

ALSI4140鋼의 超音波減度와 機械的 性質의 相互關係에 關한 研究

·朴宗賢*, 郭慶眞*, 朴大英*, 宋振泰**

*韓國 에너지研究所

**漢陽大學校

1985年9月11日 接受

A Study on the Correlation Between Ultrasonic Attenuation and Mechanical Properties in ALSI 4140 Steel

C.H.Park, K.J.Kwak, D.Y.Park, J.T.Song

ABSTRACT

A study has been made on the correlation between ultrasonic attenuation and mechanical properties with different prior austenite grain size.

It was found that ultrasonic attenuation is increased with increasing grain size, decreasing yield strength and increasing charpy impact energy value for ALSI 4140 steel.

1. 序 論

오늘날 非破壞的인 方法에 의하여 材料들의 微細構造의 特性을 分析하고 試驗하는 것이 活用化되고 있으며 그 重要度は 점차 增大되고 있다. 실제 原子力發電所나 石油化學 plant의 數가 늘어남에 따라 이들 主要 構造物에 대한 非破壞檢査가 활발히 要求되고 있는 실정이다. 特히 材料의 機械的 特性은 대개 材料의 微細構造에 따라 決定되며 이러한 機械的 特性 및 微細構造는 주로 破壞試驗 및 顯微鏡組織을 통하여 알 수 있다. 그러나 材料를 破壞하지않고 직접 材料特性을 測定할 수 있는 非破壞的 方法을 利用할 수 있다면 이러한 方法은 간단하면서도 효율적인 方法이 될 것이다. 그리하여 超音波가 材料内部를 進行할 때 材料의 微細構造에 따른 超音波의 傳波特性에 關한 非破壞研究가 많은 研究者들에 의해서 행하

여졌다. 1945년까지는 超音波를 利用한 非破壞研究는 주로 固体의 彈性係數를 測定하는 研究였으나 이러한 研究에 利用된 超音波의 周波數는 비교적 낮은 것이었고 보다 높은 周波數를 利用한 研究는 활발하지 못하였다. 1946년 Fire stone⁽¹⁾은 金屬의 結晶粒子크기에 따라서 超音波 特性이 상이하게 나타난다는 사실을 定性的으로 보고하였고, 1947년에 Mason과 McSkimin⁽²⁾은 最初로 2~15 MHz의 周波數 영역에서 Rayleigh⁽³⁾의 音波散亂理論을 근거로 하여 多結晶體의 超音波減衰 研究에서 超音波의 減衰는 結晶粒子의 體積에 비례하고 周波數의 4제곱에 비례한다는 理論을 체계화 하였다.

그후, 結晶粒子가 超音波減衰에 미치는 影響에 關해서는 많은 研究가 進行되었고⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 이와 병행하여 金屬의 微細構造에 따른 機械的 特性과

超音波減衰와의 相互關係에 關한 研究도 進행되었
다. (7)(8)

따라서, 本 研究는 超音波를 使用한 非破壞的
方法의 活用을 넓히고져, 특히 原子力 發電所의
壓力容器로 使用되는 材質과 化學成分이 類似한
構造用 合金鋼인 ALSI 4140 鋼에 대하여 prior
austenite 結晶粒子크기를 조절한후 結晶粒子크
기에 따른 超音波減衰現象과 항복강도 및 충격인
성과 같은 機械的 特性의 相互關係를 調查, 檢討하
였다.

2. 實 驗

2-1 試 料

使用된 試料는 ALSI 4140 鋼으로서 組成은
Table 1 과 같다. 인장시험 및 충격시험용 試片
의 規格은 Fig.1 과 같으며 ASTM 規格에 의거
제작하였다. 上記 試片의 結晶粒크기를 變化시키
기 위하여 austenitizing temperature 를 달
리하여 熱處理한 후, 이들의 顯微鏡組織, 超音波
減衰, 引長試驗 및 충격시험에 使用하였다.

2-2 熱處理

모든 試片을 불림처리 하기 위하여 1000 °C 에
서 3시간동안 加熱후 空冷하였다. 이와같은 試
片들의 prior austenite 粒子크기를 조절하기 위

Table 1. Chemical Composition of AISI
4140 (Wt.%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
0.36	0.27	0.72	0.015	0.008	0.95	0.19

하여 870 °C, 920 °C, 970 °C에서 各各 1시간 加
熱하였고 結晶粒子의 크기를 더욱 크게하기 위하
여 1020 °C에서 2시간, 1070 °C에서 2시간 加熱
후 油冷을 하였다.

2-3 顯微鏡組織觀察 및 結晶粒子크기의 測定
顯微鏡組織觀察을 위하여 引張試驗 및 衝擊試驗
을 행한 試驗片의 一部를 절단하여 emery pap-
er 및 0.3 μ, 0.5 μ의 Al₂O₃로 연마한 다음
etching 시켰다. prior austenite 結晶粒界를
觀察하기 위한 etchant 로서는 100 ml 과포화
picric acid 에 0.1 ml Hcl, 25 ml ethanol
및 Teepol 1 g을 녹여 혼합한 것을 使用하였으
며 50 °C에서 약 1분 30 초 동안 etching시켰다.
各 試片들의 prior-austenite 結晶粒子크기는
100 倍의 배율로 ASTM E112 에 의하여 各 試
片의 平均結晶粒子크기를 決定하였다. 또한 常
溫에서의 組織은 3% nital 부식용액으로 etch-
ing 시킨후 400 倍의 배율로 觀察하였다.

