

다중 접착계면의 초음파 전달 모델 연구

임수용*† · 김동륜*

A Study on Ultrasonic Wave Propagation Model in Multi-Layer Media

Sooyong Lim*† · Dongryun Kim*

ABSTRACT

This research simulates the ultrasonic wave propagation in multi-layered media using generalized formular of system response function. We made the artificial defect specimen of a rocket motor and compared with experimental wave forms. The simulation results are coincided with mesuared waves and we found that the pulse echo method is able to detect disbond at liner-propellant interface.

초 록

본 연구는 다중 접착계면에서의 초음파 전달 현상을 시스템 응답함수의 일반식을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 추진기관의 모의결합시편을 제작하여 모델링의 결과를 검증하였다. 실험 결과 추진제-라이너 미접착 결함을 초음파 펄스 반사법으로 검출할 수 있었으며, 시뮬레이션 결과와 측정된 초음파 파형이 잘 일치함을 알 수 있었다.

Key Words: Rocket Motor(로켓 모터), Ultrasonic Inspection(초음파 검사), Multi-layer Media(다중 접착계면), System Response Function(시스템 응답 함수), Propellant(추진제)

1. 서 론

추진기관의 품질 보증을 위해 가장 많이 사용하는 비파괴시험 방법은 방사선 투과 시험법이다. 방사선 투과 시험법은 X-ray 발생 장치에서 방출된 X선이 검사물을 투과하면서 감쇄된 X선 강도(Intensity)의 변화를 필름이나 검출기들을

사용하여 검사물의 내부의 상태나 결함의 존재를 판단하는 시험 방법으로써 결함을 가시화하여 확인할 수 있기 때문에 결과의 해석이 용이하여 다른 검사 기법에 비하여 신뢰성이 높은 검사 방법이다. 그러나 방사선을 사용하기에 위해서는 방사선 차폐 시설과 방사선을 발생시키기 위한 고가의 검사 장비들이 소요되어 큰 검사 비용이 필요하며 치명 결함인 미접착이나 균열 등과 같은 면적형 결함에 대해서는 상대적으로 결함 검출 능력이 낮아서 방사선 투과 시험

* 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: 77sooyong@daum.net

을 보완할 수 있는 검사 방법이 필요하다. 이를 위한 유력한 대안인 초음파 탐상 시험의 경우 일반적으로 방사선 투과 시험법에서 검출하기 어려운 면적형 결함을 쉽게 검출할 수 있는 장점이 있으나, 추진기관에서는 통상의 초음파 시험 기법으로 좋은 결과를 얻지 못하였었다. 이것은 추진기관이 다중 접착계면들로 구성된 대상물으로써, 초음파가 추진기관에 입사되어 초음파가 검사물 내부로 진행하면서 추진기관의 모든 접착계면들에서 반사와 투과 현상이 반복되며 많은 반사파들이 발생하여 복잡한 초음파 신호를 형성하게 된다.

이러한 다중 접착계면에서의 초음파의 전달 현상에 대한 연구는 Hajian et al.과 Chern et al. 등이 각기 독자적으로 연구를 수행하여 이항계수를 사용하여 시스템 응답 함수를 계산하는 유사한 일반식을 도출하였다.[1-3]

본 연구에서는 Chern et al.의 시스템 응답 함수 일반식을 사용한 추진기관 추진기관에 대한 초음파 펄스 반사법의 신호를 시뮬레이션을 수행하였고 실험을 통해 모델링 결과와 계측된 신호를 비교하여 시스템 응답 함수 일반식을 검증하고자 하였다.

