

이 논문은 1994년도 조선대학교 학술
연구조성비 지원을 받아 연구되었음.

고장력 볼트의 체결축력 측정을 위한 설비 안전 검사 시스템 구축에 관한 연구

김재열*, 박상규**, 김희석***, 김창현****, 유 신*****

* 조선대학교 정밀기계공학과

** 여수수산대학교 기계공학과

*** 기아 기술연구소

**** 조선대학교 대학원 기계공학과

요 약 각종 산업 분야에서 사용되는 고장력 볼트는 피결합체의 진동이나 충격 하중 및 반복 하중에 의해 체결력이 약해지는 현상이 발생하는 문제점이 대두되고 있다. 그러므로, 고장력 볼트의 체결력 관리라는 관점에서, 초음파의 음탄성 효과를 이용하여 화력발전소용 터어빈의 고장력 볼트(12Cr.V.Ta)를 모델링한 시험체 내에 입사된 초음파 빔의 공진 주파수 또는 전파 시간을 측정하기 위하여 고장력 볼트의 데이터 값 및 체결 축력 계산식이 입력된 IBM PC를 연결하고, 인장시험기로 하중을 1 ton 씩 증가시키면서 고장력 볼트의 체결축력 및 결보기 신장량을 구하였으며, 이를 통하여, 고장력 볼트의 설비 안전 검사 시스템의 구축이 가능하였다.

1. 서론

각종 산업 분야에 있어서, 첨단 기계 및 구조물이 대형화에 따라 건설 기계나 화학 플랜트 혹은 자동차 엔진 헤드 및 발전소 터어빈 등의 분야에서 안정성 있는 고장력 볼트의 체결력의 관리가 요구되고 있다.

특히, 산업용으로서 고장력 볼트는 피결합체의 진동이나 충격 하중 또는 반복 하중이 지속적으로 작용한다면, 고장력 볼트가 헐거워지는 현상이 발생하여 안정성에 있어서 문제가 발생하게 된다.^{(1),(2)}

지금까지의 볼트의 체결력 측정법과 관리 방법은 여러 관점에서 검토·개발되고 있으나, 현재는 토오크 렌치에 의한 너트 회전각법과 스트레인 게이지를 이용한 모델 실험 등 간접적인 방법에 의존하는

상황이다.^{(3),(4)}

또한, 다른 방법으로 각종 구조물의 부품 체결의 수단으로서의 고장력 볼트에 대한 체결력 측정을 초음파를 이용하여 측정하는 방법으로서, 탄성 재료가 응력 부하 상태에 있으면 탄성파의 속도가 그 응력에 의존하므로, 탄성 재료는 응력 부하 상태에서 미소한 변형량은 응력에 의존하게 된다. 즉, 고장력 볼트의 경우에도 이러한 이론을 적용하게 되면 고장력 볼트의 축력을 추정할 수 있다.^{(5),(6),(8)}

이러한 방법으로, 볼트의 머리 부분으로부터 초음파 빔을 입사하고, 그 공진 주파수 또는 초음파의 전파 시간을 측정함으로써 볼트의 축력을 알아보는 방법이다.^{(7),(9),(10)}

따라서 본 논문에서는 화력발전소용 터어빈의 고장력 볼트에 대한 적용으로서, 실제의 모델 즉, 고

(접수: 1995. 1. 20)

장력 볼트(재질이 12Cr.V.Ta)의 시험편을 만들어서 초음파 음탄성 효과를 이용하여 고장력 볼트의 축력을 측정하고자 한다.

또한, 볼트의 체결축력에 대한 비파괴검사의 효율적인 실시 및 설비 안전 검사 시스템 구축을 위하여, 초음파 빔 노정과 하중의 상관 관계를 알아보고, IBM PC를 연결하여 인장시험기로 하중을 1 ton씩 증가시키면서 볼트의 재질이 12Cr.V.Ta인 고장력 볼트의 항복 축력을 구하고, 또한, 결보기 신장량을 구하는데 연구의 목적이 있다.

2. 고장력 볼트의 축력 측정의 원리

2.1. 고장력 볼트의 합성 Compliance 계산법

Fig. 1에 측정 원리를 나타내고 있다. Fig. 1에서와 같이 볼트의 머리 부분으로부터 초음파 빔을 입사시켜서 볼트 밀면에서 반사한 저면 에코우를 수신하고, 초음파가 볼트 내부를 전파하는데 필요한 시간을 측정한다. Fig. 1과 같은 볼트에 인장 응력을 주게되면 볼트는 탄성적인 변형(ΔX)을 일으키고, 또한 인장 응력에 의해서 볼트 내부를 전파하는 초음파의 음속이 지연되게 된다. 이러한 두가지 상승 효과로부터 볼트 내부를 전파하는 초음파의 전파 시간(beam 노정)이 지연(Δt)되게 된다.

