

## ICRF 안테나에서의 고주파에 의한 열부하

### RF Heat Load on ICRF Antenna

배영덕, 곽종구, 홍봉근  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

ICRF 안테나의 정상 운전시 고주파에 의해 나타나는 열부하 분포를 이론적으로 계산하였으며, 실험 결과와 비교하였다. Faraday shield (FS) 근처 영역에 대해 포로이달 방향으로의 자기장 분포를 계산하고 FS 표면에서의 열부하 분포를 도출하였다. 인접하는 FS를 바라보는 쪽의 표면에 대한 열부하가 가장 높았다. 토로이달 방향으로 전류띠를 포함한 cavity box 내부 영역에 대해 자기장 분포를 구하여 FS의 토로이달 방향에 대한 열부하와 전류띠 표면에서의 열부하 분포를 계산하였다. 안테나에 대한 고주파 시험의 일환으로 전류띠-1의 아래쪽 half strap에 고주파를 인가하여 고주파에 대한 성능 시험을 수행하였으며, 이 때 측정된 적외선 영상으로부터 FS 및 전류띠에서의 온도 분포를 구하였다. 이 결과와 계산한 열부하 분포와 비교하였다.

#### Abstract

RF heating profiles that occur during normal operation of ICRF antenna were theoretically studied and compared with the experimental results. The poloidal configuration of a magnetic field was calculated using a commercial 2-D code, and the heat load along the FS surface was deduced. The heat load on the surface facing with the adjacent FS was highest. The toroidal profile of the magnetic field in the cavity box was calculated, and toroidal distributions of heat loads on the FS and the strap were calculated. A RF test was carried out to investigate the standoff capability of the antenna. In this test, temperature distributions on the FS and the strap were measured using a IR camera and were compared with the calculated heat loads.

## 1. 서론

고주파에 의한 ICRF (Ion Cyclotron Range of Frequency) 안테나의 가열현상은 설계

시부터 고려되어야 할 사항이며, 안테나의 성능을 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다 [1]. 특히 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 토카막의 ICRF 가열장치는 300초의 장펄스로 운전되므로 고주파에 의한 열부하는 Faraday shield (FS)의 손상을 가져올 수도 있으므로 그 영향을 면밀히 평가해야 한다. 본 논문에서는 고주파에 의한 열부하를 상용 2-D code(QuickField v.4.2)를 이용하여 계산하였으며, 실제 실험 결과와 비교하였다.

## 2. 열부하 분포의 계산

안테나에 열부하가 가장 큰 FS의 경우, 고주파에 의한 열부하는 기하학적 구조에 의해 결정된다. 포로이달 방향에서 바라본 FS 부근의 자기장 분포는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 전류띠에 고주파 전류가 흐를 때 발생하는 자기장이 FS 사이를 통과하게 되고, FS 표면에 전류가 유기되며, 표면 저항에 의해 열이 발생하게 된다. 두 FS 사이에서 자기장이 압축되는 것을 알 수 있으며, 압축 정도를 나타내는 flux compression factor,  $\xi$ 는 FS가 없을 때의 자기장  $B_{\perp 0}$ 와 FS가 있을 때의 자기장  $B_{\perp}$ 에 의해

$$\xi = \frac{\oint B_{\perp}^2(s) ds}{\oint B_{\perp 0}^2(s) ds} \quad (1)$$

와 같다. 본 안테나의 경우  $\xi$ 는 5.4이다. 이로부터 FS 표면을 따른 열부하의 분포는

$$p(x) = \frac{1}{4} \frac{\eta}{\delta} [K_{\perp}^2(x) + \xi K_{\parallel}^2(x)] \quad (2)$$

와 같으며, 여기서  $\eta$ 는 resistivity,  $\delta$ 는 skin depth,  $K$ 는 전류밀도[A/m]이다. FS의 폴로이달 표면을 따라 열부하를 구하면 Fig. 2와 같다.

