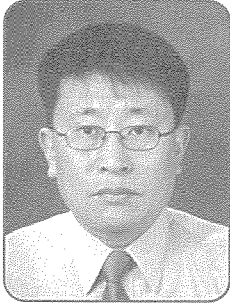


ASME Code 규정을 따르는 압력용기 스테드 암나사산의 유한요소해석에 의한 건전성 평가



한전기공(주)
G/T 정비센터 기술팀
공학박사 김문영
Tel : 032-580-8255

1. 서론

현재 세계적인 추세에 비추어 볼 때, 원자력 발전소는 신규 발전설비의 건설보다는 수명평가를 통하여 설비수명을 연장하여 사용하는 사례가 많이 늘고 있다. 국내의 고리 원자력 발전소 1호기의 경우 2주기로 운전되고 있는 좋은 예이다. 원자력발전소는 기력이 나 열병합발전소 보다는 많은 위험요소를 지니고 있으며 제작과 정비규정이 까다롭게 규정되어져 있다. 이와 같이 까다로운 규정 속에서 사용되어지고 있는 스테드 볼트의 손상상태와 건전성평가를 위하여 원자력설비 중에서 압력용기로 사용되어지고 있는 증기발생기(steam generator)의 맨-웨이 커버(man-way cover) 스테드 볼트를 연구대상으로 선택하였다. 장기간 운전된 증기발생기는 사전에 설비진단을 통하여 안전성이 확보되어야 하는 설비이다.

증기발생기는 원자로 냉각재 계통으로부터 터빈 발전기 구동을 위하여 포화증기를 발생시키는 원자력 발전소의 특수한 부분으로 원자로 냉각재 계통과 2차 계통과의 경계부분이 된다. 이러한 증기발생기는 장기간 사용하였을 경우, 원자력의 수명에 따라 1, 2차 계통으로 구분하는 콘덴서 튜브(condenser tube)의 관막음(plugging) 비율에 따라 교체하여 발전설비의 수명을 연장하여 사용한다. 콘덴서 튜브 검사를 위하여 맨 웨이 덮개 스테드 볼트는 장기간 운전에 따른 잦은 분해 조립과정으로 인하여 나사산의 손상과 재질

인성의 저하로 사용할 수 없게 되므로 스테드 볼트의 건전성을 평가하여 정비 수행 후 사용하여야 한다. 그러나 원자력의 경우에는 스테드 볼트의 체결력은 사용재질의 항복강도로 관리하도록 되어있어 암나사산 손상에 대한 평가기준을 현장에 직접 사용할 수 없으며, ASME Code상에도 이러한 사항들이 충분히 고려되어 있지 않다^(1, 2). 건전성 평가는 웨스팅하우스, 히다찌 등의 제작사들이 제안한 기준들을 사용하고 있으며^(3, 4), 미국의 경우에는 볼트의 중요성을 인식하여 98년 이후에는 볼트 체결 부분의 해석(analysis of bolted joints) 분과로 나누어 운영하고 있으며⁽⁵⁻⁷⁾, 볼트 체결부의 거동에 대한 논문은 다수 발표되고 있으나^(8, 9), 나사산의 손상에 따른 응력강도를 ASME Code에 따라 검토한 논문은 거의 전무한 상태이다.

본 논문에서는 현장에서는 적용되고 있는 육안검사, 나사산 마모량 검사, 기울기 측정 및 암나사산의 10% 손상 등과 같은 다양한 검사 방법중 ASME Code 기준의 현장 적용을 위하여 원자력 발전소 증기발생기 맨 웨이 덮개 스테드 볼트의 형상을 모델링하여 10% 스테드 암나사산 손상에 대한 해석을 수행하여 사용재질의 2/3항복강도와 비교·검토하여 건전성을 평가하였으며, ASME Code에 규정하고 있는 헬리컬 코일(helical-coil) 정비법의 안전성을 해석상으로 확인하였다.

2. ASME Code 적용절차 및 기준

ISO(international standard organization) 기준에 따라 스테드 볼트 체결부를 모델링 하였다. Fig. 1은 해석에 적용된 절차를 나타내고 있으며, 필요한 재료의 물성치, 평가기준 및 절차는 Table 1과 같이 ASME Code 규정에 따라 수행하였다. 내용 중에서 스테드 암·수나사산 평가절차 및 기준이 명확하게 규정되어 있지 않은 부분은 기술자의 경험과 관련 전문가의 권고를 참고하여 해석평가를 수행하였다.

