



2020

---

스프링잉을 고려한  
피로강도 평가 지침



2020

---

스프링잉을 고려한  
피로강도 평가 지침

## “스프링잉을 고려한 피로강도 평가 지침”의 적용

이 지침은 별도로 명시하는 것을 제외하고 2020년 7월 1일 이후 건조 계약되는 선박에 적용한다.

# 차 례

제 1 장 일반사항 .....	1
제 1 절 일반사항 .....	1
제 2 절 평가 절차 .....	1
제 3 절 적재 및 운항 조건 .....	2
제 4 절 유탄성 시뮬레이션 .....	2
제 2 장 선형 스프링잉 평가 .....	5
제 1 절 응력전달함수 및 응답 스펙트럼의 계산 .....	5
제 2 절 직접평가법에 의한 선형 스프링잉 평가 .....	6
제 3 절 비교평가법에 의한 선형 스프링잉 평가 .....	10
제 3 장 비선형 스프링잉 평가 .....	13
제 1 절 직접평가법에 의한 비선형 스프링잉 평가 .....	13
제 2 절 비교평가법에 의한 비선형 스프링잉 평가 .....	16
제 3 절 종굽힘 모멘트가 주요한 저속 비대선의 비선형 스프링잉 평가 .....	17

# 제 1 장 일반사항

## 제 1 절 일반사항

### 101. 적용

1. 이 지침은 파랑중 선박의 진동응답을 고려한 선체구조의 피로강도를 평가하기 위한 것으로서, 신청자의 요청에 의해 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3 선체구조의 피로강도평가 지침에 추가하여 검토한다.
2. 스프링잉은 파랑하중과 선체 거더의 공진으로 인해 발생하는 선박의 진동응답으로 선체 거더의 고유진동수가 낮은 값을 갖거나 세장비가 큰 선박 또는 대형선박의 경우 스프링잉의 영향이 크다. 휘핑은 슬래밍과 같은 충격 하중이 선박에 작용하여 발생하는 진동 응답으로서 선박의 속도가 빠른 경우 혹은 선수미 형상에 따라 휘핑의 영향이 크다. 휘핑은 극한하중 관점에서도 검토가 이루어지나, 이 지침에서는 피로강도평가 관점에서 휘핑의 영향을 검토한다.
3. 이 지침에서는 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 이용한 진동응답 해석 및 응력 계산에 의한 피로강도평가 방법을 다루고 있으나, 모형시험을 통해 선체 종굽힘 모멘트 및 비틀림 모멘트에 미치는 진동 응답을 계측한 후 응력집중계수를 적용하여 구조 상세 부위의 피로강도평가를 수행하는 방법에도 적용된다.
4. 이 지침에서 제시하는 절차 이외의 방법으로 파랑중 진동응답을 고려한 피로강도를 검토하고자 할 경우, 이론 및 프로그램 검증에 관한 충분한 자료를 우리 선급에 제출하여 승인받아야 한다.

### 102. 선급부호

이 지침에 따라 검토되어 적합한 경우 신청자(선주 또는 건조자)의 요청에 의해 선급부호 “SeaTrust(SPR1)”, “SeaTrust(SPR2)”를 부여한다.

## 제 2 절 평가 절차

### 201. 일반사항

1. 스프링잉을 고려한 피로강도 평가 절차는 그림 1.1과 같이 선형 스프링잉 평가 절차와 휘핑을 고려한 비선형 스프링잉 평가 절차로 나눌 수 있다.
2. 선형 스프링잉 평가의 경우에는 “SeaTrust(SPR1)”, 비선형 스프링잉 평가의 경우에는 “SeaTrust(SPR2)”의 부기부호를 각각 부여한다.



그림 1.1 스프링잉을 고려한 피로강도 평가 절차

## 202. 선형 스프링잉 평가

1. 파랑 중 선박의 유탄성 시뮬레이션을 통해 얻어진 선체 응력전달함수를 이용하여 주파수 영역에서 파랑과 선체의 공진이 피로강도에 미치는 영향을 평가한다.
2. 선형 스프링잉 평가의 경우, 선박 운동의 비선형성 및 휘핑의 영향을 검토할 수는 없으나, 주파수 영역에서의 계산이 이루어지므로 해석에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다.

## 203. 비선형 스프링잉 평가

1. 선박 운동의 비선형성 및 휘핑을 고려하며, 시간영역에서의 시뮬레이션이 이루어져야 한다.
2. 비교적 실제 운항 상태와 유사하게 시뮬레이션 할 수 있으나, 장기 해석 시 계산 시간이 많이 소요되므로 시뮬레이션 대상 단기 해상 조건을 적절히 한정하여 계산 시간을 줄일 수 있다.

## 204. 피로손상도 계산 방법

1. 선형 및 비선형 스프링잉 평가에는 각각 직접평가법 또는 비교평가법을 사용한다.
2. 직접평가법은 유탄성 시뮬레이션에서 얻은 응력 결과를 사용하여 피로손상도를 직접 계산하는 방법이다. 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항에서 정의하고 있는 선형 스펙트랄 피로해석 방법 등과 해석의 절차가 유사하다.
3. 비교평가법은 선박의 유탄성을 고려한 시뮬레이션 결과와 유탄성 효과를 고려하지 않은 결과를 비교하여 두 결과에 대한 상관계수를 산정하고, 기존 스펙트랄 피로해석 방법 등에 의한 피로손상도 결과에 이 상관계수를 곱하는 방법이다.

## 제 3 절 평가 조건

### 301. 적재 조건

1. 컨테이너선의 경우 운항비율이 가장 높을 것으로 예상되는 적재 조건을 기준으로 검토한다.
2. 산적화물선, 광석운반선, 유조선과 같이 만재 및 평형수 적재 조건으로 운항하는 경우, 이들 두 가지 적재 조건의 운항비율을 고려하여 검토한다.
3. 선적·하역 및 수리 등을 위해 선박이 운항하지 않는 기간의 비율은 피로 손상도 계산에서 제외한다.

### 302. 속도

1. 선박의 운동 시뮬레이션을 위한 속도는 설계 속도의 2/3를 사용한다.
2. 유의 파고에 따른 선박의 속도 정보가 있는 경우에는 해당 정보를 사용할 수 있다.

### 303. 평가 해석 및 설계 피로 수명

평가 해석 및 설계 피로 수명은 선형하여 수행된 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3 선체구조의 피로강도평가 지침에 의한 피로강도평가 조건을 따른다.

## 제 4 절 유탄성 시뮬레이션

### 401. 일반사항

1. 선체의 유탄성 문제는 유체-구조 연성해석을 수행하여 해를 구하는 것이다.
2. 유체영역은 3차원 포텐셜 유동을 가정하여 경계요소법으로 그 해를 구할 수 있다. 비선형성은 실제의 접수면적에 대해 Froude-Krylov 및 유체 정역학적 힘(복원력)을 고려하는 약비선형 접근법(weakly nonlinear approach)을 기반으로 검토할 수 있다.

## 402. 시뮬레이션 조건

### 1. 파 입사각

모든 파 입사각을 고려하여 30° 이하의 등간격으로 입사각을 나누어 계산을 수행한다. 이 때, 선박의 항로 정보가 있는 경우에는 예상되는 파 입사각의 발현확률을 사용할 수 있으며, 그렇지 않은 경우에는 파 입사각의 발현확률은 동일한 것으로 가정한다.

