

음향방출 파형 파라미터 필터링 기법을 이용한 실시간 음원 분류

Real-Time Source Classification with an Waveform Parameter Filtering of Acoustic Emission Signals

조승현*[†], 박재하*, 안봉영*

Seung Hyun Cho*[†], Jae Ha Park* and Bongyoung Ahn*

초 록 음향방출기법은 대형 구조물의 구조건강성감시(SHM)를 위한 매우 효율적인 방법이지만, 롤러코스터 지지구조물처럼 승용물의 운행으로 인한 매우 큰 잡음이 일상적으로 존재하는 경우에는 균열 진전 신호만을 분류하여 실시간 감시를 수행하기가 쉽지 않다. 이와 같은 문제의 해결을 위해 본 연구에서는 실시간으로 음원의 분류가 가능한 파형 파라미터 필터링 기법을 제안하였다. 파형 파라미터 필터링 기법은 음향방출 신호의 파형 파라미터를 이용하여 음향방출 히트를 사전에 필터링함으로써 실시간으로 감시하고자 하는 대상 음원만을 분류해내는데 매우 유리한 점이 있다. 다양한 음원에 대해 음향방출 파형 파라미터를 측정 및 분석하여 제안한 기법의 타당성을 살펴보았다. 또한, 파형 파라미터 필터가 내장된 음향 방출 시스템을 구축하고 이를 실제 롤러코스터 지지구조물에 적용하여 실시간 균열진전 감시를 위한 가능성을 타진하였다.

주요용어: 음향방출, 파형 파라미터 필터링, 롤러코스터, 균열 진전 감시, 실시간 음원 분류

Abstract The acoustic emission(AE) technique is a well established method to carry out structural health monitoring(SHM) of large structures. However, the real-time monitoring of the crack growth in the roller coaster support structures is not easy since the vehicle operation produces very large noise as well as crack growth. In this investigation, we present the waveform parameter filtering method to classify acoustic sources in real-time. This method filtrates only the AE hits by the target acoustic source as passing hits in a specific parameter band. According to various acoustic sources, the waveform parameters were measured and analyzed to verify the present filtering method. Also, the AE system employing the waveform parameter filter was manufactured and applied to the roller coaster support structure in an actual amusement park.

Keywords: Acoustic Emission, Waveform Parameter Filtering, Roller Coaster, Crack Growth Monitoring, Real-Time Source Classification

1. 서론

1.1. 연구의 배경

음향방출(acoustic emission, AE)이란 손상 및 열화로 인하여 재료 내부에 국부적으로 형성된 변형에너지가 급격히 방출되면서 발생하는 탄성

파를 측정하여 구조물의 건전성을 평가 및 감시하는 기술이다. 음향방출기법은 종래의 대표적인 비파괴검사 방법인 초음파탐상법과 함께 금속 구조물 등의 비파괴검사에 널리 이용되고 있으며 [1-3], 균열의 발생 및 진전에 매우 민감한 특성을 가지고 있어 재료의 손상도 평가를 위한 메커니즘 연구에 널리 적용되어 왔다. 능동적으로 특

정 초음파를 국부적인 영역에 인가하여 그에 따른 반응을 측정하여 재료를 검사하는 초음파탐상법과는 달리, 음향방출기법은 다양한 원인에 의해 구조물내 음원으로 부터 발생한 탄성파를 수동적으로 모니터링하며 측정된 신호를 분석해서 구조물의 건전성을 진단한다. 이 기법은 극도로 민감한 음향방출 센서를 다수 설치하여 진단 및 감시를 수행하므로, 교량 및 압력용기 등과 같은 대형 구조물에도 적용이 가능하므로 구조건전성 감시(structural health monitoring; SHM) 분야에서도 적용하고자 하는 시도가 매우 활발하다[4-10].

음향방출기법은 주로 대상의 상태를 감시하고자 하는 목적에 적용되는데, 음향방출 센서로 측정되는 탄성파형의 크기가 설정한 문턱값(threshold level)을 넘어설 때를 히트(hit)라고 정의하고 히트 파형의 정보를 이용하여 이를 근거로 사건(event)을 판단하게 된다[11]. 현재 구조물에 적용되는 대부분의 음향방출 감시 기법은 원신호의 크기가 문턱값을 넘었을 때 발생한 히트의 빈도나 지속 양상을 기준으로 이상이 발생했다고 판단하는 알고리즘을 적용하고 있다.

