균열조사에서 균열이 관찰되지 않았지만 모든 센서에서 AE hit가 발생하였다. 또한, 발생빈도는 최대 휨모멘트가 작용하는 영역(Ch.7~9)에서 상대적으로 높고, 2차 신호가 거의 나타나지 않기 때문에 부재 내부에서 휨에 의한 미세균열이 형성된 것으로 판단할 수 있다. 하중 2단계에서는 1차 신호가 급격하게 증가하고, 2차 신호도 함께 발생하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 경계영역(Ch-9)에서 2차 신호가 상대적으로 높게 나타난 이유는 센서 양쪽에서 다수의 균열이 발생하였고, 이로 인한 마찰 신호가 합산된 것으로 추정된다.

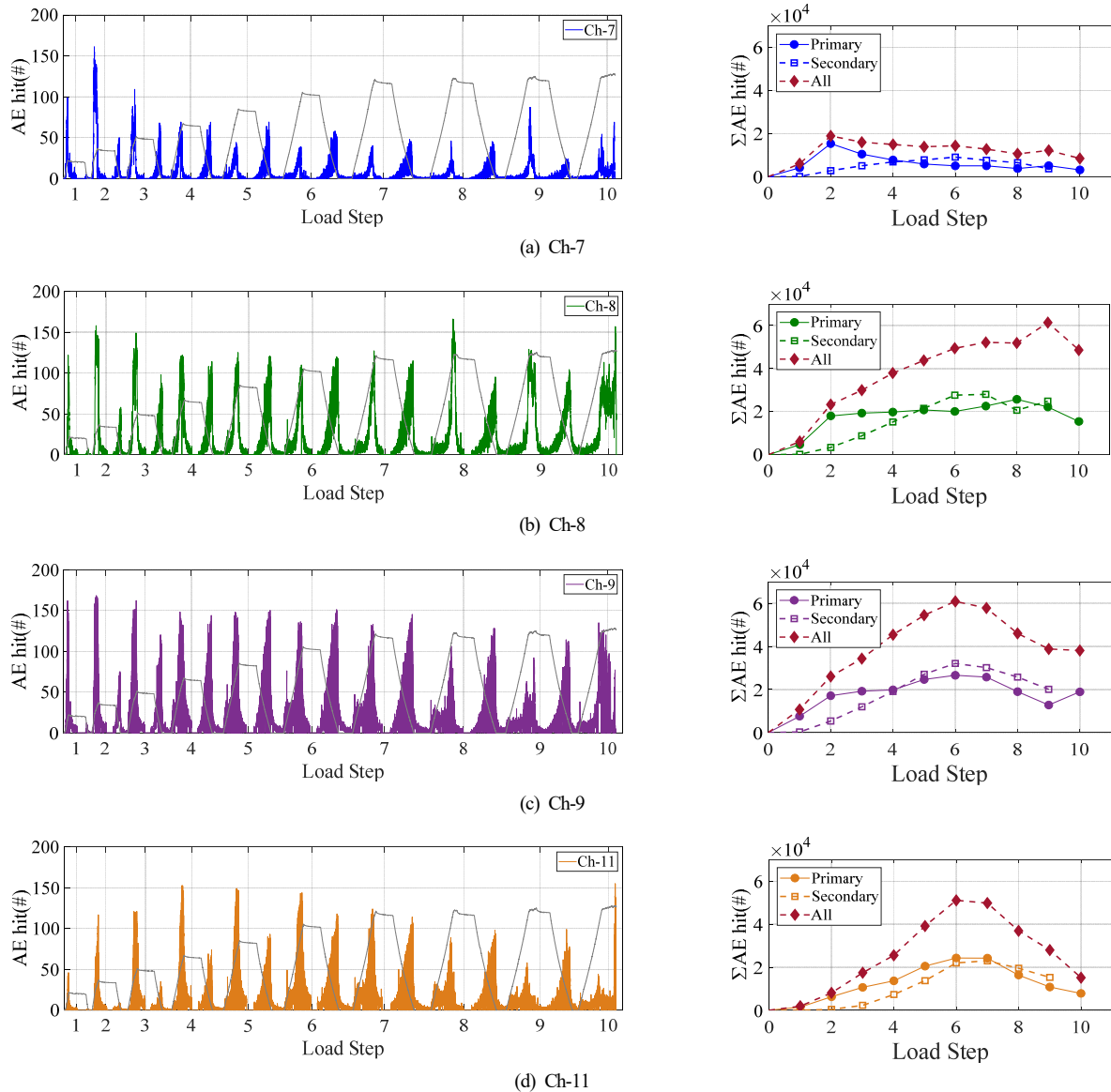


Fig. 8. AE hit distribution and activity analysis.

주 균열이 형성되는 Mode-II($\leq 0.60P_u$)의 하중 3~5 단계는 중앙부의 중립축 하부(Ch-7)에서 1차 신호가 상대적으로 감소하기 시작하였고, 중립축 상부(Ch-8)와 경계영역(Ch-9)에서는 비슷한 발생빈도를 유지하였다. 해당 영역에 새로운 균열이 발생하지 않지만 2단계와 비슷한 발생빈도를 유지하는 것은 골재와 시멘트 풀 사이의 부착 균열로 인한 것으로 추정되며, 이것은 2차 신호가 지속적으로 증가하는 것으로도 유추할 수 있다.

주 균열이 안정적으로 전파되는 Mode-III($\leq 0.90P_u$)의 하중 6~7단계는 균열의 성장이 완료된 후 마찰로 인한 AE 신호가 증가하여 보의 중앙부(Ch.7~8)에서 2차 신호가 1차 신호보다 높게 나타나기 시작한다. 