

# 초음파를 이용한 대형볼트 신장량 및 체결력 측정연구 The Study on Elongation and Torque Measurement in Large Bolt by using Ultrasonic Technology

안연식 · 길두송 · 박상기  
Y. S. Ahn, D. S. Gil and S. G. Park

(접수일 : 2009년 4월 24일, 수정일 : 2009년 5월 27일, 채택확정 : 2009년 6월 10일)

**Key Words** : Ultrasonic(초음파), Elongation(신장량), Torque(체결력), Large Bolt(대형볼트), Dial Gage(다이얼게이지)

**Abstract** : This study on the bolt elongation and torque measuring method by ultrasonic non-destructive method. In the past, The dial gage was used for the elongation measurement of gas turbine bolts. The purpose of this study is to improve the traditional bolt elongation measurement method. The old method using dial gage measures the elongation of the gas turbine bolt. If the length differences among the loading bolts are within the required range, The loading torques of bolts consider as acceptable. But this method can not give the information about torque differences among the loading bolts. It could bring out vibration of turbine due to loading torque differences among the bolts. So the elongation and torque must be measured simultaneously. The new technology using ultrasonic non-destructive method can give the information about bolt elongation and torque. The ultrasonic method basically measures the speed in the bolt material for the calculation the bolt elongation. But the ultrasonic speed varies according to temperature and loading torque of bolts. So the factors of temperature and loading power were investigated and reflected to the calculation of bolt elongation and torque. The results of this study shows the big difference among the bolts torque in the old method and the torque differences among the bolts can be adjusted by reflecting the result of this study. And this torque adjusting method can decrease gas turbine vibration problem due to torque difference among the bolts. So this paper shows ultrasonic method is better than old method for the measurement of bolt elongation and torque.

## 1. 서 론

발전소 가스터빈 설비는 공기를 압축하는 압축기와 혼합가스에 의해 구동되는 터빈으로 구성되어 있으며, 압축기와 터빈은 Marriage볼트에 의해 그리고 터빈의 각 단은 Turbine 볼트에 의해 연결 된다.

이러한 가스터빈의 체결용 볼트는 체결된 상태로 장시간 그리고 3600rpm의 고속회전 상태로 운전되고 있다. 또한 잦은 기동정지와 고온 하에서 운전되기 때문에 볼트재료의 경년변화 및 체결부의 열응력으로 인하여 재질의 상태가 변하고 이로 인해 볼

트의 길이 및 체결력이 시간의 경과에 따라 변하게 된다. 그러므로 사용 초기 볼트의 신장량이 일정한 범위 내에 있다 하더라도 시간이 지남에 따라 탄성 변형이 저하하고 소성변형이 증가하여 체결력이 저하되게 된다.

따라서, 설비의 운영 중에 일정한 주기로 볼트의 신장량 및 체결력을 측정하여 제한된 범위에서 유지될 수 있도록 관리되어야 한다. 지금까지 가스터빈 볼트의 신장량은 다이얼게이지를 이용하여 측정하여 왔으며, 이는 단순히 볼트 체결 전 후의 길이만을 측정하고 볼트 상호간의 상대적인 길이가 일정한 범위 내에 있으면 체결력에 문제가 없는 것으로 판단하여 왔다.

그러나, 운전 중에 가스터빈에 진동이 자주 발생하고 이로 인해 가스터빈 블레이드가 손상되는 등

안연식(책임저자) : 한전 전력연구원 원자력발전연구소  
E-mail : ysas@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5549  
박상기, 길두송 : 한전 전력연구원 원자력발전연구소

가스터빈 설비의 안정성에 많은 위협을 주고 있어 이러한 원인이 볼트간의 체결력이 달라 발생할 수 있다는 의견이 끊임없이 제기 되어 왔다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 신장량은 물론 볼트 상호간의 체결력을 동시에 측정하는 기술 개발이 필요하게 되었고 이러한 요구에 부응하기 위하여 초음파를 이용한 신장량 및 체결력을 측정하는 방식을 개발하여 소개하게 되었다.

