

음향방출 에너지 파라미터를 이용한 고로 철판균열의 조기 결함탐지 기술

Early Shell Crack Detection Technique Using Acoustic Emission Energy Parameter Blast Furnaces

김동현*, 이상범*, 배동명**†, 양보석***

Dong-Hyun Kim*, Sang-Bum Lee* Dong-Myung Bae**† and Bo-Suk Yang***

초 록 고로는 제철소에서 철을 만들어 내는 핵심설비 중 하나로 고온고압 환경에서 냉각과 팽창으로 인한 철판의 손상이 노출되어 있어 대형사고에 대한 발생 가능성이 높아 중점관리가 필요하다. 본 연구에서는 음향방출법을 이용한 대형구조물 안전진단 시스템에 대한 평가를 수행하였다. 특히, 철판 크랙의 성장은 큰 에너지를 수반하게 되어, 음향방출 에너지 파라미터의 급격한 증가로 심각한 손상을 예측하였다. 이러한 결과를 바탕으로 고로의 정비시기를 앞당겨 확인한 결과 실제 크랙을 UT와 병행하여 확인하였다. 본 연구에서는 음향방출법을 이용한 대형 구조물인 철판균열의 심각도에 대한 평가기준을 마련하여 구조물 조기 결함진단 시스템의 활용으로 유용할 것으로 기대된다.

주요용어: 음향방출, 철판균열, 조기 결함탐지, 고로, 음향방출 에너지, 구조물 안전진단

Abstract Blast furnaces are crucial equipment for steel production. A typical furnace risks unexpected accidents caused by contraction and expansion of the walls under an environment of high temperature and pressure. In this study, an acoustic emission (AE) monitoring system was tested for evaluating the large-scale structural health of a blast furnace. Based on the growth of shell cracks with the emission of high energy levels, severe damage can be detected by monitoring increases in the AE energy parameter. Using this monitoring system, steel mill operators can establish a maintenance period, in which actual shell cracks can be verified by cross-checking the UT. From this study, we expect that AE systems permit early fault detection for structural health monitoring by establishing evaluation criteria based on the severity of shell cracking.

Keywords: Acoustic Emission, Shell Cack, Early Fault Detection, Blast Furnace, AE Energy, Structural Health Monitoring

1. 서 론

고로란 철광석과 코크스가 반응하여 철광석이 선철로 배출되는 연속식 반응로로 노내의 압력(0.4~2.5 Kg/cm²)을 견디기 위해 로를 철판으로 둘러싸고 있고, 철판을 보호하기 위해 내부에 연화(내화벽돌)로 되어있으며, 연화의 온도 상승에 따른 손실을 막기 위해 연화 내부에 냉각 시스템이 설치되어 있어 철판의 균열 감시가 필요하다.

음향방출(Acoustic emission)법은 고로에 대한 진전성 평가를 수행하는 목적으로 최근 구조물 안전진단 분야에 적용되고 있다.

고로 철판 초기 파손진단을 위한 일반적인 방법으로는 초음파 비선형 특성평가법[1]으로 수 mm의 미세균열에 대한 평가를 수행하거나, 노체 냉각기구의 마모진단을 위한 초음파 두께측정[2] 방식이 일반적이나, 가동 중 실시간 연속감시를 수행할 수 없는 어려움이 있다.

[Received: December 11, 2015, Revised: January 27, 2016, Accepted: February 4, 2016] *㈜렉터슨, **부경대학교 조선해양시스템공학과, ***부경대학교 기계자동차공학과, †Corresponding Author: Department of Naval Architecture & Ocean System Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea (E-mail: dmbae@pknu.ac.kr)

온라인 연속감시 방법으로는 무선 센서기술을 이용한 다수의 온도센서를 설치하여 설비 상태를 감시자에 전달하는 시스템[3]과, 고해상도의 열화상 카메라를 이용한 온도감시 시스템으로 운영되고 있으나, 온도의 분포에 대한 감시만 수행될 뿐 크랙의 성장 및 균열의 전조현상에 대한 수행에 한계가 있다.

한편, 용광로의 구조적 건전성 평가 방법으로는 육안검사, 온도데이터의 분석, 내화 라이닝의 음향초음파 에코(AU-E) 및 주요 구조 요소의 변위 및 온도변화 고로 전체의 팽창현상 등의 계측으로 고로 전체를 대상으로 건전성 평가 범위를 확장하여 진단[4-9]을 수행하고 있으나 국부적으로 구조물의 균열에 대한 손상은 찾을 수 없었다. 본 연구에서는 철판균열에 대한 건전성 평가 시스템을 개발하고, 균열이 성장하는 시점의 음향방출 에너지 파라미터를 이용하여 균열신호의 조기 결함탐지 및 건전성 평가에 대한 연구를 수행하고자 한다.

