

## 대칭 적층 복합재 연소관의 탄성과 전파에 관한 실험적 연구

송성진\*, 최지웅\*\*

\* 성균관대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 조선대학교 대학원 기계공학부

**요 약** 복합재 연소관의 수압/AE 시험의 성공적 수행을 위한 핵심 과제중의 하나는 수압으로 인해 방출되어 연소관을 통해 전파하는 탄성파의 특성을 분석함으로써 수압/AE 시험시 감지해야할 탄성파의 최적 성분을 결정하는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 대칭 적층 구조를 갖는 복합재 연소관에 광대역 초음파를 발진시키고 전파방향과 거리를 변화시킨 105지점에서 광대역 음향방출 센서를 이용하여 복합재 내를 전파한 탄성파를 수신하고, 그 특성(주파수, 전파거리, 전파속도)을 분석하였다. 이와 같은 실험을 내부가 비어 있는 연소관과 내부를 물로 채우고 수압을 가한 연소관에 대해 반복 수행함으로써, 수압이 탄성파의 전파특성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 수압/AE 시험시 검출할 탄성파의 최적 성분을 결정하였다.

### 1. 서론

고체 연료 로켓모터 케이스와 같은 압력 용기의 품질 보증을 위해 수압보증시험(hydroproof test)이 사용되고 있는데, 이 방법은 금속제 케이스에서는 매우 성공적으로 적용되고 있으나, 복합재 케이스의 경우 보증시험시 가한 수압이 오히려 복합재의 성능을 저하시키는 경우도 보고되고 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로서 통상적인 보증 압력보다 낮은 압력을 가한 수압보증시험과 AE시험을 병행한 시험(이하 수압/AE 시험)을 실시하여, 이때 감지한 AE 거동으로부터 복합재 고체 연료 로켓모터 케이스(이하 복합재 연소관)의 파손거동(손상의 위치 및 종류, 최종 파열 위치 및 강도)을 예측하는 기법 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며<sup>1~6)</sup>, 최근 국내에서도 탄소섬유를 필라멘트와인

딩하여 제작한 복합재 연소관의 품질보증을 위한 수단으로서 수압/AE 시험을 적용한 연구가 수행된 바 있다<sup>7~10)</sup>.

복합재 연소관의 수압/AE 시험에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 수압에 의해 연소관이 손상될 때 방출되는 탄성파를 AE 센서로 감지하고, 감지된 AE 신호의 특성으로부터 손상의 특성을 규명한다.

수압에 의한 연소관의 손상(섬유파단, 층간분리, 기지균열 등)이나 손상은 무관한 잡음 등 수압/AE 시험시 방출된 탄성파는 연소관 내를 전파하면서 복합재의 이방성 때문에 그 전파 속도와 감쇠가 진행방향에 따라 달라질 뿐 아니라, 연소관이 두께가 얇은 원통 형태이기 때문에 모드가 다양하고 분산이 심한 판파(Lamb wave)의 형태로 진행하여 그 파형이 매우 복잡해진다. 이렇게 복잡한 형태의 탄성파가 최종적으로 AE 센서에 의해 감지되면, 센서

의 수신 특성에 따라 신호가 다시 한번 변조된다. 따라서 이 최종 신호의 특성으로부터 음원의 특성(손상의 특성)을 정확히 분석하기 위해서는 최종적인 신호에 영향을 미치는 제 요인에 대한 이해가 선행되어야 하는데, 실용적 관점에서는 수압/AE 시험의 성공적 수행을 위한 핵심 과제로서 다음과 같은 두 가지를 들 수 있다. 첫째는 감지한 AE 신호의 특성과 복합재의 파손 거동을 어떻게 연계시킬 것인가 하는 점이며, 둘째는 수압/AE 시험시 감지할 탄성파의 최적 모드(혹은 성분)는 무엇이며, 이를 어떻게 결정해야 하는지에 대한 것인데<sup>10)</sup>, 이 두 번째 문제는 첫번째 문제보다 오히려 선결되어야 할 문제이다.

첫번째 문제에 대한 지금까지의 연구에서는 손상에 대한 정보를 내포하고 있는 AE를 효율적으로 발생시킬 수 있는 수압 조건의 선정, AE 신호 획득을 위한 AE 센서의 수량 및 위치 결정, AE parameter의 선정, 수압 시험 과정에서 AE를 이용한 손상의 위치 표정, 파손 모드의 식별, 과열 압력의 예측 모형, 그리고 충격 손상의 영향 평가 등 AE 거동으로부터 연소관의 파손 거동을 예측하기 위한 세부 기술에 대한 연구가 수행된 바 있는데 최근에 송성진 등이 이러한 종전의 연구 성과를 정리하고 이를 바탕으로 수압/AE 시험을 통해 연소관의 손상 위치와 손상 종류를 식별한 연구 결과를 발표한 바 있다<sup>9)</sup>.

두번째 문제와 직·간접적으로 연관된 문제로서 복합재 내를 통과하는 탄성파의 전파 특성 분석에 대한 연구도 또한 국·내외적으로 지금까지 비교적

활발하게 수행된 바 있는데<sup>11~16)</sup>, 이들 연구에서는 수압/AE 시험에서 방출되는 탄성파가 복합재 내에서 Lamb파 형태로 전파한다는 사실을 밝히고, 그 전파 특성에 대한 이론적·실험적 분석을 실시하였다. 이러한 연구를 통해 지적된 것 중의 하나는 복합재 구조물 내를 진행하는 탄성파의 거동을 실험적으로 정확히 규명하기 위해서는 반드시 실물 크기의 복합재 시험편을 사용해야 한다는 것이다<sup>17)</sup>. 왜냐하면 실험용 시험편의 적층(혹은 필라멘트 와인딩) 방법과 크기가 실제 구조물과 다르면, 탄성파의 진행 특성이 또한 달라지기 때문이다. 따라서 복합재 구조물에 대한 정량적 AE 시험을 위해서는 시험 대상이 되는 실제 구조물 내를 진행하는 탄성파의 진행 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 AE 시험에서 감지할 탄성파의 최적 성분을 결정해야 한다.

최근 김호철 등은 복합재 연소관의 품질 보증을 위한 비파괴 평가 기법의 개발에 관한 연구에서 수압/AE 시험시 방출되는 AE 신호로부터 연소관의 파손 거동을 예측하는 연구와 함께, 복합재 내를 진행하는 탄성파의 전파 특성을 분석하기 위한 실험 기법 개발을 위한 연구를 수행하였다<sup>8)</sup>. 이 연구에서 그들은 적층수와 적층방향을 변화시킨 복합재 판과 축방향에 대해  $\pm 20^\circ$ 의 섬유배열이 되도록 탄소섬유를 감아 만든 복합재 튜브를 지나는 탄성파의 전파 특성을 분석하기 위해, 광대역 탐촉자에 의한 탄성파의 발진과 수신, 그리고 수신 신호의 주파수 분석이 탄성파 전파 특성 분석을 위한 매우 효율적인 방법임을 보였다. 그러나 이 연구에서 사용한 복합재 판과 튜브가 실험을 위해 특별히 제작된 시험편이었기 때문에, 그 결과를 연소관의 파손거동 예측을 위한 수압/AE 시험과는 연계시키지 못하였다. 그 이후 이러한 미비점을 보완하기 위해 송성진 등은 실제 수압/AE 시험의 대상이 되었던 복합재 연소관과 동일한 조건으로 제작된 비대칭 적층 연소관 시험편 내를 진행하는 탄성파의 진행 특성을 실험적으로 규명하고, 이로부터 수압/AE 시험을 위한 탄성파의 최적 성분을 결정하는 연구를 수행하였다<sup>18)</sup>. 이 연구에서 그들은 탄소섬유를 비대칭적으로 필라멘트 와인딩하여 제작한 복합재 연소관(이하 비대칭 연소관)에 물을 채우고 수압을 가하였을 때와 내부를 비웠을 때의 탄성파 전파 특성을 비교하여, 수압이 탄성파의 전파 특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

