

# 실험을 이용한 전기보온압력밥솥 오븐의 안전도 평가

이승표<sup>1\*</sup>, 고병갑<sup>2</sup>, 하성규<sup>3</sup>

## Safety Evaluation for Pressure Rice Cooker Oven using Experiment

Seung-Pyo Lee<sup>1\*</sup>, Byung-Kab Koh<sup>2</sup> and Sung-Kyu Ha<sup>3</sup>

**요약** 유도가열 방식의 전기보온압력밥솥은 밥솥 전체를 가열하기 때문에 밥맛이 좋고, 빠르게 밥을 지을 수 있는 장점이 있어서 많이 사용되고 있다. 특별히 전기보온압력밥솥의 오븐은 내부에 압력이 작용하기 때문에 안전성 검토가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 변형률을 평가하기 위하여 스트레인 게이지를 이용한 실험을 수행하였고, 그 결과를 유한 요소법을 이용한 구조 해석 결과와 비교하였다. 또한, 영구 변형량을 평가하기 위하여 수부하 실험을 수행하였고, 그 결과를 구조 해석 결과와 비교하였다. 이들 실험과 해석 결과를 통하여 오븐의 안전도를 평가하는 방법을 제시하였다.

**Abstract** Because of good taste and quick cooking, the induction heating type pressure rice cooker is widely used. Since pressure is applied to oven structure, it should be necessary to check the safety evaluation. In this paper, strain gauge experiment is performed in order to evaluate the oven's strain and its result is compared with that of structural analysis. And water test is performed to evaluate the oven's permanent deformation. The result is also compared with that of structural analysis. By using these experiments and analyses the safety evaluation method of the oven is suggested.

**Key Words** : IH Oven, Strain gauge experiment, Finite element analysis

### 1. 서론

우리나라를 포함하여 일본, 중국에서는 예로부터 쌀을 주식으로 하여왔다. 따라서 밥을 지어주는 도구가 일찍부터 발달해 왔으며, 특히 생활수준이 향상된 요즘은 사람들이 단지 먹는 것 자체가 아니라 맛있는 밥 먹기를 바라고 있다. 이에 부응하여 업계에서는 유도가열 방식의 전기보온압력밥솥을 개발하였다. 이 밥솥은 코일에서 발생하는 와전류(Eddy current)를 열로 변환시켜서 오븐 자체를 가열하는 방식이다. 고효력으로 가열되므로 밥맛이 좋고, 빠르게 밥을 지을 수 있는 고급 밥솥이다. 그러나 전기보온압력밥솥은 오븐 내부에 압력이 가해지기 때문에 안전에 주의하여야 하며, 오븐 체결 구조물들에 대한 실험과 구조 해석 등의 철저한 검증을 통한 설계가 필요하다.

Omori 등[1]은 기존의 열판식 가열방식과 유도가열

방식의 열 분포를 비교하고, 밥맛을 높이는 것은 강하고 균일한 화력과 적절한 화력제어라는 사실을 주장하였다. Murase[2]는 클래드(Clad) 오븐에 대하여 열 분포 해석과 실험을 수행하였고, 그 결과 맛있는 밥을 위하여 균일한 열 분포가 필요하다는 사실을 확인하였다. Lee 등[3]은 유한 요소법을 이용하여 오븐 체결 구조물에 대한 구조 해석을 수행하여 구조적으로 안전한 최적 두께를 산출하였다. 즉, 맛있는 밥맛과 염가형 설계를 위하여 체결 구조물의 두께를 설계 변수로 선정하고 설계 변수법을 적용하여 체결 구조물의 최적 두께를 계산하였다.

그러나 이들 연구들은 열 해석과 이에 대한 검증 실험이 대부분이며, 구조 해석과 이에 대한 검증 실험은 거의 없다. 그러므로 스트레인 게이지 등을 이용한 변형률 측정 실험은 의미가 있고, 실험과 해석의 결과를 비교하는 것은 오븐 체결 구조물의 안전도를 평가하기

<sup>1</sup>한양대학교 기계설계학과 대학원(박사과정)

<sup>3</sup>한양대학교 기계정보경영공학부

접수일 08년 07월 28일

수정일 08년 10월 14일

<sup>2</sup>인하공업전문대학 기계과

\*교신저자: 이승표(chrisl@hanyang.ac.kr)

게재확정일 08년 12월 16일

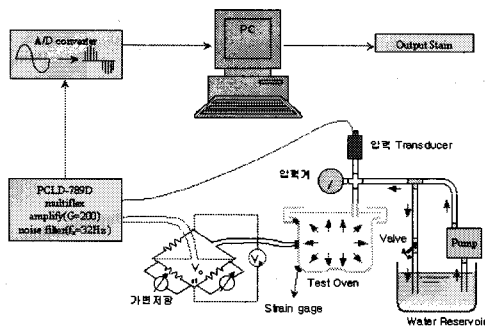
위하여 반드시 수행되어야 한다.