또한 경계영역(Ch-9)에서 1차 신호가 Mode-II에 비해 증가하는데, 이것은 전단력과 상대적으로 작은 휨모멘트가 작용하는 영역(Ch-11)에서 사인장균열의 영향으로 1차 신호가 증가하는 것과 연관이 있다. 그리고 주 균열이 중립축 상부까지 전파된 중립축 상부(Ch-8)의 7단계 1차 신호가 증가하였다.

철근이 항복하여 주 균열이 열리는 Mode-IV의 하중 8단계 이후 모든 센서에서 계측된 1차 신호는 급격히 감소한다. 다만, 8단계에서 중립축 상부(Ch-8)에서 1차 신호가 증가하는 것은 중립축 상부에서 압축파괴가 진행될 때 발생하는 AE 신호에 의한 것으로 볼 수 있다.

4. 음향방출 파라미터 기반 손상평가

4.1 활성화도 기반 상태평가

AE hit를 1차 신호와 2차 신호로 구분하여 분석한 결과를 균열조사와 비교하여 휨 거동에서 나타나는 AE 파라미터의 특성을 다음과 같이 정리하였다.

Mode-I의 미세균열이 형성될 때, AE hit의 1차 신호는 발생하지만 2차 신호는 발생하지 않았다. 또한, 미세균열이 전파될 때에는 1차 신호가 이전 단계보다 증가하였고, 2차 신호도 함께 발생하였다. 이것은 이전의 최대하중을 초과할 때에만 신호가 증가하는 카이저효과(Kaiser effect)에 의해 1차 신호가 지속적으로 증가하는 것이고, 미세균열이 발생하면 균열 면의 마찰로 인해 2차 신호가 함께 나타나는 것이다.

Mode-II의 주 균열이 형성되는 상태에서는 AE hit의 1차 신호의 발생빈도가 이전 단계와 비슷하거나 감소하였지만, 2차 신호는 계속 증가하였다. 이 단계에서는 1차 신호의 활성화도가 다양한 형태로 변화하였고, 특히, 추가 균열이 생성되는 측정 위치에서 1차 신호가 계속 증가하는 특성이 나타나는 등 활성화도 분석만으로 상태를 명확하게 구분하는 것은 쉽지 않다.

