

선박접안시험을 통한 자켓식 돌핀부두의 내하력 평가 방법 연구

조 병 완* · 권 오 혁**

(98년 3월 2일 접수)

Assessment of Safety and Load Carrying Capacity of Aged Jacket-Typed Dolphin by Ship-Impact Test

Byung-Wan Jo* · Oh-Hyuk Kwon**

Key Words : Load Carrying Capacity(내하력), Reliability Analysis(신뢰성 해석), Reliability Index(β)(신뢰성 지수), Marine Structure(해안구조물), Dolphin Piers(돌핀부두)

Abstract

An improved evaluation method of load-carrying capacity for the large-scaled offshore structures, which subjected to the axial force and bending moments simultaneously at the piles, was suggested with reliability analysis and advanced working stress method.

Reliability analysis requires the fracture probability and safety factor(β) for each of forces and the load-carrying capacity due to combined action of axial force and bending moments from $P_n - \beta$ Curve.

The combined equation due to those forces, which suggested by the Korean Specification for the marine structure, was derived for the advanced working stress method and applied to evaluate the load-carrying capacity of jacket-type dolphin piers.

1. 서 론

현대 산업의 발전과 더불어 대규모 임해공업단지의 조성이 활발히 추진되어 오는 등 관심이 점차 해상으로 집중되고 있으며 기존 노후 부두에 대한 안전성 및 유지관리에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 노후 구조물에 대한 현장 재하 시험 및 비파괴 검사기법을 이용한 안전도 검사가 활발히 진행되고 있다. 건설된지 20년 이상 된 부

두의 경우 열화손상의 정도가 점점 심화되고 있으며 경제 성장에 따른 수출·입 물량이 증가하고 있으며 항만구조물의 건설비용이 일반구조물에 비해 엄청나다는 점등을 감안하면 기존 부두에 대한 안전성 및 내하력 평가는 사회간접자본의 효율적 관리라는 측면에서 매우 중요한 것으로 사료된다.

현재 항만 구조물의 안전에 대한 불안감이 고조되고 있고 그에 따라 기존 구조물의 내하력 평가가 활발히 진행되고 있지만 기존의 내하력 평가 방

* 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과, 부교수

** 한양대학교 공과대학 토목공학과, 박사과정

법들에는 약간의 문제점이 존재한다.

항만 구조물들(잔교식 부두, Dolphin, Jacket 구조물 등)은 주로 선박의 접안력을 파일이 저항하게 되어 있으며, 따라서, 기존의 평가 연구방법들(WSR, LRFR, 신뢰성방법 등)은 항하중에 대해 발생하는 축력과 휨모멘트를 각각 따로 평가하는 방법을 취하고 있다. 그러나, 실제로 파일은 축력과 휨모멘트를 동시에 저항하기 때문에 복합거동을 하게 되며, 따라서, 휨과 축력을 동시에 받는 경우에 지배적인 단일 파괴모드만을 고려하는 방법이 아닌 이러한 복합거동을 평가할 수 있는 새로운 방법이 필요하다.

본 연구에서는 합리적이며 체계적이고 실질적인 안정성 및 내하력 평가 기법의 정립을 위한 지속적이고 체계적인 연구로서 현행 육안조사 방식에서 각종 계측장비를 이용한 체계적이고 과학적인 조사, 시험 및 측정을 통해 취득한 자료 및 기타 수집 문헌들을 정밀하게 분석 고찰하고 이를 바탕으로 Jacket 식 Dolphin 구조물의 복합거동을 평가하기 위한 효율적인 내하력 평가 기법인 신뢰성 해석에 의한 등가내하력 산정방법과 조합상관식에 의한 WSR(Working Stress Rating)방법을 제안하고자 한다.

신뢰성 해석에 의한 등가내하력 산정 방법은 신뢰성 해석을 통해 축력과 휨모멘트에 따른 파괴확률과 Safety Factor(β)를 각각 구한 다음 $P_n - \beta$ Curve를 통해 공용 내하력을 산정하고 내하력을 구하게 되며, 조합상관식에 의한 WSR방법은 축력과 휨모멘트를 동시에 고려할 수 있는 조합상관식을 유도하고 각각의 응답측정치와 노후손상도를 이용하여 구조물의 내하력을 평가하게 된다.

본 연구에서는 여수항에 위치한 LG Caltex 원유제2부두의 Jacket식 Dolphin구조물의 복합거동에 대해 위의 두 방법을 적용 내하력 평가를 수행하여 제안된 방법의 타당성 여부를 고찰하였다.

