

신뢰성공학에 근거한 하중-강도계수 설계법과 부분안전계수의 개념 및 적용

유 연식[†] · 김 태완* · 김 종인*

The Concepts and the Applications of Load and Resistance Factor Design and Partial Safety Factor Based on the Reliability Engineering

Yeon-Sik Yoo, Tae-Wan Kim and Jong-In Kim

Key Words : Load and Resistance Factor Design(하중-강도(저항)계수 설계법), Partial Safety Factor(부분안전계수), Safety Index(안전성지표), Limit-state Function(한계상태함수)

Abstract

Recently, the LRF and the PSF based on structural reliability assessment have been applied to NPP designs in behalf of the conventional deterministic design methods. In the risk-informed structural integrity, it is especially possible to optimize design procedures considering cost, manufacturing and maintenance because the structural reliability concepts have confirmed the reliability for which a designer aims. Generally, in order to evaluate the PSF, the LRF which is the design concept for evaluating safety factors respectively on the limit state function including load and resistance. This study certifies the concept and its applications of the PSF using the LRF based on the structural reliability engineering.

기호설명

COV : 변동계수	μ : 평균치
G : 한계상태함수	σ : 표준편차
P_f : 파손확률	σ : 응력
P_{fa} : 허용파손확률	σ_U : 인장응력
P_i : 내압	
R_m : 평균반경	
S_U : 설계인장응력	
PSF : 부분안전계수	
PSF_L : 하중에 관한 부분안전계수	
PSF_R : 강도에 관한 부분안전계수	
SF : 안전율	
X_N : 변수 X 에 대한 기준치	
Z : 정규화 변수	
t : 두께	
x^* : 변수 X 에 대한 파괴점	
β : 안전성지표	
β_a : 허용안전성지표	

1. 서 론

최근까지 이용되고 있는 결정론적 설계평가법과는 달리, 리스크 정보를 활용한 건전성 평가에서는 설계자에 의해 선정된 목표신뢰도가 확보되므로, 가격, 제작 및 유지 등을 고려한 최적의 방법을 강구할 필요가 있다. 예를 들어, 내압을 받는 용기의 경우, 재료비를 삭감하기 위하여 다소 통계적 편차가 있는 강도의 재료를 사용하더라도 두께를 증가시키는 방법으로 신뢰도를 확보하는 설계를 채택하거나, 정선된 강도를 가진 재료를 사용함으로써 두께를 가능한 얇게 제작하는 설계도 가능하다. 이처럼 설계에 있어서 융통성을 발휘할 수 있도록 하는 판단근거 중 주목 받는 것이 부분안전계수(PSF: Partial Safety Factor)이다. 부분안전계수에 의한 설계법은 미국에서는 주로 하중-강

[†] 회원, 한국원자력연구원

E-mail : yooys@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-4678 FAX : (042)868-8990

* 한국원자력연구원

도(저항)계수 설계법(LRFD: Load and Resistance Factor Design), 유럽에서는 부분안전계수 설계법(PSFD: Partial Safety Factor Design)으로 불리며, 현재 ASME Sec. III 및 Sec. XI 에 있어서 그 검토가 진행되고 있다. 또한, 미국의 API579⁽¹⁾, 영국의 BS7910⁽²⁾, 프랑스의 RSE-M⁽³⁾, 유럽의 SINTAP⁽⁴⁾, 일본의 WES2805⁽⁵⁾등에서는 부분안전계수를 사용한 결함평가관계의 실적을 보유하고 있다.

일반적으로 부분안전계수의 평가에는 하중-강도(저항)계수 설계법을 이용한다. 하중-강도(저항)계수 설계법은, 한계상태함수(Limit-state Function)를 구성하는 하중과 강도에 대하여, 개별적으로 안전계수를 설정하는 것이 가능한 설계 기법이다.

본 연구에서는 구조신뢰성공학에 근거한 하중-강도(저항)계수 설계법을 이용한 부분안전계수의 개념 및 설계/유지에의 적용에 관하여 기술한다.

