

교량 케이슨 운송의 동적 안정성 고찰

조철희* · 김성준* · 정현**

*인하대학교 선박해양공학과

**오션스페이스(주)

Dynamic Stability during Transportation of Bridge Caisson

Chul-Hee Jo*, Sung-Jun Kim* and Hyun Cheong**

*Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**Ocean Space Inc., Seoul, Korea

KEY WORDS: Heavy caisson 케이슨, Floating dock 플로팅 도크, Mooring force 계류력, Environmental loads 환경하중, Transportation load conditions 운송 하중 조건, Crane barge 크레인 바지

ABSTRACT: As the demands of ocean resource development increase, many offshore structures are required. To cope with the active ocean developments, many types of construction methods have been applied for offshore facilities, including oil, gas and harbors. One of the challenges is to transport and install the heavy bridge caisson. Several construction methods are well understood. However, for the sake of safety and reliability, the F/D installation method can be utilized. While the caisson is carried by an F/D, the mooring force of the tug boat and the structure stability from exiting motions in the dock should be checked against external loadings and sea conditions. The external loads can be classified with wind force, current force, and wave force. In the stability analysis, transportation velocity and draft of F/D are important factors. The dynamic stability and hook load for crane barge installation for the same caisson are also studied. Considering external loads and dominant factors, the stability of caisson during transportation has been investigated.

1. 서 론

해양 교 하부 구조물인 대형 케이슨 운송에는 여러 가지 운송 방법이 있다. 어떤 방법을 적용하든지 해상상태에 따른 여러 변수를 고려하여 충분한 안정성이 확보되어야 한다. 운송을 위해 일반적인 크레인 바지나 F/D(Floating dock)를 사용하게 되며 터그보트로 예인할 경우 운송바지와 구조물의 일치된 운동은 물론 독립적인 운동에 대한 검토가 요구되고, 예인 와이어의 계류력에 대해서도 충분한 안정성이 확보되어야 한다. 본 논문과 관련한 이전연구는 부유구조물 운동, 동적 계류력, 크레인바지 진자운동등이고, 해양부유체 운동에 대해서는 이판목 등(2004)과 이판목 등(2008)이 수중체의 운동 및 항법기술개발 연구가 발표되었고, 수중체의 동역학 계수 추정에 대해 백혁 등(2008)이 소개하였다.

해상 크레인의 진자운동이 화물에 미치는 영향에 대해 신장용 등(2005)이 고찰하였고 예인로프의 로프각에 따라 예인 운동방정식과 이를 통해 화물에 작용하는 관성력을 연구하였다. 유사한 논문으로 대형 해양구조물인 자켓 진수 시 발생하는 동적 영향에 대해 조철희 등(2001)이 논문을 발표하였고 바지의 홀수와 트립 및 자켓의 하중과 동적 운동관계에 대해 연구하였다. 해양구조물에 작용하는 파랑하중은 조규남 등(2000)이 고찰하

여 파랑하중 계산 기법을 소개하였다. 해양 부유구조물인 FPSO의 횡운동에 대해서는 최윤락 등(2005)이 FPSO 횡운동 자유감쇠 연구를 통해 2차항 감쇠계수를 추정하였다.

본 논문에서는 거가대교의 대형 교각케이슨을 크레인바지와 F/D를 사용하여 운송할 때 계류력 및 운송선의 동적 운동과 같은 교각 케이슨을 크레인바지로 운송할 때 2 body freedom의 동적안정성을 검토하였다.

2. 운동방정식

2.1 부유체 운동방정식

부유체 운동은 병진 운동과 회전운동을 포함하여 6자유도를 가지지만 계류계의 거동 해석에서는 수면상의 저 진동수 대 변위 표류 운동해석이 매우 중요하다. 좌표계 사이의 관계식은 수평운동 오일러각을 이용한다.

$$\dot{\eta}_i = \begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\psi}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi_i & -\sin\psi_i & 0 \\ \sin\psi_i & \cos\psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ r_i \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

각 부유체의 강체 운동방정식은 일반적인 Newton의 제 2법칙인 선 운동량과 각 운동량 보존법칙이 적용된다.

$$M_{RB} \dot{v}_i + C_{RB}(v_i)v_i = F_{hydro} + F_{mooring} + F_{ext}, i = 1, 2 \quad (2)$$

위 식에서 아래 첨자 RB는 강체이고, 부유체에 작용하는 힘과 모멘트는 유체력, 계류력 그리고 환경하중이 포함됨으로 동 유체력을 고려한 운동방정식이 적용되었다.