2. 초음파 전달 모델

2.1 매질 경계면에서의 초음파 투과 및 반사

초음파가 추진기관에 입사하게 되면 초음파는 물질의 내부를 압력파의 형태로 진행하게 되는데 이종재료의 경우, 경계면에서 두 재료의 음향 임피던스의 차이 및 진행파의 종류에 의하여 다양한 형태의 전파 특성을 나타내게 된다. Fig. 1에는 경계면에서 발생하는 초음파의 반사와 투과현상을 도시하였다. 초음파가 경계면에 수직으로 입사할 때 초음파는 경계면에서 반사하는 성분과 통과하는 성분으로 나누어지는데 이는 음향 임피던스에 따라 그 비율이 정해진다. Fig. 1과 같이 제 1 매질에서 제 2 매질의 경계면으로 음파가 수직으로 입사될 때 입사되는 음의 크기를 P_i , 경계면에서 반사되는 음압을 P_r , 매질 2로

통과된 통과파의 음압을 P_t 로 표시하면 Eq. 1과 Eq. 2와 같이 간단한 식에 의해 투과계수 T_{12} ,

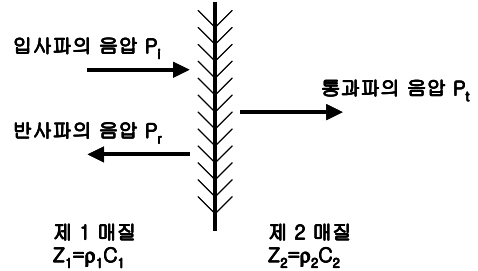


Fig. 1 Reflection and Transmission of a Plane Wave at the Plane Interface

반사계수 R_{12} 을 구할 수 있다.

$$R_{12} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$T_{12} = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

여기서 Z 는 음향임피던스로서 $Z = \rho C$ 이다.

2.2 추진기관에서의 초음파 전달

추진기관은 연소관과 내열고무(EPDM), 라이너(Liner)와 추진제로 구성된 4중 접착구조로 제작되어 있고, 초음파의 전달 과정을 분석하면 접촉

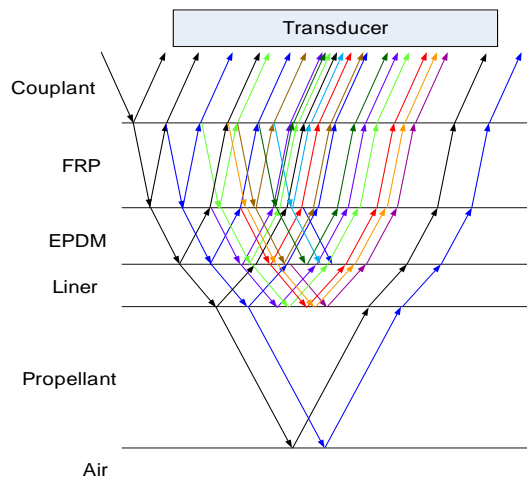


Fig. 2 System Response in a Four-Layered Object

매질, 연소관, 내열고무, 라이너, 추진제, 공기층으로 구성되어 있다.

다중 접착계면에서 초음파는 각각의 경계면에서 반사파와 투과파로 나누어지며 각각의 반사파는 진행 방향에서 만나는 모든 경계면에서 연속적으로 반사파와 투과파로 분리되어 Fig. 2와 같이 매우 복잡한 초음파 신호를 형성하게 된다.

초음파가 n개의 층으로 구성되어 있는 검사물에 수직으로 입사할 경우의 초음파 전달 현상을 Fig. 3에 도시하였다. 여기서 i번째 층에서의 물성은 아래 첨자 i로 나타내었고, d는 층의 두께, n는 초음파 감쇄계수, Z는 임피던스를 의미한다. 초음파가 단일 물질로 구성된 단일 검사물에 입사했을 경우, 검사물의 내부에서 n번의 반사 후 측정되는 신호의 시간은 Eq. 3과 같이 된다.

$$t_{(n)} = n t_1 \quad (3)$$

여기서 $t_1 = 2d_1/v_1$, v_1 은 제 1층에서의 초음파 속도이다.

