

CFST의 D/t 제한모델들에 대한 신뢰성해석에서 모델링불확실성을 해결하는 선택적 방법

한택희¹ · 김정중^{2*}

¹한국해양과학기술원 연안공학연구본부, ²경남대학교 토목공학과

An Alternative Perspective to Resolve Modelling Uncertainty in Reliability Analysis for D/t Limitation Models of CFST

Taek Hee Han¹ and Jung Joong Kim^{2*}

¹Coastal & Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan, 426-744, Korea

²Department of Civil Engineering, Kyungnam Univ., Changwon, 631-701, Korea

Abstract

For the design of Concrete-Filled Steel Tube(CFST) columns, the outside diameter D to the steel tube thickness t ratio(D/t ratio) is limited to prevent the local buckling of steel tubes. Each design code proposes the respective model to compute the maximum D/t ratio using the yield strength of steel f_y or f_{yk} and the elastic modulus of steel E . Considering the uncertainty in f_y and E , the reliability index β for the local buckling of a CFST section can be calculated by formulating the limit state function including the maximum D/t models. The resulted β depends on the maximum D/t model used for the reliability analysis. This variability in reliability analysis is due to ambiguity in choosing computational models and it is called as "modelling uncertainty." This uncertainty can be considered as "non-specificity" of an epistemic uncertainty and modelled by constructing possibility distribution functions. In this study, three different computation models for the maximum D/t ratio are used to conduct reliability analyses for the local buckling of a CFST section and the reliability index β will be computed respectively. The "non-specific β s" will be modelled by possibility distribution function and a metric, degree of confirmation, is measured from the possibility distribution function. It is shown that the degree of confirmation increases when β decreases. Conclusively, a new set of reliability indices associated with a degree of confirmation is determined and it is allowed to decide reliability index for the local buckling of a CFST section with an acceptable confirmation level.

Keywords : concrete filled tube, reliability analysis, modelling uncertainty, possibility distribution function

1. 서론

최근 들어 강재와 콘크리트의 장점을 효과적으로 이용할 수 있는 합성 부재의 사용이 증가하고 있다. 특히 강관에 콘크리트를 충전하는 콘크리트충전강관(concrete-filled steel tube, CFST)의 경우, 철근콘크리트(reinforced concrete, RC) 부재에 비해 내하력과 강성이 우수하여 그 사용성이 증가하고 있으며, 특히 기둥부재로서의 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. RC 부재의 경우, 콘크리트가 횡철근에

의해 구속되어 3축 구속 상태를 유지하나, 횡철근은 강관과 같이 연속적으로 존재하지 않고 불연속적으로 배근됨에 따라 콘크리트에 연속적이고 완전한 구속능력을 제공할 수 없다. 하지만, CFST 부재는 연속적인 강관에 의해 콘크리트가 완전히 3축 구속되어 부재의 강도 증진 효과가 뛰어나며 강관이 축력과 모멘트에 저항함으로써 우수한 내력 및 변형 성능을 발휘한다. CFST 기둥 설계 시, 강관의 국부좌굴을 방지하기 위하여 강관두께 t 에 대한 기둥외경 D 의 크기를 제한하고 있다. 최대 D/t 값은 일반적으로 강재의 항복응력 f_y ,

* Corresponding author:

Tel: +82-55-249-6421; E-mail: jungkim@kyungnam.ac.kr

Received July 4 2015; Revised July 16 2015;

Accepted July 17 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

또는 f_y 와 강재의 탄성계수 E 의 식으로 표현된다(AISC, 1998; AIJ, 1985; CSA, 1994). CFST 부재의 거동 및 특성에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다(Inai *et al.*, 2004; Sakino *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2005).

신뢰성해석에 의해 결정된 구조물의 파괴확률은 구조물의 해석값(응력, 저항력, 휨모멘트 등)을 얻기 위해 사용된 전산모델에 의존적이다. 이러한 전산모델에 따른 신뢰성해석 결과의 가변성(variability)을 모델링불확실성(modelling uncertainty)이라고 한다(Melchers, 1999). 모델링불확실성은 정보적불확실성(epistemic uncertainty)의 하나로 알려진 불명확성(non-specificity)으로 고려할 수 있으며, 불명확성은 가능성분포함수(possibility distribution function)를 구성하여 모델링 할 수 있다(Kim *et al.*, 2010). 불명확성 이외의 다양한 형태의 정보적불확실성에 대한 연구와 적절한 모델링 기법에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다(Ross, 2010; Klir, 2006; Hoffman and Hammonds, 1994; Helton and Burmaster, 1997; Matthies *et al.*, 1997; Dempster, 1967; Shafer, 1976; Dubois and Prade, 1988).

