

# 초음파를 이용한 고체 추진제 추진기관의 결함 검출 기법

나성엽\*

## Ultrasonic Inspection Technology of Defect Detection of Solid Propellant Rocket Motor

Sungyoub Na\*

### ABSTRACT

Ultrasonic inspection method is more profitable than X-ray radiographic inspection in cost and effect of defect detection such as dis-bond, damage, and it doesn't need special constructions and can be possible real time inspection with safety. This report explains the experiment and analysis of ultrasonic property of solid propellant and the inspection methods of propellant/liner dis-bond by inside or outside inspection, and of propellant micro crack by damage. At result, ultrasonics has big attenuation(6~8db/cm) in solid propellant, and it can be possible to detect the defect of propellant/liner dis-bond by inside or outside inspection. And also it can be possible to detect the propellant micro crack caused by damage by using ultrasonic attenuation.

### 초 록

초음파를 이용한 추진기관의 비파괴검사는 X-ray 검사에 비하여 경제성이 우수하고, X-ray 검사시 취약한 dis-bond, damage 등의 결함 검출이 우수한 편이다. 그리고 전용시설의 필요없이 현장에서 실시간으로 검사가 가능하며 방사선 작업에 비하여 안전한 방법이다. 본 논문에서는 고체 추진제에 대한 초음파 특성을 분석하고, 추진제/라이너 미접착에 대한 내측과 외측 검사 방법 및 추진제 damage에 의한 미세 크랙 검출에 대하여 실험 및 분석하였다. 실험 결과, 추진제에서의 초음파 감쇠는 6~8db/cm로 비교적 큰 감쇠를 보였으며 추진제/라이너 미접착에 대한 내.외측 검사에 있어서도 제한된 조건이지만 검출 가능성을 보였다. 그리고 damage에 의한 추진제 미세 크랙도 초음파의 감쇠특성을 이용하여 검출 가능함을 보였다.

Key Words: Ultrasonic Inspection(초음파검사), Rocket Motor(추진기관), Propellant(추진제), Non-destructive Test(비파괴검사), Dis-bond(미접착), Micro-crack(미세 크랙)

### 1. 서 론

로켓 모터를 생산할 때 또는 장기 저장후 노화에 의하여 Fig. 1과 같이 화학적이거나 물성이 변하여 추진제 크랙, 추진제/라이너 미접착, 입자와 바인더간의 dewetting 등 추진기관의 성능에 영향을 미치는 결함이 발생할 수 있다.

\* 정회원, 국방과학연구소  
연락처, E-mail: 5855078@hanafos.com

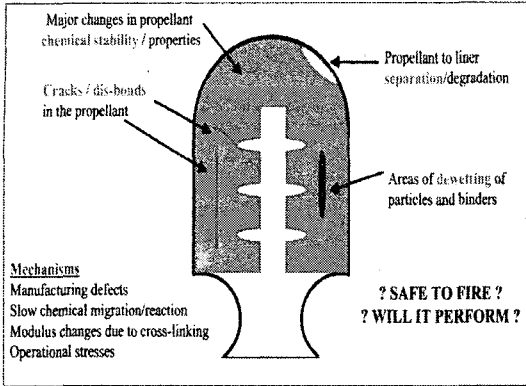


Fig. 1 Defects according to production or aging of solid propellant rocket motor

따라서 비파괴검사와 물성 측정을 수행하여 추진기관의 상태와 잔존 수명을 평가하여 왔다. 이를 위한 방법으로 방사선 투과 검사법은 비파괴검사의 전통적 방법으로서 추진기관의 검사에 많이 이용되어 왔다. 그러나 방사선 투과 검사법은 시험 소요 비용 및 전용시설의 투자비가 과다하고 또한 검사를 위해서는 추진기관을 전용 시설로 이송해야하는 불편함이 있었다. 또한 일부 결함들, 즉, 접착 계면에서의 dis-bond, 외력 및 하중 충격에 의한 마이크로 크랙 등에 대한 검출력이 다소 취약한 점이 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 대체 검사법으로써 초음파 검사법이 1990년대 이후로 활발하게 연구되어 왔으며 최근에는 그 방법이 차차 정립되어 가고 있다.