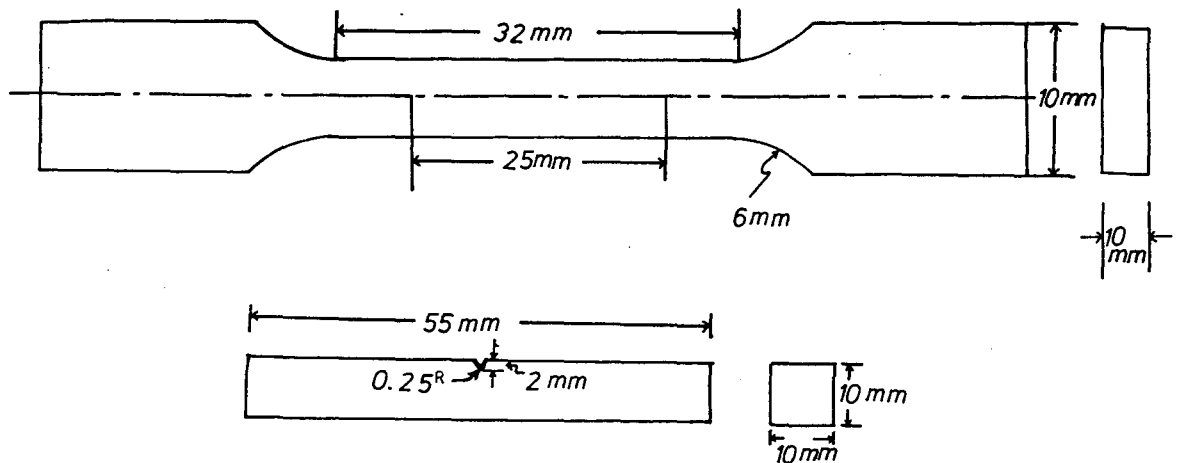


Fig.1 . Tensile and Impact Test Specimen

2-4 超音波減衰量の測定

超音波減衰量の測定 방법은 超音波探觸子에 buffer rod (7.5% R, 1.0% L)를 부착하여 buffer 및 試片의 底面에서 反射되는 超音波信號를 frequency spectrum analyzer (H/P 85.57A)로 各 周波數에서 振幅을 測定하여 超音波減衰量を 計算하였다. (9) 상기 frequency spectrum analyzer 로서는 5 KHz 에서 200 MHz 범위의 周波數 영역에서의 測定이 가능하나 本 實驗에서는 1 MHz 에서 20 MHz 周波數영역 振幅을 測定하여 超音波減衰量を 計算하였다. 이러한 frequency spectrum analyzer 方法에 대한 개략도는 Fig.2와 같다. 그림에서 pulser-receiver gate unit 는 電氣的인 信號를 超音波探觸子에 보내어 探觸子에서 超音波를 發生하게 하고 探觸子에서 다시 電氣的인 信號로 바뀌어진 反射波를 증폭 및 gating 하는 역할을 한다. 또한 이러한 증폭된 信號들을 oscilloscope 에 연결시켜 各 反射된 信號들의 pulse 가 進行시간에 따라 分離되어 나타나도록 하였으며 gate 회로를 조정하여 원하는 pulse 信號에 대한 frequency spectrum 을 얻을 수 있도록 하여 各 周波數에 다른 振幅을 測定하였다. 本 實驗에 使用된 超音波 探觸子의 지름은 1/4 inch, 공칭 周波數는 22 MHz 이다.

위와 같은 pulse-echo 方法에서 探觸子에서 發生되는 超音波의 beam 은 일정한 角度로 퍼지게 때문에 測定된 振幅은 diffraction correction 하여야 한다. (10) 따라서 Fig.2에서와 같이 buffer 의 저면에서 反射된 信號A와 試片의 저면에서 反射된 B와 C의 振幅을 diffraction correction 하기 위하여 다음 式을 利用하여 S_A, S_B, S_C 를 計算하였다.

$$\left. \begin{aligned} S_A &= 2LV/a^2f \\ S_B &= 2LV/a^2f + 2\ell v/a^2f \\ S_C &= 2LV/a^2f + 4\ell v/a^2f \end{aligned} \right\} \dots (1-1)$$

여기에서 L은 buffer의 길이, V는 buffer에

서의 超音波速度, ℓ 은 試片의 두께, v 는 試片에서의 超音波速度, a 는 探觸子의 반경 및 f 는 超音波의 周波數이나 다음, frequency spectrum analyzer에서 各 周波數에 따라 測定된 A, B 및 C 信號의 振幅을 測定하고 교정된 A_0, B_0 및 C_0 를 다음 式을 利用하여 計算하였다.

$$\left. \begin{aligned} dB(S_A) &= dB_A = 20 \log(A_0/A) \\ dB(S_B) &= dB_B = 20 \log(B_0/B) \\ dB(S_C) &= dB_C = 20 \log(C_0/C) \end{aligned} \right\} \dots (1-2)$$

여기서 dB_A, dB_B 및 dB_C 는 各 測定된 振幅과 교정된 振幅의 비율을 decibel로 나타낸 것이고 이것은 이미 計算된 S_A, S_B, S_C 값을 사용하여 dB와 $S^{(15)}$ 곡선에서 求하여진다. 위와 같이 計算된 各 信號들의 振幅 A_0, B_0 및 C_0 를 다음 式에 적용하여 超音波減衰量, α 를 計算하였다.

$$R = \{ \tilde{A}_0 \tilde{C}_0 / (\tilde{A}_0 \tilde{C}_0 - 1) \}^{1/2} \dots (1-3)$$

$$\alpha = \{ C \ln(R/\tilde{C}_0) \} / 2\ell \dots (1-4)$$

여기에서 $\tilde{A}_0 = A_0/B_0, \tilde{C}_0 = C_0/B_0$ 이며 ℓ 은 試片의 두께이다.

