

超音波 硬度計의 測定精度에 관한 研究

韓 應教*, 尹 鍾學**, 金 在烈***

A Study on the Measuring Accuracy of Ultrasonic Hardness Tester

Eung-kyo Han* , Jong Hak Yoon**, Jae Yeor Kim***

Abstract

In recent days, the application of ultrasonics has been increased in the field of engineering and medicine.

The ultrasonic hardness tester to apply the principle of contact compliance method is entirely different from hardness tester in the past and in the practical use, the more precise measurement is required because it has a slight change of hardness value due to the difference of resonance frequency.

Therefore, in this study, as one type of applicative transducers which can detect the optimum pressure load, ring type load cell was used in the measurement of ultrasonic hardness.

From experimental results, it was compared ultrasonic hardness testing method with the other hardness testing methods.

Also, the measurement error of ultrasonic hardness tester could be measured within ± 0.5 HRC F.S. in the case of 3.0Kg pressure load.

Nomenclature

(English letters)

CsN	: Coefficient of specimen.	q_r	: Static compliance of rod.
CtN	: Coefficient of indenter.	q_s	: Compliance of specimen.
d	: Diameter of indented part.	q_t	: Compliance of indenter.

* 漢陽大學校 教授

** 京畿工業開放大學 教授

*** 漢陽大學校 大學院

E	: Young's modulus or Modulus of elasticity.	q_x	: Contact compliance.
f	: Resonance frequency.	S	: Cross-sectional of the load.
fr.1	: First order natural frequency of bar.	V	: Velocity of sound in the material.
Δf	: Variation of frequency.	x_c	: Reactance of specimen.
L	: Length of vibration rod.	Z_x, Z_o	: Impedance of specimen.
m_s	: Mass of specimen.		
m_t	: Mass of specimen.		
(Greek letters)			
γ	: Damping coefficient	ρ	: Density of the rod.
α_r	: Ratio of the length of the rod.	ξ	: Vibrational displacement.
ν_s	: Poisson's ratio of indenter.	$\Phi = \alpha_r \tan \alpha_r$	(Non-dimensional value)
ν_t	: Poisson's ratio of indenter.	Ψ	: Ratio of elastic compliance.

I. 結 論

從來의 硬度試驗法과는 전혀 다른 試驗法으로서 非破壞分野에 있어서 超音波의 應用면에 대한 연구가 행해지고 있다. 現在 사용되고 있는 直接的인 押入法과 周波數가 높은 超音波 周波數의 減衰와 硬度 사이의 關係에 의한 間接的인 方法에 이어서 Contact Compliance Method가 開發되었다.

超音波 硬度計는 Contact Compliance Method를 利用한 原理인데 壓子の 押入깊이(數 micron)을 超音波振動을 使用하여 測定한 것으로 發振周波數의 差異로 나타난 硬度値는 Ampere meter에 의해서 나타나게 되며 특히 從來의 측정방법과 比較할 때 垂直方向 뿐만 아니라 어떠한 방향에서도 測定이 可能하고, 또한 表層部의 測定도 되며, 1 in²의 試驗片에 250,000회의 測定이 可能하므로 金屬組織의 研究에 適合하며, Portable形이므로 機械的인 試驗 이외에도 建築 및 一般構造物의 測定에도 利用될 수 있으리라 생각된다.

이것은 G. M. L Gladwell^{7), 8)}에 의해 報告되었으나 圧荷重에 대한 가변성이 매우 크기 때문에 實際應用面에 있어서 많은 研究가 必要하다고 生覺된다.

本 論文에서는 超音波 硬度計의 測定에 있어서 精度向上을 위해서 測定에 必要한 壓荷重을 檢出하는데 應用變換器의 一種인 Ring type load Cell을 製作하여 최적의 압하중을 결정해서 정도를 향상시키는데 목적이 있다.

여기에 그 實驗한 結果를 다음과 같이 報告한다.

