

빌트인 냉장고 댐핑힌지의 응력해석 및 파손방지를 위한 설계개선

이부윤*.#

*계명대학교 기계자동차공학전공

Stress Analysis and Design Improvement to Prevent Failure of the Damping Hinges of Built-in Refrigerators

Boo-Youn Lee*.#

*Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, KEIMYUNG UNIV.

(Received 1 September 2019; received in revised form 30 September 2019; accepted 17 November 2019)

ABSTRACT

The damping hinge of a built-in refrigerator was examined in terms of its stress and fatigue life. Analysis of the initial design showed that stress concentration occurred at the concave surface of the hinge lever, which was broken during the door opening-and-closing endurance test of the prototype. The maximum von Mises stress at this location exceeded the yield strength. In addition, Goodman fatigue analysis of the initial design showed that the fatigue life at this location was consistent with the failure observed during the endurance test. Based on these results, an improved design for the damping hinge was derived. Analysis of this improved design showed that the stress concentration in the hinge lever of the initial design was eliminated. In this case, the maximum stress occurred at the position where the hinge lever was in contact with the door stopping pin, and the maximum von Mises stress was smaller than the yield strength. Goodman fatigue analysis of the improved design indicated that the fatigue life of the entire damping hinge was infinite. It was therefore concluded that the improved design does not suffer from fatigue damage during the endurance test.

Key Words : Built-in Refrigerator(빌트인 냉장고), Damping Hinge(댐핑힌지), Hinge Lever(힌지레버), Stress Analysis(응력해석), Fatigue Life(피로수명)

1. 서론

근래에 들어서 고급 주방가전이 활성화되면서 일 반 양문형(side-by-side) 냉장고에 비해 고가인 빌트 인(built-in) 양문형 냉장고가 많이 보급되기 시작하

고 있다. 양문형 냉장고에는 전면에서 볼 때 좌측 에 냉동실 도어(door), 우측에 냉장실 도어가 설치 된다. 그리고 냉동실 도어의 좌측과 냉장실 도어의 우측에는 도어를 캐비닛(cabinet)에 체결하는 역할을 하는 상부힌지(hinge)와 하부힌지가 설치된다. 상부 힌지는 캐비닛과 도어를 핀(pin) 결합 방식으로 체결하여 도어 개폐 시 도어가 자유롭게 회전하게 하 는 역할을 한다. 하부힌지는 도어의 회전축의 역할

Corresponding Author : bylee@kmu.ac.kr
Tel: +82-53-580-5922, Fax: +82-53-580-5165

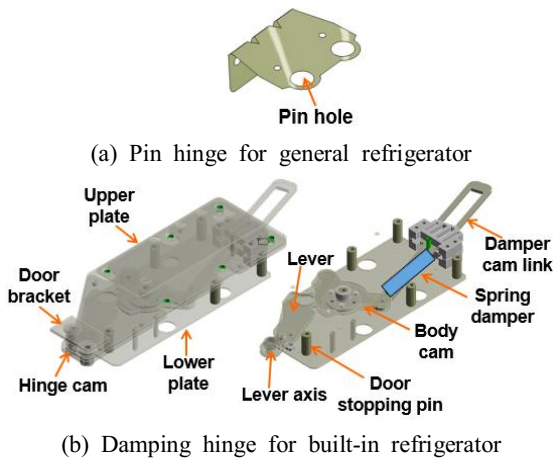


Fig. 1 Types of lower hinges for side-by-side refrigerator

뿐만 아니라 도어의 무게를 지지하는 역할도 한다.

일반 양문형 냉장고에서 사용되는 하부힌지는 보통 Fig. 1(a)와 같은 형상을 갖는데, 상부힌지와 마찬가지로 캐비닛과 도어를 핀으로 체결하여 도어의 회전을 자유롭게 한다. 이와 같은 핀 체결 방식의 하부힌지는 구조가 간단하고 가격은 싸지만, 사용자가 도어 개폐 시 힘을 크게 가하면 도어가 확 열리거나 큰 소리를 내면서 닫히면서 발생하는 충격을 흡수할 수 없는 단점을 갖는다.

