

'96 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

탄소섬유 강화 복합재료를 이용한 증기발생기용 노즐담 설계

박진석, 김태룡

한국원자력연구소

오제훈, 이대길

한국과학기술원

### 요 약

원자로의 가동 중지 중이나 재장전시 원자로가 설치되어 있는 수조의 냉각수가 증기발생기 안으로 유입되는 것을 막는 장비로써 노즐담을 사용한다. 현재의 노즐담은 알루미늄 재질로 그 무게가 무거워 노즐담 작업자가 취급하기 어렵다. 이 노즐담의 경량화와 동시에 구조적 강도를 증가시키기 위해서 비강성이 높은 탄소섬유 강화 복합재료와 곱힘강성 및 전단강성을 증가시키기 위하여 벌집구조(honeycomb)의 알루미늄을 사용하여 KAERI 노즐담-II를 설계하였다. 노즐담에 발생하는 응력 해석을 통하여 중앙판과 측면판의 변위가 충분히 작은 값을 가지면서 파괴지수도 충분히 작은 값이 되는 탄소섬유의 적층각도를 구하였으며, 중앙판은 [±15]로 적층하고 측면판은 [±45]로 적층 하였다. 그리고 각 판의 최대 파괴지수는 중앙판의 경우 0.32, 측면판의 경우 0.27 이었고 최대변위는 각각 3.1mm, 2.7mm 로 노즐담을 사용할 때 예상되는 하중에 대하여 노즐담의 구조적 건전성을 입증하였다.

### 1. 서론

가압경수로 원자로의 가동중지 중이나 재장전시 점검, 보수 시에 작업종사자에게 피폭되는 방사선량의 30% 정도가 증기발생기 작업에서 발생한다[1]. 그 중 상당수의 피폭량이 증기발생기 채널헤드에서 작업자가 노즐담을 설치 또는 제거할 때 피폭된다. 이와 같이 고방사선의 환경과 제한된 공간 내에서 작업을 해야하는 특수성 때문에 작업자들이 노즐담 작업을 기피하는 현상을 보인다. 고리 원자력발전소, 영광 원자력발전소의 1, 2호기, 그리고 울진 원자력발전소의 1, 2 호기에서 현재 사용 중인 노즐담의 중앙판(34.1 kg)과 측면판(34.1 kg)은 중량이기 때문에 노즐담작업이 어렵게 되는 요인이다. 따라서 경량의 노즐담을 설계하면 노즐담작업을 쉽게 수행할 수 있게 됨으로 장·탈착에 소요되는 시간을 줄일 수 있으며, 작업자의 방사선 피폭량도 저감할 수 있다. 섬유강화 복합재

료는 비강성과 비강도가 높기 때문에 노즐땀 재질로 사용될 경우 노즐땀의 무게를 줄일 수 있으며, 탄소섬유 강화 복합재료로 경량의 KAERI 노즐땀-I을 제작한 결과 중앙판과 측면판은 각각 10 kg, 8 kg 으로 경량화 되었다. KAERI 노즐땀-I 측면판은 중앙판을 지지하는 역할과 동시에 중앙판의 y-방향의 강성을 보충해 주지만 중앙판 자체만의 굽힘강성 대 무게 비( $N \cdot m^2/kg$ )는 x-방향과 y-방향으로 각각  $0.32 \times 10^3$ ,  $32.83 \times 10^3$  이었다. 이 값은 기존 노즐땀의 그것에 비하여 x-방향과 y-방향의 굽힘강성 대 무게 비가 서로 교차되면서 조금 증가하였지만, 굽힘강성은 크게 개선되지 않았다(표 1 참조).

본 연구에서는 탄소섬유 강화 복합재료 사이에 벌집구조(Honeycomb)의 알루미늄을 채워넣는 샌드위치 구조로 굽힘강성과 전단강성을 보강하여 x-방향과 y-방향의 굽힘강성 대 무게 비를 균일하게 향상 시켰으며, 복합재료의 최적 적층각도를 계산하여 경량의 KAERI 노즐땀-II를 설계하였다.

