한국 CAD/CAM 학회 논문집
제 16권 제 5호 2011년 10월 pp. 380-389

조립품 심(seam)의 갭(gap)에 대한 정량적 심미평가의 기초연구 – 서랍장을 대상으로 한 사례연구

이해승*, 이래우*, 임현준**

A Preliminary Study for Quantifying Appearance Assessment of Assembly Seam Gaps – Case Study of Drawer Assembly

Haeseung Lee*, Raewoo Lee* and Hyunjune Yim**

ABSTRACT

Esthetic appeal of a product is often affected by the appearance quality of seams forming between components of the product. The appearance quality of seams is, however, assessed in a very subjective and qualitative manner that heavily depends on the evaluator. This paper presents a preliminary study to quantify such assessment by formulating a quantitative index which is a linear function of the seam gap sizes, seam gap ranges, and the size uniformity of seam gaps. By considering a highly simplified problem of a drawer system and utilizing subjective assessments by twenty evaluators, the index has been formulated. The validity of this index has been confirmed by observing its behavior with changes of the component tolerances. Also, the utility of this index has been demonstrated through a selective assembly scheme applied to the drawer system problem. Though the index formulated in this study for seam appearance quality may be useful, future studies are necessary to make the model readily applicable to real problems.

Key words : Assembly seam, Seam gap, Appearance quality, Appearance assessment, Tolerance analysis

1. 서 론

모든 조립품에는 부품 사이의 경계선마다 심(seam)이 존재하는데, 심은 제품 외관 또는 심미성에 영향을 미친다. 따라서 심미성이 중요한 제품의 경우에는 심을 정밀하게 관리하여야 한다. 대표적인 예로서 자동차의 문, 엔진 후드, 트렁크 후드, 범퍼 등이 차체와 이루는 심의 크기와 균일성 등은 차량의 심미성에 있어 중요하다.

심의 품질을 좌우하는 측정 가능한 물리량은 심의 갭(gap)과 단차(flush)이다. 갭은 조립된 두 부품의 표면이 이루는 평면상에서 측정한 부품 사이 간격이고, 단차는 그 평면에 수직인 방향으로 (즉, 평면상에서) 측정한 부품 사이 거리이다.

심의 갭과 단차는 제품을 구성하는 부품들의 공차가 누적되어 결정되므로, 심의 품질을 확보하기 위해서는 갭과 단차의 편차(variation)를 예측하면서 부품의 공차설계를 수행해야 한다.

이를 위해서는 부품의 공차가 설정되었을 때 심의 갭과 단차가 어떤 편차를 보일지 예상하는 공차해석(tolerance analysis)이 필요하다. 공차해석은 아주 간단한 문제가 아니면 손 계산으로 할 수 없고, 부품의 치수들을 확률변수로 간주한 후 조립공정을 몬테칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션하는 컴퓨터 프로그램을 사용하여야 한다.

기존의 공차설계[1-6]에서는 심 하나 하나의 갭과 단차에 대해 허용범위를 미리 정해 놓고, 공차 시뮬레이션의 결과로 얻어지는 심의 갭과 단차가 이 범위 내에 있도록 부품의 공차를 결정하고 있다. 여기서, 갭과 단차의 허용범위를 미리 정함에 있어 고려하는 요구조건은 주로 제품의 기계적인 작동과 관련된 기능이다.

*비회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과
**교신저자, 종신회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과
- 논문투고일: 2011. 08. 05
- 논문수정일: 2011. 08. 29
- 심사완료일: 2011. 08. 31

예를 들어, 자동차의 트렁크 문과 차체가 이루는 심이 너무 작으면 트렁크 문을 여닫기 어렵고 너무 크면 빗물이 새어들어 갈 수 있으므로, 이를 고려하여 갭이나 단차의 허용범위를 결정하는 것이다.

그러나 소비재로 분류되는 제품들의 경우에는 제품의 기계적 기능뿐 아니라 심미성이나 인간공학적인 기능도 암묵적으로 고려되는 경우가 있다. 슬라이드형 핸드폰의 경우를 예로 들면, 본체와 슬라이더 사이의 갭이 너무 작으면 부품간 간섭이 일어나 슬라이더를 여닫기 어려워지지만, 그 크기가 너무 큰 경우에는 보기 싫거나 핸드폰이 너무 두꺼워져 사용하기 불편한 문제는 있어도 작동기능에는 별 문제가 없다. 그럼에도 불구하고 갭의 크기에 상한을 두는 것은 심미적 또는 인간공학적, 즉 산업디자인적인 요구조건을 고려한 것이라 볼 수 있다[7].

이와 같이 일부 제품의 경우 심미성까지 고려하여 심의 허용 갭과 단차를 설정하고 있지만, 심 하나 하나의 갭과 단차에 대해서만 허용 범위를 설정하는 기존의 방법으로는 심미적인 성능을 제대로 확보할 수 없다. 이는, 많은 경우에 있어 제품을 바라보는 관찰자의 눈에 여러 개의 심이 동시에 보이고, 이 심들의 크기(정확히는 갭의 크기)가 비슷하지 않으면 심미성이 떨어지기 때문이다[8-9]. 대표적인 예로, 승용차 트렁크 뚜껑의 좌우에 존재하는 심의 갭 크기가 둘 다 허용범위 이내라 하더라도 그 차이가 크면 심미성이 떨어진다. 최근에는 기계 디자인도 비대칭에서 미를 찾는 경우도 있지만 이러한 비대칭 디자인 또한 공차 관리가 되지 않으면 의도했던 형상과 다르게 나타나게 되므로 심미성에 대한 공차 관리는 여전히 필요하다.

따라서 다수의 심을 동시에 고려하는 총체적인 심미 성능에 근거하여 공차설계 기법을 정립할 필요가 있고, 본 논문에서는 이를 위한 기초연구로서 심들의 심미 평가를 정량화하는 기본 모델을 개발하고자 한다.