이번 연구에서는 초음파 속도에 크게 영향을 주는 온도와 체결력 변화에 따른 보정계수를 도출하여 신장량 및 체결력 측정에 활용하였고 기존의 다이얼게이지 방식과 이번 연구에서 제안하는 초음파 방식의 측정결과를 상호 비교 하였다.

## 2. 신장량 및 하중 측정의 원리

신장량 측정에 사용되는 초음파는 기본적으로 고체의 재질이나 재질의 상태, 초음파의 종류에 따라 전파하는 속도가 달라진다. 재질 내에서 초음파의 속도는 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = f \lambda \quad (2.1)$$

V : 속도(m/sec), f : 주파수 Hz(cycles/sec),  
λ : 파장(m/cycle)

따라서 재료 내부의 음파 속도를 알고 있다면, 반사되어 돌아오는 시간을 이용하여 볼트의 길이 즉 신장량을 측정할 수 있다. 우선, 초음파 탐상기를 이용하여 신장량을 측정하고자 하는 볼트에 종파를 투과하고 반사되는 TOF *measured*(Time of Flight)를 구한다. 이는 초음파가 반사되어 돌아오는 시간(Sound Path Duration)을 2로 나눈 것이며, 이는 식 (2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TOF_{measured} = \frac{Sound\ Path\ Duration}{2} \quad (2.2)$$

실험으로부터 구한 TOF *measured*에 볼트의 고유 종파 속도를 곱하면 볼트의 참조 길이 Lref(Reference Length)를 구할 수 있다. 여기서 V는 재료의 고유 종파 속도로서 Reference Block을 이용하여 실험적으로 구한다.

$$Lref = TOF_{measured} \times V \quad (2.3)$$

여기서 볼트의 길이는 온도의 영향을 받는다. 온도가 올라가면 볼트의 길이 또한 증가한다. 또한,

볼트의 온도가 올라가면 음파 속도는 감소한다. 따라서 음파 길이는 증가한다. 그러므로 음파의 온도 효과를 고려하여 TOF *measured*와 Cp, 시험 온도를 이용하여 TOF<sub>normal</sub>을 구한다.

$$TOF_{normal} = TOF_{measured} \times \{1 + (Cp \times (Temp_{measured} - 22.22))\} \quad (2.4)$$

여기서 Cp는 서로 다른 온도 T1, T2에 대해서 초음파를 이용하여 구한 길이 L1, L2와의 상관관계를 통해 아래의 식으로 구한다.

$$Cp = \left( \frac{1}{T_2 - T_1} \right) \left( \frac{L_2}{L_1} - 1 \right) \quad (2.5)$$

또한 하중의 영향을 고려하여 하중을 가하지 않은 상태에 대한 TOF *normal-reference*와 하중을 가한 상태에 대한 TOF *normal-stressed*를 이용하여 길이의 변화를 구한다. 여기서 TOF *normal-stressed*는 인장 하중을 가한 상태에서 온도의 효과를 고려하여 구한 TOF이다.

$$Change\ in\ Ultrasonic\ Length = \frac{(V \times TOF_{normal-stressed}) - (V \times TOF_{normal-reference})}{(V \times TOF_{normal-reference})} \quad (2.6)$$

이러한 길이의 변화를 통해서 볼트에 가해진 응력 값을 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

$$Stress_{uncorrected} = \frac{V}{k} \times \frac{(Change\ of\ Ultrasonic\ Length)}{(Change\ of\ Ultrasonic\ Length + Effective\ Length)} \quad (2.7)$$

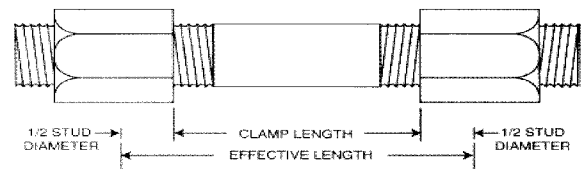


Fig 2.1 The general shape of gas turbine bolt

여기서 k는 종파에서 인장 하중의 변화에 따른 음파 속도의 변화를 나타내는 계수로서, 볼트에 하중이 가해지면 음파 속도는 감소하게 되며 그에 따라 음파 길이는 증가하게 되며, 이러한 효과를 고려한 값이다. 그리고 여기서 Effective Length는 볼트가 어떤 식으로 체결되어 있는가에 따라서 위의 Fig. 2.1에 나타내는 방법을 참고하여 구할 수 있다.

