

## Al材料에서 Ultrasonic Backscattered Energy 와 Stress 와의 相互關係

朴宗賢 朴致承 林亨澤  
(韓國에너지研究所 非破壞試驗室)

〈1987년 7월 25일 접수〉

(The Correlation between the Ultrasonic  
Backscattered Energy and the Applied  
Stress in Al material)

J. H. Park, C. S. Park, H. T. Lim

### Abstract

As a new device of stress monitoring method, ultrasonic backscattering method has been used to aluminium samples with various grain sizes at rayleigh critical angle in order to observe the relationships between applied stress and ultrasonic backscattered energy.

It was found that the ultrasonic backscattered energy was observed to decrease as the grain size increased at the given applied stress.

At the same grain size, the ultrasonic backscattered energy increased with increasing the applied stress.

Through this study, we provided some possibility to evaluate stresses in materials under loads nondestructively, and this method is expected to be used as a new stress monitoring device.

## 〈記号説明〉

- $V_{Ll}$  : Longitudinal Wave Velocity through the Liquid  
 $V_{Tl}$  : Transverse Wave Velocity through the Liquid  
 $V_{Ls}$  : Longitudinal Wave Velocity through the Solid  
 $V_{Ts}$  : Transverse Wave Velocity through the Solid  
 $L_1$  : Incident Longitudinal Wave  
 $L'_1$  : Reflected Longitudinal Wave  
 $T_1$  : Reflected Transverse Wave  
 $L_2$  : Refracted Longitudinal Wave  
 $T_2$  : Refracted Transverse Wave  
 $\theta_i$  : Incident angle  
 $(Z_L)_l$  : Acoustic impedance for Longitudinal Wave in the Liquid  
 $(Z_L)_s$  : Acoustic impedance for Longitudinal Wave in the Solid  
 $(Z_T)_s$  : Acoustic impedance for Transverse Wave in the Solid  
 $R$  : Reflection Coefficient  
 $T$  : Transmission Coefficient  
 $B$  : Ultrasonic Backscattered Energy  
 $\beta$  : Attenuation Coefficient

## 1. 序 論

超音波의 利用범위가 점차 增大 됨에 따라 材料 内部에 存在하는 缺陷을 檢出하고 評價, 分析하는 것 뿐만 아니라 材料의 物性研究에도 超音波를 利用한 方法이 많이 活用되고 있다.

超音波가 材料内部를 進行할 때 그 傳播特性에 따라 材料의 超音波 減衰特性<sup>1)(2)(3)</sup>, 結晶粒子

크기의 分布,<sup>(4)(5)(6)(7)</sup> 微細構造 및 機械的性質<sup>(8)(9)</sup> 등에 관한 研究들이 많은 研究者들에 의하여 行하여져 왔다.

또한 하중을 받고 있는 構造物에서의 殘留応力 및 応力分布에 대한 非破壞的 評價 方法도 관심의 對象이 되어 왔다.<sup>10)(11)(12)</sup> 實際, 材料에서의 応力의 變化는 超音波의 速度, 減衰特性의 變化 등을 測定하여 評價가 可能하나 그러한 變化는 무척 작기 때문에 正確하게 測定하기란 그리 容易하지 않다. 한편 理想的인 固体(Ideal or Homogeneous Solid)内에서 그 境界面에 入射된 超音波는 Snell's law나 反射法則에 따라서 固体内로 傳播한다.

그러나 實際固体(Real or Inhomogeneous Solid)에서는 超音波探觸子를 통하여 固体内로 傳播된 超音波의 相當量이 反射(Reflection) 되지 않고 超音波探觸子로 되돌아 오는데 이를 Ultrasonic Backscattered Energy라 한다. 이와 같은 Ultrasonic Backscattered Energy의 크기 特性(Amplitude, Form of frequency, Spectrum)은 材料의 表面거칠기, 結晶粒界面, 相境界面, 軋位, 또는 기타 작은 缺陷으로부터의 超音波 散亂 등에 의하여 달라진다. 또한 殘留応力에 의하여 材料内部에 Distortion이 發生하면 그 정도에 따른 Ultrasonic Backscattered Signal을 얻을 수 있고 이 信號크기를 評價함으로써 応力의 크기를 觀測할 수 있다. 応力變化에 의한 Ultrasonic Backscattered Energy 分布의 特性이 Bridge 및 Ismail에 의하여 처음 觀測되었다.<sup>13)</sup>

上記 方法은 Immersion을 이용한 비접촉법(Non-Contact Method)으로 行하여졌는데 비교적 간단하게 적용되었다. 따라서 本 研究에서는 超音波를 利用한 応力觀測의 새로운 機構로서의 응용범위를 넓히고자 각기 다른 Grain Size를 가진 公業용 Al 試驗片을 使用하여 応力의 크기를 測定하여 試驗함으로써 그때의 Ultrasonic Back-

scattered Energy와의 相互關係를 調査, 檢討하였다.

