

냉장고 내벽의 비드가 열변형에 미치는 영향에 관한 연구

The Study for Bead Effect in Inner Case on Thermal Deformation of Refrigerator

책건광¹, 조종래^{1,✉}, 전우진¹, 김주현²
JianGuang zhai¹, Jong Rae Cho^{1,✉}, Woo Jin Jeon¹ and Joo Hyun Kim²

¹ 한국해양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime Univ.)

² LG 전자(주) 냉장고사업부 (LG Electronics)

✉ Corresponding author: cjr@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4298

Manuscript received: 2010.9.14 / Accepted: 2010.10.16

Under extreme test or operation condition, refrigerator endures complicated stresses state and thermal bowing deformation arises on the sidewall. Shelf rails designed in the inner case provide increased surface area to permit expansion without bowing, and also increase structural rigidity to resist bowing. In this study, we designed six different shelf patterns of refrigerator model and studied the bead on refrigerator deformation using finite element method (FEM). Analysis result shows that increasing the numbers of beads properly in refrigerator is more helpful to reduce thermal bowing deformation. In addition, the beads would decrease stress on refrigerator sidewall. However, vertical beads have no effect to reduce thermal deformation of the bowing.

Key Words: Refrigerator (냉장고), Cabinet (벽면), Thermal Deformation (열변형), Bead (비드), Inner Case (내벽), PU Foam (폴리우레탄 발포)

1. 서론

운전 중인 냉장고는 냉동실의 온도가 대개 영하 18°C 이고 냉장실은 1°C 이며 밖은 대기온도로 큰 안팎의 온도차가 나기 때문에 냉장고의 벽면(cabinet)이 튀어 나오는 변형이 발생한다. 이러한 변형으로 내부 선반이 떨어지기도 하고 변형에 따른 열응력으로 폴리우레탄 발포(PU foam)¹ 단열재에 균열이 발생하는 등 문제가 되고 있다.

냉장고 벽면은 Fig. 1 과 같이 강판인 외판(outer case)과 ABS 수지를 팽창성형(blow forming)하여 만든 내판(inner case)을 조립하고 그 사이에 폴리우레탄 수지를 발포시켜 구조적으로 강성을 갖도록 되어 있다.² 즉, 냉장고 몸체 벽면은 다양한 재질로 인한 수축 팽창과 온도구배에 각기 다른 응답을 갖는 이종재료이다. 내부 ABS 는 냉장고의 차가운

격실 표면의 낮은 온도로 큰 수축을 하게 되고, 반면에 몸체 외부의 강판은 따뜻한 주변 온도에 노출되어 팽창하는 경향을 가진다. 특히 ABS 의 두께는 1.5 mm 이고 선 팽창계수가 강판(두께 0.6 mm)에 비해서 6 배 정도로 크기 때문에 내면은 강하게 수축하면서 전체적으로 밖으로 튀어 나오는 변형(bowing)을 유도하고 자체는 큰 인장이 작용하여 균열을 일으킨다.²

튀어나오는 경향은 좌-우로 열리는 양문형 냉장고(side-by-side style)에서 심해지고, 특히 냉동실(F-room)은 냉장실(R-room)에 비해 온도 구배가 더 크기 때문에 벽면의 변형이 증가한다. Williams³ 등은 함몰형 비드에 대한 2 차원적 해석에 의해 변형의 거동을 연구하여 특허로 발표하였다. 국내에서도 함몰형 비드에 대한 연구가 발표되기도 하였다.⁴

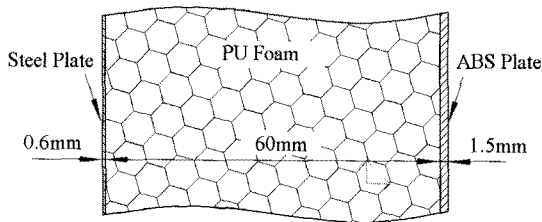


Fig. 1 Components of refrigerator cabinet

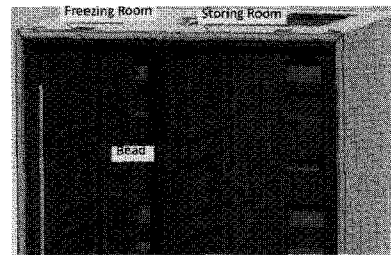


Fig. 2 Shape of inner wall in refrigerator

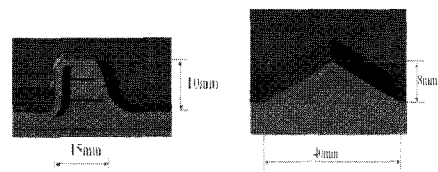
냉장고에서 변형이 문제가 되는 경우는 출하 전 극한실험 조건과 운전조건의 2 가지 경우이다.

