

# ETCM에 의한 강구조부재의 최적설계기준

"Optimum Design Criteria of Steel Structure members based on ETCM"

이 중 빈\* 박 주 원\*\*

Lee, Cheung-Bin , Park, Ju-Won

## ABSTRACT

Based on the developments of the reliability-based steel structural analysis and design as well as the extending knowledge on the probabilistic characteristics of loading and resistance the probability based design criteria have been successfully developed for many students.

The existing design codes, which are generally based on the structural theory and certain engineering experience, do not realistically consider the uncertainties of loads and resistance and the basic reliability concepts. It is recognized to develop the design criteria by ETCM(Expected Total Cost Minimization).

In this study, therefore, the proper probability based design criteria (Optimum load and resistance factor design formats) has been developed based on the safety levels observed from calibration with existing standards, which applies to the ultimate limit states of steel structural members.

## 1. 서론

최근 강구조부재의 신소재개발 및 시공기술등의 향상에 힘입어 강구조물의 고도화가 급속히 진행되고 있는데 반하여 건축구조물의 고층화와 교량의 장대화로 인한 안전한 설계와 시공 및 유지관리 측면에서 볼 때 강구조부재의 개발 및 실용화는 이에 미치지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 설계기준개발에 사용한 2차모멘트방법과 다르게 하중계수의 대소에 대응하는 강구조물의 역학적 안정성과 사회적-경제적인 측면을 동시에 고려한 최적신뢰성해석 및 설계기준을 통계적 의사결정이론인 총비용최소화원칙에 의해 실용적인 해석 알고리즘<sup>2),9)</sup>을 유도 분석하고, 이 알고리즘을 토대로 강구조부재의 최적설계기준인 저항-하중계수를 개발하는데 목적을 둔다.

## 2. 강구조부재의 극한한계상태 모델

본 연구에서는 강구조부재에 대한 최적설계기준의 개발을 위해 한계상태중 극한한계상태만을 고려하였으며, 강구조부재에 대한 현행 우리 나라 도로교 시방서와 미국의 AASHTO시방서규준을 채택하여 이를 토대로 한계상태모델을 제안하였다.<sup>4)</sup>

\* 순천공업전문대학 공학박사

\*\* 조선대학교 토목공학과 석사과정

## 2.1 인장부재

인장부재의 한계상태파괴거동은 설계개념이 다른종류의 부재에 비하여 단순하기 때문에 항복및 극한강도파괴만 고려하면 공칭인장(저항)강도는 다음과 같이 된다.<sup>4)</sup>

(1) 순단면이 항복하는 경우

$$R_n = \sigma_y * A_g \text{ ----- (2.1)}$$

여기서,  $\sigma_y$  = 강재의 항복응력

$A_g$  = 강재의 순단면적

(2) 순단면이 파괴되는 경우

$$R_n = \sigma_u * A_g \text{ ----- (2.2)}$$

여기서,  $\sigma_u$  = 강재의 인장강도

## 2.2 압축부재 (기둥)

도로교시방서의 기둥설계압축강도는 schulz의 4개 기둥강도곡선식에 바탕을 두고 있다. 따라서 압축부재의 공칭저항강도는 다음과 같다.<sup>4)</sup>

$$R_n = \sigma_{cr} * A_g \text{ ----- (2.3)}$$

(1) 도로교시방서

$$\sigma_{cr} = \sigma_y \quad (\lambda \leq 0.2) \text{ ----- (2.4a)}$$

$$\sigma_{cr} = [1.0 - 0.545(\lambda - 0.2)] \sigma_y \quad (0.2 < \lambda \leq 1.0) \text{ ----- (2.4b)}$$

$$\sigma_{cr} = [1.0 / (0.773 + \lambda^2)] \sigma_y \quad (\lambda > 1.0) \text{ ----- (2.4c)}$$

(2) AASHTO 시방서

$$\sigma_{cr} = (1.0 - 0.25\lambda^2) \sigma_y \quad (\lambda \leq \sqrt{2}) \text{ ----- (2.5a)}$$

$$\sigma_{cr} = (1.0 / \lambda^2) \sigma_y \quad (\lambda > \sqrt{2}) \text{ ----- (2.5b)}$$

$$\text{여기서, } \lambda = \frac{1}{\pi} \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

## 2.3 휨부재 (보)

휨압축강도는 압축플랜지의 고정단에 있어서 보가 단순지지되고 등단면보의 양단에 등휨모멘트가 작용했을 때의 보의 횡방향좌굴응력을 기본으로 한다. 이때 횡방향 좌굴강도는  $A_w/A_c$  및  $1/b$ 의 함수로 도로교시방서에서는 횡좌굴의 기준내하력곡선은  $A_w/A_c$ 의 크기에 의하여 공칭저항강도는 다음과 같이 된다.<sup>4)</sup>

(1) 도로교시방서의 기본내하력식

$$R_n = (M_u/M_y) = 1.0 \quad (\lambda \leq 0.2) \text{ ----- (2.6a)}$$

$$R_n = (M_u/M_y) = 1.0 - 0.412(\lambda - 0.2) \quad (0.2 < \lambda \leq 2) \text{ ----- (2.6b)}$$

$$\text{여기서, } \lambda = \frac{2}{\pi} \sqrt{3 + \frac{A_w}{2A_s} \left( \frac{1}{b} \right)} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

$$M_y = \sigma_s * Z$$

(2) AASHTO 시방서의 기본내하력식

$$R_n = (M_u/M_y) = 1.0 - 0.25\lambda^2 \quad (\lambda \leq \sqrt{2}) \text{ ----- (2.7)}$$

$$\text{여기서, } \lambda = \frac{1}{\pi} \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{3 \left( \frac{1}{b} \right)} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

