



# 핵융합용 토카막의 진공용기 내진해석

안 희 재\* 이 용 옥\*\* 김 윤 춘\*\*\* 도 철 진\*\*\*\*

## 1. 서 론

고도화된 산업사회와 21세기의 첨단 정보사회에서 많이 사용되는 전기의 수요가 급증하는 추세에 있으므로, 전력을 안정적으로 공급하고 기술적·경제적 특성을 살린 최적의 에너지를 확보하는 것이 에너지 정책의 주요 과제가 되고 있다. 또한, 최근 환경문제가 전 세계적인 문제로 떠오르면서 모든 생명체에 에너지를 공급하는 태양의 에너지 발생 원리인 핵융합 반응이 새로운 대체 에너지원으로 주목받고 있다.

핵융합에너지는 아직까지 실험단계에 있지만, 우리나라에서 그림 1과 같은 세계적 수준의 핵융합 연구를 수행할 수 있는 초전도 토카막 핵융합장치 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)를 한국기초과학지원연구원을 중심으로 산학연 공동으로 개발하고 있다.

현대중공업에서는 KSTAR 토카막의 진공용기, 저온용기 및 초전도자석 구조물 등의 주요 구조물의 공학설계를 수행하고 있으며, 본고에서는 토카막의 주장치인 진공용기에 대한 지진하중 산정, 내진성능 향상 및 구

조안전성 평가를 목적으로 응답 스펙트럼해석 및 등가 정적해석을 통한 내진해석의 결과를 정리하였다.

## 2. 핵융합용 토카막

### 2.1 핵융합이란?

핵융합 반응은 우라늄과 같은 무거운 원자핵이 외부의 중성자와 충돌하여 두 개 이상으로 쪼개지는

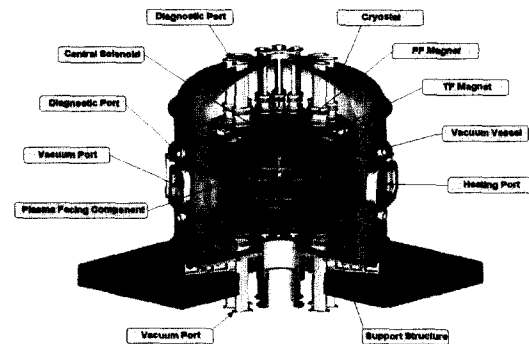


그림 1 KSTAR 토카막의 개념도

\* 현대중공업 산업기술연구소, 책임연구원  
\*\* 현대중공업 산업기술연구소, 연구원  
\*\*\* 현대중공업 플랜트사업본부, 부장  
\*\*\*\* 한국기초과학연구원, 책임기술원

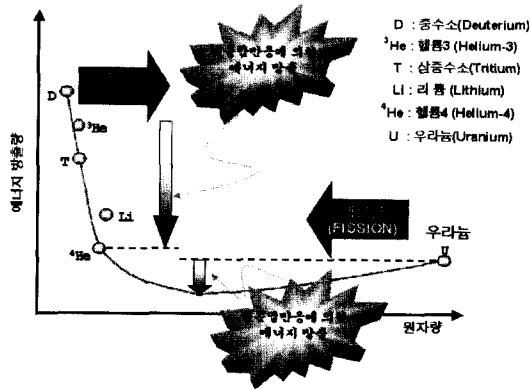


그림 2 핵융합과 핵분열 에너지 방출량 비교

핵분열 반응과 상반되는 물리현상으로 수소와 같이 가벼운 원소들의 원자핵을 초고온 플라즈마 상태에서 결합하여 헬륨과 같이 좀더 무거운 원소의 원자핵을 형성하는 과정에서 발생하는 질량결손으로 인한 엄청난 양의 에너지 방출을 동반한다. 핵융합과 핵분열에 의한 에너지 방출량은 그림 2에 나타난 것과 같이 핵융합에 의한 에너지가 핵분열의 경우보다 매우 크며, 이를 이용하기 위하여 연쇄적으로 핵융합 반응을 일으켜 폭발에 이르게 하는 것이 잘 알려진 수소폭탄이고, 이를 제어된 방법에 의해 발전에 응용하려는 것이 핵융합 에너지 개발의 목표이다.