II. 超音波 硬度計의 理論

2.1 超音波 硬度計의 原理

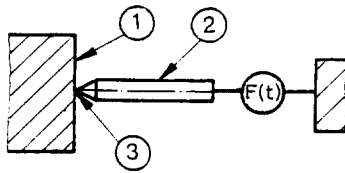
超音波 硬度計는 超音波 振動을 하고 있는 棒의 先端에 diamond 壓子를 附着하고 Specimen의 表面에 눌러주게 되면 棒의 共振周波數가 Compliance의 差異에 의해서 增加하는 現象을

利用한 것이다. Fig. 1에서 超音波 硬度計에 對한 Circuit의 簡單化된 動作圖를 나타내고 있으며 磁歪振動子인 Nickel棒의 先端에 Vickers diamond indenter가 附着되어 있는 處가 Sensor이다.

Fig. 1에서

$$F(t) = F_{st} + F_a \sin \omega t \dots \dots \dots (1)$$

여기서 F_{st} 는 Static Component 이고 F_a 는 Alternating force amplitude를 나타낸다. 이와 같은 Contact impedance meter의 動作 그림에서 Specimen의 質量 m_s 나 Indenter의 質量 m_t 와 Reactance를 考慮하면 그 Vibro-System(振動系)는 Fig. 2와 같이 된다. Fig. 2의 Vibro-System에서 實際上 微小하기 때문에 無視해도 좋은 變數 m_s, m_t, r 등을 省略하면 Fig. 3과 같은 振動系로 簡單化된다. 棒이 基本波 振動을 하는 경우 棒의 兩端의 振幅을 ξ_0 라고 하면 壓子가 Specimen에 接觸한 경우의 振幅



Number	Description
1	Surface of specimen
2	Sensor rod
3	Vickers diamond indenter

Fig. 1 Schematic diagram of contact impedance meter.

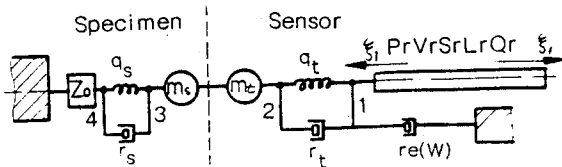


Fig. 2 Vibro-system of sensor and specimen.

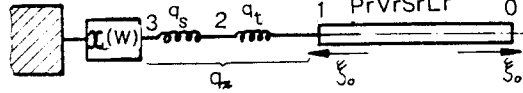


Fig. 3 Simplified vibro-system of ultrasonic hardness tester.

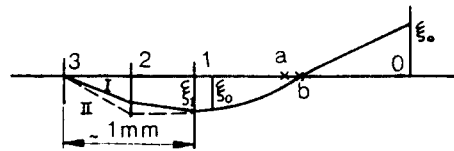


Fig. 4 Amplitude distribution on a contact state

分布는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. Fig. 3에서 Vibro-System이 共振을 하는 경우에 있어서 振動方程式은 다음과 같다.

$$\frac{1}{Z_r \tan \alpha_r} = \omega(q_s + q_t) - \frac{1}{Z_x \tan \alpha_x} \dots \dots (2)$$

여기서 $Z_r = \rho_r V_r S_r$

$$\alpha_r = \frac{\omega L_r}{V_r} \quad (\omega = 2\pi f)$$

따라서 $\omega = \frac{\alpha_r V_r}{L_r}$

$$Z_r \cdot \omega = (\rho_r V_r S_r) \left(\frac{\alpha_r V_r}{L_r} \right) = \left(\frac{E_r S_r}{L_r} \right) \alpha_r$$

$$= \frac{\alpha_r}{q_r}$$

여기서 $E_r = \rho_r V_r^2$ 이다. 그러므로 振動棒의 靜的인 Compliance는 다음과 같다.

$$q_r = \frac{L_r}{E_r S_r}$$

式(1)로부터

$$\cot \alpha_r = Z_r \omega (q_s + q_t) - \frac{Z_r}{Z_x \tan \alpha_x}$$

여기서 $q_x = q_s + q_t$ 이므로

$$\cot \alpha_r = \frac{q_x}{q_r} \alpha_r - \frac{Z_r}{Z_x \tan \alpha_x} \dots \dots \dots (3)$$

만약 $Z_x \tan \alpha_x \gg Z_r$ 이 되는 條件을 利用하면 式(3)의 第2項은 第1項에 比較해서 작게 된다.

