

필라멘트 와인딩으로 제작된 복합재 압력용기에서 탄성과 발생원의 위치표정

Acoustic Emission Source Location in Filament Wound CFRP Pressure Vessel

김정곤*, 권오양**†, 원용구***

Jeong-Kon Kim*, Oh-Yang Kwon**† and Yong Gu Won***

초 록 구조물이 하중을 받았을 때 손상부에서 발생하는 탄성파인 AE는 이를 탐지함으로써 손상부의 위치를 측정하는데 매우 효과적이다. 그러나 복합재료 구조에서의 위치표정은 탄성파의 전파속도가 섬유 방향에 의존하는 이방성의 문제로 인하여 전통적인 방법을 그대로 적용할 경우 알고 있는 위치에 대해서도 정확도가 매우 낮으며, 미지의 발생원을 찾는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 최근에 새로이 개발된 바 있는 이방성을 고려한 위치표정 방법이 실제 복합재 구조물에 적용될 경우에도 정밀도와 정확도 면에서 실용적인 방법임을 입증하고자 하였다. 기하학적으로 복잡한 구조체인 복합재 압력용기가 비어있을 경우와 물을 가득 채운 경우에 대하여 0°(축방향)에서 90°(원주방향)까지 모든 방향별 속도를 고려한 위치표정을 성공적으로 수행하였다.

주요용어 : 이방성, 복합재 압력용기, 필라멘트 와인딩, 위치표정, 음향방출

Abstract Acoustic emission(AE) can be very effectively applied to locate the damaged area in large structures by detecting the elastic waves generated during the damage process within solids. Source location in the composite structures has been, however, extremely difficult due to the acoustic anisotropy with the velocity dependence on fiber orientations. In this study, it has been shown that a newly proposed method for 2-D source location of anisotropic structures is practically applicable to the real structure. The method employs wave velocities obtained with different velocities from 0° to 90° for a filament wound composite pressure vessel under the air-filled and the water-filled conditions.

Keywords: anisotropy, CFRP pressure vessel, filament winding, source location, acoustic emission

1. 서 론

지난 수십 년간 국내에서 제작되는 압력용기는 금속제 탱크가 대부분이었지만 대형 발사체의 개발과 함께 로켓의 경량화를 위한 복합재 용기의 개발이 요구되고 있다. 특히 필라멘트 와인딩된 압력용

기(filament wound pressure vessel)는 세계적으로 복합재료 부품 제조 회사들이 항공기, 미사일, 인공 위성 및 수중 장비 등에 사용하기 위해서 생산하고 있으며, 국내에서는 항공, 우주, 방위산업 분야에 사용되고 있다[1,2].

실제로 복합재 압력용기는 전투기나 로켓의 외부연

료 탱크, 고체로켓 모터 케이스, 액체연료 로켓의 연료 탱크 및 산화제 탱크 등에 이용되는데, 이들은 대부분 파손 시 대형사고를 유발할 위험성이 크다. 따라서, 이러한 압력용기에서 발생하는 결함검출은 구조물의 안정적 운영에 기본적이며 중요한 문제이다.

복합재료가 갖는 가장 큰 특징 중 하나는 이방성(anisotropy)이다. 즉, 탄성계수, 밀도 등 역학적 성질이 섬유배열방향에 따라 현저하게 다르며, 이는 곧 방향에 따라 탄성파의 전파속도가 달라짐을 의미한다[3,4]. 이 때문에 복합재 압력용기에서는 등방성인 금속재 압력용기와는 달리 손상부의 위치를 비파괴적으로 결정하는 것이 매우 어려운 문제로 남아있다.

