

# 초음파 다중 반사를 이용한 추진제/라이너 미접착 검출 기법 연구

나성엽\* 김동륜\* 류백능\*

## Inspection Technology of Detection of Propellant/Liner Debond Using Ultrasonic Multi-reflection

Sungyoub Na\* Dongryun Kim\* Baekneung Ryoo\*

### ABSTRACT

Ultrasonic inspection method is more profitable than X-ray radiographic inspection in cost and effect of defect detection such as debond, and it doesn't need special facilities. The method can also be a possible real time inspection with safety. This report explains the experiment and theoretical modeling analysis of the inspection methods of propellant/liner debond using ultrasonic multi-reflection in rocket motor. From the results, it is possible to detect the defect of propellant/liner debond and its signal is distinguishable with normal. And, it is approximately coincide with both experimental signal and modeling.

### 초 록

초음파를 이용한 로켓 모터의 비파괴검사는 X-ray 검사에 비하여 경제성이 우수하고, 미접착 등의 결함 검출이 우수한 편이다. 그리고 전용 시설 없이 현장에서 실시간으로 검사가 가능하며 방사선 작업에 비하여 안전한 방법이다. 본 논문에서는 초음파 다중반사에 의한 추진제/라이너 미접착 검출 기법에 대하여 실험 및 이론적 모델링으로 분석하였다. 실험 결과, 추진제/라이너 미접착의 신호가 정상 접착과 구별되는 뚜렷한 신호 차이를 보였으며, 실험에서 측정된 신호와 이론적 모델링 신호가 대체적으로 일치하였다.

Key Words: Ultrasonic Inspection(초음파검사), Rocket Motor(로켓 모터), Propellant(추진제), Non-destructive Test(비파괴검사), Debond(미접착)

### 1. 서 론

로켓 모터를 생산할 때 혹은 장기 저장 후 노화에 의하여 추진제 크랙, 추진제/라이너 미접착 등 로켓 모터의 성능에 영향을 미치는 결함이

\* 국방과학연구소, 기-4-6  
연락처, E-mail: 5855078@hanafos.com

발생될 수 있다. 따라서 이를 효과적으로 검출할 수 있는 방법이 필요하다.

방사선 투과 검사법은 비파괴검사의 전통적 방법으로서 추진기관의 검사에 많이 이용되어 왔다. 그러나 방사선 투과 검사법은 시험 소요 비용 및 전용 시설의 투자비가 과다하고 또한 검사하기 위해서는 추진기관을 전용 시설로 운반해야 하는 불편함이 있다. 또한 일부 결함들 즉, 접착 계면에서의 미접착, 미세 크랙 등에 대한 검출력이 다소 취약한 점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 대체 검사법으로 초음파 검사법이 1990년대 이후 활발하게 연구되어 왔으며, 최근에는 그 방법이 점차 정립되고 있으나 아직 국내에선 미개척 분야이다[1-6].

본 논문에서는 초음파를 이용하여 로켓 모터의 추진제/라이너 미접착에 대한 검출 방법에 대하여 이론적 모델링 및 실험 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

초음파는 음향 임피던스가 다른 두 매질의 경계면에서 반사와 투과 또는 굴절을 일으키며, 음향 임피던스( $Z$ )는 매질의 밀도( $\rho$ )와 음속( $V$ )을 곱한 값으로 물질에 따라 고유한 값을 가진다. 매질에 초음파가 수직으로 입사되면 반사와 투과가 주로 일어난다. 이때 음압 강도의 반사율( $R$ )과 투과율( $T$ )은 식 (1), (2)와 같다.

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \quad (1)$$

$$T = 1 - R = 2Z_1 / (Z_1 + Z_2) \quad (2)$$

여기서,  $Z_1$  : 매질 1에서의 음향 임피던스

$Z_2$  : 매질 2에서의 음향 임피던스

두 매질의 경계면에서 미접착이 발생된 경우 계면에는 공기층이 있다고 간주되기 때문에 매질 2를 공기층으로 두고 음향 임피던스를 적용하여 반사율 식을 계산하면 된다[7].

이와 같이 초음파의 반사와 투과는 두 매질의 음향 임피던스에 관계하기 때문에, 매질의 불연속부(계면 또는 결함부)에서 반사 및 투과되는 음압

강도의 양( $P$ )을 측정하여 접착 계면 또는 내부 상태를 판단한다.

로켓 모터의 경우 Fig. 1과 같이 다중 계면으로 이루어져 있으며, 이때 각 층에서 반사 및 투과가 일어나고 경로에 따라 반사되어 탐촉자에 전달되는 음압은 매우 복잡한 값을 가지게 된다.

