

설계 변수법을 이용한 밥솥 체결 구조물의 안전도 평가

이승표¹, 고병갑^{2*}, 하성규³

Safety evaluation for oven structures using parametric method

Seung-Pyo Lee¹, Byung-Kab Koh^{2*} and Sung-Kyu Ha³

요 약 유도가열 전기보온 압력밥솥의 체결 구조는 오븐, 상부 가열판, 체결 링으로 구성되며, 기존의 밥솥과 달리 내부에 압력이 작용하기 때문에 안전성 검토가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 밥솥의 체결 구조인 오븐, 상부 가열판, 체결 링에 대하여 구조해석을 수행하고 구조적으로 안전한 최적 두께를 산출한다. 특히, 오븐은 스테인레스와 알루미늄이 겹쳐서 성형된 제품이므로 복합재료 해석을 수행하고, 안전성 평가를 위하여 von Mises법과 Tsai-Wu법을 도입한다. 오븐과 상부 가열판의 최적 두께 산출을 위하여 설계 변수법을 적용한다.

Abstract The structures of induction heating type pressure rice cooker are consisted of oven, top heater plate and locking ring. Because the pressure is applied to their structures, those should be necessary to do the safety evaluation. In this paper, structure analysis is performed for oven structures by using finite element method and as a results, optimal thickness is achieved. Especially, analysis for anisotropic layered material is performed because oven is made of both stainless steel and aluminum. And both von Mises and Tsai-Wu failure criterion are applied for safety factor. Parametric method is used in order to get the optimal thickness for oven and top heater plate.

Key Words : Oven structure, Finite element analysis, Parametric method

1. 서론

유도가열(Induction heating)방식의 전기 보온 압력 밥솥은 전기 밥솥과 압력 밥솥의 기능을 동시에 가지고 있는 제품으로서, 유도가열방식에 의한 오븐(Oven) 가열과 함께 오븐 내부에 강한 대류를 발생시켜 취반 시간의 단축, 그리고 취반이 끝나면 자동 보온으로 전환되어 사용자가 사용하기에 편리하다는 장점들을 지니고 있다. 그러나 기존의 밥솥과 달리 압력이 작용하기 때문에 안전성이 요구되어지며, 만일 파손되면 커다란 상해를 가져올 수 있기 때문에 설계 시 특별한 주의가 요구되어 진다. 따라서 오븐은 내구성 실험, 기밀성 실험 등의 여러 가지 실험과 구조 강도 해석, 열 분포 해석 등 철저한 검증들을 통하여 설계되어야 한다. 또한 유도가열방식의 전기 보온 압력 밥솥은 기존 열판식 밥솥에 비하여 가격이 고가이므로 재료비 절감을 통한 염가형 혁신 설계가 필수적이

다. 이를 위하여 구조 안전도 해석을 통한 체결 구조물의 두께 설계가 반드시 수행되어야 한다.

Murase[1]는 알루미늄과 스테인레스가 접합된 오븐에 대하여 압력이 작용하는 경우의 열 분포 해석과 실험을 수행하였고, 맛있는 밥을 위하여 균일한 열 분포가 필요하다는 것을 검증하였다. Lee[2] 등은 유한 요소법을 이용하여 오븐의 구조해석을 수행하였다. 또한 Lee[3] 등은 전기밥솥의 제품 위험 분석을 통하여 전기밥솥이 지닌 잠재 위험을 도출하고 개선안을 제시함으로써, 전기밥솥의 안전성을 향상시켰다. 그러나 이들 연구들은 밥솥의 체결 구조물 중에서 오븐에 대한 열 및 구조해석만을 수행하였다. 실제로 오븐은 체결 링을 통해서 상부 가열판과 체결되므로 밥솥의 안전도를 평가하기 위해서는 이들 체결 구조물 모두의 안전도 평가를 통한 안전계수를 검토하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 밥솥의