2-5 機械的性質의測定

試片의 항복강도 및 최대인장강도를 測定하기 위하여 MTS-dynamic 10 ton 容量의 장치를 使用하여 常溫에서 引張試驗을 실시하였다. 이때 gauge length 25 mm를 기준으로 strain rate 는 $2.2 \times 10^{-3} / \text{sec}$, cross head speed 는 0.55 mm/sec로 하여 試驗하였다. 한편 충격시험은 Fig.1에 나타난 바와 같이 ASTM, 23-72 Charpy V-notch 충격시험을 使用하여 常溫에서 各 各 3회 測定후 그들의 平均値를 求하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3-2 超音波減衰와 機械的性質

photo.1은 各 溫度에서 austenitizing한 試片에 대한 prior austenite 結晶粒子크기를 觀測한 사진이다. 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 austenitizing 溫度가 높을수록 prior auste-

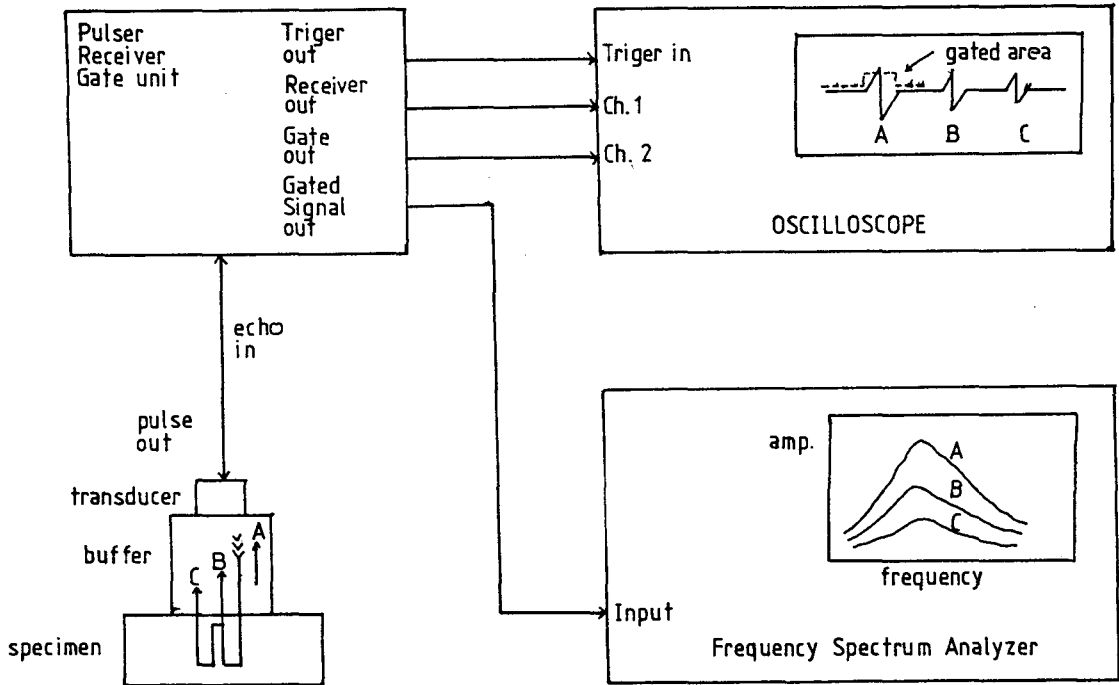


Fig. 2 Block diagram of electrical and ultrasonic system for spectrum analyzer of echo in buffer/specimen system

nite 結晶粒子 크기는 현저히 增加하였으며. 結晶粒子的 平均지름 (\bar{D}) 은 Fig.3 에서와 같이 austenitizing 溫度가 870 °C, 920 °C, 970 °C, 1020 °C 및 1070 °C로 增加함에 따라 각각 22.3 μm , 30.6 μm , 49.0 μm , 61.3 μm , 98.0 μm 로 測定되었다. Photo.2는 各 austenitizing 溫度에서 유냉처리 시킨 martensite 微細組織사진이다. austenitizing 溫度가 높은 것 일수록 prior austenite 結晶粒子內的 martensite lath의 packet 크기가 커짐을 알 수 있다. 이들 oil quenching 시킨 微細組織內에는 잔류 austenite가 存在할 것이라 생각되나 quenching 시 變態된 martensite 量 보다 잔류 austenite 量은 훨씬 적게 存在하는데 martensite lath는 超音波減衰에 영향을 미치나 그 영향은 극히 작고 이보다 훨씬 적게 存在하는 잔류 austenite가 超音波減衰에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있기 때문에 별로 문제가 없는 것으로 사료된다.(11)

