

◎ 論 文

# 골조 파이프 구조물의 최적신뢰성 설계<sup>+</sup>

백            점            기\*  
(1988년 4월 21일 접수)

## Reliability-Based Optimum Design for Tubular Frame Structures

Jeom Kee Paik

**Key Words;** Reliability-Based Optimum Design(최적신뢰성 설계), Critical Section(주요 단면), Probability of Failure(파손 확률), Buckling Failure(좌굴 파손), Plasticity Failure(소성 파손), Fatigue Failure(피로 파손), Reanalysis Method(재해석법)

### Abstract

This paper describes the development of a reliability-based optimum design technique for such three dimensional tubular frames as offshore structures.

The objective function is formulated for the structural weight. Constraints that the probability of failure for the critical sections does not exceed the allowable probability of failure are set up.

In the evaluation of the probability of failure, fatigue as well as buckling and plasticity failure are taken into account and the mean-value first-order second-moment method(MVFOSM) is applied for its calculation.

In order to reduce the computing time required for the repeated structural analysis in the optimization process, reanalysis method is also applied.

Application to two and three dimensional simple frame structures is performed. The influence of material properties, external forces, allowable failure probabilities and interaction between external forces on the optimum design is investigated.

### 1. 서            론

지금까지의 구조물설계는 주로 기존구조물의 설계 실적이나 경험을 바탕으로 한 설계기준 또는 이론적 실험적 방법에 의한 안전성 평가와 같은 확률론적인 방법으로 수행되어 왔다.

그런데, 실제구조물에는 일정하지 않은 변동하중이 작용하고 있으며, 하중 추정조건이나 추정방법

등에서 기인되는 각종 오차도 존재하기 때문에, 구조물에 작용하는 외하중의 크기는 일정한 값이 아니고 어떤 범위내에서 분포하게 된다. 또한, 구조물의 강도도 강도추정방법의 오차에서 기인되는 불확정성 뿐만 아니라, 구조물을 구성하는 재료특성의 불확정성, 구조부재의 조립과정에서 발생하는 공작오차 및 초기부정 등에 기인되는 불확정성 때문에 일정한 크기의 값이 아닌 확률변수이다.

<sup>+</sup> 1987년 한국해양공학회 추계 학술대회 발표(1987년 11월)

\* 정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소 선체구조실

구조물의 설계에 있어서 확정론적으로 추정된 외하중 및 강도를 기준으로 평가한 안전률이 일정수준 이상이라 하더라도 외하중 및 강도에 대한 불확정성이 증가하면(즉, 확률분산이 증가하면) 설계된 구조물의 신뢰성은 크게 저하되며, 신뢰성을 향상시키기 위해 상대적으로 불합리한 구조물이 되기 쉽다.

이 같은 문제점에 대해서는 각종 불확정요인을 통계 해석하고 구조물의 파손확률이나 신뢰성을 기준으로 설계를 수행하는 것이 하나의 대책이다.

이상의 관점에서 최근에는 선박·해양구조물을 비롯한 각종 구조물의 설계에 신뢰성 해석이론이 적극적으로 도입되고 있으며, 이에 대한 일련의 연구성과도 다수 보고되어 있다<sup>1-3)</sup>. 그러나, 현실적으로는 각종 불확정요인에 대한 통계적성질을 해석한 충분한 자료가 정리되어 있지 않은 실정이며, 복잡한 대형구조물의 각종 파손 형태를 모두 고려한 신뢰성 해석을 수행하기 어렵고, 더우기 부재치수의 최적화 과정에서 요구되는 반복적인 구조해석에 방대한 계산시간이 소요되므로 해양구조물과 같은 3차원 골조구조물에 대한 적용에는 거의 찾아 볼 수 없다.

또한, 지금까지의 연구에서는 정적하중하의 구조 파손과 반복하중하의 구조파손을 별도로 다루어 왔으나, 이들을 동시에 고려하여 구조물의 신뢰성을 평가할 수 있다면 초기설계단계에서 더욱 편리할 것이다.

본 연구에서는 해양구조물과 같이 원통부재로 구성된 3차원 골조구조물을 대상으로 정적하중에 대한 좌굴 및 소성파손확률과 반복하중에 대한 피로파손 확률을 동시에 평가하고, 이들이 각각의 허용 파손 확률을 초과하지 않도록 제약조건을 설정하여 구조중량이 최소화되도록 부재치수를 결정하는 최적신뢰성 설계법을 제안한다.

또한, 목적함수인 구조중량의 최적화를 위한 반복적인 구조해석시에 재해석법을 적용함으로써 계산시간을 더욱 단축시켜 3차원 골조구조물에 대한 적용성을 검토한다.

한편, 본 연구에서는 구조물에 작용하는 외하중의 통계적인 성질은 언어져 있다고 가정하고, 외하중으로서는 구조물의 인생중에 발생하는 최대치에 적절한 수정계수를 곱한 등가외력을 대상으로 한다.

## 2. 골조구조물의 중량최적화를 위한 신뢰성 설계법의 정식화

### 2.1 문제의 정의

구조물의 파손확률을 엄밀히 평가하기 위해서는 구조전체에 대한 각종 파손형식을 모두 고려한 다차원 동시 파손확률 계산을 수행할 필요가 있으나, 일반적으로 복잡한 대형구조물의 파손형식은 복잡하며, 그 수도 방대하므로 이들을 모두 고려한 신뢰성 해석은 실제적으로 거의 실행 불가능하다.

이 같은 문제에 대하여는 구조물 전체에 대한 각종 파손형식을 모두 고려하는 대신에 구조물의 안전성 관점에서 실제적으로 가장 중요하다고 생각되는 구조부재의 주요 단면에만 주목하여 계산한 파손확률을 기준으로 하는 방법이 Kishi 등<sup>1)</sup>에 의해 제안되었으며, 이들은 정적하중하의 좌굴 및 소성파손을 고려한 문제에 적용하여 그 유용성을 보인 바 있다.

본 연구에서도 구조부재의 주요단면만을 주목하여 계산한 파손확률을 제약조건으로 구조중량을 최적화하는 설계법을 정식화하며, 주요단면으로서는 Kishi 등과 같이 응력이 집중되는 구조부재간의 접속부와 집중하중 작용점을 선택하기로 한다.

또한, 정적하중에 대한 좌굴 및 소성파손 확률뿐만 아니라 반복하중에 대한 피로파손 확률을 동시에 평가하여, 이들이 각각의 허용파손 확률을 초과하지 않도록 제약조건을 설정하기로 한다.

따라서, 골조구조물의 구조중량을 최소로 하는 신뢰성 설계문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

Find  $X$

Such that  $W(x) \rightarrow \text{minimize}$

subject to  $P_{fjh}(x) \leq P_{fah}$  (1)

$$P_{fFh}(x) \leq P_{fFah}$$

$$(h=1, 2, \dots, m)$$

여기서,  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  : 설계변수

$W(x)$  : 목적함수

$P_{fjh}(x)$  : 주요단면  $h$ 의 좌굴 및 소성파손 확률

$P_{fah}$  : 주요단면  $h$ 의 좌굴 및 소성파손에 대한 허용 파손확률

$P_{fFh}(x)$  : 주요 단면  $h$ 의 피로파손 확률

$P_{fFah}$  : 주요단면  $h$ 의 피로파손에 대한 허용 파손확률

$n$  : 설계변수의 수

$m$  : 주요단면의 수

이하에서는 식(1)을 구체적으로 정식화한다.