$$Mv_i + C(v_i)v_i = F_i(t)_{memory} + F_i(t)_{viscous} + F_i(t)_{wind} + F_i(t)_{current} + F_i(t)_{wave} + F_i(t)_{mooring} + F_i(t)_{hawser} + F_i(t)_{thruster} \quad (3)$$

$$M = \begin{pmatrix} m + a_{11}(\infty) & 0 & 0 \\ 0 & m + a_{22}(\infty) & mx_G + a_{26}(\infty) \\ 0 & mx_G + a_{62}(\infty) & I_{66} + a_{66}(\infty) \end{pmatrix} \quad (4)$$

위 식에서 M은 부가 질량을 포함한 질량 행렬을 나타내며, C(v)v는 힘과 구심력을 나타낸다. 질량행렬에 포함된 부가질량 a₁₁(∞)는 무한대 진동수에서의 부가질량이다.

2.2 계류삭 운동방정식

계류삭 운동방정식은 각 계류삭에 걸리는 지배 방정식을 적용하였고 계류삭 길이방향, 수평면과 계류삭이 이루는 각도를 고려하여 계류삭에 걸리는 장력 관계를 표현할 수 있다. 관계식 (ds = √dx² + dy²)를 이용하여 (s, ϕ)로 기술된 방정식을 공각좌표 (x, y)로 변환 시킬 수 있다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{w}{T_H} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (5)$$

$$y = \frac{T_H}{w} \cosh\left(\frac{w}{T_H}x + c_1\right) + c_2 \quad (6)$$

속도 포텐셜은 지배방정식인 라플라스 방정식과 자유표면 경계조건, 바닥 경계조건, 물체표면 경계조건, 방사조건 등의 경계조건을 만족하였고, 포텐셜이 구해지면 Bernoulli 방정식을 이용하여 동압을 구한 후 이를 부유체의 침수표면에 대해 적분하여 동유체력을 얻는다. 파장제력과 부가질량 그리고 파랑 감쇠 계수가 구해지면, 뉴턴의 제 2법칙을 이용하여 두 부유체의 선형 운동 응답을 구할 수 있다. 해상에 계류된 부유체에 파도가 입사하면 자유수면 조건이 비선형이기 때문에 선형 파랑하중 뿐만 아니라 비선형 표류력을 받게 된다.

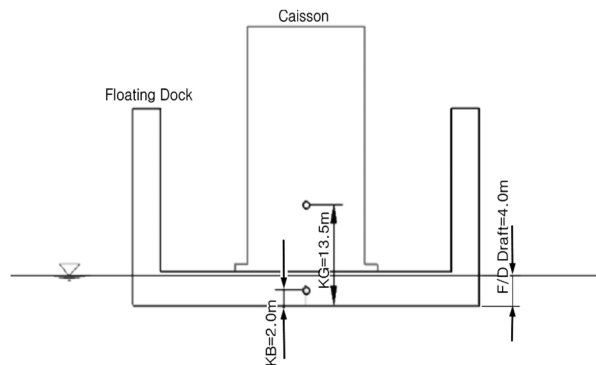


Fig. 1 Transportation concept of F/D

비선형 파랑하중은 파기울기에 대한 접근전개 과정에서 2차항 성분이다. 실제 해상상태를 수많은 진동수의 파 성분들이 합성된 불규칙파로 볼 수 있으므로, 자유표면의 비선형성으로 인하여 파기울기의 2차항인 비선형 표류력은 시간평균 표류력과 진동수들의 합과 차의 진동수에 해당하는 표류력 등 5개의 성분으로 분류할 수 있다. 이중에서 차 진동수의 저 진동 표류력은 계류 시스템의 작은 복원력으로 인한 낮은 고유진동수와 공진을 일으켜 대 진폭 운동을 야기 시킬 수 있으므로, 부유체의 비선형 운동응답에 큰 영향을 미친다.

3. 수치해석

3.1 F/D 운송해석

F/D 운송해석은 거가대교 설치에 동원된 F/D와 실제 교각 케이슨자료를 사용하였고 터그보트가 설치지역으로 F/D를 예인하는 공법을 적용하여 수행하였다. Fig. 1은 F/D에 올려진 교각 케이슨으로 홀수와 c.g.를 나타내고, Fig. 2는 9,000ton 케이슨의 사양과 크기를, Fig. 3은 F/D 예인방법을 보여준다. Table 1은 F/D의 사양을 보여준다. Table 2는 9,000ton 케이슨 사양을 요약하였다.

