超音波에 依한 보울트軸応力測定

韓 應 教

한양대학교 정밀기계공학과
(1981年 1月 29日 접수)

The measurement of bolt tension stress by ultrasonic technique

EUNG - KYO HAN

Dept. of presicion Mechanical Eng, HANYANG University
(Received; January 29, 1981)

1. 머리말

建設機械 및 自動車엔진헤드用 보울트 등 重要한 보울트는 締結力을 管理하는 것이 매우 重要하다. 따라서 現在로서는 簡單히 토오크렌치로 토오크를 管理하고 있으나 定해진 토오크로 보울트를 締結한다 해도 實際面에서는 보울트에 생기는 軸應力에 많은 흩어짐이 있어 安全性에 問題가 있다. 따라서 現在까지 보울트 軸應力의 測定法과 管理法은 여러面에서 檢討 開發하고 있으나 그 中에서도 토오크렌치에 依한 너트 回轉角法과 超音波法이 있다.

彈性材料가 應力負荷狀態에 있으면 彈性波의 速度가 그 應力에 依存한다는 것이 오래전부터 알려져있다. 그리고 또 彈性材料는 應力負荷狀態에서 微小한 變形量이 應力에 依存한다. 즉 보울트의 경우에도 이와 같은 理念을 適用하면 보울트軸力을 推定할 수가 있다. 보울트 머리로부터 超音波를 入射하여 보울트 밑면에서 反射되는 것을 받아 그 共振周波數 또는 傳播時間을 測定함으로써 보울트의 軸應力을 推定하는 것이다. 實驗裝置로서는 펄스와 共振周波數의 두가지가 있으나 傳播時間을 測定하는 펄스法이 操作이 容易하고 精度도 좋아 實用的이다. 따라서 超音波에 依한 軸力測定에 關한 基礎的인 여러 事項을 理論的으로 考察하여 實驗結果와 比較한것을 整理한 것이다. 그리고 그 밖에의 應用에 對한 것도 함께 調査하였다.

2. 測定原理

길이 ℓ 되는 보울트에 音速 c의 超音波를 頭部로부터 入射시킬 때 超音波의 n回 反射의 傳播往復時間 t_n은 다음 式으로 表示된다.

$$t_n=\frac{2nl}{c} \quad \cdots\cdots (1)$$

軸應力이 發生할 때는 다음의 式이 된다.

$$t_n=\frac{2nl\sigma}{c}=\frac{2n(l+\Delta l)}{c-\Delta c}\fallingdotseq 2n\left(1+\frac{\Delta l}{l}+\frac{\Delta c}{c}\right)\cdots(2)$$

따라서 $$\frac{n\Delta t}{tn}=\frac{\Delta l}{l}+\frac{\Delta c}{c}\cdots(\text{傳播時間變化率})\cdots\cdots(3)$$

단, $0<\frac{\Delta l}{l}\quad\frac{\Delta c}{c}\quad\frac{\Delta t}{tn}\ll 1$

l : 보울트 軸應力이 0일때 길이

그림 1은 보울트가 軸應力에 依해서 늘어날 때의 超音波에코우의 變化狀態를 表示한 것이다. 여기서 變化量 Δl, Δc, Δt는 보울트軸應力에 比例하게 되

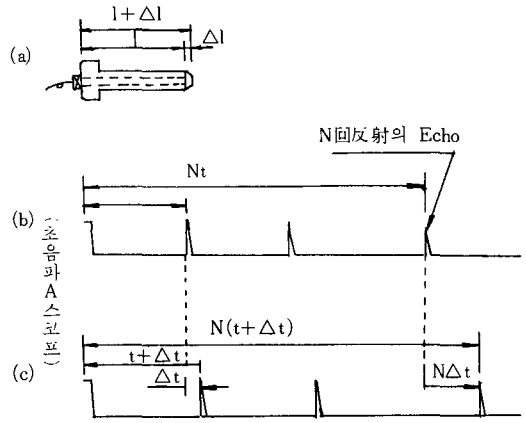


Fig. 1. Relation of the existence and the nonexistence of the stress in bolts to ultrasonic velocity changes.