2.2 설계변수 및 목적함수

일반적으로 구조물의 크기, 형태 및 부재단면이 결정되어 있는 경우, 구조중량은 부재치수(예를 들어, 판두께, 직경 등)의 함수로서 계산할 수 있으므로, 최적설계문제의 설계변수는 부재치수를 선택한다. 이때 구조물의 대칭성으로부터 동일한 부재치수를 가진 부재의 수가 많을수록 설계변수의 수는 상대적으로 줄어든다. 즉,

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}^T \quad (2)$$

여기서,  $X_n$  : 설계변수

$n$  : 설계변수의 수 ( $n <$  구조부재의 수)

따라서, 길이 방향에 균일한 구조부재로 구성된 골조구조물의 구조중량  $W$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \sum \rho_i L_i A_i = W(X) \quad (3)$$

여기서,  $W$  : 구조중량

$\rho_i$  : 구조부재  $i$ 의 밀도

$L_i$  : 구조부재  $i$ 의 길이

$A_i$  : 구조부재  $i$ 의 단면적

$\Sigma$  : 전 구조부재에 대한 총합

$X$  : 설계변수

2.3 파손확률의 간이계산 모델

2.3.1 정적하중하의 좌굴 및 소성파손모델

(1) 파손조건

Fig.1에 나타내는 원통부재가 정적하중을 받는 경우의 구조파손은 소성 판절기구가 형성되는 상태로 서 평가할 수 있다.

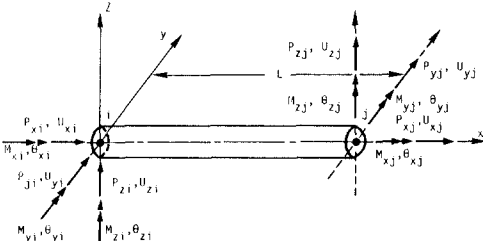


Fig.1 Tubular element in structural analysis

골조구조부재에 소성판절기구가 형성되는 형식은 축압축력을 지배적으로 받아 전체좌굴이 발생하여 처짐이 급격히 증가함으로써 소성판절기구가 형성되는 경우와 굽힘모우멘트를 지배적으로 받아 처

음부터 처짐이 서서히 증가하여 소성의 진전과 함께 소성판절기구가 형성되는 경우가 있다<sup>4)</sup>.

본 연구에서는 이들을 정적하중하에서 구조파손이 발생하는 기준으로 생각한다.

Fig.2에는 골조부재의 좌굴강도 및 전단면 소성강도의 상관관계를 나타내고 있다. 좌굴강도 상관관계의 경우 Kishi 등<sup>1)</sup>은 Fig.2의 일점사선과 같은 상당히 안전측의 기준을 채용하고 있으나, 본 연구에서는 정도를 높이기 위해 실제상태에 가까운 실선으로 나타낸 기준을 채용하기로 한다.

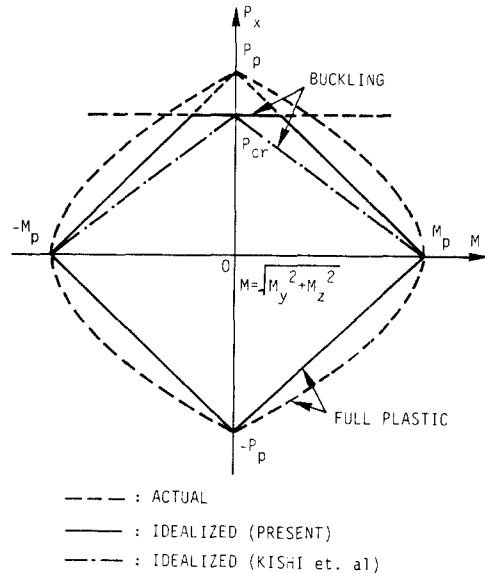


Fig.2 Ultimate strength interaction relationship of tubular members

따라서, 좌굴파손에 대한 구조부재  $i$ 의 안전 여유  $Z_{Bi}$ 는 Fig.2의 실선으로 표시되는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_{Bi} = P_{cri} - P_{xi} \quad (4)$$

여기서,  $P_{xi}$  : 부재  $i$ 에 작용하는 축압축력

$P_{cri}$  : 부재  $i$ 의 좌굴하중 ( $= A_i \cdot \sigma_{cri}$ )

$\sigma_{cri}$  : 부재  $i$ 의 좌굴응력

$A_i$  : 부재  $i$ 의 단면적

그런데, 좌굴이 발생하기까지 부재단면에 작용하는 축압축력의 크기는 부재길이에 걸쳐 거의 일정하다고 볼 수 있으므로 식(4)는 주요단면  $k$ 에 대해서도 동일한 형태로 적용할 수 있다. 즉, 식(4)의 하중  $P$ 를 응력  $\sigma$ 로 치환하면,

$$Z_{Bk} = \sigma_{erk} - \sigma_{xk} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_{xk}$  : 주요단면  $k$ 의 축압축응력으로서의 하중의 함수

$\sigma_{crh}$ : 주요단면  $h$ 의 좌굴응력으로서 재료특성(항복응력 등)과 초기부정(초기 처짐 등)의 함수

식(5)의 안전여유  $Z_{Bh}$ 가 양(+)<sup>1)</sup>의 값을 갖는 경우는 구조부재에 좌굴이 발생하지 않으나  $Z_{Bh}$ 가 0 혹은 음(-)의 값을 가지게 되면 구조부재는 좌굴하게 된다. 따라서, 주요단면의 좌굴발생조건은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$Z_{Bh} = \sigma_{crh} - \sigma_{xh} \leq 0 \quad (6)$$

다음으로, 주요단면의 소성발생에 대한 안전여유는 Fig. 2의 검선으로 표시되는 비선형의 상관관계 대신에 안전측에서 선형적으로 평가할 수 있는 직선으로 구성된 직선을 기준으로 하면 다음 식이 얻어진다.

$$Z_{ph} = 1 - |P_{xh}|/P_{ph} - M_h/M_{ph} \quad (7)$$

여기서,

$P_{xh}$ : 주요단면  $h$ 의 축력으로서 외하중의 함수

$P_{ph}$ : 주요단면  $h$ 의 전단면 소성축력으로서 재료특성(항복응력 등)의 함수

$M_h$ : 주요단면  $h$ 의 등가굽힘모멘트로서 외하중의 함수 ( $= \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$ )

$M_{ph}$ : 주요단면  $h$ 의 전단면 소성굽힘모멘트로서 재료특성(항복응력 등)의 함수

주요단면  $h$ 의 소성은 식(7)의 안전여유  $Z_{ph}$ 가 0 혹은 음(-)의 값을 갖게 될 때 발생한다. 즉,

$$Z_{ph} = 1 - |P_{xh}|/P_{ph} - M_h/M_{ph} \leq 0 \quad (8)$$

식(6) 및 (8)의 축력 및 굽힘모멘트는 구조물의 일생중에 발생하는 외하중의 등가 최대기대치  $\{F\}$ 에 대해 Matrix법에 의한 구조해석을 통하여 쉽게 계산할 수 있다(Fig.1 참조).

