

## 초음파의 파형 해석에 의한 고감쇠 재료의 평가

남 영현

한국표준과학연구원

**요약** 본 논문은 초음파법을 이용하여 소결 재료의 비파괴적인 평가 방법을 확립하는데 목적을 두고 있다. 소결 재료의 밀도는 소결체로 제작되는 동안 금형과 분말사이의 마찰 때문에 부분적으로 불균질한 분포를 가지고 있으며 이 불균질성은 에너지 감쇠 계수 및 초음파 반사 에코의 주파수 스펙트럼에 있어 중심 주파수의 변화량에 의해 조사되었다. 초음파의 속도, 탄성계수, 포와송 비는 소결 재료의 밀도와 비례 관계에 있었으며 저면 반사파의 중심 주파수는 초음파의 전파 거리의 증가 및 밀도의 감소에 따라 저주파수 쪽으로 이동하였으나 에너지 감쇠 계수는 밀도의 증가에 따라 감소하고 있었다. 본 논문에서는 반사파의 주파수 스펙트럼에 있어 중심 주파수의 변화가 소결 재료의 비파괴적인 평가 방법으로써의 가능성을 보여주고 있다.

### 1. 서론

분말 성형법은 복잡한 형상의 기계 부품을 제작하는 일이 가능하며 세라믹과, 경사 기능 재료 등, 용제재(溶製材)에서는 얻어지지 않는 재료를 만들 수 있다는 특징을 가지고 있다.

최근에는 이제까지의 상압 소결(常壓燒結) 및 Hot Pressing법을 대신하여 HIP법(Hot Isostatic Pressing Method) 및 단시간에 성형이 가능한 방전 프라스마법이 사용되고 있으며 성형 기술의 발전에 따라 적층형 경사 기능 재료(積層型傾斜機能材料)와 같은 새로운 소결 재료도 개발되고 있다. 이와 같이 소결 재료와 성형 기술의 진보는 현저하나 현재 평가 기술으로써는 기계적인 성질의 측정, 조직의 관찰, 밀도 측정 등의 기술이 주로 이용되고 있다. 소결 재료는 내부 결함, 조직의 비균질성 등이 원인이 되는 균열 및 변형에 의한 성형 불량(成形不良)이 발생하기 쉽기 때문에 비파괴적인 재료 평가법을 확립하는 일은 대단히 중요한 과제가 되고 있다.<sup>1)-3)</sup>

현재까지의 평가 기술로는 X선 투과법과 초음파

법이 이용되고 있으며, X선 투과법의 경우 내부 결함을 검출하기에는 용이하나 조직의 비균질성을 검출하기에는 곤란하다. 또한 초음파법의 경우는 강산란에 의한 감쇠가 큰 문제가 되고 있다.

본 연구에서는 소결 재료내를 전파하는 초음파 pulse파형을 시간 영역에서 검출한 후, 주파수 해석을 실시하여 소결체의 밀도 및 초음파의 전파 거리가 주파수 스펙트럼의 중심 주파수에 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

### 2. 분말 소결체의 제작

실험에 이용한 분말 소결체의 제작에는 입경(粒徑)이 177  $\mu\text{m}$ 의 알루미늄 분말을 사용하였다. 알루미늄분말을 厚肉 원통형의 금형에 넣고 유압 압축 시험기로부터 축방향으로 가(加)하는 압력을 변화시키면서 Table 1에 표시한 것과 같이 상대 밀도(알루미늄 밀도 100%:2700  $\text{kg}/\text{m}^3$ )가 0.74~0.97인 분말 성형체를 만들었다. 소결체의 직경은 20 mm이며 높이는 H=2.5, 5.3, 12 mm의 3종류이다.

분말 소결체는 전부 방전 프라스마 소결법을 이용하여 제작하였으며, 진공도는 1.33 Mpa로 소결 온도는 743K이다. 방전 프라스마 소결법은 통전가열법(通電加熱法)에 의한 Hot Pressing 법의 일종이다. 가열 전원으로는 pulse전류를 이용하는 것이 특징이며 가열중 gap에 방전이 발생하여 용융(熔融)하기 때문에 공극(空隙)이 적은 소결체를 단시간에 제작할 수 있는 특징을 가지고 있다.

소결체의 밀도는 시편 전체의 평균적인 밀도를 구하기 위하여 Archimedes법으로 측정하였다.