따라서 式(3)과 같다.

$$\alpha_r \tan \alpha_r \approx \frac{q_r}{q_x} = \Psi \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $\phi = \alpha_r \tan \alpha_r$ (non-dimensional量) 이고

$$\Psi \equiv \frac{q_r}{q_x} \text{ (彈性的인 Compliance ratio 이다.)}$$

式(4)는 다음과 같다.

$$\phi \approx \Psi \dots\dots\dots (5)$$

여기서 求하고자 하는 未知量은 q_x 이다.

q_x 는 壓子가 파고 들어가는 量에 따라서 變化한다.

q_x 가 變化하면 ϕ 가 變化하고 α_r 가 變化한다. α_r 의 變化는 共振周波數의 變化로 나타나게 되는데 이것이 超音波 硬度計의 原理이다. 基本波 振動을 하는 棒을 利用할 경우 Compliance 와 押入자극의 直徑과의 關係는 다음과 같다.

$$q_x N = q_s N + q_t N \\ = C_s N \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s d} \right) + C_t N \left(\frac{1 - \nu_t^2}{E_t d} \right) \dots\dots\dots (6)$$

2.2 測定 誤差와 精度

測定 誤差와 精度에는 다음 2개의 影響因子가 介入된다.

式(4)에 의해 測定한 $\phi (= q_r/q_x)$ 에 의해 判明된 共振周波數의 變化量과 試料의 Reactance $Z_x \tan \alpha$ 를 省略한 것에 의하여 생기는 誤차이다.

첫번째의 경우

$$f_{r,1} = \frac{V_r}{2L_r}, \quad \alpha_r = \frac{\omega L_r}{V_r} = \frac{\omega}{2f_{r,1}} = \frac{\pi f}{f_{r,1}} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $f_{r,1}$ 은 棒의 第1次 固有振動數이다. 만약 Ψ 가 적게 된다면 Vibro-System의 第n次 共振式은 다음과 같다.

$$\alpha_r = n\pi + \pi \Delta f / f_{r,1} = n\pi(1 + \Delta f / f_{r,n}) \dots\dots\dots (8)$$

여기서 Δf 는 變動周波數이고 式(4)는 다음과 같다.

$$n\pi(1 + \Delta f / f_{r,n}) \tan(n\pi \Delta f / f_{r,n}) = \Psi \dots\dots\dots (9)$$

左邊은 近似式으로 다음과 같다.

$$n^2 \pi^2 (1 + \pi \Delta f / f_{r,n}) \Delta f / f_{r,n} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $\pi \Delta f / f_{r,n}$ 이 대단히 작고 0.1 혹은 그 以下일 경우 式(10)은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} n^2 \pi^2 \Delta f / f_{r,n} &= \Psi \\ \Delta f &\propto \Psi \propto \frac{1}{q_x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

두번째의 경우 試料의 Reactance에 對해서는 測定 誤差는 式(2)로부터 다음과 같다.

$$\alpha_r \tan \alpha_r = \frac{q_r / q_x}{1 - \frac{1}{2f_{r,1} \times q_x q_r}} \dots\dots\dots (12)$$

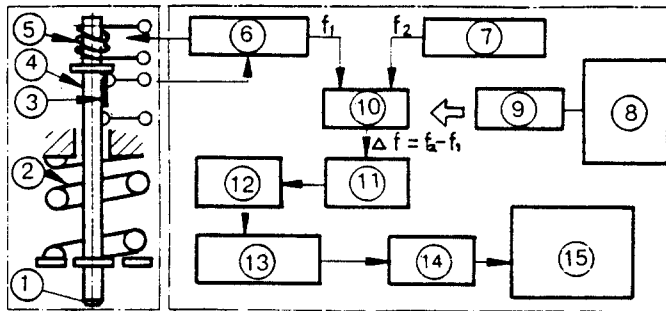
윗式의 右邊은 다음과 같은 경우에 1이 된다.