## (2) 파손확률

구조물의 하중과 강도에 대한 확률 변수로는 부재의 재료특성(항복 응력 등), 초기부정(초기 처짐 등), 외하중 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 식(6) 및 (8)의 파손조건에 있어서 항복 응력  $\sigma_y$ , 초기처짐  $w_0$ , 외하중  $\{F\}$  등을 불확정적인 확률변수로 채용하기로 한다. 따라서, 식(6) 및 (8)의 안전여유  $Z_{Bh}$  및  $Z_{ph}$ 는 확률변수의 함수로서 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} Z_{Bh} &= f_B(\sigma_y, w_0, \{F\}) \\ Z_{ph} &= f_p(\sigma_y, \{F\}) \end{aligned} \quad (9)$$

이 경우, 주요단면  $h$ 의 파손확률  $P_{fh}$ 는 식(6) 및 (8)의 합사상의 발생확률로서 평가할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{fh} &= \text{Prob}[Z_{Bh} \leq 0] \cup (Z_{ph} \leq 0) \\ & \quad (h = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)의 계산에 있어서  $Z_{Bh}$ 와  $Z_{ph}$ 는 종속적인 관계에 있으므로 동시확률계산을 수행해야 하지만 동시 확률계산은 일반적으로 대단히 복잡하므로 안전측의 결과(파손확률치의 상한)를 주는 다음 식과 같이 평가하는 것이 편리하다.<sup>1)</sup>

$$P_{fh} \cong \text{Prob}[(Z_{Bh} \leq 0)] + \text{Prob}[(Z_{ph} \leq 0)] \quad (11)$$

그런데, 부재의 재료특성이나 초기부정 및 외하중 등의 통계적인 성질을 엄밀하게 해석하기에는 실제적으로 충분한 data가 정립되어 있지 않은 실정이므로, 본 연구에서는 각 확률변수의 분포를 정규분포로 가정한다.

따라서, 식(6) 및 (8)의 파손조건도 정규분포로 되며, 파손확률 계산도 계산이 비교적 용이한 MV-FOSM법(mean-value first-order second-moment method)<sup>2)</sup>을 적용할 수 있다.

먼저, 확률변수인 항복응력  $\sigma_y$ , 초기처짐  $w_0$  및 외하중  $\{F\}$ 에 대한 평균치와 분산을 각각  $\bar{\sigma}_y$  및  $S_{\sigma_y}^2$ ,  $w_0$  및  $S_{w_0}^2$ ,  $\{F\}$  및  $S_{F_i}^2$ 라 하면 식(6) 및 (8)의 안전여유  $Z_{Bh}$ 와  $Z_{ph}$ 의 평균값  $\mu_{Z_{Bh}}$ ,  $\mu_{Z_{ph}}$  및 분산  $\sigma_{Z_{Bh}}^2$ ,  $\sigma_{Z_{ph}}^2$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \mu_{Z_{Bh}} &= f_B(\bar{\sigma}_y, \bar{w}_0, \{F\}) \\ \mu_{Z_{ph}} &= f_p(\bar{\sigma}_y, \{F\}) \\ \sigma_{Z_{Bh}}^2 &= \left(\frac{\partial f_B}{\partial \sigma_y}\right) \bar{\sigma}_y S_{\sigma_y}^2 + \left(\frac{\partial f_B}{\partial w_0}\right) \bar{w}_0 S_{w_0}^2 \\ & \quad + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial f_B}{\partial F_i}\right) F_i \left(\frac{\partial f_B}{\partial F_j}\right) F_j S_{F_i} S_{F_j} \rho_{F_i F_j} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Z_{ph}}^2 &= \left(\frac{\partial f_p}{\partial \sigma_y}\right) \bar{\sigma}_y S_{\sigma_y}^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial f_p}{\partial F_i}\right) F_i \\ & \quad \cdot \left(\frac{\partial f_p}{\partial F_j}\right) F_j S_{F_i} S_{F_j} \rho_{F_i F_j} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $\rho_{F_i F_j}$ : 외하중  $F_i, F_j$ 의 상관관계를 나타내는 정수

$S_{F_i}$ : 외하중  $F_i$ 의 표준편차

$k$ : 외하중 (집중하중)의 수

주요단면의 안전여유  $Z_{Bh}$  및  $Z_{ph}$ 는 정규분포로 가정하고 있으므로 밀도함수는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} f(Z_{Bh}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{Z_{Bh}}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z_{Bh} - \mu_{Z_{Bh}}}{\sigma_{Z_{Bh}}}\right)^2\right] \\ f(Z_{ph}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{Z_{ph}}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z_{ph} - \mu_{Z_{ph}}}{\sigma_{Z_{ph}}}\right)^2\right] \end{aligned} \quad (13)$$

또한, 식(13)을 평균치 0, 분산 1을 갖는 표준정규분포함수로 치환하면,

$$f(\xi_{Z_{Bh}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \xi_{Z_{Bh}}^2\right)$$

$$f(\xi_{Z_{ph}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi_{Z_{ph}}^2\right) \quad (14)$$

여기서,  $\xi_{Z_{Bh}} = \frac{Z_{Bh} - \mu_{Z_{Bh}}}{\sigma_{Z_{Bh}}}$

$$\xi_{Z_{ph}} = \frac{Z_{ph} - \mu_{Z_{ph}}}{\sigma_{Z_{ph}}}$$

따라서, 파손확률  $P_{fh}$ 는 식(11)에 식(14)를 적용하여 다음 식과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_{fh} &\cong \text{Prob}[Z_{Bh} \leq 0] + \text{Prob}[Z_{ph} \leq 0] \\ &= \Phi\left(-\frac{\mu_{Z_{Bh}}}{\sigma_{Z_{Bh}}}\right) + \Phi\left(-\frac{\mu_{Z_{ph}}}{\sigma_{Z_{ph}}}\right) \\ &= \Phi(-\beta_{Z_{Bh}}) + \Phi(-\beta_{Z_{ph}}) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $\Phi$ : 표준정규분포함수

$$\beta_{Z_{Bh}} \left( = \frac{\mu_{Z_{Bh}}}{\sigma_{Z_{Bh}}} \right), \quad \beta_{Z_{ph}} \left( = \frac{\mu_{Z_{ph}}}{\sigma_{Z_{ph}}} \right) : \text{안전성지수 (safety index)}$$

### 2.3.2 반복하중하의 피로파손 모델

해양구조물과 같은 골조구조물에 있어서 피로파손은 과량하중에 의한 변동응력이 반복적으로 작용하여 응력이 집중되는 구조부재간의 접속부 등에서 주로 발생한다. 피로파손이 발생하면 구조전체적으로 안정성을 상실하여 붕괴될 위험성이 있다.