### 2. 파 주파수 (wave frequency)

선형 스프링링 평가에 있어 파 주파수의 개수는 응력전달함수의 주파수 특성이 적절히 표현될 수 있도록 충분히 많아 야 하며, 고 주파수가 최소한 선체의 1차 종굽힘 모드를 포함하는 주파수 범위에서 최소 40개 이상으로 파 주파수를 나누어 계산을 수행한다. 비선형 스프링링 시뮬레이션을 위하여 단기 해상 상태의 불규칙파를 구성하는 경우, 고려하는 범위의 파 주파수를 최소 150개 이상의 규칙파로 나누어 불규칙파를 생성한다.

### 3. 시뮬레이션 시간 간격

시뮬레이션 시간 간격은 0.025초 이하의 시간 간격을 권장 한다.

### 4. 시뮬레이션 시간

비선형 스프링링 평가를 위한 유탄성 시뮬레이션은 각 단기 해상 별로 3시간 이상을 권장한다.

### 5. 점성 횡동요 감쇠

점성 횡동요(roll) 감쇠 계수는 모형시험 또는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통해 구할 수 있으며, 정보가 없는 경우 임계감쇠값의 5%의 값을 사용할 수 있다.

## 403. 유체모델

1. 선체를 구성하는 패널은 충분한 개수의 패널로 구성하여야 한다. Rankine Source 법을 이용하는 경우 그림 1.2와 같이 반쪽 모델을 4,000개 이상 개수의 패널로 구성하는 것을 권장하며 유체의 자유표면을 구성하는 패널은 자유표면의 반경이 선박 길이의 3배 이상 될 수 있도록 적절히 생성한다.
2. 비선형 해석을 위한 패널 모델의 범위는 선박의 강력갑판 높이까지 모델링한다.

## 404. 슬래밍 하중 계산

1. 휘핑에 의한 선체 거더 진동응답을 확인하기 위하여 슬래밍 하중 계산을 수행한다.
2. 슬래밍 하중은 3차원 효과를 고려하여 산정하거나, GWM(Generalized Wagner Model) 등을 이용한 2차원 단면으로부터의 산정 방법을 사용할 수 있다. 그리고 파랑 입사각에 따른 슬래밍 하중 산정이 제한되는 경우에는 선수, 선미 파 조건에서만 슬래밍 하중 계산을 수행할 수 있다.

## 405. 피로강도 평가 구조 모델

### 1. 선박의 구조 모델

선박의 3차원 구조모델은 선박 전체를 표현할 수 있어야 하며, 모델을 구성하는 요소의 크기는 최소 거더 또는 늑판 간격 이하여야 한다. 2차 지지부재의 보 요소의 경우 굽힘 강성을 가지는 보 요소를 사용하여야 한다.

### 2. 피로강도 평가 부위의 모델

평가 대상 구조 부재는 가능한 4절점 판 요소로 모델링하며 응력집중부에서는 판 두께  $t$  정도의 사각형 요소( $t \times t$ )를 사용하여 모델링한다. 용접비드는 유한요소 모델에 포함시키지 않으며 표면응력(surface stress) 분포를 구하기 위하여 강성이 거의 없는 가상의 보(fictitious beam)를 오프셋(offset)을 고려하여 부착하고 구조해석을 수행할 수 있다. 이 경우 부식 추가를 포함한 치수(as-built scantling)를 사용하고 전단강성을 고려하여야 한다.

### 3. 질량 모델링

컨테이너와 같은 화물 질량은 가능한 무게중심을 고려하며 강성에 영향을 미치지 않는 요소(예: Nastran RBE3 요소)를 사용하여 모델링 하는 것을 권장하며, 이외의 질량물은 무게중심을 고려하여 적절하게 모델링 되어야 한다.

### 4. 구조감쇠

컨테이너선의 경우 구조감쇠에 대한 자료가 없다면, 임계 감쇠값의 2% 값을 사용한다. 이외의 선박에 대해서는 관련 자료를 우리 선급에 제출해야 한다.

406. 응력 계산 방법

시간영역에서 유탄성 시뮬레이션을 수행하는 경우, 전선 구조해석 모델과 같이 자유도가 큰 유한요소모델의 구조해석을 매 시간 간격마다 엄격하게 수행하는 것은 매우 큰 전산 자원을 필요로 한다. 따라서 구조해석에 소요되는 시간을 줄이기 위한 방법을 사용할 수 있으며, 응력 계산에는 각각 모드중첩법과 하중변환법을 사용한다.

1. 모드중첩법

- (1) 선체 진동의 고유모드에 대해 각각 구한 응답값을 관심을 갖는 수의 모드까지 중첩하여 선체 구조에 작용하는 진동 응답의 응력 값을 계산하는 방법이다.
- (2) 선체의 고유 진동 모드를 구한 후 유탄성 시뮬레이션에 사용할 고유모드를 선택한다.
- (3) 선택한 고유 모드에 대한 피로손상도 평가 대상 요소의 응력 변환 행렬을 구한다.
- (4) 시간영역의 시뮬레이션을 통하여 매 시간 간격에서 각 고유 모드의 응답을 계산한 후 이에 (3)호에서 계산한 단위 크기의 고유모드에 대한 응력 변환 행렬에 곱한 후 중첩한다.
- (5) 일반적으로 중첩하는 고유 모드의 수가 많으면 구조 응답의 정확도를 높일 수 있으나, 고차 모드의 경우에는 국부 변형 모드를 포함하여 구조 응답 계산에 영향을 줄 수 있으므로 고유 모드를 확인하여 중첩에 사용될 모드의 수를 결정한다.

2. 하중변환법

- (1) 이는 선박 길이 방향 위치에서 횡단면에 작용하는 선체 거더 하중을 유탄성 시뮬레이션으로 구한 후, 이 하중을 전선 구조해석 모델의 응력 변환 행렬에 곱하여 선박의 진동 응답을 구하는 방법이다.
- (2) 대상선박의 길이 방향에서 선정된 횡단면에 단위 크기의 하중 성분을 작용시켜 피로손상도 평가 대상 구조 요소의 응력을 계산한다.
- (3) 시간영역의 시뮬레이션을 통하여 매 시간 간격에서 선박 길이 방향 위치에서 횡단면에 작용하는 하중 성분의 크기를 계산한다. 계산하지 않는 선박 길이 방향 횡단면에 작용하는 하중 성분 크기는 보간하여 추정한다.
- (4) (3)에서 구한 길이 방향 위치에서의 하중 성분 별 크기를 (2)에서 구한 단위 하중 크기에 대한 응력 변환 행렬에 곱하고 중첩하여 대상 구조 요소의 응력을 계산한다.
- (5) 하중변환법은 보 모델과 같이 단순한 구조 해석 모델에 대한 유탄성 시뮬레이션에 편리하게 적용할 수 있으나, 선체 거더 하중 이외의 파랑 압력 또는 관성력이 주요한 평가 위치에서의 응력 평가에는 불확실성이 있으므로 이에 주의하여 적용한다.

