

◎ 論 文

# 대규모 폭풍에 대한 Tension Leg Platform의 신뢰도해석<sup>+</sup>

朴 佑 善\* · 尹 禎 邦\*\*

(1991년 1월 20일 접수)

## Reliability Analysis of Tension Leg Platforms for Severe Storm Waves

Woo-Sun Park and Chung-Bang Yun

Key Words : Tension Leg Platform(인장각식 해양구조물), Severe Storm(대규모 폭풍), Reliability Analysis(신뢰도해석), Limit State(한계상태), First Passage(최초초과), Expected Domain Crossing Rate(평균초과율)

### Abstract

This paper presents a method of the reliability analysis for a tension leg platform(TLP) in severe storm waves by using the first passage concept of the random tensile stress in the tendons. In the present method, two failure conditions are considered ; i. e., the exceedance of the ultimate tensile capacity and the occurrence of the negative tension. In order to consider the correlation effects between the failure events for each corner resulted from the rupture of all tendons at one corner, a new system limit state for a rectangular shaped TLP is developed, which is defined in terms of the TLP motions in the vertical plane ; i. e., heave, roll, and pitch. To illustrate the validity of the present method, the numerical analysis is carried out for two TLP's with different structural dimensions. Then, the results are compared with those by other methods.

### 1. 서 론

Tension Leg Platform(TLP)은, Fig. 1에 보인 바와 같이, 심해의 석유생산작업에 적합하도록 설계된 부유식 해양구조물로 인장력을 받고 있는 여러

개의 인장각(tension leg)에 의해서 지지된다. 이 구조물은 연직면상의 운동(heave, roll, pitch)에 대해서는 아주 단단히 구속되도록 설계된 반면, 수평면상의 운동(surge, sway, yaw)에 대해서는 외력의 효과를 완화시킬 수 있도록 어느 정도 움직임을 허용하게 설계되어 있어 동적특성이 매우 우수한

+ 1990년도 한국해양공학회 추계학술대회 발표(1990년 12월)

\* 한국해양연구소 해양공학실

\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과

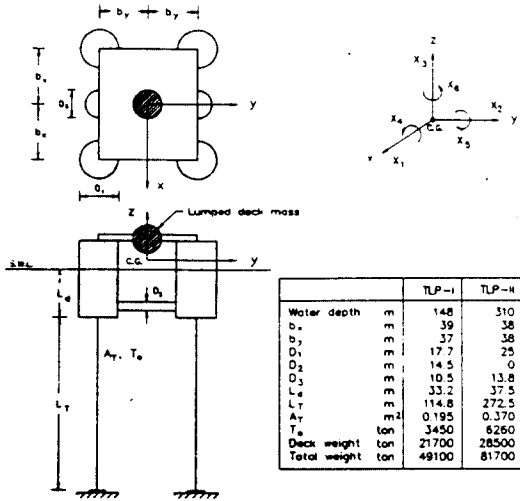


Fig.1 Schematic diagram of a tension leg platform

구조물이라 할 수 있다. 이러한 구조형식이 새로운 개념인 점과 심해의 열악한 해상상태에서 운영되어야 한다는 점에서 볼 때, TLP 전체 구조계의 안전성 분석에 있어 인장각의 안전문제는 매우 중요하다고 할 수 있다.

이와 같은 관점에서 연구되어 발표된 논문으로는 Cornell 등<sup>1)</sup>, Prucz와 Soong<sup>2)</sup>, Stahl과 Geyer<sup>3)</sup> 등의 논문을 들 수 있는데, 이 논문들은 TLP 인장각의 초기설계단계에서 유용할 수 있는 기초자료의 마련에 주 목적을 두고 있다. 특히, Prucz와 Soong은 무작위로 시간에 따라 변하는 하중을 받게 되는 TLP의 신뢰도해석 문제를 최초초과(first passage)개념<sup>4,5)</sup>을 이용하여 수식화하였으며, 여러 가지 설계변수에 대해 수치해석을 수행하였다. 이와 같이 TLP의 신뢰도해석 문제를 최초초과개념에 의해서 수식화할 경우, 구조계의 파괴면을 의미하는 한계상태를 벗어나는 평균초과율(expected domain crossing rate)의 산정은 필수적이다. 이에 관련하여 TLP의 신뢰도해석에 유용할 수 있는 연구결과로는 Veneziano 등<sup>6)</sup>, Ditlevsen<sup>7)</sup>, Shinozuka 등<sup>8)</sup>의 논문을 들 수 있다.

본 논문에서는 TLP의 인장각의 파괴조건을 사용하여 대규모 폭풍에 대한 TLP 전체 구조계의 신뢰도를 최초초과개념에 의해서 추정할 수 있는

방법에 대해서 연구하였다. 본 방법에서는, Prucz와 Soong의 방법에서는 고려되지 않은 인장각이 설치된 네모통이의 파괴사건간의 상관관계를 적절히 고려할 수 있도록 전체 구조계의 한계상태면을 TLP의 운동좌표계에서 정의하였다. 이때에 사용하는 파괴조건으로는 인장각에 걸리는 장력이 허용 최대치를 초과하는 경우와 급작스런 충격하중을 유발할 수 있는 음(압축)으로 되는 경우를 고려하였다. 정점을 향해 성장하다가 쇠퇴하는 형태로 발생하는 대규모 폭풍은 크기가 다른 일련의 정상 해상상태로 모형화하였으며, 폭풍의 크기를 나타내는 최대유의파고(maximum significant wave height)와 인장각을 구성하는 재료의 극한 지지용력은 각각 log-normal과 Weibull 분포를 갖는 확률 변수로 취급하였다.

