

超音波에 의한 볼트의 軸力測定

Study on the Measurement of Bolt Axial Force by Ultrasonic Wave

韓 應 教,* 金 在 烈**
Eung Kyo Han, Jae Yeol Kim

ABSTRACT

It is important to control the axial forces of high tension bolts such as the automobile, construction machine, aircraft, marine engine bolts.

However, the direct method to measure the axial forces of bolts practically have not been found out.

The ultrasonic techniques is based on the principles that the bolt tensile elongation and ultrasonic velocity changes are proportional to the axial force below the yield point of the materials.

From the result of the experiment, the coefficient of acoustoelasticity k could be measured as $-11.18 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{Kg}f$.

NEMENCLATURE

A1 : Section area of part of the Non-screw
A2 : Effective section area of part of the screw
B1 : Propagation time of the B1 echo
B2 : Propagation time of the B2 echo
4B : Difference of propagation time of the B1 and B2 echo
D : Diameter of part of the Non-screw
D' : Diameter of part of the screw
E : Longitudinal elastic coefficient
F : Tension load
 f_t : Frequency

h : Length of head part of the bolt
h' : Length of head part of the bolt an applying the load
 k : Coefficient of acoustoelasticity
L : Total length of the bolt
 l : Length from lower head part to end of the bolt
 l' : Effective length of the bolt
 l_1 : Length of Non-screw prt of the bolt
 l_2 : Diameter of screw part of the effective length part
 l_3 : Length of part of the nut
 l_4 : Length of free part of the bolt
 l'_3 : Length of nut part on applying the load

* 漢陽大學校 精密機械工學科 教授

** 漢陽大學校 大學院

- Δl : Elastic elongation
- $\Delta h, \Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$: Elongation of each part
- $\Delta l'_3$: Elongation of nut part on applying the load
- P : Pitch of bolt
- t_σ : Propagation time of load situation
- t_o : Propagation time of unload situation
- t_d : Delay time
- V_σ : Velocity of load situation
- V_o : Velocity of unload situation
- σ : Stress

1. 緒 論

各種 構造物의 大型化나 部品의 精密化에 따르는 여러가지 種類의 高張力 볼트가 自動車, 船舶用機關, 原子力發電所, 建設機械 등의 分野에서 利用되고 있다. 이와 같은 分野에서 構造物의 安全性과 耐久度를 維持하기 위하여 볼트의 締結力의 管理는 대단히 重要한 意味를 지니고 있다.

볼트의 軸力을 測定하는 方法으로서는 現在 Torque 法,¹⁾ 回轉角法,²⁾ Strain Gauge 法³⁾ 과 非破壞的인 方法으로 超音波에 의한 볼트의 軸力測定法⁴⁾이 있다. 하지만 이와 같은 方法들은 現場에서의 適用性과 測定精度에 問題가 있다. 이와 같은 여러가지 軸力測定法중 超音波에 의한 볼트의 軸力測定法과 彈性材料가 應力負荷狀態에 있고 材料中을 傳播하는 超音波의 速度가 應力에 存在하는 音彈性(Acousto-elasticity) 效果⁵⁻⁸⁾를 利用하는 方法이다. 결국 볼트의 머리部로부터 超音波를 入射하고 볼트의 저면部로부터 反射波를 받아 그 共振周波數 혹은 傳播時間을 測定하는 것에 의해서 볼트의 軸力을 推定하는 것이다.

그러나 볼트의 軸力測定에는 이에 미치는 인자가 많을 뿐만 아니라 이들 인자의 影響에 대해서는 충분히 밝혀져 있지 않다. 이 때문에 볼트의 測定條件이 變化할 때마다 校正할 必要가 생긴다.

따라서 本 研究에서는 볼트의 軸力測定에 있어서 볼트試驗片의 材質, 形狀, 應力狀態가 變化될 때의 超音波의 傳播時間과 彈性變形量을 測定하여 測定條件이 달라질 경우에도 測定精度를 向上시키기 위하여 軸力과 音彈性係數의 相關關係를 究明하고자 여러가지 實驗을 하여 音彈性係數의 平均値를 求해냈다.