2. 하중-강도(저항)계수 설계법(LRFD)

하중-강도(저항)계수 설계법(LRFD: Load and Resistance Factor Design)은, 구조신뢰성공학에 근거한 부분안전계수의 설정 기법으로서 해외의 토목업계 및 석유업계 등에서 적극적으로 검토되고 있다. 이 설계 기법은 한계상태 설계 기법으로도 불리고 있으며, 구조물의 시공 및 사용기간 중에, 구조물이 수행할 것으로 예상되는 기능을 유실하는 상태(한계상태)를 명확히 하여, 그 가능성이 충분히 적도록, 가능한 한 신뢰성 이론에 바탕을 둔 구조물의 설계 기법으로 정의 될 수 있다.

일반적으로 파손에 대한 목표신뢰도의 판정은 작용하는 하중의 상한치와 재료강도의 하한치와의 대소관계에 의해 이루어지며, 재료 및 외력의 불확실성으로서 실험적, 경험적 가정에 근거한 안전계수가 결정론적으로 포함되어 왔다. 여기에 비해, 부분안전계수는 하중과 강도의 통계적 특성을 고려하고 신뢰성공학 기법을 응용하여 목표신뢰도에 대하여 각 변수의 불확실성의 차에 의해 변수 별로 안전계수를 설정하는 합리적인 평가를 수행하도록 하는 것이다.

이러한 개념은 확률밀도와 부재의 강도 및 작용 하중과의 관계를 나타내는 Fig. 1 의 L-R 모델로 설명될 수 있다. 이 모델은 부재의 강도와 작용 하중이 일정치가 아닌 분포로 나타내어지며, 부재의 파손은 강도변수(R) 보다 하중변수(L)가 크게 평가되는 부분(R < L)에서 생기는 것을 의미한다. 따라서, 하중-강도 설계 기법에 이용되는 한계상태함수는 다음과 같이 정의된다.

$$G = R - L \quad (1)$$

$G > 0$: 안전, $G < 0$: 비안전, $G = 0$: 한계상태

3. 안전성지표(β)

기본변수를 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 으로 하고, 한계상태함수를 $G(X)$ 라 할 때, 안전성지표(β)를 정의하기 위해서는 먼저 기본변수를 정규화 할 필요가 있다. 기본변수로부터 정규화된 새로운 변수 $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

여기서, μ_X 및 σ_X 는 확률변수 X_i 의 평균치 및 표준편차이다. 식(2)에서 정의되는 선형사상에 의해, X 좌표계의 파손면은 Z 좌표계의 파손면에 사상된다. 일반적으로 Z 좌표계의 원점은 안전영역 내에 존재하게 된다. Fig. 2에 2차원의 예를 나타낸다. Fig. 2에서 안전성지표(β)는 거리 OA 로 정의되며 이때 점 A 를 파괴점¹이라 한다. 안전성지표(β)는 다음과 같이 정식화 될 수 있다⁽⁶⁾.

$$\beta = \min \left(\sum_{i=1}^n Z_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

기본변수 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 가 정규분포에 따르면, 안전성지표(β)와 파손확률(P_f)와의 관계가 다음과 같이 정식화 될 수 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

여기서, $\Phi(\bullet)$ 는 표준정규분포함수를 나타낸다.

4. 부분안전계수(PSF)의 평가

앞에서 살펴본 바와 같이, 안전성지표(β)는 한계상태함수(G)의 정의식과 그 정의식에 포함되는 확률변수의 확률통계적 특성, 즉, 평균치, 표준편차 및 확률밀도함수가 설정되어 있음을 전제로 하여 구해진다.

또한, 안전성지표는 Fig. 2와 같이 비선형의 파손면을 가질 경우, 반복에 의한 수렴계산으로 구해지며, 그 값은 $G=0$ 을 만족하는 파괴점(x^*)에서 평가된다.