기존의 국내 문헌에서는 본 주제에 해당되는 연구결과를 찾아볼 수 없지만, 외국의 경우에는 스웨덴 찰머스(Chalmers) 공대에서 관련 연구를 수행한 바 있다[10-14]. 이 그룹의 연구결과 중 본 논문과 가장 밀접한 것을 예로 들면, 공차해석 시뮬레이션 프로그램으로 계산된 자동차 여러 부위의 심을 산업디자이너들이 평가할 수 있도록 하는 가상현실 시스템을 개발한 것이 있다. 그러나 이 방법은 시스템 구축에 많은 비용과 시간이 소요되므로, 본 연구에서는 심미적 평가를 정량적으로 표현하는 수식을 도출한 후 이를 반복적으로 사용하는 현실적인 방안을 개발하고자 한다.

2. 대상문제 정의 및 공차해석 모델링

2.1 대상문제의 정의

상기한 바와 같이 본 연구의 목적은 심의 심미적 평가에 대한 정량적 모델을 처음으로 개발하는 것이므로, 가급적 간단한 형상을 갖는 대상을 고려하기 위해 서류보관용 서랍장 시스템을 그 대상으로 정하였다. 여기서 서랍장 시스템이라 함은 서랍, 서랍이 들어 있는 서랍장, 그리고 서랍을 지지하고 그 움직임을 안내하는 레일, 휠 등의 부품을 모두 합친 시스템을 의미한다. 보통의 서랍장 시스템에는 서랍이 여러 개 들어있지만 서랍 각각이 독립적으로 조립되므로 하나의 서랍만을 연구의 대상으로 하였고, 정면에서 바라본 경우를 상정하여 서랍이 서랍장과 이루는 상하좌우 총 4개 심의 갭만을 평가대상으로 하고 단차는 고려하지 않는다.

Fig. 1에는 본 연구의 대상인 서랍장 시스템의 정면도가 나타나 있는데, 여기서 위쪽 서랍의 경계를 따라 검은 선으로 보이는 4개의 심이 평가 대상이다. 서랍장 시스템은 서랍장 서브어셈블리(subassembly)에 서랍 서브어셈블리가 끼워지는 방식으로 작동된다. Fig.

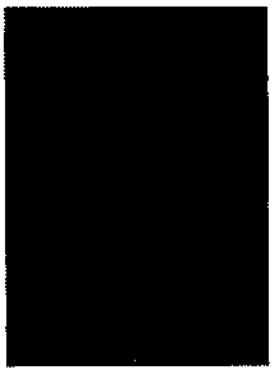


Fig. 1. 본 연구의 대상인 서랍장 시스템의 정면도.

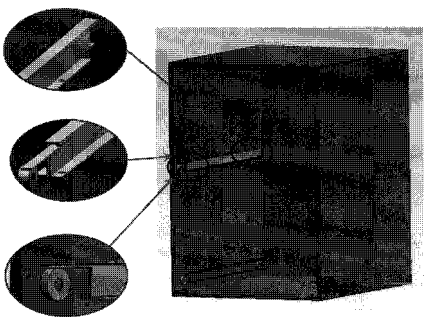


Fig. 2. 서랍장 서브어셈블리와 구성요소.

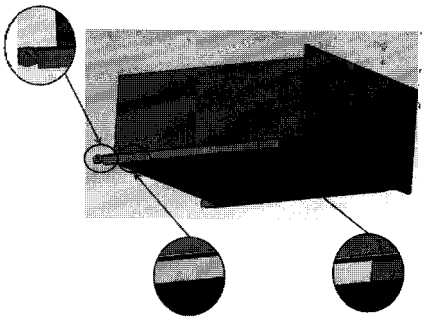


Fig. 3. 서랍 서브어셈블리와 구성요소.

2 및 3에 보인 3D CAD 모델로부터 알 수 있듯이 각 서브어셈블리에는 레일(rail)과 휠(wheel)이 있고, 이들이 서로 맞물리면서 서랍이 서랍장 내에서 미끄러져 수평운동 하도록 설계되어 있다.

2.2 공차해석 모델링

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 공차해석 시뮬레이션 프로그램(Siemens사의 VisVSA 2007) 내에서 모델링된 서랍장 서브어셈블리의 모습을 보여주고 있다. Fig. 4에는 몇 가지 기하공차(geometric dimensioning and tolerancing, GD&T)가 국제표준(ISO TC 213)에 따라 표시되어 있음을 볼 수 있다.

VisVSA에서는 주어진 모든 부품의 공차를 확률변수로 보고, 부품들이 조립되는 공정을 몬테칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션함으로써 측정하고자 하는 조립품의 치수 및 형상의 확률분포를 구할 수 있다.

본 연구의 평가 대상은 Fig. 1에 보인 4개의 심이므로, 시뮬레이션 후 각 심의 여러 점에서 갭을 측정하도록 모델링하였다. 상부(top), 하부(bottom), 좌측(left), 우측(right) 심에서 균일한 간격으로 상하부 심에 6개, 좌우측 심에 4개의 측정점을 선정한 그림이 Fig. 5에 나타나 있다.

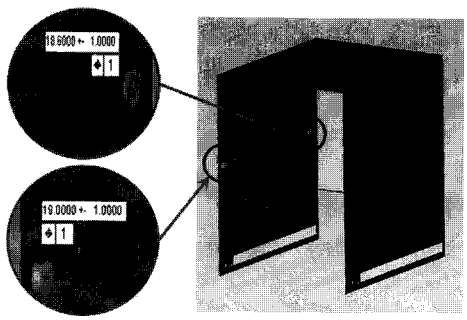


Fig. 4. 공차해석 시뮬레이션 모델링.

