

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 which using the ultrasonic wave is superior to the other testing methods about the economically detectable ability of the defects. But, the signal analysis of the ultrasonic wave takes too much time and effort that the time interval of the transmitted pulse and the received pulse is too short to be separated the reflected signals because the structure of the rocket motor is multi-layers. The ultrasonic testing of rocket motor have been only applied with automatic system about extremely limited area like the debond in adhesive interface between the motor case and insulator. In this study the new technique to detect the debond between the liner and the propellant using the property of the resonance and Lamb waves was described as comparing the existence ultrasonic testing.

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(비파괴시험), Manual Ultrasonic Test(수동초음파시험)

1. 서 론

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

추진기관은 연소관, 내열재 및 추진제와 같은

물질이 접촉되어 있는 구조며, 접촉부의 품질은 추진기관의 성능을 좌우하므로 접촉 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 저장중 노화로 인하여 라이너/추진제의 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 접촉 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 경계면에 수직으로 입사될 때 경계면에서 반사되는 성분과 투과되는 성분으로 나뉘어진다. 반사와 투과는 음향 임피던스에 따라 그 비율이 정해지므로 정확한 초음파 물성을 요구한다.

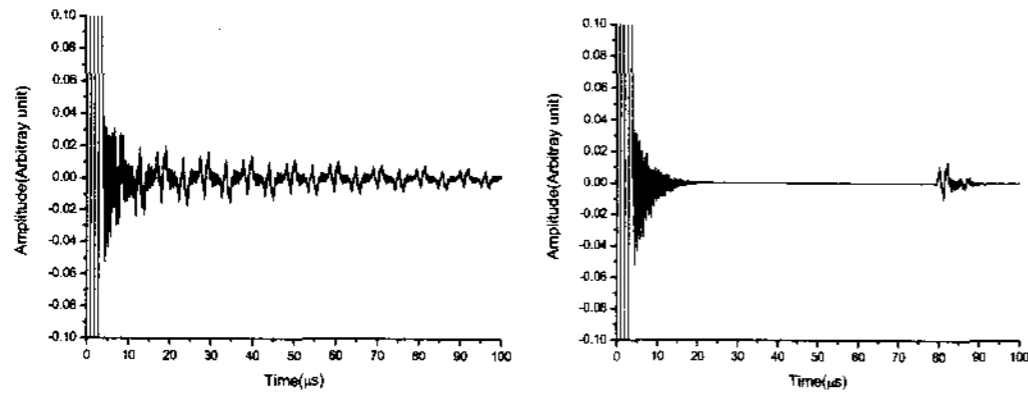
따라서 초음파 신호를 모델링하기 위해서는 각각의 물질에 대한 밀도, 초음파 속도 및 감쇠 계수와 같은 정확한 초음파 물성을 측정하는 것이 필수적이다. 추진기관에서 스틸 및 내열 고무는 독립적으로 분리하기가 곤란하여 스틸은 초음파 탐상용 A1형 표준 시험편을 이용하여 초음파 물성을 측정하였고, 내열 고무는 추진기관에서 일반적으로 사용하고 있는 EPDM 고무를 이용하여 측정하였다. 하지만 추진제는 추진기관에서 절삭하여 측정하였다.

2.2 초음파 신호의 모델링

추진기관의 초음파 신호의 반사·투과 거동은 접촉 매질/스틸/내열, 고무/라이너/추진제/공기의 다중 계면에서 복잡한 형식으로 발생될 것이다. 내열 고무와 추진제 계면 사이의 라이너는 초음파 특성이 고무와 같으므로 모델링에서는 내열 고무로 가정하였다. 초음파의 모델링은 라이너와 추진제의 접촉 계면에서 미접착이 발생한 경우와 완전 접촉된 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 신호이고, Fig. 1(b)는 라이너와 추진제가 완전 접촉된 경우를 모델링하여 이론적으로 예측한 초음파 신호이다.