- (1). 基本波振動 $f_{r,1}$ 이 높은 경우, 즉 超音波 周波數를 利用한 것으로 棒의 길이는 짧게 된다.
- (2). 接觸 Compliance q_x 가 큰 경우, 즉 $q_x \propto S_c^{-1/2}$ 으로 micro 壓子를 利用한다.
- (3). 試料의 Reactance $Z_x \tan \alpha$ 가 큰 경우, 이 경우는 큰 試料 혹은 非共振 試料를 使用하든지 혹은 試料가 작을 때는 더욱 큰 物體를 Coupling 한다.

이와 같은 理論에 따르는 超音波 硬度計의 原理를 Schematic diagram으로 나타내면 Fig. 5와 같다.

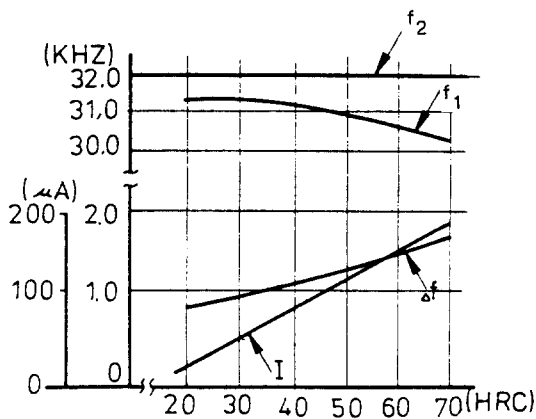
Fig. 5의 Schematic diagram에서 超音波 振動數는 基本波 振動을 利用할 때 36 KHz이며 f_1 과 Δf 는 硬度(HRC)와 直線의인 關係가 되지 않도록 發振周波數를 電氣變換回路로 바꾸어 特性을 非直線性으로 하고 硬度(HRC)와 電流가 直線關係가 되도록 Calibration 한다.

Fig. 6에서는 硬度(HRC)와 周波數 그리고 電流와의 特性을 나타내고 있다.



Number	Description		
		8	Battery(charging circuit)
1	Diamond indenter	9	Constant voltage circuit
2	Constant load spring	10	Mixer
3	Titan acid barium	11	Wave type forming
4	Vibration rod	12	Wave amplitude forming
5	Driving coil	13	f-v Converter
6	Oscillator	14	Ampilifier
7	Reference Oscillator	15	Ampere meter

Fig. 5 Schematic diagram of ultrasonic hardness tester.



	Description
f_1	Resonance frequency
f_2	Reference oscillating frequency
Δf	$f_2 - f_1$
I	Δf Convert ampere

Fig. 6 Characteristics of ultrasonic hardness tester.

III. 實 驗

3.1 實 驗 裝 置

本 實 驗 에 서 는 硬 度 測 定 時 에 適 合 한 荷 重 을 얻 기 위 하 여 Fig. 7 과 같 은 Ring Type Load Cell 을 제 작 하 고 초 음 파 경 도 계 의 압 자 가 누 르 는 荷 重 의 變 化 를 Strain 의 變 化 量 으 로 부 터 구

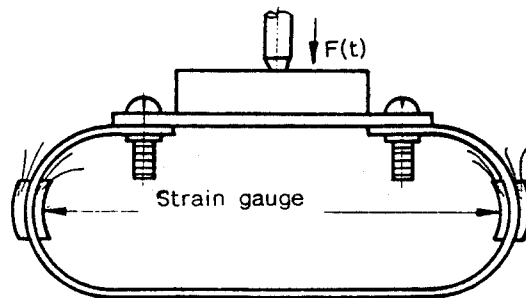


Fig. 7 Ring type load cell.

