

음탄성법을 이용한 고장력 볼트의 축응력 평가

Estimation of the Axial Stress in High-Tension Bolt by Acoustoelastic Method

전해화*, 이태훈*, 장경영**†, 김노유***

Hae-Hwa Chun*, Tae-Hoon Lee*, Kyung-Young Jhang**† and Nohyu Kim***

초 록 고장력볼트의 체결상태를 평가하는 것은 체결볼트의 안전유지관리 측면에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 초음파의 음속이 응력에 의존하는 이른바 음탄성효과에 기초하여 초음파의 전파시간(TOF)를 측정함으로써 볼트에 작용하는 축응력을 평가하는 방법을 제안한다. 그런데 일반적으로 볼트체결시 볼트에 작용하는 응력범위내에서의 음속 변화량은 매우 작으며, 따라서 TOF 측정에 있어서 높은 정밀도가 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 톤버스트파형의 초음파를 이용한 위상검출법을 적용하였다. 제안된 원리는 실험을 통해 검증되었으며, 볼트 축응력 측정의 유효성을 검증하기 위해 스트레인게이지를 이용한 축응력 측정결과와 비교하였다. 두 결과는 양호한 일치율을 보였으며, 이로써 제안한 방법이 체결된 고장력볼트의 체결상태 평가에 유용하다는 결론을 얻을 수 있었다.

주요용어: 응력측정, 볼트, 음탄성, 전파시간(TOF), 초음파, 위상검출

Abstract The evaluation of clamping condition has been regarded as the main issue in the safety-maintenance of the clamped high-tension bolts. For this, this paper proposes a method to estimate the axial stress by measuring the TOF (Time-Of-Flight) of ultrasonic wave, which is based on the acoustoelasticity or the dependency of sound speed on the stress. In this method, however, the variation of sound speed within the range of stress induced under the field condition is very small, and thus the accuracy of the TOF measurement is important. We adopted the phase detection method using tone-burst ultrasonic wave to measure the precise TOF. In order to verify the usefulness of the proposed method experiments are carried out and the results were compared with the stress measured by the strain gage. The results show good agreement with each other, and from these we can conclude that the proposed method is highly useful for the evaluation of clamping condition in the clamped high-tension bolts.

Keywords: Stress Measurement, Bolt, Acoustoelasticity, Time-Of-Flight, Ultrasonic Wave, Phase Detection

1. 서 론

원전의 철골 구조물이나 송전 첩탑 구조물의 체결을 위해 널리 쓰이는 고장력 볼트는 시공 시에 가해진 체결력을 통해 구조물의 강성을 확보하는 중요한 요소로서 사용중 풀림이나 노후화에 따른

체결력의 변화를 검사하는 것은 발전설비, 송배전 시설, 건축 및 토목 구조물 등의 안전 관리에 필수적이다.

이러한 볼트의 체결력 검사방법으로는 기존에 토크렌치 검사법이 사용되고 있는데, 이 방법은 측정 토크값으로부터 체결력을 평가하는데 있어서

볼트헤드와 체결부 사이의 마찰이나 나사산 표면에서의 마찰, 나사산의 변형 등에 따른 오차가 많고, 또한 검사도중 구조물의 체결부를 손상시키거나 변형을 초래할 가능성이 있어, 구조물의 안전성 평가와 유지보수 관리가 부적절하게 이루어질 우려가 있다[1].

또한 볼트의 탄성 회전각을 이용하는 방법이 제안된 바 있는데, 이 방법은 나사면의 표면거칠기 등 형상인자에 의한 영향으로 샘플마다 측정결과가 크게 상이하게 되는 단점이 있다[2].

따라서 신뢰성 있는 체결상태의 진단을 위해 볼트의 체결력을 직접적으로 확인할 수 있는 기법의 개발이 매우 절실하다.

이와 같은 관점에서 초음파 검사는 매우 유용한 수단으로 고려될 수 있다. 이는 전파속도의 응력의존성, 즉 음탄성 효과에 근거하여 축력에 의한 볼트내부의 축응력변화를 초음파의 전파속도변화로 알아낼 수 있다는 기대 때문이다[3-6].