본 연구에서는 AISC(1998), AIJ(1985), CSA(1994)에서 제안된 3개의 최대 D/t 계산식에 포함된 f_y 와 E 의 불확실성을 고려하여, CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성 해석을 수행하고 각각의 신뢰성지수를 계산할 것이다. 신뢰성지수들의 불명확성은 가능성분포함수를 이용하여 모델링하고 가능성이론의 확신정도(degree of confirmation)를 사용하여 측정할 것이다. 결과적으로, 확신정도가 측정된 신뢰성지수들을 얻을 수 있으며, 확신정도를 고려한 CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성지수의 결정이 가능하게 된다.

2. 본 론

이 장에서는 가능성이론과 이를 바탕으로 한 가능성분포함수를 소개한 후, 확신정도를 고려한 신뢰성지수를 산정하는 방법을 소개하고자 한다. CFST 설계 시 강관의 국부좌굴을 방지하기 위해 제시된 최대 D/t 계산식에 대한 사례연구를 수행하였다.

2.1 가능성 이론

가능성이론은 확률이론과 함께 증거이론(evidence theory)의 특수한 형태로 고려할 수 있다(Dempster, 1967; Shafer, 1976). 증거이론에서 신뢰정도(degree of belief) m 은 가능한 모든 경우에 대하여 증거를 바탕으로 부여된다. 예를 들어, 이산 집합 $X = \{0, 1\}$ 에 대한 가능한 모든 부분집합은, \emptyset , $\{0\}$, $\{1\}$,

$\{0, 1\}$ 이다. 부여된 모든 m 의 합이 1이 되도록 공집합을 제외한 각각의 부분집합에 $m = [0, 0.4, 0.4, 0.2]$ 와 같이 m 을 부여할 수 있다. 증거이론에서는 이렇게 부여된 m 을 바탕으로 다음과 같이 이중일방향측정(dual monotone measure), belief와 plausibility를 사용한다.

$$bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B), \quad pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (1)$$

식 (1)에 따라 $\{0\}$ 의 belief는 0.4이고, plausibility는 0.6으로 계산된다. 증거이론에서 plausibility와 belief의 차이를 ignorance라 하고 우리의 지식의 부족(lack of knowledge)을 표현한다. 확률이론은 증거이론의 특별한 경우(ignorance=0)로, 부여된 모든 m 의 합이 1이 되도록 각각의 원소에 m 을 부여한다. 예를 들어, $m = [0, 0.5, 0.5, 0]$ 인 경우, $\{0\}$ 의 belief와 plausibility는 모두 0.5로 같으므로, 하나의 일방향측정인 확률(probability)만을 사용한다. 가능성이론은 증거이론의 또 다른 특수한 경우로, m 이 부여된 부분집합이 각기 그 앞의 것에 포함되는 경우이다. 예를 $m = [0, 0.5, 0, 0.5]$ 인 경우, $\{0\}$ 의 belief는 0.5이고, plausibility는 1.0이다. 또한, $\{1\}$ 의 belief는 0이고, plausibility는 0.5이다. 가능성이론에서는 최대값이 1인 가능성분포(possibility distribution) π 를 각각의 원소에 부여한다. 가능성이론의 π 와 증거이론의 m 은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\pi(x) = \sum_{x \in S} m(S) \quad (2)$$

가능성이론에 대한 예에 대하여 살펴보면, $\{0\}$ 과 $\{1\}$ 의 π 가 식 (2)에 의하여 각각 1과 0.5로 계산된다. 가능성이론에서는 π 를 바탕으로 다음과 같이 이중일방향측정(dual monotone measure), certainty와 possibility를 사용한다.

$$cert(A) = 1 - pos(\bar{A}), \quad pos(A) = \max\{\pi(x) : x \in A\} \quad (3)$$

식 (3)에 따라 $\{0\}$ 의 certainty는 0.5이고, possibility는 1.0이다. 또한, $\{1\}$ 의 certainty는 0이고, possibility는 0.5이다. certainty와 possibility가 각각 증거이론을 바탕으로 계산된 belief와 plausibility의 값과 같다. certainty와 possibility를 합쳐 식 (4)의 확신정도(degree of confirmation)를 쓰기도 한다(Klir and Yuan, 2006).

$$conf(A) = pos(A) + cert(A) - 1 \quad (4)$$

$conf$ 의 범위는 -1부터 1이고, 음수는 불확신정도를 나타낸다.