구조물 내부에서 n번 반사된 후에 측정된 t_n 의 초음파의 진폭은 Eq. 4으로부터 구할 수 있다.

$$A_n = A_0 T_{10} R_{10}^{n-1} R_{12}^n e^{-2nd_1\alpha_1} \quad (4)$$

여기서 A_0 는 초기 펄스의 진폭이고 T_{10} 는 제 1층에서 탐촉자로 투과되는 신호를 나타낸다.

그러나 추진기관에서와 같이 접착계면의 수가 증가하면 초음파 반사법에 의하여 측정되는 신호는 각 층 내부에서 반사된 신호와 층과 층 사이를 연속적으로 투과와 반사를 반복하면서 발생된 신호들이 혼재하게 된다. Fig. 4에는 구조물이 2개 층으로 구성되어 있고 초음파가 제 1층에서 3번, 제 2층에서 2번 반사되는 신호의 모든 경로를 도시하였다. Fig. 4에서 왼쪽은 제 1층과 2층의 계면을 1회 통과할 때의 경우들이며 오른쪽은 제 1층과 2층의 계면을 2회 통과하는 경우를 나타냈는데, Fig. 4에 표시된 경로들은 모두 같은 시간 지연 현상을 겪게 됨으로 6개의 신호는 초음파 신호가 측정될 때 동시에 도착하게 되어 초음파 진폭의 세기를 증가시키게 된다.

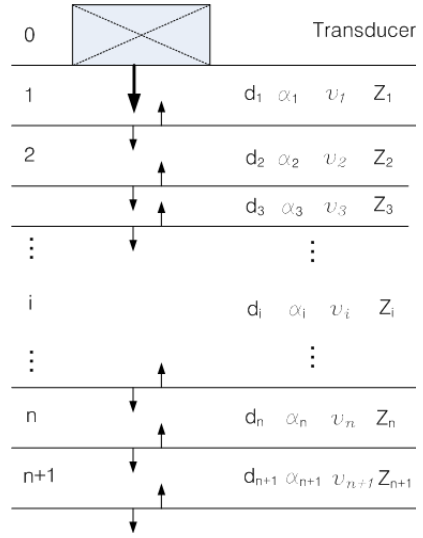


Fig. 3 n-Layered Structure

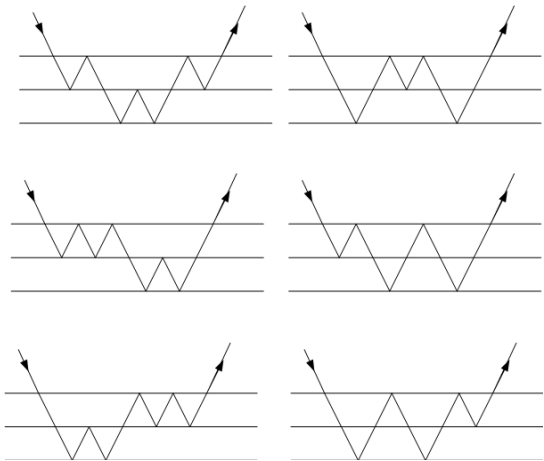


Fig. 4 Example of Different Wave Passage with the same Path Length and Arrival Time

이와 같은 방법으로 n개의 층으로 구성된 구조물에 대하여 확장하면, $k_1, k_2, \dots, k_i, k_{i+1}, \dots, k_n$ 을 각각의 층에서 발생한 반사파의 횟수라 하고 j는 계면을 통과한 횟수라고 할 때, 같은 시간 지연 경로를 갖는 경우의 수를 구하는 일반식은 Eq. 5로부터 구할 수 있다.

$$N = \prod_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{\min(k_i, k_{i+1})} \binom{k_i}{j} \binom{k_{i+1}-1}{j-1} \quad (5)$$

