

액체금속로 핵연료교환장치의 구조해석 I : 기구동역학해석

Structural Analysis of Robot Structure Handling Nuclear Fuel Assembly in Liquid Metal Reactor Vessel I : Rigid Body Dynamic Analysis

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

요 지

액체금속로(LMR) 핵연료교환장치의 기본설계를 위해서는 여러분야(예를들면, 기구학, 동역학, 재료역학 등)의 해석을 동시에 수행해야 한다. 그러나 이와같은 해석들은 각각 별개로 연속적으로 수행되는 것이 아니라, 상호 유기적인 연관을 갖고 수행되어야 한다. 이와같은 해석에 적합한 기법이 MDO기법이다. 본 논문에서는 MDO기법에 의한 핵연료교환장치 구조해석의 한 단계로 핵연료교환장치의 기구동역학해석을 수행하여 핵연료교환장치 작동에 대한 기구운동학적 특성 및 동역학적 특성을 분석하였다. 분석결과 해석대상 핵연료교환장치는 예상한대로 원활하게 작동됨이 확인 되었다. 아울러 이 분석 결과를 토대로 핵연료교환장치의 정적 휨변형을 구하기 위한 재료역학해석에서 요구되는 정적구조를 결정하였다.

핵심용어 : 액체금속로, 핵연료교환장치, MDO기법, 기구동역학해석, 정적구조

Abstract

Multidisciplinary analyses(e.g., kinematic analysis, kinetic analysis, solid mechanics analysis etc.) should be performed simultaneously to get design parameters for the basic design of robot structure handling nuclear fuel assembly in Liquid Metal Reactor(LMR). But these analyses also should have their inter organic relations. Hence, Multidisciplinary Design Optimization methodology is very required for this study. This paper reported here describes the rigid body dynamic analysis on the motion of such robot structure as one of structural analysis processes using Multidisciplinary Design Optimization methodology. The kinematic and the kinetic characteristics of robot's rigid body movement are analyzed. The analysis results show that the robot structure operates very well as expected. Also the static structure for the solid mechanics analysis to get deflection values of robot structure is determined through this study.

Keywords : Liquid Metal Reactor, robot structure handling nuclear fuel assembly, Multidisciplinary Design Optimization methodology, rigid body dynamic analysis, static structure

1. 서 론

본 논문에서는 액체금속로(LMR : Liquid Metal

Reactor)내 핵연료교환장치의 기본 설계기술개발을 목적으로 핵연료교환장치에 대한 구조해석을 수행하였다. 핵연료교환장치의 구조해석은 그리 간단한 문제

* 정희원 · 홍익대학교 기계설계학과, 부교수

** 한국원자력연구소, 책임연구원

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

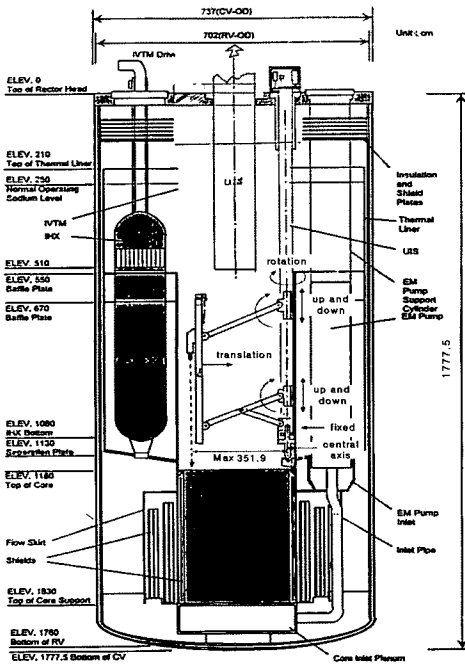


Fig. 1 Schematic diagram of nuclear reactor vessel and robot structure handling nuclear fuel assembly

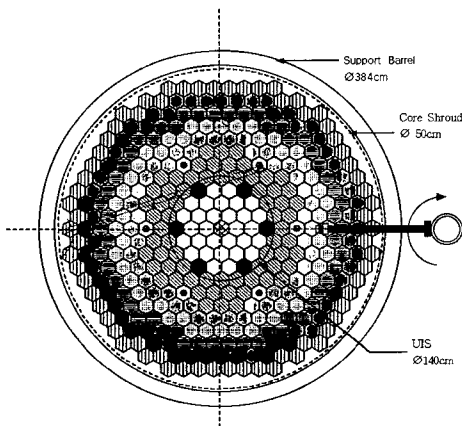


Fig. 2 Top view of nuclear fuel assembly

가 아닌 매우 난해한 해석상의 문제점을 갖고 있다. Fig. 1의 핵연료교환장치에 대한 구조해석의 최대 주안점은 핵연료교환 장치인 로봇 매니플레이터가 핵연료봉을 붙잡고 움직일 때 발생하는 구조적 휨변형이다. 정확한 휨변형해석을 통하여 로봇 매니플레이터가

핵연료봉을 운반할 시 핵연료봉들 사이의 충돌과 같은 안전사고를 미리 예방할 수 있기 때문이다.

