

고장력강을 이용한 자동차 경량 도어 개발 프로세스

장동환[#]

The Process Development of Automotive Light-Weighting Door using High Strength Steel

D. H. Jang

(Received December 1, 2016 / Revised December 26, 2016 / Accepted December 29, 2016)

Abstract

This paper proposes the process to develop a light-weighting automotive door assembly using high strength steel with low cost penalty. In recent years, the automotive industry is making an effort to reduce the vehicle weight. In this study, inner panels for automotive front door using thinner sheets and quenched boron steel were designed to reduce the weight of conventional one. In order to evaluate the stiffness properties for the proposed door design, the several static tests were conducted using the finite element method. Based on the simulation results, geometry modifications of the inner panels were taken into account in terms of thickness changes and cost saving. Furthermore, a prototype based on the proposed design has been made, and then static stiffness test carried out. From the results, the proposed door is proved compatible and weight reduction of 11.8% was achieved. It could be a reference process for automotive industry to develop the similar products.

Key Words : Automotive Door, Static Stiffness Test, Finite Element Method, Light-Weighting, High Strength Steel

1. 서 론

자동차 도어는 모노코크(monocoque) 차체에서 독립적으로 조립되는 대표적인 가동부품(moving part)으로서 외부의 환경변화를 탑승공간으로 유입되는 것을 방지하고 다양한 기능적인 역할을 제공하는 중요한 핵심부품이다[1]. 따라서 자동차 도어의 성능 저하는 불안전한 방수, 비정상적인 소음의 유입, 충돌과정에서 탑승객의 상해 등과 같은 심각한 문제점을 발생시킨다. 이러한 이유로 인하여 자동차 도어에 대한 기능적인 최적화는 관련 산업의 공학자들에게 중요한 관심사항중의 하나가 되었다[2].

전세계적으로 지속적인 자동차의 증가는 화석 에너지 고갈, 유해가스 배출, 지구 온난화 등과 같은

사회적, 환경적인 문제를 발생 시키며 현재 자동차 관련 산업은 연비 효율 상승과 배기가스 절감과 같은 요구에 직면해 있다. 일반적으로 자동차 차체는 전체 완성차 중량의 약 40%를 차지하고 있기 때문에 차체 경량화는 연비 향상의 중요한 요소중의 하나이며 가장 기본적인 공학적 접근방법은 경량소재를 적용하는 것이다[3].

현재까지는 자동차 차체에 적용되는 판재에 철강소재 대신에 고장력강[4], 복합소재[5, 6], 알루미늄[7, 8] 등과 같은 신소재를 적용하는 방향으로 발전되어 왔다. 그러나 이러한 경량소재 적용에 대한 가장 큰 단점은 철강소재와 비교하여 상대적으로 소재의 원가가 비싸고 생산공정에 대한 난이도가 높다는 점이다. 또한 현재까지의 연구 결과로부터 동일한 물

[#] Corresponding Author : Dept. of Mechanical Design, Inha Technical College, E-mail: dhjang@inhatc.ac.kr

성을 갖고 있는 단일소재를 차체에 적용하여 경량화 목표를 달성하는 것은 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 일부 연구자들에 의해 다양한 철강소재 또는 경량화된 소재를 적용하여 복합소재 구조물(multi-material structure)을 적용하는 방법에 대해 연구가 진행되어 왔다[3]. 여기에서 복합소재 구조물의 개념은 자동차 차체에 적용되는 판재에 대해 기존에 동일한 소재를 적용하는 것과 다르게 다양한 소재를 독립적인 구성요소에 각각 적용하여 최적화된 구성방안을 찾는 것이다. 이러한 하이브리드형 구조물 적용방법은 설계자로 하여금 다양한 적용소재에 대해 각각의 기계적 특성을 활용하고 최적화된 생산효율성을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 자동차 전면도어에 대한 경량화를 위하여 도어를 구성하는 각각의 독립적인 판재에 대해 소재의 종류와 두께를 설계변수로 설정하여 형상을 제안하였다. 설계에 대한 적합성을 검증하기 위하여 3가지 정적 강성시험과 성형공정에 대해 유한요소해석을 이용하여 모의실험을 수행하고 설계변경에 반영하였다. 또한 최종 제안된 설계에 따라 시제품을 제작하여 모의실험과 동일한 조건으로 강성시험을 수행하였다.

2. 자동차 도어 개요

자동차 도어는 디자인측면에서 완성차 메이커의 대표성과 차별성을 극명하게 나타내는 모듈부품으로서 사용자의 감성품질과 함께 측면충돌에서 탑승객을 보호하는 역할을 수행하기 위해 고강성의 안전이 요구된다. 이러한 도어는 일반적으로 거치되는 윈도우를 제외하고 평균적으로 약 20kgf 내외의 중량을 가지며 차종에 따라 최대 50kgf의 중량을 가지고 있는 경우도 있다.

