

< 解 說 >

超音波를 利用한 接觸面壓力的 測定法

辛 奉 碩*

1. 緒 論

2物體의 接觸面이 나타내는 舉動에 關해서는 摩擦이나 摩耗의 分野에서 여러모로 研究되고 있었으나 最近에는 이와 같은 問題中 特히 接觸面의 彈性變形, 즉 2平面接合部의 接觸剛性を 對象으로 하는 研究가 機械工業의 Bolt 結合部 또는 案内面과 같은 2平面接合部의 接合剛性を 學論하는 分野에서 活潑히 論議되고 있다. 그 理由는 機械에 存在하고 있는 Bolt 結合部나 案内面 등에 關한 接觸剛성이 1臺의 機械의 靜, 動剛성에 크게 影響을 미치게 하고 있기 때문이다. 이에 關한 問題를 解明하기 위하여 가장 重要한 일은 接合面에 생기는 接觸面壓力的 效率의인 測定方法을 찾아내는 일이다.

그러나 지금까지는 接觸面壓력을 測定하고자 할 때 그 測定面을 改造하지 않고는 事實上 檢出方法이 없어 束手無策이었다. 不正確하나마나 從來에 使用하고 있었던 方法으로는 測定面에 작은 구멍을 뚫어 그 속에 pin을 꽂아서 이 끝이 壓力에 의하여 變形하는 量을 測定하는 이른바 Sensitive pin method가 있고 또 電極을 接觸시켜서 接觸抵抗의 變化를 測定하는 方法 등이 있으나 이것들은 일종의 破壞測定이므로 이 方法은 表面의 Roughness나 接觸面의 剛性 등에 微少한 變化를 일으킬 念慮도 있어 有効適切한 方法이라고 볼 수는 없다. 특히 cylinder內에 있어서 piston ring의 接觸狀態라든지 工具의 傾斜面에서 chip의 接觸길이 등은 到底히 測定할 길이 없다. 따라서 이와 같은 接觸面의 特性을 損傷사침이 없이 接觸面壓力이나 그 分布狀態를 有效하게 測定할 수 있는 方法이 즉 超音波를 利用한 接觸面壓力的 測定法이다. 이 方法은 材料의 非破壞檢査에서 使用되는 超音波探傷機를 利用한 것으로 音響의 性質이 다른 2平面의 境界面에 있어서의 音波의 反射特性과 面壓力에 의한 接觸面積의 增加關係를 應用한 것이다. 이에 關하여 그 原理와 測定方法, 또는 앞으로의 問題點

등에 關하여 解說하고자 한다.

2. 測定原理

材質이 다른 2개의 物體가 接觸되어 있을 때 그 接觸面積은 境界面에 있어서 音波의 反射特性과 接觸壓力에 따라 다르게 된다. 즉 이 性質을 利用한 것이다.

2-1. 境界面에 있어서 音波의 反射特性

一般的으로 平面波가 音響의 性質이 다른 2媒質의 境界平面에 垂直으로 入射하면 Fig. 1에서 보는 바와 같이 그 一部는 反射하고 一部는 通過하게 된다. 이 때에 境界面에서의 音壓振幅比 즉 音壓反射率 R_p 는 다음과 같이 된다.

$$R_p = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad (1)$$

여기서 C 는 音波의 傳播速度이다. 또 反射波音壓 P_r 와 入射波音壓 P_i 의 關係는 다음과 같다.

$$P_r = R_p P_i \quad (2)$$

여기서 媒質 1을 鐵이나 鋼이라고 할 때 여러 가지 媒質 2에 對한 音壓反射率 R_p 의 값은 Table 1과 같다.

Table 1에서 音波가 鐵이나 鋼에서 鐵鋼으로 入射하는 경우는 完全透過하고 空氣中에서 入射할 때에는 거의 完全反射하는 것으로 생각된다.

2-2. 機械加工된 2平面의 接觸部の 變形

일반으로 機械加工된 2平面의 接觸狀態를 생각할 때 加工으로 인한 表面의 Roughness 또는 材料의 휨으로 接觸面은 Fig. 2와 같이 된다.

