

갭과 단차의 기능 및 심미적 품질을 고려한 냉장고 도어 시스템의 공차해석 및 설계

Tolerance Analysis and Design of Refrigerator Door System for Functional and Aesthetic Quality of Gap and Flush

김진수¹, 김재성¹, 임현준^{1,✉}
Jinsu Kim¹, Jae-Sung Kim¹, and Hyunjune Yim^{1,✉}

¹ 홍익대학교 기계-시스템디자인공학과 (Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik Univ.)
✉ Corresponding author: hjyim@hongik.ac.kr, Tel: +82-2-320-1489

Manuscript received: 2013.11.25 / Revised: 2013. 12.10 / Accepted: 2013.12.16

The central seam, the vertical 'line' between doors, in the front view of a refrigerator must have its gap and flush within certain ranges to meet functional and aesthetic requirements. The conventional criteria for gap and flush control in the industry are to keep the gap and flush within certain ranges at each of various points along the seam. For aesthetics, however, the uniformity of the gap is also as important because a 'tapered' seam is negatively perceived by human eyes. This paper shows a case study of tolerance design for a refrigerator door system. It presents a step-by-step procedure, which consists of datum flow chain analysis, identification of assembly features, computer modeling of feature tolerances, assembly operations and measurements, tolerance simulation, and tolerance adjustments based on the simulation results. It is found that extra care may need to be used to satisfy the aesthetical criterion for gap uniformity.

Key Words: Tolerance Analysis (공차해석), Tolerance Design (공차설계), Gap (갭), Aesthetics (심미성), Flush (단차)

기호설명

θ_a = angle between two normal vectors to the side (seam-forming) planes of the left-hand and the home-bar doors

θ_b = angle between two normal vectors to the side (seam-forming) planes of the left-hand and right-hand doors

σ = standard deviation

1. 서론

생산 단계의 공정능력(process capability)이 우수하고 품질 관리가 잘 된다면, 조립품의 치수 및

형상 품질은 부품들의 설계 공차에 의해 결정된다. 최근 소비자들이 고품질을 요구하는 추세에 따라 공차설계가 점차로 중요해지고 있다. 지금까지 대부분의 기업에서 설계 공차 값은 기존의 경험에 의존하여, 즉 유사한 기존 제품에서 사용하던 값을 활용해 부여해 왔다. 그러나 이제는 체계적이고 논리적인 방법으로 적절한 공차 값을 부여함으로써, 조립품의 품질을 보장할 수 있기를 원하는 기업이 늘어나고 있다.

위의 설명에서 조립품의 품질이 만족되도록 부품의 공차를 부여하는 작업을 공차설계(tolerance design)라 하고, 반대로 부품들의 공차가 주어졌을 때 조립품의 공차를 예측하는 것을 공차해석

(tolerance analysis) 또는 공차시뮬레이션(tolerance simulation)이라 한다. 제품에서 요구되는 품질로부터 부품의 공차를 바로 설계할 수 있다면 좋겠지만, 그러한 기법이 없으므로 실제로는 공차해석을 반복함으로써 공차설계를 개선해 나가게 된다. 부품의 개수가 많고 기구학적으로 복잡한 조립체의 공차해석을 위해서는 상용 소프트웨어를 사용하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 수행하는 것이 보통이다.

제품에 대해 요구되는 품질이 높아짐에 따라 다양한 종류의 형상 인자들이 중요해지고 있지만, 그 중에서 부품 간 상대 운동이 있는 곳에 반드시 존재하는 시임(seam)에서 측정되는 부품 간 갭(gap) 및 단차(flush)는 기능과 심미성의 관점에서 모두 중요하다. 이 중에서 특히 갭은 시임을 정면에서 보았을 때 눈에 띄는 심미 품질의 척도이며, 모바일 기기, 자동차, 냉장고, 가구, 주방제품, 사무용 가구 등 다양한 조립품에서 중요하게 인식되고 있다. 이와 같이 많은 제품에서 심미성 확보를 위해 갭과 단차를 관리할 필요가 있지만, 시임 전체에 걸쳐 갭이 허용 범위 내에 있으면 된다는 조건만으로는 심미성이 보장 되지 않는다. 즉 갭이 모든 점에서 허용 범위 내에 있더라도 일정하지 않으면 (예를 들어, 시임을 따라 갭이 증가하거나 감소하면) 심미성이 크게 저하된다.

Lee¹의 최근 연구를 제외하면 국내 문헌에서 본 주제와 관련되는 연구 결과를 찾아 보기는 쉽지 않다. 외국의 경우에는, 스웨덴 찰머스(Chalmers) 공대의 Soderberg²⁻⁶ 교수 팀에서 시임의 심미성과 관련된 연구를 수행해 왔다. 이 중 본 논문과 가장 밀접한 것은 Wickman⁴이 개발한 자동차 시임의 가상현실 평가 시스템이며, 이와 유사한 보다 최근의 연구로 Stoll⁷이 디자인 폼핑용으로 개발한 갭 및 단차의 실시간 가시화 시스템이 있다.

