

금속 및 복합재 CNG 탱크에서의 손상 검출을 위한 음향방출 에너지 기반 위치표정 기술

Energy Based Source Location by Using Acoustic Emission for Damage Detection in Steel and Composite CNG Tank

김일식^{*,**}, 한병희^{*,***}, 박춘수^{*}, 윤동진^{*†}

Il-Sik Kim^{*,**}, Byeong-Hee Han^{*,***}, Choon-Su Park^{*} and Dong-Jin Yoon^{*†}

초 록 음향방출기술은 고체내부에 국부적으로 형성된 변형에너지가 급격히 방출되면서 발생하는 탄성파를 이용하는 기술로써 결함의 발생이나 존재하는 결함의 진전을 검출하는 비파괴검사 기법이다. 환경문제로 인해 최근 약 20년 전부터 압축 천연 가스가 자동차 석유 연료의 대안으로 사용되면서 CNG 탱크의 안전성 검사의 필요성 또한 증가하고 있다. 특히 복합재 CNG 탱크에서는 적층된 재료와 방향에 따라 파의 속도나 분산 특성이 달라지므로 매질의 속도에 절대적으로 영향을 받는 종래의 도달 시간차를 이용한 AE 기법으로 결함검출을 하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 스틸실린더인 Type-I과 스틸실린더에 GFRP로 와인딩된 Type-II 시편에서 에너지 기반 contour map 기법을 이용해 종래의 AE기법의 한계를 극복하고 결과를 비교하였다. 그 결과 위치표정이 불가하거나 오차가 컸던 종래의 방법과 달리 에너지 기법은 모든 지점에서 위치표정이 가능했으며 오차 또한 현저히 준 것을 확인할 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 복합재 구조물, CNG 탱크, 손상위치표정, 에너지기반 위치표정 기법

Abstract Acoustic emission (AE) is an effective nondestructive test that uses transient elastic wave generated by the rapid release of energy within a material to detect any further growth or expansion of existing defects. Over the past decades, because of environmental issues, the use of compressed natural gas (CNG) as an alternative fuel for vehicles is increasing because of environmental issues. For this reason, the importance and necessity of detecting defects on a CNG fuel tank has also come to the fore. The conventional AE method used for source location is highly affected by the wave speed on the structure, and this creates problems in inspecting a composite CNG fuel tank. Because the speed and dispersion characteristics of the wave are different according to direction of structure and laminated layers. In this study, both the conventional AE method and the energy based contour map method were used for source location. This new method based on pre-acquired D/B was used for overcoming the limitation of damage localization in a composite CNG fuel tank specimen which consists of a steel liner cylinder overwrapped by GFRP. From the experimental results, it is observed that the damage localization is determined with a small error at all tested points by using the energy based contour map method, while there were a number of mis-locations or large errors at many tested points by using the conventional AE method. Therefore, the energy based contour map method used in this work is more suitable technology for inspecting composite structures.

Keywords: Acoustic Emission(AE), Composite Structures, CNG Tank, Source Localization, Energy Based Contour Map Method

[Received: August 27, 2015, Revised: October 22, 2015, Accepted: October 26, 2015] *한국표준과학연구원 안전측정센터, **과학기술연합대학원대학교 한국표준과학연구원캠퍼스, ***충남대학교 기계설계공학과, †Corresponding Author: Center for Safety Measurements, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea (E-mail: djyoon@kriss.re.kr)

© 2015, Korean Society for Nondestructive Testing

1. 서론

세계적으로 점차 강화되고 있는 자동차 배출가스 규제와 경유자동차의 배기가스로 인한 대기오염 문제가 심각해지고 있다[1]. 이를 완화하고자 우리나라에서는 약 20년 전부터 경유를 사용하는 대중교통 수단인 시내버스에 압축천연가스(CNG)를 사용하기 시작하였다. 현재 국내에 약 4만대의 CNG 자동차가 운용중이며[2] 전국 시내버스의 약 90% 정도가 CNG 연료를 사용하고 있다. 국내 외적으로 CNG 자동차 이용률이 증가하고 있지만 관련된 사고 또한 발생하고 있다. 미국에서 1984년 이후 자동차용 CNG 탱크 사고가 80건 이상 발생하였으며[3], 국내에서도 최근 잇따라 십여 차례 이상 발생한[4] 대형 사고들이 CNG 연료탱크의 노후화 및 결함으로 인해 발생한 것으로 밝혀져 관련 부품에 대한 정기적 혹은 실시간 안전성 검사에 대한 필요성이 제기되고 있다[5]. 음향방출 기법은 매질에서의 탄성과 속도를 이용해 3개 이상의 센서를 이용하여 손상위치로부터 탄성파가 각 센서에 도달하는 시간차로 결함의 위치를 파악하는 기법이다[6]. 이러한 음향방출 기법은 대상체의 운영 조건에 관계없는 비파괴검사 기법으로, 버스 운용 중에 CNG 탱크의 건전성을 실시간으로 모니터링하기에 적합하다[7].