이와 같은 2平面의 接合部에 垂直荷重이 作用되었을 때의 接觸機構에 對해서는 從來에 여러 가지로 研究된 바 있으나 아직도 確認된 바가 없어 여기서는 다만 接觸機構가 完全塑性體인 경우와 彈性體인 경우만에 關하여 垂直荷重 Q_n 와 眞實接觸面積의 關係를 檢討해 본다.

1) 接觸機構가 完全塑性的인 경우

*正會員, 全北大學校 工科大學

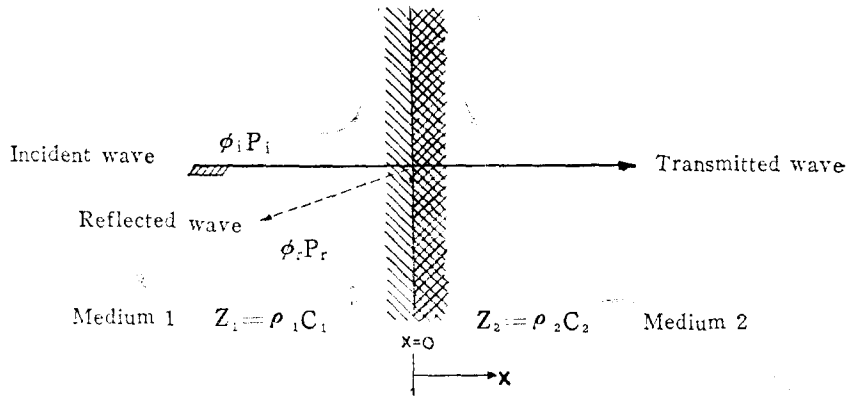


Fig. 1. 境界面に 있어서의 平面線の 反射

Table 1. R_p 의 값

媒質 2	R_p
鐵 · 鋼	0
기름	0.94
물	0.88
空氣	≈ 1.0



Fig. 2. 2平面的 接觸狀態

垂直荷重 Q_n 가 作用하여 眞平面이 거칠은 면과 接觸된 接觸點의 수를 n_c 라 하면 築添氏에 依하여

$$n_c \approx A_2 Q_n^{\eta_2} (\eta_2 \approx 0.8) \quad (3)$$

또 接觸點의 平均半徑 r_m 은

$$r_m = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} r_i}{n_c}$$

여기서

$$\sum_{i=1}^{n_c} r_i \approx A_3 Q_n^{\eta_3} (\eta_3 \approx 0.9) \quad (4)$$

따라서 垂直荷重 Q_n 에 의한 接觸面積이 增加 ΔS_p 는

$$\Delta S_p \approx n_c \pi r_m^2 = n_c \cdot \pi \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_c} r_i}{n_c} \right)^2 / n_c^2$$

따라서 (3), (4)式에 의하여

$$\Delta S_p = \frac{\pi A_3^2 Q_n^{2\eta_3}}{A_2 Q_n^{\eta_2}} \quad (5)$$

그러므로 接觸面의 表面狀態 및 材質이 一定하면

$$\Delta S_p = A_p Q_n^{2\eta_3 - \eta_2} \approx A_p Q_n$$

A_p : 定數로 되어 接觸面積의 增加는 거의 Q_n 에 比例하

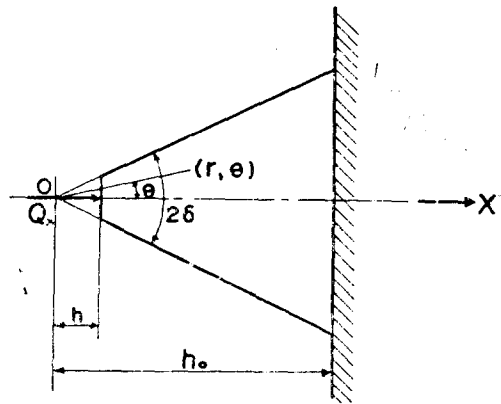


Fig. 3. 接觸點의 線性壓縮

게 된다.