한편, 빌트인 양문형 냉장고에 사용되는 상부힌지는 일반 양문형 냉장고와 동일한 핀 체결 방식을 사용하며 구조상 거의 차이가 없다. 반면에 빌트인 양문형 냉장고의 하부힌지는 일반 양문형 냉장고의 하부힌지에 비해 완충 기능을 갖는데, Fig. 1(b)에 나타난 댐핑힌지(damping hinge)가 주로 사용된다. 이 댐핑힌지는 충격을 흡수하는 스프링 댐퍼(spring-damper)를 포함한 링크 기구가 내장되어 있어 구조가 복잡하고 고가이지만 큰 힘을 가하더라도 도어가 부드럽게 열리고 닫히도록 하는 장점이 있다. 따라서 도어 개폐 시에 편안하고 고급스러운 느낌을 주는 이 댐핑힌지가 소비자 감성을 만족시키는데 있어 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구는 빌트인 양문형 냉장고에 사용되는 이 댐핑힌지의 시작품(prototype) 개발 과정에서 대두된 힌지레버(hinge lever) 부품의 파손 문제를 해결하고 설계를 개선하는데 초점을 맞추고자 한다.

냉장고의 구조설계에 관한 기존의 연구를 살펴보면 주로 제품의 실제 사용 및 수송 과정에서의 부하 조건을 고려한 구조설계가 많은 부분을 차지한다. 대표적인 연구로서 Kum^[1]은 냉장고의 내충격 완충 포장에 대한 최적설계 방안을 제시하였다. 근래에 들어서는 양문형 냉장고에서 발생하는 도어 단차의 원인을 규명하고 도어 단차 불량을 해결하기 위한 연구가 꾸준히 제시되어 왔다. Shin 등^[2]은 도어의 상하단차에 미치는 다양한 영향 인자를 유한요소해석과 실험 계획법으로 분석하였다. Kang^[3]은 상하단차 저감을 위한 냉장고 전면 하부 지지용 레그(leg)의 위치 이동과 하부힌지의 보강 방안을 연구하였다. Lee^[4]는 냉장고 지지 방식이 도어 단차에 미치는 영향 평가 및 단차 저감 방안을 연구하였다. Weng 등^[5]은 도어의 상하단차를 자동으로 조절하기 위한 메커니즘을 제시하였다. Jang^[6]은 냉장고 주요 부품의 설계 변경에 따른 상하단차의 민감도를 평가하였다. Kim^[7]은 상하단차를 저감하기 위한 역삼각형 지지 구조에 관하여 연구하였다. Lee^[8]는 빌트인 양문형 냉장고에 대하여 캐비닛의 변형 해석을 통하여 3D CAD Software를 사용하여 도어의 단차를 평가하였다. Lee^[9]는 빌트인 양문형 냉장고에 대하여 캐비닛-도어 통합모델의 해석을 수행하여 해석결과의 두 도어의 변위로부터 도어의 단차를 평가하였다. 한편, 냉장고 부품과 관련된 구조 해석 및 설계 관련 연구로서 Lee^[10]는 냉장고 열음디스펜서 덕트 캡의 밀봉성능 평가 및 개선 연구를 제시한 바 있다. 그리고 Youn 등^[11]은 대형 냉장고의 도어 개폐 시에 발생하는 충격을 저감하기 위해 댐핑힌지의 링크 기구의 부재 길이, 조인트 좌표 등의 치수에 대한 신뢰성기반 최적설계 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 빌트인 양문형 냉장고의 댐핑힌지에 대하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS workbench^[12]를 사용하여 도어를 열 때 발생하는 응력과 피로수명을 해석하고자 한다. 그리고 댐핑힌지 초기설계안의 해석결과에 기반하여 시작품의 도어 개폐 내구시험(endurance test) 시에 파손이 발생한 힌지레버의 파손 원인을 규명하고자 한다. 그리고 파손을 방지하기 위한 힌지레버의 설계개선 방안을 도출하고 해석을 통하여 안전성을 확인하고자 한다.