실제 하중과 장비에 의해 측정된 하중과의 상관 관계를 통해서 Stress Offset과 Stress Ratio를 구할 수 있으며(Fig. 2.2), 이는 장비에 의해 구해진 Stress uncorrected의 보정에 사용된다.

$$Stress_{corrected} = Stress_{uncorrected} \left\{ 1 + \frac{Stress\ Ratio}{100} \right\} + Stress\ Offset \quad (2.5)$$

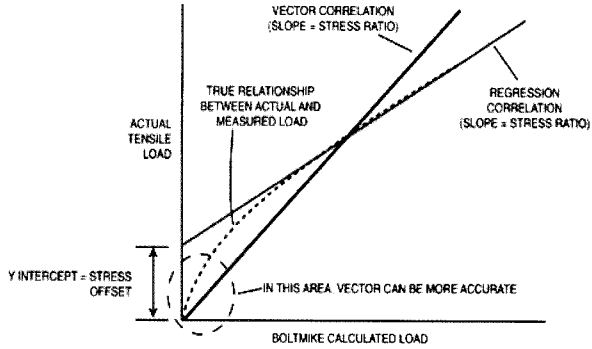


Fig. 2.2 Revision graph

이렇게 수정된 응력 값 Stress-corrected에 단면적을 곱해서 하중을 구할 수 있으며, 볼트의 신장량은 Stress-corrected와 Effective Length, 탄성 계수와의 관계를 통해 구할 수 있고 관계식은 아래와 같다.

$$Load = Stress_{corrected} \times Cross-Sectional\ Area \quad (2.8)$$

$$Elongation = \frac{Stress_{corrected} \times Effective\ length}{E_0} \quad (2.9)$$

### 3. 볼트소재 초음파 속도 측정

IN 718 볼트 소재의 신장량을 위해서는 재질 내에서의 종파와 횡파속도 측정이 필요하고 이를 위해 IN 718 Step-wedge Block을 제작한 후 초음파가 반사되는 시간을 측정하여 속도를 구하였다. 시험에 사용된 Step-wedge Block의 높이는 Fig. 3.1과 같이 각각 5mm, 10mm, 15mm, 20mm이다.

IN 718에서 종파속도를 측정하기 위해서 5.0 Mhz의 주파수를 갖는 탐촉자를 이용하였으며, 종파 속도의 계산은 각 각의 높이를 그래프에서 3번째 peak점과 4번째 peak점 사이의 시간을 이용 하였다. 각각의 높이에 대한 종파속도 평균은 856.58m/s이며, 참고 문헌<sup>10</sup>에 있는 Inconel재료의 종파 속도 5820m/s와 비교 하였을 때 큰 차이가 없으며 이를 Fig. 2-3. 및 Table 2-1에 나타 내었다.

