

# 액체금속로 핵연료교환장치의 구조해석 II : 정적 휨변형해석

## Structural Analysis of Robot Structure Handling Nuclear Fuel Assembly in Liquid Metal Reactor Vessel II : Static Deflection Analysis

권 영 주\*      김 재 희\*\*  
Kwon, Young-Joo      Kim, Jae-Hee

### 요 지

본 논문에서는 MDO기법에 의한 핵연료교환장치의 구조해석 단계 중 핵연료교환장치의 휨변형을 구하는 재료역학해석을 수행하였다. 이는 액체금속로(LMR) 핵연료교환장치의 기본설계를 위하여 매우 중요하다. 해석대상 핵연료교환장치의 정적구조는 기 수행한 핵연료교환장치의 기구동역학해석 결과를 활용하였다. 네가지 핵연료교환동작에 대하여 핵연료봉의 무게를 100kg에서 500kg까지 100kg씩 증가시켜 휨변형의 크기를 구하였다. 그 결과 회전중심축에서 가장 멀리있는 핵연료봉을 교환하는 핵연료교환동작에서 최대 휨변형이 발생함이 밝혀졌다. 또한 이 최대 휨변형이 발생하는 핵연료교환장치구조에 대하여 부재의 단면두께를 축소하면서, 또 단면형상을 여러 가지로 바꾸면서 휨변형크기를 구하여 비교하였다. 비교결과 비교대상 단면형상중에서 중공직사각형 단면이 최소 휨변형이 발생하는 최적단면형상이 밝혀졌다.

**핵심용어** : 액체금속로, 핵연료교환장치, 휨변형, 재료역학해석, 최적단면형상

### Abstract

This paper describes the solid mechanics analysis of static robot structure handling the nuclear fuel assembly in Liquid Metal Reactor(LMR) to get deflection values for the basic design of such robot structure using Multidisciplinary Design Optimization methodology. The static robot structure determined through the rigid body dynamic analysis is used for the analysis. The analysis is performed for four cases of static robot structures handling nuclear fuel rods with weight loads of 100kg, 200kg, 300kg, 400kg, 500kg. The analysis result shows that the robot structure handling the fuel rod located in the farthest position from the central rotation axis has the maximum deflection value. And the analysis on such robot structure with various cross sections shows that the hollow rectangular cross section is the optimum shape to have the minimum deflection value.

**Keywords** : *Liquid Metal Reactor, robot structure handling nuclear fuel assembly, deflection, solid mechanics analysis, optimum cross section*

\* 정희원 · 홍익대학교 기계설계학과, 부교수

\*\* 한국원자력연구소, 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2000년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

본 논문에서는 액체금속로 핵연료교환장치의 기본설계를 목적으로 핵연료교환장치에 대한 구조해석을 수행하였다. 특히, 핵연료교환장치의 휨변형을 구하는 재료역학해석을 수행하였다. 재료역학해석 대상 구조물은 네가지 핵연료교환동작, 즉 원통형핵연료다발 배열에서 회전중심축에서 가장 멀리 위치한 핵연료봉 교환동작(Case 1), 회전중심축에서 원거리에 위치한 핵연료봉 교환동작(Case 2), 회전중심축에서 중간에 위치한 핵연료봉 교환동작(Case 3), 회전중심축에 근접한 핵연료봉 교환동작(Case 4)에서 그리퍼(gripper)가 핵연료봉을 붙잡아 들어 올리거나 내려놓는 그리퍼동작시의 정적인 핵연료교환장치구조이다. 이와같은 결과는 기수행한<sup>1)</sup> 핵연료교환장치에 대한 기구동역학해석을 통하여 알 수 있었다.

이와같은 정적구조를 우선 구해야 되는 이유는 핵연료교환장치의 작동시 가장 문제가 되는 것이 각 교환동작중 발생하는 핵연료교환장치인 로봇 매니플레이터의 최대 휨변형이기 때문이다. 이 최대 휨변형의 크기가 심각해지면 핵연료교환동작시 핵연료봉들 사이의 충돌과 같은 안전사고가 발생할 수 있다. 따라서 핵연료교환장치 설계시 최대 주안점은 이 최대 휨변형의 크기를 최소화 하면서 무게가 가벼운 핵연료교환장치를 설계하는 것이다. 이를 위해서는 우선 주어진 핵연료봉 무게에 대하여 최대 휨변형이 발생하는 핵연료교환동작을 알아야 한다. 본 논문에서는 네가지 핵연료교환동작(Case 1~Case 4)의 정적구조(그리퍼 동작시의 구조) 각각에 대하여 핵연료봉무게를 100kg에서 500kg까지 100kg씩 증가시키면서 재료역학해석을 수행하여 휨변형크기를 구하여 그 크기를 비교하였다.

