

KSTAR 초전도자석 지지각 시작품제작 및 구조시험

KSTAR Superconducting Magnet Supporting Post Prototype Manufacturing and Structural Load Test

허남일*, 이영신**

N. I. Her*, Y. S. Lee**

Abstract : A magnet supporting post installed between the lower TF coil cooled by 4.5 K supercritical helium and the cryostat base is one of the most important components of the superconducting magnet supporting structure for KSTAR Tokamak. This structure should be flexible to absorb thermal shrink of the magnet and also should be rigid to support the magnet weight and the plasma disruptions load. The post was designed with stainless steel 316LN and CFRP that have low thermal conductivity and high structural strength at low temperature. In order to verify the possibility of fabrication and the structural safety, a whole scale prototype of the KSTAR magnet supporting post was manufactured and tested. Static and compressive cyclic load tests under the maximum plasma vertical disruption load and the magnet dead weight were performed. The test results showed that the magnet supporting post of KSTAR Tokamak was possible to manufacture and structurally rigid.

Key Words : KSTAR, CFRP, Supporting post, Prototype, Cyclic load test

1. 서 론

KSTAR 핵융합 실험장치의 초전도자석 지지구조물은 초전도자석을 저온장치 기초 구조물에 고정하며, 그림 1과 같이 자석 지지링(magnet supporting ring), 수직 리미터(vertical limiter), 그리고 8개의 지지각(supporting post)으로 구성된다[1]. 이 구조물은 제한된 설계공간에서 액체헬륨 온도로 운전되는 초전도자석의 열 손실을 최소화시키고, 초전도자석의 극저온 수축에 의한 열변형을 흡수해야하며, 초전도자석의 자중과 플라즈마 붕괴하중(plasma disruptions load)을 지지해야 한다.

이러한 설계요구조건을 고려하여 4.5 K 온도로 유지되는 STS(Stainless Steel) 316LN 재료의 자석 지지링과 4.5-300 K의 온도 구배를 갖는 지지각 설계가 이루어졌다[2].

이 지지각 설계에는 저온에서 강도와 인성이 우수한 STS 316LN 재료와 단열 및 구조강도 특성이 우수한 탄소섬유 강화 복합재 (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic)[3][4]가 사용되었다. 그림 2는 현재 설계된 높이 1 m, 가로와 세로가 각각 0.8 m인 초전도자석 지지각을 나타낸 것이다. 좌우 대칭 구조를 하고 있으며, 상부블록(upper block), 안쪽 복합적층판(inner CFRP plate), 하부블록(lower block), STS 판, thermal anchor block, 외부 복합적층판(outer CFRP plate), 기초블록(base block), 그리고 냉각모듈(cooling module)로 구성된다. STS 판과 복합적층판은 STS 블록사이의 홈에 끼워져 핀(pin)으로 체결되며, 복합적층판의 경우는 핀홀(pin hole)의 마모 방지를 위해 STS 재질의 원형 부시를 삽입하였다. 안쪽 복합적층판은 두께 20 mm 판재 4장으로 구성되고, 외부 복합적층판은 각각 2장으로 구성된다. STS 판은 초전도자석 냉각 시 급팽 변형에 의해 초전도자석의 수축 변형을 흡수할 수 있도록 적층된 두께 6 mm 판재 4장으로 구성되며, 복합적층판과 같은 방법으로 STS 블록에 체결된다. 보강판은 thermal anchor block과 기초블록에 부착되는 두꺼운 판으로서, 외부 복합적층판의 급팽 변형을 방지하는 역할을 한다.

본 연구에서는 현재 설계된 지지각의 제작성 및 조립성을 확인하고 요구되는 구조강도의 실험적 검증을 위해 실제크기의 시작품을 제작하였으며, KSTAR 장치의 운영기간 동안 가장 큰 작용하중으로 예상되는 320 ton의 플라즈마 수직 붕괴[5]를 고려한 압축파괴시험을 실시하였다.

2. 지지각 시작품 제작

그림 3과 같이 무게 1.2 ton의 지지각을 시제작하였다. STS 316 단조 블록과 판재를 가공하여 STS 블록 및 STS 판을 제작하였다. 그리고 평직(plain woven) 형태의 T300 탄소섬유와 에폭시 레진을 고온에서 압축 성형하여 복합적층판(model : HPW193/RS3232)을 제작하였다. 제작된 복합적층판은 비파괴 검사를 실시하였다. 그리고 지지각의 냉각 효율을 향상시키기 위해 원형 구리 파이프를 제작된 4개의 냉각모듈을 스타이캐스트(Stycast)를 사용하여 상부블록, 하부블록, 그리고 좌,우측 thermal anchor block에 부착하였다.