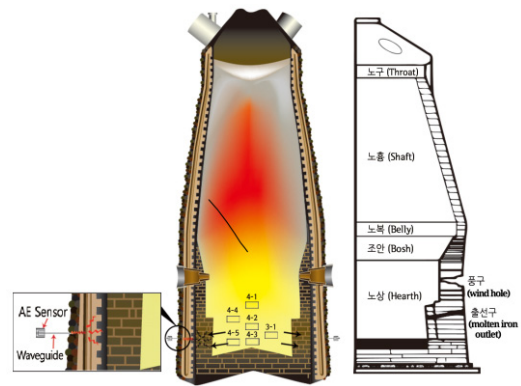


Fig. 1 Structure of blast furnace

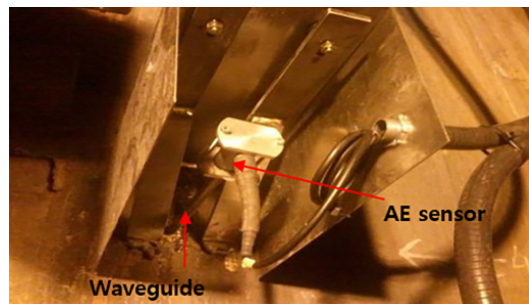


Fig. 2 Installation of AE sensor and protection cover

2. 시스템 구성 및 신호 검증

2.1. AE 시스템 구성

Fig. 1은 고로의 구조에 따른 센서의 배치를 나타낸 것으로 센서의 설치는 3번 출선구 하단에 1개(3-1), 4번 출선구 하단에 2개(4-4, 4-5), 중앙부에 3개(4-1, 4-2, 4-3)로 총 6채널로 구성하였다.

출선구는 쇳물을 내보내는 출구로서 압력 부하가 높고 기존 균열이 발생된 지역으로 집중적인 관리가 필요되는 곳으로 고온환경 지역이므로 센서의 직접적인 부착이 어려워 음향 도파관(waveguide)으로 철판의 표면에 용접후 끝단에 AE센서

를 부착하였으며 냉각을 위한 낙수환경에서 센서 보호커버를 별도로 제작하여 Fig. 2와 같이 설치하였다. AE 센서는 Fuji사의 200 kHz 20 dB 앰프 내장형 센서를 사용하였고, 고온환경용 음향 도파관은 직경 8 mm 길이 150 mm로 제작하였다. 신호의 증폭 및 필터링을 수행하기 위한 주 증폭기 및 데이터 수집장치는 센서로부터 50 m 이내에 위치한 local panel내부에 구성하였다. 최종 수집된 데이터는 광통신으로 기계실로 실시간 전송되어 철판균열에 대한 분석이 가능하도록 Fig. 3과 같이 구성하였다.

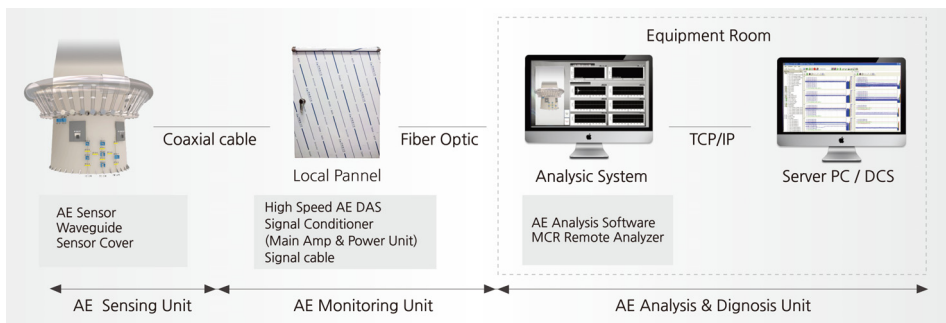


Fig. 3 AE system configuration for blast furnace

2.2. BB Gun을 이용한 시스템 성능 검증

본 논문에서는 ASTM 2374[10]에서 권장하는 시스템 검증 방법은 발사체를 이용한 방식인 강구(steel ball)의 떨어뜨림, 비비탄 총(BB gun)발사, 진자(pendulum)의 끝부분에 질량으로 충격신호를 주는 방식으로 다양한데 그 중 고로와 같은 위험 지역인 현장에서 적용이 가능한 방식으로 BB gun을 적용하였다.

BB gun은 소형 플라스틱 장난감 권총으로 0.2 mm 비비탄을 이용하여 3~4 m 떨어진 곳에서 gun을 발사하여 충격신호를 고로의 표피에 전달하는 방식이다.