1) 극한 실험 조건

냉장고는 극한 실험 조건을 통과해야 개발이 완료되어 시판이 가능하다. 극한 시험 조건은 영하 30°C 의 저온 챔버에 일정 시간 동안 넣은 상태에서 변형과 결함을 확인하는 것이다. 챔버 안에서 냉장고의 온도는 일정하지만 외판인 철판에 비해서 내판인 ABS 는 더 수축하려는 경향이 있기 때문에 내판에 큰 인장이 작용하고 벽면이 밖으로 튀어 나오는 변형을 한다. 이는 ABS 에 균열을 유발할 수 있다.

2) 운전 조건

운전 조건에서는 벽면의 내부는 저온이고 표면은 대기 온도와 유사하여 온도 구배가 폴리우레탄 두께 방향으로 존재 한다. 외판 부분은 팽창하고 내판은 수축하기 때문에 밖으로 튀어 나오는 열변형이 발생한다.



(a) Actual designed bead shape (b) Bead shape in FE modeling

Fig. 3 Enlarged section of a shelf bead

선반 비드의 효과를 관찰하기 위해서 여러 종류의 비드를 가정하여 모델링하였다. Table 1 은 해석의 종류를 정리한 것이고 Fig. 4 는 모델링한 형상을 나타내고 있다. C-0 는 선반 비드가 없는 모델의 경우, C-1 는 냉동실 냉장실의 측면면 7 개의 선반 비드가 있는 경우로 출시되고 있는 냉장고와 가장 가까운 경우이다. C-2 는 냉동실 바깥쪽 한 벽면 비드가 있는 경우이고, C-3 은 냉동실 한면에 수직 비드, C-4 는 전 내벽에 연속비드가 있는 경우이다.

2. 돌출형 선반비드의 영향 해석

2.1 유한요소 모델링

열전달과 구조해석은 ANSYS 소프트웨어를 사용하였다.⁵ PU 폼은 솔리드 요소로 모델링하였으며 외벽의 강판과 내벽의 ABS 는 열전달 해석에서는 모델링에는 포함시키지 않고 등가의 열저항을 구하여 해석에 반영하였다. Fig. 2 는 양문형 냉장고의 내벽을 나타낸 것으로 냉장실과 냉동실의 저장공간으로 구분되어 있으며 내벽은 선반 비드가 나타나 있다. Fig. 3 은 선반 비드와 유한요소로 모델링한 단면을 나타내고 있다. 모델링의 편의성과 비드의 영향을 더 신속히 확인하기 위해 실제의 비드 형상보다 크게 모델링하였다.

Table 1 Summary of analysis cases

Analysis Case	Description
C-0	Without bead
C-1	Bead in side walls in F- and R-room
C-2	Continuous bead in a wall of F-room
C-3	Vertical continuous bead in a wall of F-room
C-4	Continuous bead in all wall of F- and R-room

Fig. 5 는 C-1 의 경우 냉장고 각 부품을 유한요소 모델링한 형상과 요소를 나타내고 있다. 셸요소(shell element) 29,996 개와 솔리드요소(solid element) 49,732 개로 구성되어 있다. Table 2 는 주요 구성품의 물성치를 나타내고 있다.

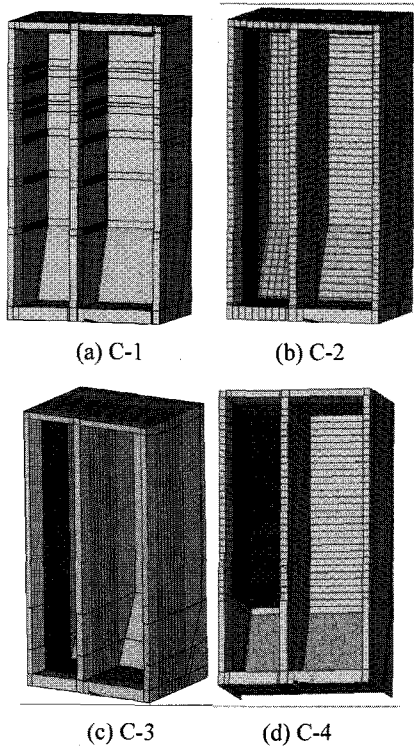


Fig. 4 Various FE model of bead

Table 2 Material properties

Material	Steel	ABS	PU foam
Elastic modulus (kPa)	131,700	2,110	3.63
Thermal conductivity (W/mK)	45	0.021	0.021
Thermal expansion ($\times 10^{-5}$ m/mK)	1.17	6.9	8

