

추진기관의 라이너/추진제 미접착 검출 기법 연구

김동륜* · 류백능*

Study on the Debonding Detection Techniques of Liner/Propellant Interface of Rocket Motor

Dongryun Kim* · Baekneung Ryoo*

ABSTRACT

It is known that the adhesive interface testing of the rocket motor using the ultrasonic wave is superior to the other testing methods about the ability to economical detect the defects. But, the signal analysis of the ultrasonic wave takes a lot of time and efforts because the time interval of the transmitted pulse and the received pulse is too short to separate the reflected signals due to the multi-layers of the rocket motor. The ultrasonic testing of rocket motor have only applied to the automatic system about extremely limited areas like the debond in adhesive interface between the motor case and the insulator. In this study the new technique to detect the debond between the liner and the propellant using the property of the resonance and the Lamb waves instead of the existing ultrasonic testing was described.

초 록

초음파를 이용한 추진기관의 접착 계면 검사는 결함 검출 능력과 경제성이 우수하다고 알려져 있다. 하지만, 추진기관의 접착 구조는 다중 계면이므로 송신 펄스와 수신 펄스의 시간 간격이 짧아서 반사 신호의 분리가 어렵기 때문에 초음파의 신호 분석에는 많은 시간과 노력이 소요된다. 이런 이유로 추진기관의 초음파시험은 연소관과 내열재 사이의 미접착 결함과 같이 극히 제한된 영역에 대해서만 자동화 시스템으로 수행하고 있다. 본 논문에서는 기존의 초음파시험으로 검출이 불가능했던 라이너와 추진제 미접착 결함을 초음파의 공진 현상과 램파 특성을 이용하여 검출하는 새로운 기법에 대해 기술하였다.

Key Words: Resonance(공진), Lamb Waves(램파), Debonds(미접착), Non-destructive Testing(비파괴 시험), Manual Ultrasonic Test(수동초음파시험)

† 2008년 1월 25일 접수 ~ 2008년 4월 20일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부
연락처, E-mail: ndtpro@hanmail.net

물질이 접착되어 있는 구조이며, 접착부의 품질은 추진기관의 성능을 좌우하므로 접착 계면의 품질을 평가하고 보증할 수 있는 비파괴시험 방법이 절실히 요구되고 있다. 비파괴시험 방법을 적용할 때는 추진기관에 존재하는 결함의 형상, 특성, 발생 위치, 물리적 성질 등을 고려하여 결함을 검출할 수 있는 시험 방법을 선정해야 한다.

초음파시험은 미접착 결함을 검출하기 위해 가장 많이 사용되고 있는데[1], 다른 시험법과 비교하여 미접착 검출 효율이 높다. 하지만, 미접착 결함은 초음파의 진행 방향과 수직을 이루어야 검출되는 기하학적 한계를 가지고 있으며, 탐촉자의 주파수, 접촉 매질 및 접촉 압력 등과 같은 실험 변수에 영향을 많이 받는다.

이런 이유로 기존에 사용했던 펄스 에코 반사 투과법 대신 새로운 시험법을 개발할 필요가 절실히 요구되고 있다[2].

미 해군과 공군에서 운용중인 AIM-7M 공대공 유도탄 추진기관의 장기 저장 중 노화로 인하여 라이너/추진제 미접착이 발생되었고, 이로 인해 추진기관이 파열되는 악작용이 발생되었다. 미 해군이 수년간의 연구와 실험을 통하여 2002년도에 개발한 수동초음파시험(MUT)을 자국과 해외에서 주둔하고 있는 기지뿐만 아니라, 이스라엘, 캐나다와 같은 무기 수입국에서도 유상으로 실시하고 있다.

국내에서도 이 추진기관의 라이너/추진제 미접착 결함을 필수적으로 검출할 필요가 요구되었으며, 중장기적으로 볼 때 미 해군에 유상으로 검사를 의뢰하기보다는 자체 기술을 보유하는 것이 유리하다고 판단되어 이 시험법을 독자적으로 연구·개발하였다.