최근 금속 단일재료를 사용한 Type-I 탱크보다 무게 대 강성비가 더욱 좋은 복합재를 이용한 탱크의 이용이 증가하고 있다. 하지만 복합재 CNG 탱크의 경우, 두 가지 이상의 재료가 적층된 구조물로서 적층된 재료 및 적층 방식에 따라 탄성파의 속도와 분산 특성이 단일 재료와 다르게 복잡하고 불규칙하다[8]. 그러므로 복합재 CNG 탱크의 경우 도달시간차를 이용하는 상용 AE장비로는 결함의 위치를 검출하는데 한계가 있다. 복합재 구조물에서의 음향방출 기법을 이용한 위치표정 기법의 한계를 극복하기 위해 energy based contour map 기법이 선행 연구에서 개발되었다[9].

Energy based contour map 기법의 적용 가능성을 확인하기 위해 본 연구에서는 금속 단일재료로 만들어진 CNG 탱크와 금속 실린더에 GFRP(glass fiber reinforced plastic)로 와인딩된 복합재 CNG 탱크 시편을 이용하여 비교하였다. 단일재료와 복합재 CNG 탱크 시편에서 각 위치에

서 측정된 waveform을 기반으로 D/B를 미리 구축하고 구축된 D/B와 CNG 탱크 운용중에 결함으로 인해 발생된 음향방출 신호를 비교, 분석하여 손상 위치표정을 실시하였다.

본 연구에서는 스틸 실린더인 Type-I과 스틸 실린더 위에 후프 부분만 GFRP로 와인딩하여 보강된 Type-II 연료탱크에서 임의 손상을 발생시켜 도달시간차를 이용한 종래의 AE기법과 선행 연구에서 개발된 energy based contour map 기법을 이용하여 위치표정을 실시하였다. 두 기법간의 결과뿐만 아니라 단일재료 시편과 복합재료 시편에서의 결과를 비교하여 energy based contour map 기법의 복합재 탱크에서의 적용 가능성을 확인하였고 기법 우수성을 검증하였다.

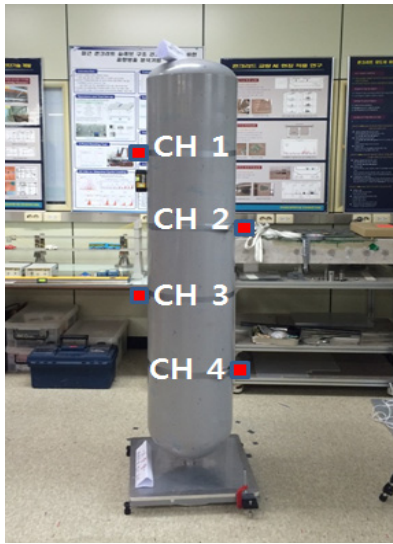
2. 실험

본 연구에 사용된 시편은 스틸로만 이루어진 Type-I과 스틸 실린더 위에 후프 부분만 GFRP로 와인딩되어 보강된 Type-II가 사용되었고 Fig. 1에 두 시편을 나타내었다. Type-I의 크기는 길이 1800 mm, 둘레 1120 mm이며, Type-II는 길이 1900 mm, 둘레 1130 mm이다.

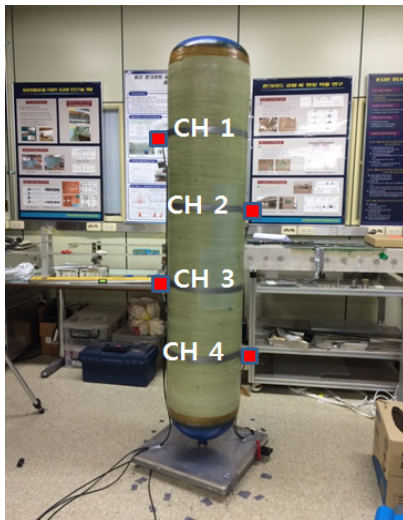
손상 위치표정을 하기 위해 두 개의 시편에 PAC社의 150 kHz 공진형 상용센서 R15I 4개를 사용하여 Fig. 1과 같이 배치하였다. 각 센서의 축방향 거리는 등간격이며 센서 1,3과 2,4는 서로 180°로 위치해있다. 손상 신호를 모사하기 위해 Hsu-nelson pencil lead break test로 모의 탄성파를 발생시켰으며 $\phi 0.5$ mm, 0.3 mm 샤프심과 금속 육각렌치를 이용하였다. 도달시간차 기법을 이용한 위치표정에는 PAC社 상용 AE 장비인 μ SAMOS를 이용하였다.

도달시간차를 이용한 종래의 AE기법은 매질에서의 정확한 속도를 AE 장비에 적용시켜야 하기 때문에 Type-I과 Type-II에서 탄성과 전과 속도를 측정하였다. 모의 탄성파 발생은 pencil lead break(PLB)로 하였으며 속도 측정을 위해 두 R15I 센서를 탄성과 발생 지점으로부터 각각 200 mm와 400 mm 이격된 곳에 설치하였다.

