

超音波를 이용한 二體 平面接觸部の 定量的인 接觸壓力 測定에 關한 研究

A Study on a Quantitative Measurement of Contact Pressure Between two Rough Flat Surfaces by Means of Ultrasonic Waves.

김 경 모* 정 인 성**
Kyoung Mo Kim In Sung Chung

ABSTRACT

It is important to have exact information about the contact pressure distribution in the design of connected parts of machines and structures. In previous works, stress analyses on a two body contact problem have been carried out in large numbers. Besides, the measurement of contact stress is important to confirm the adequateness of the theoretical analysis, to verify appropriateness of Hertzian contact theory and to know the practical pressure distribution, but an excellent measuring method can't be found at present.

Therefore, a quantitative measurement of contact pressure by means of ultrasonic waves using a normal probe and an angle has been proposed to measure the contact pressure distribution between two rough flat surfaces. At first, in a new proposed calibration method, the relation between mean contact pressure and sound pressure of reflected waves is obtained by using calibration blocks with various surface roughnesses made of the same material as the rectangular section beams. And then, this experimental results are compared with the analytical ones, and the utility of this method is discussed.

1. 序論

大部分의 機械나 構造物들은 構成部品の 結合 또는 接觸으로 連結되어 있으며 接觸面을 통하여 힘과 모멘트를 傳達하고 接觸面 사이에서는 複雜한

微視的 또는 巨視的 相對運動이 發生하기 때문에 部品들 사이의 接觸狀態와 條件에 따라서 機械나 構造物의 性能과 壽命이 큰 影響을 받는데 이것은 界面 接觸壓力의 크기와 分布狀態가 接觸面의 靜剛性和 動特性에 크게 影響을 미치기 때문이다. 더욱이 最近에는 機械 시스템이 精密化, 高速化되어 감에 따라서 構成部材의 連結部分의 接觸部에서 發生하는 實際 接觸壓力에 대한 正確한 知識을 가

*正會員 : 전북산업대학

**正會員 : 전북대학교

지고 2體 平面接觸部の 理論的인 解析結果와 Hertz¹⁾ 接觸 設計式에 대한 妥當性을 檢證하여 接觸 構成 部材의 最適強度 設計式을 提示하고자 하는 努力이 繼續되어 왔다.

以上의 目的으로 接觸面의 粗度變化에 따른 垂直荷重을 받는 2體 平面接觸部에서 發生하는 實際 接觸壓力를 測定하기 위하여 提案된 光彈性 實驗法²⁻⁴⁾, 側壓刃법⁵⁻⁷⁾, 感壓紙法⁸⁾, 表面粗度 變化法⁹⁾, 蒸着素子法¹⁰⁾ 및 壓電材 센서법^{11, 12)}, 등을 利用한 實驗的 研究와 統計學的인 側面에서 接觸面의 表面粗도에 대한 確率密度 函數를 통하여 接觸의 狀態量을 規定하는 表面微小突起의 線密度와 面密度를 決定하고 接觸狀態에 對應하는 確率構造에 따라 接觸點, 接觸面積 및 接觸壓力를 定量的으로 決定하는 解析方法을 提示한 瀨戶口良三¹³⁻¹⁶⁾의 報告와 表面 微小突起의 彈·塑性變形을 考慮한 接觸理論에 據하여 垂直荷重을 받는 2體 平面接觸部の 彈·塑性變形에 대한 實用式을 제시한 塚田忠夫와 阿武芳朗¹⁷⁻²¹⁾의 報告가 있으며, 有限要素法을 利用하여 接觸變形機構를 解析한 White와 Enderby²²⁾, Parsons와 Wilson²³⁾ 및 Endo²⁴⁾ 등의 理論的 研究가 行하여져 왔다.

그러나 前者는 實際 接觸狀態를 變化시키거나, 많은 假定과 理論을 適用시켜야 하고, 後者는 接觸部 表面 微小突起의 變形이 接觸壓力에 대해 非線形的이고 表面粗度, 波形 및 凝着力 등의 境界條件 設定이 困難하여, 어느 것이나 近似解 以上은 기대할 수가 없다는 점이 指摘되어 왔다.

그래서 測定の 多點化와 高速化가 어려운 反面, 接觸의 狀態를 그대로 維持하면서, 非破壞 및 非接觸 測定이 可能하고, 平面接觸에서 曲面의 接觸에 이르기까지 測定이 可能하며, 負荷 및 除荷過程 등의 負荷의 作用에 관계없이 測定할 수 있고, 光·電子波에 비해서 傳波速度가 빠르기 때문에 彈性接觸 理論에 의한 解析結果를 檢討하는 手段으로서 超音波法²⁵⁻²⁷⁾ 중에서 活用도가 많아 關心을 끌고 있는 펄스反射法을 採擇하였다.

이 測定法은 Krächter²⁸⁾가 프레스 다이의 接觸 狀態를 檢討하는데 利用한 것이 嚆矢가 되어 Mina-kuchi^{29, 30)}의 報告에 이르기까지 接觸壓力 測定에

관한 研究報告書³¹⁻³³⁾가 나와 있으나 定量的인 測定方法에 대한 研究는 아직까지도 確立되지 않은 것 같다.

本 研究에서는 探觸子 홀더를 中心으로 한 實驗 裝置의 設計·製作을 통해서 測定하고자 하는 對象物과 同一한 材料와 크기로 加工된 較正用 試片의 接觸部 表面粗度を 變化시켜가며, 垂直荷重을 가하므로써 發生하는 縱波와 橫波에 대한 接觸壓력과 反射(透過) 音壓 사이의 關係를 얻은 다음, 이러한 結果를 利用하여 定量的인 接觸壓力 測定法의 實用化를 기하기 위한 方法과 實驗式을 提示하고자 한다. 또한 較正實驗 結果를 利用해서 垂直 壓縮荷重을 받는 矩形斷面의 2體 平面接觸부의 接觸部에서 發生하는 接觸壓力分佈를 測定하여 理論的 解析結果와 比較·分析하여 보고 이러한 測定法의 正確性和 實用上的 問題點을 檢討하여 2體 接觸部の 接觸舉動을 事전에 點檢할 수 있는 安全檢査法으로 活用하고자 한다.

2. 2體 平面接觸 變形機構에 대한 理論的 考察

垂直荷重을 받는 2體 平面接觸 부의 接觸部에서

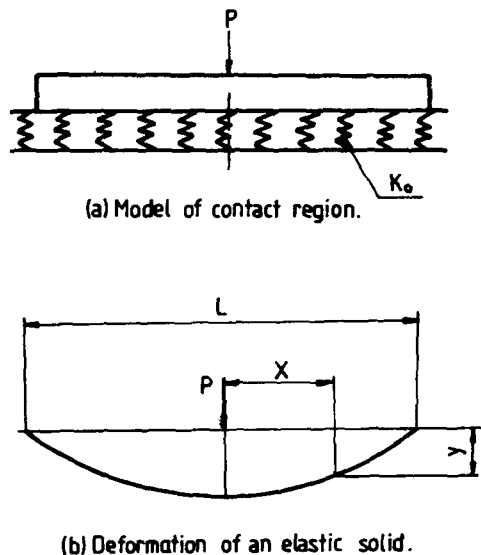


Fig. 1 The deformation model of an elastic solid in the contact region

發生하는 變形과 壓力分布狀態를 理論적으로 檢討하기 위하여 結合部의 上·下部 平面表面에 存在하는 많은 微小突起들을 Fig. 1과 같이 接觸 스프링定數가 K_0 인 코일 스프링으로 모델화 하였다.

接觸길이 L 인 矩形斷面の 彈性보가 中央에 集中荷重 P 를 받고 있다면 荷重의 作用點으로부터 x 만큼 떨어진 位置에서 發生하는 變形 y 는 다음과 같다.

$$y'''' + K_0 y / EI = 0 \dots\dots\dots(1)$$

이 式에서 $\lambda = 4\sqrt{K_0/4EI}$ 로 놓아 特性方程式을 풀면 다음과 같다.

$$r = \pm\lambda(1 \pm i) \dots\dots\dots(2)$$

따라서 變形 y 는 다음과 같이 表示된다.

$$y(x) = C_1 \sinh \lambda x \cos \lambda x + C_2 \sinh \lambda x \sin \lambda x + C_3 \cosh \lambda x \cos \lambda x + C_4 \cosh \lambda x \sin \lambda x \dots\dots\dots(3)$$

식 (3)의 1, 2, 3차 導函數를 구하여 4개의 境界條件 ($x = 0; y' = 0, EIy'''' = P/2, x = L/2; y'' = 0, y''' = 0$)을 代入한 다음 Cramer의 法則을 適用하여 풀면 다음과 같은 變形式이 얻어진다.

$$y(x) = \frac{P\lambda}{2K_0(\sin \lambda L + \sinh \lambda L)} \{ \cosh \lambda x \cos \lambda(L-x) + \cos \lambda x \cosh \lambda(L-x) - \sinh \lambda x \sin \lambda(L-x) + \sin \lambda x \sinh \lambda(L-x) + 2\cosh \lambda x \cos \lambda x \} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 P ; 垂直荷重, K_0 ; 單位길이 당 結合部 스프링定數, B ; 試片의 幅, I ; 試片의 慣性모멘트, E ; 試片의 영係數, L ; 試片의 길이

따라서 荷重의 作用點으로부터 任意의 位置, x 인 지점에서의 壓力 $P(x)$ 는 다음式으로 整理된다.

$$P(x) = K_0 \cdot y(x) / B \dots\dots\dots(5)$$

위 式에서 처짐량 $y(x)$ 는 式 (4)에서 求하고, k_0 는 $\lambda = 4\sqrt{K_0/4EI}$ 에서 求하여 곱하면 單位길이 당 荷重이 되고 이것을 幅 B 로 나누면 壓力이 된다.

