

Helicoflex 개스킷의 기밀 시험

유인근† · 인상렬*

한국기초과학지원연구원 핵융합개발사업단 장치개발운영부
*한국원자력연구소 핵물리공학팀
(논문접수일 : 2002년 1월 31일)

Sealing Test of the Helicoflex Gasket

In-Keun Yu† and Sang-Ryul In*

National Fusion R&D Center, Korea Basic Science Institute

*Korea Atomic Energy Research Institute

(Received January 31, 2002)

요 약

KSTAR 진공용기의 대형포트에 사용하려고 계획하고 있는 Helicoflex 개스킷의 특정 모델에 대해 플랜지 체결 특성 특히 토크(또는 선하중) 및 변형량과 기체누설률의 관계를 조사하여 기밀곡선을 구하는 실험을 수행했다. 그 결과 상온에서는 M18 볼트의 경우 토크 2500 kgf · cm에서 Helicoflex를 채용한 플랜지의 기체누설률은 2×10^{-11} mbar · L/s 이하였다.

Abstract

With a specific model for the Helicoflex type metal gasket expected to be used in large ports of the KSTAR vacuum vessel, a sealing curve was obtained by measuring the flange tightening properties such as the correlations of the tightening torque(or linear load), displacement to the leak rate. From the experiment results it was found that the leak rate of the Helicoflex seal in the room temperature was bellow 2×10^{-11} mbar · L/s with a tightening torque of 2500 kgf · cm using M18 bolts.

1. 서 론

국가 핵융합 프로젝트의 일환으로서 2005년 완성을 목표로 건설중인 대형 토카막장치 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)의 진공용기 체적은 약 110 m^3 이고 72개의 각종 포트가 부착되는데 2100 mm × 1380 mm의 대형 사각포트로부터 지름 300 mm의 원형포트에 이르기까지 크기와 형태가 매우 다양하다 [1].

KSTAR 진공용기의 도달압력은 대부분 기체방출에 의해 유지된다는 전제하에 1.0×10^{-8} mbar로

정해졌으므로 목표 진공도를 달성하기 위해 다른 기체원을 최대한 억제해야 한다. 특히 기체누설을 막기 위해 플랜지당 누설률을 1.0×10^{-10} mbar · L/s 이하로 낮추는 것이 필수적이다.

용접을 포함한 여러 가능한 기밀방법 중 Helicoflex 개스킷은 기밀특성이 우수하고 수 차례 반복사용이 가능하다는 점에서 유망한 방식으로 생각할 수 있다. 특히 ConFlat 방식으로 대처하기 곤란한 각종 비 원형 플랜지나 직경 500 mm 이상의 원형 플랜지에는 가장 적합한 기밀방식이라고 할 수 있다. 이미 제작되어 가동중에 있는 토카막 장치들의 플랜

† E-mail : ikyu@kbsi.re.kr

지 밀폐는 대부분 Helicoflex 개스킷에 의해 이루어졌지만, 특정 개스킷의 기밀특성이 플랜지 구조 및 체결조건과 밀접한 관련이 있는 만큼 KSTAR 진공용기에 적용하려는 개스킷 모델 및 플랜지 구조에 맞는 상세한 기밀특성에 대한 기존의 정보를 얻는 것은 어렵다.

본 실험에서는 KSTAR 진공용기에 적용될 플랜지 중 규격이 가장 큰 것을 골라 이중밀폐형 Helicoflex 개스킷을 특별 주문제작하고 별도의 시험용기를 만들어 체결 토크와 개스킷의 변형량 및 기체누설률을 측정하는 방식으로 기밀특성을 조사했다.

2. Helicoflex의 구조 및 기본특성

Helicoflex 개스킷은 초고진공용으로 사용할 수 있도록 금속재질로 만들어져 있으면서도 고무 오링과 같은 압축성과 탄성복원력 등의 특성을 가지고 있다. 개스킷의 단면은 스프링형 심 및 2겹의 외피로 구성되어 있다(그림 1). 적접 기밀이 형성되는 외피2의 재질로는 어떤 재료나 가능하지만 대표적으로, 높은 선하중을 요구하는 순으로, Al, Ag, Cu, Ni, stainless steel(S.S), Inconel 등이 있다. 본 실험에 사용된 Helicoflex(HND208Asp)의 외피1, 2의 재질은 각각 S.S와 Al이다.

