

## 불확실성을 고려한 접합부의 최적설계에 관한 연구

신수미<sup>1</sup>, 윤혁기<sup>2</sup>, 김혜민<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 생산기술연구소, <sup>2</sup>(주)DS구조엔지니어링, <sup>3</sup>경남정보대학교 건축과

## The Study of Reliability Based Optimization Design for Connection

Soo-Mi Shin<sup>1</sup>, Hyug-Gee Yun<sup>2</sup>, Hye-Min Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University

<sup>2</sup>DS Design of Structure Engineering Co., LTD

<sup>3</sup>Division of Architecture, Kyungnam College of Information & Technology

**요약** 일반적으로 구조물에는 하중, 재료상수, 부재크기와 구조해석 등의 오차에 대한 불확실성을 존재하고 이러한 불확실성은 구조물의 최적설계에 많은 영향을 준다. 확률론적 해석은 급속하게 발전하고 있고 여러 불확실성을 고려해야 하는 구조설계에서 중요한 기법으로 사용되고 있다. 본 논문에서는 구조물에서 발생하는 불확실성을 고려하기 위하여 신뢰성 해석을 통하여 신뢰도 지수를 산출하였으며 이 값을 최적설계의 제약조건으로 설정하여 확률론적 최적설계를 수행하였다. 최적설계 결과 기존의 불확실량이 고려되지 않은 확정론적 최적설계의 결과 값보다 불확실량이 고려된 최적설계 결과값이 더 크게 나타났으나 불확실성을 고려하는 경우가 구조물의 안정성이 더 확보되는 것으로 생각된다. 본 논문에서는 최적화 기법 중 가장 강력하다고 알려진 SQP(순차이차계획법)을 이용하여 최적화를 수행하였는데 SQP법은 최적화 문제의 정식화를 반복계산 하는 것에 바탕을 두고 각 반복계산에 있어서는 2차 프로그래밍 부속 문제의 해를 구하는데 그 기본을 두는 방법이다. 또 불확실량을 고려한 최적설계를 위해 신뢰성을 기초한 최적설계를 수행하여 신뢰도지수와 파괴확률을 계산하였다. 확정론적 최적설계와 달리 치수, 모양, 재료와 작용하중들의 양에 신뢰성해석을 수행하여 나온 신뢰도지수와 파괴확률을 앞에서 계산한 최적화 과정의 제약조건식에 가적으로 설정하여 최적설계를 수행하였다. T-stub 접합부를 예제로 적용하였으며 해석 결과의 기준문헌과 비교하였다.

**Abstract** Usually, there are many uncertainties regarding the error of an assumed load, material properties, member size, and structure analysis in a structure, and it may have a direct influence on the qualities of optimal design of structures. Probabilistic analysis has developed rapidly into a desirable process and structural reliability analysis is an increasingly important tool that assists engineers to consider uncertainties during the design, construction and life of a structure to calculate its probability of failure. This study deals with the applications of two optimization techniques to solve the reliability-based optimization problem of structures. The reliability-based optimization problem was formulated as a minimization of the structural volume subject to the constraints on the values of componential reliability index determined by the AFOSM approach. This presented method may be a useful tool for the reliability-based design optimization of structures.

**Keywords** : Minimum Cost, Minimum Weight, Optimization Design, Reliability, Uncertainties

“이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2014R1A1A3A04051296)”  
본 논문은 경남정보대학교 연구과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Hye-Min Kim(Kyungnam College of Information & Technology)

Tel: +82-51-320-1312 email: kimemine@eagle.kit.ac.kr

Received March 15, 2016

Revised (1st May 31, 2016, 2nd June 1, 2016)