## 2.4 판 요소

(1) 압축판

도로교시방서에서의 1방향압축력을 받는 양연지지판 및 편연지지판의 공칭저항강도는 다음과 같이 된다.<sup>4)</sup>

(가) 도로교시방서의 기본내하력식

$$R_n = (\sigma_u / \sigma_y) = 1.0 \quad (\lambda \leq 0.7) \text{ ----- (2.8a)}$$

$$R_n = (\sigma_u / \sigma_y) = 0.5 / \lambda^2 \quad (0.7 < \lambda \leq 1.4) \text{ ----- (2.8b)}$$

(나) 후좌굴강도를 고려한 내하력식

$$R_n = (\sigma_u / \sigma_y) = 1.0 \quad (\lambda \leq C) \text{ ----- (2.9a)}$$

$$R_n = (\sigma_u / \sigma_y) = C / \lambda \quad (C < \lambda \leq 1.4) \text{ ----- (2.9b)}$$

여기서,  $\lambda$ 는 좌굴파라미터이며

$$\lambda = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}$$

한편, 강구조와 콘크리트구조의 공통설계지침(안)에서 제한한 압축을 받는 판, 힘을 받는 판, 전단을 받는 판의 공칭저항강도는 다음과 같이 된다.<sup>4)</sup>

(다) 압축판

$$R_n = (M_u / M_y) = 1.0 \quad (\lambda \leq 0.7) \text{ ----- (2.10a)}$$

$$R_n = (M_u / M_y) = (0.7 / \lambda)^{0.865} \quad (0.7 < \lambda) \text{ ----- (2.10b)}$$

(라) 휨판

$$R_n = (M_u / M_y) = 1.0 \quad (\lambda \leq 1.5) \text{ ----- (2.11a)}$$

$$R_n = (M_u / M_y) = (1.04 / \lambda)^{0.716} \quad (1.5 < \lambda) \text{ ----- (2.11b)}$$

(마) 전단판

$$R_n = (\tau_{ux} / \tau_y) = 1.0 \quad (\lambda \tau < 0.611) \text{ ----- (2.12a)}$$

$$R_n = (\tau_{ux} / \tau_y) = (0.610 / \lambda \tau)^{0.391} \quad (0.611 \leq \lambda \tau < 2) \text{ ----- (2.12b)}$$

여기서,  $\lambda \tau = \frac{b}{t} \frac{\tau_y}{E} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}}$

$$k = \begin{cases} 5.34 + 4.00 / \alpha^2 & (\alpha \geq 1) \\ 4.00 + 5.34 / \alpha^2 & (\alpha < 1) \end{cases}$$

(2) 압축보강판

1방향 압축을 받는 보강판요소만의 공칭저항강도는 다음과 같이 된다.<sup>4)</sup>

$$R_n = (\sigma_u / \sigma_y) = 1.0 \quad 0.86 \quad (\lambda \leq 0.7) \text{ ----- (2.13a)}$$

$$R_n = (\sigma_u / \sigma_y) = (0.7 / \lambda) \quad (\lambda > 0.7) \text{ ----- (2.13b)}$$

## 2.5 판형

(1) 대칭인 경우

(가) 휨 (Hasegawa 식)

휨에 대한 공칭저항강도  $R'$ 는 Baseler 등이 제시한 역학적 메카니즘에 주목한 모델해석으로, Hasegawa는  $R'$ 를 다음과 같이 해석하였다.<sup>4)</sup>

$$R' = (1.0 - 0.25 \lambda^2) \frac{1 + g \rho}{1 + \rho / b} * \frac{y^2}{h} \text{ ----- (2.14)}$$

여기서,  $g = \left( \frac{-4\rho + 42}{29.58} \right) g_y / (h/t)$ ,

$$g_y = \sqrt{E / \sigma_y * \rho} = \frac{A_w}{A_{cf}}$$

$$y^*/h = \{1 / (8.9\rho + 9.79)\} + 0.92$$

$$\lambda = \frac{1}{\lambda} \frac{1}{g_y} \frac{L_b}{r}, \frac{L_b}{r} = 1.3(a/h) \sqrt{g4\rho}$$

- 단,  $A_w$  : 복부의 단면적  
 $A_{cf}$  : 압축플랜지의 단면적  
 $a$  : 수직보강재 간격  
 $L_b / r$  : 압축플랜지의 등가세장비

(나) 전단 (실험식)

전단내하력에 대해서는 실험식으로 분석해보면 공칭저항강도 R'는 다음과 같이 된다. <sup>1), 4)</sup>

$$R' = 1.507/\lambda \text{-----} (2.15)$$

여기서,  $\lambda = \frac{h}{t} \sqrt{\tau_y/E \cdot \frac{12(-\nu^2)}{\pi^2 k_s}}$ ,  $\tau_y = \frac{\sigma_y}{3}$

$$k_s = \begin{cases} 5.34 + 4.00/a^2 & (a \geq 1.0) \\ 4.00 + 5.34/a^2 & (a < 1.0) \end{cases}$$

(2) 비대칭인 경우

(가) 휨

Mikamil 등은 복부판의 극한휨강도  $\sigma_{ult,w}$ 와 압축플랜지의 극한휨강도  $\sigma_{ult,r}$ 의 함수로 판형의 공칭휨강도식을 제시했는데, 공칭휨강도는 다음과 같이 된다. <sup>2, 4)</sup>

$$R_n = Mult = \sigma_{ult,r} : \sigma_{ult,r} \leq \sigma_{ult,w} \text{-----} (2.16a)$$

$$= \sigma_{ult,r} * RpG : \sigma_{ult,r} > \sigma_{ult,w} \text{-----} (2.16b)$$