2. 초기설계안의 응력해석

댐핑힌지는 캐비닛 좌우 측벽의 하단에 장착되어 지면에 거치되고, Fig. 1(b)에 표시된 도어 브래킷 (door bracket) 아래의 힌지 캠(hinge cam)과 핀 체결되는 힌지레버의 레버축(lever axis)을 통하여 도어와 연결된다. 도어를 열면 레버축(lever axis)이 캐비닛의 전면

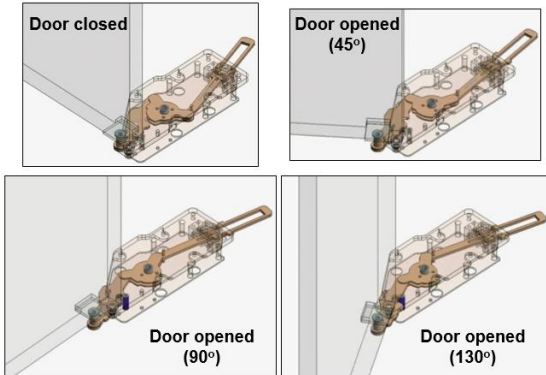


Fig. 2 Movement of link mechanism with rotating door

방향으로 움직이면서 링크 구조를 동작시키게 된다. Fig. 2는 도어를 130°까지 열 때 도어의 회전 각도에 따른 내부 링크 기구의 움직임을 나타낸다. 도어가 닫혀 있을 때는 Fig. 3(a)와 같이 힌지레버와 도어멈춤핀 (door stopping pin)이 분리되어 있다가, 도어를 130°까지 열면 Fig. 3(b)와 같이 힌지레버가 도어멈춤핀에 부딪치면서 링크 기구의 동작을 멈추게 함으로써 도어가 더 이상 열리지 않도록 한다.



Fig. 4 Failure of hinge lever during endurance test of initial design

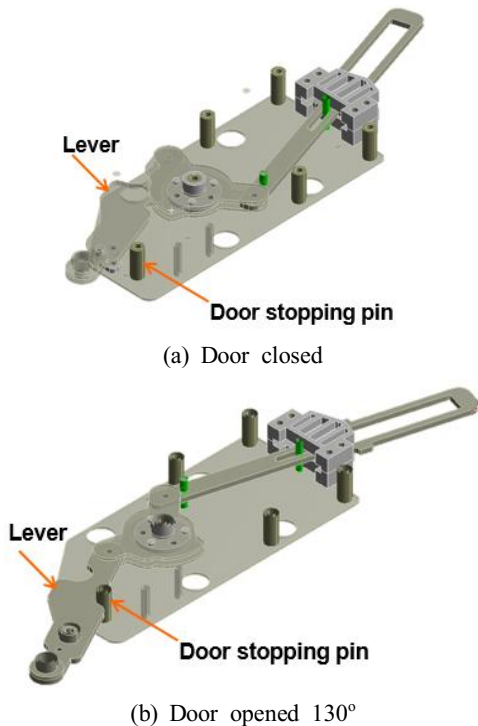


Fig. 3 Position of lever and door stopping pin

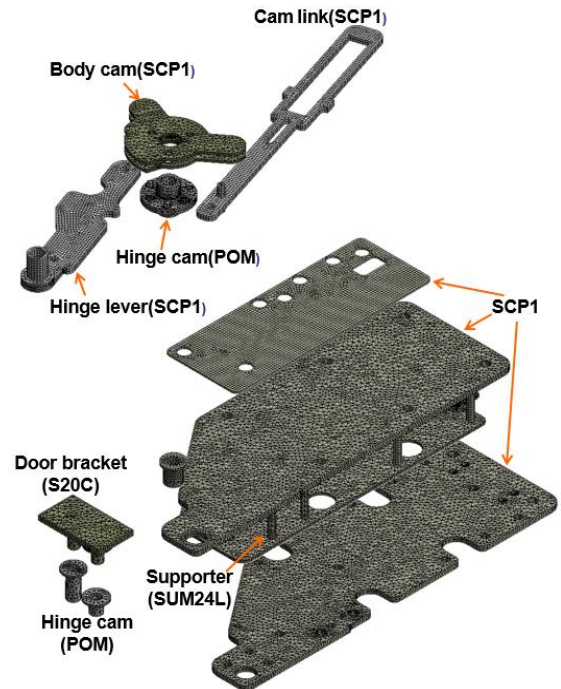


Fig. 5 Finite element model of initial design of damping hinge

Table 1 Material properties

Material spec.	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)
SCP1	7800	205	0.29	275
POM	1410	2.55	0.35	50
SUM24L	7870	200	0.29	415
S20C	7800	205	0.29	350