본 논문에서는 조립품 시임의 갭과 단차가 그 기능 및 심미성 요건을 만족하도록 공차설계를 수행하는 방법을 제시하기 위해, 전형적인 냉장고 모델을 대상으로 한 공차해석과 공차설계 과정을 수행한다. 2장에서는 우선 연구 대상이 되는 냉장고 모델과 부품들을 설명하고, 이 부품들 사이의 조립관계 및 조립순서를 설명한 후 Datum Flow Chain(DFC)⁸을 도출한다. 3장에서는 공차해석에 입력되는 조립특징형상(assembly feature), 공차의 종류, 공차 값, 측정치의 정의를 살펴 본다. 4장에서는 공차해석 결과와 그에 따라 공차를 반복적으로 조

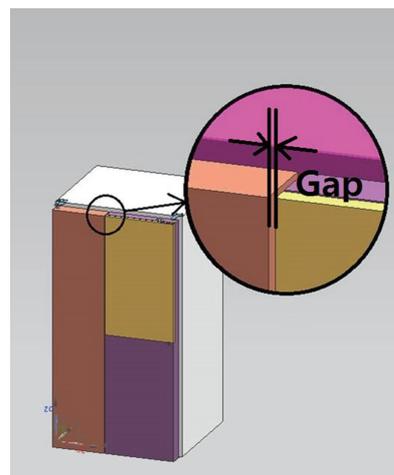


Fig. 1 CAD model of refrigerator assembly

정하는 공차설계 과정을 보인다. 5장에서는 앞의 결과를 정리하여 본 논문의 결론을 도출한다.

2. 대상 모델

2.1 조립체와 부품의 CAD 모델

본 논문에서 고려하는 단순화된 냉장고의 전체 CAD 모델이 Fig. 1에 나타나 있다. 이 모델에는 3개의 도어, 즉 좌측의 냉동칸 도어(Door_L), 우측의 냉장칸 도어(Door_R), 홈바(home bar) 도어(Door_HB)가 달려 있다. Fig. 1에는 본 논문의 관심 대상인 갭과 단차 중에서 갭의 확대된 모습이 나타나 있는데, 이는 시임의 위쪽에서는 좌측 냉동칸 도어(Door_L)와 우측 홈바 도어(Door_HB) 사이, 아래쪽에서는 좌측 냉동칸 도어(Door_L)와 우측 냉장칸 도어(Door_R) 사이의 간격으로 정의된다.

Fig. 1의 냉장고 모델은 총 10개의 부품으로 구성되는데, 이 부품들을 좌측 냉동칸 도어 쪽과 우측 냉장칸 도어 쪽으로 나누어 각각 Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)에 나타내었다. Fig. 2의 직선들은 부품들의 조립 관계 및 연결되는 부위를 나타내고 있다. Fig. 2(b)에서 Hinge_HB_L는 직육면체에 핀이 달려 있는 형태로서 홈바 도어의 아래 쪽 힌지 역할을 하며, 냉장칸 도어의 직육면체 형 홈에 끼워져 조립된다.

2.2 조립 순서 및 DFC 분석

Fig. 2에서 부품 사이의 조립 관계를 직선으로 연결하여 표시하였지만, 공차해석에 있어서는 조

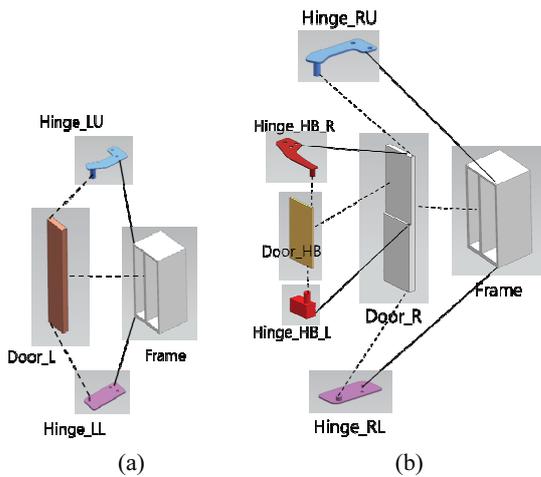


Fig. 2 Parts (a) of left-hand side, and (b) of right-hand side of the refrigerator model

