

## 저온해역에서의 해양구조물에 대한 구조신뢰성 해석

이 주 성\*  
(97년 5월 12일 접수)

### Structural Reliability Analysis of Offshore Structure at Cold Region

Joo-Sung Lee\*

**Key Words** : Structural Safety (구조적 안전성), Reliability Analysis (신뢰성 해석), Extended Incremental Load Method (확대하중증분법), Tension Leg Platform (TLP), Cold Region (저온해역), Reliability Index (신뢰성 지수), Failure Probability (파괴확률), Allowable Safety level (허용안전성 수준)

#### Abstract

In this study an adequate type of offshore structure at the Sakhalin region as cold region is proposed and its structural design results are presented based on the reliability analysis. Structural safety assessment has been carried out for the proposed offshore structure at the Sakhalin area as designed by the reliability method. And a rational design procedure is presented based on the reliability analysis.

Followings are drawn through the present study :

- Four colum TLP structure is proposed as an adequate offshore structure type at the cold region like the Sakhalin region and the reliability-based structural design results are presented. It is seen that the proposed type is a more adequate and economic than the fixed type.
- Safety assessment of the proposed structure applying the extended incremental load method is performed.
- Referring the allowable safety level for offshore structures it has been found that the present TLP structure has sufficient structural safety at the system level as well as at the component level.

\* 정희원, 울산대학교 조선해양공학부 교수

## 1. 서론

최근, 극지를 포함한 저온해역에서의 해양자원 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 논문은 저온해역에 설치할 해양구조물의 구조설계에 신뢰성 해석법을 적용한 연구이다. 잘 알려진 바와 같이 구조설계에 신뢰성 해석법을 적용하게 되면 설계변수들에 필연적으로 내포된 불확실성 특성을 보다 합리적으로 고려할 수 있기 때문에 안전성 평가 결과에 높은 신뢰도를 부여할 수 있고 또한 그 결과에 기초한 구조설계는 구조적 안전성이 구조물 전체에 걸쳐서 균일하게 분포하게 되어 안전계수의 개념에 기초한 종래의 설계결과보다 합리적인 결과를 기대할 수 있다. 특히 설계경험이 없는 새로운 구조물의 구조설계에 신뢰성 해석법은 대단히 유용한 방법으로 활용되어왔다<sup>1,2)</sup>.

본 논문에서는 대상 저온해역으로서 풍부한 해저자원이 매장되어 있는 것으로 알려진 사할린해역을 선정하였고, 우선 이 해역의 설계환경을 고려해서 해양구조물의 적합 형태를 선택하기 위한 기준을 기술하였다. 이 해역에서 적합한 해양구조물의 형태로서 Jacket 형 구조물을 변형한 Fig. 1과 같은 고정식 해양구조물을 제안한 바 있는데<sup>3)</sup>, 본 논문에서는 구조강도나 경제적 측면에서 보다 유리할 것으로 보이는 TLP구조를 적합한 형태로 제안하였고 그 배경에 대해 자세히 언급하였다. 대상 구조물의 전체적인 크기는 참고문헌 [3]의 결과를 참고하여 결정하였고, 주요 구조부재의 설계를 설계규정에 의거하여 수행한 후, 신뢰성 해석에 기초한 최적화 과정<sup>4)</sup>을 거쳐서 이들의 구체적인 치수를 결정하였다. 이어서 확대하중 증분법 (extended incremental load method)<sup>5)</sup>을 적용하여 구조적 안전성 평가를 수행하였다.

여기에서 제안한 TLP 구조는 사할린해역의 설계환경을 고려할때 적합한 해양구조물 형태 중 하나로서 생각되며, 또한 이에 대한 구조부재와 구조시스템의 신뢰성 해석으로 부터 그 구조설계 결과는 허용수준 이상의 구조적 안전성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 여기에서 제시하는 TLP 구조에 대한 설계결과는 실제 설계단

계에서 유용한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. 저온해역에서 적합한 해양구조물 형태와 구조설계

### 2.1 해양구조물의 적합 형태

대상 저온해역으로 선정된 사할린 해역에서 해양구조물의 설계환경조건은 Table 1과 같다. 보는 바와같이 이 해역에서의 수심은 비교적 얇은 해역에 속하나, 동절기에는 기온이 영하 40~45°C 가 되는 낮은 온도, 하절기와 동절기 사이의 격심한 온도 차이, 동절기의 낮은 온도 그리고 빙하, 보급선 및 쇄빙선과의 충돌 가능성 등을 감안해서 구조물의 형태를 선정해야 한다. 이를 위해 중요하게 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- 수심이 100~150 m로서 비교적 얇은 해역
- 하절기와 동절기 사이의 격심한 기온 차이, 약 60~70°C
- 동절기에 낮은 기온으로 구조물과 구조물 주위에 얼음이 형성 되고, 구조물이 빙하, 쇄빙선 등과의 충돌 가능성
- 동절기에 낮은 기온으로 구조재료의 물성특성의 변화, 즉 취성화

위의 사항을 종합해 보면 수면을 통과하는 부재와 돌출구조의 수가 가능한 적어야 한다는 점과 함께 충분한 구조강도를 갖는 형태라야 한다는 점이 우선적인 선택 기준이다. 왜냐하면 수면을 통과하는 부재가 많으면 많을 수록 빙하, 쇄빙선과의 충돌 가능성이 높아져서 충돌로 인한 구조부재의 국부적 손상이 구조부재의 강도저하를 초래하고 이는 구조시스템의 강도를 저하에 적지 않은 영향을 주기 때문이다. 한편 동절기에 구조물과 돌출구조에 얼음이 형성되어 빙하중이 증가되고 이로 인한 구조강도의 안전여유 (safety margin) 의 저하가 예상되기 때문에 돌출구조의 수가 적은 구조형태로 설계해야 한다.

