Transactions of KSAE, Vol. 24, No. 5, pp.527-537 (2016)

Copyright © 2016 KSAE / 144-05
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.5.527

3-DCS를 이용한 자동차 공기 분배장치의 도아 구동 기구의 공차 적합성 분석에 대한 연구

김 종 수 · 이 대 웅*

한온시스템 연구본부 한국연구개발센터

Study of Tolerance Suitability of Door Operation Mechanism on Mobile Air Handing Unit Using 3-DCS Analysis

Jongsu Kim • Daewoong Lee*

Korea Technical Center, Research Division, Hanon Systems, 95 Sinilseo-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34325, Korea
(Received 17 February 2016 / Revised 2 July 2016 / Accepted 14 July 2016)

Abstract : Recent automakers are trying to be more precise with the dimension check and moving parts to guarantee high quality and satisfy customer requirements. The aim of this paper is to investigate the design tolerance suitability of door operating mechanism linked arms, lever, and cam-shaft in a mobile air handling unit. These parts are complicated because doors, arms, lever and cam-shaft are connected nonlinearly in 3D. The current tolerance analysis method poses problems in design analysis because the moving doors are reasonably suitable for the AHU function. The 3-DCS analysis method provided useful results not only in establishing the inspection criteria for the quality control of products but also in enabling economical production. As a result, the vent door had 1.62° ~ 1.72° and the defrost door had 0.84° ~ 0.9° for the directly connected arms operating-type. For the lever connected arm operating-type, the foot door had 2.0° ~ 2.24° tolerance, while the tolerance values satisfied the air flow volume distribution rate criteria in the AHU. Finally, the results have confirmed the design's tolerance suitability by using 3-DCS analysis at the early design stages. Reliability can be achieved by analyzing accumulated tolerance during the sub-parts assembly process and the moving mechanism linked especially by arms, lever, and cam-shaft.

Key words : Air handling unit(공기 분배장치), Cam mechanism(캠 구동 장치), Dimensional control system(치수 제어 시스템), Monte Carlo method(몬테카를로 방법), Root sum of squares method(통계 공차 해석법), Tolerance analysis(공차 해석)

Nomenclature

T : tolerance
V : variation
μ : standard dimension
σ : standard deviation

*Corresponding author, E-mail: dlee6@hanonsystems.com

1. 서 론

일반적으로 제품을 설계하고, 제조하는 과정에서 발생하는 오류에 대하여 손실비용이 미치는 영향을 따져보면 초기 설계단계에서 수정이 이루어지는 경우가 가장 적은 비용이 소요되며, 양산 단계로까지 흘러간다면, 수정에 필요한 손실 비용은 설계비용, 품질비용, 금형 수정 등 기하급수적으로 증가하게 된다.[1)]

제조업에서 부품 표준화를 위해서는 공차를 포

함한 설계 데이터가 중요하며, 얼마의 공차를 허용할 것인가라는 공차 해석은 설계자의 경험과 노하우(know-how)에 의해 결정되는 경우가 많다. 하지만, 이런 경우 최종 제품을 조합한 다음 품질과 성능이 요구하는 목표치에 미달하게 되는 경우가 종종 발생한다. 따라서 이런 문제점을 해결하고자 하위 제품을 설계할 때 각 부품들의 공차가 누적됨으로써 발생할 수 있는 제품의 품질변화에 대하여 과학적인 해석방법과 최적의 공차 설계 방법의 적용이 필요하다. 공차 해석은 여러 가공부품들이 조립되어 나타나는 누적된 치수 변화량을 의미하며, 설계자는 이러한 공차 해석을 통하여 공차의 변동량에 대한 전체 조립체의 변위 민감도를 알게 되고, 설계목적에 부합한 정확한 공차부여가 가능하게 된다.[2)]

제품을 설계할 때 치수의 허용범위는 공차로 규정하게 되며, 공차는 정밀도에 따라 생산단가를 좌우하며, 품질의 균일화와 부품의 표준화 등 제작과 사용에 있어 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 단위부품에 주어지는 공차는 각각의 부품들이 결합되었을 때를 감안하여 부품의 치수와 상호 연관성을 고려한 전체 어셈블리(assembly) 제품의 공차와 조립에 미치는 영향을 분석하고, 그 결과를 고려하여 적절하게 공차가 주어지도록 해야한다. 즉, 공차가 필요한 값 이상으로 엄격하게 주어지면 과도한 생산비가 들기 때문에 적절하고 합리적인 공차 설정이 요구된다.[3)]

이장용[4,5)]은 트럭의 조향장치와 유니버설 조인트의 스플라인축과 백래쉬(backlash)를 공차 해석한 결과 몬테카를로 방법은 RSS(Root Sum Squares)방법에 비해 확률 이론적으로도 정확도가 높을 뿐만 아니라 주어진 생산조건에 맞게 시뮬레이션을 여러 번 반복할 수 있고 이 결과를 공차부여에 활용할 수 있다는 점에서 가장 현장 적용성이 높다고 하였다.

문성현[6)]은 차량의 쏠림 현상을 발생하는 인자들 중에서 휠 얼라인먼트(wheel alignment)의 좌우 차이의 품질 특성에 대하여 연구를 하여 공차 최적화 프로세서를 개발하여 신차 개발시 최소한의 비용으로 설계에 반영할 수 있도록 하였다.

Wang 등[7)]은 자동차용 에어컨 시스템의 압축기에 적용되는 ECV(External Control Valve)에서 각 부품들의 공차가 압축기의 가변 용량을 제어하는데 미치는 영향에 대하여 몬테카를로 시뮬레이션 기법으로 누적공차를 분석하고, 설계 요구조건을 만족하는지에 대하여 평가하였다.