2. 基礎理論

2.1 基本 Model의 設定

Fig.1에 表示된 길이 L의 單純한 丸棒을 縱波의 超音波가 傳播하는 時間에 대해서 생각하자. 無負荷狀態($F=0$)의 경우 音速을 V_o 라 하면 이때의 超音波의 傳播時間과 速度 사이의 關係式은 다음과 같다.

$$t_o = \frac{L}{V_o} \dots\dots\dots (1)$$

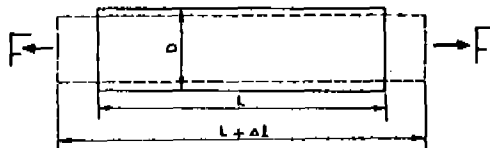


Fig.1 Fundamental model

여기서 使用한 添字 "o"는 初期값을 表現한 것이며 負荷狀態인 경우 音速과 超音波의 傳播時間을 V_σ 와 t_σ 라고 하면,

$$t_\sigma = \frac{(L + \Delta l)}{V_\sigma} \dots\dots\dots (2)$$

이때 縱波의 音速 V_σ 는 다음과 같다.

$$V_\sigma = V_o \left(1 + k \frac{F}{A} \right) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 k 는 音彈性係數이고 荷重 F 는 다음 式으로 表示된다.

$$F = A \frac{t_\sigma - t_o}{t_o / E - k t_\sigma} \dots\dots\dots (4)$$

따라서 音彈性係數 k 는 다음 式으로 나타낸다.

$$k = \frac{A}{F t_o} \left\{ \left(1 + \frac{F}{AE} \right) t_o - t_\sigma \right\} \dots\dots\dots (5)$$

2.2 볼트의 基礎理論

Fig.2와 같은 形態의 볼트의 경우에 있어서 無負荷狀態($F=0$) 때의 超音波의 傳播時間 t_0 는 다음 式 (6)으로 나타낸다.

$$t_0 = \frac{h + l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{V_0} \dots\dots\dots (6)$$

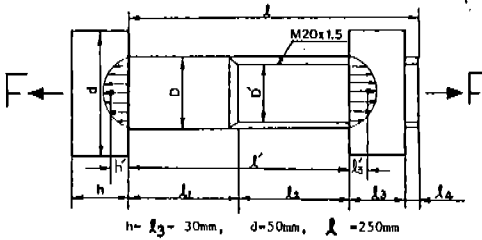


Fig.2 Construction of high tension bolts

一般的으로 볼트의 伸張量은 Fig.2에서와 같이 l_1, l_2 즉 볼트 頭部の l_1 側과 나사部の l_2 側에서 지배적으로 發生하게 된다.

負荷狀態의 경우 즉 軸力 F 가 作用할 때의 超音波의 傳播時間 t_σ 는 다음 (7)式으로 表示된다.

$$t_\sigma = \frac{(h-h') + (l_3-l_3') + l_4}{V_0} + \frac{h' + \Delta h' + (l_1 + \Delta l_1)}{V_1} + \frac{(l_2 + \Delta l_2) + l_3' + \Delta l_3'}{V_2} \dots\dots\dots (7)$$

그러므로 軸力에 의한 超音波 傳播時間의 變化量은 다음과 같다.

$$t_\sigma - t_0 = \frac{h' + \Delta h' + l_1 + \Delta l_1}{V_1} + \frac{l_2 + \Delta l_2 + l_3' + \Delta l_3'}{V_2} + \frac{h' + l_1 + l_2 + l_3'}{V_0} \dots\dots\dots (8)$$

式 (8)을 變形하면 式 (9)와 같다.

$$\left\{ (t_\sigma - t_0)V_0 + h' + l_1 + l_2 + l_3' \right\} \left(1 + k \frac{F}{A_1} \right) \left(1 + k \frac{F}{A_2} \right) - (h' + \Delta h' + l_1 + \Delta l_1)$$

$$\left(1 + k \frac{F}{A_2} \right) - (l_2 + \Delta l_2 + l_3' + \Delta l_3') \left(1 + k \frac{F}{A_1} \right) = 0 \dots\dots\dots (9)$$

式 (9)를 軸力 F 에 대해서 整理하면 다음과 같은 2次 方程式으로 表示된다.

$$aF^2 + bF + c = 0 \dots\dots\dots (10)$$

이 式에서 a, b 및 c 는 다음 式과 같다.