2 신뢰성지수에 의한 등가 내하력 평가 방법

2.1 신뢰성 지수

신뢰성 지수를 구하기 위해서는 신뢰성해석을

수행하여야 하고 적절한 한계 상태 함수를 설정해야 한다. 대상 구조물은 접안 항하중에 의해 파일이 주로 지탱하는 구조로 되어 있다. 그리고 구조 해석 및 실측치 데이터를 분석한 결과 각 구조물의 파일은 축방향력 뿐만 아니라 휨모멘트 역치 크므로 겹토식은 단순한 선형 한계 상태 함수가 아니다. 본 논문에서는 한계상태중 극한한계상태만을 고려하였으며, 일본강구조 설계지침(1993)에서 규정하고 있는 축력과 휨모멘트를 고려한 시방서 기준을 채택하여 이를 토대로 한계상태 모형을 제안하였다. 따라서 P-M 상관모드에 대한 한계상태 방정식은 식(2)와 같이 정의 할 수 있으며, 이를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다

$$\frac{P}{P_{cr}} + \frac{M_y}{M_{cr}(1 - \frac{P}{P_e})} + \frac{M_z}{M_{cr}(1 - \frac{P}{P_e})} \leq 1 \quad (1)$$

$$g(\cdot) = 1 - \left[\frac{P}{P_{cr}} + \frac{M_y}{M_{cr}(1 - \frac{P}{P_e})} + \frac{M_z}{M_{cr}(1 - \frac{P}{P_e})} \right] \quad (2)$$

여기서, P_{cr} = 실좌굴강도;

M_{cr} = 실험모멘트 저항강도; $P_e = \pi^2 EI / (kl)^2$

실좌굴강도 및 실험모멘트저항강도는 노후손상계수 D_{Fc} , D_{Fb} 와 불확실량을 내포하는 변량인 N_c , N_b 의 항으로서 다음과 같다.

$$P_{cr} = P_{cm} N_c D_{Fc} \quad (3a)$$

$$M_{cr} = M_{cm} N_b D_{Fb} \quad (3b)$$

여기서, P_{cm} , M_{cm} = 공칭 축좌굴강도, 공칭휨저항강도, N_c , N_b = P_{cr} , M_{cr} 평가에 관련된 불확실량을 내포하는 변량 하중관련변량인 P , M_y , M_z 는 실응답비를 포함시킨 식으로 다음 식(4a)~(4c)과 같다.

$$P = P_d + K_{sc} P_{sh} + P_w \quad (4a)$$

$$M_y = M_{dy} + K_{sb} M_{shy} + M_{wy} \quad (4b)$$

$$M_z = M_{dz} + K_{sb} M_{shz} + M_{wz} \quad (4c)$$

여기서, K_{sc} , K_{sb} = 각각 축력과 휨에 대한 응답비
 D_{Fc} = 축강성에 대한 손상계수

- D_{Fb} = 휨강성에 대한 손상계수
- P_{sh}, P_d, P_w = 선박충격력, 자중, 풍하중에 의한 축력
- M_{shy}, M_{dy}, M_{wy} = 선박충격력, 자중, 풍하중에 의한 y방향 휨모멘트
- M_{shz}, M_{dz}, M_{wz} = 선박충격력, 자중, 풍하중에 의한 z방향 휨모멘트

신뢰성 해석에는 다양한 수치해석방법이 사용될 수 있지만 일반적으로 Jacket식 Dolpin부두와 같이 파일이 모멘트와 축력을 동시에 받는 구조부재의 한계상태 함수는 비선형 함수가 되므로 파괴학률과 신뢰성지수를 구하는 실용적인 방법인 MCS (Monte Carlo Simulation)기법을 적용하여 파괴학률과 신뢰성지수(β)를 계산하였다.

