'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

복합재료를 이용한 원전 증기발생기 노즐댐의 설계 개선

Nozzle Dam Design Improvement using Composite Material of the Steam Generatorin Nuclear Power Plants

김 승 호 · 정 승 호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이 승 섭 · 이 영 신
충남대학교
대전광역시 유성구 궁동 220

Abstract

The period of normal shutdown and maintenance of a nuclear power plants can be remarkably shortened by doing the refueling work with inspection of a steam generator simultaneously. The nozzle dams in a steam generator are to block the back flow of coolant from the reactor cavity to the steam generator. The installation and removal of the nozzle dams have been attempted by using a robot system instead of human workers in order to protect from the high radiation exposure and harse working environment in a steam generator. the weight of the nozzle dam must be reduced for the convenience of the robot operation. In this paper, a lighter nozzle dams were designed to keep structural integrity. The nozzle dams have been manufactured using various maerial such as carbon-epoxy, glass-epoxy, honeycomb and aluminum plate. The variation in mechanical properties of composites with respect to radiation emission has been investigated. In order to verify the structural integrity of the nozzle dam, the stress analyses have performed using ANSYS finite element program. The hydrostatic pressure test was performed to mock-up. The maximum stress and the maximum displacement of the composite nozzle dams are measured and compared to that obtained by finite element analyses.

요 약

증기발생기의 전열관 검사 및 보수작업은 핵연료 재장전과 병행함으로써, 원자력발전소의 운전정지와 보수기간을 현저히 단축시킬 수 있다. 증기 발생기 노즐댐은 원자로가 설치되어 있는 수조의 냉각수가 증기발생기로 유입되는 것을 차단한다. 최근에 노즐댐의 설치 및 제거 작업은 증기발생기의 고방사선으로 인한 위험성과 가혹한 작업공간으로 인하여 작업종사자들에 의한 수작업보다 로봇을 이용하고 있다. 로봇에 의하여 노즐댐을 설치할 수 있도록 노즐댐의 무게를 감소시켜야 한다. 본 논문에서는 구조 건전성이 유지되는 경량화된 복합재료 노즐댐을 설계하였다. 노즐댐은 카본-에폭시(carbon-epoxy), 유리-에폭시(glass-epoxy), 벌집구조(honeycomb), 알루미늄판등을 사용하여 제작하였다. 방사선 조사에 대한 복합재료 물성의 변화를 조사하였다. 노즐댐의 구조 건전성의 평가를 위하여 응력해석은 ANSYS를 사용하여 수행하였고 시험을 위한 목업을 제작하여 수압 시험을 수행하였다. 복합재료 노즐댐의 최대 파괴지수와 최대 변위를 측정하고 유한 요소 해석 결과의 결과와 비교하였다.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기의 검사 및 보수작업은 정기적으로 이뤄진다. 이러한 일반적인 운전정지와 보수 시간은 중요하다. 증기발생기 노즐댐은 증기발생기의 검사 및 보수작업시 원자로의 냉각재의 유입을 차단하기 위하여 입/출력(Inlet/outlet) 노즐에 설치된다(그림 1). 현재 노즐댐의 설치 및 제거는 작업종사자에 의하여 수작업으로 이뤄지고 있다. 이러한 수작업은 고방사선의 환경[1]과 작업공간이 제한에 의한 특수성으로 인하여 작업종사자들이 기피하고 있다. 따라서, 작업종사자들이 증기발생기 노즐댐의 설치 및 제거에 소요되는 시간을 줄일 수 있고 로봇에 의한 무인작업이 가능한 보다 가벼운 노즐댐이 필요하다. 또한 노즐댐에 작용하는 수압과 냉각재의 누수를 방지하기 위한 다이어프램 실(Diaphragm seal)의 작용압력에 대하여 구조적으로 건전한 노즐댐 설계가 요구된다.