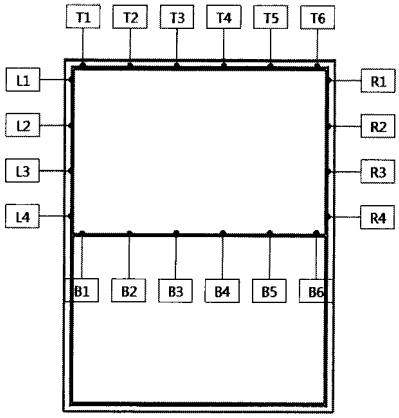


Fig. 5. 갭의 측정점.

3. 심의 심미평가 정식화

3.1 심의 심미평가 요소

Fig. 1의 서랍장 시스템과 같이 동일 평면 내에 존재하는 심의 심미적 평가에 있어서 중요한 요소는 심 각각에 대한 것과 다수의 심으로 이루어지는 심 그룹에 대한 것으로 나눌 수 있다. 먼저 심 각각에 대한 평가에서는 Fig. 6(a) 및 (b)에 예시한 바와 같이 아래 두 개의 기준을 생각할 수 있다.

① 심의 크기(size): 심이 너무 크면 심미성이 떨어지고 너무 작으면 서랍과 서랍장 사이에 간섭이 일어나 작동이 원활하지 않게 되므로 좋지 않다.

② 심 경계선의 평행도(parallelism): 심의 갭이 일정하지 않으면 심미적으로 좋은 평가를 받지 못한다.

그리고, 심 그룹에 대한 평가에서는 Fig. 6(c)에 보인 바와 같이 아래의 기준을 생각할 수 있다.

③ 심의 크기 균일성(uniformity): 동시에 보이는 여러 심의 크기가 너무 다르면 심미적으로 좋은 평가를 받지 못한다.

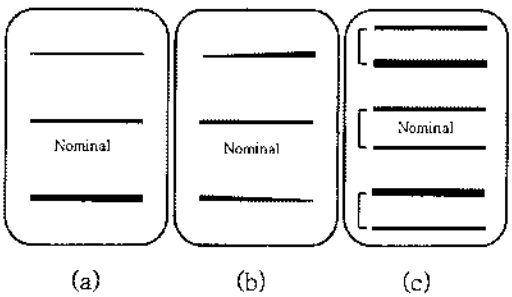


Fig. 6. 심의 심미평가 요소: (a) size, (b) parallelism, (c) uniformity.

3.2 심미평가의 정식화(formulation) - SAQL

본 연구에서는 심에 대한 정량적 심미평가 척도로서 심외관품질손실(SAQL, seam appearance quality loss)이라는 개념을 제안한다. SAQL은 '손실'이라는 이름이 말해 주듯이 값이 클수록 심미품질 또는 심미성이 낮음을 의미하는데, 본 논문에서는 아래와 같이 정의한다.

$$SAQL = aS + bP + cU_h + dU_v + eU_a + f \tag{1}$$

여기서, S, P, U(U_h, U_v, U_a)는 각각 3.1절의 세 가지 평가요소로 인한 외관품질 손실을 갭 측정값으로 표현한 항들로서 다음에 정의될 것이며, a, b, c, d, e는 각 항의 상대적인 중요도를 나타내는 상수로서 4절의 방법으로 결정될 것이다.

갭의 측정은 심을 따라 미리 정해진 유한 개의 점에서 이루어지므로, 이들 측정값을 이용하여 식 (1)의 S, P, U_h, U_v, U_a를 정의하여야 한다. 순서대로 하나씩 정의하고 설명하면 다음과 같다.

식 (1)의 첫 번째 항은 3.1절의 ①번 평가 기준, 즉 갭의 크기(size)에 관한 것으로 S는 다음과 같이 정의한다.

$$S = S_t + S_b + S_l + S_r \tag{2}$$

여기서, S_t, S_b, S_l, S_r은 각각 상부(top), 하부(bottom), 좌측(left), 우측(right) 심의 평균 크기를 나타내는데, 이들의 일반식은 다음과 같다(k = t, b, l, r).

$$S_k = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\left|\left(\frac{1}{M_k}\sum_{j=1}^{M_k} x_{ji}\right) - x_{k0}\right| / x_{k0}\right\} \tag{3}$$

여기서 x_{ji}는 i번째 몬테칼로 시뮬레이션에서 j번째 측정점의 갭 값이고, x_{k0}는 k 심의 공칭 갭 크기이며, M_k는 k 심에 지정된 측정점의 개수, N은 총 시뮬레이션 회수이다. 식 (3)에서 소괄호, 즉 ( ) 안의 값은 i번째 시뮬레이션에서 측정한 갭의 평균값이므로 k 심의 평균 크기라고 볼 수 있고, 중괄호, 즉 { } 안의 값은 심의 크기가 공칭 값으로부터 벗어난 정도를 나타내도록 공칭 값으로 정규화된 값이다. 따라서, N번의 시뮬레이션에 대해 평균을 취한 S_k는 k 심의 크기가 평균적으로 공칭 값으로부터 벗어난 정도를 나타낸다. 그리고, 식 (2)의 S는 네 개 심에서의 S_k 값의 합이므로, 네 개 심 전체에 있어 심의 크기 오차로 인한 외관품질손실을 나타낸다.

식 (1)의 두 번째 항은 3.1절의 ②번 평가 기준, 즉 심의 두 경계선이 보이는 평행도에 관한 것으로서 P는 다음과 같이 정의된다.

$$P = P_t - P_b + P_l + P_r \tag{4}$$

$$P_k = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\left\{\max_j(x_{ji}) - \min_j(x_{ji})\right\} / x_{k0}\right] \tag{5}$$

식 (5)에서 중괄호, 즉 { } 안은 k 심의 측정점들에서 측정된 갭 값의 범위(range)를 나타내고, 대괄호, 즉 [ ] 안은 이 범위를 공칭 갭의 크기로 나눈 것이므로, P_k는 k 심의 양 경계선이 보이는 정규화된 비평행도(non-parallelism)의 시뮬레이션 평균 값이다. 일반적으로는 네 개의 심의 P_k 값이 모두 다를 수 있으므로, SAQL 수식에서 경계선 평행도 P는 상, 하, 좌, 우의 심으로부터 구해진 값, P_t, P_b, P_l, P_r의 합으로 계산한다(식 (4)).