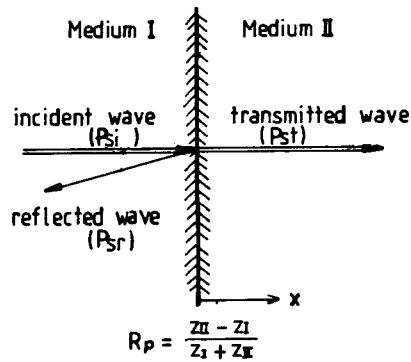
따라서 이 式을 利用하여 荷重의 作用點으로부터 任意의 位置에서 發生하는 壓力 分布의 크기를 計

算하여 이 값과 實驗에서 測定된 값을 比較·檢討 하였다.

3. 接觸壓力의 測定原理와 定量的 測定方法의 提案

超音波는 可聽音波보다 높은 周波數를 가진 音波로서 一定한 媒質에서는 一定한 速度로 전과되나 音響 임피던스가 다른 2개의 媒質이 接한 接觸面에서는 一部는 透過되고 一部는 反射된다.

Fig. 2와 같이 超音波가 音響 임피던스가 다른 2 媒質의 境界平面에 垂直으로 投射될 때 發生하는 反射波量은 境界面에서의 音壓 振幅比, 즉 音壓 反射率 R_p 에 의하여 決定된다. 매질 I에서 매질 II로 超音波가 投射될 때, 入射波 音壓 P_{si} 反射波 音壓 P_{sr} 및 透過波 音壓을 P_{st} 라고 하면 매질중에서 音波의 狀態를 나타내는 일반 波動方程式과 Helmholtz方程式³⁴⁾인 속도 포텐셜 ϕ 函數에 의해서 音壓 反射率 R_p 는 各 媒質의 音響 임피던스의 差에 대한 差의 비로서 定義되며 이들은 다음과 같은 關係를 갖는다.



- R_p : reflected pressure ratio.
- Z_I : specific acoustic impedance of medium I
- Z_{II} : specific acoustic impedance of medium II

Fig. 2 Reflection and transmission of plane waves at a boundary.

$$R_p = \rho_n C_n - \rho_l C_l / \rho_n C_n + \rho_l C_l$$

$$= Z_n - Z_l / Z_n + Z_l \dots\dots\dots(6)$$

$$P_{sr} = R_p \cdot P_{si} = R_p(P_{sr} + P_{st}) \dots\dots\dots(7)$$

여기서 ρ_l, ρ_n ; 各媒質의 密度, C_l, C_n ; 各媒質에서 音波의 傳達速度

Z_l, Z_n ; 各媒質에서 音響 임피던스(acoustic impedance)

式 (6)에서 音響 임피던스가 같은 同質의 媒質에서는 $Z_l = Z_n$ 가 되어 $R_p = 0$ 이 되므로 完全이 透過되고, $Z_n \gg Z_l$ 또는 $Z_l \gg Z_n$ 인 異質의 媒質에서 $R_p = 1$ 이 되어 거의 反射된다.

따라서 Fig. 3과 같이 同質의 金屬과 金屬 사이에 空隙이 있으면 超音波는 反射되고 眞實接觸의 部分에서는 透過하게 된다. 예를 들면 鋼의 音響임피던스는 $4.6 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2\text{s}$ 이고, 空氣의 音響 임피던스는 $4.2 \times 10^2 \text{ kgf/m}^2\text{s}$ 이므로 鋼(空氣)을 透過한 超音波가 空氣(鋼)를 만나게 되면 $R_p = 1$ 이 되어 모두 反射하게 된다.

True contact ($R_p = 0$) Air gap ($R_p = 1$)



Fig. 3 Contact of solid surfaces.

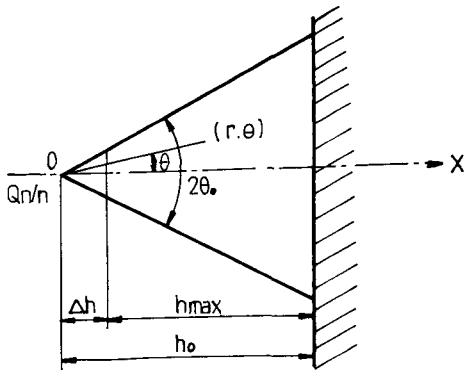


Fig. 4 A model of an asperity.

Fig. 4와 같이 機械加工되어 同種의 金屬으로 된 2體 接觸平面 表面이 垂直荷重 Q_n 의 作用下에 높이가 h_0 인 n 개의 圓錐形 微少突起가 接觸하고 있을 때 각각의 微少突起에 作用하는 垂直荷重 Q 는 Q_n/n 이 되고 Q 를 받아 微少突起에 發生하는 荷重方向의 변위 U_x 와 Q_n 에 의한 眞實 接觸面積의 增加量 ΔS 는 다음과 같다.

$$u_x = (ur)_0 = 0 = \frac{2Q}{E(\sin 2\theta_0 + 2\theta_0)} \int_0^{h_0} x^{-1} dx$$

$$= 2Q/E(\sin 2\theta_0 + 2\theta_0) \log h_0 / \Delta h$$

.....(8)

$$\Delta S = 2n u_x \tan \theta_0$$

$$= 4n Q \tan \theta_0 / E(2\theta_0 + \sin 2\theta_0) \log h_0 / \Delta h$$

$$= A_p \cdot Q \dots\dots\dots(9)$$

接觸部の 表面狀態와 재질이 均一하다면 A_p 를 比例常數로 하여 眞實 接觸面積의 變化量을 垂直荷重과의 線形的 函數關係로 表示할 수 있으며 眞實 接觸面積의 生成은 彈·塑性變形에 의한 것이지만 眞實 接觸面積의 變化量은 垂直荷重 變化量과 거의 比例한다.

式 (9)에서 ΔS 가 增加하면 音波의 反射波量은 減少하고 透過波量은 따라서 增加한다. 즉 $R_p = 1$ 인 部分이 減少하므로써 同質의 媒質에서는 粒子速度가 均一하고 媒質 內에서 音波의 減衰를 無視할 수 있으므로 超音波의 入·反射波량을 各各 音壓 波高置로 나타내어 接觸面積과의 函數關係로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{srh} = P_{sih} \{S_0 - (S_i + \Delta S)\} / S_0 \dots\dots\dots(10)$$

$$\Delta S / S_i = 2Q / E \Delta h (\sin 2\theta_0 + 2\theta_0) \log h_0 / \Delta h$$

$$= B_i Q \dots\dots\dots(11)$$

여기서 S_0 ; 表面粗도가 0인 理想平面, S_i ; 초기의 接觸面積, P_{srh} ; 反射音壓 波高置, P_{sih} ; 入射音壓 波高置

식 (11)를 식 (10)에 代入하여 入射音壓 波高置에 대한 反射音壓 波高置를 垂直荷重 Q 와 接觸壓力 P 와의 關係로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{srh}/P_{sih} = (1 - B_0) - B_2 Q = (1 - B_0) - B_3 P \dots\dots\dots (12)$$

여기서 B_0, B_1, B_2, B_3 는 정수이며 B_0 는 S_i/S_o 이므로 $B_0 \ll 1$ 게 된다.

理想的인 接觸의 경우는 反射音壓과 接觸壓力의 關係가 Fig. 5에 나타난 바와 같이 波線으로 表示된 直線의 關係에 있으나, 實際接觸의 경우는 超音波가 매질내부를 通過할 때 일어나는 散亂, 粒子와의 内部摩擦 등에 의해 減衰가 일어나고 作用荷重을 아주 크게 하더라도 $R_p = 1$ 인 部分이 存在하며 表面狀態의 不均一性에 의해 斜線으로 표시된 範圍 内の 값으로 存在한다.

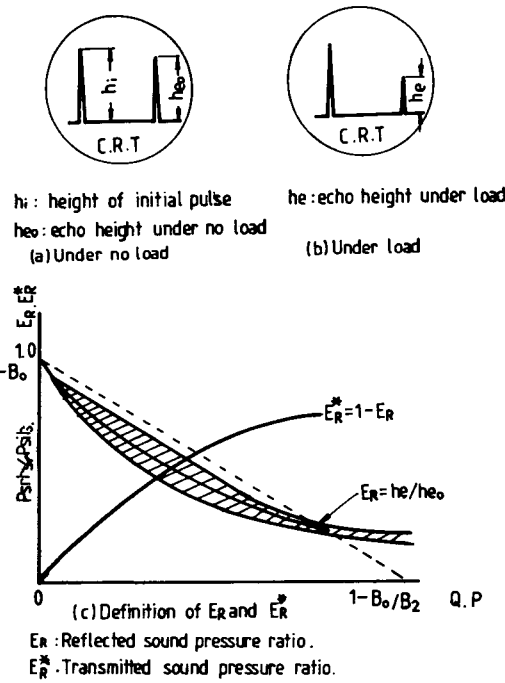


Fig. 5 Measuring principle of ultrasonic waves method.

超音波 探傷時 無負荷 時에는 反射波가 heo 가 되었다가 荷重을 가하면 眞實接觸面積의 增加에 따라 透過音壓量이 增加하므로 反射波高置가 he 로 減少한다.

식 (12)의 關係로부터 無負荷 時 에코의 높이에 대한 負荷 時 에코의 높이의 比를 反射音壓率 E_R 로 정의하고 Fig. 5(c)에서 알 수 있는 바와 같이 이를 다시 接觸壓力과 比例關係에 있는 透過音壓率 E_R^* 로 나타내면 다음과 같다.

$$E_R = he/heo, E_R^* = 1 - E_R \dots\dots\dots (13)$$

따라서 以上の 結果를 利用하여 表面粗度, 두께 변화를 준 標準 較正試片을 壓縮하므로써 發生하는 反射波(透過波)의 音壓으로써 接觸壓力를 定量的으로 測定할 수 있다.

