

원자로용 수중탐상기의 구조해석

권영주*, 최석호**, 김재희***

Structural Analysis of RIROB(Reactor Inspection Robot)

Kwon, Y.-J.*, Choi, S.-H.** and Kim, J.-H.***

ABSTRACT

This paper presents the structural analysis of RIROB(Reactor Inspection Robot). Actually, several analyses such as kinetodynamics analysis, fluid mechanics analysis, and structural mechanics analysis etc. should be carried out in the design of RIROB. These analyses are executed through the use of computer aided engineering(CAE) systems. The kinetodynamics analysis is carried out using a simple fluid dynamic analysis model for the water flow over the sensor support surface instead of difficult fluid mechanics analysis. Simultaneously the structural mechanics analysis is carried out to obtain the minimum thickness of the RIROB housing. The minimum thickness of the RIROB housing is evaluated to be 1.0 cm for the safe design of RIROB. The kinetodynamics analysis of RIROB is performed using ADAMS and the static structural mechanics analysis of RIROB is performed using NISA.

Key words : RIROB(Reactor Inspection Robot), Kinetodynamics Analysis, Fluid Mechanics Analysis, Structural Mechanics Analysis, Minimum Thickness

1. 서 론

원자력 발전설비(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 수중탐상기(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 필히 요구된다.

수중탐상기의 거동은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째는 원자로 안에 진입하여 유영을 통하여 검사 장소까지 이동하는 것이고, 둘째는 검사 장소인 노즐 부위에 도착하여 노즐 안에서 안정된 자세로 착지한 상태로 센서 장비를 구동하는 것이다. 이러한 설계조건에

서 작동하는 수중탐상기의 구조 설계에는 많은 설계 변수와 구속조건들이 요구된다. 또한 이로 인해 공학적 현상의 복잡성과 수행해야 할 해석의 수가 많음에 예상된다.

수중탐상기의 설계에서 고려되어야 할 해석으로는 수중탐상기의 초음파 센서가 수중에서의 움직임에 따라서 초음파 센서에 가해지는 유체력을 구하는 유체 역학해석(fluid mechanics analysis), 수중탐상기의 초음파 센서 축의 거동에 따라 각 조인트에 발생하는 반력들을 계산하는 기구동역학해석(kinetodynamics analysis)과, 이와 같은 하중에 의하여 발생하는 구조변형에 대한 구조역학해석(structural mechanics analysis)이 있다.

이와 같은 해석들은 수중탐상기의 설계에 있어서 Fig. 1과 같이 공학적 현상의 해석 및 설계상의 각 하부 시스템간의 입출력 자료(설계변수 및 구속조건) 사이의 유기적인 작용으로 영향을 미친다. 따라서 이와 같이 복잡한 구조해석/설계분체를 해결하기 위해서는 다양한 분야들을 동시에 고려하는 MDO기법^[1-3]의 적용이 요구된다.

본 논문에서는 원자로용 수중탐상기(RIROB : Reactor Inspection Robot)의 구조해석에 여러 가지

*정회원, 홍익대학교 기계정보공학과
**홍익대학교 대학원 기계설계학과
***한국원자력연구소
- 논문투고일: 2001. 09. 28
- 심사완료일: 2002. 10. 09

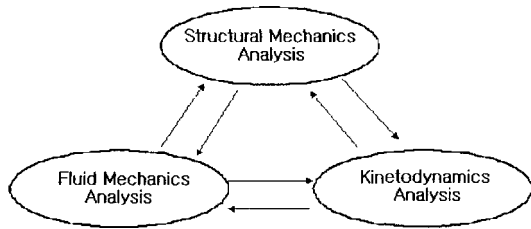


Fig. 1. Analysis types and their inter-organic relations for RIROB system design.

공학적 현상의 해석(유체역학해석, 기구동역학해석, 구조역학해석) 및 이들 상호 연관 관계를 동시에 고려¹¹⁾하여 균형있고 유기적인 방법으로 컴퓨터응용공학(CAE)시스템을 활용하여 수행하는 구조해석 기법을 고찰하고자 한다.

수중탐상기의 기구동역학해석은 ADAMS를 활용하였으며 구조역학해석은 NISA를 활용하였다.