마지막으로, 식 (1)의 세 번째부터 다섯 번째 항은 3.1절의 ③번 요인, 즉 여러 심들을 비교할 때 그들의 크기 차이에 따른 항이다. 두 개 이상의 대상이 동시에 지각 될 때 군화(grouping)의 원리에 따라서 많은 사람들이 방향이 다른 심들보다는 평행한 심들의 크기 차이에 더 민감하다는 점에 착안하여 식 (1)과 같이 U_h, U_v, U_a로 나누어 나타내었다. 즉, U_h는 사람의 수평방향(상하) 심 사이의 크기 차이, U_v는 수직방향(좌우) 심 사이의 크기 차이로 인한 외관 품질의 손실을 의미하며 다음과 같이 정의한다.

$$U_h = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\left|\left(\frac{1}{M_l}\sum_{j=1}^{M_l} x_{ji}\right) - \left(\frac{1}{M_b}\sum_{j=1}^{M_b} x_{ji}\right)\right| / x_{h0}\right\} \tag{6}$$

$$U_v = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\left|\left(\frac{1}{M_l}\sum_{j=1}^{M_l} x_{ji}\right) - \left(\frac{1}{M_r}\sum_{j=1}^{M_r} x_{ji}\right)\right| / x_{v0}\right\} \tag{7}$$

이 두 식에서 중괄호, 즉 { } 안은 i번째 시뮬레이션에서 서로 같은 방향인 심의 크기 차이를 공칭 갭 크기(상하부 수평 심의 경우 x_{h0}, 좌우측 수직 심의 경우 x_{v0})로 정규화한 값이고, 따라서 U_h 및 U_v는 각각 상하 심 사이의 크기 차이 및 좌우 심 사이의 크기 차이의 정도를 시뮬레이션 평균한 값이다. 식 (1)의 U_a 항은 방향과 관계없이 동시에 보이는 모든 심을 대상으로 그 크기 차이로 인해 발생할 수 있는 외관품질의 손실을 나타낸다. 이 항은 특히 같은 방향의 심이 없는 경우에 중요한 의미를 갖는다. 이 항의 U_a는 다음과 같이 시뮬레이션마다 가장 큰 심과 가장 작은 심의 차이를 구해 정규화한 후 시뮬레이션 평균을 내는 방법으로 정의한다.

$$E_a = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\max_k\left(\frac{1}{M_k}\sum_{j=1}^{M_k} x_{ji}\right) - \min_k\left(\frac{1}{M_k}\sum_{j=1}^{M_k} x_{ji}\right)\right\} / x_0 \tag{8}$$

여기서 주목할 것은 지금까지 설명한 식 (1)의 정식화에 깔려있는 암묵적인 가정들이다. 실제로 관찰자가 서랍장을 보면서 행하는 주관적인 심미평가는 3.1절과 같이 평가요소별로 나누어 이루어지는 것이 아니라 한 번에 총체적으로 이루어지는 것이다. 그러나 본 기초연구에서는, 총체적인 심미평가 기제를 분석하면 이들 세 가지 요소로 나누어 볼 수 있고, 더 나아가 이들은 서로 독립적으로 작용한다고 가정하는 것이다. 식 (1)에 내재되어 있는 또 한 가지 가정은 이 세 가지 요소들이 심미평가에 미치는 영향이 선형적이라고 보는 것이다. 즉, 주관적이고 직관적인 심미평가가 실제로는 결코 선형적일 수 없지만, 품질관리가 잘 되어 편차가 작은 영역에서는 선형으로 가정해도 크게 틀리지 않을 것이라고 가정하는 것이다. 정리하면, 본 연구에서는, 서랍장 심의 외관평가에 있어서 이 세 가지 요소가 상호 독립적으로 그리고 선형적으로 작용하는 것으로 가정하며, 이러한 가정은 후속 연구에서 검증되거나 개선되어야 할 것이다.

4. 심의 심미평가식 확정

4.1 SAQL의 계수 결정 방법

심의 심미평가식인 SAQL을 확정하려면 식 (1)의 계수 값들을 구해야 한다. 이 계수들은 3절에서 정의한 외관품질 저하 요소 각각에 대한 보정계수(calibration coefficient)의 의미를 가진다.

SAQL은 주관적인 심미평가를 정량적으로 나타내어 객관화하고자 하는 것이므로, 본 연구에서는 주관적인 심미평가를 먼저 수행한 후 그 결과가 잘 반영되도록 식을 확정한다. 우선, 심의 크기와 평행도 등이 이상적인 값을 갖지 않는 여러 가지 불량 케이스의 서랍장 외관을 다수의 평가자가 평가하도록 하고, 그 평가점수를 주관적인 심미평가 데이터로 활용하였다. 구체적인 방법을 설명하면 다음과 같다.

본 연구에서는 네 개의 심이 모두 공칭치수 1.5 mm의 균일한 갭을 가질 때를 이상적인 경우로 가정하였다. 평가자가 평가할 불량 케이스의 서랍장 외관은 3.1절의 ①, ②, ③ 유형별로 정면도를 작성하여 사용하였는데, Table 1에 정리되어 있다. 심의 크기가 불량인 경우(유형 ①)는 총 4가지로서 심 네 개의 크기가 모두 1.2 mm인 경우, 모두 1.8 mm인 경우, 모두 2.1 mm인 경우, 그리고 모두 2.4 mm인 경우로 하고, 심 경계선의 평행도가 불량인 경우(유형 ②)는 총 3가지로서 4개의 심 모두에서 동일하게 갭의 범위(range)가 0.5 mm인 경우, 1.0 mm인 경우, 그리고 1.5 mm인 경우로 하였다. 또, 심 네 개의 크기가 동일하지 않은 경우(유형 ③)는 수평방향 심이 상이한 두 경우(U_h), 수직방향 심이 상이한 두 경우(U_v), 그리고 상부와 좌측심이 같고 하부와 우측심은 같지만 이 두 쌍이 서로 다른 두 경우(U_a)로 하였다.