본 논문에서는 복합재 압력용기에서의 결함위치 결정을 위하여 최근에 새로이 보고한 바 있는 '이방성 적층복합재 구조에서 AE 발생원 위치표정을 위한 실용적인 방법'[5]을 도입하고, 이 방법이 실제적인 구조물에서의 위치표정에도 요구되는 정밀도와 정확도를 충분히 만족하면서 활용될 수 있음을 보이고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 시편

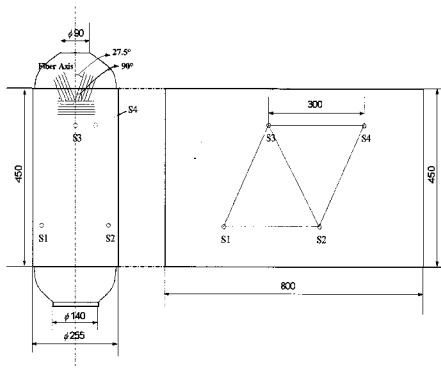


Fig. 1 A schematic of the test vessel with AE sensor location

Fig. 1은 본 연구에 사용된 시험평가용 표준 압력용기(STEB)를 보여준다. 압력용기는 크기가 $\phi 255 \times 450 \times 3$ mm인 SRM Case $[(\pm 27.5)_3/90]$ 로, 전형적인 필라멘트 와인딩 방법으로 헬리컬 와인딩한 다음 실린더 부분은 축에 수직으로 다시 일정한 두께의 덧감음 층(hoop overlay)을 추가함으로써 내압에 의한 원주 방향으로의 파손에 대한 취약성을 보강하도록 제작된 것이다[6]. 실험에서 압력용기는 비

어있는 것과 물을 가득 채운 것, 두 가지 조건으로 준비하였다. 용기에 물을 가득 채우고 실험하는 것은 수압시험 시의 조건과 같게 하기 위함이다[3]. Fig. 2는 실험에 사용된 압력용기에 센서가 부착된 모습을 보여준다.

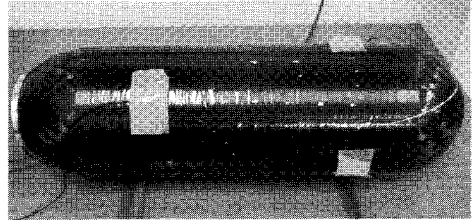


Fig. 2 Photograph of the test vessel under calibration

2.2. 실험장치

속도 측정과 위치표정에 이용되는 탄성파는 표준 연필심($\phi 0.5$ HB; JSNDI-006) 파괴를 이용하여 발생시켰으며 4개의 광대역(50kHz~2MHz) 고성능 압전센서(B1025; Digital Wave)가 두 개의 인접하는 삼각형 센서 배열을 형성하는데 사용되었다. 센서들은 고진공 그리스(grease)를 사용하여 부착한 후 접착테이프로 고정하였다. 프리앰프에서는 40 dB의 증폭과 50 kHz ~ 1 MHz의 대역 필터를 사용하였다. 파형 신호는 PC에 있는 A/D보드(CS225; Gage)를 통해 5 MHz로 샘플링되고, 디지털화 되어 저장된다. 실험장치에 대해서는 참고문헌[5]에서 그림과 함께 보다 자세히 설명한 바 있다.

2.3. 실험방법

각 방향별 속도를 구하기 위하여 우선 0° (축방향)에서 90° (원주방향)까지 5° 간격으로 속도를 측정하였다. 속도는 각각의 파형에서 임의의 문턱 전압값을 이용하여 도달시간을 측정하고 도달시간차를 구하여 계산되었다. 실제로 각 방향별 속도는 5° 간격이 아니라 1° 간격으로 입력하게 되는데, 이는 5° 간격으로 구한 속도분포로부터 내삽(interpolate)하여 구하였다. 위치표정은 센서 배열의 위치를 고려하여 8개의 점으로부터 탄성파를 발생시키고, 새로운 이방성 위치표정 방법에 따라 AE 발생원으로 가정한 모든 요소로부터 각 센서까지의 도달시간차를 Microsoft Excel[®] 및 Matlab[®] 으로 프로그램하여 계산하였다.