2. 수중탐상기의 기구동역학해석 (Kinetodynamics Analysis)

기계장치의 기구동역학해석은 정확한 운동을 유지하는데 소요되는 각 부의 힘을 분석하는 연구분야로서 장치를 구성하는 각 링크(link)나 조인트(joint)들의 정확한 위치, 속도, 및 가속도를 규명하고 외력 및 관성력에 의한 동적 힘의 상태를 결정하는 것이다. 기구동역학해석에 관한 대부분의 지식들은 그 성격상도 해석적인 경향을 갖는 기법으로 오랜 시간동안 수작업으로 해석해 오다가, 최근 컴퓨터의 고속발전에 의해 보다 보편적이고 정밀도가 높은 기구동역학해석용 프로그램 사용하게 되었다.

본 논문에서는 강제요소 링크로 구성된 수중탐상기의 운동학적 특성(위치, 속도, 가속도)과 동역학적 특성(반력, 토크)을 서로 비교해 봄으로서 보다 좋은 형태의 기구를 결정하고 구조역학(structural mechanics) 해석 단계에서의 설계변수와 구속조건을 파악하고자 한다.

2.1 수중탐상기의 기구동역학 해석모델

수중탐상기의 기구동역학해석은 탐상기가 검사 지점인 노즐부까지 이동하여 고정된 후 초음파 센서 축의 병진운동 및 회전운동에 대하여 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 수중탐상기에 대한 기구선도(kinematic diagram)이다. 빗금친 부분은 원자로(reactor)의 노즐(nozzle) 부분으로서 본 해석에서는 ground로 정의하

였고, ground에 housing이 세 개의 평면조인트(planar joint)로 고정되어 있으며 센서 축(shaft)은 housing에 두 개의 원통조인트(cylindrical joint)로 연결되어 있다. 센서 축(sensor shaft)은 볼나사 스플라인 축으로 회전운동 및 병진운동이 각각 또는 동시에 가능하고, 회전방향으로 백래쉬가 없는 앵글러 콘택트 구조로 되어 있으므로 고정도 위치결정이 가능하다. 또한 구조상 축(shaft)의 회전력 및 반력이 축과 연결된 housing에 직접 전달된다. 본 해석에서 입력은 0초에서 5초까지는 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 발생하는 유체항력(fluid drag force)을 알아야 한다. 이를 위해 축(shaft)을 지나는 유체 흐름에 대하여 유체역학해석(fluid mechanics analysis)을 수행하

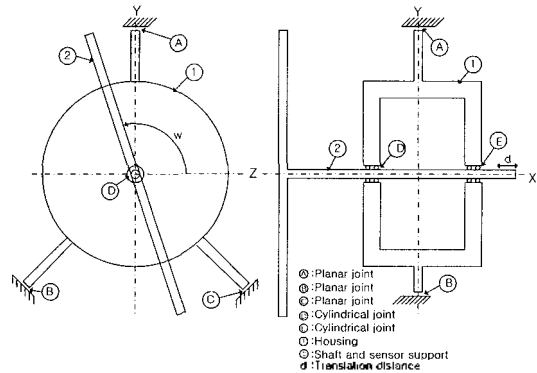


Fig. 2. Kinematic diagram of RIROB system.

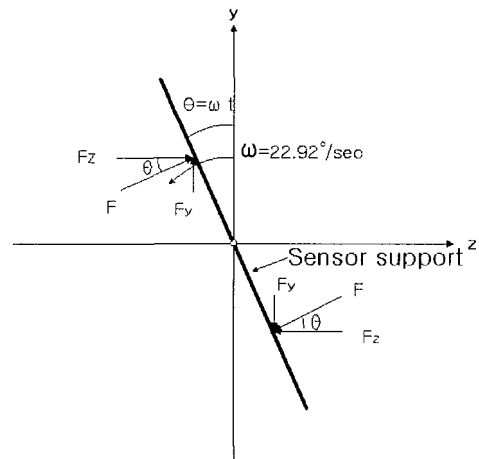


Fig. 3. Fluid dynamic pressure load applied on sensor support.