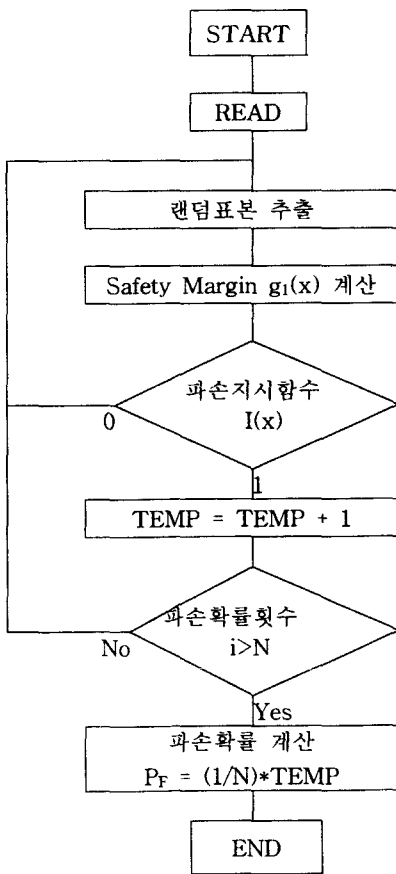


Fig. 1 MCS Program의 해석 절차

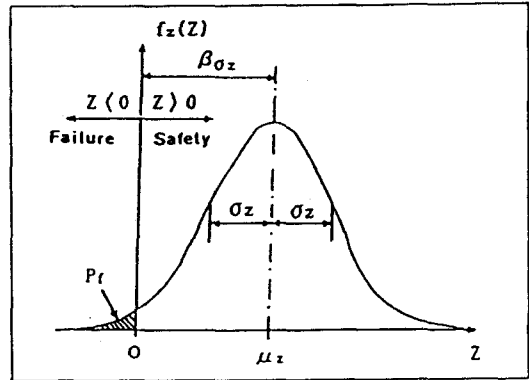


Fig. 2 신뢰성 지수

Fig. 2는 저항을 R, 하중효과를 S라는 확률변수라 할때 신뢰성지수 β 가 원점에서 평균까지 거리를 표준편차의 배수로 표현된다는 것을 개념적으로 나타내며, 파괴학률과 신뢰성지수는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$P_F = \Phi \left[\frac{-(\mu_R - \mu_S)}{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}} \right] = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (6)$$

여기서, $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$, $\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2$

μ_R, μ_S : R과 S의 평균

σ_R^2, σ_S^2 : R과 S의 분산

μ_Z : 안전여유($Z=R-S$)의 평균

σ_Z^2 : 안전여유($Z=R-S$)의 분산

본 부두의 신뢰성 해석을 위한 저항 및 하중관련 불확실량들을 국내의 관련문헌[Ellingwood 등, 1980 ; 신재철 등, 1989]을 종합, 분석하여 표(1)에 제시하였다. 상재 하중과 선박 충격력은 활하중과 같이 취급하였으며 이러한 통계적 자료는 앞으로 저항 및 하중관련 조사, 연구가 발전되고 통계자료가 누적됨에 따라 수정, 보완될 수 있을 것으로 사료되며 표(1)의 통계치는 현단계에서 최선의 추정치로서의 의미가 있다.

Table 1 통계적 불확실량

구 분	평균 공칭비	변동계수	분 포 형	
저항	휨	1.08	0.15	Lognormal
	축력(압축)	1.10	0.13	Lognormal
하중	사 하 중	1.05	0.10	Normal
	활 하 중	1.24	0.25	Lognormal
	WIND	0.89	0.42	Type II

2.2 등가 내하력 산정

본 대상 구조물은 휨모멘트와 축방향력을 동시에 받는 구조물로 신뢰성 해석에 기초한 등가 내하력 평가 방법으로 공용 내하력을 측정하였다. 본 방법은 조합상관식뿐만 아니라 저항 및 하중 관련 불확실량을 확률적으로 고려한 방법이라 할 수 있다.

등가내하력평가 방법은 두개의 평가 하중에 의 해 앞에서 기술한 바와 같은 상관식의 한계상태 함수식을 통해 신뢰성 해석을 수행하여 두개의 신뢰성 지수를 각각 구할 수 있다면 평가하중과 신뢰성 지수 β 는 지수함수의 관계가 있다고 알려져 있으며 P_n , β 은 다음 Fig. 3과 같이 두개의 평가하중과 그에따른 두개의 신뢰성지수에 의해 지수함수 관계식을 유도함으로써 얻어질수 있다. 따라서, 이 그래프를 이용하여 목표 신뢰성지수 $\beta_0=3$ 일때의 하중을 찾아내면 이것이 바로 구조물의 공용 내하력이 된다. 등가내하력의 추정절차는 Fig. 4와 같다.

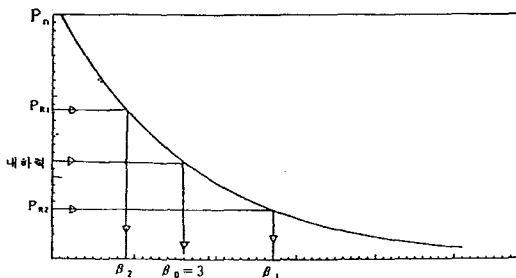


Fig. 3 β_s vs P_n Curve

여기서,

P_{R1}, P_{R2} = 두개의 평가하중(수평형 하중)

β_1, β_2 = 두개의 평가하중에 상응하는 계산된 신뢰성지수

β_0 = 목표 신뢰도(파괴확률 $P_f=10^{-3}$)