Fig. 1 은 자동차 도어에 대한 형상을 나타낸 것으로 크게 방수, 방한 역할을 하면서 윈도우의 개폐를 안내하고 지지해주는 상단 프레임(frame) 부분과 외판(outer panel), 내판(inner panel)이 조립된 하단 구조물로 구성되어 있다. 여기에서 하단 구조물은 판재의 외곽 모서리 부분을 굴곡하는 플랜징(flanging)과정과 외판과 내판을 결합하는 헤밍(hemming)공정을 거쳐서 조립된다[1]. 또한 별도의 체결공정을 통하여 내판의 경계면에 횡방향으로 조립되어 탑승객을 보호하는 사이드 임팩트 빔(side impact beam), 차체에

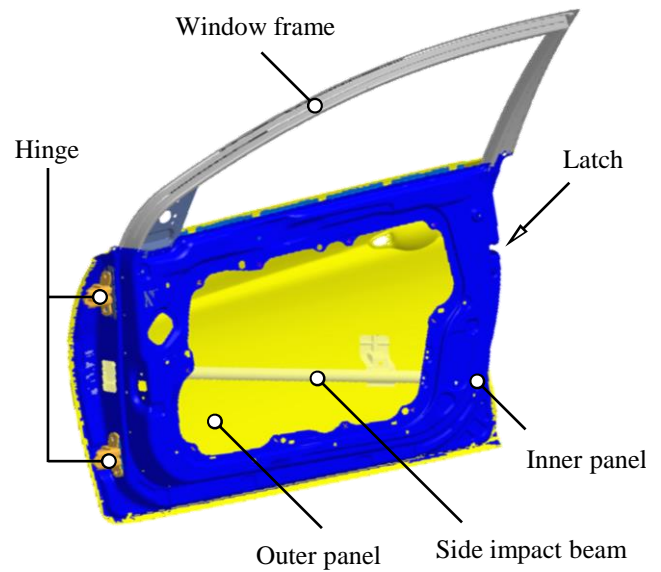


Fig. 1 Shape and illustration of the door assembly

도어를 장착하여 지지하는 경첩(hinge), 도어를 개폐하는 기능을 하는 래치(latch)가 각각 조립된다.

3. 자동차 도어 개념설계 및 평가

최근까지 자동차 산업에서는 차체의 강성증대와 외부로부터의 물리적인 손상을 방지하기 위한 목적으로 박육화된 고강성 소재나 신소재에 대한 적용에 많은 관심이 있어왔다. 일반적으로 자동차 차체의 고강성과 내손상성은 적용되는 판재의 기하학적인 형상, 지지조건, 두께, 물성, 하중조건 등과 같은 다양한 요소들에 의하여 결정되기 때문에 매우 복잡한 매커니즘으로 구성되어 있다. 또한 판재 성형 공정에서 발생하는 두께 감소, 탄성복원력, 잔류응력에 의한 후변형, 가공경화 등도 고려해야 한다. 따라서 자동차 차체에 적용되는 판재에 대해 충분한 강성을 확보하고 외력에 대한 손상발생을 최소화 하기 위하여 개념설계 단계에서 적용 소재에 대한 물성, 판재 두께, 판재 성형조건 등에 대한 복합적인 고려가 필요하다[9]. 핫 스탬핑(hot stamping)공법은 고온의 보론강을 이용하여 성형하는 기술로서 연신율이 대폭 증가하여 성형성이 우수하고 소재에 대한 고강도화를 달성할 수 있는 장점이 있다[10].