4. 實驗裝置와 方法

4.1 較正 實驗

超音波의 種類에 關係없이 垂直 壓縮荷重을 받는 2體 平面接觸部에서 發生하는 接觸壓力를 定量的으로 測定할 수 있는가를 確認하기 위해서 較正試片의 높이는 一定하게 하고 5段階의 粗度變化를 주어, 各各 5조씩의 縱波 및 橫波用 較正試片을 加工하였고 矩形斷面의 2體 平面接觸 빔의 接觸部에서 發生하는 縱方向의 壓力分布를 測定하기 위하여 3段階의 높이변화와 2단계의 粗度變化를 주어 橫波用 較正試片 6조를 加工하여 Fig. 6과 Table 1에 提示한 바와 같이 總 16조를 準備하였다. 表面粗度 測定時 메터컷업(meter cut-off)치는 0.8mm로 하고, 7회의 測定置 中에서 5회의 測定置를 平均한 값을 中心線 平均粗度(CLA) R_a 값으로 하였으며, R_a 가 $0.27\mu m$ 까지는 C600, C1000등 2종의 랩을 利用하여 50-80 m/min 速度로 습식래핑을 행하여 粗度變化를 주었으며, $0.43-1.91\mu m$ 까지의 範圍에서는 테이블 往復式 外經研削機와 WA100, WA180, WA240 등 3종의 연삭숫돌로 피드속도 1/100 m/rev를 주어 加工한 다음 사포가공을 並行하여 粗度變化를 주었다.

Table 1에 나타난 바와 같이 縱波와 橫波用 探觸子의 接觸面은 研削을 하여 사용하였고 縱波와 橫波用 較正試片 및 矩形斷面의 2體 平面接觸 빔의 接觸壓力分布를 구하기 위한 橫波用 較正試片이 서로 同一한 接觸狀態를 維持할 수 있도록 하였다.

또한 正確하고 安定된 超音波의 音壓을 얻기 위

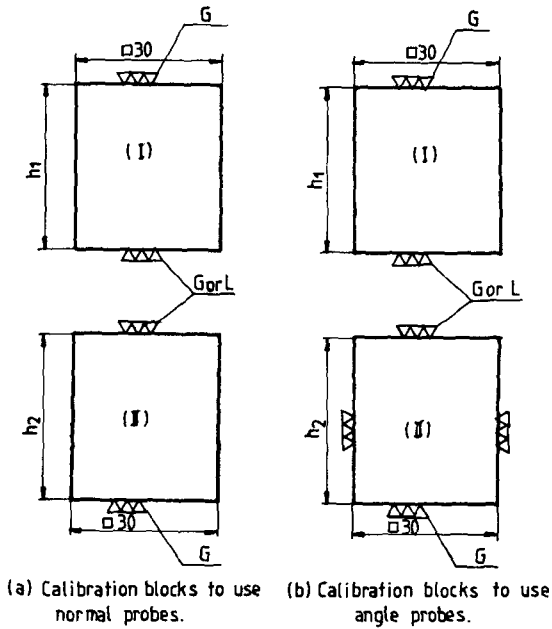
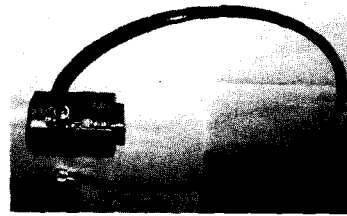
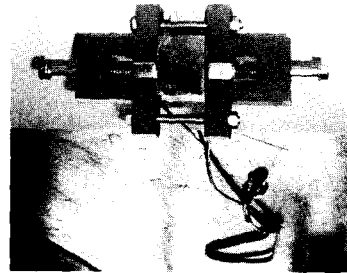


Fig. 6 Dimensions of calibration blocks.



(a) Normal probe holder



(b) Angle probe holder

Fig. 7 Photograph of a normal probe holder and an angle.

Table 1. Shapes and material properties of calibration blocks.

Calibration blocks for normal probe								Calibration blocks for angle probe									
No	Bloc.	h mm	Cond. of cont. surf.			E1 GPa	ν1 %	Mat.	No	Bloc.	h mm	Condition of contact surface			E1 GPa	ν1 %	Mat.
			Ra μm	Flat. μm	Mach. meth.							Ra μm	Flat. μm	Mach. meth.			
1	I	30	0.26	0.5	Grinding	206	0.3	SM 45 C	1	I	30	10	0.27	0.17 0.26	0.4	0.3 0.4	
	II	40	0.27	0.4									Lapping	0.28			0.17 0.26
2	I	30	0.43	0.6	Grinding	206	0.3	SM 45 C	2	I	30	15	0.43	0.17 0.26	0.7	0.4 0.3	
	II	40	0.43	0.7									Lapping	0.44			0.17 0.26
3	I	30	0.76	0.8	Grinding	206	0.3	SM 45 C	3	I	30	20	0.77	0.17 0.26	0.8	0.4 0.4	
	II	40	0.80	0.8									Lapping	0.79			0.17 0.26
4	I	30	1.32	1.1	Grinding	206	0.3	SM 45 C	4	I	30	20	1.33	1.1	0.8	1.3	
	II	40	1.30	1.1									Lapping	1.31			1.0
5	I	30	1.89	1.3	Grinding	206	0.3	SM 45 C	5	I	30	20	1.90	1.2	0.8	1.3	
	II	40	1.91	1.3									Lapping	1.90			1.3

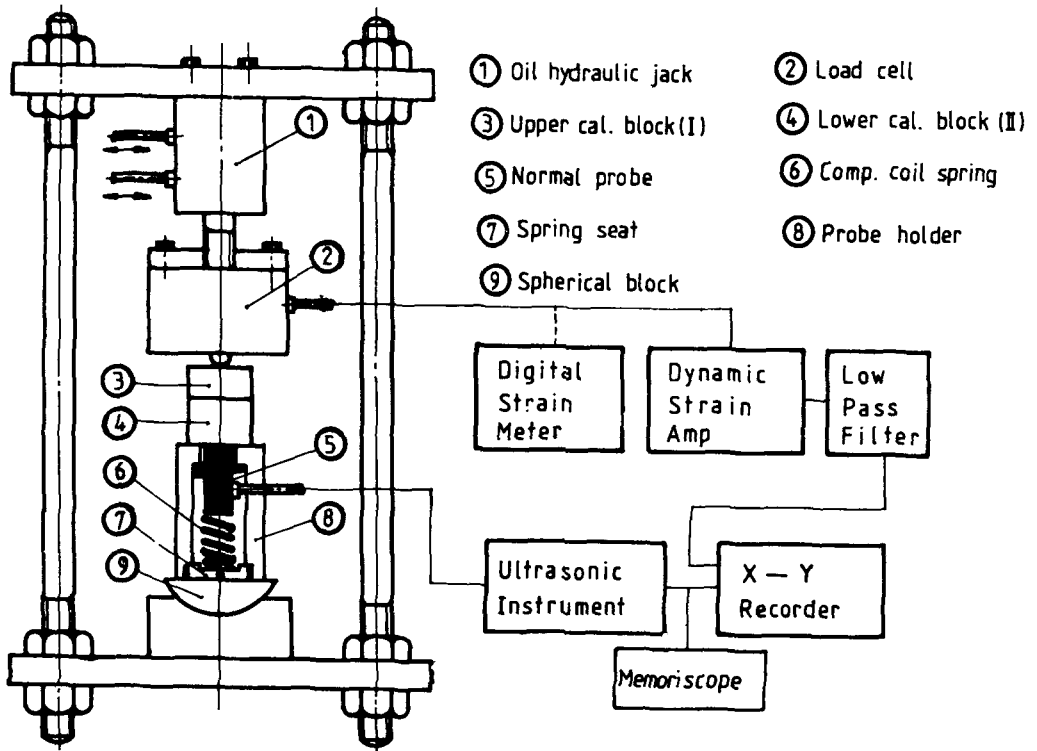


Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus using normal probes of ultrasonic waves.

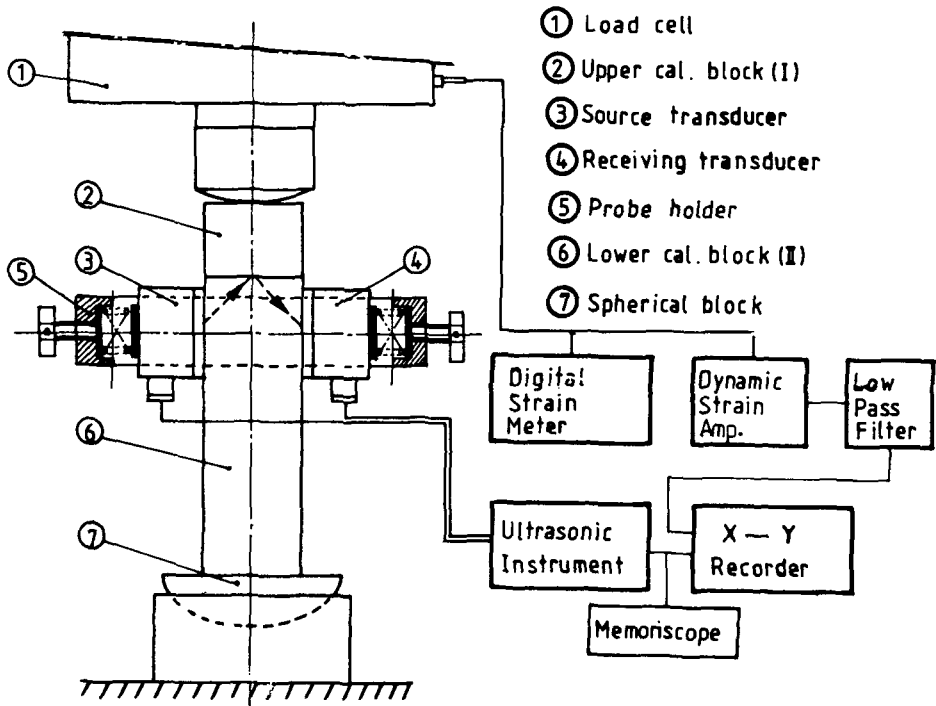


Fig. 9 Schematic diagram of experimental apparatus using angle probes of ultrasonic waves.

하여 접촉될 上·下部 試片의 表面을 트리클로루에틸렌(trichloroethylene)으로 不純物을 除去하였고 縱波 및 橫波用 探觸子 홀더(probe holder)를 Fig. 7과 같이 製作하여 縱波와 橫波用 實驗裝置에 부착하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 縱波 및 橫波用 實驗裝置의 概略圖와 測定回路를 나타낸 것이다.

