

초음파 음탄성효과를 이용한 고장력 볼트의 축력측정정도 향상에 관한 연구

김희송* · 오환교**

A Study on the Advance of Measuring Accuracy of High Tension Bolt Axial Force Using Ultrasonic Acoustoelasticity Effects

H. S. Kim* and H. G. Oh**

Abstract In this paper, the axial force of high tension bolt is measured by using ultrasonic wave.

In the case of the different materials the conclusion obtained are as follows :

- (1) The relation of the material quality of each high tension bolt and form(diameter or section area), and yield axial force can be observed.
- (2) As 0.1 is divided by the apparent elongation the measurement accuracy of high tension bolt can be achieved. Also, it is founded that the joint axial force of high tension bolt is determined by the yield force

1. 서 론

현대산업사회에서 기계구조물의 대형화 혹은 각종 초소형 또는 대형부품의 정밀화에 따르는 산업용 고장력 볼트의 피결합체의 진동이나 충격하중 또는 반복하중이 작용할 때 헐거워지는 현상이 발생하기 마련이다.^{1), 2)} 기계구조물에 있어서 볼트가 헐거워지면 작동 불량이나 성능저하 및 진동이나 소음 악화, 피로강도의 저하등의 심각한 사고를 유발시키며 디젤엔진과 화력 발전소 터어빈볼트와

같은 충격이 큰 경우 혹은 자동차산업 및 박용기계분야에서는 볼트체결이 완전하게 된 경우에도 가혹하게 사용하게 되면 볼트의 이완으로 말미암아 기계의 고장을 초래하는 경우가 있어서 제성능을 못내는 경우가 많다.^{3), 4)}

또한 최근들어서 대형교각의 건축용과 고가도로 및 고속전철용의 대형구조물이 존재하는 현장에서 사용하는 고장력 볼트 수요의 급증에 따라서 안전도 평가방법으로 볼트의 헐거움 방지는 기계계의 신뢰성을 높이는데 있어서 중요한 과제로 되고 있다. 특히 구조

* : 단국대학교 기계공학과(Dankook University)

** : 단국대학교 대학원 기계공학과

접수 : 1992년 9월 2일(Received September 2, 1992)

물등의 안정성을 유지하기 위해서 고장력 볼트의 체결력의 관리는 중요한 의미를 갖는다.

볼트의 축력은 볼트신장량을 측정하기 위해서 볼트직경이 작고 볼트의 길이가 길거나, 볼트의 축력이 크게될수록 정확하게 측정이 가능하게 된다. 따라서 측정된 축력에 대해서 측정정도를 산출해내는 것이 필요하게 되고 볼트를 약하게 체결한 때에는 측정정도가 나쁘게 되고 강하게 체결할 때에는 측정정도가 양호하게 되는 결과가 된다. 그러므로 지금까지 연구되어진 고장력 볼트의 체결력을 조사하는 방법으로는 Strain Gauge 방법⁵⁾과 Torque 방법⁶⁾ 그리고 회전각법 이외에도 비접촉·비파괴적인 방법으로써 초음파를 이용한 고장력 볼트의 축력측정방법등이 있다.^{7), 8), 9)}

따라서 본 논문에서는 재료내부를 전파해가는 초음파의 속도가 응력에 의존한다고 하는 음탄성효과(Acoustoelasticity Effect)를 이용하고 있으며^{10), 11)} 고장력 볼트의 축력을 측정하기 위해서 볼트 시험편의 재질이 다른경

우에 있어서 응력상태가 변화될때의 초음파의 전파시간과 탄성변형량과의 관계를 알아보고 측정조건이 달라진 경우에도 측정정도를 향상시키기 위해서 고장력볼트의 재질이 다른 경우 축력과 음탄성계수의 상관관계를 알아보는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 고장력볼트의 축력측정 이론

2.1 초음파에 의한 볼트축력 측정법

Fig. 1에 초음파에 의한 볼트축력 측정원리를 나타내고 있으며 Fig. 1에서와 같이 고장력볼트 머리부분으로부터 초음파를 입사시켜 볼트 밑면에서 반사된 저면 에코우를 수신해서 초음파가 볼트 내부를 전파하는데에 필요한 시간을 측정하게 된다.

Fig. 1의 (B)에서처럼 부하상태로써 볼트에 인장응력을 주면 볼트에는 탄성적인 신장(ΔX)가 발생하게되며 또한 인장응력에 의해서 볼트내부를 전파하는 초음파의 음속이 늦어지게 된다.

