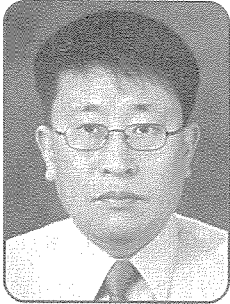


발전설비 압력용기 고온부 사용 스테드 볼트 교체 기준



한전기공(주)
기술연구소
선임연구원 김문영/공학박사
Tel : (031)710-4183

1. 개요

세계적으로 장시간 운전된 발전소가 점차적으로 증가되고 있는 추세이고 신규 발전소 건설은 국가의 막대한 경제적 부담을 안겨주므로 이와 같은 문제해결을 위하여 일반적으로 거론되고 있는 것이 설비의 수명연장이다. 수명 연장시 부품에 대한 각종 검사를 수행하여 건전성을 평가하게 되며, 그 결과에 따라 정비나 교체작업을 하는 것은 매우 중요한 일이다. 특히 가스터빈, 화력 및 원자력발전에서 사용되는 터빈 부품, 각종 밸브, 또는 원자력 1차계통 등의 주요 부품에 대한 체결요소는 일반적으로 고온·고압 및 과도상태(transition condition)의 운전조건에서 사용되어 있어 신중하게 평가 관리 되어져야 한다.

부품 체결을 위하여 볼트는 토크나 볼트 신장량 또는 너트의 회전각도에 의하여 체결되고 있다. 토크 체결의 경우, 발전설비용 볼트는 일반적으로 항복강도의 약 85% 이하로 체결하고,¹⁾ 안전성을 고려하여 대부분 고인성 재료를 사용하고 있다. 이러한 재료는 고온에서 장시간 사용하였을 경우 운전조건에 따라 소성경향이 강하게 나타나고, 항복강도가 상온에서 보다 현저히 저하되어, 장시간 사용에 의한 재질의 열화(degradation) 및 손상(damage)을 발생시킨다.²⁾ 따라서 이러한 현상의 발생은 발전 설비의 안전운전에 막대한 지장을 초래하거나 불시정지사고를 유발시킬 수도 있다.

최근, 외국의 사례에 비추어 볼 때 미국기계학회에서는 이러한 볼트를 기존 압력용기 및 파이프의 해석설계라는 분과에 속해 있었으나 98년 이후에는 볼트 체결물의 해석이라는 별개의 분과로 구분하여 운영하며 독립된 논문집으로 발간하고 있으며,³⁻⁵⁾ 90년 중반 이후 장시간 운전된 발전설비의 수명연장이 대두되면서 이 분야의 중요성이 점차로 증가되고 있다. 마찬가지로 국내의 경우도 발전설비의 노후화로 고온에서 사용되는 스테드 볼트의 건전성 평가의 중요성이 부각되고 있다. 기준시간 이상 운전된 발전설비에 대한 고온볼트의 교체에 대한 평가기준은 거의 일부 외국 제작사의 기준을 그대로 적용·평가하여 교체 또는 정비한다. 또한 스테드 암나사는 기울기를 점검하여 따라 확관(size-up) 및 새로이 나사산을 가공한다. 그러나, 이러한 발전설비용 고온 스테드 볼트의 교체기준은 각 제작사마다 차이가 있고, 현장에 적용하는데 문제점을 내포하고 있어 명확한 교체기준의 설정이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 각 제작사마다 서로 상이한 종래의 고온 스테드 볼트의 교체기준의 문제점을 파악, 검토하고 이에대한 효과적인 교체기준을 설정하고자 한다.

