

원자로용 수중탐상기의 구조해석

최석호*(홍익대 대학원 기계설계학과), 권영주(홍익대 기계정보공학과), 김재희(원자력연)

Structural Analysis of RIROB(Reactor Inspection Robot)

S. H. Choi(Mech. Design & Prod. Engr. Dept., Hongik Univ.), Y. J. Kwon(Dept. of Mechano-Informatics & Design Engr., Hongik Univ.), J.H. Kim(KAERI)

ABSTRACT

MDO(Multidisciplinary Design Optimization) methodology is an emerging new technology to solve a complicate structural analysis and design problem with a large number of design variables and constraints. In this paper MDO methodology is adopted through the use of computer aided engineering(CAE) system. And this paper treats the structural design problem of RIROB(Reactor Inspection Robot) through the application of MDO methodology. In a MDO methodology application to the structural design of RIROB, kinetodynamic analysis is done using a simple fluiddynamic analysis model for the water flow over the sensor support surface instead of difficult fluid dynamic analysis. Simultaneously the structural static analysis is done to obtain the optimum structural condition. The minimum thickness (0.8 cm) of the RIROB housing is obtained for the safe design of RIROB. The kinetodynamic analysis of RIROB is done using ADAMS and the static structural analysis of RIROB is done using NISA.

Key Words : RIROB(Reactor Inspection Robot), MDO(Multidisciplinary Design Optimization) Methodology, Structural Mechanics, Fluid dynamics, Kinetodynamics, Optimum Static Structure

1. 서 론

원자력 발전 설비(Nuclear Power Plant)의 원자로(Nuclear Reactor Vessel)내부는 고온 고방사능 지대로서 인간이 직접 작업하기에는 극한 상황이기 때문에 인간에 의한 직접적인 검사(inspection)가 불가능하다. 원자로용 수중 탐상기(Reactor Inspection Robot : RIROB)는 이러한 극한 환경에서 초음파 검사 장비(ultrasonic testing equipment)를 탑재하여 원자로 내의 입·출구 노즐부위의 미세 결함이나 균열을 검사하는 장비로서 정확한 운동의 제어와 외력조건에 대한 구조적 안정성이 필수 요구된다. 수중탐상기의 거동은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째는 원자로 안에 진입하여 유영을 통하여 검사 장소까지의 이동하는 것이고, 둘째는 검사 장소인 노즐 부위에 도착하여 노즐안에서 안정된 자세로 착지한 상태로 센서 장비를 구동하는 것이다. 이러한 설계조건에서 작동하는 탐상기의 구조 설계에는 많은 설계변수와 구속조건들이 요구된다.

수중 탐상기의 설계에서 고려되어야 할 해석으로는 탐상기의 초음파 센서가 수중에서의 움직임에 따라서 초음파 센서에 가해지는 유체력을 구하는 유체역학해석(fluid dynamic analysis), 탐상기의 초

음파 센서 축의 거동에 따라 각 조인트에 발생하는 반력들을 계산하는 기구동역학해석(kinetodynamic analysis)과, 이와 같은 하중에 의하여 발생하는 구조변형에 대한 구조역학해석(structural analysis)이 있다.

본 논문에서는 원자로용 수중탐상기(Reactor Inspection Robot : RIROB)의 구조해석에 여러 가지 공학적 현상의 해석(유체역학해석, 기구동역학해석, 구조역학해석) 및 이들 상호 연관 관계를 동시에 고려^[1]하여 균형있고 유기적인 방법으로 최적 설계를 수행하는 구조해석 기법을 고찰하고자 한다.

2. 수중탐상기의 기구동역학 해석 (Kinetodynamic Analysis)

본절에서는 기구동역학해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 강체요소 링크로 구성된 수중탐상기의 운동학적 특성(위치, 속도, 가속도)과 동역학적 특성(반력, 토크)을 서로 비교해 봄으로서 보다 최적인 형태의 기구를 결정하고 구조역학(structural analysis)해석 단계에서의 설계변수와 구속조건을 파악하고자 한다.