### 3. 초음파의 산란 이론

고체내를 전파하는 초음파는 결정립 및 전위 등에 의해 산란을 받으며, 산란에 의한 감쇠에 대해서는 많은 연구자들로부터 이론적 및 실험적으로 연구되어 왔다.<sup>4)-9)</sup> 고체내를 전파하는 초음파의 파장을  $\lambda$ , 피산란체(被散亂體)의 직경을  $d$ 라 하면,  $\lambda$ 와  $d$ 와의 상대적인 크기의 차이에 의해 초음파의 감쇠는 주파수( $f$ )와의 관계가 다르다. 즉 에너지 감쇠 계수( $\alpha$ )는 주파수와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\alpha = \Phi_R f^4 (\lambda \gg d) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = \Phi_S f^2 (\lambda \sim d) \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha = \Phi_D (\lambda \ll d) \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $\Phi_R, \Phi_S, \Phi_D$ 는 산란인자(散亂因子)에 관한 비례정수이며 재료에 따라 다르다. (1)식은 초음파의 파장이 피산란체의 직경보다 충분히 큰 경우(Rayleigh scattering)이고, (2)식은 확률적(確率的)인 산란에 의한 경우로 초음파의 파장과 피산란체의 직경이 비슷한 경우(Phase(stochastic) scattering)에 생긴다. (3)식은 초음파의 파장이 피산란체의 직경보다 작은 경우로 확산적인 산란에 의한 감쇠(Diffusion scattering)이다. 이 영역에서는 감쇠 계수가 주파수에 의존하지 않으며 피산란체의 직경의 크기에 반비례한다.

실험에 이용한 탐촉자의 경우, 초음파의 파장은 200~3000  $\mu\text{m}$ 정도이며 소결재료내의 기공의 평균크기는 50~140  $\mu\text{m}$ 정도이다. 그러므로, 이 파장 영역에서는 전파하는 초음파가 (1) 및 (2)식의 산란 영

역에 있으며 소결 재료를 전파하는 초음파의 감쇠는 결정립계(grain boundary)와 기공에 의해 크게 영향을 받는다고 생각된다.

### 4. 초음파 장치와 측정 방법

#### 4.1. 측정 장치

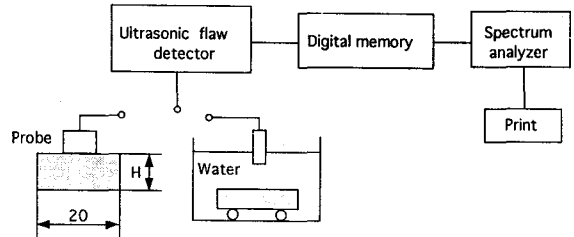


Fig. 1. Experimental setup used in the ultrasonic experiments.

Fig. 1은 본 연구에서 이용한 주파수 스펙트럼 측정 장치의 구성도이다. 직경 20 mm의 원통형 시편에 탐촉자를 놓고, 1회 저면 반사파( $B_1$ )의 신호를 디지털 신호로 변환한 후 주파수 분석기에 입력하여 주파수 스펙트럼을 구하였다. 스펙트럼 분포의 계산 및 중심 주파수(Center Frequency:  $F_c$ )의 측정에는 Hitachi AT-7000을 사용하였다.

실험에 사용한 탐촉자는 Table 1에 표시한 것과 같이 공칭주파수 2, 5, 15 MHz의 광대역형(廣帶域型)의 수직탐촉자(Aerotech AlphaHP)와 공칭 주파수 5, 10, 25MHz의 집속 수직탐촉자(集束垂直探觸子:Hitachi)를 사용하였다. 또한, 각 탐촉자의 특성을 비교하기 위한 방법으로 본 연구에서는 탐촉자의 중심 주파수를 수침법을 이용하여 구하였다.

Table 1. Characteristics of the samples used in the study.

Density $p(\text{kg/m}^3)$	H(mm)	Normal probe(MHz)	
		Flat	Point focus
2000	12.0	2, 5, 15	5, 10, 25
2350	2.5, 5.3, 12.0		
2530			
2630			

실험에서는 수직탐촉자의 경우 직접 접촉법을 이

용하였으며 집속 수직탐촉자의 경우는 수침법을 이용하였다. 물속에서 탐촉자와 시편 표면까지의 거리(水距離)에 의한 영향을 없애기 위하여 물거리는 전부 4mm로 고정하였다. 또한, 집속 수직탐촉자의 초점 거리가 다른데 따르는 영향은 무시하였다.