핵융합에너지는 화석에너지의 고갈, 폐기물의 환경 파괴 및 대형 방사능 유출사고와 같은 문제를 해결해 주는 환경 친화적이고 안전하면서도 다른 대체 에너지원과는 달리 고밀도·대용량의 무한한 에너지 개발가능성을 가지고 있어 가장 경제적인 미래의 에너지로 불리고 있다.

## 2.2 토카막 (Tokamak)

핵융합 반응의 환경인 플라즈마는 고체, 액체, 기체와는 달리 분자나 원자의 대부분이 전자, 이온이나 원자핵으로 쪼개져서 활발하게 날아다니고 있는 제4의 물질상태이다. 이는 높은 온도로 기체를 가열하여 원자핵으로부터 전자가 완전히 분리돼 이온화된 상태로 가만히 두면 고온의 플라즈마는 마구 날아가서 매우 불안정하므로 자장 또는 관성 등으로 밀폐하여야 한다. 특히, 가장 발달된 폐쇄용기인 토카막은 도넛 모양의 용기를 둘러싼

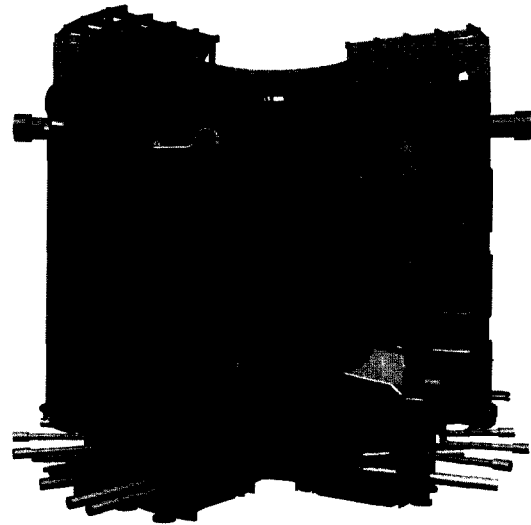


그림 3 ITER 장치의 개념도

코일에 전기를 흘려 발생하는 자장을 이용해서 플라즈마를 밀폐, 조정, 가열하는 장치이며, 이는 사하로프 박사 등의 러시아 학자의 발상에서 비롯된 것이다. 1960년대 후반부터 토카막 밀폐방식이 세계의 핵융합 연구개발의 중심이 되었으며, 세계 4대 토카막 장치로써 미국의 프린스턴 대학의 TFTR, 유럽공동체의 JET, 러시아 쿠르차토프 연구소의 T-15, 일본 원자력연구소의 JT-60U 등이 있다.

지금까지의 핵융합 연구결과의 다양한 관련 기술 개발을 바탕으로 하여, 핵융합 기술의 종합적인 실증을 목표로 한 『국제 열 핵융합 실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)』 장치의 개발이 국제 원자력기구(IAEA)의 지원하에 미국, 유럽연합, 일본, 러시아의 공동협력 과제로 진행되어, 1988년부터 개념설계를 시작하여 현재는 그림 3과 같이 설계를 거의 완성하고 2015년경에는 50만 킬로와트 이상의 핵융합 에너지가 500초 이상 지속되는 핵융합 연구의 최종 실험장치 건설을 추진하고 있다.

## 3. 진공용기의 설계 조건

### 3.1 진공용기

진공 용기는 KSTAR 토카막 주장치 중에서 가장 중요한 요소 중의 하나로서 플라즈마를 발생하고

밀폐하기 위하여  $10^{-9}$  Torr.의 초고진공 상태를 유지하여야 한다. 단면이 『D』 형태의 도넛과 비슷한 진공용기의 본체는 이중벽 구조로 되어 있으며, 포트를 제외한 높이는 3.5m, 외경은 6.0m이고, 자체의 중량이 55톤 정도이다. 진공 용기의 외부 면에는 진공 배기, 플라즈마 가열 및 진단, 냉각수 및 냉매의 유입 등의 목적으로 각종 포트들이 부착되어 저온용기로 연결된다.