거나 실험적 방법에 의하여 정확한 유체력을 구하여야 한다. 그러나 이론 유체역학 해석이나 실험적 방법은 매우 난해하며 또한 본 해석에서는 유체의 유동장보다는 축(shaft)에 가해지는 유체력에 더 관심이 있기 때문에 유체력에 의한 압력항력(P)을 센서축의 회전에 의해 발생하는 단위 면적당 회전관성력($mrv^2/A \approx 20 \text{ Pa}$, ω : 센서지지대의 각속도, A: 센서지지대의 유체와의 접촉면적)에 대한 반력으로 20 Pa로 가정하였다. Fig. 3에서 압력항력(P)이 일정하다는 가정 하에 유체항력 F는 축(shaft)이 회전하는 시간(t)에 대하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_y = PA \sin\theta(t) \quad (1)$$

$$F_z = PA \cos\theta(t) \quad (2)$$

여기서 $\theta(t) = \omega t$ 이다. 이와 같은 설계변수와 구속조건을 가지고 기구동역학해석을 수행하였다. Fig. 4는 ADAMS 프로그램으로 모델링한 수중탐상기의 고체모델(solid model)이다. 모델링은 기구동역학적 특성을 고려하여 단순화 하였으며, 각 요소의 자중과 무게중심을 실제 시스템과 유사하도록 하였다. 원자로용 수중탐상기(RIROB)의 세 개의 고정 다리는 원자로에 고정된 것으로 하기 위해 다리 끝단을 평면조인트(planer joint)로 구성하여 지지력을 가해주었다. 축(shaft)은 x축에 대하여 음(-)의 방향으로 350 mm 병진운동하고, 반시계방향(CCW)으로 각속도 $\omega = 22.92^\circ/\text{sec}$ 로 회전운동한다. 이로 인해 발생하는 각 조인트에서의 반력 및 토크를 원자로 수중탐상기(RIROB) 시스템의 전가동 범위에서 구하였다.

2.2 기구동역학해석 및 결과분석

기구동역학해석을 통해 수중탐상기가 노즐에 고정

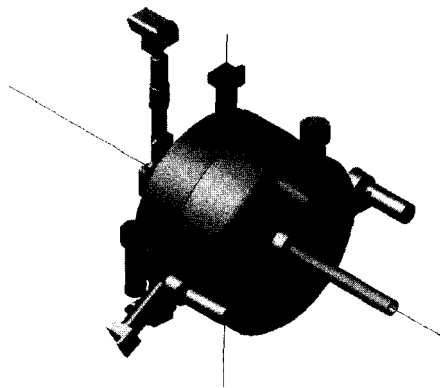


Fig. 4. Solid model of RIROB.

되어 축(shaft)이 운동(motion)을 수행할 때 각 조인트에 걸리는 반력과 토크를 구하였다. Fig. 5는 축(shaft)에 가해지는 병진운동 및 회전운동에 따른 축의 운동특성을 나타내는 그림이고, Fig. 6은 각 조인트에 발생하는 반력이다. 특히 축(shaft)의 병진 운동은 조인트(joint) A, B, C의 반력에 선형적 변화를 일으키고, 회전운동을 시작하는 순간($t = 5 \text{ sec}$) 유체항력과 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(정적상태). 조인트(joint) A, B, C의 반력의 변화는 축운동(shaft motion)에 관계하는 조인트(joint) D, E의 반력 및 토크에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이때 조인트 B, C의 반력의 크기는 같음을 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 구조역

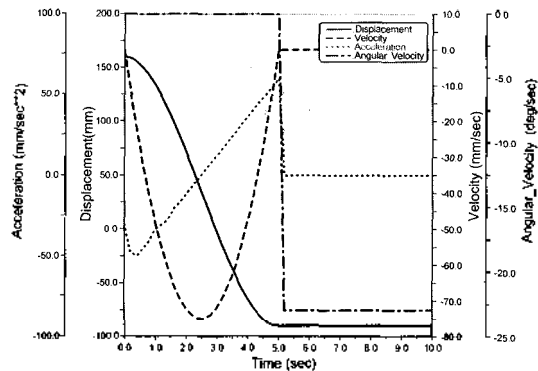


Fig. 5. Dynamic characteristics of shaft according to the input motion (translation + rotation).