## 2. 구조설계

증기발생기 맨웨이 직경(16")를 통하여 노즐땀을 운반하기 위해서 3 조각으로 분할하였으며, 노즐땀 작업자 또는 로봇이 쉽게 운반할 수 있는 경량이면서 수압( $1.1 \text{ kg/cm}^2$ )에서도 구조적 건전성을 유지하는 구조로 설계하였다. 탄소섬유 강화 복합재료로 제작 예정인 KAERI 노즐땀-II는 그 내부에 보강리브를 부착하여 관성모멘트를 증가시켰으며, 알루미늄 벌집구조로 보강리브의 위치를 고정하여 관성모멘트를 더욱 높였다. 그림 1은 KAERI 노즐땀-II 중앙판의 단면이며, x-방향의 관성모멘트 ( $I_x=1.04 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ )와 y-방향의 관성모멘트 ( $I_y=6.04 \times 10^{-6} \text{ m}^4$ )로 설계되었다. 이 중앙판의 응력해석을 통하여 파괴지수와 변위가 최적 값을 갖는 적층각도( $[\pm 15]$ )를 구했으며, 일방향 탄소섬유의 종 탄성계수와 횡 탄성계수의 값들로부터 구한  $[\pm 15]$ 로 적층된 적층판의 종 탄성계수와 횡 탄성계수는 각각 110 GPa, 15 GPa 이다[2]. 그리고 중앙판의 무게가 9.9 kg 이므로 x-방향과 y-방향의 굽힘강성 대 무게 비( $N \cdot m^2/kg$ )를 계산하면 각각  $11.56 \times 10^3$ ,  $9.15 \times 10^3$  이다. 이 값으로부터 KAERI 노즐땀-I의 굽힘강성이 한 방향으로 치우치고 x-방향의 굽힘강성은 매우 낮게 설계된 것에 비해 KAERI 노즐땀-II는 x-방향 및 y-방향의 굽힘강성이 균일하게 충분히 큰 값을 가지면서 경량의 노즐땀으로 설계되었음을 알 수 있다.

노즐땀의 중앙판에 부착되는 다이어프램 실의 공기주머니는 압축공기(440 kPa)가 주입되면 팽창되어 노즐링 벽면과 노즐땀 사이를 밀폐하여 냉각수의 누수를 막을 수 있는 기능적 구조로 설계되었으며, 플랜지에 볼트구멍이 있어 노즐링에 나사로 체결된다. 이때

플랜지의 볼트구멍에 발생하는 응력을 분산하기 위해 탄소섬유 위층에 유리섬유를 적층하고 그 위에 알루미늄 판으로 플랜지를 보강하는 구조로 설계하였다.

### 3. 노즐댐의 유한요소 모델링

#### 3.1 유한요소 모델링

노즐댐에 작용하는 응력을 해석하기 위하여 상용 전산코드인 ANSYS 5.1을 사용하였다. 샌드위치 구조로 된 노즐댐의 심재는 20 절점을 가지는 SOLID 95 요소를 사용하여 모델링 하였고 면재는 적층각도와 두께를 자유롭게 줄 수 있는 8 절점 SHELL 99 요소를 사용하여 모델링 하였다. 복합재료의 적층순서 및 노즐댐의 기하학적 형상이 대칭이므로 전체 구조의 1/4 을 모델링 하여 해석하였다. 사용한 재료의 물성치는 표 2와 같고 모델링한 형상은 그림 2와 같다. 볼트구멍 주위에는 더 세밀한 메시를 사용하여 정확한 계산이 이루어지도록 하였다. 경계조건으로는 대칭 경계조건을 사용하고 볼트로 체결하는 부분의 자유도를 모두 구속하였으며 하중조건으로는 아래 측 면재에 원자로 수실 (Reactor Cavity)에 채워질 물의 수두, 즉 노즐댐에 걸리는 수압 110 kPa 그리고 sealing 을 위해 노즐댐 다이어프램 실에 주입될 공기에 의해 측면에 걸리는 압력 440 kPa 의 하중을 가하였다. 노즐댐의 모델링시 모든 부분이  $[\pm\theta]$ 의 적층순서를 가지도록 모델링 하였다. 샌드위치 구조의 각 면재는 두께가 0.15mm 인 프리프레그를 30 층 적층하고 측면 벽을 보강하기 위하여 같은 두께의 프리프레그를 20 층 적층 하였으며 볼트구멍 주위의 응력 분산을 위하여 볼트구멍이 있는 플랜지부에 유리섬유 강화 복합재료를 10 층 적층 하였다. 그리고 플랜지를 보강하기 위하여 2mm의 두께를 가지는 알루미늄판을 사용하였다.

