

온도영향을 고려한 연수기 압력탱크의 신뢰성 최적설계

배철호* · 김문성** · 서명원†
(2003년 12월 18일 접수, 2004년 8월 4일 심사완료)

Reliability Based Design Optimization of the Softwater Pressure Tank Considering Temperature Effect

Chul-Ho Bae, Mun-Seong Kim and Myung-Won Suh

Key Words: Optimum Design(최적설계), Reliability(신뢰성), Probability Constraints(확률조건), Random Variable(확률변수), Response Surface Method(RSM, 반응표면법), Reliability Based Design Optimization(RBDO, 신뢰성 최적설계)

Abstract

Deterministic optimum designs that are obtained without consideration of uncertainties could lead to unreliable designs. Such deterministic engineering optimization tends to promote the structural system with less reliability redundancy than obtained with conventional design procedures using the factor of safety. Consequently, deterministic optimized structures will usually have higher failure probabilities than unoptimized structures. This paper proposes the reliability based design optimization technique for a pressure tank considering temperature effect. This paper presents an efficient and stable reliability based design optimization method by using the advanced first order second moment method, which evaluates a probabilistic constraint far more accuracy. In addition, the response surface method is utilized to approximate the performance functions describing the system characteristics in the reliability based design optimization procedure.

1. 서론

최근 해외에서의 시장 확보를 위한 경쟁이 심화됨에 따라 국내의 기업들도 국제경쟁력 강화를 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 기업의 제품 판매를 늘리기 위해서는 무엇보다도 고객들을 만족시킴으로써 새로운 시장을 적극적으로 개척해 나가야 된다. 이러한 추세에 따라, 재료의 허용

강도와 강성을 만족하는 범위 내에서 보다 얇은 재질을 사용하거나, 금속을 대체할 수 있는 새로운 소재를 개발하여 적용하기도 한다. 일반적으로 압력탱크는 기계적으로 간단한 구조를 가진 구조물이지만, 탱크 내부를 채우고 있는 액체의 온도 및 압력이 매우 높기 때문에 안전성의 확보가 필수적이다.

현재까지 수행된 압력탱크의 설계들은 재료물성치, 작용하중 등 주요 입력변수를 하나의 확정값으로 가정하여 설계하는 일반적인 최적설계 즉, 결정론적 최적설계에 근거한 설계였다. 결정론적 방법에서는 설계변수(design variable)나 시스템 파라미터(system parameter)에 존재하는 불확실성으로 인해 발생할 수 있는 목적함수나 제한조건에 대한 영향을 무시함으로써 최적설계 값에 대한 신뢰성 및 현실성이 떨어질 수 있다. 따라

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : suhmw@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7447 FAX : (031)290-7447

* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학부

** 회원, Engineous Korea

서 가능한 적은 제작비용으로 설계자가 원하는 신뢰도를 만족하는 기계를 구성하기 위해서는 제작 및 조립 등의 불확실성으로 인한 기계 시스템의 신뢰도를 평가하고, 이를 바탕으로 한 최적설계를 수행하여야 한다.^(1,2)

최적화가 확률론적 제한조건들을 포함할 때, 결정론적 최적화에 비해 많은 계산량이 필요하다. 최근들어 이러한 신뢰성 최적화의 문제를 해결하기 위해 신뢰성 최적화 기법과 반응표면법을 이용한 근사 최적화 기법을 접목하는 등의 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 실제 산업구조물에 이러한 기법들을 적용한 사례는 그리 많지 않은 실정이다. 본 연구에서는 신뢰성 최적설계의 적용방법을 체계화하기 위해, 실제 온도영향을 고려한 연수기 압력탱크 최적화의 수행을 통하여 확률분포를 고려한 최적화를 실제 산업구조물에 적용하는 프로세스를 명확하게 제시하고자 한다.

연수기는 마그네슘, 칼슘 등 여러 가지 불순물이 포함되어 있는 경수를 이온교환수지를 통하여 상대적으로 광물질의 양이 낮은 물인 연수를 얻어내는 제품이다. 따라서 연수기는 이온교환수지를 이용한 물의 경도 조절을 위해 이들을 포함할 수 있는 탱크가 필요한데, 연수기 탱크는 그 제품의 안정성을 좌우할 만큼 중요한 요소이다.

본 연구에서는 연수기 압력탱크의 안전성을 유지하기 위해 유한요소해석을 진행하고, 여기서 파생된 응력 및 변형량을 기준으로 제품의 디자인에 맞는 형상을 재설계한다. 이를 위해 탱크의 단면형상을 신뢰성에 근거한 최적화를 통해 설계의 기준을 제시하고자 한다. 그 방법론으로 확률론적인 제한조건들을 훨씬 더 효과적으로 해석하기 위해 성능평가함수를 반응표면법^(3,4)을 이용하여 명시하고, 이를 일계이차모멘트법을 이용하여 효율적이고 안정된 신뢰성 최적설계 기법을 적용하고자 한다.⁽⁵⁾

2. 신뢰성 최적설계 기법

결정론적인 최적설계 문제를 신뢰성을 고려한 최적설계 문제로 변환하기 위해서는 필요한 결정론적 제한조건들을 확률론적인 제한조건으로 변환해 주어야 한다. 신뢰성 최적설계를 위한 기법에는 신뢰도 지수를 이용하는 방법(RIA, Reliability

Index Approach)과 역 신뢰성 해석을 이용하는 방법⁽⁶⁾(PMA, Performance Measure Approach)이 있다.

