

법랑공정에서 Enamel 도포두께에 따른 강판 용기의 변형 메커니즘 분석

박상후*.#, 강동석**, 유재현***

*부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소, **부산대학교 기계공학부 대학원,
***한국생산기술연구원 동남권본부

Analysis on Enameled Container with Different Coating Thicknesses of Enamel in Pyrolysis Process

Sang-Hu Park*.#, Dong-Suk Kang** and Jae-Hyun Yu***

*School of Mechanical Engineering, ERC/NSDM, Pusan National University,

**Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

***Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

(Received 8 February 2020; received in revised form 20 March 2020; accepted 27 March 2020)

ABSTRACT

To predict the thermal deformation of an oven cabinet during the enamel process, we propose a simple finite element analysis method comprising two steps: heating and cooling. To this end, the basic mechanical and thermal properties such as thermal expansion of the enamel and steel plate were experimentally studied, and the mechanical properties of four different stainless steel (SUS) plates were evaluated to select the target material for the oven at high temperature conditions from 400 °C to 700 °C. In the first analysis step of the enamel process, the SUS plate was heated to 850 °C and was then thermally expanded without considering the enamel coating. Next, assuming the perfect bonding of two materials (enamel coating and metal plate), the enamel plate was allowed to cool to room temperature till 22 °C. From the results of comparing the experimental and analytical data, we can make a conclusion that the proposed method can be applied to evaluate the thermal deformation of enamel products. Especially, the thermal deformation of the oven can be predicted with different enamel coating conditions, such as uniform and nonuniform coating thickness.

Key Words : Enameled Plate(법랑판재), Enamel Process(법랑공정), Oven(오븐), Thermal Deformation(열변형), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서 론

법랑(enamel) 소재는 금속판재 표면에 도포하여

내식성, 미려한 외관, 고온 내구성 등을 이루도록 한다. 따라서 산업용뿐만 아니라 오븐, 그릇, 일반 생활용품까지 다양하게 적용되고 있다. 금속표면에 법랑유약을 도포하여 표면에 열융착(thermal fusion)시켜 제품에 코팅하는 과정을 법랑공정이라고 한다. 법랑공정은 고대 그리스 시대 이후로 다양한

Corresponding Author : sanghu@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-1011, Fax: +82-51-510-1973

제품에 적용되어 왔고, 최근에는 건축자재, 가스레인지, 전자레인지, 세탁기 등 가전제품으로 확대되고 있으며 내화화반응 특성이 요구되는 산업용 제품에 까지 확대되고 있다¹⁻⁵⁾.

법랑공정은 법랑소재와 금속표면의 물리화학적 반응에 의해 강하게 두 물질이 부착되는 공정이며, 법랑소재는 용융된 알카리 붕소규산염 계열의 유리질 금속산화 무기물로 구성되어 있다. 유약형태로 생성된 법랑소재는 특정한 용도에 맞게 여러 차례 금속표면에 코팅하여 법랑층을 형성하게 되고 이후 열처리를 통해서 화학적인 계면 결합이 생성되도록 한다. 계면에서의 밀착성이 우수하지 못할 경우에는 법랑층이 금속표면에서 박리가 되고 궁극적으로 금속표면에 부식과 같은 문제가 발생하게 된다. 따라서 많은 연구에서 법랑층과 금속표면 사이의 밀착성을 개선시키기 위한 연구가 진행되었다⁶⁻⁸⁾.

법랑공정에 관한 중요 공정변수로는 법랑소재의 화학적 조성, 부착하고자 하는 금속판재의 종류와 금속판의 표면 거칠기, 열처리(heat treatment) 및 열분해(pyrolysis) 공정온도, 유리화 과정 온도(glazing temperature) 등이 있으며 유리-금속간의 결합은 산화물-금속 밀착(oxide-metal adherence)에 의존한다고 보고되고 있다²⁾. 이러한 계면특성에 대한 분석을 위해서 광학현미경, 전자현미경, TEM(transmission electron microscopy) 등을 이용하여 미시적 분석을 진행해 왔다^{2,5,6)}. 그러나 지금까지의 많은 연구와 결과들이 재료분석학적 접근에 이루어져 왔고, 법랑소재와 계면에서 발생하는 현상을 분석하는데 초점을 두었다.

