

An Advanced Prediction Technology of Assembly Tolerance for Vehicle Door

Nam-Yeoung Jeoung* · Jin-Hyung Cho* · Hyun-Seung Oh** · Sae Jae Lee*[†]

*Dept. of Industrial & Systems Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**Dept. of Industrial & Management Engineering, Hannam University

차량도어 조립공차 예측기술 개발

정남용* · 조진형* · 오현승** · 이세재*[†]

*금오공과대학교 산업공학과

**한남대학교 공과대학 산업경영공학과

The setting of values on door hinge mounting compensation for door assembly tolerance is a constant quality issue in vehicle production. Generally, heuristic methods are used in satisfying appropriate door gap and level difference, flushness to improve quality. However, these methods are influenced by the engineer's skills and working environment and result an increasement of development costs. In order to solve these problems, the system which suggests hinge mounting compensation value using CAE (Computer Aided Engineering) analysis is proposed in this study. A structural analysis model was constructed to predict the door gap and level difference, flushness through CAE based on CAD (Computer Aided Design) data. The deformations of 6-degrees of freedom which can occur in real vehicle doors was considered using a stiffness model which utilize an analysis model. The analysis model was verified using 3D scanning of real vehicle door hinge deformation. Then, system model which applying the structural analysis model suggested the final adjustment amount of the hinge mounting to obtain the target door gap and the level difference by inputting the measured value. The proposed system was validated using the simulation and showed a reliability in vehicle hinge mounting compensation process. This study suggests the possibility of using the CAE analysis for setting values of hinge mounting compensation in actual vehicle production.

Keywords : Assembly Tolerance, Hinge, Vehicle Door, Gap and Level Difference, Flushness, CAE Analysis

1. 서 론

1.1 연구 배경

1765년 와트가 증기기관을 발명하고 수작업이 기계에 의해 수행되어 산업혁명¹⁾이 시작된 이후 대량생산과 생

산/유통시스템의 자동화를 거쳐 이제는 기계와 제품에 지능이 부여되고, 정보와 자동화기술의 통합으로 더 빠르고 더 유연하며 더 지능적으로 가동될 제4차 산업혁명²⁾의 시대가 도래하였다고 받아들여지고 있다. 이는 통신기술의 발달과 컴퓨터 기술의 발달에 기초하여 IoT, Cloud computing, Big Data 분석, AI 등이 가능해졌기 때문이다.

Received 4 September 2018; Finally Revised 16 November 2018;
Accepted 28 November 2018

[†] Corresponding Author : saejalee@kumoh.ac.kr

1) 산업혁명이란 용어는, 산업혁명이 시작한 약 100년 후 1884년 A. Toynbee(1852~1883)의 사후 노트에서부터 유래되었음.
2) 2016년 WEF에서 제안된 명칭임.

산업혁명의 다양한 분야 중 Industry 4.0의 핵심은 IoT와 AI 기술 등이 융합된 스마트공장의 구현이라고 말할 수 있을 것이다. 구체적인 목표는 설계, 부품, 생산설비, 작업자, 공정의 연결이며 이를 위해 제조공장의 디지털화, 연결화, 지능화가 요구되고 있다.

그렇다면 제조업의 대표로 불리는 자동차 공장은 어떠한지 살펴보면, 신차가 나오는 과정은 ‘디자인-설계-시험차 제작-평가-양산’으로 이뤄지는데, 연구소는 시험차 제작 및 평가를 담당하고 있고, 이 후 공정에서 생산 준비 과정에서의 문제를 자체적으로 해결하지 못하면 연구소로 다시 넘어오게 되고 시간이 많이 걸리게 된다. 과거에 ‘신차가 나오면 1년 뒤에 사야 안정화된 차를 살 수 있다’는 극단적인 말이 있듯이 생산 과정에서 도면대로 만드는데 시행착오의 시간이 걸린다는 것을 의미한다. 그러나 이는 이제 옛말로 치부해야 할 듯하다.

과거엔 문제가 생기면 설계자는 문제 해결에 적극적이지 않았지만 이제는 생산 과정의 문제도 개발자들이 적극적으로 나서 설계에 반영하고 있다. 즉 설계자가 제조 및 생산 품질까지도 최대한 도면에 반영되도록 한 것이다. 이를 SE(simultaneous engineering : 동시공학)라고 하는데 후 공정에서 불량이나 나쁜 것을 사전에 막는 활동을 뜻한다. 품질 문제에 관해서는 전 공정(개발)과 후 공정(생산)의 구분이 없어진 것이다.

하지만 오늘날 어떤 업종이나 마찬가지로이지만 특히 자동차 산업에 있어서 개인 맞춤형 생산은 생존을 위한 필수수가 되었다. 그리고 자동차 제조가 제조업의 꽃이라 하지만 그 이면에서는 복잡한 장치산업, 노동집약 산업이라는 의미를 내포한다. 그리고 개인 맞춤형으로 생산을 하려고 하면 생산공정의 복잡성은 기하급수적으로 늘어나게 되며 기존의 생산체계로는 불가능에 가깝다. 따라서 최선의 방법은 현재의 자동차 생산기술과 ICT 및 AI 등과의 융·복합을 통한 디지털 전환 이외에는 별다른 방법이 없을 것으로 생각되어진다. 이러한 제조현장의 디지털 전환은 스마트 팩토리라 불리며 지고 있다.