여기서 m 은 k_i 가 0이 아닌 마지막 층의 번호이고, j 는 k_i 와 k_{i+1} 중 작은 반사회수의 값이며,

$$\binom{k_i}{j} = \frac{k_i!}{j!(k_i-j)!} \text{이다.}$$

이 식을 사용하여 펄스 반사법(Pulse Echo Method)에서의 반사 신호에 대한 시간 지연과 초음파 진폭에 대한 일반식은 Eq. 6과 Eq. 7로 구할 수 있다고 보고되었다.

$$t_{(k_1, k_2, \dots, k_n)} = \sum_{i=1}^n k_i t_i \quad (6)$$

$$A_{(k_1, k_2, \dots, k_n)} = A_0 T_{10} R_{10}^{k_1-1} R_{m, m+1}^{k_n} \exp\left(-2 \sum_{i=1}^n k_i d_i \alpha_i\right) \\ \times \prod_{i=1}^{m-1} R_{i, i+1}^{k_i+k_{i+1}} \sum_{j=1}^{\min(k_i, k_{i+1})} \left[(-1)^{(k_{i+1}-j)} \times \binom{k_i}{j} \binom{k_{i+1}-1}{j-1} \left(\frac{1-R_{i, i+1}^{2j}}{R_{i, i+1}^{2j}}\right)^i\right] \quad (7)$$

$h(t)$ 를 시스템 응답함수라 하고 $\delta(t)$ 를 Kronecker Delta라고 하면 시스템 응답함수는 Eq. 8로 기술된다.

$$h(t) = R_{01} \delta(t-t_0) + \sum_{i=1}^n A_i \delta(t-t_i) \quad (8)$$

여기서 R_{01} 은 표면에서의 반사계수이고 t_i 는 i 번째 층에서의 초음파 전파 시간이다.

잘 알려진 것과 같이 선형 시스템에서는 시스템 응답함수 $h(t)$ 와 초기 입력 함수 $f(t)$ 에 대하여 콘볼루션(Convolution) 적분을 수행하면 출력 함수를 구할 수 있는데 이것은 Eq. 9로 표현된다.

$$y(t) = \int h(t)f(t-\tau)d\tau \quad (9)$$

2.3 모델링 결과

본 연구에서는 FRP, EPDM, 라이너, 추진제로 구성으로 된 추진기관에 대하여 초음파 신호 모델링을 하였다. 신호를 모델링하기 위하여 Eq. 6, 7, 8을 Wolfram Mathematica 7.0(Wolfram Research, Inc.)을 사용하여 시스템 응답함수를 계산하였다. 한편 시스템 응답함수의 계산에 필

Table 1. Physical Properties of Materials

	두께 (mm)	속도 (m/s)	음향 임피던스 (kg/m ² s)	감쇠계수 (dB/mm)
Couplant	-	1,920	2,419x10 ⁶	
FRP	18	2,700	4,050x10 ⁶	0.8104
EPDM	2	1,536	1,689x10 ⁶	0.2519
Liner	1	1,476	1,800x10 ⁶	0.3127
Propellant	60	1,793	3,137x10 ⁶	0.1370
Air	-	331	3.9x10 ⁶	

요한 추진기관의 소재들에 대한 물성치는 실험을 통해 측정된 값을 사용하였는데, 초음파 속도와 초음파 감쇠계수는 수동 초음파 탐상기(USD-15, KraftKramer Co.)와 0.5Mhz, 34mm 직경의 저주파수 탐촉자(K0.5-S, General Electric Co.) 탐촉자를 사용하여 FRP와 EPDM, Liner, 추진제 시편에 대하여 측정하였다. 재료들의 초음파 감쇠계수의 측정 방법은 ASTM E 664에 따라 실시하였고, Table 1에는 추진기관에 사용된 재료들의 물성치를 정리하였다. 추진제-라이너 접촉면이 정상인 경우와 미접촉이 존재하는 경우에 대하여 추진기관의 물성치를 사용하여 계산한 시스템 응답 함수를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다.