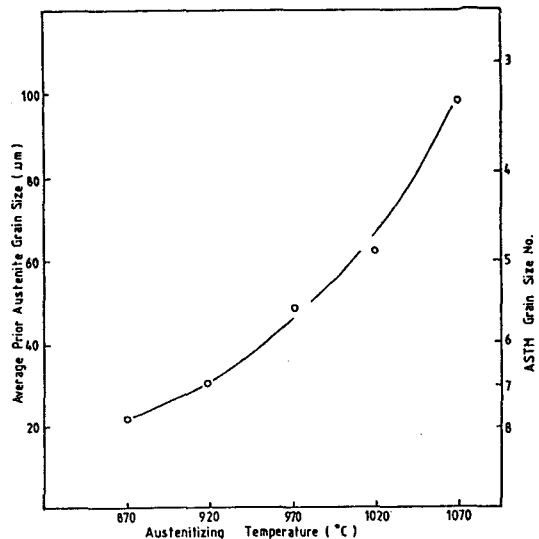


Fig.3 Average Prior Austenite Grain Size vs Austenitizing Temperature

3-2 超音波減衰와 機械的 性質

Fig.2의 frequency spectrum Analyzer를 利用하여 各 prior austenite 結晶粒子 크기가 다른 試片들에 대한 超音波減衰量을 前述한 式들

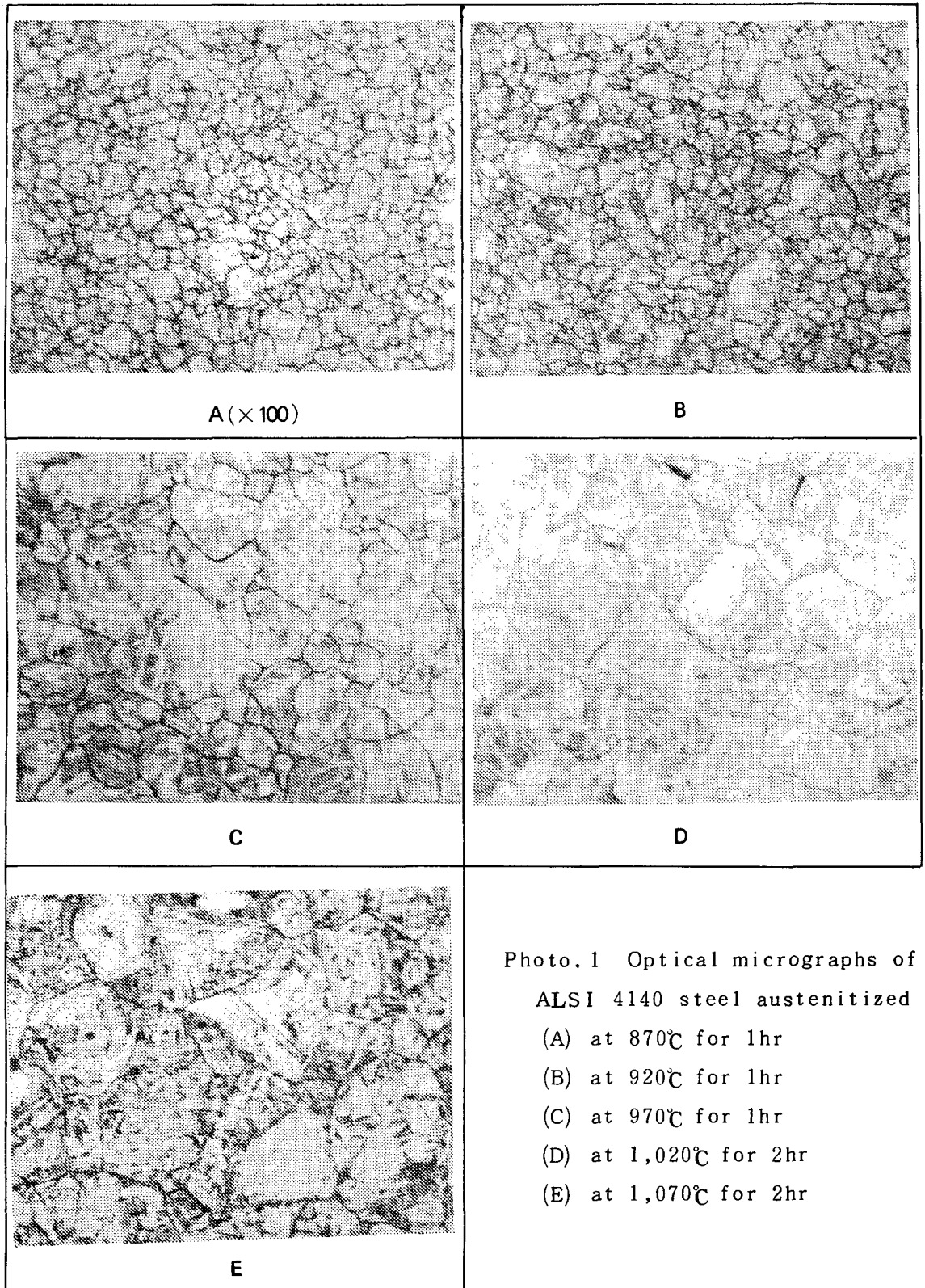


Photo.1 Optical micrographs of
ALSI 4140 steel austenitized
(A) at 870°C for 1hr
(B) at 920°C for 1hr
(C) at 970°C for 1hr
(D) at $1,020^{\circ}\text{C}$ for 2hr
(E) at $1,070^{\circ}\text{C}$ for 2hr