負荷와 除荷를 자유로 할 수 있는 油壓펌프와 復動式 油壓작 ①에 連結된 最大用量 5t의 로드 셀(load cell) ②와 디지털 스트레인 미터(digital strain meter, MS-1120)에 의하여 試片의 두께에 따라 1-2kN 單位로 30kN까지 段階의 荷重變化를 줄 수 있도록 하였다.

荷重의 作用點이 上·下部 較正試片 ③과 ④의 中心에서 편심되지 않도록 自動調心形 球面자리를 만들어 半球形 블럭 ⑨위에 探觸子 홀더(probe holder) ⑧을 設置하였고, 探觸子 ⑤가 5N 정도의 일정한 壓力을 維持할 수 있도록 홀더 안에 끼워넣고 압축코일스프링 ⑥을 裝着하였다.

또한 超音波의 透過를 돕기 위하여 下部 較正試片 ④와 探觸子 ⑤ 사이의 接觸面에 구리스(CROWN #2)를 塗布하였다.

計測에 있어서 荷重의 변화값은 로드셀, 다이내믹 스트레인 앰프(dynamic strain amplifier, DPM-

E), 로우패스 필터(low pass filter)를 거쳐 X-Y 레코더의 횡축으로, 超音波의 反射(透過) 音壓은 探觸子, 超音波 探傷器(FD-210), 메모리스코우프를 거쳐 X-Y 레코더의 縱축에 同時에 檢出되도록 하였다.

超音波의 橫波를 利用한 實驗 및 測定方法도 縱波의 境遇와 같은 方法으로 行하였다.

縱波와 橫波의 速度는 較正試片 I, II에서 5900m/sec, 3230m/sec이었으며, 垂直 및 斜角 探觸子의 發振 周波數는 公히 5 MHz인 것을 使用하였고, 垂直 探觸子의 振動子 直徑은 10mm, 斜角 探觸子의 振動子 크기는 10×10mm² 屈折角은 45° 指向角은 0.14 rad인 것을 使用하였다.

反射波 音壓은 縱·橫波의 境遇 公히 첫번째 에코의 높이를 採擇하였다.

이와 같은 兩波를 利用한 較正實驗을 통하여 試片의 粗度變化 및 높이와 粗度變化에 대한 接觸壓력과 反射(透過) 音樂率과의 定量的 關係를 얻었다.

4.2 矩形斷面의 2體 平面接觸 빔의 壓縮 實驗

앞 절의 較正實驗의 結果에 대한 實用性을 立證하기 위해서 橫波用 較正試片의 材料, 規格, 接觸部 表面狀態와 거의 同一하게 橫波用 빔 試片을 Fig. 10과 Table 2와 같이 3段階의 높이 變化와 2段階의

Table 2. Shapes and material properties of beam specimens.

No	Spec.	h ₁ h ₂ mm	Cond of contact surface			E ₁ E ₂ GPa	ν ₁ ν ₂	Mat.
			Ra μm	Flat. μm	Machining method			
1	I	10	0.17	0.3	Grinding Lapping	206	0.3	SM45C
			0.26	0.4				
	II	50	0.17	0.4				
			0.26	0.4				
2	I	15	0.17	0.4				
			0.26	0.3				
	II	50	0.17	0.3				
			0.26	0.4				
3	I	20	0.17	0.4				
			0.26	0.4				
	II	50	0.17	0.4				
			0.26	0.4				

粗度 變化를 주어 6조를 準備하였다.

縱波用 垂直 探觸子로 測定하기 어려운 荷重部에 隣接한 接觸壓力의 測定에 便利한 橫波用 斜角 探觸子를 利用하여 Fig. 10의 上·下部試片 兩 側面에 10mm單位로 表示한 測定 位置에 따라 探觸子 移送裝置에 의해서 送信 및 受信探觸子를 縱方向의 左右로 移動해가며 接觸壓力 分布를 測定하였다.

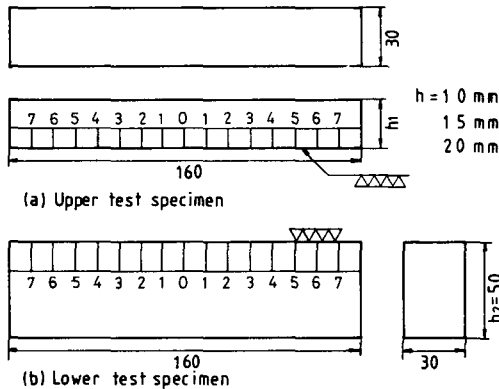


Fig. 10 Specifications of beam specimens.

上·下部 梁 試片의 加工方法도 較正試片의 加工方法과 同一하게 하였고, 垂直壓縮荷重은 10, 20, 30kN의 3段階로, 梁 試片의 높이는 10, 15, 20mm의 3段階로, 接觸部 表面粗度는 0.17, 0.26 μ m의 2段階로 變化시켰다.

橫波用 較正試片 No. 1, No. 2, No. 3와 같이 平面度도 0.3-0.4 μ m가 되도록 加工하여 接觸할 表面의 不純物을 트리클로루에틸렌(trichloroethylene)으로 除去하였다.

下部的 梁 試片의 側面에 부착할 送信 및 受信 探觸子로부터 超音波의 透過를 돕기 위하여 구리스(CROWN #2)를 塗布하고, 周波數 5MHz의 斜角 探觸子를 본 實驗室에서 製作한 探觸子 移送裝置를 Fig. 11의 베이스 상에 設置하였다.

本 實驗에서도 探觸子 홀더를 除外한 橫波를 이 용한 較正實驗 및 測定方法을 그대로 행하여 荷重과 除荷時 梁 높이와 表面粗度 變化에 따른 接觸壓力 分布가 荷重 變化에 따라 定量的으로 얻어졌다.

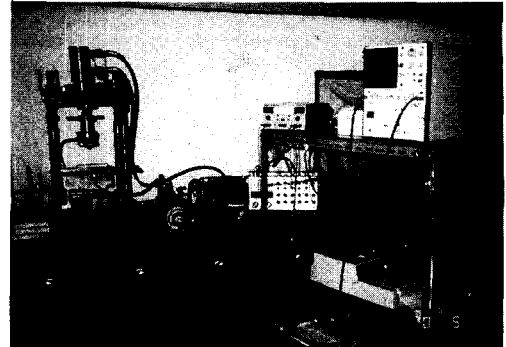


Fig. 11 Photograph of experimental apparatus.

5. 實驗結果 및 考察

5.1 縱波와 橫波에 대한 較正曲線

較正試片의 規格을 一定하게 하고 0-14kN까지 2kN 間隔으로 垂直 壓縮荷重을 作用시킨 2體 平面 接觸에서 接觸部의 表面粗度 R_a 를 0.27-1.9 μ m까지 5段階로 變化시켰을 때, 縱波 및 橫波用 較正試片의 接觸部에서 發生하는 接觸壓力 P 와 透過 音壓率 E_R^* 와의 關係를 나타낸 것이 Fig. 12이다. Fig. 12(a)는 發振周波數 f 가 5MHz, 크리스탈(crystal)의 直徑이 10mm인 縱波用 垂直 探觸子를 使用하여 Table 1의 較正試片 No. 1에서 No. 5까지 接觸部에서 發生하는 $P-E_R^*$ 와의 關係로 이때의 受信 感度(gain)는 23-25dB이었고 펄스 폭(pulse width)은 0.8 μ m이었다.

初 荷重過程의 垂直 壓縮荷重을 x 축에 잡고, 接觸部에서 發生하는 反射音壓를 正確히 測定하기 위하여 下部 較正試片의 中心에 探觸子의 接觸 位置를 明示한 部分으로부터 發生한 첫번째 反射波 에코(reflected echo)의 값을 透過 音壓率 E_R^* 값으로 換算하여 그 값을 y 축에 잡아 플로팅한 것이며 Fig. 12(b)는 前述한 橫波用 斜角 探觸子를 使用하여 Table 1의 No. 1에서 No. 5까지 初 荷重時에 接觸部에서 發生하는 $P-E_R^*$ 의 關係로, 下部的 較正試片의 兩 側面에 發信 및 受信 探觸子의 接觸位置를 明示한 部分으로부터 發生한 첫번째 反射波 에코의 값을 읽어 上記와 같은 要領으로 플로팅한 그래프로, 이때의 受信 感度は 19-21dB이었고 펄스 幅은 0.84

μm이었다.

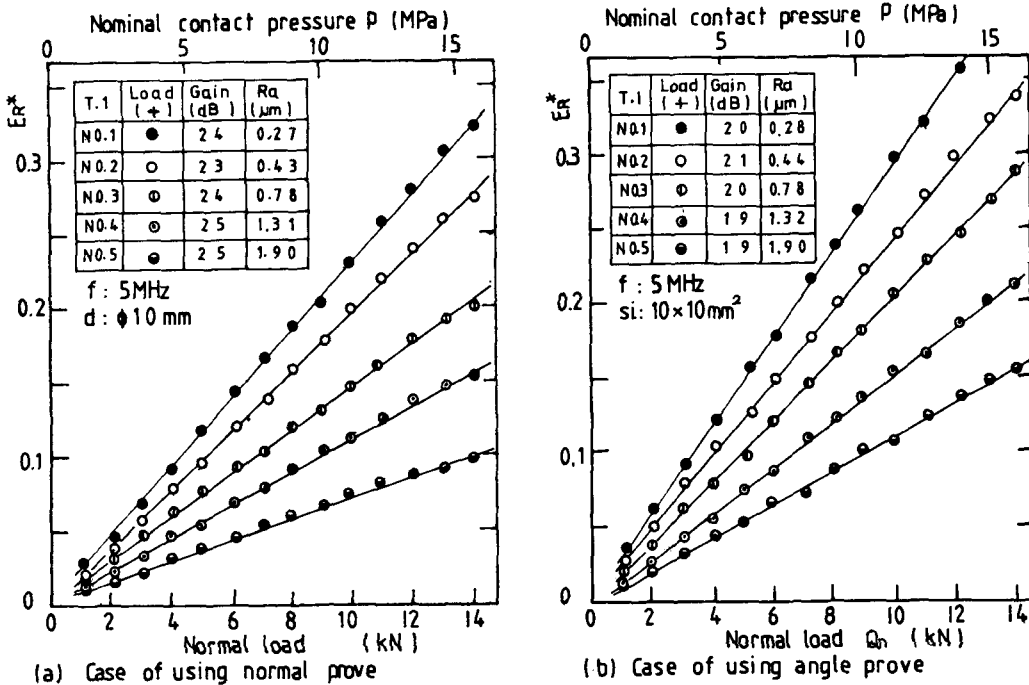


Fig. 12 Relation between the characteristic E_R^* and the nominal contact pressure P under the first loading.