Table 1 Assembly sequence assumed

Sequence	Object	Target
1	Hinge_LL	Frame
2	Door_L	Hinge_LL
3	Hinge_LU	Door_L
4	Hinge_RL	Frame
5	Door_R	Hinge_RL
6	Hinge_RU	Door_R
7	Hinge_HB_L	Door_R
8	Door_HB	Hinge_HB_L
9	Hinge_HB_U	Door_HB

립공정의 순서도 중요하다. 본 논문에서는 부품들 사이의 조립 순서를 Table 1과 같이 가정한다. Table 1에서 각 행은 대상(object) 부품이 표적(target) 부품에 조립되는 공정을 의미하여, 총 9개의 조립공정으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 1 및 Fig. 2의 그림과 Table 1의 조립 순서를 고려하여 부품들 사이의 Datum Flow Chain (DFC)를 그리면 Fig. 3과 같다. DFC는, 부품들이 조립되는 과정을 각 부품의 자유도가 구속되는 일련의 과정으로 보고, 어느 부품이 어느 부품의 자유도 몇 개를 구속하는 지 그 관계를 도식적으로 보여준다. 즉, 자유도를 구속하는 부품 간 관계(mate라고 함)를 자유도 구속 방향의 실선 화살표로 표시하고, 화살표 위에 구속되는 자유도의 개수를 표시한다. 한편, 부품들이 닿아 있기는 하지만 자

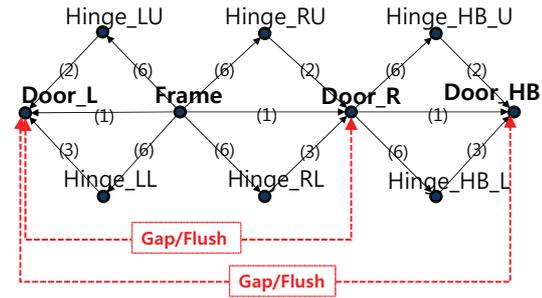


Fig. 3 Datum flow chain for the refrigerator model

유도를 구속하지 않고 단지 지지 또는 고정하는 경우를 접촉(contact)이라 하고 점선으로 표시한다.

Fig. 3에서 보인 바와 같이 프레임(Frame)이 조립의 시작점이 되는 뿌리 노드(root node) 역할을 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3의 DFC는 프레임에서 시작하여 왼쪽으로 냉동칸 도어의 조립을, 오른쪽으로 냉장칸 도어 및 홉바 도어의 조립을 보여 주고 있다. DFC에서 볼 수 있듯이 본 논문의 냉장고 모델은 동일한 조립관계가 3차례 반복된 것으로 볼 수 있다. 즉 프레임(Frame)에 냉동칸 도어(Door_L)가 조립되는 공정과 동일한 공정을 통해 프레임(Frame)에 냉장칸 도어(Door_R)가 조립되고, 또 한 번의 동일한 공정을 통해 냉장칸 도어(Door_R)에 홉바 도어(Door_HB)가 조립되는 것을 알 수 있다. 또, Fig. 3에는 본 연구의 관심 대상인 갭과 단차를 결정하는 부품들이 점선 화살표로 연결되어 있다.

3. 공차해석 모델링

3.1 조립특징형상 및 공차 입력

Fig. 3의 DFC에 나타난 모든 부품의 조립 관계를 공차해석 프로그램에 모델링 해 넣어야 하는데, 이를 위해서는 부품 간의 조립에 관여하는 특징형상(feature), 즉 조립특징형상(assembly feature)들을 정의해야 한다.

상기한 바와 같이 본 냉장고 모델은 동일한 유형의 조립공정이 3회 반복되는 것이므로, 1회의 조립공정, 즉 프레임(Frame)에 냉동칸 도어(Door_L)가 조립되는 공정에 대해서만 관련 조립특징형상과 구속되는 자유도의 개수를 정리하면 Table 2와 같다. 나머지 조립 공정의 조립특징형상도 유사하게 모델링 하였다. Table 2에서 특기할 것 중 하나는, 프레임의 좌측 도어용 락(lock)이 냉동칸 도어

Table 2 Constraining and constrained assembly features and number of constrained degrees of freedom

Constraining		Constrained		# DOF
Part	Feature	Part	Feature	
Frame	Plane (top)	Hinge_LU	Plane (bottom)	3
	2 pins (on top plane)		2 holes	3
	Plane (bottom)	Hinge_LL	Plane (top)	3
	2 pins (on bottom plane)		2 holes	3
	Point (left door lock)	Door_L	Point (door hook)	1
Hinge_LU	Pin	Door_L	Hole (upper)	2
Hinge_LL	Pin	Door_L	Hole (lower)	2
	Point (vertical stopper)	Door_L	Plane (bottom)	1