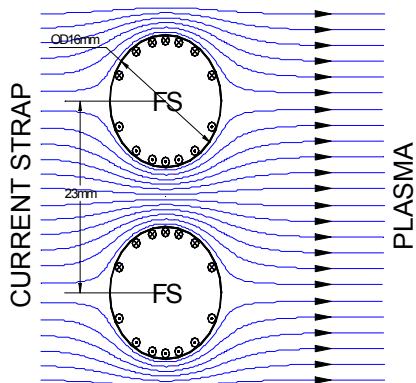


Fig. 1. Compression of the radial magnetic flux in the gap between two adjacent FSs.

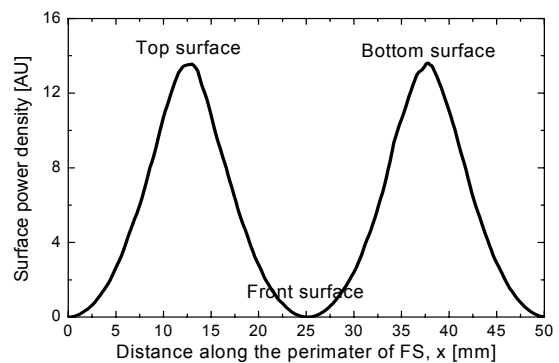


Fig. 2. The heat flux distribution along the perimeter of a FS.

Fig. 2에서  $x=0$ 는 FS 표면의 전류띠쪽 가장 안쪽 지점을 나타내며,  $x$ 는 표면을 따라 시계방향으로 이동한 거리이다. Fig. 1로부터 예상할 수 있듯이 인접한 FS를 바라보는 표면의 열부하가 가장 높음을 알 수 있다. 이 열부하는 FS 간의 간격이 좁을수록 증가하며, 반면 차폐효과는 증대된다. 따라서 적절한 간격을 유지하는 것이 중요하다. 또 간격이 너무 좁은 경우, 높은 열부하로 인한 열응력에 의해 간격이 좁아지고 열부하가 더 증가하여 열응력이 더욱 증가하는 현상이 급속도로 진행되어 FS의 손상을 유발할 수 있다 [2].

토로이달 방향의 열부하는 토로이달 방향에서 바라본 자기장 분포에서 FS가 지나는 중심선 위치에서의 자기장으로부터 (2)식과 같은 방법으로 구할 수 있다. 전류띠에 1 kA의 전류가 흐를 때 자기장을 구하면 Fig. 3과 같다. 이로부터 FS 중심선 위치에서의 자기장 값을 이용하여 FS에서의 열부하를 구하면 Fig. 4와 같다. 여기서  $z=0$ 는 FS가 cavity box의 왼쪽 벽과 만나는 지점이며,  $x$ 는 FS의 중심선을 따라 이동한 거리이다. Cavity box 근처와 septum 근처의 FS 표면에 열부하가 높음을 알 수 있다.

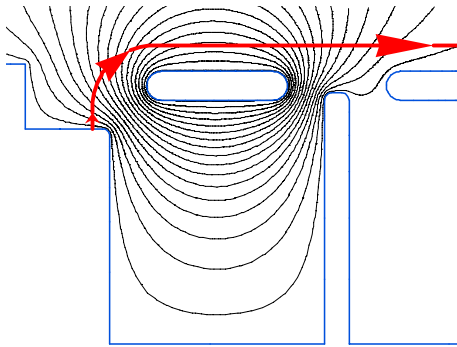


Fig. 3. The magnetic flux profile around the current strap. The arrow line is the axis of a FS.

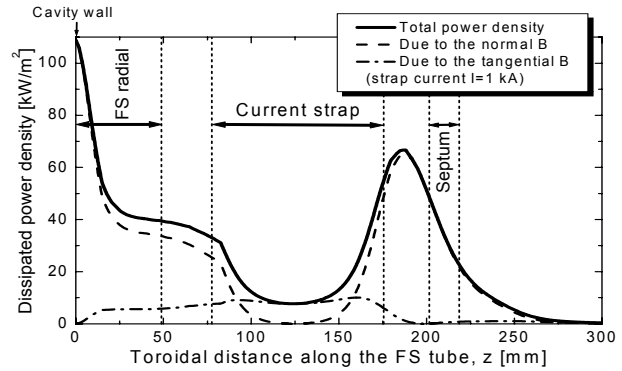


Fig. 4. The average heat flux distribution along a FS.