새로운 위치표정 방법에서는 위치표정의 관심구역 즉, 발생원이 존재할 것으로 예상되는 시편의 일정구역을 적절한 크기의 정사각형 요소로 분할한 다음 각 요소의 중심을 가상적인 AE 발생원으로 가정한다. 그러면 탄성파가 n개의 요소로부터 각각의 센서에 이르는 도달시간차를 앞에서 구한 각 방향별 전파속도를 이용하여 미리 계산해 둘 수 있으므로, 다음에 실험적으로 측정된 도달시간차와 단순히 비교하는 과정만으로도 오차가 최소인 요소가 발생원으로 위치표정될 수 있다. 즉, 실시간에 필요한 계산량을 최소로 하면서도 각 방향별 속도 차이에 기인하는 위치표정의 복잡성을 극복할 수 있다[5].

위치표정을 위하여 Fig. 3에서와 같이 4개의 센서를 이용하여 한 변의 길이가 300 mm인 정삼각형 두 개로 이루어진 배열(array)을 만들었다. Fig. 3에서 x축은 용기의 원주방향을, y축은 축방향을 나타낸다. 압력용기의 형태상 양쪽 끝 반구면 부분에도 센서를 배열하는 것이 원칙이나 본 실험에서는 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 실린더 부위를 위주로 센서배열을 선택하였다[6]. 센서의 좌표는 Table 1에 나타내었고, 모의 발생원은 센서 배열의 위치를 고려하여 1번에서 8번까지 8개의 좌표로 설정하였다. Table 2는 모의 발생원의 정확한 좌표이다.

Table 1 The nominal coordinate of AE sensors

| Sensor | Coordinate (x, y) |
|--------|-------------------|
| S1 | (0, 0) |
| S2 | (300, 0) |
| S3 | (150, 260) |
| S4 | (450, 260) |

Table 2 The exact coordinate of AE sources

| Source | Coordinate (x, y) |
|--------|-------------------|
| 1 | (150, 130) |
| 2 | (150, 87) |
| 3 | (150, 43.5) |
| 4 | (150, 0) |
| 5 | (230, 73.5) |
| 6 | (225, 130) |
| 7 | (300, 173) |
| 8 | (300, 260) |

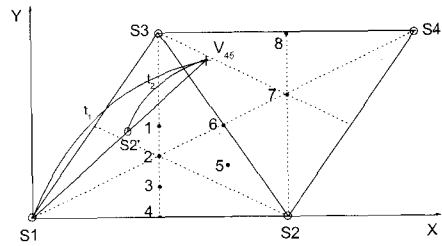


Fig. 3 Array of AE sensors with the position of simulated sources and the schematic of velocity measurement

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 속도측정 결과

실험에 사용된 복합재 압력용기에서 방향에 따른 탄성파 전파속도의 변화를 알아보기 위해 0°에서 90°까지 일정한 각도 간격으로 속도를 측정하였는데, Fig. 3에 표시한 바와 같이 1차원 위치표정의 원리를 이용하여 발생원으로부터 각각 150mm, 300mm 떨어진 지점에 위치한 두 센서 사이의 도달 시간차로부터 결정하였는데 판파(Lamb wave)의 두 가지 성분, 즉 팽창파(extensional wave, S-mode)와 굽힘파(flexural wave, A-mode), 중 굽힘파 성분을 사용하였다.

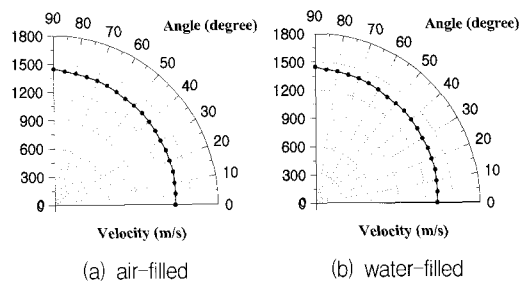


Fig. 4 Experimentally measured wave velocities with different angles at 5° interval; (a) the air-filled and (b) the water-filled