Table 3 Tolerances imposed on selected features

Part	Feature	Tolerance type	Tolerance value [mm]	Datum
Hinge_LL	2 holes	Size	±0.1	
		Pos	0.2	A B C
		Perp	0.1	A
Hinge_LU	2 holes	Size	±0.1	
		Pos	0.2	A B C
		Perp	0.1	A
Hinge_RL	2 holes	Size	±0.1	
		Pos	0.2	A B C
		Perp	0.1	A
Hinge_RU	2 holes	Size	±0.1	
		Pos	0.2	A B C
		Perp	0.1	A
Door_R	2 slots (for Hinge_HB_L)	Size	±0.1	
		Pos	0.1	A B C
		Ang	0.0	A B C
	2 points	Pos	1.0	A B C
Door_HB	2 holes	Size	±0.1	
		Pos	0.2	A B C
		Ang	0.1	A B C
Door_L	1 point	Pos	1.0	A B C
Frame	2 points	Pos	1.0	A B C

의 후크(hook)를 구속하는 관계를 나타내기 위해 락과 후크를 각각 하나의 점(point)으로 모델링 하였다. 또, 아래 쪽 힌지(Hinge_LL)의 스

토퍼(stopper)가 냉동칸 도어의 아래 면과 닿아 수직 방향의 위치를 잡아 주는 것도 역시 각각 하나의 점으로 모델링 하였다.

냉장고 모델을 위해 정의된 모든 조립특징형상에는 공차가 입력되었는데, 이 중에서 중요한 것들만 정리하면 Table 3과 같다. 많은 국내 제조업체들은 아직 좌표공차를 주로 사용하고 있으나, 본 연구에서는 보다 합리적인 공차인 기하공차를 사용하였으며 Pos는 위치도(position), Per은 직각도(perpendicularity), Ang는 경사도(angularity)를 의미한다. 공차 값은 적절하다고 생각되는 임의의 값으로 정하였으며, 확률분포의 유형은 정규분포로 하였다. Table 3에서 데이텀(datum) A, B, C는 각각 1차, 2차, 3차 데이텀을 나타내며, 이들은 각 부품에서 직교하는 평면으로 정의된다. Table 3에서 냉장칸문(Door_R)의 2개 슬롯(slot)은 Fig. 2(b)에 보인 홈바 도어의 아래쪽 힌지(Hinge_HB_L)가 조립되는 직육면체 홈을 나타내는 것이다.

3.2 조립 공정 모델링

상기한 바와 같이 동일한 유형의 조립이 3회 반복되는 문제이므로, 냉동칸 도어의 조립 공정을 예로 들어 그 모델링 과정을 설명한다. 냉동칸 도어를 프레임에 조립하는 데에는 두 종류의 조립공정이 포함되어 있다. 한 가지는 위 아래 2개의 힌지를 프레임의 위 아래 면에 조립하는 공정이고, 또 다른 하나는 냉동칸 도어를 힌지에 조립하는 공정이다.

전자는 2개의 핀(pin)과 구멍(hole)을 이용한 조립으로서, Fig. 2(a)의 실선 연결에 해당한다. 본 연구에서 사용한 지멘스(Siemens)사의 공차해석 프로그램 VA(Variation Analysis)⁹에서 이러한 조립공정을 모델링 하려면, 힌지 평면과 프레임의 평면 간 구속 및 2개의 핀과 2개의 구멍 간의 구속을 부과한다(Table 2 참조). 이 경우 핀과 구멍의 크기 차이로 인해 플로트(float)가 발생할 수 있다.

한편 위 후자에 해당하는 공정은 힌지 2개로 이루어지는 축과 도어의 회전 축을 일치시킨 후 도어의 후크와 프레임의 락에 의해 조립이 완성되는 공정으로서, Fig. 2(a)의 점선 연결 부분에 해당한다. 이 조립 공정의 모델링을 위해서는, 도어의 위 아래에서 핀과 구멍의 구속을 부과한 후, 힌지 축 상에서의 도어 위치를 수직 스토퍼로 정의하고, 마지막으로 도어의 후크와 프레임의 락에 의한 구속을 추가한다(Table 2 참조).

3.3 측정치 정의

공차해석 전에 마지막으로 하여야 하는 작업은 측정 값을 정의하는 것인데, 본 논문에서는 전면 중앙의 수직 시임이 갖는 갭과 단차가 관심의 대상이므로 이를 평가할 수 있도록 측정 값을 정의한다. 즉, 좌측 냉동칸 도어의 모서리를 따라 11개 점을 등간격으로 정하고, 이에 상응하는 우측 홈바 도어 또는 냉장칸 도어의 모서리 점 11개를 정한 후, 상응하는 점 쌍의 거리를 갭의 방향 및 단차의 방향으로 측정하도록 정의한다. 갭의 공칭값은 8.0 mm, 단차의 공칭값은 0이고, 시임의 모든 점에서 갭과 단차의 허용 값은 둘 다 공칭값 ± 1.0 mm로 가정하였다.