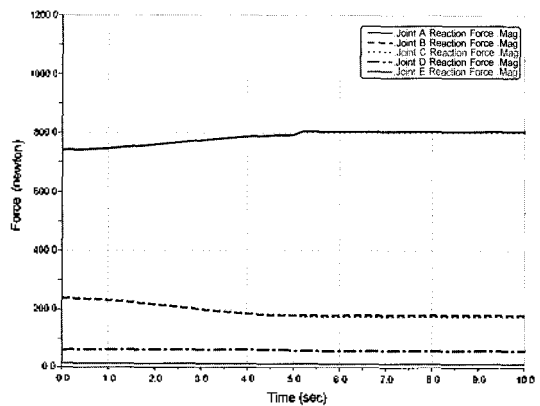


Fig. 6. Reaction force at each joint.

학해석에서 수중탐상기 시스템의 구조역학적 특성을 정의할 때 조인트(joint) D, 조인트(joint) E부분에 발생한 반력과 토크가 기구동역학적 거동에서 발생하는 외력조건으로 사용된다.

3. 수중탐상기의 구조변형에 대한 구조역학 해석(Structural Mechanics Analysis)

앞 절에서는 수중탐상기의 기구동역학해석을 통하여 수중탐상기 기구의 각 조인트들의 위치변화에 따른 운동학적 특성과 동역학적 특성을 구할 수 있었다.

본 절에서는 두 번째 해석 단계로서 기구동역학 해석단계에서의 상호 연관성을 고려하여 수중탐상기의 구조적 변형을 구하는 구조역학해석을 수행하였다. 구조역학해석을 수행함에 있어서 탐상기 구동의 모든 위치에 대해서 구조변형 해석을 한다는 것은 무의미하며, 설계 목적에 맞는 최소한의 동작상태 및 구조형상에서 센서의 회전운동 시 구조적으로 큰 변형과 응력이 예상되었던 internal support, housing, leg부분에 대한 구조역학해석이 필요하다. 이와 같은 해석의 타당성은 RIROB의 구조설계를 위해서는 변형 크기의

정확도도 중요하지만 변형의 경향(응력집중현상 등에 대한 정보)이 더욱 요구되기 때문이다.

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

3.1 구조해석모델 및 경계조건

원자로 수중탐상기의 구조해석을 위한 유한요소모델은 Fig. 7과 같이 8개의 절점(node)을 갖는 육면체 요소(hexahedral element)로 이루어져있다.

구조역학해석은 주로 housing 외면에 작용하는 수압과 고정 지지를 위한 지지력에 의한 하중조건에 대한 해석이므로 축(shaft)부분의 모델링은 생략하고 kinematic constraint인 rigid link를 적용하여 기구동역학해석에서 센서축이 운동할 때 얻은 결과인 각 조인트(joint)에서의 반력을 구조역학해석에서는 구속조건으로 고려하여 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 유한요소 모델의 유한요소 개수와 절점의 개수는 Table 1에 표시되어 있다. 경계조건으로는 두 개의 foot 끝 단면(joint B, C)이 완전히 고정되었다는 가정하에서 모든 자유도(DOF)($u_x = u_y = u_z = 0$)를 구속하고, 고정지지력이 작용하는 상부leg(joint A)에서는 지지력의 작용방향인 y축에 대해서는 자유도를 허용하였다($u_x = u_z = 0$). 또한 internal support의 양쪽 끝단 내부 절점(node)에는 rigid link를 구성하고 기구동역학해석에서 구한 축(shaft)의 운동(motion)에 의한 최대 반력과 토크를 적용하였다.

외력조건으로는 housing에 수압으로 196 KPa, 296 KPa, 396 KPa, 496 KPa, 596 KPa의 압력을 각각 적용했으며, housing을 재료와 위치로써 top cover, middle cover, bottom cover로 구분하여 aluminum 합금으로 구성된 top cover, bottom cover의 두께를 1.4 cm, 1.2 cm, 1.0 cm, 0.8 cm, 0.6 cm로 변화시키면서 발생하는 응력과 변위를 고찰하였다. 각 부분(part)을 구성하는 재료의 물성치와 유한요소 크기는 Table

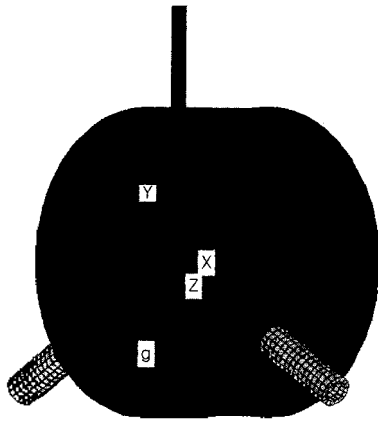


Fig. 7. F.E. model of RIROB.

