

< 기술논문 >

비틀림 변형 최소화를 위한 전자레인지 도어 프레임의 형상 최적설계

이 부 윤[†] · 구 진 영^{*}

(2006년 4월 19일 접수, 2006년 5월 8일 심사완료)

Shape Optimal Design of the Door Frame of a Microwave Oven to Minimize Its Twisting Deformation

Boo Youn Lee and Jin Young Koo

Key Words: Microwave Oven(전자레인지), Door Frame(도어 프레임), Twisting Deformation(비틀림 변형), Shape Optimal Design(형상 최적설계)

Abstract

When one opens the door of a microwave oven during its operation, twisting deformation of the door occurs, which may cause leakage of microwave through the gap between the door and the front plate. A numerical optimization is implemented to minimize the gap by maximizing twisting stiffness of the door of the oven. Design variables are defined, which describe the shape of the bead in the horizontal and vertical flanges of the door frame. To minimize the twisting deformation, Two optimal design problems to find shapes of the bead in the flange are established. The problems are solved by a numerical optimization technique, their results being evaluated.

1. 서 론

본 연구는 전자레인지(microwave oven) 가동 중에 도어(door)를 열 때 도어와 본체의 간극을 통하여 발생할 수 있는 전자파 누설을 최소화하기 위한 구조 설계의 필요성으로부터 시작하였다. 여기에서 다루고자 하는 전자레인지는 Fig. 1에 나타난 OTR(over the range) 모델⁽¹⁾로서 주방에서 가스레인지의 위쪽에 설치되어 환기를 위한 후드(hood) 기능을 겸한다. 이 전자레인지의 도어는 Fig. 2와 같은 구조⁽²⁾를 가지며, 전면 좌측의 힌지(hinge)에 의해 본체와 체결되고, 우측에 세로 방

향으로 부착된 손잡이를 당기면 힌지 축에 관하여 회전하여 열리게 된다. 도어의 개폐는 도어 프레임에 설치된 래치(latch)와 본체 앞판(front plate)에 설치된 래치보드(latch board)가 상호 체결 혹은 분리됨으로써 이루어진다. 도어가 닫혀 있을 때에는 래치와 래치보드의 접점에 설치된 안전 스위치(micro switch)가 눌러져 있으며, 도어를 열면 래치가 안전 스위치에서 이탈함으로써 안전 스위치가 동작하여 전원이 차단된다. 그러나 전자레인지 작동 중에 도어를 당기면 미처 안전 스위치가 작동되기 전에, 즉 래치가 래치보드에서 분리되기 전에 본체와 도어 사이에 발생하는 간극을 통하여 전자파가 누설될 수 있다. 그러므로 UL 923-34, Microwave Radiation Emission Test⁽³⁾와 EN 60335-2-25, Standard for Household and Similar Electrical Appliances⁽⁴⁾에서는 손잡이를 당겨서 문을 여는 형식의 전자레인지의 작동 중에

[†] 책임저자, 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

E-mail : bylee@kmu.ac.kr

TEL : (053)580-5922 FAX : (053)580-5165

^{*} 한국엠에스씨소프트웨어(주)

손잡이를 도어의 수직 방향으로 당기면서 측정된 누설 전자파의 세기(intensity)를 일정량 이하로 규제하여 안전성을 보장하고 있다. 한편, 도어 개방시에 손잡이를 잡는 위치는 사용자에게 따라 특정 위치에 국한되지 않는다. Lee and Koo⁽⁹⁾는 OTR 전자레인지 모델에서 도어 손잡이의 상부를 잡고 당길 때가 도어의 상하부의 변위차로 인한 비틀림 변형이 가장 크고, 이로 인해 조리실과 도어 사이에 가장 큰 간극이 발생함을 보인 바 있다. 이와 같이 전자레인지 도어부의 비틀림 강성은 구조 설계시 고려해야 하는 중요한 요소에 해당하며, 비틀림 강성이 우수한 구조를 갖는 도어 프레임을 설계하는 것이 필요하다.