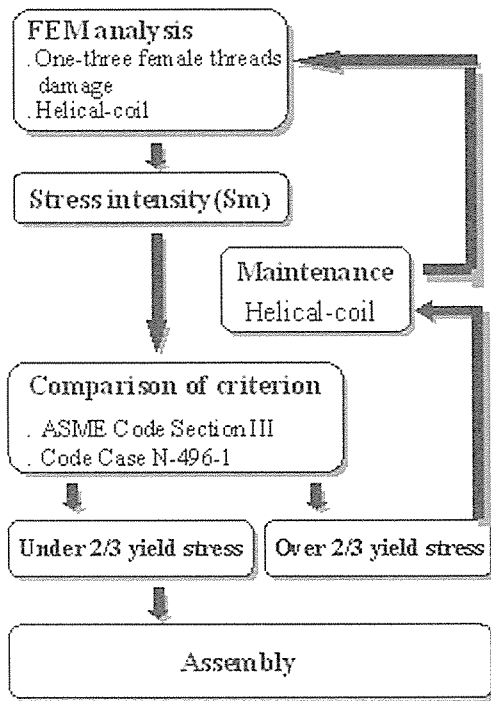


Fig. 1 Evaluation procedure and criterion according to ASME Code

Table 1. Application procedure, analysis criteria and evaluation

Items	Procedure and criterion
Properties of material	ASME Code Section II part A, D
Analysis & evaluation	ASME Code Section VIII AD-160 ASME Code Section VIII Division II Appendix 4
Maintenance	ASME B & PV Code Section XI, Paragraph IWA-4450 ASME B & PV Code Case N-496-1

3. 유한요소해석

3.1 해석기본이론

3루프 형식(loop type)의 원자력 발전설비는 3개의 증기발생기를 가지고 있다. Fig. 2는 증기발생기의 외형으로 내부 검사용 맨 웨이(man-way)는 원자로 계통인 1차측(hot leg)과 원자로 냉각재 계통(reactor coolant system, RCS)인 2차측(cold leg)에 각 1개씩 2개가 있어 총 6개가 있다. 운전 중에는 ASTM 재질 SA 193 B7, 규격 1.875"-8UN-2B로 제작된 16개의 스티드 볼트로 덮개의 기밀을 유지하고 있다.

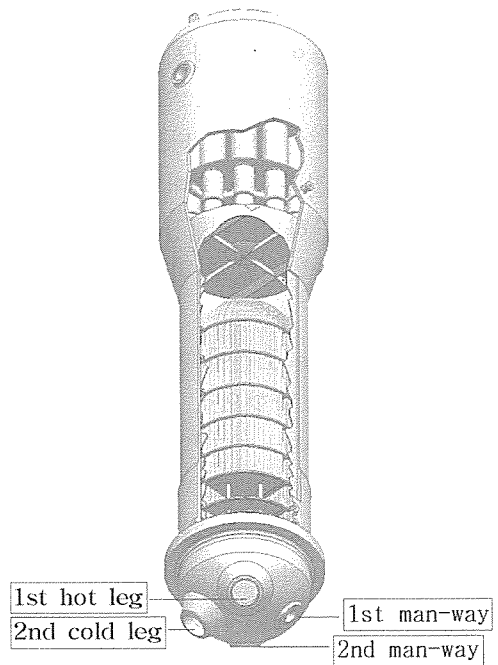


Fig. 2 The outline for steam generator

Table 2는 해석에 이용된 증기발생기의 제원 및 사양에 대한 것이다.

Table 2. Manufacturing specifications and dimensions for steam generator man-way

Items	Specifications
Model	Westinghouse "F"
Number of man-way	6(2 per S/G)
Load pressure	964 lb/in ²
Design pressure	1,200 lb/in ²
Inlet temp for coolant	619.9 °F
Outlet temp for coolant	555.6 °F
1st design pressure	2485 lb/in ²
2nd design pressure	1185 lb/in ²
1st design temperature	650 °F
2nd design temperature	600 °F

스티드 암나사산의 손상해석을 6가지로 나누어 수행하였다. 1번째로 손상되지 않은 정상상태의 암나사산 응력강도에 대하여 해석하였으며, 2번째는 제작사에서 권고하는 10% 범위의 손상으로 총 28개의 암나사산중에서 3개까지 암나사산을 인위적으로 제거하면서 2번째~4번째 해석을 수행하였다. 암나사산의 손상위치로는 응력집중부를 제외한 볼트 체결력에 크게 영향을 줄 수 있는 상부의 10% 아래 부분에서부터

시작하여 암나사산을 단계적으로 제거한 후 해석하였다. 암나사산의 10% 이상 손상시^(10, 11)는 정비하여 사용한다고 제작사에서 규정하고 있으나, ASME Code 조건을 받는 원자력 설비의 스테드 볼트는 2/3 항복강도 범위내에서 체결하도록 되어있어 직접 적용하여 건전성 평가가 곤란하며, 이 결과에 따라 ASME Code에서 정한 헬리컬 코일 정비법의 안전성 확보가 사전에 요구되어진다.