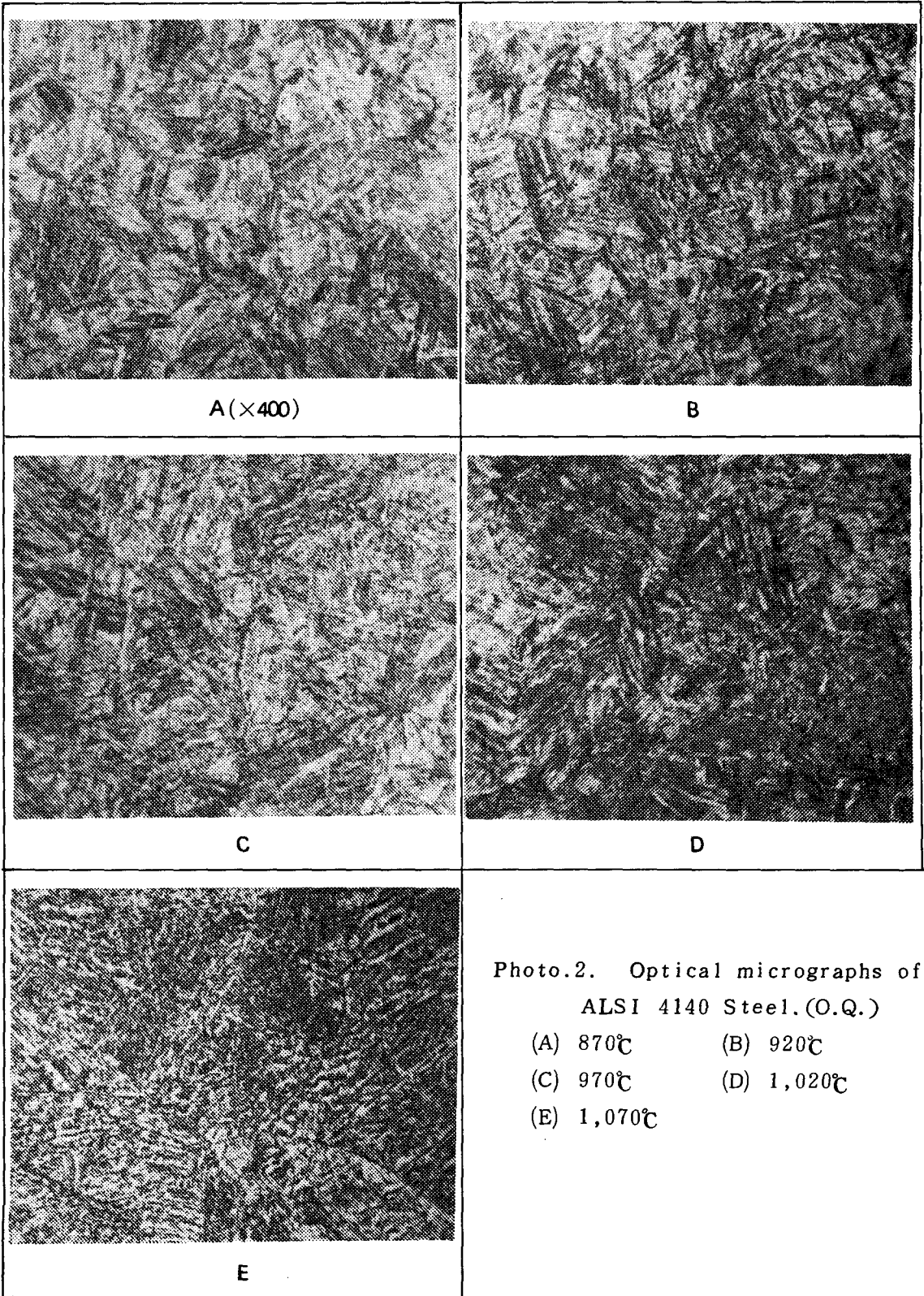


Photo.2. Optical micrographs of
ALSI 4140 Steel. (O.Q.)

- (A) 870°C (B) 920°C
(C) 970°C (D) 1,020°C
(E) 1,070°C

을 사용하여 計算하였다. photo.3은 oscilloscope 상에 나타난 各 試片의 buffer rod 底面 (A) 및 試片의 底面에서 1회 (B), 및 2회 (C) 反射된 超音波 pulse 를 나타낸 것이다. Fig.4는 prior austenite 結晶粒子 크기에 따른 超音波 減衰와 超音波 周波數와의 關係를 나타낸 것이다. 同一한 結晶粒子를 갖는 試片에서 超音波 周波數가 增加할수록 超音波 減衰量은 增加함을 알 수 있다. Fig.5는 prior austenite 結晶粒子 크기가 커짐에 따라 超音波의 減衰는 增加함을 나타낸 것이다. 이와 같이 超音波 減衰量이 結晶粒子 크기에 따라 變하는 것을 볼때 prior austenite 結晶粒子가 주된 超音波 減衰의 原因이며 超音波 散亂體로 作用하고 있다고 사려된다. 이것은 多結晶體에서 進行하는 超音波 에너지의 減少, 즉 超音波의 減衰는 散亂體인 結晶粒子의 크기와 超音波 周波數에 依存한다는 研究報告 (12)와 定性的 一致를 보이고 있다. Fig.6은 prior