본 논문에서는 우선적으로 차체에 대한 경량화를 목적으로 상부 프레임과 비교하여 상대적으로 중량 감소가 크면서 외관품질에 대한 제약이 작고 설계

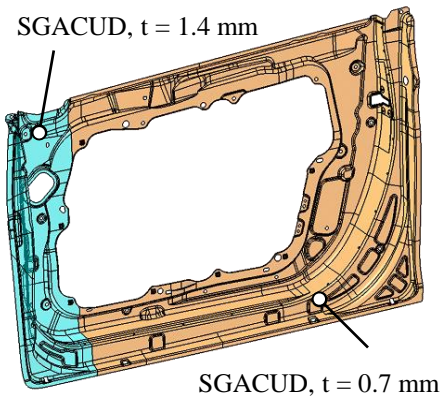


Fig. 2 Front door inner panel for commercial vehicle

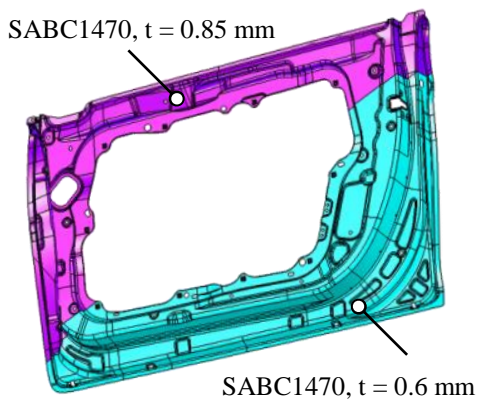


Fig. 3 Proposed design of front door inner panel

자유도가 높은 하부 구조물의 내판에 대해서 적용하였다. 또한 후면도어(rear door)와 비교하여 상대적으로 제품에 대한 설계 난이도가 높고 구조물의 형상에 따라 성형 특성이 많이 영향을 받는 전면도어(front door)를 개발 대상으로 하였다.

Fig. 2는 기존 양산공정에서 사용되고 있는 전면도어의 내판에 대한 형상과 적용된 소재를 나타낸 것으로 대상차종은 국내 완성차 메이커의 중형급 모델이다. 그림에서 알 수 있듯이 양산모델에서는 내판에 대해 동일하게 두께가 다른 용융 아연도금 강판인 SGACUD를 적용하여 맞춤식 재단용접(tailor-welded blank)을 이용하여 성형하고 있으며 중량은 5.058kgf이다.

Fig. 3은 1차 설계단계에서 제안된 전면도어의 내판에 대한 적용소재와 판재의 두께를 나타낸 것으로 핫 스탬핑 공법으로 성형이 가능한 SABC1470 소재를 이용하였다. 기존 양산 모델과 다르게 상대

Table 1 Static stiffness test for front door performance

Category	Target value
Frame stiffness(mm)	1.5↓(point 1), 1.8↓(point 2)
Vertical sagging(mm)	5.0↓
Over opening(°)	6.0↓

적으로 두께가 큰 소재를 상단에 위치하여 래치 상단부로부터 경첩 하단부 방향으로 맞춤식 재단용접이 가능하도록 설계하였다. 이러한 이유는 두께 감소에 의한 강성저하를 최소화하고 측면 충돌에 의한 안전도를 향상시키기 위한 목적이다. 1차 설계단계에서 내판에 대해 계산된 중량은 3.950kgf로서 기존 양산 모델과 비교하여 21.9%의 경량화 효과를 얻을 수 있었다.

일반적으로 다양한 형상의 부재로 구성되어 있는 자동차 차체는 설계단계에서 구조역학적인 관점에서 타당성을 판단하기 위하여 정적 강성시험을 수행한다. 여기에서 정적 강성은 차체에 외력이 가해졌을 때 반력에 의해서 발생하는 변형을 평가하는 것이다. 또한 이러한 강성시험은 자동차를 사용하는 기간에 내구수명을 판단하고 충돌시에 탑승객의 안전성을 평가하는 기준으로 사용된다[11]. 본 논문에서는 설계된 도어의 정적 강성시험을 위하여 Table 1과 같이 3가지 항목에 대해 국내 완성차 메이커의 시험규격을 적용하였다.

4. 유한요소해석 및 설계변경

4.1 해석조건

자동차 차체에 적용되는 판재 구조물에 대한 고강성화는 노면 주행중에 발생하는 정하중이나 불규칙적인 가진 조건으로부터 변형을 최소화시키는 기능을 한다. 특히 도어, 후드, 트렁크 리드 등과 같은 가동부품들은 이러한 기계적 성능을 확인하고 평가하기 위하여 물리적인 시험을 수행한다. 그러나 이러한 시험적인 평가방법은 많은 비용과 시간이 소요되기 때문에 개발기간을 연장시키고 요구되는 성능을 만족하지 못하는 경우에는 빠른 시간내에 설계를 변경하여 개선하기가 어려운 단점이 있다. 따라서 개념설계 단계에서 판재 구조물에 대한 기계적 성능을 평가를 수행하여 설계변경을 최소화하는 것이 요구된다. 수치해석적 평가방법은 이러한 기계

Table 2 Material properties for SABC1470[12]

Properties	Value
Tensile strength(MPa)	1,470
Yield strength(MPa)	996
Elongation(%)	6

