SMART 원자로집합체 스터드볼트 사이즈 최적설계

*김종욱[1], 이규만[1], 김종인[1]
[1] 한국원자력연구소

Optimal Design of Stud Bolt Size for SMART Reactor Vessel Assembly

*J. W. Kim[1], G. M. Lee[1], J. I. Kim[1]
[1] Korea Atomic Energy Research Institute

Key words : Reactor vessel assembly, External thread, Internal thread

1. 서론

원자력 에너지의 평화적 활용범위를 전력생산 이외의 분야로 넓히기 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있으며 이와 관련하여 새로운 개념의 안전성과 신뢰성이 크게 향상된 중소형 신형원자로의 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 한국원자력연구소(KAERI)는 원자로 기술의 고도화 및 첨단화를 통한 원자력에너지활용의 다변화에 대비한 시장의 기술력 선점을 목표로 다목적 활용을 위한 SMART(system-integrated Modular Advanced ReacTor)를 개발하고 있다. SMART 는 기존의 분리형원자로와 달리 증기발생기, 가압기, 그리고 주냉각재펌프 등 주요기기들이 모두 단일 원자로용기(reactor pressure vessel) 내에 위치하며, 원자로덮개(reactor closure head)와 함께 원자로냉각재의 압력경계를 형성한다. 두 구조물의 연결부에 대한 압력경계는 원자로용기의 일부인 원자로용기플랜지(reactor vessel flange)와 원자로덮개의 밀봉플랜지(reactor closure head flange) 사이에 O-ring을 설치하고 스터트볼트(stud bolt)로 체결함으로써 유지된다. 이러한 체결방식은 두 가지 측면에서 매우 중요한 구조적 역할이 요구된다. 첫째는 연결자체의 구조적 건전성의 유지이며, 둘째는 스터드볼트의 체결력에 의한 압축응력을 받는 O-ring을 통한 누설방지이다. 일반적으로 원자로용기 상부에 설치되는 스터드볼트의 총갯수는 설계압력에 의한 하중을 견딜 수 있도록 배치되어야 하며, 내압에 의해 O-ring 접촉면을 통한 누설가능성은 스터드볼트의 체결력으로 충분히 배제되어야 한다. 위의 요구사항을 반영한 스터드볼트와 O-ring의 배치설계는 KEPIC MNB[1] 및 MNZ[2]의 요건에 따라 평가되어야 한다.

본 연구는 SMART 원자로집합체 원자로용기와 원자로덮개의 체결을 위한 원자로용기 플랜지 상단에 O-ring 설치 필요 공간확보와 이를 기초로 코드요건을 충족하는 적절한 스터드볼트사이즈 및 배치 공간을 계산하고자 한다.

2. 특별응력한계에 대한 응력평가

2.1 접촉면에서의 베어링응력

KEPIC MNB 3227.1에서는 D급 한계가 지정된 하중을 제외한 설계하중, 시험하중 또는 모든 운전하중들 가운데 최대하중하에서도 파손이 되지 않도록 하기 위해 평균 베어링응력은 해당온도에서의 항복강도 S_y 이하가 되도록 제한하고 있다. 따라서 Fig. 1에서 보는 바와 같이 Outer O-ring의 하중반력이 작용하는 위치의 지름 G를 변화시키면서 계산을 수행하였다. 이때 해석변수는 원자로용기의 내경과 플랜지상부 클래딩부의 전체 면적, 그리고 노심지지배럴을 위한 안내턱(ledge)의 깊이이다. 이러한 변수들을 고려하여 접촉면에서의 베어링응력을 계산하였으며, 평가결과 주어진 원자로용기 플랜지상부의 면적을 최대한 활용하는 Outer O-ring의 위치를 결정할 수 있었다.