3. 집중응력의 계산

피로손상도 계산을 위한 집중응력은 상기 1항 또는 2항에서 구한 해석 결과를 이용하여 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 2항의 절차를 적용하여 산정한다. ↓

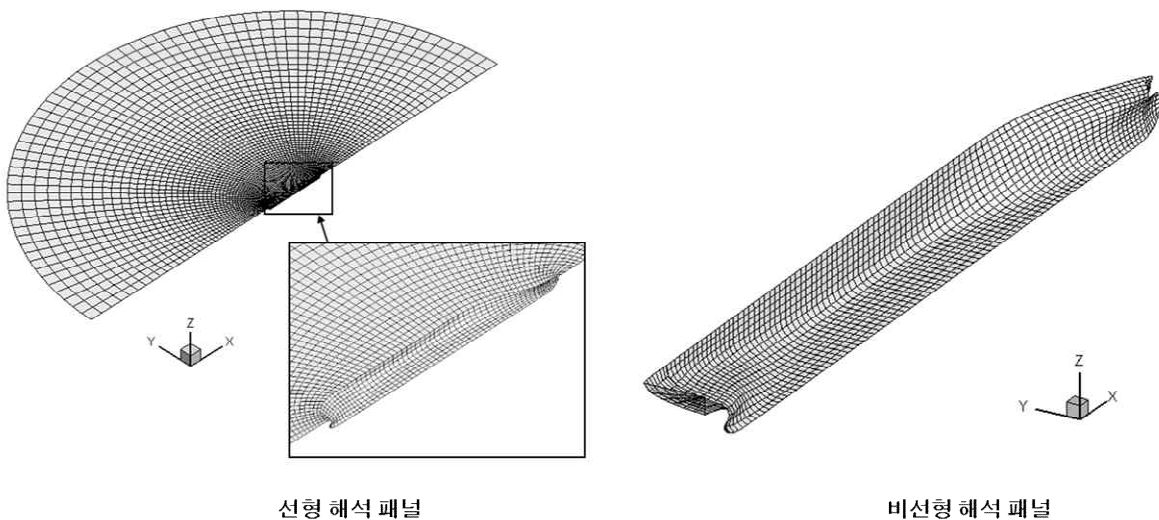


그림 1.2 시간영역해석을 위한 유체모델 예



## 제 2 장 선형 스프링링 평가

### 제 1 절 응력전달함수 및 응답 스펙트럼의 계산

#### 101. 응력전달함수

1. 파 입사각  $\theta$ , 파 주파수(wave frequency)  $\omega$ 에 대한 응력전달함수는  $H(\omega|\theta)$ 로 표현한다.
2. 응력전달함수의 계산을 위한 유탄성 시뮬레이션을 시간영역에서 수행하는 경우, 불규칙파 조건에서 얻어진 시계열 응력 자료를 푸리에 변환하여 규칙파의 응력전달함수를 계산할 수 있다.

#### 102. 파랑 스펙트럼

파랑 스펙트럼  $S_\eta(\omega|H_s, T_z)$ 은 다음과 같이 정의 되는 Modified Pierson-Moskowitz 파 스펙트럼을 사용한다.

$$S_\eta(\omega|H_s, T_z) = \frac{H_s^2}{4\pi} \left( \frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-5} \exp \left[ -\frac{1}{\pi} \left( \frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-4} \right]$$

$\omega$  : 파 주파수 (rad/s)

$H_s$  : 유의 파고 (m)

$T_z$  : 평균 제로 업 크로싱(zero up-crossing) 파랑 주기(s)

#### 103. 응답 스펙트럼

1. 파 주파수 영역에서 단기 해상상태의 응답 스펙트럼  $S(\omega|H_s, T_z, \theta)$ 은 두께 효과를 고려한 응력전달함수 및 파랑 스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 산정한다.

$$S(\omega|H_s, T_z, \theta) = (f_{thick} |H(\omega|\theta)|)^2 S_\eta(\omega|H_s, T_z)$$

$f_{thick}$  : 두께효과를 고려하기 위한 수정 계수로서 다음 식과 같이 계산한다.

$$f_{thick} = \left( \frac{t}{22} \right)^n, \quad (t > 22 \text{ 경우})$$

$$f_{thick} = 1, \quad (t \leq 22 \text{ 경우})$$

$t$  : 피로강도평가 대상 부재의 두께(mm)

$n$  : 선급 및 강선규칙 13편 9장 3절의 표 1에 따른다.

2. 조우 주파수(encounter frequency) 및 단파정파(short-crested waves)의 영향을 고려한 응답 스펙트럼의  $n$ 차 모멘트는 다음과 같이 계산 된다.

$$m_n = \int_{\omega} \sum_{\theta_0-90^\circ}^{\theta_0+90^\circ} f_s(\theta) \left| \omega - \frac{\omega^2 V}{g} \cos\theta \right|^n S(\omega | H_s, T_z, \theta)$$

$f_s(\theta) = k \cos^2(\theta)$ 로 정의 되는 퍼짐 함수(spreading function)를 사용한다. 다만,  $k$ 는 다음의 값으로 한다.

$$\sum_{\theta_0-90^\circ}^{\theta_0+90^\circ} f_s(\theta) = 1$$

$\theta_0$  : 주요 파 입사각

$\theta$  : 주요 파 입사각 주위의 상대적 퍼짐(relative spreading)

$V$  : 선박의 속도( $m/s$ )

$g$  : 중력 가속도로써  $9.81 m/s^2$ 을 사용한다.

## 제 2 절 직접평가법에 의한 선형 스프링잉 평가

### 201. 직접평가법에 의한 선형 스프링잉 평가 절차

1. 직접평가법에 의한 선형 스프링잉 평가 절차는 그림 2.1과 같다.
2. 103.으로부터 구한 응답 스펙트럼을 이용하여 202.에 따라 협대역 가정을 통한 단기 해상상태의 피로손상도를 계산한다.
3. 2항에서 구한 피로손상도에 광대역 수정 계수를 곱하여 단기 해상상태의 피로손상도를 계산한다.
4. 3항에서 구한 단기 해상상태의 피로손상도를 누적 계산하여 장기 누적 피로손상도  $D_{L-SPMI}$ 을 구하고, 이를 선형 스프링잉을 고려한 피로손상도  $D_{SPMI}$ 으로 정의한다.