TLP의 운동해석을 위한 구조모형은 단순화된 6-자유도 모형을 택하였으며, 선체구조에 작용하는 파동력은 근사적으로 파의 회절효과를 고려할 수 있도록 보정한 Morison 방정식을 이용하여 산정하였다.<sup>9)</sup> 본 연구에서 수식화한 신뢰도해석방법의 타당성 검증을 위한 수치해석 및 예제해석은 현재 북해의 145m 수심에 설치되어 운영중인 Hutton TLP<sup>10, 11)</sup>와 수심 310m에 대해 설계중에 있는 Snorre TLP<sup>12)</sup>와 제원이 비슷한 가상의 두 구조물(TLP-I, TLP-II)을 대상으로 수행하였다.

## 2. 한계상태조건

TLP의 인장각의 파괴는 구조계 전체의 파괴를 의미한다. 특히, Fig.1에서 알 수 있듯이, TLP의 네모통이 중에서 어느 한 모통이에 설치된 인장각만 파괴되어도 구조적으로 불안정하게 된다. 따라서, 이 상태를 파괴상태로 규정할 수 있다. 이러한 파괴상태를 유발시키는 것으로는 지속적인 반복하중에 의한 피로파괴와 대규모 폭풍에 의한 갑작스런 파괴를 들 수 있는데, 본 연구에서는 후자를 대상으로 하였다. 인장각의 파괴조건으로는 인장각에 걸리는 장력이 허용 최대치를 초과하는 경우와 음(압축)으로 되는 경우를 고려하였다. 인장각에 걸리는 장력이 음이 되는 경우를 고려한 것은, 장력이 음이 된 직후에 대단히 큰 인장력이 충격적으로

유발될 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 이들 조건을 사용하여 Fig.1에 보인 바와 같이 선체의 평면이 사각형인 TLP의 한계상태조건을 다음과 같이 8개의 평면으로 정의하였다.

$$S_j : R_j - \{A_j\}^T \{X_v\} \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, 8) \quad \dots \dots (1)$$

여기서,  $\{X_v\}$ 는 인장각의 장력에 직접적으로 영향을 미치는 수직운동(heave)과 수직면상의 두 방향 회전운동(roll 및 pitch)으로 구성된 벡터이며,  $R_j$ 와  $\{A_j\}$ 는 인장각의 물성치와 초기조건, 선체구조의 크기에 관계된 시간불변 계수로 구성된다. 이 한계조건을 자세히 쓰면 다음과 같다.

$$S_1 : \frac{L_T}{E} (f_u - \frac{T_0}{A_T}) - (X_3 + b_y X_4 + b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (2)$$

$$S_2 : \frac{L_T(T_0 - W_T)}{E A_T} + (X_3 + b_y X_4 + b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (3)$$

$$S_3 : \frac{L_T}{E} (f_u - \frac{T_0}{A_T}) - (X_3 - b_y X_4 + b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (4)$$

$$S_4 : \frac{L_T(T_0 - W_T)}{E A_T} + (X_3 - b_y X_4 + b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (5)$$

$$S_5 : \frac{L_T}{E} (f_u - \frac{T_0}{A_T}) - (X_3 - b_y X_4 - b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (6)$$

$$S_6 : \frac{L_T(T_0 - W_T)}{E A_T} + (X_3 - b_y X_4 - b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (7)$$

$$S_7 : \frac{L_T}{E} (f_u - \frac{T_0}{A_T}) - (X_3 + b_y X_4 - b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (8)$$

$$S_8 : \frac{L_T(T_0 - W_T)}{E A_T} + (X_3 + b_y X_4 - b_x X_5) \leq 0 \quad \dots (9)$$

여기서,  $X_3, X_4, X_5$ 는 TLP의 수직운동(heave)과 수직면상의 두 방향 회전운동(roll 및 pitch) : E와  $f_u$ 는 인장각을 구성하는 재료의 탄성계수 및 극한 지지응력 :  $L_T, A_T, T_0, W_T$ 는 TLP의 네 모퉁이 중 한 모퉁이에 설치된 인장각의 길이, 총 단면적, 초기장력, 부력을 고려한 해저면에서의 유효자중을 나타내며,  $b_x$ 과  $b_y$ 는 두 방향 회전운동(각각 pitch와 roll)에 의해 야기되는 인장각의 장력에 관련된 계수로, TLP 운동중심으로 부터 인장각이 설치된 모

퉁이까지 X 및 Y방향 거리를 나타낸다(Fig.1 참조). 인장각의 극한 지지응력을 나타내는  $f_u$ 는 Weibull 분포를 갖는 확률변수로 취급하였다.

위의 8개의 한계상태면에서  $S_1, S_3, S_5, S_7$ 은 인장력이 허용최대치를 넘는 경우에 관련된 것이며,  $S_2, S_4, S_6, S_8$ 은 음이 되는 경우에 관련된 것이다. TLP 전체 구조계의 파괴는 TLP의 운동을 나타내는  $\{X_v\}$ 가 이 8개의 한계상태면 중 어느 쪽을 초월하여도 발생하게 된다. 따라서, TLP 전체 구조계의 한계상태면은, Fig.2에 보인 바와 같이, 각 면이 삼각형인 8면체로 정의할 수 있다.