비교결과 구한 휨변형이 가장 큰 정적구조도 핵연료교환장치의 두께와 단면형상에 따라서 휨변형의 크기가 변화한다. 따라서 본 논문에서는 핵연료교환장치 부재의 두께를 변화시키면서, 또한 부재의 단면형상을 여러가지로 변화시키면서 휨변형해석을 추가로 수행하였다.

본 논문에서는 MDO기법에 의한 구조해석의 한 단계로 핵연료교환장치의 부재를 일차원 봉(bar) 및 보(beam)로 단순화하지 않고 대신 삼차원 고체

구조물로 모델링하여 휨변형해석을 수행하여 이 삼차원 고체 구조물의 변형도 및 내부응력상태, 그리고 그리퍼 끝단에서의 휨변형양을 구하였다.

MDO기법을 적용하여 핵연료교환장치의 휨변형 크기를 구한 본 논문은 기존의 다른 연구 예를들면, Sunda 등<sup>2)</sup>이 취급한 삼차원 링크시스템의 휨해석, Usoro 등<sup>3)</sup>이 취급한 경량 매니플레이터의 휨해석, Simo 등<sup>4)</sup>이 취급한 큰 운동하의 보(beam)의 휨해석, Avello 등<sup>5)</sup>이 취급한 다중 물체시스템의 휨해석에서 적용한 복잡한 어려운 동적인 휨해석과는 다르게 MDO기법을 적용하면 핵연료교환장치의 휨변형 해석시 다루기 쉬운 정적인 재료역학해석을 수행하면 된다는 사실을 보여준다.

## 2. 핵연료교환장치의 휨변형에 대한 재료역학 해석 및 최적단면형상

### 2.1 문제의 개요

핵연료교환장치의 정적구조에 대한 휨변형을 구하기 위한 재료역학해석을 수행하기 위해서는 해석대상 구조에 대한 고체구조모델(solid structure model)이 정의되어야 한다. 이 고체구조모델은 핵연료교환장치의 기구동역학해석에서 취급한 고체모델과는 달리 핵연료교환장치인 로봇 매니플레이터의 링크(link)들 사이의 구분은 없어지며 매 해석시 마다 구조형태는 다르지만은 동일물질로 구성된 연속된 한 개의 고체 구조(solid structure)로 정의 되어야 한다. 따라서 핵연료교환장치의 휨변형을 구하기 위한 재료역학해석에서는 기구동역학해석<sup>1)</sup>에서 취급한 링크와 절점의 개념은 없어지며 연속된 하나의 구조에서 링크는 부재(member)로 절점은 결합부(joint)로 다시 정의 된다. 우선 네가지 핵연료교환동작(Case 1~Case 4)의 정적 고체구조에 대한 휨변형해석을 핵연료봉의 무게를 100kg에서 500kg까지 100kg씩 증가시켜 수행한다. 이를 위하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 각 정적 고체구조에 대하여 중실직사각형(10cm × 20cm) 단면형상을 가진 핵연료교환장치의 삼차원 고체모델(three dimensional solid model)을 생성한다. 각 핵연료교환동작 경우(Case 1~Case 4)의 고체모델에 대하여 핵연료봉 무게에 따른 휨변형해석을 수행한 후 휨변형크기를 비교하여 최대 휨변형

이 발생하는 정적 핵연료교환장치구조를 구한다. 그 다음 단계로 이 최대 휨변형이 발생하는 정적 핵연료교환장치구조에 대하여 부재의 단면두께를 4/5로 축소하여 휨변형해석을 수행하고 또한 부재의 단면형상을 중실직사각형과 단면적 크기가 동일한 중실정사각형, 중실원형 및 각각의 중실단면 보다 단면치수(단면두께)가 절반인 중공직사각형 중공정사각형, 중공원형,  $\pi$ 자형으로 변화시켜 휨변형해석을 수행한 후 그 변형크기를 비교하여 최소 휨변형이 발생하는 최적단면형상을 결정한다.

