

# 음향방출검사 기술을 이용한 비파괴 검사 방안에 관한 연구

최형락, 배윤진, 우현식, 권경민, 임준혁, 최승규  
건양대학교 재난안전소방학과  
e-mail : skchoi@konyang.ac.kr

## A Study on the Plan of Non-Destructive Testing Using Acoustic Emission Testing.

Hyeong-Lak Choi, Yoon-Jin Bae, Hyun-Sik Woo, Gyeong-Min Kwon,  
Joon-Hyuk Lim, Seung-Kyou Choi  
Department of Disaster Safety & Fire fighting, Konyang University

### 요약

위험물 저장시설의 균열에 의한 누출은 중독, 화재 등을 수반할 수 있으며 폭발, 화재 등으로 이어져 심각한 인명과 재산피해를 야기할 수 있다. 폭발 위험성이 상시 내재 되어 있는 위험물 저장시설 누출 사고는 해마다 증가하고 있으며, 위험물을 저장하고 이송하는 설비의 변형, 고장, 파손, 부식, 노후 등의 내부 균열이 사고의 주요 원인으로 밝혀지고 있다. 위험물 저장시설의 주요 사고 원인인 균열을 조기에 검출하여 사고를 예방할 수 있는 비파괴 검사기술이 요구된다. 비파괴검사는 시험체를 파괴하지 않고 재질, 성능, 상태, 결함의 유무를 확인하는 기술로 최근에는 설비의 가동 중에 미세 균열을 검출할 수 있어 안전 및 신뢰성이 높은 음향방출검사법을 적용하고 있다. 이에 본 논문에서는 위험물 저장 시설의 화재 폭발 사고 예방을 위하여 피검체에 응력이 가해지면 변형, 균열 또는 파괴되는 과정에서 수반되는 에너지가 탄성파로 방출되는 것을 검출기를 통해 검출함으로써 피검체에 결함 발생 여부와 크기, 위치, 진행 정도 등을 분석하는 첨단 비파괴 검사기법인 음향방출검사 기술을 제안한다. 또한 위험물 저장시설을 대상으로 비파괴 검사 시험을 실시하고 분석한 결과, 음향방출검사 기술이 기존 비파괴 검사의 한계점을 개선하고 신뢰성이 향상되어 화재 폭발 예방 대응에 유용함을 확인하였다.

### 1. 서론

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 발생 누출되어 화재, 폭발로 이어진다[2]. 이러한 화재·폭발을 예방하기 위하여 내부의 균열을 미리 검출할 수 있는 첨단 비파괴검사(Non-Destructive Testing, NDT) 기술이 요구된다.

비파괴검사는 시험체를 파괴하지 않고 재질, 성능, 상태, 결함의 유무를 확인하는 기술로 초음파탐상, 방사선투과, 자기탐상, 침투탐상 등이 있으며 최근의 첨단 비파괴 기술에는 서모그래피, 유도초음파, 레이저초음파, 테라헤르츠, 음향방출 기술이 있다[3].

물체에 외력이 가해지면 변형 또는 파괴되어 균열에 의해

생성되는 변형에너지인 탄성파가 물체 내부에 전파된다. 음향방출검사 기술(Acoustic Emission Testing AET)은 물체 표면에 설치된 음향방출(Acoustic Emission, AE)센서에 의해 탄성파를 검출하고 신호를 분석, 처리하는 기술로 내부의 균열을 미리 검출하여 설비나 구조물의 안전을 확보하고 화재폭발사고를 예방할 수 있는 첨단 비파괴검사 기술이다[4].

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 기술을 이용한 비파괴검사 방안의 신뢰성을 확인하기 위하여 시험하고 분석한 결과 위험물 저장소의 안전을 확보하고 화재폭발사고를 예방하는 데에 유용함을 확인한다.

### 2. 위험물 저장시설의 사고 특성 분석

소방청의 위험물 통계자료에 따르면 2017년도부터 2021년

까지 최근 5년간 물적요인별 위험물 사고 현황은 표 1과 같이 총 69건으로 집계되었고 부식·노후가 24건, 고장·파손이 42건으로 전체 95.6%로 높은 비율을 차지하고 있다.