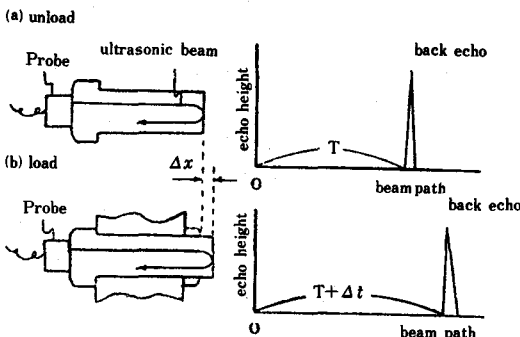


Fig. 1. Measuring principle of axial force in high tension bolt.

따라서, 응력에 의한 탄성 변형량 또는, 응력에 의한 초음파 음속의 변형량은 재질에 따라 그 값이 다르게 되므로 미리 재질마다의 값을 실험적으로

측정해두면, Fig. 1에서의 빔 노정의 차이(Δt)를 측정하여 볼트의 축력 σ 를 산출할 수 있다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 고장력 볼트의 그림을 나타내고 있다.

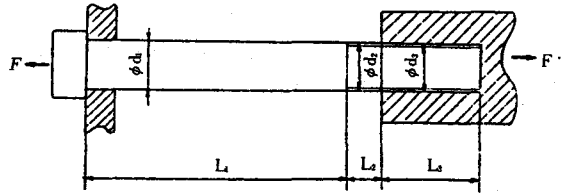


Fig. 2. Diagram of high tension bolt.

Fig. 3은 실제의 화력발전소용 터빈 볼트는 길이라든가 직경이 대단히 크므로, 본 실험에서 제작·사용한 시험편을 나타내었다.

Fig. 3과 같은 시험편을 제작하고, 시험편에 하중을 부하할 때의 볼트 내부를 전파하는 음파의 음속 변화율을 구하게 된다. 그러므로, 음속의 변화 분만을 얻기 위해서 볼트에 단위 축력이 부하된 경우의 볼트의 탄성 변형량 δ mm/kgf(Compliance)을 계산으로부터 구하게 된다.

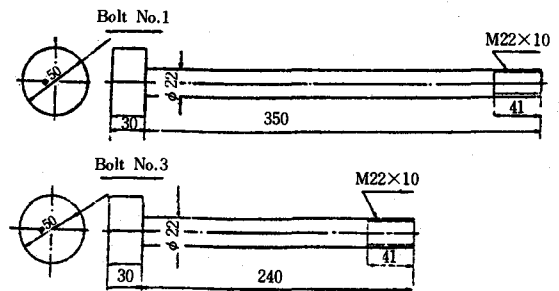


Fig. 3. Size of specimen.

여기서, 합성 Compliance는 Fig. 2의 시험편 그림에서처럼, L_1, L_2, L_3 의 3개로 분할하고, 각 부분의 단위축력당 신장량(Compliance: δ mm/kgf)을 계산하여 그 총합(합성 Compliance: $\Sigma \delta$)을 구하면 다음과 같다.

$$E \delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = \frac{L_1}{A_1 \times E} + \frac{L_2}{A_2 \times E} + \frac{0.4d_e}{A_2 \times E} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

$$(d_e = d_o - 0.649519p)$$

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}, \quad A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$$

$$E = 2.1 \times 10^4 [kgf/mm^2]$$

여기서, d_o : 볼트의 바깥 지름 [mm]

d_e : 볼트의 유효 지름 [mm]

d : 볼트의 안지름 [mm]

p : 볼트의 pitch [mm]

2.2. 축력에 의한 볼트 재료의 음속 변화량

고장력 볼트의 양단에 하중이 부하될 때의 축력에 의한 재료의 음속 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta BPD = k\sigma \left[\frac{2l_o}{C_o} - \frac{2l_e}{C_e} \right] \times \frac{C_o}{2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서, $l_e = l_o + (\Sigma\delta \times \sigma)$ 로부터

$$\frac{k\sigma}{C_o} = \frac{l_o + (\Sigma\delta \times \sigma)}{C_o} - \frac{l_o}{C_o} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\therefore C_e = \frac{l_o + (\Sigma\delta \times \sigma)}{(k \times \sigma) + l_o} \times C_o$$

