

음향방출시험 기술을 이용한 비파괴검사 방안에 관한 분석 및 검증

이승재, 이승학, 서건원, 방중윤, 김태영, 한경우, 이동현, 최승규
건양대학교 재난안전소방학과
e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

Analysis and verification of non-destructive Testing method using Acoustic Emission Test technology

Seung Jae Lee, Seung Hark Lee, Geon Won Seo, Jong Yun Bang, Tae Young Kim,
Gyoung Woo Han, Dong Hyun Lee, Seung-Kyou Choi
Department of Disaster Safety & Fire-fighting, Konyang University

요 약

비파괴검사는 시험체를 파괴하지 않고 재질, 성능, 상태, 결함의 유무를 확인하는 기술로 그 중 음향방출기술을 사용한다. 제조소 등의 위험물 저장시설의 폭발 및 화재위험이 있는 산업현장에서 가장 높은 빈도로 발생하는 누출 사고로 중독, 화상 등을 수반하여 폭발, 화재 등의 2차 피해가 발생한다. 폭발 및 화재위험이 있는 산업현장에서 발생하는 사고는 해마다 증가하고 있으며, 위험물을 저장하고 이송하는 설비의 변형, 고장, 파손, 부식, 노후 등의 내부 균열이 산업현장 사고의 주요 원인으로 밝혀지고 있다. 위험물 저장시설 누출사고가 2차 폭발과 화재로 이어지면 많은 인명과 큰 재산 피해를 발생시킬 수 있어 그에 대한 체계적인 관리와 화재 예방대책이 요구된다. 이에, 본 논문에서는 위험물 저장소 등의 화재폭발 사고 예방을 위하여 구조체에 응력이 가해지면 변형되거나 파손될 때 발생하는 탄성파를 측정하여 실시간으로 손상을 진단, 마이크로미터 수준의 균열을 검출하는 최첨단 비파괴 음향방출시험 검사 기술을 제안한다. 또한, 화재 폭발을 예방하기 위하여 내부의 균열을 미리 검출할 수 있는 첨단 비파괴검사 기술의 유용함을 확인하였다.

1. 서 론

소방청의 위험물 통계자료에 따르면 저장소 등의 사고 발생 건수는 2017년에서 2021년 사이 총 335건 중 화재 148건, 폭발 92건, 누출 95건이며, 인명피해는 총 300명으로 사망자 64명, 중상자 74명, 경상자 162명으로 집계되어 해마다 증가하고 있다 [1]. 위험물을 저장하고 이송하는 산업현장 사고의 주요 원인은 설비의 변형, 고장, 파손, 부식, 노후 등으로 내부의 균열이 발생되어 화재, 폭발로 이어진다[2]. 이러한 사고를 예방하기 위하여 내부의 균열을 미리 검출할 수 있는 첨단 비파괴검사(NDT, Non-Destructive Testing)기술이 요구된다.

비파괴검사는 시험체를 파괴하지 않고 재질, 성능, 상태, 결함의 유무를 확인하는 기술로 초음파탐상, 방사선 투과, 자기탐상, 침투탐상 등이 있으며 최근의 첨단, 비파괴 기술에는 서모그래피, 유도 초음파, 레이저 초음파, 테라헤르츠, 음향방출기술이 있다[3].

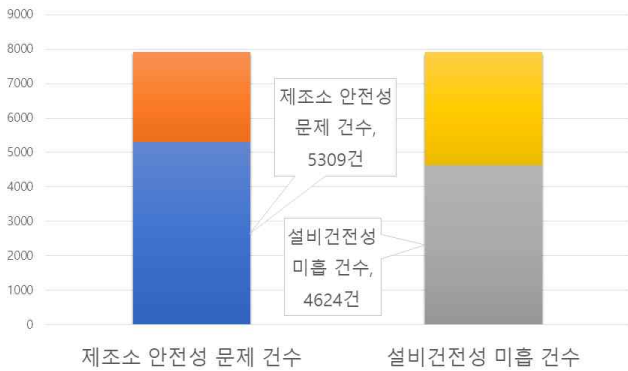
이에 본 논문에서는 위험물 저장소 등의 화재폭발 사고 예방을 위하여 구조체에 응력(내부 또는 외부)이 가해지면 변형되거나 파손될 때 발생하는 ‘탄성파’를 측정하여 실시간으로 손상을 진단, 마이크로미터 수준의 균열을 검출하는 최첨단 비파괴 음향방출시험 기술을 제안한다. 또한, 음향방출검사 기술(AET, Acoustic Emission Testing)을 이용한 비파괴검사 방안의 신뢰성을 확인하기 위하여 시험하고 분석한 결과 위험물 저장소의 안전을 확보하고 화재폭발사고를 예방하는 데에 유용함을 확인한다.