본 연구에서는 신뢰도 지수 β 를 이용하는 대표적인 신뢰성 최적설계 방법인 일계이차모멘트법(FORM, First Order Reliability Method)을 이용하였다.⁽⁷⁾

2.1 일반적인 신뢰성 최적설계 모델의 정의
시스템 파라미터 설계에서 일반적인 신뢰성 최적설계 모델은 다음과 같이 정의한다.

Find the set of design variables : (1)

$$X(\text{random}, r)$$

that Minimizes or Maximizes :

$$F(X)$$

Subject to :

$$P_{fj} = P(g_j(X) \leq 0) \leq P_j^u, j = 1, \dots, n$$

$$X^l \leq X \leq X^u$$

여기서, $X(r)$ 은 입력변수인 확률변수, $F(X)$ 는 목적함수이고, P_{fj} 는 성능평가함수 g_j 에 대한 파괴확률이며, n 은 확률론적 제한조건들의 개수이다. P_j^u 는 j 번째 제한조건에 허용되는 최대파괴확률이고, X^l , X^u 는 각 확률변수의 최소, 최대값이다.

2.2 일계이차모멘트법

일계이차모멘트법은 파괴확률의 산정을 위하여 확률변수 X 와 성능평가함수 $g(X)$ 를 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수 공간에서 표현되도록 변환한 다음, 원점으로부터 가장

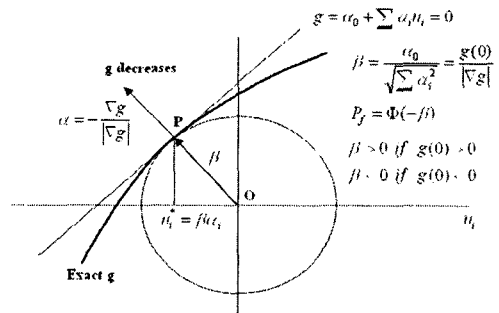


Fig. 1 First order reliability method

가까운 직선거리에 위치한 성능평가함수상의 점을 추적하고 그 직선거리를 신뢰도 지수로 정의하여 파괴확률을 산정하는 것이다. Fig. 1은 일계이차모멘트법의 개념을 도식화한 것이다.

Hasofer와 Lind는 최대가능점(MPP, Most Probabilistic Point)을 전형적인 최적화 과정으로 구한 다음, 그 점에서 성능평가함수를 선형근사하는 개선된 일계이차모멘트법⁽⁴⁾(AFORM, Advanced First Order Second Moment Method)을 제안하였다. 개선된 일계이차모멘트법에서 최대가능점을 찾는 과정은 서로 통계적으로 독립인 정규분포 확률변수 X 를 식 (2)를 이용하여, 표준정규분포 확률변수 U 로 선형변환을 한다.

$$U_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

여기서, μ_i 는 확률변수의 평균이고, σ_i 는 확률변수의 표준편차이다. 다음으로 최대가능점을 탐색하기 위한 최적화 과정을 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } \beta &= \sqrt{U^T U} \\ \text{subjected to } g(U) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (4)를 이용하여 최대가능점을 적당한 수렴범위 안에서 반복, 갱신하는 방법을 이용한다.

$$U^{k+1} = \frac{G_U^{kT} U^k - g(U^k)}{G_U^{kT} G_U^k} G_U^k \quad (4)$$

여기서, $G_U^k = \left\{ \frac{\partial g}{\partial U_1}, \frac{\partial g}{\partial U_2}, \dots, \frac{\partial g}{\partial U_n} \right\}^T$ at $U = U^k$

표준정규분포 확률변수의 공간에서 구한 최대가능점의 좌표를 U^* 로 표현한다면 신뢰도지수는 식 (5)에서 구할 수 있다.

$$\beta = \sqrt{U^{*T} U^*} = - \frac{G_U^{*T} U^*}{\sqrt{G_U^{*T} G_U^*}} \quad (5)$$

개선된 일계이차모멘트법은 모든 확률변수들이 서로 통계적으로 독립인 정규분포 확률변수임을

가정하고 있고, 기하학적인 개념에서 신뢰도지수를 정의하고 있으므로 파괴확률이 굉장히 큰 경우에는 신뢰할 수 없는 문제점이 있다. 하지만, 개선된 일계이차모멘트법은 계산의 효율성이 좋고, 정확성이 뛰어나므로, 현재 가장 강력한 신뢰성 해석 수단으로 평가되고 있다.