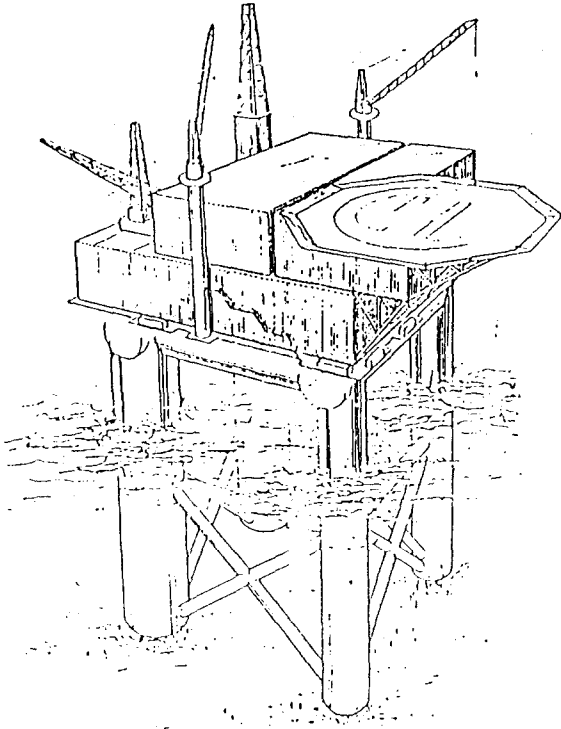


Fig. 1 Offshore Platform in the Sakhalin Area Proposed in Reference [3]

Table 1 Design Environmental Conditions in Sakhalin Area

water depth	100~150 m
design wave : wave height	12.0m
wave period	8~10 sec
current : current speed	2.0 m/sec
temperature	+12~-2°C
wind speed	40.0 m/sec
air temperature range	+25~-45°C
design temperature	-30~-45°C

현재까지 해양구조물은 수심에 따라 다양한 형태가 개발되어 있는데, 사할린 해역은 수심이 비교적 얕다는 점을 고려한다면, 고정식 해양구조물이 다른 형태 보다 우선적으로 생각할 수 있는 구조형태이다. 그러나 일반적인 형태의 Jacket 형 구조물은 Column과 Brace 등 수면을 통과하는 부재의 수가 많으므로 적합한 형태로 보이지 않고, 이를

변형한 Fig. 1과 같은 형태가 적합할 것으로 보인다<sup>3)</sup>. Fig. 1에 보인 Four Legged Jacket Platform은 4개의 Column이 주된 구조부재인데, 필요한 장치들을 Column들 안에 설치함으로써 수면을 통과하는 부재가 가능한 적도록 설계한 것이다. Column들은 구조강도를 향상시키기 위해 X-Type Brace들로 보강되어 있고 빙하, 보급선 등과의 충돌, 쇄빙작업시 구조부재에 가해지는 불리한 하중의 기회를 가능한 감소시키기 위해 수면에서 상당한 거리가 떨어진 위치에 배치시켰다.

한편 부유식 형태로서 생각할 수 있는 것이 반잠수식 해양구조물과 TLP를 들 수 있다. 이 중에서 반잠수식 해양구조물은 대개 6~8개의 Column과 이들을 보강해 주는 다수의 Brace들이 있고 또한 구조물을 고정시키는 Anchor Line이 최소 4개조가 있어야 하므로, 이로인한 빙하중의 증가를 고려하면 초기건조비가 높아지고 보수, 유지면에서 불리한 점 등 경제성이 상대적으로 낮을 것으로 보이며, 이 형태 역시 저온해역에서는 적합한 것으로 생각되지 않는다. 한편, TLP는 과부력 상태 (over buoyancy state)에 놓여 있어서 우선 운동특성이 우수하기 때문에 해상상태를 갖는 해역이나 심해에 적용하기에 적합한 형태인데 Tendon의 재료를 취성파괴에 강한 것으로 선택하면 실제로 수면을 통과하는 부재의 수가 4~6개 정도로 적기 때문에 저온해역에서도 적합한 구조형태로 생각된다.

이상의 검토결과에 의하면 사할린 해역과 같이 저온이고 거친 해상상태를 갖는 해역에서 적합한 해양구조물의 형태는 고정식으로서 Fig. 1에 보인 Four Legged Jacket Platform과 TLP로 귀착될 수 있겠다. 이 두 형태 중에서 구조 중량면에서는 TLP가 수면 하부에 위치한 구조로서 해저에 연결된 Tendon만이 있으므로 Four Legged Jacket Platform 보다 유리할 것으로 보인다. 따라서 고정식 해양구조물의 형태인 Fig. 1의 Four Legged Jacket Platform도 좋은 후보이겠지만, 이보다는 TLP 형태가 더 유리할 것으로 판단된다.