## 2. 理論的 背景

### 2-1 超音波의 反射 및 屈折

먼저 超音波의 基礎原理부터 살펴보면, 超音波探觸子에서 材質内로 들어가는 縱波는 서로 Acoustic Impedance가 相異한 界面에서 反射 或은 屈折하게 되는데(Fig. 1) 이러한 超音波의 方向 角度 및 速度는 다음과 같은 Snell's law에 따른다.

$$\frac{\sin \theta_{L1}}{V_{L1}} = \frac{\sin \theta_{T1}}{V_{T1}} = \frac{\sin \theta_{L2}}{V_{L2}} = \frac{\sin \theta_{T2}}{V_{T2}} \dots (1-1)$$

Fig. 1에서 종파의 速度는 一般的으로 횡파의 速度보다 크기 때문에 ( $V_L \approx 2V_T$ ) Fig. 1과 같이 액체에서 고체로 초음파가 입사되는 경우  $\theta_{L1}$ 은  $\theta_{T2}$ 보다 항상 크게 된다. 이제  $\theta_{L1}$ 이 계속 증가하여  $\theta_{L2}$ 가  $90^\circ$ 가 되면  $\theta_{L1}$ 이 더 증가하여도 固体内에서 종파,  $L_2$ 는 傳播되지 않는다. 즉  $\sin \theta_{L1} > V_{L1}/V_{L2}$ 가 될때  $L_2$ 는 傳播되지 않으며 이 角  $\sin^{-1}(V_{L1}/V_{L2})$ 을 제1臨界角이라 한다. 이때 固体内에서는  $T_2$ 만이 存在하게 된다.  $\theta_{L1}$ 이 더욱 증가하여  $\theta_{T2}$ 가  $90^\circ$ 가 되면 고체내에서  $T_2$ 는 傳播되지 않으며 이때의 角  $\sin^{-1}(V_{L1}/V_{T2})$ 를 제2臨界角이라 한다. 이 제2臨界角보다 조금 큰 角度에서 表面波가 存在하게 되는데 이 表面波를 Rayleigh Wave라 하며  $\sin^{-1}(V_{L1}/V_R)$ 를 제3臨界角이라 한다. 여기에서  $V_R$ 는 Rayleigh Wave의 速度이며  $V_R \approx 0.9 V_T$ 이다.

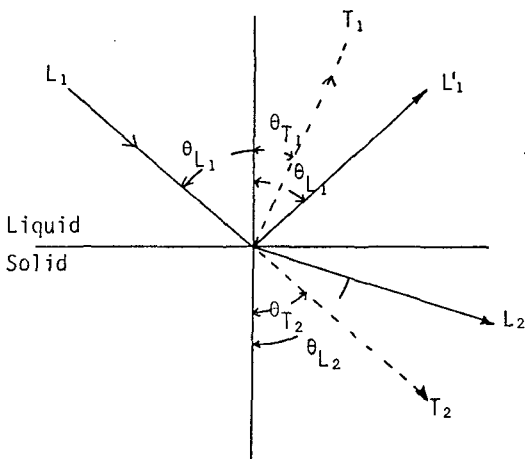


Fig. 1 Reflection and Refraction of incident wave at Liquid-Solid boundary

( $V_{L1}/V_{L2}$ )을 제1臨界角이라 한다. 이때 固体内에서는  $T_2$ 만이 存在하게 된다.  $\theta_{L1}$ 이 더욱 증가하여  $\theta_{T2}$ 가  $90^\circ$ 가 되면 고체내에서  $T_2$ 는 傳播되지 않으며 이때의 角  $\sin^{-1}(V_{L1}/V_{T2})$ 를 제2臨界角이라 한다. 이 제2臨界角보다 조금 큰 角度에서 表面波가 存在하게 되는데 이 表面波를 Rayleigh Wave라 하며  $\sin^{-1}(V_{L1}/V_R)$ 를 제3臨界角이라 한다. 여기에서  $V_R$ 는 Rayleigh Wave의 速度이며  $V_R \approx 0.9 V_T$ 이다.