본 논문에서는 고체 추진제에 대한 초음파 특성을 분석하고, 추진제/라이너 미접착에 대한 내측과 외측 검사 방법 및 추진제 damage에 의한 미세 크랙 검출에 대하여 실험 및 분석하여 고체 추진제 추진기관에 대한 초음파 검사 가능성을 알아보고자 한다.

## 2. 초음파 검사 원리

초음파는 음향 임피던스가 다른 두 매질의 경계면에서 반사와 투과 또는 굴절을 일으키며, 음

향 임피던스( $Z$ )는 매질의 밀도( $\rho$ )와 음속( $V$ )을 곱한 값으로 물질에 따라 고유한 값을 가진다. 매질에 초음파가 수직으로 입사되면 Fig. 2와 같이 반사와 투과가 주로 일어난다. 이때 음압 강도의 반사율( $r$ )과 투과율( $t$ )은 다음 식과 같다.

$$r = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (1)$$

$$t = 1 - r = \frac{2Z_1}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2)$$

여기서,  $Z_1$  : 매질 1에서의 음향임피던스

$Z_2$  : 매질 2에서의 음향임피던스

초음파 검사에서는 매질1, 2의 경계면을 투과하여 나온 음압이 매질 2에서 매질 1으로 다시 투과하여 나온 음압을 측정하므로 실제로는 왕복 투과율이 적용된다. 따라서 음압의 왕복 투과율( $T$ )는 다음 식과 같다.

$$T = t_1 \times t_2 = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3)$$

여기서,  $t_1$  : 매질 1에서 매질 2로의 투과율

$t_2$  : 매질 2에서 매질 1로의 투과율

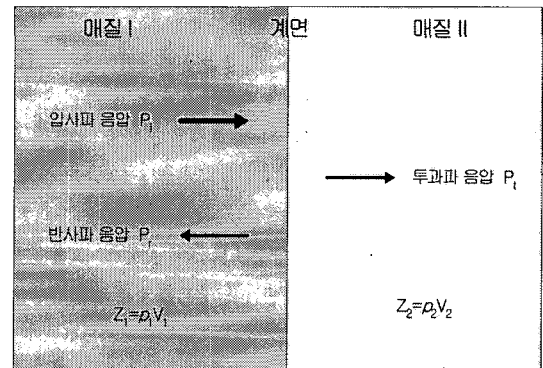


Fig. 2 Ultrasonic reflection and transmission at abundance of materials

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

강도의 양을 측정하여 접착 계면 또는 내부 상태를 판단한다.

그리고, 초음파는 매질내에서 Fig 3과 같이 산란과 흡수에 의하여 감쇠를 일으키며, 이때 음압 강도(P)는 매질에서의 초음파 경로 거리(d)에 대하여 지수함수적으로 감쇠하며, 관계식은 다음과 같다.

$$P=P_0 \cdot \text{EXP}(-a \cdot d) \quad (4)$$

여기서,  $P_0$  : 초기 음압 강도  
 $a$  : 감쇠계수

따라서 매질의 표준 상태에서의 감쇠 특성 및 변화된 감쇠 특성을 분석하여 내부 상태를 판단한다.

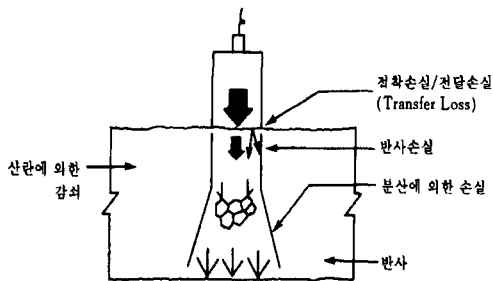


Fig. 3 Ultrasonic scattering and attenuation at material

초음파 탐사는 탐상 방법에 따라 반사파법 (Pulse-echo), 투과법(Through transmission), 공진법 (Resonance)이 있다. 반사파법은 탐촉자에서 송신된 음파가 물체의 불연속부에서 반사되어 수신되는 신호를 검출하는 방법이며, 투과법은 송신 탐촉자와 수신 탐촉자를 사용하여 물체에 투과된 음파를 수신하여 분석하는 방법이다. 공진법은 일정한 주파수에서 물체에 공진을 일으킬 때의 주파수 스펙트럼 특성을 이용하는 분석법이다.[1]

### 3. 실험

#### 3.1 추진제 초음파 특성 실험

추진제의 초음파 특성을 분석하기 위한 시편

은 Table 1과 같다. 표에서와 같이 추진제 종류 별로 두께를 달리하여 초음파 속도 및 감쇠 정도를 측정하였고, A 추진제에 대하여서는 주파수에 따른 탐상가능한 깊이를 측정하였다.