$$a = \left\{ (t_\sigma - t_0)V_0 + h' + l_1 + l_2 + l_3' \right\} \frac{k^2}{A_1 A_2} - (0.4D + l_1 + l_2 + 0.4D') \frac{k}{A_1 A_2 E} \dots\dots\dots (11)$$

$$b = \left\{ (t_\sigma - t_0)V_0 + h' + l_1 \right\} \frac{k}{A_1} + \left\{ (t_\sigma - t_0)V_0 + l_2 + l_3' \right\} \frac{k}{A_2} - \left(\frac{h' + l_1}{A_1} + \frac{l_2 + l_3'}{A_2} \right) \frac{1}{E} \dots\dots\dots (12)$$

$$c = (t_\sigma - t_0)V_0 \dots\dots\dots (13)$$

그러므로 볼트의 軸力 F 는 볼트의 形狀과 音彈性係數 k 가 주어지고 볼트締結 前後에서 超音波의 傳播時間 t_σ, t_0 을 測定하면 式 (10)으로부터 求解 될 수가 있다.

式 (9)를 音彈性係數 k 에 대하여 整理하면 다음과 같다.

$$a'k^2 + b'k + c' = 0 \dots\dots\dots (14)$$

이 式에서 a', b' 및 c' 는 다음 式과 같다.

$$a' = \left\{ (t_\sigma - t_0)V_0 + h' + l_3' + l_1 + l_2 \right\} \frac{F^2}{A_1 A_2} \dots\dots\dots (15)$$

$$b' = \left\{ (t_\sigma - t_0)V_0 + h' + l_1 - \Delta l_2 - \Delta l_3' \right\} \frac{F}{A_1} + \left\{ (t_\sigma - t_0)V_0 + l_3' + l_2 - \Delta h' - \Delta l_1 \right\} \frac{F}{A_2} \dots\dots\dots (16)$$

$$c' = (t_\sigma - t_0)V_0 - (\Delta h' + \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3') \dots\dots\dots (17)$$

그러므로 k 는 볼트의 軸力 F 의 測定과 볼트의 形狀으로부터 式 (14)를 풀어서 얻을 수가 있다.

3. 實 驗

3.1 實験裝置

- 1) 引張試驗機(容量: 20ton)
- 2) Sing-around 裝置
- 3) 超音波探觸子(使用周波數: 5MHz, 探觸子直徑: 20mm)
- 4) Oscilloscope(Model: V-105F, 100MHz)
- 5) Dial Gauge(測定範圍: 0.01~5mm)
- 6) Jig
- 7) 試驗片

Fig.3은 本 實験裝置의 Block-diagram 을 나타낸 것이다.

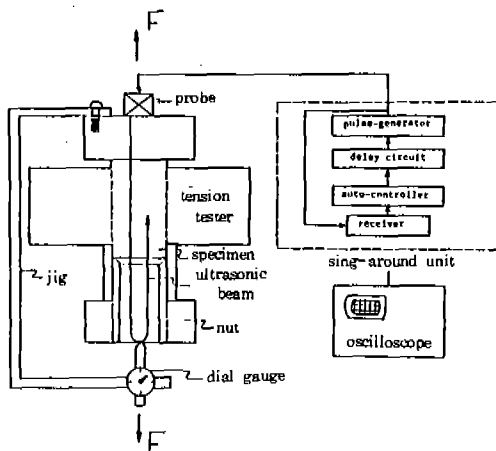


Fig.3 Block diagram of experiment apparatus

3.2 實験方法

볼트 軸力測定の 基礎實験에 있어서는 아래와 같은 試驗片을 使用했다.

- 1) 너트部의 位置가 다른 것
- 2) 나사部의 長이가 다른 것
- 3) 볼트의 直徑이 다른 것
- 4) 軟鋼으로 S50C, S45C, S35C, S25C 등의 材質이 다른 것 등의 여러가지 試驗片에 대하여 測定을 하였다. 實験에 使用된 試驗片은

Photo1에서 表示했다. 各種의 試驗片에 대하여 引張試驗機를 利用해서 0.5 ton씩 荷重을 段階的으로 加해 가면서 超音波가 試驗片內를 통과하는 往復傳播時間 t_0 와 dial gauge 로써 볼트의 彈性變形量 Δl 을 測定하였다. 本 實験에서 使用된 探觸子의 共振周波數는 5MHz 이고 thickness는 2mm이다.

