'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

미임계 핵변환로 가속기 빔창의 온도 분포와 열응력 해석

Temperature and Thermal Stress Analysis of Accelerator Beam Window for Subcritical Transmutation Reactor

이용석, 정창현
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

송태영, 박원석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)시스템은 사용후 핵연료의 장수명 핵종을 핵변환시키는 목적으로 개발하고 있는 미임계 핵변환 시스템이다. HYPER에서 사용될 양성자 가속기의 출력은 1 GeV, 수 mA 이상의 고출력이므로 양성자 빔이 빔창을 통과하면서 높은 열이 빔창에서 발생하게 되어 빔창의 온도는 상승한다. 따라서 가속기 빔창의 열적, 구조적 건전성을 우선적으로 알아보는 것이 필요하다. 본 논문에서는 열·구조 해석 코드인 ANSYS[1]를 사용하여 HYPER의 이중 빔창에 대한 온도와 열응력 계산을 수행하였다. 빔 지름 10cm, 타원형 전류밀도분포를 가정할 때 빔 전류와 이중빔창 사이의 Pb-Bi 속도를 변화시키면서 빔창의 온도, 열응력의 변화를 알아보았다. 향후 빔 형태, 냉각 조건, 빔창 구조 등의 변화에 따른 온도, 열응력의 변화연구를 계속 수행하여 HYPER의 가속기 빔창이 건전성을 유지할 수 있는 최대 빔 전류를 설정할 계획이다.

Abstract

A subcritical transmuation system named HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) is being designed to transmute spent fuel. High energy proton beam of 1GeV and several mAs will interact with beam window which will be subject to undergo high temperature. In this study, the temperature and thermal stress calculations of double beam window using thermal-structural analysis code ANSYS[1] have been performed. Assuming 10cm beam diameter and parabolic beam current density, temperature and thermal stress of beam window have been investigated varying beam current and Pb-Bi velocity passing through the double window. It plans to establish the maximum allowable beam current after more temperature and thermal stress analysis for different beam shape, cooling condition and geometry of beam window.

1. 서론

HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)시스템은 현재 KAERI에서 사용후 핵연료의 장수명 핵종을 핵변환시키는 목적으로 개발하고 있는 미임계 핵변환로 시스템이다.[2] HYPER에서는 양성자와 핵파쇄 반응을 일으켜 중성자를 발생시키는 표적물로서 액체 Pb-Bi를 고려하고 있다. 액체 Pb-Bi 표적 시스템에서는 가속기에서 나오는 양성자 빔이 빔창을 통과하여 표적과 핵파쇄 반응을 일으킨다. 이 과정에서 빔창도 양성자와 반응하여 높은 열이 발생하게 되어 빔창의 온도는 상승한다. 빔창이 운전 범위 내에서 건전성을 유지하기 위해서는 우선 빔창의 온도가 용융점을 넘어서는 안되며, 열에 의한 기계적 부하에도 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

HYPER 시스템에서 고려되고 있는 빔창의 구조는 그림 1과 같은 이중 빔창 구조이다. 액체 표적인 Pb-Bi가 하부에서 상승하여 빔창 아랫부분을 냉각시키고, 빔창 사이로는 액체 Pb-Bi 냉각재를 추가로 흘려주게 된다. 이러한 이중 빔창 구조는 빔창의 냉각을 효과적으로 할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 가속기 출력과 빔창 냉각 조건을 변화시키면서 빔창의 온도 분포와 열응력을 열전달과 구조해석의 연성해석(coupled-field analysis)이 가능한 ANSYS 코드를 사용하여 계산하였다. 빔창 재료로는 advanced ferritic/martensitic 계열의 철금속인 9Cr-2WTa이 부식 특성, 방사선 조사 특성 등을 종합적으로 고려하였을 때 핵변환로 조건에서 가장 우수한 특성을 가지는 것으로 알려져 있으므로 이를 대상으로 계산을 수행하였다.

