

전기보온압력밥솥 체결 구조물의 선형 및 비선형 구조 해석

이승표^{1*}, 김광석², 고병갑³

¹한양대학교 기계설계학과 대학원, ²인하공업전문대학 자동차과

³인하공업전문대학 기계과

Linear and Nonlinear Structural Analysis for the Assembled Structures of Pressure Rice Cooker

Seung-Pyo Lee^{1*}, Kwang-Suk Kim² and Byung-Kab Koh³

¹Department of Mechanical Design and Production Engineering, Hanyang University

²Department of Automotive Engineering, Inha Technical College

³Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요 약 전기보온압력밥솥 체결 구조물은 오븐, 상부 가열판, 체결 링으로 구성된다. 전기보온압력밥솥은 압력이 작용하기 때문에 안전성 검토가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 체결 구조물에 대하여 설계적 관점과 파손적 관점에서 구조 해석을 수행하였다. 설계적 관점에서 체결 구조물에 대한 선형 해석을 수행하였고, 파손적 관점에서 체결 링에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 이들 해석을 통하여 전기보온압력밥솥 체결 구조물의 안전도를 평가하는 방법을 제시하였다.

Abstract The assembled structures of pressure rice cooker are consisted of oven, top heater plate and locking ring. Since pressure is applied to the assembled structures, it should be necessary to check the safety. In this paper, structural analyses are performed from design and fracture point of view. For the design point of view, linear analysis is performed to assembled structure and for the fracture point of view, nonlinear analysis is performed to locking ring. From these results safety evaluation technique for the assembled structures of pressure rice cooker is proposed.

Key Words : Pressure rice cooker, Finite element analysis, Nonlinear analysis

1. 서론

밥솥은 밥을 지어주는 도구로써 전기보온압력밥솥은 전기보온밥솥과 압력밥솥의 기능을 동시에 가지고 있는 제품이다. 압력밥솥의 기능으로 인하여 밥맛이 좋고 조리시간이 단축되며, 전기보온밥솥의 기능으로 인하여 밥이 조리 되면 자동으로 보온 전환이 가능하다. 이러한 이유들로 인하여 전기보온압력밥솥은 많이 사용되고 있다. 그러나 기존의 밥솥과 달리 오븐 내부의 과도한 압력으로 인하여 밥솥이 파손되면 사용자가 다칠 수도 있으므로 이를 고려한 설계가 반드시 필요하다. 이러한 설계 조건

을 만족시키기 위하여 실험과 해석 등의 연구가 진행되어 왔다.

Murase[1]는 알루미늄과 스테인레스가 접합된 클래드(clad) 오븐에 압력을 작용시키고 오븐 내부의 열 분포를 측정하였다. 또한 측정 결과를 열 해석 결과와 비교하였다. 그 결과 오븐 내부의 균일한 열 분포와 강산화력이 맛있는 밥을 만들기 위한 조건이라는 것을 확인하였다. Lee 등[2]은 오븐 체결 구조물에 대한 구조 해석을 수행하였다. 즉, 오븐, 상부 가열판(top heater plate), 체결 링(locking ring)의 체결 구조물 두께에 대하여 설계 변수법을 이용하여 안전성 평가를 수행하였다. 또한, Lee 등[3]

*교신저자: 이승표(chrisl@hanyang.ac.kr)

접수일 09년 01월 06일

수정일 09년 03월 09일

게재확정일 09년 03월 23일

은 전기보온압력밥솥 오븐의 변형률을 평가하기 위하여 스트레인 게이지를 이용한 실험을 수행하였고, 그 결과를 구조 해석 결과와 비교하였다. 또한, 오븐의 영구 변형률을 평가하기 위하여 수부하 실험을 수행하였고, 그 결과를 구조 해석 결과와 비교하였다.

그러나 이들 연구들은 체결 구조물을 선형 시스템으로 간주하고 수행한 해석이다. Lee 등의 실험 결과로부터 알 수 있듯이 체결 구조물은 비선형 시스템이며 이로 인한 해석 오차가 발생한다[3]. 따라서 체결 구조물의 비선형 구조 해석을 수행하여 보다 정확한 변형량과 응력을 예측하는 것은 안전을 고려한 설계를 위하여 반드시 선행되어야 한다.