3. 유한요소해석

유한요소해석은 구조물내의 유한개의 절점과 요소를 이용하여 임의의 값을 수치적인 계산을 통해 얻어내는 방법이다. 유한요소해석을 하는데 있어서 최소의 시간내에 정확한 결과를 얻는 것이 무엇보다 가장 중요하며, 그러기 위해서는 여러 가지 요인을 고려하여 유한요소모델링을 할 수 있어야 할 뿐 아니라 해석결과를 정확히 평가할 수 있어야 한다. 만일 계산된 응답이 허용값이나 최대설계값 보다 큰 경우, 구조물은 적절한 설계가 될 때까지 재설계 및 재해석된다. 이러한 과정은 최적화 기법에 의해 자동화 될 수 있다.

3.1 압력탱크의 유한요소해석

본 논문에서 적용한 연수기 압력탱크의 모델은 기하학적인 대칭성을 유지할 수 있도록 설계하였기 때문에 Fig. 2에서 제시한 바와 같이 모델의 1/4 부분에 대한 3차원 해석을 수행하였다. 연수기 압력탱크는 직경이 126mm, 상부 입수부의 직경이 52mm 이고, 하부 출수부의 직경이 17mm, 상·하부 굴곡부의 두께가 1.5mm, 몸체부의 두께가 1.0mm, 상층 굴곡부의 필렛 반경은 중심에서부터 각각 5.0mm, 3.0mm, 8.0mm 인 탱크이다. 압력탱크에 작용하는 외력조건은 저장액체의 압력에 의하여 모델에 수

Table 1 Material property for FEM

Material Property	Value	Material Property	Value
Young's Modulus (kgf/mm ²)	19700	Internal Water Temperature(°C)	90
Poisson's Ratio	0.3	External Air Temperature(°C)	20
Conductivity (W/mk)	16.2	Allowable Stress (MPa)	520
Pressure (kgf/mm ²)	0.35	Allowable Displacement (mm)	0.35

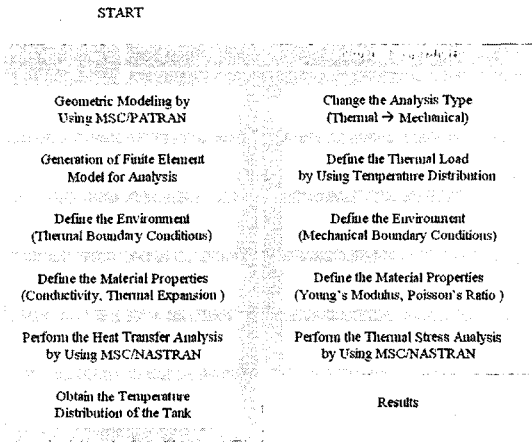


Fig. 2 Flow chart of Finite Element Analysis

Table 2 Result of the initial tank analysis

Analysis Type	Maximum	
	Stress (MPa)	Displacement (mm)
Mechanical Result	359.3	0.343
Thermal Result	787.5	0.441

직으로 작용하는 균일분포 압력과 고온의 액체에 의한 열팽창 효과가 작용하기 때문에 탱크의 내부에 90℃ 물에 의한 열의 유입, 외부에 20℃ 공기에 의한 열의 방출의 균일한 온도장을 고려하였다. 해석은 연수기 압력탱크의 내부압력을 고려한 정적해석과 탱크경계의 온도분포를 고려한 열해석을 병행하여 수행하였다. 해석용 프로그램은 MSC PATRAN/NASTRAN Ver. 2001r2⁽⁸⁾을 사용하였다. 본 논문에서 적용한 압력탱크의 물성치와 외력조건, 허용응력 및 허용변형량 등은 Table 1에 나타내었다.

3.2 압력탱크의 유한요소해석 결과

초기모델의 유한요소해석 결과로 최대응력 및 최대변형량의 발생점은 탱크의 상층 굴곡부의 1 번째 필렛부와 입수부가 수직으로 만나는 곳에서 최대응력이, 상층 굴곡부 및 하층 굴곡부의 2, 3 번째 필렛부에서 최대변형량이 발생하였다. 온도의 영향을 고려한 압력탱크의 변형상태도 및 응력분포도는 Fig. 3에 나타내었다. 초기모델의 최대