Type-II와 같은 복합재 이방성 구조물에서는 재료의 적층 방법 및 적층 방향에 따라 탄성파의 속도와 모드가 다양하며 분산이 심한 판파의 형태로 진행하여 그 파형이 복잡하다[10]. 그렇기



(a) Type-I



(b) Type-II

Fig. 1 CNG tank with four AE sensors

때문에 축방향과 원주방향으로 탄성과 속도를 측정하였다. 두 센서에서 측정된 first arrival peak의 시간차를 이용해 탄성과의 속도를 측정하였으며, 다수의 속도 측정 실험 중 실질적으로는 변화폭이 크고 각기 다른 속도값들이 측정되었기 때문에 대표적으로 측정된 평균값과 편차를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 Type-II의 경우 축방향과 원주방향으로의 탄성과 속도가 각기 다르게 측정되었다. Type-II는 후프부분만 GFRP로 90°로 와인딩 되어 있어 원주방향으로의 탄성과 속도가 더 빠름을 확인할 수 있

Table 1 Wave propagation speed at each direction on the CNG fuel tank

| Tank type | Axial direction | Circumferential direction |
|-----------|------------------------|---------------------------|
| I | 5,405 m/s (± 36) | 5,555 m/s (± 75) |
| II | 5,263 m/s (± 71) | 5,774 m/s (± 185) |

었다. 측정된 탄성과의 속도를 상용 AE 장비에 적용하여 위치표정을 하였다. 위치표정을 한 영역은 Type-I에서는 축방향 1600 mm, 원주방향 1120 mm이고, Type-II에서는 1700 mm, 1130 mm의 크기에서 위치표정을 실시하였다.

3. 위치표정

임의 손상 신호의 위치표정을 위해 R15I 공진형 상용 센서 4개를 Fig. 1과 같이 시험편 표면에 부착하였다. 본 연구에서 사용된 두 기법간의 위치표정 결과 비교를 위하여 같은 센서와 같은 위치에서의 임의 손상 신호를 사용하였다. Fig. 2에 센서를 빨간색 네모로, 하늘색 동그라미를 D/B 구축을 위한 충격지점으로, 7개의 임의 손상 신호 지점을 파란색 별표로 표시하였다. PLB ϕ 0.5 mm, 0.3 mm와 육각렌치 metal impact로 7개의 임의 지점에 각각 3번씩 반복 실험하여 정량적인 모의 충격을 가하였으며 도달시간차 기법과 energy based contour map 기법으로 각각 위치표정을 실시하고 비교하였다.

3.1. 도달시간차(Arrival Time Difference) 기법

도달시간차 기법은 결함의 위치로부터 발생한 탄성과가 구조물에 부착된 각 센서까지 도달하는

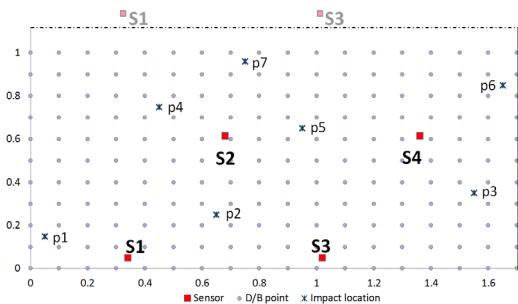


Fig. 2 Location of sensors, impact points and D/B points on the specimen

시간차와 대상 구조물에서의 탄성과 전파 속도를 이용하여 결함의 위치를 검출하는 기법이다. 그렇기 때문에 센서의 개수와 부착 위치가 위치표정에 영향을 미치며 구조물에서의 정확한 탄성과 속도가 요구된다. 앞서 측정된 각 시험편에서의 여러 속도값 중에 지배적인 탄성과 속도를 상용 AE 장비에 적용하고 문턱값은 주변 노이즈가 측정되지 않는 30 dB부터 50 dB까지 5 dB 간격으로 문턱값을 올려가며 위치표정을 하였다. Type-I 탱크와 Type-II 탱크에 비슷한 임의의 7개 지점에 각각 3회씩 PLB ϕ 0.5 mm, 0.3 mm와 metal impact로 모의 가진을 하였다. 실린더 구조물을 m 단위로 x축은 축방향, y 축은 원주방향으로 나타낸 2차원 평면에 위치표정한 결과를 벡터를 이용하여 가시적으로 Fig. 3에 나타내었다. 두 개의 각 시험에서 문턱값 30, 40, 50 dB를 대표하여 나타냈다. 그림에서 빨간색 별표가 임의의 7개 모의 충격지점이고, 파란색 마름모가 장비에서 측정된 위치표정 결과이다. 시험편과 문턱값의 조건에 따라 3번의 반복실험 중 한 번 또는 두 번만 위치표정이 되거나 3번 모두 위치표정이 불가능한 지점도 있었다. 3번의 반복시험 모두 불가능한 지점은 붉은 글씨로 "Not located"로 표기하였다. 실린더의 구조적 특성상 Type-I에서는 7번 지점이, Type-II에서는 2번 지점이 센서 1, 3라인을 기준으로 180° 반대편에 위치표정이 되어 CNG 탱크 외경의 1/3 만큼 큰 오차를 보이기도 했다.