2.2 스터드볼트의 배치

본 계산평가에 적용된 스터드볼트의 재질은 MDF A540 등급 B24 클래스3이며 KEPIC MNZ, 부록 E에 따라 위에서 잠정 결정된 O-ring 반력위치의 지름 G를 기준으로 한 설계압력에 대한 스터드볼트 사이즈별 필요한 개수를 계산하였다. Table 1은 각 스터드볼트 사이즈별 요구되는 개수를 나타낸 것이다. 비교결과 스터드볼트 사이즈가 작으면 설계압력의 하중을 견디기 위해서 상대적으로 많은 수의 스터드볼트의 체결이 필요하였다. 그러나 원자로의 유지보수 측면에서는 작업시간의 단축을 위해서 가능한 스터드볼트의 수가 적을수록 유리하다. 현재 SMART 원자로집합체의 경우 원자로덮개의 최외각 직경이 정해져 있으며 스터드볼트 설치 및 해체시의 작업 용이성과 원자로용기와의 접촉면에서의 베어링응력을 고려하여 스터드볼트 사이즈를 최적의 사이즈인 M220으로 결정하였다. Fig. 2는 원자로용기 상부에서 본 스터드볼트의 배치 나타낸 것이다.

3. 스터트볼트의 설계

3.1 External thread와 Internal thread의 설계

현재 잠정결정된 M220의 external thread와 internal thread는 ASME B1.13M에 따라 계산하였으며, 그 값은 다음과 같다.

- External thread : M220×4
  Maximum major diameter : 219.94mm
  Minimum pitch diameter : 219.465mm
  Maximum pitch diameter : 217.342mm
  Minimum pitch diameter : 217.162mm
  Maximum minor diameter : 215.61mm

- Internal thread : M220×4
  Maximum minor diameter : 216.27mm
  Minimum minor diameter : 215.67mm
  Maximum pitch diameter : 217.777mm
  Minimum pitch diameter : 217.402mm
  Minimum major diameter : 220.0mm