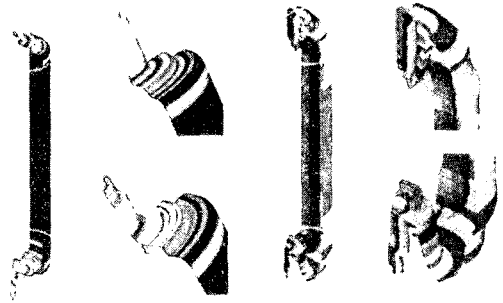


Fig. 3 Result of the initial tank analysis by FEM

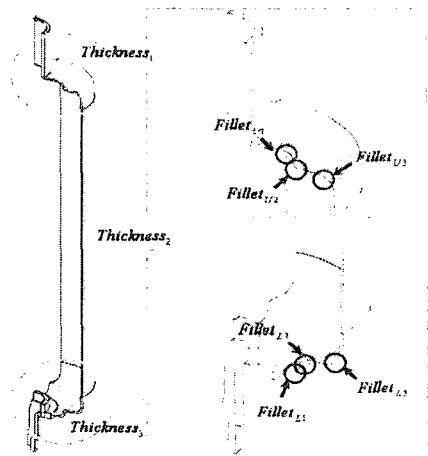


Fig. 4 Design variables for deterministic optimization

응력 및 최대변형량의 크기는 Table 2와 같이 균일분포압력을 고려한 정적해석만을 수행했을 때는 최대응력이 359.26MPa, 최대변형량은 0.343mm로 나타났다. 이는 스테인리스 SUS304의 허용응력 및 변형량인 520MPa, 0.35mm에 비교하였을 때, 안전한 영역에 있다고 할 수 있다. 하지만, 온도의 영향까지 고려하게 된다면, 최대응력은 787.5MPa, 최대 변형량은 0.441mm로 안전한 영역에 있다고 볼 수 없다. 이는 압력탱크에 작용하는 온수의 영향이 크다고 사료되며 설계시, 온도의 영향을 고려한 압력탱크의 최적설계가 요구된다고 할 수 있다.

4. 압력탱크의 결정론적 최적설계

압력탱크의 최적설계는 실제 산업에서 추구되는 방향에 따라, 최적화를 위한 목적함수의 선정

이 달라질 수 있다. 일반적으로 압력탱크를 설계할 때는 사용환경에 따른 안전도를 유지하면서 최소의 전체 질량, 또는 부피를 갖는 최적의 형상을 설계한다. 따라서 본 연구에서는 압력탱크의 질량을 목적함수로 두고 최적화를 수행하였다. 제한조건으로는 탱크의 응력 및 변형량이 허용범위를 초과하지 않는 강도설계 기준과 기존에 설계된 압력탱크의 형상조건을 만족하는 치수설계 기준을 부여하였다.

4.1 문제정의

본 연구에서 수행한 압력탱크의 결정론적 최적설계는 실험계획법 중에서 주효과와 적은 차수의 교호작용만을 검출하는 라틴방격법을 이용하여 식 (6)과 같이 문제를 수식화하였다. 본 연구에서 추출한 실험점의 조합은 Table 3에서 볼 수 있듯이, 100개의 실험점을 추출하여 목적함수 및 제한조건을 근사할 때 근사함수의 신뢰도를 높였다.

$$\text{Minimize } \Psi(\text{Mass}) \tag{6}$$

$$\text{Subject to } \sigma_{\max} - \sigma_{\text{all}} \leq 0z$$

$$\delta_{\max} - \delta_{\text{all}} \leq 0$$

$$\text{Fillet}_{U_i}^{\min} \leq \text{Fillet}_{U_i} \leq \text{Fillet}_{U_i}^{\max}$$

$$\text{Fillet}_{L_j}^{\min} \leq \text{Fillet}_{L_j} \leq \text{Fillet}_{L_j}^{\max}$$

$$\text{Thickness}_k^{\min} \leq \text{Thickness}_k \leq \text{Thickness}_k^{\max}$$

$$i, j, k = 1, 2, 3$$

여기서, σ_{\max} 는 최대응력, σ_{all} 는 허용응력이고, δ_{\max} 는 최대변형량, δ_{all} 는 허용변형량이다. 각 설계변수는 Fig. 4에 정의하였고, Table 4에 각 설계변수의 초기값 및 제한조건을 나타내었다.

근사함수가 실제 시스템과 얼마나 정확한가를 확인하기 위하여 통계학적인 관점에서 방정식의 정밀도를 측정하는 대표적인 방법은 분산분석표를 이용한 방법과 결정계수를 이용한 방법이 있다. 앞서 정의한 식 (6)의 정밀도를 측정하기 위해 본 연구에서는 결정계수에 의한 측정방법을 이용