라이너/추진제 미접착의 초음파 신호는 라이너/추진제 완전 접촉의 초음파 신호보다 크게 측정되었으나, 추진기관을 검사할 때 탐촉자의 접촉 상태, 접촉 매질 및 손 떨림 등의 영향으로



(a) Debinding signal (b) Adhesive signal

Fig 1. Modeling of ultrasonic signal

수동초음파시험은 불가능할 것으로 판단된다.

그러므로 라이너/추진제 미접착 결함을 수동 초음파시험으로 검출하기 위해 기존의 반사투과 법이 아닌 새로운 시험법의 개발이 요구되었다.

3. 실험 장치 및 모의 결함 시험편

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.

모의 결함 시험편은 A, B형 2조를 제작하였다. A형은 10 mm 결함 두 개, 20 mm 결함 두 개, 32 mm 결함 두 개 및 50 mm 결함 한 개를 포함하고 있으며, B형은 17 mm, 20 mm 및 25

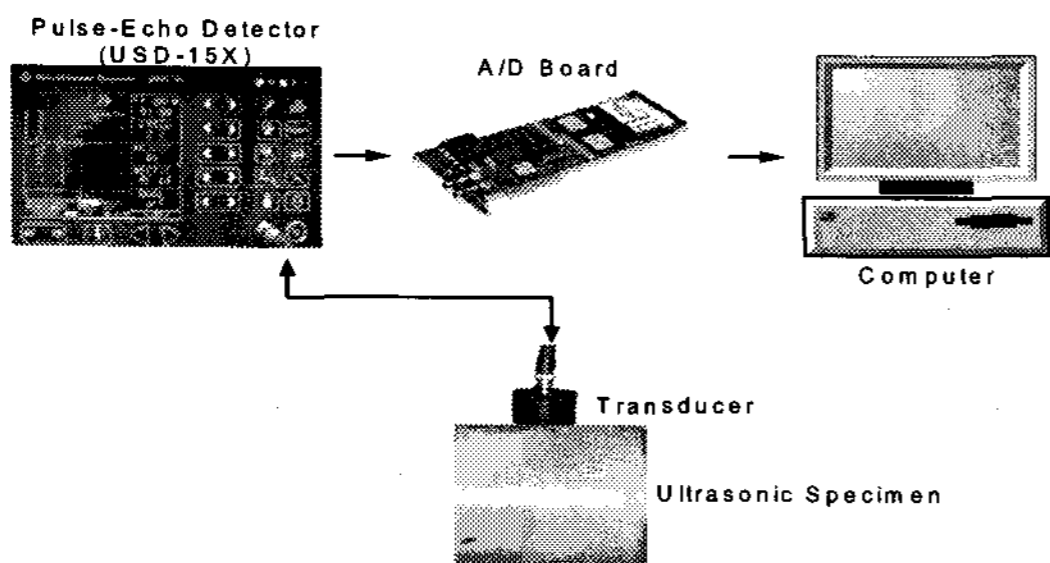


Fig. 2 Schematic drawing of experimental apparatus

mm 결함이 각각 한 개씩을 포함하고 있다. 이 두 시험편으로 초음파의 기준 감도를 설정하였고 결함의 길이를 정량적으로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 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 μs인 비교적 넓은 주파수 범위를 갖고 있는 광대역 탐촉자이므로 공진법을 적용하기 유리하였다.

라이너/추진제 미접착 결함이 존재하면 연소관과 내열 고무에서 동시에 공진이 발생되므로 초음파 신호가 증폭되어 기존의 초음파시험 기법인 펄스 에코 방식보다 결함 검출 능력이 월등하게 향상될 수 있다[4].

Figure 3은 모의 결함 시험편 A형의 라이너/추진제 미접착 결함에 대한 주파수 분석 결과이다.