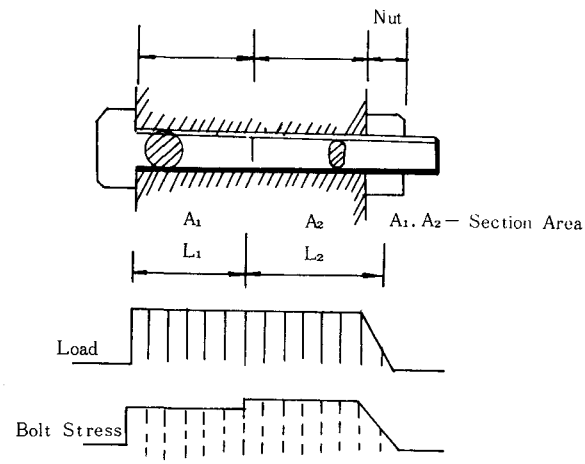


Fig 2. Distribution of load and tensile stress of bolt.

어 다음 式으로 求할 수가 있다.

$$\frac{n\cdot\Delta t}{tn}=k\sigma \quad 또는 \quad \sigma=\frac{1}{k}\frac{n\cdot\Delta t}{tn} \cdots\cdots (4)$$

따라서 傳播時間 變化率을 測定하면 보울트 軸應力 σ를 求할 수가 있다.

2-1 보울트의 伸長

보울트의 荷重分布는 大体的으로 그림 2와 같이 近似的으로 取扱하여도 좋다. 따라서 보울트의 中心軸의 應力分布는 그림 2와 같다. 여기서 보울트의 強度와 破壞에 影響을 주는 것은 나사의 골짜기 部分의 集中應力이라고 볼 수 있으나 지금 여기서 測定하고자 하는 것은 超音波의 傳播部分 즉 보울트 中心軸部分의 平均的인 應力이므로 그림 2와 같은 應力分布를 생각해도 關係가 없다.

보울트에 걸리고 있는 荷重이 靜荷重으로써 彈性限度內에 있을 경우에는 보울트의 스프링定數 K_t는 보통 다음과 같은 式이 된다.

$$\frac{1}{K_t}=\frac{1}{E}\left(\frac{L_1}{A_1}+\frac{L_2}{A_2}\right) \cdots\cdots (5)$$

여기서 E : 보울트 材料의 彈性係數

L_1, A_1 : 보울트 円筒部의 길이와 斷面積

A_2 : 보울트 나사部의 有效 斷面積

L_2 : 보울트 나사部 길이에 너트 두께의 반을 추가한 길이

따라서 軸力 P_t가 加해질 때의 보울트의 늘어짐 Δl는 다음 式으로 表示된다.

$$\Delta l=\frac{P_t}{K_t}=\frac{1}{E}\left(\frac{L_1}{A_1}+\frac{L_2}{A_2}\right)P_t \cdots\cdots (6)$$

2-2 応力에 따른 音速의 變化

D. S. Hughes와 J. L. Kelly에 따르면 應力分布方向과 一致한 方向으로 超音波縱波를 傳播시켰을 때의 音速 C_a는 다음과 같다.

$$\rho_a C_a^2=\alpha-\beta_a \cdots\cdots (7)$$

$$\alpha=\lambda+2\mu$$

$$\beta=\frac{1}{3\lambda+3\mu}\left\{2l_M+\lambda+\frac{\lambda+\mu}{\mu}(4m_M+4\lambda+10\mu)\right\}$$