2) 接觸機構가 完全彈性的인 경우

接觸點附近의 形狀을 Fig. 3과 같이 單純化시켜 各接觸點이 均一하게 垂直荷重을 받는 것이라고 하면 荷重 Q_n 에 의한 接觸面積의 增加는 다음과 같이 된다.

$$\Delta S_p = \frac{4 Q_n \tan \delta}{E(2\delta + \sin 2\delta)} \log \frac{h_0}{h} \quad (6)$$

따라서 接觸部의 表面狀態 및 材質이 一定하면 $\Delta S_p = A_p Q_n$ A_p : 定數로 된다.

따라서 實際의 接觸面의 變形은 彈, 塑性的인 경우라고 생각됨으로 어느 경우이든간에 接觸面積의 增加는 거의 Q_n 의 크기에 正比例한다고 생각된다.

2-3. 反射波音波와 垂直荷重 Q_n 의 定性的인 關係

2平面的 接觸部는 $R_p=1$, 또는 $R_p=0$ 인 部分으로부터 構成되어 있고 여기서 音波의 減衰現象은 없는 것으로

생각한다면 境界面에 있어서의 音波의 入射量 및 反射量에 따라 그 音波高의 값은 다음과 같이 된다.

$$P_{r,m} = P_{i,m} \frac{(S_0 - S) - \Delta S}{S_0} = P_{i,m} \left\{ 1 - \frac{S_i + \Delta S}{S_0} \right\} \quad (7)$$

여기서

S_0 : 現想의인 表面 Roughness 0인 接觸面上에서의 超音波가 存在하는 面積

S_i : 初期接觸面積

$P_{i,m}, P_{r,m}$: 音波高의 값

여기서 i, r 는 入射, 反射를 表示한다.

만일 超音波發振子의 接觸狀態, 發振子의 電壓 및 接觸部의 初期表面狀態가 一定하다고 하면

$$\Delta S/S_i = B_1 Q_n, \quad P_{i,m} = \text{Const.}$$

따라서

$$P_{r,m}/P_{i,m} = (1 - B_0) - B_2 Q_n \quad (8)$$

또는

$$P_{r,m}/P_{i,m} = (1 - B_0) - B_3 P_n \quad (8 \cdot a)$$

여기서 P_n : 接觸面壓力

B_0, B_1, B_2, B_3 : 定數, $B_0 \ll 1$

式(8·a)에서 理想的인 경우는 反射波音壓과 接觸面壓力的 關係가 Fig. 4의 破線과 같은 直線關係를 나타낸다.

그러나 實際로는 다음과 같은 理由에서 斜線內範圍에서 定性的인 傾向을 나타내고 있다.

(1) 荷重 Q_n , 또는 接觸面壓力 P_n 를 상당히 크게 增加해도 $R_0 \approx 1$ 인 部分은 除去되지 않는다.

(2) 式(8)의 B_0 는 S/S_0 , 즉 初期眞實接觸面積을 나타냄으로 1에 比하여 아주 적은 값이 되어 $1 - B_0 \approx 1$ 이라고 생각할 수도 있어 接觸面壓力이 0이면 反射波音壓比는 1로 된다.

(3) 式(8)는 새로운 接觸部分이 發生하지 않는 것으로 되어 있으나 實際로는 Q_n , 또는 P_n 의 增加에 따라서 接觸部의 表面 Roughness 또는 材料의 韌에 따라 새로운 接觸部分이 生成될 경우도 있을 것이다. 이 때의 音波의 透過量은 크게 增加하고 反射波音壓은 減少하게 된다.

(4) 超音波가 物質內를 通過할 때에는 散亂, 內部摩擦 등으로 多少 減衰現象이 생긴다.