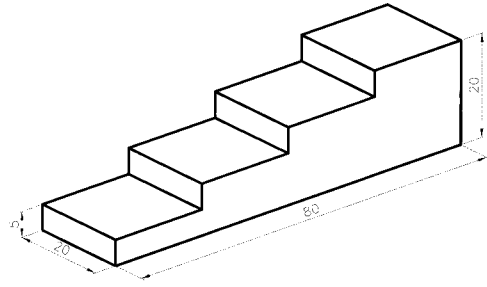


Fig. 3.1 Step-wedge for speed measurement

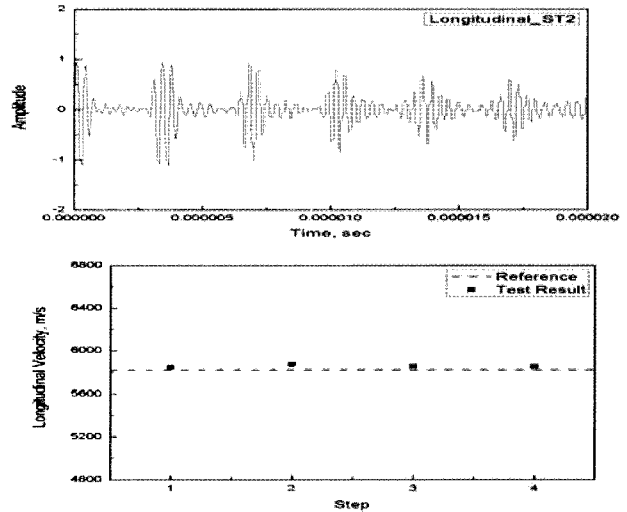


Fig. 2.3 Ultrasonic speed measurement

Table 2.1 Test results of longitudinal velocity

Stage	Height (mm)	Time(sec)	Velocity (m/s)	Remark
1	5	0.00000166	5843.37	
2	10	0.00000337	5875.37	
3	15	0.00000509	5854.62	
4	20	0.00000680	5852.94	
Average			5856.58	

### 4. 온도계수(Cp) 측정

음파 속도는 매개물질에 따라 달라지는데 매개물질의 Young modulus (E)에 비례하고, 밀도(ρ)에는 반비례하는 관계에 있다. 또한 밀도는 온도에 따라 달라지므로 결국 음파속도는 온도의 영향을 받는다. 따라서 정확한 볼트 신장량 측정을 위해서는 온도에 따른 음파속도의 보정이 필요하다.

$$C \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.1)$$

고체에서 온도가 상승하면 오히려 음속이 느려지는데 이는 온도상승에 따른 부피 팽창으로 밀도가 줄어들기 때문이다. 탄소강에서는 온도가 1℃ 상승하면 종파 속도가 대략 1.0% 떨어진다는 연구 결과가 보고된 바가 있고, Mark 등이 실온에서 200℃ 영역까지 Al 6061 T6, SPS 245 steel, Brass에 대해 실험한 바에 따르면 초음파 속도와 Young's modulus가 온도가 상승함에 따라 매우 선형적으로 감소하였다. 다음의 Table 4.1은 Mark 등에 의한 실험 결과를 나타낸 것이다.

Table 4.1 Ultrasonic speed and young's modulus follow to changed temperature

Metal	Longitudinal velocity (m/s °C)	Shear velocity (m/s °C)	Young's modulus gradient ( $\times 10^{-2} \text{Pa/}^\circ\text{C}$ )
Al 6061 T6	-1.78	-1.21	-5.5
SPS 245 steel	-1.54	-0.75	-10.5
Brass	-0.89	-0.72	-7.1

본 연구에서는 5Mhz의 탐촉자를 이용하여 어떠한 인장력도 가하지 않은 상태에서 IN 718재질에서 상온과 50℃, 70℃에서의 종파 속도를 측정하였다. 시험은 신재와 사용재의 Marriage 볼트 및 Turbine 볼트 시험편을 갖고 수행하였으며, 각 온도에서 두 번씩 측정하여 Table 4.2에 나타냈다. 이를 바탕으로 온도에 따른 초음파 속도의 변화를 보정하기 위한 Cp값을 식(4.2)를 이용하여 계산 하고 그 결과를 Table 4.3에 나타냈다.

$$C_p = \left( \frac{1}{T_2 - T_1} \right) \left( \frac{L_2}{L_1} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Table 4.2 Sound path duration (sec.)