이와 같은 오늘날의 상황을 비추어 볼 때 신차가 나오는 Product 분야인 ‘디자인-설계-시험차 제작-평가-양산’ 과정에서 차량 도어와 바디의 조립공차 즉, 차체의 간격/단차 확보는 자동차 신제품 개발에 있어 지속적으로 발생하는 이슈이다. 현재 이러한 이슈를 해결하기 위해서 중력에 의한 도어 처짐량 등을 보정하여 차량도어를 상향 장착함으로써 간격/단차 품질을 확보한다. 하지만 이 과정은 일반적으로 담당자의 경험을 통한 휴리스틱한 방법을 통해 개선 작업이 이루어진다. 또한 이러한 방법은 담당자의 숙련도 및 부품, 설비와 공장의 조건에 따라서 품질 확보 기간이 상이하며, 이로 인하여 생산 일정상 문제가 발생하게 된다. 따라서 자동차에 대한 개인 맞춤형 요구로 자기표현과 자

아실현의 욕망 충족을 위해서는 가격, 품질, 납기 및 생산성 등의 최적화로 지속 가능성을 확보하여야 한다. 이를 위한 핵심 역량을 확보하기 위해서는 지금까지 수행되던 전통적인 휴리스틱한 방법으로 인해 발생되던 비 효율성과 MH와 개발 소요기간의 낭비 등을 개선하여 디지털기술과 접목되고 업체, 부품, 금형, 지그 및 공차 설계, 공차 해석 등과 연동되어 도어와 바디 등의 조립공차 품질육성을 신속하고 정확하게 수행할 수 있는 기술개발이 요청되고 있다.

1.2 연구 목적

차량 도어와 바디의 간격/단차 품질을 확보한다는 것은 완성 차량에서 도어와 바디간 설계공차인 목표 간격(Gap) 및 단차(level difference, flushness)를 확보하는 것이다. 바디와 도어의 간격/단차는 바디, 도어, 힌지, 장착 지그 등 여러 인자들이 복합적으로 연계되어 있다. 그리고 현재까지는 각각의 인자가 도어의 간격/단차에 미치는 영향을 정량적으로 도출할 수가 없었다. 즉, 조립에 영향을 미치는 인자가 많고 정량적인 영향을 알 수 없었기 때문에 수 회에 걸쳐 휴리스틱한 방법으로 설계된 간격/단차 목표를 달성하고 있다. 최근 MBSE(Model-based systems engineering is a systems engineering methodology that focuses on creating and exploiting domain models as the primary means of information exchange between engineers, rather than on document-based information exchange, Wikipedia)와 CAE(Computer Aided Engineering) 등의 기술들을 생산기술에 활용하려는 시도가 이루어지고 있다. 이 연구에서는 CAE와 시뮬레이션을 이용하여 시스템 모델을 개발하였다. 시스템 모델은 도어와 바디의 간격/단차에 영향을 미치는 인자 값을 입력하면, 중량에 의한 도어 처짐을 보정할 수 있는 도어 상향 장착 값을 정량적으로 제시하는 기술이다.

이 기술이 개발됨으로써 신차 개발 시 담당자의 경험과 판단에 의해 수 차례에 걸쳐 휴리스틱하게 수행되던 도어와 바디의 목표 간격/단차 달성에 소요되던 공수와 비용 절감에 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

1.3 연구 방법

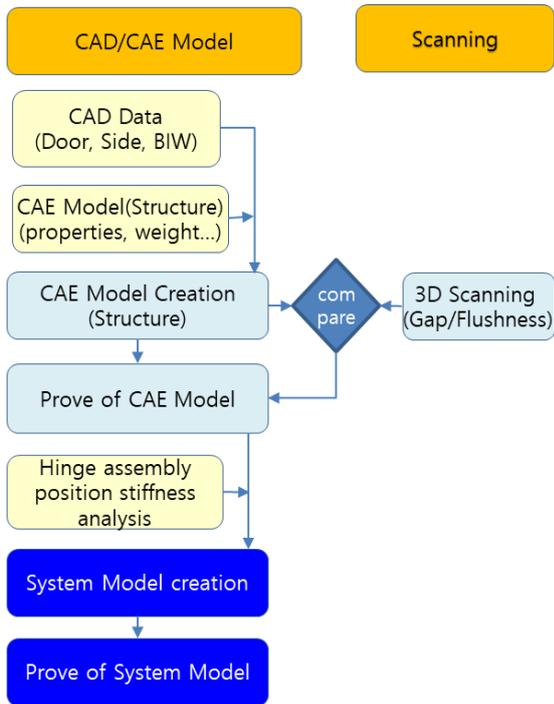
이 연구에서 수행한 방법과 절차는 <Figure 1>과 같다. 먼저 구조해석 CAE 모델을 구성한다. 해석 모델은 도어, 사이드, 바디 등의 CAD 도면과 부품의 물성, 중량 등 해석에 필요한 정보를 이용한다.

다음은 실차를 스캐닝하여 간격과 단차 값을 취득하여 CAE를 통하여 추출한 간격/단차 값과 비교한다. 이 절차를 통하여 CAD 도면 데이터와 스캐닝한 실차 data의

정합성을 확보한다. 이 절차는 실차에 대한 시스템 모델의 신뢰성을 확보하기 위한 절차이다.

그 다음은 구축된 CAD 도면 기반 CAE 구조해석 모델에서 간격/단차를 추출하였다. 추출된 간격/단차와 구축된 시스템 모델에서 추출한 간격/단차를 비교하였다. 도출된 간격/단차 값이 CAD 도면을 이용하여 CAE 모델에서 추출한 간격/단차 값과 유사함을 확인하였다. 이러한 절차를 거쳐 시스템 모델이 신뢰성이 있음을 확인하였다. 시스템 모델 구축 시는 해석을 통하여 확인된 간격/단차에 영향을 주는 주요인자와 힌지 장착부 강성 값을 입력한다.

마지막으로 시스템 모델에서 예측한 값과 실차에서 스캐닝을 통해 측정된 간격/단차 값을 비교하여 신뢰 수준의 결과를 도출하여 시스템 모델의 신뢰성을 확보하였다. 따라서 신차 개발 시 개발된 시스템 모델을 이용하여 도어와 바디의 간격/단차 조립공차를 달성하기 위해 도어 중량, 힌지 장착면 강성 등이 반영된 도어의 상향 장착량 즉, 힌지의 조절량을 정량적으로 도출할 수 있다.