* 정 회 원: 한국기초과학지원연구원 장치개발운영부

** 비 회 원: 충남대 기계설계공학과 교수

원고접수: 2001년 05월 10일

심사완료: 2001년 05월 29일

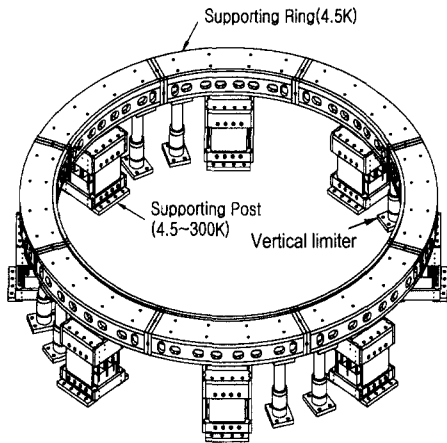


그림 1. KSTAR 토카막을 위한 자석 지지 구조물
Fig. 1. Magnet supporting structure for KSTAR Tokamak

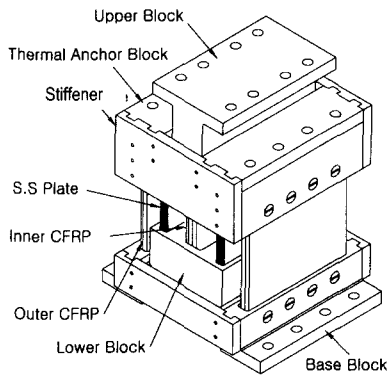


그림 2. KSTAR 토카막을 위한 초전도자석 지지각
Fig. 2. Magnet supporting post for KSTAR Tokamak

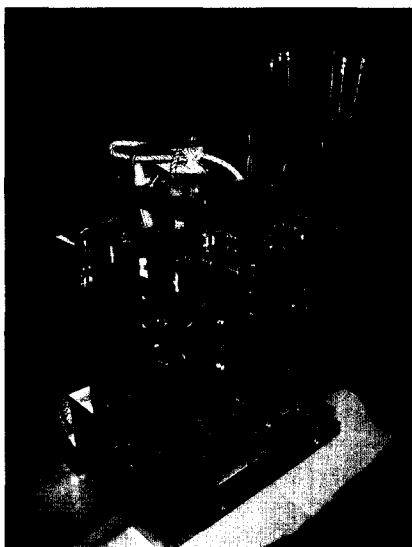


그림 3. 초전도자석 지지각의 시제품
Fig. 3. Whole scale prototype of the magnet supporting post

3. 구조시험

3.1. 구조시험장치

그림 4와 같이 저온환경에서 구조시험을 위한 실험장치를 구축하였다. 시험물의 효과적인 냉각을 위해 직경 1 m, 높이 1.3 m의 진공용기를 제작하였다. 이 진공용기의 상부에 냉각모출, 열전대(thermocouple), 그리고 변형률 게이지(strain gauge)를 위한 진공 피드 스루(vacuum feed through)를 부착하였고, 진공을 유지하면서 시험물에 하중을 인가하기 위해 벨로즈(bellow)를 포함한 하중인가 부품을 부착하였다. 그리고 시험물이 냉각되기 전에 회전식 펌프를 이용하여 진공을 만들었다. 그림 5와 같이 시험물의 주요위치 7 곳에 T-type의 열전대를 부착하여 시험물의 냉각 온도를 측정하였다. 그림 6과 같이 주요 부품의 온도가 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각되는데 약 2일이 소요되었으며, 전체 3일의 시험기간 동안 약 2000 리터의 액체질소(LN₂)가 소모되었다.

작용하중에 따른 시험물의 응력 평가를 위해 8개의 변형률 게이지를 STS plate와 CFRP plate에 부착하였고, 측정된 변형률 변화로부터 응력을 계산하여 재료의 허용 응력과 비교하였다. 본 구조시험에는 한 개의 지지각에 작용될 80 ton의 최대압축하중과 이것의 반복시험을 고려하여 최대 100 ton 용량의 유압식 피로시험기가 사용되었다. 하중이 인가되는 동안 시험물의 상부에 부착된 2개의 LVDT(Linear Variable Differential Transducer)로부터 시험물의 수직 변위가 기록되었다.