따라서, 피로파손에 대한 구조물의 안정성을 확보하기 위하여는 설계단계에서 불규칙적인 변동하중이나 구조부재의 기하형상, 용접형상, 결합 및 공차오차 등의 불확정 요인을 고려한 구조물의 신뢰성을 검토하여야 한다.

일반적으로 불규칙적인 반복하중을 받는 구조물의 피로강도는 피로파손의 발생, 진전 및 파단의 3단계로 나누어 평가할 수 있다. 이 중에서, 피로파손의 발생은 구조부재 재료에 대한 피로강도 실험결과(S-N곡선)를 이용한 피로해석에 의해 검토할 수 있으며, 피로파손의 진전 및 파단의 해석에는 파괴역학적인 수법이 필요하다.

그러나, 실제 설계단계에서의 피로강도는 피로파손이 발생하는 시점을 기준으로 하는 것이 보통이다. 따라서, 본 연구에서도 구조부재의 피로파손은 주요단면에만 주목하여 피로파손이 발생하는 시점을 기준으로 평가한다.

또한, 구조물의 피로강도는 기본적으로 사용기간 중의 전 변동하중을 대상으로 평가되어야 하며, 높은 정도의 피로강도를 추정하기 위하여는 구조물이 설치되는 장소의 장기적인 변동하중 관측 data를 직접 계산에 적용시킬 필요가 있다.

그러나, 일반적으로는 data가 충분하지 못한 경우

가 많으며, data가 있더라도 통계해석에 방대한 계산시간을 필요로 하므로 실제 설계에 적용하기에는 대단히 곤란한 경우가 많다.

이 같은 관점에서 본 연구에서는 신뢰성이론에 입각한 골조구조물의 피로파손 확률을 간단하게 평가할 수 있는 간이 계산모델을 제안한다. 즉, 사용기간중에 작용하는 전 변동하중을 대상으로 각각의 응력진폭에 대한 누적피로 손상도를 평가하는 대신에 간단하면서도 안전측의 결과를 주는 평가기준으로서 구조물이 전 생애중에 받는 최대 기대치만을 대상으로, 이때의 변동응력이 동일한 진폭으로 작용한다고 가정하여 피로손상도를 평가하기로 한다.

#### (1) 주요단면의 변동응력

주요단면의 변동응력은 외하중의 최대기대치에 대한 구조해석 결과로서 얻어지는 공칭응력에 응력집중계수를 곱하여 평가하기로 한다.

$$\sigma_{ah} = SCF \cdot \sigma_{nh} \quad (16)$$

여기서,  $\sigma_{ah}$ : 주요단면  $h$ 의 변동응력

$SCF$ : 구조부재의 기하형상, 용접형상, 결합, 공차오차 등에 의존하는 응력집중계수

$\sigma_{nh}$ : 구조해석 결과로서 얻어지는 공칭응력으로서, 골조부재의 경우, 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{nh} = \sqrt{\left(\frac{|P_x|}{A} + \frac{M}{Z}\right)^2 + 3\left(\frac{|P_y|}{A} + \frac{|P_z|}{A}\right)^2} \quad (17)$$

여기서,  $P_x$ : 축력

$P_y, P_z$ : 전단력

$M$ : 등가 굽힘모멘트(=  $\sqrt{M_y^2 + M_z^2}$ )

$A$ : 구조부재의 단면적

$Z$ : 단면계수

식(17)의 응력집중계수는 골조구조 부재의 접합부에 대한 피로강도 실험결과로부터 얻을 수 있다.

#### (2) S-N 곡선

주요단면의 변동응력에 대한 피로파손 발생수명을 평가하기 위하여는 S-N 곡선이 필요하며, 피로파손 확률을 계산하기 위하여는 S-N 곡선을 수식화하는 것이 편리하다.

본 연구에서는 S-N 곡선을 다음 식과 같이 나타내기로 한다.

$$N_{cr} = a \cdot \sigma_{ah}^b \quad (18)$$

여기서,  $\sigma_{ah}$ : 주요단면  $h$ 의 변동응력 진폭

$N_{cr}$ :  $\sigma_{ah}$ 에 대한 피로파손 발생수명

$a, b$  : 실험결과로부터 얻어지는 정수

### (3) 피로파손조건

본 연구에서는 앞에서도 설명한 바와 같이 변동하중의 최대기대치에만 주목하여, 이 때의 변동응력이 동일한 진폭으로 작용한다고 가정하여 피로파손확률을 평가한다.

따라서, 구조물의 전 생애중에 발생하는 최대기대치의 발생회수를  $N$ 이라 하면 주요단면  $h$ 의 피로손상도  $D_h$ 는 Miner의 법칙을 적용하여 다음 식과 같이 된다.

$$D_h = N/N_{crh} \quad (19)$$

여기서,  $N$  : 변동하중의 최대기대치의 발생회수

$N_{crh}$  : 주요단면  $h$ 의 피로파손 발생수명 (식 (18)로부터 계산)

$D_h$  : 주요단면  $h$ 의 피로손상도

일반적으로 식(19)에서 계산되는 피로손상도  $D_h$ 의 값이 허용손상도  $D_{ah}$ 에 도달하여 피로파손이 발생한다. 여기서,  $D_{ah}$ 는 평균값이 1이지만 불확실성을 가진 확률변수이다.

또한, 식(19)는 확정적인 응력집중계수를 적용하여 계산한 응력진폭에 대한 결과이지만, 실제로는 응력집중계수도 불확실성을 가진 확률변수이므로 이의 영향을 고려하기 위해 Akita<sup>3)</sup>가 선체구조부재를 대상으로 적용한 방법을 이용하여 식(19)를 다음과 같이 변형시킨다.

$$D_h = K_s \cdot N/N_{crh} \quad (20)$$

식(20)의  $K_s$ 는 응력집중계수의 불확실성을 나타내는 계수로서, 응력집중계수가 엄밀히 계산된 경우는  $K_s=1.0$ 의 값을 채용하고, 불확실성이 클 때는  $K_s > 1.0$ 의 값을 채용하게 되며, 이때는  $K_s$ 의 분산도 크게 된다.

다음으로, 선체구조 부재의 피로수명 분포는 대수정규분포에 가깝다는 것이 알려져 있으므로, 본 연구에서는 선체구조 부재와 비슷한 변동하중 상태에 있는 골조부재의 피로수명 분포도 대수정규 분포를 하고 있다고 가정한다.