2.2 유한요소법 해석 결과

2.2.1 냉장고의 온도 해석

냉장고의 정상상태 운전조건은 냉동실이 영하 18 °C 이고 냉장실은 영하 1 °C 이고 주위온도는 35 °C 이다. Table 3 은 대류열전달계수를 나타내고 있다. 냉장고 외부는 자연대류의 조건을 고려하였고 냉장고 냉장실과 냉동실은 냉기의 유동을 고려하여 제조회사에서 일반적으로 사용하는 값을 사용한 것이다. Fig. 6 은 계산된 온도분포를 나타내고 있다.

Table 3 Convective heat transfer coefficient

Location	Outer case	Inner case (R-room)	Inner case (F-room)
h (W/m ² K)	3	8	22

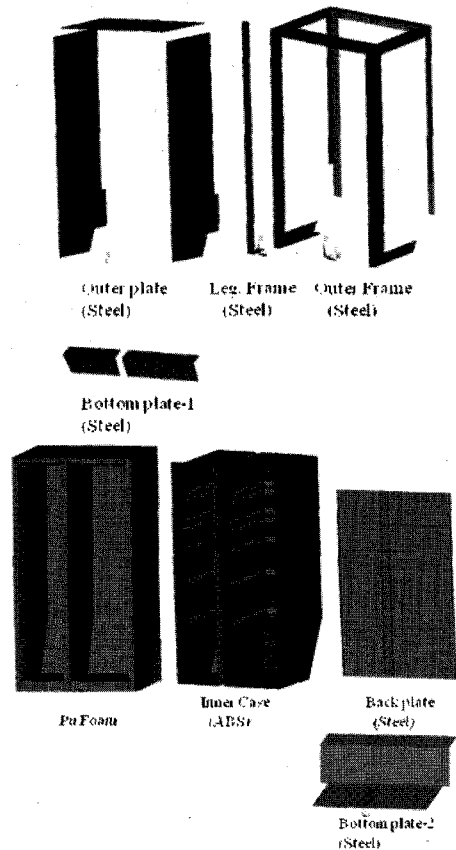


Fig. 5 FE modeling of all components

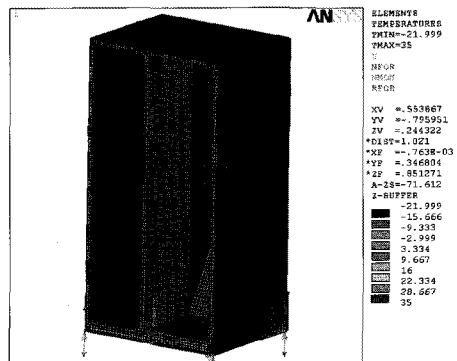


Fig. 6 Temperature contribution

2.2.2 변형해석

온도 구배에 의한 구조해석의 결과로 변형과 응력분포를 구할 수 있다. Fig. 7-9 는 변형 형상을 나타내고 있고 Table 4 는 변형량을 정리한 것이다. 7 개의 선반비드는 변형을 감소시키는 것을 알 수 있지만 전면 연속비드의 경우(C-4), 다른 경우에 비해서 효과가 매우 큼을 알 수 있다.