초음파 출력 신호를 모사하기 위하여 입력함수는 탐촉자에서 발생하는 실제 파형을 측정하여 사용하였는데 Fig. 7에는 0.5MHz 탐촉자의 측정된 파형을 나타내었다. 추진기관의 초음파 펄스 반사법에 대한 시스템 응답 함수와 입력 함수를 사용하여 추진제-라이너 미접촉이 없는 경우와 결함이 존재하는 경우에 대한 초음파 출력 신호의 시뮬레이션 결과를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

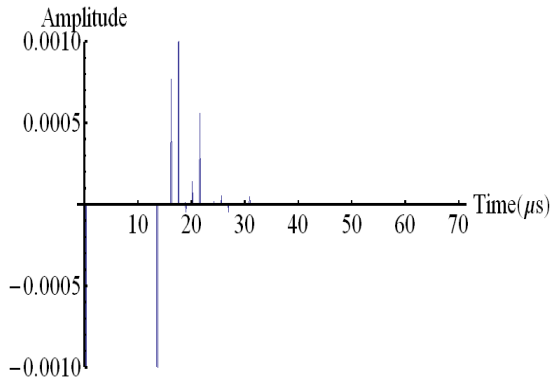


Fig. 5 System Response of Normal Bond at Liner-Propellant Interface

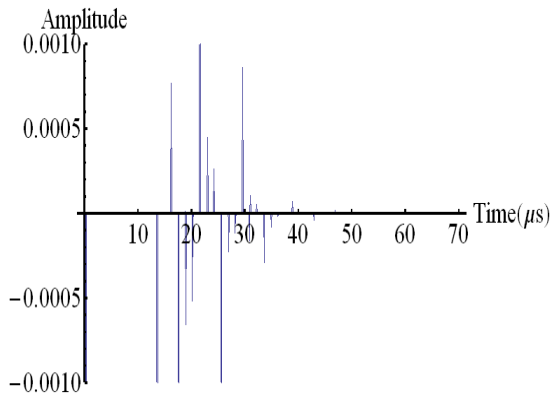


Fig. 6 System Response of Disbond at Liner-Propellant Interface

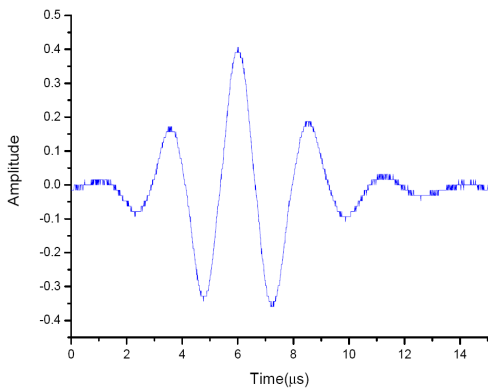


Fig. 7 Measure Wave Form of the 0.5MHz Transducer

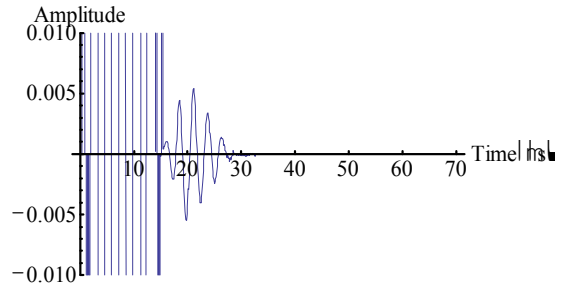


Fig. 8 Simulation Result of Normal Bond

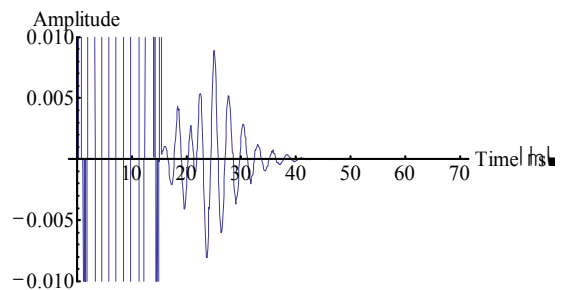


Fig. 9 Simulation Result of Disbond at Liner-Propellant Interface

3. 실험

추진기관을 모사하기 위하여 모의 결합 시편을 Fig. 10과 같이 설계 제작하였는데, 모의 결합 시편은 추진기관의 제작에 사용되는 동일한 소재와 공법으로 FRP와 EPDM을 제작한 후, 라이너와 추진제를 충전하는 방법으로 제작하였다. 모의 결합 시편은 테프론(Teflon) 시트를 삽입하여 추진제-라이너 미접착 결합을 모사하였다. 