따라서 ASME Code 조건에 따른 평가기준을 위하여, 스테드 볼트의 축 방향으로 1번째 나사산의 골지름(root diameter)으로부터 마지막 28번째 나사산 골지름 외경들을 연결한 선상의 최대전단응력강도를 그래프로 작성하여 ASME Code에서 규정하는 2/3항복강도(σ_y) 범위내에 있는지를 비교·평가하였다. 해석에는 범용으로 사용되고 있는 ANSYS 5.7을 사용하였으며, 식(1)과 같은 Tresca 최대전단응력설(maximum shear stress : S_m)의 응력강도식이 적용되었다.

$$S_m = \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \text{---- (1)}$$

S_m : stress intensity

$\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3$: principal stresses for x, y, z direction

식(2)은 압력으로 인해 1개의 볼트에 작용하는 작용력(138.7715[kN])이고, 식(3)과 식(4)은 스테드 볼트에 작용하는 체결력(301.374[kN])⁽¹²⁾과 전체 시스템에 작용하는 열팽창 변형률을 나타낸 것이다. 여기서 증기발생기 1차측 설계온도 650°F (343.3°C)와 실내온도(30°C)의 재료 물성치를 이용하였으며, 각 재료의 선팽창계수 α 는 ASME Code 규정의 값을 적용하였다.

$$F_{Pr} = P/16A \text{ [kN]} \text{----- (2)}$$

A : man-way internal area [mm²]

P : man-way internal pressure [kg/mm²]

$$F_{Pr} = T \times 1000 / (K \times D) \text{ [kN]} \text{----- (3)}$$

T : torque [N-m]

K : friction factor for bearing area = 0.17

(Felpro-N-5000 = 0.15-0.17)

D : bolt effective diameter [mm]

$$\epsilon = \alpha * (T - T_{ref}) \text{----- (4)}$$

T : design temperature [°C]

Tref : room temperature) [°C]

α : coefficient of liner expansion

3.2 기본모델

Fig. 3은 증기발생기 덮개 볼트의 2차원 모델의 형상을 나타내고 있다. 해석의 편리성과 구조형상의 특수성을 감안하여 축 대칭 2차원 모델링으로 해석하여 보다 더 정확한 결과와 시간절약을 기대할 수 있었다.

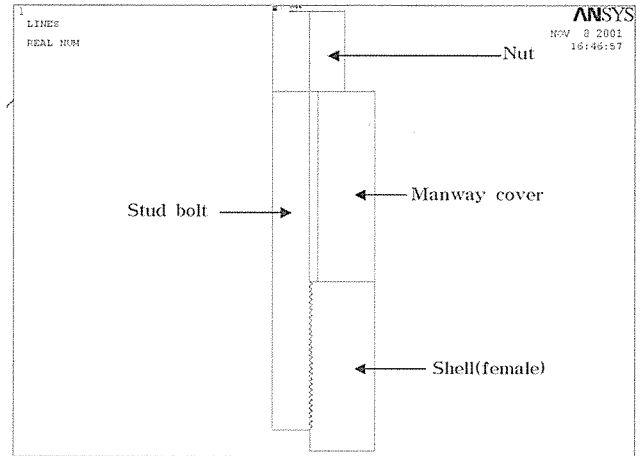


Fig. 3 Two dimension model

3.3 스테드 체결부의 유한요소모델

Fig. 4와 5는 정상상태의 스테드 암·수나사산과 헬리컬 코일 정비 후의 유한요소모델을 나타낸 것이다. 암·수나사산의 접촉부 인식을 현장상태와 유사하게 하기 위하여 면대면 접촉요소인 target 169, contact 171번을 사용하여 접촉부를 처리하였다.

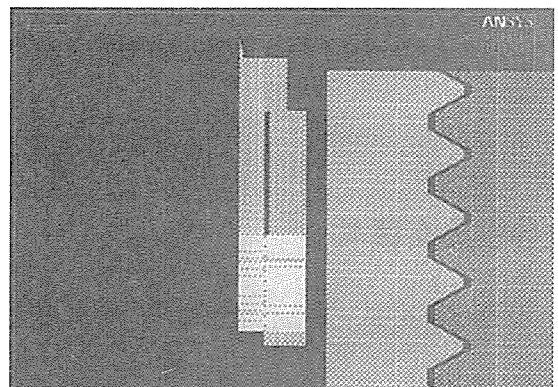


Fig. 4 FEM model for no damaged stud bolt

암나사산의 단계적 손상 해석결과는 Fig. 8~10에서 볼 수 있다. 손상되지 않은 스테드 볼트의 해석에 사용된 유한요소수는 총 8,964개로 4각형 4절점(4-node structural solid) 맵 요소망(map mesh)으로 요소를 분할하였다. 메쉬의 크기는 암·수나사산부가 있는

부근을 점차적으로 작게 하여 해석의 정밀도를 높이고자 하였다.

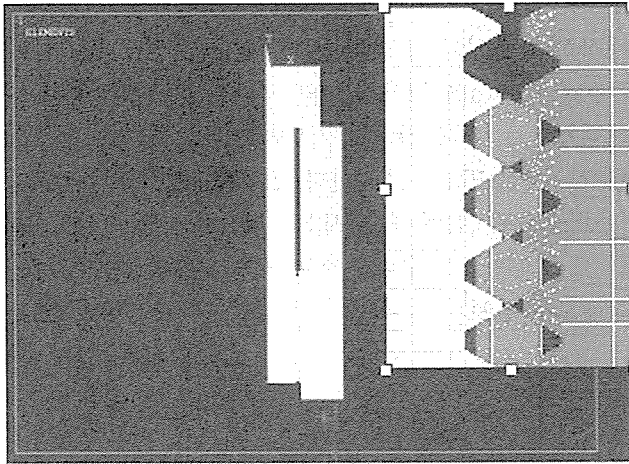


Fig. 5 FEM model in case of maintenance using helical-coil

3.4 하중 및 경계조건의 설정

Fig. 6은 하중 및 경계조건을 나타낸 것이다. 프로그램 해석에는 우선적으로 해석모델의 경계 조건을 고려하여 위 3.1절에서 계산된 하중의 이론방정식을 단계적으로 적용하였다.