<Figure 1> The Methodology of Research

1.4 기존 연구의 고찰 및 문헌 연구

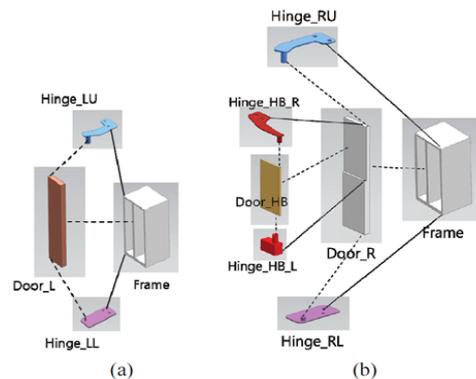
공차는 설계자가 부여하는 부품의 형상과 치수의 허용 범위이며, 편차는 제작된 부품 및 제품의 형상, 치수가 보이는 산포이다[16]. 공정의 능력을 좋게 하기 위해서는 품질의 변동을 줄여야 하며, 이를 위해서는 적절한

공차를 주어, 생산 시의 편차를 줄여야 한다[7].

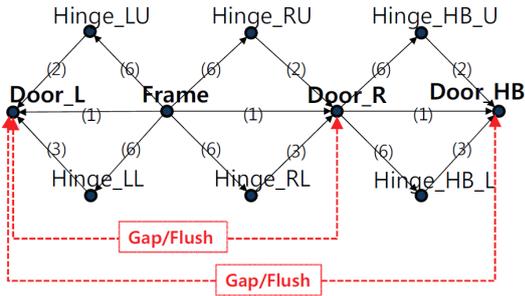
공차설계는 조립품의 품질이 만족되도록 부품의 공차를 부여하는 작업이며, 공차해석은 반대로 부품들의 공차가 주어졌을 때 조립품의 공차를 예측하는 것을 말한다. 공차설계는 보통 공차해석을 반복적으로 수행하여 적절한 공차 값을 결정하는 과정을 거친다. 따라서 이를 위해서는 공차해석을 정확히 할 수 있어야 한다. 정확한 공차해석을 위해서는 조립공정에서 부품간의 자유도 구속을 실제와 부합하게 정확히 시뮬레이션 할 수 있어야 한다. 3차원 공간에서 부품이 완전하게 구속되기 위해서는 6개의 자유도(x, y, z 방향의 병진 및 회전에 대한 자유도)가 구속되어야 한다[2, 8].

공차해석에 사용되는 방법으로는 최악조건해석 (Worst Case Analysis), Min/Max를 구하는 Arithmetic Calculation, Statistical한 RSS(Root Sum of Squares), Computational Simulation을 수행하는 Monte Carlo Simulation 방법[8, 10, 11] 등이 있으며 이를 위한 소프트웨어 툴로서 Dassault Systemes의 TAA 모듈, EDS의 visVSA, DCS의 3DCS 등이 있다[13].

국내의 간격/단차에 관련된 연구 동향은 논문으로 냉장고의 도어 사이 간격/단차를 다룬 연구가 진행되고 있다[8, 14]. 해당 연구에서는 DFC(Datum Flow Chain) 기반 공차설계에 대해 정의를 하고 있는데 DFC는, <Figure 2>[8]에서 자유도 규제가 정의된 냉장고 구성부품이 조립되는 관계를 보여주고 있다. <Figure 3>[8]은 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 자유도를 구속하지 않고 단지 지지 또는 고정하는 경우를 접촉(contact)이라 하고 점선으로 표시한다. 즉, 냉장고 도어 조립에서 부품과의 관계와 자유도 정의 후 공차해석 수행 결과를 제시하였다.



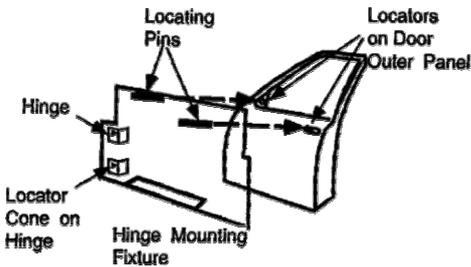
<Figure 2> Parts (a) of Left-Hand Side, and (b) of Right-Hand Side of the Refrigerator Model



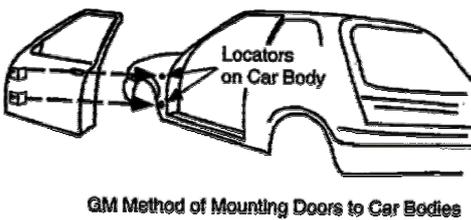
<Figure 3> Datum Flow Chain for the Refrigerator Model

해외의 간격/단차에 관련된 문헌 연구로는 미국 MIT 대학 Daniel Whitney 교수 팀은 자동차 도어의 간격/단차와 실링갭에 대한 Datum Flow Chain(DFC) 분석을 통해 GM과 Ford사의 간격/단차 품질 및 실링갭 품질 구현 방안을 제시하였다[15]. 연구에서 제시한 도어 조립 시 만족되어야 하는 2개의 Key Character는 다음과 같다.

첫 번째는 도어 사이 및 도어와 바디 사이의 간격/단차 품질이다. 두 번째는 Seal과 도어 사이의 밀폐 정도(Door Inner와 Seal의 관계)를 말하는 실링 품질이다.



<Figure 4> Mounting of Door to Body with Jig



<Figure 5> Mounting of Vehicle Door to Body

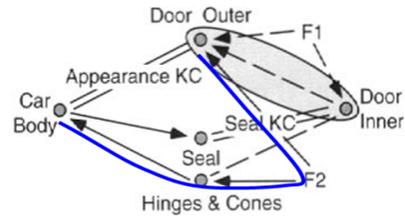
<Figure 4>[15]와 <Figure 5>[15]는 Jig Fixture를 이용하여 도어를 차체에 조립하는 순서와 기능에 대하여 아래와 같이 설명하고 있다.