4.2 중심 주파수와 감쇠 계수

초음파 펄스 파형의 검출에는 1탐촉자법(一探觸子法)을 이용하였다. 탐촉자에서 초음파 펄스를 입사하여 시편의 저면으로부터 반사하는 1회 저면 반사파의 파형을 시간 영역에서 검출하였으며, 검출한 펄스 파형은 고속 Fourier변환(Fast Fourier Transform: FFT) 처리를 실시하여 주파수 스펙트럼을 구하였다.

본 연구에서는 정량적인 중심 주파수를 구하기 위해 주파수 스펙트럼에 대한 스펙트럼과 횡축으로 둘러 쌓인 부분의 면적을 2등분하는 주파수를 구하여 중심 주파수로 하였다.

소결 재료의 감쇠 계수( $\alpha$ )는 직접 접촉법을 이용하여 시편 저면으로부터 반사하는 1회 반사파의 진폭( $A_1$ )와 2회 반사파의 진폭( $A_2$ )의 비를 시편 두께  $t$ 의 2배로 규격화하여 식(4)와 같이 감쇠 계수  $\alpha$ 로 정량화하였다.

$$\alpha = 20 \log(A_1/A_2) / 2t \dots\dots\dots (4)$$

감쇠 계수의 측정에는 시편 전체의 평균치를 구할 목적으로 15회 가산평균치(加算平均値)를 구하였다.

4.3 음속과 탄성 계수

소결 알루미늄의 음속은 두께 방향으로 전파하는 초음파의 종파와 횡파에 대한 펄스 반사법으로 측정하였다. 모든 측정은 광대역 초음파 펄스를 이용하였으며 데이터는 시간 영역에서 처리하였다. 사용한 탐촉자(Aerotech AlphaHP,  $d=8\text{mm}$ )는 직접 접촉법으로 주파수는 5 MHz이며, 접촉 매질은 종파의 경우 기계유를, 횡파의 경우 Zg 5(Krautkrämer)를 사용하였다.

시편에서 측정된 종파와 횡파의 속도 및 밀도로부터 각 시편의 탄성 계수  $E$  및 전단 계수  $G$ 는 식(5)와 (6)를 이용하여 구하였다.

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{V_L}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} = P \dots\dots\dots (7)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{P^2 - 1} \right) \dots\dots\dots (8)$$

여기서,  $V_L$ : 종파 속도,  $V_S$ : 횡파 속도,  $\rho$ : 밀도,  $E$ : 탄성 계수,  $G$ : 전단 계수,  $\nu$ : 포와송 비이다. 초음파의 음속 측정은 시편 전체의 평균치를 구할 목적으로 8회 가산 평균치를 구하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1. 탐촉자의 중심 주파수

본 연구에서는 실험에 사용한 각 탐촉자의 중심 주파수를 비교하기 위한 방법으로 수침법을 이용하여 유리판 표면으로부터의 표면 반사파의 파형을 측정하여 탐촉자의 중심 주파수를 구하였다. 수직탐촉자의 경우 물속에서 탐촉자와 유리판 표면까지의 거리에 의한 영향을 없애기 위해 전부 4 mm로 고정 하였다. 집속 수직탐촉자의 경우는 탐촉자의 초점을 유리판에 일치시킨 상태에서 표면 반사파의 파형을 측정 하였다.

Table 2. Probe specifications.

Flat	$F_c$ (MHz)	Point focus	$F_c$ (MHz)	Focus length(mm)
2MHz	1.9	5MHz	5.0	45.0
5MHz	3.9	10MHz	10.9	38.0
15MHz	13.5	25MHz	25.0	20.0

$F_c$ : Center frequency

Table 2는 수침법으로 측정된 표면 반사파의 파형을 주파수 해석하여 얻은 중심 주파수( $F_c$ )이다. 수직탐촉자의 경우는 표면 반사파의 중심 주파수가 탐촉자의 공칭 주파수보다 낮으나, 집속 수직탐촉자의 경우는 탐촉자의 공칭 주파수와 표면 반사파의 중심 주파수가 거의 일치하고 있다.