모든 경우에 있어 고체구조물을 구성하는 물질은 밀도( $\rho$ )=7,857kg/m<sup>3</sup>, 영률(E)=1.992×10<sup>11</sup>Pa, 포와송비( $\nu$ )= 0.3인 Stainless Steel로 가정한다. 또한 핵연료봉무게 이외에, 핵연료교환장치의 자중(중실단면인 경우 2,111.7 kgf)을 고려한다. 보통 원자로의 설계에서는 지진등과 같은 동적인 충격을 고려해야 한다. 예를들면 이승준 등<sup>6)</sup>, 정명조 등<sup>7),8)</sup>, 김일곤<sup>9)</sup>의 연구에서 처럼 원자로 구조물에 대한 거동분석에서 지진등의 동적인 충격이 고려되고 있다. 그러나 본 연구에서는 핵연료교환 동작이 지진이 발생하지 않는 상황에서 일어난다고 가정하여 지진등과 같은 동적인 외력은 고려하지 않는다.

## 2.2 핵연료교환장치의 휨변형에 대한 재료역학 해석

본 논문에서는 범용유한요소해석코드인 ANSYS를 이용하여 핵연료교환장치에 대한 휨변형해석을 수행한다.

### 2.2.1 해석 모델링

본 논문에서는 ANSYS의 그래픽기능을 이용하여 매 해석시 마다 정적 핵연료교환장치구조에 대한 삼차원고체모델을 생성한다(Fig. 1참조). 이 삼차원 고체모델을 이용하여 유한요소모델(FEM model)을 생성한다(Fig. 2참조). 유한요소모델생성시 유한요소형(element type)을 10개의 절점(node)을 갖는 삼차원사면체형(tetrahedron type, Solid92 Type)을 택하였다. 따라서 유한요소망은 ANSYS의 자동유한요소생성(auto mesh)기능을 이용하여 모델을 구성하고 있는 체적(volume)을 자동으로 메쉬로 나누어 유한요소를 생성하였다. 3차원 4면체를 사용한 유한요소 모델의 크기는 중실직사각형 단면인 경우 유한요소수 12,903개 절점(node)수 24,120개이다. 모든 물성치는 SI단위를 사용하였다.