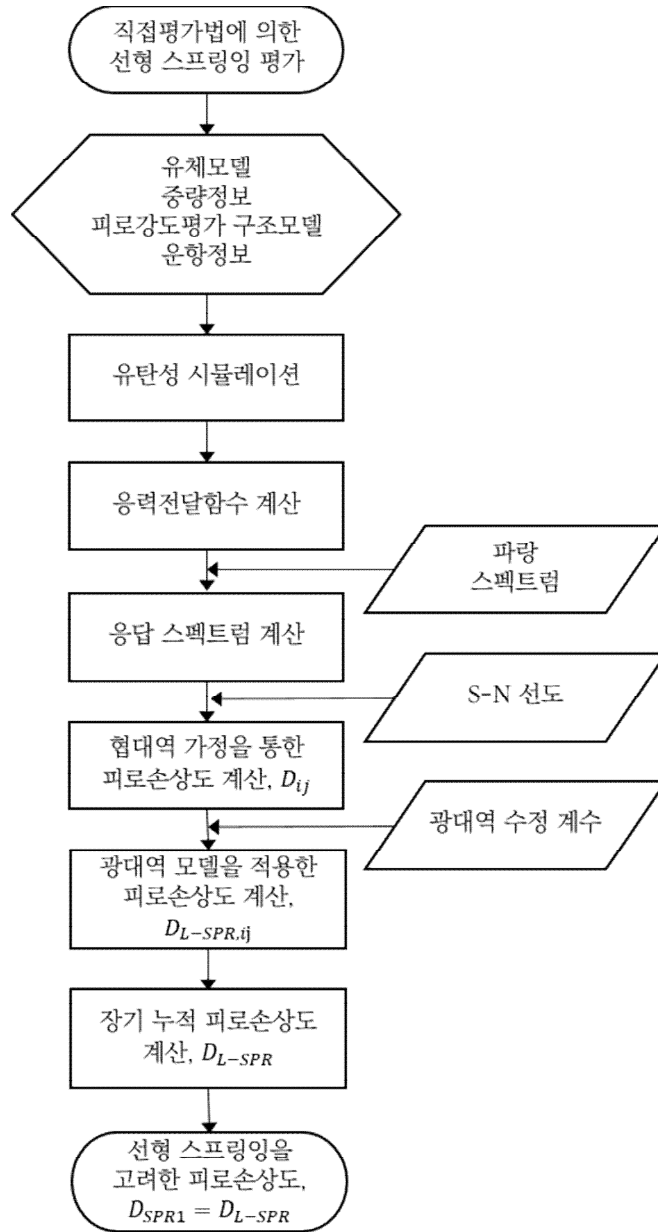


그림 2.1 직접평가법에 의한 선형 스프링 평가 절차

## 202. 협대역 가정을 통한 단기 해상상태의 피로 손상도 계산

선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항에서 기술하는 단기 해석적 방법(short-term closed-form method)을 이용한 피로손상의 산정은 다음 식에 따른다.

$$D_{ij} = 2^{\frac{3m}{2}} \frac{n_T}{K_2} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \mu_{ij} r_{ij} p_{ij} m_{0ij}^{\frac{m}{2}}$$

여기서  $(i, j)$ 는 파랑빈도자료의 유의파고  $H_s$ 와 파주기  $T_z$ 로 정의되는 단기 해상상태의 번호이다.

$K_2, m$ : S-N 선도의 수명축 절편과 역 기울기로 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 표 1과 같다.

$n_T$ : 선박의 수명 동안 받는 총 응력 사이클 수로서 다음 식에 따른다.

$$n_T = f T$$

$f$ : 평균 주파수로서 다음 식에 따른다.

$$f = \sum_i \sum_j p_{ij} f_{ij}$$

$p_{ij}$ :  $(i, j)$  번째 단기 해상상태의 발현확률

$f_{ij}$ : 응력응답의 영점통과(zero up-crossing) 주파수로서 다음 식에 따른다.

$$f_{ij} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{2ij}}{m_{0ij}}}$$

$m_{nij}$ :  $(i, j)$  번째 단기 해상상태에서 응답스펙트럼의  $n$ 차 모멘트로서, 103.의 2항에 따른다.

$T$ : 선박의 피로수명(sec)

$\Gamma(x)$ : 완전 감마함수

$\mu_{ij}$ : 이중(Bi-linear) S-N 선도의 고려를 위한 계수로서 다음 식과 같다.

$$\mu_{ij} = 1 - \frac{\gamma\left(\frac{m}{2} + 1, t_{ij}\right) - \frac{1}{t_{ij}} \gamma\left(\frac{m+2}{2} + 1, t_{ij}\right)}{\Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right)}$$

$\gamma(a, x)$ : 불완전 감마함수

$$t_{ij} = \frac{s_7^2}{8m_{0ij}}$$

$s_7$ : S-N 선도에서  $N = 10^7$ 에서의 응력 범위

$r_{ij}$ : 주파수와 평균주파수의 비로 다음 식과 같다.

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{f}$$

## 203. 광대역 모델을 적용한 단기 해상상태의 피로 손상도 계산

1. 스프링링을 고려한 유탄성 응력 응답은 고주파수 영역에서의 응답이 포함되어 광대역 분포를 보인다. 광대역 응력 응답 분포를 고려하는 여러 방법 중 이 지침에서는 Benasciutti-Tovo의 광대역 모델을 적용한다. 다른 광대역 모델을 사용하고자 하는 경우에는 배경 및 타당성을 입증하는 자료를 선급에 제출하여야 한다.
2. 협대역 응답 스펙트럼으로 가정하여 구한 피로손상  $D_{ij}$ 에 광대역 스펙트럼 수정 계수를 적용하여 다음 식과 같이 피로손상  $D_{L-SPR,ij}$ 를 구한다.

$$D_{L-SPR,ij} = \rho_{ij} D_{ij}$$

$\rho_{ij}$  :  $(i, j)$ 번째 단기 해상상태에 대한 광대역 스펙트럼 수정 계수로서 다음 식과 같이 계산될 수 있다.

$$\rho_{ij} = b_{ij} + (1 - b_{ij}) \alpha_{2ij}^{m-1}$$

$\alpha_{1ij}$ ,  $\alpha_{2ij}$  : 응력 응답 스펙트럼의 대역폭 매개 변수(bandwidth parameter)로서 다음 식과 같다.

$$\alpha_{1ij} = \frac{m_{1ij}}{\sqrt{m_{0ij} m_{2ij}}}, \alpha_{2ij} = \frac{m_{2ij}}{\sqrt{m_{0ij} m_{4ij}}} \quad 0 \leq \alpha_{1ij}, \alpha_{2ij} \leq 1$$

$b_{ij}$  : 가중 함수로서 밴드폭 계수를 이용하여 다음 식과 같이 계산될 수 있다.

$$b_{ij} = \frac{(\alpha_{1ij} - \alpha_{2ij}) \left[ 1.112(1 + \alpha_{1ij} \alpha_{2ij} - (\alpha_{1ij} + \alpha_{2ij})) e^{2.11 \alpha_{2ij}} + (\alpha_{1ij} - \alpha_{2ij}) \right]}{(\alpha_{2ij} - 1)^2}$$

## 204. 광대역 모델을 적용한 장기 누적 피로손상도(long-term cumulative fatigue damage)

1. 모든 해상상태에 대한 발현확률과 입사각 및 하중조건을 고려하여 공기 중에서의 장기 누적 피로손상도를 계산하면 다음과 같다.

$$D_{L-SPR,air} = 2^{\frac{3m}{2}} \frac{n_T}{K_2} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \rho_{ijkl} \mu_{ijkl} r_{ijkl} p_{ijkl} m_{0ijkl}^{\frac{m}{2}}$$

$K_2$ ,  $m$  : 공기 중 환경 S-N 선도의 수명축 절편과 역 기울기로서 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 표 1 (a)에 따른다.

$p_{ijkl}$  : 조합 확률로서 다음과 같다.

$$p_{ijkl} = p_{ij} p_k p_l$$

$p_k$ ,  $p_l$  : 입사각( $k$ )과 하중조건( $l$ )에 대한 확률

2. 부식을 고려한 경우의 장기 누적 피로손상도는 다음 식과 같이 계산한다.

$$D_{L-SPR,cor} = 2^{\frac{3m}{2}} \frac{n_T}{K_2} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \rho_{ijkl} r_{ijkl} P_{ijkl} m_{0ijkl}^{\frac{m}{2}}$$

$K_2$ ,  $m$  : 부식 환경 S-N 선도의 수명축 절편과 역 기울기로서 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 표 1 (b)에 따른다.