5.2. 감쇠 계수의 밀도 및 주파수 의존성

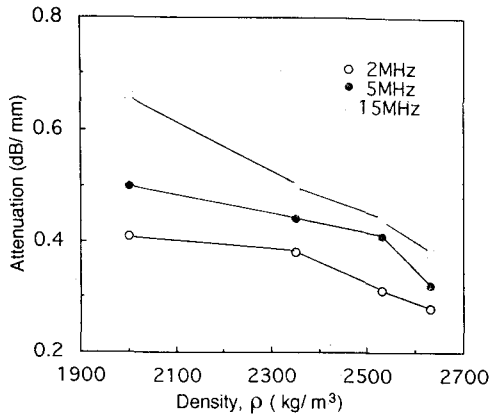


Fig. 2. The relationship between attenuation coefficient and density in sintered Al.

Fig. 2는 소결체의 밀도와 에너지 감쇠율의 관계를 나타낸 것이다. 에너지 감쇠율은 밀도의 증가에 따라 거의 직선적으로 저하하고 있으며 초음파의 산란 이론에서 표시한 것과 같이 주파수가 높을수록 에너지 감쇠율의 기울기는 커짐을 알 수 있다. 이는 주파수가 높을수록 소결체 내부를 전파하는 초음파의 파장이 짧기 때문에 결정립계 및 기공에 의한 강한 산란이 원인이라고 생각된다. 이상의 결과로부터 소결체내를 전파하는 초음파의 에너지 감쇠율은 밀도 및 주파수에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다.

5.3. 음속 및 탄성 계수의 밀도 의존성

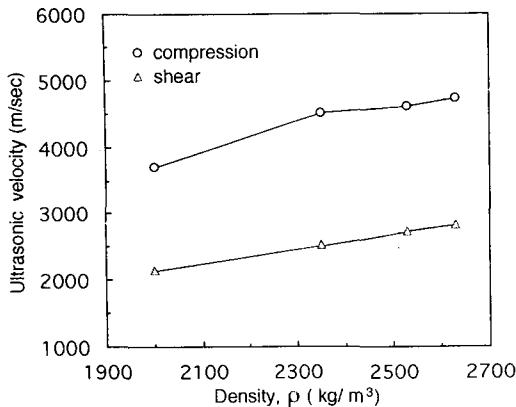


Fig. 3. The relationship between ultrasonic velocity and density in sintered Al.

Fig. 3에 측정된 종파와 횡파의 속도를, Fig. 4에는 종탄성계수와 횡탄성계수를 비교하였다. 두 속도 및 탄성 계수 모두 밀도가 증가함에 따라 증가하고 있으며, 기공량의 증가는 초음파의 속도 및 탄성 계수를 감소시킴을 알 수 있다.

Fig. 5는 측정된 음속을 이용하여 구한 포와송 비와 밀도와의 관계를 표시하고 있다.

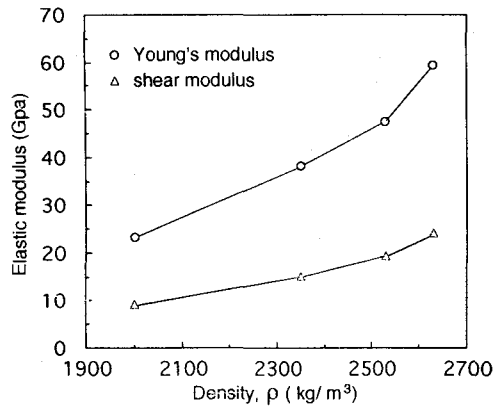


Fig. 4. The relationship between elastic modulus and density in sintered Al.