본 연구에서는 유도가열 방식의 전기보온압력발출 오븐에 대하여 스트레인 게이지[4]~[6]를 이용한 변형을 측정 실험을 수행하고, 그 결과를 유한 요소법을 이용한 구조 해석 결과와 비교하였다. 또한, 탄성 한계를 넘어서는 영구 변형량 실험을 수행하고, 그 결과를 구조 해석 결과와 비교하였다. 이들 실험과 해석 결과를 통하여 오븐 구조물의 안전도를 평가하는 방법을 제시하였다.

## 2. 변형률 평가

### 2.1 스트레인 게이지를 이용한 실험

스트레인 게이지를 이용한 변형을 실험을 위하여 그림 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 또한, 그림 2는 구성된 실험 장치에 대한 실제적인 실험 장치이다.



[그림 1] 실험 장치도



[그림 2] 실험 장치

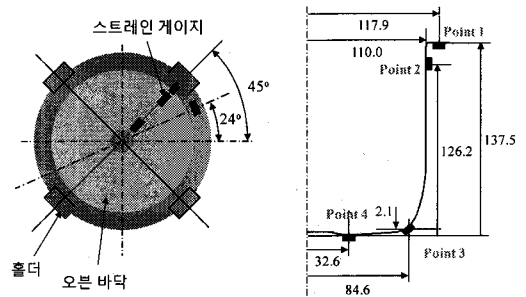
그림 2에서 알 수 있듯이 오븐 내에 압력을 가하기 위하여 수부하를 가할 수 있는 펌프를 장치하고, 압력

계(Sensotec Co.)를 상부 가열판(Top heater plate) 위쪽에 부착하였다. 압력계에는 휘스톤 브리지가 부착되어 있어서 Excitation voltage를 가하면 입력 값을 아날로그 신호로 얻을 수 있다. 또한, 변형을 측정을 위하여 오븐의 4 개의 지점에 스트레인 게이지를 부착하여 Full bridge를 구성하였다. 본 연구에 사용된 스트레인 게이지는 오븐 바깥쪽 표면에 부착하며, Tokyo Sokki Kenkyujo사 제품이다. 사용된 스트레인 게이지의 규격은 350Ω, 게이지 팩터(Gauge factor) 2.14, 게이지 길이(Gauge length) 3 mm와 1 mm이다.

오븐의 변형률을 평가하기 위하여 스트레인 게이지를 홀더에 대하여 일직선으로 부착하였고, 홀더 때문에 부착이 불가능한 부분은 홀더 옆에 부착하였다. 스트레인 게이지를 홀더에 대하여 일직선 방향으로 부착한 이유는 그 부분에서 변형률이 가장 클 것으로 예상되기 때문이다. 그림 3은 변형률 측정을 위한 스트레인 게이지 부착 위치를 나타낸다.

변형률 실험은 알루미늄과 스테인레스의 두께가 각기 다른 두 가지 오븐의 시편으로 수행하였다. 오븐의 두께별 샘플의 종류는 표 1에 나타내었다.

위에서 언급한 바와 같이 실험 장치를 구성한 후, 압력 신호에 따른 변형률 신호를 얻기 위하여 펌프 옆에 부착된 밸브를 조절하면서 오븐 내에 게이지 압력 3 기압의 내압이 가해지도록 수부하를 가하였다.