2. 고온 스테드 볼트에 대한 교체 기준의 적용

2.1 사용재질의 재질 특성

본 연구에서는 장시간 운전된 고온 스테드 볼트를 모델로 하여 볼트의 교체 정비 업무수행을 위하여 볼트의 육안검사, 경도측정값과 스테드 암나사부의 기울기측정 등의 자료를 근거로 하여 검토 비교하였다. 측정에 사용된 재질은 고온(450 °C 이상) 환경조건에서 경년열화되기 쉬운 주증기 차단 밸브(main stop valve)용 스테드 볼트의 재료(Cr-Mo-W-V : GE Code B50A125H)와 암나사부는 밸브 케이싱의 재료(Cr-Mo-V)를 선정 하였다.¹⁾

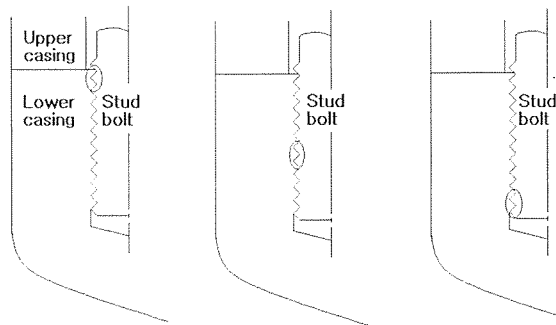
Table 1. Mechanical properties of bolt materials

Mechanical properties	Bolt	Casing
Yield strength , [kg/mm ²]	≥63.2	≥42.1
Tensile strength, [kg/mm ²]	≥98.4	≥56.2
Elongation [%]	≥13	≥15
Brinell - Hardness(HB)	271-321	-

Table 1은 고온부에 사용된 볼트의 재질특성을 나타내고 있으며 약 18년동안 14,034시간의 운전, 4,758회의 기동정지와 14회 계획 예방정비의 이력을 가지고 있다.

2.2 육안검사에 의한 교체 기준

일반적으로 육안검사로는 균열과 나사산의 마모상태 및 손상상태를 검사할 수 있다. Fig. 1은 손상된 스테드 볼트의 나사산의 손상의 위치를 상, 중, 하부측으로 구분하여 나타냈다. 이와 같은 손상은 두 체결 나사산 사이의 표면응착, 부식, 이물질의 응착, 볼트의 변형이나 지연과피 등으로 인하여 고착현상이 발생한다.⁶⁾ 이러한 볼트의 고착은 운전중에는 문제가 되지 않으나, 과도한 토크를 작용하여 분해하는 과정에서 주로 양측 두 나사산 베어링부 사이의 이물질 삽입에 의한 마찰열로 인하여 주로 손상된다. 일반적으로 손상형태는 주로 볼트와 스테드 암나사의 손상으로 구분지을 수 있다.



(a) Upper area damage (b) Middle area damage (c) Lower area damage

Fig. 1 Three types of damaged thread position in stud bolt

국내의 화력설비와 같이 1주기(화력의 경우 약 25년)동안 분해를 하지 않고 운전하는 스테드 볼트의 경우에는 전반적으로 고착되는 문제가 빈번하게 발생한다. 따라서 장시간 운전된 화력발전소의 스테드 볼트는 다른 분해방법이 적용되어야 하며, 스테드 암나

사부에 대한 특별한 관리가 요구된다. 경험에 비추어 볼 때 다양한 고착볼트의 제거방법을 적용하고 있는 현재로서는 거의 나사산에 손상을 주지 않고 고착볼트를 제거할 수 있다.

Table 2는 1999년에 수명연장을 위하여 장시간 운전된 발전설비의 고온 스테드 볼트에 적용한 신 정비 기법으로 스테드 볼트를 제거한 사례를 보여주고 있다. 스테드 볼트나 암나사의 경우 전체 나사산중에서 10% 이상 나사산 손상이 육안검사로 판별되면, 스테드 볼트와 암나사산 사이의 체결력이 저하되어 볼트는 신제품으로 교체되어야 하며, 스테드 암나사는 다른 교체기준을 적용하여 정비하여야 한다.⁷⁾ 그러나 10% 미만 손상시에도 그 위치에 따라 교체기준의 평가방법이 다르게 적용되어야 한다.