- (1) 2개의 핀에 의해 Hinge Mounting Fixture에 Door Outer Panel이 조립되어 도어의 위치가 잡힘
- (2) 장착된 Hinge를(한쪽 날개에 있는 Oversize Hole을 통해) 볼트로 Door에 고정[Hinge의 L, H 방향 관리]
- (3) Hinge의 반대쪽 날개에 있는 Oversize Hole에 Locator

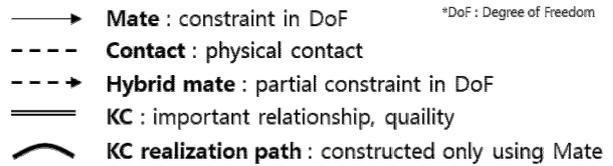
Cones 조립

- (4) 작업자가 Lifter를 이용해 Door를 들어올려, Hinge의 Locator Cones를 Car Body의 Locators (Hole, Slot)에 조립
- (5) Door 위치 조정 후 볼트로 Body에 체결[Door의 H, T 방향 관리]

아래 <Figure 6>[15]은 Door와 Car Body 조립 시의 도어, 바디, 힌지, 실 등의 관련 부품들에 대한 자유도의 제약에 대해, <Figure 7>[15]은 자유도를 구속하는 부품간의 관계를 정의하고 있다.



<Figure 6> DFC of Vehicle Door Mounting



<Figure 7> Meaning of Mate on DFC

1.5 본 연구와 기존 연구와의 차이점

기존의 연구는 공차설계와 공차해석을 통하여 부품에 공차를 부여하거나 공차가 부여된 조립부품의 공차를 해석하여 조립부품의 품질을 만족하도록 하는 것이었다. 간격/단차에 관련된 국내연구는 냉장고 간격/단차를 구성하는 부품간의 제약사항(DFC)을 정의하여 공차설계를 하기 위한 연구이고[8], 해외의 Daniel Whitney 교수 팀의 GM과 Ford에 대한 연구는 도어 조립 시 만족되어야 하는 Key Character로 간격/단차와 실링 갭 품질을 제시하고 상기 2개의 Key Character를 확보하기 위해 관련된 부품들 간 자유도 제약(DFC) 및 상호간의 트레이드오프를 제시하였다[15]. 본 연구에서는 부품을 완성품으로 조립하는 과정(완성된 Door를 완성된 Body에 Jig를 이용하여 장착)에서 설계된 공차를 확보하기 위해 부품의 중량이나 강성 등을 고려하여 도어 조립 보정량을 제시하여 주는 기술이다. 즉, 지금까지는 조립에 영향을 미치는 인자가 많기 때문에 수 회에 걸쳐 휴리스틱한 방법으로 단격/단차에 대한 목표 설계공차를 달성하고 있다. 이 연구는 PamCrush CAE

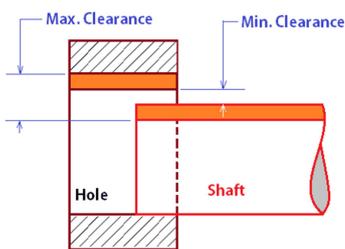
SW와 Simulation-X라는 Simulation SW를 활용하여 개발된 System Model에서 차량 도어와 바디의 간격/단차 보정량을 정량적으로 제공하여 주는 기술이다. 기존 연구와의 차이점은 기존연구는 부품에 대한 공차설계나 해석에 대한 방법이나 Case에 대한 연구를 하였고, 간격/단차에 있어서는 DFC를 정의하고 공차해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 그리고 도어의 간격/단차의 품질을 확보하기 위한 관련요소들과 요소들과의 자유도 제약(DFC) 및 고려사항을 제시하였으나 도어의 간격/단차를 확보하기 위한 생산기술적인 도어를 바디에 장착 시 정량적인 보정량을 도출하는 방안 등의 연구는 없었다. 이 연구에서는 도어의 간격/단차의 설계품질을 확보하기 위한 도어 중량 및 힌지 장착면 강성 등을 입력하여 도어 처짐을 보상해주는 도어 상향 장착 값을 정량적으로 제공해주는 기술이다.

2. 문제 정의

도어와 바디의 간격/단차에 대한 품질을 확보하기 위해서는 도어 중량과 도어와 바디의 힌지 장착면의 강성 등에 의한 도어의 처짐에 의한 간격과 단차에 관한 문제를 정의해야 한다. 이 챗터에서는 간격과 단차에 관련한 개념 및 문제를 정의한다.

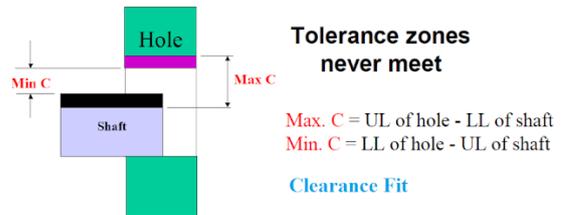
2.1 간격 및 단차

공학적 맞춤(fitting)은 일반적으로 부품 또는 어셈블리를 설계할 때 기하학적 치수 및 공차 계산의 일부로 사용된다. 엔지니어링 측면에서 볼 때, 맞춤은 두 짝을 이루는 부품 사이의 틈새이며, 이 틈새의 크기는 부품이 서로 독립적으로 움직일 수 있는지 또는 일시적으로 또는 영구적으로 결합되는지 여부를 결정한다. 엔지니어링 맞춤은 일반적으로 샤프트 및 홀(Shaft and Hole)로 설명되지만 라운드 부품에만 국한되지는 않는다. 정확한 피팅은 생산 비용이 더 비싸고 조립이 더 까다로울수록 비용이 많이 들기 때문에 피팅을 선택하는 데 있어 비용이 주요 요인이기도 하다[4].