수치해석은 광범위한 해양구조물설치 프로그램인 Moses를 사용하였다. Moses는 하역, 운송, 설치등 해양구조물 설치에 주로 사용되는 검증된 해석프로그램으로 인정되어 해양 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 해석은 예인속도에 따라 각기 다른 환경하중의 입사각을 변화 시키면서 ENV01부터 ENV20까지 조

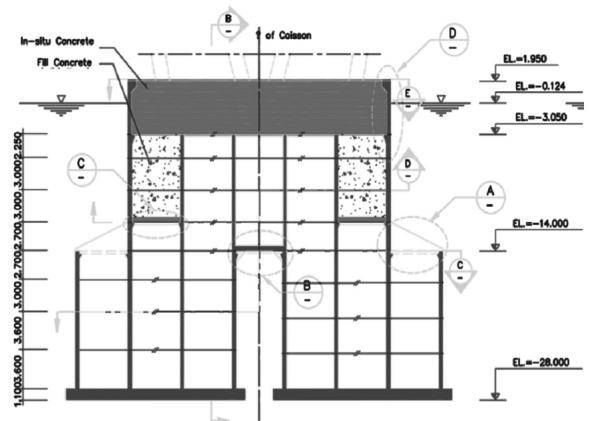


Fig. 2 9,000ton caisson model

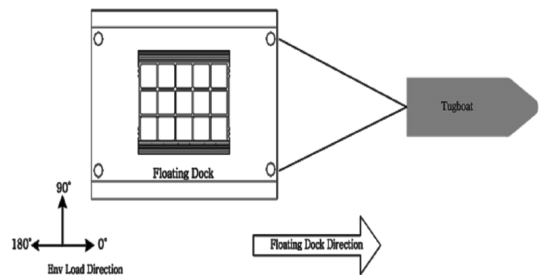


Fig. 3 Transportation concept

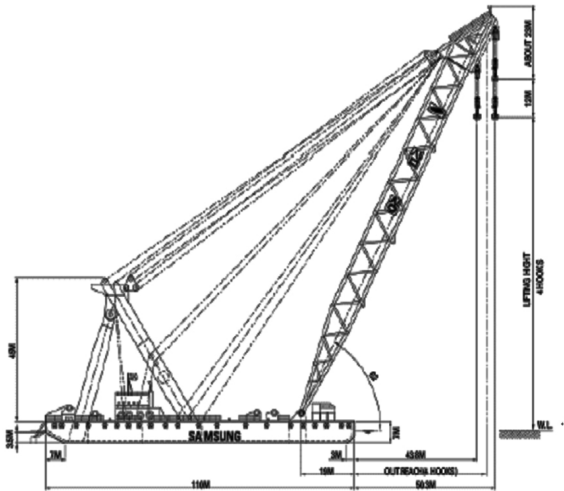


Fig. 4 Crane barge drawing

Table 1 F/D specification

LOA	62.0 m	Breadth	50.0 m
Height	26.5 m	Dead weight	9000 tonf
Draft	1.2 m	Gross tonnage	6350t onf
Full draft	4.0 m	Dock in breadth	42.0 m
Max. submerge draft	21.0 m	Pontoon height	4.5 m

Table 2 9,000ton caisson specification

Height	32.95 m	Breadth	17 m
Upper length	27.9 m	Lower length	41 m
Dead weight	9573 ton	Buoyancy	7635 ton

Table 3 Crane specification

Crane barge	L × B × D	Light weight draft	Displacement	Allowable drag weight
3,000 ton	110 m × 45 m × 7.0 m	2.4m	11,828 ton	2,700 ton

합하여 Table 4, 5와 같이 여러 조건의 환경 하중을 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 해석 모델을 도시화하였고, 자체 추진력이 없는 F/D에 케이슨을 싣고 터그보트가 2개의 계류라인을 연결하여 운송하는 공법으로 공법이고 2-body의 동적운동에 대한 해석이 요구된다. 이러한 2-body 운동으로 같은 외력조건에 따라 동적운동에 대한 고찰과, 순간적으로 매우 높은 계류력이 발생하므로 이에 대한 조사가 요구되었다.