2. 위험물 저장시설의 사고 특성 분석

위험물 저장시설의 폭발 및 화재는 최근 발생한 대전타이어 공장 화재와 같은 크고 작은 사고가 매년 발생하고 있어 안전에 대한 우려가 커지고 있다.

소방청의 위험물 통계자료에 따르면 2017년도부터 2021년까지

지 대형 위험물 제조, 보유 사업장에 대한 전수 검사를 한 결과, 7,914개 제조소 중 안전성에 문제가 있는 건수는 5,309건으로 조사되었다. 특히 설비 최초 시공 후 운전 중 균열, 부식, 이탈 등 설비 노후화에 대한 건전성 미흡이 4,624건으로 전체 87.1%로 [그림 1]과 같이 높은 비율을 차지하고 있다.



[그림 1] 대형 위험물 제조, 보유 사업장의 전수조사

가장 높은 빈도로 발생하는 누출 사고는 일반적으로 중독, 화상 등을 수반하며 폭발, 화재 등의 2차 피해가 발생되며, 위험물 저장시설의 노후화는 미세 균열의 발생 및 성장으로 위험물이 누출되고 화재, 폭발로 이어져 대형재난 사고의 주요 원인이 될 수 있어 이에 대한 안전대책이 절실히 요구된다.

3. 위험물 저장시설의 AET를 이용한 비파괴 검사 방안

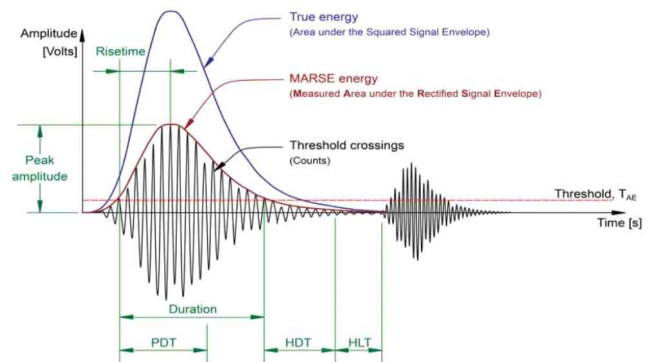
위험물 저장시설의 건전성을 평가하는 비파괴검사에는 초음파 탐상검사법(UFDT, Ultrasonic Flaw Detecting Test)과 방사선투과검사법(RT, Radio graphic Test) 등이 있다. 이때 초음파 탐상검사는 초음파를 통해, 방사선투과검사는 방사선을 통해 대규모 크랙(crack)의 표면 및 내부결함을 조기에 발견할 수 있는 기법이다[4,5].

하지만 초음파 탐상검사법은 복잡한 시설 구조물로 인해 정밀검사에 한계가 있고, 방사선투과검사법은 방사선 피폭으로 인한 안전문제와 고비용이라는 한계가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 기존의 비파괴검사 방법의 한계점을 극복하고 보완할 수 있는 음향방출검사 기술을 이용한 비파괴검사 방안을 제안한다.

음향방출검사 기술은 물체 표면에 설치된 음향방출(AE, Acoustic Emission)센서에 의해 탄성파를 검출하고 신호를 분석, 처리하는 기술로 내부의 균열을 미리 검출하여 설비나 구조

물의 안전을 확보하고 화재폭발사고를 예방할 수 있는 첨단 비파괴검사 기술이다[7].