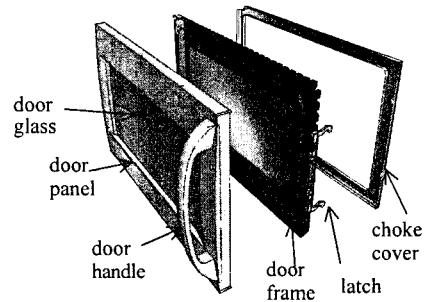
전자레인지의 해석과 구조 설계를 주제로 다룬 연구는 그다지 많지 않다. Kim et al.⁽⁹⁾은 LS-DYNA⁽⁶⁾를 이용하여 전자레인지의 낙하충격을 해석하고 취약 부분의 설계 개선을 제시하였다. Cho et al.⁽⁷⁾은 PAM-CRASH⁽⁸⁾를 이용한 전자레인지의 충격해석을 통하여 내충격 설계와 포장설계 결과를 제시하였다. Son⁽⁹⁾은 전자레인지 포장품의 낙하충격 및 클램핑(clamping) 하중에 관한 해석을 통하여 포장재와 비드(bead) 설계안을 제시하였다. 근래에 Lee and Koo⁽⁵⁾는 PAM-CRASH를 사용한 과도응답 해석을 수행하여 도어를 당길 때 래치의 동적 거동, 도어 프레임의 비틀림 변형, 안전 스위치 작동 시간 등을 평가하였다. Lee and Koo⁽²⁾와 Lee et al.⁽¹⁰⁾은 도어부의 비틀림 변형을 저감시키기 위한 설계 개선 방안으로서, 기존 설계안의 도어 프레임의 형상을 그대로 사용하면서 보강 브래킷(reinforcing bracket)을 덧붙이는 방법을 도출하고 보강 브래킷의 단면 형상, 부착 길이, 두께에 따른 변형 저감 효과를 평가하였다. Lee and Koo⁽²⁾는 ANSYS⁽¹¹⁾를 사용한 선형 정적

해석을 통하여 도어 프레임의 비틀림 현상을 평가하고 단면 형상과 길이가 다른 여러 종류의 보강 브래킷의 설계 방안을 제시하였으며, Lee et al.⁽¹⁰⁾은 진동모드 해석과 조화응답 해석을 수행하여 강성과 질량 증감의 효과가 포함된 도어 프레임의 동특성을 분석함으로써 보강 브래킷의 효과를 평가하였다.

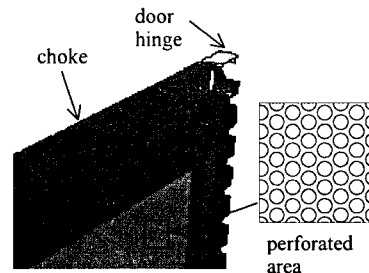
본 연구에서는 형상 최적설계 방법을 사용하여 도어 프레임의 비틀림 변형을 저감시키기 위한 구조 설계 개선 방안으로서, 보강 브래킷을 덧붙이지 않은 기존 설계안의 도어 프레임을 대상으로 하여 비틀림 변형을 최소화하기 위한 도어 프레임 테두리 비드의 최적 형상을 도출하고자 한다.

2. 형상 최적설계 개요

도어의 손잡이 상부를 잡고 당기는 과정에 대하여 도어 프레임의 선형 정적 해석⁽²⁾시에 발생하는 비틀림 변형, 즉 정적 비틀림 변형을 최소화하기 위한 최적의 비드 형상을 결정하는 최적 설계 문제를 정의하고자 한다.