현재 국내에서 사용되고 있는 노즐댐은 웨스팅하우스(Westinghouse)와 CE(Combustion Engineering), NES(Nuclear Energy Services Inc.)에서 설계된 노즐댐이다. 초기의 웨스팅하우스 노즐댐은 무게가 무거워 노즐댐 작업에 어려움이 많다. 이에 관한 문제점을 해결하기 위하여 Trundle[2,3]은 노즐댐 설치 및 제거에 쓰이는 기구를 고안하여 노즐댐의 이동 및 설치 작업을 용이하게 하였다. Evans[4]는 노즐댐에 작용하는 냉각수의 수압에 의해 발생한 굽힘모멘트 선도를 이용하여 응력이 균일하게 작용하는 경량의 노즐댐을 설계하였다. 이 노즐댐에 로봇이 파지할 수 있는 손잡이를 부착하여 원격조종이 가능하도록 하였다[5]. CE 노즐댐은 건식 노즐댐(Dry nozzle dam) 및 습식 노즐댐(Wet nozzle dam)이라고 불리는 2개의 노즐댐을 노즐벽에 있는 핀구멍에 핀으로 장착한다. Everett[6] 및 Wentzell[7]이 고안한 노즐댐들도 각각 건식 노즐댐과 습식 노즐댐으로 구성된다. M. Weisel[8]은 단일 노즐댐(Single nozzle dam)을 고안하였다. McDonald[9]는 이 노즐댐을 원격으로 설치할 수 있는 장비를 고안하였다. NES 노즐댐은 증기발생기 노즐입구에 설치되어 있는 고정링(Retention ring)에 핀으로 체결한다. 각 노즐댐의 무게와 재질이 표 1에 표시되었다.

알루미늄 합금으로 제작된 기존의 노즐댐들은 때문에 무거운 무게 때문에 설치 작업에 다소 어려움이 따른다. 이러한 무거운 노즐댐은 로봇에 의한 무인 작업시 작업하중을 증가시킨다. 따라서 노즐댐의 무게를 감소시켜야 한다. 또한 노즐댐은 구조적인 건전성이 보장되어야 하므로 항공기 및 자동차의 구조물에 널리 사용되고 있는 비강성과 비강도가 높은 섬유강화 복합재료를 사용한 경량의 노즐댐을 설계한다. 무게의 감소에 의하여 수작업 및 로봇의 무인 작업에 의한 노즐댐의 설치 및 제거에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 설계된 노즐댐은 카본-에폭시 복합재료와 유리-에폭시 직조 복합재료, 알루미늄 판과 벌집구조로 구성되어 있다. 방사선 흡수와 온도의 변화에 따른 복합재료 물성의 변화를 조사하였다. ANSYS[10]를 사용하여 정수압상태에서의 노즐댐의 해석을 수행하였다.

구조적 안전성에 대한 입증을 위한 실제 크기의 목업을 제작하였고 압력시험을 실시하였다. 노즐댐의 최대 변위를 측정하였고 유한요소의 해석 결과와 비교하였다.

표 1. 노즐댐 무게 및 재질의 비교

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">Type</th><th colspan="2">Weight</th><th>Material</th></tr>
<tr><th>Center section</th><th>Side section</th><th>Aluminum alloy 5052-H32</th></tr>
<tr><td colspan="2">KORI Nozzle Dam</td><td>340N</td><td>340N</td><td>Aluminum alloy 2024-T351</td></tr>
<tr><td colspan="2">BRAND Nozzle Dam</td><td>266N</td><td>156N</td><td>Aluminum alloy 2024-T351</td></tr>
<tr><td rowspan="2">NES Nozzle Dam</td><td>0.762m</td><td>147N</td><td>-</td><td rowspan="2">Aluminum alloy 2024-T351</td></tr>
<tr><td>1.016m</td><td>151N</td><td>-</td></tr>
</table>