음향방출기술은 위험물 저장시설의 분해검사 기간 동안 균열을 검사하여 알아내고 위치 파악에 있어 유효한 수단[8]으로 금속체나 비금속체로 제작된 저장탱크 및 압력용기의 구조물 내부에서 발생한 균열의 진전이나 소성변형의 변화를 감지하여 안전도를 확인한다[9]. 이러한 안전성 기법의 하나인 음향방출 기술은 구조물의 소스를 직접 투사하여 반사 또는 투과되는 파를 취득하는 초음파 등의 비파괴검사와 달리 구조물 자체에서 발생하는 탄성파를 검출하는 간접적인 기법으로 초음파검사에 대한 한계점을 보완할 수 있다[10]. 구체적으로 AET를 이용한 비파괴 검사 방안은 [그림 2]과 같이 구조체에서 계측된 AE 아날로그 신호로 입력되고 신호가 임계값(Threshold), 크기(Amplitude), 길이(Duration) 등을 근거로 신호를 특정한다.



[그림 2] AE 아날로그 신호

특정한 AE 신호를 대표하는 변수(AE Feature)로 다시 다음 식(1)에 의해서 산출한다.

$$V_{OUTS} = - \left(\frac{R_{FS}}{R_{1S}} V_1 + \frac{R_{FS}}{R_{2S}} V_2 + \frac{R_{FS}}{R_{3S}} V_3 \right) \quad (1)$$

여기서, V_{OUTS} 은 반전 가산 증폭기의 출력값이고, R_{1S} 는 V_1 의 입력 저항이며, R_{2S} 는 V_2 의 입력 저항이고, R_{3S} 은 V_3 의 입력 저항이며, R_{FS} 는 반전 가산 증폭기의 출력 피드백 저항이고, V_1 은 진동센서의 출력이며, V_2 는 음향방출센서의 출력이고, V_3 는 음향센서의 출력이다.

일반적인 위험물 저장시설의 개방검사는 비가동시간(Downtime), 작업비용, 보수(Repair), 그리고 부분적인 비파괴 시험이 추가되어 많은 비용이 소요될 뿐만 아니라 대용량 압력용기나 저장탱크의 경우 검사나 시험의 복잡성은 훨씬 증가한

다. 하지만, 음향방출기술을 이용한 비파괴검사는 플랜트 가동 중지 기간뿐만 아니라 가동을 멈추기 전에 진정시키는 (Cool-Down) 과정에서 시험을 확대할 수 있으며 대상물 전체에 대하여 실시간으로 모니터링이 가능할 뿐만 아니라 다른 비파괴검사 방법으로 검사가 곤란한 지역에도 적용이 가능한 장점이 있다. 이는 사용환경에서 동적 결함을 모니터링 하는데 중요하며 분해검사 기간 동안 NDE가 가능하여 결과적으로 검사 기간 단축 및 비용절감 효과를 얻을 수 있다.