Table 1. 심미평가에 사용한 13가지의 불량 케이스

유형		불량 케이스
심의 크기 불량 (S)		S_1 gap=1.2mm; S_2 gap=1.8 mm; S_3 gap=2.1 mm; S_4 gap=2.4 mm
심의 평행도 불량 (P)		P_1 range=0.5 mm; P_2 range=1.0 mm; P_3 range=1.5 mm
크기 균일성 불량 (U)	U_h	U_{h1} gap(상)=1.2 mm (하)=1.8 mm; U_{h2} gap(상)=0.9 mm (하)=2.1 mm
	U_v	U_{v1} gap(좌)=1.8 mm (우)=1.2 mm; U_{v2} gap(좌)=2.1 mm (우)=0.9 mm
	U_a	U_{a1} gap(상,좌)=1.2 mm (하,우)=1.8 mm; U_{a2} gap(상,좌)=0.9 mm (하,우)=2.1 mm

4.2 주관적 평가 점수의 표준화

Table 1에 보인 13개의 불량 케이스에 대한 서랍장 정면도를 실제 크기에 가깝게 인쇄한 후, 이들을 임의 순서로 배치하여 벽에 게시하고 20명의 평가자에게 0~10점 범위의 심미평가 감점점수를 부여하도록 하였다. 물론 평가에 앞서 평가자들에게 설문조사의 목적을 설명하였고, 감점점수 0점에 해당하는 1.5 mm의 균일한 갭 크기를 갖는 이상적인 형상을 보여 주었다. 여기서, 다양한 유형의 불량 케이스를 섞어서 동시에

평가하는 것은 동일 유형 내에서의 평가 뿐 아니라 여러 불량 유형의 상대적인 중요도도 알기 위함이다.

평가 점수는 쉽게 예상할 수 있듯이 평가자마다 크게 다른 분포를 보였다. Table 2에는 20인 중 4인의 평가자가 13가지의 불량케이스에 대해 부여한 점수의 평균과 표준편차를 보였는데, 평가자별로 평점 기준이 크게 다름을 알 수 있다.

Table 2. 심미평가 감점 점수의 예

평가자 / 불량 케이스	1	2	3	4	…	평균	표준편차
S_1	2	3	0	1	…	2.10	1.52
S_2	0	0	1	0	…	1.90	1.37
S_3	1	1	2	0	…	2.05	1.47
S_4	3	2	3	0	…	3.00	1.59
P_1	2	4	7	2	…	3.20	1.58
P_2	7	2	9	3	…	4.15	1.87
P_3	8	8	10	3	…	6.65	2.11
U_{h1}	4	2	7	3	…	3.25	1.55
U_{h2}	5	9	8	4	…	5.45	1.82
U_{v1}	3	1	7	3	…	4.20	1.94
U_{v2}	8	5	7	4	…	4.95	1.96
U_{a1}	5	6	6	5	…	4.60	1.50
U_{a2}	8	7	7	5	…	5.85	1.76
평균	4.31	3.85	5.69	2.54	…		
표준편차	2.78	2.91	3.15	1.81	…		

평가자별 차이가 너무 크므로 이를 이용하여 식 (1)의 SAQL을 확정하는 데는 무리가 있다. 따라서, SAQL 확정 이전에 평가점수들을 표준화하기 위해 다음과 같이 2단계의 점수 표준화를 시행하였다. 여기서 i번째 평가자가 j번째 불량 케이스에 부여한 점수를 y_{ij} (i = 1, 2, ..., 20; j = 1, 2, ..., 13)라고 부른다.

Step 1: 20명 평가자 각각에 대해 13개 불량케이스에 부여한 점수의 평균(m_i)과 표준편차(σ_i)를 구한다.

Step 2: 각 평가점수 y_{ij}를 아래 식에 대입하여 1차 표준화된 점수 z_{ij}를 구한다.

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - m_i}{\sigma_i} \tag{9}$$

Step 3: 모든 원 평가점수(총 260개의 y_{ij})에서 최대값($\max_y$)과 최소값($\min_y$)을 구하고, 모든 1차 표준화된 점수(총 260개의 z_{ij})에서 역시 최대값($\max_z$)과 최소값($\min_z$)을 구한다.

Step 4: 1차 표준화된 점수 z_{ij}를 다음의 식에 대입하여 2차 표준화된 점수 z'_{ij}를 구한다.

$$z'_{ij} = \min_y + (z_{ij} - \min_z) \cdot \left(\frac{\max_y - \min_y}{\max_z - \min_z} \right) \tag{10}$$

위의 과정을 통해 구해진 2차 표준화 점수의 예는 Table 3과 같다. 여기서, 모든 평가자의 평점이 동일한 평균과 표준편차를 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 평가점수의 표준화가 잘 이루어졌음을 의미한다.