표 1에는 제작사에서 권장하는 Helicoflex 표준형 개스킷에 대한 기밀면 표면거칠기의 허용범위를 정리했다. 외피2가 Al인 경우 평균 표면거칠기는

3.2Ra~0.8Ra(12.8S~3.2S)의 범위이다. 이 표면거칠기는 통상 진공용기 내면의 가공 정도에 비하면 의외로 높은 값인데 이는 개스킷 축에 수직한 방향으로의 홈만 없다면 너무 매끄러운 면보다 어느 정도 거칠기를 가지고 있는 면이 개스킷의 외피와 결합하여 기밀면을 더욱 잘 형성할 수 있기 때문이다 [3].

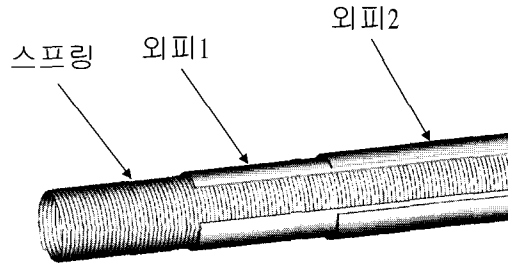


그림 1. 표준형 Helicoflex 개스킷의 단면.

표 1. Helicoflex 표준형 개스킷에 대한 기밀면 표면거칠기의 허용범위(○: 양호, ⊙: 최적).

| Ra | 12.5 | 6.3 | 3.2 | 1.6 | 0.8 | 0.4 | 0.2 |
|------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 재료 | | | | | | | |
| Pb, In, Sn | | | | ○ | ⊙ | ⊙ | ○ |
| Al | ○ | ○ | ⊙ | ⊙ | ⊙ | ○ | ○ |
| Ag, Cu, Iron | | ○ | ⊙ | ⊙ | ○ | ○ | |
| Ni, sus, Inconel | | ○ | ○ | ⊙ | ⊙ | ○ | ○ |

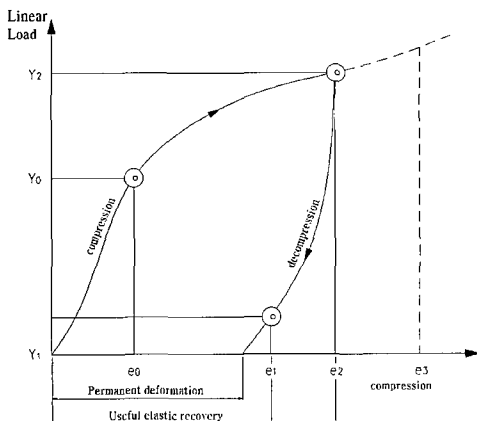


그림 2. Helicoflex 개스킷의 압축특성 곡선.

<각 값의 정의>

- Y_0 = 개스킷 특성을 얻기 위해 필요한 단위길이당의 조임 하중
- Y_2 = 최적 압축률 e_2 에 필요한 단위길이당의 조임 하중
- Y_1 = Y_0 에서 얻어진 개스킷 성능이 막 상실될 때의 단위길이당의 조임하중
- e_2 = 최적 압축률
- e_c = 개스킷 자체 손상을 일으키는 한계압축률

표 2. CEFILAC사에서 제공한 플랜지의 크기에 따른 평면도.

| dimensions | amplitude | tangential slope | radial slope |
|-----------------|-----------|------------------|--------------|
| ND 10 to 500 | 0.2 mm | 0.1/100 | 1/100 |
| ND 500 to 2000 | 0.4 mm | 0.2/100 | 2/100 |
| ND 2000 to 5000 | 0.8 mm | 0.5/100 | 3/100 |

표 2에는 Helicoflex 개스킷을 채용하는 플랜지의 크기에 따른 제작사의 권장 평면도(flatness)를 나타내었다. 평면도를 나타내는 세 가지의 항목 중 첫 번째 열은 단차의 허용높이를 나타낸다. 평면도는 개스킷의 직경에 따라서 약간씩 다르지만 아주 정교하게 가공되어야함을 알 수 있다.

그림 2에는 Helicoflex 개스킷의 압축특성 곡선을 개략적으로 나타내었다. 일반적으로 Helicoflex 개스킷은 압축률 $\epsilon_0 \sim \epsilon_2$ 의 범위에서 사용하며 처음 사용할 때의 선하중 값이 낮으면 여러 차례 사용할 수도 있다.