### 2-2 超音波의 反射係數(Reflectivity)

Fig. 1. 과 같은 고체-액체 界面에서의 反射係數는 다음과 같은 함수로 주어진다. (1) (1) (1)

$$R = F(\theta_i : (Z_L)_i : (Z_L)_s : (Z_T)_s) \dots (2-1)$$

Fig. 2는 入射角에 따른 反射係數를 나타낸 그림이다. (2) 理想的(Homogeneous, No Attenuation)인 材質에서는 入射角  $\theta_i$ 가 제2臨界角을 넘어서면 R은 급격히 증가하여 所謂, 제3臨界角에 해당하는 角에 도달하면 거의 1.0에 가까워진다. (Fig. 2 實線)

그러나 實際(Inhomogeneous, attenuation) 材質에서는  $\theta_i$ 가 제3臨界角이 되면 곡선은 급격히 떨어져서 sharp dip을 나타낸다. (Fig. 2 點線), 이

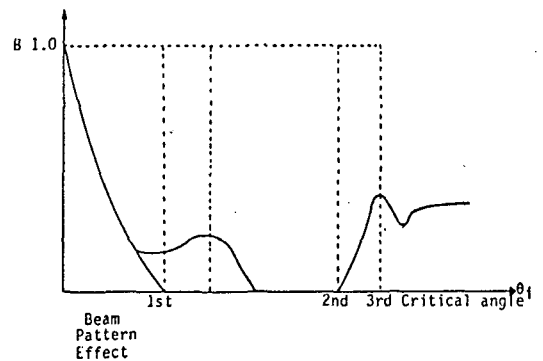


Fig. 2 Reflectivity Curve for Various Incident Angles

와같은 現象은 제 3臨界角에서 入射된 거의 全部가 表面波로 變하여 투과되기 때문이다. 이 제 3臨界角에서 dip의 모양은 重要的 意味를 갖고 있다. 즉 表面波의 減衰量이 증가할수록 dip의 깊이가 더욱 깊어지는데 波의 減衰量은 材質의 結晶粒 크기, 相構造, 殘留應力の 分布, 轉位密度 등과 관계가 있기 때문에 이 dip의 모양과 크기를 觀察함으로써 材質의 性質도 알 수가 있다.<sup>(16)(17)(18)</sup>

**2-3 超音波의 Backscattering**

一般的으로 理想的인 材質內에 入射된 超音波는 다음과 같은 法則에 의하여 反射되거나 투과하게 된다.

$$R+T=1 \dots\dots\dots (3-1)$$

그러나 實際 材質內로 入射된 超音波는 材質의 不均一性(Grains, Dislocations, Small Defects, Residual Stress Distributions)에 의하여 일부는 探觸子로 되돌아 오게 되는데 이런 波를 Ultrasonic Backscatter라고 한다.(Fig. 3)

따라서 實際 材質에서 材質內로 傳播되는 超音波 에너지는 다음과 같은 式에 의하여 反射되거나 투과된다.

$$R+T+B=1 \dots\dots\dots (3-2)$$

한편 Backscatter Energy, B는 투과되는 超音波 에너지, T가 클 수록 더욱 크게 될 것이고 한편 式 (3-1)에 의하여 B는 R이 減少 할 수록 크게 된다. Fig. 4는 제 3臨界角에서의 Ultrasonic Backscattered Energy, B를 보여준 그림이다. 이와같이 제 3臨界角에서 B가 最大로 되는 理由는 이 지점에서 入射된 거의 모든 超音波가 表面波로 變하여 투과되어 T가 최대로 되기 때문이다. 本 實驗에서도 이와같이 Backscattered Energy가 最大로 되는 제 3臨界角에서 應力變化에 따른 Backscattered Energy의 Amplitu-

de 크기를 觀察함으로써 相互關係를 調査, 檢討하였다.

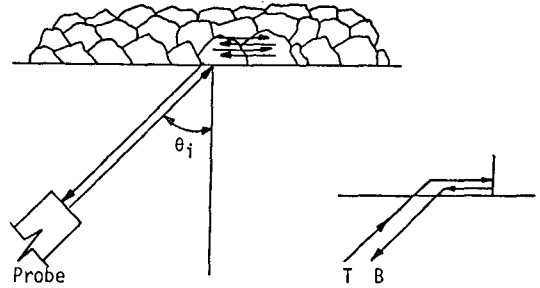


Fig. 3 Principle of Reversibility of Ultrasonic Paths. (Ultrasonic Backscatter Sound)

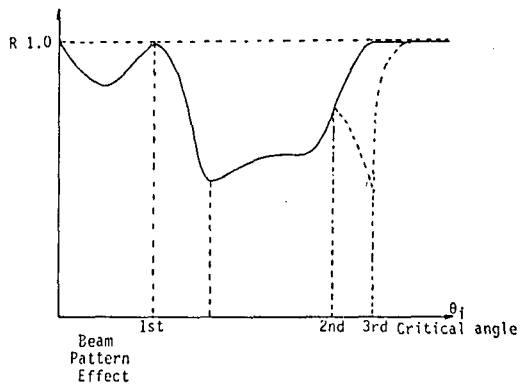


Fig. 4 Backscattered Ultrasound Energy at 3rd Critical Angle

**2-4 Ultrasonic Backscattered Beam Intensity**

Fig. 5.는 超音波 經路( $BC = 2a \cos \theta$ )를 따라 Backscatter 되어 超音波探觸子로 되돌아오는 超音波探觸子 및 試片의 相對의 位置를 一次元的으로 나타낸 그림이다. 이제 B點에서 表面波의 Beam intensity를  $I_0$ 라 하면 B에서  $x$ 만큼 떨어진 곳에서의 Beam Intensity는 다음 式과 같다.