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

최근 건설되고 있는 건축물의 동향을 살펴보면 비정형 건축물에 대한 계획과 시공이 대다수로 진행되고 있다. 비정형 건축물은 기존 박스형식의 프레임 구조에 비해 외부, 내부에서 작용하는 하중의 분산 능력이 우수하기 때문에 최근의 동향인 거대화, 장대화된 건축물에 적합하다고 볼 수 있다. 또한 비정형의 구조물의 곡면 형상이나 다양한 형태를 표현하기 위해서는 강재를 이용한 구조물로 이루어지고 있는데 이러한 강구조물은 일반적으로 조립식 구조이므로 부재 간 접합 방법이 가장 중요한 변수를 차지하고 있다. 이 중 고력볼트 접합부는 용접 접합과 함께 대표적인 강구조물의 접합방법으로서 접합부의 품질관리가 용이하고 내력과 변형 능력이 특히 우수하다. 구조물의 설계에는 계산상의 실수, 부적절한 설계 검토 등과 재료나 환경, 응력이나 강도의 해석 모델로부터 초래되는 불확실성 등 많은 불확실성이 내재되어져 있다. 불확실성의 문제에 있어서 일반적인 접근법은 구조 매개 변수들이나 하중 조건들을 임의 변수와 영역으로 모델화 하는 것이다. 초기 자료들의 모든 정보는 그것들의 절점 확률 밀도 함수에 의해 제공된다. 지금까지 대다수의 공학자들은 이러한 불확실성 문제를 확률적인 모델로 치환하여 다루고 있다.

본 연구에서는 구조물 응답의 불확실성을 발생시키는 여러 요인들 중에서 수치적으로 정량화에 적합한 구조매개 변수와 하중조건에 의한 불확실성으로 국한하여 연구를 수행한다.

## 2. 불확실성을 고려한 구조물의

### 최적설계

#### 2.1 불확실성과 신뢰성 이론

##### 2.1.1 구조의 불확실성

일반적으로 구조물 응답의 불확실성 원인은 구조물의 내적인 측면과 외적인 측면으로 구분되며 내적인 요인으로는 구조해석상의 원인들은 경계조건, 구조매개변수, 하중조건 그리고 모델링 기법들이 있다. 외적인 요인으로는 작업자와 자연 환경적인 요인 등이 있으며 이러한 불확실성이 구조물의 안전성을 확보하는데 위험요소로 작용한다. 구조시스템의 파괴나 안전성의 결여는 일정한

안전율을 가지는 조건하에서도 재료나 하중의 통계적인 특성의 차이에 따라 달라지기 때문에 구조 설계 시 신뢰성 해석을 적용한 설계법을 도입하면 안전성 확보에 도움이 된다.

구조물의 응답의 불확실성을 발생시키는 여러 요인들 중에서 수치적으로 정량화에 적합한 구조매개 변수와 하중조건에 의한 불확실성으로 국한하여 연구를 수행한다. 불확실성을 고려하는 방법으로 확률통계적인 사항을 고려한 신뢰도 지수와 파괴확률을 계산한다.

##### 2.1.2 신뢰성 이론

구조물의 신뢰도는 구조시스템이 원하는 성능에 얼마나 만족하는지를 나타내는 성능지수로 나타낼 수 있으며 요구하는 설계영역을 만족할 확률로서 표현된다. 신뢰성 공학에서 구조물의 안전성을 확률론적으로 평가하는 방법은 여러 방법[2]이 있으나 본 연구에서는 확률변수의 평균과 분산, 그리고 분포형태만을 이용하여 파괴확률에 대한 상대적인 지표인 신뢰도지수를 근사적으로 산정하는 모멘트법이다. 한계상태방정식을 1차 혹은 2차 함수로 단순 근사하여 정규분포의 확률분포함수를 이용하여, 파괴확률에 대한 간접적인 지표로서 신뢰도지수를 계산한다. 한계상태방정식  $g$  가 0보다 작을 확률인 파괴확률 식은 방정식이 선형이라는 것을 전제로 하므로 한계상태식을 선형함수로 근사하는 과정이 필요하다. 가장 큰 파괴확률을 가지는 선형점(MPDF : Most Probable Failure Point)은 표준정규 변수 공간의 원점으로 상태방정식까지의 길이를 최소화하는 점이다. 따라서 모든 변수를 표준화하고 MPDF에서 1차항까지만 Taylor 전개를 행하면 선형화된 한계상태 방정식은 식(1)과 같으며 신뢰도 지수  $\beta$ 는 식 (2)와 같다.