모의 결합 시편은 안전과 추진제 보존을 위해 라이너를 도포하여 추진제의 외부를 밀봉하였다. 초음파 시험은 초음파 물성 측정에 사용하였던 수동형 초음파 탐상기와 탐촉자를 사용하여 측정하였고, 일반적으로 초음파 시험에서 많이 사용되고 있는 접촉매질(Ultragel II, Sonotech, Inc.)을 사용하여 실험을 수행하였다.

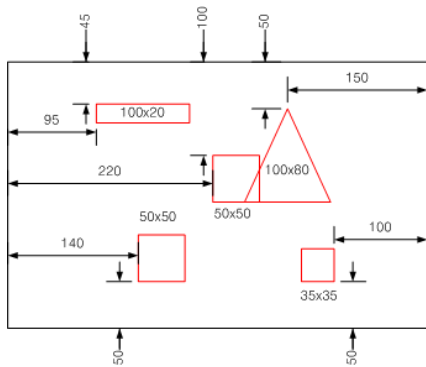


Fig. 10 Schematic Diagram of Artificial Defect Specimen

4. 결과 및 고찰

모의 결함 시편에 대한 초음파 시험은 각각 모의 결함 시편의 건전 부위와 미접착 결함 부위에서 계측한 신호를 저장하였는데, Fig. 11과 Fig. 12에는 모의 결함 시편에서 측정된 신호를 나타내었다.

정상 접착된 접착계면과 추진제-라이너 접착계면에 미접착이 존재할 경우에 대하여 시뮬레이션 결과에서 비교하면, 미접착이 존재할 경우 26 μs 의 위치에서 최대 진폭의 파형이 발생하는 것을 시뮬레이션 결과에서 관측할 수 있었다. 이러한 최대 진폭 신호는 모의 결함 시편에 대하여 초음파 펄스 반사법으로 측정된 결과인 Fig. 12에서도 동일한 26 μs 위치에서 발생하는 것을 확인할 수 있어 추진제-라이너 접착계면의 미접착 결함을 검출하는 것이 가능한 것을 알 수 있었다.

시뮬레이션 결과와 실제 실험과의 차이를 비교하기 위하여 Fig. 13과 Fig. 14에는 실험을 통해 계측된 신호와 모델을 통해 계산된 신호를 겹쳐서 도시하였다. 빨간색 실선으로 표시된 신호가 모의 결함 시편을 계측한 신호이며, 청색 점선이 시뮬레이션 신호이다. Fig. 13에 보이는 바와 같이 추진제-라이너 접착계면에 결함이 없는 경우 신호의 위치나 진폭의 크기가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