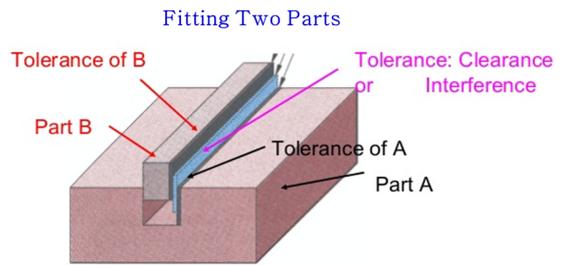
<Figure 8> Clearance of the Shaft and Hole

<Figure 8>[4]은 Hole과 Shaft의 조립에 있어서 Hole 최대가 되고 Shaft가 최소가 될 때의 Max. Clearance와 Shaft가 최대가 되고 Hole 최소가 되는 Min. Clearance를 나타내고 있는데 계산식은 <Figure 9>[4]와 같이 Maximum과 Minimum Clearance로 나타낸다.



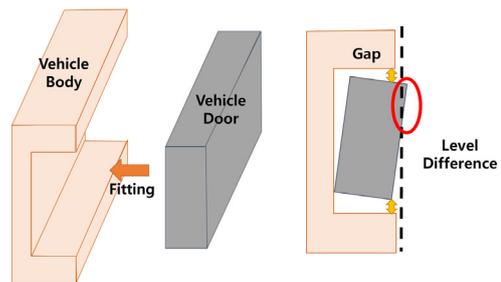
<Figure 9> Max & Min Clearance

Hole과 Shaft가 아닌 두 파트 사이의 조립에서도 동일한 개념이 성립하며, 자동차의 도어와 바디의 조립이 <Figure 10>[4]에 해당한다고 볼 수 있다.



<Figure 10> Clearance of Fitting Two Parts

차량 도어의 간격 및 단차는 조립의 개념에서 출발하게 된다. 조립이란 두개의 부품을 결합하는 과정이다. 차량 도어 조립의 경우 차량의 바디라는 부품에 도어라는 부품을 결합(Fitting)하는 과정으로 볼 수 있으며 <Figure 11>과 같다. 실제 부품들은 설계와 달리 제조 편차(Manufacturing deviation)가 존재하고, 조립 시 간격(Gap)과 단차(level difference)라는 공차가 발생하게 된다. 간격은 두 부품 사이의 공간을 의미하며 단차는 두 부품의 평면상 평탄도를 의미하며 <Figure 11>과 같이 나타낼 수 있다.

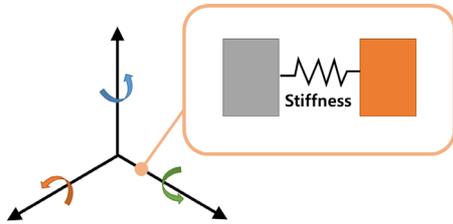


<Figure 11> Concepts of Fit, Gap and Level Difference

2.2 차량 도어 조립

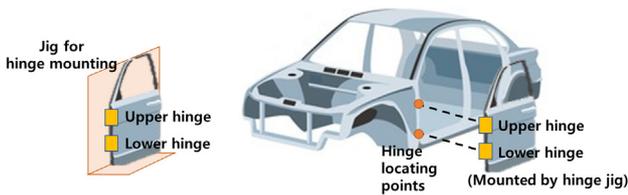
차량 도어 조립의 경우 다음의 2가지 요소가 조립 공차에 있어 큰 영향을 주게 된다.

첫 번째 요소는 변형이다. 기본적으로 힌지 장착면인 차량 바디와 도어의 경우 강체가 아닌 변형체이다. 그렇기에 <Figure 12>과 같이 6자유도(3차원 공간에서 부품이 완전하게 구속되기 위해서 x, y, z 방향의 병진 및 회전)에 대한 자유도(변형을 고려해주어야 한다. 또한 조립이라는 것은 부품들의 자유도를 제약하는 것이다[2, 8]. 그렇기에 특정 축방향으로의 강성은 단일 강성의 합이 아닌 복합적인 강성 값을 띄게 된다. 이로 인하여 복합적인 변형들이 일어나 조립 공차에 영향을 주게 된다.



<Figure 12> 6 Degree of Freedom and Stiffness

두 번째 요소는 도어 무게로 인한 처짐이다. 차량 도어의 무게는 차종마다 다르겠지만 평균적으로 약 25kg 정도의 무게를 가진다. 그렇기에 도어에 힌지를 장착하기 위해서는 별도의 지그(Jig)를 사용하여야 한다. <Figure 13>는 힌지를 통해 차량 바디와 도어가 조립된다. 2개의 힌지를 통해 차량 바디가 도어를 지지해주기 때문에 도어의 무게로 인한 처짐이 발생하게 되고 이로 인하여 간격 및 단차에 영향을 주게 된다.



<Figure 13> Mounting of Vehicle Door to Body

그렇기에 완성 차량의 품질을 위해서는 도어의 무게에 의한 처짐과, 조립에 의한 6자유도 변형이 일어난 후에도 목표 공차가 확보되어야 한다. 힌지를 상향 장착시키게 될 시 힌지 장착면의 탄성 변형 및 중력에 의하여 처짐이 일어나더라도 목표 공차의 확보가 가능하기 때문에 도어 상향 장착(도어 힌지 조절) 보정량을 정량적으로 알아낼 수 있어야 한다.

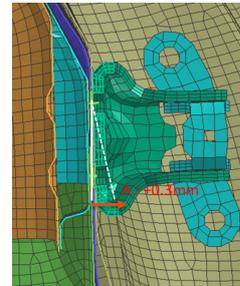
3. 차량 도어와 바디의 간격/단차와 도어 상향 장착량 예측 및 활용

이 연구주제는 완성 차량의 차량 도어와 바디의 간격/단차 목표 공차를 확보하기 위한 최적의 힌지 마운팅 상향 장착 보정 값을 제시해주는 시스템 모델을 구성하는 방식이다. 리어 도어의 장착으로 범위를 한정하여 이 연구를 진행하였다.

3.1 힌지 장착 구조 해석 모델 구성

3.1.1 해석 모델 구성

도어 간격/단차를 시스템 모델로 구성하기 위해 <Figure 14>와 같이 상세 해석 모델을 구성하였다.