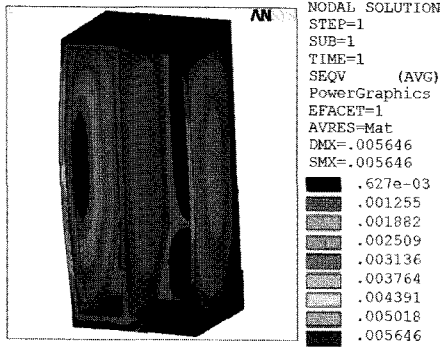


Fig. 7 Deformation distribution in C-0

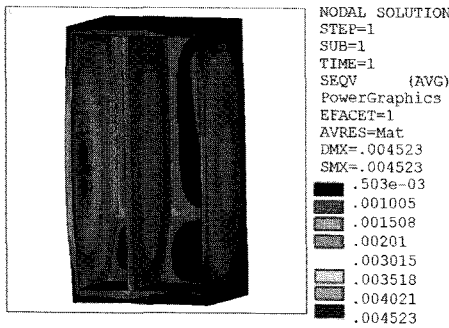


Fig. 8 Deformation distribution in C-1

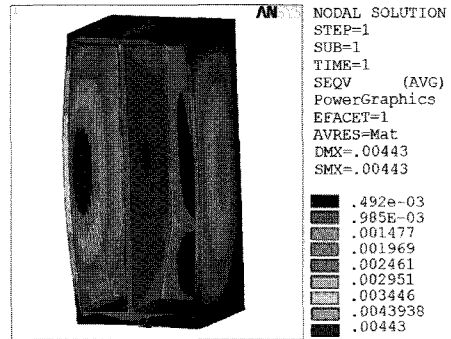


Fig. 9 Deformation distribution in C-3

Table 4 Summary of deformation in freezing and refrigerating room

Analysis Case	F- room		R- room	
	mm	%	mm	%
C-0	5.65	125	3.72	124
C-1	4.52	100	3.01	100
C-2	4.31	95.4	3.69	121
C-3	4.43	98.0	3.67	122
C-4	2.51	55.5	2.84	94.3

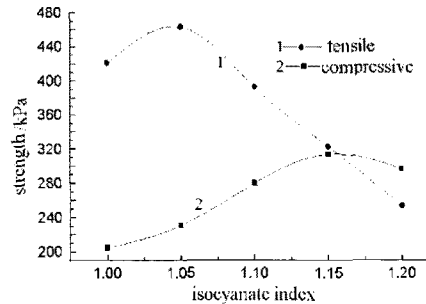


Fig. 10 Effect of isocyanate index on strength

냉장고는 열변형에 의해서 다양한 응력을 받게되며 경우에 따라서 PU 폼에 크랙이 발생하여 불량을 야기하기도 한다. Fig. 10 는 중합과정에서 이소시아네이트(isocyanate, C8H7NO2)에 따른 인장과 압축 강도를 나타내고 있다.⁶ Fig. 11 과 Fig. 12 는 두 경우의 등가응력분포를 나타낸 것이고 Table 5 에 정리하였다. 모서리나 비드가 있는 부위에서 응력집중이 나타나고 있지만 인장강도인 400 kPa 보다는 훨씬 낮은 응력이 발생하고 있다. 비드가 있는 경우 응력이 낮아짐을 확인할 수 있다.

3. 함몰형 비드 영향 해석

냉장고 내벽의 선반비드는 냉장고 용적을 감소시키기 때문에 비드를 없애고 구멍을 내어 선반을 설치하기도 한다. 이 경우는 함몰형 비드가 오히려 용적을 키우기 때문에 바람직한 개선안이다. Fig. 13 은 비드의 한 단면을 보여주고 있다. 여기서 가장 중요한 변수는 비드의 깊이이다. Fig. 14 는 18 개 비드의 위치를 나타내고 있으며 냉동실 내벽의 한쪽만 있는 경우이다.

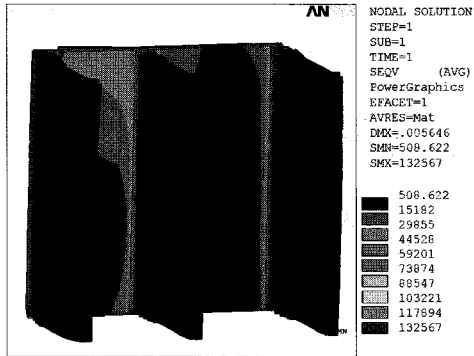


Fig. 11 Von Mises stress distribution in C-0

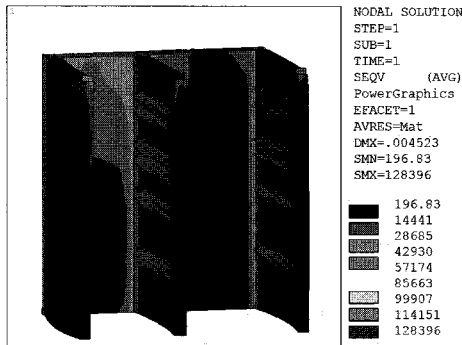


Fig. 12 Von Mises stress distribution in C-1

Table 5 Summary of von Mises stresses

Analysis Case	Von Mises stress	
	kPa	%
C-0	132	103
C-1	128	100
C-2	111	86.7
C-3	109	85.2
C-4	102	79.7