즉, 센서가 설치된 지역은 유독가스가 많은 위험지역으로 접근이 쉽지 않은 제한구역이므로, 전체 시스템 캘리브레이션을 수행하기가 쉽지 않았기에 BB gun을 이용하여 Fig. 4와 같이 채널 4-1 주변, 4-4 주변에 타격을 하였으며, Fig. 5와 같이 신호에 대한 반응을 확인하였다. 즉, 4-4 주변에서 BB gun 타격을 수행하였을 때, 4-4 및 4-5 순서로 시간지연을 가지며 신호의 입력이 이루어졌고, 4-1 주변에 BB gun을 타격하였을 때, 4-1, 4-2, 4-3 순서로 신호의 입력을 확인할 수 있었다. AE 3-1의 경우 AE 4-1로부터 5 m 이상 떨어진 곳이라 신호가 미약하게 탐지되었다.

이처럼 대형구조물이면서 위험지역의 경우 BB gun을 이용하여 일정한 시간 간격을 두고 신호의 입력이 이루어짐을 확인하여 신호의 입출력을 확인할 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 낙수신호 환경에서 BB Gun신호를 이용한 유사크랙 신호성분 특징 추출 및 선택

고로의 철펠는 고온환경이므로 외부에 많은 양의 냉각수를 흘려 보내어 냉각을 수행하는 과정에서 배경잡음이 많이 발생한다.

이러한 배경잡음이 있는 낙수환경에서 균열신호를 추출해 낼 수 있는 것이 무엇보다 중요하다. 시험은 낙수환경에서 BB gun을 발사하여 크랙과 같은 돌발형 신호를 발생시키고 해당신호의 특징 추출(feature extraction) 및 특징 선택(feature selection)을 수행하여 실제 크랙이 발생할 경우

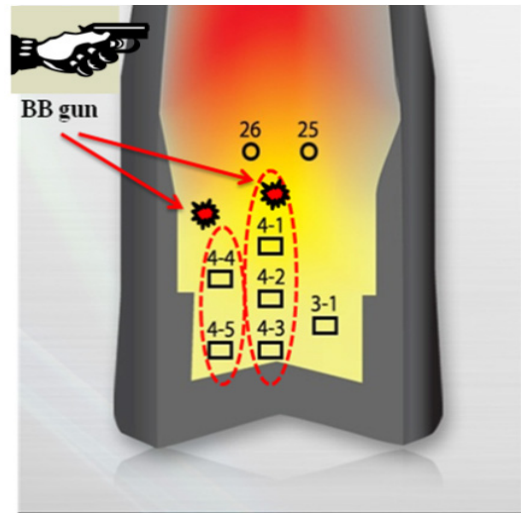


Fig. 4 BB gun test point

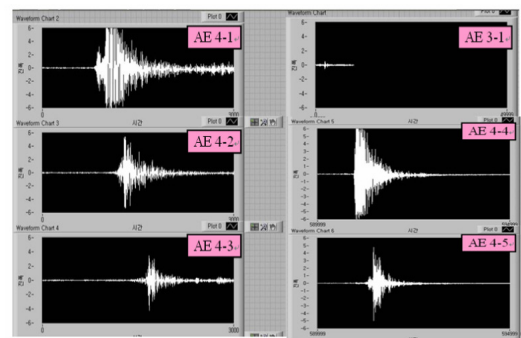


Fig. 5 BB gun test result

잘 반응할 것으로 예상되는 특징인자를 선정하는 과정을 수행하였다. 신호 발생은 AE 4-1 지점 및 AE 4-4 지점에 각각 BB gun으로 돌발형 유사 크랙신호라 가정하여 신호를 발생시켜 음향방출 파라미터를 이용하여 신호의 특징을 추출하여 Table 1과 Table 2로 각각 정리하였다.

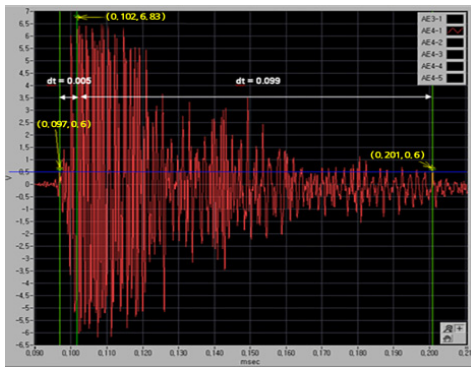
이 경우, 노이즈 환경에서 가장 잘 구분이 되는 특징변수를 구하기 위해서, AE 4-1 지역의 낙수신호(water drops)에 대해서 대표적인 AE 특징변수 (peak, duration, risetime, count, energy, energy count)들의 평균(average)값과 BB gun을 3회 발사하였을 경우 AE 4-1, AE 4-2, AE 4-3 지점에서 취득된 AE 특징변수의 평균을 각각 계산하여 Table 1에, 동일한 방식으로 AE 4-4 지역의 낙수신호와 해당지역 BB gun 발사에 대한 AE 4-4, AE 4-5 지점에서 취득된 AE 특징변수의 평균을 계산하여 Table 2에 나타내었다.