이와같은 휨변형을 야기하는 중요한 일차적인 요인은 핵연료교환장치의 자중 및 핵연료봉의 무게이다. 그 밖의 고려사항으로는 지진과 같은 원자로 외부로부터의 충격에 의한 요인을 고려할 수 있다. 핵연료교환장치의 자중 및 핵연료봉의 무게는 핵연료교환장치에 가해지는 정적인 외력인데 반하여 지진과 같은 외력은 시간에 따라 급변하는 동적인 외력이다. 따라서 지진과 같은 원자로 외부의 충격까지 고려한 구조해석은 매우 난해하며 복잡해진다. 그러나 대부분의 핵연료교환작업이 지진과 같은 외적인 충격이 없는 상태에서 이루어진다고 가정하면 동적인 외력보다는 핵연료교환장치의 자중 및 핵연료봉 무게에 의한 정적인 외력이 핵연료교환장치 설계시 고려사항인 휨변형의 주요 요인임을 알 수 있다. 이와같은 외력의 형태에 따른 해석의 어려움 이외에도 또다른 해석상의 어려움은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 300여개의 핵연료봉 위치의 다양함에 있다. 비록 다행히도 원형의 핵연료다발 형태 때문에 핵연료교환장치를 지지하는 회전중심축을 지나는 직경에 대하여 대칭으로 배열되어 있지만은 이와같은 대칭 배열구조를 이용한다 해도 300여개의 절반인 150여개의 핵연료봉위치에 대한 핵연료교환장치의 핵연료교환동작은 수적으로 매우 다양하게 많다. 따라서 최소한 150여개의 핵연료봉위치에 대한 150여번의 구조해석을 수행해야 한다. 또한 핵연료봉무게가 일정치 않고 변화하면 각각의 변화된 하중에 대하여 매번 최소한 150여번의 구조해석을 수행해야 하므로 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 수백번의 구조해석이 요구된다. 그러나 이와같은 수백번의 구조해석은 이론적으로 거의 가능하지 않다. 또 핵연료교환장치는 핵연료봉을 운반하면서 휨변형이 발생하기 때문에 매번의 구조해석은 운반동작에 대한 기구동역학해석과 휨변형에 대한 재료역학해석을 동시에 복합적으로 수행해야 된다. 이와같은 해석의 이론적 접근 방법으로 로봇 매니플레이터를 일차원 봉(bar)으로 근사하더라도 수백번의 해석을 수행하는 것은 거의 무리일 뿐 아니라 비록 해석을 수행했다 해도 정밀한 구조설계를 위해서는 근사적 해석결과는 무의미하다. 그러나 본 논문에서는 이와같은 이론적 해석상의 문제를 해결할 수 있는 방법론을 제시하면서 이 방법에 의한 정밀한 구조해석을 수행하고자 한다.

MDO(Multidisciplinary Design Optimization) 기법^{1)~3)}은 유한요소법(FEM)과 같은 수치해석기법의 발달과 이 수치해석기법의 컴퓨터와의 접목에 의해서 나타난 전산해석코드의 발달로 최근에 여러분야에서 응용되고 있다. 특히 복합적인 해석을 요구하는 현대의 항공기등과 같은 기계의 설계에 널리 적용^{4)~8)}되고 있다. 예를들면 Stubbe⁴⁾는 초음속 비행체 설계에 MDO기법을 적용하였고, Tappeta 등⁵⁾은 고온상태의 항공기엔진 부품설계에 MDO기법을 적용하였으며, 그외에 Giesing 등⁶⁾, Chamis⁷⁾, Rowel 등⁸⁾도 MDO기법을 여러 비행체 설계에 적용하였다.

본 논문은 MDO기법에 의한 구조해석의 한 단계로 핵연료교환장치인 로봇 매니플레이터의 핵연료교환동작에 대한 기구동역학해석을 수행하여 핵연료교환장치 동작의 운동학적 특성 및 동역학적 특성을 분석하였으며 아울러 이 분석을 통하여 핵연료교환장치의 정적 힘변형해석을 위한 정적구조를 결정하였다.