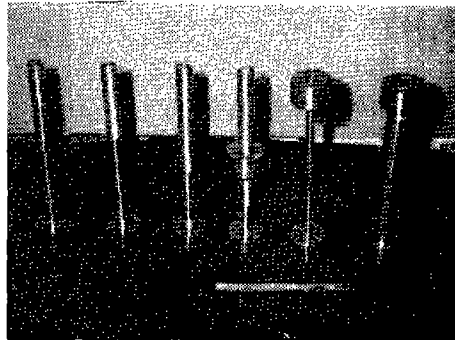


Photo 1. Specimens

t_0 는 볼트의 端部 echo의 傳播時間 B_1 과 2회多重反射 echo의 傳播時間 B_2 로부터 式 (8)에 의해서 다음과 같이 구해진다.

$$t_0 = B_2 - B_1 \dots \dots \dots (8)$$

本 實験의 Data解析에 있어서 利用한 音彈性係數 k 의 算出 Program의 flow chart을 Fig.4에서 表示했다.

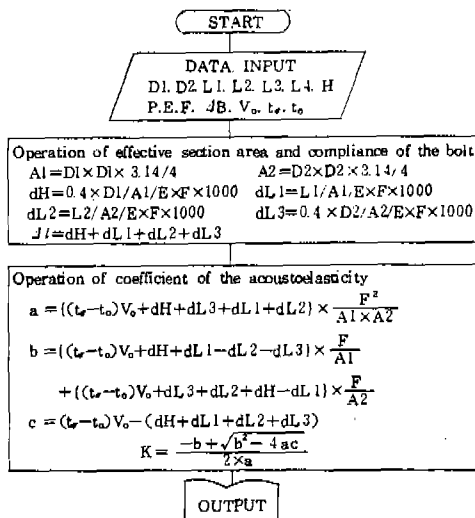


Fig.4 Flow chart

4. 實驗結果 및 考察

實驗에 使用된 여러 種類 및 치수를 가진 試驗片에 대해서 實驗한 結果 音彈性係數 k (mm^2/kg)와 引張荷重 F 의 關係에 대한 實驗結果는 다음과 같다.

① 너트部의 位置가 다른 경우

Fig.5는 너트의 位置를 볼트의 머리部로부터 105, 138, 158, 208mm로 變化시켜 實驗한 結果이다. 引張荷重이 작을 때에는 實驗誤差 등의 影響으로 音彈性係數 k 의 標準偏差는 크지만 引張荷重이 커지게 되면 너트의 位置에 따라서 거의 一定하게 되는 것을 알 수 있었다.

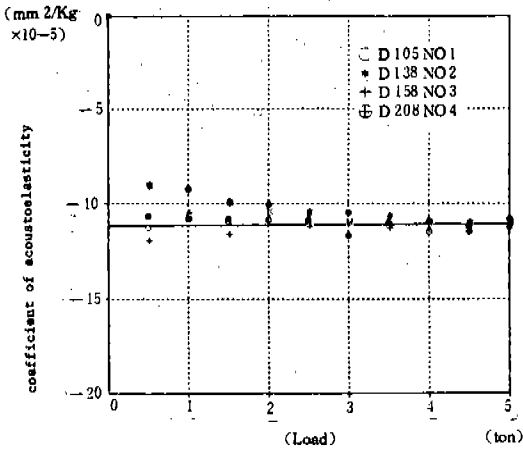


Fig.5 Relationship between coefficient of acoustoelasticity and load in case of which differs from the position of nut

이 實驗의 結果로부터 音彈性係數 k 의 平均値로서는 $-11.15 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ 이 되었다. 여기서 使用된 試驗片의 材質은 S45C이다.

② 나사部의 長이가 다른 경우

이 경우에 있어서 使用된 試驗片의 材質은 같은 S45C이고 나사部의 寸數 長이를 204, 154, 103, 53mm로 하고 實驗을 하였다. 그 結果를 Fig.6에 表示했으며 이 경우에도 荷重을 增加시키면 音彈性係數 k 는 나사部의 長이에 따라서 거의 一定한 값을 얻었다. 이 때의 音彈性係數 k 의 平均値는 $-11.16 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ 이었다.