따라서, 주요단면  $h$ 의 피로파손에 대한 안전여유  $Z_{fh}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{fh} = \ln(D_{ah}/D_h) = \ln D_{ah} - \ln D_h \quad (21)$$

식(21)의 안전여유  $Z_{fh}$ 가 0 혹은 음(-)의 값을 가질 때 피로파손이 발생한다. 즉, 주요단면  $h$ 의 피로파손조건은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} Z_{fh} &= \ln D_{ah} - \ln D_h \\ &= \ln D_{ah} + \ln N_{crh} - \ln N - \ln K_s \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

### (4) 피로파손확률

식(22)의 피로파손조건에 있어서 불확정성을 가진 확률변수는  $D_{ah}$ 와  $K_s$ 이다. 따라서,  $x_1 = \ln D_{ah}$ ,  $x_2 = \ln K_s$ 라 두면 식(22)는 다음과 같이 된다.

$$Z_{fh} = x_1 - x_2 + \ln N_{crh} - \ln N \quad (23)$$

$D_{ah}$ 와  $K_s$ 를 대수정규 분포라고 가정하면  $x_1$ 과  $x_2$ 는 정규 분포로 되며,  $Z_{fh}$ 도 정규 분포로 된다.  $x_1$ 과  $x_2$ 의 평균과 분산을 각각  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  및  $S_{x_1}^2, S_{x_2}^2$ 라 하면,  $Z_{fh}$ 의 평균  $\mu_{Z_{fh}}$ 와 분산  $\sigma_{Z_{fh}}^2$ 는 MVFOSM법을 적용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \mu_{Z_{fh}} &= \bar{x}_1 - \bar{x}_2 + \ln N_{crh} - \ln N \\ \sigma_{Z_{fh}}^2 &= S_{x_1}^2 + S_{x_2}^2 \end{aligned} \quad (24)$$

$Z_{fh}$ 의 분포는 정규분포이므로 피로파손확률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_{fFh} &= \text{Prob}[Z_{fh} \leq 0] \\ &= \Phi\left(-\frac{\mu_{Z_{fh}}}{\sigma_{Z_{fh}}}\right) \\ &= \Phi(-\beta_{Z_{fh}}) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서,  $\Phi$  : 표준정규 분포함수

$$\beta_{Z_{fh}} \left( = \frac{\mu_{Z_{fh}}}{\sigma_{Z_{fh}}} \right) : \text{안전성지수(safety index)}$$

## 2.4 제약조건

본 연구에서 제안하는 최적 신뢰성 설계에 있어서의 제약조건은 정적하중에 대한 주요단면의 좌굴 및 소성파손 확률과 반복하중에 대한 주요단면의 피로파손확률이 각각의 허용파손확률을 초과하지 않도록 하는 것이다. 즉,

$$\begin{aligned} P_{fh} &\leq P_{fah} \\ P_{fFh} &\leq P_{fFah} \end{aligned} \quad (26)$$

$$(h = 1, 2, \dots, m)$$

여기서  $P_{fh}$  : 주요단면  $h$ 의 좌굴 및 소성파손 확률

$P_{fah}$  : 주요단면  $h$ 의 좌굴 및 소성파손에 대한 허용파손확률

$P_{fFh}$  : 주요단면  $h$ 의 피로파손확률

$P_{fFah}$  : 주요단면  $h$ 의 피로파손에 대한 허용파손확률

$m$  : 주요단면의 수

## 2.5 최적화 해법

본 연구에서의 최적화 문제는 제약조건이 존재하며, 목적함수와 제약조건이 비선형인 비선형최적화 문제에 해당한다. 본 연구에서는 목적함수의 최적화를 위한 해법으로서 Rosenbrock<sup>5)</sup>을 적용하였다.

2.6 재해석법의 적용

본 연구에서는 최적화 과정에서의 반복적인 구조 해석에 필요한 계산시간을 단축시키기 위해 기저축소 변위 행렬을 이용한 기저축소재해석법<sup>1)</sup>을 적용하였다.

즉, 설계변수의 수정에 따른 반복구조 해석 과정에 있어서 새로 구해지는 절점변위 벡타 {U}는 설계변수가 수정되기 전에 구해진 s개의 독립적인 벡타 {U\*<sub>1</sub>}, {U\*<sub>2</sub>}, ..., {U\*<sub>s</sub>}의 1차식으로 근사시킬 수 있다고 가정한다.

$$\{U\} \cong \{Y_1\}\{U^*_1\} + \{Y_2\}\{U^*_2\} + \dots + \{Y_s\}\{U^*_s\} \quad (27)$$

여기서, {Y} = [{Y<sub>1</sub>} {Y<sub>2</sub>} ... {Y<sub>s</sub>}]<sup>T</sup> : 미지계수

또한, s는 설계변수의 수(n)와 비슷한 크기의 수로서 절점변위 자유도(m)에 비해 매우 작은 수이다 (s << m).

식(27)을 행렬표시하면,

$$\{U\} \cong \{U^*_B\} \{Y\} \quad (28)$$

여기서, {U\*<sub>B</sub>} = [{U\*<sub>1</sub>} ... {U\*<sub>s</sub>}]<sup>T</sup>

Matrix 구조해석에서의 절점력과 절점변위의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{matrix} m \times 1 & m \times m & m \times 1 \\ \{F\} = [K] \{U\} \end{matrix} \quad (29)$$

여기서, {F} : 절점외력 벡타

[K] : 강성 행렬

{U} : 절점변위 벡타

m : 절점변위의 자유도

식(29)에 식(28)을 대입하고 왼쪽으로부터 {U\*<sub>B</sub>}<sup>T</sup>를 곱하면,

$$\begin{matrix} s \times m & m \times 1 & s \times m & m \times m & m \times s & s \times 1 \\ \{U^*_B\}^T \{F\} = \{U^*_B\}^T [K] \{U^*_B\} \{Y\} \end{matrix} \quad (30)$$

식(30)은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{matrix} s \times 1 & s \times s & s \times 1 \\ \{F_R\} = [K_R] \{Y\} \end{matrix} \quad (31)$$

여기서, {F<sub>R</sub>} = {U\*<sub>B</sub>}<sup>T</sup>{F}

$$[K_R] = \{U^*_B\}^T [K] \{U^*_B\}$$

s << m의 경우에는 식(29)의 큰 차원을 가진 연립 방정식을 풀어서 엄밀해를 계산하는 대신에 {Y}에 대한 식(31)의 작은 차원의 방정식을 풀어서 이것을 식(28)에 대입하여 근사적인 변위 벡타 {U}를 계산할 수 있다.