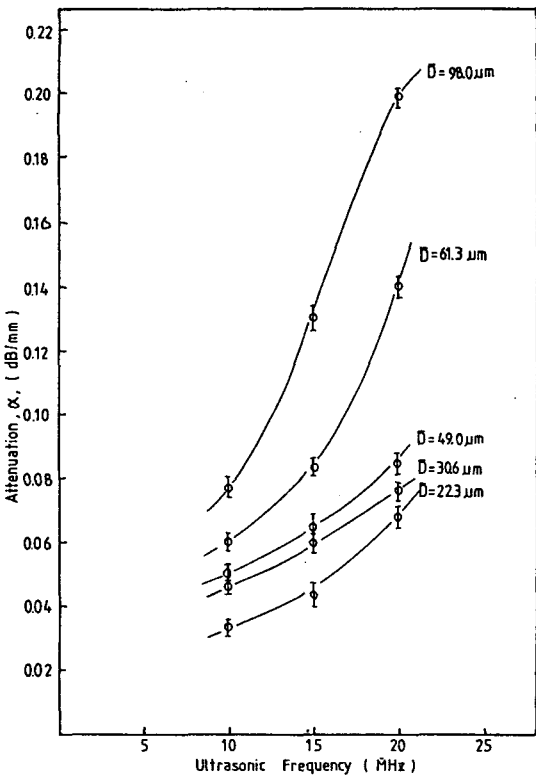


Fig. 4 Relation between Ultrasonic Attenuation and Frequency for Various Prior Austenite Grain Sizes

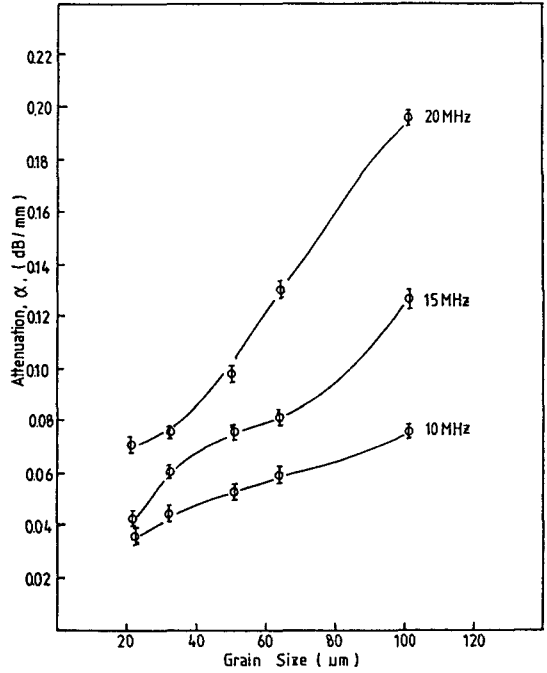


Fig. 5 Relation Between Prior Austenite Grain Size and Ultrasonic Attenuation at 10, 15 and 20 MHz of Longitudinal Ultrasonic Frequencies

austenite 結晶粒子 크기에 따른 항복강도 및 최대인장강도를 나타낸 것이다. prior austenite 結晶粒子가 22.3 μm, 30.6 μm, 61.3 μm, 98.0 μm로 增加함에 따라 항복강도는 119.3 kg/mm², 116.0 kg/mm², 109.5 kg/mm², 102.0 kg/mm², 76.8 kg/mm²로 減少되었으며 최대인장강도 역시 127.5 kg/mm², 126.0 kg/mm², 122.5 kg/mm², 116.9 kg/mm², 88.3 kg/mm²로 減少하였다. 이러한 現象은 quenching에 따르는 martensite 變態등 여러가지 強化要因등을 고려하여야 할 것이나 一般的으로 Hall-petch 式에 關係한 것이라 사료된다. Fig. 7은 各 周波數에 따른 超音波 減衰量과 항복강도의 相互關係를 나타낸 것이다. 여기서 보는 바와 같이 항복강도가 增加할수록 超音波 減衰量은 減少하였으며 同一한 항복강도를 갖는 試片에서는 超音波 周波數가 增加할수록 超音波 減衰量은 현저히 增加됨을 보여 주고 있다. 이는 B. R. Patterson 과 C. E. Bates 가 gray cast iron에 대하여 研究한 結果 (13)와 같은 傾向을 보여 주고 있다. Fig. 8