式 (13)으로부터 定義된 兩波의 透過 音壓率 E_R^* 와 公稱 接觸壓力 P 와의 關係로부터 負荷履歷이 없는 最初의 負荷時에는 超音波의 種類에 關係없이 이들 사이에 直線의 函數關係가 있음을 알 수 있다. 反射 (透過) 音壓이 3.1절에서 測定上의 問題點으로 提起한 荷重의 增加에 따른 새로운 接觸 微小突起의 發生으로 인한 眞實 接觸面積의 增加, 超音波의 減衰, 表面粗度の 不均一性 및 接觸表面의 屈曲 등에 크게 影響을 받지 않음으로서 測定上의 再現性이 優秀하고 表面粗度が 減少할수록 直線의 減少(增加)하였다.

이는 式 (9)로부터 알 수 있는 바와같이 眞實 接觸面積의 生成은 微小突起의 彈·塑性 變形에 의한 것이지만 荷重의 變化는 眞實 接觸面積의 變化이고, 眞實 接觸面積의 變化는 式 (11), (12)로부터 알 수 있는 바와 같이 超音波의 反射(透過)波量의 變化임이

立證되었다. 따라서 超音波의 種類에 關係없이 測定하고자 하는 對象物과 材質, 物性, 두께 및 表面狀態 등이 같은 較正試片을 이용하므로써 Fig. 12와 같은 結果로부터 處女面(最初의 荷重作用面)에 發生하는 接觸壓力 P 와 透過音壓率 E_R^* 사이에는 다음과 같은 直線의 函數關係가 있음을 알 수 있으며 正確성과 再現性이 充分히 實用的이라고 생각된다.

$$E_R^* = kP^n \dots\dots\dots (13)$$

위식에서 k, n 는 定數이고, 處女面에서 $n=1$ 이 되며, 負荷履歷이 있는 既壓縮面에서는 이 影響에 의하여 $P-E_R^*$ 가 指數函數의 變化를 하므로 後術하고자 한다. k 는 E_R^*/P 로 接觸面의 表面粗도에 따라서 決定되는 값으로 表面粗度常數라 定義하고 縱波와 橫波를 利用한 境遇에 粗度常數를 各各 k_n, k_a 로 表示하여 이들과 表面粗度 R_a 의 關係를 그래프로 나타내면 Fig. 13과 같이 R_a 와 k 는 反比例

關係에 있음을 알 수 있다.

따라서 接觸部の 表面粗度 Ra가 0.27-1.91 μ m 範圍에서는 任意의 表面粗度を 가진 2體 平面接觸部の 接觸壓力를 超音波의 種類에 관계없이 식 (13)과 Fig. 13을 利用하여 定量的으로 實測할 수 있다.

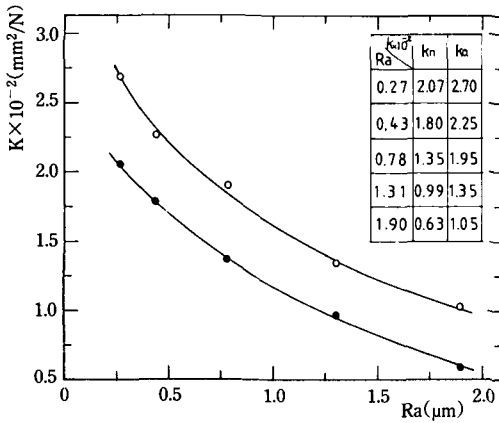


Fig. 13 Relation of roughness constant k with Ra in case of using the normal prove(k_n) and the angle prove(k_a) under the first loading.

Fig. 14는 負荷및 除荷過程에서 發生하는 彈性履歷 損失(hysteresis loss)을 檢討하기 위해서 Table 1의 較正試片 No.2를 利用하여 0-24.3kN까지 2kN 間隔으로 荷重變化를 주어 1-7회까지의 負荷및

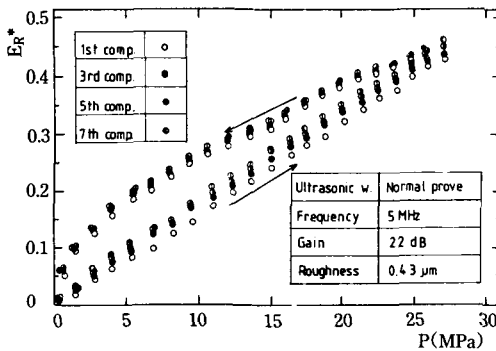


Fig. 14 Hysteresis loop between the characteristic E_R^* and the nominal contact pressure from the first loading and unloading to the seventh.

除荷過程 중 홀수 회에 대한 $P-E_R^*$ 사이의 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 圖示한 것이다. 處女面의 負荷科程에서는 $P-E_R^*$ 가 直線의 關係를 보이지만 負荷履歷이 있는 再 負荷및 除荷科程에서는 曲線의 關係로 變化하고 負荷및 除荷科程이 계속됨에 따라 表面 微小突起의 塑性變形으로 인하여 루프의 面積이 減少하는 彈性履歷 損失(hysteresis loss)을 나타내고 있다.

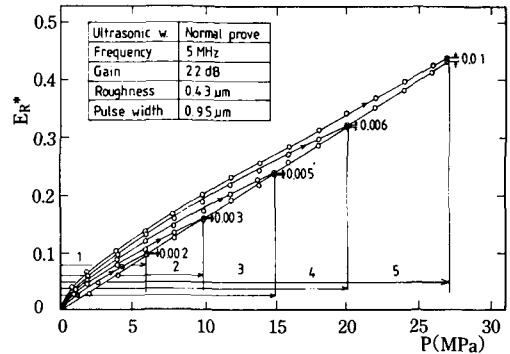


Fig. 15 Influence of hysteresis in already compressed contact surface under loading.

특히 負荷過程에서 處女面에 대한 既 壓縮面의 履歷舉動을 살펴보기 위해서 最大 再負荷를 5段階로 나누어 各 區間에서 發生하는 $P-E_R^*$ 의 關係를 檢討하여 본 缺課 Fig. 15와 같이 1區間の 最大負荷 5.4kN이 걸릴 境遇 0.003의 履歷損失(hysteresis loss)를 보였다가 最大負荷 以上の 負荷가 걸리면 $P-E_R^*$ 는 다시 處女面의인 舉動을 계속하고 5區間の 最大負荷 24.3kN에 이르르면 履歷損失이 0.01로 되어 荷重의 增加와 더불어 5배 以上 增加함을 알 수 있다.

또한 5회의 負荷履歷이 있는 1區間에서 1회의 負荷履歷이 있는 5區間으로 갈수록 履歷損失은 減少하고 있으므로 어떠한 2體 接觸部에서 發生하는 接觸壓力를 正確히 測定하고자 할 때는 反復的으로 가하여야진 負荷履歷을 감안하여야 하고 可能한한 處女面의 接觸時에 發生하는 接觸壓力를 測定하여 性能檢査 등의 參考資料로 活用하는 것이 좋을 것이다.

다음은 Table 2와 Fig. 10과 같은 矩形斷面의 2體 平面接觸 법의 接觸部에서 發生하는 壓力分布를 定量的으로 測定하기 위하여 Table 1의 橫波用 較正試片 No. 1, No. 2, No. 3를 利用해서 2段階의 粗度變化($R_a=0.17, 0.26\mu\text{m}$)와 3段階의 높이변화($h_1=10, 15, 20\text{mm}$)를 주어 0-32.4kN까지 2-5kN 間隔으로 垂直 壓縮荷重을 變化시킬 때 1, 2차 시의 負荷 및 除荷過程에서 發生하는 接觸壓力 P와 透過 音壓率 E_R^* 사이의 關係를 圖示한 것이 Fig. 16과 Fig. 17이다.

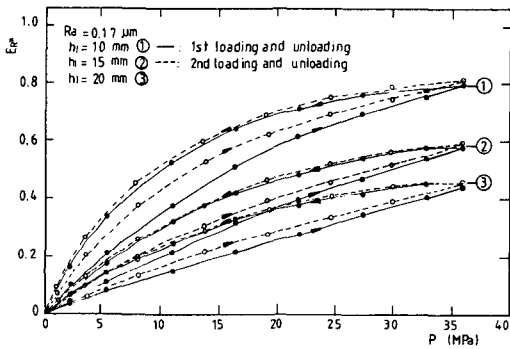


Fig. 16 Calibration curve of the characteristic E_R^* to the nominal contact pressure P according to height variation of calibration blocks.

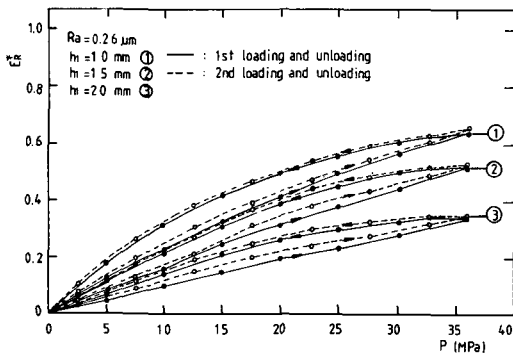


Fig. 17 Calibration curve of the characteristic E_R^* to the nominal contact pressure P according to height variation of calibration blocks.

同一한 荷重과 位置에서 測定한 E_R^* 값이 1, 2차 시의 負荷 및 除荷課程에서 서로 다르며 試片의 높이변화에 따라 큰 차이가 發生하였다. 負荷 및 除荷 課程에서는 주로 接觸表面에 存在하는 微小突起의 塑性變形에 起因한 것이라 생각되며 높이가 낮을 수록 表面粗度 以外の 곡면의 影響과 翳모멘트의 影響을 받아 直線의 變化에서 曲線의 變化를 하며 音壓率의 차이가 發生하고 있는 것으로 생각된다. 이는 尺寸效果에 의한 應力集中 現象³⁵⁾과도 有關 되기 때문에 接觸部材의 設計時 尤념해야 할 것이다.