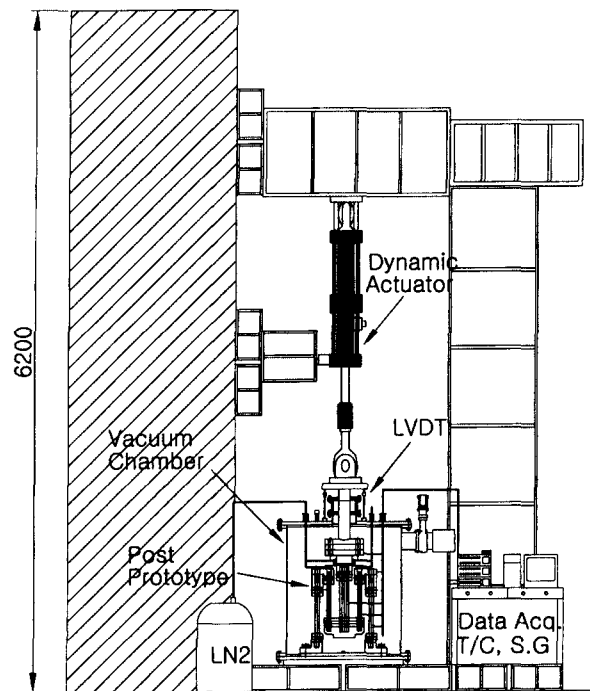


그림 4. 정적 및 동적 하중 시험 장치
Fig. 4. Static and dynamic load test system

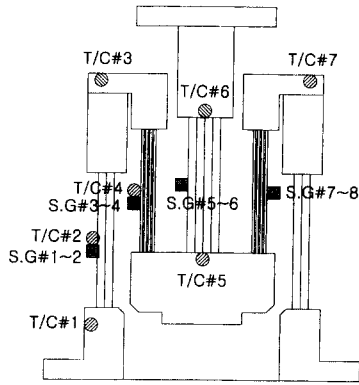


그림 5. 시제품의 온도 및 변형률 게이지 측정 위치
Fig. 5. Temperature and strain gauge measuring points on the prototype

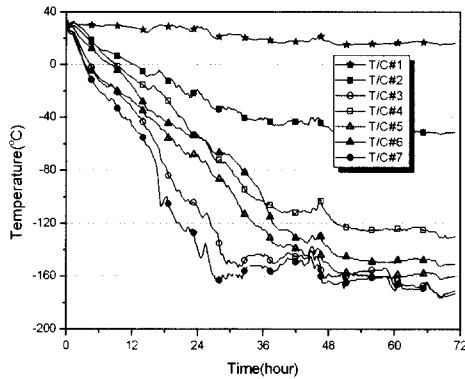


그림 6. 시제품의 냉각 중 온도 분포
Fig. 6. Cool down temperature of the prototype for three days

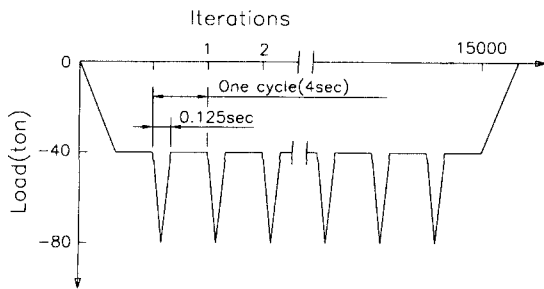


그림 7. 최대 플라즈마 수직 붕괴를 고려한 압축피로 하중곡선
Fig. 7. The cyclic compression load test curve considering the maximum plasma vertical disruption load at low temperature

3.2. 시험하중

지지각의 하중시험은 상온에서 초전도자석의 자중 (320 ton)과 저온에서 가장 큰 하중으로 예측되는 최대 플라즈마 수직 붕괴 하중(320 ton)을 고려하여 수행되었다. 8 개의 지지각에 이 하중들이 균일하게 작용된다고 할 때, 1개의 지지각에 작용되는 하중의 최대 값은 초전도자석의 자중을 고려한 40 ton의 정적 하중과 플라즈마 수직 붕괴 하중을 고려한 40 ton의 동적 하중으로 예측되었다. 따라서 본 시험에서는 초