하지만, 이러한 알고리즘은 갑자기 문턱값 이상의 잡음 또는 감시 대상이 아닌 음원이 발생했을 때 감시 결과의 오류를 유발하여 음향방출 시스템의 신뢰성을 저하시킨다. 특히, 감시 대상이 필연적으로 큰 에너지의 불연속 또는 비정기적 음원(acoustic source)을 동반하는 경우에는 이에 따른 문제가 심각하다. Fig. 1(a)는 탄소강 배관에서 초음파 변환기로 가진한 중심주파수 1 MHz의 탄성파 음원을 음향방출 센서로 측정된 신호의 파형을 나타낸 것이다. 이 때 감시 대상이 되는 음원이 Fig. 1(a)와 같은 신호라면 적절한 문턱값을 적용하여 측정된 히트로 음원의 발생을 판단할 수 있다. 하지만, Fig. 1(b)에서처럼 감시하고자 하는 음원이 다른 음원 신호와 함께 측정되는 경우는 측정된 히트의 양상만으로 음원의 판단이 불가능해진다. 실제 구조물에 음향방출 시스템을 적용할 때 이러한 문제는 빈번히 발생할 수밖에 없는데, 대표적인 예로 유원시설의 롤러코스터 지지구조물에 균열 진전을 감시하는 경우를 들 수 있다. 롤러코스터 지지구조물의 경우 롤러코스터 운행으로 인한 외력이 구조물내 균열 발생 및 진전의 주원인이므로 롤러코스터의 운행 잡음과 균열로 인한 음향 방출 신호가 동시에 발

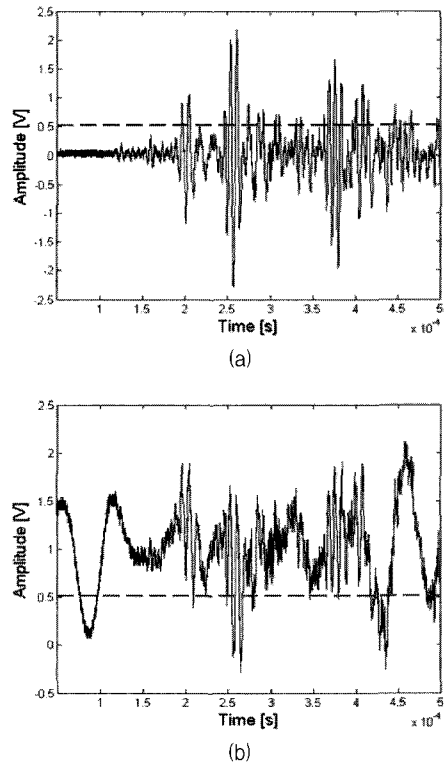


Fig. 1 The measured acoustic emission waveforms at a steel pipe with a 50 kHz resonance AE sensor (a) when excited by a 1 MHz ultrasonic transducer and (b) when excited by a 1 MHz ultrasonic transducer and rubber hammer impact simultaneously

생하게 되는데, 이 때 문턱값을 넘는 히트에만 근거하여 판단하는 것은 균열 감시 결과에 왜곡을 가져올 가능성이 매우 크다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 파형 파라미터 필터링 기법(waveform parameter filtering method)을 제안하고자 한다. Fig. 2(a)와 같은 기존의 시스템이 음향방출 센서와 음향방출 신호 분석 시스템 사이에 주파수 대역 필터를 적용한 것에 그친데 반해, 제안한 방법은 Fig. 2(b)에서 나타난 개념과 같이 파형 파라미터를 이용한 필터를 추가하여 최종적으로 음향방출 히트를 판단하는 기법이다. 제안한 기법은 검출하고자 하는 이상이 갖는 특징적인 파형 파라미터의 값을 적용한 필터를 적용함으로써, 추후 별도의 신호처리가 없이 최종적으로 감지된 히트만을 기준으로 구조물 이상신호의 실시간 감시가 가능하다.

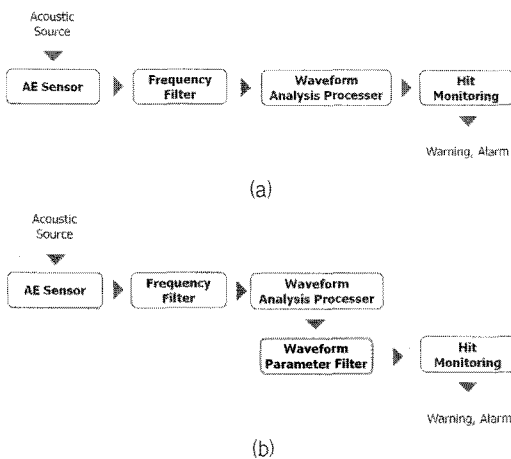


Fig. 2 The schematic diagram of (a) the existing typical acoustic emission system with a frequency filter and (b) the proposed acoustic emission system employing a waveform parameter filter

본 연구에서는 제안한 방법의 적용을 위해서 파형 파라미터 필터가 적용된 음향방출 분석 시스템을 개발하였다. 제작된 시스템을 다양한 음원에 대해 적용함으로써 제안한 파형 파라미터 필터의 유효성을 검증하고자 하였다. 최종적으로 앞서 예로 소개한 폴러코스터 지지 구조물의 결합 진전 감시를 음향방출 시스템 구축에 적용 타당성을 검토해보았다.