이러한 影響圈을 벗어나려면 本 實驗에서 採擇한 較正試片을 中心으로 $h_2/h_1=2.5$ 以上 되어야 함을 알 수 있으며 이때부터 식 (13)의 $n=1$ 에 一致한다고 볼 수 있으나 $h_2/h_1 < 2.5$ ($h_1=20\text{mm}$)인 境遇는 P- E_R^* 의 關係를 把握할 수 없기 때문에 로그좌표 상에서 分析하였다.

Fig. 18은 Table 1의 橫波用 較正試片 No. 1, No. 3의 各各의 境遇에 대해서 2段階의 높이변화($h_2/h_1=5.0, 0.5$)와 2段階의 粗度變化($R_a=0.17, 0.26\mu\text{m}$)

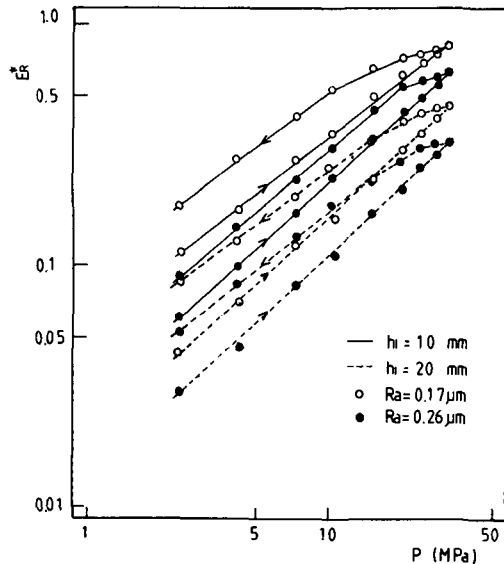


Fig. 18 Relation of the characteristic E_R^* with the nominal contact pressure under the first loading and unloading in logarithmic plane by means of angle probe.

를 주었을 때 初負荷 및 除荷 時에 發生하는 $P-E_R^*$ 의 關係를 로그좌표에 옮긴 것이다. Fig. 16과 Fig. 17에서도 알 수 있는 바와 같이 1, 2차의 最大負荷 34.2kN이 걸렸을 境遇 負荷 履歷에 의한 透過音壓率 E_R^* 는 0.01-0.02정도로 약 2% 增加하나 높이변화에 따른 E_R^* 는 높이가 배로 增加할 때 各 各의 境遇에 約 45% 減少하고 粗度變化에 대한 E_R^* 는 粗度が 53% 增加할 時에 約 20% 減少하므로 높이와 粗度變化에 대한 增加率을 같이 했을 境遇 라면 E_R^* 는 45/37로 높이변화가 E_R^* 즉 接觸壓力 P에 미치는 影響이 約 22%가 더 크다.

높이와 表面粗度を 變化시킨 어느 境遇도 處女面을 壓縮한 負荷過程에서는 E_R^*/P 가 거의 一定하게 1이 됨으로써 높이를 一定하게 하고 接觸部 表面粗度を 變化시킨 境遇와 一致함을 알 수 있다. 除荷過程에서는 微小突起의 彈·塑性變形과 凝着 등의 影響으로 彈性, 遷移 및 塑性領域 順으로 區分되어 E_R^*/P 가 減少하고 있기 때문에 式 (13)의 指數 n을 定義하기가 매우 어렵다.

그러나 再 負荷過程에서는 Fig. 19와 Fig. 20을 통해서 檢討해 본 結果 $P-E_R^*$ 가 指數函數的 變化를

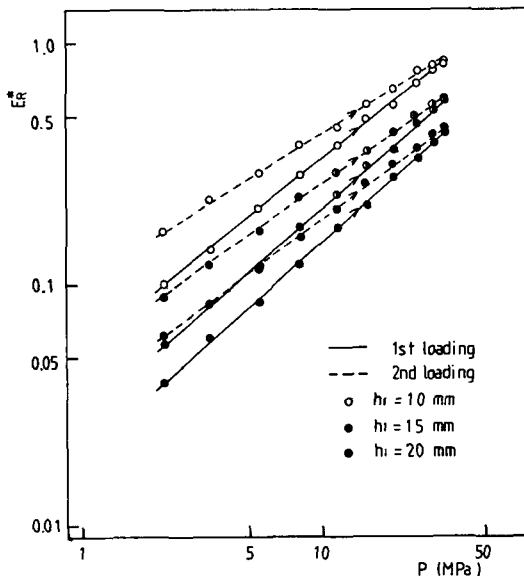


Fig. 19 Relation of the characteristic E_R^* with the nominal contact pressure under the 1st and 2nd loading in case of $R_a=0.17\mu\text{m}$.

하고 있음이 確實하였고 이 境遇에도 表面粗度 R_a 가 增加함에 따라 粗度定數 k는 거의 一定한 比率로 減少하였기 때문에 Fig. 13과 較正曲線을 통하여 쉽게 決定할 수 있었다. 1, 2차 負荷時 表面粗度 R_a 가 0.17, 0.26 μm 일때 各各의 境遇에 대해서 3段階의 높이변화($h_2/h_1=5.0, 3.3, 2.5$)에 따른 $P-E_R^*$ 關係를 로그평면에 나타내본 結果 較正試片의 높이와 接觸部 表面粗度變化와는 無關係하게 再負荷 時의 기울기가 어느 것이나 $n=2/3$ 로 一定하였다.

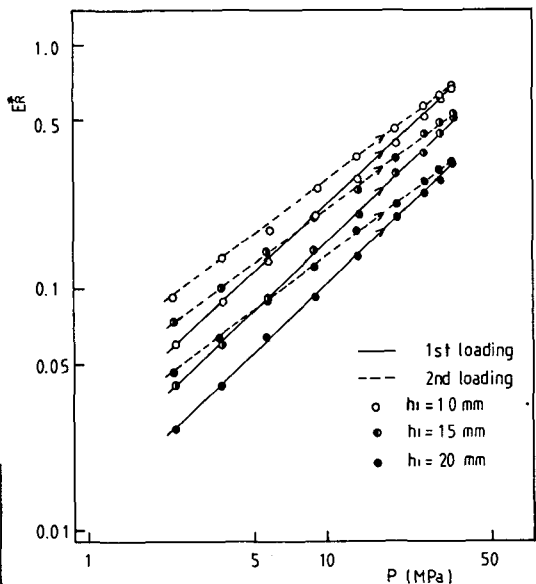


Fig. 20 Relation of the characteristic E with the nominal contact pressure under the 1st and 2nd loading in case of $R_a=0.26\mu\text{m}$.

處女面에 負荷時에는 表面 微小突起가 주로 塑性變形을 하는 接觸舉動을 나타내고 있으며 再負荷時의 境遇는 주로 彈性變形을 하는 接觸舉動을 보이고 있다고 할 수 있으며, 再負荷의 境遇는 “球面과 平面의 接觸에서 接觸面積이 荷重의 2/3승에 比例한다.”는 Hertz의 彈性接觸 理論에 接近하고 있음을 알 수 있다. 縱波用 較正試片을 利用하여 1-7회까지의 負荷時에 發生하는 $P-E_R^*$ 와의 關係를 分析한 結果와도 一致하고 負荷의 反復 횟수를 더해 감에 따라 E_R^*/P 의 기울기가 2/3가 되어 Hertz接觸에 이르게 됨을 類推할 수 있다.

이 재負荷 過程에서 發生하는 E_R^* 와 P의 關係에 대한 實驗은 廣範圍하고 많은 努力을 必要로 하기 때문에 Table 1의 較正試片 No. 1, No. 2, No. 3를 對象으로 하였다. 또한 높이의 變化에 대한 限界荷重도 問題가 되겠으나 $Ra=0.17-0.43\mu m$, $h=10-50mm$ 까지로 制限하였기 때문에 以外의 높이변화에 대한 表面粗度の 變化 幅을 擴張하였을 때에도 本 實驗 結果와 크게 다르지는 않겠으나 以上の 實驗 式이 通用될 수 있겠느냐 하는 問題는 此後의 研究를 통하여 報告하고자 한다.

5.2 矩形斷面の 2體 平面接觸 법의 接觸壓力 分布

높이와 表面粗度を 變化시킨 橫波用 較正試片 No. 1, No. 2, No. 3를 利用한 較正實驗 結果를 適用하여 3段階의 荷重變化($Q_n=10, 20, 30kN$)를 주었을 때 3段階의 높이변화($h_2/h_1=5.0, 3.3, 2.5$)와 2段階의 粗度變化($Ra=0.17, 0.26\mu m$)에 대한 2體 平面接觸 법의 接觸部에서 縱方向으로 發生하는 接觸壓力 分布의 實驗置³⁶⁾와 接觸部の 微少突起를 코일스프링으로 모델화하여 얻은 式 (5)에 의하여 計算된 理論置를 比較해서 Fig. 21-Fig. 26에 圖示하였으며 2體 接觸으로 되어 있는 部品の 強度設計 時에 가장 關心있게 檢討해야 할 荷重의 作用點 直下에서 發生하는 最大 接觸壓力 P_{max} 값을 理論置와 比較해서 Table 3에 나타냈다.