● Load point, ● Constraint point, ● Testing point

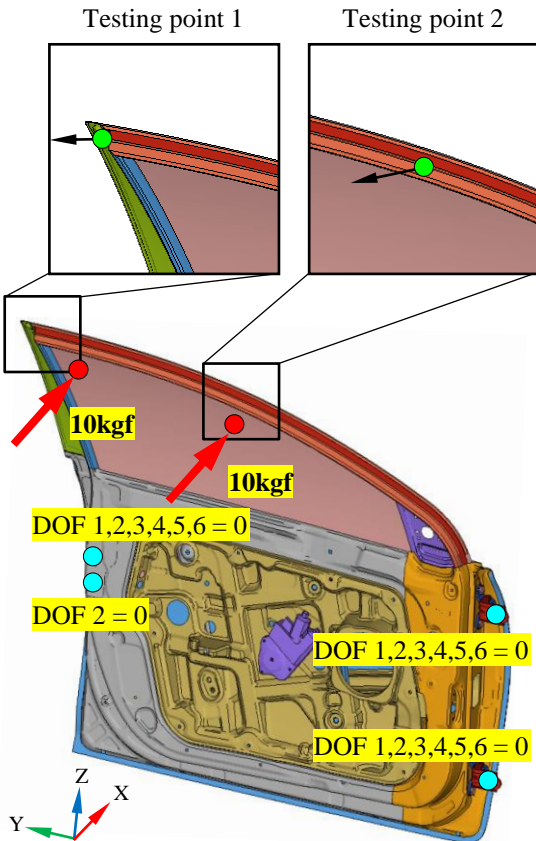


Fig. 4 Boundary conditions of frame stiffness analysis

적 성능을 평가하고 구조물의 형상과 조합에 따른 상대적인 비교를 통하여 최적화된 설계방안을 제공하는 장점이 있다[9].

본 논문에서는 제안된 도어 구조물에 대한 기계적 성능에 대한 적합성을 평가하기 위하여 앞서 언급한 3가지 정적 강성시험 항목에 대해 수치해석적 방법에 의한 모의시험을 수행하였다. 유한요소해석에 사용된 차체 구조물(body-in-white)에서 각각의 부재들과 판재들의 용접조건들에 대한 영향은 무시했으며 모든 차체 구조물의 구성요소들을 강제요소(RBE2)로 결합하는 일반적인 방법을 사용하였다. 유

● Load point, ● Constraint point

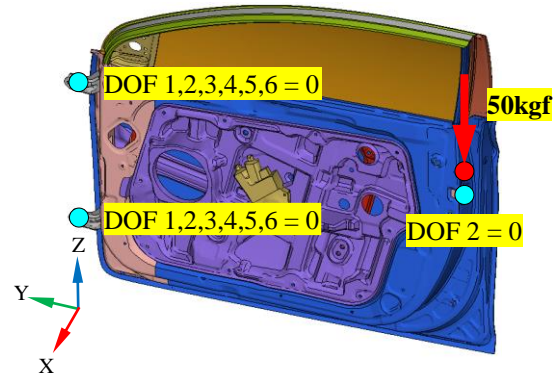


Fig. 5 Boundary conditions of vertical sagging analysis

한요소모델링에서 셸 격자망(shell mesh)을 사용하였으며 전/후처리(pre/post processor)와 해석을 위해서 상용프로그램인 HyperMesh와 Nastran을 각각 사용하였다. 해석에 사용된 SABC1470에 대한 물성조건은 Table 2와 같다.

Fig. 4는 프레임 강성을 해석하기 위하여 전면도어에 적용된 경계조건을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 차체에 체결되는 경첩과 래치부를 모든 방향에 대해 완전히 구속한 상태에서 윈도우의 표면에서 수직방향으로 2개의 지점에 각각 10kgf의 하중을 인가한다. 이때 그림과 같이 상단 프레임의 표면에 있는 2개의 측정점에서 수직방향의 변위를 각각 계산하여 적합성을 평가한다.

Fig. 5는 전면도어에 대한 수직 처짐을 해석하기 위하여 적용된 경계조건을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 2개의 경첩부를 모든 방향에 대해 구속하고 동시에 래치부는 횡방향으로 병진운동(translate motion)만을 구속한다. 이러한 이유는 가해진 하중에 의해 경첩부의 회전축을 기준으로 도어가 내측으로 단합이 발생하는 것을 방지하려는 목적이다. 측정방법은 래치부에서 수직방향으로 50kgf의 하중을 인가하면서 동일한 방향으로 발생하는 변위를 계산한다.

Fig. 6은 전면도어의 오버 오픈링(over opening) 해석을 위하여 적용된 경계조건을 나타낸 것이다. 수직처짐과 유사하게 그림과 같이 경첩부에서 모든 방향을 구속하고 래치부에서 횡방향으로 25kgf의 하중을 인가한다. 이러한 하중에 의해 도어가 완전히 열린상태에서 발생하는 변형에 따른 회전각을 측정하고 주변부품과의 간섭을 확인한다.