Fig. 4(a)는 압력용기가 비어있는 상태에서 방향에 따른 속도분포이고, Fig. 4(b)는 압력용기에 물을 가득 채웠을 때의 속도분포를 나타낸다. 물을 가득 채운 경우의 속도는 비어있을 때보다 모든 각도에서 조금씩 작아졌음을 알 수 있으며, 두 가지 모두 90°(원주방향)에서 최대속도가 나타나고, 0°(축방향)로 갈수록 속도는 점점 줄어든다. 이것은 파의 전파속

도가 필라멘트 와인딩한 섬유 방향에 의존하지만 섬유의 방향이 원주방향으로 감겨있는 덧감음층이 이러한 속도분포에 영향을 준 것이라고 볼 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 복합재 압력용기에서 속도 측정 시 기록된 파형들로서 두 센서에 도달한 파형들을 보여주고 있다. Fig. 5는 압력용기가 비어있을 때 AE 발생원(source)으로부터 45° 방향으로 각각 150 mm, 300 mm 떨어진 각 센서에 도달한 파형이다. 다만 발생원에서 멀리 떨어진 센서(d=300mm)에 도달한 신호는 가까운 센서(d=150mm)에 도달한 신호보다 감쇠와 분산 효과로 인해 1/2 이하로 진폭의 감소를 보이고 있을 뿐 그 밖의 다른 변화는 없다. 반면에 Fig. 6은 비어있을 때와 물을 가득 채웠을 때를 비교하기 위하여 0° 및 45° 방향으로 전파된 신호의 파형들을 보여준다. Fig. 6에서 각도에 따른 파형을 비교해 볼 때, 물을 가득 채운 경우는 비어있을 때보다 전체적으로 파형의 진폭이 감소하였음을 알 수 있는데, 이는 압력용기 내부를 물로 채울 경우 용기의 내부가 물과 접촉되어 있어 용기의 표면을 진행하는 탄성과 에너지의 일부가 물로 빠져 나가기 때문에 나타난다고 알려져 있다[7]. 특히 기록된 파형의 형태는 비어있을 때와 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있는데, Fig. 6의 (b)와 (d)에서 A, B로 표시된 부분에 용기가 비어있을 때는 보이지 않았던 새로운 모드가 나타났다. 이는 탄성파가 용기의 표면을 통해서 전파될 뿐 아니라 용기 내부의 물을 통해서도 전파되기 때문이라고 볼 수 있는데 [8,9], 축방향(0°)에서 원주방향(90°)으로 갈수록 그 효과가 뚜렷하다.

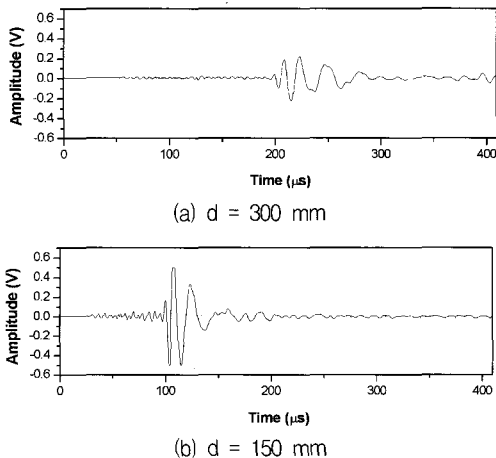


Fig. 5 Waveforms detected at 45° in the air-filled condition; (a) d=300mm and (b) d=150 mm