여기서 ρ_a : 密度

λ, μ : Lame의 定數

l_M, m_M : Murnaghan의 定數

應力依存項이 微小量인 까닭으로 (7)式을 近似的으로 다시 쓰면 音速變化分은

$$\Delta C=\left(\frac{\alpha}{\rho_0}\right)^{1/2}\left\{\left(-\frac{1}{2}+\upsilon\right)\varepsilon+\frac{\beta}{2\alpha}\alpha\right\} \cdots\cdots (8)$$

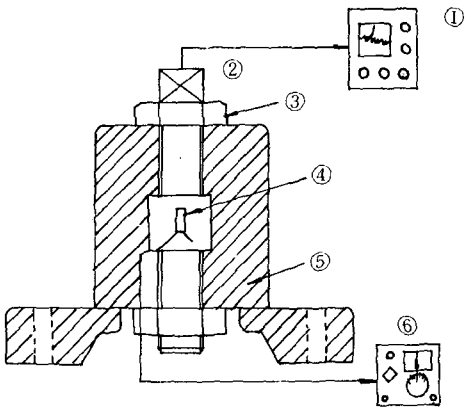
단, $\rho_a=\rho_0/(1+\varepsilon)\ (1-\upsilon\varepsilon)^2$

ε : 引張스트레인

υ : Poisson's ratio

2-3 測定理論式

以上과 같은 것을 通해서 理論測定式을 整理하면 (3), (6), (8) 式에서



No	Description
1	Ultrasonic scope
2	Transducers
3	Bolt
4	Strain gauge
5	Bolt holder
6	Strain indicator

Fig 3. Experimental apparatus

$$\frac{n\cdot\Delta t}{t_n}\fallingdotseq\frac{\Delta l}{l}+\frac{L_1}{l}\cdot\frac{\Delta C_1}{C}+\frac{L_2}{l}\cdot\frac{\Delta C_2}{C}$$
$$=K_p\cdot P_t \quad\cdots\cdots (9)$$

$$K_p=\frac{1}{l}\left(\frac{L_1}{A_1}+\frac{L_2}{A_2}\right)\left[\frac{1}{E_t}+\left(\frac{\alpha}{\rho_0}\right)^{1/2}\left\{\left(-\frac{1}{2}+\upsilon\right)\frac{1}{E_t}+\frac{\beta}{2\alpha}\right\}\right]$$

따라서 보울트軸力 P_t는 다음과 같이 求해진다.

$$P_t=\frac{1}{K_p}\cdot\frac{n\cdot\Delta t}{t_n} \quad\cdots\cdots (10)$$

여기서 $A_1=A_2$로 假定하고 $l'=L_1+L_2$, $K=K'_p/lA_1$으로 두면 보울트 軸應力 σ는 다음과 같이 求할 수 있다.

$$\sigma=\frac{P_t}{A_1}=\frac{l}{l_1}\cdot\frac{1}{K'_p}\cdot\frac{n\cdot\Delta t}{t_n} \quad\cdots\cdots (11)$$

이 式中의 K'는 보울트의 材質에 基因하는 것이다. 또 l'/l는 보울트 全長에 對한 荷重負荷部分의 길이 比率이다.

2-4 温度補正

温度가 上昇하면 보울트는 열팽창하여 超音波의 傳播速度는 減少하게 되어 超音波軸力計로 觀察하고 있으면 温度가 上昇하면 보울트에는 마치 應力이 發生한 것과 같은 現象이 생긴다. 따라서 測定도중에서 보울트의 温度가 變化했을 때는 이와 같은 量에 해당하는 温度의 影響分으로서 補正해야만 한다. 즉 보울트의 길이音速은 물론 密度와 彈性係數 등도 모두 温度의 影響을 받는다.

이 變化狀態는 常温에서 거의 直線的이며 그 變化量도 微小하다. 그러므로 測定値를 0℃의 값으로 補正해서 軸應力을 求하도록 (11)式을 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$\sigma=\frac{l}{l'}\cdot\frac{1}{K_p}\cdot\frac{t^0_0n-t^0_n}{t^0_n}(1+\varphi T_\sigma)$$

t^0_n : 0℃로 補正된 값

T_σ(℃) : 軸應力 σ일 때의 温度

φ : 이 경우의 温度係數(變化率)이며 10^{-4}정도이므로 實際面에서는 φT_σ의 項은 무시해도 좋다.