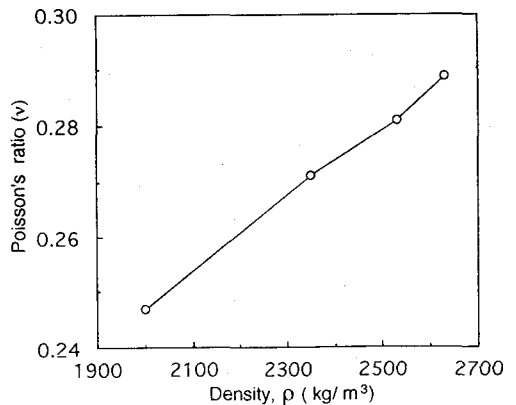
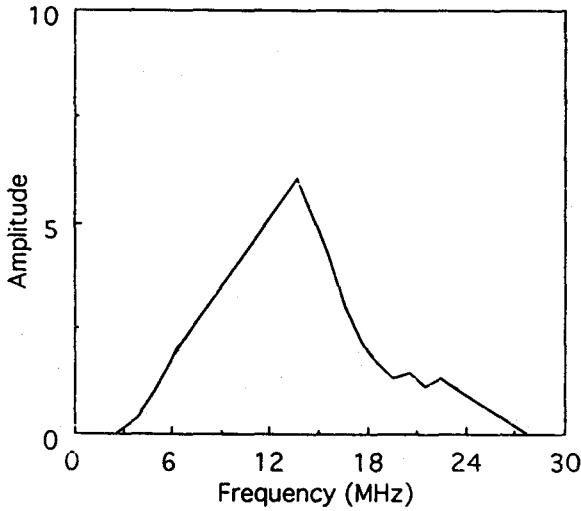


Fig. 5. The relationship between Poisson's ratio and density in sintered Al.

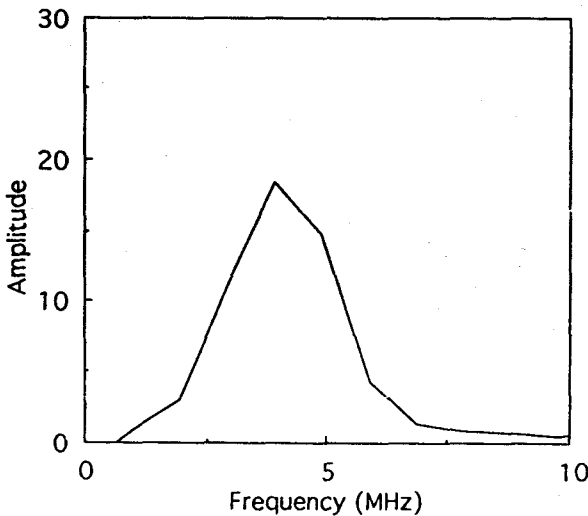
5.4. 중심 주파수의 밀도 및 전파 거리 의존성

Fig. 6(a)는 15 MHz 수직탐촉자를 이용하여 소결

체 표면으로부터 반사한 표면 반사파를 고속 Fourier변환을 실시하여 파형 해석한 스펙트럼이며 표면 반사파의 중심주파수는 약 14 MHz이다. Fig. 6(b)는 소결체의 밀도가  $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$ 이며, 두께가  $H=12 \text{ mm}$ 인 시편의 저면으로부터 반사한 저면 반사파의 주파수 스펙트럼이다. 중심 주파수가 14 MHz인 표면 반사파가 상대 밀도가 0.74인 소결체 내를 전파할 때 강한 산란에 의해 저면 반사파의 중심 주파수가 4 MHz까지 저하하고 있음을 알 수 있다.



(a) reflection wave(surface)



(b) reflection wave(B<sub>1</sub>)

Fig. 6. The spectrum distribution of received waveform(15MHz, flat).

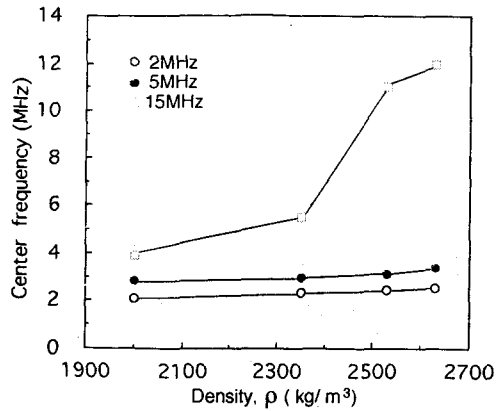


Fig. 7. The change of center frequency of the echo signal with density(flat).

Fig. 7은 소결체의 밀도와 시편의 저면으로부터 반사한 저면반사파의 스펙트럼으로부터 구한 중심 주파수의 이동량과의 관계를 나타낸 것이다. 시편의 두께는  $H=12 \text{ mm}$ 이며 2 MHz 및 5 MHz 탐촉자의 경우 밀도의 증가에 따라 커다란 변화는 관찰할 수 없다. 이에 대해 15 MHz 탐촉자에서는 밀도의 증가에 따라 약 8 MHz의 중심 주파수의 이동량이 관찰되었다.