$$I = I_0 e^{-\beta x} \dots\dots\dots (4-1)$$

여기서  $\beta$ 는 超音波의 減衰常数이다. 한편  $x$ 에

서의 微少變位量  $dx$ 까지의 超音波 減衰에 기인한 Beam Intensity의 減少量은

$$dI = -\beta I_0 e^{-\beta x} dx \dots\dots\dots (4-2)$$

와 같다.

이와같이  $dI$ 는 超音波가  $x$ 方向으로 進行 하면서 減少되는 Beam Intensity를 나타낸다. 따라서 Backscattered된 Beam Intensity는 이것과 비교하여 생각할 수 있다. 즉  $x$ 에서  $x+dx$ 까지의 영역에서의 Backscatter된 Beam의 Intensity는

$$dI_b = K_1 \beta I dx = K_1 \beta I_0 e^{-\beta x} dx \dots\dots\dots (4-3)$$

여기서  $K_1$ 은 비례상수

따라서  $B'C$  사이의 모든 點에서 Backscatter된 Beam의 Intensity는 다음과 같이 주어진다.

$$I_b' = K_1 \beta \int_0^{B'C} I_0 e^{-\beta x} dx \dots\dots\dots (4-4)$$

그런데 실제로 탐촉자가 받는 영역은  $B'C \cos \theta$ 이기 때문에 상기 式(4-4)는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$I_b' = K_1 \beta \int_0^{B'C \cos \theta} I_0 e^{-\beta x} dx = -K_1 I_0 [e^{-\beta x}]_0^{B'C \cos \theta} \dots\dots\dots (4-5)$$

$$\text{즉 } I_b' = K_2 (1 - e^{-\beta B'C \cos \theta}) \dots\dots\dots (4-6)$$

여기에서  $K_2 = K_1 I_0$

그런데  $B'C \approx a$ 이고,  $B$ 點과 같이 각기 다른 入射點에서의 Backscatter된 Beam Intensity를 平均하면

$$I_b = K_{III} (1 - e^{-\beta a \cos \theta}) \dots\dots\dots (4-7)$$

여기에서  $K_{III}$ 는 비례상수

式(4-7)을 전개하여 근사式으로 표시하면

$$I_b \approx K_{III} (1 - C1 - \beta a \cos \theta) - \beta^2 a^2 \cos^2 \theta / 2 \dots\dots\dots (4-8)$$

여기에서  $\beta$ 는 매우 작기때문에 1차 항만을 고려하면

$$I_b \approx \beta a \cos \theta \dots\dots\dots (4-9)$$

여기에서 減衰常數,  $\beta$ ,는 材質의 応力과 關係가 있고 초음파 Backscatter Intensity,  $I_b$ ,와 비례하기 때문에 재질에서 応力變化는 Backscatter Intensity,  $I_b$ ,와 비례적인 關係가 成立할 것이다. 한편  $\beta$ 는 結晶粒子크기, 殘留應力の 分布, 轉位密度 등 材料의 特性과 關係가 있기 때문에<sup>(19)(20)(21)</sup> 이들 變化에 의한 Ultrasonic Backscattered Energy를 관측함으로써 材料의 特性을 評價할 수 있을 것이다.

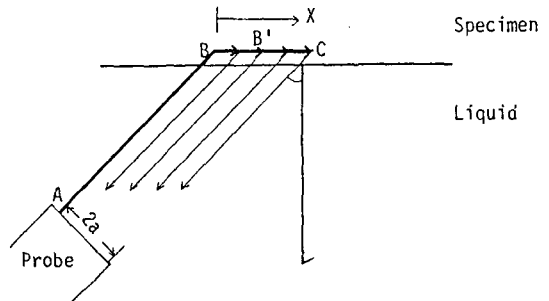


Fig. 5 Relative Positions of probe and specimen for Angle of Incidence equal to the 3rd Critical Angle producing Rayleigh waves.