기저 축소법에서는 식(27)의 독립적인 벡타(기저

벡타)를 어떻게 선택할 것인가가 기본적인 문제로 대두된다. 이 문제에 대해서는 몇가지의 방법이 제안되어 있으나 본 연구에서는 유용한 방법으로 알려져 있는 다음과 같은 방법을 적용하였다. 즉, 기저 벡타의 수를 s = n + 1개로 설정하고, 초기설계치에 대하여 구한 변위 벡타 {U}와 각각의 설계변수 X<sub>i</sub>에 대한 변위 벡타의 Taylor 급수 전개 1차 근사식 값을 각각 1개의 기저벡타로 채용하기로 한다.

$$\{U^*_1\} = \{U^*\} : \text{설계변수의 초기치에 대한 변위}$$

$$\{U^*_2\} = \partial\{U\}/\partial X_1 : \text{설계변수 } X_1 \text{만의 수정에 대한 변위 벡타 변화량}$$

...

$$\{U^*_s\} = \partial\{U\}/\partial X_n : \text{설계변수 } X_n \text{만의 수정에 대한 변위 벡타의 변화량} \quad (32)$$

한편, 기저축소법에서는 변위 벡타를 설계변수에 대해 Taylor 급수 전개하여 1차 근사식까지만을 채용하고, 이것을 기준으로 기저벡타를 설정하므로 강성방정식이 설계변수에 대해 비선형인 경우, 설계변수의 수정량이 커지면 오차가 크게 발생할 가능성이 있다.

본 연구에서는 이 같은 문제점을 해결하기 위해 반복 구조해석 과정에서 설계변수의 수정량이 임의의 한계치를 초과하면 기저벡타를 재계산하여 구조 해석결과의 정도가 저하되지 않도록 하였다.

3. 수치계산에 및 고찰

이상에서 개발한 최적 신뢰성 설계법을 바탕으로 컴퓨터 프로그램을 작성하였으며, 여기서는 수치계산을 통하여 그 정도와 유용성을 보이기로 한다.

본 계산예에서는 파이프 부재로 구성된 2차원 및 3차원 골조구조물을 대상으로 하였으며, 설계변수로는 부재직경을 채용하였고, 식(3)의 구조중량 W와 식(6) 및 (8)의 부재 좌굴응력 σ<sub>cr</sub>, 전단면 소성 축력 P<sub>p</sub>, 전단면 소성모멘트 M<sub>p</sub> 및 식(18)의 S-N 곡선은 각각 다음 식을 채용하였다.

$$W = \pi \sum_{i=1}^n \rho_i L_i D_i^2 (\eta_i - 1) / \eta_i^2 \quad (33)$$

여기서, W : 구조중량

ρ<sub>i</sub> : 부재 i의 밀도

L<sub>i</sub> : 부재 i의 직경

t<sub>i</sub> : 부재 i의 판두께

η<sub>i</sub> = D<sub>i</sub>/t<sub>i</sub>

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_{eq} - \sqrt{\sigma_{eq}^2 - 4\sigma_E \sigma_y^2}}{2} \quad (34)$$

여기서,  $\sigma_{cr}$  : 부재의 좌굴응력

$$\sigma_{eq} = \sigma_y + \sigma_E + \frac{\sigma_E}{\gamma} w_0$$

$\sigma_y$  : 항복 응력

$\sigma_E$  : Euler의 탄성 좌굴응력

$$\gamma = \sqrt{I/A}$$

$I$  : 단면 2차 모우먼트

$A$  : 단면적 ( $= \pi D^2(\eta - 1)/\eta^2$ )

$E$  : 탄성계수

$w_0$  : 초기치짐

$$P_p = \pi D^2(\eta - 1)/\eta^2 \cdot \sigma_y \quad (35)$$

여기서,  $P_p$  : 전단면 소성 축력

$$M_p = \frac{D^2 t}{3} \left\{ 2 - \frac{2t}{D} + \left( 1 - \frac{2t}{D} \right)^2 \right\} \cdot \sigma_y \quad (36)$$

여기서,  $M_p$  : 전단면 소성굽힘 모우먼트

$$N_{cr} = 3.72 \times 10^{14} \sigma_{ah}^{-4.1^{(8)}} \quad (37)$$

여기서,  $N_{cr}$  : 피로 파손 발생수명

$\sigma_{ah}$  : 변동응력의 진폭

### 3.1 2차원 골조구조물

Kishi 등<sup>1)</sup>은 2차원 골조구조물에 대하여 정적하중하의 좌굴 및 소성파손만을 고려한 최적신뢰성 설계법을 개발하고, 이것을 좌우 내칭구조인 Fig.3의 평면 골조구조물에 적용하였다.

여기서는, 본 연구에서 개발한 설계법의 정도를 확인하기 위해, 먼저 Kishi 등의 설계결과와 비교하기로 한다. 설계변수로는 구조대형성을 고려하여 Fig.5과 같이 2종류의 적경을 선택하였다.

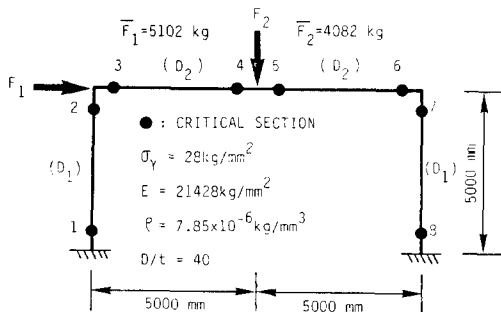


Fig.3 Example plane frame structure

Table 1에는 임의 크기의 허용파손 확률하에서 부재 재료의 항복 응력 및 외하중의 변동계수에 대한 최적 설계결과를 비교하고 있다.

Table 1로부터 부재재료의 항복응력이나 외하중의

Table 1 Effects of the coefficients of variation for example plane frame structure

COV <sub>σ<sub>y</sub></sub>	COV <sub>F<sub>k</sub></sub>	Kishi et. al			Present		
		D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	W (kg)	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	W (kg)
0.05	0.15	286	268	923	285	268	918
	0.3	310	288	1073	309	287	1068
	0.6	350	322	1360	348	320	1345
0.1	0.15	302	282	1026	299	282	1015
	0.3	322	300	1160	320	298	1151
	0.6	360	330	1438	358	328	1418

$$\sigma_{F_1 F_2} = 0, \bar{w}_0/\gamma = 0, COV_{w_0} = 0, P_{f_{ch}} = 10^{-3}$$

변동계수가 커질수록(즉, 불확정성이 증가할수록) 구조중량이 증가하고 있으며, 확률변수의 불확정성이 구조물의 신뢰성에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

또한, 비교한 결과는 서로 잘 일치하고 있으며 본 연구에서의 최적설계치가 Kishi 등의 결과에 비해 약간 작은 값을 나타내고 있으나, 이것은 앞서서도 설명한 바와 같이 Kishi 등은 좌굴 파손조건을 Fig.2의 일점사선과 같은 안전측의 기준을 채용하고 있기 때문이다.

다음으로, 허용파손 확률의 영향을 검토하기 위해 부재 재료의 항복 응력 및 외하중의 변동계수를 일정하게 유지시키고, 허용파손 확률을 변화시킨 경우의 설계결과를 Table 2 및 Fig.4에 나타내고 있다.