본 논문에서는 초음파가 접착 계면에서 반사되는 에너지의 차이로 미접착을 검출하는 기존 시험법 대신 초음파의 공진 현상과 램파의 특성을 이용하여 검출하는 수동초음파시험법에 대하여 기술하였다.

2. 초음파 신호의 모델링

2.1 초음파 물성 측정

매질 내로 입사된 초음파는 매질의 경계 면에서 두 매질의 음향 임피던스의 차이 및 파의 종류별 특성에 의하여 다양한 진행 특성을 나타낸다. 일반적으로 초음파는 경계 면에 수직으로 입사될 때 경계 면에서 반사되는 성분과 투과되는 성분으로 나뉘어진다. 반사와 투과는 음향 임피던스에 따라 그 비율이 정해지므로 정확한 초음파 물성을 요구한다.

따라서 초음파 신호를 모델링하기 위해서는 각각의 물질에 대한 밀도, 초음파 속도 및 감쇠 계수와 같은 정확한 초음파 물성을 측정하는 것이 필수적이다. 추진기관에서 스틸 및 내열 고무는 독립적으로 분리하기가 곤란하여 스틸은 초음파의 종파 특성 및 성능 점검에 사용하는 초음파 탐상용 A1형 표준 시험편을 이용하여 초음파 물성을 측정하였고, 내열 고무는 추진기관에서 일반적으로 사용하고 있는 EPDM 고무를 이용하여 측정하였다. 하지만 추진제는 추진기관에서 절삭하여 측정하였다.

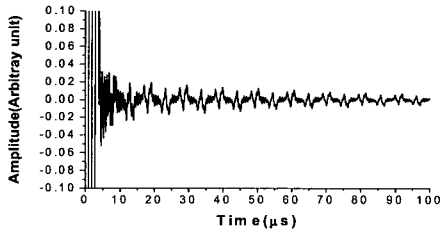
2.2 초음파 신호의 모델링

추진기관 내 초음파 신호의 반사·투과 거동은 접촉 매질/스틸/내열 고무/라이너/추진제/공기의 다중 계면에서 복잡한 형식으로 발생할 것이다. 내열 고무와 추진제 계면 사이의 라이너는 초음파 특성이 고무와 같으므로 모델링에서는 내열 고무로 가정하였다. 초음파의 모델링은 라이너와 추진제의 접착 계면에서 미접착이 발생한 경우와 완전 접착된 경우로 구분하여 실시하였다. 추진기관은 실린더 형상이므로 형상 인자의 영향 및 각 재질에 대한 감쇠 계수를 고려하였다[3].

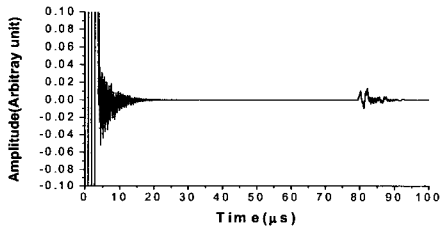
Figure 1(a)는 라이너와 추진제에 미접착 결함이 있는 경우를 모델링하여 이론적으로 예측한 초음파 신호이다. 초음파가 미접착 결함의 영향으로 추진제에 전달되지 않고 라이너와 추진제 계면에서 대부분 반사하므로 추진제 저면 신호

가 나타나지 않았다.

Figure 1(b)는 라이너와 추진제가 완전 접촉된 경우를 모델링하여 이론적으로 예측한 초음파 신호이다. 라이너와 추진제가 완전하게 접촉되었으므로 초음파는 추진제로 전달되어 추진제 저면 신호가 나타났다.



(a) Debonding Signal



(b) Adhesive Signal

Fig. 1 Modeling of Ultrasonic Signal

라이너/추진제 미접착의 초음파 신호는 라이너/추진제 완전 접착의 초음파 신호보다 크게 측정되었고 추진제 저면 신호가 나타나지 않았지만, 두 신호의 차이가 크지 않아 펄스 에코 반사 투과법으로 미접착 신호와 완전 접착 신호를 구분하는데 어려움이 많을 것으로 판단된다. 또한, 추진기관을 검사할 때 탐촉자의 접촉 상태, 접촉 매질 및 손 떨림 등의 영향으로 불안정된 초음파 신호가 수신되므로 펄스 에코 반사 투과법으로 라이너/추진제 미접착 결함을 검출하는 것은 불가능할 것으로 판단된다.