Mode-III의 주 균열이 안정적으로 전파되는 상태에서는 주 균열의 폭이 증가하면서 2차 신호가 1차 신호를 초과하였고, Mode-IV의 철근이 항복하여 주 균열이 열리는 상태에서는 2차 신호가 1차 신호를 초과한 상태를 유지하면서 모든 신호가 이전 단계보다 감소하는 경향이 나타났다.

AE hit의 1차 신호와 2차 신호의 활성화도를 이용하는 상태평가 기법은 Mode-I과 Mode-III의 경우 명확하게 구분할 수 있는 특성이 나타났지만, Mode-II와 Mode-IV의 경우 한계가 있음을 확인하였다. 특히, 주 균열의 형성과 철근의 항복은 시설물의 유지관리 및 구조건전성에 있어 매우 중요한 요소이므로 명확하게 구분하기 위한 추가적인 기법이 요구된다.

4.2 에너지 기반 손상지수 해석

콘크리트에 새로운 균열이 형성될 때 AE 에너지의 방출량이 증가하는 특성에 기반한 손상지수는 활성화도 기반 상태평가의 한계인 Mode-II와 Mode-IV의 상태를 다음과 같이 구분할 수 있음을 확인하였다.

휨모멘트의 영향을 받는 위치(Ch-7~9)에서 취득한 1차 신호의 AE 에너지를 이용하여 손상지수를 해석한 결과, Fig. 9 (a)~(c)와 같이 Mode-II에서의 기울기가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 주 균열인 휨 균열이 형성되면서 AE 진폭과 지속시간에 의해 형성된 AE 에너지가 방출된 것으로, AE hit의 활성화도 분석의 1차 신호의 특성과 분명한 차이를 보인다. 특히, 주 균열이 형성될 때 방출되는 AE 에너지는 미세 균열이 형성될 때 방출되는 AE 에너지보다 상대적으로 매우 크기 때문에 Mode-I의 손상지수와 큰 차이를 보였다. 이후 주 균열이 안정적으로 전파되는 Mode-III에서 기울기가 감소하지만, 철근이 항복하는 8단계에서는 다시 기울기가 급격히 증가하는 특성이 나타났다. 또한, 상대적으로 작은 휨모멘트가 작용하는 영역(Ch-11)에서는 Fig. 9 (d)와 같이 Mode-II의 4단계에서 기울기가 증가하고, 철근이 항복하는 8단계에서 기울기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이, 반복하중이 작용하는 철근콘크리트 보의 휨 거동 시 상태 변화는 계측된 AE hit의 활성화도를 이용하여 간단하게 파악할 수 있고, 주 균열이 형성되어 철근이 항복하기까지의 손상도는 추가적으로 손상지수를 이용하여 상호 비교함으로써 명확하게 구분하고 검증할 수 있음을 확인하였다. 또한, 손상지수는 누적 AE 에너지를 이용하기 때문에 전체 모니터링 동안의 상태를 비교할 수 있고, 작용 하중의 휴지기가 발생하더라도 이전 상태와 비교할 수 있는 장점이 있다.