[그림 3] 스트레인 게이지 부착 위치

[표 1] 오븐 두께별 샘플의 종류

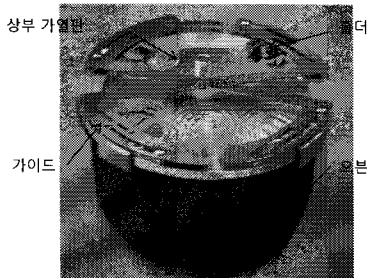
	스테인레스 두께	알루미늄 두께
샘플 1	0.5 mm	2.0 mm
샘플 2	0.8 mm	1.7 mm

이 때 압력 신호는 상부 가열판 위에 장치된 압력 변환기를 통해서 아날로그 전압 값으로 나타나고, 다시 A/D Converter를 통해서 디지털 신호로 변환되어 PC에 저장된다. A/D Converter는 PCL-818 A/D Converter를

사용하였다. 변형률 신호는 오븐 내에 수부하가 가해질 때, 오븐이 변형됨에 따라서 오븐 바깥쪽에 부착된 스트레인 게이지를 통해서 브리지 회로의 출력 값으로 나타난다. 이 출력 값은 압력 신호에 비해 매우 작으므로 PCLD-789 Board를 통하여 200배 증폭하였다. PCLD-789 Board에서 증폭된 압력 신호를 다시 PCL-812 A/D Converter를 통하여 디지털 신호로 변환하고 압력 신호와 마찬가지로 PC에 저장하였다. 2 개의 A/D Converter로 들어오는 입력 신호는 노이즈를 줄이기 위하여 Low pass filter를 사용하여 필터링(Filtering)하였다. 그리고 외란의 영향을 최대한 배제하기 위하여 Averaging하였다.

### 2.2 구조 해석

스트레인 게이지를 이용한 오븐의 변형률 실험 결과를 비교하기 위하여 오븐에 대하여 구조 해석을 수행하였다. 해석은 구조 해석을 위한 상용 프로그램인 ANSYS[7]-[9]를 사용하였고, 표 1에 언급된 샘플 1, 2의 두 종류에 대하여 수행하였다. 오븐의 형상은 그림 4와 같고, 구조 해석을 위하여 입력된 물성치는 표 2와 같다. 압력 밥솥 오븐과 같이 구조물이 두께 방향의 치수가 다른 방향의 치수에 비하여 작을 경우는 쉘(Shell) 요소를 선정하는 것이 일반적이다.



[그림 4] 오븐 및 체결 구조물의 형상

[표 2] 오븐의 물성치

	Young's modulus	Poisson's ratio
스테인레스	200 GPa	0.28
알루미늄	70 GPa	0.35

그리고 오븐은 알루미늄과 스테인레스, 2 층(Layer)의 이방성(Anisotropic) 재질로 구성되어 있기 때문에 이를 고려할 수 있는 요소를 선택하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 요소로 ANSYS SHELL91 요소를 선정하였다. SHELL91 요소는 16 Layer structural shell 요소이다.

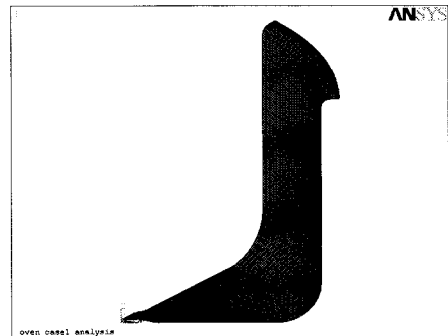
그림 4로부터 알 수 있듯이 오븐은 축대칭 형상이므로 2차원 축대칭 형상으로 모델링하여 해석을 수행할 수 있다. 그러나 90° 간격으로 홀더가 존재하므로 이를 고려할 필요가 있다. 따라서 90°의 형상에 대하여 모델링을 수행하는 것이 합리적이다. 또한 90°의 오븐 형상은 홀더를 중심으로 좌우 대칭 이므로 궁극적으로 45° 형상만을 모델링하고, 0°와 45° 부분에 적절한 경계조건을 입력하여 전체의 형상을 모델링한 것과 같은 효과를 줄 수 있다. 이와 같이 모델링된 형상을 그림 5에 나타내었다.

오븐의 유한 요소 해석을 위한 하중 조건으로는 오븐 내부에 게이지 압력 1 기압을 가하였다. 또한, 경계 조건으로 0°와 45°의 반경 방향으로 대칭 경계 조건을 주어서 전체 오븐을 해석하는 것과 같도록 하였다. 강체 운동(Rigid body motion)이 발생하지 않도록 홀더 부분의 X, Y 방향 변위에 대하여 식 (1)과 같이 자유도를 구속한다.