2. 음원에 따른 파형 파라미터 분석

대개 음향방출 감시 시스템은 저장용량 및 속도 등의 한계로 인해 히트 파형의 원신호(raw data)를 저장하지 않고 파형의 특성을 실시간으로 계산해서 그 정보만을 저장한다. 이러한 히트 파형의 특성을 파형 파라미터라고 한다. 대표적인 파형 파라미터로 진폭(amplitude), 에너지(energy), 카운트(count), 상승시간(rise time), 지속시간(duration), 평균주파수(average frequency), 첨두주파수(peak frequency), 중심주파수(frequency centroid) 등이 있다[11]. 일반적으로 음향방출 시스템을 통해서 파형의 원신호를 분석할 수는 없지만 측정된 파형 파라미터를 이용하면 많은 정보의 유추가 가능하다.

음원에 따른 파형 파라미터의 영향을 확인하기 위해서 다양한 음원을 대상으로 음향방출 신호를

측정하였다. 음원별 음향방출 신호의 측정에는 본 연구에서 개발한 음향방출 시스템을 사용하였다. 각각 중심주파수가 50 kHz, 100 kHz, 500 kHz, 1 MHz인 상용 압전형 초음파 변환기로 발생시킨 탄성과 신호와 연필심 파괴(pencil lead break; PLB), 고무망치(rubber hammer impact), 강구 낙하(steel ball drop), 칼날 충격(cutter blade impact) 등 8종류의 음원을 가진 후 음향방출 센서로 신호를 측정하였다. 구조물 시편으로는 직경 약 30 cm, 두께 6 mm 인 탄소강 배관을 이용하였고, 측정 센서로는 Fuji Ceramics사에서 제작한 140 kHz 중심주파수의 공진형 음향방출 센서를 사용하였다. 음원을 제외한 다른 모든 조건은 서로 동일한 상태로 유지한 채로 음향방출 시험을 수행하였다.

Fig. 3은 각 음원에 따라 측정된 히트의 파형 파라미터 중 카운트 값의 분포를 보여주고 있다. Fig. 3의 결과에서 나타나듯이 음원이 다를 때 파형 파라미터의 값이 서로 다른 영역에 분포함을 할 수 있다. 음원에 따라 카운트 값의 분포 대역이 넓은 경우도 있고 다른 음원과 대역이 서로 겹치는 부분도 있지만 음원과 카운트 값의 대역은 어느 정도 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 영향은 다른 파형 파라미터의 경우도 비슷하다. Fig. 4는 각 음원에 의해 측정된 평균주파수 값의 분포를 도시한 것이다. 역시, 음원에 따라 다소 차이가 나지만, 앞의 경우와 비슷하게 각 음원에 따라 비슷한 대역에 밀집하여 분포함을 알 수 있다. 초음파 변환기 가진 신호처럼 시험을 수행할 때 반복성이 좋은 음원들의 경우 그 분포가 상당히 밀집되어 있는데 반해, 강구 낙하나 칼날 충격 등과 같이 반복성이 나쁜 경우에 변수가 대역이 넓다.

이렇게 음원에 따른 파형 파라미터 측정 시험을 통하면 특정 음원의 파형 파라미터 값의 분포를 알 수 있다. 동일한 조건하에서 100 kHz 초음파 변환기 음원으로부터 측정된 음향방출 신호의 카운트는 거의 300 ~ 400 사이의 값을 가진다. 따라서, 카운트가 300 이하 또는 400 이상인 히트는 100 kHz 초음파 변환기가 가진 히트 신호가 아닐 확률이 매우 크다. 따라서, 파형 파라미터 값을 기준으로 필터링을 수행하면 원하지 않는 음원신호의 효율적인 차단이 가능함을 유추할 수 있다.