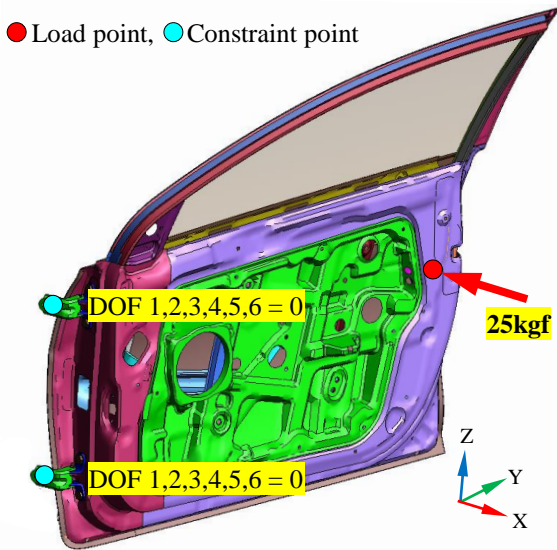


Fig. 6 Boundary conditions of over opening analysis

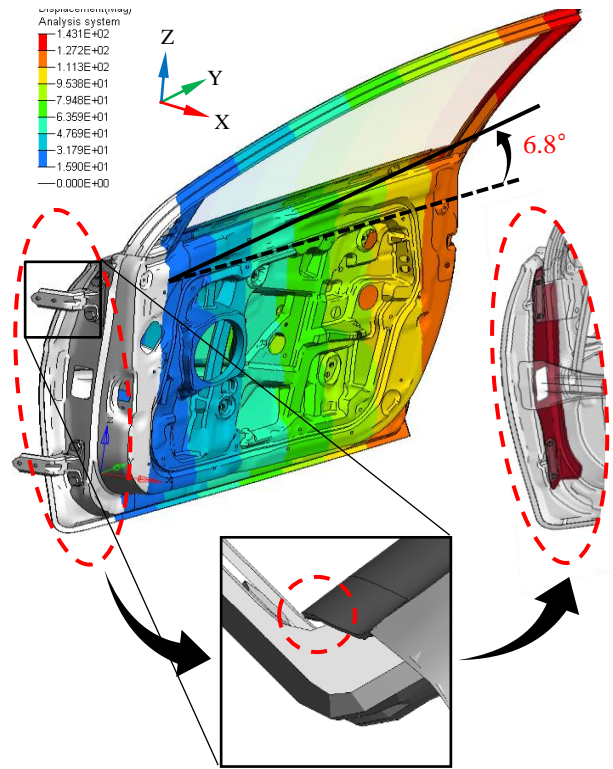


Fig. 7 Simulation results of over opening analysis

Table 3 Simulation results for the proposed design

Category	Value	Result
Frame stiffness(mm)	1.12(point 1), 1.46(point 2)	Pass
Vertical sagging(mm)	3.83	Pass
Over opening(°)	6.8	Fail
Weight	3.950kgf(21.9% weight reduction)	

4.2 1차설계 해석결과 및 성형성 평가

본 논문에서는 기존에 양산화 되고 있는 도어모델은 완성차 메이커에서 이미 성능을 검증하여 생산하고 있는 관계로 제안된 설계모델에 대해서만 수치해석을 수행하였다. Table 3은 1차 설계에서 적용된 전면도어에 대한 정적 강성시험의 해석결과와 기존 양산모델 대비 경량화율을 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 구조물에 대한 프레임 강성과 수직치짐은 만족하였으나 오버 오프닝에 대한 기준을 만족하지 못하였다. 이러한 결과를 바탕으로 오버 오프닝의 수치해석에 의한 변형형상을 분석한 결과 Fig. 7에서 표시된 상단 경첩부에서 과도한 굴곡으로 인한 굽힘현상으로 외관과 간섭이 발생하였다. 따라서 경첩부에 대한 강성을 보완하기 위하여 그림에서와 같이 내판에 대한 별도의 설계변경 없이 상/하단 경첩부에 대해서만 길이방향으로 두께 0.8mm의 보강재를 추가하였다.

