

## KT-2 토카막에서 진공용기의 투자율 변화가 플라즈마에 미치는 영향

정승호, 인상렬  
한국원자력연구소

### 요 약

KT-2 토카막 진공용기의 투자율이  $\mu_0$  보다 큰 값을 갖게 될 때 플라즈마에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 POISSON 코드를 이용해 null point 위치변화, 최외곽밀폐자기면의 변화, 진공용기 내부의 자장변화 등을 계산하였다. 진공용기의 투자율 변화의 최대 허용치를  $1.15\mu_0$  라 정할 때 플라즈마가 받는 영향은 무시할 수 있었다.

### 서 론

KT-2 진공용기는 진공배기, 각종 보조가열, 진단등을 위한 100 여개의 port를 갖는 12mm 두께의 SUS304L로 제작되도록 설계되었다<sup>[1]</sup>. 실제 진공용기의 제작시 가공 및 용접 과정에서 재료의 투자율의 변화는 필연적이며 특히 KT-2 진공용기처럼 상대적으로 용접부위가 많은 경우 진공용기의 투자율이  $\mu_0$  보다 큰 값을 갖게 되어 토카막 운전중에 진공용기가 자화되게 된다. 이러한 진공용기의 자화가 플라즈마의 MHD 평형에 어떤 영향을 미치게 될지 확실치 않으며 이런 문제점을 피하기 위해 투자율의 변화가 작은 재료의 사용을 요구할 수 있으나 이는 용기제작의 경제성과 직결되며 따라서 플라즈마의 MHD 평형에 큰 영향을 주지않는 투자율의 최적치를 제시하는 것이 실제 용기제작시 필요하다고 판단된다.

한편 다음세대 핵융합장치의 1st wall 및 blanket structure의 재료로 열적특성 및 내방사선특성이 austenitic steel(예, SUS316L) 보다 우수한 ferritic/martensitic steel(예, MANET, HT-9) 혹은 vanadium alloy를 고려하고 있다<sup>[2]</sup>. 그런데 이들의 강자성때문에 비록 강한 토

로이달 자장하에서 자기적으로 포화되었다 하더라도 여전히 1.0 보다 높은 투자율을 갖게 된다. 예를들어 HT-9의 경우 토로이달 자장이 1.2T 일때 투자율  $2.0\mu_0$  그리고 3.0T 일때 포화투자율은  $1.2\mu_0$  값을 갖는다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 이러한 진공용기의 자화가 플라즈마에 미치는 영향을 평가하기 위해 상대 투자율  $K_m = \mu/\mu_0$  값을  $1.0 \leq K_m \leq 10.0$  범위에서 변화시키면서 먼저 플라즈마 발생단계(SOP)에서 null point의 위치변화와 자장변화를 그리고 플라즈마 평형단계(SOF)에서 최외각밀폐자기면(last closed magnetic surface)의 변화 및 자장변화를 계산하였다. 더불어 플라즈마 제어에 영향을 미칠 수 있는 펄스자장 투과시간(pulsed field penetration time)을 계산하였다.

### KT-2 플라즈마 발생에 자화된 진공용기가 미치는 영향

토카막 진공용기의 상대투자율  $K_m$  값이 여러 가지 요인으로 1.0 보다 큰 값을 갖게될때 진공용기 자체가 플라즈마 발생 및 MHD 평형에 미치는 영향을 평가하기 위해 POISSON 코드(LA-UR-87-126)를 이용하여 KT-2 토카막에 대해 평형자장을 계산하였다. KT-2 토카막의 진공용기는 한개의 직선과 3개의 원주로 이루어진 내부 높이 1316mm 넓이 846mm인 D형에 가까운 단면을 갖고며 재료는 12mm 두께의 스테인레스강 304L이다. 계산에 필요한 KT-2 토카막의 PF 코일의 크기와 위치는 표1에 나타내었다. 계산은 플라즈마 발생시점(SOP)과 플라즈마가 평형상태에 이른시점(SOF)에 대해 수행하였으며 이때 각 PF 코일에 흐르는 전류값은 표2에 나타내었다<sup>[4]</sup>.