2. MDO기법에 의한 핵연료교환장치의 구조 해석

일반적으로 기계를 설계하는 과정은 개념설계(conceptual design)→기본설계(basic design)→상세설계(preliminary design)→생산설계(final design)의 과정을 반복한다고 말할 수 있다. 그런데 각 설계 과정은 여러 복합적인 해석을 동시에 요구한다. 예를들어 비행기설계시 두번째 기본설계과정을 살펴보면 Jameson⁹⁾이 논한 바와 같이 기본설계과정은 복합적인 여러분야(연소추진해석, 소음해석, 안정성해석, 제어해석, 유동해석, 응력해석, 열해석등)의 해석을 동시에 요구(MDA : Multidisciplinary Analysis)한다. 그런데 복합적인 여러분야 해석은 독립적인 해석을 수행해도 되는 경우가 있지만 대부분의 경우 서로 상호영향(interaction)¹⁰⁾을 주기 때문에 각 경우에 따른 해석의 수는 기하급수적으로 증가한다. 따라서 이론적인 해석적 방법으로는 이와 같은 복합적인 해석을 동시에 수행하는 것은 아주 무리이다. 그러나 현대 공학에서 수치적 방법의 발달과 컴퓨터의 발달에 의한 전산해석코드는 이와 같은 복합적인 해석을 가능하게 해주고 있다. 그렇지만 이런 경우에도 해석의 수는 여전히 막대하기 때문에 설계과정에서 복합적인 해석은 여전히 어려운

문제이다. 따라서 이와같은 문제를 극복하기 위하여 모든 경우의 해석을 다 수행하는 대신에 설계목적에 부합하는 최적의 경우만 해석을 수행하는 MDO기법이 요구되고 있다. MDO기법에 의한 해석/설계에서 Samareh^{11),12)}가 언급한 것과 같이 CAD시스템, Mesh Generator, Solid Modeller, CAE시스템등의 이용은 매우 요구된다. 이런 전산시스템들의 성능향상은 기계구조해석/설계에서 MDO기법의 적용을 더욱 요구하고 있다.

서론부분에서 언급한 바와 같이 150여개의 핵연료봉을 교환하는 로봇 매니플레이터의 모든 동작에 대한 해석은 핵연료교환장치의 자중과 핵연료봉무게와 같은 정적인 외력등을 모두 고려한 해석의 복잡성과 수행해야될 해석수의 많음을 고려할 때 수학적 이론적 해석은 거의 가능하지 않다. 따라서 이와 같은 해석을 수행하기 위해서는 MDO기법을 적용해야 한다. Fig. 3에 도시한 대로 핵연료교환장치의 작동해석에 요구되는 해석으로는 핵연료교환장치인 로봇 매니플레이터의 운동에 대한 기구해석, 핵연

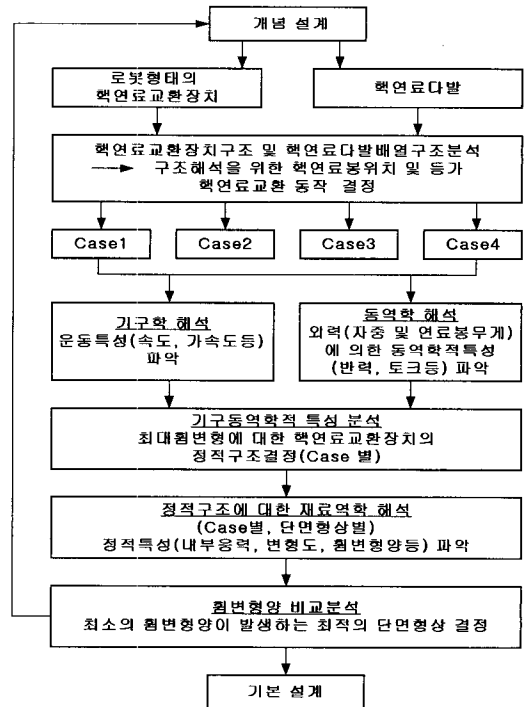


Fig. 3 Structural analysis process of robot structure by MDO methodology

료교환장치의 자중 및 핵연료봉무게등을 고려한 동역학해석, 또 이와같은 하중에 의한 휨변형에 대한 재료역학해석이 있다. 구조해석단계는 크게 핵연료교환장치의 동특성을 파악하고, 핵연료교환장치의 휨변형해석을 위한 정적구조를 구하기 위한 기구동역학해석과 이 정적구조의 휨변형을 구하는 재료역학해석으로 나뉘어진다.

3. 핵연료교환장치의 기구동역학해석 및 정적구조

3.1 핵연료교환장치의 기구선도 및 문제의 개요

다음 Fig. 4는 Fig. 1에 표시된 핵연료교환장치에 대한 기구선도이다. 그림의 기구선도에 표시된 것과 같이 핵연료교환장치의 기구학모델은 11개의 링크(link)(빋금친 ground 포함), 11개의 절점(joint)(3개의 고정 절점, 6개의 회전 절점, 2개의 회전+병진 절점)로 구성되어 있다. 따라서 허용 자유도(mobility)는 4개(z_1, z_2, z_3, θ , Fig. 4참조)이다.