¹한양대학교 기계설계학과 대학원

³한양대학교 기계정보경영공학부

접수일 08년 6월 9일

수정일 08년 7월 5일

²인하공업전문대학 기계과

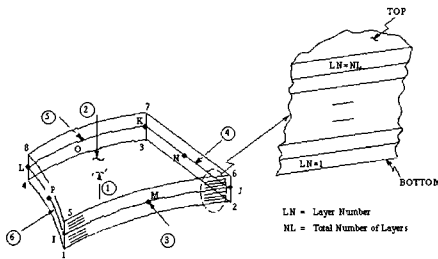
*교신저자: 고병갑(bkkoh@inhatc.ac.kr)

재제확정일 08년 8월 11일

체결 구조인 오븐, 상부 가열판(Top heater plate), 그리고 체결 링(Locking ring)에 대하여 구조해석을 수행하여 구조적으로 안전한 최적 두께를 산출한다. 하중조건으로 내압만 작용하였을 때와 내압과 온도가 함께 하중조건으로 주어졌을 때 체결 구조물의 안전성을 각각 검토한다. 맛 있는 밥 맛과 열가형 설계를 위하여 체결 구조물의 두께를 설계 변수로 선정하고 오븐, 상부 가열판의 최적 두께 산출을 위한 설계 변수법[4]을 적용하였다.

2. 이론해석

2.1 복합 재료 셀 요소



[그림 1] 8개의 절점을 갖는 셀 요소

압력 밥솥의 구조물과 같이 구조물의 두께 방향의 치수가 다른 방향의 치수들에 비하여 작을 경우에는 셀 요소를 선택하는 것이 일반적이다. 또한 오븐은 스테인레스와 알루미늄의 이방성(Anisotropic) 재질로 구성되어 있기 때문에 이를 동시에 고려할 수 있는 요소를 선택해야 한다. 따라서 본 연구에서는 그림 1에 표시한 바와 같이 8개의 절점을 갖는 복합 재료 셀 요소[5]를 이용하여 체결 구조들을 모델링하였다.

일반적으로 셀 요소는 굽힘(Bending)과 평면(In-plane) 하중을 동시에 받으며, 이 하중들은 서로 독립적으로 작용한다[6]. 본 연구에서는 셀 요소를 굽힘과 평면 하중에 의한 항으로 나누어 각각 지배 방정식을 유도하고, 절점 변위 벡터를 Hooke의 법칙[7]을 이용하여 강성 행렬과 하중 벡터와의 관계로 정식화한다.

요소 e , 절점 i 에서 변위 u 를 형상함수 N_i 와 절점 변위 벡터 a_i^e 의 관계식으로 정의하면 다음과 같다.

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i a_i^e \quad (1)$$

여기서 요소 모서리 절점과 요소 중간 절점에 대한 형상 함수는 다음과 같다.

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(\xi_0 + \eta_0 - 1) \quad (2)$$

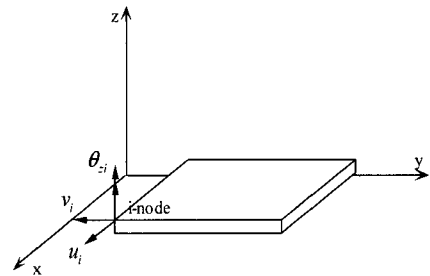
$$\xi_i = 0; N_i = \frac{1}{2}(1 - \xi_0^2)(1 + \eta_0) \quad (3)$$

$$\eta_i = 0; N_i = \frac{1}{2}(1 + \xi_0^2)(1 - \eta_0)$$

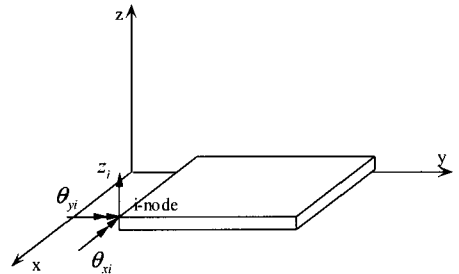
$$\xi_0 = \xi \xi_i, \eta_0 = \eta \eta_i, \xi_i, \eta_i = \pm 1$$

$$\{a_i\}^e = \{u_i \ v_i \ w_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi} \ \theta_{zi}\}^T \quad (4)$$

그림 2로부터 알 수 있듯이 식 (4)에서 u_i, v_i, θ_{zi} 항은 평면 하중과 관련된 변위들이고, $w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}$ 는 굽힘 하중과 관련된 변위들이다[8].