<Figure 14> Hinge CAE Model

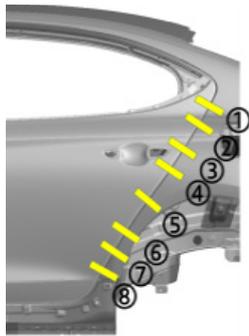
해석 모델의 목적은 도어 처짐 해석과 도어 처짐시 거동 파악 및 요인 별 간격/단차 영향도 분석이다. 구성된 해석 모델은 바디, 도어, 힌지와 힌지 키네매틱 조인트, 볼트, 힌지 마운팅 등이다. 해석 모델은 구조 해석 프로그램인 PamCrash를 사용하였으며, 바디와 도어의 유한 요소 형상 및 접촉제와 용접점 위치를 확인하여 구성하였다. 본 연구에서 중요한 도어 힌지의 바디 체결부 및 도어 체결 부를 상세 모델로 구성하였다. 차체의 도어는 힌지의 상/하단 조절 값에 의해 상향 장착되고, 중력에 의해 처짐이 발생하는 결합 구조이다. 따라서 해석 모델에서는 이러한 구조를 분석하기 위해 하중 별 해석을 분리하여 순차적인 연계 해석으로 구성하였다.

1단계로 도어 상향장착 해석에 의한 간격/단차 변화, 2단계로는 중력 처짐 해석에 의한 간격/단차 변화에 대하여 구분하여 실시한다.

3.1.2 해석 모델 검증

해석 모델의 검증은 실 양산라인의 차체를 도어 부분의 볼팅 부분을 제거하여 힌지가 바디에 장착되는 위치를 3D 스캔 장비로 측정하여 힌지의 표준위치 대비 힌지 조절 위치를 산출한다.

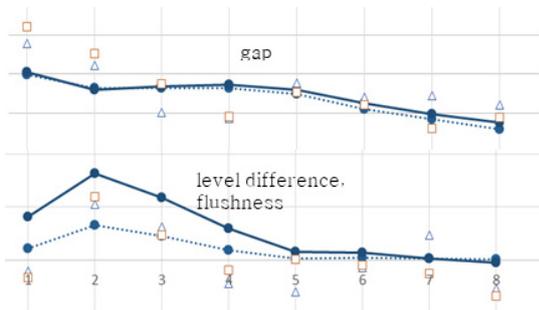
힌지의 상/하단에 대해 X 방향으로 일정량 조정하였다. 이 값으로 해석 모델에서 상/하단 위치를 조절 후 중력을 적용하여 <Figure 15>에 표시된 것과 같이 리어도어 8 포인트의 간격/단차를 해석과 실물 측정 값을 비교하였다. 실물 측정은 차체의 간격/단차를 측정한다.



<Figure 15> Reference Point of Gap & Level Difference, Flushness

<Figure 15>는 검증에서 비교한 간격/단차를 측정한 8개의 Reference 지점이다.

<Figure 16>는 간격 및 단차 비교 그래프이다. 실선은 해석에서 도출한 간격/단차이며, 점선은 시스템 모델에서 도출한 간격/단차이고 삼각형과 사각형은 실차 스캐닝으로 측정한 간격/단차이다. 현장 산포 및 측정 산포를 고려하면 해석과 실물 측정 결과가 유사하여 해석 모델의 신뢰성을 확인하였다. 해석과 실물 검증 과정을 통해 도어 처짐의 주요 인자는 도어의 무게와 힌지의 바디 장착면과 도어 장착면의 강성이라는 것을 알 수 있었다.



<Figure 16> Compare of Gap & Level Difference, Flushness of CAE & Physical

3.2 도어 상향 장착량 예측 시스템 모델 구성

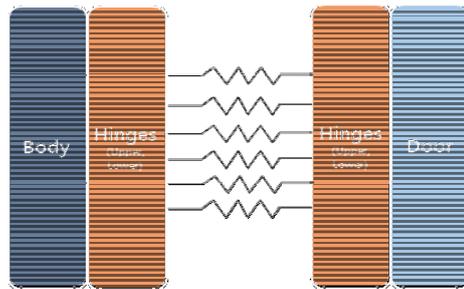
예측 모델의 활용성을 높이기 위해 몇 초 이내로 결과를 계산할 수 있는 시스템 모델을 구성하였다. 시스템 모델은 대상 주요 인자를 수치 모델로 구성한 것이기 때문에

사전 분석 없이 신뢰성 높은 시스템 모델을 구성할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 신뢰성 해석 모델 구성을 통해 대상의 주요 인자를 도출했고, 해석 모델을 통해 주요 인자의 6자유도의 강성 값의 구성 비율을 도출한다.

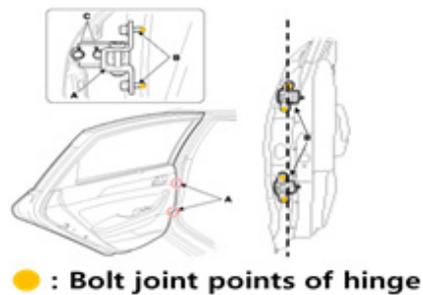
3.2.1 힌지 장착부 강성 도출 해석

힌지 장착부는 볼트의 체결한 힘에 따라 도어의 무게로 인하여 변형이 일어나게 되는데, 시스템 모델 구성을 위해 힌지 장착의 바디 및 도어 장착면의 6자유도 강성 값을 도출하기 위해 <Figure 17>과 같이 바디에 상하단 힌지가 장착되고 도어에 상하단 힌지가 장착된 기준에 구성된 해석 모델을 활용하여 강성 추출 해석 모델을 구성하고 해석을 통한 힌지 장착부 강성을 도출하였다.

<Figure 18>은 정비지침서를 통해 제공되는 차량의 리어 도어 단면도로써, 그림과 같이 도어 쪽에 상단 및 하단 힌지가 총 4개의 볼트로 체결된다.