### 3. 實 驗

#### 3-1 試驗片 및 試驗裝備

本 實驗에 使用된 試驗片은 각기 다른 結晶粒子 크기를 갖는 공업용 Aluminium으로서 製作된 18개의 引張試驗片을 使用하였으며 平均 結晶粒子 크기를 測定하기 위하여 Vernier microscope를 利用하여 gage length 內에 있는 結晶粒子의 數를 세어 計算하는 方法을 使用하였다. 各 試驗片의 規格 및 測定된 平均 結晶粒子 크기는 Table 1.과 같다. 또한 本 實驗에 使用한 裝備는 試驗片에 應力을 주기 위하여 Hounsfield Tensorm-

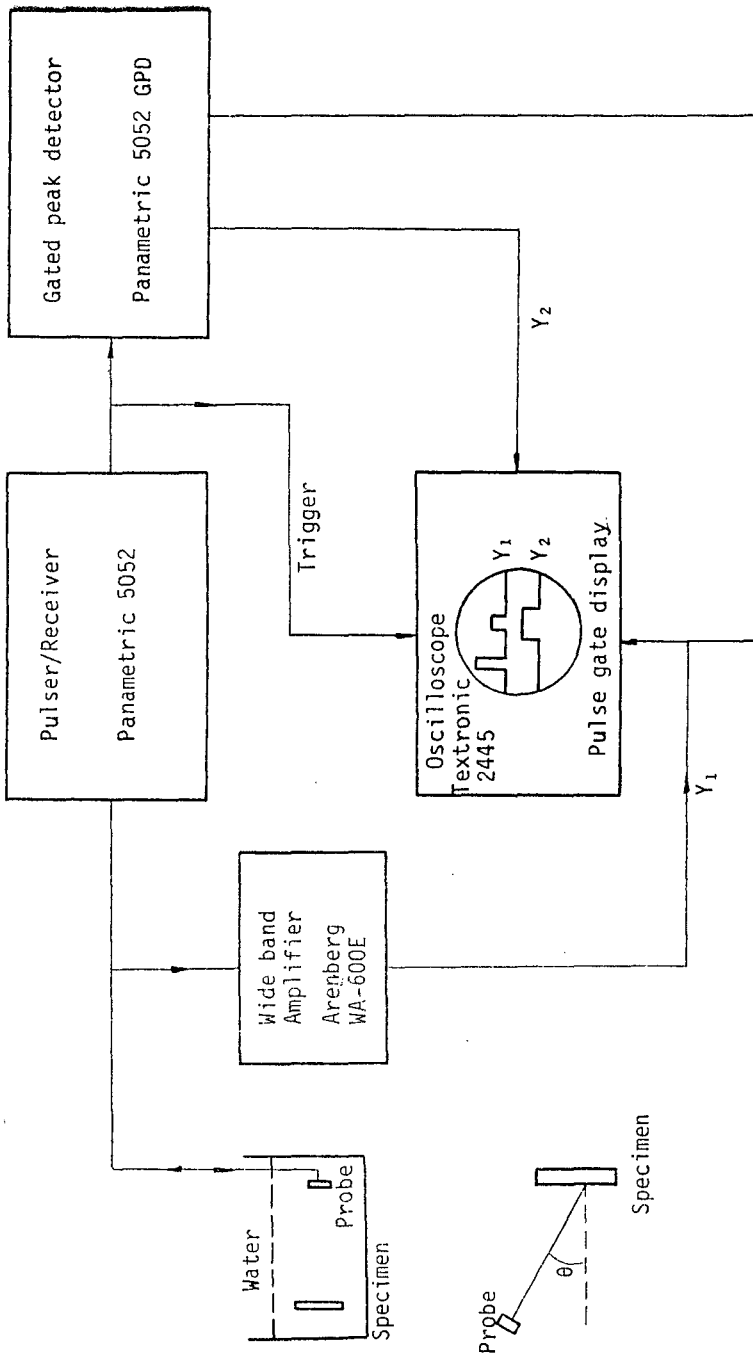


Fig. 6 The block diagram for measuring the Backscattered energy.

eter를 사용하였으며 이때 各 応力에 따른 Backscatter Signal Amplitude를 測定하는 데에는 Pulser/Receiver Gated peak detector, Amplifier, Oscilloscope 및 5MHz, 1/2" R 超音波 探觸子를 利用하였다. 本 實驗을 위한 개략도는 Fig. 6.과 같다.

Table. 1 The geometry of specimen and grain sizes.

Specimen No.	Gage Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Average Grain diameter (mm)
1	45.2	14.0	5.7	0.25
2	43.8	14.0	5.6	0.53
3	42.1	14.0	5.7	0.62
4	45.1	13.0	2.8	0.81
5	43.5	13.5	4.2	0.86
6	46.0	14.1	2.9	1.18
7	44.0	14.0	4.3	1.53
8	47.0	13.8	5.7	1.52
9	27.2	9.6	5.8	2.39
10	21.5	9.7	2.8	11.80
11	27.8	9.9	5.9	9.50
12	25.3	9.9	6.0	7.74
13	21.5	9.2	2.9	7.79
14	24.8	9.8	6.0	4.54
16	24.0	9.5	6.0	3.36
15	23.7	9.9	5.9	2.60
17	24.8	9.9	6.0	3.10
18	25.8	8.6	5.0	0.41