ΔBPD : 초음파의 빔 노정 차이 거리 [mm]
(Beam Path Distance)

k : 볼트 정수 [mm/kgf]

σ : 부하 하중 [ton]

l_o : 무부하시의 볼트 길이 [mm]

l_e : 부하시의 볼트 길이 [mm]

C_o : 무부하시의 초음파 속도 [m/sec]

C_e : 부하시의 초음파 속도 [m/sec]

2.3. 고장력 볼트의 축력 계산

볼트의 양단에 부하가 걸릴 때의 빔노정의 차이(Δl)로부터 구한 볼트 축력은 다음과 같이 구한다.

$$\Delta BPD = k\sigma \quad \dots\dots\dots(4)$$

로부터 구한 볼트의 축력에 의한 탄성 신장량을 Δl 이라 하면,

$$\Delta l = \Sigma\delta\sigma \quad \dots\dots\dots(5)$$

이 되고, 이때의 $k/\Sigma\delta$ 의 비(볼트 정수)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{k}{\Sigma\delta} = j = const \quad \dots\dots\dots(6)$$

여기서, j 의 값은 볼트의 시험편에 대한 평균값으로 산출된다.

이상으로부터 볼트의 축력(σ)를 구해보면,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\Delta BPD}{k} = \frac{\Delta BPD}{\frac{k}{\Sigma\delta} \times \Sigma\delta} \\ &= \frac{\Delta BPD}{j \times \Sigma\delta} \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

따라서, 식 (7)로부터 하중이 작용하지 않을 때 (무부하 상태)와 작용할 때(부하 상태)의 빔 노정의 차이로부터 고장력 볼트의 축력을 구할 수 있다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1. 실험 장치

본 실험에서 축력을 고정도로 계측하기 위한 데이터 처리 및 측정 장치의 구성은 Fig. 4와 같다. 또한, 이때의 실험에 사용된 장치들은 다음과 같으며,

- (1) 만능형 인장시험기 (용량 100 ton : Model UT-702)
- (2) Sing-around unit
- (3) 초음파 탐촉자(사용주파수 : 5 MHz, 광대역형, 탐촉자 직경 : 20 mm)
- (4) Oscilloscope (Model : V-105, 100 MHz)
- (5) Dial gauge (측정범위 : 0.01 ~ 5 mm)
- (6) Jig
- (7) IBM PC 386
- (8) VGA Monitor
- (9) Printer (Laser Jet 4)
- (10) 시험편 (12Cr.V.Ta)

Fig. 4의 초음파 탐촉자로부터 얻은 신호를 음속 변화량 측정 장치(Sing-around unit)와 디지털 오실로스코프를 통하여 RS 232C 직렬 링크 통신 방법을 사용하여 IBM PC 386으로 데이터를 처리 및 수록하는 방법을 나타내고 있다.

3.2. 실험 방법

볼트의 축력 측정 실험을 위하여 볼트의 재질이 12Cr.V.Ta인 고장력 볼트를 직경이 다르게 모델

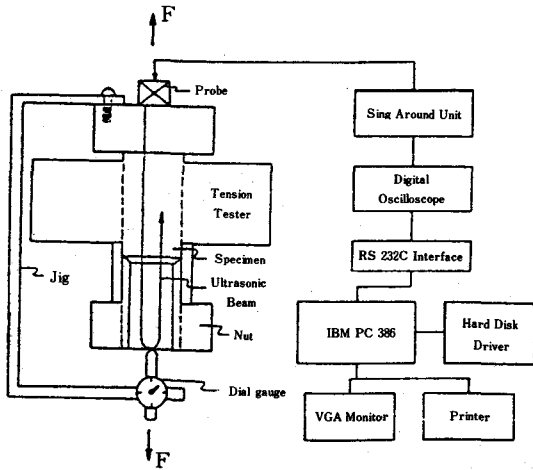


Fig. 4. Block diagram of measuring system and data process.

링하여 제작한 후, 만능형 인장시험기(용량 100 ton)를 사용하여 하중을 계단적으로 증가시켜 가면서 초음파가 시험편 내부를 통과하는 왕복 전파 시간을 측정하고, 또한, IBM PC를 연결하여 볼트 축력을 계산하였으며, dial gauge로 이 때의 탄성 변형량 Δl 을 측정하는 정밀 시스템이다.