Table 2 Effect of the allowable buckling and plasticity failure probability for example plane frame structure

COV <sub>σ<sub>y</sub></sub>	COV <sub>F<sub>k</sub></sub>	P <sub>f<sub>ch</sub></sub>	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	W(kg)
0.1	0.3	10 <sup>-3</sup>	320.2	298.2	1150.5
		10 <sup>-4</sup>	341.5	309.9	1278.5
		10 <sup>-5</sup>	351.5	319.9	1358.0
	0.6	10 <sup>-6</sup>	361.5	329.9	1439.9
		10 <sup>-7</sup>	371.5	339.9	1524.3
		10 <sup>-8</sup>	381.5	349.9	1611.0
0.2	0.3	10 <sup>-3</sup>	389.9	389.9	1828.1
		10 <sup>-4</sup>	428.2	421.4	2169.8
		10 <sup>-5</sup>	551.5	519.9	3453.4
	0.6	10 <sup>-6</sup>	401.9	401.9	1941.9
		10 <sup>-7</sup>	459.9	459.9	2543.3
		10 <sup>-8</sup>	551.9	551.9	3661.9

$$\sigma_{F_1 F_2} = 0, \bar{w}_0/\gamma = 0, COV_{w_0} = 0$$



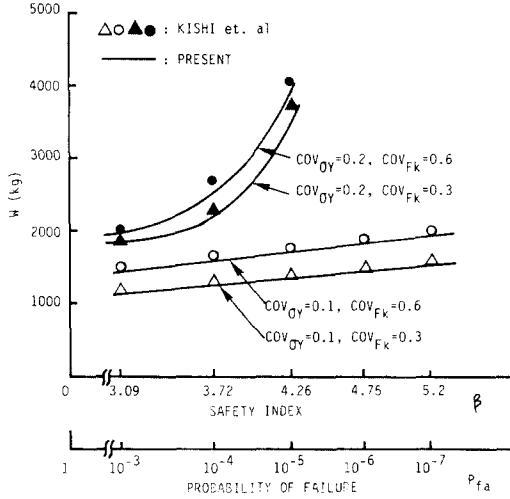


Fig. 4 Effect of the allowable buckling and plasticity failure probability for example plane frame structure

Table 3 Effects of the correlation coefficients between the loads for example plane frame structure

$\sigma_{F_1 F_2} COV_{F_k}$	Kishi et. al			Present			
	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$W$ (Kg)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$W$ (kg)	
0.0	0.15	302	282	1026	299	282	1015
	0.3	322	300	1160	320	298	1151
	0.6	360	330	1438	358	328	1418
0.5	0.15	302	286	1045	301	284	1032
	0.3	326	308	1203	324	306	1195
	0.6	366	344	1523	364	342	1501
0.1	0.15	304	290	1063	303	289	1050
	0.3	326	314	1241	326	312	1224
	0.6	372	356	1595	371	348	1554

$COV_{\sigma_y} = 0.1, \bar{w}_0/\gamma = 0, COV_{w_0} = 0, P_{f_{ah}} = 10^{-3}$

Table 4. Effects of the initial deflections of the members for example plane frame structure

$\bar{w}_0/\gamma COV_{F_k}$	kishi et. al			Present			
	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$W$ (kg)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$W$ (kg)	
0.0	0.15	302	282	1026	299	282	1015
	0.3	322	300	1160	320	298	1151
	0.6	360	330	1438	358	328	1418
0.05	0.15	304	286	1049	302	284	1034
	0.3	324	302	1178	322	300	1165
	0.6	362	332	1452	360	330	1435
0.1	0.15	308	290	1076	305	287	1056
	0.3	326	304	1199	323	301	1174
	0.6	364	334	1469	361	331	1444

$COV_{\sigma_y} = 0.1, P_{F_1 F_2} = 0, COV_{w_0} = 1, P_{f_{ah}} = 10^{-3}$

이들 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 허용 파손 확률치가 작아질수록 구조중량은 증가하며, 특히 항복 응력의 불확정성이 증가하면 구조중량이 급격히 증가한다. 이 경우도 양자는 잘 일치하고 있으며, 위에서 설명한 바와 같은 이유에서 Kishi 등의 설계 결과가 약간 높은 값을 나타내고 있다.

다음으로, Table 3 및 4에는 각각 외하중의 상관관계와 부재의 초기치짐이 구조중량에 미치는 영향을 나타내고 있다.

외하중의 상관관계가 커질수록, 또한 부재의 초기치짐이 커질수록 동일한 파손확률하에서는 구조중량이 증가한다.

이들 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서의 최적 설계치는 Kishi 등의 결과와 비교하여 전반적으로 약간 낮은 값으로서 잘 일치하고 있다.

또한, 본 계산에 소요된 계산시간은 소형 컴퓨터 PRIME 750으로 약 20~30초 정도였다.

### 3.2 3차원 골조구조물

다음으로, Fig. 5에 나타내는 바와 같은 간단한 3차원 골조 구조물에 대하여 정적하중에 대한 좌굴 및 소성파손과 반복하중에 대한 피로파손을 동시에 고려한 최적 신뢰성 설계를 수행한다.

설계변수는 구조물의 대칭성을 고려하여 Fig. 5에 나타내는 부재직경  $D_1, D_2$ 를 선택하였으며, 좌굴 및 소성파손에 대한 허용 파손확률은  $P_{f_{ah}} = 10^{-3}$ 으로 가정하였다.

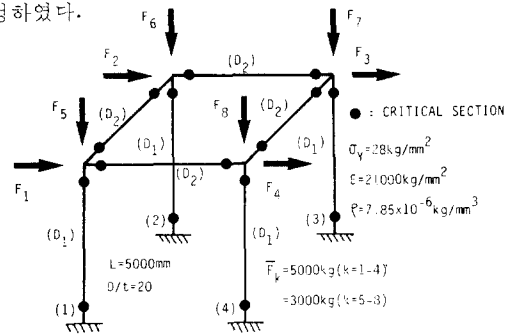
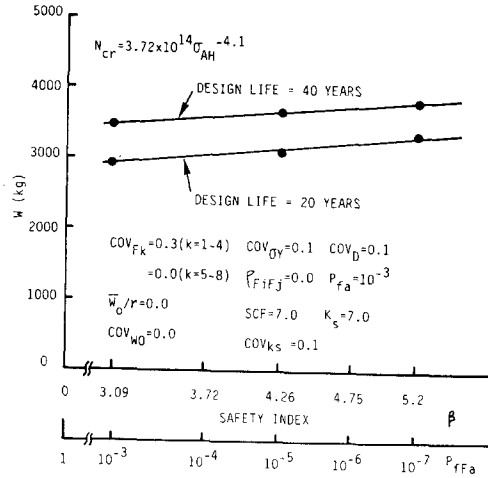


Fig. 5 Example 3-D frame structure

또한, S-N 곡선은  $D_n V$ 가 제한한 식<sup>8)</sup>을 채용하였다.

Fig. 6에는 구조물의 사용기간을 20년( $N=10^8$ ,  $N$ : 외하중 최대기대치의 발생회수)과 40년( $N=2 \times 10^8$ )으로 생각하였을 때의 주요단면의 피로 파손에 대한 허용 파손확률의 변화가 구조중량에 미치는 영향을



**Fig. 6** Effect of the allowable fatigue failure probability for example 3-D frame structure (allowable buckling and plasticity failure probability,  $P_{fa} = 10^{-3}$ )

나타내고 있다.