또한 응력에 의한 탄성 신장량과 응력에

Nomenclature

A	: Bolt section area(mm ²)
B1	: Propagation time of the B1 echo
B2	: Propagation time of the B2 echo
ΔB	: Difference of Propagation time of the B1 and B2 echo
D	: Diameter of part of the non-screw
E	: Longitudinal elastic coefficient
F	: Tension load or axial force(ton)
L	: Total length of the bolt(mm)
P	: Pitch of bolt
V	: Acoustic velocity
V ₀	: Velocity of unload situation
V ₁	: Velocity of load situation
K	: Coefficient of acoustoelasticity
L ₁	: Length of non-screw part of the bolt
L ₂	: Length of screw part of the bolt
Δl	: Elastic elongation
t ₀	: Propagation time of load situation

의한 초음파와 음속의 변화량은 재료에 따라 그 값이 다르므로 미리 재료마다의 값을 실험적으로 측정해두면 Fig. 1과 같은 빔노정의 차(Δt)를 측정하는 것으로부터 볼트축력 σ 를 계산해 낼 수 있다.

여기서 UT볼트축력측정 소프트웨어는 본체에 내장된 마이크로 컴퓨터에 Fig. 2의 관계식을 미리 입력해두고 초음파와 빔노정의 입력과 동시에 볼트에 발생한 축력을 연산해서 출력하게 된다.

2.2 고장력 볼트의 모델링

Fig. 3은 고장력 볼트의 기본적인 모델링을 나타내고 있으며 볼트의 재질, 볼트의 유효 길이, 볼트의 유효직경 등을 확인해둘 필요가 있게된다.

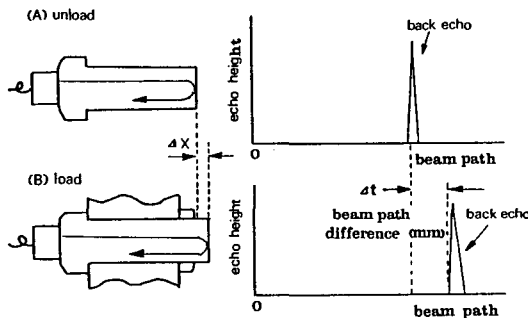


Fig. 1 Measurement principle of bolt axial force

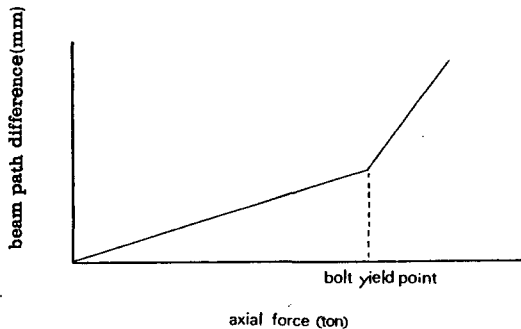


Fig. 2 Relationship between bolt axial force and change of beam path.

Fig. 3에서 볼트양단이 부하상태일 경우의 음속과 초음파의 전파시간을 V_0 와 t_0 라고한다면

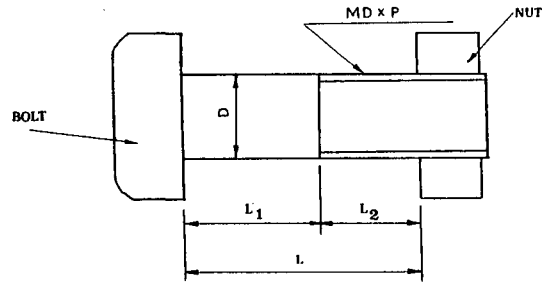


Fig. 3 Construction of high tension bolts.

$$t_0 = \frac{(L + \Delta L)}{V_0} \dots\dots\dots (1)$$

이때 종파의 음속 V_0 는 다음과 같다.

$$V_0 = V_0 \left(1 + k \frac{F}{A}\right) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 V_0 는 무부하상태의 음속을 나타내고 k 는 음탄성계수이며 이때에 음탄성계수 k 는 다음식으로 구하여진다.

$$k = \frac{A}{Ft_0} \left[\left(1 + \frac{F}{AE}\right) t_0 - t_0 \right] \dots\dots\dots (3)$$

또한 Fig. 4에서는 B1을 B1에코우의 전파시간(μ sec)으로 B2를 B2에코우의 전파시간(μ sec)이라 한다면 ΔB 즉 B1 및 B2로부터 볼트내로 초음파가 전파할 경우의 전파시간의 차이는 다음과 같이 구한다.