Type-I과 Type-II에서의 위치표정 오차 결과를 5개의 문턱값 조건과 7개의 임의의 가진지점에 따라 Table 2에 나타내었다. 도달시간차 기법은 탄성파가 측정된 3개의 센서에서 각 두 개의 쌍곡선을 그려서 교차된 지점으로부터 탄성과 발생원을 찾는 것이다. 그렇기 때문에 Table 2의 위치표정은 삼각형을 이루는 3개의 센서 중 가장 먼 거리의 센서간 거리를 기준으로 두고 위치표정 결과를 계산하여 Table 2에 퍼센트로 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 3번의 반복실험 중 3번 모두 위치표정이 불가능하거나 한 번 또는 두 번 불가능한 조건에서는 불가능한 횟수만큼 100%로 계산하여 3번의 실험을 평균을 내어 표기하였고 이 탭릿체로 구분을 하였다. Type-I에서는 4, 6, 7번 지점이, Type-II에서는 2, 3, 4, 6번 지점이 오차율이 20%를 넘겨 비교적 큰 오차를 보였다.

Table 2의 평균값에서 볼 수 있듯이 복합재 CNG 탱크인 Type-II가 위치표정이 불가하거나 오차가 Type-I보다 더 큰 것을 확인하였다. 특히 Type-II에서 3번과 6번 지점에서는 거의 모든 문턱값 조건에서 위치표정이 불가함을 보였다.

앞서 구한 Type-II의 방향별 속도의 차이와 CNG 탱크 타입별 위치표정 오차 결과의 차이에서 볼 수 있듯이 복합재 실린더 구조물에서 전파 방향에 따라 탄성과의 속도 및 분산 특성이 다르게 나타남과 실린더 구조물의 특성 때문에 정확한 위치표정을 위해서 특정 문턱값과 정확한 탄성과 속도를 결정해서 적용해야하는 도달시간차 기법은 복합재 CNG 연료탱크에서의 위치표정에 어려움과 한계가 있음을 확인하였다.

3.2. Energy Based Contour Map 기법

복합재 실린더 구조물이 가지는 구조적 특성과 복합소재에서의 탄성과 전파 특성으로 인한 도달시간차 기법의 한계를 극복하기 위해 선행 연구된 energy based contour map을 CNG 탱크에 적용

Table 2 Error rate(%) of source location using arrival time method

| Th | 30 dB | 35 dB | 40 dB | 45 dB | 50 dB |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| P1 | 12.8 | 70.9 | 9.6 | 14.8 | 50.2 |
| P2 | 4.3 | 4.3 | 5.0 | 4.8 | 5.7 |
| P3 | 12.3 | 8.1 | 6.6 | 10.2 | 70.5 |
| P4 | 29.3 | 24.5 | 27.0 | 26.6 | 26.5 |
| P5 | 1.3 | 1.6 | 0.8 | 1.3 | 1.4 |
| P6 | 64.5 | 64.0 | 61.2 | 88.0 | 52.1 |
| P7 | 48.3 | 46.5 | 47.6 | 46.7 | 47.8 |
| AVG | 24.7 | 31.4 | 22.5 | 27.5 | 36.3 |

(a) error rate(%) of source location on the Type-I

| Th | 30 dB | 35 dB | 40 dB | 45 dB | 50 dB |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| P1 | 15.6 | 13.2 | 23.4 | 22.5 | 66.8 |
| P2 | 47.8 | 47.5 | 48.2 | 48.0 | 48.8 |
| P3 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| P4 | 23.8 | 23.9 | 23.5 | 22.9 | 24.3 |
| P5 | 6.7 | 7.5 | 6.1 | 5.3 | 5.3 |
| P6 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 77.2 | 75.7 |
| P7 | 6.2 | 5.0 | 3.3 | 5.1 | 8.9 |
| AVG | 42.9 | 42.4 | 43.5 | 40.1 | 47.1 |