2.1 수중탐상기의 기구동역학 해석모델

수중탐상기의 기구동역학해석은 탐상기가 검사 지점인 노즐부 까지 이동하여 고정된 후 초음파 센서 축의 병진운동 및 회전운동에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 1는 수중 탐상기에 대한 기구선도(kinematic diagram)이다. 빗금친 부분은 원자로(reactor)의 노즐(nozzle) 부분으로서 본 해석에서는

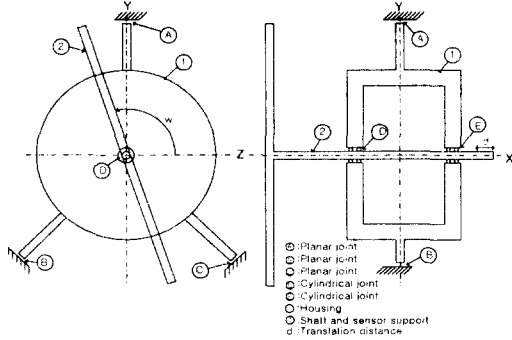


Fig. 1 Kinematic diagram of RIROB system

ground로 정의 하였고, ground에 housing이 세 개의 평면조인트(planar joint)로 고정되어 있으며 센서 축(sensor shaft)은 housing에 두 개의 원통조인트(cylindrical joint)로 연결되어 있다. 센서 축(sensor shaft)은 불나사 스플라인 축으로 회전운동 및 병진운동이 각각 또는 동시에 가능하고, 회전방향으로 백래쉬가 없는 앵귤러 콘택트 구조로 되어 있으므로 고정도 위치결정이 가능하다. 또한 구조상 축(shaft)의 회전력 및 반력이 모두 연결된 housing에 직접 전달된다. 본 해석에서 입력은 0초에서 5초까지의 병진운동 거리 $d(=350\text{mm})$ 와 5초부터 10초까지의 축(shaft) 각속도 $\omega(=22.92^\circ/\text{sec})$ 이다. 병진과 회전운동은 step function으로 주어진다. 축(shaft)이 수중에서 회전운동하기 때문에 회전 반대 방향으로 발생 되는 유체력(fluid force)을 알아야 한다. 이를 위해 축(shaft)을 지나는 유체 흐름에 대하여 유체역학해석(fluid dynamic analysis)을 수행하거나 실험적 방법에 의하여 정확한 유체력을 구하여야 한다. 그러나 이론 유체역학 해석이나 실험적 방법은 매우 난해하며 또한 본 해석에서는 유체의 유동장 보다는 축(shaft)에 가해지는 유체력에 더 관심이 있기 때문에 유체력에 의한 압력항력을 약식 계산을 이용하여 20 Newton으로 가정하였다. Fig. 2는 ADAMS 프로그램으로 모델링한 수중탐상기의 고체모델(solid model)이다. 모델링에서 각 요소의 자중과 무게중심을 실제 시스템과 유사하도록 하였다. 원자로 수중탐상기(RIROB)의 세 개의 고정 다리는 원자로에 고정된 것으로 하기 위해 다리 끝단을 평면조인트(planer joint)로 구성하여 지지력을 가해주었다.