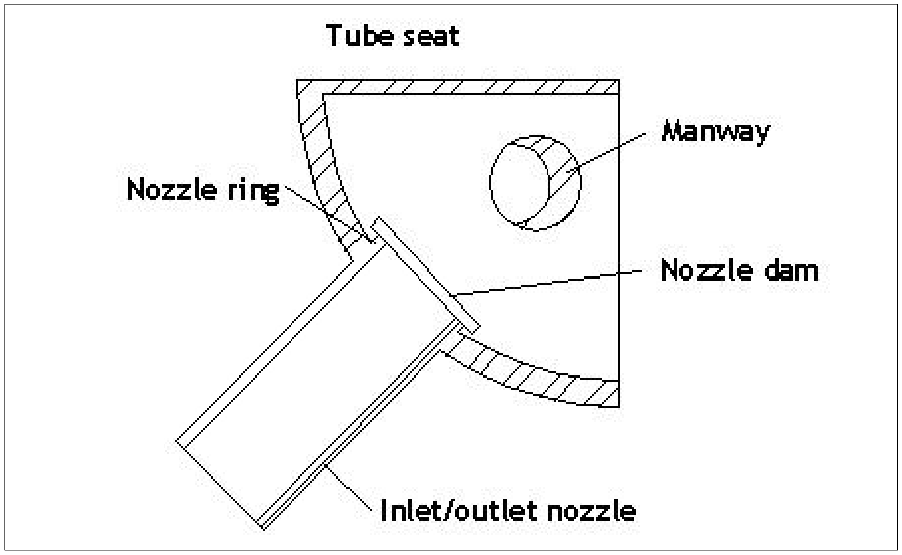


그림 1. 원전 증기발생기 노즐댐

2. 노즐댐 시스템의 구성

노즐댐 시스템은 노즐댐(Nozzle Dam), 노즐링(Nozzle Ring), 다이어프램 실(Diaphragm Seal)로 구성되어 있다. 그림 1에 증기발생기 노즐댐을 보이고 있다.

노즐댐은 증기발생기에서 원자로의 냉각제의 흐름을 막는 입/출력 노즐에 위치한다. 노즐댐은 지금이 0.4m인 맨웨이를 통하여 이동한다. 따라서, 맨웨이를 통과할 수 있도록 노즐댐은 중앙판과 측면판으로 나뉘어 진다. 노즐링은 증기발생기의 노즐입구에 용접되어 있고 노즐댐은 노즐링에 볼트로 체결된다. 다이어프램 실은 분리된 노즐댐 사이의 누수를 방지한다.

본 연구는 고리 원자력발전소에 적용하기 위한 경량의 노즐댐을 설계하였다. 노즐댐은 볼트체결을 위한 10개의 구멍과 안내핀을 위한 8개의 구멍이 있다. 노즐댐은 설계압력은 수압에 의한 최대수두압력(약 9.4m의 수두압력)의 약 1.2배인 110KPa이고 누수 방지를 위한 실링(Sealing) 압력이 448KPa[11]이다.

3. 카본-에폭시의 방사능 및 온도 변화에 따른 재료의 특성 변화

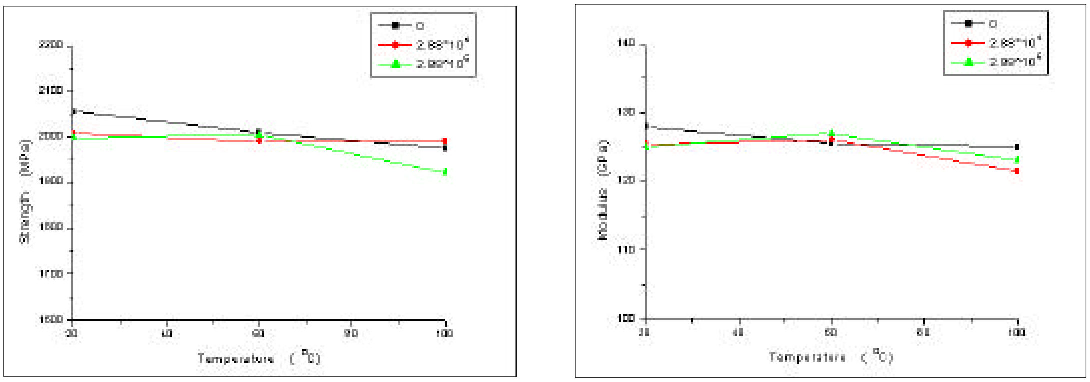
재료의 방사선 흡수와 적용 온도는 재료의 성질을 변화시켜 경화 및 연화 또는 퇴화를 유발한다. 원자로와 연결된 노즐입구에서의 고방사능에 대한 재료의 특성 변화를 시험한다. 보수작업시의 증기발생기의 온도에 대한 재료의 특성 변화도 조사한다.