Table 1. F.E. model data

	Internal Support	Top Cover	Middle Cover	Bottom Cover	Leg & Foot	Total
No of Nodes	4,128	14,611	4,320	9,252	7,522	37,973
No of Elements	2,816	11,348	3,072	6,960	5,808	30,004
Material	AL-alloy	AL-alloy	Plastic	AL-alloy	Steel	-
Properties	E(Pa)	7E10	7E10	0.22E10	7E10	20E10
	ν	0.33	0.33	0.38	0.33	0.3
	ρ (Kg/m ³)	2800	2800	1200	2800	7850
	σ_y (Pa)	490E6	490E6	-	490E6	410E6

1에 나타내었다.

본 연구의 최대 목적은 housing의 두께를 조절하여 내구력을 유지하면서 수중탐상기를 경량으로 설계하는 것이다. Housing은 초기 두께가 1.4 cm로 구조적으로 얇은 셸(shell)이다.

유한요소 해석 시 얇은 셸구조물에 대해서 3차원 solid 요소를 사용할 경우에는 두께 방향으로 발생하는 응력과 변형을 파악할 수 있는 장점이 있으나, 두께방향의 요소(element) 수에 따라 해의 오차가 발생하기 때문에 해의 수렴성과 해석 시간을 고려하여 Fig. 7과 같이 두께 방향으로 4개의 요소(element)로 나누었다.

3.2 구조역학해석 및 결과분석

본 절에서는 탐상기에 작용하는 외력에 대하여 구조역학해석을 수행하였다. 해석결과로 얻어진 구조 변형형상과 응력 분포상태를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내

었다. 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. 그러나 탐상기의 단면 형상인 원형구조는 그대로 유지되고 있다. 따라서 본 연구결과 발생하는 함몰 변형은 압력을 받는 속이 빈 보통의 원통형 셸 구조에서 발생하는 단면 원형구조가 일그러지는 좌굴(buckling)변형은 아직 발생하고 있지 않음을 알 수가 있다. 또한 두께를 변화시키기에 따라 시스템 전체에서 최대응력이 발생하는 지점이 internal support에서 bottom cover로 달라지는 경향을 볼 수 있다.

Table 2-3의 결과를 분석하면 두께가 1.4 cm일 때에

Table 2. Structural analysis results for various external fluid pressures and thicknesses

두께 (cm)	압력 (KPa)	Support		Top cover		Middle Cover	
		stress (MPa)	deflection (10 ⁻³ m)	stress (MPa)	deflection (10 ⁻³ m)	stress (MPa)	deflection (10 ⁻³ m)
1.4	196	13.87	6.41	11.29	9.21	8.88	23.43
	296	20.94	9.49	17.08	14.09	13.43	35.26
	396	28.01	12.56	22.86	18.98	17.97	47.11
	496	35.09	15.64	28.65	23.87	22.51	58.96
	596	42.16	18.71	34.43	28.76	27.06	70.81
1.2	196	15.07	6.78	12.45	9.74	9.59	23.81
	296	22.75	10.09	18.82	14.97	14.49	35.89
	396	30.44	13.39	25.19	20.21	19.39	47.99
	496	38.12	16.69	31.56	25.45	24.30	60.09
	596	45.80	20.00	37.93	30.69	29.20	72.19
1.0	196	16.40	7.24	13.83	10.39	10.43	24.27
	296	24.77	10.83	20.91	16.03	15.76	36.65
	396	33.13	14.41	27.98	21.69	21.09	49.06
	496	41.50	18.00	35.06	27.35	26.42	61.46
	596	49.86	21.58	42.13	33.00	31.75	73.87
0.8	196	17.76	7.81	18.19	11.18	11.42	24.84
	296	26.82	11.75	27.47	17.34	17.25	37.60
	396	35.88	15.69	36.75	23.50	23.08	50.38
	496	44.93	19.62	46.03	29.67	28.91	63.17
	596	53.99	23.56	55.31	35.83	34.74	75.95
0.6	196	18.95	8.47	28.93	13.03	12.54	25.58
	296	28.61	12.82	43.68	20.36	18.97	38.83
	396	38.26	17.18	58.43	27.69	25.34	52.09
	496	47.92	21.54	73.19	35.02	31.74	65.36
	596	57.58	25.89	87.94	42.36	38.14	78.63