경계조건으로는 스팀드 볼트의 반 대칭면에 대해 X방향의 이동이 없는 $U_x=0$, 압력용기(shell) 하부에서는 Y방향의 이동이 없는 $U_y=0$ 을 경계조건으로 설정하였다.

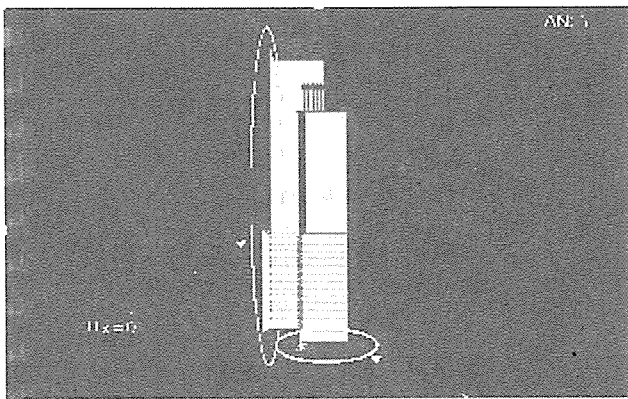


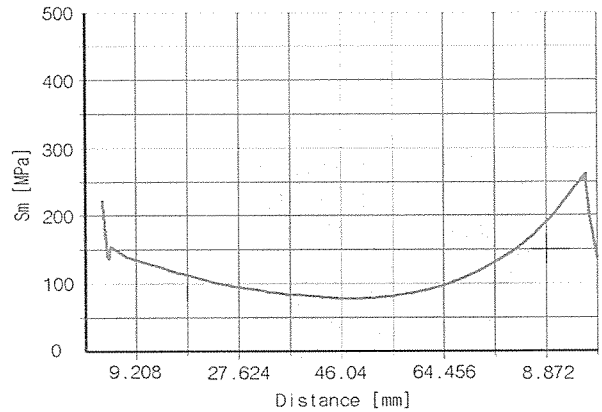
Fig. 6 Load and boundary conditions

단계적으로 1개의 볼트에 걸리는 축 방향의 하중을 계산하여 적용하였다. 체결 토크는 너트의 상부 절점(node)에 작용시키었고, 압력용기 내부압력은 맨 웨이 뒷개 상부 절점에 작용시켜 해석하였다. 마지막으로 시스템 전체에 균일하게 열변형 하중이 걸리도록

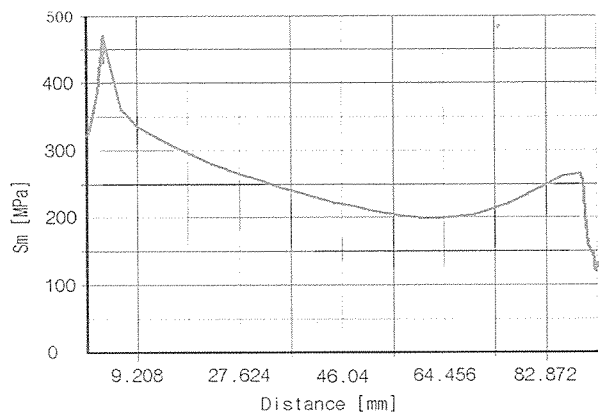
하였다.

3.5 응력해석

위의 3.2절의 유한요소모델을 해석하여 Fig. 7~12의 결과를 얻었다. 이중 Fig. 8, 11은 응력강도 분포 윤곽선(contour for stress intensity)을 포함하며, 좌·우측은 각각 전체 형상에 대한 응력강도와 나사부만의 응력강도분포의 윤곽선을 나타내고 있다.



(a) female threads



(b) male threads

Fig. 7 Stress intensity distribution for normal condition

상·하 그래프에서 세로축은 각 나사산의 최대응력강도(S_m)를 가로축은 암·수나사산의 1번째 나사산에서 부터 마지막 28번째 각 암·수나사산의 골지름 외경을 연결한 거리(mm)로서 1피치(pitch)거리는 3.175mm이다. 각 나사산 선택지점의 응력값은 일반적으로 최대응력강도를 나타내고 있으나, 그래프상의 최대응력강도 지점과는 약간의 차이가 있을 수 있다. 두 그래프 중에서 상부에 것은 암나사산의 응력강도 값을 나타내며, 아래 그래프는 수나사산의 응력강도

값을 나타내고 있다.