했으며 시험편은 Mild Steel (HRC 20)로부터 Hard Steel (HRC 70)의範圍에 걸쳐 各各 다른 硬度値를 얻기 위하여 高炭素鋼인 S56 C를 Quenching (900 C × 45 min w.c)한 後 Tempering (600 C, 500 C, 400 C × 30 min F.C)을 했다.

이 밖에도 高壓 Gas 容器의 試片과 薄片(foil)의 경우 D社의 면도날(두께 0.1mm) 그리고 Standard specimen (Steel) 등에 對해서도 測定 하였으며, 종래의 경도시험기와도 그 정밀도를 비교, 검토했다.

Fig. 8은 본 실험에 사용한 실험장치의 개략도이며 Photo 1은 실험장치를 나타낸다.

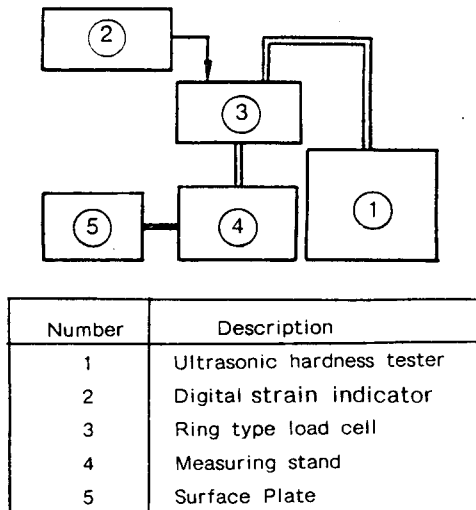


Fig. 8 Block diagram of experimental apparatus.

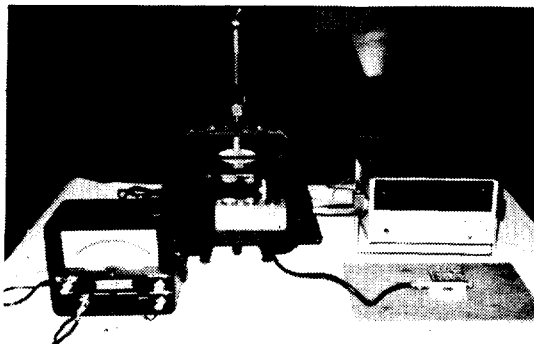


Photo. 1 Experimental apparatus

3.2 實驗 方法

Standard Specimen (HRC 26.3, HRC 60.3, Hv 169, Hv 364) 등을 利用해서 數回의 Calibration을 行한 다음 測定하고자 하는 表面에 Probe를 使用하여 一定荷重으로 Specimen 表面을 눌러주게 되는데 本 實驗에서는 measuring stand를 使用한 경우의 硬度測定을 했으며 精度向上을 얻기 위한 方法으로써

- (1). 測定方向에 따라서 壓子(Chip) Shaft와 Standard Specimen의 傾斜角에 미치는 影響을 考慮했다.
- (2). Specimen의 表面粗度는 1.2 μm 程度로 普通研削을 實施했다.
- (3). 各種의 Specimen에 對해서 順次的으로 荷重을 增加시켜 가면서 壓荷重을 檢出했다.
- (4). 從來의 硬度試驗機들로 測定한 값들을 Rockwell로 나타내어 超音波 硬度와 比較 檢討했다.

3.3 實驗 結果

HRC 26.0 (Tempering 600 C × 30 min F.C)의 경우에 있어서 荷重의 變化에 따른 最適의 壓荷重을 檢出한 것을 Fig. 9에 나타낸 것이다.

마찬가지로 HRC 37.6 (Tempering 500 C × 30 min F.C)의 경우에 있어서와 HRC 47.9 (Tempering 400 C × 30 min F.C)의 경우를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내고 있다.