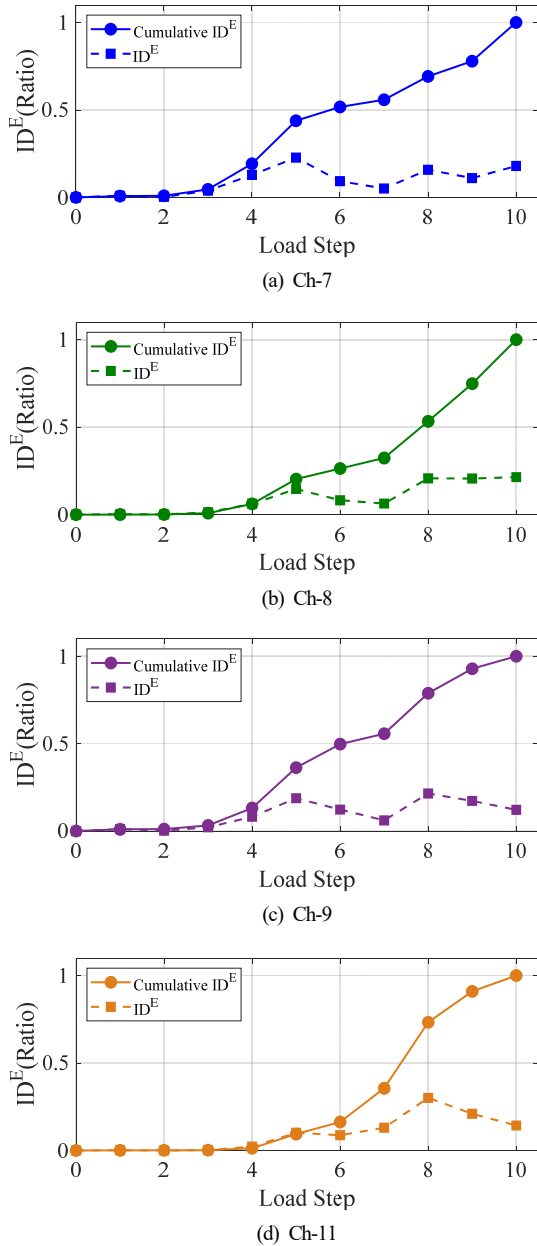


Fig. 9. Results of damage index analysis.

5. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 보의 휨 거동에서 AE 파라미터의 신호를 분류하여 활성화 분석과 손상지수를 상호보완적으로 이용하는 손상평가 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 AE 파라미터를 하중 재하 시 균열의 영향을 받는 1차 신호와 하중 제거 시 마찰의 영향을 받는 2차 신호를 분류하고 각 신호의 활성도를 분석한 후, AE 에너지를 이용한 손상지수와 비교함으로써 추가적으로 검증하는 방법이다. AE hit의 활성화 분석을 이용하면 휨 거동에서 미세균열의 형성 및 전

파 단계인 Mode-I과 주 균열이 안정적 전파 단계인 Mode-III의 상태를 명확하게 구분할 수 있지만, 주 균열이 형성되는 Mode-II와 철근이 항복하는 Mode-IV에서는 명확하지 않은 한계를 보였다. 반면, 1차 신호의 AE 에너지를 이용한 손상지수는 Mode-II와 Mode-IV에서 기울기가 급격히 증가하는 특성을 보였다. 따라서 AE hit의 활성화 분석을 통해 간단한 방법으로 휨 거동의 상태를 구분하고, AE 에너지 기반 손상지수 해석을 추가하면 주 균열이 형성되고 철근이 항복하는 단계를 명확하게 구분하고 검증할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 손상평가 기법의 활성화 분석은 측정되는 AE 파라미터의 발생빈도를 비교함으로써 초기 손상인 미세균열을 탐지하거나 진행성 손상인 주 균열의 전파 상태를 추정할 수 있고, 손상지수는 구조건전성에 민감한 손상인 주 균열과 철근의 항복으로 인한 상태 변화를 검증할 수 있음을 확인하였다. 특히 동적하중이 작용하는 시설물의 경우 음향방출의 1차 신호와 2차 신호가 반복적으로 발생하기 때문에 제안하는 기법은 구조물의 상시 모니터링에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 제안하는 기법은 철근콘크리트 보의 휨 거동에만 제한적으로 적용할 수 있기 때문에 다른 파괴모드에 대한 추가 연구가 요구된다. 특히, 교량과 같이 대형 구조물의 모니터링을 수행하는 경우 구조형식 또는 부재의 위치에 따라 다양한 거동이 나타나므로, 구조적 중요도와 거동의 특성을 고려하여 센서의 위치와 수량을 결정할 필요가 있다. 향후 연구를 통하여 다양한 파괴모드에 의한 손상 상태를 분류할 수 있는 통합적 손상평가 기법과 콘크리트 재료의 이방성 및 비균질성으로 인해 발생하는 신호 특성 변화 및 감쇠의 영향을 함께 고려할 수 있는 AE 센서의 최적 배치 연구도 필요하다.