한편, 음속의 변화는 TOF(time-of-flight)의 변화로서 측정할 수 있다. 그런데, 이 경우 볼트 체결력에 의한 볼트의 축방향 길이변화를 동시에 고려해야 한다. 본 논문에서는 이를 고려하여 TOF로부터 축응력을 측정하는 관계식을 도출하였다.

그리고 실제 볼트에 가해지는 축응력 범위내에서의 음속변화는 미세하며 따라서 TOF의 정밀한 측정이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 톤버스트파를 이용한 위상검출법(phase detection method)을 적용하였다.

제안한 원리는 시험편을 이용한 인장시험과 실제 고장력 볼트에 대한 축응력 측정실험을 통해 검증되었다.

2. 초음파에 의한 볼트 축응력 측정의 원리

일반적으로 1축응력 상태에서 응력과 응력이 작용하는 방향으로의 초음파의 전파속도와는 선형음탄성 이론에 의해 다음과 같은 관계를 갖는다[7].

$$C = C_0(1 - \beta\sigma) \tag{1}$$

여기서, β 는 음탄성계수, C 는 응력 σ 가 작용하는 상태에서의 전파속도, C_0 는 응력이 작용하지 않는 상태에서의 전파속도이다. 따라서 β 가 양인 경우 인장응력이 작용할 때 전파속도는 감소하고 압축응력이 작용할 때 증가할 것으로 예상할 수 있다.

또한 식 (1)로부터 응력은 다음과 같이 전파속도의 변화율을 측정함으로써 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$\sigma = -\frac{1}{\beta} \frac{(C - C_0)}{C_0} = -\frac{1}{\beta} \frac{\Delta C}{C_0} \tag{2}$$

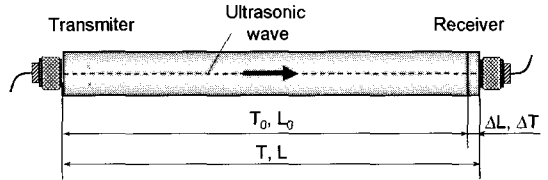


Fig. 1 TOF measurement by using ultrasonic wave

한편, 전파속도는 초음파 TOF를 측정함으로써 얻을 수 있다. 즉, Fig. 1에서와 같이 초음파의 송수신 시간차 (TOF) T_0 를 측정함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_0 = \frac{L_0}{T_0} \tag{3}$$

여기서 L_0 는 응력이 작용하지 않는 초기상태에서의 시편의 길이이다.

그런데, 응력을 작용할 경우의 전파속도 측정에 있어서는 시편의 길이변화를 고려해야 하므로 전파시간의 변화 ΔT 와 길이 변화 ΔL 을 동시에 고려하여야 한다. 즉,

$$C = \frac{L_0 + \Delta L}{T_0 + \Delta T} = C_0 + \Delta C \tag{4}$$

여기서 ΔC 는 전파속도의 변화량이다.

그리고, 이 식을 음속변화률, 결보기속도의 변화률과 길이 변화률의 관계로 표시하면 다음 식 (5)와 같다.

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta V}{V_0} + \frac{\Delta L}{L_0} \tag{5}$$

여기서, V 는 결보기 속도로서 $V = L_0/T$ 이며, $V_0 = L_0/T_0 = C_0$, $\Delta V = V - V_0$ 이다. 오른쪽 두 번째항은 변형률을 나타내며, $\epsilon = \Delta L/L_0 = \epsilon/E$ 이다. 여기서 E 는 영율을 나타낸다. 또한 위 식에서 이차항 이상의 고차항은 무시되었다.

그러면 최종적으로 식 (2)와 응력-변형률 관계식에 의해 식 (5)를 간단히 하면 다음과 같이 전파시

간과 응력의 관계를 얻을 수 있다.

$$\sigma = \frac{1 - \frac{T_0}{T}}{\beta + \frac{1}{E}} \quad (6)$$

이 식으로부터 계수 β 와 영을 E 를 알면 초음파의 전파시간 TOF를 측정함으로써 볼트의 축방향으로 작용하는 응력을 구할 수 있다.