### 3-2 實驗方法

實驗은 물을 接觸媒質로 使用한 水浸法을 利用하였으며 各 試驗片을 Hounsfield Tensormeter에 上·下 1개씩(上: dummy specimen, 下: test specimen) 設置한 후 下部에 設置된 試驗片을 immersion tank에 넣어 實驗하였다. 正確한 Backscattered Signal Amplitude를 測定하기 위하여 試驗片表面과 探觸子面과는 수평을 유지하였고( $0^\circ$  각도에서), 이때 超音波 入射角은 힘을 가하지 않은 초기상태에서 제3臨界角 부근의

Backscattered Signal Amplitude가 最大가 되는 角度를 使用하여 實驗하였다. 이와같이 0 kgf 応力하에서 最大의 Backscattered Signal Amplitude를 設定한후 Tensormeter를 利用하여 等軸方向으로 試驗片의 두께에 따라 0kgf에서 最大 500kgf까지 25kgf 또는 50kgf 간격으로 適用하면서 応力 變化에 대한 Backscattered Signal Amplitude 變化를 測定하였다.

### 4. 實驗結果 및 考察

각기 다른 結晶粒子 크기를 갖는 Aluminium

試驗片에서 応力變化에 따른 Ultrasonic Backscattered energy의 變化를 同一한 條件으로 定量的으로 보기 위하여 상기 適用 힘을 試驗片의 單位 面積당 받는 応力( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )으로 換算하였다. 즉, 初期 試驗片에 주어진 힘을 돌로 나누고(上, 下 2개의 試驗片) 各 試驗片의 面積으로 나누어 實際 試驗片이 받는 応력을 計算하였다. 上記 方法에 의하여 얻어진 計算 結果를 Oscilloscope上에서 얻어진 Backscattered Signal Amplitude에 대하여 Plotting하여  $0\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $0.5\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $1.0\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $1.5\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $2.0\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $2.5\text{kg}/\text{mm}^2$ ,  $3.0\text{kg}/\text{mm}^2$ 에 대한 Backscattered Signal Amplitude를 graph上에서 얻었다.

Fig. 7~Fig.10은 上記 7個중 4個의 応力에서 結晶粒子 크기에 따른 Backscattered Signal Amplitude를 보여준 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 Backscattered Signal Amplitude는 주어진 応力에서 結晶粒子 크기가 커짐에 따라 減少하는 傾向을 알 수가 있다. 이와같은 것은 Ultrasonic Scattering 理論<sup>22,23</sup>과 견주어 생각할 수 있는데, 즉 本 實驗에서 使用된 超音波의 波長(0.59 mm)이 대부분 結晶粒子 크기 보다 적은 領域이기 때문에 이 경우 超音波의 散亂은 Diffusive Scattering 領域에 해당되어 Scattering attenuation Coefficient,  $\alpha_s$ 는 結晶粒子 크기(D)에 反

比例하고 式(4-9)에서 보는 바와같이 Backscattered energy는 超音波 減衰와 比例하기 때문에 Backscattered Amplitude도 結晶粒子 크기에 反比例하기 때문이라 思料된다. Fig. 1은 이들 data를 最小자승법을 이용하여 直선으로 Best fitting시킨 그림이다.

그림에서 보는 바와같이 Backscattered Amplitude는 結晶粒子 크기가 增加할 수록 減少하였으며 同一한 結晶粒子 크기를 갖는 試驗片에서 適

用應力이 增加할 수록 增加하는 傾向을 알 수 있다. 다만 다소 data가 Scattering 되는 이유는 應力を 받는 材質에서 Ultrasonic Backscattering의 主된 要因은 結晶粒子 크기 뿐만 아니라 Surface roughness, 内部에 存在하는 dislocation의 分布, 結晶粒子의 方向性 등이라 생각되며 보다 正確한 이들 相互關係에 대한 分析을 위하여서는 위와같은 條件 등을 考慮하여 實驗 함으로써 可能하다고 思慮된다.