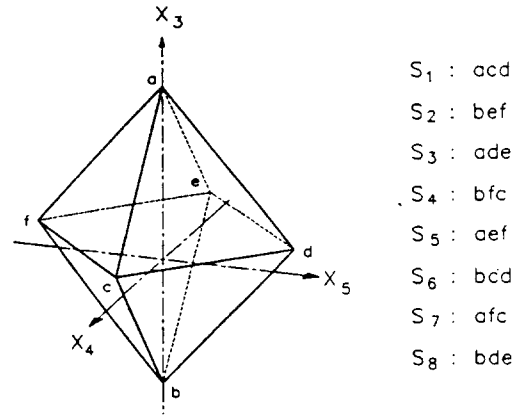


Fig. 2 System limit state

### 3. 평균초과율

무작위로 시간에 따라 변하는 과량하중을 받는 TLP의 운동은 정상 가우스 과정으로 취급할 수 있으며, 신뢰도해석은 최초초과개념으로 수식화할 수 있다. 따라서, 구조계의 한계상태면을 벗어나는 평균초과율의 산정은 필수적이라 할 수 있다. 통상적으로 이 평균초과율은 일반화된 Rice의 식을 이용하여 구하게 된다.<sup>6)~8)</sup> 그러나, 한계상태면을 나타낸 TLP의 운동  $\{X_v\}$ 의 각 성분이 서로 독립이 아니기 때문에, 이 상태 그대로는 구하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 이를 위하여  $\{X_v\}$ 의 공분산행렬  $[C_{x_v, x_v}]$ 의 Cholesky 분해를 통하여 얻은 하부삼각행렬  $[L_{x_v}]$ 를 사용하여 좌표변환을 하였다.<sup>8)</sup> 즉,

$$\{V\} = [L_{Xv}]^{-1} \{X_v\} \dots\dots\dots (10)$$

그러면, 변환된 일반좌표  $\{V\}$ 의 각 성분은 서로 독립이며, 평균이 영이고 분산이 1인 정규확률과정이다. 따라서, 일반좌표계  $\{V\}$ 에서 표시된 한계상태에 대한 평균초과율은 다음의 일반화된 Rice 식으로 구할 수 있다.

$$v_D = \int_S \int_0^\infty \dot{y} f(v), \dot{y}(\{v\}, \dot{y}) d\dot{y} dS \dots\dots\dots (11)$$

여기서,

$$Y = \{n\}^T \{V\}, \quad \dot{Y} = \{n\}^T \{\dot{V}\} \dots\dots\dots (12)$$

그리고,  $f(v), \dot{y}(\{v\}, \dot{y})$ 는  $\{V\}$ 와  $\dot{Y}$ 의 결합 확률밀도함수이며,  $S$ 는  $\{V\}$ 좌표계에서 정의된 한계상태의 표면을,  $dS$ 는  $S$ 상에서 요소를,  $\{n\}$ 은  $S$ 상에서의 외향단위벡터를 나타낸다. 수학적으로 평균초과율  $v_D$ 에 미소시간  $\Delta t$ 를 곱한 값은  $\{v(t)\}$ 가 시간  $t$ 에서  $S$ 상에 있으며,  $\dot{Y}\Delta t$ 가 영보다 클 확률을 나타낸다.

일반좌표계  $\{v(t)\}$ 가 정상 가우스 과정이기 때문에,  $v_i(t)$ 와  $\dot{v}_i(t)$ 는 서로 독립적인 관계에 있게 된다. 따라서, 이 관계를 이용하면, 식(11)은 다음과 같이 재정리 된다.

$$v_D = \int_S f_{(v)}(\{v\}) \int_0^\infty \dot{y} f_{\dot{y}}(\dot{y}) d\dot{y} dS \dots\dots\dots (13)$$

TLP의 전체 한계상태가 8개 삼각평면의 조합으로 구성되어 있고, 각 면에 대한  $\{n_j\}$ 가 일정하므로, 평균초과율은 각 면에 대한 것의 선형합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$v_D = \sum_{j=1}^8 \int_0^\infty \dot{y}_j f_{\dot{y}_j}(\dot{y}_j) d\dot{y}_j \int_S f_{(v)}(\{v\}) dS \dots\dots\dots (14)$$

식(14)의 우변의 첫번째 항은  $Y_j(t)$ 가 정규 가우스 분포를 가지므로 다음과 같이 쉽게 얻을 수 있다.

$$\int_0^\infty \dot{y}_j f_{\dot{y}_j}(\dot{y}_j) d\dot{y}_j = \frac{\sigma_{n_j}}{\sqrt{2\pi}} \dots\dots\dots (15)$$

여기서,  $\sigma_{n_j}$ 은  $Y_j(t)$ 의 표준편차로 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{n_j} &= \sqrt{E[\dot{Y}_j^2]} \\ &= \sqrt{\{n_j\}^T [C\dot{v}\dot{v}] \{n_j\}} \\ &= \sqrt{\{n_j\}^T ([L_{Xv}]^{-1})^T [C\dot{x}_v\dot{x}_v] [L_{Xv}]^{-1} \{n_j\}} \dots\dots (16) \end{aligned}$$