3.2 크레인바지 운송

크레인바지는 3,000ton의 최대예인능력을 갖고 있고 사양은 Table 3에 요약하였다. 크레인의 길이는 110m이고 배수량이 11,828ton, 경하홀수는 2.4m이다. Fig. 4는 해석에 사용된 크레인바지를 보여준다. Table 6은 크레인 운송해석시 해양환경조건

Table 4 Environmental condition (load case 1)

Load case_1	Velocity (knot)	Wind velocity (m/s)	Wave height (m)	Wave period (sec)	Current velocity (m/s)	Load direction (degree)
ENV01						0
ENV02						45
ENV03	2	4	1.5	2.53	1.48	90
ENV04						135
ENV05						180
ENV06						0
ENV07						45
ENV08	2	4	1.5	5.10	1.48	90
ENV09						135
ENV10						180
ENV11						0
ENV12						45
ENV13	2	4	1.5	7.53	1.48	90
ENV14						135
ENV15						180
ENV16						0
ENV17						45
ENV18	2	4	1.5	9.10	1.48	90
ENV19						135
ENV20						180

Table 5 Environmental condition (load case 2)

Load case_2	Velocity (knot)	Wind velocity (m/s)	Wave height (m)	Wave period (sec)	Current velocity (m/s)	Load direction (degree)
ENV01						0
ENV02						45
ENV03	2	4	0.5	5.10	1.48	90
ENV04						135
ENV05						180
ENV06						0
ENV07						45
ENV08	2	4	1.0	5.10	1.48	90
ENV09						135
ENV10						180
ENV11						0
ENV12						45
ENV13	2	4	1.5	5.10	1.48	90
ENV14						135
ENV15						180
ENV16						0
ENV17						45
ENV18	2	4	2.0	5.10	1.48	90
ENV19						135
ENV20						180

Table 6 Crane barge transportation conditions

Drag velocity	2.0~3.0 knot
Wind velocity	4 m/sec
Wind direction	0~180°
Significant wave height	0.5, 1, 1.5 m
Wave period	2.53, 3.58, 4.39 sec
Wave direction	0~180°
Current velocity	1.48 m/sec
Current direction	0~180°

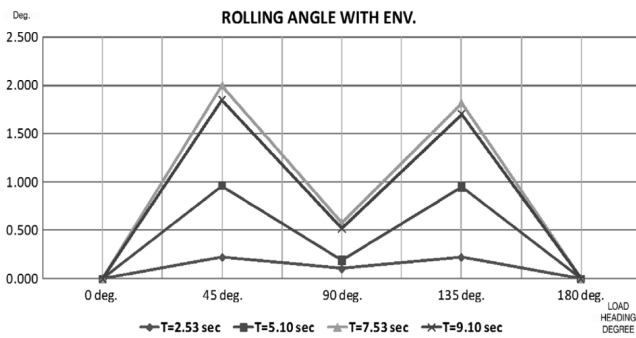


Fig. 5 F/D rolling vs. wave period (Load case 1)

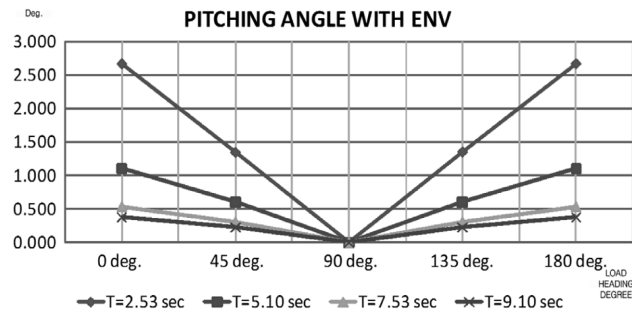


Fig. 6 F/D pitching vs. wave period (Load case 1)

을 정리하였다.

4. 수치해석 결과 및 해석

F/D 예인 해석에서는 Table 3의 하중조건을 이용하여 총 40개의 환경변수를 적용하였다. 하중조건 1은 고정된 파고에 파주기를 증가시키면서 부유체의 운동과 와이어 장력을 관찰하였고, 하중조건 2에서는 고정 파주기에 파고를 증가시키면서 운동과 와이어 장력을 해석하였다. Figs. 5과 6은 하중 조건 1에 대한 F/D의 롤링과 피칭을 파주기에 따라 요약하였다.

롤링은 환경하중의 입사각이 45°일 가장 크게 나타난다. 파주기 길이가 7.53sec일 때까지 롤링이 점진적으로 증가하다가 9.10sec 이후에는 운동이 감소한다. 피칭은 입사각이 0°와 180°일 때 가장 크며 90°를 전후에서 크거나 작아지면 증가하는 경향을 보여준다.