(b) error rate(%) of source location on the Type-II

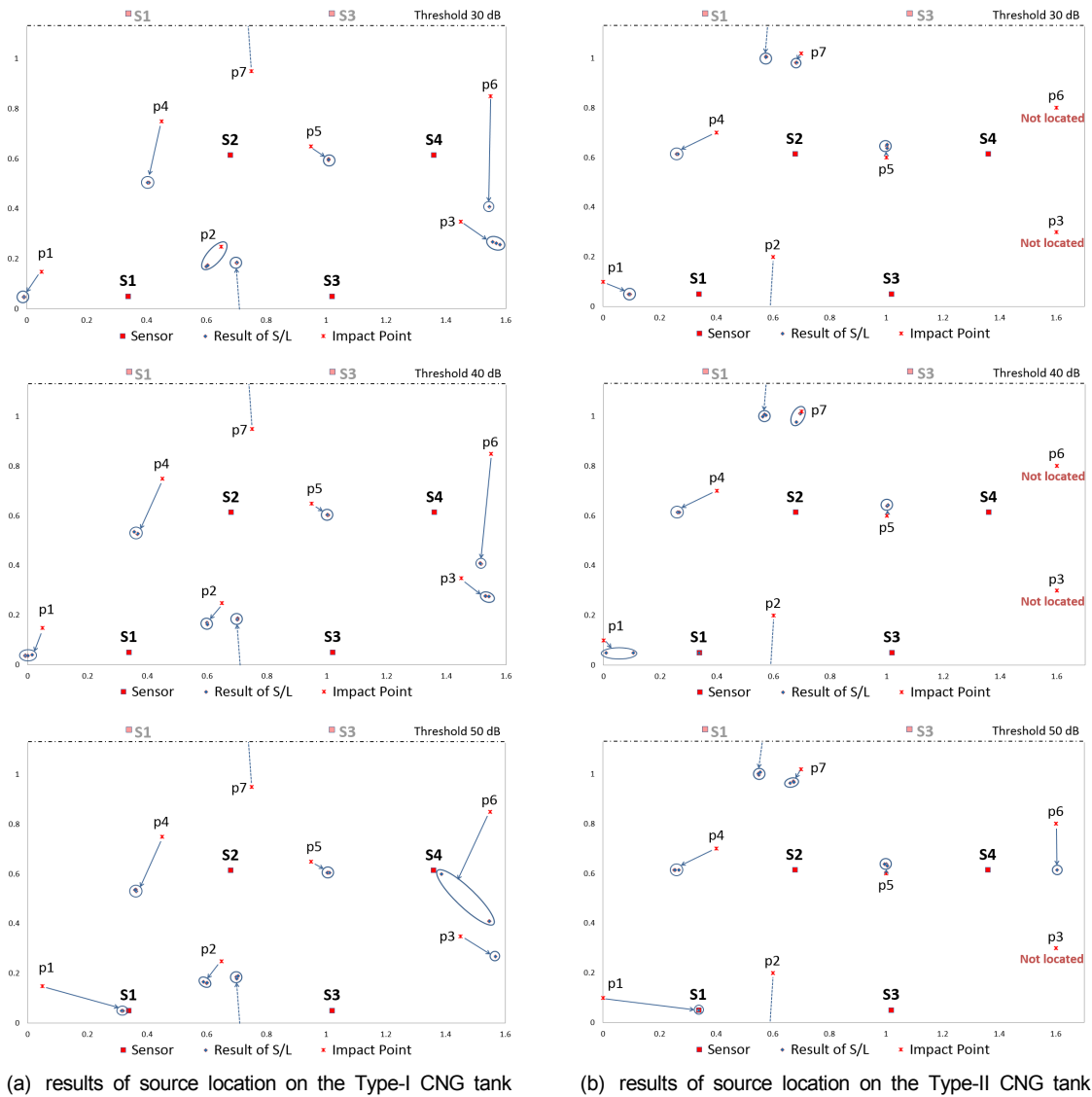


Fig. 3 Results of source location using arrival time difference method

연구하였다. Energy based contour map 기법은 손상 모니터링 관심 영역에 (m, n)의 일정 간격의 탄성과 신호 입력지점을 선정하여 각 실험 위치에 특정 발생원을 사용하여 탄성과 신호를 발생하여 구조물에 부착된 AE 센서로 측정한다. 측정된 음향방출 신호의 파워 스펙트럼 밀도(PSD: power spectral density)값이 시험 위치 정보를 대표하는 에너지값으로 결정된다. 구조물에서의 위치 (x, y)가 에너지 행렬값 (m, n)이 되고 완성된 행렬은 에너지값을 등고선으로 나타낸 contour

map이 생성된다. 각 센서의 수만큼 생성된 맵은 측정장비에 저장되어 손상 위치표정을 하기 위해 사용된다[9, 11].

외부 또는 내부에서 발생하는 unknown 신호에 의해 발생한 탄성과 신호 또한 contour map의 에너지값을 구했을 때와 같은 과정으로 에너지값으로 변환된다. 생성된 contour map에서 unknown 신호에 의한 손상 에너지값과 같은 크기의 (m, n) 좌표를 위치정보 (x, y) 값으로 변환하여 손상 후보지역이 결정된다. 각 센서에서 이 같은 과정

을 거쳐 센서 모두 중첩된 좌표가 unknown 손상 신호가 발생된 위치이다. 또한 위치표정을 할 때 각 센서의 오차 범위인 에너지 밴드를 확장해가면서 손상 위치표정을 하기 때문에 위치표정이 어떤 조건에서도 항상 가능하다. 이러한 기법은 앞서 수행한 도달시간차를 이용한 기법처럼 매질에서의 정확한 탄성과 속도값과 실험 조건에 맞는 문턱값의 영향을 받지 않기 때문에 Type-II CNG 탱크와 같이 실린더형 구조적 특성을 가지고 이종재료로 구성된 다층 복합재 구조물에서도 정확한 위치표정이 가능하게 된다.