2. 계산 수행 방법과 가정

HYPER에서는 1GeV, 수mA 이상의 출력을 가지는 양성자 가속기가 필요하다. 본 논문에서는 ANSYS코드를 사용하여 빔 출력이 1GeV, 20mA인 경우 1GeV, 10mA인 경우 그리고 1GeV, 2mA인 경우에 대해 빔창 사이를 흐르는 냉각재의 속력을 변화시키면서 이중 빔창의 온도와 열응력 계산을 수행하였다. 이때 가속기 빔은 타원형세기로 지름 10cm로 입사된다고 가정하였고 하부에서 올라오는 액체 표적의 속도는 2m/sec로 일정하게 놓았다. 모든 경우에 표적과 냉각재의 입구온도는 613K로 가정하였다. 빔창의 단면이 사각형이므로 빔창의 구조를 3차원으로 모델링하였으며, 빔창 구조가 앞, 뒤 방향으로 대칭이므로 1/2대칭구조로 놓고 안쪽 빔창과 바깥쪽 빔창에 대해서는 따로 계산을 수행하였다. 빔창의 온도, 열응력 계산에서 빔창재료 9Cr-2WTa의 열적, 기계적 물성치는 표 1의 상온에서의 물성치를 사용하고 모든 온도에서 일정한 값을 갖는다고 가정하였다.[2]

빔창의 온도 계산을 위하여 Monte Carlo 코드인 LAHET[3]으로 모사한 이중 빔창의

열생성량 자료를 사용하였으며 빔 출력 1GeV, 20mA 경우의 빔창에서의 열생성량을 표 2에 나타내었다. 1GeV, 10mA인 경우와 1GeV, 2mA인 경우의 열생성량은 각각 1GeV, 20mA인 경우 열생성량 값의 1/2, 1/10으로 놓고 계산하였다. 또한 경계조건으로 안쪽 빔창 윗부분은 단열 조건으로 하였으며 냉각재와 접하는 빔창 면에 대해서는 유체 해석 코드인 FLUENT로 계산된 대류 열전달 계수를 평균하여 적용하였다. 표 3에 빔 출력과 냉각재 속도에 따른 평균 열전달 계수를 나타내었다. 냉각재 온도는 모든 경우 620K로 일정하게 두었다.

열전달 계산에서 나온 빔창의 온도를 입력값으로 하여 빔창의 열응력 계산을 수행하였다. 경계조건으로 앞, 뒤 방향으로는 대칭 조건을 사용하였고, 빔창의 윗부분의 높이방향 변위가 0이 되도록 하였다. 열응력 계산에서는 정상상태만을 고려하였고 모든 경우에 대해 빔창이 탄성 거동을 한다고 가정하였다. 따라서 최대 응력이 항복강도를 넘는 경우에는 이 계산에서는 소성 변형에 의한 응력완화가 고려되지 않았으므로 실제 응력 값보다 과대하게 예측된 값이 나오게 된다. 소성 영역에서의 정확한 응력 값을 알려면 소성 변형에 의한 응력완화 등을 고려해 주어야 하나, 빔창이 건전성을 유지하기 위해서는 빔창에 걸리는 응력이 항복강도를 넘지 않아야 한다고 보았으므로 소성 변형을 고려한 계산을 수행하지는 않았다. 응력의 절대값으로는 Von-Mises Stress를 사용하였고, 온도에 따른 9Cr-2WTa의 항복강도의 크기를 표 4에 나타내었다.[4]

3. 계산 결과

양성자 가속기의 빔출력과 빔창 사이를 흐르는 냉각재의 속도에 따른 빔창의 최대 온도와 최대 응력 계산 결과를 표 5과 표 6에 정리하였다. 계산 결과 빔의 강도가 가장 강한 안쪽 빔창의 중앙 부분에서 최대 온도와 최대 응력이 발생하였다. 따라서 바깥쪽보다는 안쪽 빔창의 온도와 응력을 분석하는 것이 빔창의 건전성 분석에 있어 중요하다.