본 논문에서는 회전중심축 3를 z축방향으로 θ 만큼 회전시키고, 슬라이더(slidebar) 5와 슬라이더(slidebar) 6를 같은 거리만큼 상하($z_1 = z_2$)로 이동시켜 로봇 매니플레이터를 작동시킨다. 또 그리퍼(gripper) 11

를 상하(z_3)로 작동하여 핵연료봉을 들어올리거나 내려놓는다. 이와같은 로봇 매니플레이터의 동작은 핵연

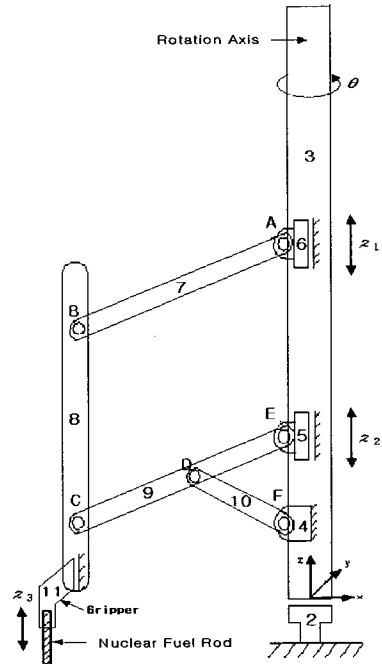
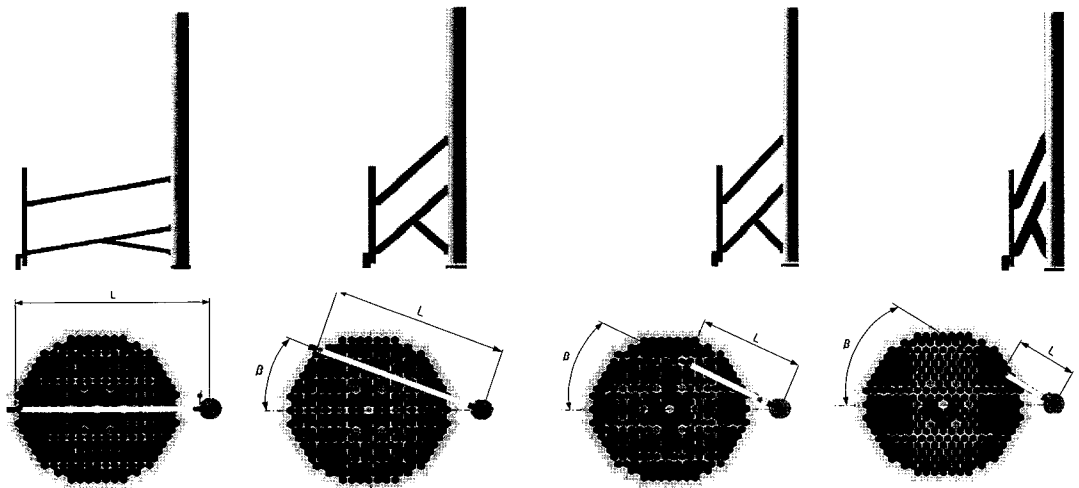


Fig. 4 Kinematic diagram of robot manipulator



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

($L=351.9\text{cm}, \beta=0^\circ$) ($L=321.3\text{cm}, \beta=21.78^\circ$) ($L=198.8\text{cm}, \beta=27.8^\circ$) ($L=119.5\text{cm}, \beta=33.7^\circ$)

Fig. 5 Four positions of nuclear fuel rods and equivalent robot structures

료봉의 위치에 따라 각기 다르게 된다. 그러나 모든 핵연료교환동작에 대한 해석은 무의미하며 설계목적에 맞는 최소한의 핵연료교환동작만 해석하면 된다.

3.2 기구동역학해석을 위한 핵연료교환동작

핵연료다발내의 핵연료봉의 갯수는 300여개나 되기 때문에 각 위치의 핵연료봉을 교환하는 로봇 매니플레이터의 교환동작에 대한 운동특성해석의 수는 300여회가 될 수 있다. 이는 이론적으로 가능하지 않으며, 설계목적상 무의미하다. 따라서, 설계목적에 부합하는 위치의 핵연료봉을 선택해야 한다. 본 논문에서는 Fig. 2의 핵연료다발의 회전중심축을 지나는 직경에 대하여 핵연료봉들의 위치가 대칭구조라는 성질과 핵연료교환동작이 회전중심축에 대한 회전운동임을 고려하여, Fig. 5에 표시한 것과 같이 네가지 경우의 핵연료봉 위치를 선정하였다. Fig. 5에서 Case 4는 회전중심축과 근접해 있는 핵연료교환동작을, Case 3는 중간위치의 핵연료봉 교환동작을, Case 2는 원거리에 있는 핵연료봉교환동작을 각각 대표하여 나타낸다. 그러나, Case 2는 회전중심축에서 가장 멀리 위치해 있는 핵연료봉을 포함하지 않기 때문에 가장 먼 곳에 있는 핵연료봉을 교환하는 동작(Case 1)이 추가로 요구된다. 따라서, 기구동역학해석을 위하여 선택된 핵연료교환동작은 네가지 경우가 된다. Fig. 5에서 L 은 회전중심축에서 핵연료봉까지의 거리이며, β 는 핵연료다발 중심과 회전중심축을 잇는 직선과 핵연료봉과 회전중심축을 잇는 직선이 이루는 각도이다.