Fig. 7은 손상되지 않은 스테드 암·수나사산의 해석으로 하중, 압력과 열응력을 작용시켜 해석한 결과이다. 해석결과는 타 논문에서 발표된 것 같이 1, 2번째 나사산에 최대응력강도를 나타내고 있으며^(9, 13), 전체 나사산중에서 최대응력강도는 476MPa이고, 최소응력강도는 0.026MPa, 볼트의 신장량은 1.643mm이다. 나사산 끝 부분에서 응력강도의 상승은 열팽창으로 인하여 두 나사산의 구속으로 발생한 것이다.

Fig. 8은 1개의 암나사산이 손상된 상태의 해석결과로서 최소응력강도와 신장량은 정상상태와 동일하나, 최대응력강도가 478MPa로서 약간 증가하였다.

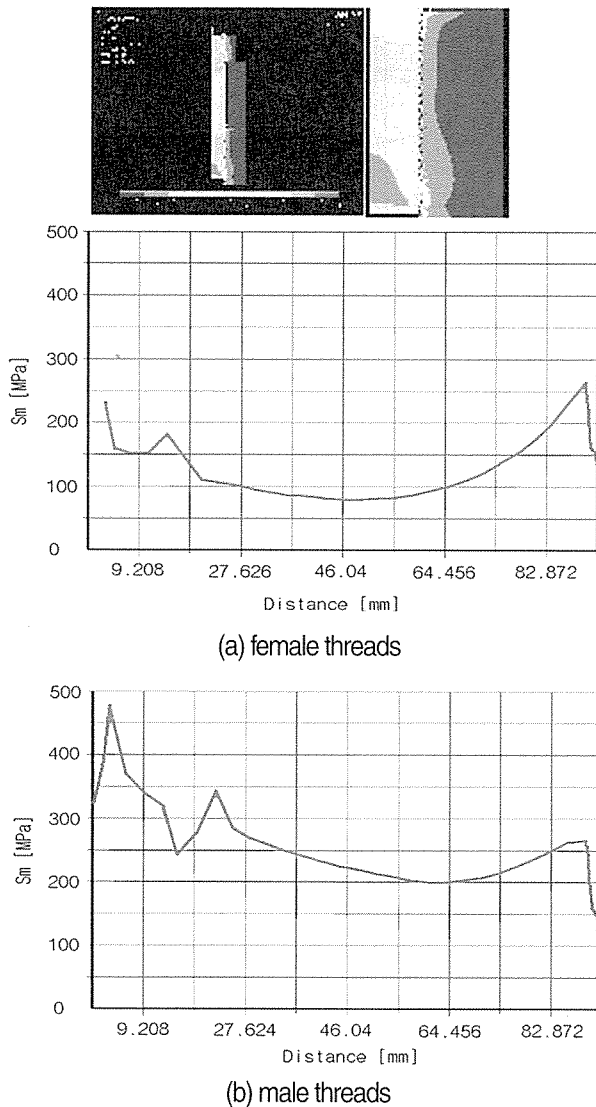


Fig. 8 Stress intensity contour and distribution in case of damaged one female thread

Fig. 9는 2개의 암 나사산이 손상된 상태의 해석 결

과를 보여주고 있으며, 최대응력강도는 482MPa로 볼트 재질의 2/3항복강도(483MPa, SA 193 B7 항복강도 : 724MPa)에 거의 도달하였으며, 볼트의 신장량은 정상상태의 것과 동일한 상태이다.

Fig. 10은 10%(3산/28개의 암나사산) 범위의 손상 해석결과로 최대항복강도가 485MPa로서 최대허용응력강도 483MPa를 초과한다. 또한 정상상태의 2번째(응력집중부 : 1,2번째 나사산) 나사산의 응력강도만큼 도달되며, 암·수나사산의 구속의 연속성이 끊기는 상태로서 볼트의 신장이 추가로 일어나기 시작한다.