그러나 실제 법랑공정을 이용하여 제품을 생산하는 경우에는 위에서 언급한 계면결합 특성도 중요하지만 전체적인 제품상태의 열변형에 대한 예측이 필요하다⁹⁾. 따라서 본 연구에서는 가스오븐 본체(cabinet)를 예제로 하여 해석적 방법으로 법랑공정의 열처리 과정에서 발생하는 변형거동 메커니즘 분석과 법랑층 도포두께에 따른 영향을 예측할 수 있는 해석적 방법을 제시하였다.

2. 법랑공정 해석

2.1 해석모델

법랑공정 해석을 위하여 대형 가스오븐 본체를 예제로 삼았다. 대형 가스오븐은 작동온도 400°C 까지 안정성이 확보되도록 설계가 되어 있으며, 음식을 조리하는 내구면에 법랑공정으로 표면처리가 되어 있다. 또한 가스오븐 제품은 Fig. 1(a)에 나타낸 것처럼 고열을 발생시키는 버너(burner), 열풍을 일으키는 팬(fan) 등 다양한 부품들과 이것들을 고정시키는 부품들로 결합이 되어 고열조건에서 발생될 수 있는 열응력(thermal stress)을 최소화 하도록 설계가 되어 있고, 일부는 특허로 등록이 되어 있다¹⁰⁻¹¹⁾.

Fig. 1(a)에서 버너, 팬 등의 여러 가지 부품들은 가스오븐 본체의 법랑공정 이후에 조립이 되는 형태로 제작이 된다. 따라서 본 연구에서 주요점인

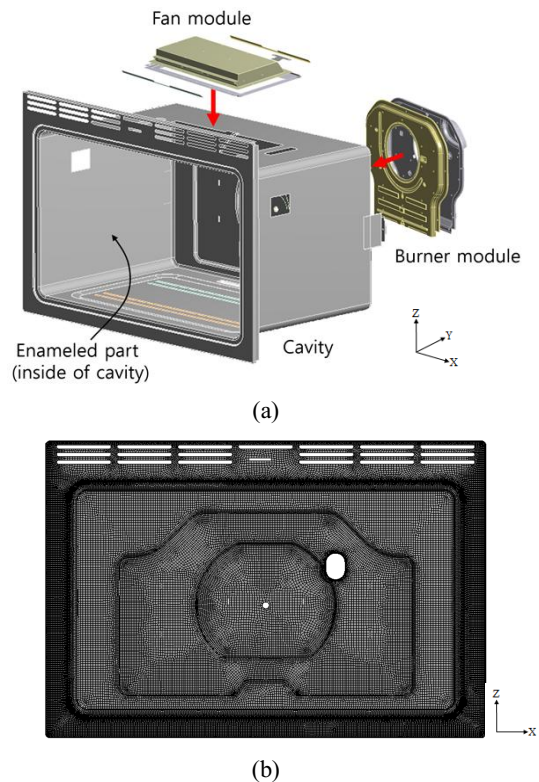


Fig. 1 (a) Schematic diagram of major parts of gas oven structure: cavity, fan and burner module, (b) finite element model of cavity

법랑공정에서 변형거동을 분석하기 위해서 Fig. 1(b)에 나타난 것처럼 본체부분만 유한요소 해석에 활용하였다.

2.2 해석조건 및 변형 메커니즘 분석

가스오븐 본체에 법랑공정은 스프레이 방식으로 법랑소재를 본체 내부표면에 도포한 뒤, 컨베이어 벨트에 걸어서 가열로를 통과하는 과정 중에 열분해가 발생하고 화학적 결합이 되도록 한다.

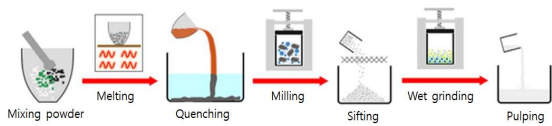
사용된 법랑 원소재의 주요 화학적 성분과 제작 과정은 Table 1과 같다. 금속 판재에 도포되어 열분해를 위한 가열로에 들어가기 이전의 법랑소재의 특성은 점탄성(visco-elastic) 특성을 가지며 유리전이온도(T_g) 부근에서 기계적 물성이 급격히 변화된다. 따라서 온도변화 상황에서 법랑소재의 거동을 미시적으로 분석하기 위해서는 복잡한 열유동학적 분석(thermo-rheological analysis)이 필요하다. 열분해 과정에서 법랑소재의 점탄성 거동에 대한 모델은 식(1)과 같이 일반화된 맥스웰 모델(generalized Maxwell model)을 이용하였다^[17].

$$G(\xi) = \sum_{i=1}^N C_i (G(0) - G(\infty)) \cdot e^{-\frac{\xi}{\lambda_i}} + G(\infty) \quad (1)$$

여기서, $G(0)$ 는 고체상태의 초기상태 전단탄성계수, $G(\infty)$ 는 최종상태 전단탄성계수, C_i 는 전단탄성계수 풀림계수, N 은 맥스웰 요소수를 의미한다.