3. Helicoflex 기밀특성 실험

KSTAR 진공용기 포트에는 ConFlat 개스킷을 쓸 수 있는 소형 원형 플랜지를 제외하고 대부분 Helicoflex 개스킷을 사용한다는 계획을 가지고 있는데 이에 대비해 사용예정인 특정 모델 Helicoflex 개스킷의 기밀특성 특히 토크(또는 선하중), 변형량, 기체누설률 간의 관계를 조사하여 개스킷의 기밀곡선을 구하는 것이 본 실험의 목적이다.

실험에 사용한 개스킷의 모델은 HND208Asp이고 지름은 7.6 mm, 가로세로가 1193 mm × 1040 mm이고 외피2, 외피1 그리고 스프링의 재료는 각각 Al, S.S 및 Inconel X-750이다.

시험용기는 30 mm 두께의 아래위 플랜지 두 개로 구성되어 있으며 크기는 1200 mm × 1050 mm로 KSTAR 진공용기의 Neutral Beam Injection 포트 플랜지 크기에 맞게 제작되었다. 재료는 S.S304L을 사용했으며, 볼트는 M18을 쓰도록 설계되어 있고, 볼트 중심간 거리는 66 mm이다. 개스킷 홈의 깊이와 폭은 각각 6 mm 및 52 mm이다. 홈의 깊이는 먼

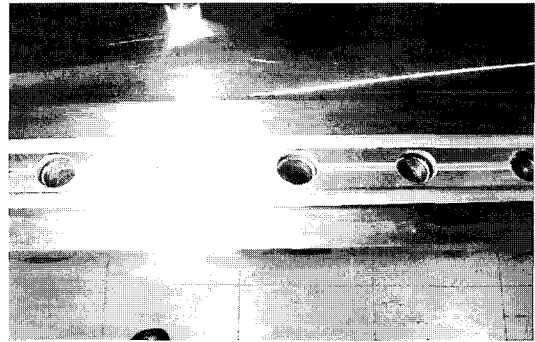


그림 3. Helicoflex HND208Asp 개스킷.

집속시에도 개스킷의 과도한 압축을 방지하도록 설계되어졌다. 그림 3은 Helicoflex 개스킷이 시험용기의 플랜지 홈에 놓여져 있는 모습이다.

시험용기의 배기를 위한 주펌프는 210 L/s의 TMP이며, 압력과 온도를 기록하기 위해서 X-Y 기록계를 사용했다. 헬륨 누설 측정기는 Alcatel ASM 180 TD+모델로 누설률 2.0×10^{-11} mbar · L/s까지 측정 가능하다.

제작사에 의하면 이중 개스킷인 Helicoflex HND208Asp의 최적 선하중은 800 N/mm로 단일 개스킷인 다른 모델들에 비해 두배 가량 높다. 선하중을 공급하기 위해 볼트 당 가해주어야 할 하중 및 이 하중을 생성하기 위한 토크의 구체적인 계산은 표 3에 나타내었다. 계산결과 선하중 800 N/mm를 생성하기 위한 필요 하중은 5385.6 kgf이고, 마찰계수가 0.3이라면 필요 토크는 3683.75 kgf · cm이다. 하중은 마찰력이 작아질수록 반비례하여 커진다. 참고로 본 실험에서는 마찰력을 줄이기 위해 모든 볼트에 고체 윤활제(MoS₂)를 사용했으며, 그림 6에는 마찰력에 따른 M18 볼트의 하중 대 토크를 나타내었다.

한편 개스킷을 누르기 위해 볼트에 가해준 하중에 의해 발생하는 응력이 볼트의 내력을 넘지 않도록 주의할 필요가 있다. 표 4와 같이 KS규격에는 스테인리스강 재료에 따른 볼트의 내력범위가 명시되어 있다. 시판되는 대부분의 나사는 S.S 304 재료(A2)에 70 계열이다.

실험은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- a) Helicoflex 개스킷을 끼우고 볼트에 힘을 가하지 않은 상태에서 플랜지간 간격을 측정한다.