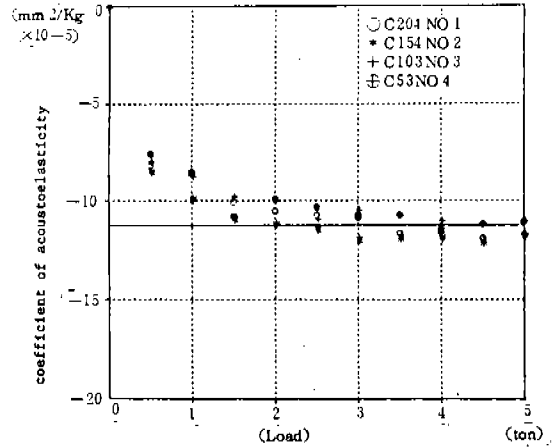


Fig.6 Relationship between coefficient of acoustoelasticity and load in case of which differs from the length of screw part

여기서 使用된 音波의 波長 λ 는 다음과 같다.

$$\lambda = c/f = 5,900 / 5 \times 10^6 \text{ Hz} \approx 1.2 \text{ mm}$$

그러므로 $a/\lambda \gg 1$ 이므로 Bulk wave의 速度를 고려할 수 있다.

③ 볼트의 直徑이 다른 경우

試驗片의 材質은 같은 S45C로 볼트의 直徑을 14, 20mm에 대하여 實驗을 行했다. 直徑 20mm의 경우 實驗結果를 Fig.7에 나타냈다.

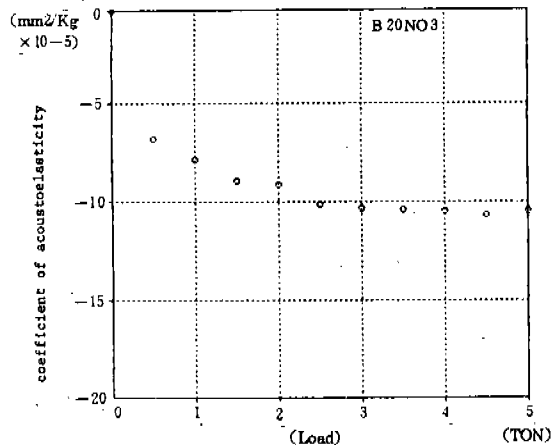


Fig.7 Relationship between coefficient of acoustoelasticity and load in case of which differs from the diameter of bolts

반면에 直徑이 14mm의 경우에는 反射 echo가 대단히 작기 때문에 正確한 測定이 不可能하였다.

④ 볼트의 材質이 다른 경우

Fig.8은 試驗片의 材質이 다른 경우의 實驗結果이다. 音彈性係數 k 는 材質에 따라서 다소의 標準偏差는 있지만 平均값으로 $-11.23 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ 로 거의 一定한 값이 얻어졌다.

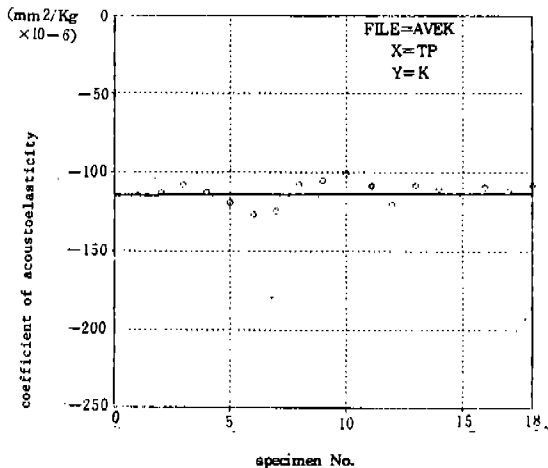


Fig.9 Coefficient of acoustoelasticity of the specimens

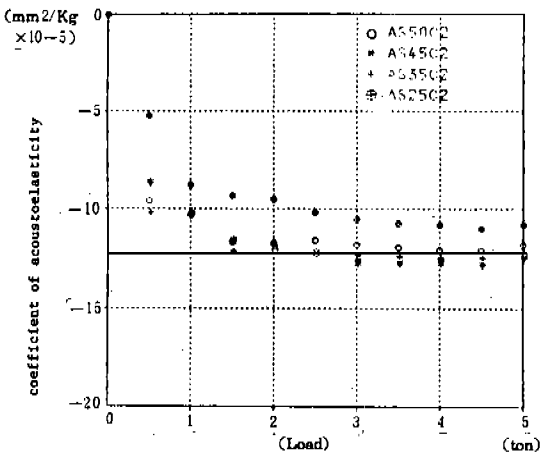


Fig.8 Relationship between coefficient of acoustoelasticity and load in case of which differs from the materials of bolts

여기서 S25C의 경우는 平均값에 比較해서 約 1%의 標準偏差가 있음을 알 수 있었다. 이것은 材質의 引張強度가 높을수록 標準偏差가 작고 引張強度가 낮은 것일수록 크게 나타나고 있는데 이는 強度가 높을수록 超音波의 傳播速度가 짧고 強度가 낮을수록 傳播速度가 길다는 것을 나타낸다.