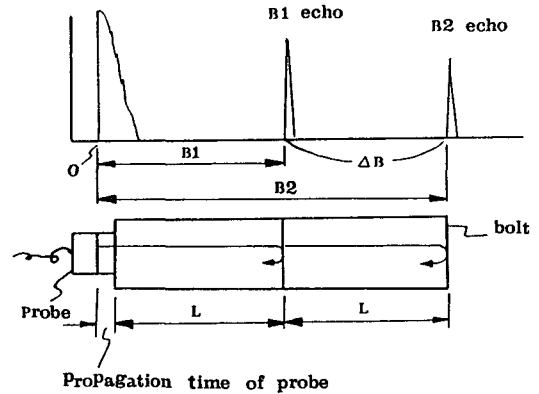


Fig. 4 Difference of propagation time of the B1 and B2 echo.

$$\Delta B = B_2 - B_1 \dots \dots \dots (4)$$

이때의 음속(V)산출은 다음과 같이 얻어진다.

$$V(m/sec) = (L \times 10^{-3} + \Delta l \times 10^{-6}) / \Delta B \times 10^{-6} \times 2 \dots \dots \dots (5)$$

여기서 Δl 은 탄성신장량(μm)이고 L는 무부하일 경우의 길이를 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서 사용된 장비들은 다음과 같다.

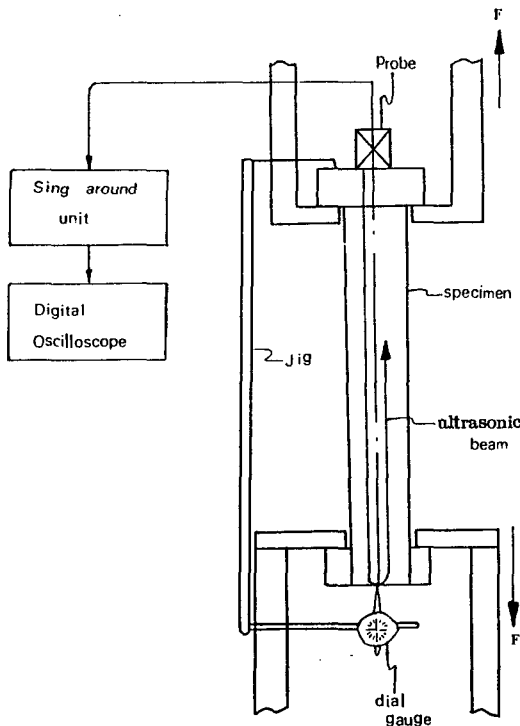


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus.

- ① Amsler's Universal Testing Machine(Capacity : 100ton)
- ② Sing-Around Unit
- ③ Ultrasonic Probe

(Frequency : 5MHz, Probe Diameter : 20 mm)

- ④ Oscilloscope(Model : V-105F, 100MHz)
- ⑤ Dial Gauge(0.01m-5mm)
- ⑥ Jig
- ⑦ Specimen(12Cr, SCM440, S40C(H), S20C)

따라서 Fig.5에서는 본연구에서 사용되어진 실험장치의 Block-Diagram을 나타내 보이고 있다.

3.2 실험방법

고장력볼트의 축력측정의 기초실험에 있어서 사용된 시험편은 S20C, S40C(H), SCM440, 12Cr등의 재질이 다른것을 대상으로 만능형인장시험기(용량 : 20ton)를 통해서 1ton씩 하중을 단계적으로 증가시켜가면서 초음파가 고장력볼트 내부를 통과하는 왕복전파 시간측정과 Dial Gauge로써 이때의 탄성변형량 Δl 을 측정하였으며 이때 사용된 초음파 탐촉자의 공진주파수는 5MHz로써 두께는 2mm이었다.

4. 실험결과 및 고찰

고장력볼트의 재질, 볼트의 유효길이, 볼트의 유효직경을 확인하고 볼트의 재질이 S20C, S40C, SCM440, 12Cr간의 시험편을 대상으로 음탄성계수(k)와 볼트의 재질 및 형상과 항복축력 및 축력측정정도를 확인하였다.

본연구에서는 모델링된 Fig.3으로부터

볼트의 유효길이
 $= L + 0.4 \times D + 0.4(D - 0.65 \times P)$ 와

볼트의 유효직경
 $= D \times \frac{L_1}{L} + (D - 0.65 \times P) \times \frac{L_2}{L}$

으로 보다 정확하게 산출할 수 있었으며 Fig. 6에서는 S20C와 S40C의 시험편을 대상으로 하중의 변화에 따르는 음속의 변화를 나타내고 있으며 여기에서 S20C 및 S40C의 경우 탄성변형량을 실험결과의 값과 이론값을 비