(a) 평면 변위 성분



(b) 굽힘 변위 성분

[그림 2] 변위 성분들

층(Layer)이 존재하는 이방성 요소에서 j 번째 층의 변형률 ϵ_j [9]를 절점 변위의 항으로 나타내면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_j = B d_e \quad (5)$$

where, B ; 변형률-변위 행렬, d_e ; 절점 변위 벡터

식 (5)로부터 임의의 j 번째 층에서 응력 σ_j 는 다음과 같다.

$$\sigma_j = D_j(\epsilon_j - \epsilon_j^{th}) \quad (6)$$

where, D_j ; 응력-변형률 행렬, ϵ_j^{th} ; 열변형률

따라서 i 번째 요소에서의 강성 행렬 K_i^e 와 전체 셀 요소의 지배방정식은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

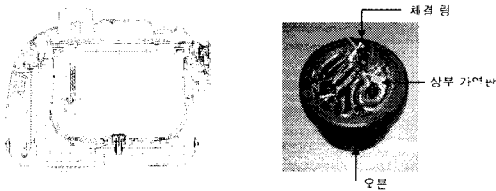
$$K_i^e = \iint B^T D B |J| d\eta d\xi \quad (7)$$

$$f_i^e = K_i^e a_i^e \quad (8)$$

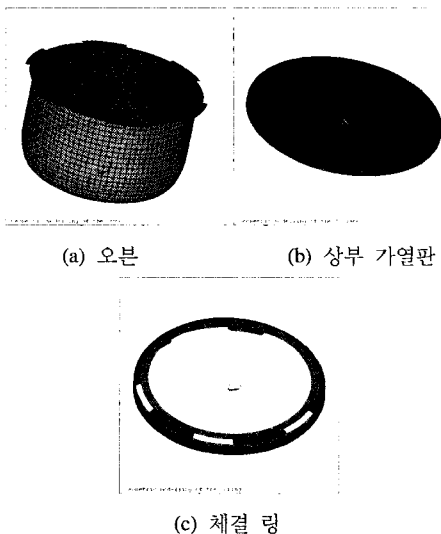
$$f_i^e = \{U_i \ V_i \ W_i \ M_{xi} \ M_{yi} \ M_{zi}\}^T$$

where, J ; Jacobian matrix

2.2 유한요소 모델링



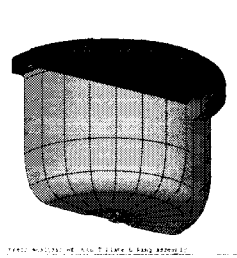
[그림 3] 밥솥 내부 구조와 체결 구조물



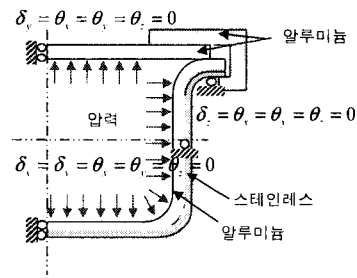
[그림 4] 체결 구조물에 대한 유한요소 모델링

압력 밥솥 전체의 내부 구조와 체결 구조물의 형상을 그림 3에 나타내었다. 그림 4는 각각의 체결 구조물에 대한 유한요소 모델링을 표시한 것이며, 여기서 오븐은 두께가 다른 두 층 즉, 알루미늄과 스테인레스로 형성되었다. 그림 5는 그림 4의 오븐과 상부 가열판과 체결 링을 결합한 것을 도시한 것으로서 전체 구조물의 1/2만을 보

여는 것이다.