以上的 여러가지 實驗條件에서부터 얻어진 考察으로써 音彈性係數 k 를 試驗片 18개에 대해서 測定한 實驗結果를 Fig.9에 나타낸다. 또한 材質 S45C의 경우 彈性變形量을 實驗結果値와 理論公式에 의한 計算値를 比較한 것이 Fig.10이며 그림에서 보는 것처럼 거의 일치함을 알 수가 있어 이는 매우 높은 信賴性을 가지게 한다.

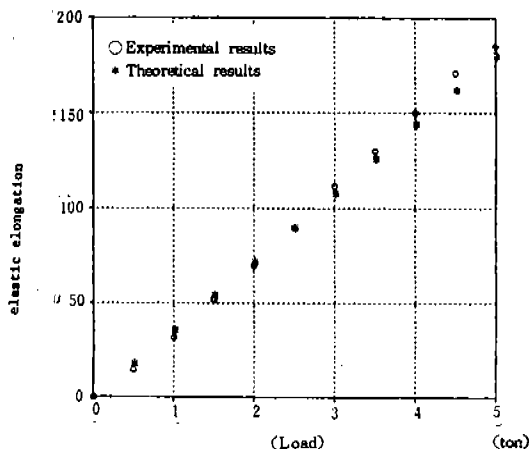


Fig.10 Comparison with theoretical and experimental result(S45C)

5. 結 論

本 論文은 超音波를 利用한 볼트軸力 測定의 基礎實驗的 研究結果이며 測定條件을 달리 할 경우 軸力과 音彈性係數 k 가 어떻게 變化하는 가를 究明한 것이며 結合하면 다음과 같다.

1) 試驗片에 대한 測定條件을 달리할 경우 音彈性係數 k 는 平均値로 $-11.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kgf}$ 의 값을 얻을 수 있었으며 測定條件중 材質에 따르는 k 의 값은 다소의 標準偏差가 있음을 알 수 있었다.

2) 本 實驗上 求한 k 의 값을 利用하면 實驗値와 理論式에 의해서 求한 彈性變形量은 1% 以內로 一致하였다.

앞으로 이 實驗을 土臺로 實用的으로 現場用 軸力測定器로 開發할 생각이며 이번 研究는 日立建機(株) 土浦工場 開發研究부와 合同으로 이루어진 것이며 研究開發부의 滝下氏, 小倉博士 기타 여러분들의 協助에 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

1. Eiji Yamamoto, Ryohei Motegi; Measurement of Bolt Tension by Ultrasonic Technique, Journal of the E. M. S. T., Vol. 13, No. 10, 1978. 10, pp. 781~785.
2. 本 晃; ねじ隨說(17), 機械の研究, 18(6), 1966. 6, pp. 795~800.
3. 福岡秀和, 戶田裕己, 中裕之; 音彈性による壓延H形鋼의 殘留應力測定, 材料30(30), 昭和56年 3月, pp. 261~267.
4. 福岡秀和; 音彈性入門(その1 音彈性理論, その2 音彈性實驗) 非破壞檢査, 33(9), 33(10), 昭和59年 10月, pp. 633~640.
5. H. FVKVOKA, H. TODA; Preliminary Experiment on Acousto-elasticity for stress analysis, Archives of Mechanics, Vol. 29, No. 5, 1977, pp. 673~686.
6. 寺澤德雄著; 振動と波動, 1987. 3. 岩波書店.
7. H. FUKVOKA, H. TODA, T. YAMANE; Acoustoelastic stress Analysis of Residual stress in a Patch-welded Disk Experimental Mechanics, July, 1978, pp. 277~280.
8. H. FUKUOKA, H. TODA; Non-destructive stress Analysis by Acoustoelasticity, VDI-Berichte, Nr. 313, 1978, pp. 245~249.
9. 小堀修身, 岩清水 幸夫, 川井 五作; 彈, 塑性變形による彈性波傳播速度の變化について, 日本機械學會關西支部第55期定時總會講演會 講演論文集, 1980. 3. 18, pp. 82~84.
10. 福岡秀和, 戶田裕己; 音彈性殘留應力解析, 材料 第35卷 第396號, 昭和61年9月, pp. 961~971.
11. H. F. Pollard; Sound wave in Solide, 1977, Pion limited.