3.3 핵연료교환장치의 기구동역학해석

300여개의 핵연료봉위치에 대한 핵연료교환장치의 운동해석 대신에 앞절에서 논한 네가지 핵연료봉교환동작에 대한 해석을 수행하는 것이 MDO기법의 핵심이다. 본 논문에서는 핵연료교환장치의 기구동역학해석을 위하여 ADAMS 프로그램을 이용하였으며, 핵연료봉무게와 핵연료교환장치의 자중을 고려한 해석을 Case 1~Case 4의 핵연료교환동작에 대하여 수행하였다. Fig. 6는 ADAMS로 모델링한 핵연료교환장치의 고체모델(solid model)이다. 핵연료교환장치의 동작은 우선 그리퍼의 상하 운동에 의해서 핵연료봉을 붙잡아 들어 올리고 회전중심축

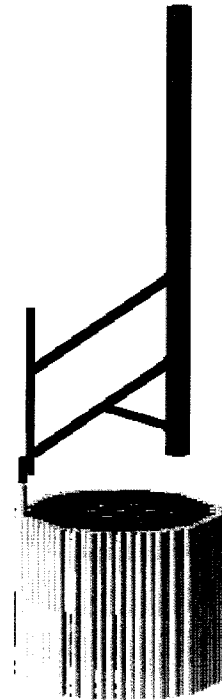


Fig. 6 Solid model of robot manipulator and nuclear fuel assembly

을 기준으로 회전운동을 하여 핵연료봉이 회전중심축을 지나는 직경선상 이외의 위치에 있을때 핵연료봉을 회전중심축을 지나는 직경선상으로 이동을 시키며, 두 개의 슬라이더가 상하로 작동한다. 이로 인하여 핵연료봉을 붙잡고 있는 그리퍼를 수평으로 회전중심축까지 이동 시켜서 어느 위치에 있던지 핵연료봉을 교환할 수가 있다. 위와 같이 핵연료교환장치가 핵연료봉을 운반할 때 그리퍼가 핵연료봉을 붙잡고 움직이는 동안 로봇 매니플레이터의 휨변형에 의해 다른 핵연료봉들과 충돌이 일어날 수가 있다. 이때 정교한 구조적 제어를 해주지 않으면 아주 큰 사고가 일어날 수 있으므로 핵연료봉을 교환할 시 이를 충분히 감안하여 제어하고 설계해야만 한다. 이를 위하여 핵연료교환장치인 로봇 매니플레이터 작동시 로봇 매니플레이터의 각 링크(link) 및 절점(joint)들의 운동학적 특성(변위, 속도, 가속도)과 동역학적 특성(반력, 토크)을 알아내는 것이 아주 중요하다. 그래서 핵연료교환 로봇 매니플레이터의 기구동역학해석을 수행하여 운동학적 특성 및 동역

Table 1 Input data of mobility(z_1, z_2, z_3, θ) for each case

(Unit : cm)

Case Mobility	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
z_1	214	151.38	36.645	6.15
z_2	214	151.38	36.645	6.15
z_3	380	380	380	380
θ	0°	21.78°	27.8°	33.7°

Table 2 Elapsed time for whole and each detailed motion for each case

(Unit : sec)

Case		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Detailed Motion	Gripper Motion	20	20	20	20
	Rotation Motion	0	40	40	40
	Translation Motion	50	50	50	50
Whole Motion		70	110	110	110

학적 특성을 구해야만 한다. 본 논문에서 해석하고자 하는 로봇 매니퓰레이터는 밀도(ρ)=7,857kg/m³, 영률(E)=1.992×10¹¹Pa, 포와송비(ν)=0.3의 물성치를 가지는 중실직사각형(10cm×20cm) 단면형상의 stainless steel로 이루어져 있고 로봇 매니퓰레이터가 최대로 뺄 수 있는 길이는 351.9cm인 고체구조물로 가정한다. 핵연료봉 한 개의 무게는 300kg이며, 핵연료봉들간의 간극은 3mm이다. 본 논문에서 기구동역학해석을 수행할 때 로봇 매니퓰레이터를 강체(rigid body)라 가정하고 자중(2,111.7kgf)을 고려한다. Table 1은 네가지 핵연료교환 동작에 대한 기구동역학해석을 위하여 본 논문에서 계산하여 입력한 허용자유도 z_1, z_2, z_3, θ 에 대한 값이다. 이 값들을 계산할 시 ADAMS에서 핵연료교환장치가 작동할 때 링크 8과 회전중심축 3의 충돌을 방지하기 위하여 링크 7과 회전중심축 3가 이루는 각도가 11°로 될 때 동작을 멈추게 하였다. Table 2는 각 교환 동작에서 세부 동작 및 전체 동작에 소요된 시간을 나타낸다.