양성자 가속기의 출력이 1GeV, 20mA이고 빔창 사이를 흐르는 냉각재의 속도가 6m/sec인 경우 계산 결과 빔창의 최고 온도가 1861K로 용융점인 1800K를 넘으므로 이 조건에서는 빔창의 국부적인 용융이 발생하여 건전성이 크게 위협받을 것으로 보인다. 이 경우에 대해서는 열응력 계산이 무의미하므로 열응력 계산은 생략하였다. 빔창 사이를 흐르는 냉각재의 속도를 15m/sec로 올린 경우는 빔창의 최고 온도가 1532K로 용융점 이하이나 이 또한 용융점과의 차이가 크지 않고, 최대 응력이 1530MPa로 항복강도를 넘어서는 것으로 나타났다. 열응력 계산에서 탄성 계산만을 수행하였기 때문에 소성 영역에서의 응력완화가 고려되지 않았으므로 실제 응력값은 이보다 작을 것이나 빔창이 건전성을 유지하기 위해서는 빔창의 거동이 탄성 영역 내에 있어야 한다고 보았으므로, 이 조건에서는 빔창이 건전성을 유지하기 어렵다고 보고 빔출력을 1GeV, 10mA로 낮추어 계산을 해

보았다. 이 경우 냉각재의 속력을 6m/sec, 15m/sec로 변화시켜 계산한 결과 최대 온도는 용융점보다 다소 낮게 나타났지만 이 경우에도 최대 응력이 항복 강도보다 높게 나타나 빔출력을 1GeV, 2mA로 더 낮추어 계산을 수행하였다. 1GeV, 2mA의 경우 냉각재 속도를 2m/sec와 6m/sec로 변화시켜 계산을 수행하였다. 냉각재 속도가 2m/sec 의 경우 최대 응력은 274MPa로 안전인자(Safety factor) $S = \frac{\sigma_Y}{\sigma}$ 를 사용할 경우 0.96으로 1보다는 약간 작은 값을 가졌다. 냉각재 속도를 6m/sec로 늘릴 경우 최대 응력은 185MPa, 안전 인자는 1.78로 나타났다. 따라서 이중 빔창에 걸리는 응력이 항복강도를 넘지 않는 경우는 가속기 빔출력 1GeV, 2mA 냉각재 속도 6m/sec인 경우 뿐이었다. 그림 2에 1GeV, 2mA, 6m/sec 경우의 빔창의 온도와 열응력 분포를 나타내었고 이중에서 안쪽 빔창의 온도와 열응력 분포를 확대하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3을 보면 두께 방향으로 온도 변화가 심한 것을 알 수 있다.

안쪽 빔창에서의 온도 분포와 응력 분포의 경향을 보기 위해 빔출력 1GeV, 2mA, 냉각재 속도 6m/s 경우에 대해 그림 4부터 8까지 빔창의 온도와 응력의 절대값, x,y,z 방향 열응력을 각각 중앙에서의 각도거리에 대한 그래프로 나타내었다. 그림 4를 보면 빔창의 중앙에서 아랫면과 윗면의 온도 차이가 약 60K 정도로 두께 방향 온도 구배가 30K/mm로 가장 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 온도 구배가 가장 크게 나타나는 빔창의 중앙부에 대해 빔 출력과 냉각재 속도에 따른 두께 방향 온도 구배는 10mA일 때 약 150K/mm, 20mA일 때 약 300K/mm로 나타났다.

안쪽 빔창의 중앙부분의 최대 온도와 두께 방향 온도 구배를 일차원 전도를 가정하여 최대 온도 T_{max}와 두께 방향 온도 구배 ΔT는 두께가 ℓ일 때 다음과 같다.

$$T_{\max} = \frac{ql^2}{2k} + \frac{ql}{h} + T_{ref}$$

$$\frac{\Delta T_{\max}}{l} \equiv \frac{ql}{2k}$$

이 식을 사용하여 빔창의 최고 온도와 온도 구배 값을 ANSYS 코드 계산 결과와 비교한 결과 거의 일치하였다. 이 식에서 두께 방향 온도 구배는 h에 무관한 것을 알 수 있으며 열발생량에 비례하는 것을 알 수 있다. 또한 윗 식에서 알 수 있는 것은 두께 ℓ이 감소할수록 빔창의 최대 온도와 두께 방향 온도 구배가 감소한다는 것이다. 따라서 빔이 입사되는 부분의 빔창 두께를 더 얇게 해주면 빔창의 최대 온도와 최대 열응력을 줄일 수 있을 것으로 보이므로, 추후 이를 고려한 계산이 필요하다.