여기서,  $[C\dot{x}_v\dot{x}_v]$ 는 연직면 운동  $\{X_v\}$ 의 속도에 대한 공분산행렬로 TLP의 운동해석으로 부터 구할 수 있다(식 (26)참조). 식(14)의 두번째 항은 다음과 같이 표시할 수 있다.<sup>6)</sup>

$$\int_{S_j} f_{(v)}(\{v\}) dS_j = \phi(r_j) \cdot \Phi_2(S_j) \dots\dots\dots (17)$$

여기서,  $\phi(\cdot)$ 는 정규확률밀도함수를,  $\Phi_2(S_j)$ 는 정규확률밀도함수의 삼각형 평면  $S_j$ 에 대한 적분값을,  $r_j$ 는 원점에서 부터  $S_j$ 면까지의 최단거리를 나타낸다. 식(14), (15) 및 (17)로부터, TLP 전체 구조계의 한계상태에 대한  $v_D$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$v_D = \sum_{j=1}^8 \frac{\sigma_{n_j}}{2\pi} \exp\left(-\frac{r_j^2}{2}\right) \Phi_2(S_j) \dots\dots (18)$$

여기서,  $\Phi_2(S_j)$ 는 0과 1사이의 값을 갖게 되는데, 이 작업이  $v_D$ 를 계산하는데 있어서 가장 복잡한 과정이다. 본 연구에서는 이를 IMSL 부프로그램 MDBNOR<sup>13)</sup>을 이용하여 직접적분하여 구하였다.

### 4. 파괴확률의 산정

일반적으로 폭풍은 Fig. 3에 보인 바와 같이 최대 파고조건을 향하여 성장하다가 다시 쇠퇴하는 형

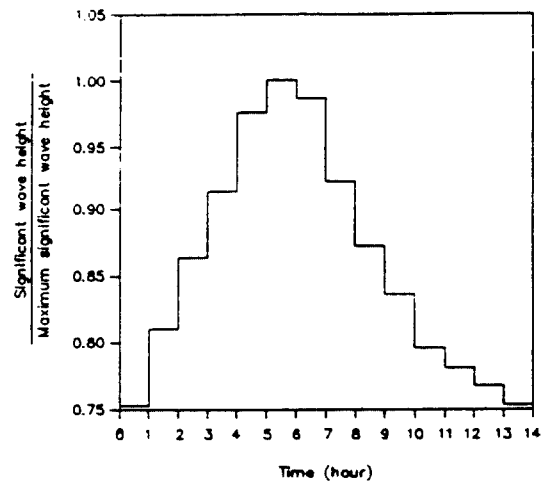


Fig. 3 Build-up and decay profile of a severe storm for hypothetical North Sea conditions

태로 발생하게 되므로, 한 폭풍은 최대 파고조건과 지속시간 및 성장-쇠퇴 모양으로 모형화할 수 있다.<sup>14)~16)</sup> 본 연구에서는 성장-쇠퇴하는 폭풍을 적절히 고려하기 위하여, Fig. 3과 같이, 파고스펙트럼과 그 지속시간으로 특징되는 일련의 해상상태로 폭풍을 모형화 하였으며, 각 해상상태는 확률적으로 서로 독립인 것으로 간주되었다.

통상 각 해상상태에서 발생하는 파동을 정상 가우스 과정으로 가정할 수 있으므로, TLP 운동  $\{X_v\}$ 도 역시 정상 가우스 과정으로 생각할 수 있다. 따라서, 앞절에서 언급한 한계상태를 초월하는 사상은 평균발생율(occurrence rate)  $v_D$ 를 갖는 포아송 과정이 되며<sup>4),5)</sup>,  $i$ -번째 해상상태에 대한 파괴확률,  $p_{fi}(t_{di}, H_{Si})$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_{fi}(t_{di}, H_{Si}) = \int_0^{t_{di}} [1 - \exp(-v_D(f_u, H_{Si})t_{di})] f_{Fu}(f_u) df_u \dots (19)$$

여기서,  $f_{Fu}(f_u)$ 는  $f_u$ 의 확률 분포함수;  $\varepsilon$ 은  $f_u$ 의 최소 한계치;  $v_D(f_u, H_{Si})$ 는 식(18)로부터 구한 평균초과율;  $H_{Si}$ 와  $t_{di}$ 는  $i$ -번째 해상상태의 유효파고와 그 지속시간을 나타낸다.

각 해상상태를 확률적으로 서로 독립이라 간주하면, 주어진 한 폭풍에 대한 조건부 파괴확률,  $p_{fg}(h_{S, \max})$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{fg}(h_{S, \max}) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p_{fi}(t_{di}, H_{Si})] \dots \dots \dots (20)$$

여기서,  $n$ 은 성장-쇠퇴하는 폭풍모형화에 사용한 해상상태의 수이며,  $h_{S, \max}$ 는 주어진 폭풍의 크기를 나타내는 최대 유의파고이다.