Table 1 Test specimens for measuring of ultrasonic properties at solid propellant

추진제 종류	추진제 두께(mm)	비고
A	10, 30, 50, 100, 150	초음파 속도, 감쇠, 탐상깊이 측정
B	10, 30	초음파 속도, 감쇠 측정
C	10, 30	"
D	10, 30	"

#### 3.2 추진제/라이너 미접착 검출 실험

추진제/라이너 미접착 검출 실험에는 2가지의 시편이 사용되었다. 먼저, 추진제측(내측) 검사의 모사로는 Fig. 4와 같은 추진제/라이너/EPDM 내열재로 구성된 시편을 사용하였다. 추진제(A) 두께는 22mm, EPDM 두께는 3mm이며, 추진제/라이너 미접착의 겹은 100배 현미경 측정된 결과 15 $\mu$ m였다.

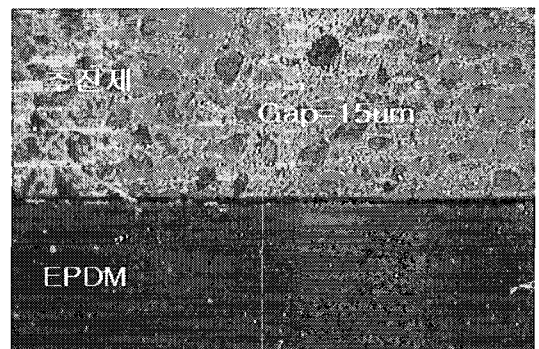


Fig. 4 Test specimen for propellant/liner dis-bond

외부 연소관측(외측) 검사의 모사로는 Fig. 5와 같이 실제 로켓 모터의 일부분을 절개하여 미접착 결함을 모사하였다. 로켓 모터는 공대공으로 사용하는 AIM-7M이며, 외경 210mm, 연소관(steel)두께는 2.0mm, 내열고무 두께는 3.0mm,

라이너 두께 1.0mm이고 추진제 웹 두께는 65mm였다. 이 시편은 U자형 다중 주조 추진제 계면의 양쪽 50mm(전체 100mm)를 축방향으로 1/4 절개한 시편이며 다중 추진제 계면을 중심으로 20x40mm 크기의 추진제/라이너 미접착 계면을 모사하였다. 미접착 갭의 최소 크기는 두께 게이지 측정 결과 20 $\mu$ m였다.

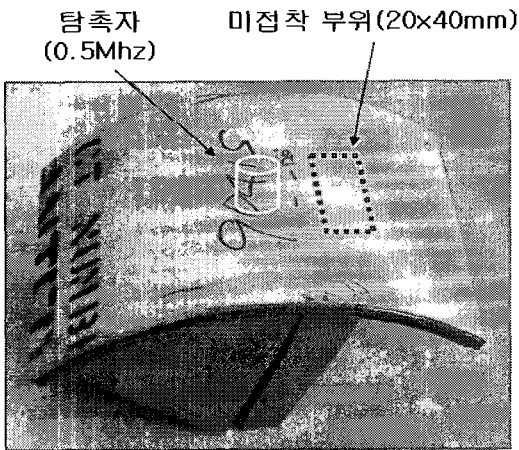


Fig. 5 Test specimen for propellant/liner dis-bond of rocket motor

실험에 사용된 초음파 탐촉자의 주파수는 비교적 감쇠특성이 심한 곳에서 침투성과 검사 효율성이 좋은 저주파수대의 0.5MHz를 사용하였으며 크기는 직경 0.7"였다.