(a) Expanded view



(b) Rear view of the door frame

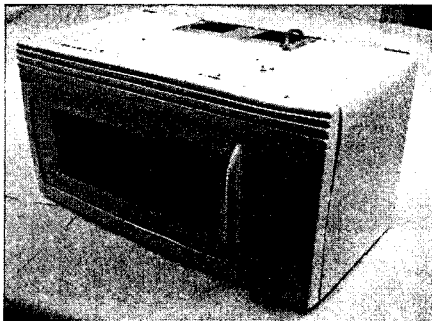


Fig. 1 The OTR microwave oven model

Fig. 2 Structure of the door

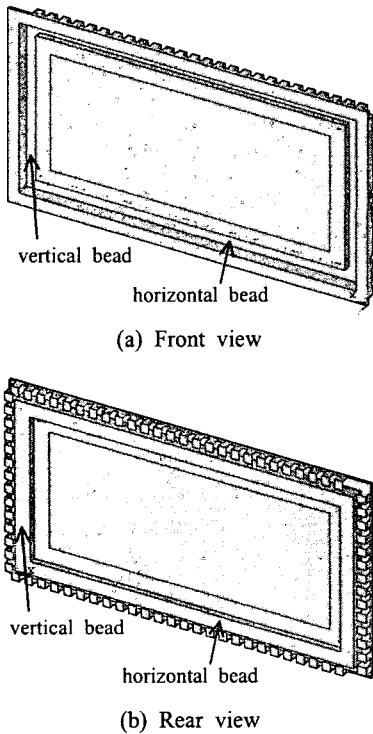


Fig. 3 Bead of the flange of the door frame

따라서, 본 연구에서는 Lee and Koo⁽²⁾와 Lee et al.⁽¹⁰⁾가 선행 연구에서 제시한 비틀림 변형 저감용 보강 브래킷을 사용하지 않고, 도어 프레임 테두리를 따라 형성되어 있는 Fig. 3에 표시된 가로 방향과 세로 방향의 요철 모양의 비드 구조의 형상을 형상 최적설계 기법을 사용하여 결정하고자 한다. Fig. 3에 주어진 도어 프레임의 형상은 최적화 과정 중의 반복해석을 자동화하기 위한 목적으로서, 유한요소 모델의 자동 생성 및 경계 조건의 자동 지정을 편리하게 하기 위하여 도어 힌지와 반경이 작은 필렛(fillet)을 생략하여 실제 형상보다는 단순화한 것이다.

최적화 문제의 해석시 사용한 경계조건과 하중 조건은 Fig. 4에 나타내었는데, 손잡이 상부와 도어 프레임이 볼트 체결되는 위치 A를 도어가 열리는 y축 방향으로 35.3 N의 힘(도어를 열 때의 축정값)⁽⁵⁾으로 당기는 경우를 고려하였다. 도어 힌지가 생략되었으므로 힌지 체결 위치에 해당하는 도어 프레임 상의 절점(위치 D와 E)에 대하여 편에 관한 회전 자유도를 제외한 $u_x, u_y, u_z,$

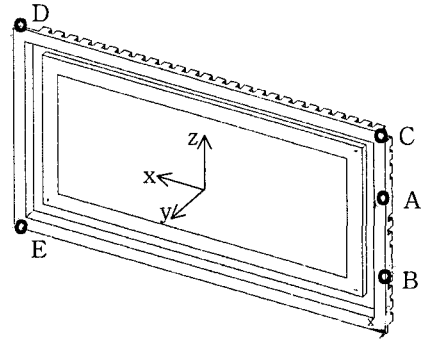


Fig. 4 Load and boundary condition for shape optimization of the door frame

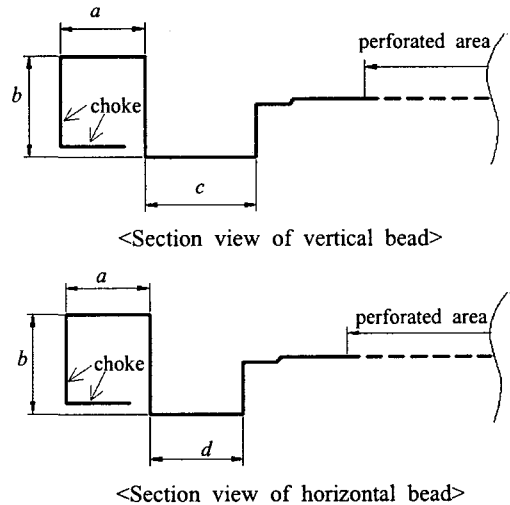


Fig. 5 Definition of shape design variables

θ_x, θ_y 의 자유도를 구속하였으며, 래치가 체결되는 부위인 위치 B의 절점에 대하여 도어가 열리는 방향의 자유도 u_y 를 구속하였다.