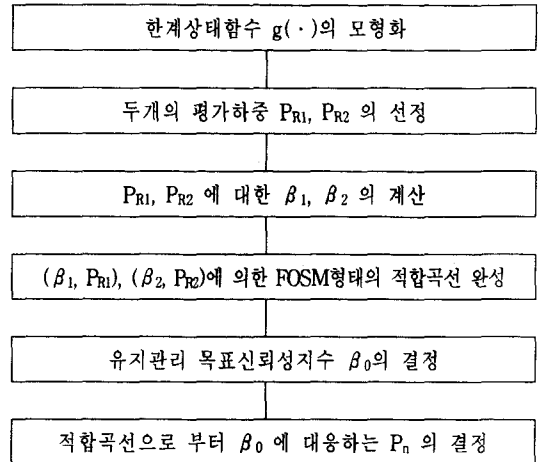


Fig. 4 등가내하력 P_n 의 추정절차

3. 조합상관식에 의한 내하력 평가

3.1 허용응력법 & 하중저항계수법

내하력 평가를 위한 재래식 방법에서는 현 구조물의 상태, 손상이 있는 단면의 손상 정도와 실하중 및 실저항 관련 불확실량의 정도, 측정 응력에 대한 응력비 등을 포함시키지 못하고 있어, 손상된 구조물의 실저항강도와 관련된 손상계수(D_F)와 재하시험에 의한 응답비(K_S)을 포함시킨 방법으로 내하력평가 실시한다.

◎ 개선된 허용응력법(AWSR; Advanced Working Stress Rating)

$$RF = \frac{D_F \sigma_a - (\sigma_d + \sigma_w)}{K_S \sigma_{sh} (i+1)} \quad (7)$$

여기서, RF = 내하율; σ_d = 사하중 응력; σ_a = 재료의 허용응력; σ_w = 풍하중에 의한 응력; σ_{sh} = 선박하중에 대한 설계응력; K_S = 응답비; D_F = 손상계수; i = 충격계수.

◎ 개선된 하중 저항계수법(LRFR; Load and Resistance Factor Rating)

$$RF = \frac{\psi D_F R_n - \gamma_d S_d}{\gamma_{sh} S_{sh} K_s (1 + i)} \quad (8)$$

여기서, K_s = 응답비; D_F = 손상계수; R_n = 공칭저항강도; S_d = 공칭사하중효과; S_{sh} = 공칭상재하중효과; i = 충격계수이며 ψ , γ_d , γ_{sh} 은 저항 및 하중관련 안전모수들로서 신뢰성 이론에 근거하여 현행시방서의 안전수준을 점검한후 공학적 판단하에 구조형식별로 code calibration을 실시하는 값으로 도로교시방서의 극한강도설계법의 하중계수를 참조하여 구하여 왔다.

◎ 충격계수 비고려

본 과업에서와 같은 항만구조물에서는 많은 측정 자료를 토대로 일반적으로 선박의 접안 속도가 느리고 완충장치인 펜더가 설치되어 있으므로 충격의 효과는 무시할수 있는 것으로 판단되어 본 과업의 내하력 평가시 충격 계수는 고려하지 않았다.

3.2 조합 상관식에 의한 WSR 방법

Jacket식 부두는 축방향력과 휨모멘트를 동시에 받고 있는 구조물이므로 위에서와 같은 기준식으로는 정확한 내하력을 평가할 수 없다. 즉 위의 두 방법은 축방향력과 모멘트 각각에 대해 따로 평가되기때문에 두가지의 힘에 대해 복합적인 힘의 거동을 알 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 항만구조물 설계기준에서 제시한 축방향력과 휨모멘트를 동시에 받는 부재의 기준식(항만 구조물 설계기준 2.2.3의 표 2.2의 (2)식)을 기초로 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{K_{sa}\sigma_{csh}R_F + \sigma_{cd} + \sigma_{cw}}{D_{Fc}\sigma_{ca}} + \frac{K_{sb}\sigma_{bshx}R_F + \sigma_{bdx} + \sigma_{bux}}{D_{Fb}\sigma_{bax}} + \frac{K_{sb}\sigma_{bshy}R_F + \sigma_{bdy} + \sigma_{bwy}}{D_{Fb}\sigma_{bay}} = 1 \quad (9)$$

여기서, K_{sa} , K_{sb} = 축력, 휨에 대한 응답비;

R_F = 내하율;

D_{Fc} = 축강성에 대한 손상계수;

D_{Fb} = 휨강성에 대한 손상계수

σ_{csh} , σ_{cd} , σ_{cw} = 선박 충격력, 자중, 풍하중에 의한 축방향응력

σ_{bshx} , σ_{bdx} , σ_{bux} = 선박 충격력, 자중, 풍하중에 의한 x방향 응력

σ_{bshy} , σ_{bdy} , σ_{bwy} = 선박 충격력, 자중, 풍하중에 의한 y방향 응력

σ_{ca} , σ_{bax} , σ_{bay} = 파일의 축응력, x와 y방향 휨응력

위 식을 R_F 대해 정리하면,

$$\left(\frac{K_{sa}\sigma_{csh}}{D_{Fc}\sigma_{ca}} + \frac{K_{sb}\sigma_{bshx}}{D_{Fb}\sigma_{bax}} + \frac{K_{sb}\sigma_{bshy}}{D_{Fb}\sigma_{bay}} \right) R_F + \left(\frac{\sigma_{cd} + \sigma_{cw}}{D_{Fc}\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bdx} + \sigma_{bux}}{D_{Fb}\sigma_{bax}} + \frac{\sigma_{bdy} + \sigma_{bwy}}{D_{Fb}\sigma_{bay}} \right) = 1 \quad (10)$$