인장 방향(인장율 : 0~25%)

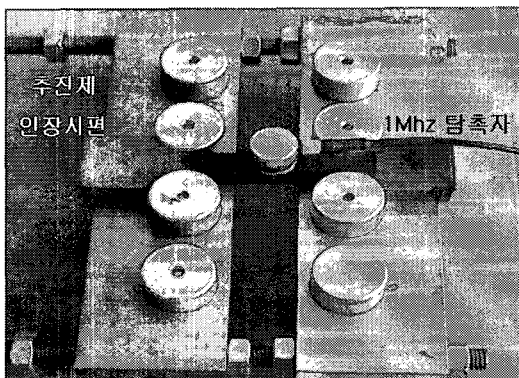


Fig. 6 Measuring of ultrasonic signal at instron displacement of solid propellant

### 3.3 추진제 미세 크랙 검출 실험

추진제 미세 크랙 검출에 사용된 시편 및 실험 방법은 Fig. 6과 같으며 JANAFF 추진제(A) 인장 시편을 사용하여 인장 damage를 주고 초음파의 감쇠 특성을 측정하였다. 실험에 사용한 인장율은 0~25%까지이며 시편의 두께는 12mm였다. 사용한 초음파 탐촉자의 주파수는 1.0MHz, 크기 0.5"이며 추진제 하단부에서 반사되어오는 신호 강도를 측정하여 상대 비교하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 추진제 초음파 특성

시험한 추진제의 종류별 초음파 특성을 측정 한 결과 Table 2와 같은 결과를 얻었다.

Table 2 Ultrasonic velocity and attenuation coefficient in solid propellant

추진제 종류	초음파 속도 (m/sec)(종파)	초음파 감쇠 계수 (dB/cm)(at 0.5Mhz)
A	1,811	6.0
B	1,786	6.0
C	1,769	6.0
D	1,750	8.0

추진제에서의 초음파 속도는 추진제 종류에 따라 약간의 차이가 있으나 대략 1750~1811m/sec 정도였다. 고무(soft)에서의 초음파 속도는 1480m/sec, 복합재의 초음파 속도는 2860m/sec이므로, 추진제에서의 초음파 속도는 이들의 중간 정도되는 값이다. 매질에서의 초음파 속도는 매질의 탄성율과 상관관계가 있다. 따라서 추진제의 탄성율이 고무와 복합재의 중간 정도되는 값이라고 예측할 수 있다. 추진제에서의 초음파 감쇠계수는 6.0~8.0dB/cm로 상당히 큰 감쇠 특성을 보였다. 따라서 두꺼운 추진제의 초음파검사에서는 이러한 큰 감쇠 특성으로 인하여 상당히 어려운 점이 있을 것으로 예측된다.

그리고, 탐촉자의 주파수별 감쇠 특성 및 저면

에서의 유효 신호 측정을 고려하여 pulse-echo법으로 검사 가능한 추진제 두께를 측정된 결과, 2.25MHz에서는 약 90mm정도, 1.0MHz에서는 100mm정도, 0.5MHz에서는 150mm정도가 검사 가능함을 보였다. 따라서 두꺼운 추진제 검사에 있어서는 0.5MHz이하의 저주파수 탐촉자를 적용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

#### 4.2 추진제/라이너 미접착 검사

먼저 추진제/라이너 미접착 검사에 있어 추진제 쪽에서 탐촉자를 접촉하여 검사하는 내측 검사 모사 방식을 적용하였으며, 사용한 탐촉자는

2.25MHz, 0.5"이고, 시험한 결과는 다음과 같다. Fig 7은 정상접착과 미접착 상태에서 검출되는 초음파 pulse-echo 신호이다. 정상 접착 상태에서는 Fig. 7의 (a)와 같이 두께 22mm 지점에 추진제/라이너 계면의 신호 강도 높이가 24% 정도를 지시하고 있으며 약 25mm 지점에 EPDM 저면에서 반사되는 신호 강도 높이가 45% 정도를 지시하였다. 이에 비하여 추진제/라이너 미접착 부위에서의 신호는 Fig. 7의 (b)와 같이 추진제/라이너 미접착 계면의 위치에서 신호 강도 높이가 55%를 지시하며 EPDM 저면에서의 신호 높이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 미접착 계면에서 거의 전반사가 일어났음을 의미한다.