부분안전계수의 평가법은, 앞에서 살핀 안전성

¹ 설계점이라고도 하며, 설계시방서의 설계치와는 다른 개념임에 주의를 요한다.

지표 (β)의 산출에 대하여 역문제를 푸는 것으로 설명될 수 있다. 즉, 이 경우에도 한계상태함수가 정해지며, 각 확률변수의 통계적인 특성이 설정되어 있는 것을 전제로, 허용안전성지표 (β_d)에 대한 $G=0$ 상의 파괴점을 구하는 것으로 기술될 수 있다. 본 연구에서는 파괴점의 평가 방법으로 1차 가우스 근사법에 근거한 AFOSM 법(Advanced First-Order Second Moment Method)을 소개한다. AFOSM의 경우, 각 확률변수가 독립적인 정규확률변수라는 가정하에, 한계상태함수를 파괴점 ($x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$) 중심의 테일러(Taylor) 전개를 이용하여 1차항까지를 고려하면 다음과 같이 표시된다.

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx G(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (X_i - x_i^*) \left. \frac{\partial G}{\partial X_i} \right|_{x^*} \quad (5)$$

이 식에 따른 평균치와 표준편차는 다음과 같다.

$$\mu_G(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx G(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n (\mu_{X_i} - x_i^*) \left. \frac{\partial G}{\partial X_i} \right|_{x^*} \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_G = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left[\left. \frac{\partial G}{\partial X_i} \right|_{x^*} \right] \bar{\sigma}_{X_i} \quad (7)$$

여기서,

$$\alpha_i = \frac{\left[\left. \frac{\partial G}{\partial X_i} \right|_{x^*} \right] \bar{\sigma}_{X_i}}{\left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i \left[\left. \frac{\partial G}{\partial X_i} \right|_{x^*} \right]^2 \bar{\sigma}_{X_i}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

이며, 파괴점을 구하기 위해서는 식(5)~식(8)과 더불어 다음 식을 반복계산에 의해 풀면 된다.

$$x_i^* = \mu_{X_i} - \alpha_i \beta \bar{\sigma}_{X_i} \quad (9)$$

이와 같이 파괴점이 평가되고 나면 강도변수와 하중변수 각각에 대한 부분안전계수가 평가될 수 있다. 일반적으로, 강도변수에 관한 부분안전계수 (PSF_R)로는 파괴점에 대한 기준치로서, 하중변수에 관한 부분안전계수 (PSF_L)로는 기준치에 대한 파괴점으로서 설정될 수 있다. 이 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{강도변수에 관한 부분안전계수} = \frac{\text{강도의 기준치}}{\text{목표파손확률을 만족하는 강도의 파괴점}} \quad (10)$$

$$\text{하중변수에 관한 부분안전계수} = \frac{\text{목표파손확률을 만족하는 하중의 파괴점}}{\text{하중의 기준치}} \quad (11)$$

식(10) 및 식(11)의 기준치는, 실제의 설계에 이용되는 값으로서 특성치로도 불리며, 설계 시방서에 명시되지 않을 경우에는 설계자의 공학적 판단에 의해 설정되기도 한다.

5. 설계 및 유지를 위한 부분안전계수의 적용

본 연구에서는 내압에 의한 파열을 대상으로 부분안전계수의 적용을 검토해 보기로 한다. 부분안전계수는 대상의 파손사상에 관한 한계상태함수에 대하여 목표로 설정되는 허용파손확률이 만족되도록 결정된다. 따라서, 부분안전계수는 목표신뢰도 및 확률변수의 조건별로 정비되는 것이 바람직하며, 파손사상에 대하여 강도 및 하중별로 필요한 부분안전계수를 이용하여 다음과 같이 설계에 적용될 수 있다. 내압에 의한 파열의 한계상태함수를 다음과 같이 정의한다.

$$G = \frac{t}{R_m} \cdot \sigma_U - P_i \quad (12)$$

여기서, t 는 용기 혹은 관의 두께, R_m 은 평균반경, σ_U 는 인장강도, P_i 는 내압을 나타낸다.