2.2 가능성분포함수

가능성이론의 실용적인 사용을 위하여 가능성이론을 연속 구간에 대하여 확장하였다(Klir, 2006). 연속구간에서 부분 집합은 구간들(intervals)로 고려할 수 있으며, 구간들은 각기 그 앞의 것에 포함된다. 이러한 구간들(consonant set of intervals) H 에 부여된 m 을 바탕으로 식 (5)와 같이 가능성분포함수를 구성할 수 있다.

$$\pi(x) = \sum_{x \in H_i} m(H_i) \quad (5)$$

Fig. 1에 각기 그 앞의 것에 속한 3개의 구간을 이용하여 가능성분포함수를 구성하는 예를 보였다. 실제 공학문제에서 사용하는 구간들은 주로 일부만 겹치거나, 독립적이기 때문에, 가능성분포함수를 구성하기 위해서는 구간들을 먼저 각기 그 앞의 것에 포함되도록 변환해야 한다. 다양한 형태의 구간 집합에 대한 변환방법이 연구되었다(Ross, 2010).

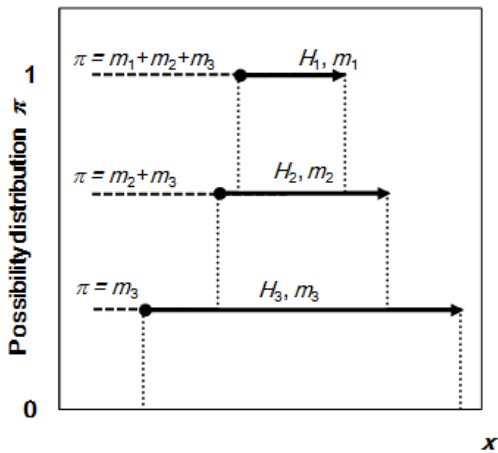


Fig. 1 Description of possibility distribution function

2.3 확신정도에 따른 신뢰성지수 산정

Fig. 2에 도식적으로 보인 것처럼, 선택 가능한 전산모델들을 모두 이용하여 신뢰성해석을 수행한다. 해석된 신뢰성지수에 부여된 m 을 바탕으로 가능성분포함수를 구성한다. 일반적으로 가장 불명확한 경우를 고려하여 해석된 결과들에 동일한 m 을 부여한다. 구성된 가능성분포함수로부터 확신정도(degree of confirmation)를 측정하여 확신정도에 따른 신뢰성지수를 도출한다(Kim et al., 2013).

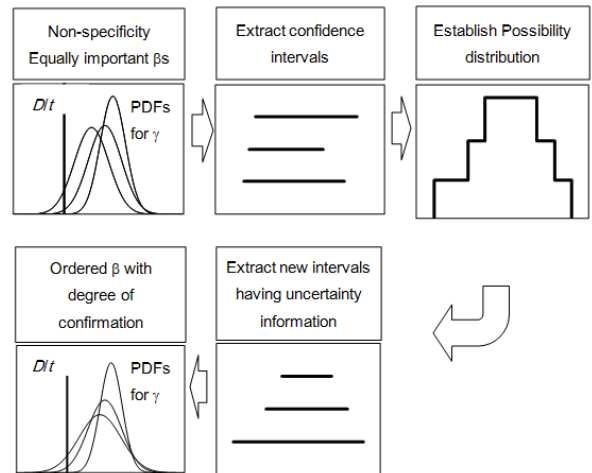


Fig. 2 Description of the reliability analysis including modelling uncertainty

2.4 사례연구

CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성을 산정하기 위해 식 (6)과 같은 한계상태함수 G 를 고려할 수 있다.

$$G = \gamma(f_y, E, constant) - D/t \quad (6)$$

식 (6)에서 $\gamma(f_y, E, constant)$ 는 강재의 항복응력 f_y , 또는 f_y 와 강재의 탄성계수 E 를 포함한 최대 D/t 계산식이다. D 는 CFST 단면의 외경, t 는 강관의 두께이다. 신뢰성지수 β 는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\beta = \frac{\mu_\gamma - D/t}{\sigma_\gamma} \quad (7)$$