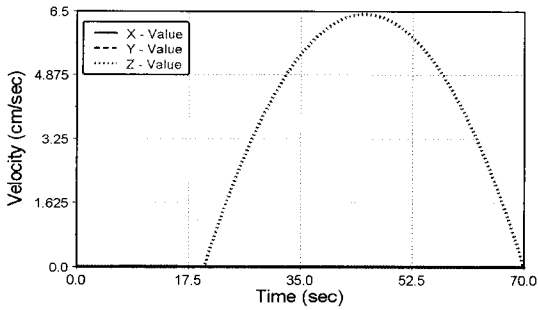
3.4 해석결과 분석 및 정적구조

3.4.1 핵연료교환 동작의 운동학적 특성

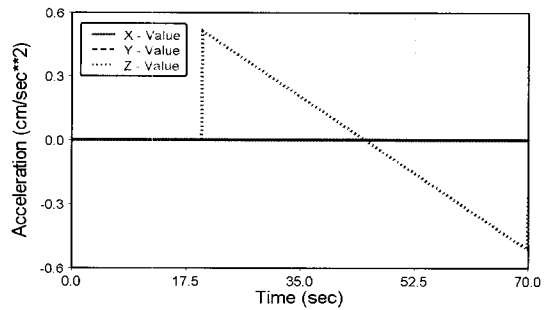
핵연료교환장치의 작동에 대한 운동특성을 파악하기 위해서는 각 절점들의 속도, 가속도 및 각 링크들의 회전각속도와 각가속도를 알아야 한다. 해석결과(Fig. 7~Fig. 8) 모든 해석대상 핵연료교환 동작(Case 1~Case 4)에 있어 절점 A와 E, 절점 B와 C는 속도, 가속도가 일치하고 있다. 또 절점 B와 C의 z방향 속도는 항상 0이며, 절점 A와 E의 x, y방향 속도도 항상 0으로 나타났다. 또한 그리퍼동작시(초기 20초간) 모든 절점과 링크들의 속도는 0으로 나타났다. 또 링크 7과 링크 9의 회전각속도, 각가속도는 일치하고 있으며 회전동작시(Case 2~Case 4)에는 회전각속도가 회전중심축 3의 회전각속도와 일치하고 있다. 또한 Case 3, Case 4의 해석 결과는 Fig. 8에 표시된 Case 2의 해석결과와 같은 경향을 보여주고 있다. 이는 Table 1과 Table 2의 입력값에 의하여 링크들이 해석대상 모든 핵연료교환 동작(Case 1~Case 4)에 있어 예상한 대로 그리퍼 동작, 회전 동작, 병진 동작을 연속적으로 수행함을 알 수 있다. 또한 그리퍼동작시에는 해석대상 모든 핵연료교환 동작(Case 1~Case 4)에 있어 핵연료교환장치는 운동이 정지된 정적구조상태임을 알 수 있다. 따라서 정적인 변형해석은 이 그리퍼동작시의 핵연료교환장치구조에 대하여 수행할 수 있다.

3.4.2 핵연료교환 동작의 동역학적 특성 및 정적구조

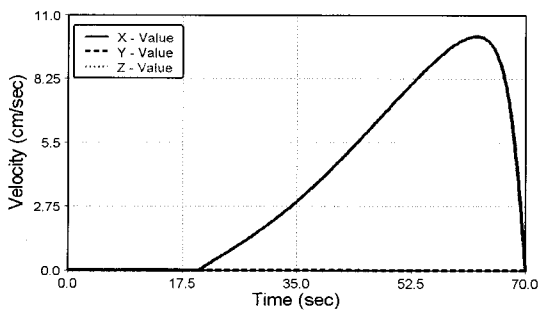
해석결과 각 절점에 걸리는 반력중 y방향의 반력은 첫번째 핵연료교환 동작 경우(Case 1)에서 전부 0이라는 것을 알 수 있고, 나머지 경우(Case 2~Case 4)에서는 회전운동을 하기 때문에 작은 y방향의 반력들이 존재했다. 모든 경우(Case 1~Case 4)에 휨변형을 유발하는 절점들(절점 B~F)에서의 반력들은 초기에 핵연료봉을 붙잡는 순간부터 반력이 생겨서 그리퍼동작시에는 변화가 없었지만(정적하중상태) 핵연료봉을 붙잡고 있는 그리퍼가 회전중심축으로 병진 동작을 하는 동안에는 그리퍼가 회전중심축에 가까워질수록 점차 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 9 참조). 따라서, 해석대상 모든 핵연료교환 동작(Case 1~Case 4)에 있어서 핵연료교환장치