평형수 탱크 내부의 부재가 부식에 대하여 유효하게 보호되어 있는 경우에는 다음과 같이 누적 피로손상도  $D_{L-SPR}$  를 계산한다.

$$D_{L-SPR} = 0.5D_{L-SPR,air} + 0.5D_{L-SPR,cor}$$

누적 피로손상도  $D_{L-SPR}$ 를 선형 스프링을 고려한 누적 피로손상도  $D_{SPR1}$ 로 정의한다.

$$D_{SPR1} = D_{L-SPR}$$

3. 피로 강도 평가 대상 부재에 대하여 선형 스프링을 고려한 피로 수명  $T_{F,SPR1}$ 은 다음 식과 같이 산정 한다.

$$T_{F,SPR1} = \frac{T_D}{D_{SPR1}}$$

$T_D$  : 피로 설계 수명 (년)

### 제 3 절 비교평가법에 의한 선형 스프링 평가

#### 301. 비교평가법에 의한 선형 스프링 평가 절차

1. 비교평가법에 의한 선형 스프링 평가 절차는 그림 2.2와 같다.
2. 204.에 따라 광대역 모델을 적용한 장기 누적 피로손상도  $D_{L-SPR}$ 을 계산한다.
3. 그림 2.2와 같이 유탄성 효과를 제외하고 응력전달함수를 구하여 강체에 대한 장기 누적 피로손상도  $D_{L-RGD}$ 를 계산한다.
4. 2항 및 3항에 따라 계산한 장기 누적 피로손상도  $D_{L-SPR}$ 와  $D_{L-RGD}$ 의 비를 구하여 이를 선형 스프링 상관계수  $f_{SPR1}$ 로 정의한다.
5. 선형 스프링 상관계수  $f_{SPR1}$ 를 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항 (5)호에 따라 장기 누적 피로손상도  $D$ 에 곱하여 선형 스프링을 고려한 피로손상도  $D_{SPR1}$ 을 계산한다.

#### 302. 유탄성 효과를 제외한 누적 피로손상도 계산

1. 유탄성 효과를 제외한 누적 피로손상도는 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항에 따라 계산한다. 피로손상도 계산에 사용되는 응력전달함수는 강체 모델에 대한 시뮬레이션으로 구하며 응력전달함수의 계산은 101.에 따른다.
2. 1항의 유탄성 효과를 제외한 응력전달함수를 계산을 위하여 강체에 대한 별도의 시뮬레이션을 수행하는 대신, 101.에 따라서 계산된 응력전달함수에서 고주파수 영역을 제거하여 사용할 수 있다. 이 때, 제거하는 고주파수 영역은 진동 응답을 제외할 수 있도록 1차 선체 고유 모드 주파수의 90%를 초과하는 주파수 영역으로 정의한다.
3. 1항 및 2항에 따라 계산한 피로손상도를  $D_{L-RGD}$ 로 정의한다.

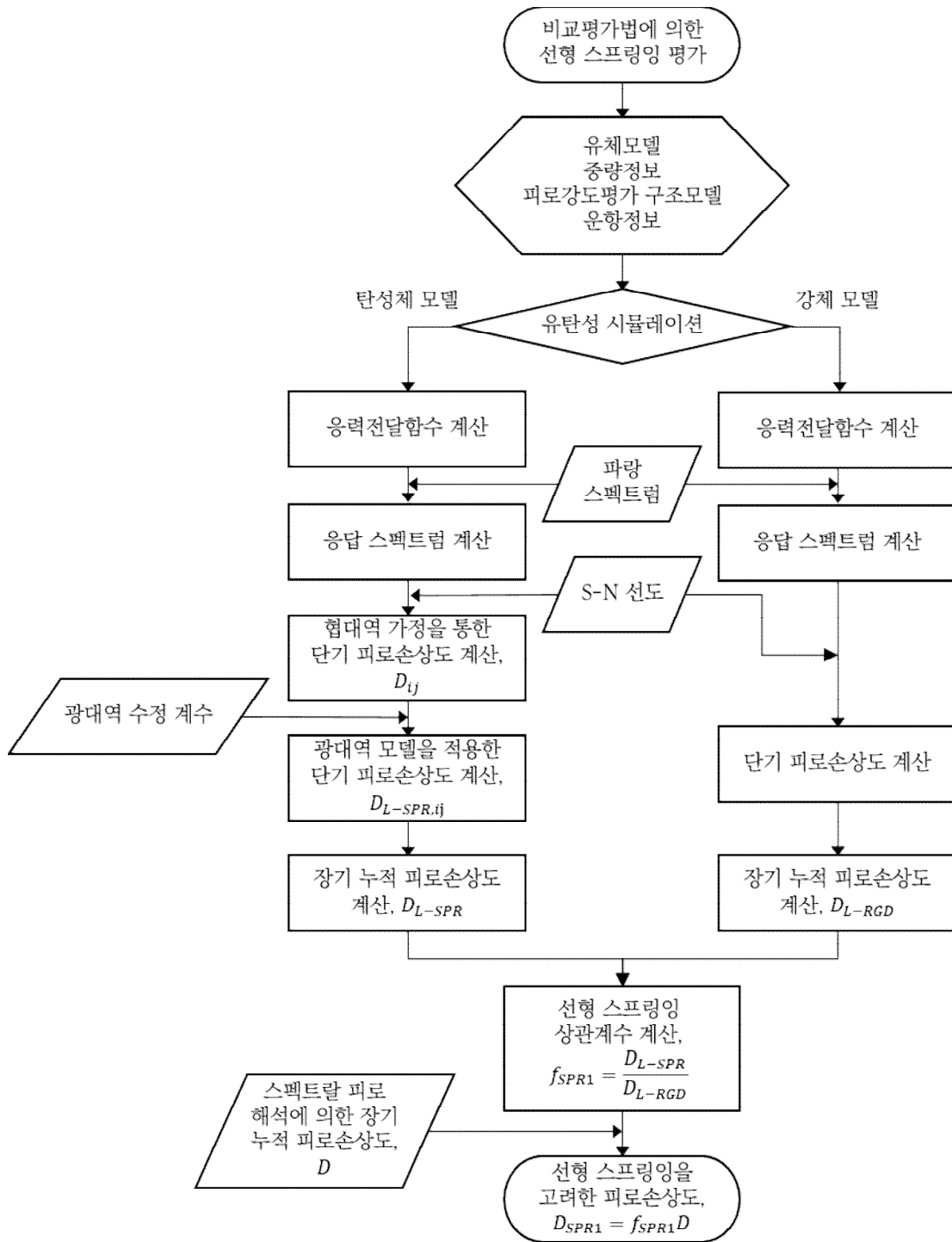


그림 2.2 비교평가법에 의한 선형 스프링 평가 절차

## 303. 선형 스프링 상관계수 및 누적 피로손상도 계산

1. 선형 스프링 상관계수  $f_{SPR1}$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$f_{SPR1} = \frac{D_{L-SPR}}{D_{L-RGD}}$$

2. 비교평가법에 의한 선형 스프링을 고려한 피로손상도  $D_{SPR1}$ 은 다음과 같다.

$$D_{SPR1} = f_{SPR1} D$$

$D$  : 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항 (5)호의 (나)에 따름.

3. 피로 강도 평가 대상 부재에 대하여 선형 스프링을 고려한 피로 수명  $T_{F,SPR1}$ 은 다음 식과 같이 산정 한다.

$$T_{F,SPR1} = \frac{T_D}{D_{SPR1}}$$

$T_D$  : 피로 설계 수명 (년) ↓



## 제 3 장 비선형 스프링링 평가

### 제 1 절 직접평가법에 의한 비선형 스프링링 평가

#### 101. 직접평가법에 의한 비선형 스프링링 평가 절차

1. 직접평가법에 의한 비선형 스프링링 평가 절차는 그림 3.1과 같다.
2. 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3 6항의 선형 스펙트랄 피로해석에 의한 피로손상도 결과로부터 피로손상에 주요한 단기해상상태를 선정한다.
3. 2항에서 선정한 주요 해상상태에서 슬래밍을 포함한 비선형 유탄성 시뮬레이션을 수행하여 응력 시계열 결과를 구한다.
4. 3항의 응력 시계열 자료를 이용하여 레인플로우 집계법을 적용하여 변동 응력의 분포를 구하고 S-N 선도 및 Palmgren-Miner의 누적손상법칙을 적용하여 단기 해상상태의 피로손상도를 계산한다.
5. 4항에서 구한 주요 해상상태의 누적 피로손상도에 전 해상상태를 고려하기 위한 수정 계수 및 단파정파 영향을 고려하기 위한 수정 계수를 적용하여 비선형 스프링링을 고려한 피로손상도를 산정한다.