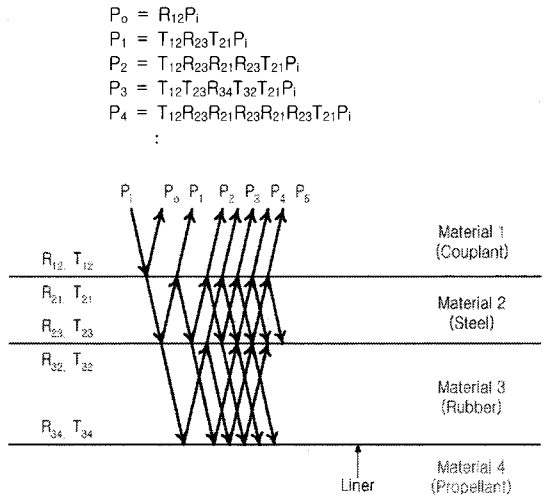


Fig. 1 Ultrasonic reflection and transmission at boundary of materials in rocket motor

따라서 각 매질에서의 반사 및 투과되는 신호의 시간 지연을 고려하여 수신되는 신호를 적분하여 나타내면 식 (3), (4), (5)와 같다[8].

$$h(t) = R_{12} \delta(t - t_0) + \sum_{k=1}^{\infty} T_{12} T_{21} R_{21}^{k-1} R_{23}^k \delta(t - t_k) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} T_{12} T_{21} T_{23} T_{32} R_{32}^i R_{34}^{j-1} R_{34}^j R_{21}^{i-1} R_{23}^j \delta(t - t_i - t_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} T_{12} T_{21} T_{23} T_{32} T_{34} T_{43} R_{43}^l R_{34}^{m-1} R_{34}^m R_{21}^{l-1} R_{23}^m R_{21}^{l-1} R_{23}^m \delta(t - t_l - t_m - t_n) \quad (3)$$

$$t_{k,i} = t_0 + 2(k,i)d/c_1, \quad t_{j,m} = t_0 + 2(j,m)d/c_2, \quad t_n = t_0 + 2nd/c_1 \quad (4)$$

$$g(t) = \int h(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (5)$$

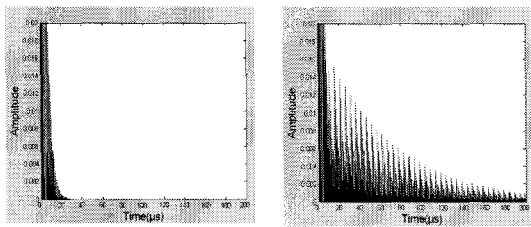
여기서,  $h(t)$  : 각 매질 층에서 반사 및 투과되는 음압의 시간 지연을 고려한 시스템 응답 함수

$d$  : 각 매질의 두께

$C_i$  : 각 매질에서의 음속

- $\delta(t-t_i)$  : Kronecker delta 함수
- $f(t)$  : 각 시간 대역 입력 신호 함수
- $g(t)$  : 신호의 컨볼루션(convolution) 적분

그러므로 추진제/라이너 계면에서의 정상 접착과 미접착에 대하여 적용되는 반사율 및 투과율 공식 (3), (4), (5)에 대입하여 Full mode로 신호 모델링을 하면 Fig. 2와 같이 예측된다. 정상 접착은 시간이 증가됨에 따라 신호가 급격하게 소멸 감쇠되는 형태이다. 반면에 미접착은 정상 접착에 비하여 상당히 증폭된 소멸 감쇠 펄스이다. 따라서 정상 접착과 미접착의 신호 판별이 가능하다.



(a) Bonding (b) Debonding

Fig. 2 Ultrasonic modeling signals of the bonding and debonding parts of solid propellant rocket motor(at Full mode)

### 3. 실험

#### 3.1 모의 결합 시편 제작

로켓 모터의 추진제/라이너 미접착 결함을 모사하기 위하여 Fig. 2와 같은 모의 결합 시편을 설계 및 제작하였다. 외경이 202 mm인 로켓 모터를 절단하여 내부 추진제를 제거하였으며, 라이너 표면에 10x10 mm, 20x20 mm, 30x30 mm, 50x50 mm 크기의 테프론 1장과 20x70 mm, 30x70 mm 크기의 필름 2장을 부착한 후 추진제로 재충전하여 제작하였다. 연소관(steel) 두께는 2.0 mm, 내열 고무 두께는 3.0 mm, 추진제 웹 두께는 65 mm이고, 내열 고무와 추진제 사이에는 라이너가 얇게 도포되어 있다. 시편에 사용된 추진제는 HTPB(Hydroxyl-Terminated Polybutadiene)계 추진제이다.