따라서 結局 다음과 같이 된다.

$$\sigma=\frac{l}{l'}\cdot\frac{1}{K'_p}\cdot\frac{t^0\sigma_n-t^0_n}{t^0_n} \quad\cdots\cdots (12)$$

여기서 係數K 또는 K'를 알고 있으면 超音波의 傳播時間의 變化率을 測定하면 보울트의 軸力 또는 軸應力을 求할 수 있다.

一定時間 經過後에도 測定하고자 하는 경우에는 温度係數를 알아가지고 温度補正을 해주면 測定이 可能하다.

3. 実験方法

3-1 方法

그림 3과 같이 보울트의 締結裝置에 從來와 같이 스트레인 게이지를 접착하여 보울트의 軸應力을 測定하는 한편 보울트 頭部를 평활하게 錬磨하여 프로

브를 대고 5MHz의 超音波를 發射하여 토오크를 加했을 때 應力値를 스트레인미터와 超音波裝置로서 各各 測定하였다.

그림 4는 보울트 軸應力測定의 블럭線圖이다.

3-2 実験装置

1) 스트레인 게이지 PB-10, AFE-4
2) 스트레인 미터
3) 超音波裝置
4) 프로브

4. 測定結果

4-1 基礎実験

1) 超音波傳播時間 變化의 直線性

우선 M10의 보울트를 使用해서 超音波傳播時間의 變化狀態를 調査하였다. 荷重은 보울트軸應力 75kg/mm²까지 스트레인으로 約 $3,570\times10^{-6}$까지 加했다. 그 結果 보울트軸應力과 超音波傳播時間의 變化率과의 關係는 荷重이 彈性限界內이면 높은 應力까지 直線的인 것을 알 수가 있다. 이것을 그림 5에 표시한다.

2) 音速變化의 크기와 材質依存性

그림 6과 같은 試驗片을 使用하여 스트레인 게이지를 접착하여 應力測定과 傳播時間의 變化關係를 試驗片의 材質을 달리 해가면서 조정하였다. 그 結果를 그림 7에 表示했다. 그림에서 點線은 傳播時間의 變化率 中에서 試驗片의 幾何學的인 變形에 依存하는 것의 計算値를 表示한 것이다. 이 點의 實線과의 差는 音速變化에 依存하는 것으로 思料된다. 그림에서 보는 것과 같이 材質依存性이 좋다는 것을 알 수가 있다.

3) 温度에 依한 變化

이 實驗에서는 선팽창계수와 音速의 温度變化率과의 크기를 個別로 나누어서 比較推定할 수 있는 方法은 없으나 兩者를 包含한 形態의 傳播時間의 温度變化率은 測定할 수가 있었다.

보울트에 締結된 物体가 鐵鋼인 경우에는 이와 같은 測定値로서 만족할만한 温度補正을 할 수 있다고 생각된다.

이 測定結果는 그림 8에 表示한다.