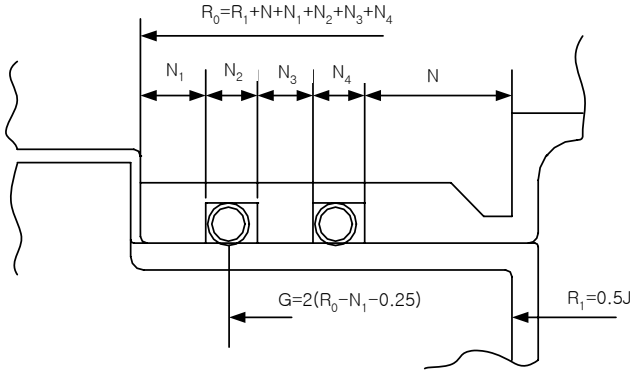

Fig. 1 Location of O-ring load reaction

Table 1 Number of the stud bolt

Stud size	M182	M200	M210	M220
No. of stud bolt	72	66	60	54

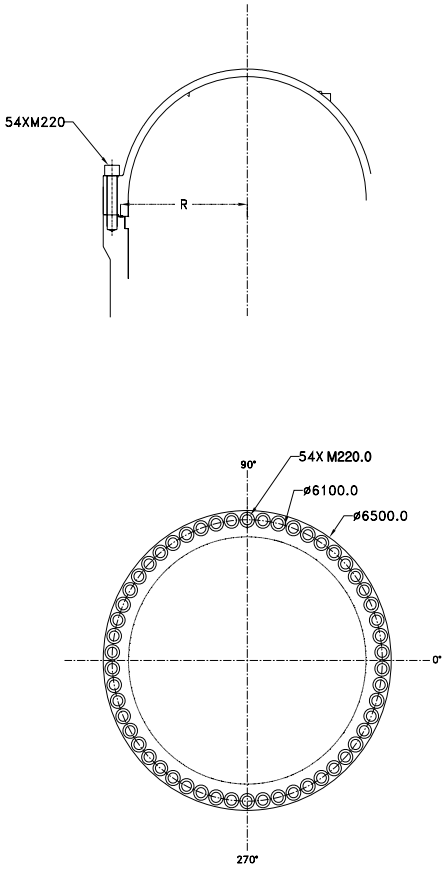

Fig. 2 Arrangement of stud bolt at the top view

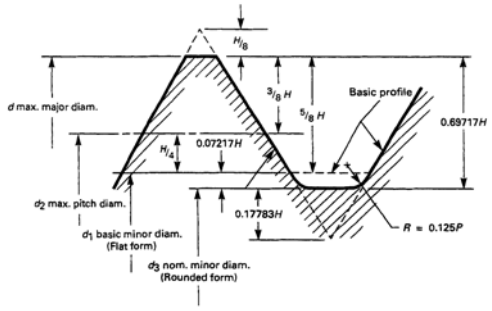

Fig. 3 External thread, design M profile with no allowance

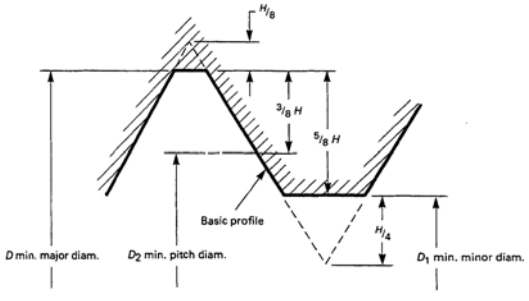

Fig. 4 Internal thread, design M profile with no allowance

3.2 나사산 전단응력

KEPIC MNB 요건은 돌출선반과 같은 자유단 근처에 베어링하중이 작용할 때 전단파손의 가능성을 고려하도록 요구하고 있으며 그 기준은 평균전단응력이 $0.6S_m$ 이하가 되어야 한다고 명시하고 있다. 따라서 스터드볼트와 너트 및 스터드볼트와 원자로용기 사이의 나사산 전단응력을 KEPIC MNB 3227.1의 요건에 따라 다음 식을 이용하여 만족여부를 평가하였다.

A_s = External thread shear area,

$$= \pi N L_e K_{nmax}\left[\frac{1}{2N}+0.57735\left(E_{smin}-K_{nmax}\right)\right]$$

A_n = Internal thread shear area,

$$= \pi N L_e D_{smin}\left[\frac{1}{2N}+0.57735\left(D_{smin}-E_{nmax}\right)\right]$$

N = Number of threads per inch
L_e = Length of engagement
$E_{s\min}$ = Min. pitch dia. of external thread
$D_{s\min}$ = Min. major dia. of external thread
$K_{n\max}$ = Max. Minor dia. of internal thread
$E_{n\max}$ = Max. pitch dia. of internal thread

평가결과, 본 연구에서 설계한 스터드볼트 M220×4의 경우 스터드볼트와 너트의 전단응력이 $0.6S_m$에 비해 약 42%의 여유도를 가지며, 스터드볼트와 원자로용기의 경우 약 50%의 여유도를 가지는 것으로 확인되었다.

3.3 설계조건 평가

위 일련의 계산과정을 통하여 결정된 두 O-ring 위치 및 설계압력에 대한 최소요구볼트하중을 계산하여 필요한 면적과 본 해석평가를 통해 결정된 스터드볼트 M220×4를 이용한 가능면적을 비교하여 스터드볼트의 구조적 건전성을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 SMART 원자로집합체의 일부이며 압력경계를 형성하는 원자로용기와 원자로덮개의 체결시 원자로냉각재 누설방지 및 구조적 건전성의 유지를 위해 KEPIC MNB 및 MNZ 요건에 따라 O-ring의 설치위치 및 스터드볼트의 사이즈를 결정하였다. 최적의 스터드볼트 사이즈를 결정하기 위해 원자로용기의 내경과 플랜지상부 클래딩부의 전체 면적, 그리고 노심지지배럴을 위한 안내턱의 깊이 등을 고려하였다.

계산결과 주어진 원자로용기 플랜지상부의 면적을 최대한 활용하는 O-ring의 위치를 결정할 수 있었으며 스터드볼트의 사이즈를 M220×4로 결정할 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. KEPIC MNB, 1등급 기기, 2005년판, 대한전기협회.
2. KEPIC MNZ 부록 E, “최소볼트단면적,” 2005년판, 대한전기협회.
3. ASME B1.13M, “Metric Screw Threads; M Profile,” The American Society of Mechanical Engineers, 2001.
4. KEPIC MDP, 허용응력, 2005년판, 대한전기협회.