[그림 5] 체결 구조물이 결합된 유한요소 모델링



[그림 6] 경계조건

그림 6은 체결 구조물의 경계조건을 나타낸 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 전체 구조물의 대칭성을 고려하여 1/2만을 해석하므로 경계면이 되는 y 방향으로의 병진 변위 δ_y 와 회전변위 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 를 구속한다. 또한 상부 가열판과 체결 링은 오븐 위에 얹혀 있는 형상이므로 이 부분에서는 x 와 y 방향으로의 병진변위 δ_x 와 δ_y 만 허용하고 다른 방향의 자유도 $\delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 는 구속한다. 그리고 이 경계조건만으로는 전체 구조물이 강체 운동을 하기 때문에 이를 방지하기 위하여 오븐의 중심에서 z 방향으로의 병진변위 δ_z 만 허용하고 다른 방향의 자유도 $\delta_x, \delta_y, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 는 구속한다[10].

본 연구에서의 하중조건은 그림 7에 나타낸 바와 같이 내압이 작용하는 경우와 내압과 온도가 동시에 작용하는 경우에 대하여 해석을 수행한다. 즉, 압력 밥솥은 게이지 압력 1 기압에서 사용되므로 101.3 kPa의 내압을 전체 구조물에 적용하며, 또한 오븐의 작동 시 온도가 대략 100~110℃이므로 온도에 대한 하중조건은 이 값을 적용한다.

2.3 안전도 평가

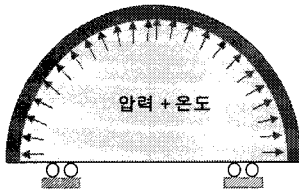
상부 가열판과 체결 링은 등방성 재질이나 오븐은 이방성 재질이므로 본 연구에서의 안전도 평가는 등방성

재질과 이방성 재질에 대한 것으로 구분한다. 먼저 등방성 재질에 대한 안전도 평가는 von Miese 항복조건[11]을 적용한다. 즉, 상당응력 $\bar{\sigma}$ 가 재료의 단축 인장항복응력 σ_Y 에 도달하면 항복이 일어난다고 가정한다. 이때 파손의 정도를 표시하기 위하여 다음 식과 같이 강도비 (Strength ratio) κ 를 정의하는 것이 편리하다.

$$\bar{\sigma} = \kappa \sigma_Y \quad (9)$$

또한, 식 (9)의 강도비의 정의로부터 안전계수 S_f 는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$S_f = \frac{1}{\kappa} \quad (10)$$



[그림 7] 하중조건

$$F_{xx}\sigma_x^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + F_{yy}\sigma_y^2 + F_{ss}\sigma_s^2 + F_x\sigma_x + F_y\sigma_y = 1 \quad (11)$$

$$F_{xx} = \frac{1}{XX'}, F_x = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'}$$

$$F_{yy} = \frac{1}{YY'}, F_y = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'}$$

$$F_{ss} = \frac{1}{S^2}, F_{xy}^* = \frac{F_{xy}}{\sqrt{F_{xx}F_{yy}}}$$

이방성 재질에 대한 안전도 평가를 위하여 Tsai-Wu 항복 조건을 적용하며, 2차원 응력의 경우 식 (11)과 같이 단순화 할 수 있다[12]. 일반적으로 F_{xy}^* 는 -1/2로 가정하고, X 는 종방향 인장강도, X' 는 종방향 압축강도, Y 는 횡방향 인장강도, Y' 는 횡방향 압축강도, S 는 종방향 전단강도이다. 즉, 여기서 나타낸 강도 값은 각 재료가 가진 고유 물성치이다.