Energy based contour map 기법을 도달시간차 기법과 비교하여 적용하기 위해 도달시간차 기법을 이용한 위치표정 실험과 동일한 AE 센서와 부착 위치를 동일하게 하였다. 맵 생성을 위한 D/B를 구축하기 위해 축방향과 원주방향 각각 100 mm 간격으로 Type-I은 축방향 17개, 원주방향 11개로 총 187개 지점에, Type-II는 축방향 18개, 원주방향 11개로 총 198개 지점에 탄성파를 입력하였다. 탄성과 입력은 Galvanometer를 설치하여 2차원 스캐닝이 가능한 Q-switched ND-YAG laser를 이용하여 100 mJ부터 800 mJ까지 가진 에너지를 변화시켜 가면서 D/B를 구축하였다. 이는 실제 CNG 탱크를 운용 중에 있어서 작은 에너지부터 큰 에너지 범위까지 R15I AE센서가 측정 가능한 넓은 에너지 범위의 손상을 위치표정하기 위함이다. Type-I은 250 mJ, 500 mJ의 에너지로, Type-II는 100, 200, 400, 600, 800 mJ의 에너지로 D/B를 구축하였다. Type-I의 Laser D/B가 적은 이유는 스틸로 이루어져있어 탄성파의 감쇠가 매우 적어 실린더 구조물을 원주방향으로 계속 돌면서 전파하기 때문에 여러 개의 wave group이 측정되어 D/B 구축이 어려웠기 때문이다. 반면 복합재로 이루어진 Type-II에서는 감쇠가 크기 때문에 100 mJ부터 800 mJ까지 D/B를 구축하여 비교적 명확한 contour map을 생성할 수 있었다. 이것을 Fig. 4에서 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 CNG 탱크 타입별로 각 센서에서 생성한 contour map이며 여기서 x축은 축방향, y축은 원주방향이다. 생성된 여러 에너지값의 맵 중 하나의 에너지값의 맵만 나타내었다. 빨간색 동그라미가 센서의 위치이며 등고선이 빨간색으로 갈수록 높은 에너지이고 짙은 남색으로 갈수록 낮은 에너지값이다. Fig. 4의 Type-I의 맵에서 확

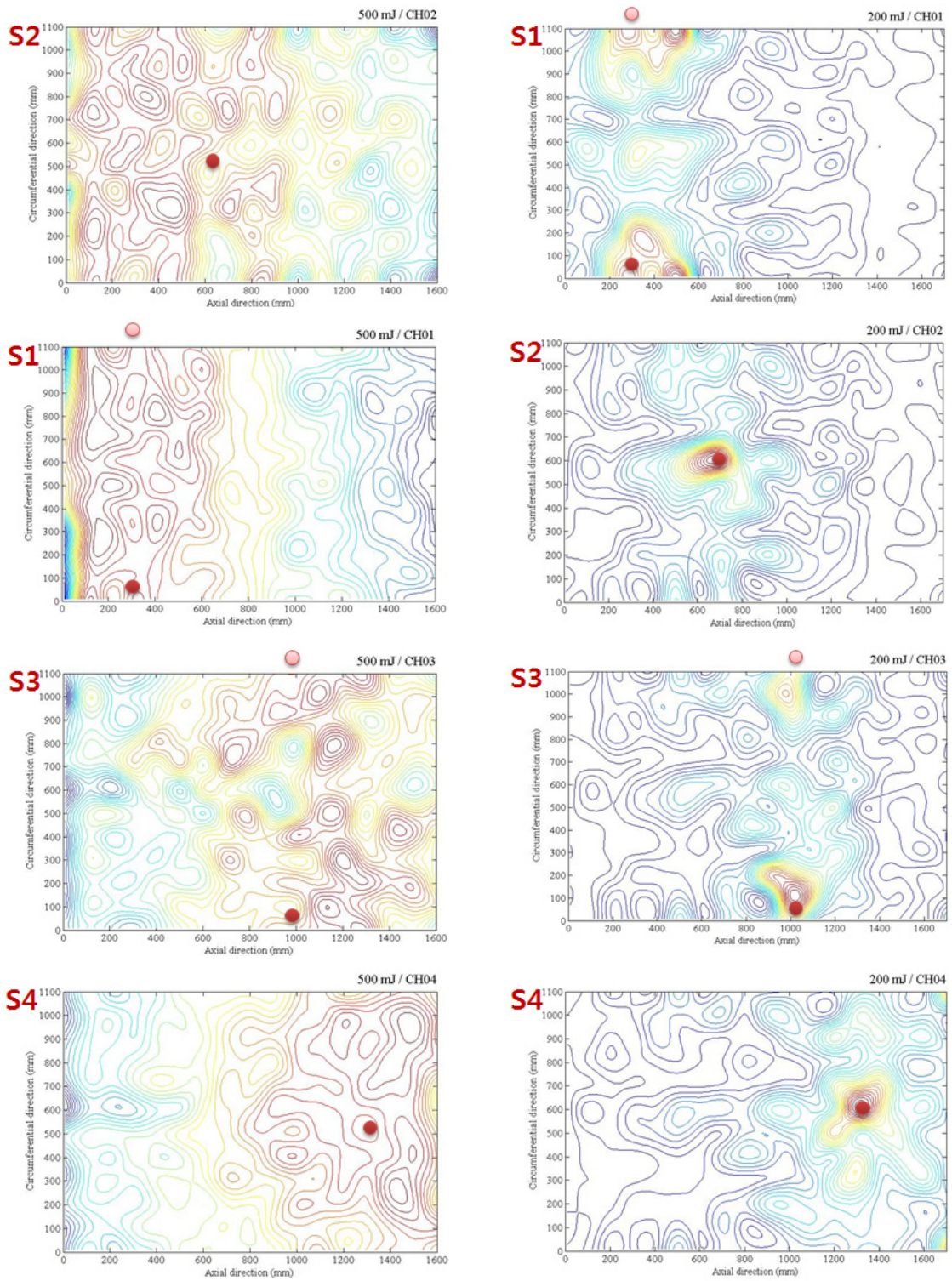
인할 수 있듯이 센서의 부착 위치 주변뿐만 아니라 많은 면적에서 높은 에너지값으로 측정된 빨간 등고선을 확인할 수 있었다. 측정 영역 및 센서로부터의 거리에 따른 에너지값이 명확하게 구분되지 않기 때문에 pulse laser로 다양한 에너지 크기로 유의미한 D/B 구축이 어려웠다. 반면에 비교적 감쇠가 큰 Type-II에서는 측정 영역 및 센서로부터의 거리에 따라 에너지의 높고 낮음이 분명하였고 스틸 실린더의 맵보다 명확한 맵을 얻을 수 있었다.