4. 음향방출기술을 이용한 비파괴검사 현장 실증

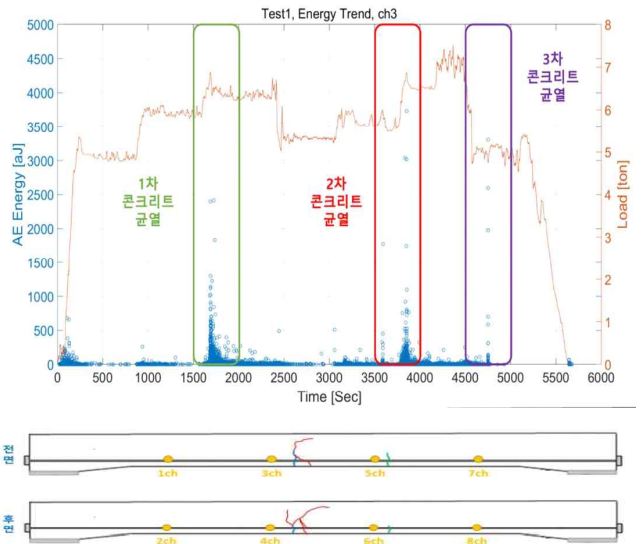
4.1 AET를 이용한 비파괴검사 실증시험

AET를 이용한 비파괴 현장 실증시험은 [그림 3]와 같이 위험물 저장탱크 기둥의 철근콘크리트 구조물 내부 텐던 파단 및 AE신호 계측 센서를 총 8채널로 철근콘크리트 측면에 설치하여 양 측면에 각 4채널 씩, 철근콘크리트 가운데를 기준으로 0.5m 등간격으로 설치하고, 센서는 60kHz 공진형으로 앰프 내장 타입을 사용하여 시험한다.



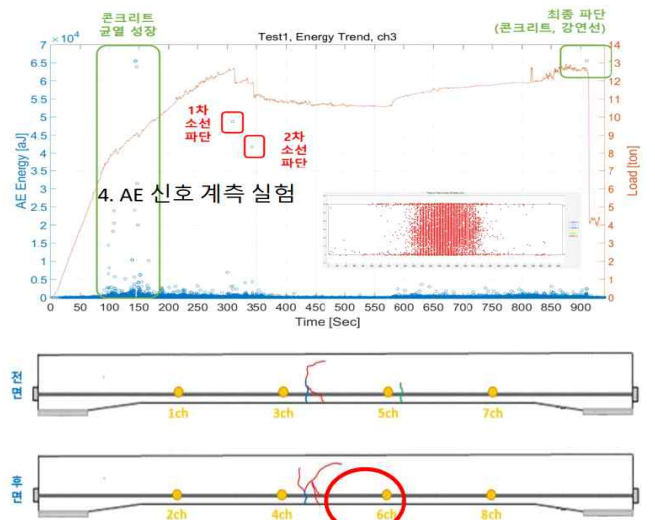
[그림 3] 위험물 저장탱크 기둥의 철근콘크리트 음향방출기술 시험

AE 신호를 통한 반복 하중 시험은 [그림 4]와 같이 철근콘크리트 한계 하중의 50%(한계 하중 13톤의 50%) 수준으로 5분간 상태를 유지 하며 하중 증가 사이클을 반복하고, 강연선 파단 또는 철근콘크리트 파괴가 발생할 때 까지 하중을 유지한다. 하중 제거 후 5톤에서 5분간 상태 유지 후에 하중을 완전히 제거 하고 시험을 종료한다.



[그림 4] 철근콘크리트의 반복 하중시험

AE 신호 계측으로 인한 인장 파괴 실험은 [그림 5]과 같이 한계 하중(13톤)까지 하중을 증가시켜 한계하중에 도달할시 콘크리트 균열 성장과정에서 1차 소선 파단, 2차 소선 파단이 발생하였고, 이는 손상 예상 위치인 4ch과 6ch사이로 예상된다. 또한, 한계하중 도달 후 10분 경과 시 철근콘크리트와 강연선이 최종 파단난 것을 확인하였다.

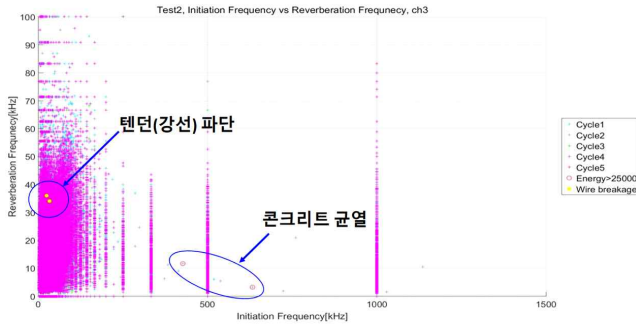


[그림 5] 철근콘크리트의 인장 파괴시험

4.2 실증시험 결과 및 분석

AET를 이용한 비파괴 현장 실증시험은 철근콘크리트 한계 하중의 50%(한계 하중 13톤의 50%) 수준으로 5분간 상태를 유

지 하며 하중 증가 사이클을 반복하는 반복 하중 시험과 한계 하중(13톤)까지 하중을 증가 시켜 한계하중에 도달할 시 철근 콘크리트 균열 성장과정에서 1차 소선파단, 2차 소선파단 발생으로 손상 위치를 예측하는 인장파괴 시험을 실시하였다.