이와 같이 합리적인 가격에 최상 품질의 제품을 생산하기 위하여 제조 현장에서 최적 공차에 대한 요구는 앞으로 점점 더 많은 요구가 있을 것이다. 차량용 에어컨 시스템에서 공기 분배장치(AHU, Air Handling Unit)는 실내의 쾌적한 조건을 만들기 위해 에어컨과 히터를 이용하여 냉난방을 조절하며, 공기 분배장치 내에는 바람의 방향을 조절하는 도아와 캠 구동장치(cam mechanism) 등 다수의 부품들로 조합되어 승객이 요구하는 안락하고 쾌적한 실내를 유지 할 수 있도록 하는 역할을 한다. 상세하게는 공기 분배장치 내부에 위치한 다수의 도아(doors)는 각각 암(arms)으로 연결되어 있고, 이들 암은 레버(levers)와 캠(cam)으로 기구학으로 연동되어 승객의 요구에 따라 캠을 구동함으로써 토출되는 바람의 방향을 제어하게 된다. 이와 같이 공기 분배장치에 적용되는 캠 구동장치는 최종 도아를 구동하기까지 여러 부품들이 조립되고, 이때 조립 시 누적되는 각 부품들 간의 공차가 제품의 품질을 좌우하게 된다. 따라서 공기 분배장치의 캠 구동 장치와 같이 다수의 구조물이 조립되어 회전을 하는 기구물인 경우 국제적으로 통용되고 있는 기하학적 치수공차방식(GD&T, Geometric Dimensioning and Tolerance)을 적극 도입하고, 완전한 공차분석 모델을 이용하여 조립품의 공차를 분석해야 할 필요성이 있다.

하지만 지금까지 공기 분배장치의 각 부품들이 조립되어 누적되는 공차설계의 경우, 엔지니어의 경험과 기계 가공 기술 수준에 따라 대부분 결정 되고 있는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 공기 분배장치의 캠 구동 장치에 대하여 적절한 공차 설계 방법으로, 3-DCS를 이용하여 공기 분배장치의 누적 공차를 해석하고 현재의 공차 설계 기준과 비교하여, 공차 설계 기준이 타당성이 있는지 확인하였다. 또한 캠 구동부의 각 부품들에 대하여 민감도를 해석하여 허용된 오차범위에서 최대의 공차 값을 가지는 부품을 미리 추정하고, 품질을 만

족하면서 과도하게 엄격하지 않는 공차를 지정함으로써 제품의 품질관리를 위한 검사기준 수립에 유용한 결과를 제공하고, 경제적인 생산이 가능하도록 하였다.

2. 공차 해석 절차

2.1 공차 해석 기법

공차 해석방법에는 크게 다음의 세 가지로 구분할 수 있다. 먼저 최악 조건(worst case) 공차 해석은, 산술적인 계산으로 최대 및 최소값을 추정하는 대수적 계산법으로 누적 공차의 이론적인 극한값을 추정하는 방법이다. 부품의 허용 공차가 최악일 경우에도 기능적 조건을 만족할 수 있도록 공차가 설정되는 기법으로, 제품의 기능보다 필요 이상으로 엄격한 공차관리가 될 수 있어 원가가 상승될 가능성이 있고, 실제 제조공정을 고려하지 못할 수가 있기 때문에 부품 수가 적은 선형 모델(linear model)에만 주로 적용을 하고 있다.[8)]

$$x(\max) = 101 - (39 + 49) = 13$$
$$x(\min) = 99 - (41 + 51) = 7 \quad (1)$$

$$\therefore x = 10 \pm 3 \quad (2)$$

Fig. 1에 최악 조건 공차 해석결과의 대표적인 예를 나타내었다. 식 (1)은 Fig. 1의 최악 조건 공차 해석결과로, 치수 x는 최대 공차를 고려하면 13 mm, 최소 공차일 때는 7 mm로 나타났다. 따라서 최악 조건 공차 해석결과 x는 식 (2)와 같이 10±3 mm 로 표현할 수 있다.

다음은 통계 공차 해석중 하나인 RSS 방법은 최악 조건 공차 해석방법보다 진보된 방법으로, 부품을 제조할 때 부품이 항상 최대치와 최소치로 만들어 지지 않고, 최대 공차 값과 최소 공차 값 사이에 존재한다는 확률을 이용하는 방법이다. 제조 공정상에서 제품들은 공차의 중앙에서 출발한다고 가정을 하고, 정규분포 제품의 공차는 표준 편차(σ) 한계의 ±3배와 같다고 가정하고 분석하는 방법이다.[9)]

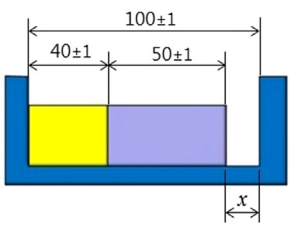


Fig. 1 Tolerance analysis results of worst case method

$$T = 6\sigma, \quad \sigma = \frac{T}{6} \quad (1)$$

$$V = \sigma^2 = \left(\frac{T}{6}\right)^2 \quad (2)$$

$$V(x) = V(A) + V(B) + V(C) \quad (3)$$

여기서,

$$V(x) = \frac{T(x)^2}{36}$$
$$V(A) = \frac{T(A)^2}{36} \quad (4)$$

$$V(B) = \frac{T(B)^2}{36}$$
$$V(C) = \frac{T(C)^2}{36}$$
$$T(x)^2 = 2^2 + 2^2 + 2^2 = 12 \quad (5)$$

$$\therefore x = 10 \pm 1.73 \quad (6)$$

Fig. 2는 RSS 방법에 의한 공차 해석을 보여주고 있다. RSS에서 주어진 공차 값이 적용된 각 부품들의 치수가 정규분포를 이룬다는 가정 하에 치수의 평균값이 기준 치수μ에서 표준편차(σ)의 세 배인 값(μ±3σ) 안에 실제 치수 값의 99.74 %가 포함된다는 확률이론에 근거하고 공차 해석을 하고 있다. 식 (1)과 식 (2)는 각각의 오차와 표준 편차에 대하여 정의를 하였다. Fig. 2의 각 부품들의 표준 편차는 식 (3)으로 나타나며, 공차는 식 (5)와 같다. 따라서 전체 공차를 계산하면 식 (6)이 된다. 이와 같이 RSS방법의 해석 결과 값 식 (6)은 최대조건 공차 해석결과인 식 (2)에 비하여 공차 해석결과가 상당히 줄어든 것을 볼 수 있다.