노즐댐이 증기발생기의 노즐링 위에 설치되어졌을 때 노즐댐은 0.05 0.4Gy/h의 방사선 흡수선량에서 30일동안 사용된다. 일반적인 보수 작업동안의 증기발생기의 온도는 약 60℃이다.

노즐댐이 0.05 0.4Gy/h의 방사선 흡수선량에서 30일동안 사용되었을 때의 노즐댐의 최대 방사선 흡수선량은 288Gy/month이다.

카본-에폭시 복합재료의 최대 방사선 흡수선량과 온도의 변화에 따른 재료의 역학적 특성 변화를 조사하기 위하여 표 2의 물성을 갖는 시편을 20℃, 60℃, 100℃의 온도에서 원자력 연구소의 γ선 방출장치를 사용하여 방사능에 활성화시킨 후 인장 및 압축, 전단시험을 수행하였다.

그림 2는 1방향 카본-에폭시의 최대 방사선 흡수선량과 온도 변화에 관한 인장시험 결과이다. 각 점들은 5번 실험의 평균값이다. 그림 2에서 최대 흡수방사선량과 온도의 변화 따른 카본-에폭시의 물성 변화는 무시할 수 있다. 카본-에폭시는 노즐댐의 주구조재로써 적당하다.



(a) 강도변화 (b)탄성계수 변화

그림 2. 방사선 조사 및 온도 변화에 따른 인장시험 결과

4. 노즐댐의 모델링 및 해석

노즐댐의 해석을 수행하기 전에 설계된 노즐댐의 유효성을 입증하기 위하여 4변이 단순지지된 샌드위치판을 ANSYS를 사용하여 해석하였다. 샌드위치 판의 심재는 20절점의 솔리드요소(Solid95)로 면재는 8절점의 쉘요소(Shell99)로 모델링하였다. 유한 요소 해석의 결과와 Monforton과 Ibrahim[12]의 결과와 비교하였다. 표 2는 해석에 사용한 면재와 심재의 물성치이다. 표 3은 ANSYS와 Monforton과 Ibrahim에 의한 결과를 비교한 것이다. 해석 결과로부터 솔리드 요소와 쉘 요소를 사용한 샌드위치 구조의 적절성을 입증하였다.

노즐댐의 해석에서 카본-에폭시 재료의 적층각과 두께는 Tsai-Wu 파손기준에 근거하여 결정하였다. 대칭성을 고려하여 1/4만 모델링하였다. 경계조건은 볼트구멍 주위의 모든 변위를 고정했고 노즐입구에서의 110KPa의 설계압력을 노즐댐에 적용하고 다이어프램 실의 448KPa의 공기압을 노즐댐의 측면에 작용하였다.

샌드위치 구조의 심재와 면두께는 각각 40mm, 4.5mm이고 노즐댐의 테두리는 볼트체결부위의 응력집중을 감소시키기 위하여 2mm의 직조 유리-에폭시와 2mm의 알루미늄판을 보강하였으며 측면을 두께 1mm로 적층하여 보강하였다. 노즐댐 재질에 대한 물성치는 표 4와 같다.

표 2. 샌드위치 구조물의 물성치

	E_{11} (GPa)	E_{11}/E_{22}	G_{12}/E_{22}	ν_{12}	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
Graphite-epoxy(face)	206.8	40	1.0	0.25	-	-
Glass fabric honeycomb(core)	-	-	-	-	117.2	241.3

표 3. FEM 결과와 Monforton & Ibrahim[12]의 결과 비교

Aspect ratio(a/b)	t_c/t_1	ω_0[12]	ω_0[ANSYS]
1.0	4	5.121×10^{-4}	5.427×10^{-4}
2.5	10	1.421×10^{-4}	1.438×10^{-4}

Note ; t_1=The thickness of the face, t_c=The thickness of the core, ω_0=The maximum displacement

노즐댐의 적층각도를 결정하기 위하여 최대 Tsai-Wu 파괴지수와 최대 변위를 0° 50°의 적층각에 대하여 7.5°간격으로 조사하였다.