Table 1 AE signal features of water drops signal and BB gun signal at AE 4-1, 4-2, 4-3

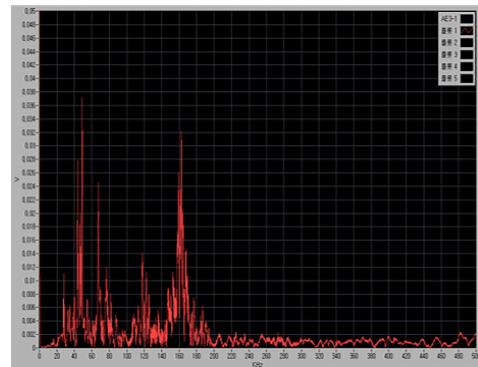
AE features	Water drops (Average)	BB gun (Average)		
	AE 4-1	AE 4-1	AE 4-2	AE 4-3
Peak [V]	0.4575	3.802	1.0675	0.329
Duration [μ s]	0.2185	1.595	0.8445	0.4755
Risetime [μ s]	0.005	0.020	0.125	0.845
Count	14	96.5	75	40.5
Energy [aJ]	1.320645	233.77955	26.38755	2.3351
Energy count	27.5	120.5	109.5	67.5
RMS [V]	0.0083095	0.39006	0.17112	0.070017

Table 2 AE signal features of water drops signal and BB gun signal at AE 4-4, 4-5

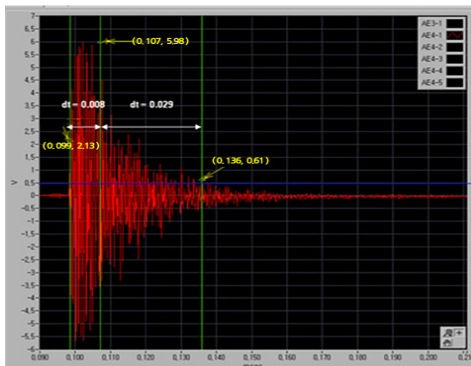
AE features	Water drops (Average)	BB gun (Average)	
	AE 4-4	AE 4-4	AE 4-5
Peak[V]	0.4595	2.438	0.259
Duration [μ s]	0.592	0.9635	0.2445
Risetime [μ s]	0.0235	0.041	0.051
Count	36	83.5	22
Energy[aJ]	7.68565	93.82055	1.25388
Energy count	58	108	34.5
RMS[V]	0.0947875	0.297655	0.070178



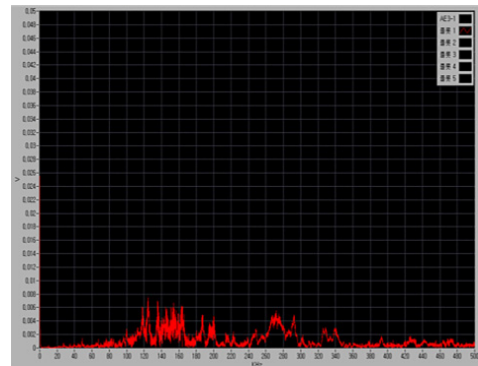
(a) rise time and duration (BB gun)



(b) FFT result (BB gun)



(c) rise time and duration (water drop)



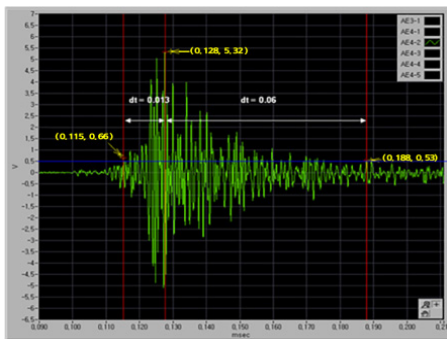
(d) FFT result (water drop)