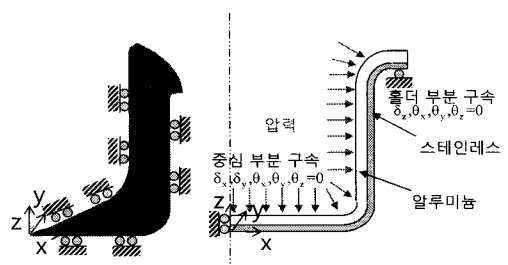
$$\delta_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z = 0 \quad (1)$$

오븐 중심에서는 높이(Z) 방향의 변위를 제외한 다른 5 개의 자유도를 식 (2)와 같이 구속하였다.

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



[그림 5] 오븐 형상의 모델링



[그림 6] 오븐 해석을 위한 하중 및 경계 조건

오븐 해석을 위하여 적용한 하중 및 경계 조건은 그림 6과 같다.

위에서 언급한 바와 같이 샘플 1, 2의 두께에 대하여 물성치, 하중 조건, 경계 조건을 입력하여 구조 해석을 수행하였다. 오븐은 알루미늄과 스테인레스로 구성되어 있으므로 이방성 재질로 간주되며, 이에 대한 안전도 평가를 위하여 식 (3)과 같이 Tsai-Wu 항복 조건식을 적용하였다.

$$F_{xx}\sigma_x^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + F_{yy}\sigma_y^2 + F_{ss}\sigma_s^2 + F_x\sigma_x + F_y\sigma_y = 1 \quad (3)$$

또한, 파손의 정도를 표현하기 위하여 안전계수  $S_f$  를 도입하였다[3],[10].

$$S_f = \frac{\sigma_i(a)}{\bar{\sigma}_i} \quad (4)$$

where,  $\sigma_i(a)$ ; 극한 강도,  $\bar{\sigma}_i$ ; 작용 응력

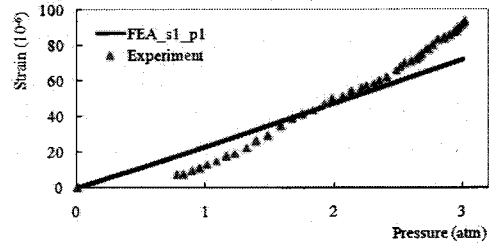
표 3으로부터 알 수 있듯이 샘플 1, 2의 안전계수가 각각 5.35, 5.82이므로 주어진 하중에 대하여 충분히 안전함을 예상할 수 있다.

[표 3] 오븐의 최대 변형량과 안전계수

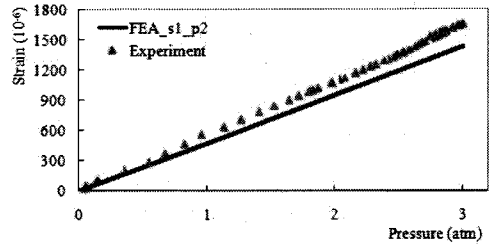
	스테인레스 두께	알루미늄 두께	최대 변형량	안전계수
샘플 1	0.5 mm	2.0 mm	0.487 mm	5.35
샘플 2	0.8 mm	1.7 mm	0.452 mm	5.82

### 2.3 실험 결과와 해석 결과의 비교

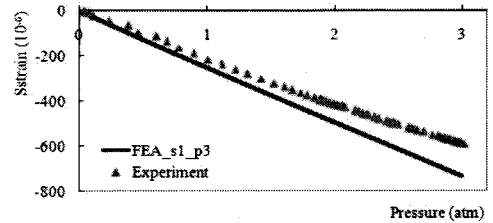
실험에 사용된 2 가지 샘플에 대하여 각각 4 지점의 변형률을 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다. 그리고 ANSYS를 이용하여 게이지 압력 1~3기압으로 하중을 변화시키면서 오븐의 변형률을 계산하였다. 이들 결과를 그림 7~14에 도시하였다. 그림 7~14로부터 알 수 있듯이 해석과 실험의 결과가 유사한 경향을 나타낸다.