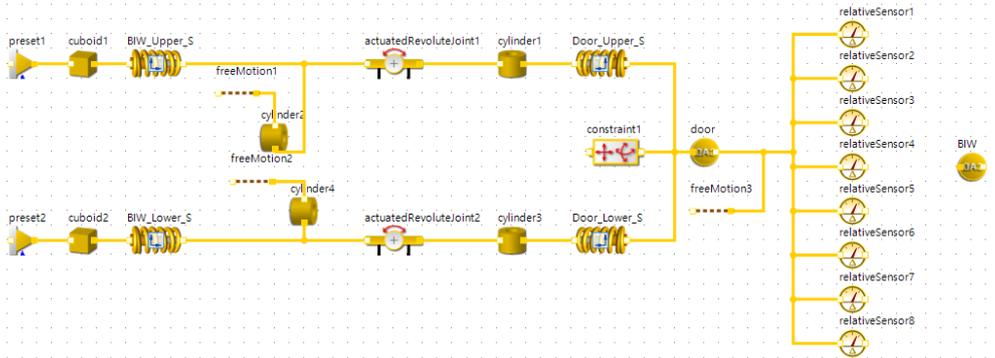
<Figure 17> Analysis of Hinge Stiffness



<Figure 18> Hinge Mounting Detail View

3.2.2 시스템 모델 구성

<Figure 19>는 이 연구에서 구성한 리어도어 간격/단차 예측 시스템 모델이다. 시스템 모델의 구성요소는 바디, 상하단 힌지 장착위치, 바디의 상하단 힌지 장착부, 상하단 힌지, 도어 상하단 힌지 장착부, 랫치, 도어형상으로 구성된다. 각 구성간의 연결 부분인 바디 쪽 힌지 장착면과 도어 쪽 힌지 장착면이 6방향으로 변형이 가능하도록 구성하였다. <Figure 19>은 구성요소와 요소간의 연계관계를 표시하고 있다.



<Figure 19> Configuration of System Model

<Figure 19>에 표시된 시스템 모델의 세부 구성 요소의 상세입력 정보 내용은 다음과 같다. 힌지 결합 부 바디(좌표, 병진 강성(kt), 회전 강성(kr)), 힌지(좌표, 회전 방향 구속 조건), 도어(좌표, 지오메트리, 무게중심, 관성 모멘트), 도어 중량 등이다.

3.2.3 시스템 모델 기능

시스템 모델의 기능은 첫째 도어 중량에 의해 처짐 발생 시 도어의 간격/단차 값의 예측과, 둘째 의장품의 무게를 반영하여 상단/하단 힌지의 최적 조절량을 도출하는 2가지 기능으로 구성되어 있다. 현재는 도어 상향/하단의 값을 예측할 수 있는 방법이 없는 상황이기 때문에 도어 상향 장착량의 정량적 제공에 의한 시행착오 횟수를 줄여줄 것으로 기대된다.

3.2.4 시스템 모델 검증 및 신차 활용 프로세스 정립

상향 장착 최적 값 예측 결과 상단 예측 값 0.2mm, 하단 예측 값 0.5mm로, 3D 스캔 상단 측정 값 0.25mm, 하단 측정 값 0.5mm로 예측 값과 측정값이 유사함을 검증하였다. 이 기술의 신차 적용 시에 필요한 데이터는 다음과 같다. 첫째, 3D CAD, 둘째, 실물정보, 셋째, 측정 정보 이다.

신차 활용 프로세스의 적합성을 확인하기 위해 해석 모델의 해석 결과를 신차 모델로 가정하여, 힌지 장착 시의 산포를 반영하기 위해 힌지 장착 위치를 X방향으로 보정량 만큼 조절하였다.

그리고 시스템 모델의 힌지 장착부의 강성 보정치를 신차로 가정하여 초기화 한 후 적합성 검증 결과 장착부의 강성(Stiffness)을 도어 측정지점의 간격들의 기울기로 도출하였고, 지그(Jig)에 의한 산포 보정은 기울기 윗값과 부합되는 힌지 장착 지그의 편심량인 X방향 보정량만큼 보정할 수 있는 것을 확인하였다. 도출된 강성의 보정치는 기존에 실물로 도출했던 값과 유사한 수준으로 도출하여 신차 적용 프로세스의 신뢰성을 검증하였다.

4. 결 론

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 간격/단차는 기능과 심미성의 관점에서 모두 중요하다. 이 중에서 특히 간격/단차는 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 간격/단차를 관리할 필요가 있지만, 시임 전체에 걸쳐 간격/단차가 허용 범위 내에 있으면 된다는 조건만으로는 심미성이 보장되지 않는다. 즉 간격/단차가 모든 점에서 허용 범위 내에 있더라도 일정하지 않으면(예를 들어, 시임을 따라 갭이 증가하거나 감소하면) 심미성이 저하되어 고객들의 감성품질에 악영향을 끼치게 된다[8].

따라서 이 연구에서는 완성 차량 도어와 바디의 간격/단차 품질 확보를 위해 PamCrush CAE SW와 Simulation-X라는 Simulation SW를 이용하여 힌지 마운팅 상향 장착 보정치를 정량적으로 제공해주는 시스템 모델을 제안하였다. 이를 위하여 힌지 마운팅 구조 해석 모델을 구축하였으며, 강성 값 실측과 레퍼런스 포인트의 공차 실측을 통해 구조 해석 모델의 신뢰성을 확보하였다.

이후 힌지 마운팅 상향 보정량을 제안해주는 시스템 모델을 구성하였고 실제 생산에 있어 사용 가능성을 확인 하였다.

연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 차체 단계에서 도어 무게를 고려한 간격/단차 품질을 예측할 수 있는 시스템 모델 구성 절차를 확립 하였다.
- (2) 담당자의 경험을 통한 휴리스틱한 방법을 통해 개선 작업이 이루어지고 담당자의 숙련도에 의해 품질

확보 기간이 상이하게 나타나던 전통적인 휴리스틱한 방법을 개선하여 정량적인 데이터에 근거하여 도어와 바디의 간격/단차 품질육성을 수행할 수 있을 것이다.