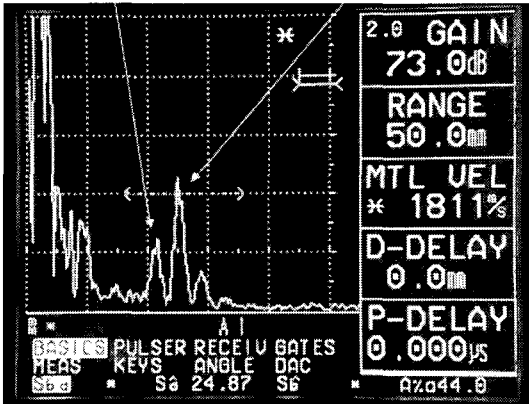
식 (1)에 의하면 추진제/라이너 정상접착 계면에서의 반사율( $r_1$ )은 0.285이고, 추진제/라이너 미접착면에서의 반사율( $r_2$ )은 0.999이다. 여기서 추진제 밀도는  $1.715\text{g/cm}^3$ , 초음파 속도는  $1811\text{m/sec}$ , 라이너 또는 EPDM의 밀도는  $1.1\text{g/cm}^3$ , 초음파 속도는  $1574\text{m/sec}$ , 공기의 밀도는  $0.001\text{g/cm}^3$ , 초음파 속도는  $330\text{m/sec}$ 를 적용하였다. 따라서, 반사율의 차이로 볼 때 정상 접착과 미접착의 신호 차이는 3.5배로 예측되었으나, 실제 신호에서는 이보다 낮은 2.3배를 지시하였다.

이에 대한 원인은 정확히 알 수 없으나 탐상 위치에 따른 추진제 표면의 거칠기 및 탐촉자 접촉 상태의 차이에 의한 것으로 판단된다.

로켓 모터의 추진제/라이너 미접착 계면 검사에 있어 외측(연소관쪽) 검사를 모사한 시편에서의 실험 결과는 다음과 같다.

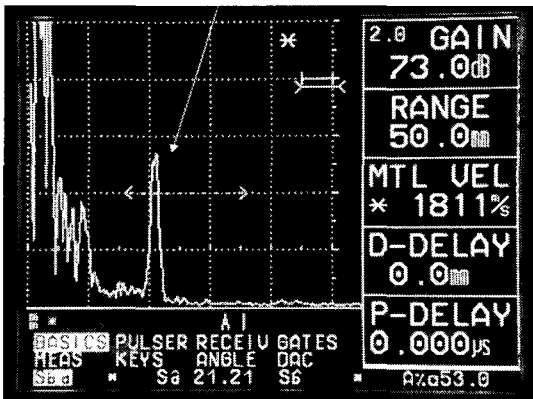
로켓 모터의 외측 검사에서의 초음파 신호 거동은 다소 복잡하다. 이는 초음파가 연소관/내열고무/라이너/추진제를 진행하면서 각 계면에서 다중 반사 및 투과가 일어나기 때문이다. 따라서 파형은 특정 피크 펄스의 형태가 아니라 다중 피크 펄스 형태이다. 초기 실험에서는 2.25MHz와 1.0MHz로 검사하였으나 감쇠가 심하고 정상 접착과 미접착 계면에서의 뚜렷한 유효 신호 차이를 검출하지 못하였다. 그래서 침투성이 좋은 저주파수대의 0.5MHz 탐촉자를 사용하였으며 실험 결과 Fig. 8과 같은 정상접착과 미접착 부위에서 검출되는 초음파 pulse-echo 신호를 얻었다.