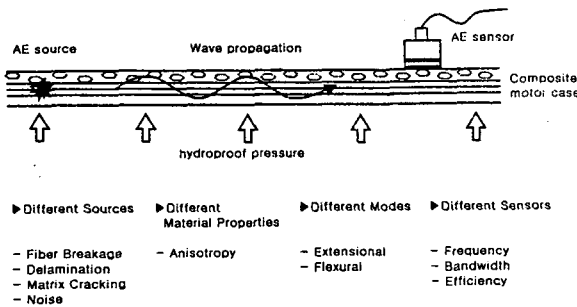


Fig. 1. Issues in acoustic emission during the hydroproof test of a composite motor case

본 연구에서는 이전의 연구<sup>18)</sup>에서 사용한 복합재 연소관과는 전혀 다른 적층순서를 가지고 있는 대칭 적층 연소관(이하 대칭 연소관)을 특별히 제작하여 종전의 연구와 동일한 분석을 수행함으로써, 적층 순서의 변화와 수압이 탄성파의 전파 특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

**2. 실험**

본 연구의 실험에서는 이전 연구<sup>18)</sup>의 실험 장치와 실험 방법을 그대로 사용하고, 다만 시험편만 대칭 적층 복합재 연소관으로 변경하여 사용하였다. 따라서 본 연구에 사용된 실험 장치와 방법에 대해서는 참고문헌 18)에 자세히 설명한 바 있으나, 여기에서는 논의의 연속성을 위해 다시 언급코자 한다.

**2.1. 복합재 연소관 시험편**

본 연구에서는 대칭 적층 구조를 갖는 복합재 연소관을 특별히 제작하여 시험편으로 사용하였다. 이 대칭 연소관은 맨 안쪽의 고무 절연층 위에 강화섬유를 축방향에 대해  $\pm 30/90_2/\pm 30/90_2/\mp 30/90_2/\mp 30$  방향으로 필라멘트 와인딩하여 복합재층의 총 두께가 약 2.8mm가 되도록 하였다. 연소관의 실린더부 직경은 254mm(10inch)이고 전·후방 포트(port)의 크기는 각각 45.7mm(1.8inch)와 97.0mm(3.82inch)이며, 실린더부의 길이는 465mm(18.25inch)이다. 이 시험편은 제작후 약 100psi~200psi의 수압시험중에서 누수가 없다는 것을 확인하였다.

**2.2. 실험 장치**

대칭 적층 복합재 연소관의 탄성과 전파 특성의 분석을 위해 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 복합재 연소관의 바깥 표면에 송신용 초음파 탐촉자를 접촉시켜 초음파를 발진시키고, 복합재 연소관을 통해 전파하는 탄성파를 수신용 AE 탐촉자를 이용하여 검출하였다. 초음파 발진을 위해 중심 주파수가 500kHz인 광대역 초음파 탐촉자(Krautkramer B0.5S)를 고출력 초음파 발생장치(Ritec Ram-10000)를 이용하여 구동시켰다. 이때 송신용 초음파 탐촉자를 연소관

에 바로 접촉시키면 선접촉만 되기 때문에, 그 사이의 접촉 면적을 늘리기 위해 적당히 가공한 아크릴 블록을 끼워 넣었다. 연소관내를 진행하는 탄성파를 주파수 대역이 50kHz에서 1.5MHz인 광대역 AE 센서(Digital Wave B1025)를 이용하여 검출하고 이를 AE 신호처리 시스템(Digital Wave FWD-4000)에 입력시켰다. 연소관에 수압을 가하기 위한 장치로는 수동식 수압펌프를 사용하였으며, 가해진 수압은 다이얼 게이지식 수압계를 이용하여 측정하였다.

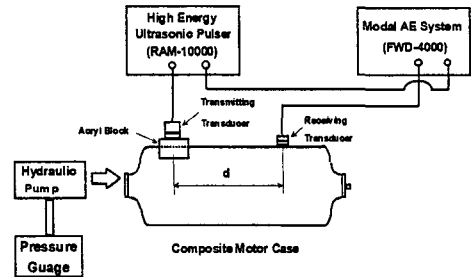


Fig. 2. Schematic diagram of experimental set-up for detection of elastic waves propagating through the composite motor case

**2.3. 실험 방법**

초음파 발진 장치를 이용하여 복합재 연소관에 탄성파를 발생시킨 후, 발진점에서 전파각(원주방향으로 부터의 경사각)  $\theta$ 의 방향으로 거리 d만큼 진행한 탄성파를 광대역 AE 센서를 이용하여 수신하였다. 그리고 이 수신파를 A/D 변환기에서 160ns 간격으로 이산 표본 추출하여 4096개의 데이터를 취한 후, 고속푸리에변환(fast Fourier transform)을 통해 주파수 성분을 구하였다. 이러한 분석을 전파각  $\theta$ 를  $0^\circ$  (원주방향)에서부터  $90^\circ$  (축방향)까지  $15^\circ$  간격으로 증가시킨 7가지 전파 방향에서, 그리고 각 전파 방향마다 진행 거리 d를 50mm에서부터 400mm(원주길이의 약 절반 정도)까지 25mm 간격으로 증가시킨 15지점에서 실시하였다. 이렇게 모두 한 시험편당 105지점에서 수신한 탄성파의 주파수 분석을 수행하여, 어떤 주파수 성분의 탄성파가

어느 방향으로 얼마만큼 진행되는지를 확인하였다. 그리고 광대역 AE 센서로 검출한 신호에 대역통과필터링(bandpass filtering)을 하여 특정 대역의 주파수 성분만을 갖는 “파열음(tone-burst)” 신호를 구하고, 이 파열음 신호가 진행되는 속도를 구하였다.

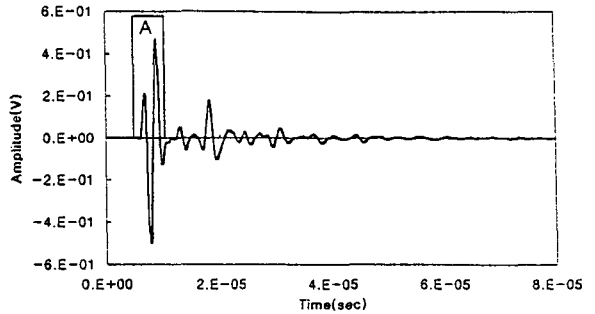
이러한 분석을 수압을 가하지 않고 내부가 비어 있는 경우(이하 “빈 연소관”)와 수압을 가한 경우(이하 “가압 연소관”)에 대해 실시함으로써, 수압이 탄성파의 진행 특성에 미치는 영향을 고찰하고, 이로부터 대칭 적층 연소관의 수압/AE 시험을 위한 탄성파의 최적 성분을 결정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

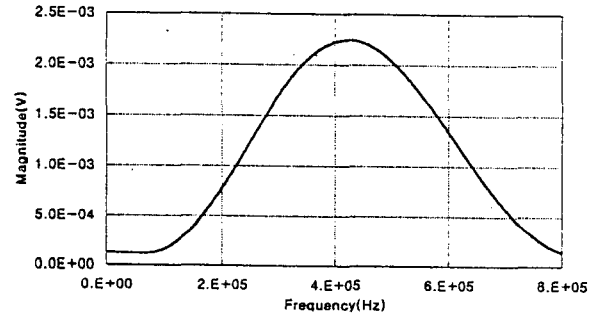
#### 3.1. 발진 초음파의 세기와 주파수 성분

복합재 연소관 내부로 발진시킨 초음파의 세기와 주파수 성분을 알아보기 위해, 수신용 AE 센서를 Fig. 2의 아크릴 블록 밑면에 직접 부착시키고, 송신용 광대역 탐촉자가 발진시킨 파를 수신하였다. 이때 송신용 광대역 초음파 탐촉자의 구동을 위한 고출력 초음파 발생장치는 3.2절 이후에 논의할 연소관 시험의 경우와 동일한 조건으로 설정하였으나, 수신파의 세기가 너무 크기 때문에 수신파의 처리를 위한 AE 신호처리시스템의 이득을 연소관 시험의 경우보다 40dB 낮게 조절하였다.