또한 열응력의 절대값이 최대인 곳은 안쪽 빔창의 윗면과 아랫면인데, 그림 6에서 8에 나타난 바와 같이 윗면에서는 최대 압축응력이 생기고 아랫면에서는 최대 인장응력이 생기는 것을 알 수 있다. 이는 윗면이 아랫면에 비해 상대적으로 고온이므로 윗면에 인장응

력이 유도되고 아랫면에 압축응력이 유도되기 때문으로 보인다. 따라서 인장응력을 받는 안쪽 빔창의 아랫면에 균열이 생길 경우 다른 곳에서 균열이 생기는 경우보다 빔창의 파단이 일어날 확률이 상대적으로 높다. 안쪽 빔창의 아랫면은 또한 냉각재인 Pb-Bi와 접촉하는 부위이므로 부식에 의해 균열이 생길 가능성이 있다. 따라서 열응력에 의한 파단 측면에서 빔창의 건전성에 가장 큰 영향을 미치는 부위는 안쪽 빔창의 아랫부분으로 보인다.

4. 결론

HYPER의 가속기 이중 빔창에 대한 열전달과 열응력 해석을 수행하였다. 양성자 빔은 지름 10cm, 타원형 전류밀도분포를 가지며 입사된다고 가정하였다. 온도와 열응력 모두 안쪽 빔창이 바깥쪽 빔창보다 높으므로 안쪽 빔창의 건전성을 유지하는 것이 더 중요하다고 판단되었다.

계산 결과 가속기 출력이 1GeV, 2mA이고 냉각재 속도가 6m/sec인 경우에서만 빔창에 걸리는 열응력이 항복강도를 넘지 않았다. 그러나 간단한 일차원 전도 방정식으로부터 빔이 입사되는 영역의 빔창의 두께를 줄이면 최대 온도와 최대 열응력을 감소시킬 수 있을 것으로 예측하였고, 추후 이를 고려한 계산이 필요하다. 또한 안쪽 빔창의 아랫면은 최대 인장응력을 받으므로 여기서 균열이 생길 때 파단이 일어날 확률이 가장 높다는 점에서 이 부분에 대한 자세한 분석이 필요할 것으로 보인다. 향후 빔 형태, 냉각 조건, 빔창 구조 등의 변화에 따른 온도, 열응력의 변화연구를 계속 수행하여 HYPER의 가속기 빔창이 건전성을 유지할 수 있는 최대 빔 전류를 설정할 계획이다.

참고 문헌

[1] ANSYS User's Manual for Revision 5.0

[2] 박원석 외 4인, "HYPER 시스템 설계연구", KAERI/TR-1316/99

[3] R. E. Prael, et, al., User Guide to LCS ; The LAHET Code System, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-89-3014, 1986

[4] A. Kimura et al, J. Nucl. Mater 233-237 (1996) 319.

표 1. 9Cr-2WTa의 상온에서의 열적·기계적 물성치

열전도도 k	26(W/mK)
녹는점 T_m	1800(K)
탄성계수 E	2.1×10^{11}(1/K)
열팽창계수 α	1.2×10^{-5}
포아송비 υ	0.3

표 2. 타원형 빔이 입사한 경우 안쪽 빔창 발열량 (1GeV, 20mA **경우**)

Proton Beam

Injection 

(10^9 W/m3)

	10cm	9cm	8cm	7cm	6cm	5cm	4cm	3cm	2cm	1cm
2mm	0.004	0.006	0.009	0.016	0.057	1.65	4.52	6.91	7.87	8.26

표 3. 가속기 이중 빔창 온도 계산에 사용된 평균 열전달 계수 (W/m^2K)

냉각재 속도 / 빔전류		2m/sec	6m/sec	15m/sec
20mA	**안쪽 빔창**	—	26000	55000
	바깥쪽 빔창	—	25500	54000
10mA	**안쪽 빔창**	—	26000	55000
	바깥쪽 빔창	—	25500	54000
2mA	**안쪽 빔창**	10500	26000	—
	바깥쪽 빔창	10000	25500	—