최악 조건 공차 해석은 각 부품들에 대한 최대, 최소공차를 기준으로 선형적인 공차해석이 이루어지는 반면, RSS법은 부품치수의 변동 값이 정규분포를 따른다는 가정 하에 누적공차를 계산하기 때문에 확률로 계산된 공차의 최대값이 현실적으로 허

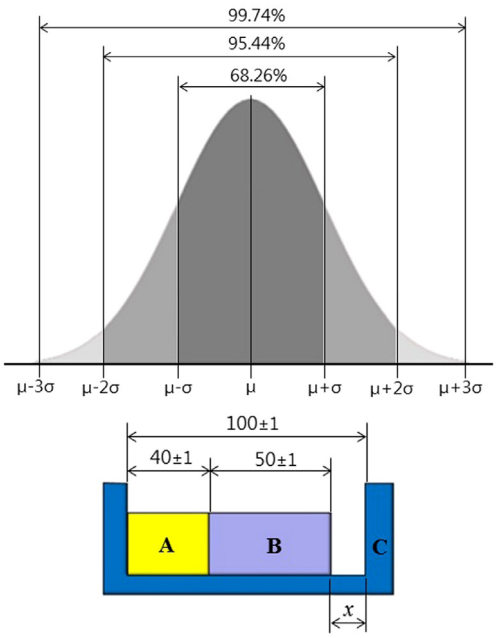


Fig. 2 Tolerance analysis results of RSS method

용된 제품의 오차범위 내에 있도록 함으로서 대수적 방법보다는 여유 있는 공차범위를 얻을 수 있어 제조 원가 절감이 가능하고, 실제 제조 현상을 구현할 수 있는 장점이 있지만, 분석을 위해서는 생산 공정능력 분석 데이터가 필요하고, 정규분포에서만 가능하기 때문에 부품 수가 적은 선형적 모델에서만 적용할 수 있으며 3차원 공차계산은 어렵다는 단점이 있다.

다음은 마지막으로 통계 공차 해석방법 중의 하나인 몬테카를로 방법(Monte Carlo method)에 의한 누적 공차 해석방법이다. RSS 방법은 조립되는 모든 부품들의 공차가 정규분포를 이룬다는 가정 하에 분석되지만, 실제로 각 부품들의 치수는 이상적인 정규분포를 나타낸다고 보기는 어렵다. 따라서 컴퓨터를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 하고, 각 부품의 공차가 적용된 치수들을 산출하고 이에 대한 누적 공차량을 해석하여 계산하는 방식이 실제 상황에 더욱 근접하기 때문에 최근의 공차 분석 방법으로 많이 사용되고 있다.[10)]

Fig. 3은 몬테카를로 공차 해석의 개념도를 나타내고 있다. 몬테카를로 공차 해석의 기반은 통계 값으로 공차를 가지는 각 부품들을 조합하여 1 만회 이상 시뮬레이션 하여 가상적 값을 산출하기 때문에 실제 상황에 대한 정밀도가 99 %까지 근접한다고 알려져 있다. 또한, 시스템의 구성 부품과 기능(function) 또는 목표 값에 대한 공정 능력과 허용 공차를 구하는 과정에서 가감으로 표현되지 않는, 즉 상대 치수간의 곱이나 각도, 삼각함수나 로그의 계산 등과 같은 비선형 시스템의 공차 해석이 가능하다는 장점이 있다.

2.2 치수 제어 시스템 공차 분석

몬테카를로 해석방법은, 하나의 완성된 조합체

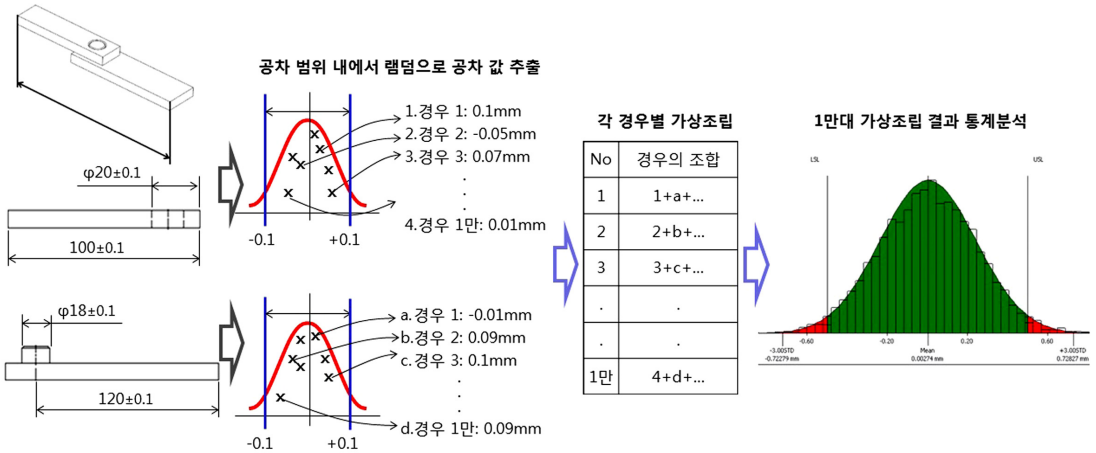


Fig. 3 Tolerance analysis diagram of Monte Carlo method

는 각각 여러 개의 하위 부품(sub parts)으로 조립되며, 이 각 하위 부품은 주어진 공차를 만족하지만 일정하지 않다고 가정하고, 컴퓨터상에서 부품을 가상 조립하고 산포를 측정하는 방법으로, 설계 변수들과 조립 제품의 특정 치와의 관계가 비선형(non-linear)일 때 더욱 효과적이며, 실제 조립과정에서 1차원, 2차원뿐만 아니라 3차원인 형태의 모델을 다루는 데 유용하다.[11)]

몬테카를로 시뮬레이션을 위해서는 몇 가지 가정이 필요하다. 먼저 모든 서브 부품에 입력되는 공차는 정규 분포로 가정한다. 다음으로 측정시 각 부품들은 힘에 의한 변형은 없는 것으로 가정하며, 마지막으로 각 서브 부품은 조립 시 변형이 없는 강체로 가정하고 제품의 누적공차 해석을 진행하게 된다.[12)]

몬테카를로 시뮬레이션 방법에 기반을 둔 3차원 치수 제어(3-DCS, Dimensional Control System) 공차 해석 상용 프로그램은 캐드(CAD)를 이용하여 3차원 형상 모델을 치수 제어 시스템 환경의 모델로 읽어 공차 해석모델로 정의 하는 것으로부터 시작한다.