먼저 플라즈마의 발생에 중요한 역할을 하는 null point 형성 및 그 위치가 자화된 진공용기에 의해 어떻게 변화되는가를 계산하였다. 그림1은  $K_m$  값을 1.0, 1.15, 1.5로 변화시키면서 진공용기의 R축(Z=0)상의  $B_z$  값을 계산한 결과이며 그림2는 null point 근처를 확대한 그림이다.  $K_m=1.0$  일때 null point 위치 ( $R=1181.15\text{mm}$ )에 대해  $K_m=1.15, 1.5$  일때 null point 위치변화는 각각 0.3mm 와 0.85mm로 진공용기의 내부 너비(846mm)에 비해 무시할 수 있는 변화임을 알 수 있다. 이 계산에서 진공용기 내부에서의  $K_m=1.0$  일때에 대한 자장 변화( $\Delta B$ )를 그림3에 나타내었는데 그림에서 보듯이  $\Delta B$ 는 진공용기의 안쪽벽쪽에서 크고 바깥쪽벽쪽으로 갈수록 작아지는 경향을 보이며 안쪽 리미터( $R=1122\text{mm}$ ) 상에서의 자장 변화  $\Delta B$ 는  $K_m=1.15, 1.5$ 에 대해 각각 0.195G, 0.714G로 원래 자장값( $K_m=1.0$  일때 자장값)의

0.467% 와 1.709%에 해당된다. 이러한 값들은 플라즈마 발생단계에서 크게 중요하지 않으며 일반적인 가공 및 용접과정에서  $K_m$  값이 1.2 이상 크게 변하지 않음을 고려할때 KT-2 토카막의 플라즈마 발생단계에서 진공용기의 투자율 변화에 의한 영향은 무시할 수 있다.

### KT-2의 MHD 평형에 자화된 진공용기가 미치는 영향

플라즈마 평형은 MHD 평형코드에 의해 계산되지만 대부분의 MHD 평형코드들이 진공용기의 투자율을  $\mu_0$ 로 가정하기 때문에 자화된 진공용기의 영향을 평가하는데 적용이 곤란하여 먼저 평형코드를 사용하여 KT-2 플라즈마의 MHD 평형을 구한후<sup>[4]</sup> 이에 의해 계산된 플라즈마 전류 및 위치를 magnetic axis에 놓인 코일전류로 대체하고 POISSON 코드를 사용해 자화된 진공용기에 의한 자장변화를 계산하였다. 이때 MHD 평형계산에 사용된 코드는 FBMEC(자유경계 자가유체학적 평형코드)이다.

부반경이 25cm 그리고 magnetic axis를 R=1400, Z=0에 갖는 플라즈마에 대해  $K_m=1.15$  일때 계산된 자장의 변화는 안쪽 토로이달 리미터(Z=0, R=1122)와 안팎 separatrix(Z=0, R=1150, R=1650) 위치에서 각각 16.6G, 13.5G, 1.135G로 원래 자장값의 0.17%, 0.13%, 0.015%의 변화를 보였다. 이러한 작은 변화로 플라즈마 평형에 미치는 영향을 판단하기 힘들어  $K_m$ 값을 2.0, 5.0, 10.0 으로 크게 변화시키면서 리미터상의 밀폐자기면의 변화를 계산하였다. 그림4은 리미터가 R=1150에 있다고 가정하고 최외곽밀폐자기면의 변화를 그린 그림이다. 그림에서 보듯이  $K_m$ 값이 커갈수록 밀폐자기면은 세로로 길어지는 경향을 보이거나 R 방향의 변화는 크게 나타나지 않는다. 실제 계산된 값에 의하면  $K_m=10.0$  인 극단적인 경우에도  $K_m=1.0$ 인 경우에 비해 R 방향으로 7mm 정도밖에 커지지않으며 이 정도의 변화는 플라즈마 제어에 의해 충분히 해결될 수 있으며 따라서  $K_m \leq 1.15$  의 값을 갖는 진공용기가 플라즈마에 미치는 영향은 무시할 수 있다고 결론지을 수 있다.

### 진공용기 투자율에 따른 펄스자장 투과시간의 변화

자화된 진공용기가 플라즈마에 미치는 영향중의 다른 하나는 플라즈마의 제어에 관련된 펄스자장 투과시간(pulsed field penetration time)을 늘이는 것이다. 자장이 어떤 도체층을 통과하는 시간은 약  $3.4 \mu \sigma \alpha \ell$ 로 주어지며<sup>[3]</sup> 여기서  $\mu$ 와  $\sigma$ 는 투자율과 전기전도도,  $\alpha$ 는

도체면까지의 거리, 그리고  $L$ 는 도체의 두께이다. KT-2의 경우 허용  $K_m$  값을 1.15라 하면 펄스자장 투과시간은 약 15% 증가하며 이는 다른 요인들에 비해 큰 효과를 미치지 않는다고 볼 수 있다.