진공 용기에 작용하는 하중으로는 용기, 용기 내부품 및 물에 의한 자중, 진공에 의한 대기압, 수압, 베이킹 시에 작용하는 기압 및 열 하중, 운전 시에 발생할 수 있는 전자기력, 지진이 발생할 경우의 지진 하중 등이 있으나, 본 지진 해석은 설계 지진에 대해 진공 용기 및 지지대에 작용하는 지진 하중을 평가하고 구조적인 안전성을 검토하기 위한 목적으로 수행되었다. 지진 해석을 위해 미국의 EMRC사가 개발한 3차원 범용 유한요소 해석 프로그램인 NISA II를 사용하여 응답 스펙트럼 해석 방법 및 등가 정적 해석 방법을 사용하였다.

### 3.2 사용 재질 및 기계적 특성

진공 용기의 재질은 용접성, 제작성, 투자율 등을 고려하여 모두 Stainless Steel 316LN(SA240-316LN)으로 선정되었다. 사용 재질의 기계적 특성은 대부분 ASME Boiler & Pressure Vessel Code에 있는 물성치와 동일하지만 재질 조성 중에서 C, P, 및 S의 조성이 특별히 제어되어야 하며, 모재와 용접 후 용접부의 투자율도 한계치를 넘어선 안 된다. 표 1에는 진공 용기의 사용 재질에 대한 화학 성분을 나타내었으며, 기계적 특성은 표 2에 정리하였다.

### 3.3 부과 질량

진공 용기 내부에는 플라즈마 대향 부품과 플라즈마 진단 장치, 제어장치 및 기타 보조 장치들이

표 2 SA240-316LN의 기계적 특성

Temp.(°C)	Sm(MPa)	E(MPa)
21.1	137.894	195100
65.6	137.894	192100
93.3	137.894	190300
148.9	137.894	186200
204.4	130.310	182700
260.0	120.657	177900
315.6	113.763	174400
343.3	110.315	172700

주)  $S_m$  : Design Stress Intensity in Tension  
 E : Modulus of Elasticity  
 $\rho$  : Density (=  $8.0 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>)  
 $\nu$  : Poisson's Ratio (= 0.29)

부착되어 있다. 또한, 초전도 전자석의 온도를 4K로 유지하기 위해 진공 용기 외부에는 단열벽을 설치하며, 진공 용기의 내·외벽 사이에는 중성자 차폐 및 냉각을 목적으로 물이 충전되어 있다. 이와 같이 진공 용기에 직접적으로 작용하는 자중은 약 45톤으로 해석 결과에 중요한 영향을 미치기 때문에 각각의 질량을 분석하여 부과질량으로 해석에 반영하였다.

### 3.4 설계 지진

한국기초과학지원연구원에서 지진 하중을 산정하기 위하여 KSTAR 토카막용 건물에 대한 시간이력 해석을 수행하여 내진 해석 및 설계를 위한 그림 4와 같은 층응답 스펙트럼을 작성하여 제공하였다. 설계 지진으로 지반최대 가속도를 수평방향으로 0.12g, 수직방향으로 0.08g를 사용하였으며, 건물의 감쇠비는 5%로 가정하였다.

## 4. 고유치 해석

지진 해석의 한 방법인 응답 스펙트럼 해석을

표 1 진공용기 재질의 화학 성분

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Co
0.02 Max.	0.75 Max.	2.0 Max.	0.03 Max.	0.015 Max.	10.0 ~14.0	16.0 ~18.0	2.0 ~3.0	0.10 ~0.16	0.25 Max.

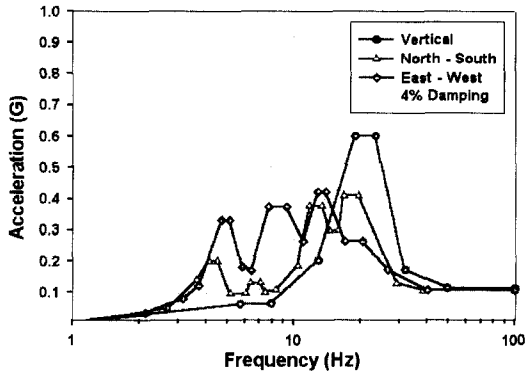


그림 4 설계 응답 스펙트럼

위해, 여기서는 감쇠가 전혀 없고 외부 하중이 작용되지 않는 비감쇠 자유 진동에 대하여 고유 진동수 및 모드 형상을 구하기 위한 고유치 해석을 수행하였다.