임의의 폭풍이 한번 발생했을 때의 파괴확률은  $h_{S, \max}$ 에 대한 확률분포함수,  $f_{H_{S, \max}}(h_{S, \max})$ 와 식(20)에서 구한  $p_{fg}(h_{S, \max})$ 로부터, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{fi} = \int_0^{h_{S, \max}} p_{fg}(h_{S, \max}) f_{H_{S, \max}}(h_{S, \max}) dh_{S, \max} \dots \dots \dots (21)$$

통상적으로, 폭풍의 발생은 포아송 과정으로 모형화할 수 있으므로, 예상 설계수명 동안의 파괴확률은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$P_i^N = 1 - \exp(-N \lambda p_{fi}) \dots \dots \dots (22)$$

여기서,  $N$ 은 구조물의 예상 설계수명(년)을,  $\lambda$ 는 폭풍의 연평균 발생율을 나타낸다.

### 5. TLP의 운동해석

TLP의 신뢰도해석을 보다 정확히 수행하기 위해서는, 비교적 직경이 큰 부재로 구성되어 있는 선체구조에 작용하는 파력은 파의 회절효과를 고려하여 산정하여야 하며, 또한, 풍력, 조류력, 2차 파력 등의 표류력에 기인한 인장각의 장력증가도 고려하여야 한다. 그러나, 본 연구에서는 능률적인 수치해석을 위해, 풍력, 조류력, 2차 파력 등은 해석에 고려하지 않고, 가장 중요한 파동력만 고려하였다. 파동력은 근사적으로 파의 회절효과를 고려할 수 있도록 보정한 Morison 방정식을 사용하여 산정하였다.<sup>9)</sup>

파랑하중에 대한 TLP의 동적 구조해석모형은 TLP 본체를 강체로 보고, 인장각 및 부력에 의한 복원력의 영향을 선형경계요소로 처리한 간단한 6-자유도 모형으로 택하였다. 이 구조모형에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>9)</sup>

$$[M_s + M_a]\{X\} + [C]\{\dot{X}\} + [K_T + K_H]\{X\} = \{F\} \dots (23)$$

여기서,  $\{X\}$ ,  $\{\dot{X}\}$ ,  $\{X\}$ 는 TLP의 6-방향 변위, 속도 및 가속도벡터;  $[M_s]$ 는 구조물 자체의 질량행렬;  $[M_a]$ 는 부가질량행렬;  $[C]$ 는 선형화된 점성 감쇠행렬;  $[K_T]$ 는 인장각에 의한 강성행렬;  $[K_H]$ 는 부력에 의한 강성행렬; 그리고,  $\{F\}$ 는 파랑기 전력벡터를 나타낸다.

식(23)의 운동방정식을 단위파고를 갖는 정규파에 대해 주파수영역에서 풀면, TLP 운동에 대한 전달함수를 얻을 수 있으며, 이를 이용하면, 파고스펙트럼으로 나타낼 수 있는 불규칙한 해상상태에 대한 TLP 운동을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{S_{XX}(\omega)\} = \{\bar{X}(\omega)\}^* \{\bar{X}(\omega)\}^T S_{hh}(\omega) \dots \dots \dots (24)$$

여기서,  $S_{hh}(\omega)$ 는 파고스펙트럼으로 본 연구에서는 ITTC 스펙트럼<sup>17)</sup>을 사용하였다.  $\{\bar{X}(\omega)\}$ 는 단위파고를 갖는 정규파에 대한 TLP의 복소진폭벡터, 즉 전달함수를 나타내며,  $\{\bar{X}(\omega)\}^*$ 는  $\{\bar{X}(\omega)\}$ 의 공액복소수를 의미한다.

앞에서 기술한 TLP의 신뢰도해석을 위해서는 TLP의 운동중에서 연직면 상의 운동( $X_3, X_4, X_5$ )에

대한 공분산행렬을 구해야 한다. 이들은 식(24)의 TLP 운동에 대한 스펙트럼을 사용하여 다음의 식으로 부터 구할 수 있다.

$$[C_{X_i X_j}] = \text{Re} \left( \int_0^\infty [S_{X_i X_j}(\omega)] d\omega \right) \dots\dots\dots (25)$$

$$[C_{\dot{X}_i \dot{X}_j}] = \text{Re} \left( \int_0^\infty \omega^2 [S_{X_i X_j}(\omega)] d\omega \right) \dots\dots\dots (26)$$

여기서,  $[S_{X_i X_j}(\omega)]$ 는 TLP의 연직면 운동( $X_3, X_4, X_5$ )에 대한 스펙트럼행렬이며,  $[C_{X_i X_j}]$  및  $[C_{\dot{X}_i \dot{X}_j}]$ 는 TLP 연직면운동의 변위 및 속도에 대한 공분산행렬로 식(10)과 (16)에서 사용되어진다.  $\text{Re}(\cdot)$ 는 괄호안 값의 실수부를 의미한다.