전도자석의 자중과 이것의 25%의 여유를 고려하여 상온에서 50 ton 정적하중시험을 먼저 수행하였고, 2 일간의 냉각 후 초전도자석의 자중과 플라즈마 수직 붕괴 하중을 고려한 80 ton의 정적하중 시험을 수행 하였다. 그리고 장치가 운영되는 10년 동안 예상되는 7500번의 플라즈마 수직 붕괴를 고려하여, 15000번의 압축피로시험을 수행하였다. 그림 7은 피로시험에 사용된 하중-시간 선도를 나타낸 것이다. 실제 플라즈마 붕괴 하중은 수-수십 ms 동안 작용이 예상되나, 이러한 시험장치 구현이 현실적으로 불가능하므로 본 시험에서는 시험기의 최대 주파수가 8 Hz임을 감안하여, 0.125 s의 하중주기와 3.875 s의 유지시간을 포함하여 반복주기를 4 s로 설정하였다.

표 1. KSTAR 지지각을 위한 STS 316과 복합적층판의 물성

Table 1. Material properties of the CFRP and the STS316 for KSTAR magnet supporting post

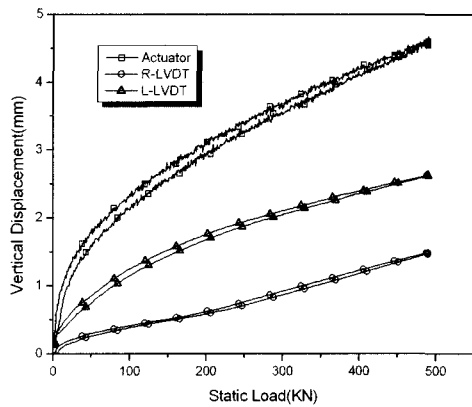
Property	STS 316			CFRP		
	4.5K	77K	300K	4.5K	77K	300K
Tensile strength(MPa)	1640	1360	580	-	-	614
Compressive strength(MPa)	-	-	-	770	670	500
Interlaminar shear s.(MPa)	-	-	-	80	80	78
Young's modulus(GPa)	207	207	197	60	60	60
Thermal Cond.(W/mK)	12	13	14.3	0.25	-	3

3.3. 구조시험결과

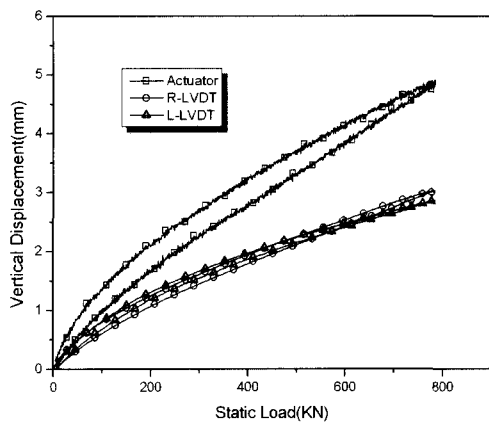
그림 8(a)는 상온에서 초전도자석의 자중을 고려한 50 ton의 정적하중이 작용할 때 하중-변위 측정결과를 나타낸 것이다. 측정된 좌우 변위가 차이를 보이고 있으며 작용하중이 증가함에 따라 변위차가 약 1 mm정도로 일정함을 볼 수 있다. 이는 제작 오차가 서로 다른 STS 판, 복합적층판, 그리고 STS 볼록이 판으로 조립될 때 완전 대칭구조로 조립되지 않았고, 로드셀(load cell)의 수직축 정렬이 정확하지 않기 때문인 것으로 예측된다. 앞으로 제작될 본 제품의 경우에도 이러한 현상은 발생할 수 있을 것으로 생각되며, 좌우 비대칭된 편차를 줄이는 노력이 필요할 것으로 생각된다. 본 시험을 통해 지지각은 초전도자석이 조립된 상온조건에서 약 1~2 mm의 수직 변형이 발생할 것으로 예측되었다.

그림 8(b)는 저온에서 초전도자석의 자중과 최대 플라즈마 수직 붕괴를 고려한 80 ton의 정적하중이 작용할 때 하중-변위 측정결과를 나타낸 것이다. 상온에서의 변위 거동과는 다르게 좌우 변위 값이 유사하였으며, 최대 3 mm의 수직변형이 발생하였다. 이 값은 지지각의 저온수축을 고려하지 않은 저온수축 된 이후 하중이 작용될 때 변위를 나타낸다.