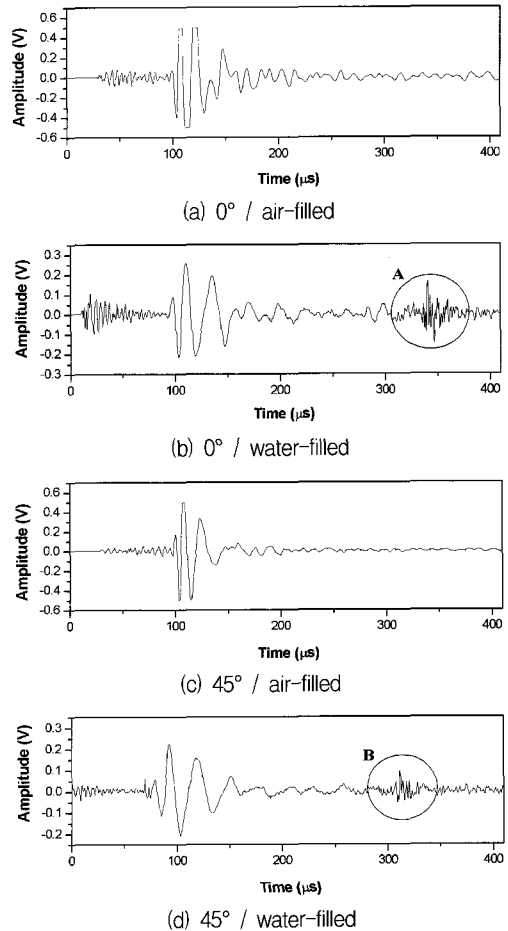


Fig. 6 Waveforms detected in the air-filled and the water-filled; (a) 0° in the air-filled, (b) 0° in the water-filled, (c) 45° in the air-filled, and (d) 45° in the water-filled

3.2. 위치표정 결과

복합재 압력용기가 비어있을 때와 물을 가득 채운 경우에 대해서 모의발생원을 사용한 2차원 위치표정을 수행하였으며 도달 시간차 측정을 위한 문턱 전압값(V_{th})은 8개의 모의 발생원에 대해 0.05V로 모두 동일하게 적용하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 용기가 비어있을 때와 물을 가득 채운 경우에 얻은 위치표정 결과이다. 새로운 방법에 의한 위치표정 결과를 보다 상세하게 비교할 수 있도록 각각의 경우에 전통적인 쌍곡선 방법으로 얻어진 위치표정 결과를 함께 보여주고 있다. 전통적인 방법에서는 단일속도를 사용하므로 위치표정을 위해 실험에서 구한 속도분포를 고려한

평균속도를 사용하였으며 압력용기가 비어있을 때는 1470m/s, 물이 가득 채워졌을 때는 1377m/s를 적용하였다. Fig. 7과 Fig. 8을 비교해 볼 때 새로운 방법에 의한 위치표정 결과의 정확성이 압력용기가 비어있을 때와 물을 가득 채운 때에 대하여 별로 다르지 않음을 알 수 있고, 또한 전통적인 방법에 의한 위치표정의 오차에 비하여 두 가지 경우 모두 오차가 훨씬 줄어들었음을 알 수 있다[6].

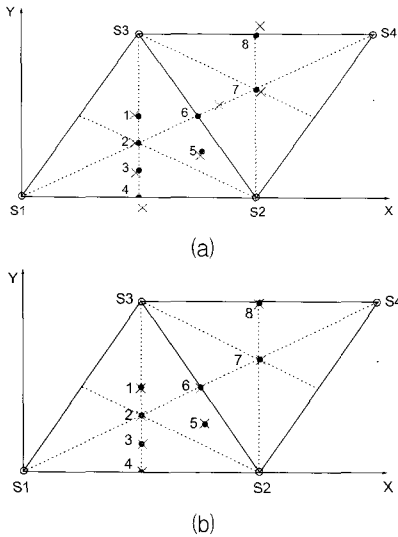


Fig. 7 Results of source location in air-filled; (a) conventional threshold method and (b) proposed location method

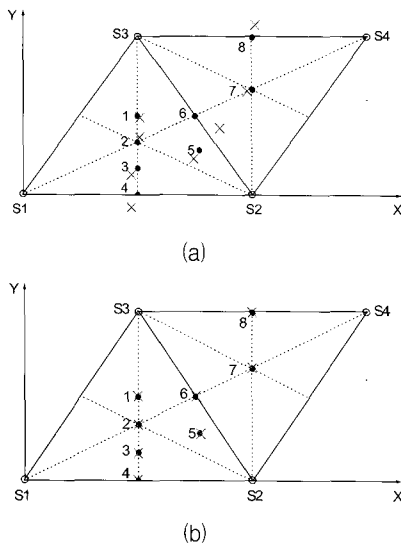


Fig. 8 Results of source location in water-filled; (a) conventional threshold method and (b) proposed location method