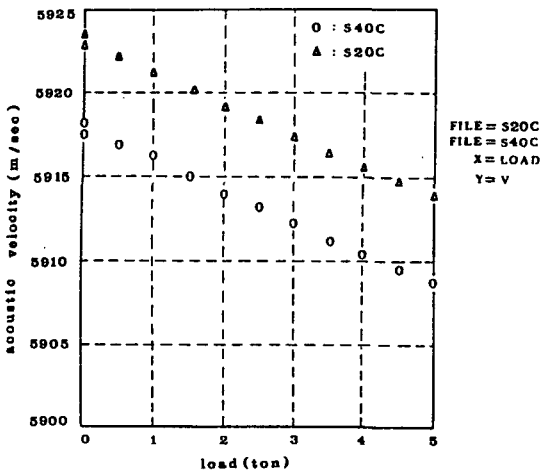


Fig. 6 Change of acoustic velocity according to change of load.(S40C, S20C)

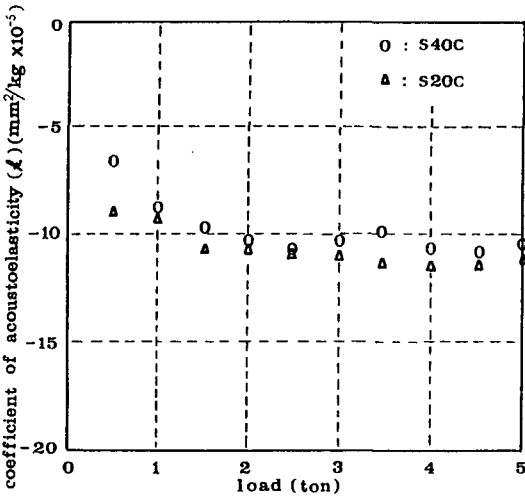


Fig. 7 Relationship between coefficient of acoustoelasticity and load in case of different materials.(S40C, S20C)

교해보면 거의 일치하게 된다. 또한 Fig. 7에서는 평균적으로 구한 S20C 및 S40C의 재질이 다른 경우의 하중의 변화에 따르는 음탄성계수(k)의 값을 구한 결과를 나타내고 있으며 이때에 S20C의 경우는 k의 값이 $-11.5 \times 10^{-5} \text{mm}^2/\text{kg}$ 의 값을 나타내고 있으며 S40C의 경우는 $-10.5 \times 10^{-5} \text{mm}^2/\text{kg}$ 의 값이 얻어졌다.

또한 재질이 다른 경우에는 재료표로부터 항복점을 구해서 S20C, S40C, SCM440, 12Cr강 등의 재료와의 상관 관계로부터 정도를

추정하게 된다. 따라서 Fig. 8에서는 인장시험기로써 1ton씩 하중을 증가시킨 경우의 고장력볼트의 재질, 볼트의 직경(단면적)으로 부터의 항복축력을 구한것이며 이러한 항복축력으로부터 볼트의 체결축력(예로서 항복축력의 80%)을 결정하게 된다.

한가지의 예로써 볼트의 유효직경 20mm 유효길이가 200mm인 볼트(SCM440)의 경우 항복축력은 Fig. 8로부터 26Ton으로써 이때 체결축력은 $26 \times 0.8 = 20.8 \text{ton}$ 으로 된다.

Fig. 9에서는 L/A 즉 볼트의 유효길이를 볼트의 단면적으로 나눈것을 구한 것으로 Fig. 9을 이용해서 축력F(직선의 첨자)와 L/A의 교차점의 위치에서 결보기 볼트신장량을 구한것을 나타낸다.

이때 측정정도는 0.1을 결보기볼트 신장량으로 나눈것으로부터 구하게 되는데 만약에 볼트의 유효직경 20mm이고 유효길이가 200mm의 볼트로써 SCM440의 경우 $L/A = 200 / (20 \times 20 \times 3.14 / 4) = 0.64$ 로 되며 Fig. 9로부터 $L/A = 0.64$ 의 선과 $F = 20.8$ 이 서로 교차하는 위치를 알아보면 SCM440에서의 결보기 신장량의 값으로 3을 얻을 수 있다. 따라서 측