여기서,  $RpG = 1.0 + \frac{(1-\phi)(\sigma_{ult,r}/\sigma_{ult,w})-1}{1+\phi 2A_{ft}/A_f + (1+\phi+\phi^2)A_w/3A_{fc}}$  ----- (2.16c)

$$RpG = 1 - m(1 - \sigma_{ult,w}/\sigma_{ult,r}) \text{-----} (2.16d)$$

단,  $m = 1 / [1 + 6 A_{rc} / A_w]$

$A_r$  = 압축플랜지의 단면적

$A_{ft}$  = 인장플랜지의 단면적

$A_w$  = 복부판의 단면적

$\phi$  = 판형의 응력구배계수

(나) 전단

Mikamil 공칭전단강도  $V_{ult}$ 는 복부판의 전단좌굴강도  $\tau_{cr}$ 에 의해 부담되는 전단력과 사장력장  $\sigma_t$ 에 의해 부담되는 전단력의 합으로 산정하고 있는데, 이에 대한 식은 다음과 같이 된다. <sup>4)</sup>

$$V_{ult} = V_{cr} + V_t$$

$$= \tau_{cr} * B * t_w + \sigma_t * B * t_w (\sin\theta \cos\theta - \alpha_c \sin^2\theta) \text{-----} (2.17)$$

여기서,  $\alpha_c = na$

$$\theta = (1/2) \tan^{-1}(1/\alpha)$$

$$\sigma_t = [1 - (\tau_{cr} / \tau_y)^{0.6}] \sigma_y$$

$$\alpha = a / B$$

$$n = 1 - (C_c + C_u) / a$$

(다) 휨, 전단

본 연구에서는 전술의 공칭휨강도 식(2.16)과 공칭전단강도 식(2.17)을 기본식으로 하여 공칭휨, 전단강도를 다음과 같이 해석한다. <sup>4)</sup>

$$\left[ \frac{M}{Mult} \right]^4 + \left[ \frac{V}{Vult} \right]^4 = 1 \text{-----} (2.18)$$

## 2.6 보 - 기둥

도로교시방서에서는 축방향력과 휨을 동시에 받는 강부재의 기본내하력식을 다음 3가지 경우로 채용하고 있다. <sup>4)</sup>

a) 축방향력과 단면의 강축들레에 휨이 작용할때의 면내내하력.

b) 축방향력과 단면의 강축들레에 휨이 작용할때의 면외내하력.

c) 축방향력과 2축휨이 작용할때의 내하력.

따라서, 위 3가지 경우의 기본내하력식을 공칭저항강도식으로 하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{P}{P_U} + \frac{M_{X0}}{M_{UX}(1-P/P_{EX})} + \frac{M_{Y0}}{M_{UY}(1-P/P_{EY})} = 1 \quad (2.19)$$

여기서, P, M<sub>X0</sub>, M<sub>Y0</sub> = 각각 보-기둥의 축하중과 단면의 강축 및 약축둘레의 작용모멘트  
P<sub>U</sub> = (M<sub>X0</sub>=M<sub>Y0</sub>=0)일 때의 기둥의 최대강도  
M<sub>UX</sub> = (P=M<sub>Y0</sub>=0)일 때의 보의 항복모멘트 (면내) 또는 횡좌굴 내하모멘트(면외)  
M<sub>UY</sub> = (P=M<sub>X0</sub>=0)일 때의 항복모멘트  
P<sub>EX</sub>, P<sub>EY</sub> = 각각 단면의 강축, 약축에 대한 Euler의 탄성좌굴강도.

### 3. 최적신뢰성이론과 해석 및 설계규준

#### 3.1 최적신뢰성이론

총기대비용최소화원칙을 이용한 최적신뢰성이론은 문헌 4)에 상술되어 있으므로 서술은 생략하고 파괴손실비용의 정도(τ), 안전도의 증가에 따른 초기비용의 증가율(ν) 및 증가곡선형(n)의 3가지 함수로 하여 초기비용 CI를 신뢰성지수β의 n차식으로 나타내면 신뢰성최적화식은 다음과 같이 된다.

$$C_T = C_0(1+k\beta^n)[1+\Phi(-\beta)\tau] = \text{Min} \quad (3.1a)$$

$$\text{여기서, } k = (\nu-1)/\beta^n \quad (3.1b)$$

$$\nu = C_B/C_0 = \lambda(\beta_0) = 1 + m(n_0-1) \quad (3.1c)$$

$$m = 1 / [1 + \text{arcs}\{(1/b)-1\}] \quad (3.1d)$$

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (3.1e)$$

단, a = n<sub>0</sub>/n' = 중앙안전율 / 공칭안전율

n<sub>0</sub> = 현행시방서의 공칭안전율

C<sub>0</sub> : R'=S'일 때의 초기비용 (즉, β=0일때의 초기비용)

C<sub>B</sub> : β일 때의 초기비용

한편, 식(3.1a)를 무차원화의 총기대비용 η, 초기비용 λ, 파괴손실비용 μ로 하면 다음과 같이 된다.

$$\eta = C_T/C_0 = (1+k\beta^n)\{1+\Phi(-\beta)\tau\} \quad (3.2a)$$

$$\lambda = C_T/C_0 = 1+k\beta^n \quad (3.2b)$$

$$\mu = \Phi(-\beta)C_F/C_0 = \Phi(-\beta)(1+k\beta^n)\tau \quad (3.2c)$$

#### 3.2 최적신뢰성해석

본 연구에서의 반복법은 AFOSM법에 의하여 비정규분포를 등가변환시켜 누적확률치와 확률밀도치가 정규분포변수와 같게 되는 등가표준편차와 평균을 산정하는 Rackwitz-Fiessler의 근사확률분포법을 이용하여 총기대비용최소화에 의한 최적신뢰성해석을 요약하면 다음과 같이 된다.

단계 1. 근사확률분포법 알고리즘으로부터 φ, γ<sub>i</sub>를 계산한다.

단계 2. 단계 1로부터 중앙안전율 n<sub>0</sub>를 계산하여 식 3.1b 와 식 3.1b의 k, ν치를 산정한다.