그러나 법랑소재가 도포된 오븐 본체가 열분해 과정인 가열로(furnace) 공정에서 전체적인 변형거동을 유한요소 해석으로 예측하는 것에 초점을 둘 경우에는 거시적 관점에서 접근이 필요하다. 법랑소재가 도포된 금속판재에 열을 가하게 되면 두

Table 1 Chemical compositions of the raw enamel material and fabrication process^[12]



comp.	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Li ₂ O	ZnO	MgO	NiO	CoO
wt%	53	16	4.0	7.0	12	4.4	0.5	2.0	1.1

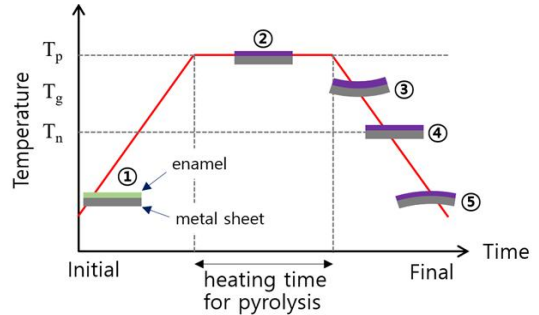


Fig. 2 Stress and deformation development in enameled plate during heating process

소재 사이의 열팽창계수 차이로 인해서 잔류응력이 발생하게 되고 이로 인해서 변형이 발생하게 된다. Fig. 2의 ①지점에 법랑소재가 도포되어 건조된 판재를 가열로에 넣게 되면 ②지점의 최고 온도(T_p)에 도달할 때까지 응력이 발생하지 않으며, ②지점에서 법랑소재가 용융이 된다. 일반적으로 T_p 는 850 °C 이상이다. ②지점 고온조건을 지속하는 구간에서 법랑소재 내부의 고분자 바인더(binder) 성분이 모두 열분해 되고 완전히 법랑소재와 판재가 물리화학적 계면결합이 이뤄진다. 이후 냉각이 시작되는 시점부터 ⑤지점까지 과정에서 열수축량의 차이로 인해서 잔류응력이 발생하고 이에 따른 열변형이 생기게 된다^[13].

제품이 가열로에서 빠져나오면서 자연냉각이 되는데 법랑소재는 온도별 열수축량이 차이가 나기에 ③, ④, ⑤지점과 같은 다양한 변형거동이 발생한다. 명확한 변형거동 메커니즘 분석을 위해서 Fig. 3에 나타난 것처럼 열기계 분석법(thermo-mechanical analyzer, TMA7000, Hitachi, Japan)으로 냉각구간에 대한 열수축량을 실험적으로 구하였다. 가스오븐 본체는 SUS304 계열 (0.08%C, POSCO, Korea) 소재를 사용하였으며 아래에 열팽창계수에 대해서 법랑소재와 비교하였다.

Fig. 3에 나타난 것처럼 최고 온도인 T_p 점 이후 냉각과정(고온→상온)에서 열분해가 된 법랑소재의 열수축(팽창)계수가 비선형적으로 변한다. 냉각 과정에서 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 ④지점 온도까지 법랑소재는 점탄성 거동을 하며 열수축(팽창)계수(coefficient of thermal expansion, CTE)가

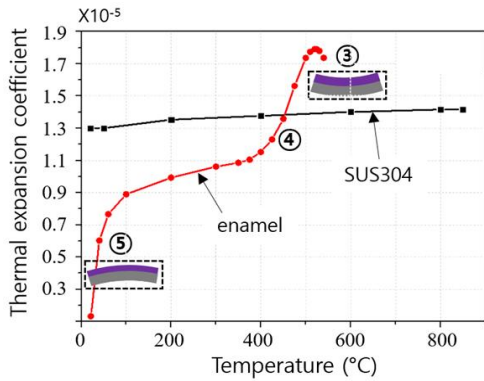


Fig. 3 Variation of thermal expansion coefficient of enamel and SUS201 materials according to temperature

Table 2 Variation of elastic modulus of enamel according to temperature

Temperature(°C)	30	300	500	600>
E (GPa)	55	50	45	~0

SUS304에 비해서 상대적으로 높음을 알 수 있다. 따라서 오목한 형태로 변형이 발생하게 되며, 이때 법랑소재부에는 인장 잔류응력이 발생하게 된다. 온도가 더 내려가게 되면 CTE값이 두 소재 간에 다시 변하게 되어 SUS304가 더 큰 값을 가지게 되어 중립(neutral state)이 되는 구간이 발생한다. 이때의 온도를 Fig. 2에서 T_n 으로 정의하였다.