Table 3 Error analysis of the results of source location in filament wound CFRP pressure vessel in the air-filled condition

| Exact | Hyperbola Method (V = 1,470 m/s) | | Proposed Method (V ₀) | |
|---------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | Detected | Error(mm) | Predicted | Error(mm) |
| 1 (150, 130) | (144.1, 132.0) | 6.2 | (149.0, 129.0) | 1.4 |
| 2 (150, 87) | (144.9, 87.2) | 5.1 | (149.0, 87.0) | 1.0 |
| 3 (150, 43.5) | (146.0, 39.8) | 5.4 | (151.0, 43.0) | 1.1 |
| 4 (150, 0) | (153.1, -14.0) | 14.3 | (151.0, 1.0) | 1.4 |
| 5 (230, 73.5) | (227.9, 67.2) | 6.6 | (229.0, 75.0) | 1.8 |
| 6 (225, 130) | (252.7, 148.4) | 33.3 | (225.0, 129.0) | 1.0 |
| 7 (300, 173) | (305.3, 169.8) | 6.2 | (301.0, 173.0) | 1.0 |
| 8 (300, 260) | (304.7, 275.4) | 16.1 | (299.0, 259.0) | 1.4 |

Table 4 Error analysis of the results of source location in filament wound CFRP pressure vessel in the water-filled condition

| Exact | Hyperbola Method (V = 1,377 m/s) | | Proposed Method (V ₀) | |
|---------------|-------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | Detected | Error(mm) | Predicted | Error(mm) |
| 1 (150, 130) | (152.9, 127.7) | 3.7 | (149.0, 131.0) | 1.4 |
| 2 (150, 87) | (152.6, 95.6) | 9.0 | (151.0, 87.0) | 1.0 |
| 3 (150, 43.5) | (141.3, 33.3) | 13.4 | (151.0, 45.0) | 1.8 |
| 4 (150, 0) | (142.1, -17.3) | 19.0 | (149.0, -1.0) | 1.4 |
| 5 (230, 73.5) | (222.4, 59.8) | 15.7 | (229.0, 73.0) | 1.1 |
| 6 (225, 130) | (257.3, 110.7) | 37.6 | (225.0, 133.0) | 3.0 |
| 7 (300, 173) | (292.7, 171.6) | 7.4 | (301.0, 173.0) | 1.0 |
| 8 (300, 260) | (303.4, 281.3) | 21.6 | (301.0, 261.0) | 1.4 |

3.3. 고찰

Table 3과 Table 4는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 위치표정의 오차를 보다 정량적으로 분석한 것이다. 거의 모든 위치에 입사시킨 모의발생원에 대하여 새로운 위치표정 방법이 1/5~1/10 이하로 오차가 크게 줄어들었음을 알 수 있으며, 새로운 이방성 위치표정 방법에 의해 나타난 오차범위는 사용된 탄성파의 파장보다 작으므로 실용적으로 충분히 의미있는 수준이라 할 수 있다. 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 Table 3과 Table 4의 결과의 오차는 실험에 의해서 구한 하나의 정사각형 요소의 중점에서 연필심 파괴에 의한 모의 AE 발생원까지의 대각선의 길이를 의미한다.