3. 實 驗

3-1. 實驗裝置

接觸面壓力的 測定原理에 따라 測定方法에 使用한 實

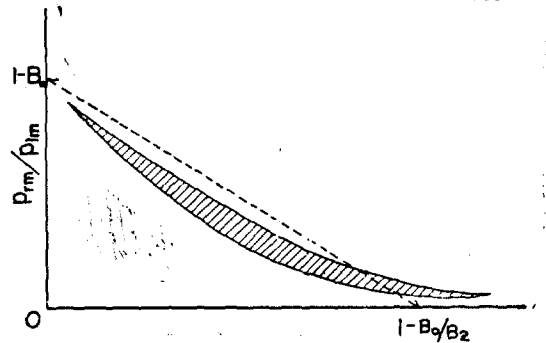


Fig. 4. 反射波音壓과 接觸面壓力的 定性的 關係

Table 2. 發振子의 周波數

發振子의 周波數	發振子의 直徑	第 1 指向角	C. R. T. 上의 Pulse
1 MHz	25 mm	16.0°	33 μsec
2	20	9.8	21
3	20	6.3	9.1
5	22	3.8	8.0

驗裝置는 다음과 같다.

(1) 超音波裝置 超音波의 發信, 受信에는 三菱電氣公社에서 製作한 FD-5C型 超音波探傷機를 使用하고 여기서 主要調整事項은 發振子의 周波數, Pulse의 너비, 受信感度(gain), 雜音除去(Rejection) 등이다.

여기서 發振子의 周波數와 Pulse의 너비는 水晶發振子에 따라서 Table 2와 같이 定해진다. 本 實驗에서는 送信과 受信을 同時에 하는 한개의 水晶發信子를 使用한 이른바 1探觸子法으로 한 것이다.

(2) 荷重裝置 荷重裝置는 荷重檢出用 Load cell과 荷重測定用 Strain meter로 測定하고 Load cell은 共和營業社製 LCH-2 TA(測定誤差 0.05%)이며 Strain meter는 共和營業社製 DPM-6CT이다.

(3) 2平面接合裝置 2平面이 接合하고 어느 集中荷重을 받을 때 그 壓力分布形狀을 檢討하기 위해서 水平型大型旋盤이나, Boring machine에서 흔히 볼 수 있는 平面案內面을 超音波接觸面壓力에 알맞도록 模型化한다. Fig. 5는 그 裝置의 概略을 表示한 것으로 ①과 ②가 各各 下部試驗片(I型), 上部試驗片이고 이 2試驗片으로 構成되는 2平面間의 定性的인 接觸壓力分布를 測定하게 된다.