표 4. 9Cr-2WTa의 온도에 따른 항복강도

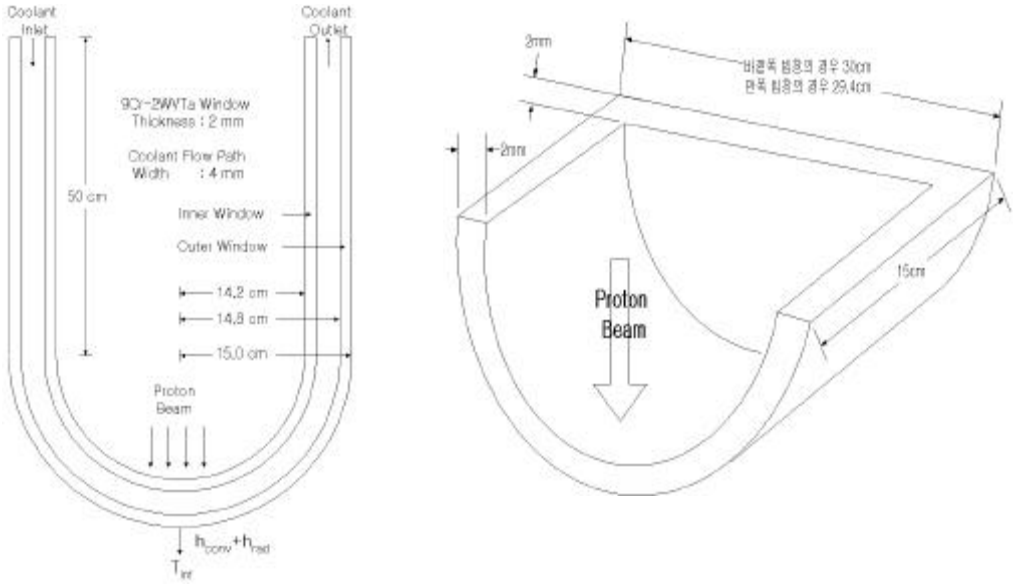
온도	650K	700K	750K	800K	850K	870K
항복강도	400MPa	370MPa	330MPa	290MPa	250MPa	230MPa

표 5. 가속기 이중 빔창 최대 온도 계산 결과

냉각재 속도 / 빔전류		2m/sec	6m/sec	15m/sec
20mA	안쪽 빔창	—	1861K	1532K
	바깥쪽 빔창	—	1408K	1221K
10mA	안쪽 빔창	—	1240K	1076K
	바깥쪽 빔창	—	1071K	926K
2mA	안쪽 빔창	830K	744K	—
	바깥쪽 빔창	741K	705K	—

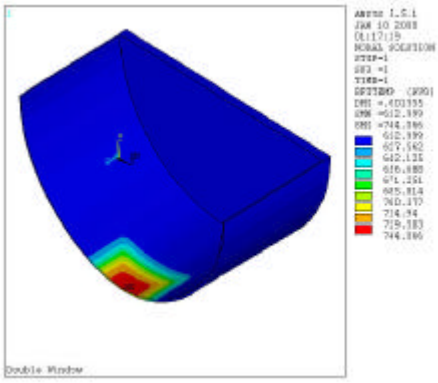
표 6. 가속기 이중 빔창 최대 열응력 계산 결과

냉각재 속도 / 빔전류		2m/sec	6m/sec	15m/sec
20mA	안쪽 빔창	—	—	1530MPa
	바깥쪽 빔창	—	—	682MPa
10mA	안쪽 빔창	—	911MPa	768MPa
	바깥쪽 빔창	—	436MPa	358MPa
2mA	안쪽 빔창	274MPa(0.96)	185MPa(1.78)	—
	바깥쪽 빔창	134MPa(2.46)	96MPa(3.85)	—