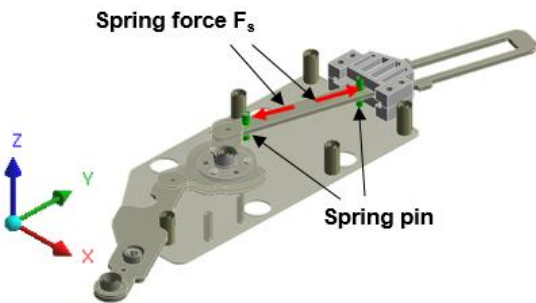


Fig. 6 Application of spring force

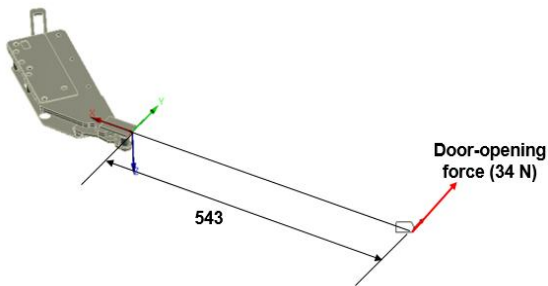


Fig. 7 Application of door-opening force

댐핑힌지의 초기설계안에 대하여 시작품을 제작하여 도어개폐 내구시험을 실시하였다. 내구시험은 도어에 부하물을 적재한 상태에서 도어를 130°까지 열고 닫는 과정을 100,000 사이클을 반복하게 되는데, 내구시험 도중에 약 60,000 사이클에서 Fig. 4와 같이 힌지레버의 오목한 부위가 파단되는 현상이 발생하였다. 따라서 유한요소해석을 통하여 이러한 파단의 원인을 분석하고 설계개선을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

먼저 댐핑힌지 조립체의 초기설계안에 대하여 ANSYS를 사용하여 응력을 해석하기 위하여 도어가 130° 열렸을 때의 유한요소모델을 구성하였으며, Fig.

5는 각 부품별 유한요소 형상과 재질을 나타낸다. 요소종류는 20절점 육면체와 10절점 사면체 솔리드 요소로서, ANSYS의 자동요소생성 기능을 사용하여 구성하였다. 유한요소모델의 총 절점 수는 248,849개, 총 요소 수는 115,721개이다. Table 1에는 각 재질별 물성치를 수록하였으며, 본 연구에서는 탄성영역의 해석을 수행하였다.

도어가 130°까지 열렸을 때 링크 기구의 스프링이 압축되어 Fig. 6과 같이 스프링이 체결되는 스프링 핀에 스프링의 길이방향으로 스프링력 F_s 를 가하게 된다. 스프링력 F_s 는 식 (1)과 같이 스프링 상수(6.844 N/mm), 자유길이(110 mm), 동작시 길이(80.5 mm)로부터 계산되며 202 N이다.

$$F_s = 6.844(110 - 80.5) = 202\text{N} \quad (1)$$

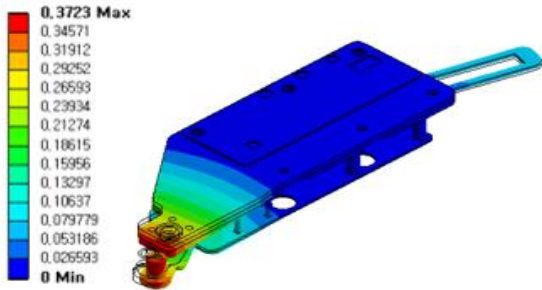
부하물을 포함한 도어하중(door load)은 806 N으로 도어 브래킷 아래의 힌지 캠과 체결된 레버축에 가해지게 된다. 그러므로 이 도어하중을 레버축의 윗면에 수직방향으로 가하였다.