Table 3 Table of latin hypercube arrays

No	Design Point of Experiment						Response			
	file _{U1}	file _{U2}	file _{L1}	file _{L2}	Thic ₁	Thic ₂	Thic ₃	Mass	Stress	Disp
1	0.8	1.606	1.111	5.556	5	5.611	4.682	0.858	1757	1.601
2	0.822	2.954	1.067	5.944	3.727	6.556	4.788	1.320	1837	1.667
3	0.844	2.466	1.733	2.722	4.258	5.056	9.348	1.210	1271	1.035
4	0.867	2.233	2.311	2.833	5.636	3.833	5.57	1.190	1298	0.845
5	0.889	1.955	1.356	5.833	2.03	1.667	4.045	1.000	1500	1.188
6	0.911	1.815	2.889	4.889	5.848	6.778	2.03	1.090	1307	0.747
7	0.933	2.303	1.956	2.056	9.348	5.278	3.515	1.180	1259	0.832
8	0.956	1.885	2.533	4.944	8.818	4.5	10.3	1.090	1274	0.727
9	0.978	2.837	0.822	2.222	6.697	3.611	11.15	1.260	1105	1.114
10	1	1.42	2.267	6.889	11.15	6.611	11.89	0.902	1233	0.656
...										
100	3	1.188	2.4	3.722	8.5	6.5	3.091	0.877	559	0.345

Table 4 Design variables and their limits

Section Name	Design Variable	Initial Value	Lower Bound	Upper Bound
Fillet (Upper)	Fillet _{U1}	5.0	1.5	7.0
	Fillet _{U2}	3.0	1.5	7.0
	Fillet _{U3}	8.0	1.5	12.0
Fillet (Lower)	Fillet _{L1}	5.0	1.5	7.0
	Fillet _{L1}	3.0	1.5	7.0
	Fillet _{L1}	8.0	1.5	12.0
Thickness of the Tank	Thickness ₁	1.5	0.8	3.0
	Thickness ₂	1.0	0.7	3.0
	Thickness ₃	1.5	0.8	3.0

Table 5 ANOVA Table of Equations

Model	Factor	S	Φ	V	F	R ²
Mass	Regression variation	5.484	35	0.156	866055.12	0.999
	Residual variation	1.158E-5	64	1.809E-7		
	Sum	5.484	99			
Stress	Regression variation	33684713.380	35	962420.382	35.391	0.920
	Residual variation	2909685.071	64	27193.318		
	Sum	36594398.452	99			
Disp.	Regression variation	105.716	35	3.020	98.945	0.970
	Residual variation	3.266	64	0.030		
	Sum	108.982	99			

하였다. 식 (6)에서 R^2 의 값이 $0 < R^2 < 1$ 에 있고, 1에 가까울수록 추정된 3차 방정식은 높은 정밀도를 가진다고 본다. 본 연구에서 근사한 질량, 응력, 변형량 함수의 결정계수는 Table 5에서도 볼 수 있듯이, $R^2 = 0.999, 0.92, 0.97$ 이므로, 총 변동중에서 회귀변동이 차지하는 비율이 99.9%, 92%, 97%로서 추정된 3차 방정식은 매우 좋은 정밀도를 가진다고 본다.

4.2 결정론적 최적설계 결과

본 연구에서는 압력탱크의 단면형상을 최적화하기 위해 실험계획법을 이용하여 실험점을 추출하고, 유한요소 해석을 통해 각각의 실험점에 대한 질량, 응력, 변형량 등의 응답을 얻었다. 유한요소 해석을 통해 얻은 데이터를 반응표면법을 이용하여 목적함수 및 제한조건 식을 근사하여 최적설계 문제를 정식화 하였고, 근사된 최적설계 문제에 대하여 수치적 최적설계 기법인 수정유용방향탐색법(MMFD, Modified Method of Feasible Direction)을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 압력탱크에 대해서 앞서 수행했던 내부압력을고려한 정적해석의 결과와 온도의 영향을 고려한 열해석의 결과를 비교하여 봤을 때, 온도가 최적화에

미치는 영향이 아주 큼을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 내부압력 및 온도영향을 모두 고려하여 최적화를 적용하였다. Table 6와 같이 초기모델은 온도의 영향을 고려한 해석결과 응력과 변형량이 787.5MPa, 0.441mm로서 안전하다고 볼 수 없었다. 최적화 후 결과와 비교해 보면, 제한조건인 응력과 변형량에 대해서 각각 506.8 MPa, 0.273mm의 결과를 보이면서 안전한 영역으로 진입하였음을 알 수 있다. 목적함수인 질량이 0.708kg으로 초기 모델의 압력탱크의 질량인 0.699kg에 비교하여 볼 때, 다소 늘어난 결과를 보였다. 이는 제한조건을 만족시키기 위해 압력탱크의 단면적이 늘어나면서 나타나는 현상이라 할 수 있다.

5. 압력탱크의 신뢰성 최적설계

구조신뢰성공학 분야의 연구는 강도의 통계적 취급이나 분석, 하중 또는 응력의 통계적 분석, 그리고 이들 사이에서의 파손확률의 계산방법으로 크게 나뉜다고 할 수 있다. 이제까지의 강도 분포는 인장강도, 항복강도, 경도, 평면변형과괴인성치 등의 정적강도는 주로 정규분포와 와이블 분포에 따르며, 변동계수는 개략 5% 이내에 있고, 피로한도, 균열발생수명, 균열전파수명 등은 대수정규분포나 와이블분포에 따르며, 변동계수의 정도는 10~50%의 수준에 달하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 정적강도에 의한 설계에 초점을 맞추고 있기 때문에, 모든 확률변수는 독립이고, 변동계수가 5%인 정규분포라고 가정하였다.⁽⁸⁾

5.1 문제정의

본 연구에서 수행한 압력탱크의 신뢰성 최적설계는 식 (7)과 같이 결정론적 제한조건을 확률론적 제한조건으로 정의하여 수식화하였다.