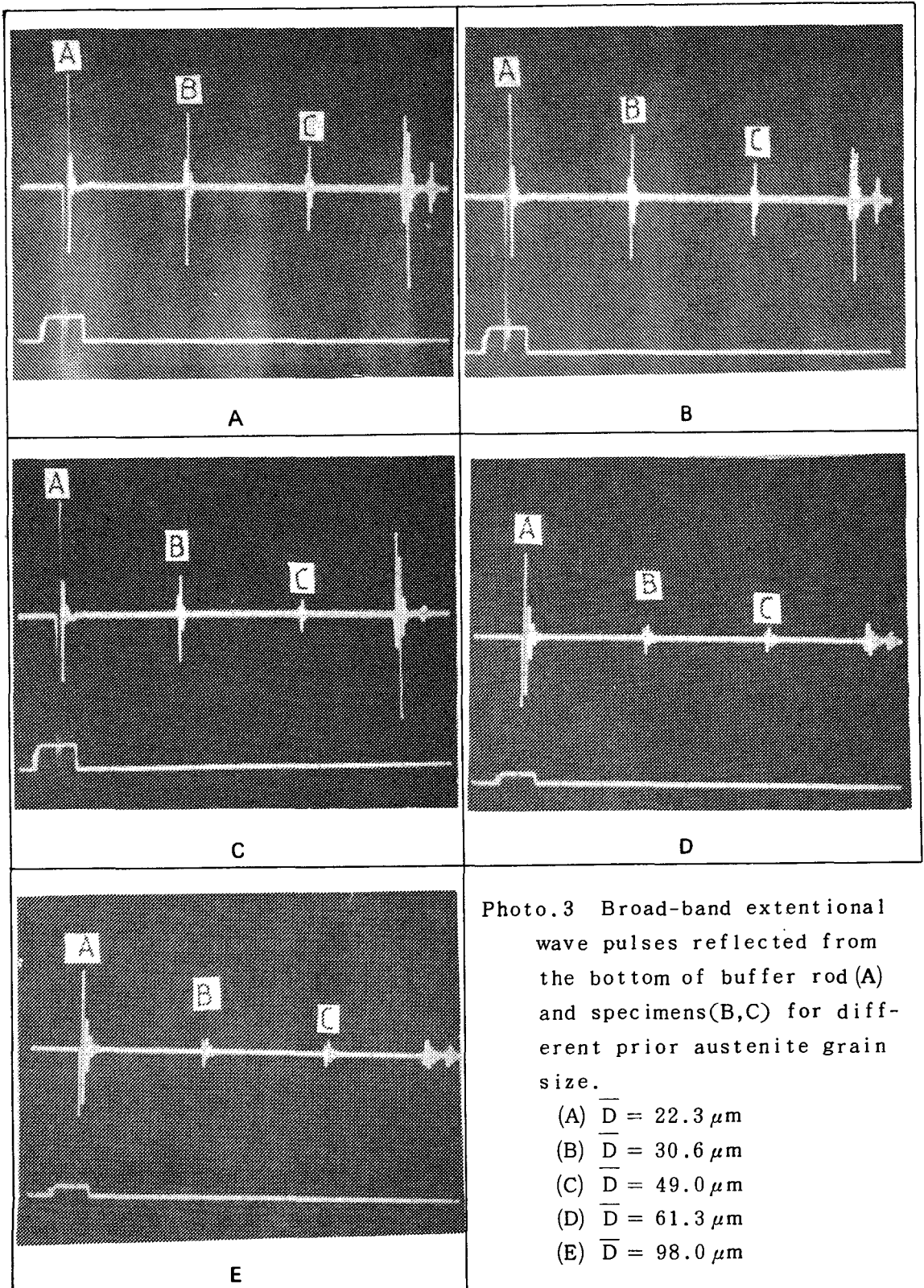


Photo.3 Broad-band extentional wave pulses reflected from the bottom of buffer rod (A) and specimens(B,C) for different prior austenite grain size.

- (A) $\bar{D} = 22.3 \mu\text{m}$
- (B) $\bar{D} = 30.6 \mu\text{m}$
- (C) $\bar{D} = 49.0 \mu\text{m}$
- (D) $\bar{D} = 61.3 \mu\text{m}$
- (E) $\bar{D} = 98.0 \mu\text{m}$

은 各 周波數에 따른 超音波減衰量과 Charpy 충격 energy 와의 相互關係를 나타낸 것이다.

여기서 보는 바와 같이 prior austenite 結晶粒子크기가 커짐에 따라 Charpy 충격 energy 는 $0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$, $0.95 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$, $1.15 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$, $1.45 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$, $2.04 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$ 으로 增加하였으며 Charpy 충격 energy 가 增加할 수록 超音波減衰量은 增加하였다. 또한 同一한 Charpy 충격 energy 를 갖는 試片에서 超音波周波數가 增加함에 따라 超音波減衰量은 增加함을 보이고 있다. 이는 E.P.Papadakis⁽¹⁴⁾가 S.A.E 3140 과 4150 steel 에서 보여준 연구결과와 定性的 一致를 보여 주고 있으며 이들 相互關係는 보다 더 具體的으로 규명되어야 할 課題이라 사료된다.

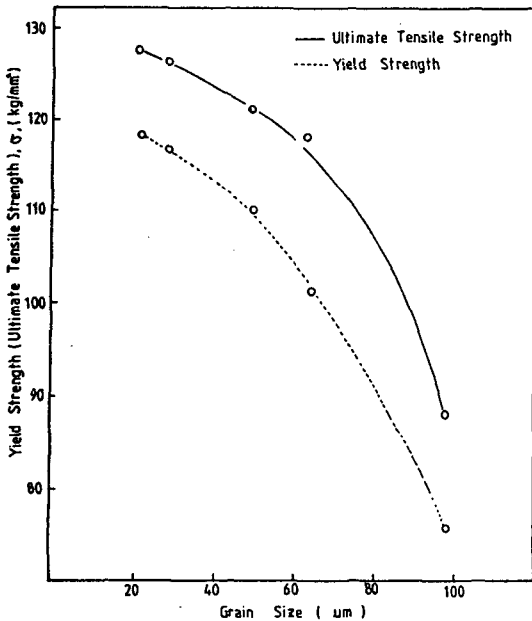


Fig. 6 Relation between Prior Austenite Grain Size and Yield Strength/Ultimate Tensile Strength

4. 結 論

以上과 같은 結果들로부터 本 研究에서 얻은 結論은 다음과 같다.