理論置와 實驗置의 變化類型이 荷重의 作用點으로부터 縱方向의 測定位置 x가 解析的인 接觸分離點(seperation point)을 취할 때까지는 거의 비슷하고 h_2/h_1 이 2.5에서 5.0으로 增加할수록 즉 법의

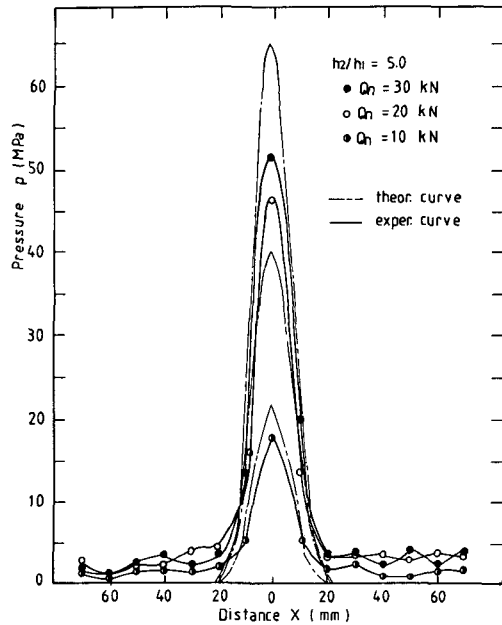


Fig. 21 Experimental and theoretical value of the contact pressure distribution in case of $Ra=0.17\mu m$ ($h_2/h_1=5.0$).

Table 3 Experimental values and theoretical of P_{max} .

h/h	P(MPa)	Theoretical value	Experimental value	
	$Q_n(kN)$		$Ra=0.17(\mu m)$	$Ra=0.26(\mu m)$
5.0	10	22.0	18.0	16.0
	20	43.9	46.9	29.5
	30	65.8	52.0	45.3
3.3	10	14.8	17.3	10.5
	20	29.6	34.0	19.7
	30	43.9	43.2	32.6
2.5	10	11.0	15.3	5.5
	20	22.0	27.7	9.9
	30	32.7	35.2	22.5

두께가 얇아질수록, 表面粗度 R_a 가 增加할수록 實驗置가 理論置에서 크게 離脫되고 있다.

이는 주로 表面粗度, 破形, 凝着力 및 眞實 接觸面積 등의 境界條件을 考慮하지 않았고, 輻모멘트 및 사이즈 效果에 의한 應力集中 등의 影響을 無視하고 彈性論的인 側面에서 解析的으로 얻은 값이기 때문인 것으로 思料된다.

Fig. 21, 22, 23은 表面粗度 $R_a=0.17\mu\text{m}$ 일때 3段階의 荷重變化를 주어 $h_2/h_1=5.0, 3.3, 2.5$ 인 빔의 接觸部에서 發生하는 接觸壓力 分布를 各各 나타낸 것이다.

빔의 높이가 낮을수록 輻모멘트 및 사이즈 效果에 의한 應力集中 등의 影響을 받아 荷重의 作用點 直下에서 最大 接觸壓力 P_{max} 이 鮮明하게 나타나고 同一한 허용급힘 應력을 넘어서 塑性變形이 發生하기 때문에 에러가 나타나고 빔의 높이가 增加하면 壓力分布가 比較的으로 均一하게 되어 荷重의 增加와 함께 接觸壓力이 增加함을 알 수 있다.

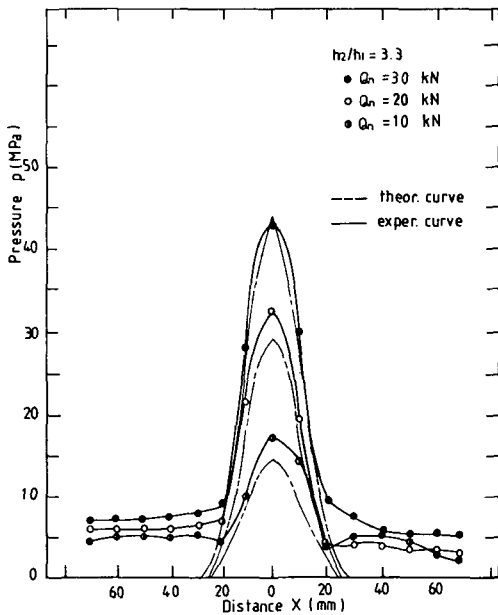


Fig. 22 Experimental and theoretical value of the contact pressure distribution in case of $R_a=0.17\mu\text{m}$ ($h_2/h_1=3.3$).

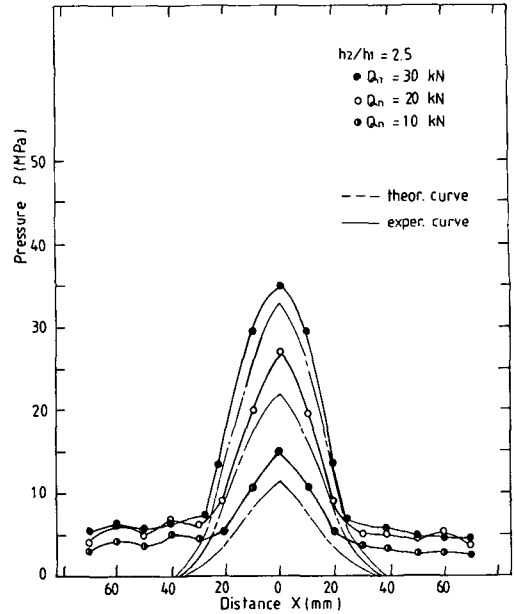


Fig. 23 Experimental and theoretical values of the contact pressure distribution in case of $R_a=0.17\mu\text{m}$ ($h_2/h_1=2.5$).

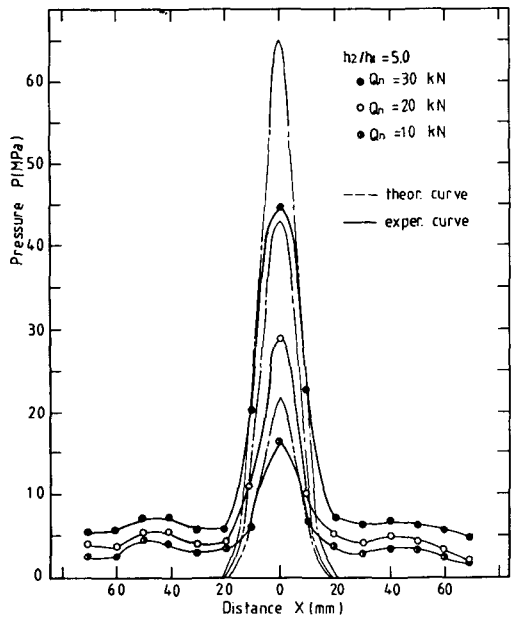


Fig. 24 Experimental and theoretical values of the contact pressure distribution in case of $R_a=0.26\mu\text{m}$ ($h_2/h_1=5.0$).

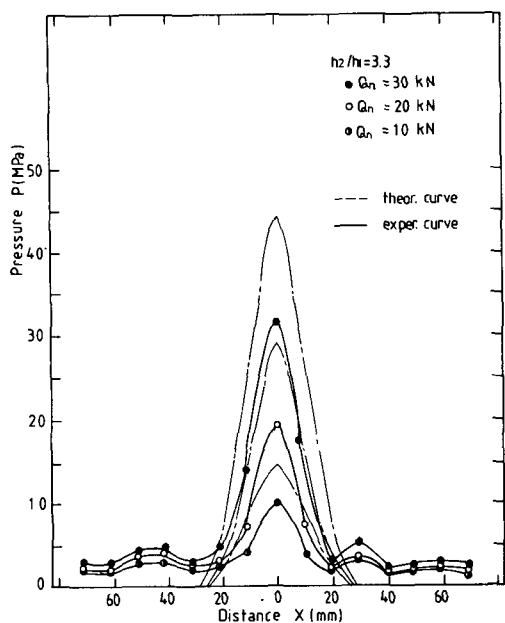


Fig. 25 Experimental and theoretical values of the contact pressure distribution in case of $Ra=0.26\mu\text{m}$ ($h_2/h_1=3.3$).

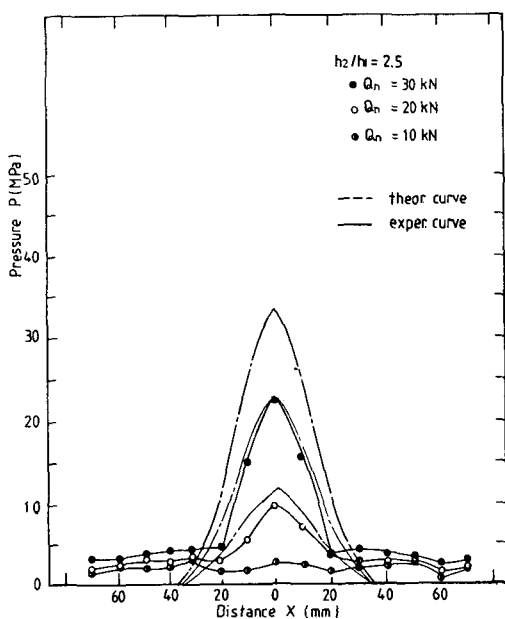


Fig. 26 Experimental and theoretical values of the contact pressure distribution in case of $Ra=0.26\mu\text{m}$ ($h_2/h_1=2.5$).

대체로 荷重의 作用點으로부터 $x=20\text{mm}$ 이상에서 平均接觸壓力이 발생하고 $x=40\text{mm}$ 近方에서 接觸分離 現象이 나타나고 있음을 알 수 있다. 粗度變化가 接觸壓力 分布에 미치는 影響을 檢討하기 위해서 $Ra=0.26\mu\text{m}$ 일때 위와 같은 方法으로 빔의 接觸部에서 발생하는 接觸壓力 分布를 圖示한 것이 Fig. 24, 25, 26이다.

前述한 內容과 大同小異하나 表面粗도가 增加할 수록 빔의 接觸部에서 發生하는 接觸壓力이 전반적으로 減少하고 있으며 $Ra=0.17\mu\text{m}$ 일때와 比較하면 實驗置가 理論置에서 더 크게 離脫되고 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 言及한 바와 같이 表面粗도가 增加할수록 주로 휨모멘트 및 사이즈 效果에 의한 應力集中 등의 影響을 더 크게 받아 塑性變形이 增加하고 表面 狀態의 不均一性 등에 起因하는 것으로 생각된다.

以上과 같은 較正 및 빔의 壓縮實驗을 통해서 超音波를 利用한 2體 接觸部의 定量的인 接觸壓力 測定法이 實際적으로 有用함을 알 수 있으나 크게 다음과 같은 問題點이 있다. 적은 指向角을 가지고 있는 푸르브의 開發을 통해서 超音波가 測定面에 作用하는 範圍를 좁혀야 하고, 測定하고자 하는 對象物과 同一한 較正試片을 準備할 수 없다.