형상 최적화를 위한 형상 설계변수는 총 네 개로서, Fig. 5와 같이 비드의 초크(choke)의 경계로부터의 간격 a , 비드의 깊이 b , 수직방향 비드(vertical bead)의 폭 c , 수평방향 비드(horizontal bead)의 폭 d 로 정의하였다.

형상 최적화 문제의 해석을 위하여 ANSYS를 사용하였다. 비드의 형상을 정의하는 치수를 매개변수(parameter)로 정의하고 전체 해석 과정을 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 사용하여 프로그래밍하고 최적화 해석을 수행하였다.

Table 1 Initial values, and upper and lower limits of design variables (unit: mm)

Design variable	Initial value	Lower limit	Upper limit
<i>a</i>	17.8	15	30
<i>b</i>	21.0	10	30
<i>c</i>	23.4	1	30
<i>d</i>	19.8	1	30

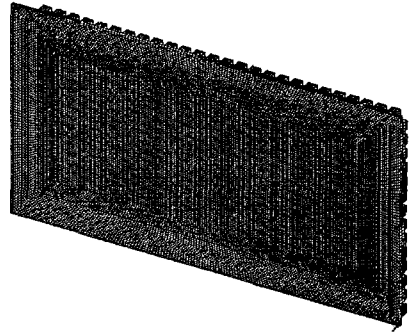
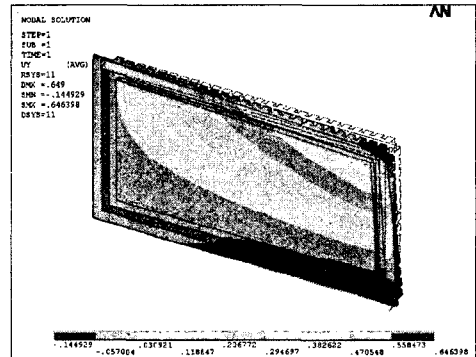
3. 비틀림 변형 최소화 문제

도어 프레임의 정적 비틀림 변형 최소화를 위한 형상 최적설계 문제는 식 (1)과 같이 Fig. 4에 표시된 도어 프레임의 우측 상부 모서리 위치 C에서 발생하는 y축 방향 최대 변위 D_{max} 를 최소화하는 네 개의 형상 설계변수 $\{a, b, c, d\}$ 를 결정하는 최대 변위 최소화 문제로 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } \{a, b, c, d\} \\
 & \text{minimizing } D_{max} \\
 & \text{subject to } a_L \leq a \leq a_U \quad (1) \\
 & \quad \quad b_L \leq b \leq b_U \\
 & \quad \quad c_L \leq c \leq c_U \\
 & \quad \quad d_L \leq d \leq d_U
 \end{aligned}$$

여기서 a_L, b_L, c_L, d_L 은 설계변수의 하한(lower limit)을, a_U, b_U, c_U, d_U 는 설계변수의 상한(upper limit)을 나타낸다. 최적화 해석을 위하여 설정한 초기설계(initial design)에서의 각 설계변수의 값과 상한과 하한을 Table 1에 수록하였다. 설계변수의 초기값은 기존 설계안의 도어 프레임의 비드 치수를 사용하였다. 비드의 초크로부터의 간격을 정의하는 설계변수 a 의 하한은 초크의 폭과 두께를 고려하여 15 mm로 정하였고, 비드의 깊이를 정의하는 설계변수 b 의 하한은 고정된 다공부의 위치를 고려하여 10 mm로 설정하였다. 수평방향과 수직방향 비드의 폭을 정의하는 설계변수 c, d 의 하한은 도어 프레임의 두께를 고려하여 1 mm로 설정하였다. 설계변수들의 상한은 공히 30 mm로 여유있게 설정하였다.