중앙판과 측면판의 적층각에 따른 최대 파괴지수와 최대 변위는 그림 3과 같다. 중앙판의 경우 적층각이 15°일 때 최대변위가 3.5mm로 가장 작고 적층각이 커질수록 최대 변위는 커짐을 알 수 있고 볼트 체결 주위에서의 최대 파괴지수는 적층각이 30°인 경우 가장 작음을 알 수 있다. 측면판의 경우 적층각이 15°일 때 최대변위가 1.38mm로 가장 작음을 알 수 있고 볼트 체결되는 2개의 구멍 주위에서의 최대 파괴지수는 적층각이 45°인 경우 가장 작음을 알 수 있다. 그러나 중앙판과 측면판의 변위차에 의하여 다이어프램 실의 파괴 및 누수현상이 발생할 가능성이 있으므로 중앙판과 측면판의 변위차를 고려하여 각각의 판에 대한 적층각을 선정하여야 한다. 따라서 중앙판의 경우 최대 파괴 지수가 0.36이고 최대 변위가 3.5mm인 적층각 15°를 선정하고 측면판의 경우 최대 파괴 지수가 0.28이고 최대 변위가 2.81mm인 적층각 45°을 선정하였다.

위에서 결정된 노즐댐의 중앙판과 측면판의 적층각에 대하여 면재와 심재의 적층두께를 결정한다. 심재로 사용되는 벌집구조의 두께를 40mm로 고정시킨 후 면재의 두께를 3㎜ 5㎜까지 0.5㎜ 간격으로 최대 파괴지수와 최대 변위를 조사하였다. 중앙판과 측면판의 경우 모두 그림 4에서 면재의 두께가 증가함에 따라 최대 파괴지수와 최대 변위가 감소하는 경향을 나타냈다.

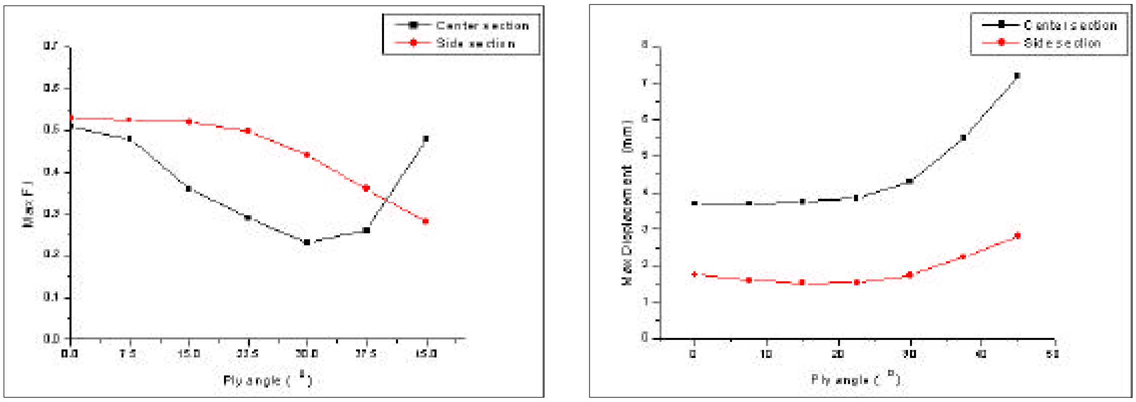
면재의 두께가 증가할수록 굽힘강성이 증가하기 때문에 최대 파괴지수와 최대 변위는 감소하게 된다. 면재의 두께는 노즐댐의 무게와 관련되므로 면재의 두께를 과도하게 증가시킬 수 없다. 따라서 중앙판과 측면판의 면재의 두께를 5mm로 결정하였다.

위에서 결정된 중앙판과 측면판의 면재의 두께에서 벌집구조인 심재의 두께 변화에 따른 중앙판 측면판의 최대 파괴지수와 최대 변위의 변화는 그림 5와 같다. 중앙판의 경우 심재의 두께가 증가할수록 최대변위는 감소하지만 볼트 체결 부위인 구멍 주위의 최대 파괴지수는 증가한다. 측면판의 경우 심재의 두께가 증가할수록 최대변위는 감소하고 볼트 체결 부위의 최대 파괴지수는 큰 변화가 없다.

두께의 증가에 따른 최대 파괴지수의 증가는 심재의 두께 증가에 따른 높이 방향의 관성모멘트가 증가했기 때문이다. 하지만 심재의 두께를 너무 작게 하면 변위가 증가하기 때문에 노즐댐의 굽힘강성을 고려하여 심재의 두께를 40mm로 결정한다.