### 6. 예제해석 및 결과분석

본 연구에서는 대규모 폭풍에 대한 TLP의 신뢰도해석과정을 체계적으로 수식화하였다. 본 모형의 타당성 검증 및 예제해석을 수행하기 위해, 북해의 수심 145m에 설치 운영중인 Hutton TLP<sup>(10,11)</sup>와 수심 310m를 대상으로 설계되고 있는 Snorre TLP<sup>(12)</sup>와 체원이 비슷한 가상의 두 구조물(TLP-I, TLP-II)에 대해서 수치해석을 수행하였다. 대규모 폭풍에 대한 모형은 가상의 북해 해상상태를 사용하여 결정하였다. 즉, 성장-쇠퇴하는 폭풍은 Fig. 3과 같이 지속시간이 1시간인 14개의 해상상태로 모형화 하였으며, 폭풍의 최대 유효파고조건의 확률분포함수는 Fig. 4에 보인 바와 같이 중앙값이 11.2m이며, 분산계수는 19.3%인 log-normal 분포로 모형화 하였다. 폭풍의 연평균 발생율( $\lambda$ )은 0.033로 취하였다. 인장각을 구성하는 재료의 극한 지지응력  $f_u$ 는 Weibull 분포로 모형화 하였다. Hutton TLP의 경우를 참조로  $f_u$ 의 최소 한계치  $\epsilon$ 은 793 MPa로 취하였으며, 평균 및 표준편차는 각각

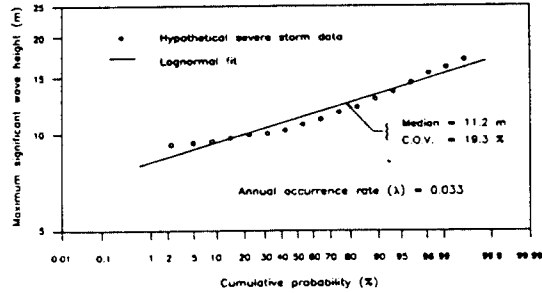


Fig. 4 Severe storm distribution for hypothetical North Sea conditions

965 MPa와 96.5MPa로 가정하였다.

자유진동해석결과, TLP-I의 경우는 수평면상의 운동(surge, sway, yaw)에 대한 자유진동주기는 43-56초 정도로 나타났으며, 연직면상의 운동(heave, roll, pitch)에 대해서는 1-2초로 계산되었다. TLP-II의 경우는 수평면상의 운동은 68-81초, 연직면상의 운동은 2-3초 정도로 나타났다. 이로 부터, 두 구조물 모두 자유진동주기가 실제 해상상태의 파 에너지가 밀집되어 있는 주기(4-20초)를 벗어나고 있어 공진현상은 거의 일어나지 않으리라는 것을 알 수 있다.

Table 1은 본 연구에서 수식화한 신뢰도해석모형의 타당성을 검증하기 위한 수치해석결과로부터 얻어진 설계수명(20년) 동안의 파괴확률을 나타낸 것이다. 본 모형에 의한 결과치와 인장각이 설치된 각 모퉁이간의 파괴사건을 서로 독립으로 보아 한계상태를 인장각에 걸리는 장력으로 정의한 Prucz와 Soong<sup>(2)</sup>의 모형에 의한 결과치를 서로 비교하였다. 또한, 본 신뢰도해석모형의 상한치, 즉, 식(18)의  $\Phi_2(S_i)$ 를 1.0으로 취하여 구한 결과치도 비교하였다. 본 모형은 괄호안에 나타낸 상한치내의 타당한 결과를 줄을 알 수 있으며, Prucz와

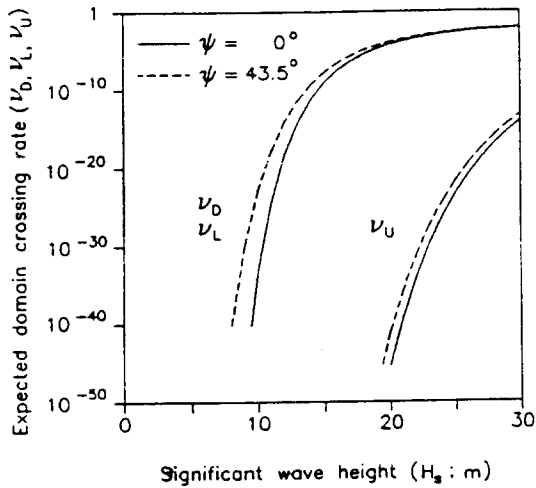
Table. 1 Comparisons of life time failure probabilities by two different models

	$\psi$	Present model	Prucz & Soong's model
TLP- I	0°	$1.076 \times 10^{-3} (1.100 \times 10^{-3})$	$2.848 \times 10^{-3}$
	43.5°	$2.011 \times 10^{-3} (2.082 \times 10^{-3})$	$3.462 \times 10^{-3}$
TLP- II	0°	$0.515 \times 10^{-5} (0.720 \times 10^{-5})$	$1.697 \times 10^{-5}$
	45°	$0.848 \times 10^{-5} (1.374 \times 10^{-5})$	$1.968 \times 10^{-5}$

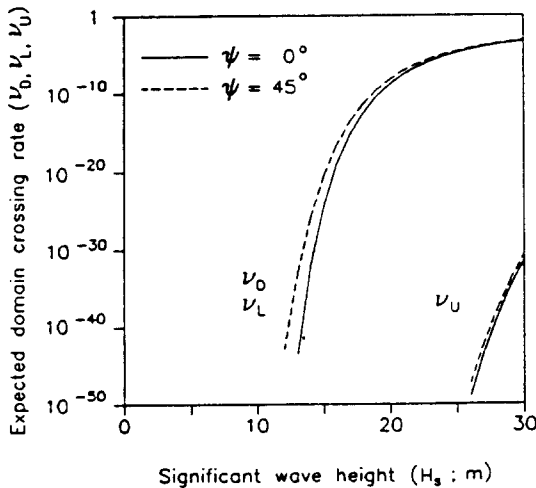
Note : The values in the parenthesis denote the upper bounds of the presnet model

Soong의 모형은 본 모형의 결과에 비해 파괴확률을 1.72배에서 3.29배까지 큰 불합리한 결과를 줄을 볼 수 있다. 특히, 파가 TLP의 정면으로 입사하는 경우, 그 차이가 더욱 심함을 볼 수 있는데 이는 파가 입사방향의 직각방향으로 나란한 두 모형의 파괴사건은 서로 중속된 사건임에 불구하고 Prucz와 Soong의 모형에서는 이를 독립사건으로 처리하게 되기 때문이다.