이렇게 얻어진 contour D/B map으로 도달시간차 기법을 이용한 위치표정 실험에서와 동일한 7개의 임의 지점에 PLB로 ϕ 0.5 mm와 0.3 mm로, 그리고 육각렌치로 정량적으로 충격을 준 metal impact로 각각 서로 다른 크기의 손상 에너지를 내어 위치표정을 실시하였다.

각 에너지별로 D/B로 생성한 contour map으로 각기 다른 세 가지 손상 에너지 크기에 대해 위치표정 결과를 퍼센트로 Table 3에 나타내었다. 도달시간차 기법과의 비교를 위해 동일하게 센서의 삼각형 영역 중 가장 먼 거리의 센서간 거리를 기준으로 두어 계산하였다. 도달시간차 기법에서처럼 매질에서의 정확한 탄성과 속도 입력과 실험 조건에 맞는 문턱값이 요구되지 않고 미리 구축된 D/B를 기반으로 위치표정이 실시되므로 7개 모든 지점에서 위치표정이 가능하였고 오차 범위 또한 현저히 낮음을 확인할 수 있다. 또한 복합재 실린더 구조물인 Type-II에서의 위치표정 오차율이 40%대로 매우 컸던 도달시간차 기법과는 달리 energy based contour map 기법은 오차율이 약 10% 이내로 매우 낮은 것을 볼 수 있다.

4. 두 기법의 위치표정 결과 비교

종래의 AE 장비에 사용되던 도달시간차 기법과 energy based contour map 기법의 위치표정 결과를 Fig. 5에 그래프로 비교하였다. 그래프에서 파란 선은 도달시간차 기법을, 빨간 선은 energy based contour map 기법을 나타낸다. 또한 얇은 실선은 표준편차를 의미한다. 도달시간차 기법의 결과는 단일 재료인 스틸로 이루어진 Type-I에서도 실린더의 구조적 특성상 약 30%의 높은 오차율을 보였으며, Type-II에서는 탄성파의 속도 및 분산 특성이 구조물의 방향마다 다른 이종복합재



(a) Type-I CNG tank

(b) Type-II CNG tank

Fig. 4 Contour D/B map for each sensor

구조물의 특성으로 0%를 넘는 큰 오차를 보였다. 또한 Type-I, II 모두 도달시간차 기법은 임의 가진 지점별로 혹은 문턱값별로 편차가 매우 큰 오차를 보였다. 하지만 energy based contour map 기법의 결과는 Type-I에서의 D/B 구축에 있어 앞서 언급한 애로사항으로 2개의 laser D/B로만 위치표정을 하였지만 종래의 도달시간차 기법에 비해 훨씬 더 낮은 오차율을 보였으며, Type-II에서는 10% 내의 매우 낮은 오차율을 보였고 편차 또한 작아 여러 조건에서 좋은 결과를 보였다. Energy based contour map 기법은 복합재 실린더 구조물과 같이 매질에서의 정확한 탄성과 속도와 조건에 맞는 문턱값이 위치표정 결과에 영향을 주지 않고 복합재가 사용되더라도 위치표정 결과에 영향을 미치지 않는다. 오히려 복합소재로 인한 탄성파의 감쇠로 더 명확한 contour map을 생성하

Table 3 Error rate(%) of source location using energy based contour map method

| Impact Point | Location error (%) | | |
|--------------|--------------------|----------------|--------------|
| | PLB (∅ 0.3 mm) | PLB (∅ 0.5 mm) | Metal impact |
| P1 | 14.48 | 6.06 | 15.84 |
| P2 | 20.00 | 7.35 | 20.00 |
| P3 | 23.25 | 13.56 | 13.32 |
| P4 | 10.60 | 15.84 | 12.48 |
| P5 | 21.41 | 11.49 | 20.48 |
| P6 | 15.14 | 15.14 | 16.24 |
| P7 | 12.56 | 13.56 | 22.45 |
| AVG | 16.78 | 11.86 | 17.26 |

(a) error rate(%) of source location on the Type-I

| Impact Point | Location error (%) | | |
|--------------|--------------------|----------------|--------------|
| | PLB (∅ 0.3 mm) | PLB (∅ 0.5 mm) | Metal impact |
| P1 | 9.87 | 6.06 | 15.63 |
| P2 | 13.87 | 4.65 | 7.50 |
| P3 | 8.32 | 8.32 | 8.32 |
| P4 | 7.35 | 7.35 | 6.06 |
| P5 | 10.40 | 6.57 | 6.24 |
| P6 | 12.49 | 7.93 | 19.74 |
| P7 | 8.57 | 7.93 | 5.88 |
| AVG | 10.12 | 6.97 | 9.91 |