본 논문에서는 제안된 전면도어 형상에 대해 성형성에 대한 타당성을 검토하기 위하여 상용프로그램

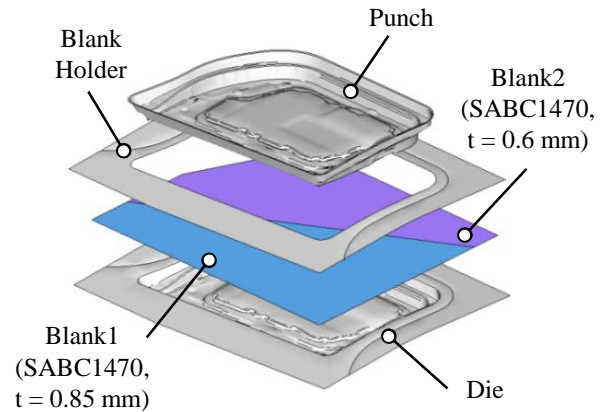


Fig. 8 Initial tooling system

인 Autoform을 이용하여 유한요소해석을 별도로 수행하였다. 해석을 위하여 도어 제품의 형상을 기반으로 금형을 설계한 후에 Fig. 8과 같이 유한요소모델을 구성하였다. 이때 박판성형과정에서 블랭크의 과다유입을 방지하기 위하여 블랭크 홀더에 각형 드로우 비드를 적용하였다. 이러한 유한요소모델링에서 맞춤식 재단용접이 적용된 블랭크의 경계면은 다중점 구속(multi-point constraint)을 이용한 빔으로 설정하였으며 고온인장 시험으로 측정된 소재물

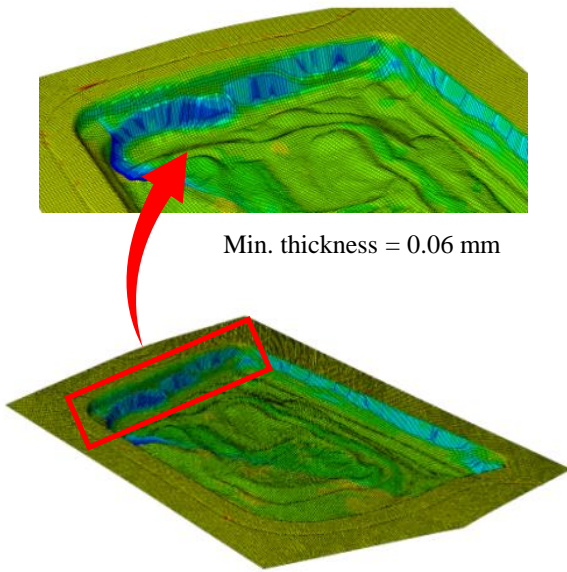


Fig. 9 Deformed shape of blank

Table 4 Minimum thickness with drawing parameters

Blank Temperature(℃)	Drawing stroke(mm)	Minimum thickness(mm)
500	10	0.35
500	20	0.25
700	10	0.20
700	20	0.22

성을 적용하여 500℃로 성형하였으며 마찰계수는 0.15이다. 성형해석에서 블랭크 홀더를 하부 다이로 이동하여 블랭크를 고정하는 바인더랩 해석과 펀치 성형 공정의 해석으로 구분하여 각각 수행하였다. Fig. 9는 성형이 완료된후에 블랭크의 형상에 대한 해석결과로서 0.85mm 판재의 외곽 모서리 부분에서 0.06mm의 최소두께를 나타내었다. 이러한 이유는 블랭크의 고정후에 펀치에 의한 드로잉 성형공정에서 블랭크의 두께 차이로 인하여 금형내부로 소재의 유동저하가 발생하기 때문에 두께 감소율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 최적의 성형조건을 확인하려는 목적으로 블랭크 온도와 드로잉 행정거리 에 따라 공정변수를 설정하여 Table 4와 같은 4가지 경우에 대해 해석을 추가로 수행하였다. 표에서 알 수 있듯이 블랭크 온도가 500℃이고 행정거리가 10mm일때 상대적으로 성형성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 그러나 블랭크의 최소 두께가 0.35mm로서

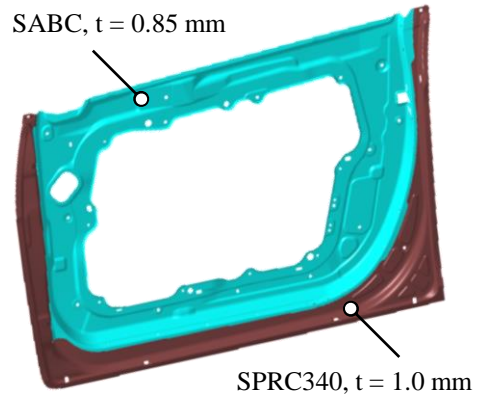


Fig.10 The redesigned model of front door inner panel

Table 5 Simulation results for the redesigned model

Category	Value	Result
Frame stiffness(mm)	1.02(point 1), 1.38(point 2)	Pass
Vertical sagging(mm)	4.64	Pass
Over opening(°)	5.7	Pass
Weight	4.461kgf(11.8% weight reduction)	

58.8%의 두께 감소율을 나타내어 국부터짐과 같은 성형불량이 예상되었다.