## 2.2 구조설계

여기에서 제안하는 TLP 구조는 Body Plan이 Fig. 2에 보인 것처럼 정사각형이고 이의 측면도를

Fig. 3에 보였다. 이 TLP 구조는 4개의 실린더형 Column을 갖고 있으며 각 Column은 Rectangular Box Girder형 Pontoon으로 연결되어 있어서 우수한 구조강도를 갖는다<sup>3)</sup>. Fig. 1에 보인 참고문헌 [3]에서 고정식 해양구조물과 여기에서 제안하는 TLP 사이에 우월성을 비교하는 것은 쉽지 않으나 다음과 같은 점에서 TLP가 더 적합한 형태로 생각된다.

- TLP는 심해에서 적합한 해양구조물의 형태로 개발된 것이지만, 수심이 비교적 얇고 거친 해상 상태에서 대단히 동적응답특성이 고정식에 비해 우수하다.
- 저온해역에서 요구하는 수면을 통과하는 부재의 수를 최소화 할 수 있다.
- 구조물의 형태가 비교적 간단하지만, Main Structure의 강도 측면에서 TLP의 Production Deck는 Web Frame과 Girder로 강력하게 보강되어 있는 Grillage 구조여서 거의 강체로 간주할 수 있고, 이에 Column이 직접 연결되어 있기 때문에 구조강도가 우수하다.
- Sea Bed와 연결되는 부재는 3 - 4개의 Pipe Line이 한조인 Tendon이어서 부재의 숫자면에서는 고정식 해양구조물에 비해 많지만, Table 1에서 볼 수 있듯이 조류의 온도가 -12~-2°C 이므로 Tendon에 결빙현상과 이로 인한 하중의 증가는 무시할 수 있다.
- 조류의 속도가 2.0 m/sec로서 이로 인한 준정적하중을 구조설계시 고려해야 하는데, 고정식 해양구조물에 비해 투영면적이 적으므로 따라서 조류에 의한 하중이 상대적으로 작다.

본 논문의 TLP 구조의 전체적인 크기는 참고문헌 [3]을 참고해서 결정하였고, 주요 특성치들을 Table 2에 열거하였다. 구조설계를 위한 설계하중은 극치를 포함한 저온해역에서의 해양구조물 설계를 위한 설계규정인 참고문헌 [6]에 따라 결정하였다. 주요 구조부재로서 Column은 높은 압축하중과 외압에 효율적으로 저항할 수 있도록 원환과 종보강재로 보강된 실린더 (ring-and stringer-stiffened cylinder)로 설계하였고<sup>7)</sup>, Pontoon은 중늑골방식인 Rectangular Box Girder로 설계하였다. 구조부재의 설계는 신뢰성해석에 의거하여

TLP Rule Case Committee에서 제안한 설계규정<sup>8)</sup>과 신뢰성해석에 기초한 최적구조설계과정<sup>4)</sup>을 적용하여 수행하였다. 구조부재의 설계 결과를 Table 3에 정리하였다. 구조재료는 항복응력이  $\sigma_y = 392$  MPa인 고장력강으로 하였다.

본 TLP의 각 Column을 연결하는 Pontoon은 전체 배수량의 약 37.5%를 부담하고 있고, Table 1에서 보듯이 설계파의 파고가 12.0 m 이기 때문에 Supply Vessel의 접근시 Pontoon에 구조적 손상이 없도록 이의 Deck에서 설계 수선면까지의 거리를 12 m로 하여 충분한 여유를 갖도록 배치하였다.

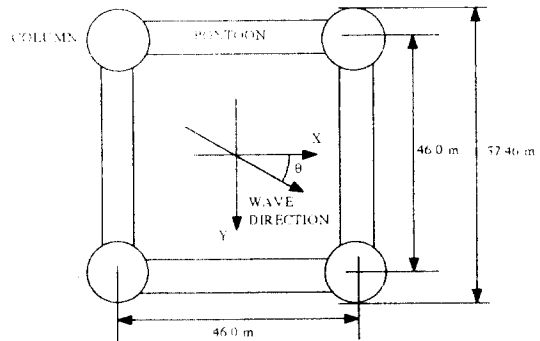


Fig. 2 Body Plan of the Present Four Column TLP at W.L.

Table 2 Principal Characteristics of the Present TLP

Water Depth	:	120.0 m
Distance between Column Centre	:	46.0 m
Height	keel to bottom of deck	: 36.0 m
	main deck to weather deck	: 7.5 m
Design Draft	:	20.0 m at L.A.T.
Column	no. of columns	: 4
	diameter of column	: 11.46 m
Pontoon	height x width	: 6.95 x 5.16 m
	corner radius	: 1.5 m
Weight	TLP structural weight	: 9, 588 tons
	tendon weight	: 246 tons
Initial Tension	riser	: 528 tons
	tendon at L.A.T.	: 3, 175 tons
Displacement at L.A.T.	:	13, 537 tons

### 3. 구조신뢰성 해석

#### 3.1 구조부재의 강도모델

Column을 구성하는 원환과 종보강재로 보강된 실린더는 Fig. 4에 보인 것처럼 일반적으로 압축하중과 횡압력이 동시에 작용하는 조합하중상태 하에 놓이게 되는데, 그 최종강도는 식(1)로 주어지는 상호작용관계식 (interaction equation)으로 부터 추정한다<sup>7,8)</sup>.

$$\left[ \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta u}} \right]^m + \left[ \frac{\sigma_x}{\sigma_{xu}} \right]^n = 1.0 \quad (1)$$

여기에서  $\sigma_x$ 와  $\sigma_{\theta}$ 는 작용하는 압축응력과 횡압력에 의한 원환응력이고,  $\sigma_{xu}$ 와  $\sigma_{\theta u}$ 는 각각 최종압축강도와 원환응력이다. 압축응력  $\sigma_x$ 는 압축하중, 압력과 굽힘모멘트에 의한 효과를 모두 고려해서 계산하며, 식(1)에서  $m = 2, n = 1$ 의 값을 사용한다.