Table 2. Experience of special method to remove stud bolt after long time operation

Work Period	Site	Unit	Bolt diameter	Counter(ea)
'99. 5-6 (40 days)	Samcheonpo	2	6", 3 1/2", 2 3/4", 2 1/2"	149
'99.10-12 (60 days)	Pyungteag	4	3 1/2", 3", 2"	110
'99.10-12 (60 days)	Samchenpo	1	6", 3 1/2", 3 1/4" 2 3/4, 2 1/2", 1 1/4"	171

특히 분해 정비시에 발생하는 상부 손상의 경우에는 일반적으로 국부응력⁸⁾을 받고 있는 부분의 손상으로 인한 추가응력이 가중되므로 기율기측정에 대한 교체기준을 적용할 수 없다.

2.3 경도측정에 의한 교체 기준

Fig. 2는 좌·우측 주증기 차단 밸브(main steam stop valve : MSV)에 대한 스테드 볼트의 경도 측정 결과를 나타내고 있다. 좌측(left side : LHD) 볼트의 경도값은 브리넬 경도(Brinell hardness : HB) 하한치 280이하가 11개로서 전체 18개 볼트의 61%를 차지하고 있으며, 우측(right side : RHD)은 6개로서 33%로 전체볼트중의 20%이상이 하한 허용값보다 경도가 낮은 상태이다. 특히 좌·우측 데이터는 볼트 전체의 경도가 하한값 가까이에 분포되어 있어 전반적으로 스테드 볼트가 열화되어 있는 것을 알 수 있다.

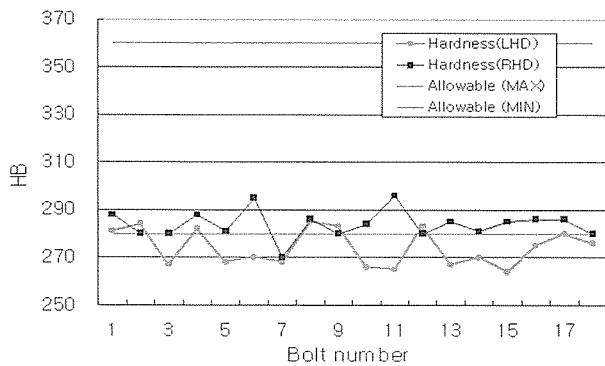


Fig. 2 Brinell hardness measured for stud bolt of main steam stop valve

2.4 기울기 측정에 의한 교체 기준

체결되는 스테드 볼트의 나사산 사이의 체결면적의 감소를 평가하기 위하여 기울기 측정(wobble test) 방법을 사용하고 있다. 체결면적의 감소는 볼트의 체결력을 저하 시키며, 궁극적으로 국부응력이 증가하여 볼트의 빠짐이나 절손과 같은 중대사고를 발생시킬 수도 있다. 이와 같이 볼트 체결면적이나 길이변화는 주로 나사부의 눌림현상(embedment)으로 고온에서 장시간 운전되었을 경우 소성변형으로 인하여 나사산 사이의 체결면적이 감소하게 되고,^{11,12)} 체결력 감소에 대한 기울기를 측정하여 스테드 볼트의 교체시기를 결정한다.

Fig. 3은 주증기 차단 밸브에 대한 스테드 볼트 홀의 기울기 측정 결과를 나타낸 것이다. 이 측정결과는 제작사에서 권장하는 허용값에 1/2도 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 결과에서 보여주는 것과 같이 좌·우측 주증기 차단 밸브에 대한 전체 18개 스테드 볼트의 기울기는 0.65~0.92mm 범위에 있으므로 그 허용값인 1.65 mm(B method : 1.216 mm)보다 훨씬 작은 상태로서 그 평균값은 0.734 mm가 된다.