3. 초음파의 전파시간 측정법

볼트에 가해지는 축응력이 항복응력까지 가해지더라도 전파속도의 변화는 1% 미만이다. 이를 정밀 측정하기 위해서는 전파시간의 정밀측정이 불가피하다. 그러나 단순 펄스신호를 이용하여 전파시간을 결정할 때 신호에 혼입된 잡음이나 펄스 피크점의 작은 변화가 전파속도 측정에 큰 오차를 나타낼 수 있다. 따라서 보다 안정적이고 정밀하게 전파시간의 변화를 측정하기 위하여 본 연구에서는 직교검파에 의한 위상검출법을 이용하였다. Fig. 2는 이를 위한 측정시스템이며, Fig. 3은 송수신 신호의 예를 보여준다.

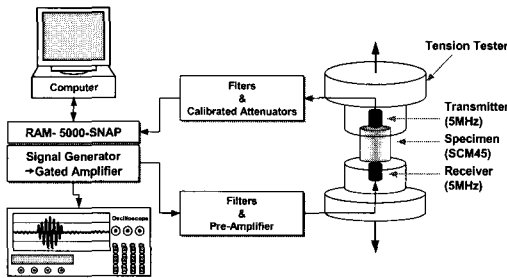


Fig. 2 Schematic diagram of the TOF measurement system for high tension bolts

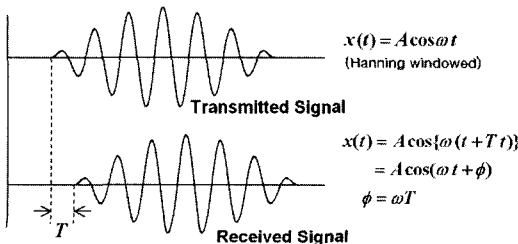


Fig. 3 Time difference and corresponding phase difference between transmitted and received signals

그림에서 알 수 있듯이 송신신호와 수신신호사이에는 전파시간에 해당하는 위상지연이 존재한다. 위상지연은 직교검파에 의해 정밀하게 측정될 수 있다. 여기서 직교검파란 수신신호에 송신신호와 동일한 주파수 성분의 $\cos \omega t$ 와 이와 직교되는 $\sin \omega t$ 를 각각 곱하여 저역필터를 통과시킴으로써 구하고자하는 위상 ϕ 의 \cos 성분과 \sin 성분을 얻어서 위상을 측정하는 방법이다. 즉, 수신신호 $x(t)$ 에 $\cos \omega t$ 를 곱하면,

$$x(t) \times \cos \omega t = A \cos(\omega t + \phi) \cos \omega t = \frac{A}{2} [\cos(2\omega t + \phi) + \cos \phi] \quad (7)$$

이 되고, 이 신호를 차단주파수 w 의 저역필터를 통과시키면 $\frac{A}{2} \cos \phi$ 성분만 남게 된다. 이 성분을 x_1 이라 하자. 다음으로 수신신호 $x(t)$ 에 $\sin \omega t$ 를 곱하면,

$$x(t) \times \sin(\omega t) = A \cos(\omega t + \phi) \sin(\omega t) = \frac{A}{2} [\sin(2\omega t + \phi) - \sin \phi] \quad (8)$$

이 되고, 앞서와 동일한 필터를 통과시키면 $\frac{A}{2} \sin \phi$ 성분만 남게 된다. 이 성분을 x_2 라 한다. 그러면 위상차 ϕ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{x_2(t)}{x_1(t)} \quad (9)$$

이로부터 송수신신호 사이의 시간차 T 는 초음파의 주파수를 F 라 할 때 다음과 같이 구해진다.

$$T = \frac{\phi}{\omega} = \frac{\phi}{2\pi F} \quad (10)$$

그런데 신호의 시간차가 버스트파의 한 주기 이내인 경우에는 무방하나 그렇지 않은 경우에는 위상차가 2π 를 넘게 되어 정확한 측정이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 송수신신호에 게이트를 설정하고, 이 게이트 사이의 시간차에 두 신호사이의 위상차에 따른 시간차를 더하여 총 시간차를 구하는 방식을 택하였다.