4.3 설계변경 및 해석결과

맞춤식 재단용접 기술은 서로 다른 치수와 강도, 코팅 형태로 되어 있는 판재를 하나의 판재처형 용접하여 성형하는 기술이다. 이러한 성형기술은 다양한 물성효과와 구성물에 대한 최적화를 달성할 수 있는 장점이 있다. 그러나 판재들간의 접합을 위하여 머시닝 용접(mash seam welding), 고진동 맞대기 용접, 마찰교반 용접, 레이저 용접 등과 같은 전처리 공정이 필요하고 두께와 물성이 다른 소재의 사용으로 성형성이 상대적으로 떨어진다는 단점이 있다[13, 14]. 전면도어의 경우 1차 설계단계에서 경량화의 목적으로 핫 스탬핑에 의한 맞춤식 재단용접 기술을 적용하였다. 그러나 앞에서 언급했듯이 성형 공정에 대한 적합성을 분석한 결과 판재들간의 접합부가 길고 상대적인 두께 차이가 커서 블랭크에 국부터짐, 주름, 균열 등이 예상되었다. 따라서 본 논문에서는 성형성을 개선하고자 하는 목적으로 Fig. 10과 같이 내판의 전체 구조물을 동일한 두께로 변경하고 상대적으로 지지 효과가 큰 외곽 모서리 경계부에 일반 냉연강판인 SPRC340을 적용하고 두께를



Fig.11 Photograph of prototype

Table 6 Experimental test results of door assembly

Category	Value	Result
Frame stiffness(mm)	1.35(point 1), 1.57(point 2)	Pass
Vertical sagging(mm)	3.23	Pass
Over opening(°)	3.1	Pass

증가시켜 성형후에 용접 체결하는 방법으로 설계를 변경하였다. 이와 같은 설계변경에서 기존에 오버 오프닝 성능을 개선하기 위한 보강재는 동일하게 적용하였다. Table 5는 최종적으로 적용된 전면도어에 대한 정적 강성시험의 해석결과와 기존 양산모델 대비 경량화율을 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 1차 설계와 비교하여 상대적으로 경량화 효율은 적게 나타났으나 모든 시험기준을 만족하였고 제품 불량을 방지하면서 원가절감과 생산성이 향상될 것으로 판단된다.

5. 시제품 제작 및 평가

제안된 자동차 전면도어에 대한 제품 성형성과 조립성을 검토하기 위하여 내판에 대한 시작금형을 가공하고 시제품을 제작하였다. 보론강인 SABC1470 블랭크는 고주파 가열로를 이용하여 6분간 591℃로 가열하였으며 이송시간은 5초이다. 성형을 위하여 1,000ton 유압프레스를 사용하였으며 제품의 성형 깊이가 크기 때문에 냉간으로 행정거리 30mm까지 예비성형을 수행하고 연속해서 10분간 982℃로 재가열하여 성형공정을 완료하였다. Fig. 11은 최종적으로

로 성형이 완료된 전면도어의 조립된 제품에 대한 사진으로서 외판과 상단 프레임은 기존에 상용화된 제품을 사용하였다. 완성된 시제품에 대해 육안으로 확인결과 표면손상, 국부터짐, 주름, 조립불량, 간섭 발생 등과 같은 문제점은 발생하지 않았다.

본 논문에서는 제작된 전면도어 시제품의 성능에 대한 타당성을 검토하기 위하여 앞서 언급한 3가지 정적 강성시험을 실시하였다. 모든 시험조건은 수치해석에 의한 모의시험과 동일하게 설정하였으며 각각의 시험에 대해 별도의 지그를 제작하여 수행하였다. Table 6은 전면도어 시제품에 대한 정적 강성시험결과를 나타낸 것으로서 모든 조건에 대해 시험기준을 만족하였다. 수치해석결과와 비교하여 시제품이 프레임 강성을 제외하고 수직처짐과 오버 오프닝에 대한 기계적 성능이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

6. 결론

본 논문은 자동차 전면도어에 대한 경량화를 목적으로 고강도 판재를 이용하고 성형성을 고려하여 설계를 개선한 개발 프로세스에 관한 것이다. 이를 위하여 보론강 SABC1470 소재가 적용된 핫 스탬핑 공정으로 성형이 가능한 내판의 형상을 제안하였으며 모의실험에 의한 해석결과를 이용하여 설계와 성형공정에 대한 적합성을 검토하고 시제품을 제작하여 성능을 시험하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 1차 설계단계에서 맞춤식 재단용접기술을 적용하여 핫 스탬핑 공법으로 성형이 가능한 경량화된 전면도어를 설계하였다.