상온까지 냉각이 되는 동안 법랑소재의 CTE값은 급격히 떨어져서 불룩한 최종 변형이 발생하게 되고 법랑소재층에 압축잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 CTE값의 변화는 법랑소재의 T_g 점 부근에서 발생하는데 열분해된 법랑소재가 온도변화량(ΔT)과 체적변화량(ΔV) 비율이 T_g 점에서 바뀌게 되어 CTE값이 변화되는 것으로 사료된다. 또한 T_g 점 온도는 냉각속도에 따라라도 바뀌기 때문에 공정조건마다 T_n 점 온도가 달라질 수 있다. 본 연구에 사용된 법랑소재의 물성으로 밀도는 2600 kg/m³, 열전도도는 5 W/m·°C 이다. 온도에 따라 탄성계수는 Table 2에 나타난 것처럼 변하며 600 °C 이상에서는 거의 0 GPa에 가깝다^[16].

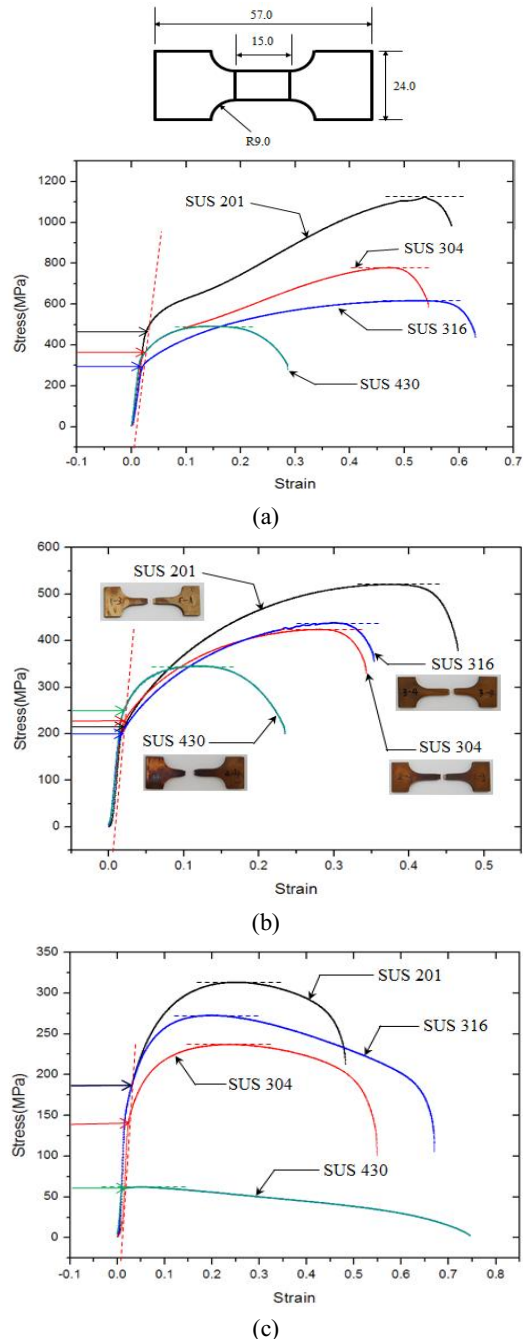


Fig. 4 Comparison of engineering stress-strain relations among three different sheet metal under temperature conditions such as (a) 30, (b) 400, and (c) 700°C

2.3 SUS 소재선정

법랑소재가 도포되어 오븐에 사용되는 재료는 고온의 법랑공정과 오븐 사용조건에서 견디어야 하기에 몇 가지 SUS 소재에 대한 기초물성 검토를 위해서 고온실험을 실시하였다. 본 연구에서 검토한 재료는 SUS201, SUS304, SUS316, SUS430 4가지 종류이 포스코에서 공급된 재료를 사용하였다. 인장시편의 두께는 1 mm 이며 시편의 형상은 Fig. 4(a)와 같다.