HRC 57.3 (薄片: foil)의 경우에 있어서 荷重의 變化에 따른 硬度를 Fig. 12에서 나타내고 있다.

Fig. 13은 HRC 37.6의 경우에 있어서 Stand 測定과 Hand 測定の 것을 測定回數와 Strain 變化와의 關係를 나타내고 Fig. 14는 HRC 26.0의 경우를 測定한 結果 超音波 硬度値와 測定回數와의 關係를 나타낸다.

超音波 硬度計와 從來의 試驗機와의 比較로써 Rockwell 硬度計와의 關係를 Fig. 15에 나타내고 있으며 Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18에서는 超音波 硬度計와 Micro Tukon (knoop) hardness와 그리고 Vickers hardness와의 關係 및 Shore hardness와의 關係를 순서대로 나타내 보이고 있다.

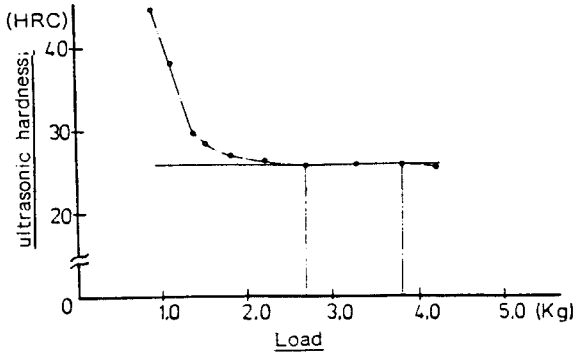


Fig. 9 Relationship between HRC26.0 and load

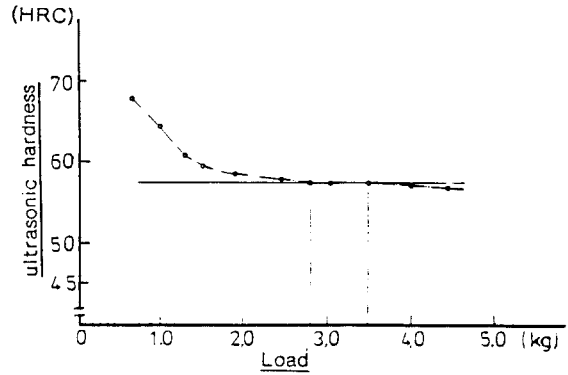


Fig. 12 Relationship between HRC57.3 and load