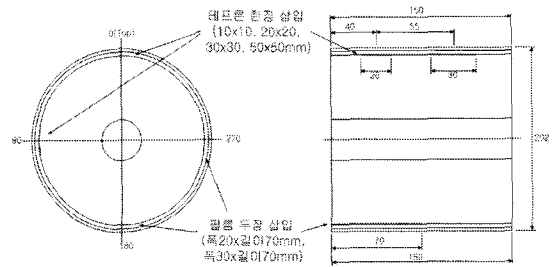


Fig. 3 Test specimen for propellant/liner debond

#### 3.2 추진제 미접착 검출 실험

추진제/라이너 미접착 검출에 대한 실험은 모의 결합 시편의 연소관 쪽(외측)에서 수직 탐상하였다. 사용된 초음파 장비는 Krautkramer Baronson의 USD15이며, 탐촉자는 감쇠 특성이 심한 곳에서 비교적 침투성과 검사 효율성이 좋은 저주파수대의 0.5MHz, 1.0" 접촉식 탐촉자를 사용하였다. 탐촉자로 모의 결합 시편의 미접착 모사 부위와 정상 접착 부위를 탐상하여 검출되는 신호를 비교 분석하였다.

### 4. 결과 및 분석

#### 4.1 초음파 신호 특성

저주파수대의 0.5 MHz 탐촉자를 사용하였으며, 실험 결과 Fig. 4와 같은 정상 접착과 미접착 부위에서 검출되는 초음파 신호를 얻었다. 신호의 형태는 RF(Radio Frequency) mode이다. 정상 접착 상태에서는 Fig. 4 (a)와 같이 시간 축으로 급격하게 수렴하는 소멸 감쇠 진동 형태이다. 테프론 1장을 삽입한 부위에서는 Fig. 4 (b)와 같이 정상 부위와 크게 다르지 않았다. 이는 라이너와 테프론, 추진제 사이에 미접착으로 인식할 만한 충분한 갭이 형성되지 않고 완전 밀착되어 초음파 신호상 접착 부위로 인식되었기 때문으로 판단된다. 반면 필름 2장을 삽입한 부위에서는 추진제/라이너 미접착 부위에서의 신호는 Fig. 4 (c)와 같이 전체적인 신호 강도가 평균 3~4배 정도 높은 값을 가지며 점진적으로 감쇠되는 소멸 진동 형태이다. 따라서 미

접착 부위로 명확하게 인식할 수 있는 신호 차이를 나타내었다. 추진제 재충전 시 실제로 추진제/라이너 미접착이 발생된 부위가 있었는데 이 부위에 대하여 탐상한 신호는 Fig. 4 (d)와 같다. 마찬가지로 정상 접착 부위에 비하여 증폭된 소멸 감쇠 진동 형태이나, 필름 2장을 삽입한 부위의 신호에 비하면 약간 낮은 값을 가진다. 이는 실제 미접착 부위를 절개하여 확인한 결과 표면이 다소 거칠었는데 이로 인하여 신호의 일부가 산란이 되어 신호 값이 감소된 것으로 판단된다.

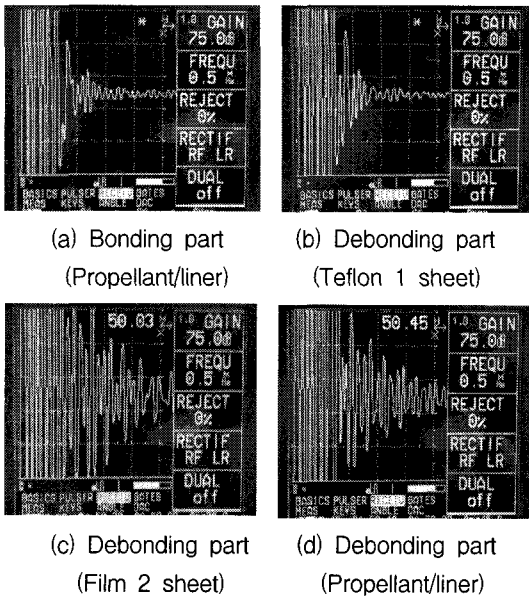


Fig. 4 Ultrasonic signals of the bonding and debonding parts of solid propellant rocket motor(at RF mode)

식 (1)에 의하면 추진제/라이너 정상 접착 표면에서의 반사율( $R_3$ )은 0.292이고, 추진제/라이너 미접착면에서의 반사율( $R_4$ )는 0.999이다. 여기서 추진제 밀도는  $1.715 \text{ g/cm}^3$ , 초음파 속도는  $1840 \text{ m/sec}$ , 라이너 또는 내열 고무의 밀도는  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , 초음파 속도는  $1574 \text{ m/sec}$ , 공기의 밀도는  $0.001 \text{ g/cm}^3$ , 초음파 속도는  $330 \text{ m/sec}$ 를 적용하였다. 따라서 반사율의 차이로 볼 때 정상 접착과 미접착의 신호 차이는 3.4배로 예측되었

으며, 실제 신호에서도 그와 유사한 형태를 지시하였다. 따라서 추진제/라이너 미접착 계면에 대한 검사가 가능함을 알 수 있었다.