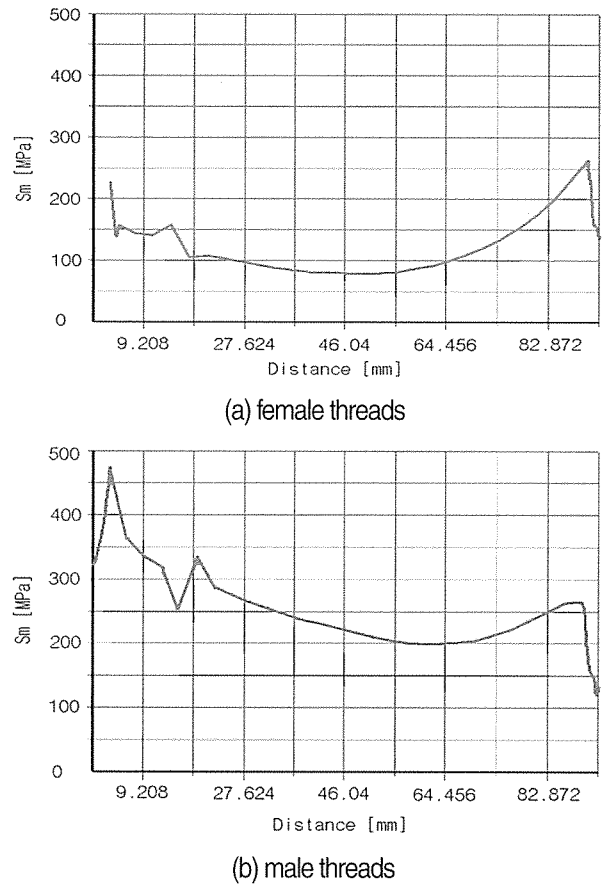
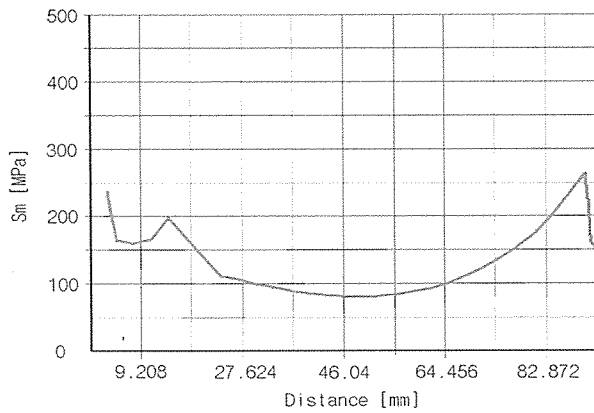


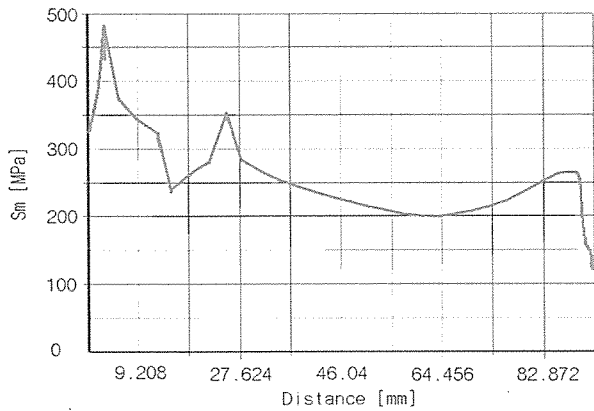
Fig. 9 Stress intensity distribution in case of damaged two female threads

Fig. 11은 헬리컬 코일로 정비한 상태의 해석결과를 보여주고 있다. 그 최대응력강도는 448MPa로서 암나사산이 손상되지 않은 경우에 비교하여 최대응력강도가 28MPa 감소하였다. 암·수나사산의 경사도가 정상 상태보다 훨씬 더 완만하게 응력강도가 변화한다. 이와 같이 동일 체결 토오크 적용하였을 때 전체적으로 완만한 응력강도 변화에도 불구하고 신장량은 0.22mm 감소된 1.423mm이다.

마지막으로 Fig. 12는 Fig. 11에서와 같이 암·수나사산의 결과가 아니고, 1번째부터 마지막까지 헬리컬 코일 내부의 최대응력강도 분포이다. 전체의 응력강도는 두 나사사산 사이의 체결 면적의 증가로 감소하였으며, 이전의 해석과 비교하여 완만한 기울기의 응력강도 분포를 나타내고 있다. 또한 열변형으로 하단부의 응력강도가 다소 증가한 형태를 나타내고 있다. 헬리컬 코일 정비 후 최대응력집중부인 상부의 1, 2번째 나사사산에서부터 마지막 나사사산까지 전체적으로 감소되었다. 따라서 헬리컬 코일로 정비하였을 경우 단독 체결력은 기존 것 보다 안정적이다.

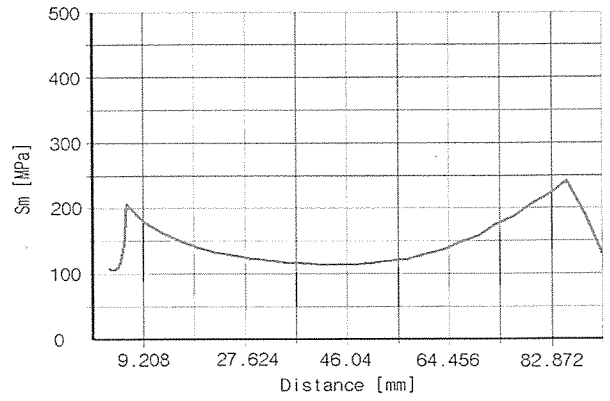
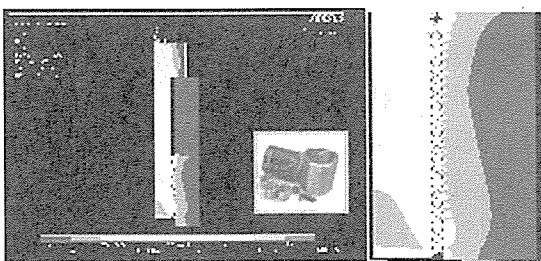