Table 3. 2단계로 표준화된 심미평가 감점 점수 예

평가자 / 불량 케이스	1	2	3	4	…	평균	표준편차
S_1	3.05	4.26	0.84	3.00	…	2.83	1.77
S_2	1.43	1.94	1.56	1.76	…	2.73	1.72
S_3	2.24	2.71	2.27	1.76	…	2.93	1.34
S_4	3.85	3.49	2.99	1.76	…	3.98	1.67
P_1	3.05	5.03	5.85	4.24	…	4.00	1.41
P_2	7.09	3.49	7.28	5.49	…	5.06	1.12
P_3	7.90	8.12	7.99	5.49	…	7.91	1.54
U_{h1}	4.66	3.49	5.85	5.49	…	4.11	1.38
U_{h2}	5.47	8.89	6.56	6.73	…	6.49	1.34
U_{v1}	3.85	2.71	5.85	5.49	…	5.16	1.55
U_{v2}	7.90	5.80	5.85	6.73	…	5.92	1.64
U_{a1}	5.47	6.58	5.13	7.97	…	5.64	1.43
U_{a2}	7.90	7.35	5.85	7.97	…	7.08	1.31
평균	4.91	4.91	4.91	4.91	…		
표준편차	2.25	2.25	2.25	2.25	…		

4.3 SAQL의 계수 결정

4.2절에서 설명한 13개의 불량케이스에 대해 식 (1)의 우변을 계산하고, 이를 Table 3의 불량 케이스별 평균 점수와 같게 놓으면, 미지의 상수 a, b, c, d, e, f를 포함하는 13개의 등식이 얻어진다.

이 6원 13차 연립방정식이 (근사적으로) 성립하도록 최소자승법(least squares method)을 이용한 다중선형회귀(multiple linear regression)를 거쳐 6개의 상수를 구하였다. 이 회귀과정에서 R^2 값은 0.914이었다. 이렇게 구해진 상수값들을 식 (1)에 대입하여 얻어진 SAQL의 식은 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{SAQL} = {} & 1.94S + 4.87P + 0.91E_h \\ & - 0.87E_v + 3.37E_a + 2.52 \end{aligned} \tag{11}$$

5. 사례 연구

5.1 사례 연구의 개요

이제 4, 5절에서 도출된 SAQL을 3절에서 정의된 서랍장 시스템의 문제에 적용하는 사례 연구를 수행함으로써 SAQL을 검증하고 그 효용성을 살펴보고자 한다.

두 가지의 사례 연구를 수행하였는데, 첫 번째는 부품의 공차 크기를 동시에 증감시키면서 SAQL 값을 계산하고 그 추이를 분석하여 SAQL 식 자체를 검증하는 것이다. 그리고 두 번째 사례 연구에서는, 심미평가를 개선하기 위한 하나의 방안을 고안하고 SQAL을 통해 그 효과를 확인하였다.

사례 연구를 위해 우선, 본 연구의 대상인 서랍장 문제에서 (실제로는 모든 부품이 공차를 갖지만) Fig. 3에 보인 12개의 공차들, 즉 레일과 휠의 위치공차 및 휠의 크기공차 만 존재하는 것으로 가정하였다. 사례 연구를 위해 수행한 공차해석에서는, 각 공차가 정규분포를 갖는다는 가정 하에 10,000회의 몬테칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 수행하면서 20개의 측정점(3절 참조)에서 갭을 측정하였다. 마지막으로, 공차해석의 결과를 이용하여 3절과 4절에서 정의된 SAQL 값을 케이스별로 구하였다. 다만, 본 연구에서는 서랍과 서랍장의 크기가 완벽한 것으로 가정하였으므로, 4절에서 고려한 첫 번째 종류의 불량케이스(즉, 모든 심이 다 같이 크거나 다 같이 작은 경우)가 발생할 수 없다. 따라서, 본 사례연구에서는 SAQL을 정의한 식 (1)에서 첫 번째 항을 배제하였다.

5.2 사례 연구 1 - SAQL 식의 검증

공차해석 시뮬레이션의 결과를 보여주는 VisVSA 화면의 한 예가 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7은 20개의 측정점 각각에 대해 얻어진 10,000개의 갭 수치의 분포와 그 중 하나를 확대한 모습을 보여주고 있다.

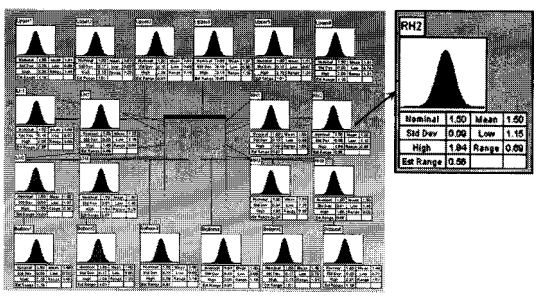


Fig. 7. 공차해석 시뮬레이션 결과 예.

12개의 공차를 모두 0.5 mm, 1.0 mm, 그리고 1.5 mm로 동시에 변경시키면서 시뮬레이션을 수행한 후, 그 결과로부터 SAQL 식의 평행도 감점 항 및 크기 균일성 감점 항의 값 및 SAQL 전체 값을 구하였고 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. 공차 크기별 SAQL 감점 항 비교

감점 항목 / 공차크기(mm)	평행도	크기 균일성			SAQL
	P	U_h	U_v	U_a	
0.5	1.32	0.07	0.11	0.52	4.55
1.0	3.30	0.13	0.30	1.28	7.54
1.5	5.62	0.25	0.45	1.99	10.83

Table 4에 보인 값을 비교해 보면 평행도 감점 항과 크기 균일성 감점 항이 공차의 증가에 따라 증가하였고 이에 따라 SAQL 값도 증가하였음을 알 수 있다. 이는 공차가 증가함에 따라 심미성이 저하되어 SAQL의 각 항이 증가함을 의미하는 것으로, 본 논문에서 고안된 심 외관 평가식이 기본적인 기능을 잘 수행하고 있음을 의미한다.