- b) 토크값을 100 kgf · cm씩 증가시키면서 볼트를 조인 후 상하 플랜지간 간격을 측정한다.
- c) 토크값 500 kgf · cm로 볼트를 조인 후 시험용기의 배기를 시작한다.
- d) 토크값을 계속 증가시키면서 시험용기의 진공도와 개스킷의 기체누설률(간이 후드법에 의해 측정)을 기록(Y₀값 확인)하고 플랜지간 간격도 측정한다.
- e) 원하는 기체누설률 값(1.0 × 10⁻¹⁰ mbar · L/s) 이하가 되면 용기의 가열을 시작한다.
- f) 가열 후 용기를 냉각시키고 기체누설률을 측정한다.
- g) 누설이 있으면 토크를 증가시키면서 기체누설률 측정을 반복한다.

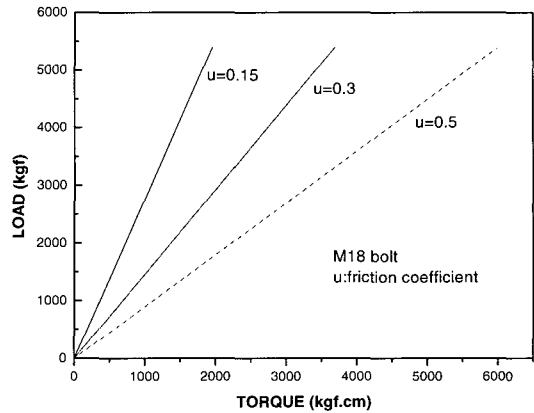


그림 6. 마찰력에 따른 M18 볼트의 하중 대 토크.

4. 실험결과 및 토의

그림 7은 플랜지 각 모서리 일정 위치에서의 토크값 변화에 따른 플랜지 사이의 간격을 측정한 결과이다. 이와 같이 간격이 위치마다 일정하지 않는 것은 시험용기의 플랜지가 전반적으로 휘어져 있고 국부적으로 가공이 정교하지 않기 때문이다. 어느 정도 개스킷이 자리잡은 후에는 토크를 증가시킬수록 간격이 조금씩이나마 계속 줄어든다. 그렇지만 처음 개스킷을 장착하고 나사를 체결하기 시작해서 400 kgf · cm의 토크로 조일 때까지의 변화량에 비해 그 이후의 변화량은 상대적으로 매우 적다. 사용한 토크렌치의 정격과 수동으로 조이는 데 힘의 한계가 있어서 토크를 3200 kgf · cm까지만 가했으므로 플랜지간의 면접촉까지는 이르지 않았다.

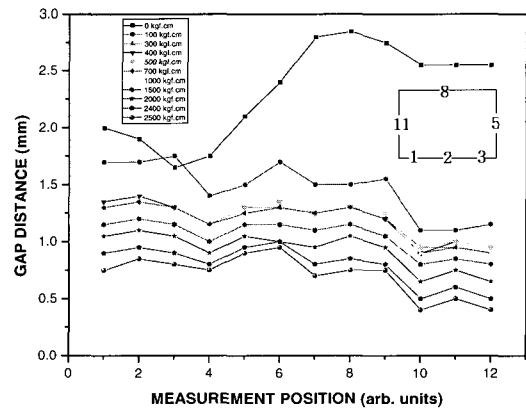


그림 7. 플랜지 주위 일정 위치에서의 간격 측정값의 변화.

| |
|---|
| <p>1) 하중의 계산(Helicoflex HND208Asp의 최적 선하중 적용)</p> $F = Y \cdot l$ $= 5385.6 \text{ kgf}$ <p>Y: 선하중(= 81.6 kgf/mm) l: 볼트간 거리(66 mm)</p> |
| <p>2) 토크의 계산(M18 볼트의 예)</p> $T = 0.5F(1.15 \times d_c \times \mu_s + P/\pi + 1.34 \times d \times \mu_w)$ $= 3683.75 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ <p>F: 축력(kgf) - 5385.6 kgf d_c: 유효지름(mm) - 16.376 mm d: 외경(mm) - 18 mm P: 피치(mm) - 2.5 mm μ: 마찰계수(0.3의 경우)</p> |

표 3. 하중 및 토크의 계산.

| |
|--|
| <p>· 오스테나이트 계열의 볼트</p> <ul style="list-style-type: none"> a) 50 series의 내력: 21 kgf/mm² b) 70 series의 내력: 45 kgf/mm² c) 80 series의 내력: 60 kgf/mm² |
| <p>· 오스테나이트 계열 70 series M18(A_e=192 mm², μ: 0.3)의 최대허용 축력</p> $\Rightarrow F = A_e S (\mu = 0.3)$ $= 6048 \text{ kgf}$ |

표 4. 오스테나이트 계열 볼트의 내력과 축력 계산.