Table 6 Result of deterministic optimization

Deterministic Optimization		
Design Variable	Nominal Value	
	Initial	Final
Fillet _{U1}	5.0	3.9
Fillet _{U2}	3.0	4.1
Fillet _{U3}	8.0	1.5
Fillet _{L1}	5.0	3.67
Fillet _{L2}	3.0	4.33
Fillet _{L3}	8.0	7.5
Thickness ₁	1.5	2.6
Thickness ₂	1.0	0.7
Thickness ₃	1.5	2.5
Constraint	Nominal Value	
	Initial	Final
Stress	787.5	506.8
Displacement	0.441	0.273
OBJ	Nominal Value	
	Initial	Final
Mass	0.699	0.708

$$\text{Minimize } \Psi(\text{Mass}) \tag{7}$$

$$\text{Subject to } P[\sigma_{\max} - \sigma_{all}] \leq P_{\sigma}^u$$

$$P[\delta_{\max} - \delta_{all}] \leq P_{\delta}^u$$

$$Fillet_{U_i}^{\min} \leq Fillet_{U_i} \leq Fillet_{U_i}^{\max}$$

$$Fillet_{L_j}^{\min} \leq Fillet_{L_j} \leq Fillet_{L_j}^{\max}$$

$$Thickness_k^{\min} \leq Thickness_k \leq Thickness_k^{\max}$$

$$i, j, k = 1, 2, 3$$

여기서,

- $P[\sigma_{\max} - \sigma_{all}]$: 최대응력이 허용응력을 만족할 확률
- $P[\delta_{\max} - \delta_{all}]$: 최대변형량이 허용변형량을 만족할 확률
- P_{σ}^u : 응력의 관점에서 허용파괴확률
- P_{δ}^u : 변형량의 관점에서 허용파괴확률

본 연구에서 확률변수는 결정론적 최적설계에서의 설계변수를 입력변수로 설정하였으며, 확률변수의 평균은 결정론적 최적설계에서 각 설계변수의 결과값을 적용하였다. 신뢰성 최적설계를 위한 확률변수의 입력데이터는 Table 7에 나타내었다. 결정론적 최적설계 과정의 식 (6)에서 정의한 바있는 응력의 제한조건식을 확률론적 제한조건으로 구성하고, 신뢰성 최적설계를 위한 목표 신뢰도지수를 설정하여 최적화를 수행하였다.

5.2 신뢰성 최적설계 결과

본 연구에서는 신뢰성 최적화 문제를 푸는 방법으로 개선된 일계이차모멘트법을 이용하였다. 또한 구조설계의 경우에는 유한요소 해석을 동반

하기 때문에 함수값의 계산량을 줄이기 위한 근사적 방법이 필요하다. 실험계획법과 반응표면법을 이용하여 목적함수와 확률론적 제한조건 등을 근사하여, 근사영역 내에서 최적점을 찾는 방법을 선택하였다.

본 연구에서는 iSIGHT Ver. 7.0⁽⁹⁾과 MSC/ NASTRAN Ver. 2001 r2⁽¹⁰⁾의 인터페이스 모듈을 구성하여 근사모델을 정의를 자동화 하였고, 근사된 연수기 압력탱크의 모델을 Visual C++로 신뢰성 최적설계 기법인 개선된 일계이차 모멘트법을 구현하여 최적화를 수행하였다. Fig. 5는 이러한 과정의 흐름도이다.

본 연구에서는 결정론적 최적점이 최대변형량의 확률론적 제한조건에 대하여 높은 신뢰도를 보이고 있으므로 그 대상에서 제외시켰고, 반면에 파손확률이 높은 최대응력의 확률론적 제한조건에 대하여 목표 신뢰도를 98%로 설정하고 최적점을 재설정하였다. Table 6의 결과에서 각각의 확률변수들의 평균이 결정론적 최적점에서의 평균보다 다소 커짐을 알 수 있다. 이는 확률론적 제한조건인 최대응력의 함수에 대하여 목표하는 신뢰도를 만족시키기 위한 현상으로 해석할 수 있으며, 이러한 영향으로 목적함수인 탱크의 질량 역시 늘어남을 알 수 있다.