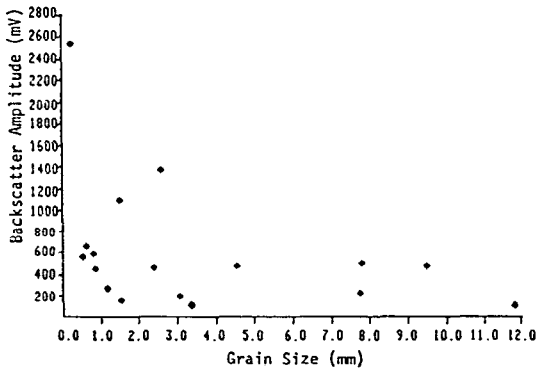


Fig. 7 The Plots of Absolute Backscatter Amplitude Versus Grain Size at 0.0 kg/mm<sup>2</sup>

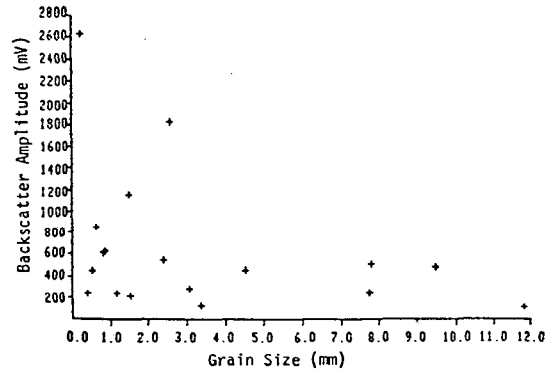


Fig. 9 The Plots of Absolute Backscatter Amplitude Versus Grain Sizes at 2.0 kg /mm<sup>2</sup>

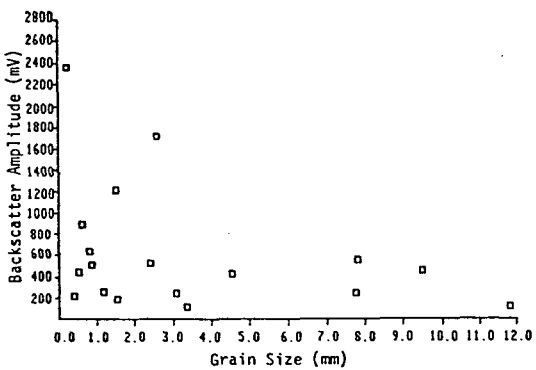


Fig. 8 The Plots of Absolute Backscatter Amplitude Versus Grain Sizes at 1.0 kg/mm<sup>2</sup>

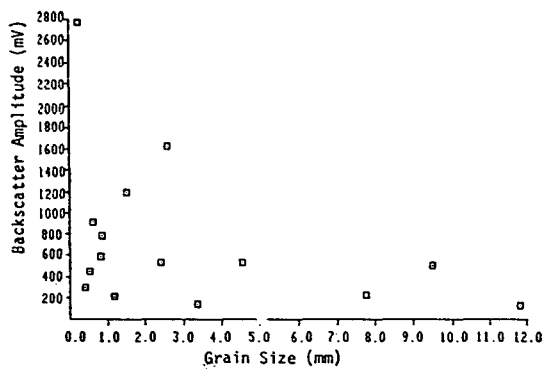


Fig.10 The Plots of Absolute Backscatter Amplitude Versus Grain Sizes at 3.0 kg/mm<sup>2</sup>