표 5. 개스킷 홈 및 플랜지의 평면도와 표면 거칠기.

| | 평면도(mm) | | | | 표면 거칠기 Ra(μm) | | | |
|-------------|---------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| | edge1 | edge2 | edge3 | edge4 | edge1 | edge2 | edge3 | edge4 |
| 플랜지 개스킷 홈 | 0.15 | 0.13 | 0.1 | 0.25 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.06 |
| 플랜지 개스킷 접촉면 | 0.4 | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 0.07 |

표 5는 시험용기의 각 모서리에서 하부 플랜지의 개스킷 홈 및 상부 플랜지면의 4 면에서 측정된 최대 단차와 표면거칠기의 결과를 나타낸 것이다. 측정결과에서 알 수 있는 것과 같이 개스킷 홈 및 플랜지면의 평면도는 Helicoflex 제작사의 최적 요구 조건(표 2)을 충족시키지 못하는 반면 표면 거칠기는 지나치게 낮음을 알 수 있다.

표 6에는 각 볼트에 가한 토크와 그에 따른 진공도 및 누설률의 변화를 정리했다. 플랜지 가공상태가 좋지 않음에도 불구하고 적어도 상온에서는 적절한 토크값에서 기밀이 형성되었다. 그림 8은 측정 자료(표 6)와 계산 결과를 이용한 Helicoflex 밀폐특성 곡선을 나타낸 것이다. 측정결과 Y_0 에 해당되는 토크값은 2500 kgf·cm(선하중 543 N/mm)이었다. 적정 Y_0 값은 대략 최대 선하중 값의 절반정도 [4](본 실험에서 사용한 HND208Asp의 경우 약 543 N/mm)에서 결정되는 것을 고려하면 측정결과는 다소 높은 값이다. 이와 같이 Y_0 값이 예상치 보다 높게 나온 것은 개스킷 홈 및 플랜지면의 평면이 단차가 매우 크고 표면거칠기는 지나치게 낮아서 제작사의 사용조건에 맞지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 단차가 커지면 같은 토크로 나사를 조여도 각 위치마다 개스킷에 가해지는 하중이 편중되기 때문에 좋은 기밀상태를 얻을 수 없다.

Helicoflex 개스킷에 대각선과 수직 방향의 굽힌 자국 및 결함 등은 발견되지 않았다. 사용 전 개스킷면은 축방향으로 인발한 가공무늬가 선명하지만 한 번 사용한 개스킷은 3~4 mm 폭으로 플랜지 면과 같은 경면으로 바뀐다. 표면거칠기가 권장하는 값 수준이었다면 플랜지 면의 가공무늬가 전사되어 나타나고 이는 개스킷 면과 플랜지 면 사이에 기밀을 형성하고 유지하는데 더 큰 도움이 되었을 것으로 판단된다. KSTAR 진공용기 제작시에는 대형 플

표 6. 각 볼트의 토크에 따른 진공도 및 기체누설률.

| 토크(kgf·cm) | 진공도(mbar) | 누설 크기(mbar·L/s) |
|------------|----------------------|-----------------------|
| 800 | 7.5×10^{-6} | 5.0×10^{-4} |
| 1200 | 2.8×10^{-7} | 8.3×10^{-6} |
| 1800 | 2.4×10^{-7} | 1.6×10^{-7} |
| 2300 | 3.5×10^{-8} | 4.0×10^{-8} |
| 2500 | 2.0×10^{-8} | $< 2 \times 10^{-11}$ |

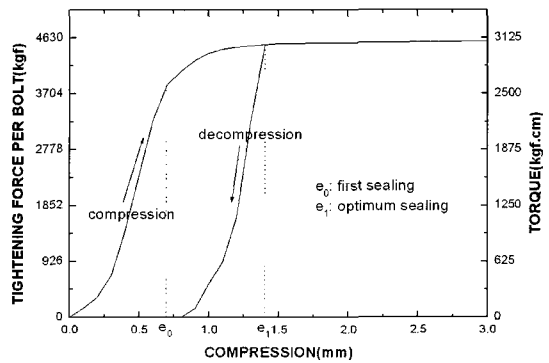


그림 8. 측정된 Helicoflex HND208Asp의 밀폐 특성 곡선.