#### 4.2 초음파 신호 모델링

정상 접착 부위 및 추진제/라이너 미접착 부위에 대하여 식 (3), (4), (5)에 Table 1의 수치를 적용하여 이론적으로 모델링한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 미접착 부위는 정상 접착 부위에 비하여 3~4배 정도 높은 소멸 감쇠 진동 형태인데 이는 실험에서 검출된 신호와 거의 유사하다. 따라서 이론적 모델링 신호와 실험 신호가 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 1. Ultrasonic characteristics of several materials of rocket motor

재질	밀도 ( $\text{g/cm}^3$ )	초음파 속도 (m/s)	음향 임피던스 ( $\times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ )
글리세린	1.26	1,920	2.419
스틸	7.80	5,830	45.474
고무	1.10	1,574	1.731
추진제	1.715	1,840	3.156
Air	0.0012	330	0.0004

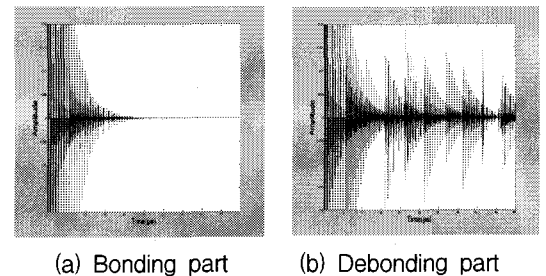


Fig. 5 Ultrasonic modeling signals of the bonding and debonding parts of solid propellant rocket motor(at RF mode)

## 5. 결 론

추진제/라이너 미접착 검출을 위하여 모의 결합 시편을 외측(연소관쪽) 검사로 실험한 결과, 테프론 1장을 삽입한 곳에서는 미접착이 충분히

모사되지 못하여 검출이 불가능하였고, 필름 2장을 삽입한 곳에서는 미접착이 충분히 모사되어 양호한 검출 신호를 나타내었다. 추진제 재 충전시 자연 발생한 추진제/라이너 미접착 부위에서도 미접착 계면의 거칠기로 인하여 약간의 신호감소는 보였지만 검출 가능하였다. 또한 이론적 미접착 모델링 신호와 실험 신호를 비교한 결과, 실험 신호와 모델링 신호가 대체적으로 일치하였다.

그리고, 큰 감쇠 특성을 고려한 추진제/라이너 미접착의 초음파 검사에서는 투과성과 신호 검출이 다소 우세한 0.5 MHz 이하의 저주파수 탐촉자를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단되었다.

#### 참 고 문 헌

1. W. N. Cobb, "Ultrasonic Characterization of Propellant Aging", Univ. of Denver, JANNAF NDES Conference, Utah, 1999. 11, pp.1~11
2. L. J. Bond, "Inspection of Solid Rocket Motors and Munitions Using Ultrasonics", JANNAF Propulsion Meeting, Pacific Northwest National Laboratory, Richland WA, 2001, pp.451~456
3. W. N. Cobb and J. J. Jonson, "Ultrasonic Inspection of Rocket Motor Grains During Extrusion", Univ. of Denver and NSWC, 2000, pp.1~12
4. Samuel W. Jang, "NDE Techniques are Essential to an Aging Program", AIAA 88-3355, AIAA/ASME/SAE/ASEE 24th Joint Propulsion Conference, 1988
5. A. N. Sinclair, M. Jastrzebski, V. Safavi-Ardebili, "Ultrasonic Evaluation of Weak Liner/Propellant Bonding in a Rocket Motor", DMIE & Univ. of Toronto, 2004
6. L. H. Pearson, and etc, "The Role of NDE in Service Life Prediction of Solid Rocket Propellant", Thiokol Corp., AGARD PEP Symposium, 1996, pp.1~10
7. 이용, "비파괴검사의 기초 : 제4권 초음파 탐상 검사", 세진사, 1995, pp.22~37, pp.103~110
8. 송성진 외 3명, "연소관 조립체의 비파괴시험 조건 설정 시험", 국방과학연구소, 2002, pp.8~19
9. 나성엽 외 3명, "관형 복합재료의 충격 손상에 대한 비파괴시험적 고찰", 한국추진공학회지, 2001, pp.20~30