1) 多結晶質 材料内部에 超音波가 進行할 때

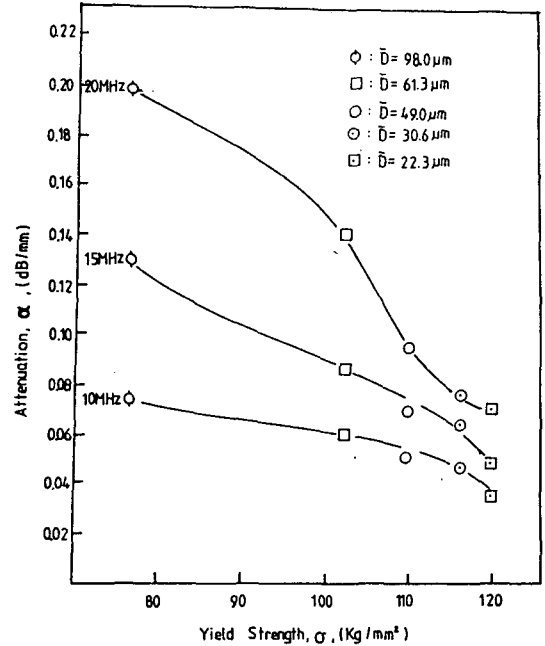


Fig. 7. Relation between ultrasonic attenuation and yield strength for various frequencies

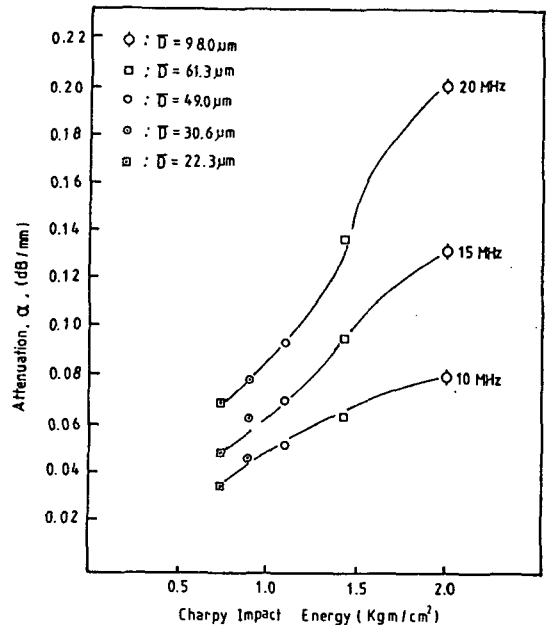


Fig. 8. Relation between Ultrasonic Attenuation and Charpy Impact Energy for Various Frequencies.

일어나는 超音波減衰量은 結晶粒子크기가 增加함에 따라 현저히 增加하였으며 同一한 結晶粒子크기를 갖는 材質에서는 超音波 周波數가 增加함에 따라 超音波減衰量도 현저히 增加하였다.

이는 超音波減衰에 直接的으로 영향을 주는 요인은 結晶粒子的 크기와 超音波의 周波數이고 주로 結晶粒子가 超音波散亂體로 作用한다고 사려된다.

2) 材料의 prior austenite 結晶粒子크기가 增加함에 따라 항복강도 및 최대인장강도는 減少하였다. 그리고 항복강도와 최대인장강도가 增加함에 따라 超音波減衰量은 減少함을 알 수 있었으며 同一한 항복강도를 갖는 材料에서도 超音波周波數가 增加할 수록 超音波減衰量은 增加하였다.

3) 材料의 prior austenite 結晶粒子크기가 增加함에 따라 材料의 Charpy 충격 energy 값은 增加하였다. 또한 Charpy 충격 energy 값이 增加함에 따라 超音波減衰量은 增加함을 알 수 있었으며 同一한 Charpy 충격 energy 를 갖는 材料에서도 超音波周波數가 增加할 수록 超音波減衰量은 增加하였다. 이상과 같은 結論에 의하여 超音波의 減衰量測定을 통하여 材料의 항복강도 및 Charpy 충격 energy 값을 定性的으로 豫測할 수 있다고 사려된다.

參 考 文 獻

1. F.A. Firestone., J. Acous. Am., 17 (1946), p. 287.
2. W.P. Mason and H.J. McSkimin., J. Acous. Am., 19 (1947), p. 464.
3. Lord Rayleigh., Macmillan, London (1894), p. 149.
4. E.P. Papadakis., J. Appl. Phys., 30 (1959), p. 1463.
5. E.P. Papadakis., Acous. Am., 33 (1961), p. 1616.
6. E.P. Papadakis., J. Appl. Phys., 35 (1964), p. 1586.
7. A. Vary., Mater. Eval., 36 (1978), p. 55.
8. A. Vary and D.R. Hill., Mater. Eval., 41 (1983), p. 309.
9. E.P. Papadakis., J. Acous. Soc. Am., 53 (1979), p. 1336.
10. Seki, A. Granato, and R. Truell., J. Acous. Soc. Am., 28 (1956), p. 230.
11. E.P. Papadakis., J. Appl. Phys., 32 (1961), p. 682.
12. S. Saharian., Brit. J. NDT, 22 (109), p. 69.
13. B.R. Patterson and C.E. Bates., AFS Transaction, 81 (1973), p. 369.
14. E.P. Papadakis., J. Acous. Soc. Am., 32 (1960), p. 1628.
15. E.P. Papadakis, J. Acous. Soc. Am., 40, p. 863 (1966)