Fig. 7은 하중조건 1의 와이어장력을 보여주며 와이어 장력은

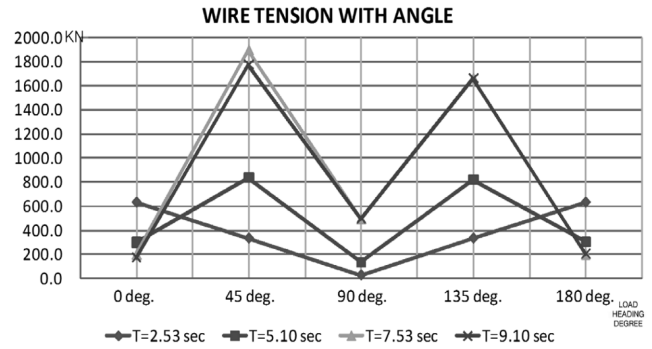


Fig. 7 Wire tension vs. wave period (Load case 1)

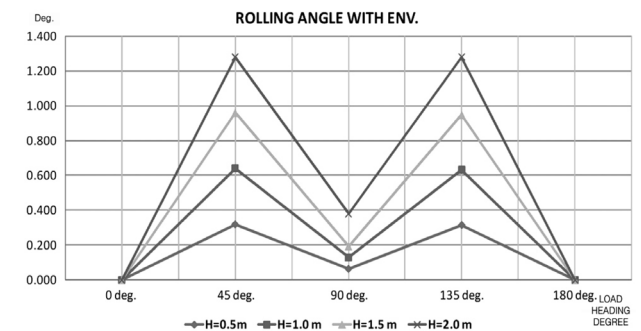


Fig. 8 F/D rolling vs. wave period (Load case 2)

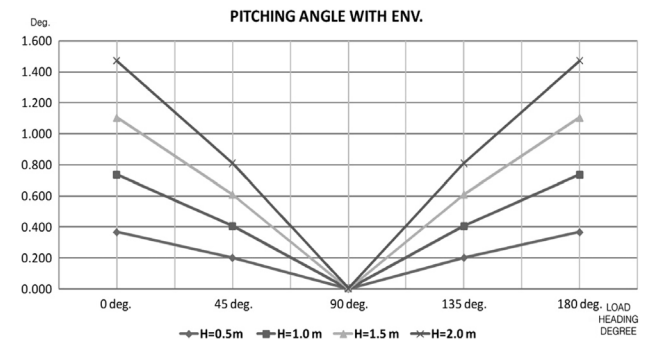


Fig. 9 F/D pitching vs. wave period (Load case 2)

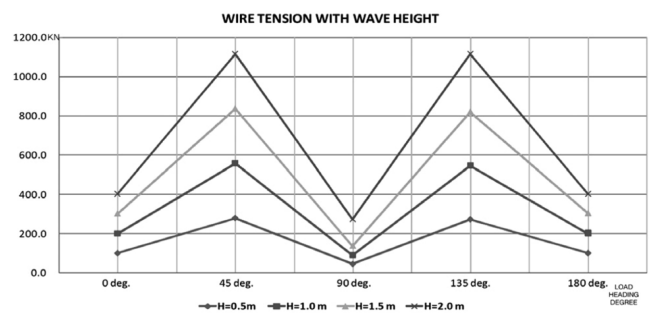


Fig. 10 Wire tension vs. wave period (Load case 2)

주기 2.53sec의 경우를 제외한 나머지 파주기에서는 45°의 각도를 가지고 환경하중이 입사하는 것이 가장 큰 장력이 발생하고 또한, 롤링 운동과 비슷한 경향으로 주기의 크기가 커짐에 따라 장력이 증가하다가 9.10sec를 기점으로 파력이 감소한다. 롤링

Table 7 Crane barge stability during towing

Drag velocity	Wave height (m)	Wave period (sec)	Heave (m)	Roll (degree)	Pitch (degree)
2 knots	0.5	2.5	0.054	0.009	0.021
	1.0	3.6	0.080	0.393	0.067
	1.5	4.4	0.189	0.573	0.116
3 knots	0.5	2.5	0.017	0.155	0.019
	1.0	3.6	0.078	0.403	0.066
	1.5	4.4	0.190	0.618	0.134

Table 8 Crane hook load at 3knots towing speed

Drag velocity	Wave height (m)	Wave period (sec)	Hook load (tonf)
3 knots	0.5	2.5	2201.5
	1.0	3.6	2753.5
	1.5	4.4	3258.1

Table 9 Crane hook load at 3knots towing speed

Drag velocity	Wave height (m)	Wave period (sec)	Hook load (tonf)
2 knots	1.0	3.6	2646.3
		5.0	2963.2
		7.0	2942.5
		9.0	2939.7
		11.0	2820.8

에 따른 와이어 장력은 파주의 증가와 입사각에 대하여 비슷한 경향을 갖고 있다. 계류된 두 부유체의 와이어텐션은 어느 일정범위의 파주기에서 가장 크게 작용된다.