위식을 R_F 에 대해 풀면 다음과 같은 일차함수의 내하력 평가식을 구할수 있다.

$$R_F = \frac{1 - \left(\frac{\sigma_{cd} + \sigma_{cw}}{D_{Fc}\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bdx} + \sigma_{bux}}{D_{Fb}\sigma_{bax}} + \frac{\sigma_{bdy} + \sigma_{bwy}}{D_{Fb}\sigma_{bay}} \right)}{\frac{K_{sa}\sigma_{csh}}{D_{Fc}\sigma_{ca}} + \frac{K_{sb}\sigma_{bshx}}{D_{Fb}\sigma_{bax}} + \frac{K_{sb}\sigma_{bshy}}{D_{Fb}\sigma_{bay}}} \quad (11)$$

위식 (11)은 설계기준식에 선박충격력에 대한 실제응력과 해석치와의 비인 실응답비와 노후손상계수를 고려하였다는 점에서 주목할만하며, 이 방법은 축력과 휨을 동시에 받는 항만구조물에 대한 내하력 평가 방법으로서 허용응력법에 의한 조합식을 합리적으로 고려하며 실응답과 노후도를 반영하는 유용한 방법으로 사료된다. 본 연구에서는 위의 조합상관식에 의한 WSR방법에 의해 내하력을 평가하였다.

4. 적 용 예

대상구조물은 280,000 DWT Oil tanker선박의 전용부두로서 상부는 콘크리트블럭, 하부는 Jacket식 강관파일로 총 4개의 Breasting Dolphin, 1개의 Working Platform, 6개의 Mooring Dolphin, 4개의 Support, 1개의 Abutment로 이루어진 대형 항만구조물이다. 내하력평가를 위해 손상변위가 심한 Breasting Dolphin중 하나를 선택하여 선박접안중

격시험에 따른 동적특성치와 파일의 응력과 구조물의 진동으로 인한 가속도를 측정하였다. Fig. 5은 개략적인 대상구조물의 평면도 및 선박접안 모습이다.

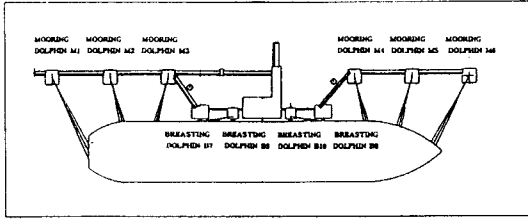


Fig. 5 평면도 및 선박접안 모습

4.1 시험내용 및 시험대상선박의 제원

정확한 내하력평가를 위해 선박 접안 충격 시험을 실시하였으며, 충격시 자켓식 돌핀 부두의 구조물의 수평 변위 가속도와 파일의 응력을 3회에 걸쳐 측정하여, 이중 신뢰성이 있는 측정응답만을 내하력 평가시 사용하였다. 선박접안충격시 대상 선박이 설계 접안 톤수(280,000DWT)보다 작은 경우 임대 및 측정 횟수의 조절이 용이하나, 정확한 구조물 응답비의 계측을 위해 표(2)와 같이 설계접안 톤수를 상회하는 선박길이 335m의 초대형 그리스 선적의 patriot호(DWT 305,369)를 대상으로 하였다.

Table 2 시험대상선박의 중량, 흘수, 접안속도 및 펜더변위

구분	시험대상선	DWT	선박길이	국적	흘수 (m)	접안속도 (cm/sec)	펜더변위 (cm)	
구조물	Breasting Dolphin	Patriot	305,369	335m	그리스	20.5	44	5

4.2 센서 부착위치

동적 거동을 파악하기 위해서 콘크리트 Deck위의 중앙에 가속도계를 설치하였으며 변형률계이지는 선박에 의한 수평 하중 작용시 지배적인 Pile들에 대해서, 해수면에 가깝게 부착하였다. 그리고 가속도는 선박의 접안방향과 같은방향 및 직각방향(X, Y방향)의 가속도를 측정하였다.