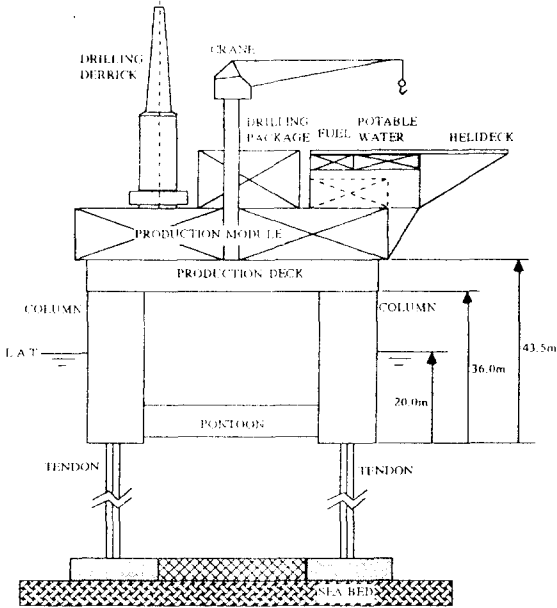


Fig. 3 Side Plan of the Present Four Column TLP

Table 4 Design Results of Principal Structural Members

structural member	scantling (mm)
Column	above WL : no. of stringers = 40
	thickness of shell = 16.0
	stringers = 200 x 11.0 + 150 x 15.0 (T)
	ring frame space = 1,800
	ring frame = 340 x 18.0 + 180 x 20.0 (T)
	below WL : no. of stringers = 40
	thickness of shell = 20.0
	stringers = 240 x 12.0 + 150 x 15.0 (T)
Pontoon	ring frame space = 1,800
	ring frame = 420 x 20.0 + 200 x 24.0 (T)
	bottom : plate thickness = 24.0
	trans. frame space = 700.0
	longitudinal = 340 x 12.0 + 120 x 20.0 (T)
	side shell : plate thickness = 22.0
	trans. frame space = 700.0
	longitudinal = 320 x 11.5 + 120 x 20.0 (T)
deck : plate thickness = 20.0	trans. frame space = 700.0
	longitudinal = 300 x 10.0 + 120 x 20.0 (T)

Pontoon은 Fig. 5에 보인 Rectangular Box Girder 형태를 갖고 압축하중과 2축 굽힘 모멘트를 동시에 받을때 최종강도는 Beam-Column Approach로 부터 도출한 아래의 상호작용관계식(2)를 이용하여 추정할 수 있다<sup>5)</sup>.

$$\frac{F_x}{F_{xu}} + \left[ \left( \frac{M_y}{M_{yu}} \right)^{1.8} + \left( \frac{M_z}{M_{zu}} \right)^{1.8} \right]^2 = 1.0 \quad (2)$$

여기에서  $F_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  는 각각 압축하중과 2축 굽힘 모멘트이고, 하첨자 "u" 는 이들의 최종강도이다. 2축 굽힘 모멘트만이 작용하는 경우에는 다음의 식(3)를 이용한다.

$$\left[ \frac{M_z}{M_{zu}} \right]^2 + \left[ \frac{M_y}{M_{yu}} \right]^2 = 1.0 \quad (3)$$

이상의 강도모델에서 최종강도를 구하는 공식은 참고문헌 [5], [7], [8] 등을 참고하기 바란다.