Table 1 An example of PSF evaluation (Burst due to internal pressure)

Ti Alloy (350°C)					
Variables	σ_U	P_i	R_m	t	SF
μ	292 [MPa] ²⁾	17 [MPa]	4.25 [mm]	1.5 [mm]	
COV ¹⁾	0.1	0.0023	0.026	0.026	
Distribution	Normal	Normal	Normal	Normal	
PSF					
$P_{fa}=1.0E-6$ ($\beta_d=4.75$)	1.87	1.00	1.02	1.02	1.56

1) COV(Coefficient Of Variance) = $\bar{\sigma} / \mu$

2) σ_U 는 COV = 0.1로 가정하고 해당온도(350°C)의 $S_U (=235MPa)$ 를 95% 신뢰도 하한치로 설정하여 구한 값

나선형 증기발생기의 전열관에 대한 부분안전계수의 평가 예를 Table 1 에 나타낸다. 목표로 설정되는 허용파손확률 (P_{fa}) 은 1×10^{-6} 으로 선정하였으며, 각 변수의 확률분포는 정규확률분포로 설정하였다. 기준치로서는 각 변수의 확률분포로부터 구해지는 평균치를 이용하였다. Table 1 로부터 강도변수인 인장응력 (σ_U) 에서의 부분안전계수가 가장 크게 평가되었음을 알 수 있다. 이와 같이 각 변수에서 평가된 부분안전계수가 설계에 어떤 형태로 적용될 수 있는지를 살펴본다. 식(12)의 내압에 관한 한계상태함수에 있어서, 허용파손확률 (P_{fa}) 혹은 허용안전성지표 (β_a) 를 만족하는 파괴점이 각각 t^* , R_m^* , σ_U^* 및 P_i^* 로서 평가되었다고 가정한다. 한편, 허용파손확률을 만족하는 각 파괴점에 대하여 다음 관계가 성립한다.

$$\frac{t^*}{R_m^*} \cdot \sigma_U^* - P_i^* = 0 \quad (13)$$

식(10) 및 식(11)의 부분안전계수 산출식에 근거하여, 각 파괴점은 부분안전계수와 기준치를 이용하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t^* = t_N / PSF_t \quad (14)$$

$$R_m^* = PSF_{R_m} \times R_{m,N} \quad (15)$$

$$\sigma_U^* = \sigma_{U,N} / PSF_{\sigma_U} \quad (16)$$

$$P_i^* = PSF_{P_i} \times P_{i,N} \quad (17)$$

여기서, 하첨자 N 은 기준치를 나타낸다. 식(14)~식(17)의 관계를 식(13)에 대입하면 파괴점에 대하여 다음 식이 성립된다.

$$\frac{t_N / PSF_t}{PSF_{R_m} \times R_{m,N}} \times \sigma_{U,N} / PSF_{\sigma_U} = PSF_{P_i} \times P_{i,N} \quad (18)$$

이 식은 두께에 관한 기준치(t_N)에 대하여 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$t_N = PSF_t \cdot PSF_{R_m} \cdot PSF_{\sigma_U} \cdot PSF_{P_i} \cdot \frac{R_{m,N} \cdot P_{i,N}}{\sigma_{U,N}} \cdot P_{i,N} \quad (19)$$

한계상태함수 $G > 0$ 의 안전영역이 되기 위해서는 다음의 관계가 요구된다.

$$t_N > PSF_t \cdot PSF_{R_m} \cdot PSF_{\sigma_U} \cdot PSF_{P_i} \cdot \frac{R_{m,N} \cdot P_{i,N}}{\sigma_{U,N}} \cdot P_{i,N} \quad (20)$$

다른 조건들이 결정된 경우, 두께에 관한 기준치가 식(20)을 만족하면 평가된 부분안전계수에 대응하는 허용파손확률이 만족될 것으로 판단된다. Table 1 의 결과로부터 $P_{fa} = 1 \times 10^{-6}$ 을 만족하기 위한 두께의 기준치(t_N)는 0.72mm 이상 요구되며, 설계에서 제시한 1.5mm 는 내압에 의한 파열방지를 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.