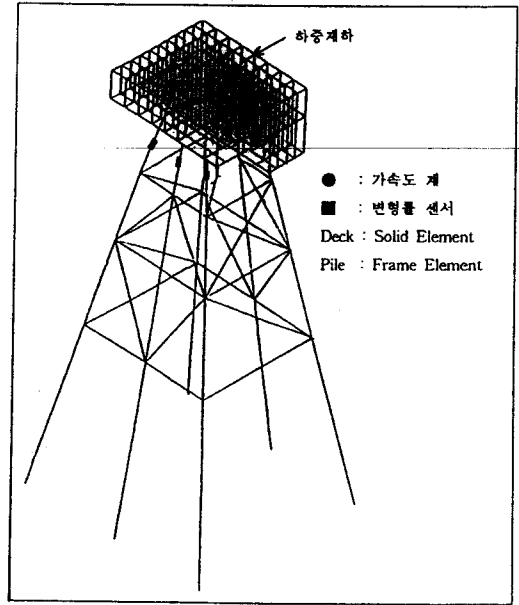


Fig. 6 구조물 Modelling 및 측정위치

5. 구조해석 및 시험결과 분석

5.1 구조해석 모델링

구조해석에 있어서 구조모델링은 매우 중요하므로 해석의 목적과 구조의 역학적인 거동을 고려하여 해석하고자 하는 구조 모델링이 적합한지 아닌지를 충분히 검토하여야 한다. 즉, 어떤 모델을 사용하는가 하는 것은 구하고자 하는 응답 변량과 역학적 거동특성, 그리고 해석목적에 따라 정해야 한다.

본 대상구조물은 상부가 콘크리트 블록이고 하부는 Jacket 구조물로 다소 단순한 구조물인 것 같으나, 3차원 공간에서 거동하기 때문에 단순한 2차원 해석으로는 구조물의 실거동을 분석하기가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 해석모델을 설정하기 위해 파일구조의 경사각을 측정하고, 응력 응답을 비교하여 주기, 진폭, 모우드 형상등의 측정치와 해석치가 잘 근접하는 파일의 3/5지점을 가상고정점으로 하여 고정처리하였으며 상단은 파일과 고정된 구조로 모델링 하였다. 또한 하부 자켓을 보 (frame)요소로, 상부의 콘크리트 Platform은 높이/폭비가 상대적으로 크므로 3차원 8절점 solid요소로 모델링하여, 3-D 유한요소해석을 실시하였다.

사용 프로그램은 범용구조해석 패키지인 SAP90을 이용하여 수행하였다

5.2 측정 응답비

본 연구방법에서의 하중 조합 상관식에 따른 구조물의 내하력 평가를 위해서 현장에서 수차례의 측정응력을 비교 검토한 후의 평균값과 구조해석을 통해 얻어진 응력을 비교해 본 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 측정치와 결과치의 비인 응답비는 여러 하중 CASE들에 대한 해석에서, 현장조사의 여건을 고려하여 구조적인 거동을 파악한 후, 적절하다고 생각되는 대표적인 값들을 취하였다.

해석에 사용된 하중들은 현장에서의 펜더의 변위량을 통한 펜더 특성 곡선을 이용해 구하였으며, 측정 응답은 선박의 접안시 최대 펜더변위 시점에서의 응력을 측정함으로써 얻어진 정적 응답값을 사용하였다.

응답비는 축력과 각 방향(X,Y방향)에 대한 응답비에 대해 각각 조사하였다.

Table 3 측정 응답비

ELEMENT	축력에 대한 응답비	Y방향에 대한 응답비	X방향에 대한 응답비
RIGHT PILE	1.03	0.95	1.23
CENTER PILE	1.11	1.09	0.96
LEFT PILE	2.1	1.11	0.87

5.3 노후손상계수

노후 손상도 추정은 노후화된 구조물의 동적재하 또는 충격시험의 측정결과에 바탕을 두며 이때 구조 요소별 손상 강성도의 추정과 요소 손상계수의 추정은 최근에 발전된 구조 시스템의 동적 추정 기법인 SI(System Identification) 기법등이 제안되어 있으나 단순한 구조에만 적용이 가능하며 실제 복잡한 구조에는 적용이 매우어려워 아직은 실용화가 되지 못하고 있으며 단일부재로된 구조나 단일 부재적 거동이 구조물을 지배하는 경우에는 식(12)을 이용하여 거의 정확하게 실강성의 감소정도를 나타내는 계수를 사용하여 손상계수를 추정할 수 있다. 따라서 실용적인 노후손상도 추정방법으로는 FFT 주파수 분석기법에 의해서 손상계수를 추정할 수 있으며, 측정 가속도 응답파에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 주파수 분석방법에

의하면 쉽게 노후 구조물의 기본 고유진동수를 구할 수 있으므로 강성도가 고유진동수의 자승에 비례한다는 점에 유의하여 다음과 같은 식으로 손상계수를 구하였다.

$$D_{Fb} = \frac{K_D}{K_I} \approx \frac{\omega_D^2}{\omega_I^2} \quad (12)$$

여기서, K_D : 손상부재의 강성도

K_I : 원래 무손상부재의 강성도

ω_D : 손상부재의 기본 고유진동수

ω_I : 원래 무손상부재의 기본 고유진동수

실제로 동적 재하 시험 결과로부터 시간 영역에서의 동적변위기록이 가용한 경우에는 여진 부분의 감쇄파의 주기수와 시간의 계산으로 현재 손상된 구조물의 고유진동수 ω_D 를 근사적으로 추정할 수 있다. 그리고, 이러한 접근 방법이 신뢰도를 갖기 위해서는 구조물이 건조된 직후에 구조물의 진전도 시험이나 Proof Loading Test등에 의해 실구조물의 초기 고유진동수 ω_I 를 측정하여야 한다. 그렇지 않을 경우에는 이론적 고유진동 해석에 의해 ω_I 를 구할 수 밖에 없으며, 설계도면조차 없는 공용년수가 오래된 구조물의 경우 기하구조의 실측에 의하여 해석하는 방법이 적절하리라 사료된다.