(a) female threads

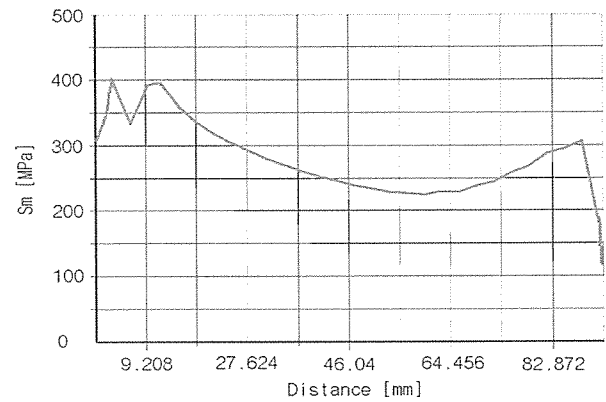


(b) male threads

Fig. 10 Stress intensity distribution in case of damaged three female threads



(a) female threads



(b) male threads

Fig. 11 Stress intensity distribution for model after helical-coil repair

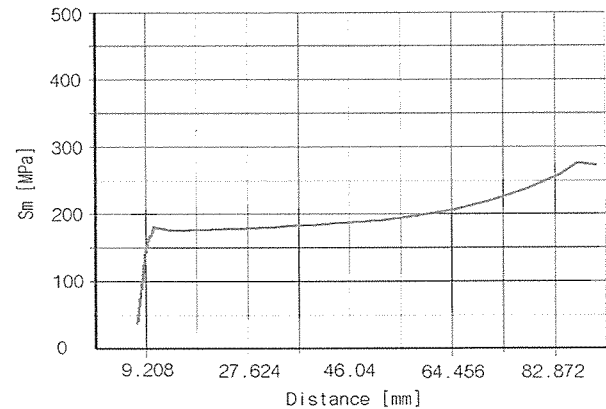


Fig. 12 Stress intensity distribution of internal for itself after helical-coil repair

4. 해석결과 및 고찰

ASME Code VIII에 따라 수직응력(normal stress)의 평가방법이 상당히 보수적이므로 좀더 근접한 해석수

행을 위하여 최대전단응력설에 따른 응력강도값을 2/3 항복강도와 비교·평가하였다. 또한 해석평가에 있어서 ASME Code에 주어진 기준과 조건이 거의 볼트에 대한 사항으로서 가장 취약한 해석평가의 결과 값으로는 ANSYS 프로그램에서 응력강도(stress intensity)의 값을 계산하여 암나사를 비교·평가하였다.

Fig. 12는 Table 3의 각 경우의 최대응력강도 값을 그래프로 나타낸 것이다. 가로축은 헬리컬 코일, 정상 상태, 암나사산이 1, 2, 3개의 순으로 손상된 상태의 최대응력강도 값으로 제작사 규정(10%이상 암나사산 손상)과 같이 3개의 암나사산 손상에서부터 최대허용 응력강도 값을 초과하기 시작한다.

Table 3. Maximum stress intensity and bolt elongation of each items

Stress and elongation			Max. stress intensity [MPa]	Bolt elongation [mm]
Female thread		Fig.		
No.	Condition	Fig.		
1	Helical-coil	11	448	1,423
2	Normal	7	476	1,643
3	Damage_1	8	478	1,643
4	Damage_2	9	482	1,643
5	Damage_3	10	485	1,644
Max. allowable stress intensity			483	-

Table 3은 각 경우의 최대응력강도를 비교한 것으로, Fig. 10에서 부터 체결력에 따른 볼트 신장량이 균일하지 않고 손상된 부분에서 추가 신장이 일어나기 시작한다. 이때부터 일부 스테드 볼트가 국부응력을 받게되므로 재질이 먼저 취약해진다. 따라서 최대 응력강도가 최대허용응력강도를 초과하는 상태로 암나사의 정비를 고려하여야 한다.

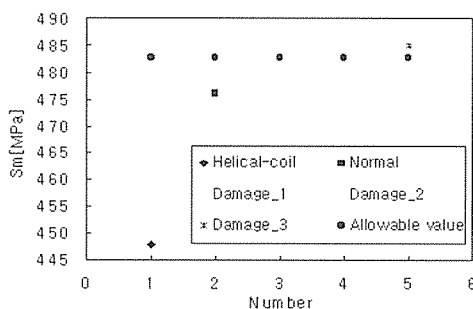


Fig. 13 Comparison of maximum stress intensity for Table 3 in case of damaged female threads and helical-coil repair

Fig. 12는 각 나사산 사이의 헬리컬 코일내의 응력강도 값으로 180MPa~275MPa 범위에 있으며, 전체적으로 응력강도 그래프의 경사도가 작아지고 안정된 상태로서 스테드 암·수나사부에 체결하중이 상대적으로 작게 된다. 헬리컬 코일 정비후의 스테드 볼트 신장량은 1.423mm이고, 나머지 스테드 볼트의 신장량은 1.643~1.644mm로서 약 0.22mm 작게되므로, 한 그룹에 복합적으로 이러한 방법이 적용되어 정비하였을 경우, 동일조건인 체결방법을 적용하여 체결하여도 균일하게 체결될 확률이 낮으며, 체결 후 응력 이완의 정도에도 차이가 나타나 장기적으로 정확한 체결 유지가 어렵다.