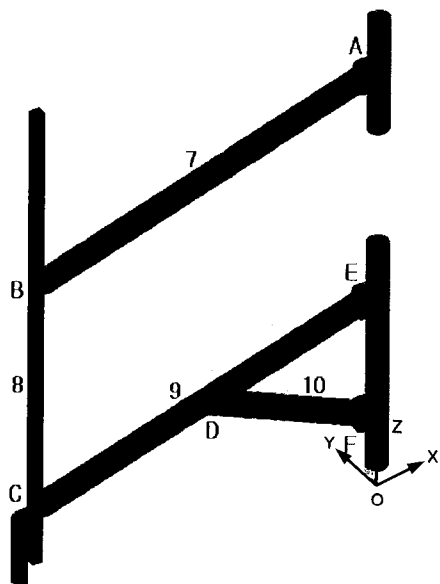


Fig. 1 Solid model of static robot structure for case 1

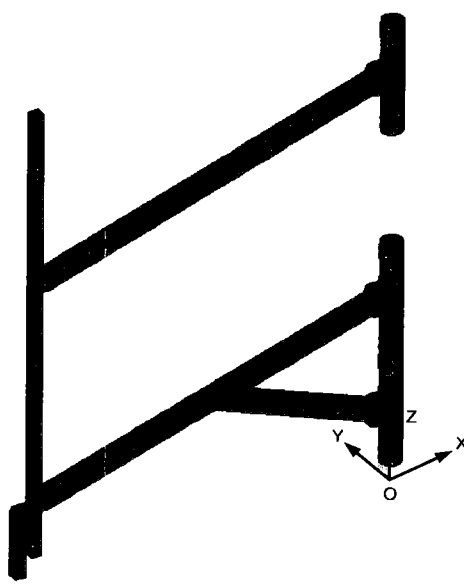


Fig. 2 FEM model of static robot structure for case 1

### 2.2.2 변위 및 외력 구속조건

핵연료교환장치의 정적 휨처짐변형해석을 수행하기 위해서는 적절한 변위 경계조건 및 외력 구속조건이 필요하다. 핵연료교환장치를 지지하고 있는 회전 중심기둥은 자체적으로 회전하면서 로봇 매니플레이터를 지지해야하므로 구조변형이 일어나지 않아야 한다. 핵연료교환장치가 최대 휨변형을 일으키는 순간은 핵연료교환장치의 그리퍼가 핵연료봉을 붙잡아 들어올리는 정적 구조상태이기 때문에 회전중심기둥안에서 움직이는 두개의 슬라이더(slider)도 회전기둥안에서 정지된 상태로 있어야 한다. 따라서 회전기둥안에 있는 핵연료교환장치의 두개 슬라이더(slider)가 회전기둥과 접하고 있는 모든 면에서의 변위값은 0이 되도록 구속한다. 또한 결합부(joint) F에서의 변위값도 0이 되도록 구속한다(Fig. 3 참조). 하중은 핵연료봉을 붙잡고 있는 그리퍼의 끝부분에 분포하중으로 적용시킨다(Fig. 3 참조). 이때 하중의 크기를 100kg에서부터 500kg까지 100kg씩 증가시켜 적용하였다

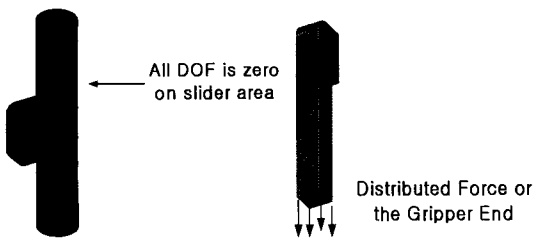


Fig. 3 Displacement constraint condition on slider area and distributed load exerted on the end of gripper

## 2.3 해석결과분석 및 최적단면형상

### 2.3.1 네가지 정적구조물에 대한 해석결과

ANSYS를 이용한 핵연료교환장치에 대한 정적 휨변형해석결과 우선 해석을 수행한 네가지 해석모델중 첫번째 해석모델(Case 1)의 경우 핵연료봉의 무게에 의해 발생한 휨변형을 관찰하면 Fig. 1에 표시된 부재 7과 부재 9의 끝단에 많은 휨변형이 발생하여 결과적으로 부재 8 끝에 붙어있는 그리퍼 끝단에 최대 휨변형이 발생하는 것을 알 수 있다(Fig. 4참조). 또한 부재 8 자체도 약간 휨변형이

발생한 것을 알 수 있다(Fig. 4참조). 최대 휨변형이 발생할 때 핵연료교환장치 고체구조내의 응력분포도 역시 구하였다(Fig. 5참조). 이에 의하면 결합부 D에서 최대응력(Table 1참조)이 발생하여 응력집중(stress concentraion)현상이 발생함을 알 수 있다. 또 결합부 C부근에도 응력집중현상이 관찰되고 있다. 따라서 이 결합 부분들이 구조적으로 취약한 부분임을 알 수 있다. 그러나, 이 결합부들은 실제 핵연료교환장치에서는 핀절점(pin joint)으로 되어 있어 구조적으로 큰 문제는 없을 것으로 예상된다. 또한 이 결합부에서의 최대응력의 크기(20~60 MPa, Table 1참조)도 구조물 재질(stainless steel)의 항복강도(280~700 MPa)보다 훨씬 작아 구조적으로 안전하다. 이때 그리퍼 끝단의 휨변형크기는 그리퍼 끝단의 -z방향의 변형도를 계산하여 구한다. 같은 방법으로 다른 해석모델의 경우(Case 2~Case 4)들에 대해서도 휨변형크기를 구하였다(Fig. 6참조). Fig. 6에 나타난대로 첫번째 해석모델(Case 1)에서 최대 휨변형이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 다음에 수행할 단면형상에 따른 핵연료교환장치의 변형크기를 비교하기 위한 재료역학해석은 최대 휨변형이 발생하는 첫번째 해석모델(Case 1)을 이용하여 수행한다. 이와같은 연구수행 목적은 예상되는