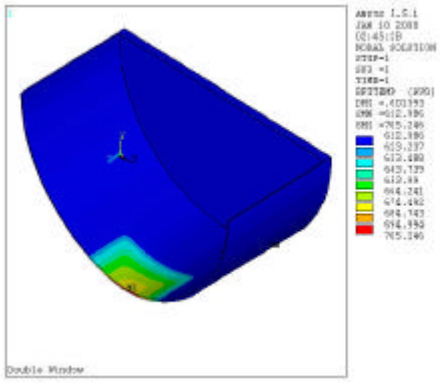


(a) 이중 빔창 정면도 (b) ANSYS 계산에서 사용된 빔창 구조

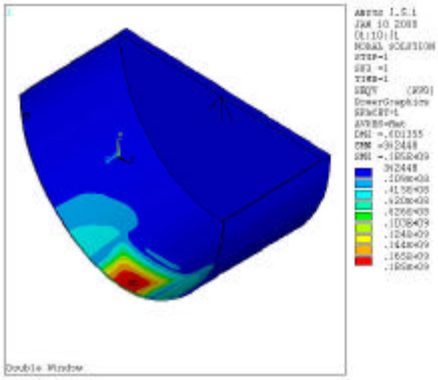
그림 1. 이중 빔창의 개략도



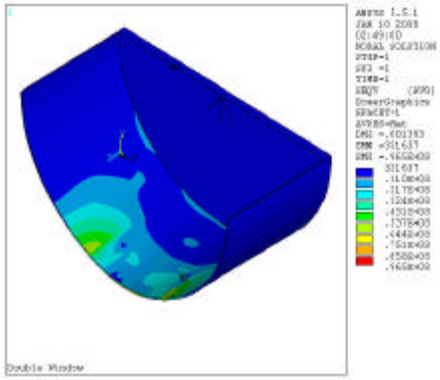
(a) **안쪽 빔창 온도 분포**



(b) **바깥쪽 빔창 온도 분포**

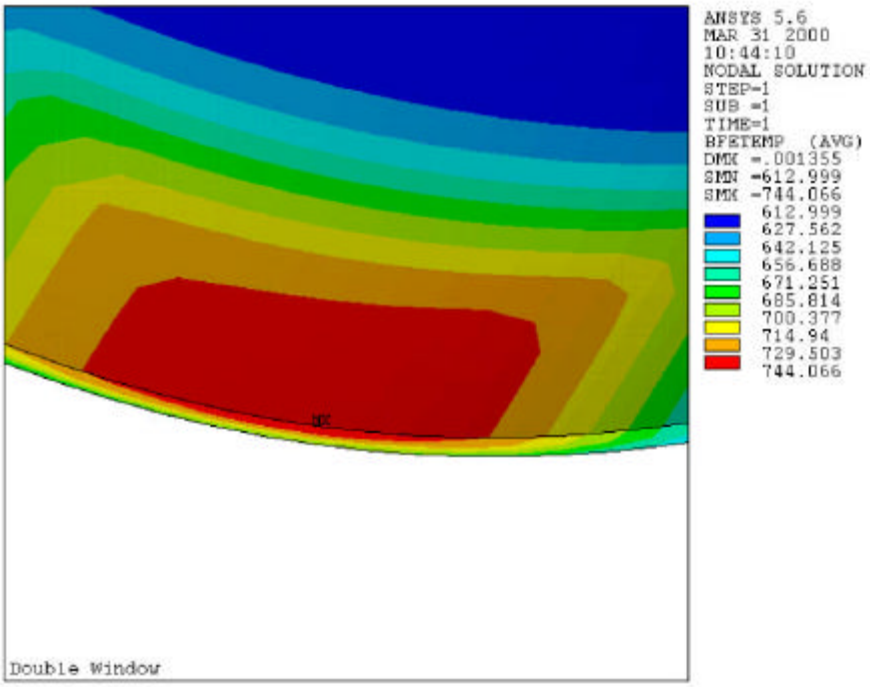


(c) **안쪽 빔창 열응력 분포**

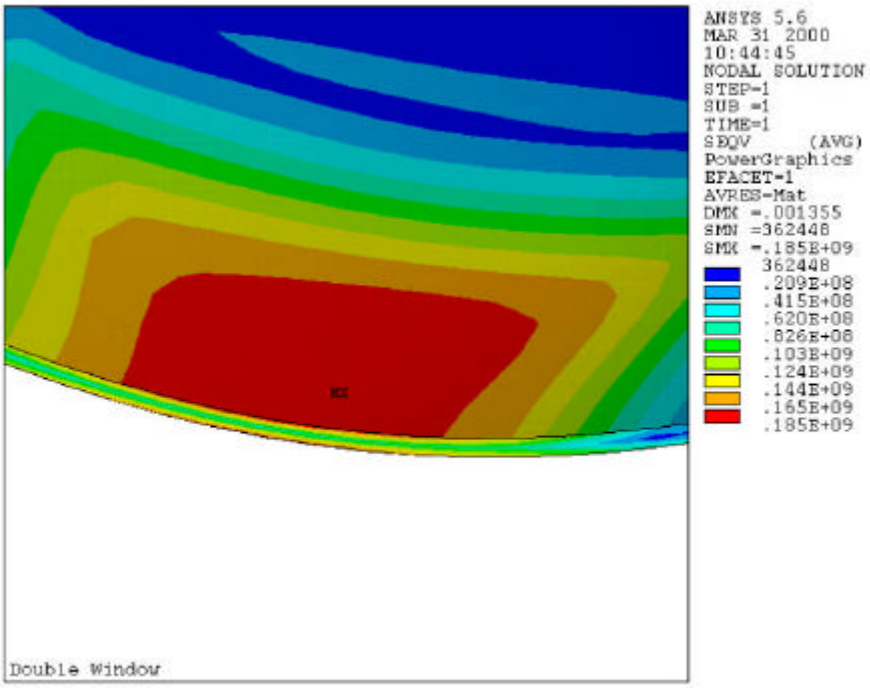