랜지의 개스킷 홈 및 플랜지면의 평면도와 표면거칠기를 설계요건에 맞게 잘 관리하는 것이 필요하다.

한편 토크값이 3000 kgf·cm 이상에서부터는 누설크기의 변화가 나타나지 않았으며, 해체 후 개스킷 표면을 관찰한 결과 개스킷 내부의 스프링자국이 밀폐면에 나타나있었다. 따라서 이 값 이상에서는 Helicoflex 개스킷의 복원력이 상실되는 것으로 간주했다. 플랜지 면의 수정을 위해 2차 가공을 했기 때문에 개스킷 홈의 실제 깊이가 설계치보다 낮아져서 개스킷이 예상보다 과도하게 눌러졌을 가능성이 있다. 따라서 홈의 깊이를 잘 결정하고 관리하는 것이 개스킷의 손상을 막고 재사용을 가능케 할 것이다.

3000 kgf·cm의 토크가 한계치로 나타난 이번 측정결과는 제작사가 제시한 최적 선하중을 공급하기 위한 토크값의 약 80 %에 해당되는 값이다. 이 실험결과를 토대로 판단했을 때 Helicoflex 제작사에서 제공하는 기준에 맞춰서 제작된 플랜지의 경우라면 최적 선하중은 제작사의 권장치(800 N/mm)

보다 상당히 낮을 것으로 추정된다. ConFlat 개스킷의 권장 선하중 값들도 실제 필요한 값보다 높다는 보고도 있으므로 이를 참고할만하다 [5].

Helicoflex 개스킷의 가열에 따른 안정성 검증을 위해서 140~150 °C의 온도에서 24시간 실시했다. 그런데 가열 후 누설(2.0×10^9 mbar · L/s)이 발생되었으며 약 3000 kgf · cm까지의 추가적인 체결토크 증가에 의해 누설이 일단 교정되었으나 추가 가열에 따라 누설이 다시 발생했고 더 이상 개선되지 않았다. 이 결과로부터 정밀하게 가공되지 않는 플랜지의 경우 특히 가열에 따른 기밀의 안정성은 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

한편 국내에서 시판되는 나사는 대체로 영세업체에서 제작되기 때문에 내력 또는 최대 토크 값을 알 수 없고 마찰력에 따른 인가 토크 대 실제 하중 특성도 나사마다 다르다 [6]. 보다 정확하게 플랜지를 체결하기 위해서는 사용하는 볼트의 마찰력 및 내력범위를 직접 측정해 두는 것이 좋을 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) 실험에 사용한 플랜지의 가공상태가 설계요건을 잘 충족시키지 못했다.
- 2) 플랜지 가공상태가 좋지 않음에도 불구하고 상온에서는 2500 kgf · cm 이상의 토크범위에서 기

밀을 형성했다. 이때 누설률은 2×10^{-11} mbar · L/s 이하이었다.

- 3) Helicoflex HND208Asp의 최적 선하중은 제작사가 제시하는 800 N/mm보다 상당히 낮을 것으로 추정되며 최대 토크값은 3000 kgf · cm이었다.
- 4) 가열에 따른 안정성을 보장하기 위해서는 플랜지가 설계요건에 맞도록 가공되지 않으면 안된다.
- 5) 더 정량적인 실험이 되기 위해서는 사용 나사의 체결특성도 측정하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 실험은 과학기술부 KSTAR 프로젝트의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] G. S. Lee, et al., Nucl. Fusion **41**(10), 1515 (2001).
- [2] Helicoflex seal의 정보, 제작자 및 구입처는 www.helicoflex.com에 방문하면 알 수 있다.
- [3] 배석희, 인상렬 외, 진공공학(한국경제신문), p469 (2000).
- [4] D. H. Mullaney, M. A. Mozeleski, and R. B. Fleming, J. Vac. Sci. Technol. **A1**(2), 1331 (1983).
- [5] K. Obara et al., Jpn. J. Vac. Soc. **32**, 2 (1989).
- [6] 인상렬, 박미영, 한국진공학회지 **10**(2), 155 (2001).