Fig. 8은 하중조건 2로 고정 파주기 시 파고의 변화에 따른 F/D의 롤링을 보여주며, 파고가 커짐에 따라서 그 값도 커진다. Fig. 9의 피칭도 같은 경향을 보여준다. 와이어 장력도 하중의 입사각이 45°와 135° 일 때 가장 크게 발생하며, 파주의 증가는 어느 일정범위에서 와이어장력과 롤링이 증가하고 그 범위를 지나면 오히려 그 값이 감소한다는 것을 알 수 있다(Fig. 10). 피칭은 파주기 증가에 따라 점차 감소하나 계류된 부유체의 운동과 와이어장력은 증가시킨다.

해상크레인의 해양환경과 예인속도에 따른 동적운동은 Table 7와 같고 2knot와 3knot로 예인하더라도 크레인 바지의 안정성은 확보되었다. 그러나 예인속도가 3knot일 경우 주기가 커짐에 따라 크레인의 홀로드가 증가하여 파주기 3.6sec 이상일 때는 크레인의 허용인양 중량을 초과한다(Table 8).

예인 속도를 2knot로 유지하고 2m 파고에 여러 파주기에 대해 크레인 홀로드를 해석하여 Table 9에 나타내었다. 파주기가 변화에 따라 홀로드도 변화하며 5sec 이상의 장주기파에서는 지속적으로 허용인양하중을 초과하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

대형 교각 케이슨을 해상 운송을 할 때 해양 환경에 따른 안정성 해석이 매우 중요하다. 운송방법과 공법과 해양환경의 조합에 따라 동적운동과 와이어장력, 운송장비의 허용범위를 초과하지 않는지 검토가 요구된다.

F/D공법으로 대형 교각 운송 시 F/D의 사양과 해양환경에 따른 동적운동, 와이어장력의 검토가 요구되고, 크레인바지 공법을 적용할 경우 속고 및 해양환경에 따른 홀로드와 허용범위를 검토해야 한다. 계류된 부유체의 해상 운송 시 특정 파주기 범위에서 계류하중의 급격한 증가와 동적운동 변화를 일으키는 현상이 발생하고 그 특정 범위를 넘으면 계류하중의 감소와 운동의 크기가 감소하므로 구조물 형태 및 환경에 따른 동적해석은 매우 중요하다. 운송해석은 많은 변수가 있으므로 여러 해양 환경 조건 및 적용 운송공법에 따라 안전 한계범위를 분석하는 것이 요구된다.

후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었다.

참 고 문 헌

백혁, 김기훈, 전봉환, 이관목, 임용곤 (2008). “심해용 무인 잠수정의 동역학 계수의 추정에 관한연구”, 한국해양공학회지, 제22권, 제4호, pp 97-105.

신장용, 박영현, 고성희, 홍금석 (2005). “로프각이 화물의 진자 운동에 미치는 영향: 설계력의 산정”, 한국해양공학회지, 제19권, 제1호, pp 77-86.

이관목, 전봉환, 임용곤 (2008). “고정기준점에 대한 거리측정 신호를 이용하는 자율무인잠수정의 수중항법”, 한국해양공학회지, 제22권, 제4호, pp 106-113.

이관목, 전봉환, 김시문, 이종무, 임용곤, 양승일 (2004). “초음파 거리계를 이용한 무인잠수정의 수중 복합 항법시스템”, 한국해양공학회지, 제18권, 제4호, pp 33-39.

조규남, 이근무, 최영철 (2000). “해저석유개발을 위한 해양구조물의 기본 설계/해석 및 실험기법 개발 - 해양구조물에 작용하는 파랑하중 산정에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제14권, 제1호, pp 1-5.

조철희, 김경수, 김재환, 이수훈 (2001). “해저 자켓구조물 진수 영향인자에 대한 고찰”, 한국해양공학회지, 제15권, 제2호, pp 141-147.

최윤락, 김진하, 김용수 (2005). “바이지형 FPSO의 횡운동 성능에 대한해석”, 한국해양공학회지, 제19권, 제3호, pp 25-30.

2008년 9월 30일 원고 접수

2008년 12월 9일 최종 수정본 채택