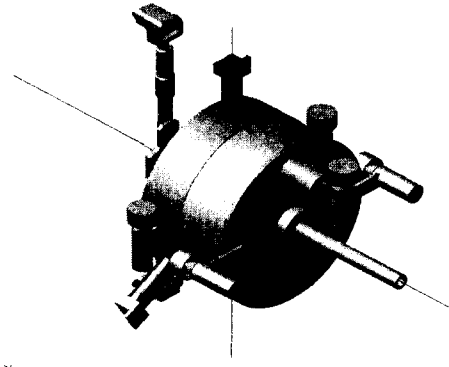


Fig. 2 Solid model of RIROB system

2.2 기구동역학 해석 및 결과 분석

기구동역학 해석을 통해 탐상기가 노즐에 고정되어 축(shaft)이 운동(motion)을 수행할 때 각 조인트에 걸리는 반력과 토크를 구하였다. Fig. 3은 축(shaft)에 가해지는 병진운동 및 회전운동에 따른 축의 운동특성을 나타내는 그림이고, Fig. 4는 각 조인트에 발생하는 반력이다. 특히 축(shaft)의 병진 운동은 조인트(joint) A,B,C의 반력이 선형적 변화를 일으키고, 회전운동을 시작하는 순간 ($t=5\text{sec}$) 유체력과 회전을 위한 힘의 작용으로 갑작스런 반력의 변화를 보인다. 축(shaft)의 회전이 일정 각속도를 유지하기 시작하면 각 조인트의 반력 또한 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 조인트(joint) A, B, C의 반력의 변화는 축운동(shaft motion)에 관계하는 조인트(joint) D, E의 반력 및 토크에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한 조인트(joint) A, 조인트(joint) B, 조인트(joint) C의 반력과 변위는 센서축에 운동을 일으키는 조인트(joint) D, 조인트(joint) E의 반력과 토크에 따라 변화한다. 이러한 결과로 다음에 수행될 구조해석에서 탐상기 시스템의 구조역학적 특성을 정의할 때 조인트(joint) D, 조인트(joint) E부분에 발생한 반력과 토크가 기구동역학적 거동에서 발생하는 외력조건으로 사용된다.

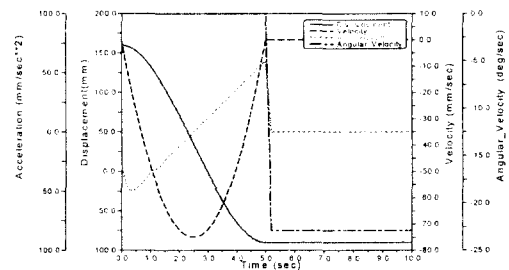


Fig. 3 Dynamic characteristics of shaft according to the input motion (translation + rotation)

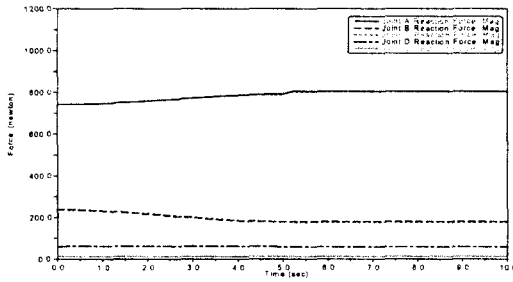


Fig. 4 Reaction force at each joint

3. 수중탐상기의 구조변형에 대한 구조해석(Structural Analysis)

본절에서는 두 번째 해석 단계로서 기구동역학 해석단계에서의 상호 연관성을 고려하여 수중탐상기의 구조적 변형을 구하는 구조해석을 수행하였다. 구조해석을 수행함에 있어서 구조적으로 큰 변형과 응력이 예상되었던 internal support, housing, leg부분에 대한 구조해석이 필요하다.

본 논문에서는 유한요소법에 의한 수중탐상기의 구조변형 문제의 해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 NISA를 이용하여 해석을 수행하였다.

3.1 구조해석모델 및 경계조건

원자로 수중탐상기의 구조해석을 위한 유한요소 모델은 Fig. 5와 같이 8개의 절점(node)을 갖는 육면체요소(hexahedral element)로 이루어져있다.