한편, 냉장고 실제품에 대하여 도어를 열 때 드는 개방력을 푸시풀 게이지(push-pull gage)를 사용하여 측정한 결과 34 N으로 측정되었다. 도어는 강체로 가정하여 모델링하고 Fig. 7과 같이 도어가 내구시험 시의 최대 개방각도인 130°까지 열렸을 때 도어의 끝단(댐핑힌지의 레버축으로부터 543 mm 위치)에 개방력 34 N을 정적으로 가할 때를 해석하였다.

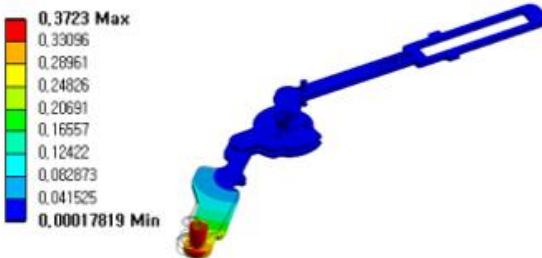
댐핑힌지 초기설계안의 해석 결과로서, Fig. 8은 변형형상과 변위크기(Usum) 분포를 나타낸다. 전체적으로 도어하중의 작용 부위가 아래로 처지는 양상을 보이며 최대변위는 레버축에서 0.37 mm로 나타났다.

Fig. 9는 von Mises 등가응력(Seqv) 분포를 나타내는데, 힌지레버의 오목한 면에서 응력집중이 발생하였다. 이 위치에서 발생한 최대응력은 307.7 MPa로서 힌지레버 재질 SCP1의 항복강도인 275 MPa를 초과하였다. 따라서 도어가 130°까지 열렸을 때 이 위치에서 소성변형이 발생 가능한 것으로 판단된다. 또한 이 위치는 도어개폐 내구시험 시에 힌지레버에서 파손이 발생한 위치(Fig. 4 참조)와 일치하였다. 한편, 힌지레버는 재질이 SCP1으로 연성(ductile)재료이므로 이와 같이 오목한 기하학적 불연속 위치의 국부적 응력

집중으로 인한 최대응력이 항복강도보다 크더라도 변형률경화(strain hardening) 현상으로 인하여 하중이 1회만 가해지는 경우에는 파손이 되지 않는 것으로 판단된다^[13]. 그러나 본 연구에서와 같이 하중이 반복적으로 가해지는 도어개폐 내구시험 시에는 피로에 의한 파손의 가능성이 높으므로 피로수명을 계산하여 안전성을 확인하는 것이 필요하다.