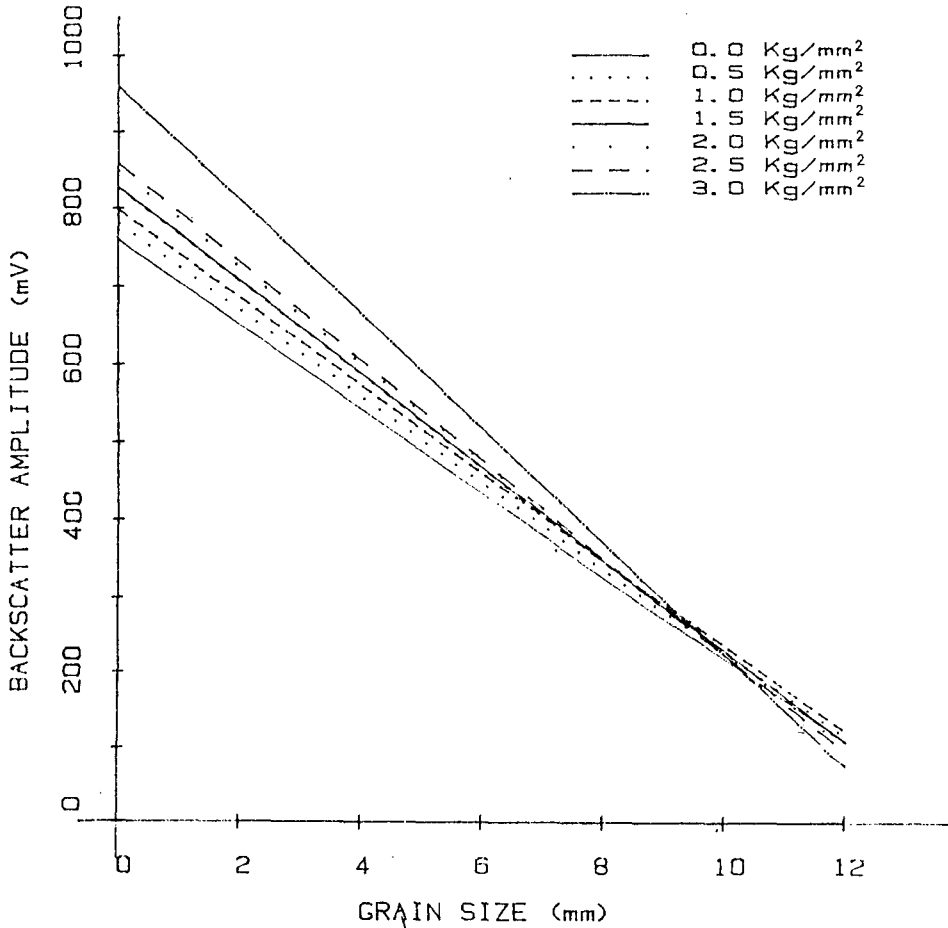


Fig. 11 The Relationships between Backscatter Amplitude & Grain Size at 0.0 kg/mm<sup>2</sup>, 0.5 kg/mm<sup>2</sup>, 1.0 kg/mm<sup>2</sup>, 1.5 kg/mm<sup>2</sup>, 2.5 kg/mm<sup>2</sup>, 3.0 kg/mm<sup>2</sup>

### 5. 結 論

Rayleigh critical angle 領域에서 Ultrasonic - Backscattering을 利用한 応力 觀測은 超音波를 利用한 새로운 応力 觀測 機構로서 既存 超音波를 利用한 応力 觀測 方法보다 簡單 하고 精密하게 適用되었다.

本 研究에서는 각기 다른 結晶粒子 크기를 갖는 Aluminium 試驗片에 대하여 適用 応력과 Ultra-

sonic Backscattered Energy와의 相互關係에 대하여 調査, 驗討한 바, 本 實驗을 통하여 얻은 結論은 다음과 같다.

應力變化에 따른 Ultrasonic Backscattered Energy는

1) 同一한 應力에서 結晶粒子 크기가 增加함에 따라 減少하였으며 同一한 結晶粒子 크기를 갖는 材質에서 應力이 增加할 수록 增加하였다.

2) 荷重을 받는 材質에서 Ultrasonic - Back-

scatter 방법을 이용한 応力觀測은 可能 하며 계속적인 研究를 통하여 보다 具体的으로 규명함으로써 새로운 応力觀測 機構로서 그 応用이 期待된다.

### 參考文獻

- (1) W. P. Mason and H. J. Meskimen., J. Acous. Soc. Am., 19. (1947), p. 464
- (2) E. P. Papadakis., J. Acous. Soc. Am., 32 (1960), p. 1628
- (3) E. P. Papadakis., J. Appl. Phys., 42 (1971). p. 2990
- (4) E. P. Papadakis., J. Appl. Phys, 30 (1959). p. 1463
- (5) E. P. Papadakis., J. Acous, Soc. Am., 33 (1961). p. 1616
- (6) V. M. Merkulova., Defectroscopiya., 2 (1970), p. 111
- (7) R. L. Smith., Ultrasonics., Sep(1982), p. 211
- (8) A. Vary., Mater. Eval., 36(1978). p. 55
- (9) A. Vary and D. R. Hill, Mater. Eval., 41 (1983), p. 309
- (10) A. V. Clark Jr. and J. C. Moulder, Ultrasonic., Nov. (1985), p. 253
- (11) B. J. Ratcliffe., British. J. NDT, Sep (1969). p. 148
- (12) K. W. Andrews and R. L. Keightley., Ultrasonic, Sep (1978), p. 205
- (13) B. Bridge and M. P. I Smail., NDT Communications., (1984), p. 155
- (14) W. G. Mayor, J. Appl. phys. 34 (1963). p. 909
- (15) L. S. Fountain., J. Acous. Soc. Am, 42(1967), p. 242
- (16) F. L. Becker and R. L. Richardson., J. Acous. Am., 51(1971), p. 1609
- (17) F. L. Becker and R. L. Richardson, J. Acous. Soc. Am, 45(1969), p. 793
- (18) R. S. Sharp., Research technique in non-destructive testing, p. 91~131. Academic press(1970)
- (19) A. B. Bhatia and R. A. Moore., J. Acous. Soc. Am, 31(1959), p. 1140
- (20) W. P. Mason and M. J. Meskimen., J. Appl. Phys., 19(1948), p. 940
- (21) E. P. Papadakis., J. Appl. phys., 35 (1964), p. 1474
- (22) E. P. Papadakis., J. Acous, Soc. Am., 37(1965). p. 703
- (23) I. Roman and M. Oron., J. Mater, Science. 9 (1974), p. 630
- (24) FRED. R. ROLLINS, JR., Mater. Eval, 24(1966) p. 683