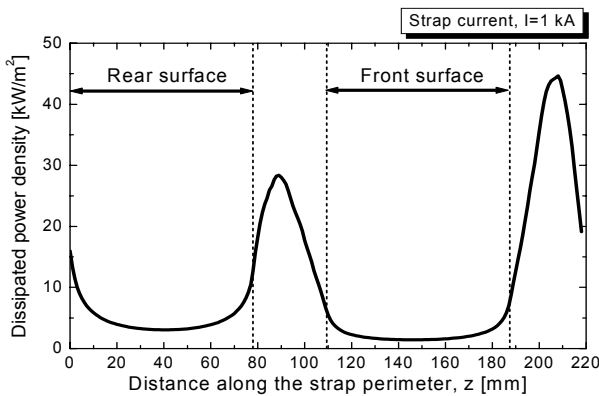


Fig. 5. The heat flux distribution along the perimeter of a current strap.

전류띠에서의 열부하는 Fig. 3의 자기장 계산 결과로부터 전류띠 표면에서의 전류밀도를 구하여 계산할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 그림에서  $z=0$ 는 전류띠의 안쪽 직선부의 오른쪽 끝 지점이며,  $z$ 는 전류띠의 표면을 따라 시계방향으로 이동한 거리이다. Cavity box와 septum과 인접한 표면에서의 열부하가 현저히 높음을 알 수 있다.

### 3. 실험 결과와의 비교

안테나 특성 시험의 일환으로 전류띠-1의 하단 half strap에 고주파를 공급하여 고전압 특성을 시험하였다. 이 때 적외선 카메라를 이용하여 안테나 전면의 온도 분포를 측정하였으며, 계산 결과와 비교하였다. 비교 대상이 되는 shot은 300초 장펄스 시험을 시행한 shot#11182003-13으로서 최대전압은 15.2 kVp, 전류띠 접지 지점에서의 전류는 346 A이었다. 적외선 카메라로 촬영한 영상은 Fig. 6과 같다. 이 영상으로부터 FS#10의 포로이달 방향으로의 온도 분포를 그려보면 Fig. 7의 점선과 같다. 또한 전류띠에 346 A의 고주파 전류가 흐르는 경우의 열부하 분포를 계산한 것은 실선으로 나타내었다. 두 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

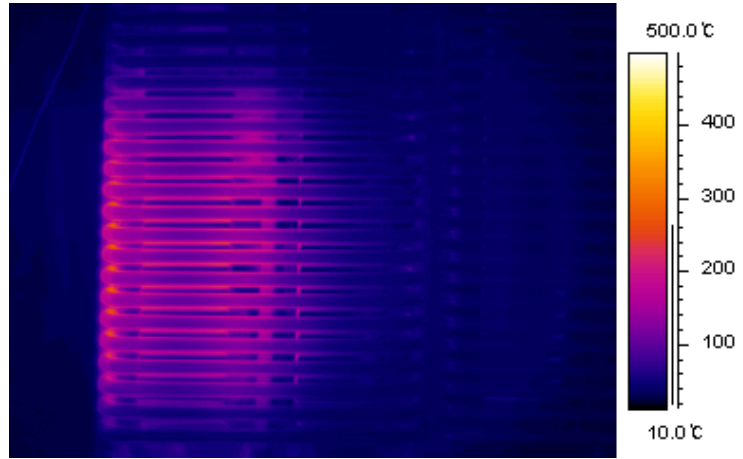


Fig. 6. The IR view of the prototype ICRF antenna at t=300 sec for the shot #11182003-13

FS 표면에서 수평 방향으로 측정된 온도 분포는 Fig. 8의 점선과 같다. 그림에서 실선은 계산한 열부하 분포이며, 두 결과를 비교할 수 있는 영역은 FS가 직선으로 바라보이는  $x > 40$  mm의 영역이다. 두 분포의 경향은 유사하나 높이의 비가 다른 것은 수평 방향으로의 열전달 특성 때문인 것으로 사료된다.