(a) Assembly



(b) Link

Fig. 8 Distribution of magnitude of displacement (Usum) of initial design

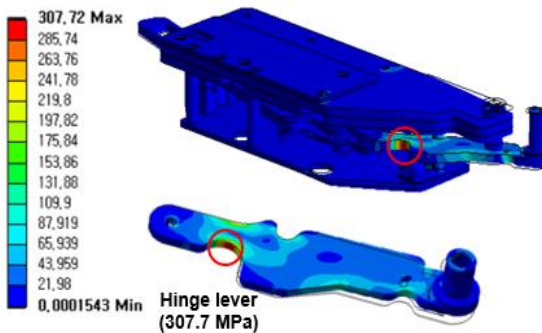


Fig. 9 Distribution of von Mises equivalent stress (Seqv) of initial design

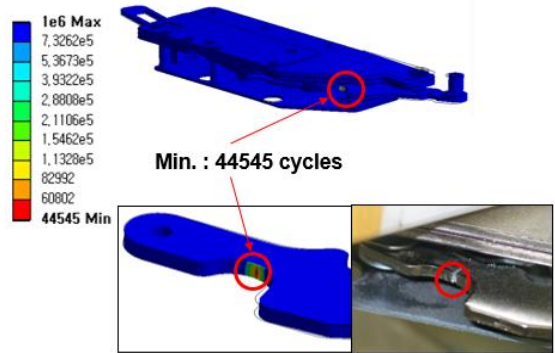


Fig. 10 Distribution of fatigue life of initial design

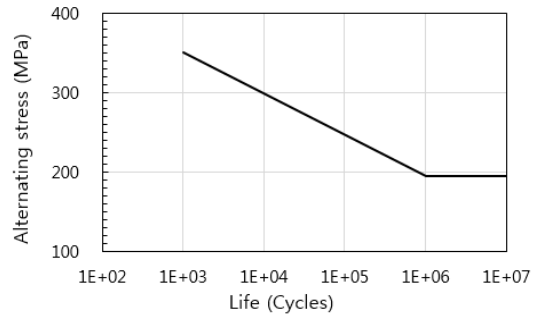


Fig. 11 S-N diagram



(a) Initial design



(b) Improved design

Fig. 12 Design modification of hinge lever and hinge frame

응력해석 결과로부터 도어개폐 내구시험 시의 피로수명을 평가하기 위하여 Goodman 이론^[13]을 적용하였다. Goodman 이론을 적용하게 되면 도어가 닫혀

있을 때와 열렸을 때의 변동응력의 평균응력과 응력 진폭을 고려하여 피로수명을 계산할 수 있다.

초기설계안에 대해 피로수명을 계산한 결과를 Fig. 10에 나타내었는데, 힌지레버의 오목한 위치를 제외하고는 무한수명으로 나타났다. 이 오목한 국부 위치에서의 피로수명은 44,545 사이클로 나타났다. 피로수명 계산 시에 사용한 S-N선도는 Fig. 11에 나타내었는데, 이는 문헌^[13]을 참조하여 구하였다. Fig. 11에서 10^3 사이클의 교변응력(alternating stress)은 $0.9S_{ut}$, 10^6 사이클의 내구한도(endurance limit)는 $0.5S_{ut}$ 로 결정되었다. 여기서 S_{ut} 는 극한강도(ultimate strength)인데, SCP1의 극한강도는 390 MPa이다. 문헌^[13]에 의하면 이렇게 극한강도에 기반하여 구한 S-N선도는 다양한 재료에 대해 수많은 피로시험을 수행한 결과로부터 구한 평균값이므로, 특정한 재료의 직접적 피로시험으로부터 얻어지는 S-N선도에 비해 정확성이 그다지 높지 않다고 볼 수 있다. 한편으로는 이 최대응력 위치의 응력이 항복강도를 초과하는 것으로 나타났는데 본 연구에서는 탄성해석의 결과를 사용했으므로 피로수명 계산에 사용된 응력도 실제와 조금의 차이가 난다고 할 수 있다. 이를 감안하면 본 연구에서 구한 피로수명 계산 결과인 44,545 사이클은 시작품의 내구시험 시에 이 위치에서 약 60,000 사이클에서 파손이 발생한 것과 어느 정도 일치한다고 판단된다.

3. 설계개선안의 응력해석

앞 장에서 댐핑힌지 초기설계안의 해석과 평가를 통하여 힌지레버의 오목한 부위에서 발생하는 응력 집중이 도어개폐 내구시험 시의 파단의 원인임을 확인하였다. 이를 토대로 하여 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 힌지레버와 힌지프레임의 설계개선안을 도출하고 해석을 수행하여 안전성을 평가하였다. 이러한 설계개선안에 대한 해석 및 평가는 새로운 시작품의 제작 및 시험 횟수를 줄임으로써 제품개발 기간을 단축하고 비용을 절감하기 위하여 필요하다고 판단된다.

Fig. 12에서 알 수 있듯이 설계개선안은 응력집중이 발생한 힌지레버의 오목한 부위(원으로 표기)를 평탄한 형상으로 개선하였다. 그리고 설계개선안의 힌지프레임은 개선된 힌지레버의 동작 범위를 고려하여

전면부의 폭을 초기설계안보다 10 mm 증가시켰다.