단계 3. 무차원화시킨 총기대비용의 식 3.1a를 반복 시행하여 최적신뢰성 지수 β<sub>opt</sub>를 계산한다.

(허용치에 수렴할때까지 반복시행)

#### 3.3 최적신뢰성 설계규준

전절의 최적신뢰성알고리즘을 이용하여 최적신뢰성규준인 φ, γ<sub>i</sub>의 산정을 요약하면 다음과 같다.

단계 1. 파괴비용의 정도(τ)에 따른 최적신뢰성지수 β<sub>opt</sub>를 결정한다.

단계 2. 최적신뢰성해석 알고리즘의 단계 1로부터 φ, γ<sub>i</sub>값을 계산한다.

### 4. 강구조부재의 불확실성 모델

본 연구에서는 저항과 하중의 통계적 불확실량인 평균-공칭비와 변동계수의 추정방법을 기술하고 국내외의 관련문헌들을 종합 판단하여 강구조부재의 최적신뢰성해석에 사용되는 통계적 불확실량을 계산한다.

#### 4.1 저항의 불확실량

전술한 극한상태모델의 저항관련랜덤변수는 기본랜덤변량의 적으로 표현할 수 있다.<sup>1),4)</sup>

$$R_n = M_n * F_n * P_n \text{ ----- (4.1a)}$$

여기서,  $M_n$  = 재료의 강도추정 기본불확실량 랜덤변수  
 $F_n$  = 제작 및 시공과정에 수반되는 불확실량 랜덤변수  
 $P_n$  = 해석 및 모델링 관련에 수반되는 불확실량 랜덤변수

이 때,  $R_n$ 의 평균과 분산은 2차 모멘트법에 의한 불확실량대수에 의해 다음과 같이 기본랜덤변량의 평균과 분산으로부터 구할 수 있다.

$$\text{평균 : } R_n = M_n * F_n * P_n \text{ ----- (4.1b)}$$

$$\text{변동계수 : } \Omega_R = \sqrt{\Omega_M^2 + \Omega_F^2 + \Omega_P^2} \text{ ----- (4.1c)}$$

#### 4.2 하중응답의 불확실량

작용하중응답의 불확실량을 나타내는 응력응답의 불확실량은 다음과 같이 된다.<sup>1),4)</sup>

$$S_{0i} = S_{0Ai} S_{0\alpha} \text{ ----- (4.2a)}$$

$$S_{Li} = S_{LiA} S_{L\alpha} \text{ ----- (4.2b)}$$

여기서,  $S_{0A}$ ,  $S_{LA}$  = 사하중과 트럭하중에 대응하는 응답불확실량랜덤변수  
 $S_{0\alpha}$ ,  $S_{L\alpha}$  = 사하중과 트럭하중에서의 불확실량을 나타내는 랜덤하중변수

이때,  $S_0$ 와  $S_L$ 의 평균과 분산은 저항에서와 마찬가지로 2차모멘트법의 불확실량대수에 의해 산출할 수 있다.

### 5. 해석결과 및 고찰

#### 5.1 통계적 불확실량 데이터

본 연구에서 제안한 강구조부재의 최적신뢰성해석에 사용되는 통계적 불확실량은 문헌.4)에서와 같다. 이러한 저항 및 하중관련 각종 통계자료는 앞으로 저항 및 하중에 관련된 연구가 점차로 확대되고 통계적 자료가 누적됨에 따라 수정 및 보완되어져야 할것이다. 이 자료는 어디까지나 현단계에서 추정치로서의 의미를 갖는다.

#### 5.2 기존 시방서의 안전수준 검토

현행도로교시방서는 허용응력설계법(WSD)으로, 미국 AASHTO시방서는 허용응력설계법이나 하중계수설계법(LFD)으로 강구조부재를 설계하도록 규정하고 있다.

그림 1,2에서 보면 하중비  $\rho = L/D$ 가 0.5에서 2.5까지 변화할 때 본 연구에서 제안한 강구조부재에 대한 현행 도로교의 WSD규준과 AASHTO의 LFD규준을 둘 다 최적신뢰성지수  $\beta_{opt}$ 이 하중비  $\rho = L/D$ 와  $\tau = C_F/C_I$ 가 증가함에 따라 단계적으로 거의 비슷하게 감소하는 데 반하여, AFOSM에 의한 현행 도로교의 WSD규준은  $\beta$ 가 4.82- 3.45(강기둥), 4.01-3.04(압연보), 4.20-3.13(용접보) 정도로 이  $\beta$ 값들은 본 연구의  $\tau = 100-1000$ 의  $\beta_{opt} = 3.34-3.95$ (강기둥),  $\tau = 50-1000$ 의  $\beta_{opt} = 3.05- 3.89$ (압연보),  $\tau = 50-1000$ 의  $\beta_{opt} = 3.08-3.91$ (용접보)정도에 상응한 값으로 변화하고, AASHTO의 LFD규준은 3.23-2.09(강기둥), 3.56-2.63(압연보),

3.52-2.53(용접보)로 이  $\beta$ 값들은 본 연구의  $\tau = 3-100$ 의  $\beta_{opt} = 1.99-3.24$ (강기둥),  $\tau = 25-100$ 의  $\beta_{opt} = 2.79-3.23$ (압연보),  $\tau = 10-250$ 의  $\beta_{opt} = 2.48-3.51$ (용접보)에 상응한 값으로 변화한다.

따라서 강구조부재에 대한 현행도로교의 WSD규준의  $\tau = C_F/C_I$ 는 AASHTO의 LFD규준의  $\tau$ 보다 훨씬 높기 때문에 현행 도로교의 WSD규준이 비경제적인 설계가 됨을 알 수 있다.