## 결론 및 논의

KT-2 진공용기 제작시 가공 및 용접과정에서 투자율이 변화될 것이며 이로 인해 토카막 운전시 진공용기가 자화될것이라 가정하고 진공용기의 자화정도(투자율의 변화정도)에 따른 플라즈마에 미치는 영향을 자장 계산을 통해 평가하였다.

계산시 투자율의 변화 폭은  $1.0 \leq K_m \leq 1.5$ 로 하였으며 특별한 경우  $1.0 \leq K_m \leq 10.0$  까지도 확대해 보았다. 그리고  $K_m=1.15$  값을 용기 제작과정에서 일어날 수 있는 투자율 변화의 최대치로 설정하고 계산결과를 이 값을 중심으로 논의하였다.

자화된 진공용기의 영향을 플라즈마 시작단계에서 null point의 위치변화를 그리고 플라즈마 평형단계에서는 최외곽밀폐자기면의 변화를 통해평가하였으며, 이 두단계 모두에 대해 진공용기 내부에서의 자장변화를 계산하였다.  $K_m=1.15$  일때 null point 및 최외곽밀폐자기면의 변화는 모두 1mm 이하로 그리고 자장변화는 0.5% 이하로 플라즈마에 미치는 영향은 무시할 수 있었다.

자화된 진공용기의 펄스자장 투과시간은  $K_m=1.15$ 일때 약 15% 길어지는데 이는 플라즈마 제어에 큰 영향을 주지 않는다. 마지막으로 진공용기가 자화될때 고려해야될 사항으로 진공용기에 미치는 자기적인 힘을 들 수 있으며 본 논문에서는 고려하지 않았지만 이 문제도 확인이 필요하다고 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 인상렬 등, "토카막 장치기술개발", KAERI/RR-1536/94, 한국원자력연구소(1995).
- [2] M. Dalle Donne, D. R. Harries, G. Kalinin, R. Mattas and S. Mori, J. Nucl. Mater., 212-215 (1994), P69.
- [3] S. N. Rosenmasser et al., DOE/ET-0058/5, U.S.DOE(1980).
- [4] 이광원 등, "토카막 실험기술 개발", KAERI/RR-1537/94, 한국원자력연구소(1995).

표1. KT-2 토카막의 PF 코일 중심위치 및 크기

coil	Rc(mm)	Zc(mm)	$\Delta R$ (mm)	$\Delta Z$ (mm)
PF1, 1'	525	$\pm 150$	250	300
PF2, 2'	525	$\pm 450$	250	300
PF3, 3'	525	$\pm 750$	250	300
PF4, 4'	750	$\pm 1150$	250	300
PF5, 5'	1050	$\pm 1275$	300	300
PF6, 6'	2000	$\pm 1175$	200	300
PF7, 7'	2500	$\pm 500$	150	150
Q, Q'(-Q)	1680	$\pm 640$	80	100
D, D'	1190	$\pm 590$	$\psi_o=60$	$\psi_i=20$

표2. KT-2 토카막의 OH 기본작동시 PF 코일에 흐르는 전류

coil	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	Q	D	$I_p$
t(s)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)	(kA)
-4.0(SOM)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0(SOP)	1475	1468	1472	987	1475	0	207	0	0	0
0.5(SOF)	309	568	997	1572	1689	-863	126	-20	10	500
5.5(EOF)	-2037	-2229	-2219	209	305	-1156	-15	-20	10	500
5.5+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