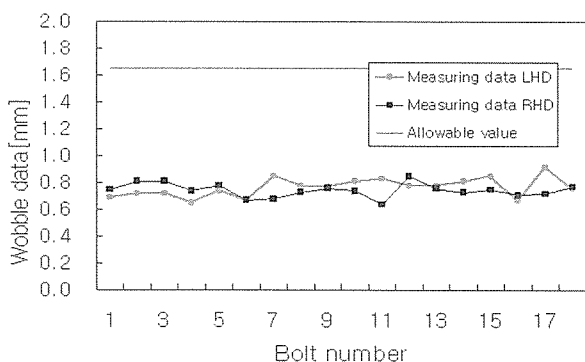


Fig. 3 Wobble values measured for stud holes of main steam stop valve before maintenance

Fig. 4는 정비업무(신규 나사가공)를 수행한 후의 기울기 측정값으로서 그 기울기는 0.16~0.6 mm 범위에 있으며 그 평균값은 0.33 mm이다. 따라서, 18년 운전후의 기울기값이 약0.404 mm($0.734-0.33=0.404$)가 증가되었다.

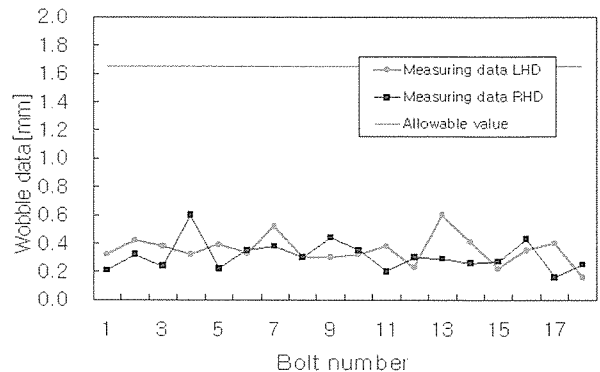


Fig. 4 Wobble values measured for stud holes of main steam stop valve after maintenance

3. 종래의 고온 스테드 볼트에 대한 교체기준 및 문제점

3.1 스테드 볼트에 대한 종래의 교체 기준

3.1.1 육안검사

반복적으로 분해 조립되는 발전설비용 고온부 볼트는 일반적으로 22년 이상 11회 분해 조립되었을 경우 교체하여야 하는 것으로 제작사에서 규정하고 있다.⁶⁾ 그러나 교체시기 이전에 과도한 분해조립 과정에서 나사산이 손상될 수 있고, 이와 같은 손상은 재질열화 등과는 다르게 과도한 나사산의 손상으로 두 나사산 사이의 체결면적을 감소시켜 응력을 증대시키고, 결국 그 부분의 국부응력으로 인하여 볼트는 절손 사고를 초래할 수 있다. 따라서 일반적으로 제작사(HITACHI<일본>)에서는 전체 나사산수의 10% 이상이 손상되었을 때 스테드 암나사를 확관(size-up)하여 새로운 나사산을 가공하여 사용하도록 규정하고 있다.⁷⁾

3.1.2 경도측정

Table 3은 경도측정값에 따라 볼트의 교체기준을 나타내고 있다. 이와같이 열화관정을 위해 실험적으로 만들어진 경도 판정표(ASTM에 규정)와 현장에서

Table 3. Replacement criteria of stud bolts according o material hardness(Cr-Mo-W-V)

Inspection	Exchange criteria		Remarks
	Hareness	Evulation	
Hardness value(HB)	>360	Replacement	damaged
	290-360	OK	> 25% in
	280-289	Replacement within 2 years	group
	<280	Replacement	(all bolt exchange)

취득된 데이터를 비교하여 재질의 열화상태를 판정하고 재사용 유무를 결정한다.⁹⁾ 이 표에서와 같이 ASTM에 모든 볼트 재질의 경도 허용값이 규정되어 있지 않다. 따라서, 고온부에서 사용되고 있는 모든 스테드 볼트¹⁰⁾의 열화상태를 비교 판정할 수 없으며, 타 재질에 대한 열화상태의 판정은 각 재질에 대한 각각의 교체기준을 필요로 한다.

3.1.3 기울기 측정

체결면적 감소에 대한 기울기를 측정하기 위해서는 기존의 스테드 볼트를 제거한 후 기준 스테드 볼트(standard stud bolt)를 가볍게 손으로 체결하고, Fig. 5와 같이 수평면에 대한 높이 (DH) 152 mm 위치에 다이얼 게이지를 설치한다. 스테드 볼트의 상부를 가볍게 앞 뒤로 흔들어 볼트의 기울어진 정도를 다이얼 게이지에서 확인한 후, 그 결과를 Table 4 (a)의 A method와 비교하여 허용깊이(Δ) 이상일 경우 스테드 나사산에 대한 정비를 수행하여야 한다.