다음은 부분안전계수가 원자력 구조물의 유지(maintenance)에 적용되는 예로서 부분안전계수에 이용하여 현행안전율을 검토해 보기로 한다⁽⁷⁾.

내압에 의한 파열의 조건은 다음과 같이 설정될 수 있다.

$$\sigma = \sigma_U \quad (21)$$

여기서, σ 는 응력이다.

내압을 받는 관에서의 원주방향응력과 압력과의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma \cong \frac{P_i \cdot R_m}{t} \quad (22)$$

식(14)~식(17) 및 식(21)~식(22)를 이용하면 내압에 의한 파열 조건하의 각 파괴점에 대하여 다음의 관계가 성립된다.

$$\frac{\sigma_{U,N}}{PSF_{\sigma_U}} = \frac{(PSF_{P_i} \cdot P_{i,N}) \cdot (PSF_{R_m} \cdot R_{m,N})}{t_N / PSF_t} \quad (23)$$

부분안전계수에 의한 안전율은 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$SF = \frac{\sigma_U}{\sigma} = \frac{(PSF_{P_i} \cdot P_{i,N}) \cdot (PSF_{R_m} \cdot R_{m,N}) \cdot (PSF_t / t_N)}{P_{i,N} \cdot R_{m,N} / t_N} \cdot PSF_{\sigma_U} \quad (24)$$

한편, 설계인장응력 (S_U) 를 인장응력 (σ_U) 의 95% 신뢰도 하한치로 가정하면 다음의 관계가 성립한다.

$$PSF_{S_U} = PSF_{\sigma_U} \cdot (1 - 1.96 \cdot COV_{\sigma_U}) \quad (25)$$

식(25)를 이용하면 부분안전계수에 의한 안전율은 설계인장응력을 기준으로 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned}
SF &= \frac{S_U}{\sigma} \\
&= \frac{(PSF_{P_i} \cdot P_{i,N}) \cdot (PSF_{R_m} \cdot R_{m,N}) \cdot (PSF_t / t_N)}{P_{i,N} \cdot R_{m,N} / t_N} \\
&\quad \times PSF_{\sigma_U} \cdot (1 - 1.96 \cdot COV_{\sigma_U}) \\
&= PSF_{P_i} \cdot PSF_{R_m} \cdot PSF_t \cdot PSF_{\sigma_U} \cdot (1 - 1.96 \cdot COV_{\sigma_U})
\end{aligned}
\tag{26}$$

Table 1에 본 평가에 의한 부분안전계수의 결과를 이용하여 식(26)에 의해 산출된 안전율을 나타내었다. 참고로 본 평가에 이용한 허용파손확률 ($P_{fa} = 1 \times 10^{-6}$)은 Service Level A 및 B를 기준으로 한 것이며⁽⁸⁾ 현행의 결정론적 설계에 의한 안전율은 본 경우에 대하여 3.0으로 설정되어 있다. 표 1의 부분안전계수에 의한 안전율의 평가결과 ($SF = 1.56$)로부터 현행의 안전율 3.0은 보수적으로 설정되어 있음을 나타내고 있으며, 이는 향후 허용파손확률로 주어지는 리스크 정보가 명확히 평가되고, 한계상태함수를 구성하는 각 변수의 확률모델이 구체적으로 설정되면, 현행 안전율의 합리화가 가능함을 시사하고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 신뢰성공학이론에 근거한 하중-강도(저항)계수 설계법과 이를 이용한 부분안전계수의 개념 및 설계/유지에의 적용에 관하여 기술하였다. 지금까지의 결정론적 안전율의 경우, 평가에 이용되는 각 변수의 영향이나 설정의 근거가 명확하지 않음에 비하여 부분안전계수는 목표 신뢰도를 만족하도록 구성된 한계상태함수에서 각 변수의 중요도까지 명확히 평가할 수 있다. 따라서, 부분안전계수를 설계에 이용하면 동 수준의 신뢰도를 만족하기 위한 각 변수의 유도(Safety Margin) 교환도 가능하게 된다. 향후, 리스크 정보에 근거한 기기의 신뢰도목표가 명확히 평가되면, 지금까지 이용해 온 결정론적 안전율의 타당성 및 문제점이 명확하게 됨은 물론, 결정론적 안전율에 과도한 보수성이 포함된 경우에는 이의 합리화도 가능할 것으로 판단된다.