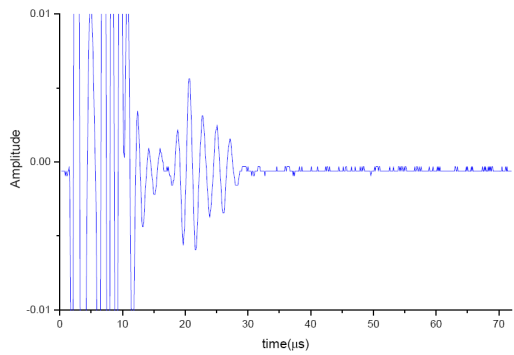


Fig. 11 Measured Signal of Normal Bond

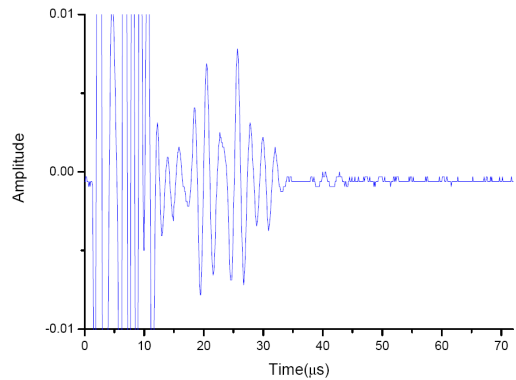


Fig. 12 Measured Signal of Disbond at Liner-Propellant Interface

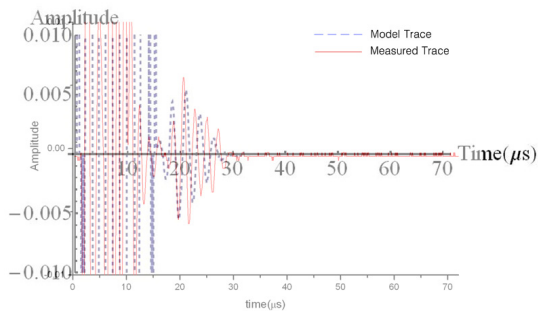


Fig. 13 Comparison of Ultrasonic Wave between measured Trace and modeled Trace with Normal Bond at Liner-Propellant Interface

또한 미접착이 존재하는 경우에도 비교적 정확히 파형과 진폭이 일치함을 확인할 수 있었다. 추진기관에 대한 초음파 모델링이 정확하게 초

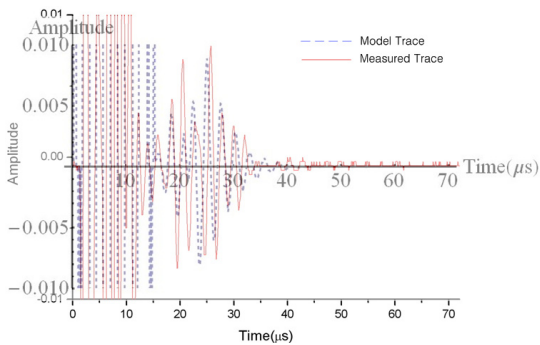


Fig. 14 Comparison of Ultrasonic Wave between measured Trace and modeled Trace with Disbond at Liner-Propellant Interface

음과 신호전달 현상을 모사할 수 있는 것을 실험을 통해 입증할 수 있었고 향후 이와 유사하게 다중 접착계면을 형성하는 다른 추진기관의 초음파 시험방법 개발에도 적용이 가능할 것으로 예상되었다.

5. 결 론

다중 접착 계면에 대한 초음파 전달 모델을 사용하여 추진기관의 초음파 펄스 반사법의 시스템 응답 함수와 입력 함수를 구하여 초음파 시험의 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다중 접착계면에서의 초음파 전달에 대한 일 반식을 사용하여 계산한 시스템 응답 함수와 탐촉자에서 측정한 입력함수를 사용한 초음파 시뮬레이션이 모의 결함 시편에서 측정한 초음파 신호와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 초음파 펄스 반사법을 사용하여 추진제-라이너 접착계면의 미접착 결함을 검출 가능함을 시뮬레이션 결과와 모의 결함 시편 측정을 통해 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th Edition, New York: Springer-Verlag, 1990
2. Chern, E. J and Nielsen, H. T. C., "Generalized formulas for reflected pulse response of multilayered structures", *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, No. 7, 1989, pp.2833-2837
3. Hajian, M. Honarvar, F., "Reflectivity estimation using an expectation maximization algorithm for ultrasonic testing of adhesive bonds", *Materials Evaluation*, Vol. 69, No. 2, 2011, pp.208-219