#### 4.1 유한 요소 모델

고유치 해석 및 지진 해석을 위한 유한 요소 모델은 해석 시간 및 비용을 줄이기 위하여 여러 가지 주요 장치들을 간략화 하였다. 진공 용기 및 포트 등과 같은 대부분의 장치들은 4절점 쉘요소를 사용하였고, 본체를 지지하는 역할을 하는 Leaf Spring은 각각의 판들을 등가의 보요소를 이용하여 치환하였다. 해석 모델의 총 절점 수는 12398개, 요소의 수는 13626개, 자유도는 72012이다. 진공 용기의 해석 모델에서 제외된 부분과 부과질량에 대해서는 각 부품별 유효 밀도 값으로 보상하였다.

#### 4.2 경계 조건

지지용 포트를 제외한 진공 용기의 모든 포트들은 Expansion Bellows를 통하여 저온 진공 용기(Cryostat)와 연결되어 있으나, 이들 Expansion Bellows는 매우 유연하기 때문에 해석 모형에서 무시하였다. 따라서, 고유치 해석을 위한 경계 조건은 Leaf Spring의 하부에 고정 조건을 적용하였으며, Expansion Bellows와 연결되는 포트 끝 부분은 자유단으로 가정하였다.

#### 4.3 해석 결과

보다 정확한 지진 해석을 위하여 고유치 해석을 통해 50개의 모드를 계산하였으며, 응답 스펙트럼 해석에 사용되는 X, Y, Z축 방향으로의 주요 모드는 표 3에서 알 수 있듯이 상당히 명확하게 나타났다.

그림 5와 같이 1번째 및 2번째 모드는 10.2Hz에서 양방향의 수평 병진 운동 모드를 나타내고, 12.2Hz에서 수직 방향에 대한 비틀림 모드, 수직 방향의 병진 운동은 41.3 Hz에서 나타났으며, 그리고 나머지 모드들은 주로 여러 포트들의 굽힘 모드들로 나타났다.

#### 5. 지진 해석

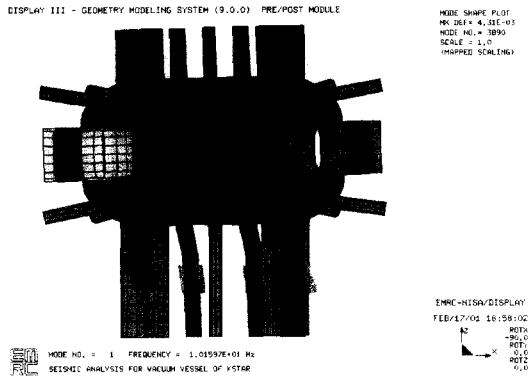
KSTAR 토카막 진공 용기의 내진 해석은 응답 스펙트럼 해석(Response Spectrum Analysis)과 동가 정적 해석(Equivalent Static Analysis)을 사용하였다.

##### 5.1 응답 스펙트럼 해석

어떤 특정한 지진에 대하여 일정한 감쇠율을 가진 단자유도 구조물의 진동주기를 여러 가지로 변화시키면서 동적 해석을 수행하고, 이때 발생하는 가속도, 속도, 변위 등의 최대 응답을 구하고 이것을 진동주기의 변화에 대하여 그림으로 나타낸 것

표 3 고유주파수 및 모달 질량

Mode	Freq. (Hz)	Cumulative Modal Mass Ratio(%)					
		UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
1	10.16	88.69	4.41	0	4.22	84.83	0
2	10.17	93.10	93.11	0	89.09	89.05	0
3	23.45	93.10	93.13	0	89.11	89.05	95.23
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
33	44.28	95.95	95.95	71.08	98.24	98.24	95.34
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	53.50	95.96	95.97	71.09	98.32	98.32	95.39



(a) 1st & 2nd Mode : Horizontal Translation.