3-DCS 해석과정은 3차원 캐드 모델링 데이터로부터 모델을 분리하고, 조립과정(assembly process)을 이용하여 움직임(movement)을 정의하고, 기하학적 치수 공차방식에 정의된 공차(tolerance)를 입력한 후 마지막으로 시뮬레이션을 통해 얻고자 하는 측정지점에 품질 변동을 확인할 수 있도록 측정(measurement)을 정하고 시뮬레이션을 수행하게 된다. 이를 도식적으로 나타내면 “공차 해석모델 준비 → 모델 분리 → Point 정의 → Move 정의 → Tolerance 정의 → Measure 정의 → Simulation & Results”로 표현된다.[13)]

이 과정에서 중요한 행위는 다음의 3가지로 요약할 수 있다. 첫째는 조립의 방법 및 순서를 정의하는 과정인 조립(move)이다. 면(surface)과 면의 조립, 홀(hole)과 핀(pin)의 끼워 맞춤, 서브 어셈블리 구조를 명확히 고려하여 조립(move)을 정의 하여야 한다.

둘째는 공차(tolerance) 정의이다. 도면에 명기된 제품의 조립 위치에 대하여 치수 및 공차를 정의하는 과정이다. 직선 치수 공차 또는 원통 치수(circular) 공차 등을 3-DCS를 이용하여 정확하게 정의 한다.

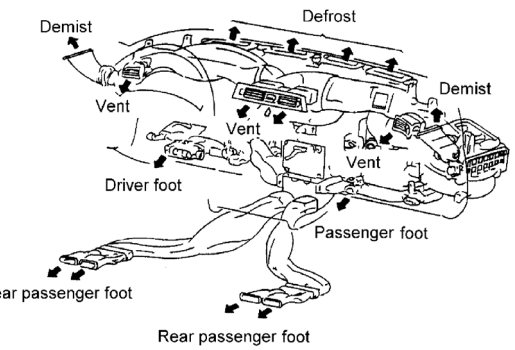


Fig. 4 Diagram of air discharge direction from AHU

마지막으로 측정에 대한 정의이다. 공차 해석이 필요한 곳의 간극 또는 간섭량, 두 위치들 간의 거리, 특정 위치에서의 흔들림에 대한 측정이 필요하다. 결국 시뮬레이션의 결과는 이러한 3가지 과정을 거쳐 공차를 해석하게 된다.

자동차에서 공기 분배장치는 차 실내 탑승자의 요구에 따라 차가워진 공기 또는 더운 공기를 실내로 공급하거나, 이들 차가운 공기와 더운 공기를 적절히 혼합하여 온도조절을 한 후 Fig. 4에 표시된 것처럼 사용자의 요구에 따라 각각 얼굴 방향(vent), 발 방향(foot), 유리 방향(defrost)으로 단독 혹은 복합적으로 송풍 하여 실내의 쾌적성을 유지하는 기능을 한다.

이와 같이 공기 분배장치의 도아 작동 각을 움직여 토출되는 바람의 방향과 양을 제어하는 캠 구동장치의 경우, 구성 부품과 기능 또는 제품의 공정능력과 허용차를 구하는 과정에서 각 공차들의 직선 누적공차인 선형함수와 도아의 구동을 위한 암과 레버, 캠의 회전운동을 포함하는 비선형함수를 포함하고 있기 때문에 기존의 공차 해석방법으로는 한계가 있어 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 3-DCS 해석방법은 공차 수준을 확인하는데 매우 유용할 것이다.

3. 공차 해석 및 최적화

3.1 제어 인자 정의

Fig. 5는 공기 분배장치의 분해도이다. 공기 분배장치는 내부에 다수개의 도아들이 장착되고 이들 도아들을 작동하기 위하여 암, 레버, 캠이 구성되어

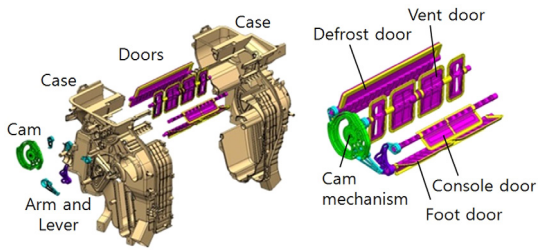
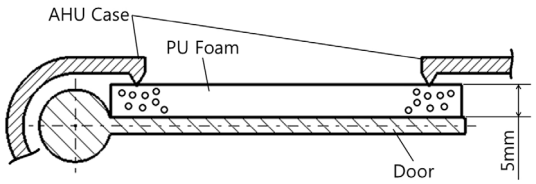


Fig. 5 Dis-assembly of AHU and cam mechanism

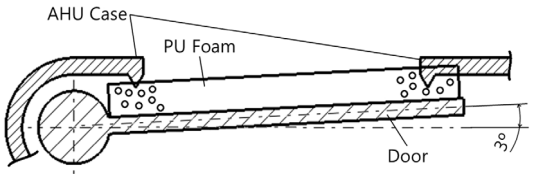
있다. 승객의 요구에 따라 토출되는 바람을 제어하기 위해서는 먼저 전기식 구동 모터(electric actuating motor)에 의하여 캠을 구동하면, 구동력이 레버에 전달되고, 레버는 암을 작동시키고 암은 도아 샤프트(door shaft)와 연결되어 도아를 구동하게 된다. 이와 같이 공기 분배장치는 각 구성 부품들이 가지는 공차와 기구학적으로 구성된 캠 구동 기구들이 조립 될 때 누적 공차가 발생하게 되며, 이 누적공차는 각 도아가 제대로 작동되지 않으면, 승객이 원하지 않은 방향으로 공기 누설이 발생하게 되고, 이 공기 누설은 승객의 열 쾌적성을 해치고, 경우에 따라서는 시계를 방해하여 주행 안전성을 해칠 수도 있다.

공기 분배장치의 기능을 다 하기 위하여 얼굴 방향, 발 방향, 유리 방향 도아는 Fig. 6에 나타난 것처럼 힌지를 가지는 플라스틱판으로 구성되어 있고, 케이스와 접촉되는 면에는 공기 누설을 방지하기 위하여 PU(Polyurethane)재질의 스펀지가 부착되어 있다. PU 스펀지는 공기 누설을 방지하기 위하여 케이스와 PU 스펀지가 접촉되는 치수는 경험적으로 약 3°정도 과도하게 겹치도록(over sealing dimension) 설계하고 있다.