(d) **바깥쪽 빔창 열응력 분포**

그림 2. 1GeV, 2mA, 6m/sec **경우 이중 빔창 계산 결과**



(a) **온도 분포**



(b) **열응력 분포**

그림 3. 1GeV, 2mA, 6m/sec **경우 안쪽 빔창 계산 결과 (확대)**

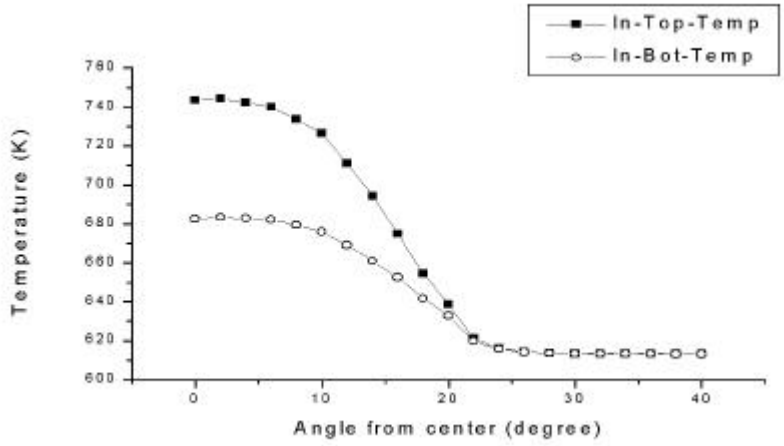


그림 4. **빔출력** 1GeV, 2mA, **냉각재속도** 6m/s **안쪽 빔창 온도**(K)

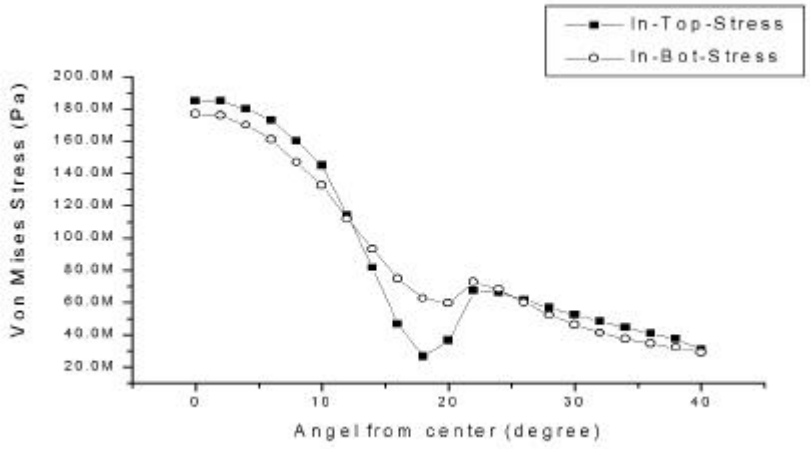


그림 5. **빔출력** 1GeV, 2mA, **냉각재속도** 6m/s **안쪽 빔창 열응력 절대값**(Pa)