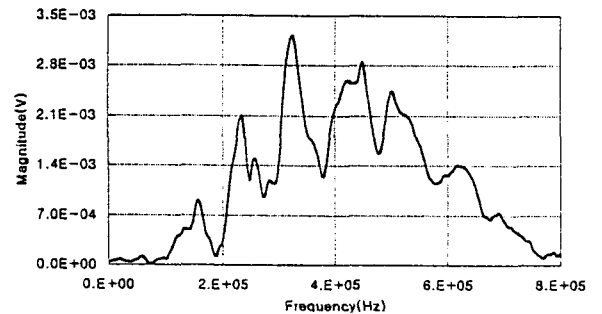
Fig. 3의 a), b), c)에 이 수신파의 파형과 주파수 스펙트럼을 나타내었다. Fig. 3a의 “A”부분이 초음파 탐촉자에서 원래 발진된 송신파로서 펄스폭은 약 5.6μs이고, 피크와 피크간 전압은 97.7V(연소관 시험파의 이득차 40dB를 보정했을 때)이다. 그 이후의 파형은 아크릴 블록 상하면 사이에서 발생한 다중반사에 의한 반사파인데 이 다중 반사파까지를 합한 송신 펄스의 폭은 약 27.4μs이다. Fig. 3b는 “A”부분에 대한 주파수 성분을 나타내고 있는데 중심 주파수는 430kHz이며, 주파수 대역이 170kHz~700kHz로 나타났다. 그리고, Fig. 3c는 Fig. 3a의 전체 파형에 대한 주파수 성분을 나타내고 있는데 다중반사파와의 간섭으로 주파수 스펙트럼상에 여러 개의 피크가 나타난 것을 볼 수 있다.



a) The time-domain waveform

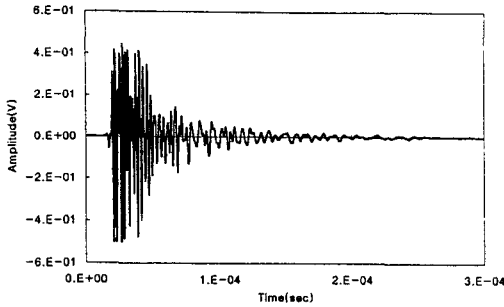


b) The frequency spectrum of the part “A”

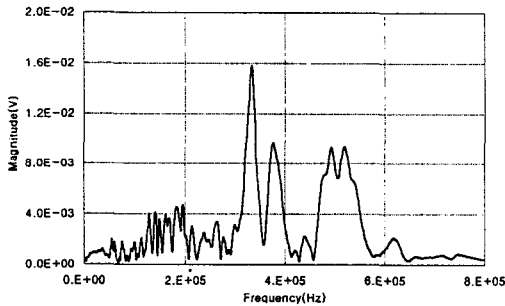


c) The frequency spectrum of the full waveform

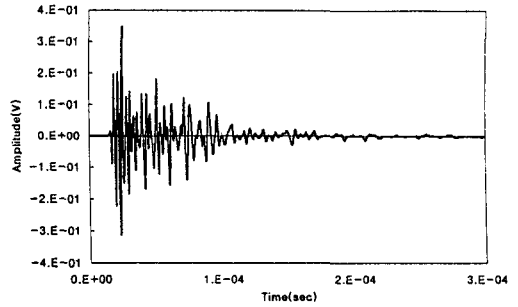
Fig. 3. Elastic wave transmitted through the acrylic block



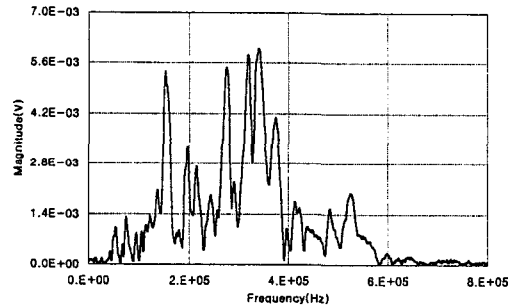
a) The time-domain waveform



b) The frequency spectrum



a) The time-domain waveform



b) The frequency spectrum

Fig. 4. Elastic wave detected from the symmetric air-filled motor case at  $\theta=0^\circ$  and  $d=75\text{mm}$

Fig. 5. Elastic wave detected from the symmetric air-filled motor case at  $\theta=45^\circ$  and  $d=75\text{mm}$

3.2. 빈 연소관을 진행하는 탄성파의 주파수와 감쇠

Fig. 4에 빈 대칭 연소관에 대하여 전파각  $\theta = 0^\circ$  (원주방향), 그리고 진행 거리  $d = 75\text{mm}$ 에서 검출한 탄성파의 파형과 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 그리고 전파거리를 같게 하고 전파각을  $\theta = 45^\circ$ 와  $90^\circ$ 로 변화시킨 경우의 파형과 주파수 스펙트럼을 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다.

Fig. 4를 보면 발진점에서 원주방향으로 75mm 떨어진 지점에서 수신한 파에는 350kHz, 370kHz, 500kHz 등 고주파 성분이 포함되어 있으며, 100kHz에서 200kHz 사이의 저주파 성분은 그 크기는 작지만 고루 내포되어 있다. 파의 최대 진폭은 약 0.9V이고, 펄스폭은 약  $100\mu\text{s}$ 로서 Fig. 3에 나타낸 발진 초음파와 비교할 때 진폭은 약 1/10로 줄어든데 반

해, 펄스폭은 약 4배정도 길어졌는데, 이러한 현상은 비대칭 연소관의 경우와 유사하였다. Fig. 5에 나타낸  $\theta=45^\circ$ 의 경우 수신파에 존재하는 주파수 성분은 150kHz, 200kHz, 270kHz, 320kHz, 340kHz, 380kHz 등 저주파 성분이 주로 내포되어 있으며, 비록 크기는 작지만 420kHz, 490kHz, 530kHz 등 고주파 성분도 내포되어 있다. Fig. 6에 보인  $\theta=90^\circ$ 인 경우 150kHz성분이 상대적으로 작아진 것 외에는  $\theta=45^\circ$ 의 경우와 유사한 경향을 보여주고 있다. Fig. 5와 6에 나타낸 파들은  $\theta=0^\circ$ 의 경우와는 달리 약 0.7V의 최대진폭과 약  $100\mu\text{s}$ 의 펄스폭을 가지고 있음을 볼 수 있는데, 이렇게 신호진폭이 감소한 것은 아마도 탐촉자와 연소관 사이에 끼워 넣은 아크릴 블록의 영향 때문인 것으로 추정된다. 비대칭 연소관의 경우<sup>18)</sup>와 비교할 때, 비대칭 연소관에서는 전

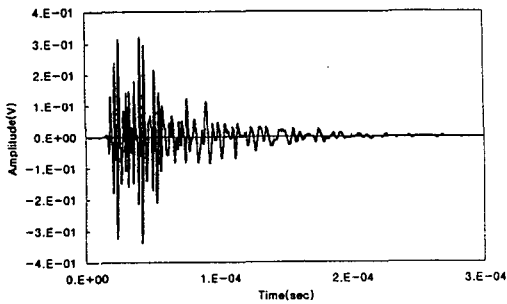
파각  $\theta$ 가 증가함에 따라 주파수 성분이 단순해지는데 반해, 대칭 연소관에서는 오히려 복잡해지는 경향을 나타내고 있다.