Figs. 4(a)-4(c)에 나타난 것처럼 상온조건, 400, 700 °C에서 인장실험을 실시하면 탄성계수는 대부분 유사하지만 모든 조건에서 항복응력과 인장강도가 SUS201 소재가 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 고온조건으로 올라갈수록 SUS316 소재가 그 다음으로 우수한 기계적 특성을 보였다. SUS201 소재는 700°C에서 SUS304에 비하여 항복응력이 약 32% 우수한 것으로 나타났다. 다만 CTE값은 SUS201이 100°C 조건에서 1.6×10^{-5} mm/mm·°C로 동일 조건의 SUS430의 CTE값인 1.2×10^{-5} mm/mm·°C 보다 큰 것으로 알려졌기에 SUS201을 선정할 때 열팽창과 열변형에 대한 부분의 고려가 필요하다. 본 연구에서는 최종적으로 선정된 SUS201 소재 위에 법랑공정을 실시한 가스오븐용 본체의 열변형을 해석적으로 검토하였다.

2.4 해석방법

유한요소 해석으로 법랑공정에서 발생하는 변형량을 예측하는 방법은 크게 두 가지 방법으로 제안할 수 있다. 첫 번째 방법으로는 Fig. 2에 나타난 ②지점 온도에서부터 상온까지 냉각하는 과정을 해석하는 방법과 두 번째로 앞 구간은 모두 무시하고 형상의 평형을 가져오는 ④지점에서 상온까지 냉각하는 과정을 계산할 수 있다.

그러나 아래의 두 가지 이유로 인해 첫 번째 방법이 더 유효하다고 판단되어 본 연구에 적용하였다. 첫째, ④지점의 T_n 온도를 정확하게 계산하는 방법이 복잡하고, 둘째로 열분해 공정 중 상온에서 최고 온도인 T_p 점까지 가열했을 때 가스오븐 본체가 열팽창량을 고려해야 정확한 최종 변형량을 계산할 수 있다. 법랑층에 걸리는 응력변화와

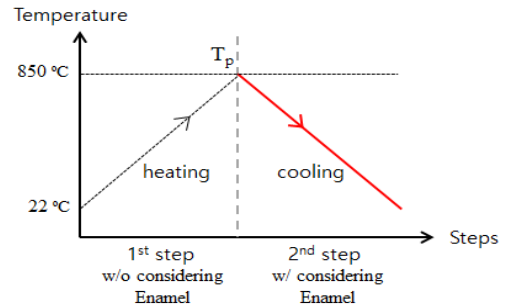


Fig. 5 Analysis method of enamel process; two steps for heating and cooling

온도변화에 대해서는 기존 연구를 통해서 얻을 수 있다^[14,15]. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5와 같은 절차에 따라 법랑공정 해석을 수행하였다.

법랑공정에서 상온에서 T_p 온도까지 가열하는 동안, 도포된 법랑이 가스오븐 본체와 화학적 결합이 되지 않기에 해석에서 법랑층에 대한 고려는 제외하고 Fig. 3에 나타난 온도별 SUS304의 CTE 값 변화만 고려하여 계산한다. 그 다음 단계로 열팽창된 가스오븐 본체와 법랑층이 열분해 과정을 통해서 완전한 결합이 되었다고 가정하고, T_p 점에서 상온까지 냉각과정을 해석하였다. 이때 법랑층의 CTE값은 Fig. 3에 나타난 온도별 변화량을 고려하였다. 해석은 ANSYS Workbench (ver. 2019 R3)를 사용하였다.

3. 해석결과 토의

3.1 법랑공정 해석

2.4절에 기술한 공정해석 단계에 따라서 첫째 가열단계로 22°C에서 850°C까지 법랑물질과 판재간의 상호작용이 없다는 가정 하에서 법랑물질을 고려하지 않고 순수한 SUS201의 열팽창 과정을 해석하였다. 이어서 냉각단계로 850°C에서 22°C까지는 도포된 법랑물질과 판재가 완전히 결합이 되었다고 가정하고 법랑소재의 온도별 열수축계수를 고려하고 또한 SUS201 판재의 열수축 계수를 판재 제조사인 POSCO에서 제공한 30~100°C (CTE, 1.6×10^{-5} mm/mm·°C), 100~500°C (CTE, 1.7×10^{-5}