5. 결론

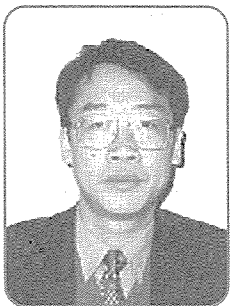
유한요소해석에 의한 ASME Code 적용 압력용기 스테드 암나사산의 건전성 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정상상태의 스테드 볼트의 체결력 응력강도 분포는 1~2번째 나사산에서 최대를 나타내고 있으며, 암나사부는 열응력에 의하여 마지막 부분의 응력강도의 증가를 보이고 있다.
- 2) 10% 암나사산 손상해석에서는 체결력이 ASME Code 조건에서와 같이 해당 사용재질의 2/3항복강도 이상이므로 암나사산을 정비하여 사용하는 것이 바람직하다.
- 3) 해석의 결과에 따라 ASME B & PV Code Section XI, Paragraph IWA-4450와 ASME B & PV Code Case N-496-1에 따라 헬리컬 코일로 정비한 경우 응력집중 부위의 최대응력강도 값이 정상상태보다 낮으며, 응력의 변화가 전체적으로 완만하므로 타 정비방법에 비교하여 균일한 신장량과 체결하중을 받는다.
- 4) 한 그룹에 2가지 정비방법(정상, 헬리컬 코일)을 적용하여 정비할 경우, 동일 체결 조건에서도 스테드 볼트의 신장량 차이로 인하여 균일하게 체결되지 않을 확률이 높으며, 어느 한 부분에 응력이 집중되어 재질이 쉽게 손상된다.

참고문헌

- 1) 1988, "ASME Code Section II," Part A, D.
- 2) 1988, "ASME Code Section VIII," pp. 62~66.
- 3) "高温スタッド ボルトのメネジ点検について," Hitachi LTD. Engineer Sheet, 1993, ES NO. TAA-93-001.
- 4) "Thread Wobble Measurement 600930," 1993, PGBU Process Specification
- 5) Williams, D. K., 1997, "Current Topic in the Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping," ASME PVP-Vol. 354, pp. 165~253.
- 6) Hsu, K. H. and Sawa, T., 1998, "Analysis of Bolted," ASME PVP-Vol. 367, pp.1~133.
- 7) Hsu, K. H. and Sawa, T., 1998, "Analysis of Bolted," ASME PVP-Vol. 382, pp.1~169.
- 8) Zerres, H., Perez, M., Gorree, C. and Sciffet, L., 1998, "Comparison between the Analysis of the Mechanical Behavior of Bolted Joints by the Finite Elements Method and by the European Approach," ASME PVP-Vol. 367, pp. 69~73.
- 9) Fukuoka, T. and Takaki, T., 1997 "Mechanical Behavior of Bolted Joint in Various Clamping Configuration," ASME PVP-Vol. 354, pp. 195~202.
- 10) 정남용, 김문영, "장기간 사용된 고온 스테드 볼트의 암나사부 관리 방법," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, 2000, pp. 199~205.
- 11) 김문영, 정남용, 2000, "발전설비 고온부에서 사용되는 스테드 볼트의 교체기준의 설정," 한국자동차공학회 제8권 6호, pp. 279~286.
- 12) 김문영, 1998, "일반적인 볼트 토크의 적용 방법," 한전기공(주), pp. 4~7.
- 13) Fukuoka, T. and Xu, Q., 1998, "Analysis of the Tightening Process of Bolted Joint with a Bolt Heater," ASME PVP-Vol. 367, pp. 53~59.

발전기 여자시스템(Ⅱ - I) (자동전압 조정장치)



한전전력연구원
발전연구실 발전계전그룹
책임연구원 임익현
Tel : (042)865-5265

I. 발전기 여자 시스템 기술

1. 여자시스템의 종류 및 특징

여자시스템은 크게 6가지 모델로 대분류 된다.

1) 직류(DC) 여자 시스템

직류 여자 시스템은 교류 회전형 여자 시스템이나 정지형 여자 시스템으로 대체되어 현재는 거의 생산되지 않는 것이 많다. 직류 여자 시스템은 여자 전원으로써 직류 발전기를 이용하며 슬립링을 통하여 동기 발전기에 전류를 공급한다. 이러한 여자 시스템은 발전기의 축이나 다른 전동기를 이용하여 여자발전기를 구동하는데 자여자식(Self-excited)이나 타여자식(Separately Excited)으로 다시 세분화 할 수 있다. 여기서 타여자식인 경우에는 여자발전기의 여자전류를 영구자석 발전기를 갖고 있는 부 여자기(Pilot-exciter)에 의해 공급된다. 이러한 형태의 여자 시스템은 1920년부터 1960년대까지 많이 사용되었으며 초창기 가변저항을 이용하는 형태에서 자기증폭기나 앰플