$$g(x) \approx \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} \Big|_{x=x^*}$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i} \frac{\partial g}{\partial u_i} \Big|_{u=u^*} \sigma_i (u_i - u_i^*) \quad (1)$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial u_i} \Big|_{u^*} (u_i - u_i^*)$$

$$\beta = - \frac{\sum_{i=1}^n u_i^* \frac{\partial g}{\partial u_i} \Big|_{u^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial u_i} \Big|_{u^*} \right)^2}} \quad (2)$$

$$P(g \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_g}{\sigma_g}\right) = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

여기서  $x_i$ : 정규분포 따르는 변수

$\mu_i, \sigma_i$ :  $x_i$ 의 평균과 표준편차

$u_i, u^*$ : 정규분포 변수와 평균

$P$ : 파괴확률

$\Phi$ : 확률분포함수

## 2.2 최적설계

본 논문에서는 최적화 기법 중 가장 강력하다고 알려진 SQP(순차이차계획법)을 이용하여 최적화를 수행하였다. SQP법은 최적화 문제의 정식화를 반복계산 하는 것에 바탕을 두고 각 반복계산에 있어서는 2차 프로그래밍 부속 문제의 해를 구하는데 그 기본을 두고 있는데, 탐색방향으로의 강화함수를 최적화하여 이동거리를 구하는 방법이다[3-9]. 최적화 과정은 목적함수, 설계변수 제약조건이 설정되어야 하는데, Fig. 1은 구조물의 최적설계에 관한 문제를 해결하기 위한 과정을 나타낸 프로그램수행도로서 최적화를 위한 목적함수, 설계변수, 제약조건을 지정한다.

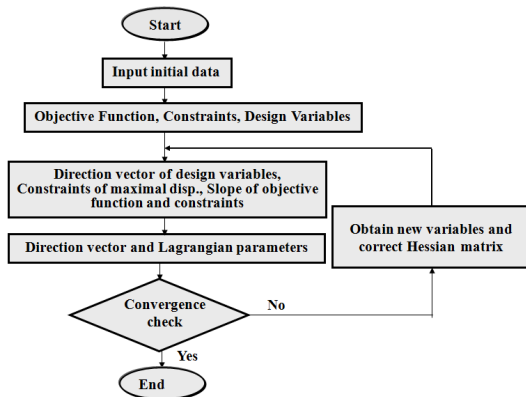


Fig. 1. Flow chart for optimization

최적화를 위하여 플랜지판 폭, 두께, 길이, 플랜지외보, 기둥의 볼트 수와 직경, 플랜지와 기둥, Tee 플레이트의 두께 등을 설계변수로 한다. 이 때, 모든 설계변수들 중에서 한정된 변수만을 독립변수로 선정하고, 다른 모든 조건이나 규준에서 결정된 값들은 상수로 하고, 설계변수가 결정되면 자동으로 결정되는 값들을 종속변수로 구분한다.

목적함수는 설계문제의 목적을 나타내는 함수로 주어진 재료 하에서의 최소비용이나 응력과 변위를 만족하는 최소중량 등을 최적화하는 것으로, 본 연구는 최소비용을 목적함수로 사용한다. 철골조 접합부에 비용 최적 설계를 적용하는 데는 비용계수가 먼저 결정되어야만 한다. 설계변수의 함수로 표현되는 비용함수는 정확히 표현하기가 매우 어려운 조립과 제작단계에 포함되는 민감한 요소들에 의존하기 때문에 정확한 추정은 간단한 문제로 되지 않는다.

본 논문에서는 접합부 형태 중 T-stub 접합부를 사용하였는데 부재 비용은 사용된 강재 중량으로 표현된다. 접합부의 비용은 재료와 노동력의 비용이 포함되어야 하고, 재료의 비용은 볼트, 너트, 워셔, 플레이트, 앵글 등의 비용이 들어가고, 노동력의 비용은 접합부의 조립 및 설치비용으로 구성될 수 있다. 재료비용은 쉽게 산출되지만 노무비용은 변화가 많기 때문에 일반적인 연구에서는 고려하지 않으며 본 연구의 접합부 비용을 추정하는 데는 적용하지 않았다.