수신파의 파형과 주파수 스펙트럼은 진행 거리가 증가함에 따라 점차 달라진다. Fig. 7부터 Fig. 9까지 이러한 변화를 나타내었다. 이때, 수신파의 신호 크기가 진행거리에 따라 감소하기 때문에, 수신파를 원주방향에서 +15dB, 나머지 방향에서 +18dB 증가시킨 값을 나타내었다.

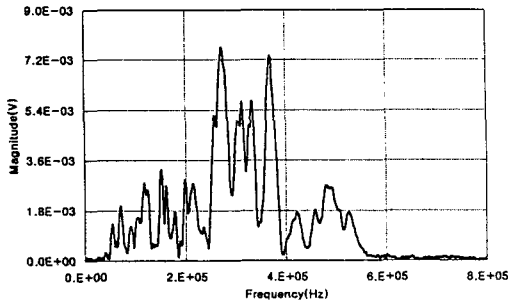
Fig. 7~9를 살펴보면, 우선 시간축 상의 파형이 Fig. 4~6의 파형과 약간 달라져 있음을 볼 수 있다. 그러나 이 변화가 비대칭 연소관의 경우에 비해 상대적으로 작아 분산에 의한 파의 분리현상이 뚜렷하게 나타나지 않고 있다. 탄성파가 연소관의 원주방향으로 전파하는 경우(Fig. 7), Fig. 4에 나타난 여러 가지 주파수 성분 중 400kHz 이상의 고주파 성분은

감쇠로 인해 사라지고, 150kHz 저주파 성분과 250kHz~350kHz 사이의 주파수 성분(이중 270kHz, 320kHz 성분들이 많음)을 갖는 탄성파가 멀리까지 전파되고 있다. 탄성파가 45° 방향으로 전파함에 따라(Fig. 8) 400kHz 이상의 성분은 완전히 사라지고, 원주방향으로 전파하는 경우와 마찬가지로 150kHz 성분과 250kHz에서 350kHz 사이의 성분만이 남아 있다. 탄성파가 90° 방향(축방향)으로 전파하는 경우(Fig. 9), 350kHz 이상의 고주파 성분이 45° 방향으로 전파하는 경우에 비해 더 많이 감쇠되어 사라진 것과 75mm에서의 결과처럼 150kHz 성분의 크기가 상대적으로 작아진 것 이외에는 45° 전파의 경우와 매우 유사한 양상을 나타내었다.

특정 주파수의 탄성파가 복합재 구조물 내를 전파할 수 있는 “최대 전파거리”는 탄성파의 주파수별 전파 방향에 따른 감쇠와 관련된 것으로서, AE 시

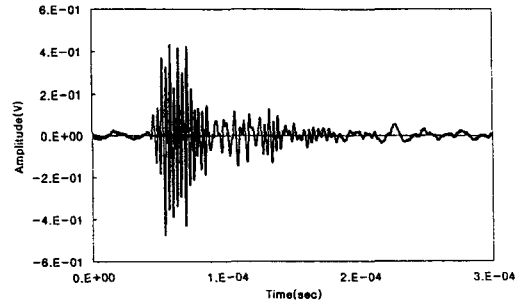


a) The time-domain waveform

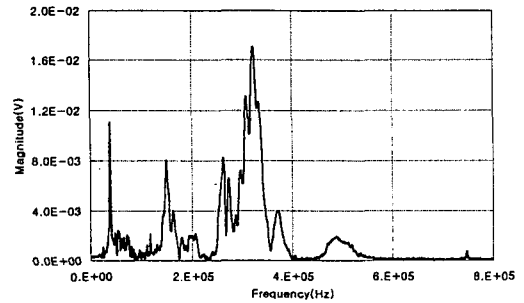


b) The frequency spectrum

Fig. 6. Elastic wave detected from the symmetric air-filled motor case at  $\theta=90^\circ$  and  $d=75\text{mm}$



a) The time-domain waveform



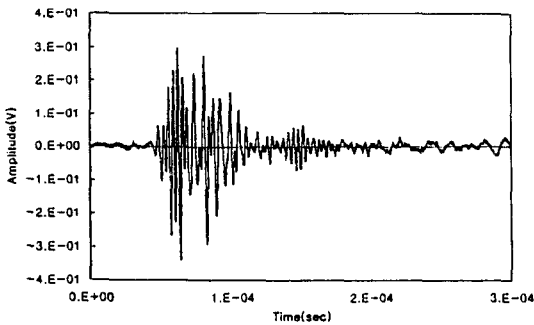
b) The frequency spectrum

Fig. 7. Elastic wave detected from the symmetric air-filled motor case at  $\theta=0^\circ$  and  $d=250\text{mm}$

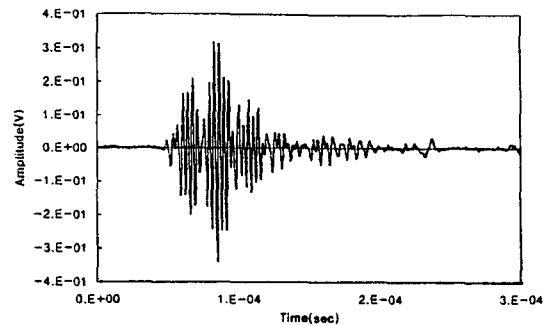
험시 센서의 선택과 배치를 위한 기초 정보가 된다. (여기에서 “최대전파거리”라 함은 Fig. 3에 나타난 입사파가 복합재 연소관내에 투입되어 2.2에서 언급한 수신 장치에 의해 감지할 수 있는 정도의 세기로 감쇠될 때까지 복합재 연소관내를 전파한 최대거리를 의미하는 것으로서, 본 연구에서 탄성파의 감쇠를 나타내는 하나의 지표로 사용하였다.) 특정 주파수를 갖는 탄성파의 진행 방향별 최대 전파거리를 결정하기 위해, 진행 방향과 거리가 서로 다른 105 지점(2.3 실험 방법 참조)에서 수신한 탄성파에 대한 주파수 분석을 수행하였다. 그 결과 발진점으로부터 모든 방향으로 진행하고 있는 3가지 주파수 성분(150kHz, 270kHz, 320kHz)의 최대 전파거리를 Fig. 10과 같이 구할 수 있었다.

Fig. 10을 보면 주파수가 150kHz, 270kHz,

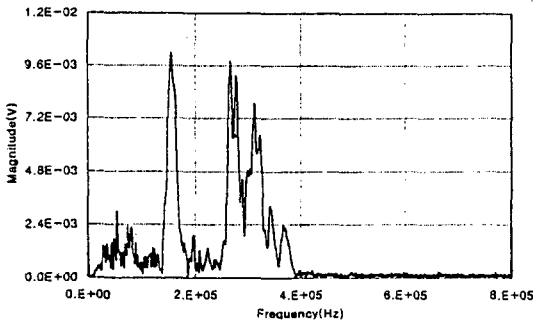
320kHz 인 세가지 성분의 탄성파는 모두 모든 방향에서 400mm 정도 전파하였으나, 고주파 성분인 550kHz 성분은 원주방향으로만 약 300mm 정도 전파될 뿐 전파각이 증가할수록 최대 전파거리가 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있다. (전파각 90°와 75°의 경우는 연소관의 길이가 짧아 실험 배치상 전파 거리 400mm를 얻을 수 없었으나, 만약 측정이 가능하였다면 150kHz와 270kHz, 320kHz 성분의 탄성파는 이 거리에서도 감지되었을 것으로 판단된다.) 본 실험에서 사용한 복합재 연소관의 크기를 고려할 때 전파거리 400mm는 AE 시험시 복합재 연소관의 전 표면을 감지하기에 충분한 거리이다. 따라서 150kHz와 270kHz, 320kHz는 모두 빈 연소관의 AE 시험시 사용할 수 있는 최적 성분의 탄성파들이라 판단된다.