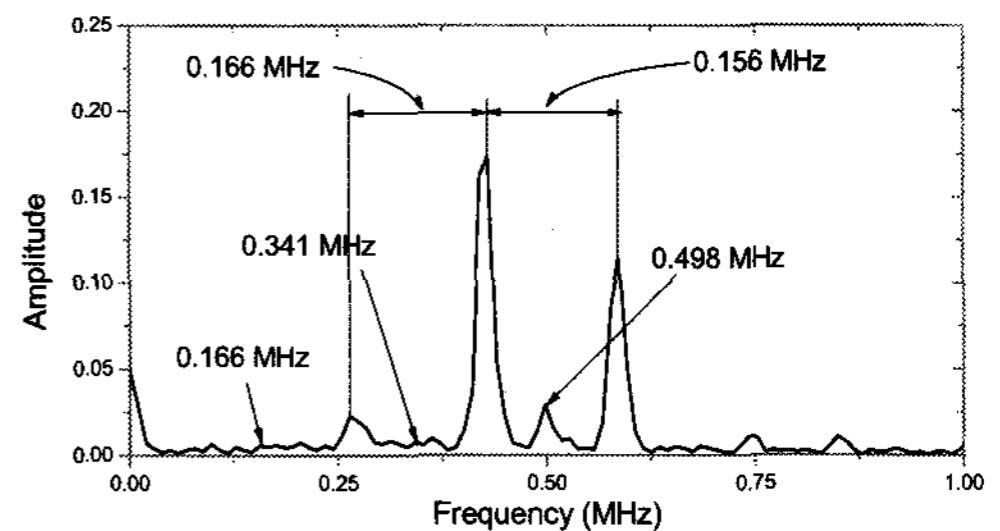


Fig. 3 Frequency spectrum of the rocket motor using the 0.45 MHz transducer

연소관과 내열 고무의 초음파 평균 속도는 2,035 m/s이고, 두께는 6 mm이므로 공진 주파수는 0.169 MHz의 정수 배임을 보여 주고 있다. 초음파 탐촉자의 파형 지속 시간이 3.91 μs인 반면에 연소관과 내열 고무의 초음파 왕복 시간이 5.89 μs이므로 송신 펄스와 반사파의 분리가 곤란하였으므로 가동 주파수를 높여 주파수의 차이를 이용하여 공진 주파수를 획득하였다.

4.2 추진기관의 램파 특성 분석

램파는 추진기관의 연소관과 같이 박판의 벽을 따라 전파하는 파로서, 전파 특성은 연소관의 두께와 시험 주파수에 의해 영향을 받는다. 램파의 속도는 연소관의 두께와 시험 주파수에 따라 변하므로 정확한 분산 선도를 구하여 각 모드별 분산 특성을 반드시 분석해야 한다.

Figure 4는 연소관에 대한 분산 선도이다. 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. 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.