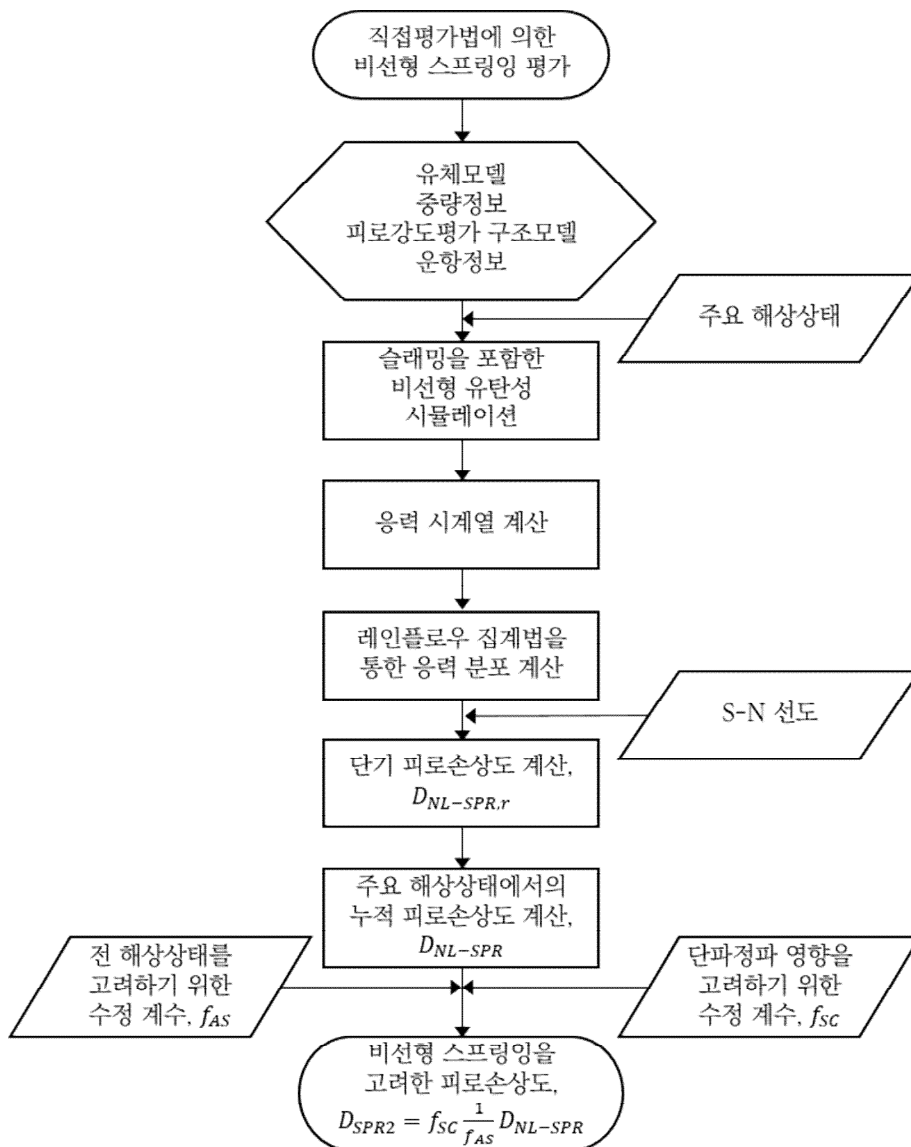


그림 3.1 직접평가법에 의한 비선형 스프링링 평가 절차

## 102. 주요 해상상태 선정

1. 선박 운동의 비선형성에 의한 스프링링 및 슬래밍에 의한 휘핑이 피로강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 시간영역에서의 시뮬레이션을 수행한다.
2. 시간영역에서의 비선형 시뮬레이션을 위해서는 긴 해석시간이 소요되기 때문에, 모든 단기 해상상태에서 직접 계산을 수행하는 것이 어렵다. 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항의 결과로부터 피로손상도에 미치는 영향이 큰 단기 해상상태들을 선별하여 계산을 수행한 후 전체 피로손상을 예측하는 방법을 적용할 수 있다.
3. 스펙트럴 피로해석에 의한 단기 해상상태의 피로손상도는 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항 (4)호의 (나)의  $D_{ij}$ 를 인용하고 입사각( $k$ ) 및 적재 조건( $l$ )을 추가한  $D_{ijkl}$ 로 정의한다. 그리고, 산정한 단기 해상상태의 피로손상도를 주어진 적재 조건에서의 장기 누적 피로손상도  $D_l$ 로 나누어 각 단기 해상상태의 피로 손상 기여도  $d_{ijkl}$ 를 계산한다.

$$d_{ijkl} = \frac{D_{ijkl}}{D_l}$$

4. 3항에서 계산한 단기 해상상태의 피로 손상 기여도를 누적하여  $C_d$ 로 정의하는 누적 기여도를 초과하는  $n$ 개의 단기 해상상태를 선정한다. 이 때, 누적 기여도  $C_d$ 는 선급과 협의하여 결정하며, 0.5 이상의 값을 권장한다. 그리고 효율적인 계산을 위하여 다음 식과 같이 피로 손상 기여도가 큰 단기 해상상태부터 정렬하여  $n$ 개의 단기 해상상태를 구할 수 있다. 이렇게 구한  $n$ 개의 단기 해상상태를 주요 해상상태로 정의한다.

$n$  : 다음 식을 만족하는 단기 해상상태의 개수

$$\sum_{r=1}^n d_r > C_d$$

$d_r$  : 피로 손상 기여도  $d_{ijkl}$ 가 큰 단기 해상상태부터 정렬하였을 때  $r$ 번째 단기 해상상태의 피로 손상 기여도

$C_d$  : 누적 기여도

## 103. 레인플로우 집계법을 이용한 피로손상도 계산

1. 스프링링 및 휘핑에 의한 진동 응답 성분이 포함된 단기 해상상태의 응력 시계열 데이터로부터 레인플로우 집계법을 이용하여 특정 응력 범위의 횡수를 계산한다.
2. 계산된 특정 응력 범위의 횡수에 다음의 Palmgren-Miner의 누적손상법칙과 단기 해상상태의 발현확률을 적용하여 피로손상도  $D_{NL-SPR,r}$ 를 계산한다.

$$D_{NL-SPR,r} = p_r \frac{T}{T_r} \sum \frac{n_i}{N_i}$$

$p_r$  :  $r$ 번째 단기 해상상태의 발현확률

$T$  : 선박의 피로수명(sec)으로서 지침 2장의 202.에 따른다.