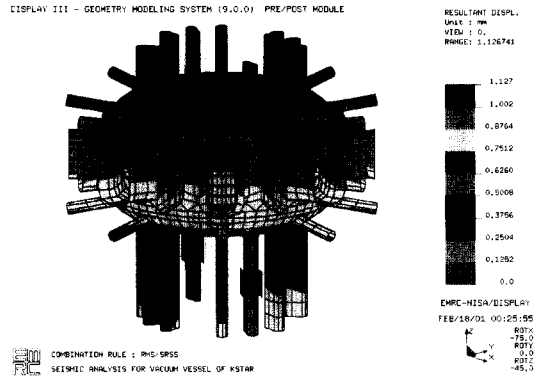
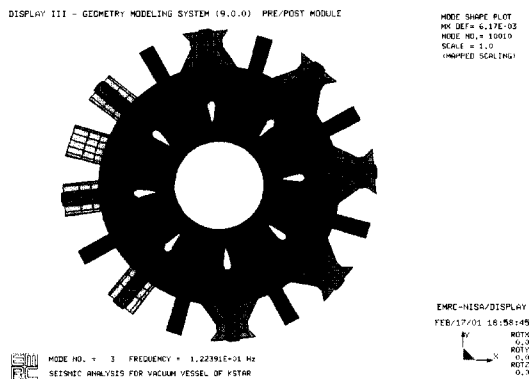
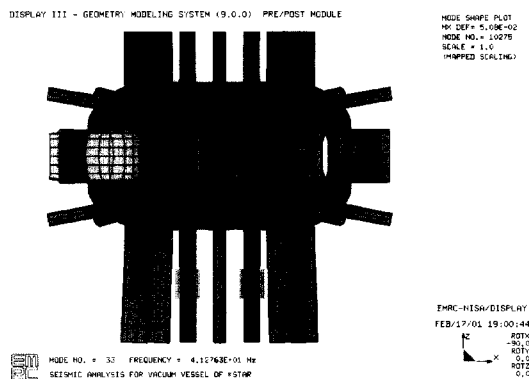


그림 6 응답스펙트럼 해석으로 구한 변위 분포



(b) 3rd Mode : Torsional Rotation.



(c) 33rd Mode : Vertical Translation.

그림 5 진공용기의 주요 모드 형상

을 응답 스펙트럼 (Response Spectrum)이라고 한다. 층 응답 스펙트럼은 통상 설비가 포함되지 않은 주 구조물의 지반 입력에 대한 지진 해석으로부터 각 층의 동적 응답을 구한 후 이를 바탕으로

작성하며, 설비의 지지점이 위치하는 높이 마다 각기 다른 층 응답 스펙트럼이 주어진다. 동-서, 남-북 및 상하 등의 3방향 스펙트럼을 모드 해석에서 구한 각 모드별 응답에 적용하여 가장 유용하게 사용하는 조합 방법인 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 법으로 그 결과를 조합하였다. 또한, 모드 해석의 결과에서 알 수 있듯이 각 주요 모드의 주파수가 인접하지 않으므로 각 모드 결과를 SRSS법으로 조합하는 것이 타당하다.

그림 6은 응답 스펙트럼 해석으로부터 구한 각 방향의 변위 UX, UY, UZ를 SRSS법에 의해 조합한 층 변위의 결과를 나타낸 것인데, 상부 포트의 끝단에서 최대 변위 1.1mm정도가 나옴을 알 수 있었다.

응답 스펙트럼 해석을 통해 계산된 응력 성분들은 각 방향 및 모드에 대하여 SRSS법에 의해 조합되었기 때문에 방향성이 없는 크기만을 나타낸다. 따라서 주응력이나 Stress Intensity를 산정하기 위해서는 발생 가능한 모든 경우에 대한 계산이 필요하다. 즉 3차원 문제에서 주응력을 계산하기 위해서는 식 (1)의 근을 구해야 한다.