3-2. 試驗片 및 實驗方法

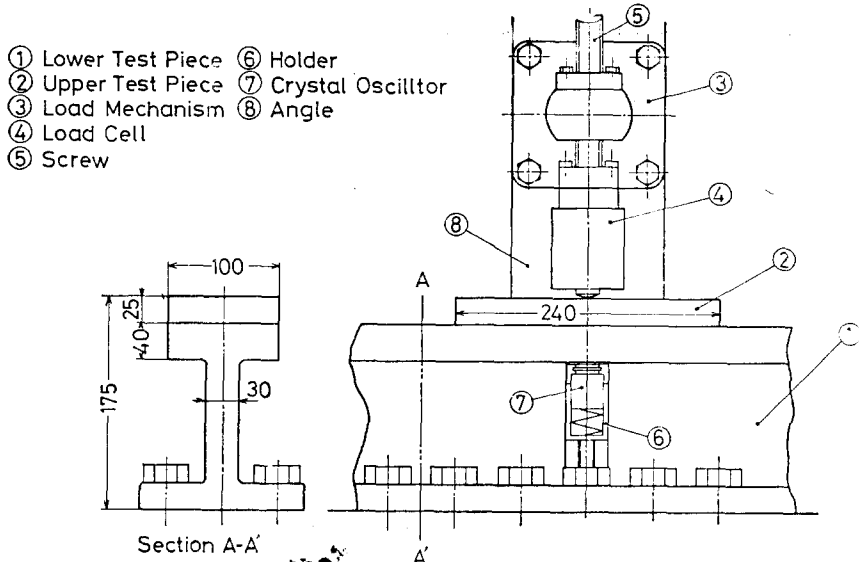


Fig. 5. 實驗裝置

Table 3. Upper and Lower Test Pieces

Material	Finishing	Thickness mm	Finishing of Lower Test Piece
FC 25	Grinding $H_{max}=2.0\mu m$	30, 25, 20, 15, 10	Grinding $H_{max}=2.0\mu m$ Lapping $H_{max}=2.0\mu m$
	Lapping $H_{max}=2.0\mu m$	20, 10	
S45C	Grinding $H_{max}=2.0\mu m$	10	Grinding $H_{max}=2.0\mu m$

Lower Test Piece: FC25

Chemical Component %

	C	Si	Mn	P	S
FC25	2.51	1.48	0.69	0.26	0.08
S45C	0.47	0.30	0.54	0.017	0.011

Mechanical Properties

	Tension Test	Transverse Test		Hardness Test
	Tensile Strength kg/mm ²	Maximum Load kg	Deflection mm	Hardness H _B
FC25	>22	>2300	>7.0	<229

(1) 試驗片 本實驗에 使用한 試驗片의 寸수는 Fig. 5와 같으며 두께, 機械的 性質, 化學的 組成, 表面加工 및 材質規格은 Table 3과 같다.

2개의 試驗片의 面은 Trichloroethylen 으로 充分히 깨끗이 씻고 乾燥시킨 다음 無潤滑狀態로 조용히 겹쳐 놓는다.

(2) 實驗條件 實驗條件은 아래와 같이 한다.

超音波送受信用發振子周波數	1 MHz
H ₂ 發振子の 直徑	25 mm
超音波探傷機 C. R. T의 Pulse	33 Msec
受信感度	5.0 dB
發振子の 接觸壓加	20 kg
雜音除去	Max

送信 Pulse의 能力은 어느 限定以上으로 높더라도 測定感度は 그리 向上되지 않으므로 豫備實驗에서 最適 條件으로 認定되는 5.0 dB로 통일하고 Pulse는 試驗片이 얇으면 反射波가 送信 Pulse內에 存在하여 Brown管上에 나타나지 않는 경우도 있어 이것을 고려하여 標準值인 33 μsec 근처에서 조절한다.

(3) 實驗方法 Fig. 5의 實驗裝置로 上部試驗片 ②를 下部試驗片 ①에 겹쳐 놓은 다음 荷重裝置 ③에 빠져 있는 나사 ⑤에 의해서 Load cell ④를 누르며 中央集中荷重을 上部試驗片에 作用시켜서 接觸面壓力을 測定한다. 荷重作用時의 2平面間의 面壓力은 Holder ⑤에 들어 있는 水晶發振子 ⑦에 의하여 投射되는 超音波의 2平面接觸部에서의 反射波의 變化로서 測定하게 된다. 水晶發振子和 下部試驗片의 接觸狀態는 測定結果에 크게 影響을 미치므로 測定을 簡單히 하기 위하여 水晶發振子는 固定하고 上部試驗片과 荷重裝置를 支持하