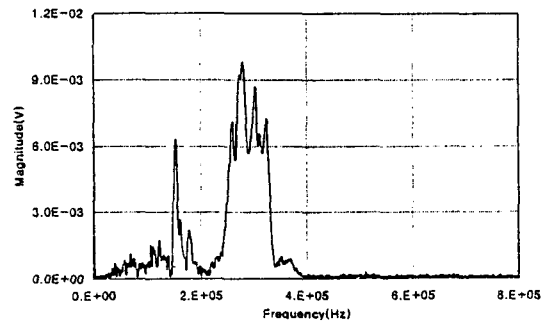
a) The time-domain waveform



a) The time-domain waveform



b) The frequency spectrum



b) The frequency spectrum

Fig. 8. Elastic wave detected from the symmetric air-filled motor case at  $\theta=45^\circ$  and  $d=250\text{mm}$

Fig. 9. Elastic wave detected from the symmetric air-filled motor case at  $\theta=90^\circ$  and  $d=250\text{mm}$

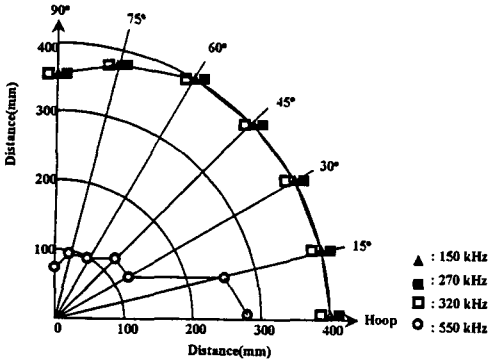


Fig. 10. Maximum propagating distances of elastic waves with specific frequency components along various propagation directions in the symmetric air-filled motor case.

3.3. 빈 연소관을 진행하는 탄성파의 속도

빈 연소관 내를 진행하는 탄성파는 전파속도가 서로 다른 여러 주파수 성분이 합쳐진 복합파로서 진행 거리에 따라 파형이 계속 변화하고 있어, 시간 축상의 파형으로부터 각 주파수 성분별 전파속도를 구할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 언급한 105지점에서 수신한 파에 Fig. 10에 나타낸 주파수 성분을 중심 주파수로 갖는 대역통과필터링을 수행하여, 파열음 신호를 생성하였다. 그리고 전파거리를 변화시켜가면서 파열음 신호를 측정하여 파열음 신호내의 동일점 (첫번째 최고값을 갖는 점)이 도달한 시간을 측정하였다. 그리고 이 신호의 도달 시간을 횡축으로, 신호의 전파거리를 종축으로 하는 그래프를 그렸다. 이렇게 하면 이 그래프 상의 데이터 값을 가장 잘 표현하는 최적 직선의 기울기가 곧 협대역 탄성파의 전파속도가 된다. 이때 270kHz와 320kHz는 하나의 AE센서로 동시에 검출할 수 있기 때문에 이 두 성분을 중심주파수가 300kHz(주파수 통과 대역은 250kHz~350kHz)인 하나의 탄성파로 간주하고, 그 탄성파의 속도와 150kHz 성분의 속도를 측정하여 그 결과를 Fig. 11에 속도표면(velocity surface)으로 나타내었다.

Fig. 11을 보면, 150kHz인 탄성파의 원주방향으로의 속도는 약 6500m/s이며, 전파각이 60° 까지는 거의 같은 속도를 유지하다가 전파각이 더 커지면

5500m/s로 다소 감소하였다. 그리고 주파수 성분이 300kHz인 탄성파도 역시 원주방향에서는 약 6500m/s의 속도를 가지며, 이 속도를 전파각이 60° 정도까지 유지하다가, 그 이상의 전파각에서는 점차 감소하여 축방향에서는 약 4500m/s의 속도를 나타내고 있다. 대칭 연소관의 경우 비대칭 연소관에 비해 재질의 이방성이 심하지 않기 때문에 속도의 이방성 역시 작게 나타났다.

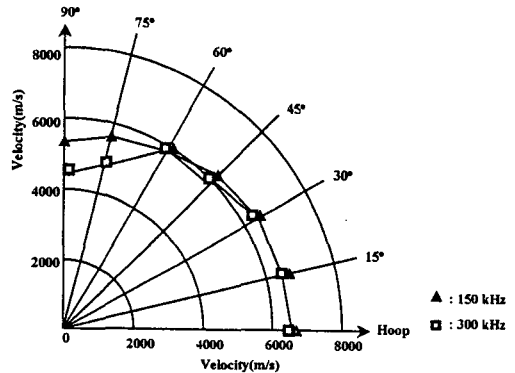


Fig. 11. Velocity surface for tone-burst signals (with the central frequencies of 150kHz and 300kHz) in the Symmetric air-filled motor case

3.4. 가압 연소관을 진행하는 탄성파의 주파수와 감쇠

수압이 대칭 연소관을 지나는 탄성파의 전파 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 연소관의 내부를 물로 채우고 약 50기압의 수압을 가하였는데, 이로 인해 연소관 표면에 육안으로 쉽게 식별할 수 있을 정도의 기지균열이 발생하였다. 또한 비대칭 연소관의 경우 물을 통과하여 수신 탐촉자에 도달한 탄성파가 실험 결과에 영향을 미쳤기 때문에<sup>18)</sup> 이를 제거하기 위하여 물을 채운 연소관 내부에 스펀지를 넣어 물을 통과하는 탄성파를 흡수할 수 있도록 하였다. 그림 Fig. 12~14에 가압 연소관에 대하여 진행거리 d=75mm에서 검출한 탄성파의 파형과 주파수 스펙트럼을 나타내었다.

Fig. 12는 원주방향( $\theta=0^\circ$ )으로 전파한 탄성파의 파형을 보여주고 있는데, 이 파에는 200kHz, 240kHz, 270kHz, 340kHz, 380kHz, 450kHz, 550kHz, 660kHz 등 다양한 주파수 성분이 포함되어 있다. Fig. 13은

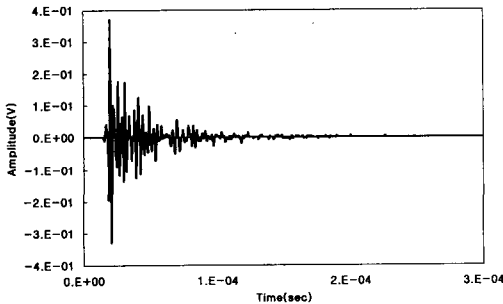


탄성파가 45° 방향으로 전파한 경우로서 이 파는 200kHz, 270kHz, 340kHz 등의 주파수 성분을 포함하고 있으며, 특히 270kHz 성분이 가장 많은 것을 볼 수 있다. Fig. 14는 탄성파가 90° 방향으로 전파한 파형으로서 이 파는 200kHz 성분이 더 작아진 것 외에는 45° 방향으로 전파한 경우와 유사하다. 그리고, 이 파형들을 Fig. 4~6에 표시한 빈 연소관에 대한 파형과 비교해 보면 가압 연소관의 경우가 파형이 더 짧아지고 주파수 스펙트럼에서 고주파 성분이 감소된 상태로 나타나고 있다. 이러한 현상은 연소관 내부를 물로 채운 경우 연소관의 한쪽이 물과 접촉되어 있어 연소관을 진행하는 탄성파의 에너지가 물로 빠져나가기 때문에 나타난다. 그러나, 빈 연소관과 가압 연소관의 주파수 성분은 큰 차이가 없는데, 이는 복합재 내부의 물과 수압이 주파수 성분 자체에는 큰 영향을 미치지 않음을 보여주고 있는데 이러한 현상은 이전의 연구<sup>18)</sup>에서도 확인된 바 있다.