그러므로 라이너/추진제 미접착 결함을 수동 초음파시험으로 검출하기 위해 기존의 펄스 에코 반사 투과법이 아닌 새로운 시험법의 개발이 요구되었다.

3. 실험 장비 및 모의 결함 시험편

3.1 초음파 실험 장비

Figure 2는 실험 장비의 개략도이다. 본 연구에서는 초음파의 송·수신을 위한 디지털 초음파 탐상기를 사용하였고, 초음파 탐촉자는 진동자의 크기가 25 mm이고 초음파의 공칭 주파수가 0.45 MHz인 수직 탐촉자를 사용하였다. 탐촉자에서 수신된 신호는 A/D Board에서 초음파 전달 시간에 따른 초음파 음압을 RF 신호로 표시하여 스펙트럼 해석, 음파의 감쇠 및 속도를 측정하였다. 탐촉자와 피검체의 신호 전달을 용이하게 하기 위하여 접촉 매질은 글리세린을 사용하였다.

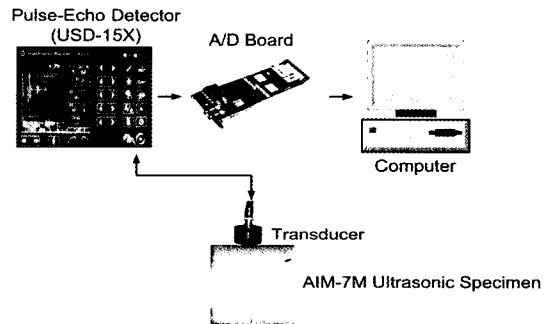


Fig. 2 Schematic Drawing of Experimental Apparatus

3.2 모의 결함 시험편

모의 결함 시험편은 A, B형 2종을 제작하였다. 모의 결함 시험편 A형은 추진기관의 원통부를 150 mm로 절단한 후에 추진제를 연소관, 내열 고무 및 라이너만 남겨 놓고 제거하였다. 이 후에 이형 필름을 10×10 mm 두 개, 20×20 mm 두 개, 32×32 mm 두 개 및 50×50 mm 한 개로 잘라서 라이너 면에 접착시킨 후에 추진제를 충전하였다. 이형 필름으로 인하여 라이너와 추진제는 미접착이 발생하게 된다.

모의 결함 시험편 B형은 추진기관의 원통부를 200 mm 절단한 후 내부의 추진제를 약 10 mm 정도 남겨 놓고, ϕ 17 mm, ϕ 20 mm 및 ϕ 25 mm의 크기로 임의의 세 곳을 지정하여 라이너 면까지 추진제를 제거하였다. 이 두 시험편으로 초

음파의 기준 감도를 설정하였고 결함의 길이를 정량적으로 측정하였다. Fig. 3은 모의 결함 시편 A형과 B형의 형상 및 치수이고 단위는 mm이다.