그림 1,2와 같이 상기한 계산결과를 분석해보면 AFOSM에 의한 현행 WSD규준은 대체적으로 높게 나올 뿐만 아니라  $L/D$ 의 변화에 따라 다소 민감하게 변화하고 AASHTO시방서의 LFD규준은  $L/D$ 의 변화에는 WSD규준보다 덜 민감하지만 AISC LRFD규준의 휨파괴와 압축파괴에서 보편적으로 적용되는 신뢰도가  $\beta = 3.0$ (휨파괴), 3.5(압축파괴)보다 훨씬 낮은 2.8 정도의 수준이 되므로 안정성 측면에서 다소 위험을 초래할 요소가 있다고 판단되지만 우리 나라의 시공수준과 품질관리에 비추어 볼 때 현행 도로교 시방서보다 대체적으로 일관성있는 신뢰도를 유지한다고 볼 수 있다. 한편, AFOSM에 의한 강판의 신뢰성지수  $\beta$ 는 하중

비  $\rho=L/D$ 에 따라 3.06-2.07(압축), 3.73- 2.46(휨), 3.47-2.25(전단)이고 이  $\beta$  값들은 본 연구의  $\tau=3-50$ 의  $\beta_{opt}=1.95-3.00$ (압축),  $\tau=10-500$ 의  $\beta_{opt} = 2.54-3.73$ (휨),  $\tau=5-250$ 의  $\beta_{opt}=2.25- 3.52$ (전단)에 상응한 값으로 변화하고 있다. 현행 도로교시방서규정으로 분석한 압축강판의  $\beta$ 는 4.77- 3.39(양연지지판), 5.04-3.53(편연지지판)으로  $L/D$ 의 변화에 따라 상당히 민감하게 변화하고 있으며, 이  $\beta$  값들은 본 연구의  $\tau=100-1000$  이상의  $\beta_{opt}=3.34-3.95$ (양연지지판),  $\tau=250-1000$  이상의  $\beta_{opt}=3.61-3.97$ 정도에 상응한 값으로 변화한다. 그리고 본 연구에서는 강판형을 대칭과 비대칭인 경우로  $\beta$  값을 분석했는데 대칭의 강판형  $\beta$ 는 3.58-2.30(휨), 3.61-2.52(전단), 비대칭의 강판형  $\beta$ 는 3.71-2.58(휨), 2.54-1.95(전단), 4.04-2.81(휨+전단)으로 이  $\beta$  값들은 본 연구의  $\tau=5-250$ 의  $\beta_{opt}=2.26-3.53$ (대칭강판형의 휨),  $\tau=10-250$ 의  $\beta_{opt}=2.50-3.52$ (대칭강판형의 전단),  $\tau=10- 500$ 의  $\beta_{opt} = 2.52-3.72$ (비대칭강판형의 휨),  $\tau=5-25$ 의  $\beta_{opt}=1.99-2.64$ (비대칭강판형의 전단),  $\tau=25-1000$ 의  $\beta_{opt} = 2.86-9.91$ (비대칭강판형의 휨 + 전단)에 상응한 값으로  $L/D$ 의 변화에 따라 다소 민감하게 변화한다.

강보-기둥의  $\beta$ 는 3.56-2.51(케이스a), 3.72- 2.77(케이스b), 4.10-3.02(케이스c)이며, 이  $\beta$  값은 각  $\tau=10-250, 25-500, 50-1000$ 의  $\beta_{opt}$ 에 상응한 값이며 1축 압축보강판의  $\beta$ 는 3.78-2.49로 본 연구의  $\tau=10-500$ 의  $\beta_{opt}$ 에 상응한 값이고 인장부재의  $\beta$ 는 3.86-2.76(항복), 4.04-2.72(파괴)로 이  $\beta$  값들은 본 연구의  $\tau=25-750$ 의  $\beta_{opt} = 2.84 - 3.82$ (항복),  $\tau=25-1000$ 의  $\beta_{opt}=2.87-3.92$ (파괴)에 상응한 값으로  $L/D$ 의 변화한다.

표-1. 강구조부재의 최적목표신뢰성지수 (D+L) n = 2.0 ,  $\rho = 1.0$

강 부 재	세 부 사 항	$\tau$	$\beta_{opt}$	CI	CF	CT	비 고	
강 기 등	도로교시방서	1000	3.9505	8616	332	8948		
	AASHTO 시방서	250	3.5046	8446	489	8936		
강 보	도로교시방서	압 연	250	3.5279	8174	436	8610	
		용 접	250	3.5457	7790	400	8390	
		계	250	3.5410	8236	409	8445	
	AASHTO 시방서	압 연	50	3.0231	6570	614	7184	
		용 접	50	2.8024	6569	613	7182	
		계	50	3.0230	7047	441	7488	
강 판	압 축	25	2.7682	6610	470	7080		
	휨	50	3.0807	6728	355	7083		
	전 단	25	2.8281	6365	374	6739		
압 축 강 판	압 연 지지판	I	1000	3.9535	8628	333	8961	
		II	25	2.8101	6433	400	6833	
	편 연 지지판	I	1000	3.9708	8438	304	8742	
		II	100	3.2916	7220	370	7590	
강 판 형	대 칭	휨	50	3.0638	6814	377	7191	
		전단	25	2.7710	6597	465	7062	
		휨	100	3.2681	7384	408	7792	
	비 대 칭	전단	10	2.2931	6306	699	7005	
		휨 + 전단	250	3.5532	7918	387	8305	
		계	50	3.0205	7063	446	7509	
강 보 - 기 등	케 이 스 a	50	3.0391	6950	414	7364		
	케 이 스 b	100	3.2465	7553	448	8001		
	케 이 스 c	250	3.5425	8022	407	8429		
인 장 부 재	항 복 인 경 우	100	3.2716	7359	402	7761		
	파 괴 인 경 우	250	3.5605	7850	374	8224		
압 축 보 강 판	일 축 인 경 우	100	3.2856	7260	380	7640		