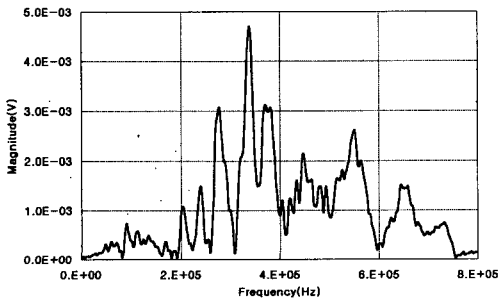
가압 대칭 연소관에서도 진행거리가 증가함에 따라 수신파의 파형과 주파수 스펙트럼이 또한 달라진

다. 이것은 비대칭 연소관의 경우에서도 볼 수 있었던 것으로 Fig. 15부터 Fig. 17까지 이러한 변화를 나타내었다. 여기서도 빈 연소관의 경우와 마찬가지로 원주방향에서 수신한파를 +12dB, 나머지 방향에서 +18dB를 증가시킨 값을 그림에 나타내었다.

Fig. 15는 탄성파가 연소관의 원주방향으로 전파하는 경우로서 Fig. 12에 나타낸 파가 길어지기는 하였지만 그 변화가 그다지 크지 않아 분산의 효과를 명확히 확인할 수가 없었다. 그리고, 신호의 후미 이후에 상당히 높은 잡음 성분이 존재하는데, 이것은 물을 통과한 탄성파의 영향이라 판단된다. 본 연구에서는 물을 통과하는 탄성파를 제거하기 위하여 흡음재를 연소관에 삽입하였으나, 그 흡음효과가 완벽하지 못하여, 비대칭 연소관의 경우보다는 훨씬 적은 양이기는 하지만 여전히 물을 통과한 파의 여진이 수신 탐촉자에 의해 감지된 것으로 판단된다. 이 영향으로 주파수 스펙트럼 또한 큰 피크들이 약해지고, 작은 피크들이 연속적으로 나타나고 있다. 전파거리 75mm일 경우와 비교할 때, 400kHz 이상의 고주파 성분이 사라지고, 주파수 성분은 250kHz

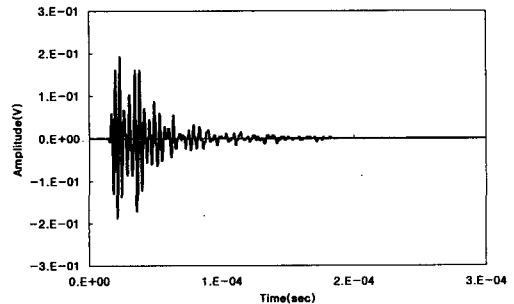


a) The time-domain waveform

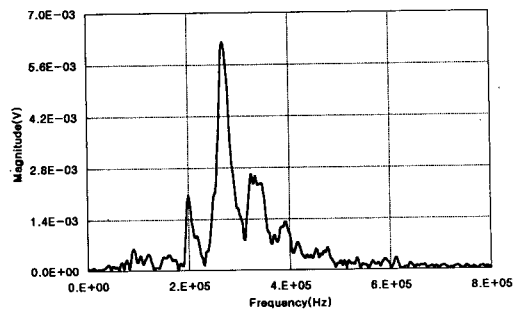


b) The frequency spectrum

Fig. 12. Elastic wave detected from the symmetric pressurized motor case at  $\theta=0^\circ$  and  $d=75\text{mm}$

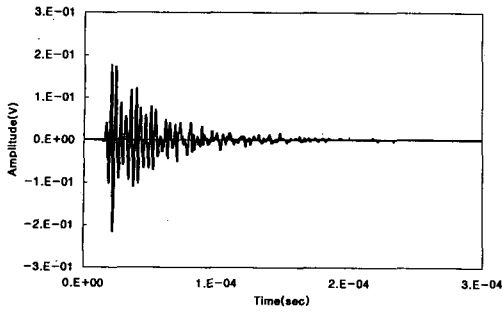


a) The time-domain waveform

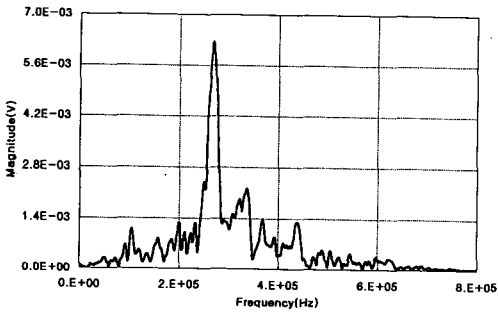


b) The frequency spectrum

Fig. 13. Elastic wave detected from the symmetric pressurized motor case at  $\theta=45^\circ$  and  $d=75\text{mm}$

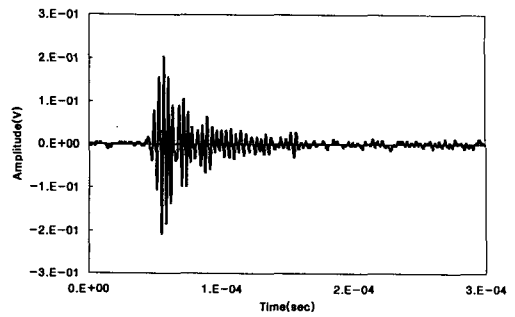


a) The time-domain waveform

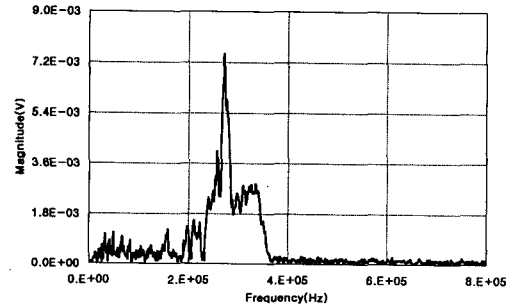


b) The frequency spectrum

Fig. 14. Elastic wave detected from the symmetric pressurized motor case at  $\theta=90^\circ$  and  $d=75\text{mm}$

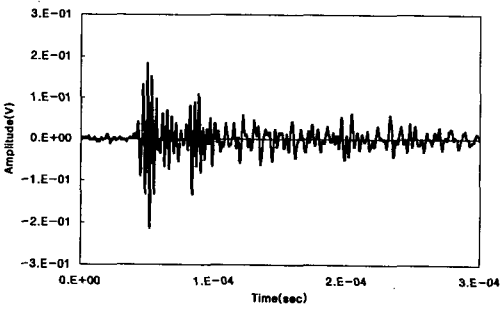


a) The time-domain waveform

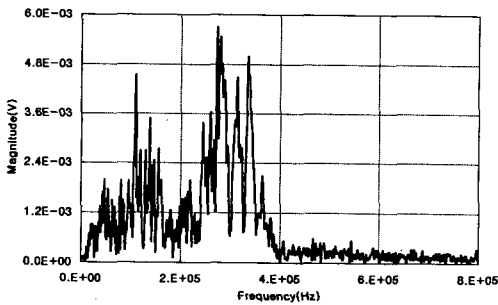


b) The frequency spectrum

Fig. 16. Elastic wave detected from the symmetric pressurized motor case at  $\theta=45^\circ$  and  $d=250\text{mm}$

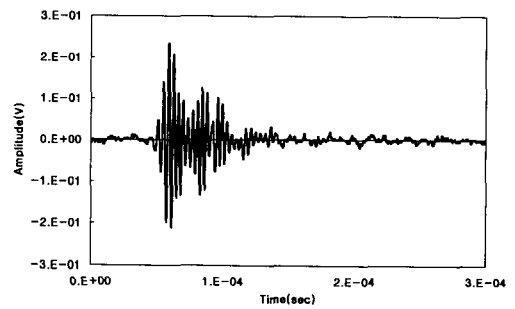


a) The time-domain waveform

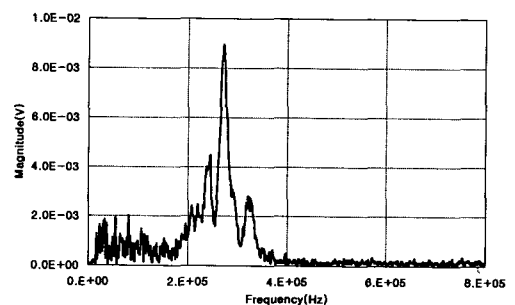


b) The frequency spectrum

Fig. 15. Elastic wave detected from the symmetric pressurized motor case at  $\theta=0^\circ$  and  $d=250\text{mm}$



a) The time-domain waveform



b) The frequency spectrum

Fig. 17. Elastic wave detected from the symmetric pressurized motor case at  $\theta=90^\circ$  and  $d=250\text{mm}$

