

<기술논문>

합체박판 성형기법의 적용을 위한 자동차 도어의 구조 설계

Structural Design of Door Assembly to Apply Tailor Welded Blanks Technique

황우석*, 이덕영*, 하명수**
Woo Seok Hwang, Dug Young Lee, Myeong Su Ha

ABSTRACT

TWB(Tailor Welded Blanks) is one of the recent techniques to reduce the weight and cost of the body members. To apply the TWB technique, we must decide the position of the welding line and the thickness of the welded blanks. Although many researchers have tried to check the formability of welded blanks, there are not so many researches from the structural point of view. In this paper, the TWB technique is applied to combine the door inner panel and the hinge face panel into one piece. The finite element structural analysis of the door assembly leads to the final design of the tailor welded door inner panel, which shows the mass reduction of 1.08kg without the sacrifice of the structural stiffness. The structural stiffness analysis includes the frame stiffness analysis, the belt line stiffness analysis, the door sagging analysis and the vibration analysis.

주요기술용어 : Tailor welded blank(합체박판 성형), Finite element analysis(유한요소 해석), Door assembly(자동차 도어), Door sagging(도어 처짐)

1. 서론

고품질화 및 경량화를 위한 차체 설계 분야의 최신 기술 중 하나인 합체박판 성형기술(Tailor Welded Blanks)은 강도, 두께, 표면처리 상태가 각기 다른 이종 강판을 레이저나 메쉬 심(Mash Seam)방법으로 용접한 후 성형하여 부위별로 요구되는 특성을 갖도록 하는 기술이다.¹⁾ 이 기술을 사용하면 부위별로 적정 두께의 재료를 사용할 수 있어 보강재의 제거가 가능하므로, 생산 공정의 단순화와 금형 및 프레스 공정수의 감소를 통하여 투자비를 절감할 수 있다. 합체박판 성형

기술은 차세대 부품 제조기술로 세계 유수의 자동차사가 플로어 패널(floor panel), 도어 내판(door inner panel) 등에 적용하고 있으며, 향후 그 수요가 폭발적으로 증가하여 2005년경이면 자동차의 190개 부품 중 22개가 합체박판 성형부품이 될 것으로 예상되고 있다.²⁾ 그러나 합체박판 성형 기술을 적용하기 위해서는 설계 단계에서 용접선(welding line)의 위치 및 각 소재의 두께를 결정하는 설계 기술이 필요하다.

본 연구에서는 자동차 도어의 경량화를 목적으로 도어 내판과 힌지 보강판(hinge face panel)에 합체박판 성형기술을 적용하여 힌지 보강판을 제거하고자 한다. 힌지 보강판을 대신하여 도어 내판의 일부는 두꺼운 판재를 사용하여야 하

* 회원, 대구대학교 자동차·산업·기계공학부

** 명신산업(주)

는데, 설계 단계에서 용접선의 위치 및 판재의 두께를 결정하여야 한다. 용접선의 위치나 판재의 두께는 부품의 구조 강성과 성형성에 절대적인 영향을 주므로, 이를 평가하고 정량화할 수 있는 설계 방법의 정립이 매우 중요하다. 최근 들어 컴퓨터를 이용한 전산 구조 해석 및 성형 해석이 널리 도입되고 있는데, 이는 자동차의 개발과정에서 성능이나 품질을 평가하기 위한 시작차 및 시제품의 실험 횟수를 줄여 비용 및 개발 기간을 단축하기 위한 방안으로 주목받고 있다.³⁾

도어 내판에 합체박판 성형기술을 적용했을 때, 성형성을 평가한 연구^{4,7)}는 사례가 많으나, 구조 성능을 고려하여 용접선과 부재 두께를 결정하는 문제에 대한 연구 사례는 드물다. 이권희 등⁸⁾은 프레임 굽힘, 처짐 강성 및 고유진동수를 고려한 위상최적설계로부터 도어 내판을 5개의 파트로 분류하고, 치수 최적설계를 수행하였다.