$T_r$  :  $r$ 번째 단기 해상상태의 시뮬레이션 시간(sec)

$n_{\Delta\sigma_i}$  : 레인플로우 집계법을 이용하여 얻어진 특정 응력 범위의 횡수

$N_{\Delta\sigma_i}$  : S-N 선도에서 특정 응력 범위의 내구 횡수

3. 주요 해상상태의 누적 피로손상도  $D_{NL-SPR}$ 은 계산된 단기 해상상태의 피로손상도의 합으로 다음 식과 같이 산정한다.

$$D_{NL-SPR} = \sum_{r=1}^n D_{NL-SPR,r}$$

$n$  : 102.의 4항에서 정의한 주요 해상상태의 개수

## 104. 전 해상상태를 고려하기 위한 수정 계수 계산

전 해상상태를 고려하기 위한 수정 계수  $f_{AS}$ 는 스펙트랄 피로해석 결과에서 전 해상상태에 대한 주요 해상상태의 피로손상 기여도로서 다음 식과 같이 산정한다.

$$f_{AS} = \frac{\sum_{r=1}^n D_{l,r}}{D_l}$$

$D_{l,r}$  : 적재 조건  $l$ 에서 스펙트랄 피로해석에 의한  $r$ 번째 주요해상상태의 피로손상도

$D_l$  : 적재 조건  $l$ 에서 스펙트랄 피로해석에 의한 누적 피로손상도

## 105. 단파정파의 영향을 고려하기 위한 수정 계수 계산

비선형 스프링잉 및 휘핑을 고려하기 위한 유탄성 시뮬레이션을 장파정파(long-crested wave) 조건에서 수행하는 경우, 단파정파의 영향을 고려하기 위한 수정 계수를 구한다. 이 때, 수정 계수  $f_{SC}$ 는 다음과 같이 스펙트랄 피로해석결과에서 단파정파 및 장파정파 피로손상도 결과의 비로 다음 식과 같이 산정한다.

$$f_{SC} = \frac{D_l}{D_{l-LC}}$$

이 때, 장파정파 조건에서의 피로 손상도  $D_{l-LC}$ 는 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항 (3)호의 (다)에서 정의하는 단기 응답 스펙트럼의 면적 및 2차 모멘트에서 퍼짐 함수(spreading function)를 제외하여 다음 식과 같이 계산한다.

$$m_{0-LC} = \int_{\omega} S(\omega|H_s, T_z, \theta)$$

$$m_{2-LC} = \int_{\omega} \left| \omega - \frac{\omega^2 V}{g} \cos\theta \right|^2 S(\omega|H_s, T_z, \theta)$$

## 106. 비선형 스프링잉을 고려한 피로손상도 계산

1. 103.으로부터 계산되는 주요 해상상태에서의 피로손상도에 104. 및 105.에서 계산되는 수정 계수를 적용하여, 비선형 스프링잉을 고려한 피로 손상도  $D_{SPR2}$ 를 다음 식과 같이 산정한다.

$$D_{SPR2} = f_{SC} \frac{1}{f_{AS}} D_{NL-SPR}$$

2. 비선형 스프링잉을 고려한 피로 수명  $T_{F,SPR2}$ 은 다음과 같이 산정한다.

$$T_{F,SPR2} = \frac{T_D}{D_{SPR2}}$$

### 제 2 절 비교평가법에 의한 비선형 스프링링 평가

#### 201. 비교평가법에 의한 비선형 스프링링 평가 절차

1. 비교평가법에 의한 비선형 스프링링 평가 절차는 그림 3.2와 같다.
2. 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3 6항의 선형 스펙트랄 피로해석에 의한 피로손상도 결과로부터 피로손상에 주요한 단기해상상태를 선정한다.
3. 2항에서 선정한 주요 해상상태에서 슬래밍을 포함한 비선형 유탄성 시뮬레이션을 수행하여 응력 시계열 결과를 구한다.
4. 3항의 응력 시계열 자료에 레인플로우 집계법을 적용하여 변동 응력의 분포를 구하고 S-N 선도 및 Palmgren-Miner의 누적손상법칙을 적용하여 단기 해상상태의 피로손상도를 계산한다.
5. 4항의 단기 해상상태 피로손상도를 주요 해상상태에 대하여 누적하여 피로손상도  $D_{NL-SPR}$ 를 계산한다.