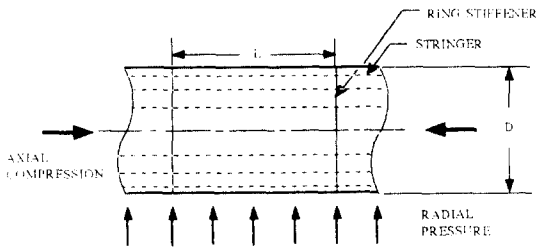


Fig. 4 Ring- and stringer stiffened cylinder

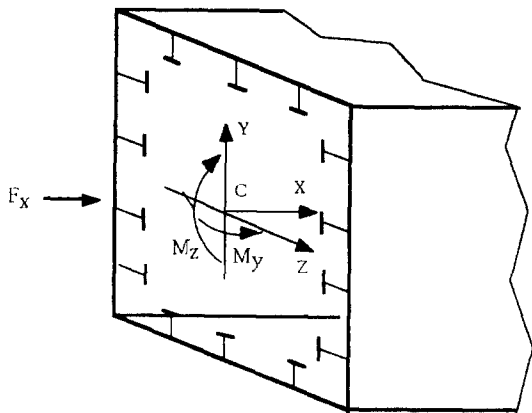


Fig. 5 Rectangular box girder

### 3.2 신뢰성해석 결과

본 연구의 TLP Model (Fig. 2와 Fig. 3 참조)의 구조해석을 위해 Fig. 6과 같이 Space Frame으로 모델링하였다. Production Deck는 Web Frame과 Girder로 강력하게 보강되어 있으므로 Rigid Beam Element로 모델링하였다. 보 요소의 양 절점을 Component로 간주하고 파괴는 소성힌지가 형성될 때 파괴된다고 가정하였다. 구조시스템이 붕괴에 이르는 파괴모드 (failure mode)의 수는 비록 간단한 경우라 하더라도 상당히 많고, 특히 TLP와 같은 연속 구조시스템 (continuous structural system)의 경우 이를 모두 구하는 것은 거의 불가능하다. 간단한 형태의 구조시스템에 대한 신뢰성 해석에 관한 연구에 의하면<sup>5,9)</sup> 구조시스템의 파괴 확률의 범위 (bound of failure probability) 또는 신뢰성 지수의 범위 (bound of system reliability index)는 수 많은 가능한 파괴모드 중 발생확률이 상대적으로 큰 몇개의 파괴모드에 의해 결정될 수 있다. 구조시스템의 파괴는 이론적으로는 전체구조의 강성행렬의 Determinant (determinant of stiffness matrix)가 영 (zero)일때 발생한다. 그러나 TLP와 같은 연속 구조시스템에서 이를 적용하는 것은 의미가 없으므로 Component의 파괴가 진전됨에 따라 구조시스템의 강성행렬의 Determinant가 초기상태의 값 보다 상당히 작을때를 구조시스템의 파괴상태로 간주하였다. 즉,

$$\frac{\det[K_j]}{\det[K_0]} \leq \epsilon \quad (4)$$

일때를 구조시스템의 파괴상태로 보았다. 여기에서  $\det[K_j]$ 와  $\det[K_0]$ 는 각각 j번째 Component가 파괴 되었을때의 강성행렬과 초기상태에서 강성행렬의 Determinant 값이고,  $\epsilon$ 은 작은 수로서  $\epsilon = 10^{-10}$ 으로 설정하였다.

구조시스템의 신뢰성 해석법으로서 확대하중중분법을 적용하였다<sup>5)</sup>. 이 방법은 구조부재의 설계에 적용하는 강도모델들을 신뢰성해석과 시스템의 강도를 추정하는데 직접 이용할 수 있기 때문에 다른 방법 보다 더 실질적이라는 잇점이 있다<sup>5)</sup>. 신뢰성 해석은 Table 1에 보인 파고가 12.0 m이고, 추기는

9.0 sec.인 설계파의 입사각,  $\theta$  가  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  인 세 경우에 대해 수행하였다. 변수들의 불확실성 모델로서 확률분포 및 COV와 상관계수 (correlation coefficient),  $r$  는 Table 4와 같다.

본 TLP 구조에 대한 시스템 신뢰성해석에 확대 하중증분법을 적용한 결과로서 시스템의 파괴확률에 큰 영향을 주는 중요한 파괴모드 (important failure mode)가 각 입사각에 대해 4개씩 구해졌다. 또한 각 파괴모드에 대한 신뢰성 지수,  $\beta_{\text{path}}$  와 파괴확률,  $(P_f)_{\text{path}}$  을 파의 입사각별로 Tables 5-7에 시스템 신뢰성지수 및 파괴확률의 범위와 함께 정리하였다. Tables 5-7에서 Failed Component는 시스템의 파괴에 이룰때 이에 포함되는 Component의 번호로서 (Fig. 6 참고) 이를 순서대로 나열한 것이다. 결과에서 보듯이 중요한 파괴모드에 포함되는 Component의 번호는 마지막 것을 제외하고 모두 동일한 위치에서 그리고 동일한 순서이고 신뢰성 지수 (또는 파괴확률)에 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 본 TLP 구조의 형상은 정사각형이지만 입사각이  $0^\circ$ 일때와  $90^\circ$ 일때 파괴모드에 포함된 Component의 위치는 거의 동일한데  $\beta_{\text{path}}$  및  $(P_f)_{\text{path}}$  에 차이가 있는 것은 조류와 바람에 의한 준정적하중 (quasi-static load)의 작용방향이 다르기 때문이다. Table 5-7에 정리한 파괴모드에 포함되는 Component의 위치를 파의 입사각별로 Figs.7-9에 표현하였다. Fig. 10은 Fig. 11에 보인 각 단면에서의 파괴상태에 대한 예로서 입사각,  $\theta$

=  $0^\circ$ 인 경우에 대한 것이다.

이상의 시스템 신뢰성해석 결과를 Table 8에 정리하였다. 파의 입사각 세 경우에 대해 동일한 발생확률을 부여했을때 본 TLP 구조의 시스템 신뢰성 지수는 Table 8에서 보는 바와같이  $\beta_{\text{sys}} = 5.53$ 이고, 이에 대응되는 파괴확률은  $(P_f)_{\text{sys}} = 0.161 \times 10^{-7}$  이다. 한편 처음으로 파괴되는 Component의 번호는 각 입사각에 대해서 48, 40, 64로서 모두 Production Deck 근처에 위치한 Component 들이고 (Fig. 6 참고), 이들의 파괴확률 및 신뢰성 지수를 Table 9에 보였다. 일반적으로 Component의 신뢰성해석 결과만을 볼때 처음 파괴되는 Component의 신뢰성 지수가 다른 Component의 신뢰성 지수 보다 낮는데 (파괴확률은 반대로 높고), 부유식 해양구조물에서 구조부재의 허용 신뢰성 지수 (allowable reliability index) 가 3.0 (파괴확률은  $P_f = 0.135 \times 10^{-3}$ ) 정도임을 감안한다면 8), 본 TLP 구조를 구성하는 구조부재는 허용 수준 이상의 안전성을 갖는다고 말할 수 있다. 한편 부유식 해양구조물에 대해 구조시스템의 신뢰성 해석에 의하면 허용 신뢰성 지수를 약 5.0 정도 (파괴확률은  $P_f = 0.287 \times 10^{-6}$ )로 설정하고 있는데 10) 본 연구의 결과에 의하면 본 TLP 구조는 구조부재 측면에서 뿐만 아니라 구조 시스템 측면에서도 충분한 구조적 안전성을 갖고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Uncertainty Modelling for Reliability Analysis

variable	mean	COV	distribution type
strength modelling parameter	1.0	0.12	log-normal
load variable			
- static component	design load value	0.10	normal
- quasi-static component	design load value	0.20	log-normal
- dynamic component	design load value	0.25	log-normal
correlation coefficient, $r$			
- for strength variables = 1.0 between the components in the same member 0.0 between the components in the different member			
- for load variables = 0.0 between all load variables			