본 연구에서는 공기 분배장치가 각 부품들의 누적 공차로 인하여 도아의 작동에 얼마나 영향을 미치는지 3-DCS를 이용하여 공차 해석을 하고, 공기 분배장치의 도아 작동 메커니즘이 적절한 공차로 설계가 되었는지 공차 적합성에 대하여 분석을 하였다. Fig. 7은 공기 분배장치에서 토출되는 공기의 방향을 제어하기 위하여 도아들을 작동하는 캠 구동 장치의 구조를 설명하고 있다. Fig. 7(b)의 캠 구동 장치에서 핀(pin), 레버 및 캠의 위치와 슬롯(slot) 등에 대하여 공차를 가지며, 각 부위에서의 공차는 Table 1에 상세히 나타내었다. 이 공차 치수들은 각

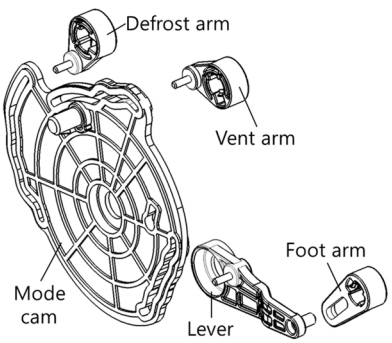


(a) Door sealing with case (Ideal condition)

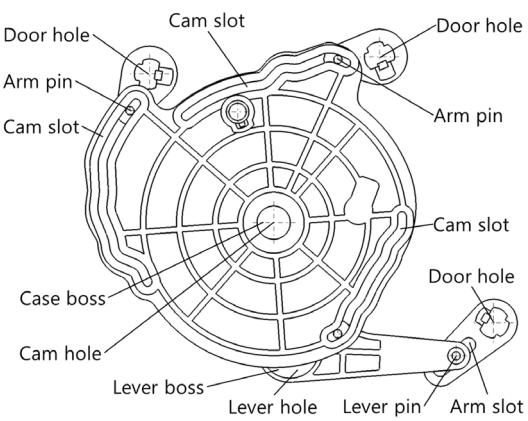


(b) Door over sealing with case (Current design)

Fig. 6 Door sealing mechanism with case in current design criteria



(a) Mode cam mechanism structure



(b) Parts mame of cam mechanism

Fig. 7 Define of subparts name and position of cam mechanism

도아들이 구동될 때 도아 흔들림에 영향을 주는 인자들로 공기 분배장치에서 도아를 작동시키는 각

Table 1 Design tolerance of cam mechanism

Part name	Qt'y	Dimension	Tolerance	
			Size	Position
Case boss	1	ϕ12	±0.1	±0.2
Lever boss	1	ϕ12	±0.1	±0.2
Cam hole	1	ϕ12	+0.1 -0	-
Lever hole	1	ϕ12	+0.1 -0	-
Arm pin	2	ϕ3.0	+0 -0.05	±0.1
Lever pin	1	ϕ5.0	+0 -0.05	±0.1
Arm slot	1	ϕ5.1	±0.05	
Cam slot	3	ϕ3.1	±0.05	±0.1
Door hole	3	ϕ11	+0 -0.1	±0.2

암과 레버, 캠 부품들의 공차 범위에 따라 도아의 흔들림은 달라지며, 이 흔들림 량에 따라 설정된 모드로 토출되는 바람의 양은 변하게 될 것이고, 경우에 따라서는 원하지 않는 방향으로의 공기 누설이 발생하게 되는 것이다.

공기 분배장치에서 도아를 작동하는 각 암과 레버, 캠 부품들의 공차 범위에 따른 도아의 흔들림은 변하게 되며, 이 흔들림량에 따라 설정된 모드로 토출되는 바람의 양은 변하게 될 것이다. 캠 구동 장치에서 누적된 공차량에 따라 달라지는 각 도아의 흔들림을 확인하기 위하여 공기 분배장치의 전산 유동 해석을 진행하였다. 공차의 누적량에 의한 도아의 작동 각도 변화가 공기 분배장치에서 토출되는 풍량 비율과 유리 방향으로의 공기 누설에 미치는 영향을 해석하였다.[14)]

전산 해석 조건은 풍량 조절 도아는 바이 레벨 모드(Bi-level mode), 온도조절 도아는 1/2 Cool위치에 있으며, 풍량은 송풍기(blower) 모터가 약 6V DC로 작동될 때의 풍량 실험값을 이용하였다. 전산 해석에 사용된 프로그램은 상용 열 유체 해석프로그램인 FLUENT를 이용하였다. 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 난류 및 운동량에 대하여 2차 상류차분법(up-wind scheme)을 적용하였고, 정상상태를 고려한 SIMPLE알고리즘을 사용하였다. 공기 분배장치는 히터코어와 증발기, 각 온도 조절 도아와 공기조절 도아를 포함하고 있으며, 공기 토출 덕트(ducts)와 방향 조절 기구(vent grill), 제상 노즐(defrost nozzle)도 함께 고려되었다. 사용된 공기 분배장치의 복잡한 3차원 형상은 CAD모델링 데이터로부터 추출하였다. 또한 증발기(evaporator)와 히터코아(heater core)는 다공성(porous) 매질로 가정하였고, 열교환기의 통기 저항은 단품 열량계(calorimeter)에서 실험한 값을 사용하였다. 본 연구에서는 전산 유동 해석이 주가 아니므로 상세한 해석방법은 논하지 않았다.

Fig. 8은 해석에 사용된 공기 분배장치의 공기 혼합 도아와 온도 조절 도아의 위치를 나타내고 있다. 바이 레벨 모드일 때 공기 혼합 도아들의 움직임을 보면, 유리 방향 도아는 완전히 닫혀 있어야 하며, 캠이 시계방향으로 회전하므로, 얼굴 방향 도아는 열리게 되며, 발 방향 도아는 닫히는 방향으로 움직인다. 따라서 전산 해석은 바이 레벨 정위치를 Base로 하고, 얼굴 방향 도아는 열리는 방향으로, 발 방향 도아는 닫히는 방향으로 0.5° 간격으로 회전하면서 최대 4.0°까지 도아가 흔들리는 것을 가정하여 해석을 하였다.