[그림 6] 텐던 파단 및 균열

철근콘크리트 균열과 텐던 파단이 [그림 6]과 같이 주파수 변수가 구분되는 초기 주파수(Initiation Frequency)와 잔향 주파수(Reverberation Frequency)의 특징에서 철근콘크리트 균열과 강연선 파단이 구분되어 강연선 파단 시 초기주파수는 철근 콘크리트 균열보다 낮게 나타나고, 잔향 주파수는 반대로 높게 나타남을 확인할 수 있다. 강연선 파단 시점의 두 주파수 성분의 상기 상관관계 그래프에서 AE Energy가 충분히 큰 시점을 표시 했을 때 서로 다른 영역으로 구분되는 것을 볼 수 있어 위험물 저장탱크의 균열 발견과 예측에 유용함을 확인 하였다.

5. 결 론

위험물을 저장하고 이송하는 산업현장 사고의 주요 원인은 설비의 변형, 고장, 파손, 부식, 노후 등으로 내부 균열이 발생, 누출 되어 대형화재, 폭발로 이어져 심각한 인명피해와 재산피해를 야기한다.

이에 본 논문에서는 위험물 제조소 등의 화재폭발 사고 예방을 위하여 구조체에 응력이 가해지면 변형되거나 파손될 때 발생하는 ‘탄성파’를 측정하여 실시간으로 손상을 진단, 마이크로미터 수준의 균열을 검출하는 최첨단 비파괴 음향방출시험 검사 기술을 제안한다.

또한, 음향방출시험 검사기술의 신뢰성을 확인하기 위하여 위험물 저장시설콘크리트 한계 하중의 50% 수준으로 5분간 상태를 유지하며 수행한 결과 기존 검사 기술보다 음향방출기술을 이용한 비파괴검사가 위험물 저장시설의 사고예방에 유용함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구 결과입니다(NTIS 과제번호. 1345356798).

참고문헌

- [1] 김성문, "석유화학설비의 안전 진단 기술 현황", 한국비파괴 검사학회, 학회지, pp171,
- [2] 임채운, 김채수, "산업유해 위험물질 취급 제조현장 관리자의 공정안전관리(PSM)가 잠재 위험도에 미치는 영향에 관한 연구", 한국산학기술학회 논문지, PP.108-114, 2018
- [3] 2009소방청, 위험물 통계자료, 2022
- [4] 정중채, 윤동진, 박휘립, 김기복, 이승석, "구조용 알루미늄 합금에서의 피로균열 열림 및 닫힘 시 AE 발생특성 연구", 한국비파괴검사학회, 학회지, pp155-169, 2002
- [5] 이영석, 남명우, 홍순관, "초음파 비파괴 평가를 위한 협소 타깃의 크랙 사이징 및 검출을 위한 영상 증진기술" 한국산학기술학회논문지, v.8, no.2, 245-249, 2007년
- [6] 임중진, 박용진, "누출사고 방지를 위한 위험물 탱크의 기초 안정성 분석" 한국위험물학회, 학회지, pp44-48, 2013
- [7] 박휘립, 정중채, 김동진, 허용학, 윤동진, "철근 콘크리트 보의 손상 진전에 의해 발생하는 음향방출 신호 특성", 한국비파괴검사학회, 학회지, pp116-124, 2003
- [8] 권지홍, 김봉기, 이문욱, "탄성파 신호 추출 성능이 향상된 음향방출 시험장치", 대한민국특허청, 2017
- [9] 김성문, "석유화학설비의 안전진단 기술 현황, 비파괴검사 학회지, pp.171, April 2009
- [10] 배명환, 최원재, 하종문, 승홍민, "탄성 메타물질 기반 L-자 초음파 도파관", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, pp.285, 2022