Fig. 6 Rise time, duration, and FFT result at AE 4-1

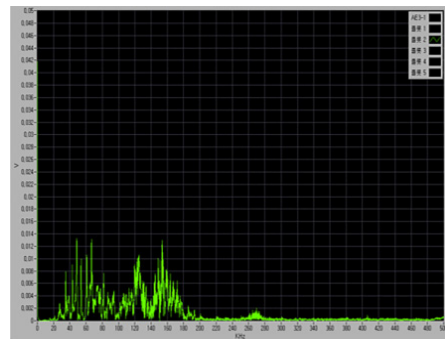
Table 1과 Table 2에서 정리된 AE 변수 중에서 모니터링 되는 신호의 최소값과 최대값에 대해서 가장 넓은 범위에서 확연히 구분이 가능한 값이 AE energy값임을 확인할 수 있었다. 즉, AE 4-1 지점의 낙수신호의 평균 에너지값이 1.320645 aJ (atto Jule)인 값에 대비 BB gun 신호의 평균 에너지값은 233.77995 aJ일 경우, 약 200배 이상에 해당되는 신호의 표현 범위를 가지므로 고로가 정상적인 운전 중일 경우의 평균 신호레벨 대비 위

험상태를 구분 할 수 있는 범위의 설정에 유용하다 판단하였다. 에너지에 대한 정의 및 계산방법은 다양하게 존재하나, AE에 관한 용어(ISO 1276: 2001)로 규정된 값인 MARSE (measured area of rectified signal envelope)로서 정의하였다. 이는 AE 신호 전압 절대값을 포락선 지속시간에 걸친 적분값으로 계산하고 단위는 aJ (atto Jule)로 정의된다.

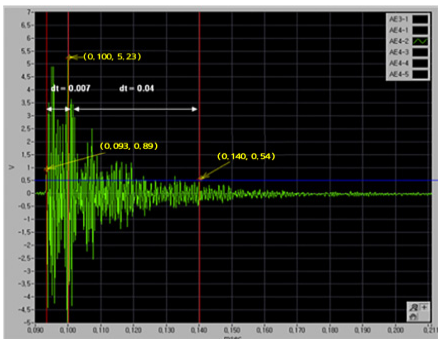
Fig. 6은 AE 4-1 지점에서 유사 크랙신호(BB gun)와 낙수신호(water drops)에 대한 신호의 특징



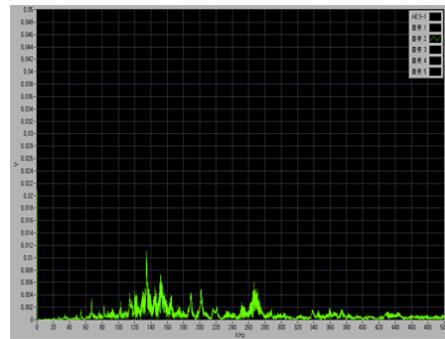
(a) rise time and duration (BB gun)



(b) FFT (BB gun)

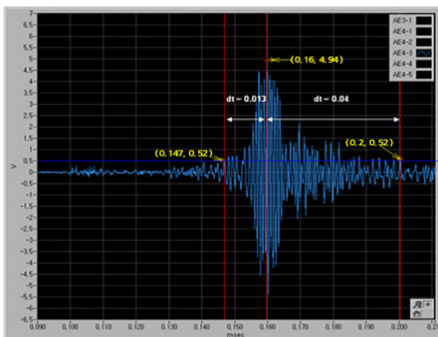


(c) rise time and duration (water drops)

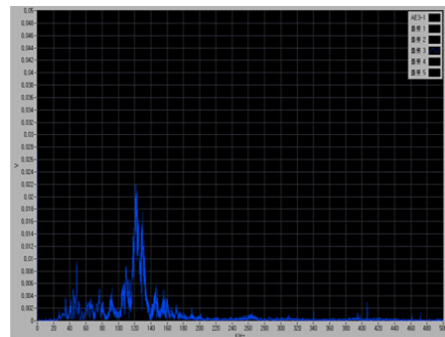


(d) FFT (water drops)

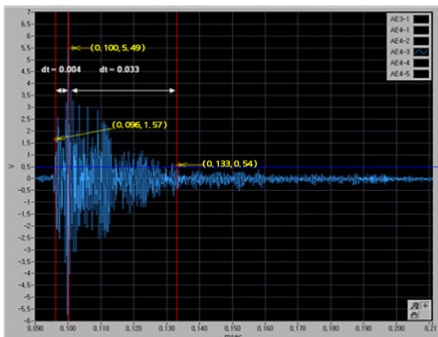
Fig. 7 Rise time, duration, and FFT result at AE 4-2



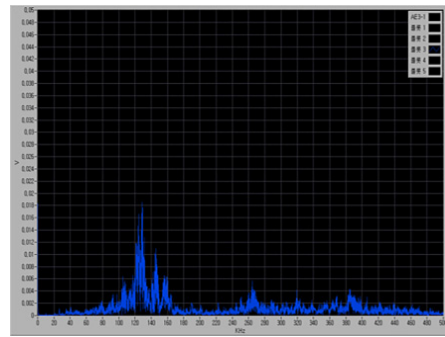
(a) rise time and duration (BB gun)