Fig. 5, 6과 Table 2는 두 예제해석용 구조물에



(a) Hutton TLP



(b) Snorre TLP

Fig. 5 Expected domain crossing rate

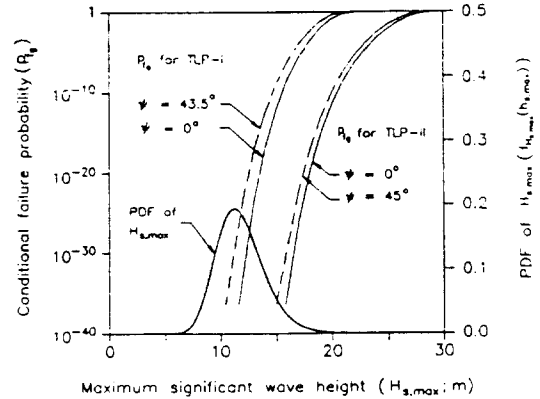


Fig. 6 Conditional failure probability for maximum significant wave heights

각기 다른 두 방향에서 파가 입사하는 경우에 대한 신뢰도해석결과를 나타내고 있다. Fig. 5는 한계상태면에 대한 평균초과율( $\nu_0$ ) 및 이를 인장력이 허용 최대치를 넘는 경우( $\nu_0$ )와 음이 되는 경우( $\nu_L$ )로 나누어 나타낸 것으로, 두 구조물 모두  $\nu_L$ 이 지배적임을 볼 수 있다. 이는 두 구조물의 인장각이 파괴될 경우, 그 원인은 인장각의 장력이 음이 된 직후 충격적으로 발생하게 되는 대단히 큰 인장력에 기인할 확률이 크다는 것을 시사하고 있다. 또한, 이는 인장각을 구성하는 재료의 극한 지지력의 불확실성이 TLP의 신뢰도에 주는 영향은 무시할 수 있다는 것을 나타내는 것이기도 하다. Table 2에 보인 1년간 파괴확률을 살펴보면, TLP-I 인 경우는  $10^{-5} - 10^{-4}$  정도로, 설계규정에 맞는 해양구조물의 1년간 파괴확률이  $10^{-5} - 10^{-4}$  정도의 값<sup>18)</sup> (가능한 여러 파괴경우를 고려하여 산정된 값임) 이라고 보고된 것과 같은 수준을 보이고 있음을 알 수 있으며, TLP-II는  $10^{-7} - 10^{-6}$  정도로 TLP-I에 비해 파괴확률이 상당히 작음을 알 수 있다. TLP-II의 파괴확률이 TLP-I에 비해 상당히 작게 나타난 것은 이 두 구조물 모두 인장각에 걸리는 장력이 음이 되어 파괴되는 경우가 지배적이라는 측면에서 설명이 가능하다. 즉, 인장각에 걸리는 초기장력이 TLP-II가 TLP-I보다 약 2배정도 크게 설계되어 있으며, 또한, TLP-II의 경우, 인장각의 자중을 부력의 영향으로 상쇄시켜 해저면에서의 인장각에 걸리는 장력을 선체구조에 연결된 상단

Table. 2 Failure probabilities of Hutton and Snorre TLP's for two different angles of wave attack

	$\psi$	Random storm	Annual	Life time	
		$p_{fr}$	$p^1_f$	$p^{20}_f$	$\beta = \Phi^{-1}(-p^{20}_f)$
TLP-I	0°	$1.631 \times 10^{-3}$	$0.538 \times 10^{-4}$	$1.076 \times 10^{-3}$	3.068
	43.5°	$3.050 \times 10^{-3}$	$1.007 \times 10^{-4}$	$2.011 \times 10^{-3}$	2.876
TLP-II	0°	$0.781 \times 10^{-5}$	$2.557 \times 10^{-7}$	$5.154 \times 10^{-6}$	4.411
	45°	$1.285 \times 10^{-5}$	$4.239 \times 10^{-7}$	$8.479 \times 10^{-6}$	4.302

부와 같은 수준으로 유지시키기 위하여 인장각의 직경을 크게 설계한 (TLP-I의 3배 정도) 때문이다. 파의 입사각에 따른 해석결과를 비교해 보면, 두 구조물 모두 정면으로 입사하는 경우보다 선체구조의 대각선방향으로 입사하는 경우가 더 위험함을 알 수 있다.