식 (7)에서 μ_γ 는 f_y 와 E 의 평균값에서 계산된 최대 D/t 값의 평균이고, σ_γ 는 f_y 와 E 의 표준편차로부터 파급된 최대 D/t 값의 표준편차로 f_y 와 E 가 서로 독립적인 변수일 경우 식 (8)과 같이 계산된다.

$$\sigma_\gamma^2 = \left(\frac{\partial \gamma(\cdot)}{\partial f_y} \right)^2 \sigma_{f_y}^2 + \left(\frac{\partial \gamma(\cdot)}{\partial E} \right)^2 \sigma_E^2 \quad (8)$$

최대 D/t 계산식으로는 AISC(1998), CSA(1994), AIJ(1985)에서 각각 제안된 식 (9), (10), (11)을 고려하였다.

$$\gamma_{AISC} = \sqrt{8E/f_y} \quad (9)$$

$$\gamma_{CSA} = 28000/f_y \quad (10)$$

$$\gamma_{AIJ} = 23520/f_y \quad (11)$$

식 (9)는 확률변수로 f_y 와 E 를 모두 고려할 수 있지만, 식 (10)과 (11)은 f_y 만을 확률변수로 고려할 수 있다. 확률변수 f_y 와 E 의 분포를 모두 분산계수(Coefficient of Variation, COV) 10%인 정규분포로 가정하고, 외경 $D=152.4\text{mm}$, 강관 두께 $t=3.12\text{mm}$, $D/t=48.85$ 인 CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성해석 결과는 Table 1과 같다. f_y 와 E 의 평균은 각각 400MPa, 210GPa를 사용하였다.

Table 1 Reliability analyses for the local buckling of a CFST section

| D/t model | μ_γ | σ_γ | $\mu_\gamma \pm 3\sigma_\gamma$ | β | m |
|---------------------|--------------|-----------------|---------------------------------|---------|-----|
| Eq. (9) AISC, 1998 | 64.8 | 4.58 | [51.1, 78.6] | 3.5 | 1/3 |
| Eq. (10), CSA, 1994 | 70.0 | 7.0 | [49.0, 91.0] | 3.0 | 1/3 |
| Eq. (11), AIJ, 1985 | 58.8 | 5.88 | [41.2, 76.4] | 1.7 | 1/3 |

식 (7)에 의해서 결정된 Table 1의 신뢰성지수 β 는, CFST 단면의 D/t 가 계산된 최대 D/t 를 초과할 확률, 즉, Fig. 3에서 $D/t=48.85$ 이하의 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 적분한 확률, p_e 와 식 (12)의 관계를 가진다. 식 (12)에서 $\Phi(\cdot)$ 는 표준 정규분포 누적밀도 함수이다.

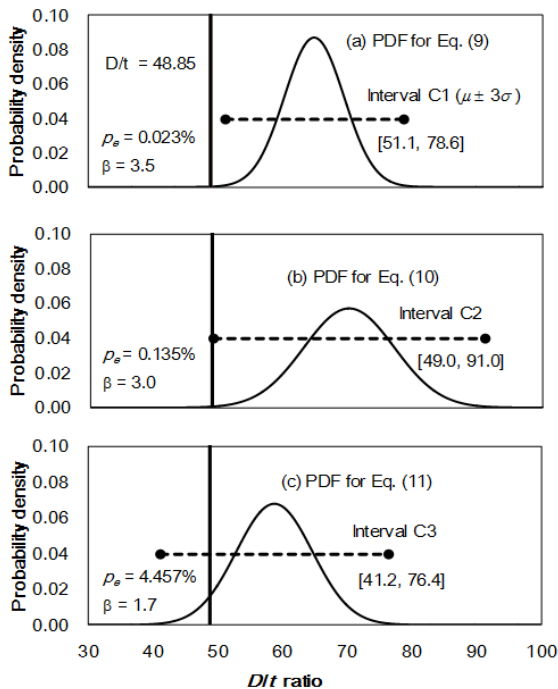


Fig. 3 Reliability analyses and intervals extracted from PDF(broken line is extracted from solid line) using Eq. (9), (10) and (11) respectively