앞에서 설명한 설계변수를 이용하여 목적함수 식을 구성하면 식(4)와 같다.

$$F_{BC}(\bullet) = F(n_{fb}, t_{fp}, t_{sp}, t_{tp}, b_{fp}, L_{fp}, b_{sp}, L_{sp}) \\ = C_S(t_{fp} \cdot b_{fp} \cdot L_{fp} + t_{sp} \cdot b_{sp} \cdot L_{sp} \\ + t_{tp} \cdot A_{tp}) + C_B(n_{fp} \cdot d_b + n_{sp} \cdot d_b) \quad (4)$$

여기서,

$F_{BC}(\bullet)$ : 볼트연결 접합부 비용 함수

$C_S, C_B$ : T-웹브와 플랜지 판, 볼트에 관한 비용

$C_S = 1,430$ 원,  $C_B = 1,260$ 원

$t_{fp}, b_{fp}, L_{fp}$ : T-웹브와 플랜지 두께, 폭, 길이

$n_{fp}, n_{sp}$ : T-웹브와 플랜지의 볼트 수

$t_{tp}, A_{tp}$ : Tee 판의 두께 및 면적

T-stub 접합부의 제약조건으로는 KBC2009 강구조설계 규준, 건축구조설계기준 중 접합부 강도 설계 사항을 토대로 본 해석 모델에 적합한 사항을 선별하였다. 다음 식 (5) ~ 식(17)은 본 연구에서 적용한 제약조건식으로 용어와 각 식에 관한 상세 설명은 구조설계기준을 참조하였으며 각 식의 용어에 관한 설명은 생략하였다. 또한, 본 연구에서는 사용성 강도설계에 관한 내용은 적용하지 않고 최적설계를 수행하였다.

① 볼트 설계 전단 강도

$$g_1 = V_u - \phi n_b F_{nv} A_b \leq 0 \quad (5)$$

여기서  $n_b$ 는 볼트개수,  $F_{nv}$ 는 공칭전단강도,  $A_b$ 는 볼트의 공칭단면적을 나타낸다.

② 미끄럼강도

$$g_2 = P_u - \phi \mu h_{sc} T_o N_s n_b \leq 0 \quad (6)$$

여기서,  $\mu$ 는 미끄럼계수,  $h_{sc}$ 는 구멍종류에 따라 결정되는 상수,  $T_o$ 는 설계볼트장력,  $N_s$ 는 전단면의 수를 나타낸다.

③ 볼트 구멍의 설계지압강도

$$g_3 = P_u - \phi 1.2 L_c t F_u n_b \leq 0 \quad (7)$$

여기서,  $L_c$ 는 하중방향 순간격으로 구멍의 끝과 피접합재의 끝 또는 인접구멍의 끝까지의 거리이며,  $F_u$ 는 피접합재의 공칭인장강도를  $t$ 는 피접합재의 두께를 나타낸다.

④ 설계인장강도

$$g_4 = P_u - \phi F_{nt}' A_b n_b \leq 0 \quad (8)$$

여기서,  $F_{nt}'$ 는 전단응력의 효과를 고려한 공칭인장강도를 뜻하며  $F_{nt}' = 1.3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} f_v \leq F_{nt}$  이다.

⑤ 인장과 전단을 동시에 받는 설계 미끄럼강도

$$g_5 = P_u - \phi k_s R_n n_b \leq 0 \quad (9)$$

여기서,  $k_s$ 는 설계미끄럼강도계수,  $T_o$ 는 설계볼트장력,  $T_u$ 는 소요인장강도,  $N_b$ 는 인장력을 받는 볼트의 수를 뜻한다.

⑥ 플랜지의 인장항복강도

$$g_6 = P_{uf} - \phi A_f F_{bf} \leq 0 \quad (10)$$

⑦ 웨브의 전단항복강도

$$g_7 = V_u - \phi (0.6 F_y A_g) \leq 0 \quad (11)$$

⑧ 웨브의 전단파괴강도

$$g_8 = V_u - \phi (0.6 F_u A_n) \leq 0 \quad (12)$$

⑨ 플랜지 판 국부 휨 강도

$$g_9 = P_u - \phi R_n \leq 0 \quad (13)$$

여기서  $R_n$ 은  $6.25 t_f^2 F_{yf}$ 로 계산되며  $t_f$ 는 플랜지 두께,  $F_{yf}$ 는 플랜지 항복강도를 뜻한다.