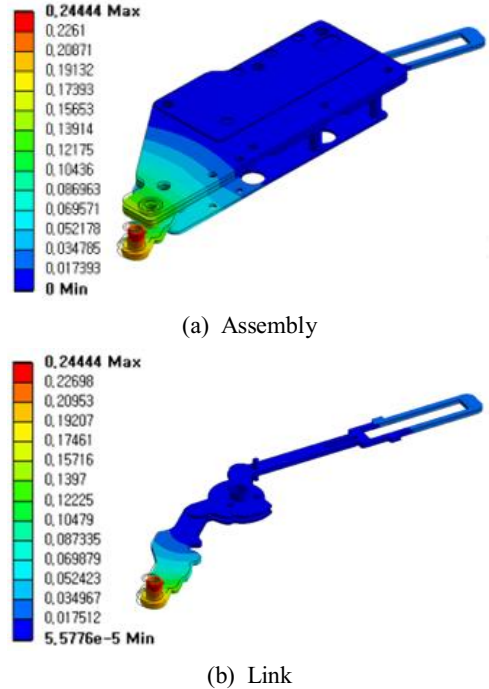


Fig. 13 Distribution of magnitude of displacement (Us) of improved design

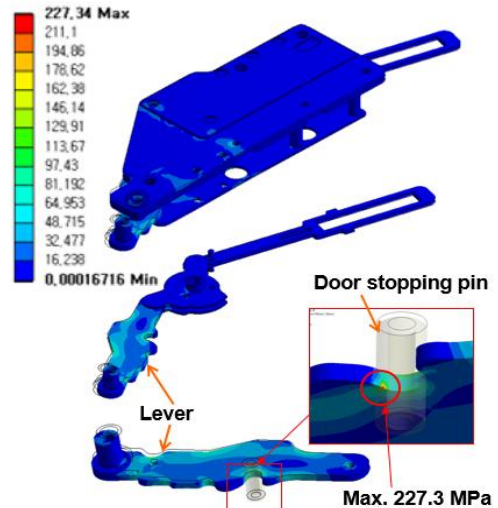


Fig. 14 Distribution of von Mises equivalent stress (Seqv) of improved design

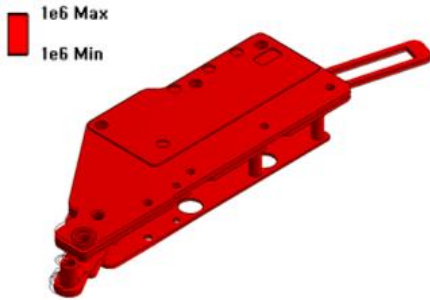


Fig. 15 Distribution of fatigue life of improved design

도출된 댐핑힌지의 설계개선안에 대하여 초기설계안과 동일한 방법으로 도어가 최대 개방각도인 130°까지 열렸을 때를 해석하였다. 댐핑힌지 설계개선안의 해석 결과로서, Fig. 13은 변형형상과 변위크기 분포를 나타낸다. 전체적으로 도어하중이 가해지는 부위가 아래로 처지는 양상을 보이고 최대변위는 레버축에서 0.24 mm로 나타났으며 초기설계안(0.37 mm)에 비해 감소하였다.

Fig. 14는 설계개선안의 von Mises 등가응력 분포를 나타낸다. 초기설계안의 힌지레버 오목부에서 발생했던 응력집중은 오목부를 평탄하게 함으로써 제거되었고, 최대응력은 도어가 열렸을 때 힌지레버가 도어 멈춤핀과 접촉하는 위치에서 발생하였다. 이 위치에서 발생한 최대응력은 227.3 MPa로서 힌지레버 재질 SCP1의 항복강도인 275 MPa보다 작다. 따라서 도어가 130°까지 열렸을 때 힌지레버에서 소성변형이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

설계개선안의 응력해석 결과로부터 도어개폐 내구시험 시의 피로수명을 평가하기 위하여 ANSYS에서 Goodman 이론을 사용하여 피로수명을 계산한 결과를 Fig. 15에 나타내었는데, 댐핑힌지 전체의 피로수명은 무한수명에 해당되는 10^6 사이클로 나타났다. 결론적으로 댐핑힌지의 설계개선안은 도어개폐 내구시험 시에 피로파손이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

4. 결론

1. 빌트인 양문형 냉장고의 댐핑힌지에 대하여 도어를 최대 개방각도까지 열 때 발생하는 응력과 피로

수명을 해석하였다.