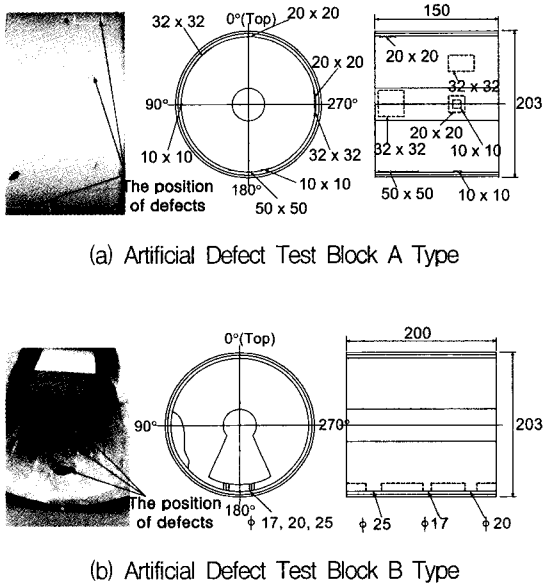


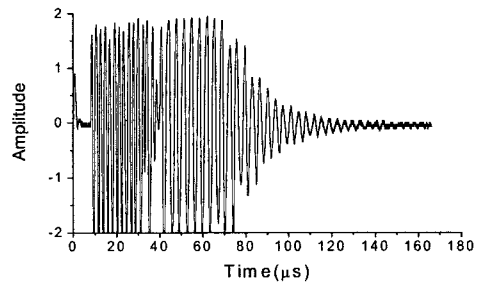
Fig. 3 Configuration and Dimensions of the Artificial Defect Test Block

4. 결과 및 고찰

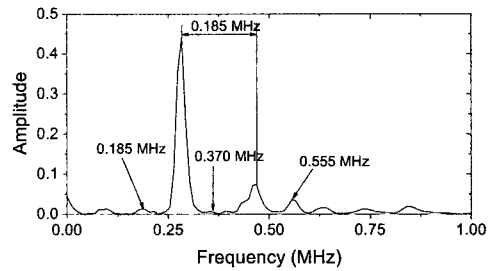
4.1 고무 시편의 공진 신호 분석

EPDM 고무 시편 4.17 mm을 이용하여 고무 시편의 공진 신호를 분석하였다. 일반적으로 고무는 공진이 힘든 재질이므로 추진기관의 스틸 및 고무가 동시에 공진 되는 현상을 증명하기 위해 우선적으로 실험을 실시하였다.

고무 시편의 초음파 왕복 시간은 5.44 μ s이고, 고무 시편의 초음파 펄스 폭은 3.91 μ s이므로 송신 펄스와 반사파의 분리가 곤란하였다. 그러므로, 가동 주파수를 높여 주파수의 차이를 이용하여 공진 주파수를 획득하였다. Fig. 4는 고무 시편의 초음파 신호와 주파수 스펙트럼이며, 고무 시편에서도 공진 신호가 발생됨을 확인하였다.



(a) Ultrasonic Signal



(b) Frequency Spectrum

Fig. 4 The Resonance Signal Analysis of the Rubber Specimen

4.2 추진기관의 공진 신호 분석

추진기관의 공진 신호를 분석하기 전에 ASTM E 1065-99 규격을 적용하여 탐촉자의 성능을 평가하였다. 수동초음파시험에 사용한 탐촉자는 분석 결과, 피크 주파수가 0.468 MHz이고, 밴드 폭이 86%이며, 파형 지속 시간이 3.91 μ s인 비교적 넓은 주파수 범위를 갖고 있는 광대역 탐촉자이므로 공진법을 적용하기 유리하였다[4].

라이너/추진제 미접착 결함이 존재하면 연소관과 내열 고무에서 동시에 공진이 발생되므로 초음파 신호가 증폭되어 기존의 초음파시험 기법인 펄스 에코 반사 투과법보다 결함 검출 능력이 월등하게 향상될 수 있다[5].

Figure 5는 모의 결함 시편 A형의 라이너/추진제 미접착 결함에 대한 주파수 분석 결과이다. 연소관과 내열 고무의 초음파 평균 속도는 2,035 m/s이고, 두께는 6 mm이므로 공진 주파수는 0.169 MHz의 정수 배가 될 것으로 예측하였다.

실험 결과, 두 주파수의 차이가 0.166 MHz와 0.156 MHz로 측정되어 계산에서 얻은 공진 주파수인 0.169 MHz와 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이를 근거로 추진기관의 라이너/추진제 미접착 계면에서 초음파의 공진 현상을 증명할 수 있었다.