추진제/라이너 계면      EPDM 저면



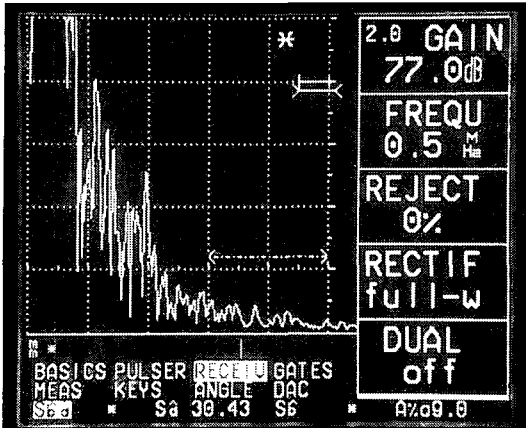
(a) Adhesive part of propellant/liner

추진제/라이너 미접착

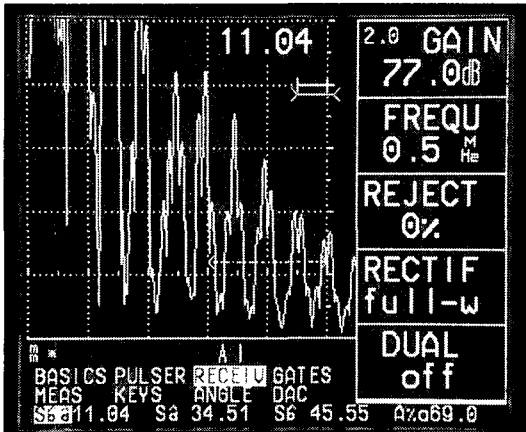


(b) Dis-bond part of propellant/liner

Fig. 7 Ultrasonic signals of the adhesive and dis-bond parts of solid propellant test specimen



(a) Adhesive part of propellant/liner



(b) Dis-bond part of propellant/liner

Fig. 8 Ultrasonic signals of the adhesive and dis-bond parts of solid propellant rocket motor

정상 접착 상태에서는 Fig. 8의 (a)와 같이 추진제 깊이쪽으로 급격하게 수렴하는 소멸 감쇠 펄스 형태이다. 반면 추진제/라이너 미접착 부위에서의 신호는 Fig. 8의 (b)와 같이 전체적인 신호 강도 높이가 평균 3~4배 정도 높은 값을 가지며 점진적으로 감소하는 다중 피크 펄스 형태이다. 이는 미접착 계면에서 반사되는 신호에 의하여 다중 반사 투과하면서 펄스를 보강하는 형식으로 되기 때문에 판단된다. 식 (1)에 의하면 이 경우 추진제/라이너 정상접착 계면에서의 반사율( $r_1$ )은 0.292이고, 추진제/라이너 미접착면에서의 반사율( $r_2$ )는 0.999이다. 여기서 추진제 밀도는  $1.715\text{g/cm}^3$ , 초음

파 속도는  $1840\text{m/sec}$ 를 적용하였으며 나머지는 전과 같았다. 따라서, 반사율의 차이로 볼 때 정상 접착과 미접착의 신호 차이는 3.4배로 예측되었으며, 실제 신호에서도 그와 유사한 형태로 지시하였다. 따라서 소형 로켓 모터로 제한된 검사이지만 외측에서도 추진제 라이너 미접착 계면에 대한 검사 가능성이 알 수 있었다.

### 4.3 추진제 인장 damage 검사

추진제에 인장 damage를 주고 인위적으로 미세 크랙을 발생시켜 초음파로 검사 가능성을 확인한 실험에서는 다음과 같은 결과를 얻었다. Fig. 9에서는 인장 변형율에 따른 초음파 신호의 추진제 저면 신호 강도 변화를 나타낸 것이다. 인장 변형율 4~7% 부위에서는 초음파 신호 강도가 급격하며 뚜렷하게 저하되는 것을 알 수 있다. 인장 변형율 8% 이상에서는 비교적 완만하게 신호 강도가 저하하였고 거의 0에 가까운 신호들이어서 상대 비교가 용이치 않았다.

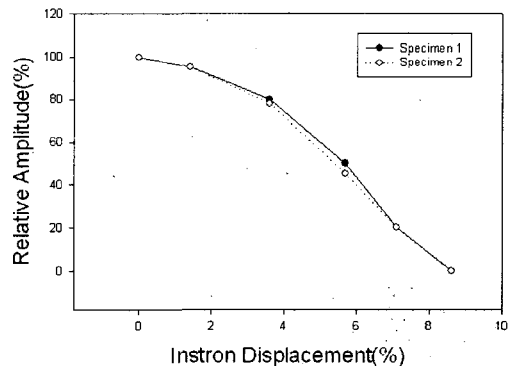


Fig 9. Ultrasonic signal amplitude variations of instron displacement ratios of solid propellant