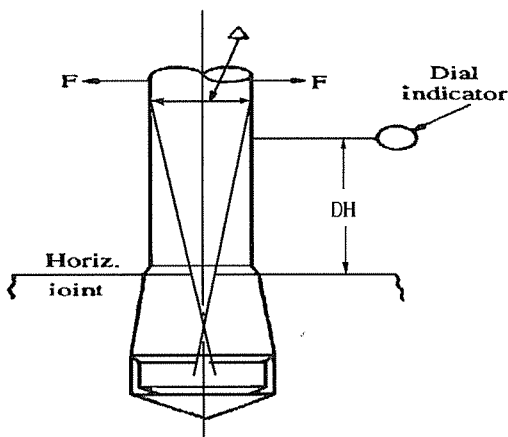
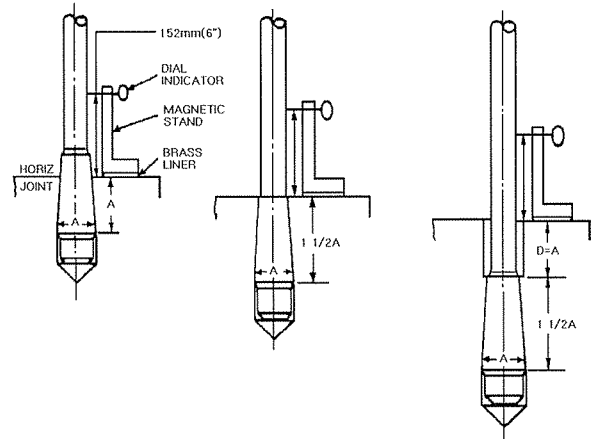


Fig. 5 Installation position of the dial gauge

Fig. 6 각각 서로 다른 스테드 볼트 형상을 나타내고 있다. 이것은 Case I, II, III의 형상으로 구분하여

교체기준에 대한 허용치를 Table 4에 서로 다르게 규정하고 있다.



(a) Case I (b) Case II (c) Case III

Fig. 6 Three cases of stud bolts

여기에서 Case I은 볼트 직경과 나사체결 높이가 동일한 상태를 나타내고 있으며, Case II는 나사산의 높이가 볼트 직경의 1.5배되는 볼트 형상으로 일반적인 밸브에 사용되는 스테드 볼트가 여기에 속한다.

또한, Case III는 상부에 볼트직경과 같은 높이의 카운터 보어(counter bore)가 있으며 나머지 부분은 Case II와 같은 형상을 하고 있는 것으로 터빈 스테드 볼트가 이와 같은 부류에 속한다. 각각의 경우 볼트의 기울기 측정결과를 Table 4 (a)의 A method¹³⁾와 비교하여 기울기가 허용치 이상 되었을 경우에는 스테드 볼트를 정비하여야 한다. 또한 카운터 보어 깊이가 Fig. 6과 다른 경우 (1)식을 적용하여 허용깊이 Δ 을 계산한다.

$$(\text{mm}) = \frac{152 + H + 1.5A}{152 + 1.5A} \quad (1)$$

여기서 H는 카운터 보어의 깊이이고, A는 스테드 볼트의 외경이다.

Table 2 (b)의 B method⁷⁾는 또 다른 제작사의 기울기 측정에 대한 허용치를 나타내고 있다. 여기서, 다이얼 게이지의 설치위치, DH=300 mm에 대한 허용값을 나타내고 있으며, 이것은 Fig. 6에서 보여주는 것 같이 스테드 볼트의 형상에 따라 구분하지 않고 동일한 형상으로 간주하고 평가하도록 되어 있

다. 일반적으로 벨브용 스테드 볼트의 형상을 보여 주고 있는 Case II를 예를들면 A method와 B method를 같다고 간주하여 152mm 위치에 다이얼 게이지를 설치하였다고 가정하면 기울기의 허용값은 101.6mm(4인치) 이하에서 1.216mm로서 A method의 허용값보다는 작게 되어 기준값이 제작사별로 차이를 나타내고 있다.