⑩ 웨브의 국부항복강도

$$g_{10} = P_u - \phi (5k + l_c) t_w F_{yw} \leq 0 \quad (14)$$

여기서,  $k$ 는 플랜지표면에서 웨브 필렛 선단까지의 거리,  $N$ 는 집중력이 작용하는 폭,  $t_w$ 는 웨브의 두께,  $F_{yw}$ 는 웨브의 항복강도를 나타낸다.

⑪ 웨브의 클리플링(crippling)강도

$$g_{11} = P_u - \phi 0.8 t_w^2 \left[ 1 + 3 \left( \frac{l_c}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{e F_{yw} t_f}{t_w}} \quad (15)$$

⑫ 웨브의 압축좌굴강도

$$g_{12} = P_u - \phi \frac{24 t_w^3 \sqrt{E F_{yw}}}{h} \leq 0 \quad (16)$$

여기서,  $h$ 는 웨브의 순길이를 뜻하며 압연형강은 전체 춤에서 플랜지와 필렛을 뺀 길이이고 용접형강은 플랜지 길이만 뺀 길이이다.

⑬ 웨브의 횡좌굴강도

$$g_{13} = P_u - \phi \frac{C_r t_w^3 t_f}{h^2} \left[ 1 + 0.4 \left( \frac{h/t_w}{l/b_f} \right)^3 \right] \leq 0 \quad (17)$$

여기서  $l$ 은 하중점에서 각 플랜지의 횡방향 비지지길이를 나타낸다.

### 2.3 불확실량을 고려한 최적설계

불확실량을 고려한 최적설계를 위해 신뢰성을 기초한 최적설계를 수행하여 신뢰도지수와 파괴확률을 계산하였다. 확정론적 최적설계와 달리 치수, 모양, 재료와 작용하중들의 양에 신뢰성해석을 수행하여 나온 신뢰도지수  $\beta$ 와 파괴확률  $P_f$ 를 앞 절의 최적화 과정의 제약조

건설식에 아래 식(18)과 같이 추가적으로 설정하여 최적설계를 수행하였다.

$$g_{14} = \beta^* - \beta_i \leq 0 \quad (18)$$

$\beta^*$ 는 목표신뢰도지수를 뜻하며 본 연구에 사용된 목표신뢰도지수는 Table 1과 같이 강구조 한계상태 설계 기준에서 제시한 값을 사용하는데, 고정하중과 활하중이나 적설하중 하에서 부재에 대해 3.0을 적용시켰다.

Table 1. Reliability Index

Reliability Index	Load		Probability of Failure
3	Normal Member	Dead+Live+Snow	0.001
4.5	Connection		0.0001
2.5	Dead+Live+Wind		0.0032
1.75	Dead+Live+Earthquake		0.0178

### 3. 설계 모델 해석 및 분석

구조물의 불확실량을 고려한 최적설계 프로그램 개발을 검증하기 위해 적용한 모델은 앞에서 설명한 바와 같이 T-stub으로 연결된 보-기둥 접합부 모델이다. 해석에 사용된 강재의 재질은 SS400이며, 보 부재는 H-350×175×7×11, 기둥부재는 H-250×250×9×11을 사용하였고, 부재의 길이는 보는 1500mm, 기둥은 1200mm로 가정하여 해석을 수행하였다.

불확실량을 고려하기 위한 방법으로 신뢰성 해석 기법 중 AFOSM법을 이용하여 신뢰도 지수  $\beta$ 를 먼저 산출하기로 한다. 그 과정은, 임의의 모멘트를 입력받아 한계상태에 이를 때까지 하중을 증가시키면서 신뢰도 지수  $\beta$  값을 구하고 그 값을 이용하여 파괴확률  $P_f$ 을 계산하도록 하는 것이다. 본 연구에서는 임의로 산출된 모멘트 값 3230(kN·cm)을 입력하여 극한모멘트 9658(kN·cm)까지 증가시켰을 때 신뢰도지수 값의 변화를 관찰하였으며 변화량의 일부분을 Table 2와 같이 나타냈다.