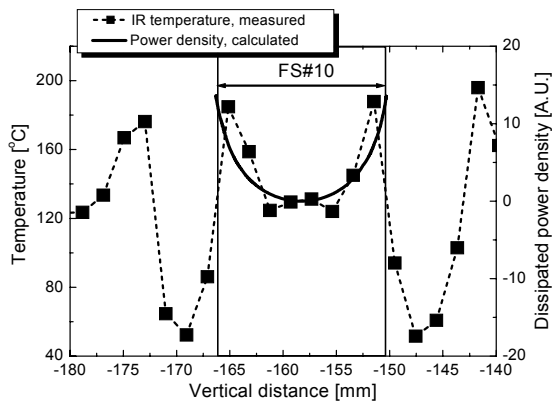


Fig. 7. A vertical temperature distribution on FS#10 for the shot#11182003-13.

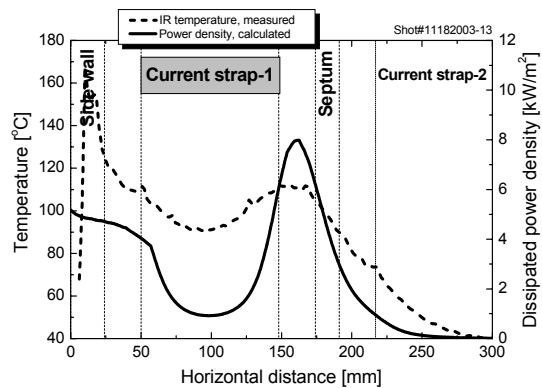
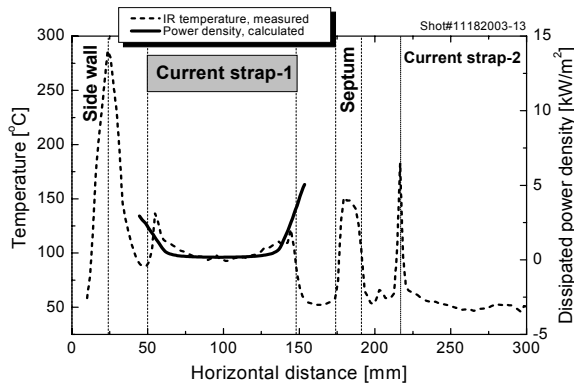


Fig. 8. A horizontal temperature distribution on FS#16 for the shot#11182003-13.



**Fig. 9. A horizontal temperature distribution on the current strap between FS#9&10 for the shot#11182003-13.**

나 구조 개선에 이용할 수 있을 것이다. 또한 제작된 안테나의 고주파에 대한 가열 특성이 설계시 예상한 바 그대로 나타났으며, 이로서 안테나 설계의 신뢰성을 다시 확인할 수 있었다. 앞으로의 과제로서, 계산된 열부하로부터 온도를 도출하여 측정치와 직접 비교하는 작업이 요구된다. 또한 3-D 전자기 해석을 통한 보다 정확한 열부하 계산이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] D. J. Taylor, F. W. Baity, C. L. Hahs, B. W. Riemer, P. M. 교무, and D. E. Williamson, "Heating profiles on ICRF antenna Faraday Shields", *Fusion Engineering* (1991) pp.98-102.
- [2] P. M. Ryan, F. W. Baity, R. H. Goulding, G. R. Haste, D. J. Hoffman, K. E. 깨술, and J. H. Whealton, "Methods of Calculating Selected Geometrical Effects in the Design of ICRH Antennas", *Fusion Engineering and Design* vol. 24, pp.135-157, 1994.

적외선 카메라로 측정된 전류띠에서의 온도 분포는 Fig. 9의 점선과 같다. 이 온도 분포는 FS#9와 FS#10 사이에서 수평 방향으로의 분포이며, 계산된 열부하 분포와 비교하였다. 비교 영역은 앞쪽에서 보아 직선으로 바로 보이는 영역에 한정하였다. 두 분포가 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

고주파에 의한 안테나의 가열 특성을 이론적으로 계산하고 실험 결과와 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다. 열부하가 높아 온도가 많이 올라가는 부분을 이론적으로 예측할 수 있었으며, 차후 안테