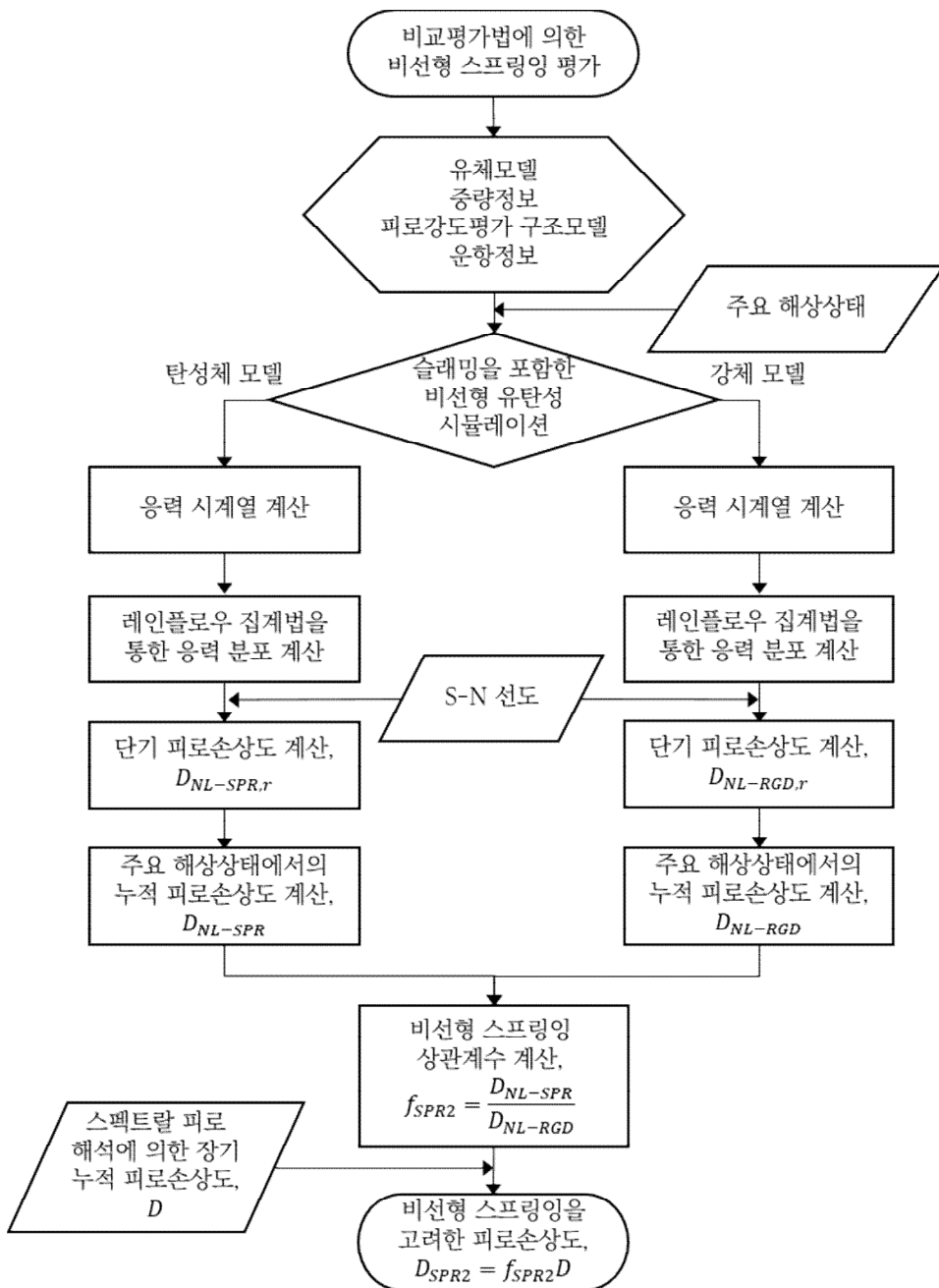


그림 3.2 비교평가법에 의한 비선형 스프링링 평가 절차

6. 유탄성 효과를 제외하여 계산한 응력 시계열을 이용하여 4항 및 5항의 절차를 수행하여 강체의 피로손상도  $D_{NL-RGD}$ 를 계산한다.
7. 5항 및 6항에서 계산된 장기 누적 피로손상도  $D_{NL-SPR}$ ,  $D_{NL-RGD}$ 의 비로서 비선형 스프링링 상관계수  $f_{SPR2}$ 를 정의한다.
8. 계산된 비선형 스프링링 상관계수  $f_{SPR2}$ 를 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항 (5)호에 따른 장기 누적 피로손상도  $D$ 에 적용하여 비선형 스프링링을 고려한 피로손상도  $D_{SPR2}$ 를 계산한다.

## 202. 유탄성 효과를 제외한 누적 피로손상도 계산

1. 102.에서 정의한 주요 해상상태에서 유탄성 효과를 제외하고 시물레이션을 수행하여 응력 시계열 데이터를 계산한다. 이 때, 시물레이션에 사용되는 파랑 시계열은 비선형 스프링링을 고려한 유탄성 시물레이션에 사용된 시계열과 동일해야 한다.
2. 유탄성 효과를 제외한 응력 시계열 데이터를 얻기 위하여 1항과 같이 별도의 시물레이션을 수행하는 대신, 유탄성 효과를 고려하여 계산한 응력 시계열 데이터에 저주파수대역통과필터(low-pass filter)를 적용하여 생성할 수 있다.
3. 상기 1항 또는 2항으로부터 계산된 응력 시계열 데이터를 이용하여 103.에 따라서 피로손상도를 계산하고, 비선형 스프링링을 고려하지 않은 피로손상도  $D_{NL-RGD}$ 로 정의한다.

## 203. 비선형 스프링링 상관계수 및 누적 피로손상도 계산

1. 비선형 스프링링 상관계수  $f_{SPR2}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$f_{SPR2} = \frac{D_{NL-SPR}}{D_{NL-RGD}}$$

2. 비교평가법에 의한 비선형 스프링링을 고려한 피로손상도  $D_{SPR2}$ 은 다음과 같다.

$$D_{SPR2} = f_{SPR2} D$$

$D$  : 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 6항 (5)호의 (나)에 따름.

3. 피로 강도 평가 대상 부재에 대하여 비선형 스프링링을 고려한 피로 수명  $T_{F,SPR2}$ 은 다음 식과 같이 산정한다.

$$T_{F,SPR2} = \frac{T_D}{D_{SPR2}}$$

$T_D$ : 피로 설계 수명 (년)

## 제 3 절 종굽힘 모멘트가 주요한 저속 비대선의 비선형 스프링링 평가

### 301. 적용

1. 광석 운반선과 같이 종굽힘 모멘트에 의한 응력 변화가 피로손상에 주요한 저속 비대선에 한하여 선수파 조건에서의 해석으로 비선형 스프링링 평가를 간략하게 수행할 수 있으며, 이 때 비선형 스프링링 평가에는 제2절의 비교평가법을 적용한다.
2. 저속 비대선의 경우 비교적 강성이 커서 선체 고유 모드의 주파수가 높으며 일반적으로 종굽힘 모드가 가장 저차의 선체 거더 고유 진동 모드가 된다. 이처럼 선체 고유 모드의 주파수가 높은 경우, 선형 스프링링이 피로손상에 미치는 영향은 비교적 적으며 휘핑을 포함한 선체 진동 응답의 영향을 고려하여야 한다.

## 302. 주요 해상상태 선정

1. 주요 해상상태의 선정은 102.의 요건을 따르되 파의 입사각도는 선수파에 한정한다.
2. 102.의 3항에서 입사각을 선수파 조건으로 한정하여 단기 해상상태의 피로손상 기여도  $d_{180ijl}$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$d_{180ijl} = \frac{D_{180ijl}}{D_{180l}}$$

$D_{180ijl}$  : 스펙트랄 피로해석에 의한 선수파 조건에서의 단기 해상상태 피로손상도

$D_{180l}$  : 스펙트랄 피로해석에 의한 선수파 조건에서의 장기 피로손상도

3. 102.의 4항에 따라 주요 해상상태를 선정한다.

## 303. 집중응력 및 피로손상도 계산

1. 종굽힘 모멘트가 피로손상에 끼치는 영향이 주요한 경우, 1장 406.의 응력 계산 방법 대신 공칭응력 및 응력집중계수를 이용한 간이 피로해석방법에 따라 집중응력을 계산할 수 있다.
2. 선체를 강성 및 중량 분포를 잘 표현하는 보 요소로 모델링하여 선체 거더 하중의 시계열 자료를 구한다. 하중 시계열 자료로부터 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3의 4항 (2)호 및 (3)호에 따라 공칭응력을 계산하고 여기에 응력집중계수를 곱하여 응력 시계열 자료를 구한다.
3. 스프링링을 고려하지 않은 선체 거더 하중의 시계열 자료를 얻기 위해 별도의 시뮬레이션을 수행하는 대신, 2항으로부터 얻어진 응력 시계열에 저주파수대역통과필터를 적용하여 구할 수 있다.
4. 2항 및 3항으로부터 얻은 응력 시계열 각각에 103.의 레인플로우 집계법을 적용하여, 스프링링을 고려한 피로손상도  $D_{NL-SPR}$  및 스프링링을 고려하지 않은 피로손상도  $D_{NL-RGD}$ 를 계산한다.

## 304. 비선형 스프링링 상관계수 및 누적 피로손상도 계산

1. 비선형 스프링링 상관계수  $f_{SPR2}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$f_{SPR2} = \frac{D_{NL-SPR}}{D_{NL-RGD}}$$

2. 비교평가법에 의한 비선형 스프링링을 고려한 피로손상도  $D_{SPR2}$ 은 다음과 같다.

$$D_{SPR2} = f_{SPR2} D_{RGD}$$

$D_{RGD}$  : 선급 및 강선규칙 적용지침 3편 부록 3-3에 따른 장기 누적 피로손상도.

3. 피로 강도 평가 대상 부재에 대하여 비선형 스프링링을 고려한 피로 수명  $T_{F,SPR2}$ 은 다음 식과 같이 산정한다.

$$T_{F,SPR2} = \frac{T_D}{D_{SPR2}}$$

$T_D$  : 피로 설계 수명 (년) ↓

---

인 쇄 2020년 6월 23일

발 행 2020년 6월 23일

## 스프링잉을 고려한 피로강도 평가 지침

발행인 이 형 철

발행처 한 국 선 급

부산광역시 강서구 명지오션시티 9로 36

전화 : 070-8799-7114

FAX : 070-8799-8999

Website : <http://www.krs.co.kr>

---

신고번호 : 제 2014-000001호 (93. 12. 01)

Copyright© 2020, KR

이 규칙 및 지침의 일부 또는 전부를 무단전재 및 재배포시 법  
적제재를 받을 수 있습니다.