stress= von-Mises stress.

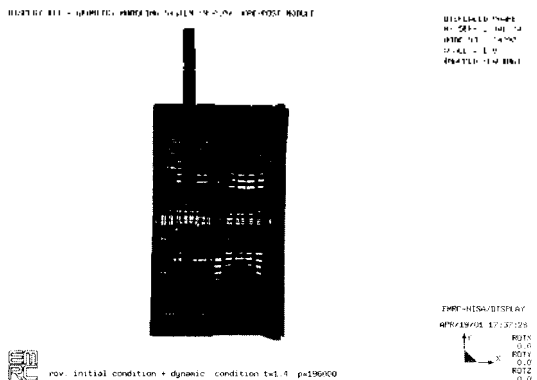


Fig. 8. Deformed shape of RIROB system (thickness=1.4 cm, pressure=196 MPa).

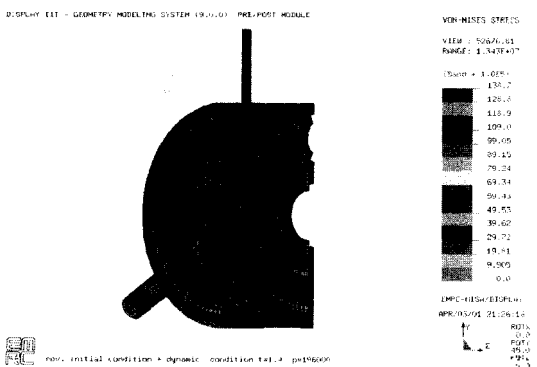


Fig. 9. Stress contour of RIROB system (thickness=1.4 cm, pressure=196 MPa)(section view).

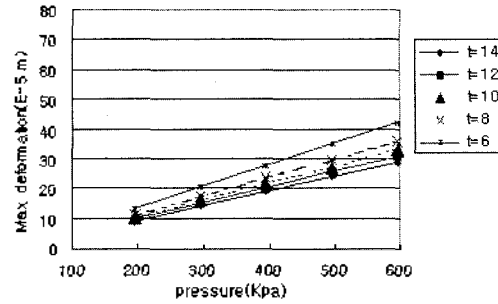
Table 3. Structural analysis results for various external fluid pressures and thicknesses

두께 (cm)	압력 (KPa)	Bot. Cover		Leg & Foot	
		stress (MPa)	deflection (10^{-5} m)	stress (MPa)	deflection (10^{-5} m)
1.4	196	8.56	8.64	12.34	2.94
	296	12.92	12.93	17.84	4.55
	396	17.27	17.39	23.34	6.18
	496	21.63	21.86	28.85	7.82
	596	25.99	26.33	34.35	9.46
1.2	196	10.80	9.25	13.23	3.00
	296	16.30	13.87	19.19	4.70
	396	21.81	18.60	25.16	6.42
	496	27.31	23.43	31.12	8.15
	596	32.82	28.26	37.08	9.88
1.0	196	14.17	10.49	13.96	3.15
	296	21.40	15.79	20.32	4.84
	396	28.63	21.08	26.67	6.65
	496	35.86	26.38	33.02	8.46
	596	43.09	31.67	39.38	10.28
0.8	196	20.00	12.91	14.42	3.48
	296	30.21	19.50	21.03	5.12
	396	40.42	26.08	27.63	6.80
	496	50.64	32.67	34.24	8.68
	596	60.85	39.25	40.84	10.57
0.6	196	31.22	18.70	14.83	3.85
	296	47.16	28.31	21.62	5.70
	396	63.10	37.91	28.41	7.57
	496	79.04	47.44	35.19	9.43
	596	94.98	57.04	41.98	11.30