식 (1)은 각 응력 성분의 발생 가능한 모든 경우에 대하여 16개 조합의 독립적인 해를 갖게 되는데, 본 해석에서는 이를 통해 최대 전단력을 산정하고 이중 최대값을 이용하여 Stress Intensity를 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 S^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)S^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x)S \\
 - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)S - \sigma_x\sigma_y\sigma_z - 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} \\
 + \sigma_x\tau_{yz}^2 + \sigma_y\tau_{zx}^2 + \sigma_z\tau_{xy}^2 = 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

표 4 응답스펙트럼 해석의 Stress Intensities

Components	Stress Intensities, MPa			
	P <sub>L</sub>	Ratio	P <sub>L</sub> +P <sub>b</sub>	Ratio
Inner Shell	14.86	0.060	16.52	0.067
Outer Shell	19.40	0.078	24.65	0.099
Top Ports	1.80	0.007	1.88	0.008
Cooling Ports	2.71	0.011	3.10	0.012
EH Ports	3.94	0.016	4.05	0.016
RF Ports	3.17	0.013	4.95	0.020
NBI Ports	3.33	0.013	3.68	0.015
Supporting Ports	21.32	0.086	25.63	0.103
Bottom Ports	21.76	0.088	24.65	0.099
Leaf Springs 1	1.05	0.004	25.73	0.104
Leaf Springs 2	7.15	0.029	31.76	0.128
Allowables	248.22	1.000	248.22	1.000

표 4는 이에 따른 결과를 나타낸 것으로 진공 용기의 여러 구성 요소 중에서 Leaf Spring에서 응력이 허용치의 15% 정도인 31.8MPa로 가장 높게 발생하였다.

응답 스펙트럼 해석에서 사용한 해석 모형은 국부적으로 정확한 응력을 계산할 정도로 충분히 자세하지 않기 때문에 지진 하중에 대한 등가 정적 하중을 계산하여, 상세한 구조 해석용 정적 해석 모형에 적용하는 것이 필요하다. 따라서, 등가 정적 해석법에 적용할 유효 가속도를 산정하기 위해 응답 스펙트럼 해석에서 지지점의 반력을 계산하였다.

각 방향별 등가 정적하중은 응답 스펙트럼 해석 결과에서 나온 지지점의 반력을 각 방향 별로 SRSS 법에 의해 조합한 후 전체의 유효 질량(System Mass)으로 나누어 계산하였으며, 지진 하중에 대한 유효 가속도는 동서방향 0.30g, 남북 방향 0.18g, 수직방향 0.07g 이었다.

### 5.2 등가 정적 해석법

등가 정적 해석에서 사용한 해석 모형은 국부적으로 상세한 구조 해석용 정적 해석 모형을 적용하는 것이 필요하지만, 앞에서 언급한 지지점의 반력을 통해 구한 유효 지진 하중에 대한 타당성을 검토하기 위하여 고유치 해석 모델과 동일한 것을 사용하였다. 그림 7은 등가 정적 해석을 통해 얻은 총 변위를 나타낸 것인데, 상부 포트의 끝단에서 최대 변위 1.0mm정도의 결과는 응답 스펙트럼 결과와 상당히 유사함을 알 수 있었다.

그림 8은 진공 용기에서 발생하는 Stress Intensity의 분포를 나타낸 것으로 응답 스펙트럼 해석 결과와 상당히 유사하였다. 이는 기본적인 고유 진동수에서의 모드가 진공용기의 동적 거동을 지배하기 때문이다.