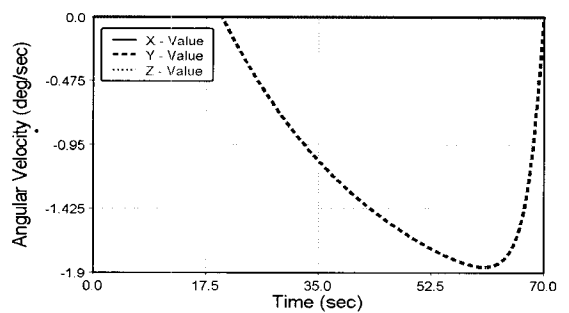
(a) Velocity of joint A, E



(b) Acceleration of joint A, E

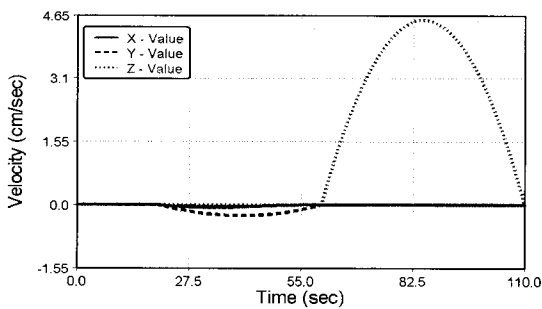


(c) Velocity of joint B, C

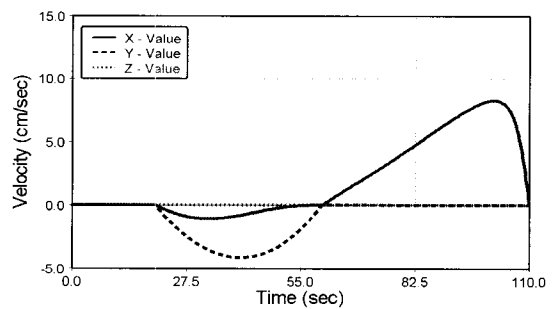


(d) Angular velocity of link 7, 9

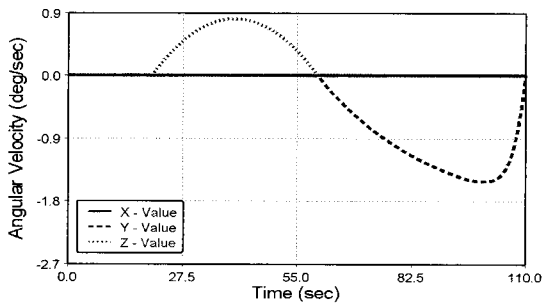
Fig. 7 Velocity, acceleration and angular acceleration of each joint and link for case 1



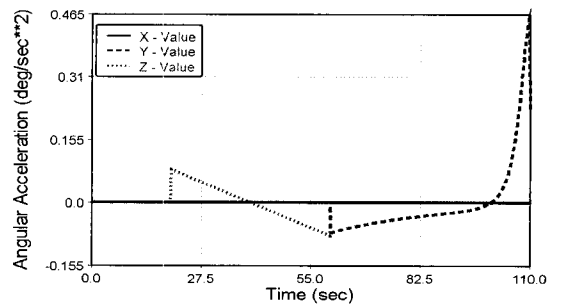
(a) Velocity of joint A, E



(b) Velocity of joint B, C

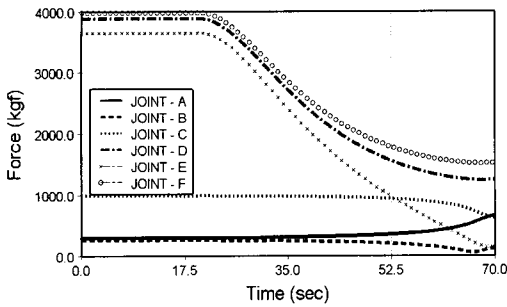


(c) Angular velocity of link 7, 9

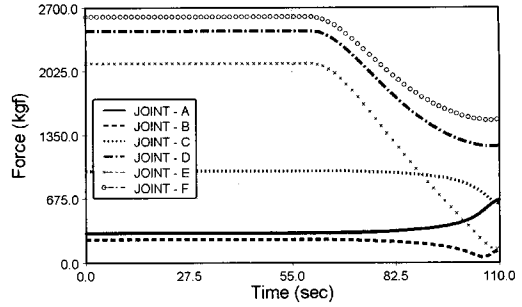


(d) Angular acceleration of link 7, 9

Fig. 8 Velocity, acceleration and angular acceleration of each joint and link for case 2



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 9 Magnitude change of resultant reaction force at each joint (A, B, C, D, E, F)

의 그리퍼가 핵연료봉을 붙잡아 들어올리거나 내려놓는 그리퍼동작 순간의 구조상태가 최대 반력의 크기를 가지며 정적인 하중상태임을 알 수 있다. 또한 해석대상 모든 핵연료교환동작(Case 1~Case 4)에 있어 절점 D와 절점 F에서 큰 반력(Case 1인 경우 절점 D에서의 최대반력크기는 3,800kgf, 절점 F에서의 최대반력크기는 4,000kgf)들이 발생하는 것을 알 수 있다.