도어 프레임 초기설계의 유한요소 모델은 Fig. 6과 같으며, 8 절점 2차 탄성 구조 셀(quadratic

**Fig. 6** Finite element model for the initial design of the door frame**Fig. 7** Deformed shape and distribution of displacement u_y of the initial design

elastic structural shell) 요소인 SHELL93 요소를 사용하였다. 요소의 수와 절점의 수는 각각 27,672개와 28,437개이다. 셀 요소의 두께는 도어 프레임의 실제 두께인 0.7mm를 부여하였고, 탄성계수와 포와송비는 강판의 물성치를 사용하였다. 도어 프레임에서 중앙의 큰 사각형 면적을 차지하는 Fig. 2에 표시된 다공부(perforated area)는 매우 많은 수의 작은 원형 구멍들이 존재하므로, 대칭 반복되는 단위셀(unit cell)의 변위가 구멍이 없는 같은 크기의 등가연속체의 변위와 같아지도록 하는 등가물성치⁽²⁾를 구하여 사용하였다.

식 (1)의 형상 최적설계 문제는 비선형 계획법(nonlinear programming)⁽¹²⁾을 사용하여 수치적으로 최적해를 구할 수 있으며, 본 연구에서는 ANSYS Optimization Module에서 제공하는 일계법(first order method)⁽¹¹⁾을 사용하였다. 일계법에서 필요

한 목적함수와 제약조건의 민감도(sensitivity) 계산은 전방차분법(forward difference)을 사용하는데, 설계변수 증분량은 상하한 범위의 0.3 %로 설정하였다. 선탐색 이동거리(step size)의 최대값은 각 반복회(iteration)에서의 선탐색 최대 가능 이동거리의 25 %로 정의하였다. 목적함수의 수렴공차(convergence tolerance)는 10^{-10} 으로 정의하였다.

초기설계의 해석 결과 변형 형상과 도어가 열리는 방향의 변위 u_y 의 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 초기설계에서 목적함수인 도어 프레임의 y축 방향 최대 변위량 D_{max} 는 0.646 mm로서, 문헌⁽²⁾에서 제시된 기존 설계안의 최대 변위 0.724 mm보다는 조금 작게 계산되었다.

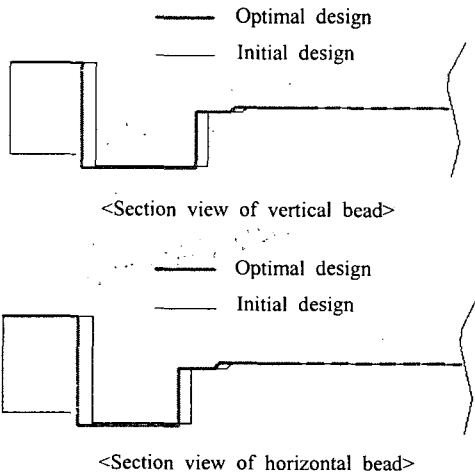


Fig. 8 Initial and optimal shapes of the bead

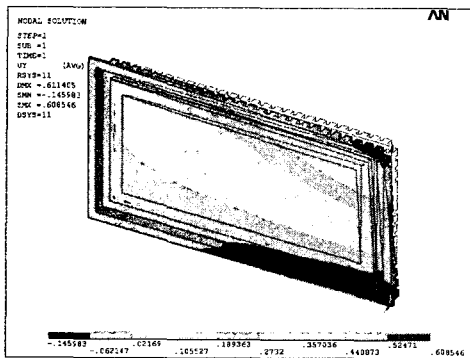


Fig. 9 Deformed shape and distribution of displacement u_y of the optimal design

이는 형상 최적화에서는 반복 해석의 자동화를 위하여 도어 힌지와 필렛을 생략하여 실제 도어 프레임의 기존 설계안보다 단순화한 해석 모델을 사용한다. 기인하는 것으로, 해석 모델의 최대 변위량을 최소화하는 비드의 치수를 결정하는데에는 무리가 없는 것으로 판단된다.