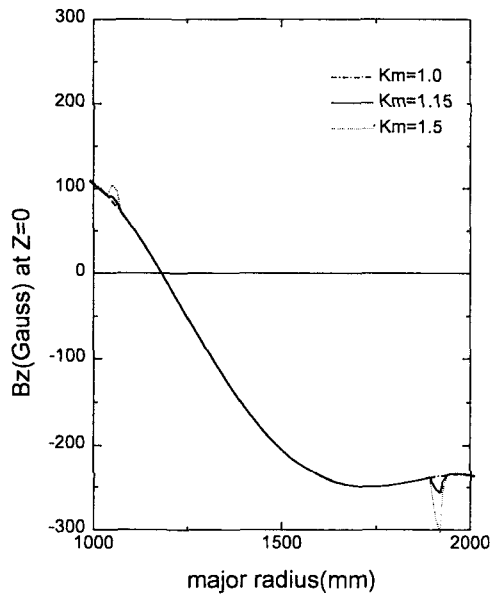


그림1. 진공용기 내부에서의  $B_z$  값

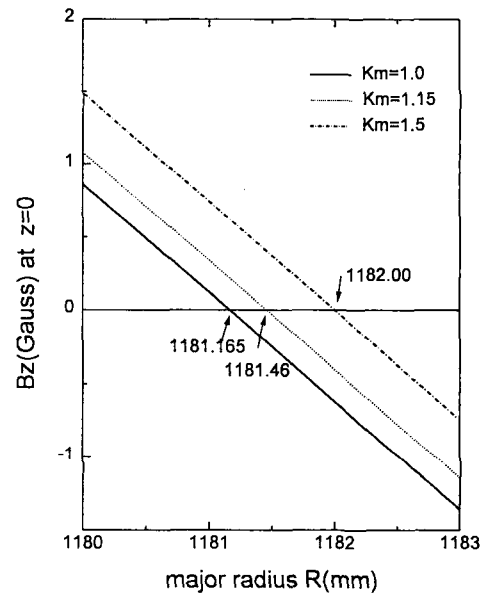


그림2. 진공용기의  $K_m$  값에 따른 null point의 위치변화

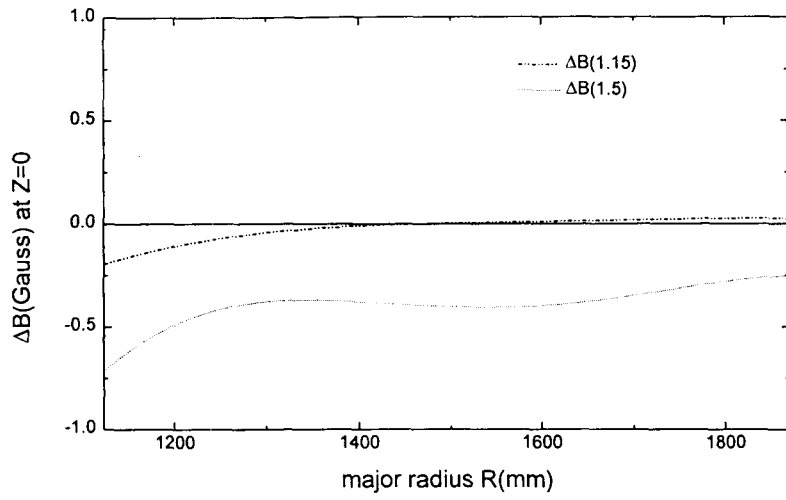


그림3.  $K_m$  값에 따른 진공용기내부에서의 자장변화  
 $\Delta B(1.15) = B_{K_m=1.15} - B_{K_m=1.0}$ ,  
 $\Delta B(1.5) = B_{K_m=1.5} - B_{K_m=1.0}$

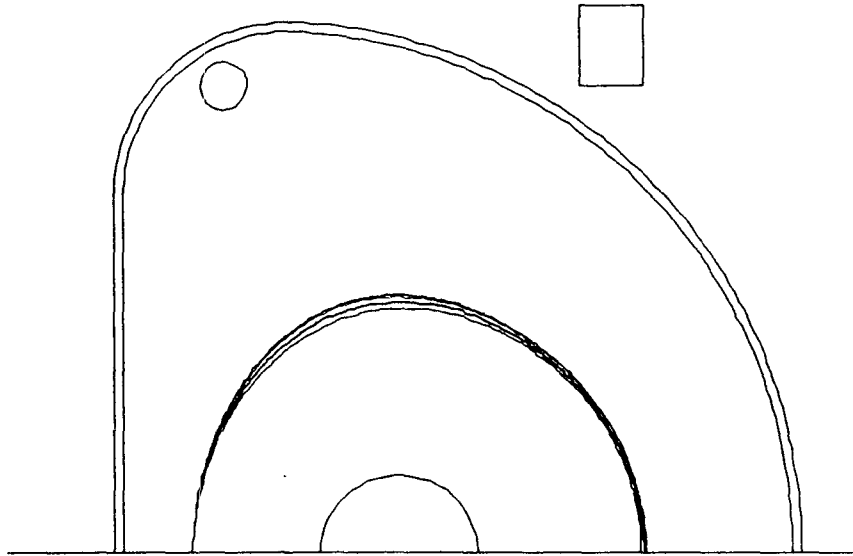


그림4. 진공용기의  $K_m$  값이 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 값을 갖을때 최외곽밀폐자기면의 변화  
(바깥쪽으로부터 10.0, 5.0, 2.0, 1.0 순)