(b) FFT (BB gun)



(c) rise time and duration (water drops)



(d) FFT (water drops)

Fig. 8 Rise time, duration, and FFT result at AE 4-3

을 보다 면밀히 파악하기 위한 과정으로 신호의 duration 및 도달시간, 주파수 분석과정을 수행하였다. AE 파라미터 중 rise time, duration, FFT 분석결과를 나타내고 있으며, BB gun 신호의 경우 낙수신호보다 대략 2배의 rise time을 가지고, duration의 경우 BB gun 신호가 2배의 신호길이를 볼 때, 낙수신호가 짧은 파장을 가지면서 BB gun 신호보다 속도가 빠르다는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 속도가 빠르다는 의미는 감쇄속도가 빠르다는 것을 의미한다.

주파수 분석에서는 BB gun 신호는 20 kHz에서 200 kHz의 신호성분이 주를 이루었고, 낙수신호의 경우 100 kHz에서 200 kHz의 대역의 분포를 확인하였다.

Fig. 7 및 Fig. 8 은 AE 4-2 지점과 AE 4-3에서 유사 크랙신호와 낙수신호의 특징을 각각 나타낸 것으로, rise time의 경우 낙수신호가 BB gun 신호보다 짧았으며, BB gun 신호가 낙수신호보다 긴 duration을 가졌고, BB gun의 경우 20 ~ 200 kHz의 신호성분이 낙수신호의 경우 100~ 200 kHz의 신호성분이 주를 이루고 있음을 확인하였다.

3.2 AE Energy 기반 철피크랙 신호 판단

3.1절에서 수행한 낙수신호 환경에서 BB gun 신호와 같은 유사크랙 신호의 판별이 가능하다는 실험 데이터를 기준으로 실시간 온라인 크랙감시 시스템을 개발하여 적용하였다. 온라인 연속감시를 수행을 위한 대표적인 경향감시를 위해 AE energy 파라미터를 적용하였으며, Energy 신호의 측정시험에서 낙수환경에서는 10 aJ, BB gun 시험에서 100 ~ 200 aJ로 범위를 확인하였다. 1개월에서 3월정도의 현장에서 수집된 운전데이터를 분석한 결과 평균값의 경우 10 aJ임을 확인하였으며, 낙수신호와 최소한 구분이 되는 수준을 고려하여 5배 이상의 신호인 50 aJ 이상 근접한 채널에서 함께 반응한 경우 크랙성 의심신호로 간주하여 주변에 설치된 스트레인, 온도센서로 취득된 신호와의 상관관계를 기반으로 온라인 연속감시를 수행하였다.

이는 고로 내부의 팽창에 따른 철판의 변위량과 주변의 온도분포가 음향방출 에너지와 잘 반응하여, 철판에 크랙성 돌발신호의 경우 BB gun을 발사하였을 경우 발생하는 에너지 신호의 크

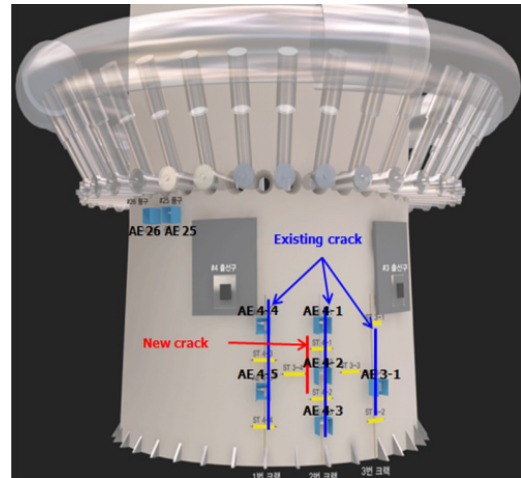


Fig. 9 Existing crack and new crack

기보다 작은 범위에서부터 그 이상의 신호 에너지 범주 내에서 관측될 것이라는 전제를 두었다.

즉, 사전 시스템검증시험에서 낙수환경에서 BB gun으로 신호를 발생하여 감지가 가능한 범위 신호인 50 aJ ~ 10,000 aJ 범위 내의 변화를 예측하고, 이후 온라인 연속감시에서 energy 트렌드의 급격한 변화량을 관측으로 진단을 수행하였다.

Fig. 9는 고로의 균열을 탐지하기 위한 6채널 AE 센서의 배치를 나타낸 것으로 고로 하단부에 기존 균열이 발생하여 수리를 마친 3개소에 집중관리를 위해 길이방향으로 설치하였다. 센서 배치는 균열 부위가 작은 곳은 1개의 센서를 부위가 큰 곳의 경우 2~3의 센서를 배치하여 그룹별 신호분석을 수행하였다. 균열신호 판단의 경우, 일시적인 노이즈성 신호와의 구분을 위해 균열이 위치한 개소에서 2개 이상 채널에서 큰 신호가 지속적으로 동시에 감지가 된 경우 균열 의심신호로 감시를 수행하였다.