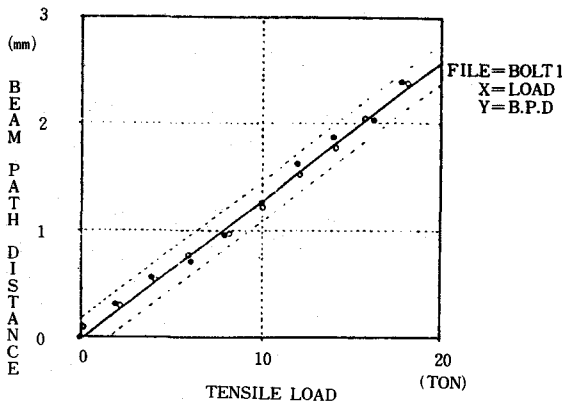


Fig. 5. Relationship between beam path distance and load (Bolt No. 1).

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5와 Fig. 6에서는 인장 하중 σ (ton)와 초음파의 결보기 신장량 $\Delta BPD(mm)$ 와의 관계를 나타

내고 있으며, 이러한 결과로부터 다음과 같은 실험식을 얻을 수 있다.

$$\Delta BPD = 0.129\sigma \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta BPD = 0.087\sigma \dots\dots\dots (9)$$

여기서, 식 (8)은 볼트 No. 1 그리고, 식 (9)는 볼트 No. 3번에 대한 실험식을 나타낸다.

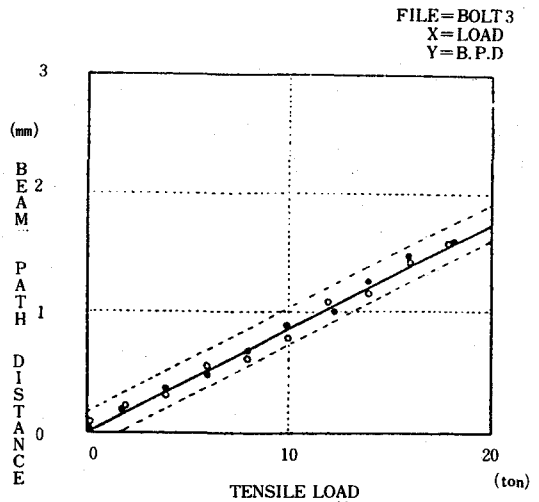


Fig. 6. Relationship between beam path distance and load (Bolt No. 3).

또한, Fig. 2의 고장력 볼트 그림으로부터 시험편을 여러 부분으로 분할하여, 식 (1)로부터 구한 각 부분의 Compliance를 구하면, Table 1의 결과와 같다.

Table 1. Calculated results of compliance

Unit : [mm/kgf]

Specimen No.	δ_1	δ_2	δ_3	$\Sigma \delta$
1	3.873×10^{-5}	1.065×10^{-6}	1.137×10^{-6}	4.093×10^{-5}
3	2.294×10^{-5}	1.065×10^{-6}	1.137×10^{-6}	2.714×10^{-5}

또한, 식 (4), 식 (5), 식 (6)으로부터 볼트 정수 k 와 합성 compliance의 비(j)를 구한 결과를 다음의 Table 2에 나타내었다.

따라서, Table 2의 시험편 1과 3의 값을 평균하면 $j \approx 3.18$ 이 된다. 그러므로, 이상으로부터 고장력

Table 2. Ratio of bolt constant and compliance

Specimen No.	k [mm/kgf]	$\Sigma \delta$ [mm/kgf]	j [k/ $\Sigma \delta$]
1	1.29×10^{-4}	4.093×10^{-6}	3.152
2	8.7×10^{-5}	2.714×10^{-6}	3.205

볼트의 축력을 구하면, 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{ABPD}{3.18 \times \Sigma \delta} \dots\dots\dots (10)$$

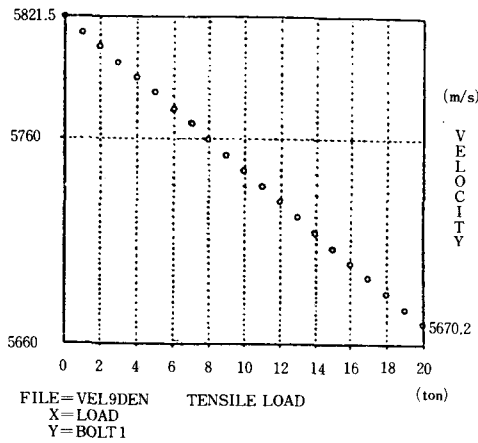


Fig. 7. Relationship between load and acoustic velocity (Bolt No. 1).