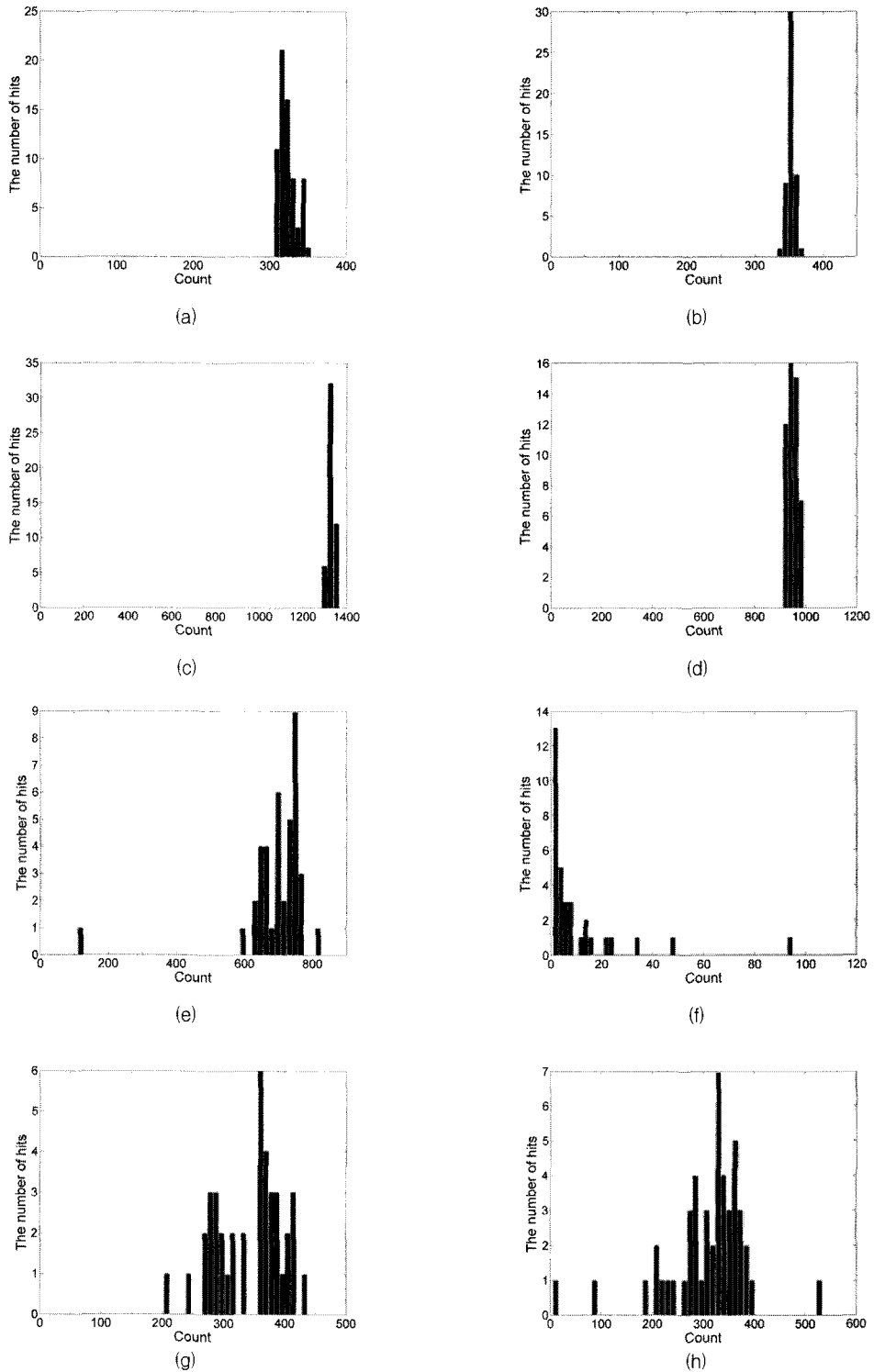


Fig. 3 Distribution of the value of the count according to various acoustic sources; (a) A 50 kHz ultrasonic transducer, (b) A 100 kHz ultrasonic transducer, (c) A 500 kHz ultrasonic transducer, (d) A 1 MHz ultrasonic transducer, (e) Pencil lead breaks, (f) Rubber hammer impacts, (g) Steel ball drops, and (h) Cutter blade impacts