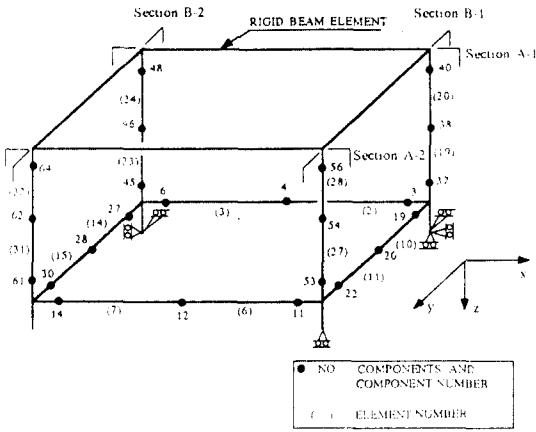


Fig. 6 Space Frame Modelling of the Present TLP Model

Table 5 Identified Important Failure Modes for  $\theta = 0^\circ$

mode no.	failed components	$\beta_{path} [(P_f)_{path}]$
Mode-1	48-46-45-61-53-37-3-64-56	5.42 $[0.298 \times 10^{-7}]$
Mode-2	48-46-45-61-53-37-3-64-11	5.43 $[0.282 \times 10^{-7}]$
Mode-3	48-46-45-61-53-37-3-64-19	5.61 $[0.101 \times 10^{-7}]$
Mode-4	48-46-45-61-53-37-3-64-22	5.63 $[0.904 \times 10^{-8}]$
bounds of $\beta_{sys}$ and $(P_f)_{sys}$ :		
$\beta_{sys,lower}$ and $\beta_{sys,upper}$ = 5.42 and 5.44		
$(P_f)_{sys,upper}$ and $(P_f)_{sys,lower}$ = $0.298 \times 10^{-7}$ and $0.267 \times 10^{-7}$		

Table 6 Identified Important Failure Modes for  $\theta = 45^\circ$

mode no.	failed components	$\beta_{path} [(P_f)_{path}]$
Mode-1	40-48-37-38-61-45-53-56-3	5.71 $[0.566 \times 10^{-8}]$
Mode-2	40-48-37-38-61-45-53-56-46	5.73 $[0.504 \times 10^{-8}]$
Mode-3	40-48-37-38-61-45-53-56-19	5.96 $[0.127 \times 10^{-8}]$
Mode-4	40-48-37-38-61-45-53-56-54	6.01 $[0.931 \times 10^{-9}]$
bounds of $\beta_{sys}$ and $(P_f)_{sys}$ :		
$\beta_{sys,lower}$ and $\beta_{sys,upper}$ = 5.71 and 5.75		
$(P_f)_{sys,upper}$ and $(P_f)_{sys,lower}$ = $0.566 \times 10^{-8}$ and $0.448 \times 10^{-8}$		

Table 7 Identified Important Failure Modes for  $\theta = 90^\circ$

mode no.	failed components	$\beta_{path} [(P_f)_{path}]$
Mode-1	64-61-62-37-53-19-45-30-56-553	5.53 $[0.161 \times 10^{-7}]$
Mode-2	64-61-62-37-53-19-45-30-40-554	5.54 $[0.152 \times 10^{-7}]$
Mode-3	64-61-62-37-53-19-45-30-48-572	5.72 $[0.534 \times 10^{-8}]$
Mode-4	64-61-62-37-53-19-45-30-27-575	5.75 $[0.448 \times 10^{-8}]$
bounds of $\beta_{sys}$ and $(P_f)_{sys}$ :		
$\beta_{sys,lower}$ and $\beta_{sys,upper}$ = 5.53 and 5.56		
$(P_f)_{sys,upper}$ and $(P_f)_{sys,lower}$ = $0.161 \times 10^{-7}$ and $0.135 \times 10^{-7}$		

Table 8 Summary of System Reliability Analysis of TLP Structure Model

$\theta$	$\beta_{sys,lower} [(P_f)_{sys,upper}]$	$\beta_{sys,upper} [(P_f)_{sys,lower}]$	average $\beta_{sys}$ [average $(P_f)_{sys}$ ]
0	5.42 $[0.298 \times 10^{-7}]$	5.44 $[0.267 \times 10^{-7}]$	5.43 $[0.283 \times 10^{-7}]$
45	5.71 $[0.566 \times 10^{-8}]$	5.75 $[0.448 \times 10^{-8}]$	5.73 $[0.507 \times 10^{-8}]$
90	5.53 $[0.161 \times 10^{-7}]$	5.56 $[0.135 \times 10^{-7}]$	5.54 $[0.148 \times 10^{-7}]$
Total Average of $\beta_{sys}$ = 5.53			
$(P_f)_{sys}$ = $0.161 \times 10^{-7}$			