또한 갭의 심미성을 나타낼 수 있는 측정치를 추가로 도입하는데 이는 Lee¹의 연구에서 그 중요성이 밝혀진 갭의 불균일성의 척도이다. 여기서 갭의 불균일성이라 함은 갭을 이루는 두 면의 평행도가 완벽하지 않아 갭이 점차로 커지거나 작아져서 심미성이 떨어지는 것을 의미한다. 불균일 갭의 한 예를 도시하면 Fig. 4(a)와 같은데, 이는 두 면의 방향 차이로 인한 것으로서 비록 모든 점에서의 갭이 만족스러운 범위(점선 사이 영역)에 있다 하더라도 여전히 나타날 수 있는 현상이다. 이를 정량적으로 표현하기 위해, Fig. 4(b)와 같이 갭을 이루는 두 평면의 수직 벡터가 이루는 각 θ 를 측정하는 방법을 사용한다. 즉, Fig. 4(b)에 정의된 각 θ 가 180도에서 얼마나 벗어나는 지가 갭의 불균일성을 나타내는 척도가 된다. 본 연구의 대상인 냉장고의 상부에서는 냉동칸 도어와 홈바 도어가 갭을 이루므로 해당되는 두 면의 방향 차이 θ_u 로, 하부에서는 냉동칸 도어와 냉장칸 도어가 갭을 이루므로 해당되는 두 면의 방향 차이 θ_b 를 측정치에 포함시켜 갭의 불균일성을 측정하였다. 본 논문에서 사용한 θ 의 공칭값은 180° 이고 $\pm 0.05^\circ$ 까지 허용하는 것으로 가정하였다. 0.05°라는 각도 차이는 높이 1.7 m의 냉장고 전체에 걸쳐 1.5 mm의 갭 차이를 낼 수 있는 정도로 많은 사람에게 심미성의 저하를 야기할 수 있는 값이다.

4. 공차해석 결과 및 공차설계

4.1 공차해석 결과

3절과 같이 완성된 공차해석 모델을 사용하여 VA[®]로 공차해석을 수행한 결과, 대표적인 측정치

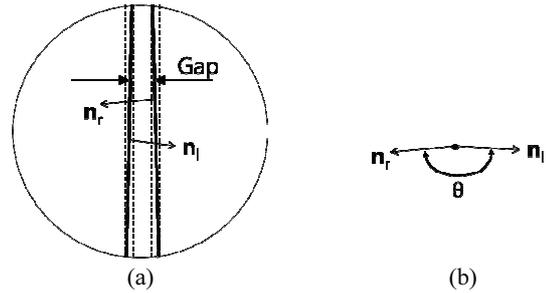


Fig. 4 (a) An example of non-uniform gap, and (b) definition of the angle θ

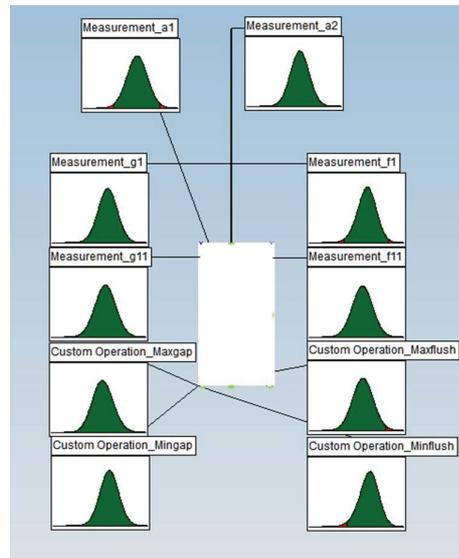


Fig. 5 Results of tolerance analysis in VA[®]

의 분포가 Fig. 5와 같이 나타났다. 본 논문에서는 편의상, 11개 측정점에서의 갭과 단차를 모두 고려하는 대신, 몬테카를로 시뮬레이션 매 회에서의 갭의 최대값 및 최소값(max gap, min gap), 단차의 최대값 및 최소값(max flush, min flush)을 고려한다. 모든 입력 공차가 정규분포이므로, Fig. 5의 측정값 역시 모두 정규분포로 나타났다.

이들 측정치의 $\pm 3\sigma$ (σ : 표준편차) 범위, 즉 전체의 99.73%에 해당하는 범위를 열거하면 Table 4와 같다. Table 4의 마지막 칸에는 각 측정치에 대해 요구되는 사양 조건이 나타나 있다. 여기서 갭과 단차의 최대값과 최소값 범위의 중앙값은 각각 8 mm와 0 mm가 아닌데 이는 이들이 최대값과 최소값이기 때문이다. 11개 점에서 측정된 갭과 단차의 측정치 하나 하나의 평균값은 공칭값과 일치한다.