[표 1] 물적요인별 위험물 사고 현황 통계

구분	계	부식·노후	설계불량	고장·파손	시공불량
계	69	24	-	42	3
2021년	6	2	-	4	-
2020년	14	10	-	4	-
2019년	14	2	-	10	2
2018년	19	5	-	14	-
2017년	16	2	-	10	1

위험물 저장시설의 균열, 부식, 파손 등으로 미세 균열의 발생 및 성장, 위험물이 누출되고 대형 화재·폭발로 이어져 표 2와 같이 막대한 인명피해와 재산피해를 발생시킬 수 있어 이에 대한 안전대책이 요구된다.

[표 2] 국내 위험물 취급시설의 화재 폭발 사고

일 자	사고 개요 및 원인
2019.09.06.	충북 이월면 위험물제조소 공장 화재, 탱크에서 아세톤을 용기에 옮겨 담는 작업 도중 사고, 1억 150만원 재산피해
2019.08.06	안성 건화지기 창고 폭발, 미상의 접화원에 의해 화재, 인명피해 12명 사상, 81억원 재산피해
2019.04.30	군포 강남제비스코 공장, 원인 미상 폭발사고, 소방대 대응 단계 중 최고단계인 대응 3단계 발령
2018.10.07	경기도 대한송유관 공사 경인지사, 저유소 시설 내부 풍등으로 인한 화재 및 폭발, 43억 5,000만원 재산피해
2017.11.16	오산시 풍산 인더스트리 위험물 제조소, 재료 작업투입 중 정전기 등에 의한 폭발, 화학적요인 추정, 2명 부상, 110만원 재산피해
2015.10.07	용인시 처인구 모현면 유류보관 창고 화재, 석유화학제품의 연속적인 폭발, 1억 5,000만원 재산피해

### 3. 위험물 저장시설의 AET를 이용한 비파괴 검사 방안

#### 3.1 위험물 저장시설의 비파괴 검사

위험물 저장시설의 건전성을 평가하는 비파괴검사(Non-Destructive Testing)에는 초음파 탐상검사법(Ultrasonic flaw detecting Test)과 방사선투과검사법(Radiographic Test) 등이 있다. 이때 초음파 탐상검사는 초

음파를 통해, 방사선투과검사는 방사선을 통해 대규모 크랙(crack)의 표면 및 내부결함을 조기에 발견할 수 있는 기법이 다[5,6].

초음파 탐상검사법은 결함 존재 시, 결함에 의해 반사되어 돌아오는 초음파의 진행거리를 펄스신호로 나타내어 결함에 대한 크기와 상태를 검사한다. 하지만 결함의 종류 식별이 어렵고 외부의 영향에 민감하며 검출이 불가능한 부분이 존재하고 검사원의 능력에 따라 신뢰성에 한계가 발생한다[7].

방사선투과검사법은 시험체 내에 방사선 투과 시, 필름 상에 나타나는 건전부와 결함부의 투과선량의 차이로부터 결함을 검출하는 것으로, 영구적인 보관이 가능하지만 방사선 피복으로 인한 검사장소 제한과 검사자의 안전문제 및 고비용의 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 비파괴검사 방법의 한계점을 극복하고 보완할 수 있는 음향방출검사 기술을 이용한 비파괴 검사 방안을 제안한다.

#### 3.2 AET를 이용한 위험물 저장시설의 비파괴 검사 방안

폭발 위험성이 상시 내재 되어 있는 위험물을 저장하고 이송하는 저장시설의 주요 사고 원인은 설비의 변형, 고장, 파손, 부식, 노후 등으로 내부의 균열이 발생, 누출되어 화재, 폭발로 이어져 막대한 인명피해와 재산피해를 발생시킨다. 위험물 저장시설에서 발생하는 화재폭발 사고를 예방하기 위해서는 기존 비파괴 검사의 한계점을 극복하고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 첨단 비파괴검사 기술이 필요하다.