식 (1)로 정의한 형상 최적설계 문제를 해석한 결과, 25번의 반복회를 수행하여 최적해에 도달하였다. 설계변수의 최적값은 $\{a, b, c, d\} = \{15.000, 21.419, 23.746, 20.121\}$ mm이다. Fig. 8은 초기설계와 최적설계의 비드 단면의 형상을 나타낸다. 최적설계에서 비드의 깊이는 초기설계 대비 변화가 거의 없으며 비드의 위치가 초크가 위치한 가장자리 쪽으로 이동한 형상을 보여준다. 이와 같이 최적설계에서의 비드가 테두리의 가장 자리에 위치함으로써 초기설계에 비하여 테두리의 굽힘 강성이 증대되는 것으로 판단된다. 최적설계에서 변형 형상과 도어가 열리는 방향의 변위 u_y 의 분포를 Fig. 9에 나타내었으며, 목적함수인 도어 프레임의 y축 방향 최대 변위량 D_{max} 는 0.609 mm로서, 초기설계에서의 0.646 mm에 비해 5.7 % 감소하였다. Fig. 10은 목적함수 D_{max} 의 수렴 이력을 나타낸 것이다.

한편, 비드 형상을 정의하는 설계변수 값에 따라 도어 프레임의 중량이 결정된다. 최적화 전후의 도어 프레임의 중량을 평가하기 위하여 셀 요소 전체의 면적에서 다공부의 원형 구멍을 제외한 면적을 계산하고 두께와 밀도를 곱하여 질량을 계산하였다. 초기설계에서 도어 프레임의 질량은 1.103 kg이며, 최적설계에서의 질량은 1.110 kg으로 초기설계에 비해 1.0 % 증가한 것으로 나타났다. 이는 비드의 최적설계가 초기설계에 비

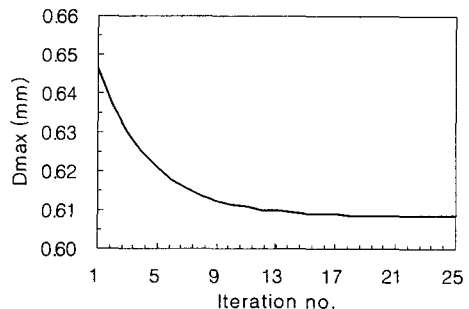


Fig. 10 Iteration history of the objective function

하여 비틀림 변형을 5.7 % 감소시키면서 도어 프레임 중량을 약간 증가시켰음을 의미한다.

4. 중량 제약조건을 부여한 비틀림 변형 최소화 문제

앞 장에서는 도어 프레임의 중량을 고려하지 않고 비틀림 변형을 최소화하는 최적해를 구하였으나, 일반적으로 제품의 중량을 가능한 한 가볍게 설계하는 것이 바람직하다. 따라서 본 장에서는 중량을 고려한 형상 최적설계를 도출하기 위하여 식 (2)와 같이 중량 제약조건을 부여한 비틀림 변형 최소화 문제를 새롭게 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } \{a, b, c, d\} \\
 & \text{minimizing } D_{\max} \\
 & \text{subject to } W \leq W_i \\
 & a_L \leq a \leq a_U \quad (2) \\
 & b_L \leq b \leq b_U \\
 & c_L \leq c \leq c_U \\
 & d_L \leq d \leq d_U
 \end{aligned}$$

여기서 첫 번째 제약조건식은 도어 프레임의 질량이 초기설계에서의 질량보다 증가하지 않도록 설정한 것으로, W 는 도어프레임의 질량을 나타내고, W_i 는 초기설계에서의 질량을 의미한다.