- (3) 또한 정량적인 보정치 제공에 의해 간격/단차의 균질성을 확보할 수 있으며, 이로 인해 간격/단차의 균질성에 의해 심미성을 확보하여 고객의 감성 품질을 높일 수 있을 것이다.
- (4) 시스템 모델에서 제공하는 도어 상향장착 보정 예측량에 의해 신속하고 정확한 품질 육성 기반을 마련하였다.
- (5) 이를 통해 현재 수회에 걸쳐 수행되던 도어와 바디의 간격/단차 품질육성이 신속하게 이루어져 소요 MH와 소요기간이 크게 단축될 것이며, 비용이 절감되고 품질이 좋아지게 되어 고객만족에 기여하게 될 것이다.

이번 연구에서는 힌지 장착지그 및 도어 장착지그에 대한 설비 정보를 반영하지는 못했지만 이 후의 연구에서 설비 정보를 추가 반영하여 예측의 정확도를 높일 계획이다. 이렇게 되면 더욱 더 심미성이 높은 품질을 확보하고 품질확보 기간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 이 연구는 신차 개발에 있어 정량적인 데이터에 의해 차량의 간격/단차를 심미성 있게 빠르고 정확하게 확보함으로써 품질, 가격, 일정 등이 최적화된 차량을 제공할 수 있는 핵심역량 확보에 기여하게 될 것이다.

벤츠는 사람이 도어에 앉아도 힌지와 차체강성이 문제 없다는 것을 자랑으로 여겼고, 동독의 국민차였던 Trabant가 통일 후 경쟁력을 확보할 수 없어 이 세상에서 사라졌다는 것을 고려할 때 ‘디자인-설계-시험차 제작-평가-양산’ 등에 관련된 정보가 디지털화 되고 업체, 설비, 부품, 품질 정보가 연계된 융/복합 기술기반 시스템 모델의 효율적 적용을 통한 과잉 스펙 또는 터무니없이 부족한 스펙이나 과도한 제약 등의 원인을 제거하여 가격과 품질 등의 고객 Needs 만족의 최적화 방안을 제시하여 고객에게 가치를 부여하고 기업의 지속성 확보에도 기여할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

1. This study has been supported by a Research Fund of Kumoh National Institute of Technology, Korea [2016-104-115].
2. The support of the research work presented in this paper by Chen Se Shin of KMC in cooperating the re-

search and conducting the validation of the proposed methods.

References

- [1] Ahn, H.J. and Yim, H.J., Development and Case Studies of a Function-Based Method for Geometric Tolerance Design, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2018, Vol. 35, No. 4, pp. 433-442.
- [2] Ahn, H.J., Choi, Y.H., Park, J.I., Park, H.P., and Yim, H.J., Study of assembly process simulation algorithms for tolerance analysis and illustrating case studies, *Spring and Autumn Conference of The Korean Society of Mechanical Engineers*, 2015, pp. 1922-1927.
- [3] Cho, J.U. and Han, M.S., Structural Analysis on Door Hinge of Car, *Journal of Korean society of Manufacturing Process Engineers*, 2010, Vol. 9, No. 2, pp. 33-39.
- [4] Engineering Metrology, <https://extrudesign.com/types-of-fits-in-engineering/>.
- [5] Han, Y.H., A Conceptual Information Model of Mechanical Assemblies Incorporating Assembly and Kinematic Constraints, and Tolerances, *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 2005, Vol. 10, No. 2, pp. 133-142.
- [6] Jang, S.H., Fundamentals of GD & T, Kumho University Press, 2016, pp. 30-37.
- [7] Kim, J.H., Calculating Cp of Position Tolerance when MMC Applied at Datum and Position Tolerance, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 3, pp. 1-6.
- [8] Kim, J.S., Kim, J.S., and Yim, H.J., Tolerance Analysis and Design of Refrigerator Door System for Functional and Aesthetic Quality of Gap and Flush, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2014, Vol. 31, No. 1, pp. 59-66.
- [9] Kim, K.D., Jang, H.K., Park, J.S., Moon, J.B., and Kang, M.G., Study on Computational Structure Analysis Modeling of Composite Carbody BIW system, *Spring Conference of Korean society on Automotive Engineering*, 2016, pp. 657-658.
- [10] Kim, Y.N., Yoon, K.H., and Chang, S.H., The Tolerance Stack Analysis of the Model Involving Position Tolerance, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2005, Vol. 31, No. 1, pp. 36-43.
- [11] 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*, 2011, Vol. 16, No. 5, pp. 380-389.
- [12] Lee, J.Y., Quality Control with Tolerance Analysis, *Autumn Conference of Korean Institute of Industrial Engineers*, 2010, Vol. 36, No. 4, pp. 243-247.
- [13] So, H.C., Jeong, N.M., Yim, H.J., and Jee, H.S., Determination of Fixture Location based on a Tolerance Analysis Method for Deformable Assembly, *Society for Computational Design and Engineering*, 2006, pp. 188-194.
- [14] Weng, L., Yun, J.D., Jung, Y.H., Development of the Auto Leveling Mechanism for Side-by-Side Refrigerator Doors, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2012, Vol. 13, No. 7, pp. 3165-3174.
- [15] Whitney, D.E., *Mechanical Assemblies : their design, manufacture, and role in product development*, Oxford University Press, 2004, pp. 235-247.
- [16] Yim, H.J., Dimensional Engineering TECHNITE Review, *Journal of the Korea Society for Computational Design and Engineering*, 2013, pp. 457-474.

ORCIDNam-Yeoung Jeoung | <http://orcid.org/0000-0002-6692-3479>Jin-Hyung Cho | <http://orcid.org/0000-0003-2674-1774>Hyun-Seung Oh | <http://orcid.org/0000-0002-7773-3750>Sae-Jae Lee | <http://orcid.org/0000-0002-6656-5341>