Table 2에 바이 레벨 모드에서 전산 해석에 의한 공기 분배장치의 토출 풍량과 각 방향에서 바람의 비율을 나타내었다. 캠의 구동에 의하여 얼굴 방향 도아와 발 방향 도아, 유리 방향 도아가 최대 4.0°까지 변화할 때 전산 해석결과를 보면, 풍량의 변화량

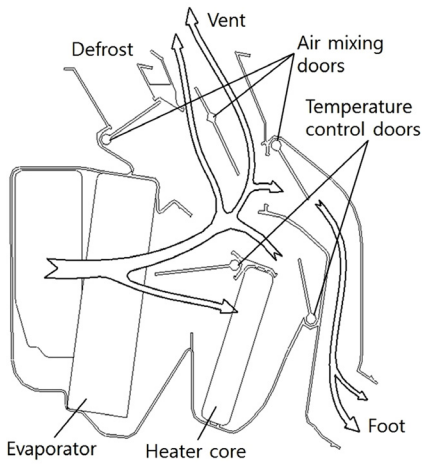


Fig. 8 Diagram of air discharge direction at AHU

Table 2 Numerical analysis results of air flow volume and distribution rate according to door angle changes

Doors position deviation		Base	1.0°	1.5°	2.0°	2.5°	3.0°	3.5°	4.0°
Air flow volume (m^3/h)	Vent	156.9	159.0	159.8	160.6	161.3	162.1	163.4	164.6
	Foot	72.4	70.0	69.4	68.8	68.2	67.6	66.3	64.1
	Total	229.3	229.0	229.2	229.4	229.6	229.8	229.7	229.7
Air distribution rate (%)	Vent	68.4	69.4	69.7	70.0	70.3	70.6	71.1	71.7
	Foot	31.6	30.6	30.3	30.0	29.7	29.4	28.9	28.3

은 최대 7.7 m^3/h 수준이고, 풍량 배분 비율을 보면 약 ±3.3 % 이내의 변화율을 보이고 있어 현재 공기 분배장치의 토출 풍량 배분율 설계 기준인 ±5.0 %를 만족하고 있다.

다음으로 공기 분배장치의 캠 구동 장치, 즉, 각 도아들과 암, 레버 및 캠과의 누적 조립 공차를 분석하여 공차 해석결과가 공기 분배장치에서 공기 누설을 방지하기 위하여 도아와 공기 분배장치 케이스 간에 고려하는 3.0° 과도 실링이 타당한지에 대하여 분석하였다.

3.2 공기 분배장치의 공차 해석결과

3.2.1 암 직접 구동 방식의 공기 분배장치

3-DCS의 공차 해석은 공기 분배장치의 도아가 구동되는 형태에 따라 크게 두 가지로 해석을 진행 하였다. 먼저 캠이 암을 직접 구동하는 방식으로 중간에 별도의 레버를 사용하지 않고 암과 직접 연결된 도아를 구동하는 방식이다. 주로 얼굴 방향 도아와 유리 방향 도아가 해당된다.

Fig. 9는 공기 분배장치의 얼굴 방향 도아에 대한 공차 해석결과로, 도아의 변동각은 바이 레벨 모드인 정위치 에서 시계방향으로(CW) 1.76°, 반시계 방향으로(CCW) 1.62° 정도 변동하고 있음을 알 수 있다. 암 직접 구동 방식에서 공기 분배장치의 공차 해석에 의한 도아의 흔들림 각도는 얼굴 방향 도아는 최대 1.76° 로 해석되어 전산 해석에 의한 얼굴 방향 토출 풍량과 풍량비와 비교해 보면 약 3.3 m^3/h와 +1.4 %로 설계 조건을 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.

또한 공차 해석의 중요한 결과 중 하나는 캠 구동 장치에 대하여 각 부품이 가지고 있는 공차의 민감도를 분석하여 어느 부품의 치수가 도아의 흔들림에 가장 많은 영향을 많이 미쳤는가를 확인 할 수 있다는 것이다. 이와 같은 공차에 대한 민감도 분석으로 도아의 흔들림에 가장 큰 영향을 미치는 특정 부품에 대하여 설계자가 의도하는 기능에 맞게 적절히 공차를 관리함으로써 부품의 제작비용과 품질을 향상할 수 있는 것이다.

Runs	10000
Nominal(deg)	0.00
Mean(deg)	-0.07
STD(deg)	0.56
6.00STD(deg)	3.37
LSL(deg)	-2.00
USL(deg)	2.00
L-OUT%	0.03
H-OUT%	0
Tot-OUT%	0.03
Est.Type	Normal
Est.Low(deg)	-1.76
Est.High(deg)	1.62
Est.Range(deg)	3.37

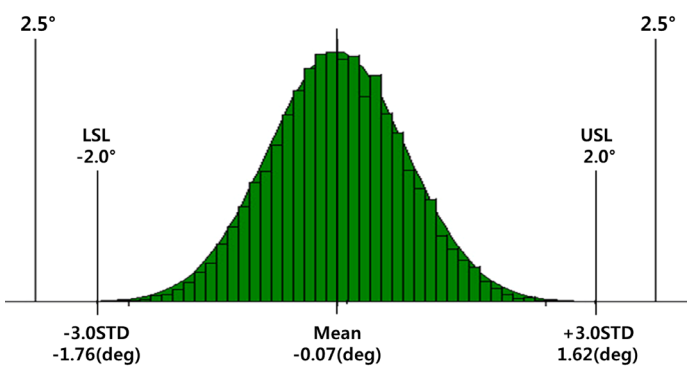


Fig. 9 Vent door 3-DCS analysis results of tolerance at AHU

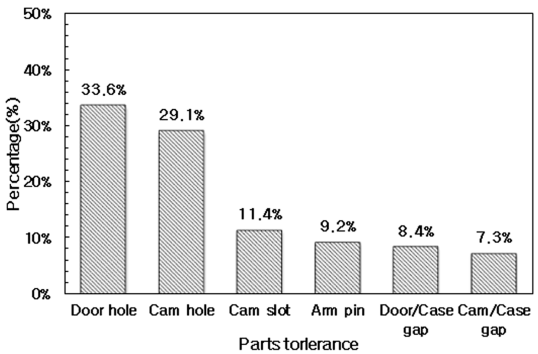


Fig. 10 Sensitivity results of vent door tolerance

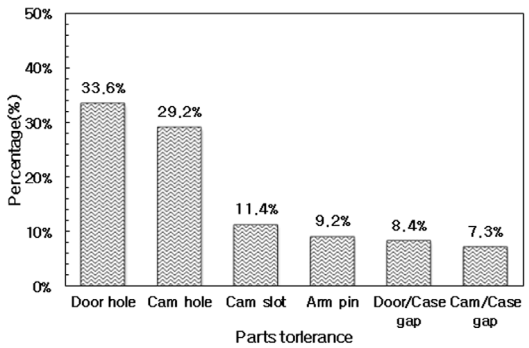


Fig. 12 Sensitivity results of defrost door tolerance

Fig. 10은 얼굴 방향 도아의 공차 민감도 분석 결과이다. 암 직접 구동 방식의 공기 분배장치에서 도아 변동량에 영향을 주는 공차 민감도 분석을 보면, 도아 홀의 위치 공차 민감도가 33.6 %, 캠 중심 홀의 위치 공차 민감도가 29.1 %, 캠 슬롯의 위치 공차 민감도가 11.4 %로 각각 해석되었다.