일반적으로 2차원 위치표정에서 오차의 원인으로 는 속도측정, 모의 발생원에서 획득한 파형의 도달

시간차 측정, 센서위치와 모의발생원의 상대적인 위치 등을 꼽을 수 있지만, 본 연구에서 사용한 새로운 방법에서 가장 주요한 원인으로서는 사용된 요소의 형태가 한 변의 길이가 최소 2 mm인 정사각형이었고, 가상의 AE 발생원을 그 사각형의 중심으로 잡았기 때문에 나타나는 기하학적인 요소에 의한 것이라 할 수 있다. 이러한 오차는 요소의 크기를 1×1mm, 0.5×0.5mm로 줄인다고 하더라도 그 크기에 비례하여 줄어들지 않는다. 이는 사용된 탄성파의 파장이 수 mm이고, 센서 개구부(aperture)도 이상적인 한점(one point)이 아니라 유한한 크기를 갖고 있는 때문이다. 실제로 본 실험에서는 크기가 2×2mm인 요소와 1×1mm인 요소를 사용한 경우에 대하여 비교해 본 결과 1×1mm일 때 오히려 오차가 다시 커짐을 알 수 있었고, 이에 따라 본 연구에 사용된 구조와 조건하에서는 요소의 크기가 2×2mm일 때가 최적의 조건임을 알 수 있었다.

4. 결 론

1. 이방성 적층복합재 구조를 위한 새로운 위치표정 방법이 복합재 압력용기와 같은 실제 구조물에 적용될 경우 그 결과의 정밀도 및 정확도를 향상시킬 수 있는 방법임을 실험적으로 확인하였다.
2. 최소의 오차를 갖는 요소크기를 선택하는데 있어서 요소의 크기를 줄여나가는 실험을 반복적으로 수행함으로써 주어진 조건하에서 최적의 요소크기는 2×2mm임을 결정하였다.
3. 복합재 압력용기의 내부가 비어 있을 때에 비하여 물을 가득 채운 경우에는 전파하는 신호의 진폭이 감소하고 전파하는 탄성파의 모드가 복잡해지지만, 최종적인 위치표정 결과의 정확도에는 거의 영향을 미치지 아니함을 확인함으로써 새로운 방법이 어떠한 구조에도 적용될 수 있음을 보였다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-041-D00010)

참고문헌

- [1] E. E. Morris, L. W. Smith, J. Ko, "New Generation Carbon Filament-Wound Composite Cylinders for Self-Contained Breathing Apparatus," Proc. 44th SAMPE Symposium and Exhibition, pp. 23-27, (1999)
- [2] J. B. Carrigan, L. W. Smith, N. J. H. Holroyd, E. E. Morris, "CNG Container Systems for Maximum Payload Space and Vehicle Range," SAMPE Journal, Vol. 36, No. 6, pp. 26-33, (2000)
- [3] R. K. Miller and P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook," ASNT Handbook, Vol. 5 Acoustic Emission Testing, pp. 92-212 & pp. 418-568, (1987)
- [4] Y. H. Kim and S. S. Lee, "Simulation of Elastic Wave Propagation in Anisotropic Materials," J. of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 17, No. 4, pp. 227-236, (1997)
- [5] J. K. Kim, O. Y. Kwon and Y. K. Kang, "A Practical Method of Acoustic Emission Source Location in Anisotropic Composite Laminates," J. of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 23, No. 3, pp. 237-245, (2003)
- [6] O. Y. Kwon, D. J. Yoon, H. Jeong and W. M. Cho, "Acoustic Emission Testing of Filament Wound CFRP Pressure Vessels," Proc. 8th Asia-Pacific Conference on NDT, pp. 47-54, (1995)
- [7] J. L. Rose, Y. H. Cho and J. J. Ditre, "Cylindrical Guided Wave Leakage due to Liquid Loading," Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 13, pp. 259-266, (1994)
- [8] S. J. Song, J. U. Choe, "An Experimental Study on Elastic Wave Propagation in a Symmetrically Filament-Wound Composite Motor Case," J. of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 18, No. 3, pp. 191-204, (1998)
- [9] S. J. Song, C. H. Oh, H. J. Jeong, S. H. Rhee, S. Y. Lim and H. C. Kim, "Prediction of Failure Behavior in Composite Motor Cases by Acoustic Emission during Hydroproof Testing," J. of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 18, No. 2, pp. 92-102, (1998)