확률론적 최적점에서의 최대응력은 447.5MPa로서 각 확률변수의 평균과 분산을 고려한 신뢰성 해석을 수행한 결과, 허용응력 520MPa에 대한 신뢰도 지수 β 는 1.97로 나왔다. 이는 97.6%의

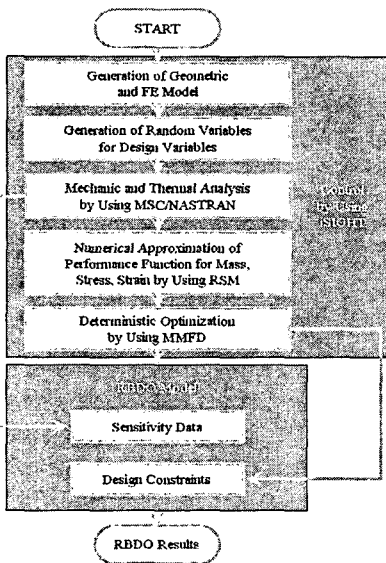


Fig. 5 Flow chart of Reliability Based Design Optimization

Table 7 Random variables

Section Name	Random Variable	Mean Value	Std.dev	Distribution
Fillet (Upper)	Fillet _{U1}	3.9	0.195	Normal
	Fillet _{U2}	4.1	0.205	
	Fillet _{U3}	1.5	0.075	
Fillet (Lower)	Fillet _{L1}	3.67	0.184	
	Fillet _{L1}	4.33	0.217	
	Fillet _{L1}	7.5	0.375	
Thickness of the Tank	Thickness ₁	2.6	0.13	
	Thickness ₂	0.7	0.035	
	Thickness ₃	2.5	0.125	

Table 8 Result of Reliability Based Design Optimization

Reliability Based Design Optimization				
Design Variable	Nominal Value			
	Initial		Final	
Fillet _{U1}	3.9		4.094	
Fillet _{U2}	4.1		3.906	
Fillet _{U3}	1.5		1.53	
Fillet _{L1}	3.67		3.723	
Fillet _{L2}	4.33		4.277	
Fillet _{L3}	7.5		8.222	
Thickness ₁	2.6		2.786	
Thickness ₂	0.7		0.7	
Thickness ₃	2.5		2.555	
Constraint	Nominal Value		Reliability	
	Initial	Final	Initial	Final
Stress	506.8	447.5	63.3%	97.6%
Displacement	0.273	0.257	97.6%	98.1%
OBJ	Nominal Value			
	Initial		Final	
Mass	0.708		0.717	

신뢰도를 갖는 것으로 목표했던 신뢰도인 98%를 만족하지 못했지만, 본 연구에서 설정한 허용파손확률인 10%를 만족하였다. 또한, 본 연구에서는 최대변형량의 제한조건에 대하여 신뢰성 최적설계는 수행하지 않았지만, 각 확률변수 평균점의 이동이 최대변형량의 제한조건에 대한 신뢰도에 영향을 줄 수 있다. 따라서 신뢰성 최적점을 변형량의 확률론적 제한조건에 대하여 신뢰성 해석을 수행하였다. Table 8에서 볼 수 있듯이, 신뢰성 최적점에서의 최대변형량은 0.257mm로서 신뢰성 해석을 수행한 결과, 허용변형량 0.35mm에 대한 신뢰도 지수 β 는 2.07로 나왔다. 이는 98.1%의 신뢰도에 해당하는 것으로 결정론적 최적점에서의 신뢰도인 97.6%보다 신뢰도가 높아졌으며, 본 연구에서 설정한 허용파손확률 10% 이하를 만족하고 있으므로 변형량에 대하여 안전하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 근사적 기법을 이용하여 신뢰성 최적화를 수행하였으므로, 실험을 통하여 근사값과 실제값을 비교하여 검증할 필요가 있었다. 검증결과 Table 9에서 볼 수 있듯이, 제한조건과 목적함수 모두 10%이내의 오차율을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 확률론적 최적점에서 유한요소

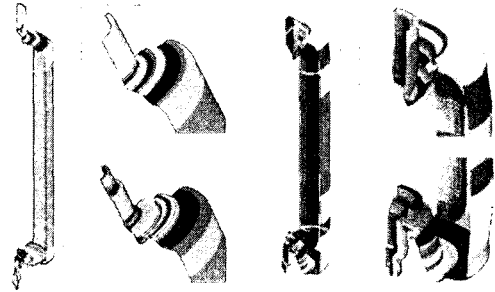


Fig. 6 Result of final tank analysis by FEM

Table 9 Comparison of RSM and actual value

	Stress (MPa)	Displacement (mm)	Mass (kg)
RSM Value	447.5	0.257	0.717
Actual Value	455.7	0.292	0.717
Error rate	9.12%	7.29%	0%

해석을 통한 압력탱크의 변형상태도 및 응력분포도는 Fig. 6에 나타내었다.

6. 결론

본 연구에서는 온도영향을 고려한 압력탱크의 단면형상을 확률론적 최적화 기법을 적용하여 압력탱크의 파손확률을 예측하고, 목표로 하는 신뢰도 수준을 만족하는 단면형상을 설계하였다. 본 연구에서 얻어진 주요결과 및 결론은 다음과 같다.