모든 공차가 1.0 mm인 경우를 기준으로 할 때, 공차를 1.5 mm로 증가시킨 경우 SAQL 식의 항목별 증가 추이를 살펴보면 평행도 감점 항이 약 70% 증가하였고 크기 균일성 중 상하 균일성 감점 항이 약 92%, 좌우 균일성 감점 항이 약 50%, 전체 균일성 감점 항이 약 55% 증가하였다. 한편, 모든 공차를 0.5 mm로 감소시킨 경우에는 평행도 감점 항이 약 60%, 크기 균일성 중 상하 균일성 감점 항이 약 46%, 좌우 균일성 감점 항이 약 63%, 전체 균일성 감점 항이 약 59% 감소하였다. 또한, SAQL 값은 공차의 증감에 따라 각각 44% 증가 및 39% 감소를 보였다.

이와 같은 분석으로부터 공차의 증감과 SAQL의 각 항 및 SAQL 전체 값의 증감은 선형관계를 보이지 않음을 알 수 있다. 각 항의 증감에 비해 SAQL 전체 값의 증감폭이 작은 것은 식 (11)의 마지막 상수항 때문이다.

5.3 사례 연구 2 - SAQL의 감소 방안

심미성을 높이기 위해 공차를 조정하려면, 우선 시뮬레이션 결과를 분석하여 조립품 심의 편차를 일으키는 주범이 되는 공차를 찾는 것이 중요하다. VisVSA를 이용하면 공차들 중에서 조립품 심의 편차에 대한 영향도가 큰 공차를 쉽게 파악할 수 있다. 영

향도란 해당 공차 혹은 공차해석 모델의 한 부분이 전체 측정 갭의 분산에 영향을 주는 정도이므로, 이 값이 큰 공차를 찾아 이를 조정하는 것이 효과적이다. Fig. 8은 공차가 1.0 mm인 경우에 대해 구한 영향도를 보여준다.

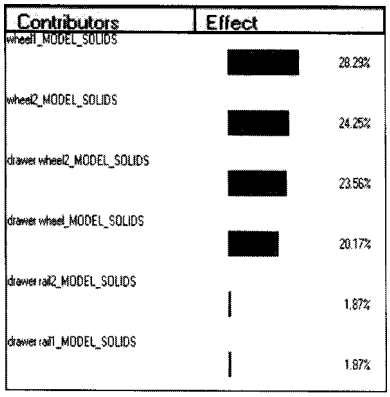


Fig. 8. 영향도 결과.

Fig. 8로부터 서랍장의 휠 2개가 가장 큰 영향도를 보이는 것을 알 수 있고, 따라서 이 두 공차를 조정하는 것이 가장 효과적이다. 그런데, 공차 값을 줄이면 당연히 갭이 작아지고 심미성이 향상되겠지만 생산원가가 함께 증가한다. 따라서 본 연구에서는 두 휠의 공차 크기는 그대로 둔 채 이들의 크기가 같도록 관리하는 방법을 고려해 보고자 한다.

이 방법은 선택조립(selective assembly)이라는 방법에 해당되는데 같은 크기 또는 유사한 크기의 휠끼리 함께 조립하는 것으로서 볼 베이링 제조와 자동차 산업 등에서 널리 사용되고 있다[16]. 이렇게 함으로써, 정면에서 보았을 때 서랍이 회전되는 것을 줄일 수 있어 심의 평행도를 개선할 수 있다. 이 역시 휠을 크기에 따라 선별하는 공정이 추가되므로 조립공정의 비용이 증가되기는 하지만, 비용의 증가폭이 작은 것이 보통이다[17]. Table 5는 사례연구 1에서 기준으로 삼은 경우(Case A: Table 4의 두 번째 경우)와 휠 공차를 동시에 관리하였을 경우(Case B)의 SAQL을 비교하고 있다.

Table 5. 케이스별 SAQL 비교

감점 항목 / Case	평행도	크기 균일성			SAQL
	P	U_h	U_v	U_a	
Case A	3.30	0.13	0.30	1.28	7.54
Case B	0.77	0.21	0.09	0.87	4.46

Table 5를 보면, Case B에서 심의 평행도 감점 항(P), 수직방향 심의 균일성 감점 항(U_v), 전체 크기 균일성 감점 항(U_a), 그리고 전체 SAQL 크기가 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 한편, 가로 심의 크기 균일성 감점 항(U_h)은 다소 증가 하였는데, 이는 상하 심의 평행도가 대폭 개선되면서 상하 심의 평균 크기의 차이는 다소 커지는 효과 때문으로 생각된다.

이 사례연구에서는 선택조립을 위한 추가 비용을 들여 SAQL을 줄일 수 있었다. 만일 SAQL이 Case A의 값(7.54)을 넘지 않는 범위에서 부품의 공차를 늘려 부품 가공비용을 절감함으로써 (선택조립 비용까지 고려한) 총 생산비용이 증가하지 않도록 할 수 있다면, Case A에 비해 생산비용과 심미성에서 모두 향상된 설계를 얻을 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문은 조립품의 심이 공칭크기와 형상을 갖지 않음으로써 제품의 심미적 평가에 미치는 부정적 영향을 정량화하고, 이를 이용하여 공차설계를 수행하기 위한 기초연구이다. 본 기초연구의 대상으로서 가급적 간단한 문제를 고려하기 위해, 서랍과 서랍장 사이에 네 개의 심이 형성되는 서랍장 시스템의 문제를 선정하였다.

선정된 문제에 적용가능하면서 일반성도 가질 수 있도록 심의 외관품질손실(SAQL)이라는 개념을 도입하였다. 이를 위해 외관품질의 손실을 야기하는 심의 형상 인자들이 포함되도록 수식 형태의 SAQL을 정의하였다. 이 과정에서는 문제를 단순화시키기 위해 선형성, 인자 간 독립성 등의 가정을 하였다. 본 연구의 대상인 서랍장 시스템에 맞는 SAQL식을 확정하기 위해, 불량케이스들의 2차원 형상을 20인의 평가자에게 평가하도록 하여 그 평가점수를 이용하였다.