표-2 강기둥의  $\phi'$ ,  $\gamma_i$  값의 비교

$n = 2, \rho = 1.0$

$\tau$	본 연구					AFOSM			
	$\beta_{opt}$	$\phi'$	$\gamma_d'$	$\gamma_l'$	$\beta_o$	$\phi'$	$\gamma_d'$	$\gamma_l'$	
도로교시방서	3	2.1733	1.1123	1.1040	1.6387	2.0	1.1340	1.1001	1.6096
	5	2.3702	1.0881	1.1084	1.6710				
	10	2.6201	1.0578	1.1139	1.7114	2.5	1.0723	1.1113	1.6921
	25	2.9252	1.0215	1.1204	1.7596				
	50	3.1403	0.9765	1.1243	1.7923	3.0	1.0128	1.1220	1.7713
	100	3.3435	0.9732	1.1291	1.8238				
	250	3.7975	0.9447	1.1342	1.8617	3.5	0.9555	1.1323	1.8473
	500	3.7798	0.9246	1.1379	1.8885				
	750	3.8826	0.9134	1.1397	1.9034	4.0	0.9007	1.1422	1.9203
	1000	3.9345	0.9056	1.1413	1.9138				

표-3. 강구조부재의 최적공칭저항계수( $\phi'$ )

$n = 2.0, \rho = 1.0$

강 부 재	세 부 사 항	$\phi'$			$n'$	
		1.2D+2.0L	1.2D+1.8L	1.2D+1.6L		
강 기 등	도로교시방서	.95	.89	.83	1.68	
	AASHTO 시방서	.79	.74	.69	2.02	
강 보	도로교시방서	압 연	.92	.86	.81	1.73
		용 접	.88	.83	.78	1.80
		계	.94	.88	.82	1.70
	AASHTO 시방서	압 연	.94	.88	.82	1.70
		용 접	.92	.86	.81	1.74
		계	.89	.83	.78	1.80
강 판	압 축	.88	.83	.77	1.81	
	휨	.91	.85	.80	1.75	
	전 단	.92	.88	.81	1.73	
압 축 강 판	압 연 지지판	I	.94	.88	.82	1.70
		II	.91	.85	.79	1.76
	편 연 지지판	I	.96	.90	.84	1.65
		II	.90	.85	.79	1.77
강 판 형	대 칭	휨	.90	.84	.78	1.77
		전단	.89	.83	.78	1.79
	비 대 칭	휨	.90	.84	.78	1.77
		전단	.91	.85	.79	1.75
		휨 + 전단	.90	.84	.78	1.78
		계	.90	.85	.80	1.76
강 보 - 기 등	케 이 스 a	.92	.86	.81	1.73	
	케 이 스 b	.92	.86	.81	1.73	
	케 이 스 c	.92	.87	.81	1.73	
인 장 부 재	항복인 경우	.93	.87	.81	1.72	
	파괴인 경우	.89	.84	.78	1.79	
압 축 보 강 판	일 축 인 경우	.90	.84	.78	1.78	



표-4. 각 설계기준에 의한 최적공칭저항계수와 최적공칭안전율

강 구조 부재	AISC-LRFD	AASHTO-LRFD	도로 교시	본 연구		
	(1.2D+1.6L)	(1.25D+1.75L)	(1.30D+1.95L)	1.2D+2.0L	1.2D+1.8L	1.3D+1.95L
강 기 등 (압축)	0.85	0.90	0.85	0.95	0.89	0.96
강 보 (휨)	0.90	1.00	0.95	0.94	0.88	0.95
인 장	항 복	0.90	0.95	0.90	0.93	0.87
	파 괴	0.75	0.80	0.75	0.89	0.84
강 보 - 기 등	0.90	0.90	0.90	0.92	0.86	0.94
강판형	휨	0.90	1.00	0.95	0.90	0.85
	전단	0.90	1.00	0.95	0.91	0.83

### 5.3 최적목표신뢰성지수의 산정

총기대비용최소화원칙에 의한 신뢰성해석의 연구로는 CIRIA Report 63<sup>4)</sup>에서는 사회적 - 경제적 기준에 의한 접근법으로  $\tau=35-75$ (보요소),  $\tau=350-750$ (기둥요소)로  $\beta_{opt}$ 을 선정하고 있고, Yamamoto<sup>13)</sup>는 인간오차를 포함하여  $\tau=10-100$ 의  $\beta_{opt}$ 을 강도설계기준의 신뢰성 검정에 선정하고 있다. 그리고 Kanda-Ellingwood는  $\tau=15-50$ 정도의  $\beta_{opt}$ 를 건물과 교량구조물의 신뢰성검정에 선정하고 있다.

AISC LRFD 사양서에서는 하중비  $\rho=L/D=1.0$ 일때의  $\beta$ 값을 강구조부재의 목표신뢰성지수  $\beta_o = 2.7-3.6$ (강기둥),  $\beta_o = 2.5-2.8$ (압연보의 휨),  $\beta_o = 2.5-2.9$ (용접보의 휨),  $\beta_o = 2.6-2.9$ (강판형의 휨),  $\beta_o = 2.3$ (강판형의 전단)으로 안전수준의 검정에 채택하고 있다. 이 값들은 본 연구에서 제안한 총기대비용최소화원칙에 의한  $\tau=10-50$ 의  $\beta_{opt}$ 값과 거의 일치하는데 반하여 현행도로교의 WSD기준은  $\beta=4.82-3.45$ (강기둥), 4.01-3.04(압연보의 휨), 4.20-3.13(용접보의 휨)정도 훨씬 높은 안전수준으로  $\tau=50-1000$ 의  $\beta_{opt}$ 값과 거의 일치하고 있다. 이는 AISC LRFD설계가 현행도로교의 WSD설계기준보다 낮은 신뢰성을 갖는 설계가 됨을 나타낸것이다.