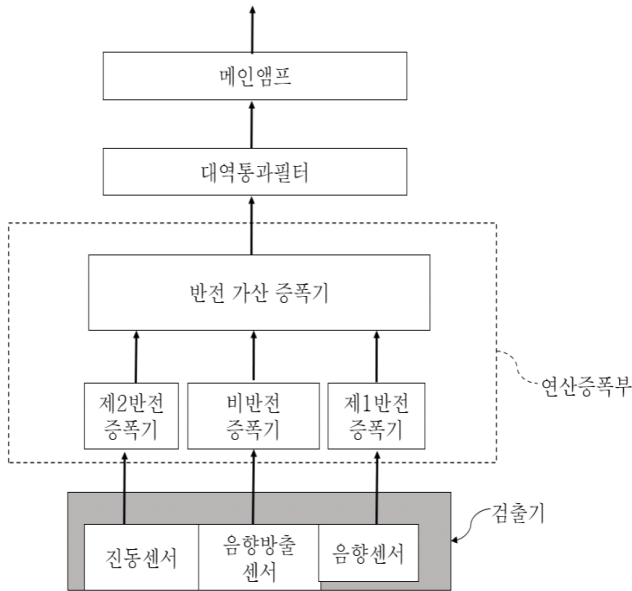
이에 본 논문에서는 매우 큰 구조물에서도 가동상태를 유지하면서 결함의 발생이나 성장 유무를 연속적으로 관측하는 것이 가능하고 기존 비파괴 검사의 한계점을 개선하고 신뢰성을 향상시킨 음향방출검사 기술을 제안한다.

음향방출기술의 Hardware는 그림 1과 같이 피검체로부터 방출되는 신호를 검출하는 검출기와 검출된 신호를 1차적으로 증폭 및 증첩시켜 잡음 신호가 제거된 탄성과 신호를 반전시켜 출력하는 연산 증폭부, 증폭된 탄성과 신호를 일정 대역의 신호로 필터링하는 대역통과필터, 대역통과필터를 통과한 신호를 증폭 반전시켜 출력하는 메인앰프, 메인앰프를 통과한 신호 중에서 임계값 이상의 값을 가지는 탄성과 신호를 추출하는 임계식별부, 임계값 이상의 탄성과 신호를 이용하여 피검체의 결함이 존재하는지 여부를 분석하는 신호분석부, 분석된 정보를 출력 및 저장하는 출력 및 저장부로 구성되고 연산 증폭부는 음향방출센서를 통해 출력되는 잡음이 포함된 탄성과 신호를 비반전 증폭하는 비반전 증폭기와 음향센서에서 출력되는 음향 신호의 위상을 반전시켜 증폭하는 제1반전 증폭기와 진동센서에서 출력되는 진동 신호를 반전시켜 증폭하는 제2반전 증폭기 및 반전 가산 증폭기로 구성한다. 한편,

반전 가산 증폭기의 값은 식 (1)에 의해 출력된다.

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

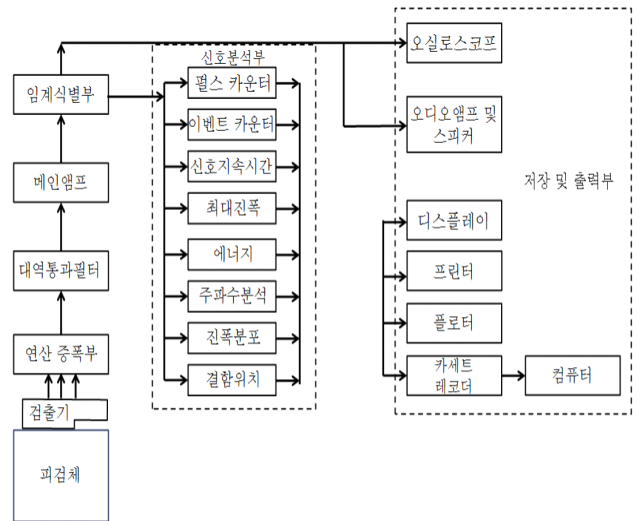
여기서,  $V_{OUTS}$ 은 반전 가산 증폭기의 출력값이고,  $R_{1S}$ 는  $V_1$ 의 입력저항이며,  $R_{2S}$ 는  $V_3$ 의 입력 저항이며,  $R_{FS}$ 는 반전 가산 증폭기의 출력 피드백 저항이고,  $V_1$ 은 진동센서의 출력이며,  $V_2$ 는 음향방출센서의 출력이고,  $V_3$ 는 음향센서의 출력이다[2].