본 연구에서 구한 SAQL 식을 검증하기 위해 서랍장 시스템을 대상으로 사례연구 1을 수행하였다. 공차를 증감하면서 정량적인 SAQL 값의 변동을 관찰함으로써 SAQL 식이 그 기본적인 기능을 잘 수행하는 것을 확인할 수 있었다. 사례연구 2에서는 서랍장 휠의 선택조립을 통해 SAQL을 줄여 심미성을 개선할 수 있음을 보여, SAQL의 효용성을 보였다.

그러나, 본 기초연구에서 개발한 SAQL 식은 향후 연구를 통해 많이 개선되어야 한다. 우선 3절의 가정들이 실제로는 성립하기 어려우므로, 이러한 가정을 제거하면서 실제 경우에 부합하는 SAQL 식을 개발해 나가야 한다. 이를 위해서는 매우 다양한 종류의

심 불량케이스에 대해 더 많은 평가자의 평가점수를 확보하고 그 결과를 고도의 통계기법으로 분석하는 것이 한 방법이 될 것이다.

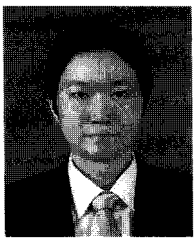
일반적으로 제품의 심미적 평가는 각 사용자의 주관적인 인지 및 감성에 기초하는 것이므로 이를 대신할 수 있는 정량적이고 객관적인 척도를 개발한다는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 조립품의 심에만 대상을 국한 시키면 본 연구에서 고려하고 있는 심의 불량인자 이외에 별 다른 인자가 없어, 상당한 연구 성과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다. 또, 이러한 연구를 통해 보편타당한 정량적 심미평가 척도가 개발된다면, 궁극적으로는 복잡한 형상을 갖는 일반 조립제품의 심미적 품질향상에도 도움이 될 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2010 홍익대학교 학술연구진흥비의 지원으로 이루어졌다.

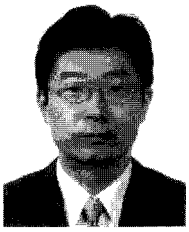
참고문헌

1. Welker, B. R., "Feature Based Variation Modeling of Preliminary Injection Molded Parts," *Master Degree Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, June 1998.
2. Franciosa, P., Gerbino, S. and Patalano, S., "Variational Modeling and Assembly Constraints in Tolerance Analysis of Rigid Part Assemblies: Planar and Cylindrical Features", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, pp. 239-251, 2010.
3. 박정기, "제품개발 단계에서 최적공차 설계를 위한 누적공차 해석 적용." 한국자동차공학회 2005년 추계학술대회논문집, pp. 1743-1752, 2005.
4. Stadzisz, P. C. and Henrioud, J. M., "An Integrated Approach for the Design of Multi-product Assembly Systems," *Computers in Industry*, Vol. 36, pp. 21-29, 1998.
5. Moroni, G. and Polini, W., "Tolerance-based Variations in Solid Modeling," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 3, pp. 345-352, 2003.
6. Ceglarek, D. J. and Shi, J., "Tolerance Analysis for sheet Metal Assembly Using a Beam-Based Model," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, DE-vol. 94, pp. 153-159, 1997
7. 이래우, "슬라이드 형 휴대전화기의 갭 품질 개선을 위한 부품의 공차해석 및 설계," 석사 학위 논문, 홍익대학교, pp. 22-36, 2010.
8. Maxfield, J., Juster, N. P., Dew, P. M., Taylor, S., Fitchie, M., Ion, W. J., Zhao, J. and Thompson, M., "Predicting Product Cosmetic Quality Using Virtual Environment," *Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Baltimore, MD, September 10-13, 2000.
9. Juster, N. P., Fitchie, M., Taylor, S., Dew, P., Maxfield, J. and Zhao, J., "Visualising the Impact of Tolerances on Cosmetic Product Quality," *Proc. International Conference on Engineering Design Glasgow*, August 21-23, 2001.
10. Wickman, C. and Soderberg, R., "Defining Quality Appearance Index Weights by Combining VR and CAT Technologies." *Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Pittsburgh, PA, September 9-12, 2001.
11. 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.
12. 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, pp. 171-177, 2004.
13. Wickman, C. and Soderberg, R., "Perception of Gap and Flush in Virtual Environments," *Journal of Engineering Design*, Vol. 18, pp. 175-193, 2007.
14. 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.
15. 김병어, 이웅직, 디자인 개론, 태학원, pp. 33-34, 1999
16. Ceglarek, D. and Shi, J., "Dimensional Variation Reduction for Automotive Body Assembly," *Journal of Manufacturing Review*, Vol. 8, No. 2, pp. 139-154, 1995
17. Mease, D., Nair, V. N. and Sudjianto, A., "Selective Assembly in Manufacturing: Statistical Issues and Optimal Binning Strategies," *American Statistical Association and the American Society for Quality Technometrics*, Vol. 46, No. 2, pp. 165-175, 2004.



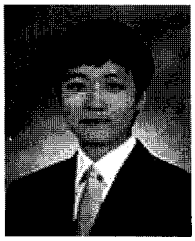
이 해 승

2010년 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 학사
2010년~현재 홍익대학교 기계공학과 석사과정
관심분야: CAD/CAE, 공차해석, Design Methodology



임 현 준

1984년 서울대학교 공과대학 기계공학과 학사
1986년 서울대학교 대학원 기계설계학과 석사
1993년 미국 MIT 대학원 기계공학과 박사
1993년~1995년 미국 MIT 공과대학 기계공학과 Lecturer
1995년~현재 홍익대학교 기계공학과 교수
관심분야: Digital Manufacturing, Tolerance Design, Ultrasonics



이 래 우

2009년 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 학사
2011년 홍익대학교 기계공학과 석사
2011년~현재 현대엔지니어링 품질경영팀 연구원
관심분야: CAD/CAE, 공차해석