Table 9 Reliability Index and Probability of Failure of First Failed Component

$\theta$	$\beta$ & $(P_f)$ of first failed component
0	3.10 $[0.968 \times 10^{-3}]$
45	3.22 $[0.641 \times 10^{-3}]$
90	3.13 $[0.874 \times 10^{-3}]$



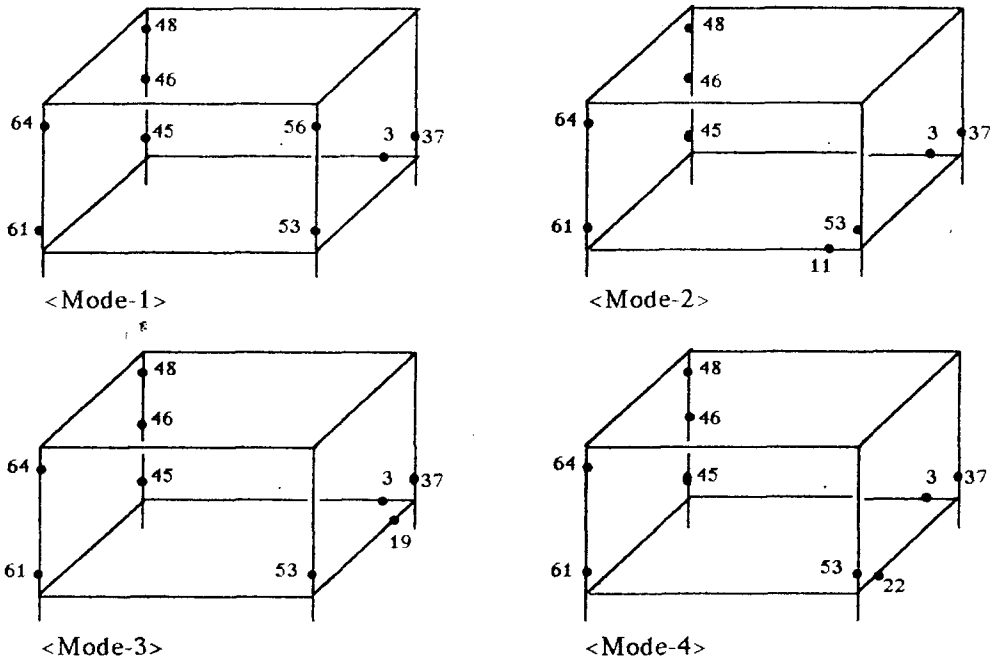


Fig. 7 Failed Components for  $\theta = 0^\circ$

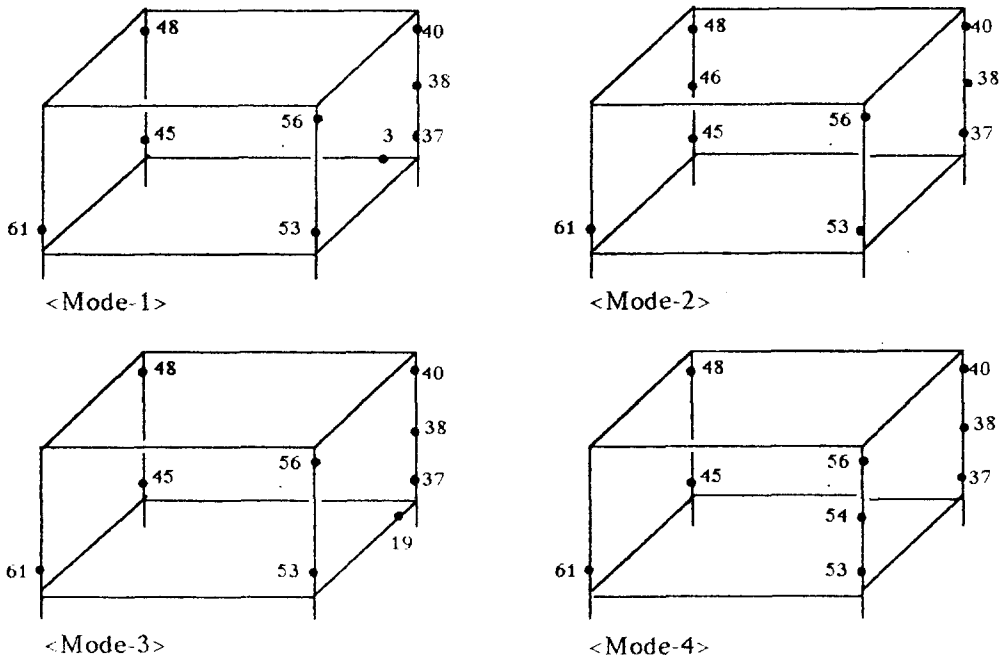


Fig. 8 Failed Components for  $\theta = 45^\circ$



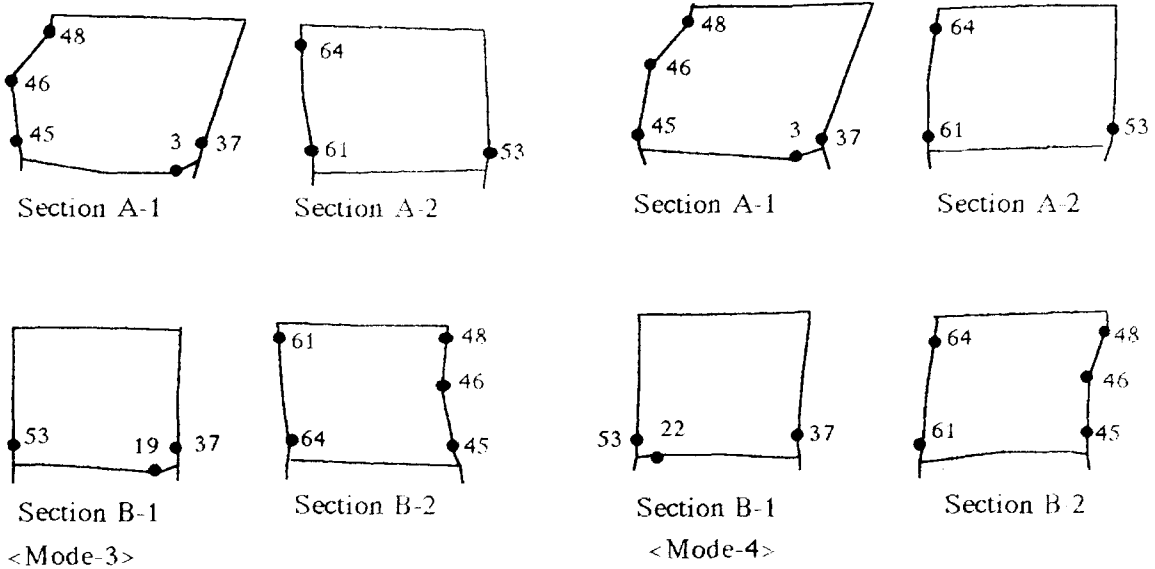


Fig. 10 Example of Structural Systems Failure State ( $\theta = 0^\circ$ )

#### 4. 결 론

본 연구는 저온해역에서 설치할 해양구조물의 구조설계에 신뢰성 이론을 적용한 연구로서, 대상해역을 사할린 해역으로 설정하였고, 이 해역의 설계환경을 고려하여 적합한 해양구조물의 형태로서 Four Column TLP 구조를 제안하였다. 대상해역으로 선정된 사할린 해역은 수심이 120 - 150m로 얕은 해역이기 때문에 고정식 해양구조물을 첫번째 후보로 생각할 수 있지만, 구조강도측면을 고려한다면 TLP 구조가 더 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 TLP 구조를 구성하는 구조부재의 설계는 신뢰성 해석에 기초하여 도출한 설계공식에 따라 수행하였고 최종적인 설계결과는 신뢰성 해석에 기초한 최적설계 과정을 거쳐서 도출하였다. 해양구조물에 대한 신뢰성 해석결과에 의하면 구조부재와 구조시스템의 안전성에 대한 허용수준은 신뢰성 지수를 기준으로 각각 3.0과 5.0으로 설정하고 있는데, 본 연구에서 설계한 TLP 구조에 대한 신뢰성 해석 결과에 의하면 이를 모두 만족하고 있어서 구조부재와 구조시스템의 구조적 안전성이 충분하다고 말할 수 있다.

본 연구에서 설계한 TLP 구조에 대해서 추후

구조물의 상세한 설계, 건조 및 보수, 유지 등 다양한 각도에서 그 적합성을 평가하고 또한 다른 형태의 구조물들과의 비교를 통해 잇점이 있는지에 대한 충분한 검토연구가 필요할 것이다. 한편 여기서 제시한 TLP 구조에 대한 설계결과는 실제 설계단계에서 Proto-Model로서 유용하게 참고될 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 논문은 한-러 국제공동연구결과로서 한국과 학제단의 연구비 지원으로 수행한 것이다 (과제번호 : KOSEF '93 국제공동연구).