Fig 10은 현미경으로 관측한 인장 변형율에 따른 추진제 미세 크랙 발생 수와의 상관 관계를 나타낸 것이다. 인장 변형율이 증가 할수록 초음파의 신호 강도는 현저히 저하되고, 추진제의 미세 크랙 발생 수는 상대적으로 현저히 증가함을 보여주고 있다. 미세 크랙의 크기는 초기 인장 변형율 5%에서  $30\sim 60\mu\text{m}$ 의 범위였으며, 인장 변형율 10%에서는  $50\sim 100\mu\text{m}$ , 인장 변형율 20%에

서는 100~160 $\mu\text{m}$ 로 점차 증가하다가 25%에서는 길이는 늘어나지 않고 인장 방향으로 당긴 형태로 늘어나서 미세 불규칙 기공 형태로 변형됨이 관측되었다. 따라서 초음파 신호 강도 변화를 측정하면 미세 크랙 발생 정도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

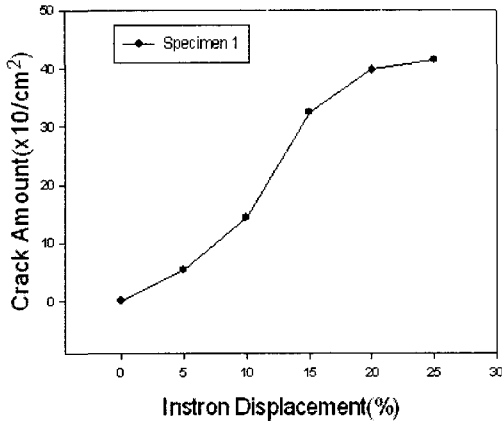


Fig. 10 The numbers of micro cracks of solid propellant by Instron displacement ratios

## 5. 결 론

실험한 몇가지 종류의 추진제에서 초음파 속도는 1750~1860m/sec 범위이고, 감쇠 계수는 6~8dB/cm로 고무와 복합재의 중간 정도 초음파 특성을 갖고 있음을 알았다. 그리고 이러한 상대적으로 큰 감쇠 특성을 고려한 두꺼운 추진제의 초음파 검사에 있어서는, 투과성과 신호 검출이 다소 우세한 0.5MHz이하의 저주파수 고효율 탐촉자를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

그리고 추진제/라이너 미접착 검사에 있어서는, pulse-echo법으로 내측(추진제쪽) 검사와 외측(연소관쪽) 검사에서 이론 값과 유사하게 추진제/라이너

미접착 계면이 검사 가능함을 실험적으로 확인하였다. 그러나 로켓 모터는 내부 형상과 구성품의 물성 및 두께가 다양하기 때문에 향후 실제 모터를 모사한 시편으로 실험하여, 검사 방법을 개발 및 입증하는 것이 필요하다.

추진제에 damage를 주어 미세 크랙을 모사한 추진제 인장 변형을 초음파 신호 측정 실험에서는 인장 변형율과 미세 크랙 발생수, 초음파 신호 강도 변화와의 상관 관계를 구하였으며, 신호 강도 변화에 따른 미세 크랙 발생수를 예측할 수 있을 것으로 판단되나 추진제의 종류에 따라 다양한 값을 가질 수 있으므로 향후 추가적인 실험이 필요하다.

초음파를 이용한 추진제 검사는 국내에서 미개척 분야이다. 따라서 향후 다양한 실험 및 검사 방법의 개발이 요구된다.

## 참고 문헌

1. 이용, "비파괴검사의 기초, 제4권 초음파 탐상 검사", 세진사, 1995, pp.22~37, pp.103~110
2. W. N. Cobb, "Ultrasonic characterization of propellant aging", Univ. of Denver, JANNAF NDES Conference, Utah, 1999. 11, pp.1~11
3. 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
4. W. N. Cobb and J. J. Jonson, "Ultrasonic Inspection of Rocket Motor Grains During Extrusion", Univ. of Denver and NSWC, 2000, pp.1~12
5. Samuel W. Jang, "NDE Techniques are Essential to an Aging Program", AEROJET Solid Propulsion Company, AIAA Joint Propulsion Conference, 1988. 6