T	Base metal	Marriage bolt	Turbine bolt
RT(20℃)	0.00003806	0.00003823	0.00003828
RT(20℃)	0.00003805	0.00003823	0.00003828
50℃	0.00003817	0.00003831	0.00003837
50℃	0.00003817	0.00003831	0.00003837
70℃	0.00003825	0.00003835	0.00003843
70℃	0.00003825	0.00003837	0.00003843

Table 4.3 Temperature coefficient Cp (1/°C)

No.	Base metal	Marriage bolt	Turbine bolt
1	0.00010073	0.00006975	0.00007837
2	0.00010479	0.00006526	0.00007819
3	0.00010248	0.00006801	0.00007837
Average	0.00010267	0.00006767	0.00007831

Table 4.2에서 보는 것과 같이 온도가 증가함에 따라 재료 내부를 이동하는 초음파의 이동 시간이 길어짐을 알 수 있으며, 신재보다 사용한 재료에서 초음파의 이동 시간이 더 길게 나타났다. 그리고 똑같이 사용한 재료라 하더라도 보다 높은 온도 환경에 놓이는 볼트에서의 초음파 이동 시간이 더 길게 나타났다. 이를 통해 재료의 열화에 따라 초음파의 이동 시간이 더 길어짐을 알 수 있다.

### 5. 하중계수(k) 측정

볼트의 신장량은 체결하는 하중이 증감에 따라 달라지게 되므로 하중에 따른 신장량 및 체결력 변화를 반드시 보정하여야 한다. 보정계수 산정을 위하여 5Mhz의 탐촉자를 이용하고 신재와 사용재 Marriage 볼트, Turbine 볼트에서 채취한 3 종류의 시험편에 0 ton, 1 ton, 2 ton, 3ton, 4ton, 5 ton의 인장하중을 가하면서 재료의 변형에 따른 종파 속도의 변화를 관찰하였으며, 인장응력의 변화에 따른 종파속도의 변화를 나타내는 Stress Factor k를 구하였다.

### 6. 신장량 및 체결력 측정 장비

볼트의 신장량 및 체결력 측정을 위한 장비는 Stress Tel 사의 BoltMike III(Fig. 6.1)를 이용 하였으며 사양은 Table 6.1과 같다.

신장량 및 체결력 측정장비는 기본적으로 초음파를 이용하는 장비로서 측정에 사용된 초음파 Probe의 주파수는 5.0 Mhz이며 직경은 볼트 헤드의 크기를 고려하여 0.5inch를 사용하였으며, 신장량 측정을 위한 장비 Parameter는 시험을 통해 취득한 속도, 온도보정계수, 하중보정계수 그리고 물성 시험값 그리고 볼트 설계값 등을 사용 하였다.

Table 5.1 Sound path duration (sec.)

Load (Ton)	Base metal	Marriage bolt	Turbine bolt
0	0.00003806	0.00003809	0.00003828
0	0.00003805	0.00003823	0.00003828
1	0.00003811	0.00003811	0.00003834
1	0.00003811	0.00003829	0.00003820
2	0.00003817	0.00003834	0.00003840
2	0.00003816	0.00003834	0.00003840
3	0.00003823	0.00003840	0.00003846
3	0.00003823	0.00003825	0.00003846
4	0.00003829	0.00003846	0.00003852
4	0.00003829	0.00003845	0.00003851
5	0.00003834	0.00003852	0.00003858
5	0.00003834	0.00003852	0.00003858



Fig. 6.1 BoltMike III

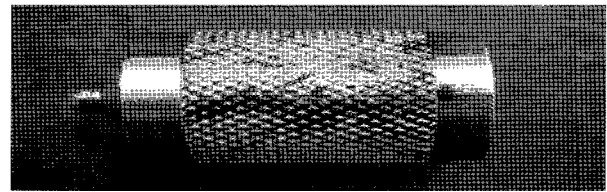


Fig. 6.2 Ultrasonic probe

Table 5.2 Stress factor k(m/s/MPa)