#### 참고문헌

- 1) Mansour, A.E. and Faulkner, D., "On Applying the Statistical Approach to Extreme Sea Loads and Ship Hull Strength", Trans. RINA, vol.115, pp.277-314, 1973
- 2) The Committee on Structural Safety and Reliability of Offshore Structures of Structural Division, "Application of Reliability

- methods in Design and Analysis of Offshore Platforms", J. Structural Engineering, ASCE, vol.109, no.10, pp.2265-2291, 1983
- 3) "Preliminary Project Design for the Sakhalin Oil Resources Development Program", McDermott Engineering, 1982
  - 4) Lee, J.S., "Optimum Structural Design of Stiffened Cylinders Based on Reliability Analysis", 대한조선학회지, 제27권 4호, pp.67-71, 1990
  - 5) Lee, J.S., "Reliability Analysis of Continuous Structural Systems", Ph.D. Thesis, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Univ. of Glasgow, 1989
  - 6) Mockba, "Design and Construction of Offshore Platforms", 1986 (in Russian)
  - 7) Faulkner, D., Chen, Y.N. and de Oliveira, J.G., "Limit State Design Criteria for Stiffened Cylinders of Offshore Structures", ASME 4th National Congress of Pressure Vessels and Piping Technology, Portland, Or., pp.1-11, 1983
  - 8) ABS-Conoco, "Model Code for Structural Design of Tension Leg Platforms", ABS-Conoco TLP Rule Case Committee, Final Report, ABS, N.Y., Feb. 1984
  - 9) Thoft-Christensen, P. and Murotsu, Y. : Application of Structural Systems Reliability Theory, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, Tokyo, 1986
  - 10) Lee, J.S. and Faulkner, D., "System Design of Floating Offshore Structures", Trans. RINA, Vol.130, pp.223-240, 1990