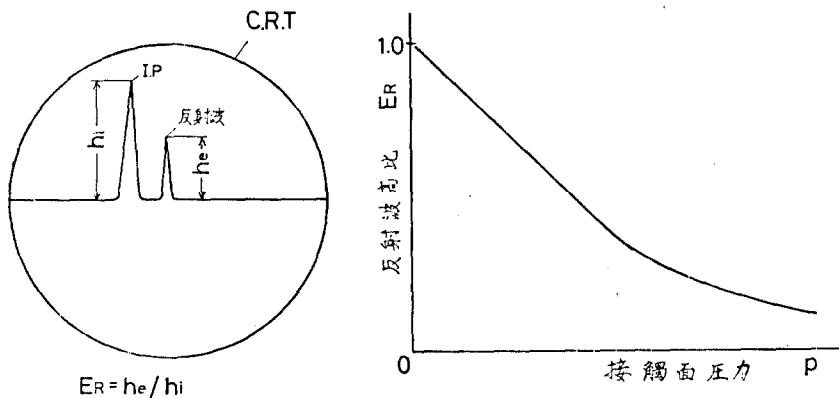


Fig. 6. C.R.T 상의 反射波音의 比

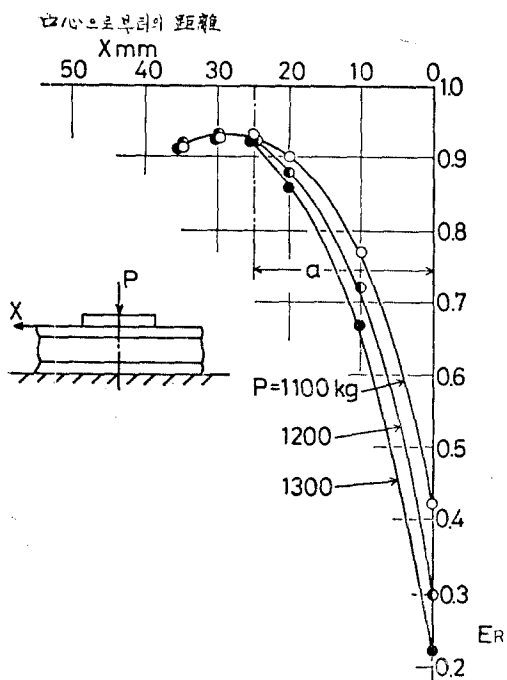


Fig. 7. 定性的인 面壓力分布

고 있는 Angle ③를 試驗片의 길이 方向으로 移動시키므로서 定性的인 面壓力分布를 얻을 수 있게 한다.

實際로 測定하는 경우 Broun 管上에 表示되는 超音波와 反射波의 變化關係를 模型의 으로 나타낸 것이 Fig. 6의 (a)이다. 즉 2平面間에 投射되는 送信 Pulse 波高 h_i 에 對한 反射波高 h_e 의 比를 反射波高比라고 부르고 이것을 E_R 로 表示하면 Fig. 6의 (b)에서 보는 바와 같이 接觸面壓力과는 거의 直線關係로 되어 있다. 따라서 試驗片 ①과 ② 사이에 있어서의 反射波高比分布를

測定하면 결국 2平面間의 定性的인 面壓力分布를 Fig. 6의 (b)에서 求할 수 있게 된다.

Fig. 7은 反射波高比를 測定한 一例이다. 壓力分布는 荷重이 加해지는 地點으로부터 對稱이 되므로 여기서는 그 中心으로부터 左側半만을 表示한 것이다.

4. 應用分野

超音波를 이용한 接觸面壓力의 測定法을 機械工學에서 應用될 分野는 다음과 같다.

(1) 案内面壓力分布의 測定

工作機械의 案内面設計에 있어서 重要な 限界面壓力의 設定 및 局部變形이 생길 때의 床의 彈性係數를 測定할 수 있다. 이것은 즉 2平面이 接觸되어 있을 때의 接觸剛性을 比較的 簡單히 求할 수 있고 그 때의 定性的인 面壓力分布를 알 수 있는 方法도 된다.

(2) Bolt 結合體에 있어서 締結壓力分布

Bolt 締結力의 有效作用範圍를 設定할 수 있으며 이 때의 定性的인 締結壓力의 分布狀態를 簡單한 計算에 의하여 定量的으로도 算出할 수 있다.

(3) 工具傾斜面에 있어서 Chip의 接觸길이의 測定

機械加工의 切削理論에서 가장 難問題로 提起되고 있는 切削中 Chip의 工具面에 있어서 接觸길이는 從來에 測定不可能한 領域이었다. 다만 光學的인 特殊한 方法으로 그 概要를 檢討할 뿐이었으나 本 測定方法을 利用하면 比較的 쉽게 그 接觸길이를 究明할 수 있다.