Table 4 Allowable depth for wobble test

(a) A method

Allowable depth, (mm)(DH=152 mm)			
Size(Diameter)	Case I	Case II	Case III
M42~M56	2.54	1.90	2.03
M64~M100	2.03	1.65	

(b) B method

Size (Diameter)	Allowable depth, (mm) (DH=300 mm)
≤4" (101.6mm)	≥2.4 x DH/300 (1,216 mm)
>4" (101.6mm)	≥1.6 x DH/300 (0.811 mm)

3.2 종래의 스테드 볼트 교체기준의 문제점

발전설비용 고온 스테드 볼트의 교체여부를 판정하기 위한 교체기준의 평가방법으로는 외부검사를 위한 육안검사, 재질내부의 결함 유무상태를 판정하기 위한 방법중의 하나인 비파괴검사(ultrasonic test), 열화상태를 판정하는데 주로 사용하는 경도측정, 나사산의 침식, 마모, 부식에 의한 나사산의 손상⁹⁾의 평가방법이 있다. 또한, 운전중 고온상태에서 두 나사산 사이의 체결력에 의한 나사부 눌림현상(embedment)과 소성변형으로 나타나는 체결면적 감소를 측정하는 기울기 측정(wobble test) 방법이 있다.^{7) 13)}

이러한 여러 평가기준에서 육안검사로 나타나는 소규모의 나사산 손상(10%이하)에도 적용되고 있는 기울기 측정방법에는 손상부가 스테드 볼트의 응력집중부(1번째 나사산)⁸⁾에 발생되었을 때는 거의 기울기 측정에는 영향을 미치지 않으나 다른 논문에서 보고된 바와 같이 설계 특성상 집중응력(critical stress)을 받고 있는 1번째 나사산 부분에 추가응력이 가증되므로 확관 정비하여야 하며 기울기 측정방법의 적용이 불합리하다. 또한 두 가지 방법(경도측정, 기울기 측정)을 장시간 사용한 고온 스테드 볼트에 적용하여 검토한 결과 어느 한 방법에 편중하여 교체시기

가 판정되는 문제점이 발생하고, 현재 사용되고 있는 기울기 측정방법은 각 제작사에 따라 교체기준에 대한 허용값이 서로 다르기 때문에 실제로 현장에서 효과적인 교체기준을 사용하기에 어려운 문제점이 발생한다.

4. 고온 스테드 볼트의 교체기준 설정 및 검토

위의 결과를 종합적으로 분석하여 볼 때 장시간 운전된 발전설비용 스테드 볼트가 육안 검사방법으로 이상이 없더라도 한번도 분해되지 않은 스테드 볼트는 위에 설명한 것과 같은 복합적인 경로로 인하여 준 고착상태에 있는 것으로 정비 및 평가시 주의를 요하여야 한다. 또한 스테드 볼트나 홀에서 나사산의 과도한 손상(10% 이상)시는 제작사에서 6.35mm(1/4인치)씩 확관하여 정비작업을 수행하나 10%이하 손상시에는 건전성을 평가하여 정비한다. 특히, 손상위치가 상부에 있을시에는 기울기 측정 방법을 적용하여 평가가 곤란하며, 응력집중부의 응력확대로 인하여 확관에 의한 정비작업이 고려되어야 한다.