(1) 온도영향을 고려한 압력탱크의 특성을 파악하기 위한 유한요소해석 방법을 제시하였고, 이를 수학적으로 정의하였다. 연수기 압력탱크를 구체적 대상으로 적용한 결과, 정적해석만을 수행했을 때는 응력이 359.3Mpa, 변형량이 0.343mm로 안전한 영역에 있었지만, 온도의 영향을 고려하게 된다면 응력과 변형량이 787.5Mpa, 0.441mm로서 안전하다고 볼 수 없었다.

(2) 효과적이고 경제적인 설계를 위해 실험계획법과 반응표면법을 이용한 근사최적화 방법론을 소개하였고, 이를 연수기 압력탱크를 예로하여 적용하였다. 결과로서 연수기 압력탱크의 초기 모델과 비교하였을 때, 제한조건인 응력과 변형

량에 대해서 각각 506.8Mpa, 0.273mm의 결과를 보이면서 안전한 영역으로 진입하였다. 하지만, 목적함수인 질량이 0.708kg으로 초기 모델의 압력탱크의 질량인 0.699kg에 비교하여 볼 때, 다소 늘어난 결과를 보였다. 이는 제한조건을 만족시키기 위해 압력탱크의 단면적이 늘어나면서 나타나는 현상이라 사료된다.

(3) 신뢰성 최적설계를 위한 계산비용의 절약을 위해 근사영역 내에서 최적화를 수행하고, 개선된 일계이차모멘트법을 이용한 신뢰성 최적화 방법론을 소개하였다. 연수기 압력탱크에서는 확률론적 최적점에서의 최대응력은 447.5MPa로서 각 확률변수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 수행한 결과, 허용응력 520MPa에 대한 신뢰도 지수는 1.97로 97.6%의 신뢰도를 갖는 것으로 나타났다. 목표했던 신뢰도인 98%를 만족하지 못했지만, 본 연구에서 설정한 허용과손확률인 10%를 만족하였다. 또한, 신뢰성 최적점에서의 최대변형량은 0.257mm로서 신뢰성 해석을 수행한 결과, 허용변형량 0.35mm에 대한 신뢰도 지수는 2.07로 나왔다. 이는 98.1%의 신뢰도에 해당하는 것으로 결정론적 최적점에서의 신뢰도인 97.6%보다 신뢰도가 높아졌으며, 본 연구에서 설정한 허용과손확률 10% 이하를 만족하고 있으므로 변형량에 대하여 안전하다고 할 수 있다.

현재 압력탱크의 신뢰성 평가에 필수적인 허용과손확률이 제시되지 않은 상황이 본 연구를 수행하는 과정에서 가장 어려웠던 점이었다. 또한, 본 연구에서는 실험을 통한 직접 최적화 과정에서 발생할 수 있는 계산비용의 문제, 모델의 실용성문제 등을 해결하기 위해 근사최적화 기법을 사용하였다. 이는 신뢰성 최적설계를 통해서 찾은 최적해의 신뢰성을 의심할 수 있는 여지를 남겼다. 향후 근사최적화 기법의 신뢰성을 높일 수 있는 연구가 필요하리라 생각된다.

후 기

본 논문은 한국과학기술단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원 및

2003년도 두뇌한국21 사업의 지원으로 이루어졌으며, 논문에 적극적으로 지원해주신 Engineous Korea 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Patrick, N.K., 1999, "Srinivas Kodiyalam, Variable Complexity Structural Reliability Analysis for Efficient Reliability based Design Optimization," AIAA-99-1210.
- (2) Liu, P.L., Der Kiurehian, A., 1991, "Optimization Algorithms for Structural Reliability," Structural Safety, Vol. 9, No. 3, pp.161~177.
- (3) Myers, R.H., Montgomery, D.C., 1995, "Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments," John Wiley & Sons, New York.
- (4) Lee, S.B., Baik, S., Yim, H.J., 2003, "Optimal Reliability Design for Thin-Walled Beam of Vehicle Structure Considering Vibration," International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 135~140.
- (5) Jeon, K.N., 2001, "Reliability Analysis with Progressive Quadratic Response Surface Methodology," Hanyang University Master's Dissertation.
- (6) Choi, K.K., Tu, J., 1997, "A Performance Measure Approach in Reliability Based Structure Optimization," Technical Report R97-02.
- (7) Yang, Y.S., Seo, Y.S., Lee, J.O., 1999, "Structral Reliability Analysis," Seoul National University Press.
- (8) Kwak, S.L., 2001, "A Study for Integrity Assessment of CANDU Pressure Tube Using Probabilistic Fracture Mechanics," Sungkyunkwan University Dotoral Dissertation.
- (9) MSC/NASTRAN User's Guide, 1988, Macneal - schwendler co.
- (10) iSIGHT7.0 Reference Manual, 2003, Engineous software.