본 연구에서는 전기보온압력밥솥 체결 구조물에 대하여 선형 해석과 비선형 해석을 수행하여 구조물의 안전도를 평가하였다. 즉, 오븐과 상부 가열판, 체결 링으로 구성된 체결 구조물에 대하여 설계적 관점에서 선형 해석을 수행하였고, 체결 링에 대하여 파손적 관점에서 비선형 해석을 수행하였다. 그리고 해석 결과를 실험치와 비교하여 해석의 신뢰도를 검증하였다. 이들 결과를 이용하여 전기보온압력밥솥 체결 구조물의 안전도를 평가하는 방법을 제시하였다.

2. 설계적 관점에서의 해석

2.1 해석 대상 및 조건

전기보온압력밥솥에 대한 안전도를 평가하기 위하여 유한 요소법을 적용한 구조 해석을 수행하였다. 구조 해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS[4],[5]를 사용하였다.

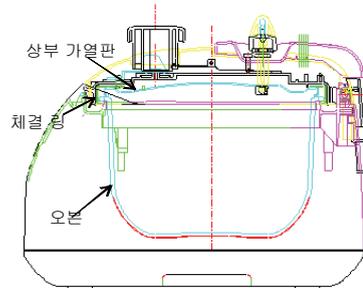
전기보온압력밥솥의 체결 구조물은 3차원 형상을 가지고 있고, 두께 방향의 치수가 다른 방향의 치수에 비하여 작기 때문에 유한 요소 해석 시 3 차원 쉘(shell) 요소를 적용하였다. 곡선 쉘(curved shell)의 지배 방정식은 매우 복잡하므로 이를 단순화시킨 ‘shells as an assembly of flat elements’를 적용하였다. 이 쉘 요소는 연속적인 곡선 표면(curved surface)의 거동을 작고 평평한 평판(plate)들을 조합한 표면의 거동으로 적절히 표현할 수 있다고 가정한다. 또한, 오븐은 알루미늄과 스테인레스의 이방성(anisotropic) 재질로 구성되어 있기 때문에 이를 고려할 수 있는 요소를 선택하여야 한다. 본 연구에서는 1 개의 요소에 8 개의 절점을 갖고, 1 개의 절점에 6 개의 자유도를 갖는 적층 복합재료 쉘 요소(ANSYS; SHELL99)를 이용하여 체결 구조들을 모델링하였다.

전기보온압력밥솥의 체결 구조물은 그림 1에서 알 수

있듯이 오븐, 상부 가열판, 그리고 체결 링의 세 부분으로 나눌 수 있다. 이 구조물들은 원주 방향으로 그 모양이 반복되는 특징이 있다. 따라서 반복되는 단위 형상만을 모델링하고, 이를 회전이나 대칭 이동시켜서 전체 형상을 구성하는 것이 편리하다. 먼저, 오븐의 경우 쉘 요소로 가정하였고, 60°를 주기로 형상이 반복되지만, 모델링의 편의상 0~90°를 모델링하고 회전 이동하여 전체 형상을 형성하였다. 오븐은 특히 표 1과 같이 두께가 4~5 mm로 변하고 두 개의 층(layer)으로 성형되었기 때문에 이를 고려하여 모델링하였다.

상부 가열판의 형상도 오븐과 마찬가지로 쉘 요소로 모델링하였다. 체결 링의 형상도 오븐과 마찬가지로 60° 주기로 대칭이며, 모델링의 편의상 90°를 단위 형상으로 구성하고 이를 회전 이동하여 전체 형상을 형성하였다. 상부 가열판과 체결 링의 두께를 표 2에 나타내었다.

오븐과 상부 가열판, 체결 링 모두를 모델링하기 위하여 각각을 모델링하고 세 개의 모델링 결과를 좌표 변환을 이용하여 전체를 조합하였다. 세 개의 모델링을 하나



[그림 1] 전기보온압력밥솥의 체결 구조물

[표 1] 오븐의 두께 (단위; mm)

	알루미늄	스테인레스
러그(Lug) 부분	4	0
오븐 벽(Wall) 부분	4.5	0
스테인레스와 알루미늄의 접합 시작 부분	5	0
스테인레스와 알루미늄의 접합 부분	4.5	0.5

[표 2] 상부 가열판과 체결 링의 두께 (단위; mm)

	두께
상부 가열판	1.5
체결 링	1.5

로 합치기 위하여 먼저 좌표상의 원점(coordinate origin)을 일치시켜야 한다. 오븐의 원점을 전역 좌표계 원점(global coordinate origin)으로 지정하고, 상부 가열판과 체결 링의 원점을 국부 좌표계 원점(local coordinate origin)으로 지정하였다. 전역 좌표계 원점과 국부 좌표계 원점의 상대 거리를 이용하여 체결 구조물의 전체 형상을 구성하였다.