식 (11)은 단지 파손 여부만을 제공하여 주므로, 파손의 정도를 표현하기 위하여 등방성 재질의 경우와 같이 강도비 κ 와 안전계수 S_f 를 도입한다.

$$\bar{\sigma}_i = \kappa \sigma_{i(a)} = \frac{\sigma_{i(a)}}{S_f} \quad (12)$$

where, $\bar{\sigma}_i$; 작용응력, $\sigma_{i(a)}$; 극한강도

3. 결과 및 고찰

3.1 염가형 설계

일반적으로 제품의 가격은 제품의 재료비에 비례한다. 따라서 제품을 값싸게 만들기 위해서는 제품의 재료비를 줄이면 된다. 그러나 제품의 재료비를 줄이면 제품의 안전이 위협을 받을 수가 있다. 따라서 제품의 안전을 유지 하면서 가장 적은 재료비로 제품을 만드는 기술이 필요하다. 이러한 염가형 설계 기술은 제품을 대량 생산하는 경우에 더욱 큰 장점이 있다. 즉, 제품의 두께를 조금만 줄여도 대량 생산의 경우는 상당한 비용 절감의 효과가 있다.

이와 같은 염가형 설계를 위하여 전체 체결 구조물이 주어진 압력 하에서 안전을 유지하기 위한 가장 얇은 두께를 계산하는 것이 필요하며, 이를 위하여 설계 변수법을 도입하였다. 설계 변수는 오븐의 알루미늄과 스테인레스 각각의 두께와 상부 가열판의 두께이고, 이 때 체결 링의 두께는 고정하였다.

3.2 내압만을 고려한 경우

오븐과 상부 가열판의 두께를 설계 변수로 하여 내압이 작용하는 경우에 대하여 해석한 결과를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 알 수 있듯이 Case 1~Case 3에서 오븐의 두께를 알루미늄 2.0 mm, 스테인레스 0.8 mm로 고정하고 상부 가열판의 두께를 3.8~3.2 mm로 변화시켰을 때 안전계수는 3.17~3.00으로 변화된다. 즉, 상부 가열판의 두께가 감소할수록 전체 구조물의 안전계수는 선형적으로 감소됨을 알 수 있다. Case 4~Case 8에서 오븐의 두께를 알루미늄 2.3 mm, 스테인레스 0.5 mm로 고정하고 상부 가열판의 두께를 3.8~2.8 mm로 변화시켰을 때 안전계수는 3.22~2.44로 변화된다. 즉, Case 1~Case 3과 마찬가지로 상부 가열판의 두께가 감소할수록 전체 구조물의 안전계수는 이에 대응하여 감소하나, 상부 가열판의 두께가 3.2 mm 이하일 때 안전계수가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 안전성을 고려하면서 두께가 가장 얇은 염가형 설계를 위한 상부 가열판의 최적 두께는 3.2 mm임을 알 수 있다.

이를 검증하기 위하여 Case 9~Case 10에서 오븐의 스

테인레스 두께를 0.5 mm, 상부 가열판의 두께를 3.2 mm로 고정하고 오븐의 알루미늄의 두께를 2.1~1.9 mm로 변화시켰을 때 안전계수의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 또한, Case 11~Case 12에서 오븐의 알루미늄 두께를 2.3 mm, 상부 가열판의 두께를 3.2 mm로 고정하고 오븐의 스테인레스 두께를 0.4~0.3 mm로 변화시켰을 때 안전계수의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 다른 체결 구조물의 두께에 비하여 상부 가열판의 두께가 전체 체결 구조물의 안전성에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

[표 1] 내압만을 고려한 경우의 해석 조건과 결과

	오븐 알루미늄 두께(mm)	오븐 스테인레스 두께(mm)	상부 가열판 두께(mm)	안전계수
Case 1	2.0	0.8	3.8	3.17
Case 2	2.0	0.8	3.4	3.07
Case 3	2.0	0.8	3.2	3.00
Case 4	2.3	0.5	3.8	3.22
Case 5	2.3	0.5	3.4	3.07
Case 6	2.3	0.5	3.2	3.00
Case 7	2.3	0.5	3.0	2.53
Case 8	2.3	0.5	2.8	2.44
Case 9	2.1	0.5	3.2	3.01
Case 10	1.9	0.5	3.2	3.01
Case 11	2.3	0.4	3.2	3.00
Case 12	2.3	0.3	3.2	3.00