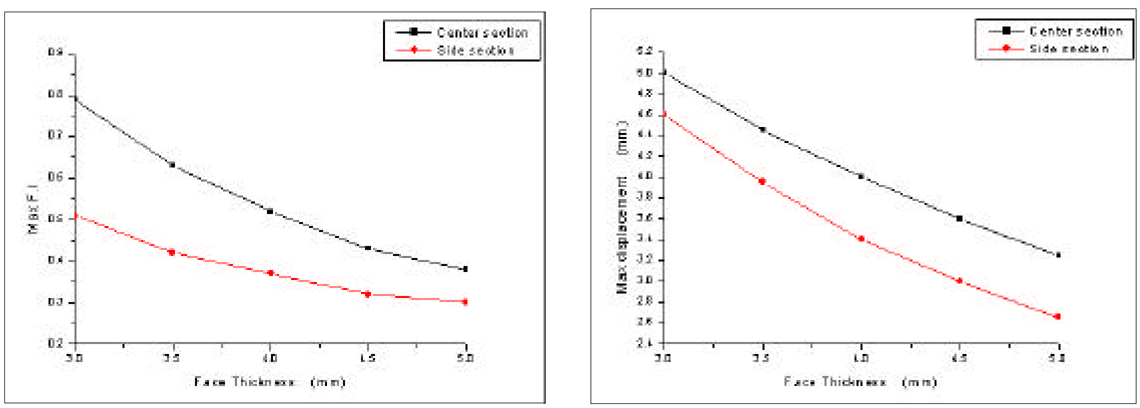
표 4. 노즐댐의 물성치

Material Properties	Carbon-epoxy (CU125NS)	Glass-epoxy (fabric)	Honeycomb	Aluminum
Longitudinal Modulus (E_1; GPa)	130	21	-	69
Transverse Modulus (E_2; GPa)	8	21	-	-
Shear Modulus (G_{12}; GPa)	6	4	-	-
Shear Modulus (G_{23}; MPa)	-	-	110	-
Shear Modulus (G_{13}; MPa)	-	-	69	-
Poisson's Ratio (ν_{12})	0.30	0.11	-	0.30
Longitudinal Tensile Strength (X^t; MPa)	1800	428	-	-
Longitudinal Compressive Strength (X^c; MPa)	1100	-	-	-
Transverse Tensile Strength (Y^t; MPa)	60	425	-	-
Transverse Compressive Strength (Y^c; MPa)	200	-	-	-
Inplane Shear Strength (S; MPa)	75	95	-	-



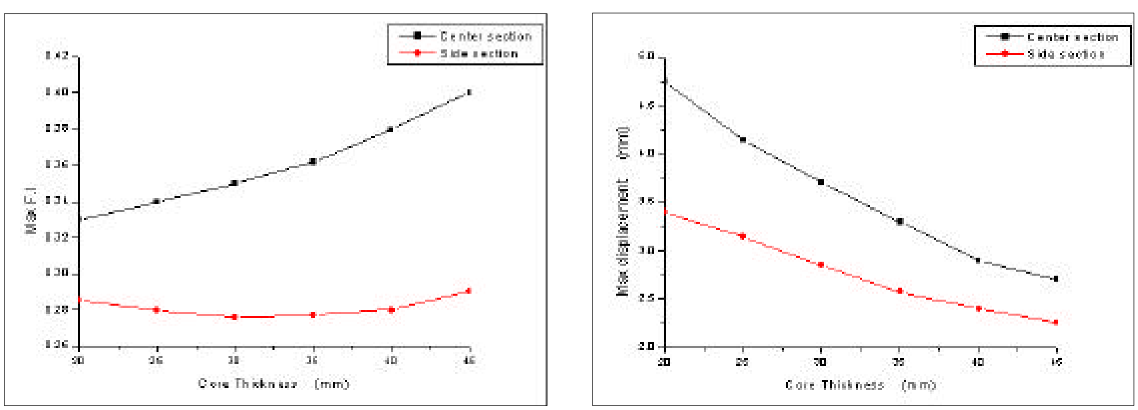
(a) **최대 파괴지수** (b) **최대 변위**

그림 3. **적층각에 따른 최대 파괴지수와 최대 변위**



(a) **최대 파괴지수** (b) **최대 변위**

그림 4. **면재 두께 변화에 따른 최대 파괴지수와 최대 변위**(**심재 두께**;40mm)