### 7. 결 론

본 논문에서는 대규모 폭풍에 대한 심해용 해양 구조물 TLP의 안전도 진단에 대하여 연구하였다. TLP의 신뢰도해석방법을 인장각의 파괴조건을 사용하여 최초초과개념에 의해 체계적으로 수식화하였다. TLP 전체 구조계의 한계상태는 인장각이 설치된 각 모퉁이의 파괴사건간의 상관관계를 적절히 고려할 수 있도록 하기 위하여 TLP운동좌표계에서 정의하였다. 현재 북해에 설치되어 운영중인 Hutton TLP와 설계중인 Snorre TLP와 재원이 비슷한 가상의 두 구조물에 대한 수치해석 결과, 각 모퉁이의 파괴사건간의 상관관계는 상당히 중요하게 다루어져야 함을 알 수 있었으며 (이를 무시하면 파괴확률을 과도하게 산정하게 됨), 두 구조물 모두 인장각의 장력이 허용 최대치를 넘어 파괴되는 경우보다는 음이 된 직후 충격적으로 발생하게 되는 대단히 큰 장력에 의해 파괴되는 경우가 지배적임을 알 수 있었다. 또한, 파가 정면으로 입사하는 경우보다 선체구조의 대각선방향으로 입사하는 경우가 더 위험함을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1) Cornell, C.A., R. Rackwitz, Y. Guenard, and R.

Bea, "Reliability Evaluation of Tension Leg Platforms", Proceedings of the 4th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, Berkeley, CA, pp. 159~162, January, 1984

2) Prucz, Z. and T.T. Soong, "Reliability and Safety of Tension Leg Platforms", Engineering Structures, Vol. 6, pp. 142~149, Arpil, 1984

3) Stahl, B. and J.F. Geyer, "Ultimate Strength Reliability of Tension Leg Platform Tendon System", Proceedings of the 15th Annual Off-shore Technology Conference, OTC 4857, pp. 151~162, 1985

4) Lin. Y.K., Probabilistic Theory of Structural Dynamics, McGraw-Hill, 1967

5) Nigam, N.C., Introduction to Random Vibrations, The MIT Press, 1984

6) Veneziano, D., M. Girigoriu and C.A. Cornell, "Vector-process Models for System Reliability", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM3, pp. 441~460, 1977

7) Ditlevsen, O., "Gaussian Outcrossing from Safe Convex Polyhedrons", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 127~128, 1983

8) Shinozuka, M., T. Kako, and A. Tsurui, "Random Vibration Analysis in Finite Element Formulation", Random Vibration-Status and Recent Developments, I. Elishakoff and R.H. Lyon, Amsterdam : Elsevier, 1986

9) 편종근, 박우선, 윤정방, "Morison 방정식을



- 이용한 Tension Leg Platform의 동적해석”, 대한토목학회논문집, 제7권 제3호, pp.223~228, 1987
- 10) Ellis, N., M.N. Silbert, F. Anderson, and A.L. Woodhead, “Hutton TLP Vessel Structural Configuration and Design Features”, Proceedings of the 14th Annual Offshore Technology Conference, OTC 4427, pp.557~571, 1982
- 11) Ocean Industry, Vol. 19, No. 8, August, 1984
- 12) Almeland, I.B., J. Lereim, and T. Gaul, “Structural Design Philosophy for the Snorre Tension Leg Platform”, Proceedings of the 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 1, pp.75~82, March, 1989
- 13) User's Manual of IMSL Library, IMSL Inc., 1984
- 14) Hamilton, R.C. and E.G. Ward, “Ocean Data Gathering Program-Quality and Reduction of Data”, Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference, OTC 2108-A, pp.749~767, 1974
- 15) Haring, R.E. and J.C. Heideman, “Gulf of Mexico Rare Wave Return Periods”, Proceedings of the 10th Annual Offshore Technology Conference, OTC 3230, 1978
- 16) Anderson, W.D., M.N. Silbert, and J.R. Lloyd, “Reliability Procedure for Fixed Offshore Structures”, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 108, ST11, pp.2517~2538, 1982
- 17) Price, W.G. and R.E. Bishop, Probabilistic Theory of Ship Dynamics, Chapman and Hall, 1974
- 18) Fjeld, S., “Reliability of Offshore Structures”, Journal of Petroleum Technology, SPE of AIME, pp.1486~1496, October, 1978

★ NEWS ★

## 7th International Conference on Pressure Vessel Technology

- 주 관 : German Committee of the International Council for Pressure Vessel Technology  
 기 간 : 1992년 5월 31일 - 6월 5일(6일간)  
 개 최 지 : Hotel Hilton International in Dusseldorf, Federal Republic of Germany  
 분 야 : Group A : Design and Stress Analysis of Pressure Vessel, Piping, Fitting and Special Components  
           Group B : Material and Manufacturing of Components  
           Group C : Experimental Studies, Operating Experiences and Failure Analysis  
           Group D : Quality Assurance, Non-Destructive Testing Inspection
- 일 정 : 1991년 10월 31일      논문제출마감  
 연 락 처 : THE ASIAN AND OCEANIC REGIONAL COMMITTEE OF THE ICPVT  
           Prof. K. Iida, Department of Mechanical Engineering, Shubaura Institute of Technology,  
           3-9-14, Shibaura, Minato-ko, Tokyo, Japan(FAX 81-489-78-7796)
- ★ 기타 상세한 사항은 홍익대학교 표동근교수에게 문의바람.  
 Tel. (02) 334-0951 교환 523, FAX. (02) 333-6445