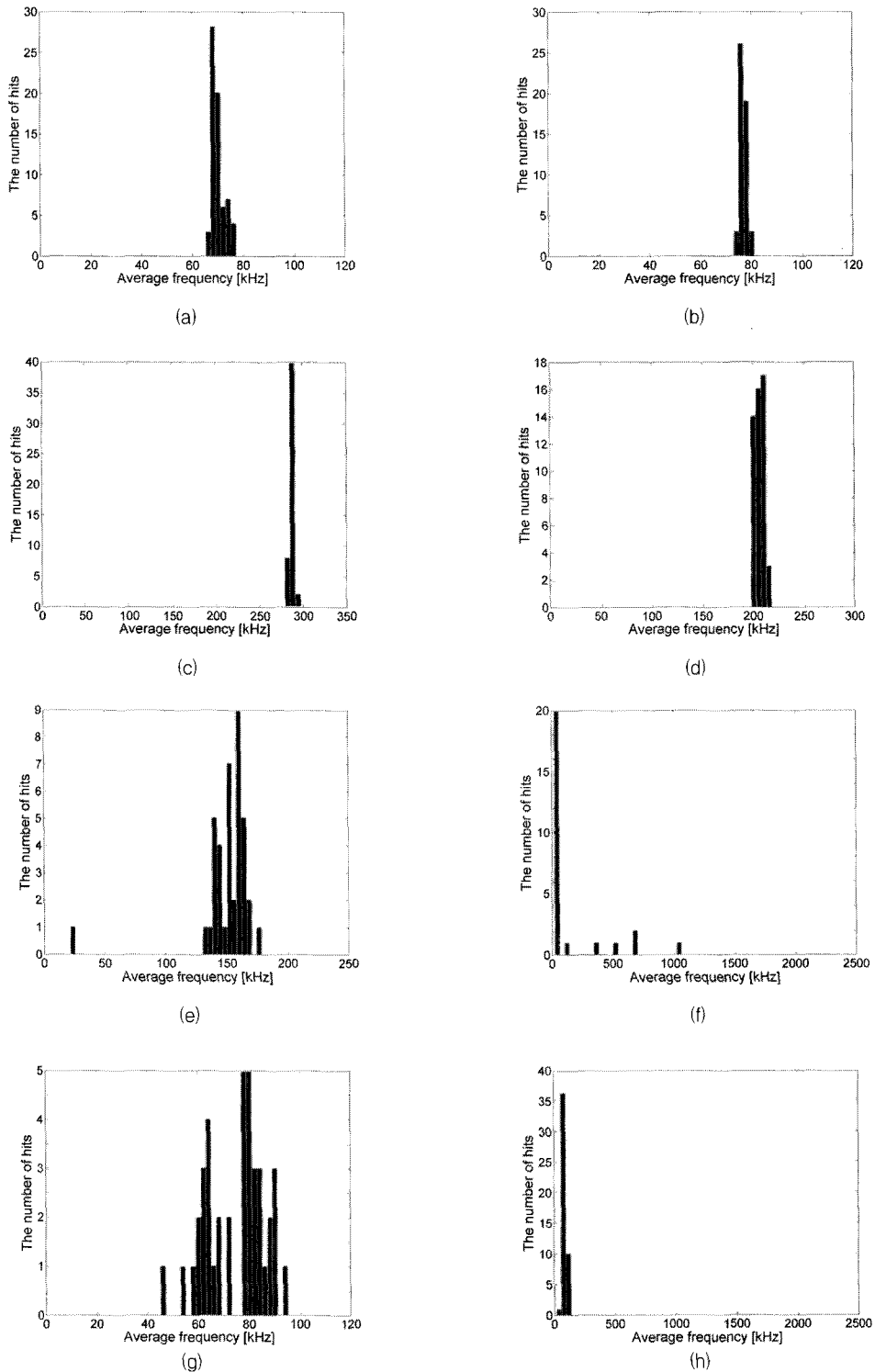
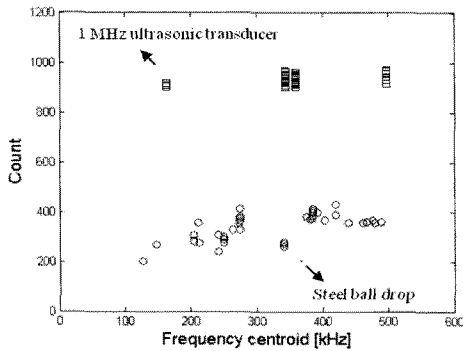
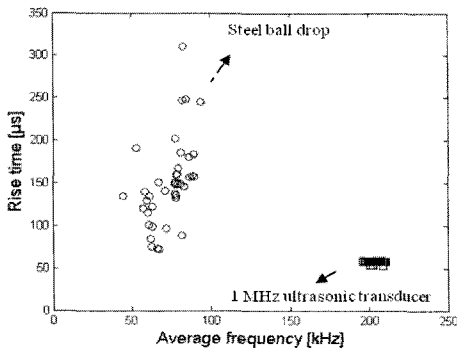