(a) **최대 파괴지수** (b) **최대 변위**

그림 5. **심재의 두께 변화에 따른 최대 파괴지수와 최대 변위**

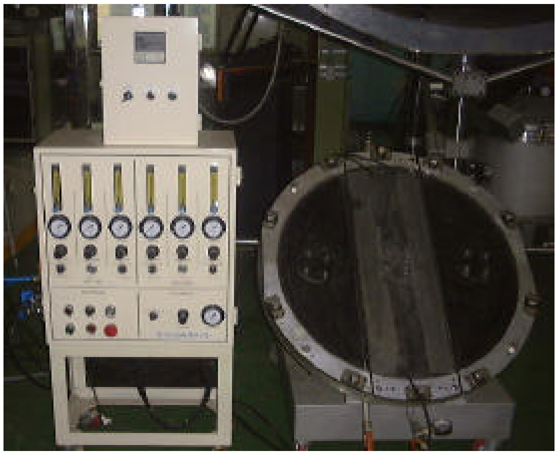


그림 6. 노즐댐 수압 시험장치

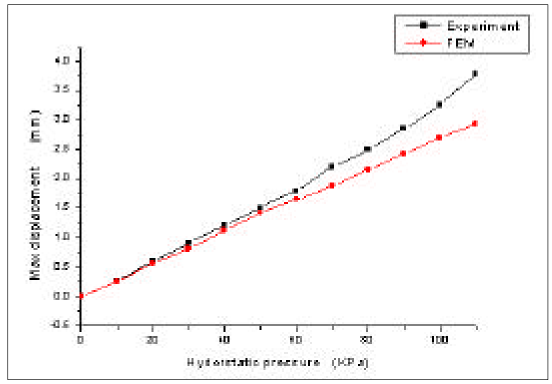


그림 7. 수압시험과 유한 요소 해석의 비교

5. 노즐댐의 제작

노즐댐의 적층각과 두께에 따른 면재와 심재의 설계변수를 결정하였다(표 5). 노즐댐은 prepreg lay-up법과 고압의 진공 백 프로세스를 사용하여 제작하였다. 노즐댐은 중앙판과 측면판의 간섭을 감소시키기 위하여 중앙판의 리브를 테이퍼하였다. 중앙판과 측면판은 독립적으로 하중을 지지한다. 로봇에 의한 파지가 가능하도록 중앙판과 측면판 모두에 어덴터를 설치하였다. 중앙판과 측면판은 각각 Ø22㎜의 2개의 볼트와 4개의 볼트로 체결되어진다. 노즐댐 설치 및 제거시에 볼트 또는 안내핀이 떨어지는 것을 방지하기 위하여 Ø7㎜의 구멍이 드릴링 되어있다. 제작된 복합재료 노즐댐의 중앙판과 측면판의 무게는 각각 80N과 74N이다. 알루미늄 합금으로 만들어진 기존의 노즐댐의 무게가 340N임으로 중앙판과 측면판의 무게가 각각 25%과 22%이다

.

6. 노즐댐의 수압시험

제작된 노즐댐의 수압시험을 수행하여 유한 요소 해석 결과와 비교하였다. 수압시험을 수행하기 위한 목업을 제작하였다. 다이어프램 실은 누수방지 압력은 448KPa이고 노즐댐에 작용하는 설계수압 110KPa이다. 그림 6은 노즐댐의 수압시험 장치이다.

수압시험에서 최대 변위는 3.75mm이고 유한 요소 해석에서는 2.87mm이다. 수압시험과 유한 요소 해석 결과를 그림 7에서 비교하였다. 압력이 증가함에 따라 변위 차이가 증가하고, 시험결과값이 유한 요소 해석결과값보다 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 시험결과가 유한 요소 해석 결과에 비해 다소 비선형적으로 나타남을 알 수 있다. 이것은 심재의 비선형성과 심재와 면재의 불완전한 결합 등에 의한 것이다. 수압시험 후 노즐댐을 분해하여 조사하였다.