Table 3은 불확실량을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 최적해 결과를 나타낸 것이다. 불확실량을 고려하지 않은 경우는 기존의 확정론적 최적설계(deterministic optimization)와 같은 방법으로 불확실량 제약조건을 고려하지 않고 최적설계를 수행하여 얻은 결과이다. 각 설계변수들의 수렴값에서 나타난 바와 같이

불확실량을 제약조건으로 설정한 경우의 볼트 직경, 개수, 두께 등의 설계변수 값이 크게 나타났음을 알 수 있다.

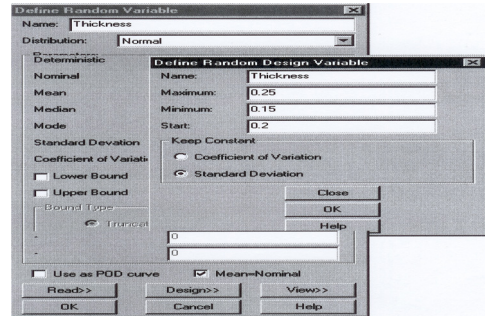


Fig. 2. Dialog Box(1) - Constraint Condition

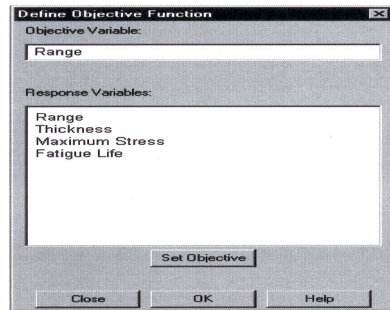


Fig. 3. Dialog Box(2) - Objective Function

Table 2. Reliability Index and Probability of failure

$\theta$ (rad.)	$M$ (kN·cm)	$\beta$	$P_f$ (%)
2.4748e-003	2.1270e+004	7.1601e+000	4.0323e-013
2.8702e-003	2.2760e+004	6.4596e+000	5.2476e-011
3.3468e-003	2.3345e+004	5.7562e+000	4.3009e-009
3.9329e-003	2.8712e+004	5.0498e+000	2.2116e-007
4.6719e-003	3.1320e+004	4.3403e+000	7.1140e-006
5.6338e-003	3.3800e+004	3.6278e+000	1.4291e-004
6.9398e-003	3.5370e+004	2.9123e+000	1.7938e-003
8.8184e-003	3.7160e+004	2.1938e+000	1.4124e-002
1.1761e-002	3.8900e+004	1.4723e+000	7.0466e-002
1.7054e-002	3.9940e+004	7.4789e-001	2.2726e-001
2.9515e-002	4.2340e+004	2.0524e-002	4.9181e-001

Table 3. Result of Optimization Design of T-stub

Design Variables	Uncertainty	
	With	Without
Diameter of bolt of beam flange	19.05(mm)	16.51(mm)
No. of bolt of beam flange	15	12.45
Diameter of bolt of column flange	22.225(mm)	19.81(mm)
No. of bolt of column flange	4	3.75
Thickness of T-flange	12.59(mm)	11.97(mm)
Thickness of T-web	8.3(mm)	7.8(mm)
Objective(₩)	258,790	236,140