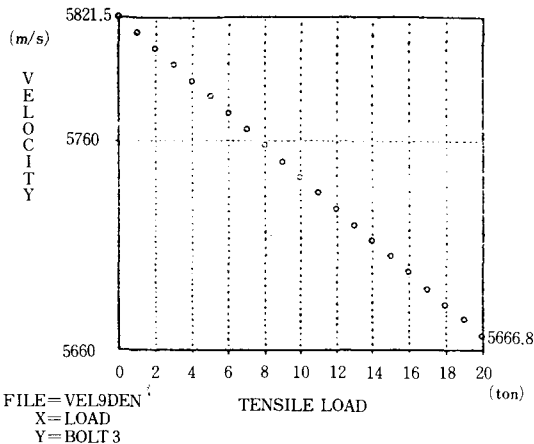


Fig. 8 Relationship between load and acoustic velocity (Bolt No. 3).

Fig. 7과 Fig. 8에서는 두가지 종류의 치수를 가진(볼트 No. 1과 볼트 No. 3) 볼트로서, 재질이 12Cr.V.Ta 시험편에 대해서 고장력 볼트의 양단에 응력이 부하할 때의 축력에 의한 볼트의 음속 변화량을 sing-around unit로부터 측정된 값들을 나타내고 있으며, Fig. 7은 볼트 No. 1의 시험편을 나타내었고, Fig. 8은 볼트 No. 3의 시험편을 각각 나타내고 있다.

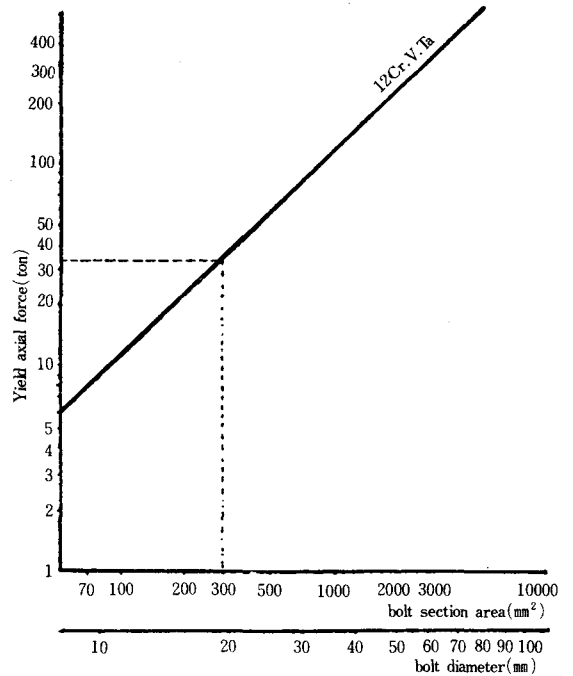


Fig. 9. Relationship among joint axial force and bolt diameter and bolt section area on 12Cr.V.Ta.

또한, Fig. 9에서는 만능형 인장시험기(Model : UT-702)를 사용하여 하중을 증가시킬 경우의 고장력 볼트, 즉, 재질이 12Cr.V.Ta인 볼트의 직경(단면적)으로부터 항복 축력을 구한 것으로 이것을 이용하여 볼트의 체결축력을 결정(항복축력의 80%)하게 되는 것을 나타내고 있다.

예를 들면, 볼트의 유효 직경이 20mm이고, 유효 길이가 200 mm볼트(12Cr.V.Ta)의 경우, 항복 축력은 Fig. 9로부터 34 ton으로서, 이때의 체결축력은 $34 \times 0.8 = 27.2$ ton이 된다.

또한, Fig. 10에서는 L/A 즉, 볼트의 유효 길이를 볼트의 단면적으로 나눈 값으로, Fig. 10을 이용해서 축력 F의 L/A 교차점으로부터 볼트의 결보기신장량을 구하는 것을 나타내었다.

200 mm인 볼트로서 12Cr.V.Ta의 경우 L/A의 값은 0.64이며, Fig. 10으로부터 F=27.2 ton과의 관계로부터 볼트의 결보기 신장량은 2.3임을 알 수가 있다.