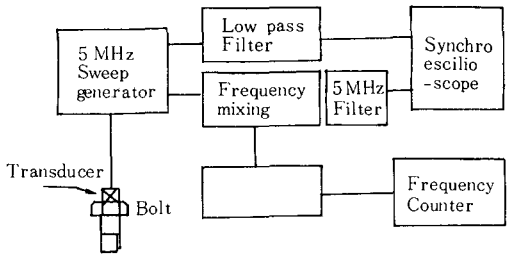


Fig 4. Block diagram of ultrasonic bolt tension measurement

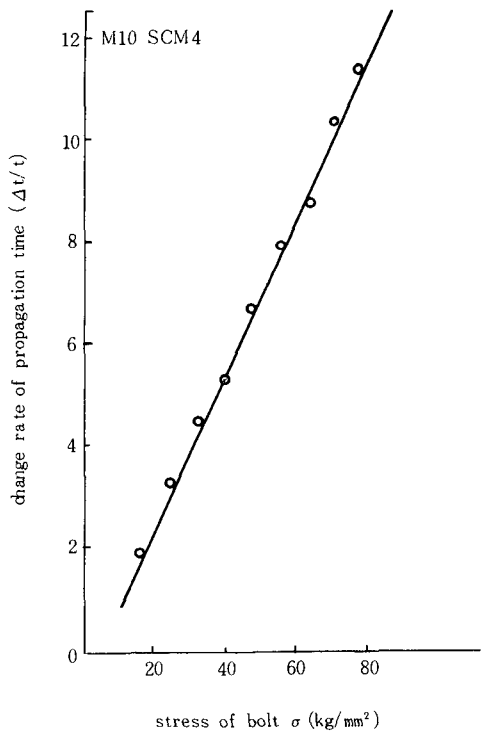


Fig 5. Relation propagation time change rate

이 以外에 3개 정도 測定하였으나 그 變化率은 거의 約 100×10^{-6}/℃ 應力値로 換算해서 2.1kg/mm² 정도였다.

4-2 実用実験

基礎實驗의 結果에서 생각할 수 있는 것이 傳播時間의 變化率은 보울트 材質에 따라 크게 달라지고, 또 (3)式에 따른 너트의 걸린 위치, 나사의 보통나사

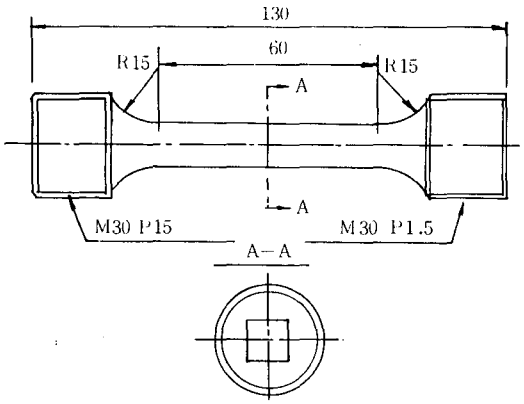


Fig 6. Tension test piece

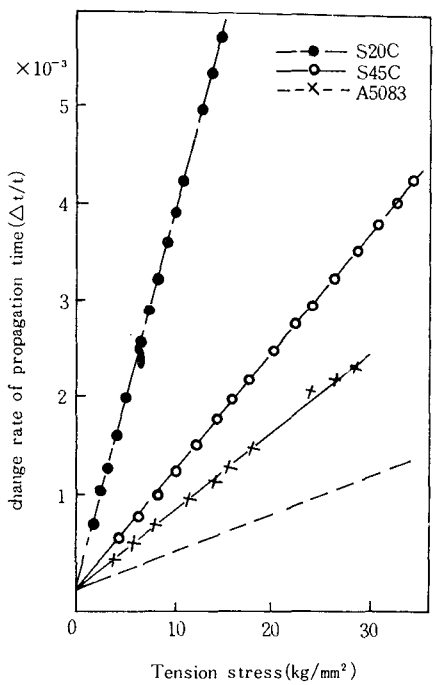


Fig 7. Specimen dependance of change rate in ultrasonic propagation time when tensile strength is applied

山, 가는나사山의 差異에도 달라진다. 따라서 實用的이고도 正確性이 있는 보울트軸應力을 測定하기 위해서는 보울트의 材質, 形狀, 使用法 등을 加味한 綜合的인 係數를 實驗的으로 求해서 測定하는 方法이 最適이라고 본다. 그림 9는 M16 SCM4 高張力鋼 보울트(High tension bolt) 1個를 5回 測定한