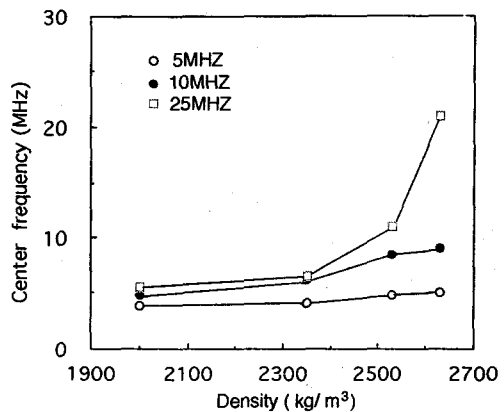
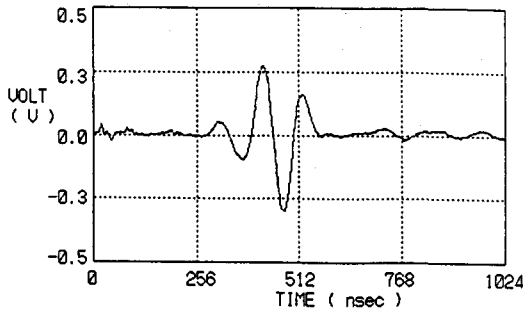


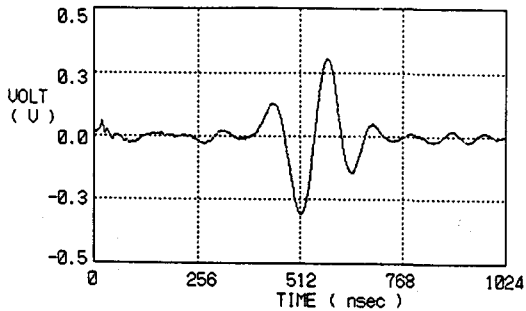
Fig. 8. The change of center frequency of the echo signal with density(point focus).

Fig. 8은 집속 수직탐촉자를 이용하여 얻은 중심 주파수의 이동량과 밀도와의 관계를 나타낸 것으로

시편의 두께는 H=12 mm이다. 소결체의 밀도가 약  $\rho=2350 \text{ kg/m}^3$ 까지는 중심 주파수의 커다란 변화를 관찰할 수 없었다. 그러나, 소결체의 밀도가  $\rho=2350 \text{ kg/m}^3$  이상에서는 시편의 밀도 증가에 따라 중심 주파수는 증가하였으며, 그 비례 관계는 탐촉자의 주파수가 높을수록 큼을 알 수 있다.



(a) 2.5 mm



(b) 5.3 mm

Fig. 9(a). Ultrasonic signals received from acoustic measurement(first backwall signal, 5MHz)

Fig. 9(a)는 집속 수직탐촉자를 이용하여 밀도가  $\rho=2350 \text{ kg/m}^3$ 이며, 두께가 H=2.5 mm 와 5.3 mm인 시편의 저면으로부터 반사한 저면 반사파의 파형을 나타낸 것이다. Fig. 9(b)는 초음파의 전파 거리(H:2.5~12 mm)를 변화시켜 저면 반사파의 중심 주파수를 각 집속 수직탐촉자에 대해 측정된 결과이다. 반사파의 중심 주파수는 전파 거리의 증가에 따라 저하하고 있으며 중심 주파수의 저하율은 25 MHz 탐촉자가 5 MHz와 10 MHz 탐촉자에 비해 크게 저하하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 고감

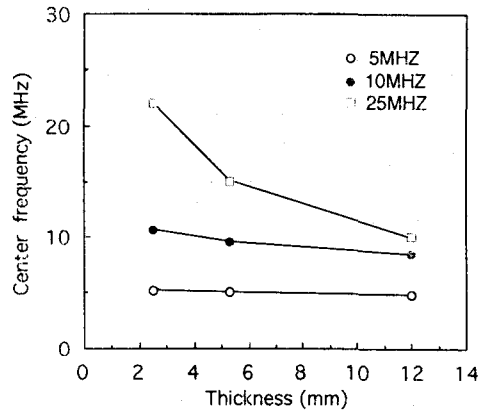


Fig. 9(b). The change of center frequency of the echo signal with beam path length(point focus).