2. 초기설계안의 해석결과, 도어개폐 내구시험 시에 파단이 발생했던 힌지레버의 오목한 면에서 응력집중이 발생하였다. 이 위치에서 최대 von Mises 등가응력은 307.7 MPa로서 항복강도(275 MP)를 초과하므로 소성변형이 발생 가능한 것으로 나타났다.
3. 초기설계안에 대한 Goodman 피로수명 해석결과, 힌지레버의 오목한 면의 피로수명은 44,545 사이클로 나타났다. 이는 시작품의 내구시험 시에 이 위치에서 약 60,000 사이클에서 파손이 발생한 것과 어느 정도 일치하였다.
4. 초기설계안의 해석결과를 토대로 하여 힌지레버와 힌지프레임의 설계개선안을 도출하였다. 설계개선안에서는 초기설계안에서 응력집중이 발생한 힌지레버의 오목한 면을 제거하여 평탄하게 하고, 개선된 힌지레버의 동작 범위를 고려하여 힌지프레임의 전면부 폭을 증가시켰다.
5. 설계개선안의 해석결과, 초기설계안의 힌지레버 오목부에서 발생했던 응력집중이 제거되었다. 최대응력은 힌지레버가 도어멈춤핀과 접촉하는 위치에서 발생하였으며 최대 von Mises 등가응력은 227.3 MPa로서 항복강도(275 MP)보다 작게 나타났다.
6. 설계개선안에 대한 Goodman 피로수명 해석결과, 댐핑힌지 전체의 피로수명은 무한수명에 해당되는 10^6 사이클로 나타났다. 결론적으로 본 연구에서 도출된 설계개선안은 도어개폐 내구시험 시에 피로파손이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Kum, D. H., "Optimal Design for Cushioning Package of a Heavy Electronic Product Using Mechanical Drop Analysis," A Thesis for MS, Keimyung University, Republic of Korea, 2004.
2. Sin, G. C. and Che, S. W., "A Study on the Door Height Difference of the SBS Refrigerator," Proc. of Autumn Conference of KSME(A), pp. 528-531, 2004.
3. Kang, G. W., "A Study and Analysis for the

- Improvement of Door Height Difference of the Side-by-Side Refrigerator,” A Thesis for MS, Pusan National University, Republic of Korea, 2008.
4. Lee, M. S., “A Study of Optimization of the Load Supporting Structure in the Side-by-Side Refrigerator,” A Thesis for MS, Pusan National University, Republic of Korea, 2008.
 5. Weng, L., Yun, J. D. and Jung, Y. H., “Development of the Auto Leveling Mechanism for Side-by-Side Refrigerator Doors,” Transaction of KAIS, Vol. 13, pp. 3165-3174, 2012.
 6. Jang, M. J., “A Study and Analysis for the Improvement of Door Height Difference of the Side-by-Side Refrigerator,” A Thesis for MS, Pusan National University, Republic of Korea, 2010.
 7. Kim, J. H., “A Study Regarding Supporting Structure of Refrigerator to Minimize a DHD between Each Door at the Unleveled Floor Condition,” A Thesis for MS, Pusan National University, Republic of Korea, 2015.
 8. Lee, B. Y., “Structural Analysis of Cabinet of Built-in Side-by-Side Refrigerator and Evaluation of Door Height Difference and Door Flatness Difference,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 30-36, 2018.
 9. Lee, B. Y., “Structural Analysis of Built-in Side-by-Side Refrigerator with Ice Dispenser and Home Bar and Evaluation of Door Differences and Gasket Gap,” Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 9, pp. 465-473, 2018.
 10. Lee, B. Y., “A Study on Evaluation and Improvement of Sealing Performance of Duct Cap Assembly for Ice Dispenser By Nonlinear Contact Problem Analysis,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,, Vol. 17, No. 2, pp. 37-46, 2018.
 11. Youn, S. J. and Noh Y., “Reliability-Based Design Optimization of Refrigerator Door Hinges Using PIDO Technology,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 16, No. 4, pp. 715-722, 2015.
 12. ANSYS, ANSYS User’s Manual Revision 11.0, ANSYS Inc., 2007.
 13. Shigley, J. E., Mechanical Engineering Design, 3rd Ed., International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo, pp. 177-194, 1977.