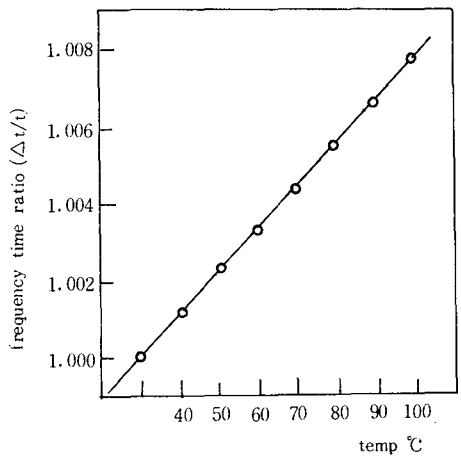


Fig 8. Chang of ulteasonic propagation time by temperature cause

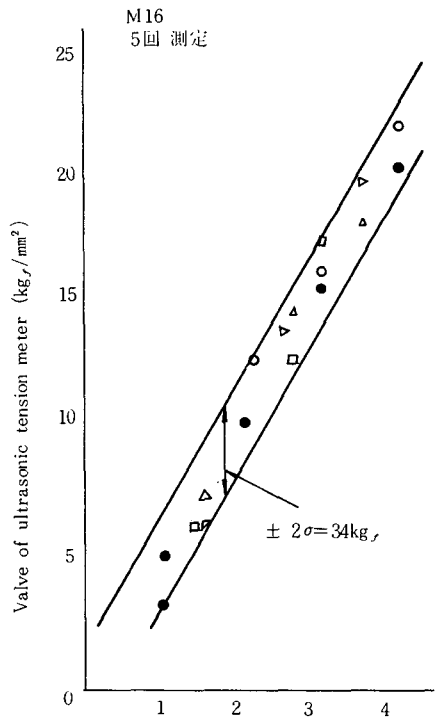


Fig 9. Reappearance of 5 times measurement of same testing bolt

것이다.

5. 超音波法의 보울트 以外의 応用

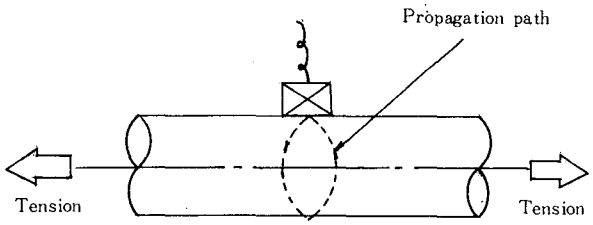


Fig 10. Propagation direction of ultrasonic on the tention test of bar.

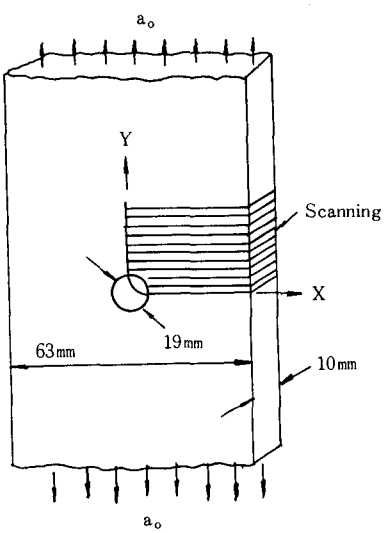


Fig 11. Al specimen with circular hole

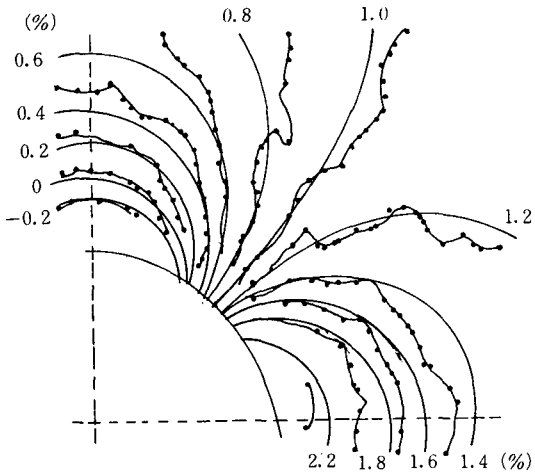


Fig 12. Experiment result
[Change rate of frequency]