한편 지금까지는 설명의 편의를 위하여 시편을 투과한 신호를 이용하는 경우를 전제로 설명하였으나 본 연구에서는 투과법과 반사법을 모두 이용한

다. 즉, 원리의 검증을 위해 실시한 인장시험 과정에서는 투과법을 이용하고, 토크를 인가하는 과정에서의 축응력 측정 실험에서는 반사법을 이용하였다. 이것은 다음과 같은 이유에서이다.

인장시험의 경우 시편 양단에 트랜스듀서를 부착할 수 있고 투과신호가 반사신호에 비하여 전과거리가 짧아 신호의 품질이 양호하기 때문에 투과법을 이용한데 반해, 볼트의 경우 실제 적용시 표면에 돌출된 헤드부에만 트랜스듀서를 부착할 수 있기 때문에 반사법을 이용한 것이다. 단, 반사법인 경우에는 1회반사와 2회반사 신호에 게이트를 설정하여 시간차를 측정하고 이의 1/2을 TOF로 얻는다. Fig. 4는 반사법인 경우의 에코신호와 게이트를 예시한다.

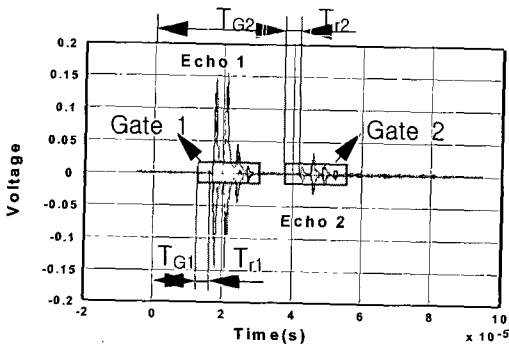


Fig. 4 Example of gated echo signal

그림에서 T_{G1} , T_{G2} 는 각각 에코1과 에코2에 설정된 두 게이트의 초기 시간을 나타낸다. T_{r1} , T_{r2} 는 각각의 게이트 초기 시간으로부터 에코 시작점까지의 시간을 나타내는 것으로 위상검출법에 의해 정밀측정된다. 단, 이 시간은 초음파의 한 주기가 되도록 게이트 위치가 설정되는데, 그림에서는 편의상 과장하여 표시하였다. 그러면 최종 TOF는 다음 식 (11)에 의해 구해진다.

$$T = \frac{(T_{G2} - T_{G1}) + (T_{r2} - T_{r1})}{2} \quad (11)$$

4. 실험 및 실험결과

4.1. 실험장치 및 실험방법

초음파의 전파속도가 볼트에 작용하는 축응력에 의존한다는 것을 실험적으로 검증하기 위해 본 연

구에서는 인장 및 토크의 변화에 따른 초음파 전파속도의 변화를 먼저 측정하였다. 응력 및 토크는 인장시험기와 토크렌치를 사용해 각각 변화시켰다.

Fig. 5는 열처리를 통해 고장력 볼트를 대신할 수 있는 유사한 강도를 재현한 환봉형 인장시험편을 인장시험기에 장착한 후 응력을 증가시켜가며 시편 상단에 함께 부착된 5 MHz의 트랜스듀서를 통해 초음파 신호를 획득하는 것을 보여준다.

Fig. 6은 제작된 하우징과 너트를 이용해 충분한 토크를 줄 수 있도록 준비된 시편에 토크렌치를 이용해 축력을 인가하는 것을 모식적으로 나타낸 것이다. 이 때 사용된 고장력 볼트는 M16/10.9T이다. 초음파 트랜스듀서는 볼트 헤드부의 평탄면에 접촉시켰으며 저면 반사파를 수신하였다.