Fig. 4 Distribution of the value of the average frequency according to various acoustic sources: (a) A 50 kHz ultrasonic transducer, (b) A 100 kHz ultrasonic transducer, (c) A 500 kHz ultrasonic transducer, (d) A 1 MHz ultrasonic transducer, (e) Pencil lead breaks, (f) Rubber hammer impacts, (g) Steel ball drops, and (h) Cutter blade impacts



(a)



(b)

Fig. 5 Distribution of hits by a 1 MHz ultrasonic transducer source and steel ball drops in the coordinate plane of (a) Frequency centroid and count and (b) Average frequency and rise time

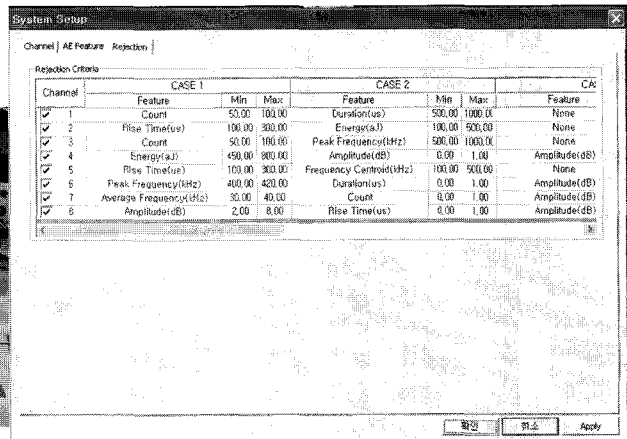
만약, 서로 다른 음원으로부터 측정된 히트를 2개의 파형 파라미터로 표현하면, 음원의 차이에 따라서 파형 파라미터 값들이 서로 다른 영역에 분포함을 더 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 5의 그래프는 1 MHz 초음파 변환기 음원 및 강구 낙하 음원으로부터 측정된 히트를 각각 2개의 파형 파라미터의 좌표에 나타낸 것이다. 결과에 따르면, 두 음원을 분리하는 데 있어서 중심주파수나 상승시간보다는 카운트나 평균주파수를 이용하는 것이 더 효율적임을 알 수 있다. 또한, 한 종류의 파형 파라미터보다 다양한 종류의 파형 파라미터를 이용할수록 필터링에 유리하다.

3. 파형 파라미터 필터의 적용

앞서 살펴본 바와 같이 파형 파라미터의 값을 이용하면 원하지 않는 음원 신호의 필터링이 가능하고, 다수의 파형 파라미터를 적용하면 더 효율적인 필터링이 가능하다. 본 연구에서는, 이러한 특성을 적용하기 위해 파형 파라미터 필터링 기능이 내장된 음향방출 신호 분석 시스템을 개발하였다. 물론, 다양한 파형 파라미터 값의 특성에 기반한 주성분 분석을 통한 회귀 모델 개발 및 신경망 등의 신호처리기법 등을 이용해 좀 더 정교하고 체계적인 음원 분류가 가능하지만, 본 연구에서는 파형 파라미터 필터를 적용하여 개발 시스템이 특정 음원을 실시간으로 감시하는데 적합하도록 하였다. 따라서 개발 시스템은 불연속



(a)



(b)

Fig. 6 (a) The developed acoustic emission system employing a waveform parameter filter and (b) The program menu for setting the band of the parameters

적이고 부정기적인 다른 음원이 발생하더라도 실시간으로 필터링할 수 있도록 고안되었다.

Fig. 6(a)는 본 연구를 위해 개발된 음향방출 시스템의 사진이다. 8채널의 음향방출 신호를 동시에 획득할 수 있도록 제작되었으며, 3 MHz의 샘플링 주파수를 갖는다. 또한 외부 제어 신호의 사용을 위해 별도로 2개의 추가 입력 채널을 갖고 있다. 개발된 시스템은 기존의 상용화된 다른 음향방출 시스템과 대동소이하지만 Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 제안한 파형 파라미터 필터를 내장하고 있다.

Fig. 6(b)는 시스템의 운용 프로그램에서 파형 파라미터 필터의 값을 정해주는 윈도우 메뉴를 보여주고 있다. 개발된 시스템에서는 각 채널별로 임의의 6개의 파형 파라미터에 대해 필터를 적용할 수 있도록 되어있다.