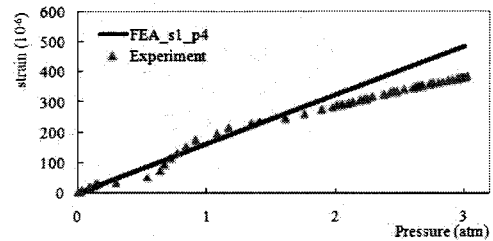
[그림 7] 샘플 1의 1번 지점에서의 압력-변형률 선도



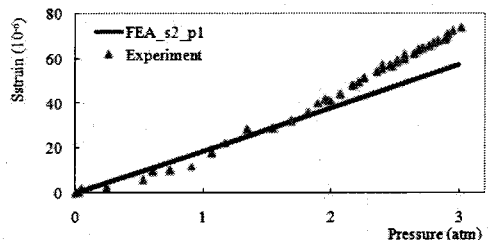
[그림 8] 샘플 1의 2번 지점에서의 압력-변형률 선도



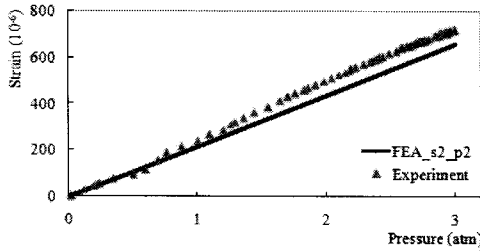
[그림 9] 샘플 1의 3번 지점에서의 압력-변형률 선도



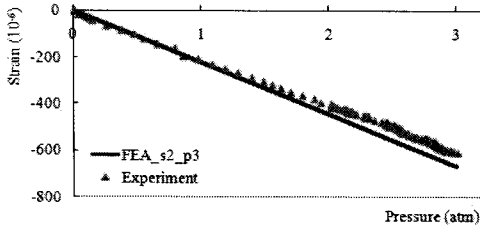
[그림 10] 샘플 1의 4번 지점에서의 압력-변형률 선도



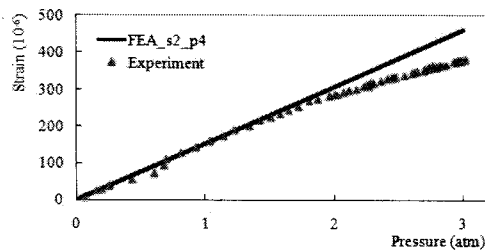
[그림 11] 샘플 2의 1번 지점에서의 압력-변형률 선도



[그림 12] 샘플 2의 2번 지점에서의 압력-변형률 선도



[그림 13] 샘플 2의 3번 지점에서의 압력-변형률 선도



[그림 14] 샘플 2의 4번 지점에서의 압력-변형률 선도

유한 요소 해석으로부터 얻은 변형률과 실험으로부터 얻은 변형률의 최대 오차를 표 4에 나타내었다. 표 4로부터 알 수 있듯이 1차 샘플 4번 지점의 최대 오차가 28%로서 가장 크며, 다른 지점에서는 9~24%의 오차를 보인다. 그림 9와 그림 13의 기울기가 (-) 방향인 것은 변형률 값이 음수라는 뜻이며, 즉 3번 지점은 압축이 발생한다는 것을 의미한다. 또한, 나머지 지점들은 압력에 의하여 인장이 발생함을 예상할 수 있다.

[표 4] 변형률의 해석과 실험의 최대 오차

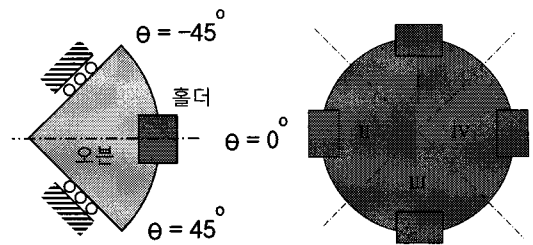
샘플 No	지점 No	해석값	실험값	오차
1	1	72.0	92.6	22%
1	2	1439.2	1661.3	13%
1	3	-738.4	-594.4	24%
1	4	485.9	380.3	28%
2	1	57.7	73.8	22%
2	2	660.5	721.9	9%
2	3	-669.5	-609.9	10%
2	4	461.2	378.7	22%

해석과 실험의 최대 오차가 큰 이유는 스트레인 게이지의 부착 위치가 유한 요소 해석의 위치와 정확히 일치하지 않아서 발생하는 것이라고 판단할 수 있다. 특히 2, 3번 지점에서는 변형률 구배가 크기 때문에 오차 발생의 소지가 크다고 예상할 수 있다. 그림 7~14에서 알 수 있듯이 구조 해석의 그래프는 직선인데 비하여 실험 결과의 그래프는 3 기압 부분에서 약간의 곡선을 그린다. 이는 게이지 압력 3 기압 부근에서 소성 영역으로 넘어가며 영구 변형이 발생하기 때문이라고 예상할 수 있다. 이와 같은 현상을 정확히 묘사하기 위해서는 영구 변형량 실험과 함께 구조물의 비선형성을 고려할 수 있는 비선형 해석을 수행하여야 한다. 즉 비선형 해석을 수행하면 해석과 실험의 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