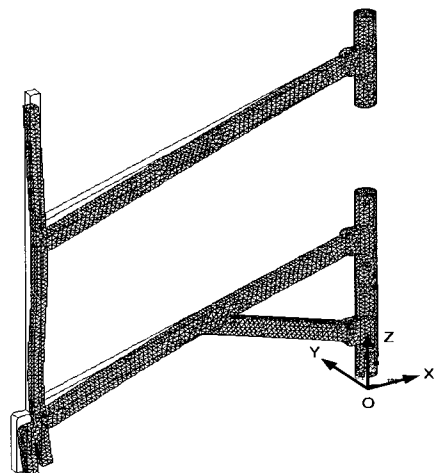
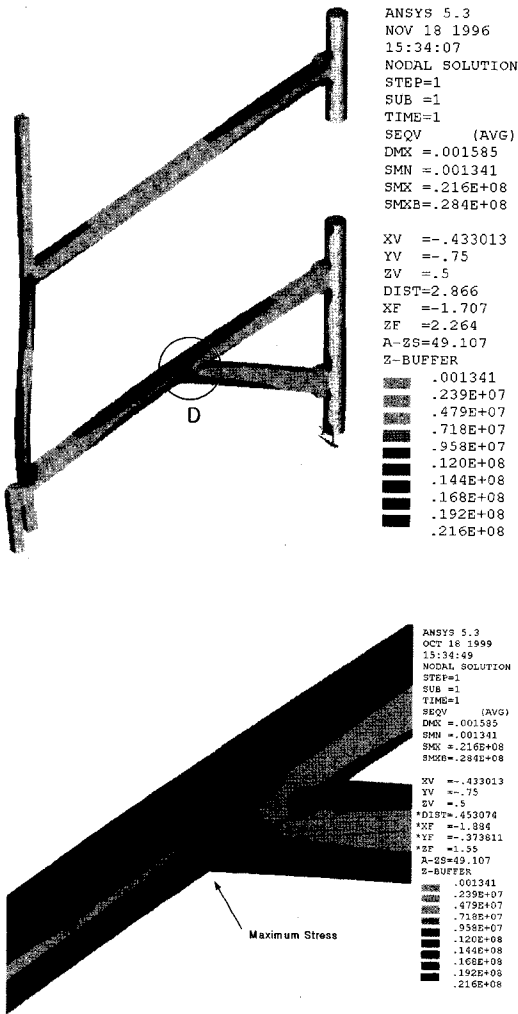


Fig. 4 Deflection deformation result of static robot structure for case 1(Weight fo nuclear fuel rod : 300kgf, cross section : rectangular shape)

모든 핵연료교환동작 중 가장 불안정한 구조형태를 찾기 위함이다. 이 가장 불안정한 구조형태가 주어진 설계조건(변형크기 및 최대응력크기)을 만족하면 해석대상 핵연료교환장치는 설계목적에 부합하는 구조물이 될 수 있기 때문이다.



Detailed View fo Joint D

Fig. 5 Stress(Von Mises Equivalent Stress) analysis result of static robot structure for case 1(Weight of nuclear fuel rod : 300kgf, cross section : rectangular shape)

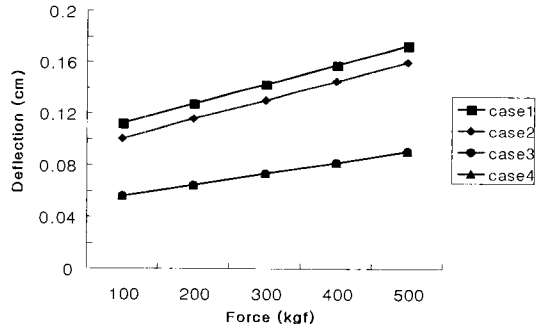


Fig. 6 Deflection deformation (- z direction ) analysis results for four cases(Case 1 ~Case 4)(Weight of nuclear fuel rod is increased from 100kgf to 500kgf by 100kgf. Cross section is rectangular shape)

2.3.2 단면변화에 따른 해석결과 및 최적단면형상 최대 휨변형이 발생하는 핵연료교환장치의 정적 구조(Case 1)에서 부재 단면의 가로, 세로의 길이가 4/5로 축소된 핵연료교환장치에 대해서 핵연료봉의 무게를 변화시키면서 같은 휨변형해석을 수행하여 그리퍼 끝단의 변형크기를 구하였다. 이 값을 원래두께 크기를 갖는 핵연료교환장치의 변형크기와 비교하면 -z방향의 변형크기는 1.5~1.6배 더 큰 약 1.5~2.4mm, +x방향의 변형크기도 1.5~1.6배 더 큰 약 1.0~1.7mm, 최대응력크기는 1.3~1.4배 더 큰 약 30~50MPa인 것을 알 수 있다(Table 1 참조). 비록 최대응력의 크기(47.5 MPa)가 물질의 항복강도인 280~700 MPa보다 훨씬 작지만은 +x 방향의 변형은 최대값(1.7 mm)이 핵연료봉사이의 간극의 크기인 3mm의 절반인 1.5mm를 초과함으로써 핵연료교환장치 부재의 두께를 4/5로 축소시키면 구조물이 불안정해지는 것을 알 수 있다.