(4) Engine의 Piston ring의 接觸狀態

機關의 Cylinder 內에 있어서 Piston의 運動狀態는

時間에 따라 그 變位가 一定하지 않으므로 그 運動狀態를 檢討하기란 매우 難題의 하나이다. 더욱이 Piston ring 가 Cylinder 內面에서 어느 정도의 接觸面壓力을 가지고 움직이는가 하는 壓力分布는 從前에 그 測定方法이 없었다. 그러나 本 超音波를 利用한 面壓力測定法으로는 比較的 容易하게 測定可能性이 있다고 推測된다.

5. 結 論

2物體의 接觸面에 있어서 그 接觸面壓力의 測定에 따른 諸問題는 工學上 매우 重要な 課題이기는 하지만 지금까지 有効한 測定方法이 없어 이 現象을 究明하기 어려운 點이 많았다. 最近 超音波를 利用한 接觸面壓力의 測定方法이 開發됨에 따라 2物體의 接觸面에 있어서의 面壓力分布狀態는 어떠한 경우든지 定性的으로 測定可能하게 된 것은 實로 劃期的인 方法이라고 말할 수 있으나 定量的으로는 어느 特殊한 경우를 除外하고는 다음과 같은 여러 가지 問題點이 있다.

(1) 發振子의 設定條件에 따라서 測定結果에 크게 影響을 미치게 한다.

(2) C. R. T 를 使用한 記錄方法은 크게 修正할 餘地가 있다.

(3) 照射面積에 따라서 測定精度가 매우 다르게 나타났다.

(4) 測定面積을 보다 적게 할 必要가 있다.

現在 使用되고 있는 測定面積은 直徑 4~17 mm 의 範圍에서 測定하고 있으나 보다 微小한 位置의 面壓力을 測定할 수 있는 方法이 要望되고 있다.

또 超音波를 利用한 本 測定方法은 面壓力에 의한 音響 Impedance 의 變化를 測定할 수도 있으며 또 面壓力에 의한 超音波의 位相差를 檢討할 수도 있고 接觸面의 周波數特性變化에 관해서도 利用할 수 있을 것으로 생각된다. 또 面壓力 測定方法으로 使用하는 發振子의 面을 立體化하면 그 應用範圍는 더욱 擴大하여 定量的인 實用性도 있을 것으로 展望된다.

參 考 文 獻

- 1) N. Back, M. Burdekin & A. Cowley: Proceedings of the 13th Inter. M. T. D. R. Conference, Macmillan (1973) 87.
- 2) E. J. Fontento: Dissertation, Louisiana State University (1968)
- 3) Z. M. Levina: Proceedings of the 8th Inter. M. T. D. R. Conference. Pergamon Press (1968) 737
- 4) R. E. Schofield: Proceedings of the 13th Inter. M. T. D. R. Conference, Macmillan (1968) 75
- 5) 辛奉碩, 伊東誼: そりのおろは 不均一變形の生じろ 2平面接合部の接觸剛性, 潤滑, 19, 8 1974, 570
- 6) 伊東誼: 工作機械のボルト結合部の靜・動剛性, 日本機械學會誌 73, 619 (1970) 1169
- 7) 伊東誼, 益子正巳: 日本機械學會論文集, 36, 284 (1970) 639
- 8) 益子正巳, 伊東誼: 日本機械學會論文集, 34, 257 (1968) 191
- 9) 伊東誼, 益子正巳: 日本機械學會論文集, 37, 295 (1971) 271
- 10) 日本學術振興會編: 超音波探傷法, 日刊工業新聞 (1964)
- 11) 塚田忠夫: 日本機械學會論文集, 37, 304 (1971) 2401
- 12) 築添: 表面おりちと面の接觸機構いつりこ, 潤滑, 13, 3 (1968) 101
- 13) Timoshenko: (鷄戶口, 岡村澤) 材料學會(中卷) 東京圖書 (1962)

附 記

本 實驗은 1973年 5月부터 1975年 4月까지 24個月 동안 東京工業大學 生産機械工學科 機械加工學教室에서 主로 實施한 것임.