$$p_e = \Phi(-\beta) \quad (12)$$

Table 1의 신뢰성지수들은 모두 동일한 신뢰정도(degree of belief) m 을 가지며, 어떤 값을 선택할지 가장 불명확한 상태이다. 이제 Fig. 3의 각각의 PDF로부터 추출된 $\mu_\gamma \pm 3\sigma_\gamma$ 구간(interval), C1, C2, C3을 이용하여 가능성분포함수를 구성한다. 먼저 3개의 구간으로부터 선택 가능한 모든 구간을 고려한다. 이 때, 구간의 시작점은 시작점으로만 사용되고, 끝점은 끝점으로만 사용되어야 한다. Table 2에 C1, C2, C3 구간으로 구성할 수 있는 모든 구간을 나타내고, 동일한 비중으로 정규화 하였다.

Table 2 All possible intervals from C1, C2 and C3 intervals

| Reference | Interval | weight | Normalized weight |
|-----------|--------------|--------|-------------------|
| C1 | [51.1, 78.6] | 1/3 | 1/9 |
| C2 | [49.0, 91.0] | 1/3 | 1/9 |
| C3 | [41.2, 76.4] | 1/3 | 1/9 |
| New1 | [51.1, 91.0] | 1/3 | 1/9 |
| New2 | [51.1, 76.4] | 1/3 | 1/9 |
| New3 | [49.0, 78.6] | 1/3 | 1/9 |
| New4 | [49.0, 76.4] | 1/3 | 1/9 |
| New5 | [41.2, 78.6] | 1/3 | 1/9 |
| New6 | [41.2, 91.0] | 1/3 | 1/9 |

C1, C2, C3 구간이 모두 공통으로 가지는 구간 New2 = [51.1, 76.4]를 바탕으로 각기 그 앞의 것에 포함되는 구간들의 집합(consonant set of intervals)을 Table 3과 같이 구성할 수 있다.

Table 3 Consonant set of intervals based on the consistent interval [51.1, 76.4]

| Reference | Interval | Normalized weight |
|-----------|--------------|-------------------|
| New2 | [51.1, 76.4] | 1/9 |
| New3 | [49.0, 78.6] | 1/9 |
| New6 | [41.2, 91.0] | 1/9 |

나머지 구간들의 비중은 Table 3의 구간들에 유사성(similarity)을 바탕으로 재분배된다. 예를 들어, C1 구간과 Table 3의 구간들의 유사성 λ 와 재분배계수 κ 는 각각 식 (13)과 (14)와 같이 계산된다. 나머지 구간들의 유사성과 재분배계수를 계산할 수 있으며, Table 4에 정리하였다.

$$\lambda_{11} = \frac{|[51.1, 78.6] \cap [51.1, 76.4]|}{|[51.1, 76.4]|} = \frac{25.3}{25.3} = 1.0 \quad (13)$$

$$\lambda_{21} = \frac{|[51.1, 78.6] \cap [49.0, 78.6]|}{|[49.0, 78.6]|} = \frac{27.5}{29.6} = 0.9291$$

$$\lambda_{31} = \frac{|[51.1, 78.6] \cap [41.2, 91.0]|}{|[41.2, 91.0]|} = \frac{27.5}{49.8} = 0.5522$$

$$\kappa_{11} = \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{11} + \lambda_{21} + \lambda_{31}} = \frac{1}{1 + 0.9291 + 0.5522} = 0.4030 \quad (14)$$

$$\kappa_{21} = \frac{0.9291}{2.4813} = 0.3744$$

$$\kappa_{31} = \frac{0.5522}{2.4813} = 0.2225$$

Table 3의 구간들의 최종 m 은 자신의 비중과 다른 구간에서 재분배된 비중을 합하여 결정된다. 예를 들어, [51.1, 76.4]의 최종 m 의 계산을 식 (15)에 보였다.

$$m([51.1, 76.4]) = w([51.1, 76.4]) + \sum_{j=1}^6 \kappa_{1j} w(I_j) \quad (15)$$

$$= 1/9 + (0.4030 + 0.3517 + 0.3799 + 0.3663 + 0.4039 + 0.3635)(1/9)$$

$$= 0.363$$

Table 4 Similarity and redistribution factors for weight redistribution from non-consonant intervals to consonant intervals