표 5. 복합재료 노즐댐의 적층각 및 두께

Design parameter	Center Section	Side Section
The ply angle of the carbon-epoxy(。)	±15	±45
The thickness of the carbon-epoxy(mm);Face	5	5
The thickness of the honeycomb core(mm)	40	40
The thickness of the glass-epoxy(mm)	2	2
The thickness of the aluminum(mm)	2	2

7. 결 론

본 연구에서는 복합재료의 적층각에 따른 노즐댐 중앙판과 측면판의 최대 변위와 Tsai-Wu 파손이론에 따른 최대 파괴지수를 계산하였다. 설계된 노즐댐의 면재는 카본-에폭시 복합재료를 사용하였고 볼트 체결을 위한 구멍이 있는 플랜지 부위의 응력 집중을 감소시키기 위하여 유리-에폭시 직조 복합재료와 알루미늄 판으로 보강하였으며 노즐댐의 굽힘강성을 증가시키기 위하여 벌집구조를 사용하였다. 면재로 사용한 카본-에폭시 재료의 최대 방사선 흡수선량에서 온도의 변화에 따른 인장 및 압축 전단 시험을 수행하였다. 재료의 물성 변화는 매우 작음을 알았다. 노즐댐의 중앙판과 측면판에서의 최대 파괴지수와 최대 변위를 고려하여 노즐댐 중앙판과 측면판의 최적 적층각을 ±15°와 ±45°로 결정하였다. 면재와 심재는 두께 변화에 최대 파괴지수와 최대 변위를 고려하여 각각 5mm와 40mm로 결정하였다.

수압시험과 유한 요소 해석의 결과로부터 알루미늄 합금인 기존의 노즐댐에 비하여 구조적인 건전성을 유지하면서 무게가 25%정도인 경량의 복합재료 노즐댐을 설계하였다.

본 연구는 한국원자력연구소의 중장기연구개발사업의 일환으로써 수행하였다.

8. 참고문헌

[1] “No Jumpers Needed”, Nuclear Engineering International, Jan. 1991, p30.

[2] M. H. Trundle, “Nozzel Dam Remote Installation System and Technique”, U.S. Patent No. 5006302, Apr. 9, 1991.

[3] M. H. Trundle, “Nozzel Dam Translocationg System and Technique”, U.S. Patent No. 4959192, Sep. 25, 1990.

[4] C. Evans, “Segmented Nozzle Dam”, U.S. Patent No. 4957215, Sep. 18, 1990.

[5] "Installing Nozzel Dams 100% Remotely", Nuclear Engineering International, Mar. 1993, pp. 17-19.

[6] J. W. Everett, “Foldable Dual Seal Nozzle Dam”, U.S. Patent No. 4690172, Sep. 1, 1987.

[7] T. H. Wentzell, “Nozzle Plug for Submersible Vessel”, U.S. Patent No. 4482076, Nov. 13, 1984.

[8] E. M. Weisel, “Multisectioned Nozzle Dam”, U.S. Patent No. 5048570, Sep. 17, 1991.

[9] F. X. McDonald, “System for Installing Steam Generator Nozzel Dam”, U.S. Patent No. 5032350, Jul. 16, 1991.

[10] ANSYS User's Manual, Vol. III, Swanson Analysis System, Inc

[11] 원자력/압력용기 설계실, 한국중공업주식회사 “고리2호기 증기발생기 노즐댐 사용 절차서”, AUG. 1986

[12] G. R. Monforton and I. M. Ibraheim, “Analysis of Sandwich Plates with Unbalanced Cross-ply Faces”, Int. J. of Mech. Sci., Vol. 17, pp. 227-238, 1975.

[13] 이대길, 복합재료 역학 및 가공론, 성안당, 1993.

[14] 김태룡, 김승호, 정승호, 박진석, 박진호, 로봇 최적화 설계 기술개발, KAERI/RR-1337/93, 한국원자력연구소, 1994.

[15] 김태룡, 박진석, 정승호, 박진호, “증기발생기용 노즐댐 설계개선", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 25, pp. 327-335, 3. June, 1995.