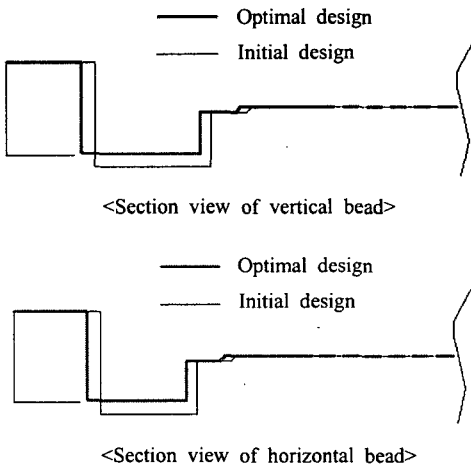


Fig. 11 Initial and optimal shapes of the bead under weight constraint

네 개의 형상 설계변수 $\{a, b, c, d\}$ 의 초기값과 각각의 상한, 하한은 앞 장과 동일하게 부여하였으며, W_i 는 1.103 kg이다.

식 (2)로 정의한 중량 제약조건 하의 형상 최적 설계 문제를 해석한 결과, 21번의 반복회를 수행하여 최적해에 도달하였으며, 설계변수의 최적값은 $\{a, b, c, d\} = \{15.000, 18.383, 23.990, 20.474\}$ mm이다. Fig. 11은 초기설계와 중량 제약조건 하의 최적설계에서의 비드 형상을 나타낸다. 최적설계에서 비드의 깊이는 초기설계에 비해 작아졌으며 초크가 위치한 가장자리 쪽으로 비드의 위치가 이동한 형상을 보여준다. 중량 제약조건 하의 최적설계에서 변형 형상과 도어가 열리는 방향의 변위 u_y 의 분포를 Fig. 12에 나타내었으며, 목적함수인 도어 프레임의 y축 방향 최대 변위량 D_{\max} 는 0.615 mm로서, 초기설계에서의 0.646 mm에 비해 4.8 % 감소하였다. Fig. 13은 목적함수 D_{\max} 의 수렴 이력을 나타낸 것이다. 한편, 최적설계에서의 도어 프레임의 질량 W 는 1.084 kg으로 나타났는데, 이는 초기설계에 비해 1.7 % 감소한 것이다. 이는 중량 제약조건을 부여한 최적화를 통하여 도출한 비드의 최적설계가 초기설계에 비하여 비틀림 변형을 어느 정도 감소시키면서 동시에 중량도 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.

이와 같이, 앞 장에서 기술한 바와 같이 중량을 고려하지 않은 경우에는 비틀림 변형은 5.7 %

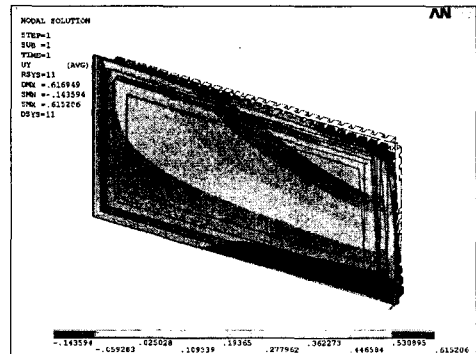


Fig. 12 Deformed shape and distribution of displacement u_y of the optimal design under weight constraint