Fig. 6으로부터 피로파손에 대한 허용 파손 확률치나 사용기간의 증가와 함께 구조중량이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

또한, Table 5에는 지점부분의 주요 단면에 대한 피로 파손확률치를 나타내고 있으며, 그 외의 주요 단면에 있어서의 피로 파손확률은  $10^{-12}$  정도였다.

이것으로부터 본 예제의 경우, 굽힘 모멘트가

크게 작용하는 지점부분의 피로 파손확률이 가장 크게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.

한편, 본 예제의 경우, 소요된 계산시간은 소형컴퓨터 PRIME 750으로 약 100초였다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 3차원 골조구조물을 대상으로 정적 하중에 대한 좌굴 및 소성파손과 반복 하중에 대한 피로파손을 동시에 고려한 최적 신뢰성 설계법을 제안하였으며, 반복 구조해석에 소요되는 계산시간을 단축시키기 위하여 기저 축소에 의한 재해석법을 적용하였다.

또한, 개발한 설계법을 바탕으로 컴퓨터 프로그램을 작성하고 계산예를 통하여 본 연구에서 제안한 설계법의 정도와 유용성을 확인하였다.

끝으로, 본 연구는 1987년도 과학기술처가 지원한 기본 과제 연구비(연구책임자: 백점기)에 의해 수행된 연구성과의 일부임을 밝혀 둔다.

### 참 고 문 헌

- 1) Kishi, M. et. al, "Optimum Design of Frame Structure Under Constraint on Failure Probabilities", J.SNAJ, Vol.155, 1984(in Japanese)
- 2) Mansour, A. E. "Probabilistic Design Concepts

**Table 5** Effect of the allowable fatigue failure probability for example 3-D frame structure

Design life (year)	$P_{fa}$	$P_{f1}$	$P_{f2}$	$P_{f3}$	$P_{f4}$	$P_{fF1}$	
20	$10^{-3}$	$5.90 \times 10^{-6}$	$5.90 \times 10^{-6}$	$5.90 \times 10^{-6}$	$5.90 \times 10^{-6}$	$1.00 \times 10^{-4}$	
	$10^{-5}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$7.46 \times 10^{-6}$	
	$10^{-7}$	$7.87 \times 10^{-8}$	$7.87 \times 10^{-8}$	$7.87 \times 10^{-8}$	$7.87 \times 10^{-8}$	$6.66 \times 10^{-3}$	
40	$10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-8}$	$2.27 \times 10^{-8}$	$2.27 \times 10^{-8}$	$2.27 \times 10^{-8}$	$1.87 \times 10^{-5}$	
	$10^{-5}$	$1.54 \times 10^{-9}$	$1.54 \times 10^{-9}$	$1.54 \times 10^{-9}$	$1.54 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^{-7}$	
	$10^{-7}$	$3.18 \times 10^{-10}$	$3.18 \times 10^{-10}$	$3.18 \times 10^{-10}$	$3.18 \times 10^{-10}$	$8.92 \times 10^{-9}$	
Design life (year)	$P_{fa}$	$P_{fF2}$	$P_{fF3}$	$P_{fF4}$	$D_1(mm)$	$D_2(mm)$	$W(kg)$
20	$10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	353.5	19.0	2936.1
	$10^{-5}$	$7.46 \times 10^{-6}$	$7.46 \times 10^{-6}$	$7.46 \times 10^{-6}$	361.4	17.9	3066.7
	$10^{-7}$	$6.66 \times 10^{-3}$	$7.05 \times 10^{-3}$	$7.05 \times 10^{-3}$	373.9	62.9	3368.8
40	$10^{-3}$	$1.87 \times 10^{-5}$	$1.95 \times 10^{-5}$	$1.95 \times 10^{-5}$	379.9	67.9	3490.1
	$10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-7}$	$1.99 \times 10^{-7}$	$1.99 \times 10^{-7}$	393.9	31.9	3658.9
	$10^{-7}$	$8.92 \times 10^{-9}$	$8.92 \times 10^{-9}$	$8.92 \times 10^{-9}$	402.2	29.4	3810.1

- in Ship Structural Safety and Reliability”,  
Trans. SNAME, 1972
- 3) Akita, Y., “Reliability Analysis of Ship Strength (5th Report)—Failure Probability and Allowable Stress in Fatigue”, J. SNAJ, Vol. 159, 1986 (in Japanese)
  - 4) 백접기, “Ultimate Strength Analysis of Ship Structures by Idealized Structural Unit Method,” Doctor Dissertation, Osaka University, 1987
  - 5) Rosenbrock, H.H., “An Automatic Method for Finding, The Greatest or Least Value of a Function”, Computer Journal, Vol.3, 1960
  - 6) Kirsch, U., “Optimum Structural Design-Concepts, Methods and Applications”, McGraw-Hill, 1983
  - 7) Timosenko, S.T and Gere, J.M., “Theory of Elastic Stability”, McGraw-Hill, New York, 1961
  - 8) Det Norske Veritas, “Rules for Classification of Mobile Offshore Units”, 1982
  - 9) 백접기, “골조 구조물의 최적 신뢰성 설계기법 개발”, 한국기계연구소, UCE360-1037.D, 1988



(p.9에서 계속)

**4. SEA COAST DEVEVELOPMENT**

- Ocean Structures
- Civil Engineering Machinery
- Cargo Handling Systems
- Anti-Scour System
- Mooring Anchor
- Vessels (Pusher, Barge, Drillship)
- Jack-Up Rig
- Robots
- Hydroextractor Pumps
- Marine Engines
- Breakwater
- Related Technology
- Others

**5. ENVIRONMENTAL SAFETY**

- Waste Disposal Facilities and Equipment
- Anti-Sea Pollution Equipment and Cleaning-Up Operations
- Surface Effect Vehicles
- Oil Skimming Vessels
- Related Technology
- Others

**6. ELECTRONIC EQUIPMENT**

- Cables
- Lighting Equipment
- Underwater TV/Underwater Camera System
- Satellite Communication Data/Collection System
- Computer Communication System
- Others

**7. RELATED MARINE EQUIPMENT**

- Pump

- Heating and Air-Conditioning Systems
- Heat Exchangers
- Hydraulic/Air Pressure Equipment
- Control Instrumentation
- Connectors
- Valves and Fittings
- Others

**8. RAW MATERIALS AND ASSOCIATED PRODUCTS**

- Production Materials
- Chemical Materials
- Safety Equipment/Diving Equipment
- Corrosion Protection
- Lifeboats. Lifesaving Capsules
- Umbilicals

**9. SERVICES**

- Coastal Surveys
- Ocean-Bed Surveys
- Ocean Research
- Weather Research
- Insurance
- Consultants
- Transportation
- Journals
- Public Relations
- Maritime and Offshore Structure Maintenance

**10. OTHERS**

- Pressure Resistant Buoyancy Material
- Anticorrosive and Antifouling Technology
- Others