(b) error rate(%) of source location on the Type-II

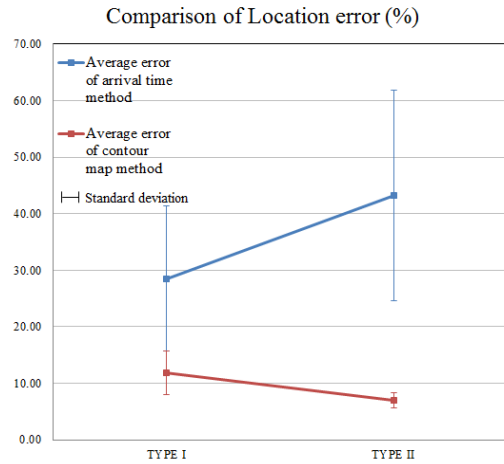


Fig. 5 Comparison of source location error(%)

여 도달시간차 기법과 달리 모든 영역에서 위치표정이 가능하였고 위치표정 결과가 더 뛰어난을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 단일 재료와 이종복합소재로 만들어진 실린더형 구조물에서 기존 상용 AE장비에 사용된 도달시간차 기법과 선행 연구를 통해 개발된 energy based contour map 기법을 본 연구에서 CNG 탱크에 새롭게 적용·개발하여 위치표정을 실시하였다.

여러 형태의 실험을 통하여 기존 도달시간차 기법과 새로운 기법을 비교하였고 새롭게 제안한 energy based contour map 기법은 구조물의 재료와 구조적 특성에 영향을 받지 않음을 보였다. 그렇기 때문에 매질에서의 정확한 탄성과 속도나 실험 조건에 따른 문턱값이 요구되지 않으며 위치표정 결과에 영향을 미치지 않는다.

따라서 구조물의 방향에 따라 탄성파의 속도 및 분산 특성이 다르게 나타나는 Type-II와 같은 복합재 실린더 구조물에서 더 높은 오차율을 보이는 도달시간차 기법과 달리 energy based contour map 기법은 매우 낮은 오차율을 보이고 뛰어난 위치표정 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

또한 도달시간차 기법에서는 센서의 부착 위치와 센서들이 커버하는 영역에 따라 위치표정이 불가능한 지점도 있었지만 energy based contour

map 기법은 각 센서로부터 구축된 contour D/B map으로 손상 위치로부터 측정된 음향방출 신호 이벤트의 에너지값과 동일한 에너지 밴드를 확장 시켜가면서 교차되어 중첩된 에너지값들로부터 위치표정을 하기 때문에 D/B가 구축된 모든 영역과 어떤 조건에서도 위치표정이 항상 가능하였다. 또한 여러 에너지 크기별로 laser source로만 가진하여 구축한 D/B를 기반으로 서로 다른 주파수 대역과 에너지를 가지는 다른 임의 손상 신호들도 위치표정이 가능하였고 오차율 또한 매우 낮았다.

이러한 점들로 보아 기존 도달시간차 기법이 가진 문제점과 한계점을 energy based contour map 기법으로 개선 및 극복하였고 실린더와 같은 구조적 특성을 가지며 이중복합소재 구조물인 Type-II CNG 탱크에서 낮은 오차율과 모든 영역에서 위치표정이 가능한 점들로 인해 매우 효과적임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] H.-J. Kim and B.-J. Sung, "Development of CNG hybrid city bus," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 18-23 (2013)
- [2] "Automobile Enrollment in Fuel Type," Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015. 05)
- [3] H. E. Seiff, "Some things to be learned from the other compressed gas fuel system," The Clean Vehicle Education Foundation (2008)
- [4] Y.-S. Kim, K.-S. Park and T.-O. Kim, "Suggestion for safety improvement of compressed natural gas vehicle," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 16, No. 4, pp. 1-7 (2012)
- [5] O. Skawinski, P. Hulot, C. Binetruy and C. Rasche "Structural integrity evaluation of CNG composite cylinders by acoustic emission monitoring," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 26, No. 11, pp. 120-131 (2008)
- [6] M. Toughiry "Examination of the nondestructive evaluation of composite gas cylinders - final report," The Nondestructive Testing Information Analysis Center (2002)
- [7] J.-O. Lee, S.-H. Won, W.-H. Yoon, J.-K. Lee and C.-H. So, "AE source location of unidirectional GFRP," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 21, No. 3, pp. 277-280 (2001)
- [8] J.-K. Kim, O.-Y. Kwon and Y.-G. Won, "Acoustic emission source location in filament wound CFRP pressure vessel," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 5, pp. 439-444 (2003)
- [9] B.-H. Han and D.-J. Yoon "Source location on full-scale wind turbine blade using acoustic emission energy based signal mapping method," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 5, pp. 443-451 (2013)
- [10] S.-J. Song, J.-U. Choe and H.-J. Kim, "A study on elastic wave propagation for non-destructive evaluation of composite structures - An experimental approach," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 22, No. 6, pp. 978-989 (1998)
- [11] B.-H. Han and D.-J. Yoon, "Damage assessment of wind turbine blade under static loading test using acoustic emission," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 5, pp. 621-630 (2014)