No.	Base metal	Marriage bolt	Turbine bolt
1	0.069443	0.059359	0.059272
2	0.059305	0.069057	0.05889
3	0.059219	0.058989	0.058805
4	0.058834	0.058805	0.058621
5	0.068704	0.058621	0.058439
Average	0.063101	0.060966	0.058805

Table 6.2 Measuring instrument Parameter

Parameter	Marriage bolt	Turbine bolt
Acoustic velocity (m/s)	5856.58	5856.58
Thermal coefficient (1/C)	1.0267E-04	1.0267E-04
Modulus of elasticity (MPa)	199948.0	199948.0
Stress factor(m/s/Pa)	6.3101E-08	6.3101E-08
Yield strength (MPa)	1050.000	1050.000
Bolt length (mm)	166.62	353.90
Measurement length(mm)	166.62	353.90
Effective length(mm)	125.98	310.47

Table 6.1 Specification of measuring instrument

Length of bolt measurement	19.05mm ~ 6350mm
Measurement resolution	0.0001 inch(0.00254mm)
Measurement error	±2%
Temperature	-10℃ ~ +50℃
Temperature measurement	Temperature Sensor Correction
Measurement method	Ultrasonic single echo and multiple-echo

## 7. 신장량 및 체결력 측정결과

신장량 및 체결력 측정은 가스터빈에서 사용되고 있는 Marriage 볼트 및 Turbine 볼트에 대하여 이루어 졌다. 이번 연구에서는 Marriage 볼트 9개에 대해 기존의 다이얼게이지에 의한 방식과 초음파에 대한 측정을 동시에 수행하고 신장량 및 체결력의 측정결과를 비교 하였다.

이미 언급한 대로 기존의 측정방식은 기준볼트에 대한 다이얼게이지를 이용한 비교측정 형태로 볼트의 체결력은 측정하지 않고 단순 늘어난 길이만을 측정을 하고 있다. Table 7.1 및 Fig. 7.1은 Marriage 볼트를 BoltMike III로 측정한 데이터와

다이얼게이지로 측정된 데이터의 결과를 비교한 것이다. Fig. 7.2는 다이얼게이지로 신장량만을 측정하여 볼트간의 늘어난 길이가 제한된 범위 내에 들어 볼트체결이 정상적이라고 판단한 경우 볼트간의 체결력의 상태를 초음파방식(BoltMike III)으로 측정된 결과이다.

Table 7.1 Elongation measurement of marriage bolt

Bolt name	Length [mm]	Stress [MPa]	Elongation[mm]		Load [kN]
			BoltMike	Dial gage	
R 5-2	166.9	588.8	0.371	0.32131	1095
R 6-2	166.9	443.3	0.279	0.34036	824
R 7-2	166.9	471.8	0.297	0.33782	877
R 8-2	166.8	501.5	0.316	0.33909	932
R 9-2	166.8	507.7	0.32	0.3175	944
R 10-2	166.7	557.2	0.351	0.33909	1036
R 2-3	166.9	535.5	0.337	0.34544	996
R 3-3	166.8	523.1	0.33	0.35179	972
R 4-3	166.8	439.3	0.277	0.32512	817