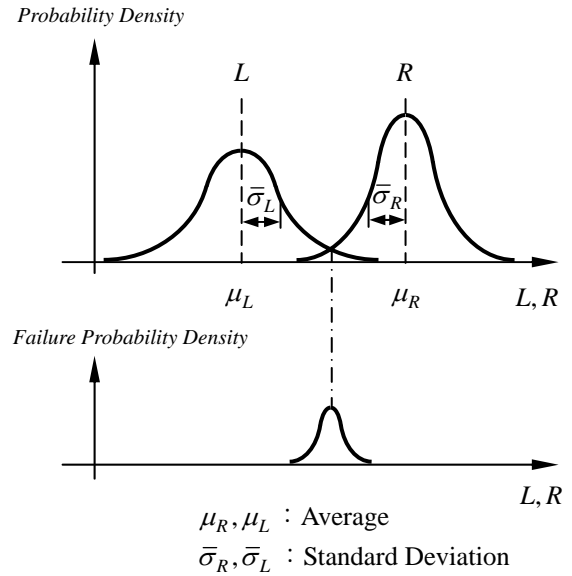


Fig. 1 Load and Resistance model

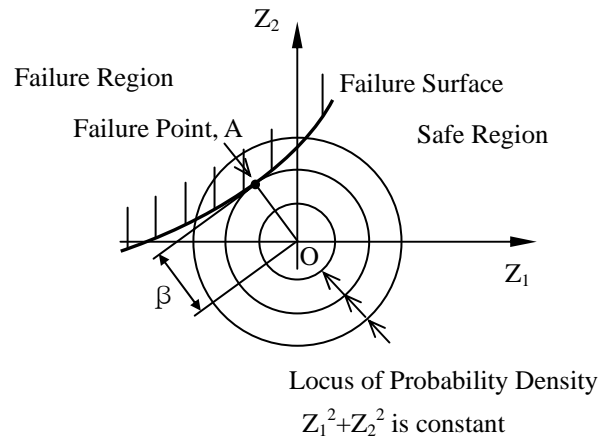


Fig. 2 Safety Index

참고문헌

- (1) API, 2000, Fitness-for-Service API Recommended Practice 579.
- (2) BS7910, 1999, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, BSI.
- (3) IN-SERVICE INSPECTION RULES FOR THE MECHANICAL COMPONENTS OF PWR NUCLEAR ISLANDS, RSE-M, 1997
- (4) P. Dillstrom, 1999, ProSINTAP - A Probabilistic Programme for Safety Evaluation, SAQ/SINTAP/09, June 1999.
- (5) WES2805-1997, 1997, JWES.
- (6) P. Thoft-Christensen and M. J. Baker, 1982,

“Structural Reliability Theory and Its Applications”,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

- (7) J. M. Bloom, 2000, “Partial Safety Factors (PSF) and Their Impact on ASME Section XI, IWB-3610”, ASME PVP-2000.
- (8) D. A. Osage, K. S. Shipley, P. H. Wirsching and A. E. Mansour, 2000, “Application of Partial Safety Factors for Pressure Containing Equipment”, ASME PVP-411, pp.121-142.