쇠 재료에서는 공칭 주파수와 실제의 탐상 주파수가 전파 거리 증가에 따라 크게 변하고 있음을 확인할 수 있다.

또한 탐촉자의 주파수가 같아도 광대역형 탐촉자가 협대역형 탐촉자에 비해 넓은 주파수 성분을 가지고 있기 때문에 에너지 감쇠가 큰 소결 재료에서는 고주파 성분이 감쇠하여도 감쇠가 적은 저주파수를 이용하는 일이 가능하기 때문에 탐상면으로부터 깊은 곳에 있는 결함을 탐상할 수 있다고 생각된다.

이상의 결과로부터 초음파법을 이용한 소결 재료의 평가에 대해서, 에너지 감쇠 계수는 밀도의 증가에 따라 감소하였으며 저면 반사파의 스펙트럼의 중심 주파수는 전파 거리의 증가에 따라 저주파수 쪽으로 이동하였다. 그러나, 밀도의 증가에 대해서는 고주파수 쪽으로 이동하였다. 이와 같은 변화는 결정립계 및 기공에 의한 산란이 주 원인이라고 생각된다. 또한 저면 반사파의 특성 변화를 측정함으로써 거꾸로 소결 재료의 밀도를 예측하는 일은 가능하며, 이러한 비파괴평가 기술은 소결 재료의 품질 관리에 적용할 수 있으며, 재료 특성 변화에 관한 유익한 정보를 얻는데도 이용할 수 있다. 더우기, 수직탐촉자와 집속 수직탐촉자의 양 측정 결과를 이용하면 예측치는 더욱 정확하리라고 생각된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 초음파의 파형 측정과 주파수 해석으로부터 소결 재료의 밀도, 에너지 감쇠율 및 저면반사파의 중심 주파수 이동량이 소결 재료의 건전성을 평가하기 위한 기준으로 활용하기 위한 가능성에 대해 검토하였다.

그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소결체내를 전파하는 초음파의 에너지 감쇠율은 밀도 및 탐촉자의 주파수에 크게 의존하고 있었다.
2. 초음파의 속도, 탄성 계수, 포와송 비와 밀도 사이에는 비례 관계가 있었다.
3. 저면 반사파의 중심 주파수는 초음파의 전파 거리의 증가 및 밀도의 감소에 따라 저주파수 쪽으로 이동하였다.

## 7. 참고 문헌

- 1) R.L.Smith, NDT International, Vol. 20(1987), pp.

43-48

- 2) J.P.Panakkal and H.Willems, NDT International, Vol. 22(1989), pp. 273-276
- 3) D.J. Roth, D.B. Stang, S.M. Swickard, M.R. DeGuire and L.E. Dolhert, Material Evaluation, Vol. 49(1991), pp. 883-888
- 4) R.L.Smith, W.N.Reynolds and H.N.G.Wadley, Metal science., Vol. 15(1981), pp. 554-558
- 5) E.P.Papadakis, JASA., Vol. 37(1965), pp. 703-710
- 6) E.P.Papadakis, K.A.Fowler, and L.C.Lynnworth, JASA., Vol. 53(1973), pp. 1336-1343
- 7) A. Nagarajan, J. Appl.Phys., Vol. 42(1971), pp. 3693-3696
- 8) J.P.Panakkal, J.K. Ghosh and P.R. Roy, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 17(1984), pp. 1792-1795
- 9) W.N.Reynolds and R.L.Smith, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 17(1984), pp. 109-116

# Evaluation of High Attenuation Material Using Ultrasonic Wave Analysis

Young-Hyun Nam

Korea Research Institute of Standards and Science

**Abstract** The purpose of this paper was to develop a nondestructive evaluation method of sintered material by ultrasonic method. The density distribution of sintered material becomes inhomogeneous partially because of the friction between the powder and the die during compaction. The inhomogeneity was investigated by measurement of the energy attenuation coefficient and the shift of the center frequency in the frequency spectrum of the ultrasonic reflection echo. The experimental results showed that the center frequency of reflection wave depended linearly on the density of sintered materials. However, the attenuation coefficient decreased inversely as the density increased. This study shows that the shift of the center frequency in the frequency spectrum of reflection wave can be used to a nondestructive evaluation of sintered materials.

(Received: December 8, 1994)