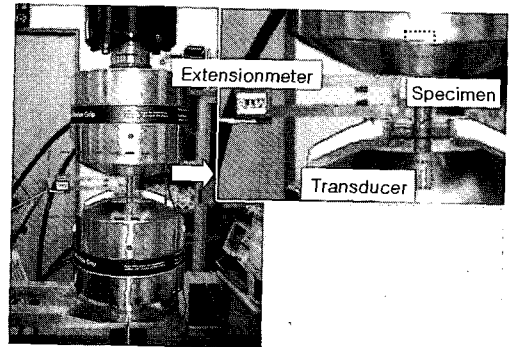


Fig. 5 Configuration of the tension test

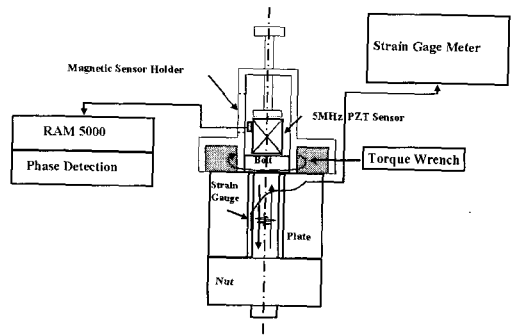


Fig. 6 TOF measurement by phase detection during the torque wrench test

4.2. 영율의 측정

제안한 방법을 적용하여 응력을 측정하기 위해서는 음탄성계수 β 와 영율 E 를 알고 있어야 한다. 먼저 영율 E 는 인장실험을 통해 구할 수 있다. 여기

서 고장력 볼트의 영율을 구하기 위하여 시판 고장력 볼트 M16/10.9T를 KS B 0801 규격에 근거하여 인장시험편으로 가공하였다. 인장시험편의 형태는 Fig. 7과 같다.

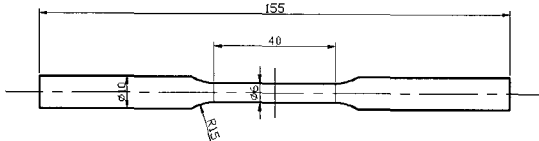


Fig. 7 Tension test specimen

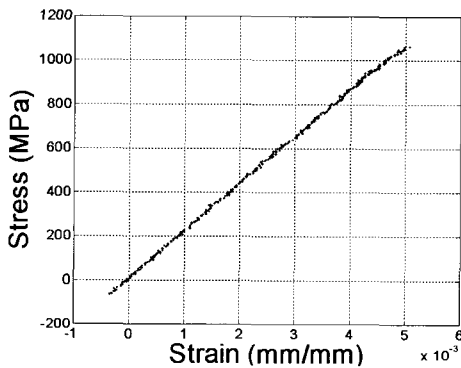


Fig. 8 Measurement of Young's modulus

그리고 Fig. 5에서와 같은 인장시험기를 사용하였으며, 실험 조건은 KS B 0802 규격을 근거로 하였다. 또한 시험편의 형태를 고려하여 25 mm extensionmeter를 사용하여 길이 변화를 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 8과 같다. 이 실험 결과로부터 인장강도가 1200 MPa인 것을 확인할 수 있었으며, 영율 $E=209.29MPa$ 이었다.

4.3. 음탄성계수 β 의 측정

음탄성계수 β 를 구하기 위해 토크렌치로 볼트에 토크를 인가하고 이 때 작용하는 축응력과 이에 따른 전파속도의 변화율의 관계를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 9에서 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 토크가 증가함에 따라, 즉 축응력이 증가함에 따라 초음파의 전파속도의 변화가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 실험결과에 대한 선형보간을 통하여 선형기울기를 구함으로써 음탄성계수를 구할 수 있다. 그 결과 $\beta=24.04 \times 10^{-4} \% / MPa$ 이었다.