한편, 측강성의 노후손상도를 식(12)의 결과를 그대로 측강성의 노후손상도로 사용할 경우 측강성이 과소하게 평가되는 경우가 있어 본 논문에서는 식(12)를 휨강성의 노후손상도로 적용하고 측강성의 노후손상도는 실제로 강재의 비파괴시험을 통해 구한 부식두께를 통계적으로 분석하여 부식 단면을 고려한 유효 단면적과 설계 단면적과의 비를 통해 구하였다.

$$D_{Fc} = \frac{A_D}{A_I} \quad (13)$$

여기서, A_D = 손상 부재의 유효 단면적
 A_I = 무손상 부재의 단면적

고유진동 해석 결과, 1차 모드는 수평 변위 형상으로, 2차 모드는 회전 변위 형상을 나타낸다.(Fig. 7, 8) 본 연구에서는, 선박의 접안에 따른 수평 변위에 대해 평가하므로 1차 모드 형상을 나타내는 Natural Frequency을 채택하여 노후 손상도 계수를 구하였다.

6. 내하력평가 결과

6.1 신뢰성에 기초한 등가 내하력 평가

전술한 방법과 절차(Fig. 4 참조)에 따라 휨모멘트와 축력에 대해 각각 산출한 다음 두개의 평가하중 P_{R1} , P_{R2} 와 그에 따른 신뢰성 지수 β_1 , β_2 를 구한 다음 $P_n - \beta$ Curve를 통해 공용 내하력을 구하고 내하률을 산정하면 다음과 같은 Table 5를 얻을 수 있다.

Table 5 신뢰성 방법에 의한 내하력 평가

	Left Pile	Center Pile	Right Pile
공용내하력	240.5 t	221.0 t	253.5 t
설계내하력	130.0 t	130.0 t	130.0 t
내하율(RF)	1.85	1.70	1.95

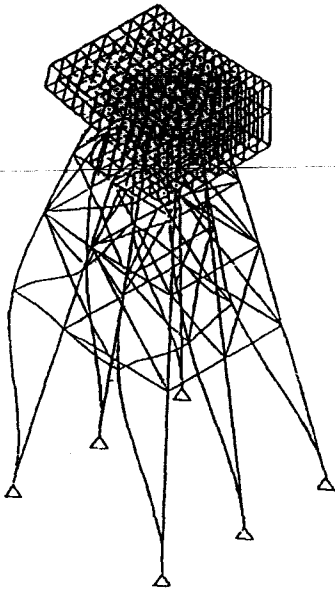


Fig. 7 1 차 모드 형상

6.2 조합 상관식에 의한 구조물의 내하력 평가

본 구조물은 휨모멘트와 축력이 동시에 작용하는 구조물로서 각각의 하중에 대해 평가하는 기존의 방법으론 정확한 구조물의 내하력을 평가할 수 없다. 따라서, 본 방법에 의해 축력 및 X, Y방향에 대한 응답비와 각 하중에 따른 노후 손상도를 추정하여 복합거동에 대한 내하력을 식(11)에 의하여 평가할 수 있었다.

Table 6 조합상관식에 의한 내하력 평가

R F	Left Pile	Center Pile	Right Pile
(내하율)	1.86	1.87	2.01

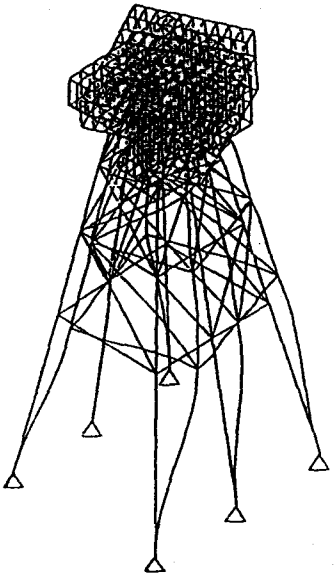


Fig. 8 2 차 모드 형상

Table 4 노후손상계수

파일의 휨강성에 대한 손상계수 (x,y방향)	손상부재의 기본 고유 진동수(W_D)	원래 무손상 부재의 기본 고유 진동수(W_I)	손상 계수
	0.810	0.843	0.923
파일의 축강성에 대한 손상계수	손상부재의 유효 단면적(cm^2)	무손상 부재의 유효 단면적(cm^2)	손상 계수
	976	1009	0.967