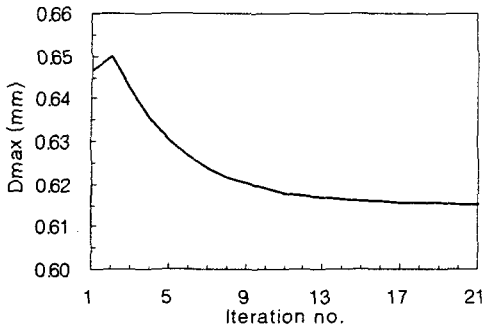


Fig. 13 Iteration history of the objective function under weight constraint

감소하지만 중량은 1.0 % 증가하는 반면에, 중량 제약조건을 부여한 경우에는 비틀림 변형은 4.8 % 감소하며 중량도 1.7 % 감소하는 것으로 나타났다. 두 가지 최적해에서 이와 같은 2.7 %의 중량 차는 도어 프레임의 철판 두께가 큰 대형 전자레인지의 경우에는 경량화 설계 관점에서 무시할 수 없는 경우도 있을 것으로 판단된다. 반면에 비틀림 변형에 의한 전자파 누설량 관점에서는 당연히 중량 제약조건을 고려하지 않는 것이 더 유리하다. 한편, 본 연구에서 도출된 최적해는 보강 브래킷을 덧붙이는 설계 개선안에서 얻을 수 있는 비틀림 변형의 저감 효과(브래킷의 종류 별로 7.8 ~ 37.6 %)에 비하여 상대적으로 저감 효과는 작지만 중량 면에서는 크게 유리한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 형상 최적설계 방법을 사용하여 도어 프레임의 비틀림 변형을 저감시키기 위한 구조 설계 개선 방안으로서, 비틀림 변형을 최소화하기 위한 도어 프레임 테두리 비드의 형상 최적설계 문제를 제시하였다. 도어 프레임 사각 테두리를 따른 비드의 형상 치수를 설계변수로 설정하고, 정적 비틀림 변형 최소화 문제를 수치적 최적화 기법을 사용하여 해석함으로써 도어 프레임 비드의 최적 형상을 도출하였다. 중량 제약조건을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 두 가지 문제를 해석하여 그 결과를 서로 비교한 결과 두 가지 최적해에서 중량의 차는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 도어 프레임의 철

판 두께가 두꺼운 대형 전자레인지의 경우에는 경량화 설계 관점에서 중량 제약조건을 고려할 수도 있으며, 이러한 중량 제약조건을 부여 여부는 설계 단계에서 경량화 설계의 중요도에 따라서 결정해야 하는 것으로 판단된다. 그러나 도어 프레임의 비틀림 변형으로 인해 발생하는 조리실과 도어 사이의 간극이 전자파 누설량에 직접적인 영향을 미치므로, 도출된 최적설계안을 채택할 때에는 비틀림 변형의 상대적인 크기도 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Over The Range Microwave Oven Owner's Manual, 2002, Maytag.
- (2) Lee, B. Y. and Koo, J. Y., 2005, "Analysis of Twisting Deformation and Structural Design of the Door Frame of a Microwave Oven to Decrease Leakage of Microwave," *J. of Korean Soc. Precision Eng.*, Vol. 22, No. 12, pp. 141~148.
- (3) UL 923-34, Standard for Microwave Cooking Appliances, Users Laboratory.
- (4) EN 60335-2-25, Standard for Household and Similar Electrical Appliances, European Standard.
- (5) Lee, B. Y. and Koo, J. Y., 2005, "Evaluation of Twisting Deformation of the Door Frame of a Microwave Oven by Transient Response Analysis," *Trans of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 9, pp. 1282~1288.
- (6) Kim, C. S., Na, J. M., Kim, J. H and Chung, H. S., 2001, "Drop Analysis of Micro Wave Machine with I-DEAS and LS-DYNA," Technical Paper, Samsung Electronics.
- (7) LS-DYNA3D, User's Manual, 1999, LSTC.
- (8) Cho, W. J., Kim, H., Lee, C. S. and Lee, D. R., 2000, "Drop-Impact Simulation of Micro Wave Oven," HANPAM 2000 Users Conference in Korea, pp. 61~67.
- (9) PAM-SYSTEM, Reference Manual, 2002, PAM System International.
- (10) Son, B. S., 2004, Research on the Finite Element Analysis of the Drop-Impact and Clamping of a Microwave Oven, M.S. Thesis, Keimyung University.

- (10) Lee, B. Y., Koo, J. Y. and Kim, W. J., 2006, "Structural Design of the Door Frame of a Microwave Oven to Decrease Its Twisting Deformation Using Dynamic Analysis," *J. of Korean Soc. Precision Eng.*, (submitted).
- (11) ANSYS, *User's Manual*, Revision 6.2, 2002, ANSYS Inc.
- (12) Arora, J. S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, New York.