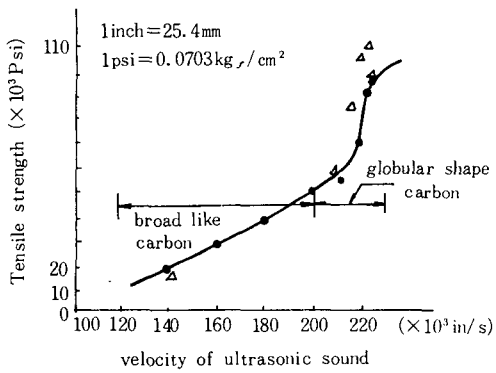


Fig 13. Ultrasonic velocity and tensile strength of casting iron (Non−annealing)

1) 超音波로서 應力解析과 材質檢査가 可能하다. 그림 10은 材料의 彈性係數를 測定하는 것을 表示한다.

2) 共振法으로 超音波의 連續波入射로서 引張時의 共振周波數變化를 各 個所마다 測定하면 마치 光彈性試驗片의 모양과 같이 된다. 그림 11은 Al板 試驗片의 形狀이며 實驗結果를 그림 12에 表示하고 있다.

3) 表面波로서 鐵道Rail의 熱應力 測定도 可能하다.

4) 超音波로서 球狀黑鉛鑄鐵의 球狀變化率 測定도 可能하다. 그림 13은 球狀黑鉛鑄鐵의 音速과 引張強度 差異의 關係를 表示한 것이다. 音速이 어느값 以上이 되면 黑鉛이 거의 球狀이고 引張強度도 一定値를 確保할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 製品의 品質評價도 超音波音速測定으로 可能함을 보여 주고 있다. 그밖에도 熱處理, 材質의 硬度 등의 機械的性質을 精度높이 測定이 可能하게 되겠다.

6. 맺음말

(1) 超音波의 傳播速度變化를 測定함으로써 보울트의 軸應力을 ±3.4kg/mm² 以內의 精度로 測定이 可能하다.

(2) 超音波의 速度變化 測定에는 펄스法과 共振法이 있으며 共振法을 利用해서 材質의 彈性係數도 測定할 수가 있다.

(3) 共振周波數變化 測定으로 光彈性試驗에서 不可能한 實材料를 가지고 소위 超音波彈性試驗도 簡單

하게 할 수 있다.

(4) 材質檢査에 適用도 可能하다.

(5) 單一方向에만 適用되는 것이 缺點이며 휨 등과 같은 複雜하고 多方向性의 應力測定은 現在의 方法으로는 不可能하며 이는 彈性限界 內에서만 測定이 可能하다.

(6) 펄스法과 共振法을 比較하면 펄스法은 조작이 簡單하고 容易한 대신 精度가 共振法에 比해 떨어진다.

參 考 文 獻

(1) Hughes et al "Phisical Review" No. 5, p. 1145~1953

(2) TAKAHASHI S et al Material Science 1978

(3) 北郷「機械の研究」Vol. 14, No. 1, p. 231~1962

(4) Kino G. S. et al GL Report 2722

(5) 平井他「日本鑄物協會」第93回 講演會 p. 61 1978

(6) Toseptk S. Heyman LACW Ultrasonic Bolt—strain monitor "Exper : Mechanics may 1977

(7) 山本茂本, 超音波によるボルトの 軸應力測定について日本船用 機械學會誌 Vol, 13, No. 10, 1978.

(8) 酒井牧野 超音波を利用したボルト軸力の測定 日本機械學會誌 Vol. 43, No. 366 1977

(9) Noronha P. Ti. J Testing and Evaluation 1~3 (1973~1975) 209

(10) 西田正孝 : 應力集中 森北出版. p. 660~667