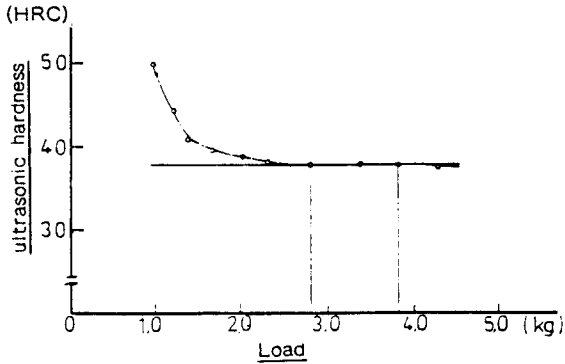


Fig. 10 Relationship between HRC37.6 and load

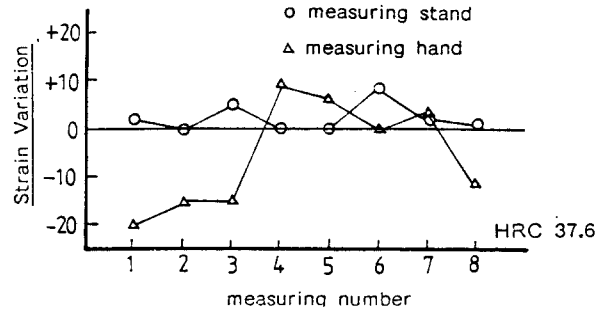


Fig. 13 Relationship between measuring number and strain variation

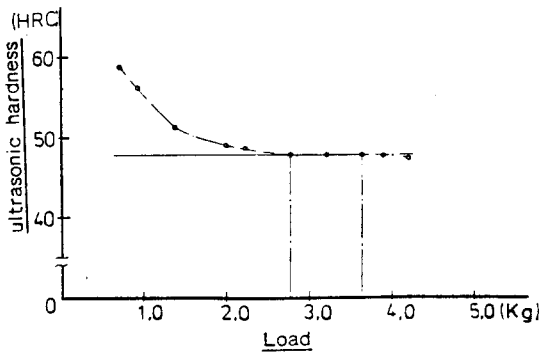


Fig. 11 Relationship between HRC47.9 and load

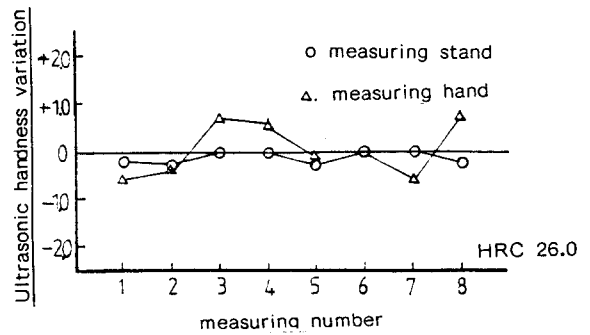


Fig. 14 Relationship between measuring number and ultrasonic.

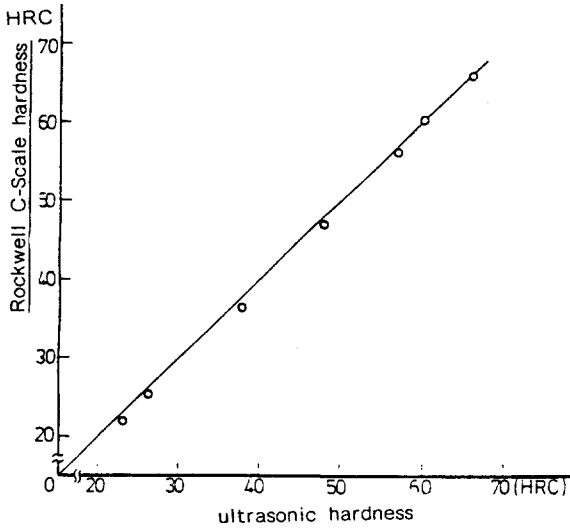


Fig. 15 Relationship between HRC(Rockwell) and HRC.

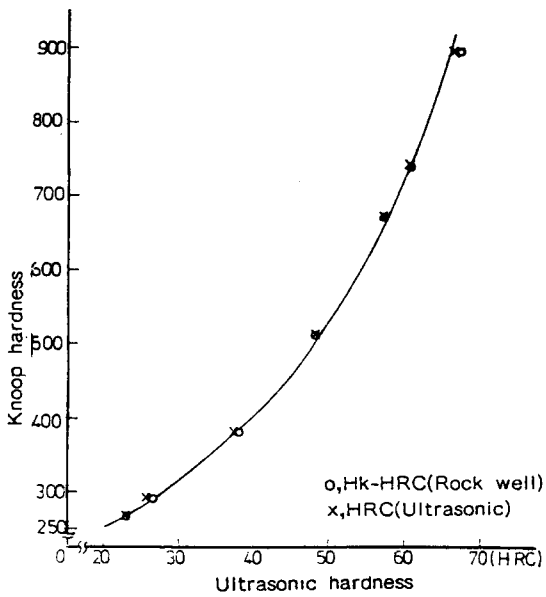


Fig. 16 Relationship between HK and HRC.