6. 結 論

超音波의 種類(縱波와 橫波)에 관계없이 接觸壓力을 定量的으로 測定하기 위해서 較正實驗을 利用한 方法이 提案되었으며 實際적인 有用성을 檢討하기 위해 矩形斷面의 2體 平面接觸 빔을 壓縮한 境遇의 接觸壓力 分布가 測定되었다. 또는 實驗結果와 解析結果가 比較, 檢討되었고 다음과 같은 結論이 얻어졌다.

(1) 較正實驗을 통하여 超音波의 種類(縱波 및 橫波)에 관계없이 測定하고자 하는 對象物과 同一한 材質, 두께 및 表面狀態를 지닌 較正試片을 利用하므로써 反比例 關係에 있는 粗度定數 k 와 表面粗度 Ra 曲線($Ra-k$ 曲線) 위에서 任意的인 表面粗도를 가진 粗度定數 k 를 읽어 式 (13)에 의하여 接觸壓力을 定量的으로 測定할 수 있다.

(2) 試片의 높이와 表面粗度가 減少할수록 透過音壓率 E_R^* 가 增加하고 處女面의 負荷過程에서는 E_R^* 가 接觸壓力 P에 正比例하고 再 負荷過程에서는 E_R^* 가 接觸壓力 P의 2/3 승에 比例하므로 本 測定法을 使用할 境遇는 그 接觸面에 걸었던 過去의 負荷履歷을 考慮해야하나 그 接觸에 걸었던 最大 負荷를 超過하는 負荷가 걸릴 境遇는 다시 處女面的 舉動을 나타낸다.

(3) 試片의 높이가 減少하고, 表面粗度가 增加할수록 實驗置가 理論置에서 크게 離脫되며 荷重의 作用點 直下에서 最大 接觸壓力 Pmax이 鮮明하게 나타난다.

(4) 荷重의 作用點으로부터 20mm 안밖에서 平均 接觸壓力가 發生하며 40mm 이상이 되면 세퍼레이션(seperation)이 나타나기 시작한다.

(5) 測定器로서 再現性은 優秀하나 적은 指向角을 가지고 있는 探觸子의 開發을 통해서 超音波가 測定面에 作用하는 範圍를 좁혀야 한다.

以上과 같은 研究를 통하여 이제까지는 機械나 構造物의 使用部材에 대한 材質의 安全 檢査나 銲接部의 缺陷檢査 等과 같은 品質管理의 手段으로써 超音波의 펄스 反射法이 주로 適用되어 왔으나, 靜·動的인 2體接觸部의 力學的 舉動을 定量的으로 究明할 수 있으므로써 接觸部의 強度設計에 安全을 기하고 圓滑한 運轉 및 使用을 위한 安全點檢에 따른 補修對策을 세울 수 있어 超音波의 應用範圍가 擴大되었다고 思料되나 探傷技術의 普及을 위한 教育이 隨伴됨으로써 소기의 目的을 達成할 수 있으리라고 생각된다.

참고문헌

- (1) Hertz, H., "Über die Berührung Fester Elastischer Körper", J. Reine und Angewandte Mathematik, Vol. 92, pp.156-171, 1882.
- (2) 蔦山地, "接觸問題의 有限要素解析法에 關する 研究", 日本機械學會論文集, 76券, 621號, pp. 348-358, 1973.
- (3) 林卓夫, "光彈性法による異方性板의 應力解

析(1)", 非破壞檢査, 第21券, 第8號, pp. 492-497, 1973.

- (4) 鳩山正義, "光彈性法による三次元應力解析", 非破壞檢査, 第26券, 第6號, pp. 404-410, 1978.
- (5) Minakuchi, Y., Koizumi, Y., Shibuya, T. and Yoshimine, k., "Contact Stresses in Two Elastic Bodies(Elastic Bodies Finite Hollow Cylinders)", Bulletin of the JSME, Vol. 26, No. 215, pp. 716-723, 1983.
- (6) 水口ほか3名, 機講論, No. 810, pp. 118-130, 1981.
- (7) van Rooyen, G. T. and Backofen, W. A., "Contact Pressure Measurement by means of Pressure Sensitive Pins", J. Iron Steel Inst., Vol. 186, pp. 235-240, 1957.
- (8) Plock, R., "Die Übergangsstufigkeit von Schraubenber-Bindungen", Industrie-Anzeiger J., Vol. 93, No. 27, pp. 571-575, 1971.
- (9) 加藤仁, 山口勝美, 加藤隆雄, "表面あらさ變化による金屬接觸面의 壓力分布測定法(第1報)", 日本機械學會論文集(第3部), 44卷, 381號, pp. 1742-1750, 1978.
- (10) 小山武夫, "蒸着素子による接觸壓力分布の測定", 潤滑, 第30卷, 第9號, pp. 639-644, 1985.(11)
- (11) 尾田十八, 品田智宏, 井上二郎, 花本康二, "壓電セラシックスを用いた接觸壓力分布の測定用センサシステムの開發", 日本機械學會論文集(A編), 54卷, 498號 pp. 399-404, 1988.
- (12) 尾田十八, 本悟, 井上二郎, 多保田純, "壓電セラシックスを用いた接觸壓力分布の測定用システムの開發", 日本機械學會論文集(A編), 55卷, 513號 pp. 1230-1235, 1989.
- (13) 瀨戶口良三, "接觸機構に關する研究(第1報)", 精密機械, 37卷, 12號, pp. 404-405, 1971.
- (14) 瀨戶口良三, "接觸機構に關する研究(第2報)", 精密機械, 37卷, 12號, pp. 297-302,

- 1972.
- (15) 瀬戸口良三, “接觸機構に關する研究(第3報)”, 精密機械, 38卷, 6號, pp. 489-494, 1972.
- (16) 瀬戸口良三, “接觸機構に關する研究(第4報)”, 精密機械, 38卷, 9號, pp. 733-738, 1972.
- (17) 塚田忠夫, 阿武芳朗, 釜洞文夫, “表面おうとつによる接觸部剛性(第1報) 2平面接觸部の彈性變形”, 日本機械學會論文集(第3部), 36卷, 291號, pp. 1923-1930, 1970.
- (18) 塚田忠夫, 阿武芳朗, “表面おらとつによる接觸部剛性(第2報)”, 日本機械學會論文集(第3部), 37卷, 304號, pp. 2387-2393, 1971.
- (19) 塚田忠夫, 阿武芳朗, 釜洞文夫, “表面おらとつによる接觸部剛性(第3報)”, 日本機械學會論文集(第3部), 37卷, 304號, pp. 2394-2399, 1971.
- (20) 塚田忠夫, 阿武芳朗, 釜洞文夫, “表面おらとつによる接觸部剛性(第4報)”, 日本機械學會論文集(第3部), 37卷, 304號, pp. 2394-2399, 1971.
- (21) 塚田忠夫, 阿武芳朗, “機械加工されに 2平面接觸部の變形機構(第5報)”, 日本機械學會論文集(第3部), 40卷, 336號, pp. 2389-2397, 1974.
- (22) White, D. J. and Enderby, L. R., “Finite Element Stress Analysis of a Multipiece Piston”, J. of Strain Analysis, Vol. 4, No. 1, pp. 32-37, 1969.
- (23) Parsons, B. and Wilson, E. A., “A Method for Determining the Surface Contact Stress Resulting from Interface Fits”, Trans. ASME. J. of Eng. for Industry, Vol. 92, No. 1, pp. 208-214, 1970.
- (24) Endo, T., Oden, E. B., Becker, E. B. and Miller, T.,
“A Numerical Analysis of Contact and Limit-Point Behavior in a Class of Problems of Finite Elastic Deformation”, Computers and Structures, Vol. 18, No. 5, pp. 899-910, 1984.
- (25) 益子正己, 伊東諒, “すべり案内面の 壓力分布に 關する研究(第1報)” 日本機械學會論文集, 第34卷, 257號, pp. 191-198, 1968.
- (26) Kendall, k. and Tabor, D., “An Ultrasonic Study of the Area of Contact between Stationary and Sliding Surfaces”, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A No. 323, pp. 321-329, 1971.
- (27) 堤正臣, “超音波の 機械計測への 應用”, 精密機械, 第48卷, 第7號, pp. 953-959, 1982.
- (28) Krächter, H., “Ein Neuartiges Verfahren zur Messung von Druckkräften mit Ultraschall”, Werkstatt U. Betrieb, Vol. 91, No. 5, pp. 246-253, 1958.
- (29) Minakuchi, Y., et al., “Contact Pressure Measurment by means of Ultrasonic Waves”, Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 235, pp.40-45, 1985.
- (30) Minakuchi, Y., “Contact Pressure Measurement by means of Ultrasonic Waves”, Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 239, pp.792-798, 1985.
- (31) Tsutsumi, Miyakawa, A., and Ito, y., “Topographical representation of Interface Pressure Distribution in a Multiple Bolt-Flange Assembly Measurement by means of Ultrasonic Waves”, 28th Nat. Design Eng. Cont. Trans. ASME, pp. 1-8, 1981.
- (32) Krolikowski, J., Szczepek, J., and Witczak, Z., “Ultrasonic Investigation of Contact between Solids under High Hydrostatic Pressure”, Ultrasonics, Vol. 27, No. 1, pp. 45-49, 1989.
- (33) Tsutsumi, M., Ito, y., and Masuko, M., “Deformation of Bolted Joints in Machine Tools”, Bulletin of JSME, Vol. 22, No. 168, pp. 885-892, 1979.
- (34) Lawrence, E. K., Austin, R. F., Alan, B. C.,

- James, V. S., "Fundamentals of Acoustics", John Willey & Sons, Inc. New York, pp. 429-435, 1985.
- (35) Eisenstadt, M. M., "Introduction to Mechanical Properties of Materials Macmillan Publishing Co., Inc. New York, pp. 203-206, 1988.
- (36) 鄭寅聖, "超音波(橫波)를 이용한 接觸壓力測定에 關하여(1)", 工學研究, 第15輯, pp. 93-100, 1984.