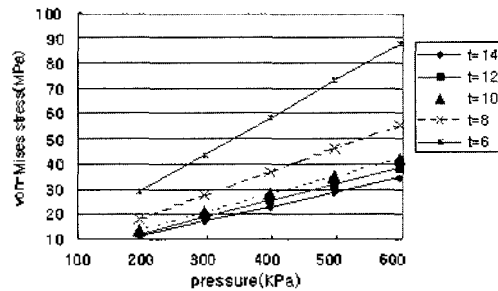
stress=von-Mises stress.

는 internal support에서 최대 동가응력(von-Mises stress)이 발생하고 있다. 이러한 응력발생의 경향은 압력을 196 KPa에서 596 KPa로 증가시켜도 동일하며, housing 두께를 1.0 cm까지 줄여도 동일하다. 그러나 두께를 0.8 cm 이하로 줄이게 되면 최대 동가응력(von-Mises stress)이 internal support가 아닌 bottom cover의 모터(motor) 부착을 위해 천공된 홀(hole) 주위에서 발생하게 된다. 또한, 모든 경우에서 가동지다리다리가 관통하는 top cover의 천공된 홀 주위에도 내부 지지물이 없다는 구조적 취약성 때문에 응력이 비교적 높게 나타나고 있다.

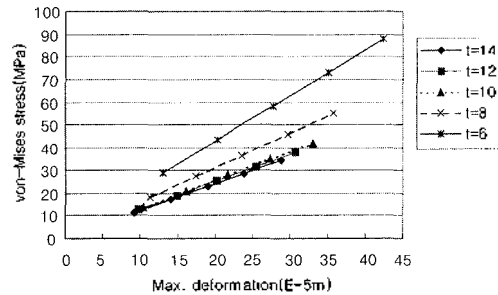
Table 2-3은 해석한 모든 경우의 응력과 변위를 나타내고 있다. 두께가 1.4 cm, 1.2 cm, 1.0 cm일 때 모



(a) maximum deflection versus pressure



(b) maximum von-Mises stress versus pressure



(c) maximum deflection versus maximum von-Mises stress

Fig. 10. Structural analysis result for various housing thickness at top cover (t = thickness, mm).

든 압력 범위에서 최대응력 발생지점이 internal support이고 다음으로 leg와 foot부분에서 응력이 발생한다. 그러나 0.8 cm, 0.6 cm일 때에는 최대응력이 bottom cover에서 발생하고 다음으로 top cover에서 응력이 높게 나타나는 경향을 보인다.

Fig. 10에는 top cover에서의 압력-변위, 압력-응력, 변위-응력의 관계를 그래프로 나타내었다. 앞에서 설명한 최대응력의 발생지점의 변화가 일어나는 두께가 0.8 cm 이하에서는 변위-응력 그래프의 기울기가 급격한 변화를 보이고 있다. 이것은 구조물의 강도가 약화되고 있음을 보여주는 것이므로 0.8 cm 이하로 수증탕상기의 housing을 설계하는 것은 구조적으로 바람직하지 않다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 해석결과를 재료의 항복응력(Table 1참조)과 비교하였을 때 발생하는 최대응력이 항복응력보다 현저히 낮음을 알 수 있다. 이것으로만 보았을 때에는 수중탐상기의 housing의 두께가 0.6 cm 외부압력이 596 KPa일 때에도 구조적으로 안전하다고 말할 수 있다.