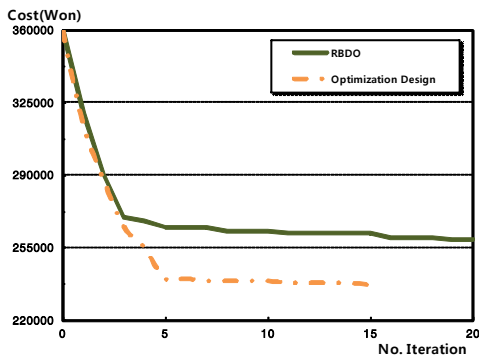


Fig. 4. Convergences of Objective Function

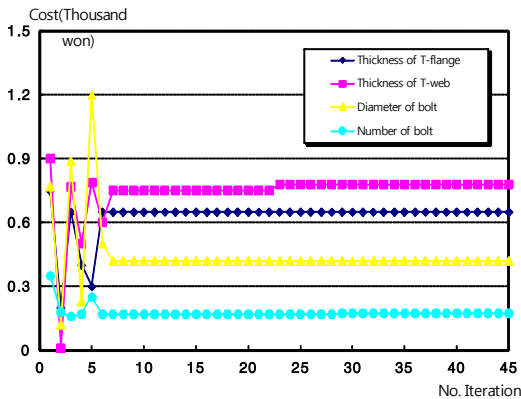


Fig. 5. Convergences of Design Variables

Fig. 4는 불확실량을 고려한 경우(RBDO)와 고려하지 않은 경우의 T-stub 접합부의 목적함수 수렴과정을 나타낸다. 수렴횟수는 불확실량을 고려한 경우 21회, 고려하지 않은 경우가 16회로 나타났으며 목적함수 값이 비용은 각각 258,790원, 236,140원으로 나타났다. Fig. 5는 설계변수를 볼트뿐만 아니라 T-플랜지와 웨브의 두께로 두고 최적설계를 실시한 경우의 수렴과정을 나타내며, 평균 6회 정도에서 목적함수 값이 수렴되는 것을 나타낼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 구조물에서 발생하는 불확실성을 고려한 접합부의 최적설계 모델을 개발하여 T-stub 접합부를 예제로 적용하여 최적설계를 수행한 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 불확실성을 고려하기 위하여 신뢰

성 해석을 통하여 신뢰도 지수를 산출하였으며 이 값을 최적설계의 제약조건으로 설정하여 확률론적 최적설계를 수행하였다. 최적설계 결과 기존의 불확실량이 고려되지 않은 확정론적 최적설계의 결과 값보다 불확실량이 고려된 최적설계 결과값이 더 크게 나타났으나 불확실성을 고려하는 경우가 구조물의 안정성이 더 확보되는 것으로 생각된다.

기존의 최적설계 방법인 확정론적 최적설계 시 최적화과정의 많은 수식의 간략화와 설계변수, 제약조건, 목적함수를 제한된 약산으로 설정하여 설계를 진행하는 경우가 많다. 이런 경우 구조설계에서 발생할 수 있는 많은 불확실성들이 발생하게 된다. 따라서 구조물의 안전성을 좀 더 확보하기 위하여 구조시방서나 설계도서들의 불확실성에 대한 신중한 고려가 요구될 것으로 사료된다.

#### References

- [1] H. N. Cho, M. H. Park, Y. S. Ryu *Optimum Structural Design*, Lecture Note 3-4, Short Course on Computer Aided Structural Analysis and Design, COSIK, 1991
- [2] Andrzej S. Nowak *Reliability of Structures*, Department of Civil and Environmental Engineering University of Michigan, 1997.
- [3] Singiresu S. Rao, *Engineering Optimization*, John Wiley&Sons, 1996.
- [4] Chinyere Onwubiko, *Introduction To Engineering Design Optimization*, Prentice Hall, 2000.
- [5] P. Venkataraman, *Applied Optimization with MATLAB Programming*, JOHN WILEY&SONS, INC., 2002.
- [6] N. Garret, Vanderplaats, *Numerical Optimization Technique for Engineering Design*, McGraw-Hill, 1984.
- [7] U. Kirsch, *Optimum Structural Design*, McGraw-Hill, 1981.
- [8] L. Fox, *Optimization Methods For Engineering Design*, 1971.
- [9] S. Arora, McGraw-Hill, *Introduction to Optimum Design*, 1989.

**신 수 미(Soo-Mi Shin)**

[정회원]



- 1999년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과(공학석사)
- 2004년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과(공학박사)
- 2006년 6월 ~ 2010년 2월 : 부산대학교 BK21사업팀 연구원
- 2010년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 생산기술연구소 연구원

<관심분야>

최적설계, 건축구조

---

**윤 혁 기(Hyug-Gee Yun)**

[정회원]



- 1999년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과(공학석사)
- 2011년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과(박사수료)
- 2009년 3월 ~ 2012년 8월 : 대한구조 소장
- 2012년 9월 ~ 현재 : (주)디에스구조엔지니어링 대표이사

<관심분야>

구조안전, 리모델링

---

**김 혜 민(Hye-Min Kim)**

[정회원]



- 1990년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과(공학석사)
- 2002년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과(공학박사)
- 1991년 3월 ~ 1993년 2월 : 부산대학교 건축공학과 조교
- 1994년 3월 ~ 현재 : 경남정보대학교 건축과 교수

<관심분야>

건축구조, 신뢰성해석