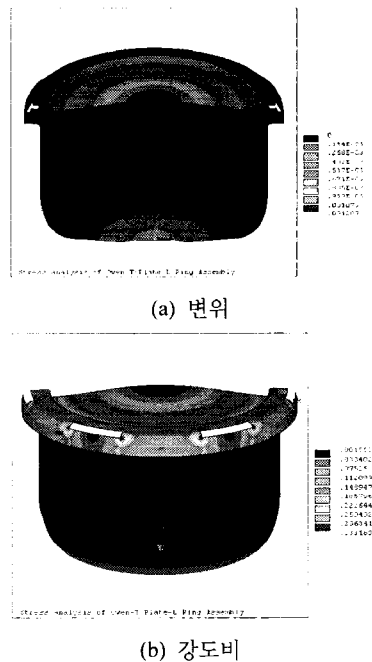
따라서 구조적으로 안전한 체결 구조물의 최적 두께는 오븐은 알루미늄 1.9~2.3 mm, 스테인레스 0.3~0.5 mm이고, 상부 가열판은 3.2 mm인 것을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 오븐의 두께가 두꺼울수록 밥솥 내부의 열 분포가 균일하여 궁극적으로 맛있는 밥을 만들 수 있다고 알려져 있다[1]. 따라서 맛있는 밥을 만들 수 있고, 구조적으로 안전하며, 제품의 재료비가 가장 적게 드는 체결 구조물의 최적 두께를 산정하여야 한다. 이에 가장 적합한 경우는 Case 6이다. Case 6의 경우가 다른 Case에 비하여 오븐과 상부 가열판의 두께가 얇아서 제품의 재료비를 가장 적게 들면서, 구조적으로 안전하고, 또한 맛있는 밥을 만들 수 있는 조합이다. Case 11, 12는 재료비는 적게 들지만, Case 6에 비하여 두께가 상대적으로 얇기 때문에 맛있는 밥을 만들기 어렵지 않다. 그림 8은 Case 6에 대한 변위와 강도비를 표시한 것이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 상부 가열판의 중심에서 최대 변형이 발생하였고 그 때의 값은 1.207 mm이다. 또한, 강도비는 0.33이며 이를 식 (12)를 이용하여 안전계수로 변환하면 3.00이며, 이는 게이지 압력 3.00이 되면 항복(Yielding)이 시작됨을 의미한다. 즉, 안전계수를 3.0으로 할 때 Case 6은 구조적으로 안전하다.

3.3 내압과 온도를 동시에 고려한 경우

표 2는 내압과 온도를 동시에 가한 경우 전체 구조물의 안전계수를 나타낸 것이다. 표 2에서 Case 1, 13, 14는 오븐의 두께를 알루미늄 2.0 mm, 스테인레스 0.8 mm로, 상부 가열판의 두께를 3.8 mm로 고정하고 압력 101.3 kPa, 온도를 각각 0℃, 100℃, 110℃로 적용한 경우이다.

[표 2] 내압과 온도를 동시에 고려한 경우의 해석 조건과 결과

	오븐 알루미늄 두께(mm)	오븐 스테인레스 두께(mm)	상부 가열판 두께(mm)	안전계수
Case 1	2.0	0.8	3.8	3.17
Case 13	2.0	0.8	3.8	3.09
Case 14	2.0	0.8	3.8	3.08
Case 6	2.3	0.5	3.2	3.00
Case 15	2.3	0.5	3.2	2.91
Case 16	2.3	0.5	3.2	2.90



[그림 8] 체결 구조물의 변위 및 강도비; Case 6

또한 Case 6, 15, 16는 오븐의 두께를 알루미늄 2.3 mm, 스테인레스 0.5 mm로, 상부 가열판의 두께를 3.2 mm로 고정하고 마찬가지로 압력 101.3 kPa, 온도를 각각 0℃, 100℃, 110℃로 적용한 경우이다.