그러나 housing의 두께가 0.8 cm이하로 되면서 top cover에서의 변위-응력 그래프의 기울기가 급격히 증가하므로 이 경우 수중탐상기 구조물이 약화되어 위험하다고 볼 수 있다. 더욱이 수중탐상기는 외력이 일정하게 작용하기보다는 잠함수심의 변화에 따른 작용하중이 반복적이며 지속적으로 변하기 때문에 설계시에 이러한 하중의 변화에 대한 발생응력의 급격한 변화를 피하도록 설계하여 충분한 내구성을 확보하는 것이 중요하다¹²⁾. 이러한 이유로 수중탐상기는 housing의 두께를 본 연구에서 제시한 두께들 중에서는 0.8 cm보다 큰 1.0 cm로 설계하면 충분히 구조적으로 안전하다는 결론을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. Sobieszczanski-Sobieski, J., "Multidisciplinary Design Optimization : An Emerging New Engineering Discipline," *Advances in Structural Optimization*, edited by J. Herskovitz, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 483-496, 1995.
2. Alexandrov, N. and Hussaini, Y., (eds), "Multidisciplinary Design Optimization : State of the Art," SIAM Publications, Philadelphia, PA, 1997.
3. Prager, W. and Taylor, J. E., "Problems in Optimal Structural Design," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, No. 1, pp. 102-106, 1968.
4. Vanderplaats, G. N., "Structural Optimization-Past, Present and Future," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 7, pp. 992-1000, 1982.
5. Rozvany, G. I. N., Zou, M. and Birker, T., "Generalized Shape Optimization Without Homogenization," *Structural Optimization*, Vol. 4, pp. 250-252,

- 1994.
6. Jongsoo Lee, "MDO 분야의 최근 연구 동향," *Proceedings of the Optimal Design 20*, Nov, 1998.
7. 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, pp. 263-271, 1992.
8. 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, pp. 1055-1065, 1998.
9. 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.
10. 권영주, 방해철, "MDO기법에 의한 새로운 구조해석 및 설계기법 고찰 : 플랩 구동장치의 구조설계에의 적용," *한국CAD/CAM학회 논문집*, 제5권, 제2호, pp. 184-195, 2000.
11. Samareh, J. A., "Use of CAD in MDO," *AIAA Paper 96-3991*, Sept, 1996.
12. 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.
13. 현범수, "무인잠수정 설계 및 개발," *한국해양 공학회지*, 제7권, 제1호, 한국해양공학회, 1993.
14. 권영주, 방해철, 김창녕, "기계식 인공심장판 막의 경량화 구조설계를 위한 혈액유동과 상호작용하는 관막거동의 구조역학적 특성연구," *한국CAD/CAM학회 논문집*, 제6권, 제1호, pp. 59-68, 2001.
15. Yun, C. B., Kim, J. W., Kim, H. S., Seo, J. M., Kim, J. M. and Choun, Y. S., "Fluid-Structure Interaction Analysis of Liquid Storage Structures," *한국전산구조공학회 논문집*, 제5권, 제2호, pp. 103-111, 1992.



권영주

1979년 서울대학교 공과대학 기계공학과 학사
 1981년 서울대학교 대학원 기계공학과 석사
 1987년 미국 미시간대학교(The University of Michigan, Ann Arbor) 대학원 공학박사
 1987~1988년 미국 ADAPCO 엔지니어
 1988~1990년 미국 EMRC(기계공학연구소) 수석연구원
 1990~1996년 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원
 1996년~현재 홍익대학교 기계정보공학과 부교수
 관심분야: 박판고체구조분 구조해석 (Structural Analysis of Plate & Shell), 탄성/소성 대변형 구조해석 (Large Elastic & Plastic Structural Deformation Analysis), 좌굴해석 (Buckling Analysis), 열탄성해석 (Thermal Elasticity Analysis), 유한 요소법개발(Finite Element Method Development), MDO에 의한 통합 구조해석기술개발



김재희

1980년 서울대학교 공과대학 기계공학과 학사
 1982년 서울대학교 대학원 기계공학과 석사
 1992년 한국과학기술원 정밀공학과 공학박사
 1993년 일본 국제정보화센터 방문연구원
 1983년~현재 한국원자력연구소 책임연구원
 관심분야: 로봇트 설계 및 제어(Design and Control of Robots), 원자력 기기 건전성 평가(Integrity Evaluation of Nuclear Plant Components), 인공지능 및 지능제어 (Artificial Intelligence and Intelligent Control)



최석호

2000년 홍익대학교 기계설계학과 학사
 2002년 홍익대학교 대학원 기계설계학과 석사
 2002년~현재 삼진정공(주) 근무
 관심분야: CAE에 의한 구조해석 및 설계, MDO에 의한 통합구조해석기술개발