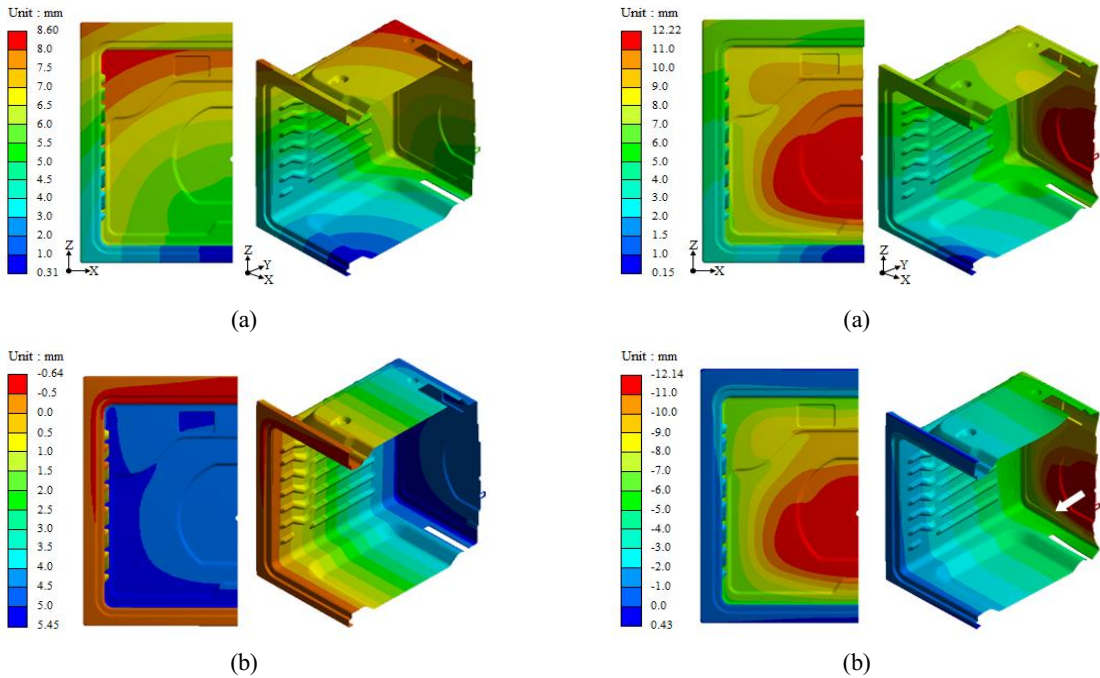


Fig. 6 Deformation of gas oven cabinet during heating step from 22 to 850°C; (a) total deformation and (b) -y directional deformation

mm/mm·°C)범위로 각각 나누어서 계산에 적용하였다.

범랑두께가 0.2 mm로 균일하게 SUS201 판재(두께 2.0 mm)에 도포되었다고 가정하고 해석한 결과, Fig. 6(a)와 6(b)에 나타난 것처럼 가열구간에서 가스오븐 본체의 열팽창이 발생하였고 특히 많은 부분이 결합되어 정밀도가 요구되는 바닥부에서 -y축 방향으로 배불림 형태의 변형이 발생하는 것을 예측할 수 있다. 이러한 배불림 현상은 Figs. 7(a)와 7(b)에 나타난 것처럼 냉각과정에서 수축되면서 더 가속화 되는 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)에 범랑공정 실험과 해석결과를 비교하였다.

실험후 디지털 인스펙션(line-scan CCD camera, e2V AViiVA SM2, ATMEL, USA)장치를 이용하여 국부적인 변형량을 초기 CAD 데이터와 비교하여 구하였으며 본체 중앙부의 최대 변형량(6.82 mm)은 해석결과(6.79 mm)와 비교하여 약 1% 이내로

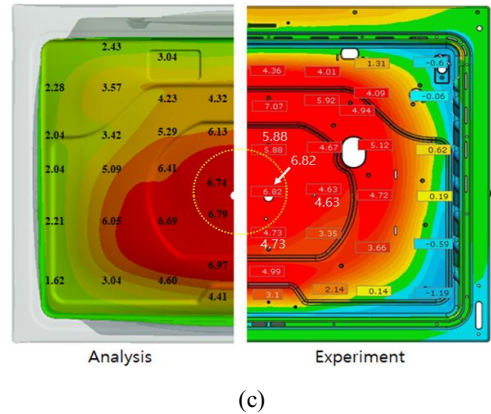


Fig. 7 Deformation of gas oven cabinet during cooling step from 850 to 22°C; (a) total deformation, (b) -y directional deformation, and (c) comparison of analysis and experimental results, dotted circle show the center zone of the cabinet (unit: mm)

유사하였으며, 변형분포는 가장자리로 갈수록 차이가 발생했다. 이것은 실제 실험상태와 해석조건 의 차이로 이해가 된다. 예를 들면 범랑소재 도포

량이 균일하지 못한 것이나 가열 및 냉각온도의 편차가 있을 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안하는 방법으로 법랑공정 해석이 가능하며 실험결과와 비교하여 변형량 측면에서 예측이 가능함을 알 수 있다. 이러한 바닥면의 배불림 현상을 개선할 수 있는 새로운 법랑공정 방법이 필요하다.