Acknowledgement: This research was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE)[grant number 20191510301470].

References

- 1) J.-H. Kim, B.-H. Han, D.-C. Seo and D.-J. Yoon, "Acoustic Emission Signal Analysis for Damage Assessment of the Reinforced Concrete Slab Structures", Journal Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 29, No. 4, pp. 360-367, 2009.

- 2) C. Ouyan, E. Landis and S. P. Shah, "Damage Assessment in Concrete using Quantitative Acoustic Emission", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 11, pp. 2681-2698, 1991.
- 3) Y. Jiao, Y. Zhang, W. Shan, Q. Han, Y. Zhao and S. Liu, "Damage Fracture Characterization of Reinforced Concrete Beam Subjected to Four-point Bending with Parametric Analysis of Static, Dynamic, and Acoustic Properties", *Structural Health Monitoring*, Vol. 19, pp. 1202-1218, 2019.
- 4) S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeishi, M. Ohtsu and T. Kishi, "A Proposed Standard for Evaluating Structural Integrity of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission", *ASTM STP 1353*, pp. 25-40, 1999.
- 5) Z. Li, F. Li, A. Zdunek, E. Landis and S. Shah, "Application of Acoustic Emission Technique to Detection of Rebar Corrosion in Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 1, pp. 68-76, 1998.
- 6) K. Ohno and M. Ohtsu, "Crack Classification in Concrete based on Acoustic Emission", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 12, pp. 2339-2346, 2010.
- 7) M. Ohtsu, M. Uchida, T. Okamoto and S. Yuyama, "Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams by Acoustic Emission", *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, pp. 411-417, 2002.
- 8) B.-H. Oh, E.-J. Kim, K.-S. Kim and S.-W. Yoo, "Identification of Damage Characteristics Due to Cracking of Concrete Structures Using Acoustic Emission", *Journal of the Korean Concrete Institute*, Vol. 11, No. 4, pp. 107-116, 1999.
- 9) P. Park, D.-J. Yoon, J.-C. Jeong, D.-J. Kim and Y.-H. Huh, "Acoustic Emission Behavior during Damage Development of Reinforced Concrete Beam", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 2, pp. 116-124, 2003.
- 10) D. H. Kim, Y. K. Hong, D.-W. Seo and K.-T. Park, "Integrity Evaluation Technology of PSC Bridge Tendons Using Acoustic Emission Technique", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 39, No. 1, pp. 37-44, 2019.
- 11) D. H. Kim, Y. K. Hong, D.-W. Seo and J. Kim, "Fracture Behavior of Internal Tendon in PSC Structure Using Acoustic Emission Technique", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 39, No. 6, pp. 362-368, 2019.
- 12) F. Sagasta, A. Benavent-Climent, A. Roldan and A. Gallego, "Correlation of Plastic Strain Energy and Acoustic Emission Energy in Reinforced Concrete Structures", *Applied Sciences*, Vol. 6, No. 3, pp. 84-98, 2016.
- 13) A. Benavent-Climent, A. Gallego and J. M. Vico, "An Acoustic Emission Energy Index for Damage Evaluation of Reinforced Concrete Slabs under Seismic Loads", *Structural Health Monitoring*, Vol. 11, No. 1, pp. 69-81, 2011.
- 14) M. Huang, L. Jiang, P. K. Liaw, C. R. Brooks, R. Seeley and D. L. Klarstrom, "Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 50, No. 11, pp. 1-11, 1998.