세 개의 구조물을 조합하여 전체 형상을 구성할 때 가장 주의할 점은 각 형상들을 절점과 요소로 나눌 때 절점이 공유되어야 한다는 점이다. 실제 체결 구조에서는 이 겹쳐지는 부분들이 접촉에 의한 변형을 하지만, 이는 특별한 해석을 수행하여야 하므로 본 연구에서는 서로 연동(coupling)되어서 움직인다고 가정하였다. 전체 형상을 해석하는 것은 계산 시간이 너무 오래 소요되기 때문에 1/2 형상만을 모델링하고 1/2의 경계가 되는 부분에 대칭 경계 조건(symmetric boundary condition)을 적용하여 전체를 해석한 것과 같은 효과를 얻었다. 그림 2는 전기보온압력밥솥 체결 구조물의 모델링 결과이다. 오븐과 상부 가열판, 체결 링의 물성치는 각각 표 3, 표 4와 같다.

실제 밥솥은 오븐이 상부 케이스(upper case)에 놓여있고, 상부 가열판과 체결 링은 뚜껑부에 결합되어 있어서 핸들을 좌우로 회전함으로 오븐과 체결 링의 러그(lug)가 체결 또는 해제되도록 구성되어 있다. 이를 유한 요소 해석하기 위하여 상부 케이스에 놓이는 오븐 러그 부분을 식 (1)과 같은 경계 조건으로 자유도를 구속하였다.

$$\delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z = 0 \quad (1)$$

식 (1)의 경계 조건만으로는 체결 구조물이 강체 운동(rigid body motion)을 한다.



[그림 2] 전기보온압력밥솥 체결 구조물의 모델링

[표 3] 오븐의 물성치

	알루미늄	스테인레스
Young's modulus, kgf/mm ²	7.238e+3	20.387e+3
Poisson's ratio	0.33	0.28
Longitudinal tensile strength, kgf/mm ²	33.0	45.9
Longitudinal shear strength, kgf/mm ²	19.1	26.5

[표 4] 상부 가열판과 체결 링의 물성치

	스테인레스
Young's modulus, kgf/mm ²	19.690e+3
Plastic modulus, kgf/mm ²	750
Poisson's ratio	0.28
Longitudinal tensile strength, kgf/mm ²	52.5
Longitudinal shear strength, kgf/mm ²	30.3
Yield stress, kgf/mm ²	20.9

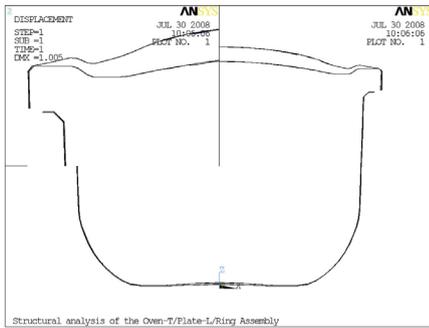
이를 억제하기 위하여 오븐 중심에서 식 (2)와 같은 경계 조건을 입력하였다.

$$\delta_x, \delta_y, \theta_x, \theta_y, \theta_z = 0 \quad (2)$$

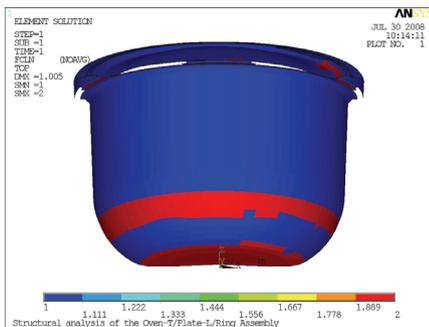
체결 구조물의 하중 조건으로 게이지 압력 1 기압, 즉 절대 압력 2기압을 체결 구조물 내부에 가하였다. 체결 링은 직접 압력을 받지 않고 오븐과 상부 가열판에 의한 반력으로 하중이 작용하여 변형이 발생하므로 체결 링에 대한 하중 조건은 입력하지 않았다.