Table 4 Measurements for initial tolerances

Measurement	Estimated range [mm or °]	Specification limit [mm or °]
Max gap	7.460 ~ 9.039	< 9.0
Min gap	7.011 ~ 8.577	> 7.0
Max flush	-0.9064 ~ 1.298	< 1.0
Min flush	-1.468 ~ 0.8529	> -1.0
θ_a	179.934 ~ 180.067	179.95 ~ 180.05
θ_b	179.959 ~ 180.042	

Table 4로부터 갭은 최대값이 9.039 mm로서 허용치 9.0 mm보다 약간 크지만, 단차는 그 최대값이 1.298 mm로 허용치 1.0 mm를 많이 초과하고 있으며 최소값도 -1.468 mm로 허용치 -1.0 mm를 많이 초과하고 있음을 알 수 있다. 또한, 각도 측정치 θ_a , θ_b 중에서 후자, 즉 냉동칸 도어와 냉장칸 도어의 방향 차이는 허용 범위 내에 있지만 전자, 즉 냉동칸 도어와 홉바 도어의 방향 차이는 허용 범위를 초과하고 있음을 알 수 있다.

4.2 공차설계 변경 (1 차 공차 조정)

냉동칸-홉바 갭의 불균일성과 단차가 허용치를 넘었으므로, 부품의 공차를 조정하여 이들이 허용 범위 내에 들어오도록 하여야 한다. 이를 위해서는 수 많은 공차 중에서 어느 공차를 조정하는 것이 효과적인지를 알아야 하는데, 이에 관해 유용한 정보를 제공해 주는 것이 VA®의 HLM 해석 결과이다. HLM 해석을 수행하면 각 측정치의 분산에 기여한 공차들을 기여도(%) 순서로 알려준다. 따라서 어떤 측정치의 분산을 줄이고 싶으면, 그 측정치에 대한 HLM 해석 결과에서 기여도가 큰 공차부터 조정하면 된다.

본 연구에서는 단차의 최대 및 최소값과 θ_a 의 분산을 줄이기 위해 1차 공차 조정을 시도하였다. 우선 단차의 최대값에 대한 HLM 결과(Table 5)를 보면, 각 도어가 닫힐 때 고정되는 후크와 락의 위치를 결정하는 특징형상 6개가 기여도 상위를 모두 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 단차의 최소값에 대한 HLM 결과도 마찬가지이다.

이번에는 θ_a 의 HLM 해석 결과(Table 6)를 보면, 홉바 도어나 각종 힌지들의 플롯으로 인한 분산이 주된 원인으로 나타났다. 플롯을 줄이려면 핀과 구멍의 공칭치수 차이를 줄이거나 핀 및 구멍의 크기 공차를 줄여야 한다.

따라서, 1차 공차 조정에서는 우선 Table 5에 열

Table 5 Tolerances contributing to variance of maximum flush

Part	Feature	Tolerance	% contribution
Frame	Lock_L	Position 1.0	20.5
Door_L	Hook_L	Position 1.0	20.5
Frame	Lock_R	Position 1.0	20.5
Door_R	Hook_R	Position 1.0	20.5
Door_R	Lock	Position 1.0	6.0
Door_HB	Hook	Position 1.0	6.0

Table 6 Tolerances contributing to variance of θ_a

Part	Feature	Tolerance	% contribution
Door_HB	Holes	Float	37.7
Hinge_LL	Holes	Float	8.8
Hinge_HB_L	Tabs	Float	6.9
Hinge_LU	Holes	Float	5.2
Hinge_RU	Holes	Float	5.2
Hinge_RL	Holes	Float	4.3

Table 7 Measurements for adjusted tolerances

Measurement	Estimated range [mm or °]	Specification limit [mm or °]
Max gap	7.402 ~ 8.985	< 9.0
Min gap	7.035 ~ 8.566	> 7.0
Max flush	-0.5338 ~ 0.8398	< 1.0
Min flush	-0.9807 ~ 0.5051	> -1.0
θ_a	179.941 ~ 180.061	179.95 ~ 180.05
θ_b	179.959 ~ 180.042	

거된 6개 락의 위치도를 모두 1.0 mm에서 0.6 mm로 줄였다. 또, Table 6을 참조하여, 홉바 도어의 위아래 구멍의 공칭 크기를 0.2 mm만큼 줄이고 이들 구멍의 위치도를 0.2 mm에서 0.15 mm로 줄임으로써 홉바 도어의 플롯을 감소시키기로 하였다. 위의 공차 감소량은, 공차를 줄이면 비용이 증가하므로 공차 감소폭을 적게 하려고 노력하는 과정에서 결정된 값들이다.