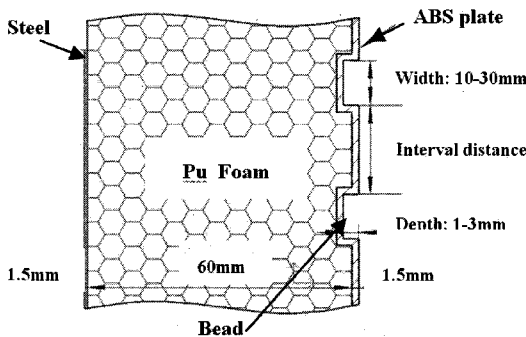


Fig. 13 Enlarged bead section view

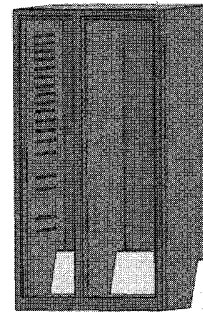


Fig. 14 Bead location in refrigerator

Fig. 15 는 비드 깊이에 따른 변형량을 분석한 것으로 비드의 깊이가 3 mm 이상일 경우에 변형량 감소효과가 증가함을 확인하였다.

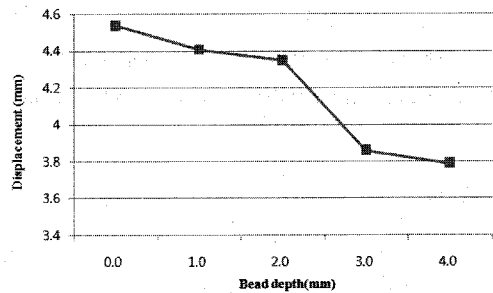


Fig. 15 Deformation with bead depth

4. 결론

운전 중 가정용 냉장고의 측면이 튀어 나오는 변형 현상을 분석하고 이를 줄이기 방안을 제시하였다. 선반 레일용으로 비드가 돌출한 경우와 선반 레일이 없는 경우 함몰형 비드를 설계하여 변형량과 응력을 비교하였다. 냉장고 전체를 3 차원 유한요소 모델링하여 해석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 측면 변형의 주 원인은 선팽창계수가 큰 냉장고 내벽의 ABS 수지가 낮은 냉장고 내부의 온도에서 수축하면서 큰 변형을 일으키고 있다.

2) 따라서 수축하려는 강성을 줄여주면 변형을 감소시킬 수 있다. 2 가지 방향에 대해서 분석하였다. 선반 레일의 비드와 같이 내벽을 돌출형으로 할 경우에는 냉동실 한 벽면보다는 전면에 연속적으로 하는게 효과적이다.

벽면을 파고드는 함몰형으로 비드를 만들 경우 비드의 깊이는 3 mm 이상이 효과적이다.

3) 항상 최대 변형은 냉동실의 바깥벽에서 발생하는데 선반 레일의 숫자를 적절히 증가하면 온도구배에 의한 변형 현상을 줄일 수 있다.

그렇지만, 벽면 두께방향에 연직평행인 선반비드는 변형을 감소시키는 효과는 적다. 변형이 증가하면 PU 폼에 발생하는 응력도 증가한다.

4) 이러한 비드의 설계는 변형을 저감하기 위해 일반적으로 사용하는 보강재(stiffener)를 줄일 수 있어 원가 절감에 기여할 수 있고 불량이 없는 안정적인 생산을 가능하게 한다.

후 기

본 연구는 LG 전자의 지원을 받았으며, 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Fishback, T. L., Reichel, C. J. and Lee, T. B., "Polyol composition having good flow and water blown rigid polyurethane foams made thereby having good dimensional stability," US Patent, No. 5686500, 1997.
2. Mills, N. J., "Polymer Foams Handbook," Elsevier, pp. 20-35, 2007.
3. Williams, S. G. and Schwartz, D. L., "Method and apparatus for manufacture of plastic refrigerator liners," US Patent, No. 5269601, 1993.
4. Cho, J. R., Zhai, J. G., Shin, M. G. and Kim, J. H., "The effect on cabinet deformation by bead of inner case," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 427-428, 2009.
5. "ANSYS 11.0 User Manual," ANSYS, Inc., 2008.
6. Song, C., Tong, J. and Luo, Z., "Preparation of water-blown rigid polyurethane foams," PU China Conference, pp. 255-260, 2003.