2.2 해석 결과 및 고찰

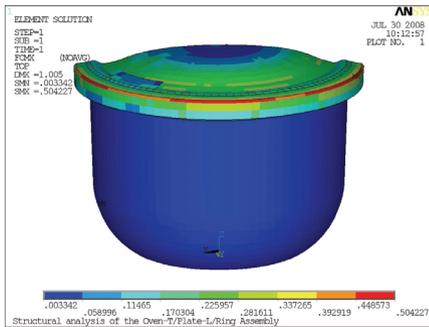
유한 요소 해석 결과, 그림 3과 같이 상부 가열판에서 최대 변형이 발생하였고, 그 값은 1.01 mm이다. 상부 가열판에서 최대 변형이 발생한 이유는 상부 가열판의 두께가 오븐의 두께에 비하여 상대적으로 얇기 때문이라고 예상된다. 그림 4는 FCLN[4]으로 정의되는 가장 먼저 파손(fail)되는 층을 도시하였다. 오븐 중심부분과 스테인레스와 알루미늄이 접합되는 끝부분에서는 스테인레스가 먼저 파손하고, 러그 부분에서는 체결 링이 먼저 파손한다. 이 두 부분을 제외한 나머지 부분에서는 알루미늄에서 파손이 발생하는 것을 예상할 수 있다. Tsai-Wu 항복 조건식[6]을 적용한 안전도 평가를 위하여 정의한 FCMX[4]는 그림 5에 도시하였다. FCMX 최대값은 체결 링의 위쪽 필렛(fillet) 부분에서 발생하였고, 그 값은 0.50이다. 이를 안전 계수로 변환하면 2.00이며, 이는 게이지 압력 2.00이 되면 항복이 시작함을 의미한다. 이로부터 체결 구조물은 설계적 관점에서 안전하게 설계되었음을 알 수 있다.



[그림 3] 전기보온압력밥솥 체결 구조물의 변형량



[그림 4] 전기보온압력밥솥 체결 구조물의 FCLN



[그림 5] 전기보온압력밥솥 체결 구조물의 FCMX

그러나 전기보온압력밥솥은 항복 응력 이상의 압력이 작용하여 체결 구조물이 터져서 파손되는 것이 아니라, 소성 변형으로 인하여 압력 누설이 되어 사용할 수 없게 되는 경우가 대부분이다. 즉, 지금까지의 해석은 응력 값에 초점을 맞추어 안전도 평가를 하였지만, 실제 밥솥에서는 최대 응력에 의한 파손이 아니라 최대 변형에 의한 파손이 발생하며 이를 이용하여 밥솥의 안전도를 평가 및 예측하여야 한다. 또한, 최대 변형에 의한 압력 누설로서 압력 밥솥의 안전을 평가하기 위해서는 탄성 한도 내에서의 해석이 아니라 가공 경화 현상이 고려되는 소성 변형까지를 고려한 해석을 수행하여야 한다. 소성 변형은

선형 해석이 아닌 비선형 해석 방법으로 계산되며, 비선형 해석은 일반적으로 복잡한 현상을 부분적으로 선형화하여 반복적(iterative)으로 계산을 수행하여 결과를 얻는다.

3. 파손적 관점에서의 해석

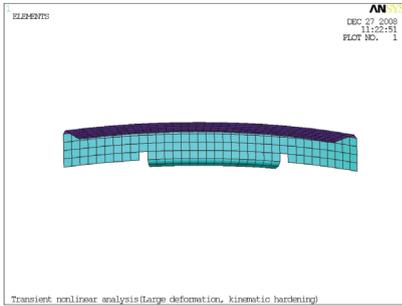
3.1 해석 대상 및 조건

전기보온압력밥솥의 체결 구조물에 대하여 구조 해석을 수행한 결과, 탄성 영역만이 아니라 소성 영역까지를 고려하는 비선형 해석이 필요하였다. 비선형 해석은 선형 해석에 비하여 몇 배의 시간이 소요되며 해석 과정이 훨씬 복잡하다. 전체 구조물에 대하여 비선형 해석을 수행하는 것은 시간적으로 너무 많이 소요되며, 쉽게 수렴하지 않기 때문에 체결 구조물 중에서 구조적으로 가장 취약한 체결 링만을 고려하여 비선형 해석을 수행하는 것이 바람직하다. 체결 링의 형상은 리그를 포함한 60°의 단위 형상에 대하여 축 대칭이므로 하나의 단위 형상에 대하여 비선형 거동을 수행하는 것이 경제적이다. 이를 위하여 체결 구조물 전체 형상 중에서 체결 링 모델링 부분을 이용하였다. 해석의 정확도를 높이기 위하여 전체 형상을 구성할 때 무시하였던 리그 양쪽 끝 부분의 홀도 생성하였다. 그림 6은 체결 링의 모델링 결과를 나타낸다.