구조해석은 주로 housing 외면에 작용하는 수압과, 고정 지지를 위한 지지력 하중 조건에 대한 해석이므로 축(shaft)부분의 모델링은 생략하고 kinematic constraint인 rigid link를 적용하여 기구 동역학해석에서 센서축이 운동할 때 얻은 결과인 각 조인트(joint)에서의 반력을 구조해석에서는 구속조건으로 고려하여 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 유한요소 모델의 크기와 물성치는 Table 1과 같다. 경계조건으로는 두 개의 foot 끝단면(joint B, C)이 완전히 고정 ($u_x = u_y = u_z = 0$) 되었다는 가정하에서 모든 자유도(DOF)를 구속하고, 고정지지력이 작용하는 상부leg(joint A)에서는 지지력의 작용방향인 y축에 대해서는 자유도를 허용하였다($u_x = u_z = 0$). 또한 internal support의 양쪽 끝단 내부절점(node)에는 rigid link를 구성하고 기구동역학 해석에서 구한 축(shaft)의 운동(motion)에 의한 최대 반력과 토크를 적용했다.

외력조건으로는 housing에 수압으로 196KPa, 296KPa, 396KPa, 496KPa, 596KPa의 압력을 각각 적용했으며, housing을 재료와 위치로써 top cover, middle cover, bottom cover로 구분하여 Aluminum 합금으로 구성된 top cover, bottom cover의 두께를 1.4cm, 1.2cm, 1.0cm, 0.8cm, 0.6cm로 변화시키면서 발생하는 응력과 변위를 고찰하였다. 각 부분

(part)의 재료의 물성치와 유한요소 크기는 Table 1에 나타내었다. 유한요소 해석시 해의 수렴성과 해석 시간을 고려하여 Fig. 5와 같이 두께 방향으로 4개의 요소(element)로 나누었다.

Table 1 F.E. model data

	Internal Support	Middle Cover	Leg & Foot	General	Unit	
No of Nodes	4,128	4,320	7,522	37,973	None	
No of Elements	2,816	3,072	5,808	30,004	None	
Material	AL-alloy	Plastic	Steel	-	-	
Properties	E	7E10	0.22E10	20E10	-	N/m ²
	ν	0.33	0.38	0.3	-	None
	ρ	2800	1200	7850	-	Kg/m ³
	σ_s	$\pm 490E6$	-	$\pm 410E6$	-	N/m ²

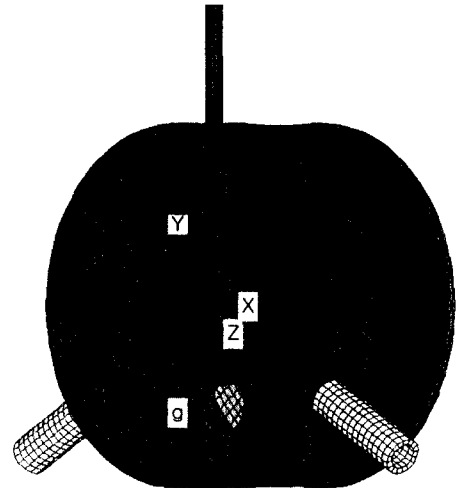


Fig. 5 F.E. model of RIROB system

3.2 구조해석 결과 및 분석

본 절에서는 탐상기에 작용하는 외력에 대하여 구조해석을 수행하였다. 해석결과로 얻어진 구조 변형형상과 응력 분포상태를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 구조 변형 형상을 보았을 때 시스템 전체가 자중에 의해 중력방향인 -y축 방향으로 처지는 경향을 보이고, middle cover 부분에서는 재료의 연성으로 작용압력에 의해 함몰되어지는 경향을 볼 수 있다. 또한 두께를 변화 시킴에 따라 시스템 전체에서 최대응력이 발생하는 지점이 internal support에서 bottom cover로 달라지는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 8은 top cover에서의 변위-응력의 관계를 그래프로 나타내었다. 앞에서 설명한 최대응력의 발생지점의 변화가 일어나는 두께가 0.8cm 이하에서는 변위-응력 그래프가 급격한 변화를 보이고 있다. 이것은 구조물의 강도가 약화되고 있음을 보여주는 것이므로 0.8cm 이하의 두께를 적용하는 것

은 위험하다고 볼 수 있다.