3.2 법랑두께 분포에 따른 변형량

가스오븐 본체의 배불림 현상은 법랑소재와 금속판재 사이의 열수축량 차이와 기하학적인 구속 조건에 의해서 발생된다. 따라서 이를 저감하기 위해 바닥면의 법랑소재 도포두께를 국부적으로 변화시켜 법랑공정 해석을 실시하였다. Fig. 8(a)와 같이 바닥면 법랑 도포두께를 국부적으로 4가지 영역으로 달리하여 해석을 변형량을 예측하였다.

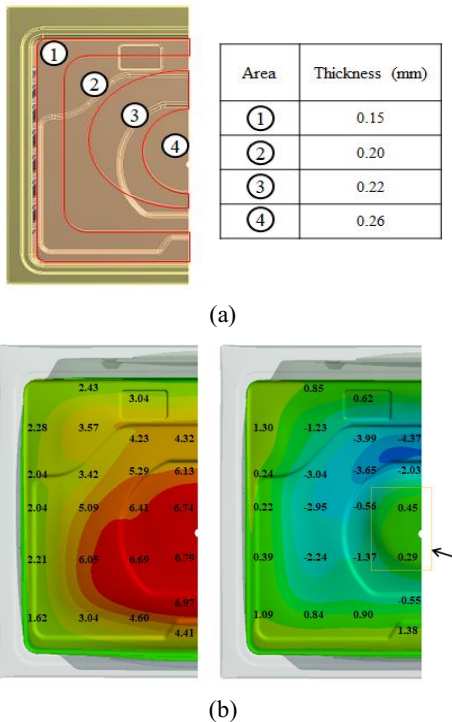


Fig. 8 (a) Deposition thickness of enamel in regions, (b) analysis results: 0.2 mm uniform deposition of enamel (left) and non-uniform (0.15~0.26 mm) deposition of enamel (right) (unit: mm)

해석결과 Fig. 8(b)에 나타낸 것처럼 균일하게 법랑을 도포한 경우에 비하여 국부적으로 법랑두께를 달리 도포한 경우에 바닥부 배불림 현상이 상당히 달라짐을 알 수 있다. 따라서 법랑공정에서 원하는 형태의 열변형 거동을 얻기 위해서 본 연구에서 제안한 해석방법을 이용하여 향후 최적화된 국부적 법랑도포 두께에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 법랑공정에 발생하는 변형메커니즘을 예측하기 위한 해석적 방법론을 제시하였으며, 냉각되는 구간에서 온도에 따른 법랑소재의 열수축량과 SUS201 판재의 열수축량의 차이로 인해서 열변형이 발생하며, 이를 예측하기 위해서는 2단계로 해석을 나누어서 진행하는 방법을 제안하였다.
2. 해석신뢰성 검증을 위해 가스오븐 본체를 예제로 하여 실험과 비교한 결과 최대 열변형량과 변형거동 형태가 유사하였으나, 국부적으로는 법랑도포량의 불균일 등과 같은 해석에서 고려하지 못한 변수로 인해 변형량의 정량적인 값은 차이가 있었다. 그러나 본체 중간부의 최대 변형량 크기의 경우 약 1% 이내로 일치하였다.
3. 가스오븐 본체 바닥면의 배불림 현상에 대해서 해석적으로 발생 메커니즘을 분석하였으며, 이것은 법랑공정에서 가열구간에서 기하학적 구속조건 하에서 약간의 배불림 변형이 발생하고 이후 냉각구간에서 법랑소재와 판재의 온도별 열수축량에의 급격한 차이로 인해서 배불림 현상변형이 가속화됨을 알 수 있다.
4. 본 연구에서 제안하는 해석적 방법으로 가스오븐 본체의 법랑공정 중 발생하는 배불림 현상을 저감할 수 있도록 국부적인 법랑소재 도포를 달리하는 방법을 제안하였고, 해석결과 중간부 변형량이 약 70% 이상 개선됨을 확인할 수 있었다.