역시 최대 휨변형이 발생하는 첫번째 해석모델(Case 1)의 정적 핵연료교환장치구조에 대하여 핵연료봉무게를 변화시키면서 부재의 단면형상을 중실 직사각형 이외에 단면적이 중실직사각형과 동일한 중실정사각형, 중실원형 및 단면치수(단면두께)를 절반으로 줄인 중공직사각형, 중공정사각형, 중공원형, ㄷ자형으로 변화시키면서 같은 재료역학해석을 수행하였다. 그 결과 구한 변형크기 및 최대응력크

기를 Table 1에 정리하였다. 이때 y방향 변형크기는 모두 0이기 때문에 표시하지 않았다. Table 1에 나타난 바와 같이 해석대상 단면형상들을 비교했을 때 중공직사각형단면의 핵연료교환장치구조에서 최소 변형(+x방향의 변형크기는 0.69mm, -z방향 변형크기는 0.97mm)이 발생함을 알 수있다. 따라서 비교대상 단면형상중 가벼우면서 견고한 핵연료교환장치구조는 중공직사각형 단면형상의 구조임을 알 수 있다. 이 중공직사각형 단면형상이 최적단면형상이다.

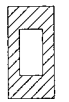

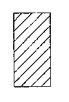
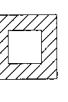
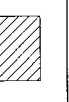



### 3. 결 론

지금까지의 해석결과를 검토해 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 첫째로 그리퍼에 적용된 하중의 크기를 증가시키에 따라 핵연료교환장치의 휨변형크기도 비례하여 증가하였다. 둘째로 제안된 네가지 해석모델경우(Case 1~Case 4)에 대한 휨변형크기를 비교해보면 첫번째 해석모델 경우(Case 1)가

제일 큰 휨변형크기를 가지며 회전중심축에 가까운 핵연료봉을 교환하는 해석모델(Case 2~Case 4)일수록 휨변형크기가 작아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 그리퍼가 회전중심축에 가까운 모델일수록 핵연료교환장치는 구조적으로 견고해지는 것으로 생각된다. 셋째로 모든 경우에 있어서 결합부 D에 최대응력(응력집중현상)이 발생하여 이부분이 구조적으로 취약한 것으로 나타났다. 그러나 실제 핵연료교환장치에서는 이 부분은 핀결점(pin joint)으로 되어 있어 구조적으로 큰 문제가 없을 것으로 예상된다. 넷째로 부재 단면의 크기가 감소된 핵연료교환장치의 변형크기는 감소된 핵연료교환장치 모델보다 훨씬 증가하였다. 이는 원래의 핵연료교환장치 모델보다 핵연료교환장치 부재 두께를 축소하면 구조적으로 안전에 문제가 있음이 예상된다. 예를들면, 핵연료봉의 무게가 500kgf일 때 부재 두께가 축소된 핵연료교환장치의 +x방향의 변형크기는 약 1.7mm로 핵연료봉사이의 간극크기인 3mm의 절반

Table1 Deflection magnitudes and maximum stresses of static robot structure (Case 1) for various cross section shapes

(Unit : cm , MPa)

Section		Rectangular Shape (Hollow)	Rectangular Shape	Rectangular Shape (4/5)	Square Shape (Hollow)	Square Shape	Circle Shape (Hollow)	Circle Shape	∩ Shape	
										