(2) 완성차 메이커에서 사용하고 있는 도어에 대한 정적 강성시험 규격을 모의실험에 적용하여 수치해석을 수행하고 설계변경에 반영하였다.

(3) 오버 오프닝에 의한 해석결과 경첩부에 대한 길이 방향의 보강재는 성능을 개선하고 간섭을 회피하는 구조로 적합하다.

(4) 맞춤식 재단용접 기술을 적용하는 경우 경량화 효율은 높게 나타났으나 적용되는 소재의 두께 차이로 인하여 성형결함이 예상되었다.

(5) 기존에 상용화된 제품과 비교하여 제안된 전면도어는 상대적으로 성형성을 개선하고 11.8%의 경량화 효과가 있으면서 모든 정적 강성시험 기준

을 만족하였다.

(6) 제안된 개발 프로세스는 향후에 후면도어 뿐만 아니라 모노코크 차체의 유사한 가동부품에 적용하여 경량화가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 산업통산자원부 우수제조기술센터사업에 의해 수행된 결과를 활용하여 인하공업전문대학의 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] D. H. Jang, 2011, Process Development for Automotive Hybrid Hood using Magnesium Alloy AZ31B Sheet, *Trans. Mater. Process*, Vol. 20, No. 2, pp. 160~166.
- [2] J. Fang, Y. Gao, G. Sun, Q. Li, 2013, Multiobjective Reliability-based Optimization for Design of a Vehicle Door, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 67, pp. 13~21.
- [3] X. Cui, S. Wang, S. J. Hu, 2008, A Method for Optimal Design of Automotive Body Assembly using Multi-material Construction, *Mater. Des.*, Vol. 29, No. 2, pp. 381~387.
- [4] Y. X. Li, Z. Q. Lin, A. Q. Jiang, G. L. Chen, 2003, Use of High Strength Steel Sheet for Lightweight and Crashworthy Car Body, *Mater. Des.*, Vol. 24, No. 3, pp. 177~182.
- [5] Y. X. Li, Z. Q. Lin, A. Q. Jiang, G. L. Chen, 2004, Experimental Study of Glass-fiber Mat Thermoplastic Material Impact Properties and Lightweight Automotive Body Analysis, *Mater. Des.*, Vol. 25, No. 7, pp. 579~585.
- [6] D. Y. Kwak, J. H. Jeong, J. S. Cheon, Y. T. Im, 1997, Optimal Design of Composite Hood with Reinforcing Ribs through Stiffness Analysis, *Compos. Struct.* Vol. 38, No. 1, pp. 351~359.
- [7] D. Carle, G. Blount, 1999, The Suitability of Aluminum as an Alternative Material for Car Bodies, *Mater. Des.*, Vol. 20, No. 5, pp. 267~272.
- [8] A. Deb, M. S. Mahendrakumar, C. Chavan, J. Karve, D. Blankenburg, S. Storen, 2004, Design of an Aluminum-based Vehicle Platform for Front Impact Safety, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 30, No. 8, pp. 1055~1079.
- [9] S. Holmberg, B. Nejabat, 2004, Numerical Assessment of Stiffness and Dent Properties of Automotive Exterior Panels, *Mater. Des.*, Vol. 25, No. 5, pp. 361~368.
- [10] D. H. Lee, T. J. Kim, J. D. Lim, H. J. Lim, 2009, Development of High Strength Steel Body by Hot Stamping, *Trans. Mater. Process*, Vol. 18, No. 4, pp. 304~309.
- [11] Z. Shen, X. Qiao, H. Chen, 2013, *Proc. of the FISITA 2012*, Springer, Berlin Heidelberg, pp. 13~26.
- [12] K. W. Nam, S. H. Park, J. S. Yoo, S. M. Lee, 2012, Analysis of Impact Characteristics of Bonded Dissimilar Materials for Center Pillar, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 36, No. 8, pp. 929~934.
- [13] A. V. Bhagwan, G. T. Kridli, 2004, Formability Improvement in Aluminum Tailor-welded Blanks via Material Combinations, *J. Manuf. Processes*, Vol. 6, No. 2, pp. 134~140.
- [14] R. J. Pallett, R. J. Lark, 2001, The Use of Tailored Blanks in the Manufacture of Construction Components, *J. Mater., Process. Technol.*, Vol. 117, No. 1, pp. 249~254.