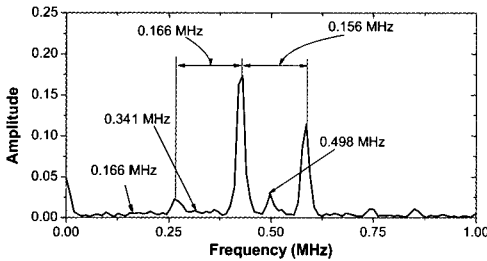


Fig. 5 Frequency Spectrum of the Rocket Motor Using the 0.45 MHz Transducer

4.3 추진기관의 램파 특성 분석

램파는 추진기관의 연소관과 같이 박판의 벽을 따라 전파하는 파로서, 전파 특성은 연소관의 두께와 시험 주파수에 의해 영향을 받는다. 램파는 대칭모드(Symmetric mode)와 비대칭모드(Antisymmetric mode)로 구분되어 진다. 대칭모드는 램파의 진행방향으로 진동하는 파의 성분이 박판의 두께 중심선에 대해 대칭인 S파이고, 비대칭모드는 박판의 두께 중심선에 대해 비대칭인 A파이다. 램파의 파형 구조 및 진동 특성에 따라 대칭모드는 S_0, S_1, S_2, \dots 로 나타내고 비대칭모드는 A_0, A_1, A_2, \dots 로 나타낼 수 있다.

램파의 속도는 연소관의 두께와 시험 주파수에 따라 변하므로 정확한 분산 선도를 구하여 각 모드별 분산 특성을 반드시 분석해야 한다.

Figure 6은 스틸 연소관에 대한 분산 선도이다. 분산 선도는 각 모드별 분산 특성을 보여줄 뿐만 아니라 램파가 존재할 수 있는 조건을 나타내 줄 수 있는데 가로축은 주파수와 연소관의 두께의 곱이고 세로축은 속도를 나타내고 있다. 연소관의 외경은 203 mm이고 두께는 2 mm이며, 탐촉자의 피크 주파수는 0.468 MHz이므로 연소관의 기하학적 조건에 의해 S_0 파와 A_0 파가

전파됨을 알 수 있다. 이 때 S_0 파의 속도는 5,114 m/s이며, A_0 파의 속도는 3,133 m/s이다.

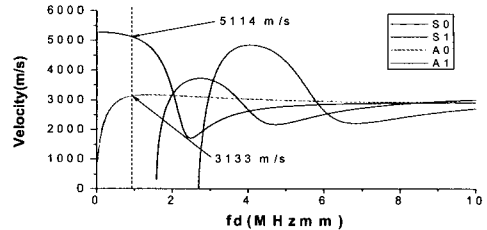


Fig. 6 Velocity of Lamb Waves in Steel

S_0 파는 분산 선도로 예측할 때 124.7 μ s의 시간 축에서 측정되고, A_0 파는 203.5 μ s의 시간 축에서 측정될 것으로 판단하였다. 실험 결과, S_0 파는 123.5 μ s에서 측정되었으며, A_0 파는 201.6 μ s에서 측정되어 이론과 실험이 일치함을 알 수 있었다. S_0 파에 비해 A_0 파가 상대적으로 신호의 크기가 낮았으며, 이는 고무와 스틸의 접촉으로 에너지 손실이 발생했기 때문이다.

램파는 수동초음파시험에서 중요한 척도로 작용하는데, 이는 탐촉자의 접촉 상태, 표면 이물질 및 손 떨림에 의한 초음파 신호의 불안정을 판단하는 기준이 되기 때문이다.

4.4 모의 결함 시편의 모드 변환 신호 분석

모의 결함 시편은 추진기관을 절단하여 인위적으로 결함을 만든 시편으로서, 그 크기는 직경 203 mm, 높이 150 mm인 실린더 형상이다. 램파가 연소관 외벽으로 진행되면 모의 결함 시편의 기하학적 형상에 의해 시편 측면으로부터 모드 변환 S_0 파와 모드 변환 A_0 파가 발생하게 된다.

모드 변환 S_0 파는 속도의 변화가 없으므로 S_0 파와 중첩이 되지만, 모드 변환 A_0 파는 속도 변화로 인하여 S_0 파와 A_0 파의 사이에 위치하게 된다. 모드 변환은 모의 결함 시편의 기하학적 형상에 의해 발생되므로 실제 추진기관에서는 검출되지 않을 것이다. Fig. 7는 A_0 파, S_0 파 및 모드 변환 A_0 파를 나타낸 초음파 신호로서 모드 변환 S_0 파는 S_0 파와 중첩됨을 알 수 있다.