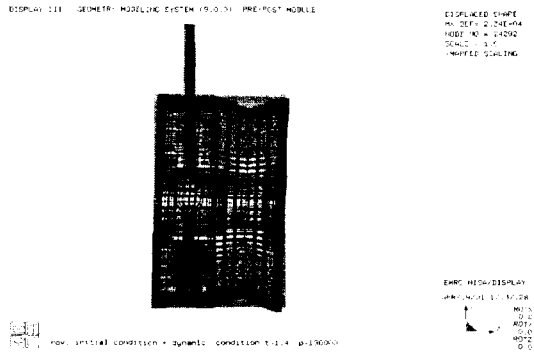


Fig. 6 Deformed shape of RIROB system (thickness=1.4cm, pressure=196MPa)

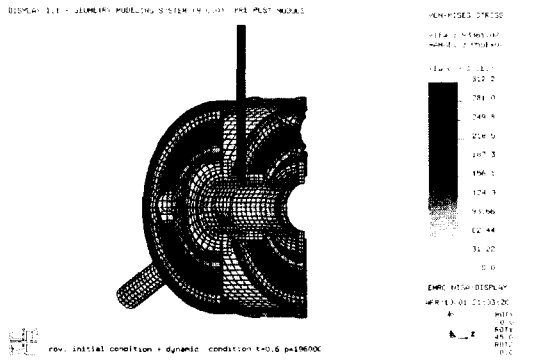


Fig. 7 Stress contour of RIROB system (thickness=0.6cm, pressure=196MPa)

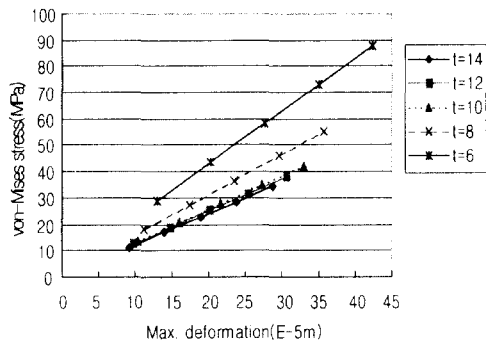


Fig. 10 Structural analysis result for various housing thickness at top cover(Maximum deflection versus maximum von-Mises stress) (t=thickness, mm)

4. 결론

본 해석결과를 재료의 항복응력과 비교 했을 때 발생되는 최대 응력이 항복응력보다 현저히 낮음을 알 수 있다. 이것으로만 보았을 때에는 탐상기의 housing의 두께가 0.6cm 외부압력이 596KPa 일때에도 구조적으로 안전하다고 말할 수 있다.

그러나 housing의 두께가 0.8cm이하로 되면서 변위-응력 관계가 갑작스런 변화를 보이므로 위험하다고 볼 수 있다. 더욱이 수중탐상기는 외력이 일정하게 작용하기보다는 잠함수심의 변화에 따른 작용하중이 반복적이며 지속적으로 변하기 때문에 설계 시에 이러한 하중의 변화에 대한 발생 응력의 급격한 변화를 피하도록 설계하여 충분한 내구성을 확보하는 것이 중요하다.^[2-3] 이러한 이유로 수중탐상기는 housing의 두께를 0.8cm 이상으로 설계하면 충분히 안전하다는 결론을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Yun, C.B., Kim, J.W., Kim, H.S., Seo, J.M., Kim, J.M., Choun, Y.S., "Fluid-Structure Interaction Analysis of Liquid Storage Structures," 한국조선구조공학회 논문집, 제 5권, 제2호, pp. 103-111, 1992.
2. Jeom Kee Paik, Ge Wang, Bong Ju Kim, "On Advanced Buckling and Ultimate Strength Design of Ship Plating", the Society of Naval Architects and Marine Engineers Annual Meeting Preprints, pp. 34-44, 2000.
3. 현 범수 "무인잠수정 설계 및 개발" 한국해양공학회지, 제 7권 1호, 한국해양공학회, 1993.