[그림 1] 검출기, 연산 증폭부, 대역통과필터 및 메인앰프의 구성도

피검체의 미세 균열을 검출하는 음향방출검사 알고리즘은 그림 2와 같이 반전 가산 증폭기를 거치면서 탄성파에 포함된 잡음 신호(음향 및 진동 신호)는 효과적으로 제거되어 탄성과 신호만 남게 되며, 이러한 탄성과 신호는 그 하류측에 위치하는 대역통과필터에 입력되고 미리 설정된 대역폭을 가지는 신호만 필터링되어 출력된다. 이때 대역통과필터는 30kHz~2MHz의 대역폭을 가지며 연산 증폭부로부터 입력되는 신호 중 일정 대역의 신호만 통과시킴으로써 필요한 대역의 신호만 추출되고, 대역통과필터를 통과한 신호는 메인앰프에 전송되어 2차적으로 증폭된다. 메인앰프는 반전형 증폭기가 사용되고, 위상이 반전된 신호가 원래의 위상을 가지도록 복원되어 출력된다. 출력된 신호는 임계식별부에 입력되고, 메인앰프를 통과한 신호 중에서 분석에 사용할 수 있는 미리 설정된 임계값 이상의 신호 레벨을 가지는 신호를 추출하여 다음 신호분석부에 전송한다. 신호분석부에서 펄스카운터, 이벤트 카운터, 신호지속시간, 최대진폭, 에너지, 주파수분석, 진폭분포, 결합위치

포, 결합위치 등을 각각 분석함으로써 획득한 탄성과 신호로부터 피검체의 파손 또는 균열여부, 결함의 크기, 종류, 위치 및 결함의 진행 정도 등을 정확하게 분석하고, 분석된 정보는 출력 및 저장부를 통해 출력되거나 저장되면서 모니터링된다. 출력 및 저장부는 오실로스코프, 오디오앰프 및 스피커, 디스플레이, 프린터, 플로터, 카세트 레코더 및 컴퓨터 중에서 선택된 어느 하나 또는 복수 개로 구성되고, 오실로스코프, 오디오앰프 및 스피커에는 임계식별부로부터 직접 신호를 받아 신호분석부를 거치지 않은 신호가 입력되어 실시간으로 출력된다



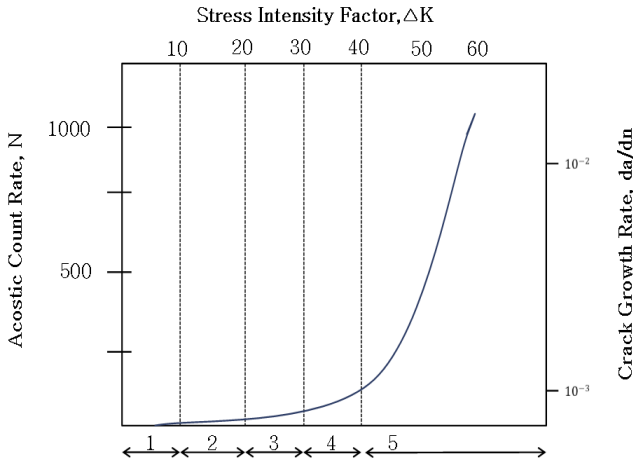
[그림 2] 음향방출검사 기술의 미세 균열 검출 분석 알고리즘

음향방출 시험장치의 검출기에 음향방출센서와 음향센서 및 진동센서를 구비하여 음향방출센서로부터 획득된 탄성과 신호로부터 잡음 신호를 효과적으로 제거함으로써 피검체에 결함이 있는지 여부와 결함의 상태 등을 더욱 정확하게 검사 및 분석할 수 있으며, 또한 검사 및 분석에 소요되는 시간을 대폭 단축할 수 있다.

#### 4. 시험 및 결과 분석

본 논문에서 제시한 AET를 이용한 비파괴 검사 기술과 알고리즘에 따라 시험한 결과는 그림 3과 표 3과 같다.