Deflection (cm)	100 (kgf)	+X	0.068854	0.071680	0.105650	0.104900	0.109928	0.106860	0.112032	0.079914
		-Z	0.096701	0.100326	0.151720	0.149750	0.156030	0.152644	0.159220	0.111156
	200 (kgf)	+X	0.079144	0.081424	0.121920	0.120310	0.124600	0.122540	0.126970	0.092468
		-Z	0.110306	0.113106	0.173580	0.170532	0.175546	0.173814	0.179218	0.127634
	300 (kgf)	+X	0.088424	0.091168	0.138198	0.135720	0.139270	0.138220	0.141910	0.105020
		-Z	0.123910	0.125840	0.195970	0.191312	0.195242	0.194984	0.199216	0.144110
	400 (kgf)	+X	0.099727	0.100912	0.154470	0.151126	0.153942	0.153904	0.156846	0.117578
		-Z	0.137512	0.138666	0.218100	0.212092	0.214850	0.216156	0.217940	0.160588
	500 (kgf)	+X	0.110018	0.110656	0.170744	0.166534	0.168616	0.169586	0.171784	0.130130
		-Z	0.151118	0.151446	0.240230	0.232874	0.234458	0.237326	0.239208	0.177066
	Maximum Stress (Von Mises Stress) (MPa)	100(kgf)	23.719	22.867	29.146	28.316	29.472	27.934	38.497	30.528
		200(kgf)	26.891	25.616	33.727	32.562	33.517	31.540	42.958	34.813
300(kgf)		30.063	28.365	38.309	36.809	37.563	35.147	47.432	39.098	
400(kgf)		33.236	31.114	42.891	41.055	41.609	38.754	51.881	43.382	
500(kgf)		36.408	33.863	47.472	45.301	45.656	42.626	56.343	47.667	

※ y 방향 변형의 크기는 모두 0임.

을 훨씬 초과하고 있다. 다섯째로 핵연료교환장치 부재의 단면형상을 여러 가지로 변화시킨 해석결과 중공직사각형단면형상이 다른 비교대상 단면형상들에 비하여 변형크기가 제일 작은 값을 갖는 것으로 보아 구조적으로 견고한 안정적인 최적단면형상임을 알 수 있었다.

결론적으로 본 연구를 통하여 구조해석을 수행한 제안된 중실직사각형단면의 핵연료교환장치모델이 핵연료교환장치 부재 단면두께가 감소된 핵연료교환장치와 비교했을 때 비교적 정성적/정량적으로 안전한 것으로 생각되어지며, 또 이 중실직사각형단면의 핵연료교환장치모델에 대한 재료역학해석 결과 제일 큰 +x방향의 변형크기가 1.1mm(핵연료봉하중이 제일 큰 500kg인 첫 번째 해석모델(Case 1) 경우)인 것으로 보아 핵연료봉사이의 간극이 3mm인 것을 감안할 때 정량적으로도 3mm의 절반인 1.5mm 보다 훨씬 작으므로 제어 가능한 안전한 구조물로 여겨진다. 특히 단면형상이 제안된 중실직사각형단면 보다 중공직사각형단면형상이면 구조적으로 더욱더 견고하면서 경량 구조물이 될 것으로 결론지어진다.

### 참 고 문 헌

1. 권영주, 김재희, "액체금속로 핵연료교환장치의 구조해석 I : 기구동역학해석", 한국전산구조공학회논문집, 제12권 제4호, 1999. 12, pp.573~581
2. Sunda. W. and Dubowsky. S., "The Application of Finite Element Methods to the Dynamic Analysis of Flexible Spatial and Co-planar Linkage Systems", *ASME J. Mech. Design*. Vol. 103, 1981, pp.643~651
3. Usoro, P.B., Nadira. R. and Mahil. S. S., "A Finite Element/Lagrange Approach to Modeling Light Weight Flexible Manipulators", *ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*. Vol. 108, 1986, pp.198~205
4. Simo, J. C. and Vu-Quoc, L., "On the Dynamics of Flexible Beams under Large Overall Motions - the Planar Case: Part 1 and 2", *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 53, 1986, pp.849~863
5. Avello, A, DE Jalon, J. G., and Bayo, E., "Dynamics of Flexible Multibody Systems Using Cartesian Coordinates and Large Displacement Theory", *Inter. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.32, 1991, pp.1543~1563
6. 이승준, 구민세, 정란, 신동기, "내진해석을 위한 강구조물의 극한상태에 대한 연구", 한국전산구조공학회 논문집, 제4권 제1호, 1991.3, pp.79~88
7. 정명조, 최순, 송희갑, 박근배, "한국표준형 원자력발전소 제어봉집합체 보호구조물의 모우드특성", 한국전산구조공학회 논문집, 제5권 제3호, 1992. 9, pp.105~112
8. 정명조, 박근배, 최순, 송희갑, "한국표준형 원자력발전소 제어봉집합체 보호구조물의 모우드특성(II. 실험 및 실험후 해석)", 한국전산구조공학회 논문집, 제5권 제4호, 1992. 12, pp.93~102
9. 김일곤, "안전정지 지진하의 원자로 내부구조물 거동분석," 한국전산구조공학회 논문집, 제7권 제1호, 1994.3, pp.95~103

(접수일자 : 1999. 4. 19)