~350kHz 사이가 가장 많으며, 150kHz 부근의 주파수 성분도 일부 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 16은 탄성파가 45° 방향으로 전파하는 경우로서, 시간축상의 파형은 Fig. 13과 비슷하고, 주파수 스펙트럼 역시 270kHz와 320kHz가 주종을 이루는 점이 흡사하다. 다만 물과 가압의 영향으로 인해 잡음 성분이 증가하였음을 볼 수 있다. Fig. 17은 탄성파가 축방향( $\theta=90^\circ$ )으로 전파한 경우로서, 그 변화양상이 45°의 경우와 비슷하다. 즉 파형과 주파수 스펙트럼상에 수압으로 인한 잡음 성분이 증가한 것 외에는 Fig. 14와 큰 변화가 없다. 가압을 하지 않은 경우(Fig. 7~9)와 비교할 때, 빈 연소관에서는 150kHz 부근의 저주파 성분도 멀리까지 전파하고 있었으나, 가압연소관의 경우는 250kHz에서 350kHz 사이의 주파수 성분이 주종을 이루고 있음을 볼 수 있었는데, 가압시 150kHz 부근의 저주파 성분이 나타나지 않는 이유는 현재로서는 불분명하여 이 현상규명을 위한 계속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

진행방향과 거리가 서로 다른 105지점(2.3 실험방법 참조)에서 검출한 탄성파에 대해 주파수 분석을 수행한 결과 Fig. 18에 나타낸 바와 같은 최대 전파거리를 얻었다.

Fig. 18에서 볼 수 있는 바와 같이 발진점으로부터 모든 방향으로 전파한 주파수 성분은 270kHz, 320kHz의 두 가지였다. 이 중에서 270kHz 성분은 45° 방향까지는 400mm 이상 전파하다가 60° 이상의 전파각에서는 전파거리가 350mm 정도로 다소 감소하였다. 이에 대해 320kHz 성분은 전파각이 30° 이상이 되면 최대 전파거리가 300mm 정도로 감소하고 있다. 이러한 현상은 대칭 연소관에서도 비대칭 연소관의 경우와 마찬가지로<sup>18)</sup> 전파 방향에 따라 탄성파의 중심 주파수가 저주파 쪽으로 점차 이동하고 있음을 의미한다. 그러나 이러한 변화는 270kHz와 320kHz의 탄성파를 모두 한 개의 AE센서(중심 주파수 300kHz, 주파수 통과대역 250kHz~350kHz)로 동시에 검출할 수 있다는 사실을 상기하면, 실용적인 관점에서는 큰 문제가 아니라고 판단된다. 또한 Fig. 18의 결과를 Fig. 11의 빈 연소관의 경우와 비교하면, 270kHz와 320kHz 성분의 탄성파의 최대 전파거리가 수압연소관에서 더 짧아지고 있음을 볼 수 있는데, 이것은 탄성파의 일부가 물로 빠져나간 결과로 판단된다.

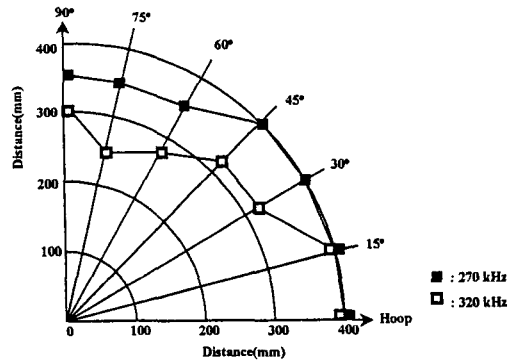


Fig. 18. Maximum propagating distances of elastic waves with specific frequency components along various propagation directions in the symmetric pressurized motor case

### 3.5. 가압 연소관을 진행하는 탄성파의 속도

빈 연소관의 경우와 마찬가지로 진행방향과 거리가 서로 다른 105지점에서 수신한 탄성파에 중심 주파수가 300kHz(주파수 통과 대역은 250kHz~350kHz)인 대역통과 필터링을 수행하여 파열음 신호를 생성하였다. (여기에서 중심주파수를 300kHz로 선택한 이유는 여러 지점에서 수신한 탄성파의 주파수 성분을 면밀히 살펴본 결과 270kHz~320kHz의 주파수 성분이 하나의 그룹을 형성하고 있다고 판단하였기 때문이다.) 이 파열음 신호로부터 탄성파의 전파속도를 3.3절에 설명한 방법으로 측정하여 그 결과를 Fig. 19에 나타내었다.

Fig. 19를 보면 중심 주파수 300kHz 인 탄성파는 원주방향에서 약 6500m/s의 전파속도를 가지나 전파각이 증가할수록 다소 감소하여 전파각 60°에서는 약 6000m/s, 그리고 축방향(전파각 90°)에서는 약 4600m/s의 전파속도를 나타내었다. 이 결과는 Fig. 12에 나타낸 빈 연소관에서의 속도측정 결과와 거의 일치하고 있는데, 이것은 수압이 탄성파의 전파속도에는 영향을 미치지 않다는 것을 보여 주고 있다. 그러나 이 결과를 가압한 비대칭 연소관의 경우<sup>18)</sup>와 비교하면 대칭 연소관의 경우에 속도 이방성이 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 적층순서가 대칭적이기 때문에 비대칭 연소관에 비해 재료의 이방성이 작아졌기 때문인 것으로 판단된다.

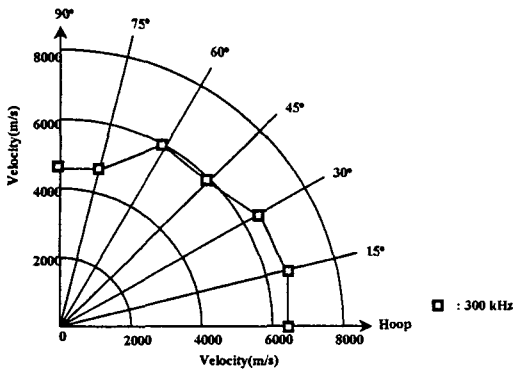


Fig. 19. Velocity surface for tone-burst signal (with the central frequency of 300kHz) in the symmetric pressurized motor case

3.6. 수압AE시험을 위한 탄성파의 최적 성분

복합재 연소관의 품질보증을 위해 실시하는 수압/AE 시험에서 검출해야할 탄성파는 1) 모든 방향으로 가능한 한 멀리 전파해야 하고, 2) 전파방향에 따른 전파속도의 변화가 가능한 한 작아야한다. 3.4 와 3.5에서 보인 바와 같이 복합재 연소관에 물을 채우고 수압을 가한 경우에, 연소관 내에서 모든 방향으로 전파하는 탄성파의 중심 주파수는 300kHz 였기 때문에, 대칭적층 복합재 연소관의 수압/AE 시험에서는 중심 주파수 300kHz인 탄성파를 검출하는 것이 가장 효율적이라 판단된다.