Fig. 11은 유리 방향 도아의 공차 해석결과로, 도아의 변동각은 정위치 에서 시계 방향으로 0.84°, 반시계 방향으로 0.9° 변동하는 결과를 보여 주고 있다. 바이 레벨 모드의 특성상 유리 방향 도아는 닫혀 있기 때문에 공차 해석결과에도 거의 변동이 없는 것으로 나타났으며, 전산 해석 결과를 보면, 최대 0.9°의 변동량은 현재 공기 분배장치 설계시 도아의 과도 실링 범위 내에서의 변동량이므로 유리창 방향으로의 공기 누설은 없을 것으로 보인다.

해석 결과를 보면, 바이 레벨 모드의 특성상 바람의 토출 방향이 얼굴과 발 방향으로 토출되기 때문에 얼굴 방향 도아는 상대적으로 변동량이 크고 유리 방향 도아는 닫혀 있으므로 변동량이 작게 나타난 것으로 판단된다. 즉, 두 도아가 모두 캠이 암을 구동하는 동일한 방식이지만, 암 중심에서 핀의 위치와 핀과 캠에 있는 슬롯과 맞물려지는 누적 공차가 달려지기 때문에 서로 다르게 나타난 것이다.

Fig. 12는 유리 방향 도아의 공차 민감도 분석결과이다. 암 직접 구동 방식의 공기 분배장치에서 유리 방향 도아 변동량에 영향을 주는 공차 민감도는, 도아 홀의 위치 공차 민감도가 33.6 %, 캠 중심 홀의 민감도가 29.2 %, 캠 슬롯의 공차 민감도가 11.4 %로 각각 해석되었다. 앞서 설명 드린바와 같이 바이 레벨 모드의 특성상 얼굴 방향 도아와 유리 방향 도

Runs	10000
Nominal(deg)	0.00
Mean(deg)	0.03
STD(deg)	0.29
6.00STD(deg)	1.73
LSL(deg)	-2.00
USL(deg)	2.00
L-OUT%	0
H-OUT%	0
Tot-OUT%	0
Est.Type	Normal
Est.Low(deg)	-0.84
Est.High(deg)	0.90
Est.Range(deg)	1.73

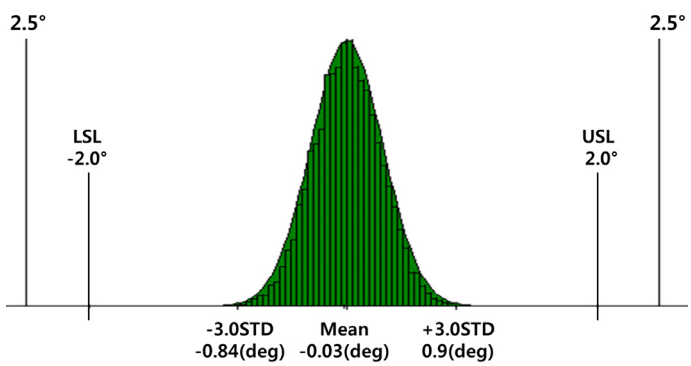


Fig. 11 Defrost door 3-DCS analysis results of tolerance at AHU

아의 변동량 각도는 다르지만, 이 도아들의 변동량에 미치는 영향은 같았다.

3.2.2 레버 구동 방식의 공기 분배장치

다음은 공기 분배장치에서 도아와 암이 연결되고, 중간에 별도의 레버가 있어 이 레버가 캠과 연결되어 도아를 구동하는 방식으로, 주로 발 방향 도아가 해당된다.

Fig. 13에 레버 구동 방식의 발 방향 도아의 공차 해석결과를 나타냈다. 발 방향 도아의 공차 해석결과는, 바이 레벨 모드의 Base에서 시계 방향으로(CW) 2.24°, 반시계 방향으로(CCW) 2.0°의 변동량을 나타내고 있다. 발 방향 도아의 경우 암과 캠 사이에 레버를 두고 조립이 되기 때문에 암을 직접 구동하는 방식보다는 누적 공차가 커질 것이다. 공차 해석에 의한 도아의 흔들림 각도는 최대 2.24°로, 발 방향으로 토출되는 풍량 변화량을 전산 해석결과와 비교해 보면, 약 -3.9 m^3/h 정도이고, 풍량 배분율은 +1.7 % 수준으로 나타나, 공기 분배장치의 풍량 배분은 설계 기준 내에 있는 것을 확인하였다.

Fig. 14는 발 방향 도아의 흔들림에 영향을 주는 공차 민감도 분석 결과이다. 캠 중심 홀의 민감도가 40.1 %, 레버의 공차 민감도가 16.2 %, 캠과 공기 분배장치 케이스와의 거리 공차 민감도가 10.0 %, 캠 슬롯 공차 민감도가 9.9 %로 나타났다. 즉, 레버 구동 방식의 공기 분배장치에서 발 방향 도아의 변동에 가장 많은 영향을 미치는 부위는 캠 중심의 위치

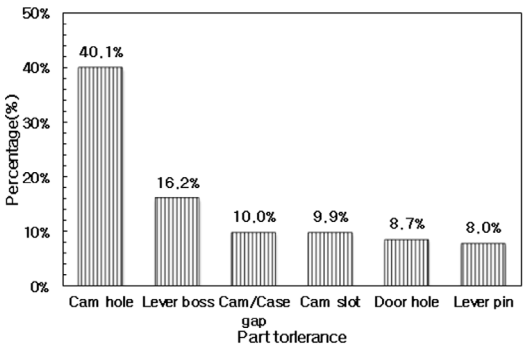


Fig. 14 Sensitivity results of foot door tolerance

공차로, 이 부분의 공차 관리가 매우 중요함을 알 수 있었다.