그림 9(a)는 상온에서 초전도자석의 자중을 고려한 50 ton의 정적하중이 작용할 때 STS 판과 복합적층판 중앙에서의 작용하중에 따른 변형을 변화에 대한 측정 결과를 나타낸 것이다. 좌우 비대칭 구조에 따른 영향으로 좌우 STS 판에서의 변형을 변화가 차이를 보이고



(a)

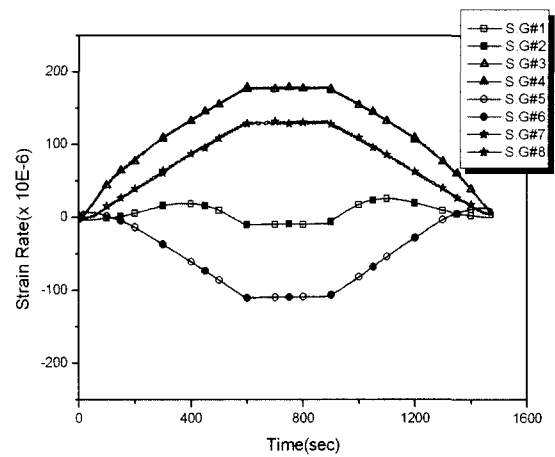


(b)

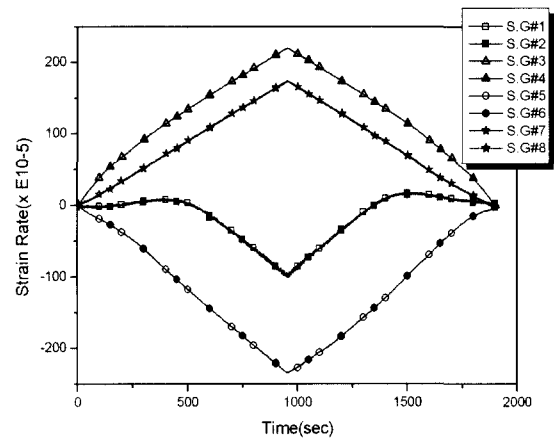
그림 8. 지지각의 수직변위 (a)상온에서 50ton이 작용할 때, (b) 저온에서 80ton이 작용할 때
Fig. 8. Vertical displacement of the post (a) under the 50 ton at room temperature (b) under the 80 ton at low temperature

있으며, 이러한 경향은 하중이 감소할 경우에도 같은 경향을 보였다. 표 1의 재료 물성과 측정된 변형률 변화로부터 좌측 STS 판에서 35 MPa의 최대 인장 응력이 발생하고, 중앙에 위치한 복합적층판에서 7 MPa의 압축응력이 계산되었다. 그리고 좌측 복합적층판은 일정 하중이 작용되기 전까지는 급힘에 의해 급힘응력이 작용되다가 하중이 더 작용될 때 압축응력이 증가되는 현상이 나타났다. 이 좌측 복합적층판에서 발생하는 급힘 및 압축 응력은 재료의 허용응력과 비교할 때 매우 작은 값이었으며, STS 판과 복합적층판에서 발생된 응력들도 재료의 허용응력에 비해 작은 값이었다.

그림 9(b)는 저온에서 초전도자석의 자중과 최대 플라즈마 수직 붕괴를 고려한 80 ton의 정적하중이 작용할 때, STS 판과 복합적층판의 중앙에서의 작용 하중에 따른 변형률 변화의 측정결과를 나타낸 것이다. 상온에서의 시험결과와 유사하게 좌우 비대칭 구조에 따른 영향으로 좌우 STS 판에서의 변형률 변화의 차이를 보였다. 측정된 변형률 변화로부터 좌측 STS 판에서 45 MPa의 최대 인장응력이 발생하고,



(a)



(b)

그림 9. 지지각의 변형률 변화 (a)상온에서 50ton이 작용할 때, (b) 저온에서 80ton이 작용할 때
Fig. 9. Strain rate of the post (a) under the 50 ton at room temperature (b) under the 80 ton at low temperature

중앙의 복합적층판에서 15 MPa의 압축응력이 작용하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 좌측 복합적층판에서도 상온에서와 같이 일정 하중이 작용되기 전까지는 판의 급힘에 의해 급힘응력이 작용되다가 하중이 더 작용될 때 압축응력이 증가되는 현상이 측정되었다. 측정된 응력은 모두 재료의 허용응력에 비해 작은 값이었다.