따라서 현행 강구조부재의 통상하중비인  $L/D=1.0-2.0$  사이에서 목표신뢰성지수  $\beta_o$ 를 선정하고 있는데, 현재 교량의 고속화 및 중량화에 따른 재하상태 강구조부재의 우리 기술수준등을 고려한 최적목표신뢰성지수의 선정 결과가 표-1에 요약되어 있다.

표-1과 그림-3,4에서 보면 알 수 있듯이 강기둥에 대한 도로교의 WSD 기준의 총기대비용  $C_T$ 값이 AASHTO기준의  $C_T$ 값보다 다소 높는데 반하여 파괴비용  $C_F$ 는 AASHTO기준의  $C_F$ 가 더 높게 나타난다. 이는  $\tau = C_F/C_T$ 의 함수에 좌우되어진다고 볼수 있는데 현행 도로교의 WSD기준은  $\beta_{OPT}=3.9545$ 에 대응하는 파괴확률로  $C_T, C_F$ 를 산출한데 반하여 AASHTO기준에서는  $\beta_{opt}=3.5279$ 에 대응하는 파괴확률로 산출했기 때문이다.

강보에서도 현행 도로교의 WSD기준의  $C_T$ 값이 AASHTO기준의  $C_T$ 값보다 훨씬 높은 값인데 반하여  $C_F$  값은 반대가 되므로 현행 도로교의 WSD기준 설계가 AASHTO기준설계보다 비경제적인 설계가 됨을 입증해주고 있다.

### 5.4 최적 신뢰성 설계기준

다음의 그림-5,6에서는 하중비 e 및 총기대비용과 파괴비용의 비  $\tau$ 의 변화에 따른 일련의  $\phi, \gamma_i$ 의 값을 수록하였다. 표-2는  $n=2.0, \rho=1.0$ 인 경우 강구조부재에 대한  $\beta_o$ 에 따른 AFOSM의 저항계수  $\phi'$ , 하중계수  $\gamma_1'$ 와 본 연구에서 제시한  $\tau$ 의 변화에 따른  $\beta_{opt}$ 의 저항계수  $\phi'$ , 하중계수  $\gamma_1'$ 을 비교한 것이다.

표에서 보면 강구조부재에 대한 AFOSM의  $\beta_o=2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ 의  $\phi', \gamma_1'$ 값은 각각 본 연구의  $\tau=3, 10, 50, 250, 1000$ 의  $\phi', \gamma_1'$ 값과 거의 일치하고있다.

표-3은 안전율( $n'$ )을 강구조부재에 따라 일정한값으로 고정하고 강구조부재의 최적공칭저항계수  $\phi'$ 를 사하중 D와 활하중 L의 하중조합 D+L별로 분석하여 Level-I형 설계기준으로 재조정된 값들이다.

현행 AISC-LRFD, AASHTO-LRFD, AASHTO-LFD의 하중조합은 각각 1.2D + 1.6L, 1.25D + 1.75L, 1.3D + 2.17L을 사용하고 있다. 이에 대한 강구조부재의 최적공칭저항계수와 최적공칭안전율을 비교 분석하면 표-4와 같이 된다.

표-4에서와 같이 강구조부재에 관계없이 일정하게 현행 AASHTO-LFD설계규준의  $\phi'=0.9$ ,  $n_{opt}=1.93$ 인데 반하여 AISC-LRFD, AASHTO-LRFD 및 본 연구의  $\phi'$ ,  $n_{opt}$ 는 강구조부재별로 다르게 나타나고 있다. 이는 하중계수의 확률분포모형이나 통계적 특성을 고려하여 하중모형을 유도한 다음 이로부터 하중비의 변화와 무관하게  $\tau$ 의 함수로 일관성있는 안전수준을 주는 하중규준을 결정했기 때문이다.

또한 AISC-LRFD, AASHTO-LRFD설계규준의  $n_{opt}$ 이 본 연구의  $n_{opt}$ 보다 낮은 것은 AISC-LRFD, AASHTO-LRFD의 안정성 수준보다 본 연구의 안정성 수준(최적신뢰성지수)을 낮게 선정했기 때문이다. 이는 하중계수를 일반적으로 사용하는 값으로 고정한 후 강구조부재별  $\phi'$ 를 분석한 결과와 최적공칭안전율을 일반적으로 사용되는 값으로 고정한 후 강구조부재별  $\phi'$ 를 분석한 결과는 서로 보완적으로 이용될수 있다는 것을 나타낸 것이다.

따라서 본 연구에서 제안한 강구조부재의 최적저항계수  $\phi'$ 가 AISC-LRFD시방서의 1.2D+1.6L의  $\phi'$ 값과 AASHTO-LRFD시방서의 1.25D+1.75L의  $\phi'$ 값보다 다소 낮은 것은 우리 현실을 고려하여 안전측의 최적공칭하중계수  $\gamma_L$ 를 택하였기 때문에 강구조부재의 강도설계규준의 선정시에 표-3, 표-4의 하중조합에 따른  $\phi'$ 값을 사용함이 바람직하다고 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 하중 및 저항의 불확실성을 합리적으로 고려할수 있도록 총기대비용 최소화 원칙에 의한 구조신뢰성이론에 근거한 강구조부재의 설계규준을 제시하고자 하였으며 이를 위해 포괄적인 기초연구를 수행하였다. 본 연구결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

가) 국내에서 시공되는 강구조부재는 현장품질강도를 포함하여 시공오차가 상대적으로 크기때문에 외국규준에 근거한 현행저항계수(감소계수)를 사용하는데는 무리가 있다. 특히, 강구조부재별에 따라서 발생하는 오차의 특성에 차이가 있어 동일한 저항계수를 사용하는 것은 불합리한 것으로 나타났다.

나) 본 연구에서의 분석결과와 국내에서 사용되는 현행도로교의 WSD설계규준이 내포하고 있는 안전수준에 비추어 표-4의 MATRIX로 공칭하중 및 공칭저항계수식을 제안할수 있다.