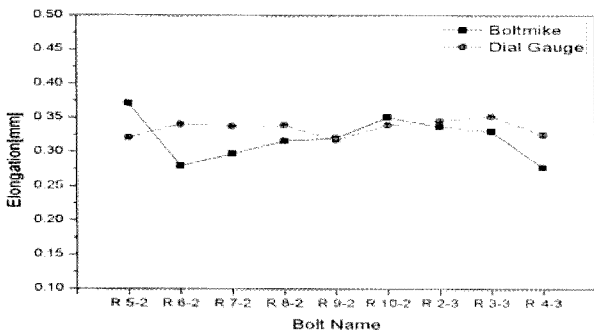


Fig 7.1 Elongation result of marriage bolt

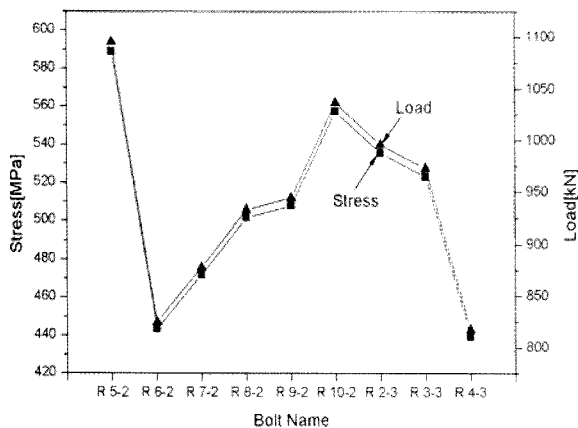


Fig. 7.2 Torque measuring result by ultrasonic

## 8. 결 론

이번 연구결과 초음파 방식은 기존의 다이얼게이지

지이지 방식과는 달리 볼트의 신장량은 물론 체결력에 대한 정보를 동시에 제공할 수 있었다.

또한, 볼트간의 체결력 차이를 쉽게 보정하여 체결력 차이에 따른 가스터빈의 진동유발 현상을 획기적으로 줄이는데 크게 기여하게 되었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기존의 다이얼게이지 방식의 경우 신장량에는 문제가 없더라도 볼트간의 체결력에는 많은 오차가 있음을 확인 할 수 있었다.

2) 초음파를 이용한 신장량 측정결과는 신장량 및 체결력을 등을 복합적으로 나타내주고 있어 신장량은 물론 균일한 체결여부를 동시에 확인할 수 있었다.

3) 초음파 방식으로 결과를 활용하면 볼트간의 불균일한 체결력을 조정할 수 있고 가스터빈의 진동을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인 하였다

4) 초음파의 속도는 온도에 따라 달라지고 온도가 올라갈수록 초음파 속도는 느려짐을 확인하였으며 이를 속도보정에 반영하여야 만 정확한 볼트의 신장량을 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

5) 볼트의 신장량은 체결력에 따라 달라지고 체결이 진행될수록 늘어나는 길이가 적어지고 있어 이를 초음파 속도보정에 반영하여야만 정확한 신장량 및 체결력 측정이 가능함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. ASM, 1964, "Metal Handbook", 8th ed., Vol.2, pp. 398~405.
2. 안연식, 정계조, 2004, "발전설비 와전류 신검사 기법 개발 최종보고서".
3. 박상기, 안연식, 2008, "7FA형 가스터빈 주요부품 비파괴진단기술 개발 최종보고서".
4. G. P. Singh, R. A. Cervantes and R. L. Spinks, "Ultrasonic Nondestructive Testing Technique for the Examination of Low-Pressure Turbine discs Rims", SWRI.
5. ASTM B637, "Standard Specification for Precipitation-Hardening Nickel Alloy Bars, Forgings, and Forging Stock for High-Temperature Service".
6. Donald J. Hangemaier, 1990, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, p. 44.
7. ASNT, "Nondestructive Testing Handbook", 2nd. Edition, 1986, Vol. 4. Electromagnetic

- Testing, p. 382.
8. Donald J. Hangemaier, "Fundamentals of Eddy Current Testing", 1990, ASNT, p. 43.
  9. ASNT, "Nondestructive Testing handbook", Vol. 4.
  10. 한국기계연구원, 1997, "항공기 가스터빈 핵심재료기술 개발(III)", p. 11, 과학기술처.
  11. ASTM E1820, 1999, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness".
  12. Lucjan Witek, 2002, "Failure analysis of turbine disc of an aero engine", Engineering Failure Analysis, 9, pp. 593~601.
  13. M. G. Park et al., 2002, "Analysis of a J69-T-25 engine blade fracture", Engineering Failure Analysis, 9, pp. 593~601.
  14. S. K. Bhaumik et al., 2002, "Failure of turbine rotor blisk of an aircraft engine", Engineering Failure Analysis, 9, pp. 287~301.