표 2에 나타난 바와 같이 온도가 100℃, 110℃로 주어졌을 경우 온도가 없는 경우에 비하여 안전계수가 약 0.1

정도 감소함을 알 수 있다. 그리고 최대 변형이 일어나는 위치와 안전성 측면에서 가장 취약한 부분 즉, 최소 안전계수가 나타나는 체결 구조물의 위치는 온도가 없는 경우와 동일하였다. 따라서 밥솥의 체결 구조물은 온도보다는 압력이 가해지는 경우 안전성에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 밥솥의 체결 구조물인 오븐, 상부 가열판, 그리고 체결 링의 두께에 대하여 설계 변수법을 이용하여 안전성 평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 내압만을 하중조건으로 고려한 경우는 상부 가열판의 두께가 감소할수록 전체 구조물의 안전계수는 이에 대응하여 감소됨을 알 수 있었으며, 오븐의 알루미늄과 스테인레스의 두께가 변화함에 따라 전체 구조물의 안전계수의 변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

2. 내압과 온도를 동시에 고려한 경우는 온도가 100℃, 110℃로 주어졌을 경우가 온도가 주어지지 않은 경우에 비하여 안전계수가 약 0.1 정도 감소함을 알 수 있었다. 따라서 밥솥의 체결 구조물은 온도보다는 압력이 가해지는 경우 안전성에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] K. Murase, "Induction-Heater Type Rice Cookers with Pressure - Cast Thick Pot", Toshiba Review, Vol. 50, No. 4, pp. 335~338, 1995.

[2] Lee, S. P., Final Report; Oven structural analysis, LG Electronics, 1996.

[3] 이종훈, 전용용, 조암, "제품위험분석을 통한 전기밥솥의 안전성 평가 및 개선방안", 대한인간공학회 2006년 춘계학술대회 논문집, 제 5권, pp. 321~325, 2006.

[4] 이종선, 김세환, "런닝머신 프레임의 구조해석", 산학기술성공학회논문지, 제 2권, 1호, pp. 31~35, 2001.

[5] ANSYS User's Manual Ver. 10.0, ANSYS Inc., 2005.

[6] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, "The Finite Element Method", Fourth Ed. Vol. 2, McGraw-Hill, 1991.

[7] Stephen H. Crandall, Norman C. Dahl and Thomas J. Lardner, "An Introduction to the Mechanics of Solid", Second Ed., McGraw-Hill, 1978.

[8] T. J. R. Hughes and F. Brezzi, "On Drilling Degrees of Freedom", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 72, pp. 105~121, 1989.

[9] Daryl L. Logan, "A First Course in the Finite Element Method", PWS-KENT, 1992.

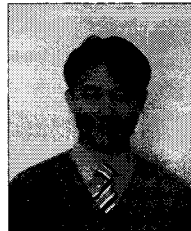
[10] 이종선, "폐목재 2차 파쇄기에 대한 설계 및 구조해석", 한국산학기술학회논문지, 제 6권, 4호, pp. 355~360, 2005.

[11] 김동항, "소성학", 청문각, 1991.

[12] Stephen W. Tsai and H. T. Hahn, "Introduction to Composite Materials", Technomic, 1980.

이 승 표(Seung-Pyo Lee)

[정회원]



- 1992년 2월 : 한양대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 한양대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1999년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 기계설계학과 박사과정

<관심분야>
구조해석

고 병 갑(Byung-Kab Koh)

[정회원]



- 1995년 : 한양대학교 기계설계학과(공학박사)
- 1997년 : Univ. of Virginia 박사후 연구원
- 1998년 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과 부교수

<관심분야>
구조해석 및 최적설계

하 성 규(Sung-Kyu Ha)

[정회원]



- 1988년 : Stanford University(공학박사)
- 1991년 : Stanford University 박사후 연구원
- 1991년 ~ 현재 : 한양대학교 기계정보경영공학부 교수

<관심분야>
복합재 역학