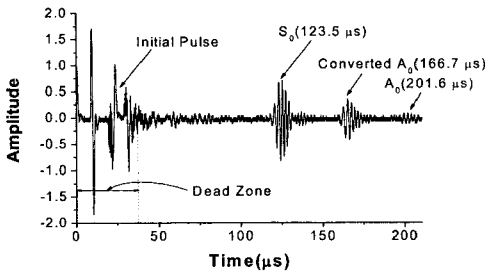
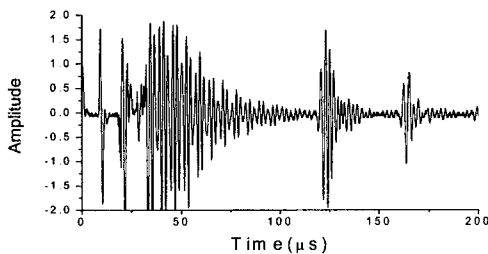


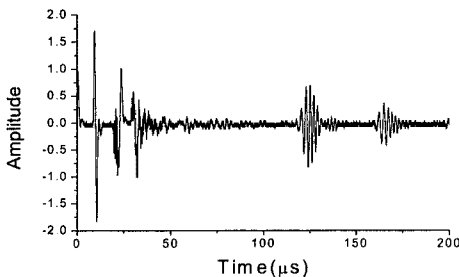
Fig. 7 Ultrasonic Signal of Rocket Motor

4.5 미접착 및 완전 접착의 초음파 신호 분석

Figure 8은 미접착 및 완전 접착에 대한 초음파 신호를 비교한 것이다. 미접착의 초음파 신호는 추진기관의 스틸 및 고무가 동시에 공진기 때문에 신호가 증폭되고 있으며, 공진 현상을 이용하면 자동화 장치 및 신호 안정화 치구 등이 없더라도 수동초음파시험이 가능하다고 판단된다.



(a) Debonding Signal



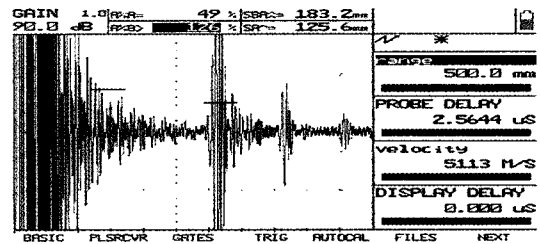
(b) Adhesive Signal

Fig. 8 Comparison of the Debonding Signal and the Adhesive Signal detected by the Manual Ultrasonic Test

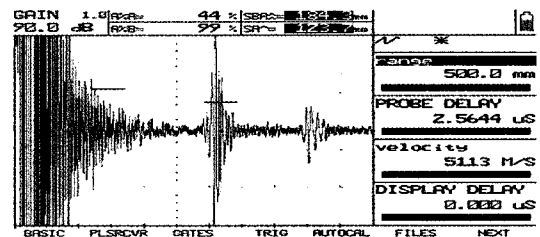
4.6 초음파 기준 감도 설정

초음파 시험은 계측된 초음파 신호만으로 결함을 판단할 수 없으므로 모의 결함 시편을 이용하여 기준이 되는 신호의 크기를 반드시 설정해야 한다. 탐촉자의 진동자 크기인 ϕ 25 mm의 절반에 위치하도록 모의결함시편 A형의 32x32 mm 결함 경계 면에 탐촉자를 위치시켰다. 탐촉자 진동자의 절반은 라이너/추진제 미접착 신호를 수신하고, 절반은 완전 접착 신호를 수신하게 되므로 초음파 신호는 등가 결함 ϕ 17 mm와 같아진다. 음압을 6 dB 높이면 초음파 신호는 등가 결함 ϕ 25 mm의 초음파 신호와 같아질 것이다. 결함 검출력을 높이기 위하여 기준 감도는 등가 결함 ϕ 17 mm로 설정하였다.