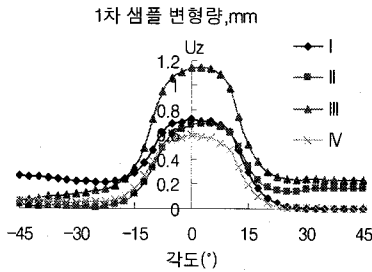
### 3. 영구 변형량 평가

#### 3.1 수부하 실험

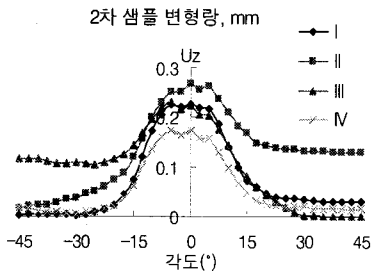
오븐의 영구 변형량을 평가하기 위하여 두께를 달리 한 2 가지 샘플에 대하여 수부하 실험을 수행하였다. 실험 결과, 샘플 1은 게이지 압력 3 기압으로 40 초간 유지되다가 누수가 되었다. 누수 후 영구 변형량을 분석해 보면 4 군데의 오븐 플랜지 부위에 홀더에 의한 변형이 확연히 나타난다. 이를 그림 15, 그림 16에 도시하였다. 그림 16에서 알 수 있듯이 III번 홀더에서의 영구 변형량이 다른 홀더의 변형량에 비하여 상대적으로 크며 이 부근으로 누수가 발생했음을 예상할 수 있다. 이와 같은 누수 현상은 이상 압력이 작용할 때 오븐의 파손이 발생하기 전에 홀더 부분의 소성 변형으로 인하여 압력이 누수가 되도록 설계한 일종의 안전 장치라고 판단된다.



[그림 15] 수부하 실험 시 홀더의 위치



[그림 16] 샘플 1의 영구 변형량

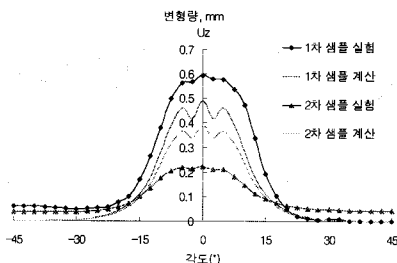


[그림 17] 샘플 2의 영구 변형량

샘플 2를 게이지 압력 3 기압으로 1분간 지속하였고, 그 결과 누수가 발생하지 않았다. 또한, 오븐 플랜지 부분에 외관상 큰 변형은 나타나지 않았다. 샘플 2에 대한 영구 변형량을 그림 17에 도시하였다. 샘플 2의 영구 변형에도 불구하고 누수가 발생하지 않은 이유는 오븐 안쪽에 체결되어 있는 고무 패킹 때문이라고 예상된다. 즉, 0.2~0.3 mm 가량의 영구 변형은 고무 패킹으로 인하여 누수가 발생하지 않으며, 1.2 mm 가량의 영구 변형은 고무 패킹에도 불구하고 누수가 발생한다고 기대할 수 있다.

### 3.2 실험 결과와 해석 결과의 비교

영구 변형량 실험 조건과 동일한 하중 조건 및 경계 조건으로 구조 해석을 수행하였고, 그 결과를 실험 결과와 비교하였다.



[그림 18] 실험 결과와 해석 결과의 비교

[표 5] 변형량의 해석과 실험의 최대 오차

샘플 No	각도	해석값, mm	실험값, mm	오차
1	0도	0.49	0.59	18%
1	15도	0.11	0.19	41%
1	20도	0.04	0.05	10%
2	0도	0.39	0.22	75%
2	15도	0.10	0.09	7%
2	20도	0.04	0.06	41%

그림 18은 실험 결과와 해석 결과의 비교를 나타내며, 표 5는 이들의 최대 오차를 나타낸다. 해석 결과에서 3개의 작은 산 모양의 그래프는 홀더 부분의 절점(Node)과 경계 조건에 의하여 발생하는 것이며, 실제로는 실험 결과와 같이 부드러운 곡선을 그린다.