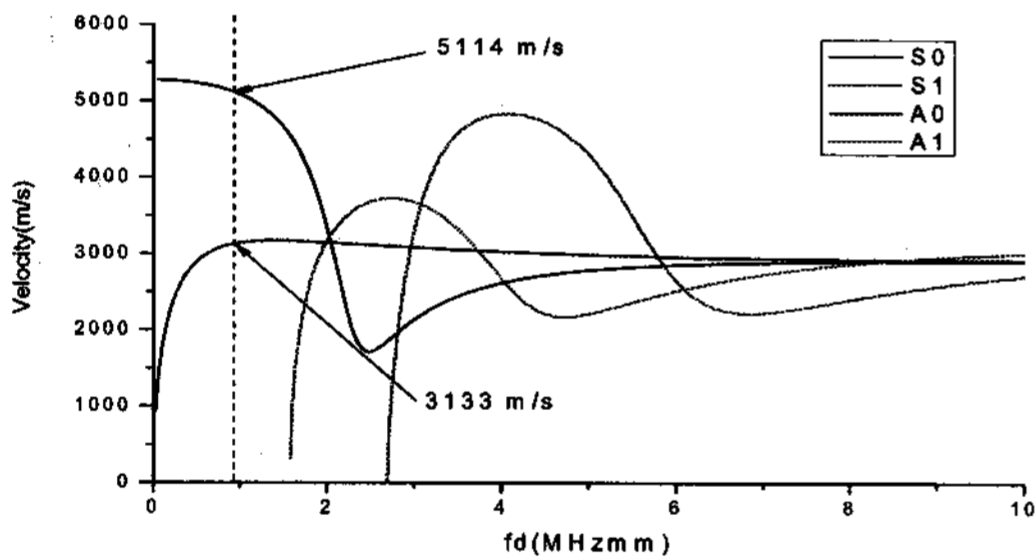


Fig. 4 Velocity of lamb waves in steel

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

4.3 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 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 발생되지 않을 것이다. Fig. 5는 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.

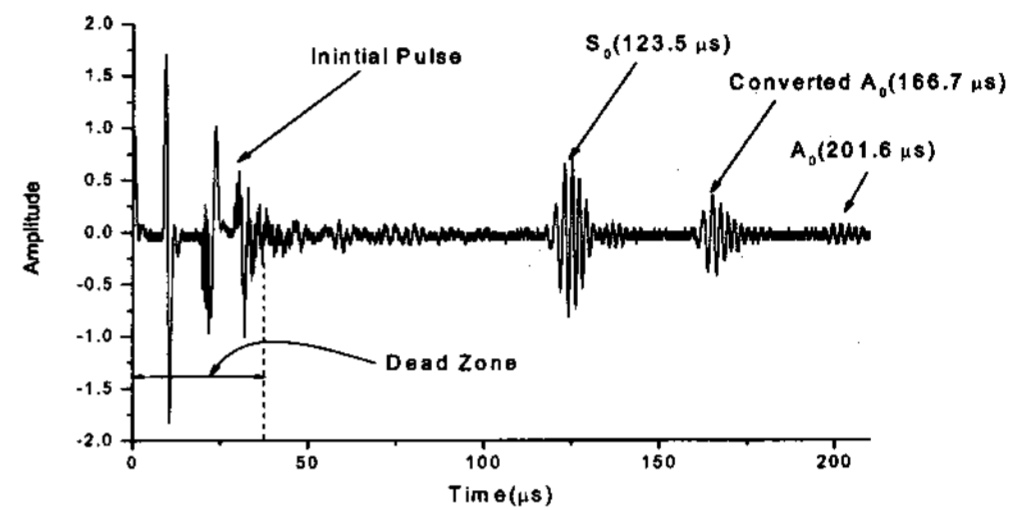


Fig. 5 Ultrasonic signal of rocket motor

4.4 미접착 및 완전 접착의 초음파 신호 분석

Figure 6은 미접착 및 완전 접착에 대한 초음파 신호를 비교한 것이다. 미접착의 초음파 신호는 완전 접착 신호와 비교하여 공진이 발생되므로 신호가 증폭되고 있으며, 공진 현상을 이용하면 자동화 치구 및 신호 안정화 치구 등이 없더라도 수동초음파시험이 가능하다고 판단된다.

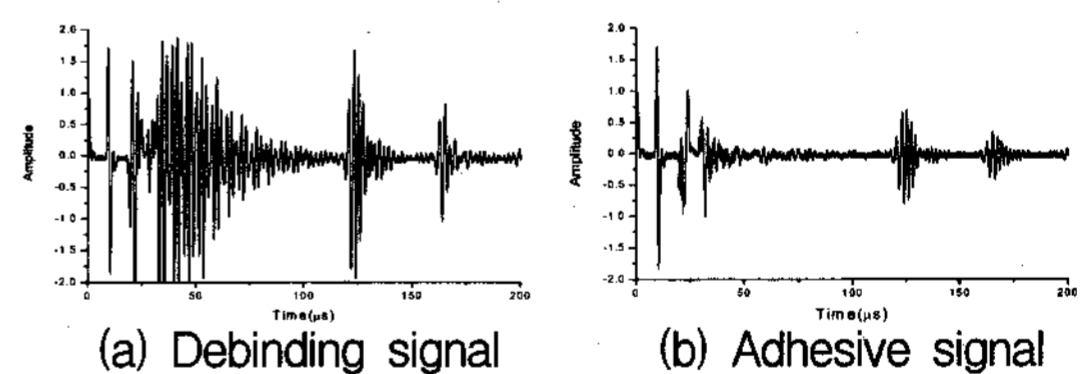


Fig. 6. Comparison of the debonding signal and the adhesive signal from the manual ultrasonic test