4.3 공차 1 차 조정에 따른 공차해석 결과

이와 같이 공차를 일부 조정한 후 얻어진 공차 해석 결과는 Table 7과 같다. 이제 갭과 단차는 원하는 범위 내에 들어 왔으나, θ_a 는 아직 원하는 범위를 초과하고 있음을 알 수 있다.

4.4 공차설계 추가 변경 (2 차 공차 조정)

냉동칸 도어와 홉바 도어가 이루는 갭의 불균

Table 8 Tolerances contributing to variance of angle θ_a after first adjustment of tolerances

Part	Feature	Tolerance	% contribution
Door_HB	Holes	Float	23.8
Hinge_LL	Holes	Float	10.8
Hinge_HB_L	Tabs	Float	8.6
Hinge_LU	Holes	Float	6.5
Hinge_RU	Holes	Float	6.5
Hinge_RL	Holes	Float	5.3

일성, 즉 θ_a 범위의 최대값이 허용 범위를 약간 넘고 있으므로, 이를 줄이기 위한 최종 공차 조정을 시도한다. 1차 조정된 공차에 근거한 HLM 해석 결과를 살펴보면 Table 8과 같다.

Table 8을 Table 6과 비교해 보면, 홉바 도어의 플롯과 홉바 아래 힌지의 플롯을 줄인 1차 공차조정 결과로 홉바 도어의 플롯의 기여도가 (여전히 1위이지만) 크게 줄었고, 나머지 공차들의 기여도는 조금씩 증가했음을 알 수 있다.

2차 공차 조정에서도 공차 중 가장 중요한 것으로 나타난 홉바 도어의 플롯을 줄이기 위해, 홉바 도어 위, 아래 구멍의 공칭크기를 0.1 mm만큼 줄이고 구멍의 위치도를 0.15 mm에서 0.1 mm로, 경사도는 0.1 mm에서 0.05 mm로 줄였다. 여기서 구멍의 크기만 많이 줄이면, 시뮬레이션 중에 조립에 실패하는 경우가 너무 많아진다. 따라서 구멍 크기는 0.1 mm만큼만 줄이고 동시에 구멍의 위치도와 경사도도 함께 줄여야 했다.

홉바 위 아래 구멍에 대한 관리만으로는 모든 측정치가 허용 범위 내에 들어오도록 할 수 없어서, Table 8의 2위~6위의 다른 공차와 공칭치수도 조정하였다. 우선, 3위인 홉바 아래 쪽 힌지의 플롯을 줄이기 위해, 이 힌지가 놓이는 냉장칸 도어의 슬롯(slot)의 공칭 크기를 0.3 mm만큼 줄였다. 그 다음으로는 Table 8에서 2, 4, 5, 6위를 차지한 4개 힌지들의 플롯을 줄이기 위해 이들의 구멍의 크기와 공차를 조정하였다. 구체적으로는, (1) Hinge_LL과 Hinge_RL의 구멍 치수를 8.2 ± 0.1 mm에서 $8.1 + 0.1 / - 0.0$ mm로, 위치공차를 0.2 mm에서 0.1 mm로, 직각도 공차를 0.1 mm에서 0.05 mm로 조정하였고, (2) Hinge_LU와 Hinge_RU도 구멍 치수를 8.7 ± 0.1 mm에서 $8.6 + 0.1 / - 0.0$ mm로, 위치공차를 0.2 mm에서 0.1 mm로, 직각도 공차를 0.1 mm에서 0.05 mm로 조정하였다.

즉, 1차 공차 조정으로 충분하지 않았으므로 할

Table 9 Measurements for finalized tolerances

Measurement	Estimated range [mm or °]	Specification limit [mm or °]
Max gap	7.572 ~ 8.807	< 9.0
Min gap	7.129 ~ 8.472	> 7.0
Max flush	-0.5373 ~ 0.8309	< 1.0
Min flush	-0.9644 ~ 0.5092	> -1.0
θ_a	179.953 ~ 180.048	179.95 ~ 180.05
θ_b	179.969 ~ 180.032	

수 없이 추가적으로 공차를 감소시킨 것이며, 이는 당연히 비용 증가를 유발할 것이다. 그러나, 본 논문에서는 다루지 않았지만 상대적으로 덜 중요한 공차는 늘일 수 있으므로, 중요 공차의 감소로 인한 비용 증가를 어느 정도 보상할 수 있을 것으로 예측한다.