제안한 시스템의 검증을 위해 서로 다른 두 음원을 동시에 가진하면서 필터링 성능을 확인하였다. Fig. 7의 그래프는 3초 간격으로 1 MHz 초음파 변환기 음원을 시편에 인가함과 동시에 실험자가 주기적으로 망치 충격을 가하면서 음향 방출 신호를 측정하는 것이다. 이 때, Fig. 7의 위 그래프는 파라미터 필터링을 하지 않을 때 그리고 아래 그래프는 파라미터 필터링을 적용했을 때 측정되는 히트의 양상이다. 이 때, 파라미터 필터는 사전에 취득한 1 MHz 초음파 변환기 음원 신호를 분석하여 해당 신호가 잘 통과할 수 있도록

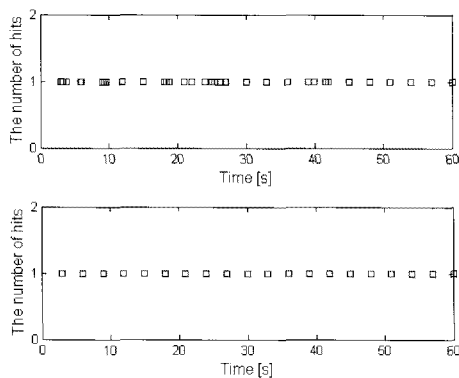


Fig. 7 The time vs. hit profile measured by the developed acoustic emission system employing a waveform parameter filter with the periodic simultaneous excitation of 1 MHz ultrasonic pulse and hammer impacts; the upper is without and the lower is with applying the parameter filter

파형 파라미터의 대역이 설정되었다. Fig. 7의 위 그래프에서 확인할 수 있듯이, 매 3초마다 반복적으로 인가된 1 MHz 초음파 변환기 신호뿐만 아니라 망치 충격 신호가 동시에 측정된다. 이 때, 단순히 시간에 따른 히트의 양상에만 근거해서는 음향방출 신호가 발생한 원인을 전혀 판단할 수 없다. 반면에 파형 파라미터 필터를 적용한 Fig. 7의 아래 그래프에서는 위와 동일하게 서로 다른 음원이 동시에 발생함에도 망치 충격으로 인한 히트는 완전히 필터링 되어 히트로 인식되지 않는다. 즉, 이와 같은 경우에는 별도의 사후 신호처리를 거치지 않고도 히트의 발생을 관찰하여 감시하고자 하는 사건을 즉시 모니터링하는 것이 가능하다.

4. 롤러코스터 지지구조물 적용 타당성 고찰

실제 롤러코스터 지지구조물에 음향방출기법을 적용할 경우, 승용물이 운행될 때 발생하는 탄성파의 크기가 매우 크고 장시간에 걸쳐 지속적으로 측정되므로, 이 신호로부터 균열이 발생하여 진전할 때 발생하는 음향방출 신호의 구분이 매우 까다롭다. 본 연구에서는, 실제 롤러코스터 지지구조물에 적용하기 위한 음향방출 시스템을 구축하고 실제 구조물에서 이 두 신호를 구분해 내는 것을 목적으로 연구를 진행하였다. 놀이 시설 지지 구조물 용접부 균열진전 평가를 위하여 서울 어린이 대공원에 설치되어 있는 롤러코스터 지지 구조물을 감시 대상으로 선정하고 음향방출 시스템을 구성하였다. 시험 구간은 Fig. 8과 같이



Fig. 8 Roller coaster support structures in Seoul Children's Grand Park

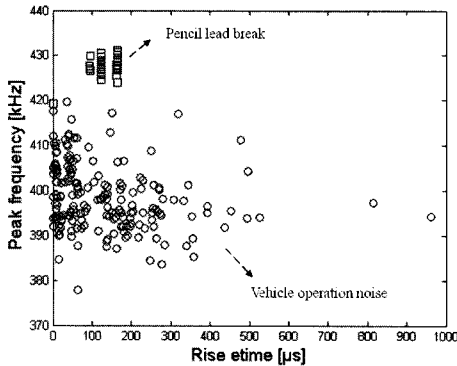


Fig. 9 Distribution of hits mimicking the crack growth by the pencil lead break (square) and the vehicle operation noise (circle) in the coordinate plane of peak frequency and rise time

승용물에 큰 가속도가 작용하는 회전구간의 지지 구조물의 용접부 4곳을 선택하여 음향방출 신호를 획득하였다.