4.5 미접착 결함의 정량적 평가 분석

수동초음파시험의 기준 감도는 모의 결함 시편으로 설정하였으며, 결함의 길이는 dB 드롭법을 이용하여 정량적으로 측정하였다. A형 시편에는 결함이 7개 존재하였으며, 각 결함의 미접착 폭을 측정하기 위해 전산화 단층촬영을 실시하였다. 이 중 5개는 전산화 단층촬영으로 측정

할 수 있었으나, 2개는 측정할 수 없었다. 이는 미접착의 폭이 전산화 단층촬영 영상의 픽셀 사이즈 50 μm 보다 좁기 때문이다.

초음파시험으로 검출 가능한 미접착의 폭은, 모의 결함 시편을 제작하기가 곤란할 뿐만 아니라, 비교적 결함 검출 감도가 우수한 전산화 단층촬영으로도 검출이 되지 않으므로 이론적으로 계산하여 예측하였다.

Fig. 7은 에너지 보존의 법칙을 이용하여 삼중매질에서 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 수동초음파 시험에서 모두 검출 가능한 것으로 판단되었다.

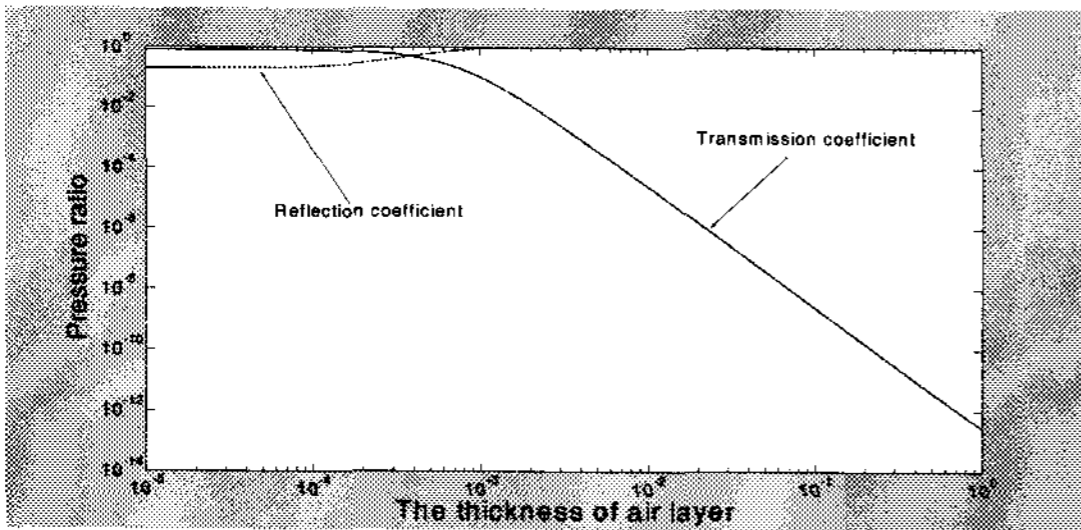


Fig 7. Expectation of detectable debonding width between the liner and propellant

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 활용하였다.
- 3) 모의 결함 시편을 이용하여 기준 감도 및 결함의 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. O. Y. Kwon, S. H. Lee, "Acousto-Ultrasonic Evaluation of Adhesively Bonded CFRP-Aluminum Joints", *NDT&E International*, 1999, pp.153-160