재료 내 피로파괴 시 미세 균열에 대한 AE시험 데이터를 분석하면, 응력 강도 계수가 0과 10 사이에서는 Minor defect (사소한 결함), 10과 20 사이에서는 Slow crack growth(느린 균열 성장), 20과 30 사이에서는 Requires repair(수리 필요), 30과 40 사이에서는 Dangerous(위험), 40 이상에서는 Imminent failure(임박한 고장)로 나타난다.



[그림 3] AET를 이용한 비파괴 검사 결과

또한, 응력 강도 계수가 높아지면 음향방출 계수율이 올라가고 균열 성장률은 높아진다.

[표 3] AET를 이용한 비파괴 검사 결과 분석

Range of $\Delta K$	Crack Safety Index	Crack Description
$0 < \Delta K < 10$	1	Minor defect
$10 < \Delta K < 20$	2	Slow crack growth
$20 < \Delta K < 30$	3	Requires repair
$30 < \Delta K < 40$	4	Dangerous
$40 < \Delta K$	5	Innocent failure

한편, 일반적인 위험물 저장시설의 개방검사는 비가동시간(Downtime), 작업비용, 보수(Repair), 그리고 부분적인 비파괴 검사가 추가되어 많은 비용이 소요될 뿐만 아니라 대용량 압력용기나 저장탱크의 경우 검사나 시험의 복잡성은 훨씬 증가한다. 하지만, 음향방출검사 기술을 이용한 비파괴검사는 플랜트 가동중지 기간뿐만 아니라 가동을 멈추기 전의 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 기간동안 비파괴 검사가 가능하여 결과적으로 검사 기간 단축 및 비용 절감 효과를 얻을 수 있다.

### 5. 결 론

위험물 저장시설의 균열, 부식, 파손 등으로 미세 균열의 발생 및 성장, 위험물이 누출되고 대형 화재·폭발로 이어져 심

각한 대형재해가 발생한다. 폭발 위험성이 상시 내재 되어 있는 위험물 저장시설 누출 사고는 해마다 증가하고 있으며, 위험물을 저장하고 이송하는 설비의 변형, 고장, 파손, 부식, 노후 등의 내부 균열이 사고의 주요 원인으로 밝혀지고 있다. 위험물 저장시설에서 발생하는 화재폭발 사고를 예방하기 위해서는 기존 비파괴 검사의 한계점을 극복하고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 첨단 비파괴검사 기술이 필요하다.

이에 본 논문에서는 위험물 저장시설의 화재·폭발·사고 예방을 위하여 피검체에 응력이 가해지면 변형, 균열 또는 파괴되는 과정에서 수반되는 에너지가 탄성파로 방출되는 것을 검출기를 통해 검출함으로써 피검체에 결함 발생 여부와 크기, 위치, 진행 정도 등을 분석하는 첨단 비파괴 검사기법인 음향방출검사 기술을 제안한다. 또한, 위험물 저장시설을 대상으로 비파괴 검사 시험을 실시하고 분석한 결과, 음향방출 검사 기술이 기존 비파괴 검사의 한계점을 개선하고 신뢰성이 향상되어 화재, 폭발 사고의 예방, 대응에 유용함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구 결과입니다(NTIS 과제번호. 1345356198).

#### 참고문헌

- [1] 김성문, "석유화학설비의 안전 진단 기술 현황", 한국비파괴검사학회, 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] 박휘립, 정중채, 김동진, 허용학, 윤동진, "철근 콘크리트 보의 손상 진전에 의해 발생하는 음향방출 신호 특성", 한국비파괴검사학회, 학회지, pp116-124, 2003
- [5] 정중채, 윤동진, 박휘립, 김기복, 이승석, "구조용 알루미늄 합금에서의 피로균열 열림 및 닫힘 시 AE 발생특성 연구", 한국비파괴검사학회, 학회지, pp155-169, 2002
- [6] 이영석, 남명우, 홍순관, "초음파 비파괴 평가를 위한 협소 타깃의 크랙 사이징 및 검출을 위한 영상 증진기술" 한국산학기술학회논문지, v.8, no.2, 245-249, 2007년
- [7] 임종진, 박용진, "누출사고 방지를 위한 위험물 탱크의 기초 안정성 분석" 한국위험물학회, 학회지, pp44-48, 2013