샌드위치 구조물의 심재와 면재의 경계면에는 솔리드 요소와 셸 요소의 모든 변위 및 회전 자유도를 서로 연결하였으며, 이 모델링을 검증하기 위하여 4단이 모두 단순 지지된 경계조건을 갖는 샌드위치 구조에서 심재부분은 솔리드요소를 사용하고 면재부분은 셸요소를 사용한 해석결과와 참고문헌[3]의 결과와 비교해 보았다. 면재의 적층 각은 위아래가 모두  $[90/0]_n$ 로 같다. 샌드위치 모델링을 해석한 결과와 참고문헌[3]의 결과와 거의 일치하였으며 이 샌드위치 모델링이 합당함을 알 수 있었다.

#### 3.2 해석 결과

복합재료의 적층각도에 따른 중앙판과 측면판의 최대 변위와 Tsai-Wu[2] 파괴조건에

다른 최대 파괴지수를 계산하였다. 볼트 주위에서 파괴지수가 가장 크게 나타났기 때문에 적층각도에 따른 볼트 주위의 최대 파괴지수를 계산하였다. 그림 3은 중앙판에 발생하는 파괴지수 분포를 나타내고 그림 4와 같이 적층각도가  $0^\circ$  인 경우 최대 변위가 가장 작지만 볼트 주위의 최대 파괴지수가 크기 때문에 최대 변위와 최대 파괴지수를 고려하여 적층각도  $[\pm 15]$ 로 결정하였다. 비록 적층각도가  $30^\circ$  인 경우 볼트 주위의 최대 파괴지수가 가장 작지만 이 경우 중앙판의 최대 변위가 측면판의 최대 변위와 차이가 나기 때문에 중앙판과 측면판의 최대 변위의 차이를 고려하여 적층각도를  $[\pm 15]$ 로 결정하였다.

측면판인 경우 최대 변위와 최대 파괴지수는 그림 5와 같다. 측면판의 적층각도가  $15^\circ$  인 경우 최대 변위가 가장 작지만 볼트부의 최대 파괴지수는 적층각도가  $[\pm 45]$ 일 때 가장 작게 나타나므로 적층각도를  $[\pm 45]$ 로 결정하였다. 중앙판의 경우 적층각도가  $[\pm 15]$ 일 때 최대 변위는 3.1mm 이었고 측면판의 경우 적층각도가  $[\pm 45]$ 일 때 최대 변위는 2.7mm 이었다. 그리고 각 판의 최대 파괴지수는 중앙판의 경우 0.32, 측면판의 경우 0.27 이었다. 이와 같이 중앙판과 측면판의 파괴지수가 1 보다 충분히 작기 때문에 노즐 댐에 작용하는 하중에도 KAERI 노즐댐-II는 구조적 건전성을 유지함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

원형의 형상 이면서 중앙판과 측면판으로 분할된 노즐댐에 수압과 같은 수직면압이 균일하게 작용하는 구조물을 탄소섬유 강화 복합재료와 벌집구조의 샌드위치 구조로 제작할 때 중앙판은  $[\pm 15]$ 의 적층각도, 그리고 측면판이  $[\pm 45]$ 의 적층각도를 가질 때 최적의 적층각도임이 밝혀졌고 이와 같은 구조로 설계된 KAERI 노즐댐-II에 발생하는 최대 파괴지수는 각각 0.32, 0.27 이었다. 그러므로 KAERI 노즐댐-II이 위와 같은 조건으로 제작되면 구조적 건전성을 유지하면서 무게는 알루미늄 재질의 노즐댐보다 현저하게 가벼워지며, x-방향과 y-방향의 굽힘강성 대 무게 비도 한 방향으로 치우치지 않고 균형을 갖는 구조로 설계되었다.

#### References

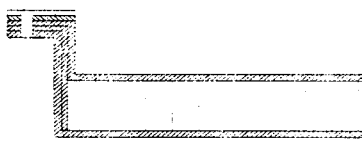
1. 김태룡외 3인, "로봇 최적화 설계 기술개발," 한국원자력연구소 보고서, KAERI/RR-1337/93, 1994. 7.
2. 이대길, 복합재료 역학 및 가공론, 성안당, 1993. 3.
3. Monforton, G. R. and Ibraheim I. M. "Analysis of Sandwich Plates with Unbalanced Cross-ply Faces," Int. J. of Mech. Sci., Vol. 19, 1975. pp227~238.