이 때, 감시 대상이 되는 실제 균열진전 신호의 발생은 불가능하므로 연필심 파괴(PLB) 시험을 수행하여 이를 결함 모사 신호로 가정하였다. 이 경우, 실제 구조물에서 균열의 진전 신호는 연필심 파괴 신호와는 다소 차이가 있을 수 있으므로, 동일 재료의 인장 파단 시험 및 피로 파괴 시험 등에서 측정된 실제 음향방출 신호를 사용하는 것이 더욱 바람직하다. 하지만, 본 연구에서는 파라미터 필터링을 이용한 실시간 음원 분리 기법에 대한 타당성에 대해 집중하여, 현장에서 가진이 용이한 연필심 파괴신호를 이용하였다. 이 부분은 추후 실결함 진전 신호를 적용한 연구가 계속해서 수행될 필요가 있다.

Fig. 9은 두 음원으로부터 각각 측정된 음향방출 히트를 첨두주파수와 상승시간 좌표에서 표현한 것이다. 이 결과로부터 실제 롤러코스터 지지 구조물에서 획득된 신호 역시 파형 파라미터의 분포 대역이 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 즉, 파형 파라미터 필터를 적용하면 승용물 운행 신호로부터 발생하는 히트는 제거하고 결함 모사 신호인 연필심 파괴로 인한 히트만을 측정할 수 있다. 이러한 사실은 히트의 동향만을 모니터링하여 실시간 균열진전 감시를 수행할 수 있는 근거가 되므로, 추후 롤러코스터 지지구조물 건전성 평가에 적용했을 때 큰 의미를 가질 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 음향방출 시스템이 적용하던 주파수 필터링 기법에서 덧붙여 음향방출 히트의 파형 파라미터를 이용하여 음향방출 신호를 필터링하는 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 실시간으로 음원의 분류를 가능하게 하고 나아가 별도의 사후 신호처리 없이 히트의 발생 양상만을 관찰하여 구조물의 건전성을 감시할 수 있다. 이러한 방법은 특히 매우 큰 잡음이 일상적으로 발생하는 롤러코스터와 같은 대형 구조물에 매우 유리하게 적용될 수 있다. 다양한 음원에 대한 음향방출시험을 통해 제안한 기법의 타당성을 분석하였고 파형 파라미터 필터를 탑재한 음향방출 시스템을 실제 제작하여 동시에 발생한 서로 다른 음원을 분류하는 시험을 수행하였다. 마지막으로, 실제 롤러코스터 지지구조물에서 측정된 음향방출 신호를 개발된 파형 파라미터 필터링 기법을 적용하여 분석함으로써, 제안한 방법의 타당성 및 후속 연구의 필요성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 소방방재청(National Emergency Management Agency)의 지원 사업 NEMA-09-MD-05를 통하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] D. Parrt, "Nondestructive flaw detection by use of acoustic emission," IDO-17230, Phillips Petroleum Co., Idaho falls, ID (1967)
- [2] C. Ennaceur, "Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference," *International Journal of pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp. 197-204 (2006)
- [3] N. Ohtsuka, M. Nakano and H. Ueyama, "Acoustic emission monitoring during rupture test of pressure vessels and laboratory fracture test," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 191-199 (1981)

- [4] M. Houssny-Emam and M. N. Bassim, "Study of the effect of heat treatment on low cycle fatigue in 4340 steel by acoustic emission," *Materials Science and Engineering*, Vol. 61, pp. 79-88 (1983)
- [5] 김정희, 한병희, 서대철, 윤동진, "철근 콘크리트 슬래브 구조 손상 평가를 위한 음향방출 신호 분석", *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 4, pp. 360-367 (2009)
- [6] 김영훈, 김진현, 송봉민, 이준현, 조윤희, "음향방출기법을 이용한 원전 고온 고압 배관의 누설 특성 평가에 관한 연구", *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 5, pp. 466-472 (2009)
- [7] 김종현, 김재성, 이정, 광노권, 이보영, "원전 구조물 결함탐지를 위한 음향방출 신호처리 방안에 대한 기초 연구", *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 5, pp. 485-492 (2009)
- [8] 이상국, "음향방출을 이용한 발전용 밸브 누설 진단 현장 적용 연구", *비파괴검사학회지*, Vol. 28, No. 4, pp. 315-322 (2008)
- [9] C. Ouyang, E. Landis and S. P. Shah, "Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, No. 11, pp. 2681-2689 (1991)
- [10] S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeishi and M. Ohtsu, "Quantitative evaluation and visualization of cracking process in reinforced concrete by moment tensor analysis of acoustic emission," *Materials Evaluation*, Vol. 53, No. 6, pp. 751-756 (1995)
- [11] R. K. Miller and P. McIntire, *Nondestructive Testing Handbook, Second Edition, Vol. 5, Acoustic Emission Testing*, American Society for Nondestructive Testing (1987)