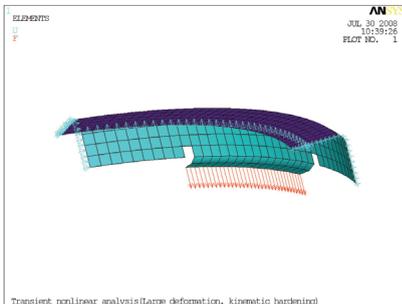
체결 구조물의 비선형 거동을 계산하기 위하여 체결 링의 단위 형상만을 모델링하였고, 그림 7과 같이 경계 조건을 구성하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 오븐 리그와 접촉하는 체결 링의 리그 부분은 하중을 가하고, 상부 가열판과 접촉하는 위 부분은 대칭 경계 조건을 주어서 운동을 구속하였다. 즉, 상부 가열판의 영향으로 이 부분에서는 높이 방향의 자유도가 구속되며, 다른 5 개의 자유도는 자유(free)이다. 오븐 리그와 접촉하는 부분의 하중은 힘의 평형 방정식으로부터 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$P = \frac{p(\pi r^2)}{6A} \quad (3)$$

여기서, P ; 체결 링의 리그 부분에 작용하는 전체 힘
 A ; P 가 작용하는 영역
 p ; 압력
 r ; 체결 링의 반경



[그림 6] 체결 링의 모델링



[그림 7] 체결 링의 경계 조건

이 때 리그 부분의 하중은 오븐 리그의 끝에서 작용한다고 가정하고 계산하였다. 모델링된 체결 링 단위 형상의 거동이 전체 형상에서의 거동과 같도록 하기 위하여 단위 형상의 양쪽 끝에 대칭 경계 조건을 입력하였다. 이 대칭 경계 조건은 계산 결과, 대칭이 되는 부분에서의 응력이 연속적(continuous)인가를 보면 경계 조건이 제대로 입력되었는지를 알 수 있다.

3.2 해석 결과 및 고찰

전기보온압력밥솥 체결 구조물의 변형에 의한 파손을 계산하기 위하여 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석은 기하학적 비선형(geometric nonlinear)과 물성치 비선형(material nonlinear)으로 크게 나눌 수 있다. 본 연구에서는 기하학적 비선형으로 재료의 대 변형(large deformation)을 적용하였고, 물성치 비선형으로 소성 변형(plastic deformation)을 고려하였다. 해석 결과, 체결 링의 경우에는 형상에 비하여 크기(dimension)가 상대적으로 작기 때문에 대 변형에 의한 영향이 그리 크지는 않았다.

물성치 비선형, 즉 소성 변형을 고려하기 위하여 응력-변형률 선도에서 가공 경화 영역을 탄성-소성 거동(Elastic-Plastic behavior)으로 가정하였고, 밥솥 체결 링을 구성하는 재질인 스테인레스는 Rate-independent plastic이라고 간주하였다. Associated flow rule과

Bauschinger effect가 나타나는 Kinematic hardening 모델을 적용하였다[7].

전기보온압력밥솥의 안전도를 평가하기 위하여 체결 링의 아래 부분에서의 변형량과 위 부분에서의 변형량을 하중 변화에 대하여 계산하여 각각 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 그림 8과 그림 9는 하중-변형량 곡선(Force-Deflection curve, $F-\delta$ curve)이며, 각각 하중의 변화에 대한 반경 방향의 변형량(δ_r)과 높이 방향의 변형량(δ_z)을 나타낸 것이다. 그림 8에서 체결 링 위 부분과 아래 부분의 반경 방향의 변형량은 하중이 증가함에 따라서 선형적으로 증가하며 3.5~3.6 기압에서 체결 링은 급격한 변형이 발생한다. 그림 9에 나타낸 높이 방향의 변형량은 약 2 기압의 하중 상태까지는 선형적으로 변화하며 2~3.4 기압까지는 급한 경사로 변형량이 증가하고, 3.5~3.6 기압의 하중에서는 급격한 변형을 나타낸다.

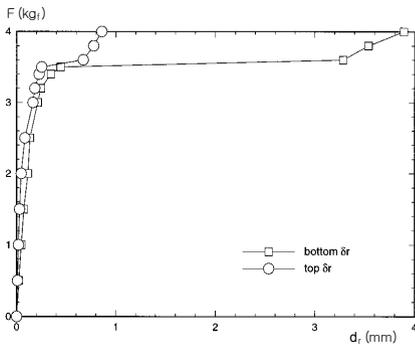
그림 8, 그림 9의 두 그래프로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 첫째로, 0~2 기압까지는 하중에 대한 변형량이 선형적으로 변화하며, 이는 응력-변형률 선도에서 Hooke의 법칙이 적용되는 탄성 영역으로 간주할 수 있다. 둘째로, 2 기압 이상 3.5 기압까지는 변형량이 비선형적으로 증가하는 부분이다. 이 부분은 Hooke의 법칙에서 소성 변형하는 부분으로 나타낼 수 있다.