(부식두께 : 1.014 mm)

6.3 내하력 평가결과의 고찰

신뢰성에 기초한 등가내하력 평가결과와 조합상관식에 기초한 WSR방법의 내하력 평가결과를 비교하여보면 내하율이 유사한 추세로 나타남을 알 수 있어 내하력 평가시 공히 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 조합상관식에 기초한 WSR방법이 신뢰성 방법보다 내하율이 크다는 것을 알 수

있는데 이는 신뢰성 해석에서는 저항 및 하중관련 불확실량을 고려하고 있는 반면 조합상관식에 의한 방법은 이러한 불확실량을 확정량으로 보는데 그 원인이 있는것으로 판단된다. 따라서 신뢰성에 기초한 등가내하력 평가방법이 항만구조물의 하중, 저항효과의 불확실량을 고려하기 때문에 내하력 평가방법으로서 보다 합리적인 방법이라고 사료되며, 항만구조물의 실질적인 내하력 평가에 있어서 노후손상도와 응답비의 정확한 산정이 매우 중요함을 알 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에는 선박의 접안력으로 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 Jacket식 Dolphin구조물의 거동을 정확히 분석하여 내하력을 평가하는 기법을 제시하였으며 실제 Jacket식 Dolphin부두에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 신뢰성 해석에 의한 등가 내하력 산정 방법은 신뢰성 해석을 통해 축력과 휨모멘트에 따른 파괴 확률과 Safety Factor (β)를 각각 구한 다음 $P_n - \beta$ Curve를 통해 공용 내하력을 산정하는 방식으로 축력과 휨모멘트에 의한 거동을 고려할 수 있었으며, 저항 및 하중관련 불확실량을 합리적으로 고려할 수 있어 합리적인 방법으로 판단된다.

(2) 조합 상관식에 의한 내하력 평가방법은 축력과 휨모멘트를 동시에 고려할 수 있는 조합 상관식을 유도하고 각각의 응답축정치와 각각의 거동에 따른 노후손상도를 구함으로서 각 방향의 거동을 고려할 수 있어 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 본 대상구조물에 유용하게 적용할 수 있는 방법이라 판단된다.

(3) 실제적인 내하력 및 안전성을 평가하기 위해서는 좀더 실질적이고 정확한 실용담비 및 노후손상계수 추정방법에 대한 연구가 진행되어야 할것으로 판단된다.

(4) 접안시설물의 신뢰성 및 내하력 평가를 위해서는 선박충격력과 방충재 반력과 같은 하중관련

정확한 불확실량이 필요하나 현재 이부분에 대한 연구가 미흡하므로 보다 합리적인 불확실량을 구하기 위해서는 차후 이부분에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

8. 참 고 문 헌

1. 해운항만청, "항만시설물 설계기준서", 해운항만청, 1993.12
2. 日本鋼構造 設計指針(1993)
3. Ellingwood, B., Galambos, T.V., Macgregor, J.C. and Comell, C.A : Development of A Probability-Based Load Criterion For The American National Standard A58, National Bureau of Standard SP-577, Washington D.C., June, 1980
4. Shin, J. C., Cho, H. N. and Chang, D. L.(1989), "A Practical Reliability-Based Capacity Raing of Existing Road Bridges," Jour. of Structural Eng., JSCE, Vol5, pp.245-254., 1989
5. Cho, H. N. and Ang, A. H-S.(1989). "Reliability Assessment and Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges," 5th International Conference on Structural Safety and Reliability(ICOSSAR '89), pp. 2235-2238. San Francisco, Calif., USA.
6. Cho, H. N., Lee, S. J. and Lim, J. K.(1993). "System reliability and capacity-rating of R.C box-girder highway bridges." EASEC 4, The 4th East-Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Seoul, Korea, Sep. 20-22, pp. 2033~2038
7. Ueda, Shigeru, "Study on Berthing Impact Force of very large crude oil carriers", Report of the port and harbour research institute, Vol. 20, No. 2, June,1981
8. Tominaga, M., Kenmochi, S. and Kimura, T. and Okumura, I., "Innovative Technology

- Utilized for industrial berth construction", Jour. of JSCE, VI-7, Vol, 385, Oct, 1987.
9. Rackwitz, R. and Fiessler, B., "Structural reliability under combined random load sequences," Computers & Structures, Vol. 99, PP. 541-553, 1973.
 10. Ang, A.H-S. and Tang. W. H.(1984). "Probability concepts in engineering planning and design - vol.II; decision, risk and reliability." John Wiley & Sons Inc.
 11. 한양대학교, "쌍용정유 기준 부두 안전진단 용역 보고서", 1995. 5.