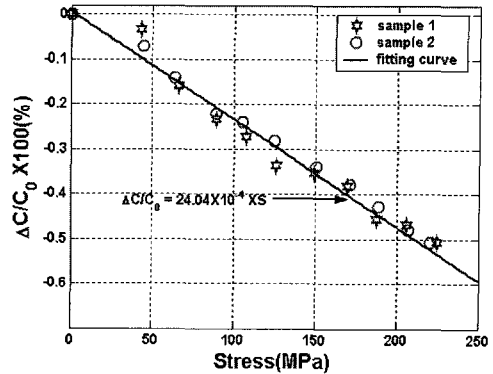


Fig. 9 Result of the torque wrench test stress vs. change rate of sound speed

4.4. 축응력 측정

실제응용에서는 재료내부에서의 초음파의 전파시간을 측정하여 앞에서 구해진 물성값, 즉 음탄성계수 β 와 영율 E 를 식 (6)에 대입하여 응력을 구하게 된다. 또한 초기 전파시간은 기지로 한다. 이것은 초기 전파속도를 알고 있는 것과 동등한 조건이다. Fig. 10은 볼트에 토크를 인가하면서 측정된 응력을 나타낸 그래프이다. 여기서 직선은 각 토크 값에서 스트레인이기에 의해 측정된 응력과 그 추세선을 나타낸다. 두 결과는 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

이로부터 제안하는 방법을 이용하여 고장력 볼트 내의 축응력을 측정할 수 있음을 확인할 수 있다.

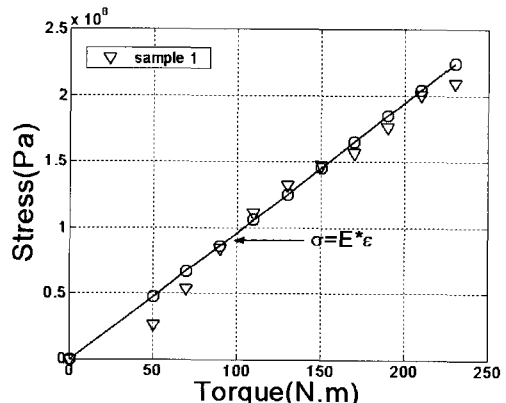


Fig. 10 Stress obtained by the proposed method and its comparison with the result obtained by the strain gage measurement

5. 결 론

초음파를 이용한 고장력 볼트의 축응력 평가에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 초음파를 이용하여 고장력 볼트에 작용하는 축응력을 측정하는 기법을 제안하였다. 특히 여기서는 볼트 재료의 음탄성계수와 탄성계수를 미리 알고 있거나 측정해 두면, 초음파의 전파시간을 측정하여 축응력을 평가할 수 있도록 하였다.
- 2) 전파시간의 측정에는 직교검파법에 의한 위상검출법을 이용하였으며 실험을 통해 1ns의 수준까지 정확하게 측정할 수 있음을 증명하였다.
- 3) 실험을 통하여 초음파의 전파속도가 축응력과 비례적인 관계가 있음을 확인하였으며 제안하는 방법에 의해 고장력 볼트에서의 축응력 평가가 가능함을 실증하였다.

이로써 초음파를 이용하여 체결된 상태에서의 고장력 볼트의 체결력 평가가 가능해질 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2004년도 전력기술기초연구비 지원에 의해 수행되었습니다. (R-2004-B-127)

참고문헌

- [1] Y. Frank, "Bolt torque equations predict stresses," *Product Engineering*, Vol. 49, No. 10, pp. 28-33, (1978)
- [2] T. Fukuoka and T. Takaki, "Evaluation of the tightening process of bolted joint with elastic angle control method," *Analysis of Bolted Joints*, ASME-PVP Vol. 478, pp. 11-18, (2004)
- [3] I. Romanishin, "Tomography of stress tensor field by acoustic elasticity," *Gordon & Breach Science Publishers*, Vol. 15, No. 6, pp. 361-371, (2000).
- [4] J. Y. Kim, et al., "A study on constitution of plant safety inspection system for measuring joint axial force of high tension bolt," *Journal of KSNT*, Vol. 15, No. 2, pp. 371-377, (1995)
- [5] I. K. Park and C. K. Lee, "Measurement of nondestructive residual stress by acousto-elasticity," *Journal of KWS*, Vol. 17, No. 2, pp. 25-28, (1999)
- [6] K. C. Kim, et al., "Research on the nondestructive measurement of nonlinear elastic modulus by using ultrasonic wave," *JSME International-A*, Vol. 44, No. 3, pp. 383-389, (2001)
- [7] H. Hukuoka, et al., "Acoustoelasticity (in Japanese)," pp. 2-18, *JSNDI*, Japan, (1994)