공기 분배장치에서 바람의 방향을 조절하기 위한 부품과 기구물, 즉 다수의 부품을 조립하면서 발생하는 누적 공차에 의한 도아의 변동에 대하여 3-DCS로 공차 해석을 한 결과, 각 도아의 변동량으로 인하여 변화하는 토출 풍량의 변화량은 설계 기준을 만족하고 있으며, 도아와 케이스 간 실링하는 설계 기준도 도아의 흔들림 변동으로 인하여 원하지 않는 방향으로의 공기 누설은 발생하지 않을 것으로 확인되었다. 또한 각 도아의 변동량에 기여하는 민감도를 분석하여 암 직접구동 방식과 레버 구동 방식에서 가장 많은 영향을 미치는 부품들을 분석하여 향후 집중관리가 필요한 부품만을 관리함으로써 공차 수준을 제어할 수 있다.

Runs	10000
Nominal(deg)	0.00
Mean(deg)	-0.12
STD(deg)	0.69
6.00STD(deg)	4.14
LSL(deg)	-2.00
USL(deg)	2.00
L-OUT%	0.47
H-OUT%	0.04
Tot-OUT%	0.51
Est.Type	Pears.IV
Est.Low(deg)	-2.24
Est.High(deg)	2.00
Est.Range(deg)	4.24

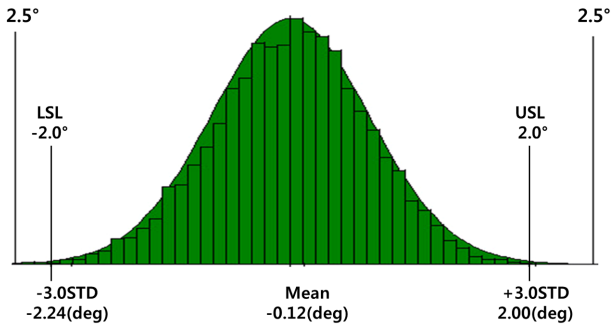


Fig. 13 Foot door 3-DCS analysis results of tolerance at AHU

4. 결 론

공기 분배장치에서 바람의 방향을 조절하기 위한 부품과 기구물, 즉 다수의 부품을 조립하면서 발생하는 누적 공차에 의한 도아의 변동에 대하여 3-DCS로 공차 해석을 한 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 캠 구동 장치의 각 부위별 조립 공차에 대하여 해석을 한 결과, 암 직접 구동 방식은 0.84° ~ 1.76°, 레버 구동 방식은 2.0° ~ 2.24° 로 변동되었다.
2) 각 도아의 변동량으로 인한 토출 풍량의 변화에 대하여 전산 해석한 결과 풍량 변화량은 설계 기준 내에 들고 있으며, 도아의 변동으로 인하여 원하지 않는 방향으로의 공기 누설은 발생하지 않을 것으로 확인되었다
3) 공차 분석의 민감도 해석결과, 암 직접 구동 방식의 경우는 도아 홀의 위치와 캠 중심의 위치도가 가장 큰 영향을 미치며, 레버 구동 방식의 경우 캠 중심 위치와 레버의 중심축 위치 공차가 도아 변동에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다
4) 캠 구동 장치에서 각 부품들의 누적 공차에 미치는 영향에 대하여 우선순위를 쉽게 파악할 수 있으며, 공차 수준 제어시 비용과 효과를 고려한 설계가 가능하게 되었다.

이상으로 자동차 공기 분배장치에서 차 실내로 토출되는 바람을 제어하기 위하여 다수의 도아들과, 암, 레버, 캠으로 구성된 복잡한 구동장치의 누적공차에 대하여 3-DCS를 이용하여 공차 해석을 하여, 설계의 적정성을 확인 하였고, 공차 범위 선정시 적합성 검증에 유용한 방법임을 알게 되었다.

References

1) Y. S. Kim, Y. J. Choo and J. M. Son, “Virtual Dimensional Assessment Process for Optimizing GD&T with Balanced DTS Based on 3DCS Variation Analysis before Style Freezing,” KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1194-1201, 2006.
2) J. K. Tahk, “Accumulated Tolerance Analysis for Optimal Tolerance Design,” KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1743-1752, 2005.
3) J. Y. Lee, “Quality Control with Tolerance Analysis,” Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol.36, No.4, pp.243-247, 2010.
4) J. Y. Lee, “Quality Control with Tolerance Analysis,” Journal of KIIE, Vol.36, No.4, pp.243-247, 2010.
5) J. Y. Lee, “Tolerance Analysis of Automobiles Steering System,” Journal of KSPE, Vol.28, No.12, pp.1397-1402, 2011.
6) S. H. Moon, “A Study of Front Wheel Alignment Tolerance Analysis for Vehicle Pulls Improvement,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.562-567, 2014.
7) X. Wang, E. J. Kang, H. S. Chang, S. J. Lee, D. J. Choi, M. S. Guk, T. H. Hong, H. J. Kang and Y. J. Ahn, “Tolerance Accumulation Analysis of ECV by Monte Carlo Simulation,” Transaction of KSAE, Vol.22, No.1, pp.85-94, 2014.
8) H. S. Choi, “Theory of Tolerance,” Seongandang, Paju, pp.40-149, 1993.
9) D. H. Jang, H. S. Jang and B. K. Lee, “Optimal Tolerance Design using Genetic Algorithm,” KIIE, KORMS Spring Joint Conference, pp.1-11, 1998.
10) J. J. Lee, “Suitability of Mounting Holes Tolerances of Assembled Compressor Components & Analysis of Pulley Alignment Tolerance,” KSAE Daejeon·Sejong·Chungcheong Brench Office Fall Conference Proceeding, pp.15-20. 2015.
11) S. J. Noh, “Design Study based on Pull Sensitivity Analysis for Enhancing Steering Pull Performance,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.801-806, 2009.
12) H. S. Chae, Y. S. Kim, Y. J. Choo and H. J. Kim, “Optimization of Engine Room Dynamic Clearance using Variation Analysis,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1278-1281, 2010.
13) D. H. Jang, H. S. Jang and B. K. Lee, “Optimal Tolerance Design using Genetic Algorithm,” KIIE Spring Conference Proceeding, pp.1-7, 1998.
14) D. W. Lee and S. Y. Yoo, “A Numerical Study for Performance of Automotive HVAC System,” SAREK, Vol.16, No.11, pp.1084-1091, 2004.