| Non-consonant intervals | Consonant intervals | λ | κ |
|-------------------------|---------------------|-----------|----------|
| [51.1, 78.6] | [51.1, 76.4] | 1.0000 | 0.4030 |
| | [49.0, 78.6] | 0.9291 | 0.3744 |
| | [41.2, 91.0] | 0.5522 | 0.2225 |
| [49.0, 91.0] | [51.1, 76.4] | 1.0000 | 0.3517 |
| | [49.0, 78.6] | 1.0000 | 0.3517 |
| | [41.2, 91.0] | 0.8434 | 0.2966 |
| [41.2, 76.4] | [51.1, 76.4] | 1.0000 | 0.3799 |
| | [49.0, 78.6] | 0.9257 | 0.3516 |
| | [41.2, 91.0] | 0.7068 | 0.2685 |
| [51.1, 91.0] | [51.1, 76.4] | 1.0000 | 0.3663 |
| | [49.0, 78.6] | 0.9291 | 0.3403 |
| | [41.2, 91.0] | 0.8012 | 0.2934 |
| [49.0, 76.4] | [51.1, 76.4] | 1.0000 | 0.4039 |
| | [49.0, 78.6] | 0.9257 | 0.3739 |
| | [41.2, 91.0] | 0.5502 | 0.2222 |
| [41.2, 91.0] | [51.1, 76.4] | 1.0000 | 0.3635 |
| | [49.0, 78.6] | 1.0000 | 0.3635 |
| | [41.2, 91.0] | 0.751 | 0.2730 |

식 (15)와 같은 방식으로 구간 [49.0, 78.6]과 [41.2, 91.0]의 최종 m 은 각각 0.351과 0.286으로 계산된다. 식 (5)의 m 과 π 의 관계를 이용하여 Fig. 4(a)와 같은 가능성 분포함수를 구성할 수 있다. 가능성분포함수로부터 구간 [51.1, 76.4], [49.0, 78.6], [41.2, 91.0]에 대한 확신 정도를 식 (3)과 (4)를 이용하여 측정할 수 있다. Fig. 4 (b)에 구간 [49.0, 78.6]에 대한 확신정도 측정 예를 보였다. 식 (3)으로부터 구간 내에서 가장 큰 π 가 pos 가 되어 $pos([49.0, 78.6])$ 는 100%이며, 구간 외에서 가장 큰 π 인

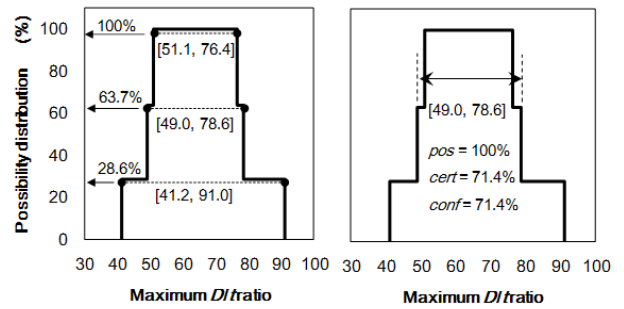


Fig. 4 Possibility distribution and an example to measure the degree of confirmation

28.6%를 100%에서 뺀 값이 $cert$ 가 되어 $cert([49.0, 78.6])$ 는 71.4%이다. 식 (4)로부터 확신정도는 71.4%로 계산된다.

또한, 사례연구에서 사용된 구간 $[\phi_1, \phi_2]$ 가 정규분포 PDF의 $\mu \pm 3\sigma$ 로부터 추출된 점을 고려할 때, 정규분포 PDF를 재구성하기 위한 평균 μ 와 표준편차 σ 를 식 (16)과 (17)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mu = (\phi_1 + \phi_2)/2 \quad (16)$$

$$\sigma = (\phi_2 - \phi_1)/6 \quad (17)$$

Fig. 5에 보인 것처럼 구간 [51.1, 76.4], [49.0, 78.6], [41.2, 91.0]에 대한 정규분포 PDF를 재구성하여 $D/t=48.85$ 에 대한 신뢰성지수를 산정하였다.