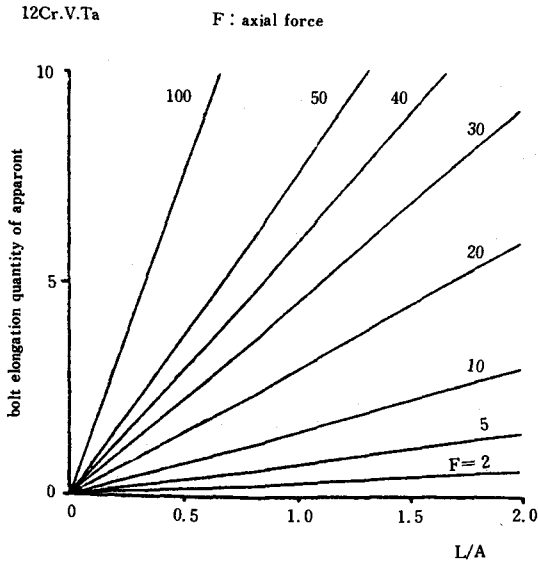


Fig. 10. Inspection accuracy of axial force between material quality(12Cr.V.Ta) and form of bolt.

따라서, 이상으로부터 고장력 볼트의 재질이 본 실험에서 사용한 12Cr.V.Ta강에 대해서도 효과적인 적용이 가능하며, 또한, 고장력 볼트의 체결축력 측정을 통하여 설비 안전 검사 시스템의 구축이 가능함을 알 수 있었다.

5. 결론

이상의 초음파를 이용한 고장력 볼트의 체결축력 측정을 위한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화력발전소용 터어빈에 사용되는 고장력 볼트로부터 체결축력 계산식 $\sigma = \frac{\Delta BPD}{j \times \Delta \delta}$ 를 얻었다.
2. 고장력 볼트의 체결축력 계산방정식이 입력된

IBM PC를 이용하여 초음파의 빔 노점으로부터 고장력 볼트의 체결축력을 구하였으며, 더 나아가서는, 설비 안전 검사 시스템의 구축이 가능함을 알 수 있다.

참고 문헌

- 1) N. N. Hsu ; Acoustical Birefringence and The Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis, Experimental Mechanics, (1974.), pp. 169-176.
- 2) Y. Iwashimizu ; Ultrasonic Waves Propagation in Deformed Isotropic Elastic Materials, int..J. Solids Structures, 7, (1971.), pp. 417-429.
- 3) D. I. Crecraft ; The Measurement of Applied and Residual Stresses in Metals using Ultrasonic Waves, J.sound Vib, 5, (1967), pp. 173-192.
- 4) R. A. Toupin and Bernstein ; Sound Waves in Deformed Perfectly Elastic Materials, J.Acoust. Soc. Amer, 33 (1961), pp. 216-225.
- 5) H. F. Pollard ; Sound Waves in Solid, 1. Introduction, 1977, Pion Limited.
- 6) Eiji Yamamoto, Ryhei Motegi ; Measurement of Bolt Tension by Ultrasonic Technique, Journal of the E.M.S.T. Vol. 13, No. 10, (1978) 10. pp. 781-785.
- 7) Oppenheim, A.K. and R.W.Schafer, Digital Signal Processing, 1.Discrete-Time Signals and System, 1975. Prentice-Hall, Englewod Cliffs, NJ.
- 8) Kiernan, M.T. and J.C. Duke, Jr. Acousto-Ultrasonics as a Monitor of Material Anisotropy, Materials Evaluation, Vol. 46, No. 8, (1988), pp. 1105-1113.
- 9) Jack Blitz, Fundamentals of Ultrasonics, Plenum Press New York, (1967), pp. 150,
- 10) James. H. Williams, Jr. Samson S. Lee, Input-output Characterization of an Ultrasonic Testing by Digital Signal Analysis, International Advanced in Nondestructive Testing, Vol. 12, (1989) pp. 147-192.

A Study on Constitution of Plant Safety Inspection System for Measuring Joint Axial Force of High Tension Bolt.

J. Y. Kim* and S. G. Park** and H. S. Kim*** C. H. Kim**** and S. You****

*, **** Chosun University

** Yu su Fisheries University

*** KIA Technique Research Institute

Abstract By using ultrasonic waves, we obtained conclusion from the experiment for measuring joint axial force of high tension bolt. The conclusion is followed. : From the high tension bolts used at turbine of Thermoelectric Power Plant, we obtained the equation of calculating joint axial force that is $\sigma = \frac{ABPD}{j \times \Sigma \delta}$. By using IBM PC, which is inputed by the equation for calculating joint axial force of high tension bolts, we got joint axial force of high tension bolts form beam path of ultrasonic waves. Further, we can identify that constitution of plant safety inspection system is possible.

(Received : January 20, 1995)