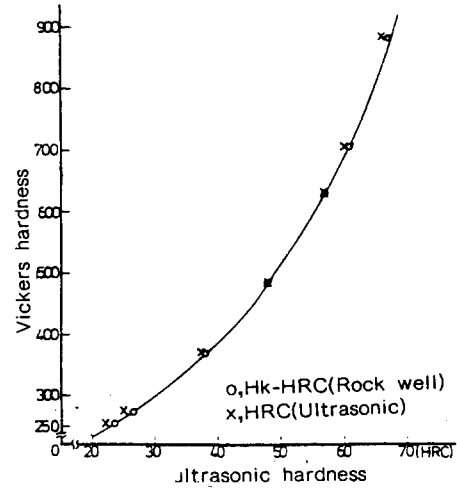


Fig. 17 Relationship between Hv and HRC

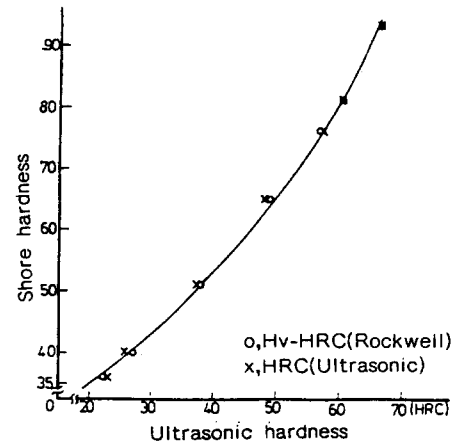


Fig. 18 Relationship between Hs and HRC.

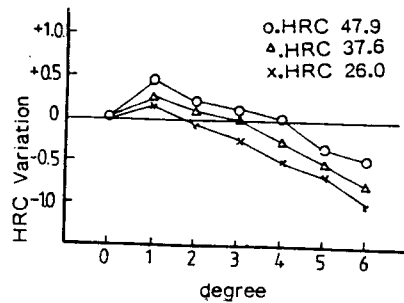


Fig. 19 Effect of inclination between indenter shaft and specimen.

IV. 考 察

- (1) 發振周波數(f_1)의 硬度에 對한 變化率이 작기 때문에 測定하는데 誤差의 原因이 된다.
- (2) Specimen의 硬度가 HRC 20에서 HRC 70으로 增加됨에 따라 壓荷重을 決定하는데 不安定했다.
- (3) Specimen의 Reactance $x_o (Z_x \tan \alpha_x)$ 를 無視했을 경우 誤差의 原因이 된다.
- (4) 測定方向에 對한 壓子(Chip) Shaft 와 Specimen 과의 傾斜角에 따르는 變化를 Fig. 19에 나타내 보이고 있다.

V. 結 論

- (1) 本 超音波 硬度計의 測定誤差는 實驗結果(壓荷重 3.0kg)에 의하면 ± 0.5 HRC F. S 以內임을 確認하였다.
- (2) 從來의 硬度試驗機와의 比較해서 Rockwell 과는 ± 0.8 HRC와 Micro Tukon (knoop) 과는 ± 0.3 HRC 이었으며 Vickers 와는 ± 0.26 HRC 이고, Shore 와는 ± 0.5 HRC의 差異를 가져움을 알 수 있었다.

參考文獻

- (1) M. W. Simmons : Ultrasonic hardness testing, Tool and Manuf. Engr, June (1966) p. 80-81.
- (2) 島川正憲 : 超音波 かたさ計, 計量管理, Vol. 18, No. 7 (1966) p. 355-359.
- (3) United States Patent : 3. 153. 338.
- (4) United States Patent : 3. 308. 476.
- (5) United States Patent : 3. 302. 454.
- (6) 島川正憲 : 超音波 工學 — 理論と實際, 工業調査會, p. 511~517.
- (7) C. Kleesattel and G. M. L Gladwell : The Contact-impedance meter - 1. Ultrasonics, Vol. 6, No. 3 (1968) p. 175-180.
- (8) C. Kleesattel and G. M. L Gladwell : The Contact-impedance meter - 2. Ultrasonics, Vol. 6, No. 4 (1968) p. 244-251.
- (9) 超音波 かたさ計 資料 : 川鐵計量器株式會社, p. 1~33.