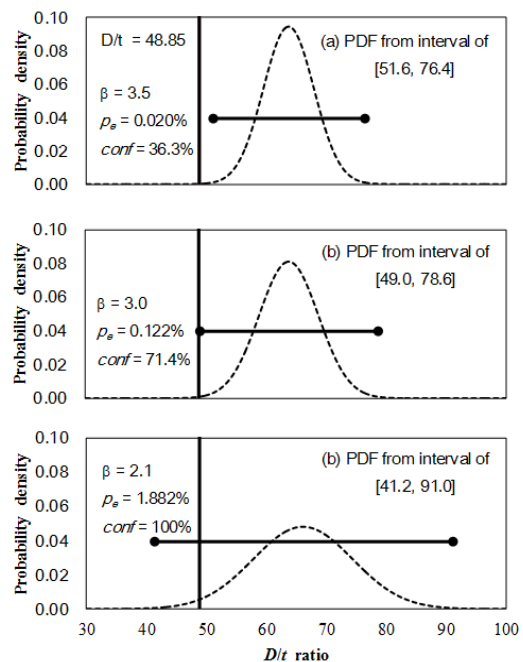


Fig. 5 Reliability analyses and PDF extracted from consonant intervals(broken line is extracted from solid line)

Table 5 A new set of reliability indices with the corresponding degree of confirmation

| Consonant intervals | <i>conf</i> | μ | σ | β |
|---------------------|-------------|-------|----------|---------|
| [51.1, 76.4] | 36.3% | 63.8 | 4.22 | 3.5 |
| [49.0, 78.6] | 71.4% | 63.8 | 4.93 | 3.0 |
| [41.2, 91.0] | 100% | 66.1 | 8.30 | 2.1 |

최종적으로 Table 5에 보인 것처럼 확신정도가 측정된 신뢰성지수들을 얻을 수 있다. 높은 신뢰성지수 $\beta=3.5$ 에 대한 확신 36.3%는 낮은 신뢰성지수 $\beta=2.1$ 에 대한 확신 100%보다 낮음을 알 수 있다.

허용 확신정도를 설정하여 본 연구에서 제안된 방법을 신뢰성해석에 실용적으로 적용할 수 있을 것이다. 예를 들어, 사례연구를 위해 사용된 최대 D/t 계산식이 모두 신뢰도가 매우 높은 모델들이라면, 이 들을 사용한 결과에 대해서는 상대적으로 낮은 확신정도(50% 이하)의 $\beta=3.5$ 를 채택하도록 할 수 있다. 반면, 이 들 모델이 단순한 형태의 간략 모델이므로 추가적인 유한요소해석이 필요하다고 판단되는 경우에는 높은 확신정도(80% 이상)의 $\beta=2.1$ 을 채택할 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 가능성분포함수를 이용하여 모델링 불확실성을 해결하는 방법을 CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성 해석에 적용하였다. 확신정도가 클수록 신뢰성지수가 낮아지는 보수적인 결과를 보여주므로, 확신정도와 함께 신뢰성지수를 선택할 수 있다. 일반적으로, CFST의 D/t 제한 모델은 여러 연구자들과 설계코드 상에서 서로 다른 값을 제안하고 있다. 이러한 이유는 콘크리트의 재료와 콘크리트-강재 사이의 인터페이스, 실험의 오류 등, 여러 가지 불확실성이 내재되어 있고, 서로 고려하는 주요 인자들이 다르기 때문이다. 대부분의 연구자들은 CFST의 D/t 제한 모델에 대하여 역학적인 접근을 통하여 문제를 해결하고 있는 반면에 본 연구에서는 가능성이론의 확신정도를 사용하여 문제에 접근하였다. 사례연구에서는 세 가지 코드에서 제안한 D/t 제한모델 만을 다루었는데, 최근 들어, 콘크리트와 강재의 면적비, 콘크리트와 강재의 최대강도 비 등 다양한 인자들을 포함하는 진보된 식들이 제안되고 있다. 추후에는 이러한 식들을 추가하여 분석을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 12기술혁신E09) 및 한국해양과학기술원(KIOST)