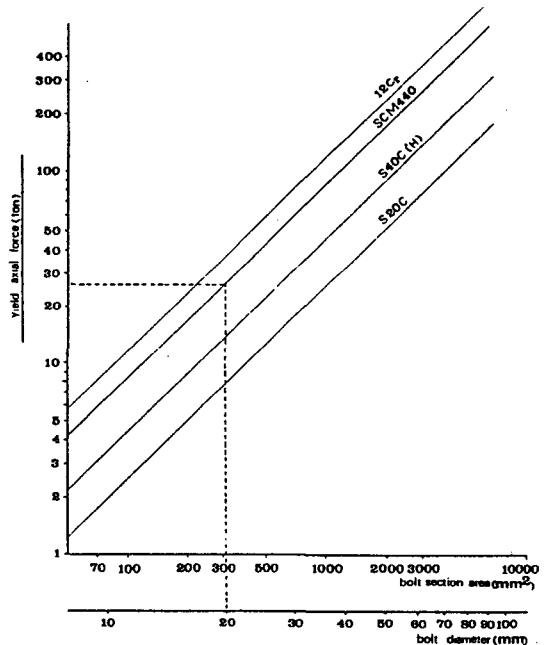


Fig. 8 Relation material quality among form and axial force of bolt.

정정도=0.1/3=0.033으로 약 3.3%임을 확인할 수 있었다. 따라서 각종재질 즉 S20C, S40C, SCM440, 12Cr강 등에 대해서도 같은 방법으로 적용할 수 있었다.

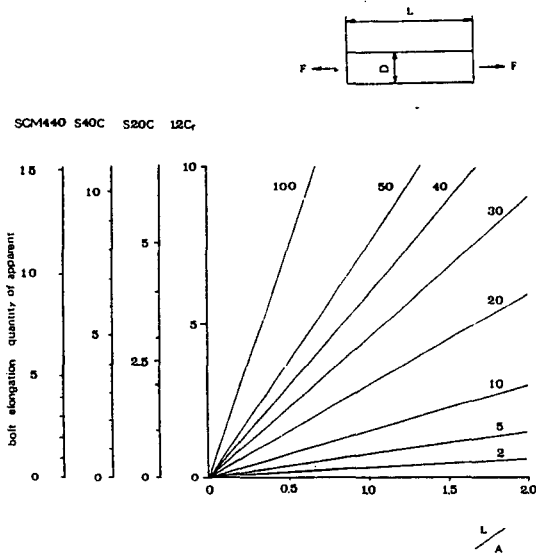


Fig. 9 Measuring accuracy of axial force in case of different the material quality and form of bolt

5. 결 론

본 연구에서는 초음파를 이용한 고장력볼트의 축력측정으로써 재질이 다른 경우를 대상으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 만능시험기로 인장하중을 가한 상태에서 초음파의 전파시간을 이용해서 각종 고장력볼트의 재질 및 형상(직경이나 단면적)과 항복축력의 관계를 알아 볼 수 있었다.
- 2) 고장력볼트의 축력측정의 정도는 실험을 통해서 구한 0.1을 결보기 신장량으로 나눈것으로부터 얻을 수 있음을 확인하였고 또한 항복축력으로부터 고장력볼트의 체결축력을 결정한다는 것을 알 수 있었다.

References

1. Eiji Yamamoto, Ryohei Motegi :

- Measurement of Bolt Tension by Ultrasonic Technique, Journal of the E · M · S · T Vol. 13, No. 10, pp. 781-785, (1978)
2. H. Fukuoka, H. Toda : Preliminary Experiment on Acousto-elasticity for Stress Analysis, Archives of Mechanics Vol. 29, No. 5, pp. 673-686, (1977)
3. H. F. Pollard : Sound Wave in Solid, (1977) Pion Limited.
4. D. S. Hughes and J. L. Kelly : Second-order Elastic Deformation of Solids, Physical Review, 92, pp. 1145-1149, (1953)
5. R. W. Benson and V. J. Raelson : Acoustoelasticity, Product Engng, 30, pp. 56-59, (1959)
6. R. A. Toupin and B. Bernstein : Sound Waves in Deformed Perfectly Elastic Metals, J. Acoust. Soc. Amer, 33, pp. 216-225, (1961)
7. D. I. Crecraft : The Measurement of Applied and Residual Stresses in Metals using Ultrasonic Waves, J. Sound Vib, 5, pp. 173-192, (1967)
8. E. E. Day and R. A. Brewer : Exploratory Work on Acoustoelasticity, Japan Soc. Mech. Engng, Semi-International Symposium, pp. 147-153, (1976)
9. T. Tokuoka and Y. Iwashimizu : Acoustical Birefringence of Ultrasonic Waves in Deformed Isotropic Elastic Materials, int. J. Solids Structures, 4, pp. 383-389, (1968)
10. Y. Iwashimizu : Ultrasonic Wave Propagation in Deformed Isotropic Elastic Materials, Int. J. Solids structures, 7, pp. 417-429. (1971)
11. N. N. Hsu : Acoustical Birefringence and the Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis, Experimental Mechanics, pp. 169-176. (1974)