그림 10은 초전도자석의 자중과 최대 플라즈마 수직 붕괴하중을 고려한 15000번의 압축피로시험에서 하중 반복회수에 따른 지지각의 수직변위 최대/최소값을 나타낸 것이다. 좌측 LVDT의 경우 1 mm, 우측 LVDT의 경우 1.4 mm의 수직 변형이 발생되었으며, 이로부터 실제로 최대 플라즈마 수직 붕괴하중이 작용될 경우 이 두 값을 평균한 1.2 mm의 변형이 발생할 것으로 예측되었다. 15000번의 반복하중이 작용하는 동안 이 변위는 같은 변화를 보였고, 80 ton의 정적하중이 작용할 때와 유사하였다. 이러한 피로시험 결과로부터 구조물이 파손되지 않았음을 확인할 수 있었다.

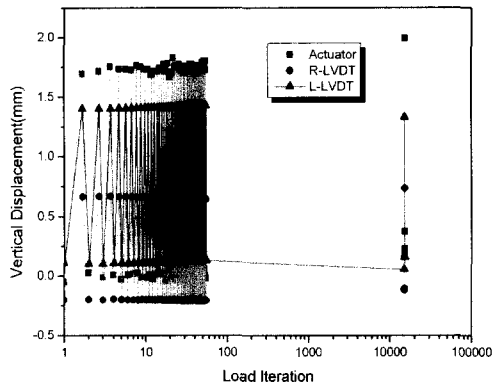


그림 10. 저온에서 최대 플라즈마 수직 붕괴하중의 반복하중이 작용할 때 지지각의 수직변위

Fig. 10. Vertical peak displacement under the iteration load considering the maximum plasma vertical disruption load at low temperature

4. 결 론

본 연구에서는 KSTAR 핵융합 실험장치 초전도자석 지지각의 제작성 및 조립성 검토와 요구되는 구조강도의 실험적 검증을 위해 실제 크기의 시작품을 제작하였으며, 상온 및 저온에서 정적하중시험과 저온에서 압축피로시험을 실시하여 구조물의 안정성을 검증하였다. 상온에서 초전도자석의 자중을 고려한 정적하중시험과 저온에서 플라즈마 수직 붕괴하중을 고려한 정적하중시험 결과, 각 하중에 따른 지지각 상부의 수직 변위를 확인할 수 있었으며, STS 판/복합적층판에서 허용응력 이하의 응력이 발생되고 있음을 확인하였다. 그리고 플라즈마 붕괴에 의한 반복하중을 고려한 압축피로시험결과, 피로파손이 발생하지 않았으며, 이로부터 지지각이 구조적으로 충분한 피로강도를 갖고 있음이 확인되었다. 본 실험에서 얻어진 지지각의 수직 변위와 응력은 지지각의 설계보완과 초전도자석 설계의 기본자료로 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 특정연구사업(KSTAR Project)의 연구비지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] G.S. Lee, and KSTAR team, The design of the KSTAR tokamak, Fusion Engineering and Design, Vol. 46, pp. 405-411, 1999
 [2] 허남일, 도철진, 사정우, 조승연, 임기학, and KSTAR 설계팀, 초전도자석 지지각 설계 및 구조해석, 2000년도 한국초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp. 115-118, 2000
 [3] M.S. Kramer, Composite for cryogenics, Applications of Cryogenic Technology, Vol.

10, pp. 185-195, 1991

[4] H. Tamura, S. Imagawa, H. Hayashi, T. Satow, J. Yamamoto, O. Suzuki and LHD group, Structural and mechanical design of cryogenic support systems for LHD, Proceedings of the 19th Symposium on Fusion Technology, pp. 1019-1022, 1996
 [5] S. Cho, B.J. Yoon, S.R. In, and K.H. Im, Design analysis of electromagnetic forces on the KSTAR vacuum vessel interfaces, Fusion Engineering and Design, Vol. 51, pp. 219-227, 2000

저 자 소 개



허남일 (許南一)

1967년 4월 10일생, 1992년 충남대 공대 기계설계공학과 졸업, 1994년 동대학원 기계설계공학과 졸업(공학석사), 1994년 2월 ~ 1997년 5월 한국전자통신연구원, 1997년 6월 ~ 현재 한국기초과학지원연구원 연구원



이영신 (李永臣)

1950년 2월 17일생, 1972년 연세대 공대 기계공학과 졸업, 1980년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1980년 2월 ~ 현재 충남대 기계설계공학과 교수