음향방출기술을 이용한 분석기술은 주변의 공정신호와의 상관해석이 중요한데, AE 센서가 설치된 주변의 스트레인 및 온도센서를 통해 고온 고압환경의 공정상황 변화에 따른 주변신호의 변화를 함께 관찰하여 상관해석이 용이하도록 하였다. 또한 온라인 연속감시를 수행하는 AE 시스템의 경우, 월별 에너지 경향을 확인하여 정기적인 관리가 필요하므로, 본 연구에서는 AE energy의 경향관리를 수행 중 분석 3개월 시점부터 급격한 에너지의 증가를 보이는 신호의 경향을 감지하게 되었다.

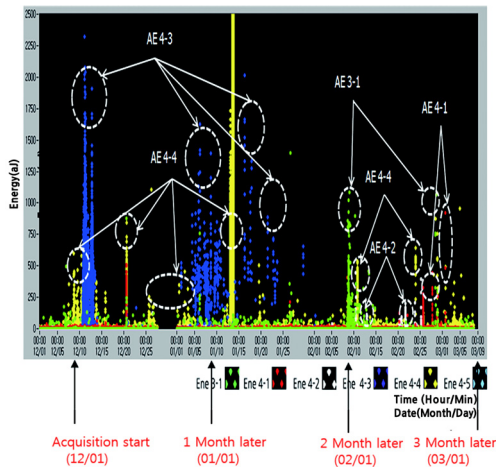


Fig. 10 Change of AE energy trend during crack propagation for all channels

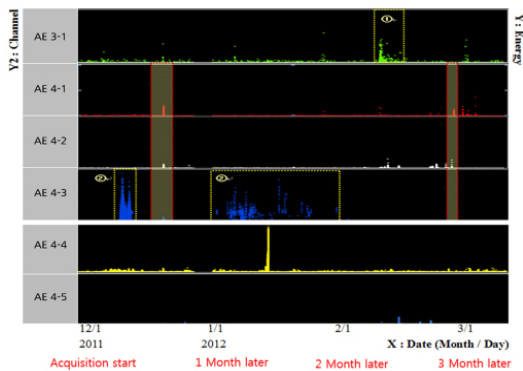


Fig. 11 Change of AE energy trend during crack propagation for each channels

Fig. 10은 크랙이 성장하는 동안에 AE energy의 변화를 나타낸 것으로, AE4-1, AE 4-2, AE 4-3의 그룹에서 2배 이상의 에너지를, AE 4-4 및 AE 4-5의 그룹을 이룬 곳에서는 70배 이상 높은 에너지의 변화가 지속적으로 탐지되었다. 이 경우, 크랙의 변화를 의심하여 현장 관계자에게 진단보고서를 발행하여 정비시점을 앞당겨 확인 결과 AE 4-1, AE4-2 지역에 신규 크랙이 발견되었음을 확인하였다.

Fig. 11은 크랙 발생지점 채널별 AE energy 변화를 상대적으로 나타낸 것으로, AE 4-1, AE 4-2, AE 4-3으로 동일그룹으로 형성된 지역의 신호가 함께 반응함을 파악할 수 있었다. Fig. 11의 ①은 AE 3-1에서 energy 신호가 활발하게 반응한 지점을 나타낸 것이고, ②는 AE 4-3에서 energy

신호가 활발하게 반응한 경우를 나타낸 것이다. 이 경우 근접한 채널에서도 동시에 반응하는지에 대한 확인이 필요한데, Fig. 10에서 AE 4-3이 반응한 시점 AE 4-4의 energy 값이 상대적으로 떨어진 거리에 있어 약하게 반응함을 확인하였고, 해당지역에 어떠한 변화가 일어나고 있다는 것을 예측할 수 있었다.