### 6. 결 론

차세대 초전도 토카막인 KSTAR 장치에서 가장 중요한 장치인 진공용기의 내진에 대한 구조적인

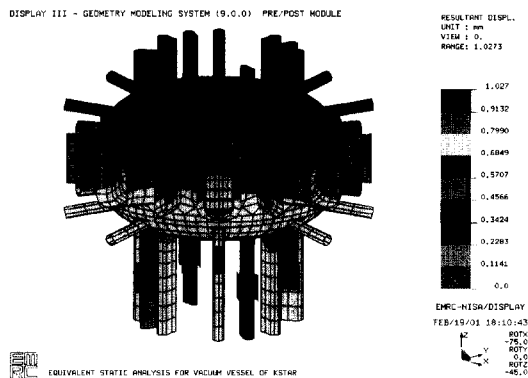


그림 7 등가 정적 해석으로 구한 변위 분포

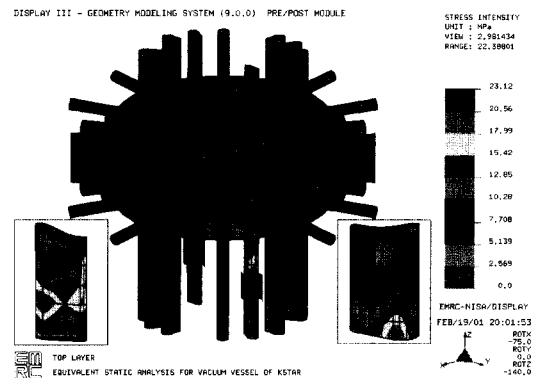


그림 8 Stress Intensity 분포 (등가 정적 해석)

안전성을 검토하기 위하여, 한국기초과학연구원  
에서 제공한 총 응답 스펙트럼의 지진하중을 기준으  
로 응답 스펙트럼 해석 및 등가 정적해석을 통하  
여 내진 해석을 수행하였다.

내진 해석을 위한 고유치 해석으로부터, 진공 용  
기의 수평 모드는 10.2Hz, 수직 방향에 대한 비틀림  
모드는 12.2Hz 및 수직 모드는 41.3Hz에서 나타  
나는 것을 알 수 있었다. 총 응답 스펙트럼의 지진하  
중에 대한 내진 해석의 결과, 최대 변형량은 상부  
수직 포트에서 1.1mm, 최대 응력은 ASME Boiler  
and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division  
2에 의거한 허용 응력의 15%정도이므로 진공용기  
는 설계지진에 대하여 구조적으로 안전하다.

또한, 정적 구조해석에서 적용할 수 있는 유효  
가속도는 동서방향 0.3g, 남북 방향 0.2g, 수직방향  
0.07g로 계산되었으며, 이를 적용한 등가 정적해석  
의 결과는 응답 스펙트럼 해석의 결과와 매우 유  
사한 변위 및 응력 분포를 얻을 수 있어서 유효가  
속도가 타당하다고 판단된다. 그러나, 수직방향의  
유효가속도는 고주파수 영역(Cutoff Frequency)에  
서 총응답 스펙트럼의 가속도 값인 0.12g 보다 낮  
기 때문에 진공용기의 구조해석에서는 수직 방  
향의 등가 가속도로 0.12g를 적용하는 것이 공학적인  
측면에서 바람직한 것으로 판단된다.

## 부 연

본 연구는 과학기술부의 특정연구개발사업 중  
“차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업”의 일  
환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. Y. W. Lee, H. J. Ahn, “Seismic Analysis for the Vacuum Vessel”, Hyundai Heavy Industries Co., February 20, 2001
2. The American Society of Mechanical Engineers, Boiler & Pressure vessel Code Section II, Part D - Properties, 1998 Edition
3. The American Society of Mechanical Engineers, Boiler & Pressure vessel Code Section VIII, Division 2 - Alternative Rules, 1998 Edition
4. 사정우, 허남일, “Floor Response Spectrum Analysis for the Seismic Design of the KSTAR Tokamak”, 한국기초과학지원연구원, August 22, 2000
5. 나성원, 안희재, 이충동, “화학 반응기의 내진 및 진동해석”, 대한기계학회지, 1996년 9월호
6. J. D. Stevenson, et al., Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 58, ASCE
7. R. W. Clough, J. Penzien, Dynamics of Structures, McGraw-Hill, 2nd Edition, 1993
8. G. Sannazzaro, P. Barabaschi, et al., “Seismic Analysis of the ITER Tokamak”, 20th Symposium on Fusion Technology, Marseille, 1998
9. S. Tado, et al., “Dynamic Analysis of the Tokamak Support System in ITER”, Fusion Engineering and Design 41, Elsevier, 1998
10. NISA II Users Manual, EMRC 