Table 1 Bending Stiffness to Weight Ratio of Center Plate

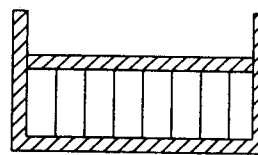
Nozzle Dam	Material	Moment of Inertia		Young's Modulus		Weight (kg)	Bending Stiffness to Weight Ratio	
		$I_x (m^4) \times 10^{-6}$	$I_y (m^4) \times 10^{-6}$	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)		$\frac{E_y \cdot I_x}{W} \times 10^3$	$\frac{E_x \cdot I_y}{W} \times 10^3$
		KORI-1	Al	11.40	0.18		69.3	69.3
KAERI Nozzle Dam-I	CFRP	0.05	5.17	63.5	63.5	10.0	0.32	32.83
KAERI Nozzle Dam-II	CFRP + Honeycomb	1.04	6.04	15	110	9.9	11.56	9.15

Table 2. Material Properties

Material	E11	E22	G12	$\nu_{12}$
Carbon/Epoxy	130GPa	8GPa	6GPa	0.28
Glass/Epoxy	48.5GPa	5GPa	5GPa	0.33
	E	G13	G23	$\nu$
Honeycomb		0.372GPa	0.930GPa	
Aluminium	69GPa			0.30



(a) x-direction view



(b) y-direction view

Fig. 1 Center Plate Section of KAERI Nozzle Dam-II

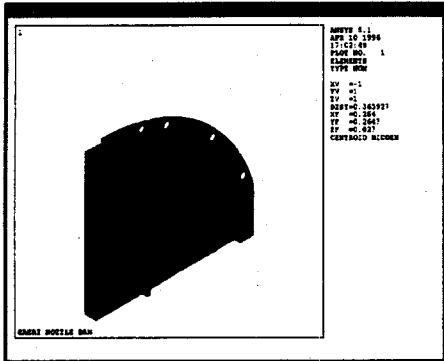


Fig. 2 Finite element model of the nozzle dam

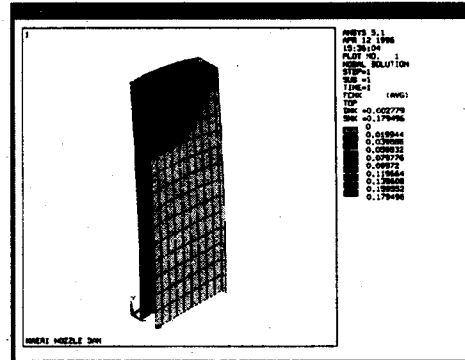
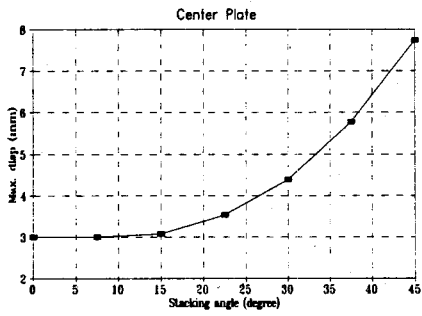
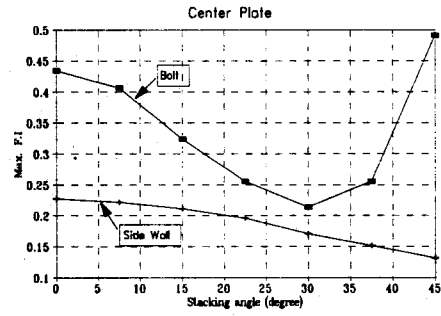


Fig. 3 Failure Index of Center Plate

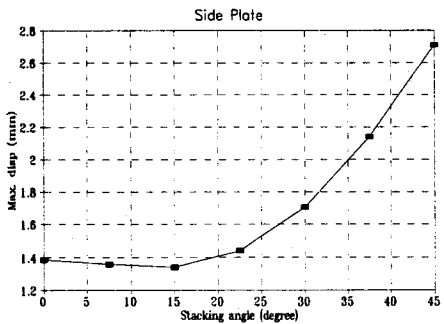


(a) Max. displacement w.r.t. stacking angle

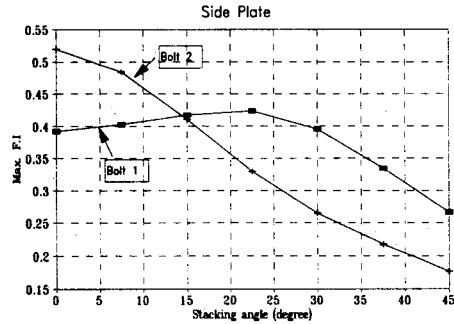


(b) Max. failure index w.r.t. stacking angle

Fig. 4 Maximum displacement and maximum failure index w.r.t stacking angle in the center plate



(a) Max. displacement w.r.t. stacking angle



(b) Max. failure index w.r.t. stacking angle

Fig. 5 Maximum displacement and maximum failure index w.r.t stacking angle in the side plate