셋째로, 3.5~3.6 기압의 하중이 작용하는 구간에서는 변형량이 급격히 증가하며 이 부분은 응력-변형률 선도에서 파손이 발생하는 구간이다. 즉, 밥솥의 소성 변형으로 인하여 압력이 누설되고 밥솥을 사용할 수 없게 되는 구간이다. 그 이후의 하중-변형량 곡선은 의미가 없다.

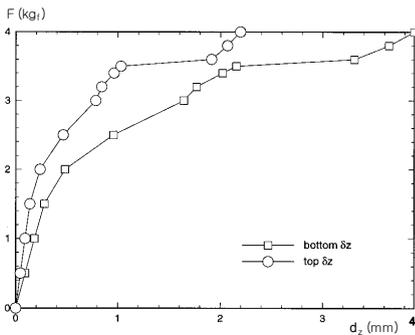
그러므로 본 연구에서 해석한 전기보온압력밥솥의 체결 구조는 3.5~3.6 기압의 압력 조건 하에서 심한 소성 변형이 발생하여 밥솥의 제 기능을 발휘하지 못하며 궁극적으로 사용할 수 없게 된다고 예상할 수 있다. 이 결과는 Lee 등이 실험한 결과와도 잘 일치한다[3]. 따라서 향후 유사한 전기보온압력밥솥의 설계 및 안전성 평가 시 본 연구에서 제시한 방법은 상당히 유용하게 사용할 수 있으며 새로운 제품 설계에 도움을 줄 수 있다고 생각된다.

4. 결론

오븐, 상부 가열판, 체결 링으로 구성된 전기보온압력 밥솥의 체결 구조물에 대하여 ANSYS를 이용하여 선형 및 비선형 구조 해석을 수행하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.



[그림 8] 체결 링의 $F-\delta_r$ 선도



[그림 9] 체결 링의 $F-\delta_z$ 선도

1. 설계적 관점에서의 해석을 위하여 체결 구조물에 대한 선형 구조 해석을 수행하였고, 그 결과 안전 계수가 2.00임을 알았다. 이는 게이지 압력 2.00 기압이 작용할 때 항복이 시작함을 의미한다. 이 결과로부터 체결 구조물은 설계적 관점에서 볼 때 안전함을 예상할 수 있다.
2. 파손적 관점에서의 해석을 위하여 체결 링에 대한 비선형 구조 해석을 수행하였다. 그 결과 3.5~3.6 기압에서 급격한 소성 변형이 발생하며 따라서 이 기압에서 밥솥이 파손된다고 예상할 수 있다. 이 결과는 실험치와 상당히 유사한 결과이며, 설계적 관점과 파손적 관점에서의 해석은 향후 밥솥의 설계에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

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] 이승표, 고병갑, 하성규, "설계 변수법을 이용한 밥솥 체결 구조물의 안전도 평가", 한국산학기술학회논문지, Vol. 9, No. 4, pp. 853~858, 2008.

[3] 이승표, 고병갑, 하성규, "실험을 이용한 전기보온압력밥솥 오븐의 안전도 평가", 한국산학기술학회논문지, Vol. 9, No. 6, pp. 1541~1547, 2008.

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

[5] 이종선, "엘리베이터 도어의 거동해석", 한국산학기술학회논문지, Vol. 8, No. 5, pp. 991~994, 2007.

[6] Stephen W. Tsai and H. T. Hahn, "Introduction to Composite Materials", pp. 278~302, Technomic Publishing Company, 1980.

[7] Jacob Lubliner, "Plasticity Theory", pp. 136~140, Macmillan Publishing Company, 1990.

이 승 표(Seung-Pyo Lee)

[정회원]



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

<관심분야>
구조해석

김 광 석(Kwang-Suk Kim)

[정회원]



- 1998년 : 부산대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1999년 : 부산대학교 CAE Lab. 박사 후 연구원 및 기금교수
- 2000년 ~ 현재 : 인하공업전문대학 자동차과 부교수

<관심분야>
탄성다물체동역학, 구조해석

고 병 갑(Byung-Kab Koh)

[정회원]



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

<관심분야>

구조해석 및 최적설계