모의 결함 시편 B형에서 모의 결함 ϕ 17 mm를 기준 감도로 설정하였다. 모의 결함 시편 A형과 형상은 다르지만 결함의 면적이 같으므로 Fig. 9와 같이 초음파 신호는 같게 된다.



(a) Artificial Defect Block A



(b) Artificial Defect Block B

Fig. 9 Adjustment of the Standard Sensitivity about the Artificial Defect Block

4.7 미접착 결함의 길이 정량 측정

미접착 결함의 길이는 초음파시험에서 일반적으로 널리 사용하는 방법인 dB 드롭법을 이용하

여 정량적으로 측정하였다. 모의 결함 시편 A형은 10×10 mm 결함 두 개, 20×20 mm 결함 두 개, 32×32 mm 결함 두 개 및 50×50 mm 결함 한 개를 포함하고 있으며, dB 드롭법으로 결함 길이를 측정된 결과 ± 1 mm 내로 결함 길이를 측정할 수 있었다.

모의 결함 시편 B형은 $\phi 17$ mm, $\phi 20$ mm 및 $\phi 25$ mm 결함이 각각 한 개씩을 포함하고 있으며, dB 드롭법으로 결함 길이를 측정된 결과 ± 2 mm 내로 결함 길이를 측정할 수 있었다.

약간의 오차가 발생한 이유는 수동초음파시험으로 추진기관을 검사할 때 탐촉자의 접촉 상태, 접촉 매질 및 손 떨림 등의 영향과 추진기관의 곡률에 의한 기하학적 형상에 기인한 결과이다. 모의 결함 시편 A형의 측정 결과보다 모의 결함 시편 B형의 측정결과가 오차가 조금 크게 발생한 이유는 모의 결함 시편 A형의 결함이 dB 드롭법이 잘 적용되는 사각 결함이기 때문이다.

4.8 검출 가능한 최소 미접착 결함의 폭 예측

모의 결함 시편으로 기준 감도, 정량적인 결함 길이 측정 및 기준을 마련할 수 있지만 검출 가능한 라이너/추진제 미접착의 최소 폭을 측정하기는 어려운 문제점이 있다. 검출 가능한 라이너/추진제 미접착의 최소 폭을 측정하기 위해서 무수히 많은 모의 결함 시편을 제작하는 것은 시간 및 비용 면에서 추천할만하지 않다.

라이너/추진제 미접착 결함의 폭을 측정하기 위해 모의 결함 시편 A형의 모의 결함에 대하여 전산화 단층촬영을 실시하였다. 시험 방법은 검사 범위 지름 50 mm 이하이고 화소 크기가 50 μm 인 국소영역촬영방법을 채택하였다.

수동초음파시험은 모의 결함 시편 A형에 존재하는 10×10 mm 결함 두 개, 20×20 mm 결함 두 개, 32×32 mm 결함 두 개 및 50×50 mm 결함 한 개를 모두 검출하였으나, 전산화 단층촬영은 모의 결함 시편 A형에 존재하는 10×10 mm 결함 두 개, 20×20 mm 결함 두 개, 32×32 mm 결함 한 개만 검출하고 32×32 mm 결함 한 개

및 50×50 mm 결함 한 개는 검출하지 못하였다.

전산화단층촬영으로 모의 결함 시편 A형의 미접착 5개소를 검출하였으며 검출한 미접착 폭은 260 μm ~910 μm 로 측정되었다. 전산화 단층촬영의 화소 크기는 50 μm 이므로 전산화 단층촬영으로 검출되지 못한 미접착은 폭이 50 μm 보다 좁을 것으로 판단하였다.

Figure 10(a)는 20×20 mm 미접착 결함에 대한 전산화 단층촬영 영상으로 미접착 길이가 22.9 mm, 폭이 278 μm 로 측정되었다. Fig. 10(b)는 50×50 mm 미접착 결함에 대한 전산화 단층촬영 영상으로 초음파시험에서는 미접착 결함이 검출되었으나 전산화 단층촬영에서는 미접착 결함이 검출되지 않았다.