발전설비용 고온 스테드 볼트의 경우 경도치와 기울기 측정에 의한 볼트의 교체기준을 비교할 때 일반적으로 너무 한쪽의 평가방법에 의존하여 평가되는 경향이 크게 나타나며 현재로서는 전반적으로 기울기에 의한 교체기준의 적용은 큰 의미가 없는 상태이다. 따라서 고온부에 사용되는 스테드 볼트의 기울기측정에 의한 교체기준은 열화상태의 판정기준에 비교하여 기울기에 대한 허용치가 재 정립 되어져야 한다. 또한, 기울기 측정에 의한 교체기준의 평가는 양 제작사 적용방법이 유사하나 실제 볼트형상에 따른 기울기에 대한 허용값에 있어서 차이를 나타내므로 동일형상으로 간주하여 교체기준을 적용하는 것은 현장의 안전성을 고려하여 작은 허용값을 기준과 비교하여 평가하여야 한다. 앞에서 기울기 측정에 대한 정비전·후의 평균값이 0.734 mm, 0.33 mm로서 양 제작사 기준중 허용값이 적은 Table 4 (b)의 B method의 허용값(1,216 mm)보다 작으므로 기울기 측정에 의한 교체기준에는 문제가 되지 않는다.

5. 결 론

발전설비용 고온 스테드 볼트에 대한 종래의 교체 기준인 과도손상에 대한 육안검사, 경년열화 판정을 위한 경도 측정과 접촉면적의 감소를 위한 기울기 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 육안검사에 의해 10%이하의 암나사 산 손상에 도 기울기 측정으로 볼트를 교체하고 있으나, 손상부가 상부에 있을 때에는 응력집중(critical stress)부의 응력이 가중되므로 기울기 측정방법을 적용하여 평가하는 것은 의미가 없으며, 외경을 확관하여 정비하는 것이 효과적이다.
- 2) 18년 이상 운전된 볼트는 기울기 측정값으로 는 허용기준값의 절반에도(44.5 %) 도달하지 않은 상태지만, 거의 모든 볼트가 경도상으로 열화된 상태로서 경도값만으로도 교체기준으로 판정할 수 있다.
- 3) 스테드 볼트의 경도 및 기울기 측정 방법에 의한 교체 기준 중 어느 한 방법만을 고려하였을 경우 편향적으로 교체기준이 결정되므로 두 가지 이상의 방법을 동시에 적용하여 평가 교체기준을 적용하는 것이 바람직하다.
- 4) 발전설비용 고온 스테드 볼트의 교체기준에 대한 기울기측정 허용값이 제작사별로 서로 다르게 설정되어 있어 현장적용시 설비안전을 고려하여 작은 쪽의 허용값을 적용하여야 한다.

참 고 문 헌

- 1) "Bolted Joint Maintenance & Applications Guide" TR-104213, EPRI, pp10-13, 1996.
- 2) 정남용, 김문영, 김중우, "발전용 가스터빈 고온부의 탄·소성 J 적분의 파괴인성 평가", 대한기계학회논문집 A권 제23권 10호, pp. 1837-1844, 1999.
- 3) "Current Topic in the Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping," ASME,

- 1997.
- 4) "Analysis of Bolted Joints," ASME, pp. 1-133, 1998.
- 5) "Analysis of Bolted Joints," ASME, pp.1-169, 1999.
- 6) 김문영, 김상민, "볼트정비Ⅱ", 한전기공주식회사, pp. 165-199, 1999.
- 7) "高温スタッドボルトのメネズ点検について", Hitachi LTD Engineer Sheet, ES NO .TAA-93-001, 1993.
- 8) Toshimichi Fukuoka, Tomohire Takaki, "Mechanical Behavior of Bolted Joint in Various Clamping Configuration", PVP-VOL.354, Current Topics in the design and Analysis of Pressure Vessels and Piping ASME, pp. 195-202, 1997.
- 9) 류승우, 김호진, 박종진, 강용호, "장기 사용된 스테드 볼트의 진단법 및 재질특성 평가", 대한기계학회, 추계학술대회논문집 A, pp.190-195, 1998.
- 10) "Steel Bolt Material", ASTM, pp. 185-793, 1993.
- 11) Harold, A. Rothbart, "Mechanical Design & Systems Handbook", pp. 17-23, 1992.
- 12) John H Bickford, "An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joint", Third Edition, Reverse and Expanded, pp. 66-69, 1999.
- 13) "Thread Wobble Measurement 600930", PGBU Process Specification Rev 4, Westinghouse, 1993.