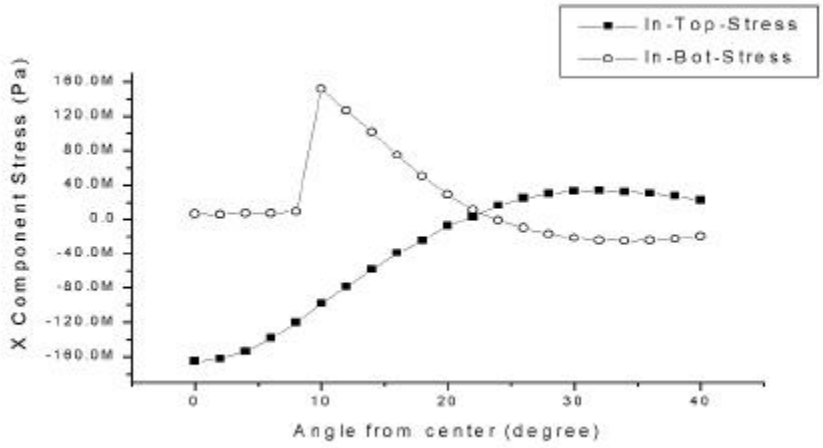


그림 6. **빔출력** 1GeV, 2mA, **냉각재속도** 6m/s **안쪽 빔창** x **방향 열응력**(Pa)

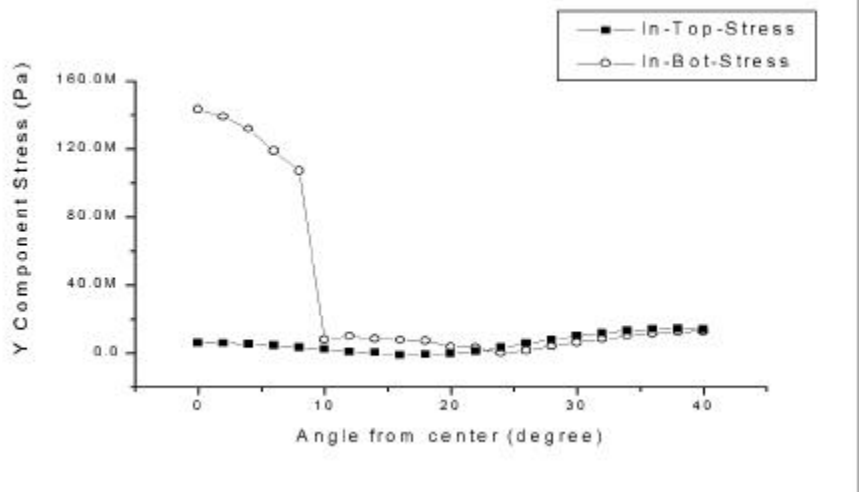


그림 7. **빔출력** 1GeV, 2mA, **냉각재속도** 6m/s **안쪽 빔창** y **방향 열응력**(Pa)

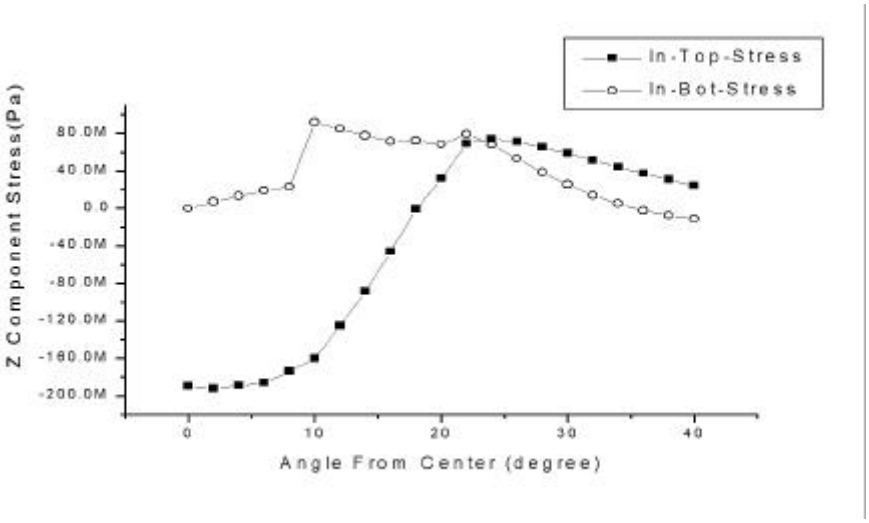


그림 8. **빔출력** 1GeV, 2mA, **냉각재속도** 6m/s **안쪽 빔창** z **방향 열응력**(Pa)