후 기

“부산대학교 기본연구지원사업(2년과제, 2019. 3. 1. ~ 2021. 2. 28)에 의해서 수행된 연구결과입니다”

REFERENCES

1. Yoon, J. B., Cho, H. S., Park, Y. D., Kim, Y., Kim, Y. S., Nam, D. G., and Oh, W., Interfacial Adhesion Properties of Enamel-coated Alloyed Steels, *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 48, No. 3, pp. 235-240, 2010.
2. Bachar, A., Mabrouk, A., Meneses, D. D. S., Veron, E., Sadallah, Y., Echegut, P. and Bentiss, F., “Effect of Thermal Treatment on the Property of Enamel Coating on Steel Substrates,” *Journal of Materials and Environmental Science*, Vol. 8, No. 11, pp. 3884-3891, 2017.
3. Fan, L., Tang, F., Reis, S. T., Chen, G., Koenigstein, M. L., “Corrosion Resistance of Transmission Pipeline Steel Coated with Five Types of Enamels,” *Acta Metallurgica Sinica English Letters*, Vol. 30, pp. 390-398, 2017.
4. Padhy, M. K., Saini, R. P., A Review on Silt Erosion in Hydro Turbine, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 12, pp. 1974-1987, 2008.
5. Zhou, Y. X., Lu, Z. L. and Zhan, M., “An Investigation of the Erosion-Corrosion Characteristics of Ductile Cast Iron,” *Mater. Des.*, Vol. 28, pp. 260-265, 2007.
6. Shen, G. X., Chen, Y. C. and Lin, C. J., “Corrosion Protection of 316L Stainless Steel by a TiO₂ Nanoparticle Coating Prepared by Sol-Gel Method, *Thin Solid Films*,” Vol. 489, Issue.1-2, pp. 130-136, 2005.
7. Ritchie, D., Schaeffer, H. A. and White, D., The Presence of an Iron Oxide Layer at the Enamel/Steel Interface in One-coat Porcelain Enamelling, *Journal of Materials Science*, Vol. 18, No. 2, pp. 599-604, 1983.
8. Yang, X., Jha, A., Brydson, R. and Cochran, R. C., “An Analysis of the Microstructure and Interfacial Chemistry of Steel-Enamel Interface,” *Thin Solid Films*, Vol. 443, No. 1-2, pp. 33-45, 2003.
9. Son, Y. K., Lee C. J., Lee, J. M. and Kim, B. M., “Deformation Prediction of Porcelain-Enameled Steels with Strain History by Press Forming and High-Temperature Behavior of Coating Layer,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. s838-s844, 2012.
10. Korean Patent, No. 10-1564426, Korean Intellectual Property Office, 2015.
11. Kim, C. and Ha, T. J., “Optimization of an Automotive Disc Brake Cross-section with Least Thermal Deformation by Taguchi Method,” *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-9, 2016.
12. Song, D., Tang R., Yang, F., Qiao Y., Sun, J., Jiang, J. and Ma, A., “Development of High-Performance Enamel Coating on Grey Iron by Low-Temperature Sintering,” *Materials*, Vol. 11, Article No. 2183, 2018.
13. Abeele, F., Hoferlin, E., Duprez, L. and Goussot, P., “Numerical Simulation of Thermal Warping and Buckling in Enamelled Steel Parts,” *Proceedings of XXI International Enamellers Congress*, 2008.
14. Nielsen, J. H., Olesen, J. F., Poulsen, P. N. and Stang, H., Finite Element Implementation of a Glass Tempering Model in Three Dimensions, *Comput. Struct.*, Vol. 88, pp. 963-972, 2010.
15. Tool, A. Q., “Relation Between Inelastic Deformability and Thermal Expansion of Glass in Its Annealing Range,” *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 29, No. 9, pp. 240-253, 1946.
16. Lin, M., Liu. Q. D., Kim, T., Xu, F., Bai. B. F. and Lu. T. J., A New Method for Characterization of Thermal Properties of Human Enamel and Dentine: Influence of Microstructure, *Infrared Phys. Technol.*, Vol. 53, No. 6, pp. 457-463, 2010.
17. Nobile, M. A. D., Chillo, S., Mentana, A. and Baiano, A., “Use of the Generalized Maxwell Model for Describing the Stress Relaxation Behavior of Solid-like Foods,” *Journal of Food Engineering*, Vol. 78, No. 3, pp. 978-983, 2007.