그림 18로부터 알 수 있듯이 해석 결과와 실험 결과는 유사한 경향을 보인다. 그러나 표 5로부터 알 수 있듯이 오차량이 크며 오차의 변화가 급격하다. 그 이유는 해석 결과는 탄성 영역만을 고려한 선형 해석인데 비하여 실험 결과는 비선형이기 때문이라고 예상된다. 따라서 비선형 해석을 수행한다면 실험 결과와 해석 결과는 보다 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한, 해석 결과는 홀더의 0°를 기준으로 좌우 대칭으로 변형이 발생하는데 비하여 실제 실험에서는 비대칭으로 변형이 발생한다. 즉, 그림 16의 III번 홀더의 경우에 각도 0°를 중심으로 오른쪽 부분의 변형이 왼쪽 부분에 비하여 크며, 그림 17의 II번 홀더의 경우에도 오른쪽 부분의 변형이 크다. 이러한 비대칭 영구 변형량은 I-IV번 홀더 중에서 재료의 결함이나 가공상의 문제로 인하여 상대적으로 취약한 임의의 위치에서 다른 부분에 비하여 큰 응력 집중이 발생하고 이에 따른 변형에 의해 발생된다. 그러나 본 연구에서는 이를 고려하지 않고 탄성 해석만을 수행하였기 때문에 표 5에서 나타난 오차가 발생되었다고 예상된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 유도가열 방식 전기보온압력밥솥의 변형률을 평가하기 위하여 스트레인 게이지를 이용한 변형률 실험을 수행하였고, 그 값을 해석 결과와 비교하였다. 실험 결과와 해석 결과를 비교한 결과, 압력과 변형률 선도는 유사한 경향을 보였다.

오븐의 영구 변형량을 평가하기 위하여 수부하 실험과 구조 해석을 수행하였고, 그 결과를 비교하였다. 비교 결과, 영구 변형량과 해석 결과가 유사함을 알 수

있었다.

변형률 실험과 해석, 그리고 영구 변형률 실험과 해석 결과에서 오차가 발생하는 이유는 실험의 경우는 소성 영역에서의 영구 변형이 발생하는데 비하여 해석은 탄성 영역에서의 선형 해석을 수행하기 때문이다. 따라서 항 후 오차를 줄이고 보다 정확한 비교를 위해서 구조물의 비선형을 고려한 해석이 필요하다고 생각된다.

### 참고문헌

- [1] Hideki Omori, Takashi Koshno and S. Hamaoka, "Induction-Heating Rice Cooker/Warmer", National Technical Report, Vol. 35, No. 5, pp. 176-181, 1989.
- [2] K. Murase, "Induction-Heater Type Rice Cookers with Pressure - Cast Thick Pot", Toshiba Review, Vol. 50, No. 4, pp. 335-338, 1995.
- [3] 이승표, 고병갑, 하성규, "설계 변수법을 이용한 밥솥 체결 구조물의 안전도 평가", 한국산학기술학회논문지, Vol. 9, No. 4, pp. 853-858, 2008.
- [4] 이호철, "스트레인 게이지를 이용한 측정에 있어 잠음 저감법", 한국소음진동공학회, 17권, 5호, pp. 66-69, 2007.
- [5] 하태경, 이건명, "스트레인게이지를 이용한 변형률 모드시험방법의 특성", 대한기계학회 '95년도 춘계학술대회논문집(I), pp. 412-416, 1995.
- [6] 박태근, 양민복, 백태현, "Strain Gage와 A/D 변환기를 이용한 하중, 변형률 측정장치 제작", 한국정밀공학회 2006년도 춘계학술대회논문집, pp. 293-294, 2006.
- [7] ANSYS User's Manual Ver. 10.0, ANSYS Inc., 2005.
- [8] 이종선, "엘리베이터 도어의 거동해석", 한국산학기술학회논문지, Vol. 8, No. 5, pp. 991-994, 2007.
- [9] 이종선, "양방향 로프 브레이크의 설계 및 해석", 한국산학기술학회논문지, Vol. 7, No. 3, pp. 391-324, 2006.
- [10] Stephen W. Tsai and Hahn, H. T., "Introduction to Composite Materials", Technomic, 1980.

### 이 승 표(Seung-Pyo Lee)

[정회원]

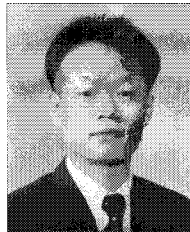


- 1992년 2월 : 한양대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 한양대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1999년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 기계설계학과 박사과정

<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