4. 결론

복합재 연소관의 수압/AE 시험의 성공적 수행을 위한 핵심과제 중의 하나는 수압으로 인해 방출되어 연소관을 통해 전파하는 탄성파의 특성을 분석하여, 수압/AE 시험시 감지해야할 탄성파의 최적 성분을 결정하는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는, 대칭 적층 구조를 갖는 복합재 연소관 내를 전파하는 탄성파의 전파 특성을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 빈 연소관의 경우, 중심주파수가 150kHz, 270kHz, 320kHz 의 세 가지 성분인 탄성파가 연소관의 모든 방향으로 약 400mm 이상 전파하였다. 중심 주파수 150kHz의 탄성파는 원주방향에서 6500m/s의 전파속도를 가지나,

전파각이 증가함에 따라 전파속도가 완만히 감소하여 축방향에서는 5300m/s의 전파속도를 나타내었다. 그리고, 중심 주파수 300kHz 인 탄성파(이는 270kHz와 320kHz 성분을 모두 포함하고 있는 탄성파임.) 역시 원주방향에서부터 전파각이 60° 가 될 때까지는 150kHz의 성분과 비슷한 전파속도를 보이나, 전파각이 더욱 증가할수록 전파속도가 상대적으로 더 큰폭으로 감소하여 축방향에서는 4500m/s의 전파속도를 보였다. 따라서 빈 대칭 연소관에 대한 AE시험에서는 전파속도의 이방성이 상대적으로 작은 중심 주파수 150kHz의 탄성파가 보다 적합한 성분의 탄성파이다.

- (2) 연소관에 수압을 가하였을 때, 중심 주파수 300kHz인 성분의 탄성파가 대칭 복합재 연소관 내를 모든 방향으로 약 400mm 이상 전파하였으며, 그 전파속도는 원주방향에서 약 6500m/s이며, 축방향에서는 약 4600m/s로서 원주방향 전파속도 대비 약 71%였다. 가압 대칭 연소관에서는 모든 방향으로 일정거리 이상으로 전파한 탄성파의 성분이 오직 하나이기 때문에, 중심 주파수 300kHz인 탄성파가 수압/AE시험을 위한 최적 성분의 탄성파이다.
- (3) 중심주파수가 300kHz인 탄성파의 빈 연소관에서 측정된 속도표면과 가압 연소관에서 측정된 속도표면이 일치하고 있는데, 이로부터 수압이 탄성파의 전파속도에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 가압 연소관내에서 300kHz 성분의 탄성파의 최대 전파거리는 빈 연소관에서의 최대 전파거리보다 약 50mm 정도(전파각 60° 이상에서) 짧아졌는데, 이로부터 수압이 탄성파의 감쇠에 상당한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 1) Eric v.K. Hill, "Predicting Burst Pressures in Filament-Wound Composite Pressure Vessels by Using Acoustic Emission Data," Mater. Eval., (1992), pp. 1439-1445
- 2) J. W. Whittaker, W. D. Brosey and M. A. Hamstad, "Felicity Ratio Behavior of Pnuematically and Hydraulically Loaded Spherical Composite Test Specimen," J. Acoustic Emission, Vol. 9, No. 2, (1990), pp. 75-83
- 3) J. W. Whittaker, W. D. Brosey and M. A. Hamstad, "Correlation of Felicity Ratio and Strength Behavior of Impact Damaged Spherical Composite Test Specimen," J. Acoustic Emission, Vol. 9, No. 2, (1990), pp. 84-90
- 4) M. A. Hamstad, J. W. Whittaker and W. D. Brosey, "Correlation of Residual Strength with Acoustic Emission from Impact-Damaged Composite Structures under Constant Biaxial Load," Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 15, (1990), pp. 2307-2328
- 5) M. R. Gorman, "Burst Prediction by Acoustic Emission in Filament Wound Pressure Vessels," Journal of Acoustic Emission, Vol. 9, No. 2, (1990), pp. 131-139
- 6) J. Walker, M. Lansing, S. Russell, G. Workman and A. Nettles, "Materials Characterization of Damage in Filament Wound Composite Pressure Vessels," 4th Annual Research Symposium, NDE of Composite and Composite Structures, (1995), ASNT Spring Conference, Las Vegas, Nevada, March 20-24
- 7) 권오양, 윤동진, 정현조, 조원만, "복합재 연소관의 수압/AE 시험 분석," 제 5차 유도무기 추진기관 학술대회 논문집, 국방과학연구소, (1995), pp. 544-551
- 8) 김호철, 남창희, 이정기, 송성진, 양인영, 오치환, "복합재 연소관의 비파괴평가 기법 연구," 국방과학연구소 연구보고서 MSDC-421-960558, (1996)
- 9) 송성진, 오치환, 정현조, 이상호, 임수용, 김호철, "수압음향방출에 의한 복합재 연소관의 파괴거동 예측," 비파괴검사학회지, 제18권 제2호 (1998), pp. 92-102
- 10) S. J. Song, C. H. Oh, H. J. Kim and J. U. Choe, "Hydroproof Acoustic Emission for Prediction of Failure Behavior in Composite Pressure Vessels," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, Vol. 17, (1998), (in press)
- 11) J. W. Whittaker, W. D. Brosey, O. Burencio and D. A. Waldrop, "Acoustic Emission Wave Propagation and Source Location in Small, Spherical Composite Test Specimen," J. Acoustic Emission, Vol. 7, No. 1, (1988), pp. 31-40
- 12) D. Noiret and J. Rojet, "Calculation of Wave Propagation in Composite Materials Using the Lamb Wave Concept," J. Comp. Mater. Vol. 23, (1989), pp. 195-206
- 13) W. H. Prosser, J. Dorigi and M. R. Gorman, "Extentional and Flexural Waves in a Thin-Walled Graphite/Epoxy Tube," J. Composite Mater, Vol. 26. No. 14, (1992), pp. 2016-2027
- 14) W. H. Prosser and M. R. Gorman, "Propagation of Flexural Mode AE Signals in Gr/Ep Composite Plates," Acoustic Emission in Composite Mater. Vol. 4 (1992), pp. 418-427
- 15) J. K. Lee, Y. H. Kim and H. C. Kim, "Transient Elastic Waves Generated by Point Source in Carbon in Fiber Reinforced Plastic Plates," Prog. in Acoustic Emission VI, ed. T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu, The Japanese Soc. for NDI, (1992), pp. 101-108
- 16) J. K. Lee, H. C. Kim, M. S. Choi and Y. H. Kim, "Spectral Analysis of Transient Elastic Waves Generated by Point Source

- in Glass and Unidirectional CFRP Plates,”  
한국음향학회, 13권 6호, (1994), pp. 50-59
- 17) M. A. Hamstad and K. S. Downs, “On  
Characterization and Location of Acoustic  
Emission Sources in Real Size Composite  
Structures-A Waveform Study,” J. Acoustic

- Emission, Vol. 13, No. 1/2, (1995), pp. 31-41
- 18) 송성진, 최지웅, 김학준, “복합재 구조물의 비  
파괴 평가를 위한 탄성과 전파 특성 연구-실  
험적 접근,” 대한기계학회논문집 A권, 제 22  
권 6호 (1998), pp. 978-989

## An Experimental Study on Elastic Wave Propagation in a Symmetrically Filament-Wound Composite Motor Case

Sung-Jin Song\* and Ji-Ung Choe\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746

\*\* School of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759

**Abstract** One of the key issues in acoustic emission (AE) during hydroproof test of filament-wound composite rocket motor cases is the determination of the optimal component of elastic wave to be monitored. To solve this problem, broadband ultrasonic wave was generated into a symmetrically filament-wound composite motor case, and was received at 105 different locations after the propagation through the composite case with different distances and directions. By analysis of the received signals, characteristics of elastic wave propagation such as frequency components, the maximum propagating distance, and velocity surface were investigated. This analysis was performed for two different conditions of the motor case; air-filled and hydraulically pressurized. Based on these information, the effect of hydraulic pressure on the wave propagation characteristics was investigated and furthermore, the optimal component of elastic wave for AE during hydroproof test of the motor case was successfully determined.