핵연료교환동작에 대한 지금까지의 기구동역학해석 결과를 종합하면 해석대상 모든 핵연료교환동작(Case 1~Case 4)에서 그리퍼동작시 모든 절점들과 링크들의 운동상태는 정지된 정적운동상태이며 또한 이 동작시 그리퍼끝단에서의 휨변형을 야기하는 각 절점들에서의 반력크기가 제일 크면서 일정한 정적하중상태를 유지하기 때문에 해석대상 모든 핵연료교환동작(Case 1~Case 4)에서 최대 휨변형이 발생하는 정적구조물상태는 그리퍼동작시의 핵연료교환장치구조임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 핵연료교환장치 기본설계에 있어서 핵연료교환장치의 구조적 타당성 검토를 위하여 핵연료교환장치인 로봇 매니플레이터의 작동에 대한 기구동역학해석을 수행하였다. 이와같은 기구동역학해석을 통해 핵연료교환장치의 운동학적 특성인 각 링크 및 절점들에서의 속도, 가속도 및 동역학적 특성인 반력의 변화를 관찰해 보았다. 그 결과 본 논문에서 제시한 해석모델의 핵연료교환동작(Case 1~

Case 4)에 있어 주어진 입력값들에 따라 로봇 매니플레이터가 예상대로 잘 작동함을 알 수 있었다. 또한 그리퍼동작 동안에 각 절점들에서의 반력이 최대값을 가지며 또한 일정한 정적하중상태임을 알 수 있었다. 따라서 해석대상 모든 핵연료교환동작에서 그리퍼동작시의 핵연료교환장치구조가 최대 휨변형이 발생하는 정적구조임을 알 수 있었다. 그러므로 핵연료교환장치의 구조적 설계시 문제가 되는 로봇 매니플레이터의 최대 휨변형을 구하기 위해서는 해석대상 모든 핵연료교환동작에서 그리퍼동작시의 핵연료교환장치구조에 대한 재료역학해석을 수행하면 된다는 결론을 얻을 수 있다. 이는 핵연료교환장치의 작동시 구조적 취약상태를 알아내기 위하여 로봇 매니플레이터의 작동 매순간의 구조적 거동에 대한 관찰을 수행할 필요가 없게 해주는 매우 중요한 결과이다.

참 고 문 헌

1. Sobieszczanski-Sobieski, J., "Multidisciplinary Design Optimization : An Emerging New Engineering Discipline", *Advances in Structural Optimization*, edited by J. Herskovitz, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1995, pp.483~496
2. Alexandrov, N., and Hussaini, Y., (eds.), "Multidisciplinary Design Optimization : State of the Art", *SIAM Publications*, Philadelphia, PA, 1997

3. Sobieszczanski-Sobieski, J., and Hafta, R., "Multidisciplinary Aerospace Design Optimization : Survey of Recent Developments", *AIAA Papers 96-0711*, Jan., 1996
4. Stubbe, J., "PAYCOS : A Multidisciplinary Design Optimization Tool for Hypersonic Vehicle Design", *Proceedings of the AIAA/USAF/NASA/OAI 4th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization (Cleveland OH)*, AIAA, Washington, DC, 1992, pp.263~271
5. Tappeta, R., Nagaendra, S., and Renaud, J.E., "A Multidisciplinary Design Optimization Approach for High Temperature Aircraft Engine Components", *Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 39th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference(Long Beach, CA)*, AIAA, Reston, VA, 1998, pp.1055~1065
6. Giesing, J.P., Agrawal, S., and Bharadvaj, B.K., "The Role of Computational Fluid Dynamics in Multidisciplinary Design Optimization of Transport Aircraft", *Proceedings of the 6th International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Technology and Operations Congress(Lake Tahoe, CA)*, 1995
7. Chamis, C.C., "Coupled Multidisciplinary Optimization of Engine Structural Performance", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, Jan.-Feb., 1999, pp.190~199
8. Rowell, L.F., Braun, R.D., Olds, J.R., and Unal R., "Multidisciplinary Conceptual Design Optimization of Space Transportation Systems", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No.1, Jan.-Feb., 1999, pp.218~226
9. Jameson, A., "Re-Engineering the Design Process Through Computation", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, Jan.-Feb., 1999, pp.36~50
10. Yun, C.B., Kim, J.W., Kim, Y.S., Seo, J.M., Kim, J.M., Choun, Y.S., "Fluid-Structure Interaction Analysis of Liquid Storage Structures", 한국전산구조공학회 논문집, 제5권 제2호, 1992.6, pp.103~111
11. Samareh, J.A., "Use of CAD in MDO", *AIAA Paper 96-3991*, Sept. 1996
12. Samareh, J.A., "Status and Future of Geometric Modeling and Grid Generation for Design and Optimization", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, Jan.-Feb., 1999, pp.97~104

(접수일자 : 1999. 4. 19)