의 “조류에너지 융복합 발전기술 개발(PE99323)”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- American Institute of Steel Construction** (1998) *Load and Resistance Factored Design*, Manual of Steel Construction, Vol. 1.
- Architectural Institute of Japan** (1985) *Design Recommendations for Composite Constructions*, Tokyo.
- Canadian Standard Association** (1994) *Limit State Design of Steel Structures*, CAN/CSA-S16. 1-94, Clause 18, Rexdale, Ontario.
- Dempster, A.P.** (1967) *Upper and Lower Probability Inferences based on a Sample from a Finite Univariate Population*, *Biometrika*:54:515~28.
- Dubois, D., Prade, H.** (1988) *Possibility Theory, an Approach to Computerized Processing of Uncertainty*, USA: Plenum Press.
- Helton, J.C., Burmaster, D.E.** (1996) Guest Editorial: Treatment of Aleatory and Epistemic Uncertainty in Performance Assessments for Complex Systems, *Reliab Eng Syst Saf*:54:91~4.
- Hoffman, O.F., Hammonds, J.S.** (1994) Propagation of Uncertainty in Risk Assessment: the need to Distinguish between Uncertainty due to Lack of Knowledge and Uncertainty due to Variability, *Risk Anal*:14:707~12.
- Inai, E., Mukai, A., Kai, M., Tokinoya, H., Fukumoto, T., Mori, K.** (2004) Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Beam Columns, *J. Struct. Eng., ASCE*, 130(2), pp.189~202.
- Kim, J.J., Reda Taha, M.M., Ross, T.J.** (2010) Establishing Concrete Cracking Strength Interval using Possibility Theory with an Application to Predict the Possible Reinforced Concrete Deflection Interval, *Eng. Struct.*, 32, pp.3592~3600.
- Kim, J.J., Reda Taha, M.M., Noh, H.-C., Ross, T.J.** (2013) Reliability Analysis to Resolve Difficulty in Choosing from Alternative Deflection Models of RC Beams, *Mech. Sys. & Signal Proc.*, 37, pp.240~252.
- Klir, G.J.** (2006) *Uncertainty and information*, USA: John Wiley and Sons.
- Klir, G.J., Yuan, B.** (2006) *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic, Theory and Applications*, Prentice Hall.

- USA.
- Matthies, H.G., Brenner, C.E., Bucher, C.G., Guedes, S.C.** (1997) Uncertainties in Probabilistic Numerical Analysis of Structures and Solids—Stochastic finite Elements, *Struct Saf.* 19:283~336.
- Melchers, R.E.** (1999) *Structural Reliability Analysis and Prediction*, John Wiley & Sons, USA.
- Ross, T.J.** (2010) *Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. Chichester (UK):* John Wiley and Sons.
- Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S., Nishiyama, I.** (2004) Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns, *J. Struct. Eng., ASCE*, 130(2), pp.180~188.
- Shafer, G.** (1976) *Mathematical Theory of Evidence*, USA: Princeton University Press.
- Xiao, Y., He, W., Choi, K.K.** (2005) Confined Concrete-Filled Tubular Columns, *J. Struct. Eng., ASCE*, 131(3), pp.488~497.

요 지

콘크리트충전강관(Concrete Filled Steel Tube, CFST) 기둥 설계 시, 강관의 국부좌굴을 방지하기 위하여 강관두께 t 에 대한 기둥외경 D 의 크기를 제한하고 있다. 각각의 설계시방서에서 각기 다른 최대 D/t 값을 제안하고 있으며, 강재의 항복응력 f_y , 또는 f_y 와 강재의 탄성계수 E 의 식으로 표현된다. f_y 와 E 의 불확실성을 고려할 경우, 최대 D/t 계산식을 포함한 한계상태함수(limit state function)를 구성하여 CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성지수(reliability index) β 를 산정할 수 있다. 결정된 β 는 사용된 최대 D/t 계산식에 따라 달라질 것이다. 이러한 신뢰성해석(reliability analysis) 결과의 가변성(variability)은 한계상태함수에 포함되는 전산모델 선택의 모호함(ambiguity)에서 기인한 것으로 모델링불확실성(modelling uncertainty)이라 한다. 모델링불확실성은 정보적불확실성(epistemic uncertainty)의 하나로 알려진 불명확성(non-specificity)으로 고려할 수 있으며, 불명확성은 가능성분포함수(possibility distribution function)를 사용하여 모델링할 수 있다. 본 연구에서는 다른 3개의 최대 D/t 계산식을 사용하여 주어진 CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성해석을 수행하고 각각의 신뢰성지수를 계산할 것이다. 불명확한 신뢰성지수들은 가능성분포함수를 사용하여 모델링되고, 이로부터 확신정도(degree of confirmation)를 측정할 것이다. 확신정도는 신뢰성지수가 감소하면 증가한다. 결과적으로, 확신정도에 따라 재구성된 신뢰성지수들을 얻을 수 있으며, 허용 확신정도와 함께 CFST 단면의 국부좌굴에 대한 신뢰성지수의 결정이 가능하게 된다.

핵심용어 : 콘크리트충전강관, 신뢰성해석, 모델링 불확실성, 가능성분포함수