이와 더불어, 상관분석을 위해 동일시점의 온도, 스트레인의 변화를 확인한 결과 균열이 발생한 지역의 온도 및 스트레인의 변화가 높음을 확인하였다. 이는 미세균열로 인한 에너지가 집중되어 고로 표피로 전달되었고, 온도 및 스트레인의 변화에 따른 음향방출 에너지의 활성도가 함께 증가함을 의미한다. 현장 관리자의 협조로 실제 고로의 운전을 정지하고 육안관측 및 UT로 확인을 수행하였으며, 최종 Fig. 9에 기술된 것과 같이 신규 크랙이 AE 4-1, 4-2, 4-3 그룹이 위치한 곳에 발생됨을 현장에서 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 고로 철판에 대한 균열 감시 및 진단을 수행하기 위해 온라인 연속감시가 가능한 음향방출법 기반의 온라인 실시간 균열 감시 시스템을 개발 및 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 균열 감시에 가장 적합하면서 민감도가 탁월한 음향방출 파라미터는 AE energy임을 확인하였다.
- 2) AE energy는 낙수환경에서 10 aJ을 크랙과 유사한 환경인 BB gun 신호의 입력에서는 100~200 aJ의 상대적으로 큰 신호 차이를 보였으며, 3개월 이상 수집된 정상운전 데이터를 기준으로 낙수신호와 최소한 구분이 되는 수준을 고려하여 5배 이상신호인 50 aJ 이상 신호가 근접한 채널에서 함께 반응한 경우 크랙성 의심신호로 간주하여 온라인 연속감시의 기준으로 삼았다.
- 3) BB gun 신호의 경우 낙수신호보다 대략 2배의 rise time을 가지고, duration의 경우 BB gun 신호가 2배의 신호 길이를 볼 때, 낙수신호가 짧은 파장을 가지면서 BB gun 신호보다 감쇄속도가 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

- 4) 주파수 분석에서는 BB gun 신호는 20 kHz에서 200 kHz의 신호성분이 주를 이루었고, 낙수 신호의 경우 100 kHz에서 200 kHz의 대역의 분포로 볼 때 크랙성 신호의 경우 구분이 가능함을 확인하였다.
- 5) 대형구조물의 크랙신호의 분석 및 판단을 수행할 경우 2채널 이상에서 동시에 반응하면서 AE energy의 급격한 변화로서 크랙신호의 탐지에 유용함을 확인하였으며, 주변 공정신호인 온도나 스트레인의 상관해석으로 보다 신뢰도 높은 진단을 수행할 수 있었다.
- 6) AE energy 파라미터로 온라인 연속감시를 수행한 결과 정상보다 2배에서 70배 이상의 에너지 변화량 및 주변 데이터의 활용으로 고로 철피균열에 대한 조기 결함탐지가 가능함을 확인하였다. 상기 분석된 데이터를 바탕으로 고로와 같은 대형구조물에 음향방출법을 이용한 온라인 조기결함 탐지 시스템에 적용이 가능함을 확인하였고, 유사한 설비에도 현장에서 취득한 데이터를 축적할 경우 확대 적용이 가능할 것이라 판단된다.

References

- [1] S. W. Choi, "Ultrasonic Nonlinearity Evaluation for Inspecting Steel Shell of the Blast Furnace at Initial Failure," *Proceedings of 26th ICROS Annual Conference*, pp. 533-536 (2011)
- [2] S. W. Choi, J. L. Yoo and T. H. Choi, "Ultrasonic Thickness Measuring Technique for Inspecting Worn Cooling Stave in the Blast Furnace," *Proceedings of 25th ICROS Annual Conference*, pp. 771-775 (2010)
- [3] G. S. Moon, J. H. Lee and D. W. Kim, "Implementation of a Outer Wall Furnaces Temperature Monitoring system utilizing WirelessHART," *Proceedings of the Institute of Electronics and Information Engineers Conference*, pp. 1619-1621 (2014)
- [4] P. Gebiski and A. Sadri, "Structural integrity monitoring of smelting furnaces based on acoustic emission data acquisition and analysis," *18th World Conference on Nondestructive Testing*, pp. 16-20 (2012)
- [5] A. Sadri, P. Gebiski, K. Mirkhani and G. McGarrie, "New and innovative NDT techniques for inspection and monitoring of metal smelting furnaces," *NDT in Canada 2009, Conference and 6th International Workshop* (2009)
- [6] M. -A. -G. Bentes, A. -H. -B. de Mello, F. Franklin, R. -J. van Laar, R. van Oudenallen, V. -W. -B. van Straaten and K. Andreev, "Expansion phenomena in a blast furnace hearth after blow-in," *Millennium Steel 2008*, pp. 42-48 (2008)
- [7] P. Bigos, J. Kulka, M. Mantic and J. Curilla, "Continual measuring of local stress values on shell of the blast furnace hearth and of total shell expansion," *Metallurgija*, Vol. 51(1), pp. 55-58 (2012)
- [8] S. Cheng, L. Qian, H. Zhao, "Monitoring method for blast furnace wall with copper staves," *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-5 (2007)
- [9] N. Parida and S. Palit Sagar, "Non-destructive testing and inspection of the blast furnace refractory lining by stress wave propagation technique," *NDESAI 2011*, pp. 78-86 (2011)
- [10] ASTM E 2374-04, "Standard guide for acoustic emission system performance verification," ASTM (2002)