4.5 공차 2 차 조정에 따른 공차해석 결과

공차를 2차로 조정한 후 수행한 공차해석의 결과를 Table 9에 나타내었다. 이제 모든 갭과 단차의 크기 및 갭의 균일성 척도(θ_a 및 θ_b)가 모두 허용 범위에 들어 왔음을 알 수 있다. 따라서 2회의 공차 조정을 통해 냉장고 중앙의 갭과 단차가 모두 기능과 심미성을 위해 설정되었던 범위(3.3절) 안에 머물게 되었다.

5. 결론

본 논문에서는 냉동칸, 냉장칸, 홉바를 갖춘 냉장고의 전면 중앙에 상하로 놓인 시임의 갭(gap)과 단차(flush)의 기능과 심미성을 위한 공차설계 방법을 제시하였다. 공차설계를 위해서는 반복적인 공차해석이 필요하므로, 우선 공차해석을 위해 주요 부품들의 상호 구속관계를 DFC(Datum Flow Chain) 기법을 통해 분석하였다. 다음으로는, DFC 분석 결과를 바탕으로 상용 공차해석 프로그램(지멘스 VA[®])에 각 부품의 조립특징형상(assembly features) 및 공차 값을 입력하여 공차해석을 수행하였다.

공차해석의 결과로는, 시임을 따라 11개 점 쌍에서의 갭과 단차 및 그들의 최대값과 최소값, 그리고 시임을 이루는 2개 도어의 옆면의 방향 차이를 각도로 측정하였다. 이와 같이 두 평면 사이의 각도 차이를 측정하는 것은, 갭이 시임 전체에 걸쳐 허용 범위 내에 있더라도 점점 커지거나 작아지면 심미성이 떨어진다는 기존의 연구 결과에 따

른 것으로서 갭 불균일성의 척도이다. 본 연구에서는 이들 세 가지 측정치, 즉 갭의 크기, 단차의 크기, 시임 평면간 각도 차이가 허용 범위 내에 들어오는 지를 살펴보고, 만족스럽지 않은 경우에는 공차를 일부 조정한 후 공차해석을 다시 수행하는 반복적인 공차설계 과정을 보였다. 본 논문에서 살펴 본 냉장고 모델의 경우, 냉장고 도어 사이의 단차에 있어서는 락(lock) 및 후크(hook)의 공차가 중요하고, 갭 크기와 그 균일성에 있어서는 다양한 핀-구멍 조립부의 플로트(float)가 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또 갭의 균일성을 보장하여 심미성을 높이기 위해서는 갭 크기만 관리하던 기존의 경우보다 더 정밀한 공차 관리가 필요함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 단순화된 냉장고 도어 시스템 모델을 대상으로 하여 냉장고 전면의 시임이 갖는 갭과 단차를 다루었지만, 동일한 방법이 유사한 문제에도 적용될 수 있다. 따라서 본 논문에서 설명한 방법론을 다양한 분야의 다양한 제품에 적용한다면, 제품의 기능과 심미 품질을 향상시켜 국내 제조업의 경쟁력 향상에 기여할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2011 홍익대학교 학술연구진흥비의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

1. Lee, H., Lee, R., and Yim, H., "A Preliminary Study for Quantifying Appearance Assessment of Assembly Seam Gaps – Case Study of Drawer Assembly," *Journal of Korean Society of CAD/CAM*, Vol. 16, No. 5, pp. 380-389, 2011.
2. Wickman, C. and Soderberg, R., "Defining Quality Appearance Index Weights by Combining VR and CAT Technologies," *Proc. of ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 1215-1224, 2001.
3. Soderberg, R. and Lindkvist, L., "Automated Seam Variation and Stability Analysis for Automotive Body Design," *Geometric Product Specification and Verification: Integration of Functionality*, pp. 255-

264, 2003.

4. Wickman, C. and Soderberg, R., "Comparison of Non-Nominal Geometry Models Represented in Physical versus Virtual Environments," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 171-177, 2004.
5. Wickman, C. and Soderberg, R., "Perception of Gap and Flush in Virtual Environments," *Journal of Engineering Design*, Vol. 18, No. 2, pp. 175-193, 2007.
6. Soderberg, R. and Lindkvist, L., "Stability and Seam Variation Analysis for Automotive Body Design," *Journal of Engineering Design*, Vol. 13, No. 2, pp. 173-187, 2002.
7. Stoll, T., Stockinger, A., and Wartzack, S., "Geometric Manipulation Method for Evaluation of Aesthetic Quality in Early Design Phases," *Proc. of 18th International Conference on Engineering Design*, Vol. 9, 2011,
8. Whitney, D. E., "Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development," Oxford University Press, pp. 211-252, 2004.
9. SIEMENS, "Variation Analysis (VSA)," https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/quality_mgmt/variation_analyst/index.shtml#lightview-close.html (Accessed 18 Dec. 2013)