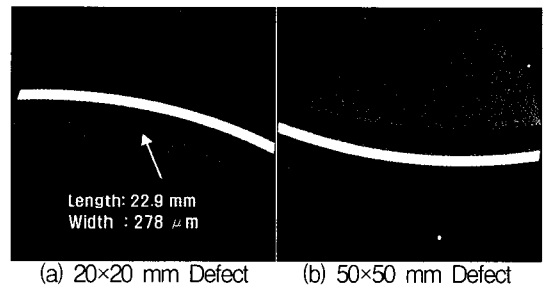


Fig. 10 Measurement of the Detectable Defect Size from the Computed Tomography Results

초음파시험으로 검출 가능한 최소 미접착의 폭은 모의 결함 시편을 제작하여 측정하기가 곤란할 뿐만 아니라, 결함 검출 능력이 우수한 전산화 단층촬영으로도 50 μm 보다 좁은 결함은 검출되지 않으므로 라이너/미접착/추진제의 삼중 매질에 대한 모델을 설정하여 이론적으로 계산하여 예측하였다.

Fig. 11은 에너지 보존의 법칙을 이용하여 삼중 매질에서 초음파의 반사율과 투과율을 나타낸 그래프로서, 라이너/추진제 미접착 결함이 1 μm 인 경우는 89.7%가 반사되고, 10 μm 인 경우는 99.9%가 반사될 것으로 예측되었다. 그러므로 최소한 10 μm 이상의 미접착 결함은 수동초음파시험에서 모두 검출 가능한 것으로 판단하였다.

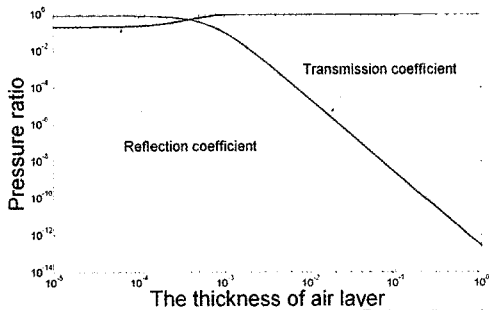


Fig 11. Expectation of Detectable Debonding Width between the Liner and Propellant

5. 결 론

미접착 검출을 위한 기존의 시험 기법인 반사 투과법과 공진 및 램파 특성을 이용한 새로운 시험 기법의 실험 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 모델링으로 라이너/추진제 미접착 신호는 완전 접착 신호보다 크게 측정되었으나, 초음파 신호의 차이가 크지 않아 기존의 반사 투과법으로는 결함을 효과적으로 검출하기 어려웠다.
- 2) 공진법으로 초음파 신호를 증폭하여 수동초음파 시험에 의한 라이너/추진제 미접착 검출 기법을 개발하였고, 램파 특성을 분석하여 초음파 신호의 불안정을 판단하는 기준으로 활용

하였다.

- 3) 모의 결함 시편을 이용하여 기준 감도 및 결합 길이를 정량적으로 측정하였다.
- 4) 라이너/추진제 미접착 결함의 검출 가능한 폭은 10 μm 이상으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. S. Hirsekorn, "Nonlinear Transfer of Ultrasound by Adhesive Joints - A Theoretical Description", *Ultrasonics*, Vol. 39, 2001, pp.57-68
2. A. N. Sinclair, M. Jastrzebski, V. Safavi-Ardebili, "Ultrasonic Evaluation of Weak Liner/Propellant Bonding in a Rocket Motor", University of Toronto, pp.1-9
3. S. C. Wooh, C. Wei, "A High-Fidelity Ultrasonic Pulse-echo Scheme for Detecting Delaminations in Composite Laminates", *Composites*", 1999, pp.433-441
4. 김영환외 6, "토출관 접합계면 평가를 위한 초음파 시험법 개발", *한국추진공학회지*, 제8권, 제2호, 2004, pp.46-53
5. O. Y. Kwon, S. H. Lee, "Acousto-Ultrasonic Evaluation of Adhesively Bonded CFRP-Aluminum Joints", *NDT&E International*, 1999, pp.153-160