다) 향후 도로교시방서의 개정에서 보다 높은 안전수준이 요구된다면 본 연구의 분석결과를 이용하여 약간 증가된 공칭하중계수를 선정할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 이증빈, 김우석, 조효남, "강도로교의 신뢰성설계규준에 관한 연구" 대한토목학회 논문집, 제5권 제1호, 1985. 3, pp. 43-53
2. 이증빈 "하중계수에 기초한 최적신뢰성 해석모형개발" 한국전산구조공학회는문집, 제5권, 제4호 1992. 12 pp. 113-123
3. 이증빈, 장석모 "총기대비용최소화원칙에 의한 최적신뢰성지수." 한국전산구조공학회는문집, 제6권. 1993. 10. pp. 216-223.
4. 이증빈, 박주원 "총기대비용최소화원칙에 의한 강구조물의 최적설계규준," 「순천공업전문대학 학술 연구조성비 지원 연구보고서」 (1994년도).

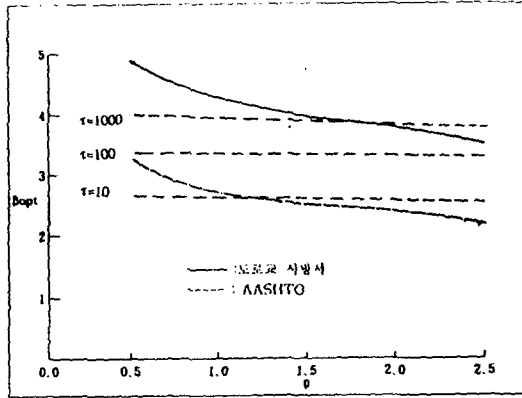


그림-1  $\rho$ 에 따른  $B_{opt}$  (기둥)

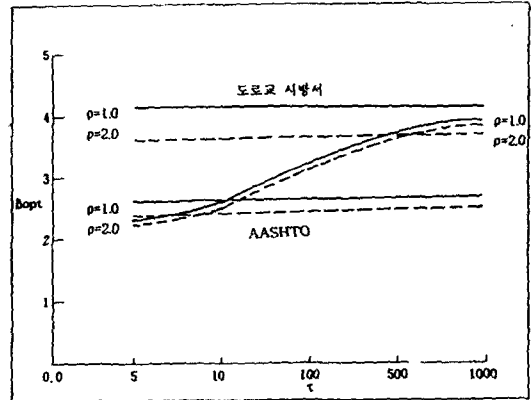


그림-2  $\tau$ 에 따른  $B_{opt}$ (기둥)

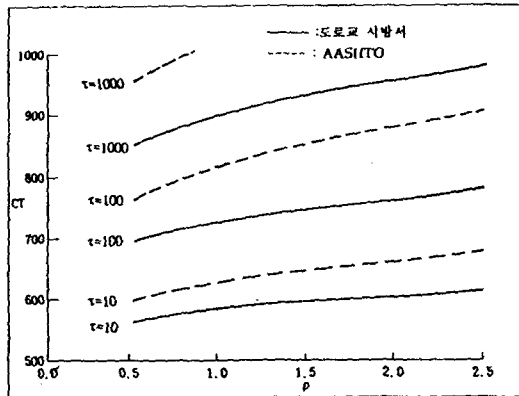


그림-3  $\rho$ 에 따른  $C_T$  (기둥)

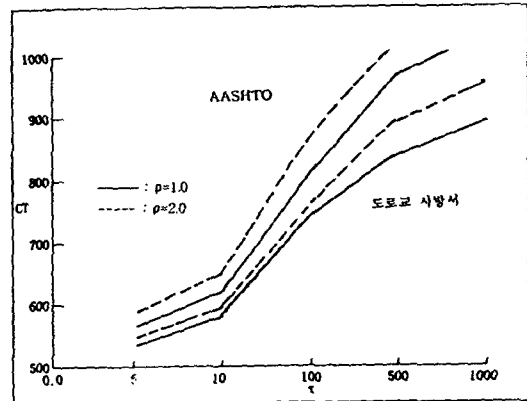


그림-4  $\tau$ 에 따른  $C_T$  (기둥)

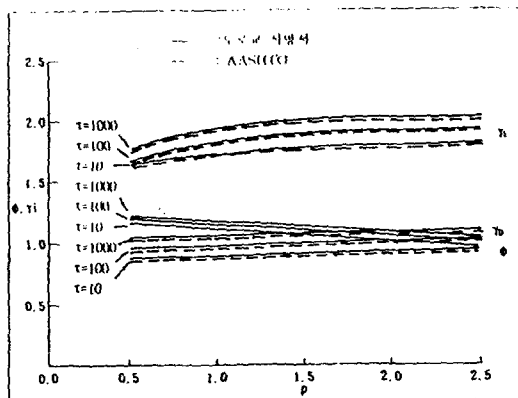


그림-5  $\rho$ 에 따른  $\phi, \gamma_i$  (기둥)

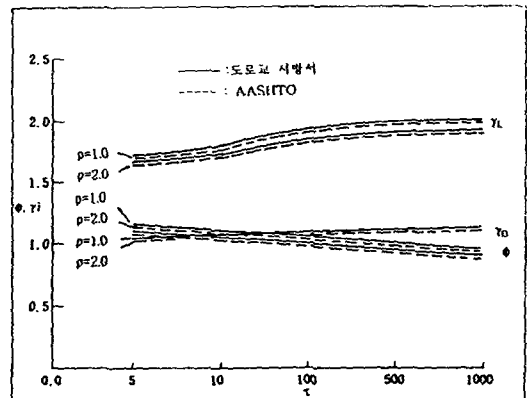


그림-6  $\tau$ 에 따른  $\phi, \gamma_i$  (기둥)