본 논문에서는 현재 양산되고 있는 자동차 도어에 합체박판 성형기술을 적용하기 위한 구조 설계 기술을 정립하였다. 생산성과 재료 손실을 고려하여, 용접선은 기초 소재의 경계와 평행한 직선만을 고려하였으며, 성형성을 확보하기 위하여 형상 변화가 심한 곳은 피하도록 정하였다. 도어 내판의 두께는 기존 설계치를 사용하였으며, 힌지 부위만 두꺼운 판재를 사용하는 설계안을 고려하였다. 도어 내판은 자동차 도어 전체의 일부로서의 구조적 기능을 만족하여야 하므로, 외판 및 프레임을 포함한 도어 전체 모델을 대상으로 구조 강성을 평가하여야 한다. 구조 강성해석은 생산업체에서 정립해 놓은 자동차 도어의 시험 평가 기준을 이용하였다. 각 평가 항목에 대하여 양산 설계안과 합체박판 성형기술을 적용한 경우의 구조 강성을 비교하여, 최소한 기존 설계안의 강성을 유지하도록 용접선 위치와 판재 두께를 선정하였다.

2. 자동차 도어의 구조 설계 조건

자동차 도어가 만족하여야 할 구조 설계 조건

을 기술하고, 유한요소해석을 통하여 각 설계 조건에 대한 구조 강성을 평가한다. 자동차 도어를 설계할 때 고려해야 하는 설계조건들은 도어 처짐(sagging), 프레임(frame) 처짐, 벨트 라인(belt line) 강성, 도어 진동 특성 등이다.

2.1 도어 처짐

자동차 주행시 도어에 발생하는 상하 가속도에 의한 관성력이나 도어가 열린 상태에서 사람의 체중이 가해지는 경우, 도어가 처져 잘 안 닫히는 경우가 발생할 수 있다. 이는 주로 도어가 고정되는 힌지 부근의 차체나 도어가 변형되어 발생하는 현상이다. Fig. 1은 실제 도어 처짐 시험 방법을 나타낸 그림으로, 도어를 약간 연 상태에서 도어록 부위에 지면 방향으로 490N의 하중을 가한 후, 도어의 처짐량을 계산한다. 도어의 처짐량이 많을수록 힌지부의 차체나 도어 강성이 작은 것을 의미한다. 그러므로, 각 제작사들은 최대 처짐량을 설정하고, 이보다 작은 처짐이 발생하도록 도어를 설계한다.

2.2 프레임 처짐

고속 주행으로 인하여 차실 내외의 압력차가 상승하거나 공조시스템의 작동으로 차실 내압이 상승하는 경우, 도어의 프레임 부분이 밖으로 벌어지면 풍절음이 발생하거나 외부 소음이 유입된다. 이를 방지하기 위해서는 프레임이 어느 정도 이상의 강성을 가져야 한다. 프레임 강성을 평가하기 위하여 힌지 부위와 도어록 부위를 고

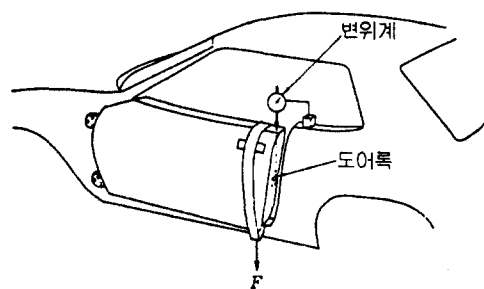


Fig. 1 Door sagging test

정한 후, 프레임의 좌우 상당 모서리에 각각 98N의 힘을 가하여 프레임의 최대 처짐을 계산한다.

2.3 벨트 라인 강성

도어 유리가 상하로 움직이는 통로로서, 도어 외판과 도어 내판 사이의 벌어진 부분을 벨트 라인이라고 한다. 이 부분의 강성이 약하면 도어 전체의 강성을 저하시키고, 도어를 닫을 때 진동이 발생할 수도 있으므로, 이에 대한 평가가 필요하다. 벨트라인 강성을 평가하기 위하여 힌지 부위와 도어록 부위를 고정한 후, 도어 내판의 좌우 중앙이면서 상단에서 100mm 떨어진 부위에 98N의 힘을 가하여 도어 내판의 변위를 계산한다.

2.4 도어 진동 특성

도어의 강성이 약하면 도어를 닫을 때의 충격이 프레임과 패널의 떨림 현상을 유발한다. 특히 깡통을 두드릴 때 나는 소리와 같은 음색은 상품성을 저해하고, 주행시 패널 떨림이 차실 소음을 유발하는 경우도 발생한다. 진동 특성 해석을 위하여 힌지 부위와 도어록 부위를 고정된 후 모달 해석을 수행하여 고유 진동수를 계산한다.

3. 구조 해석 및 설계 과정

3.1 모델링

본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 사용하여 구조 해석을 수행하였다. 유한 요소 모델은 전처리 및 후처리 프로그램인 HyperMesh를 사용하여 작성하였다.

먼저 전처리 프로그램으로 Fig. 2와 같이 도어 전체 부품에 대한 유한요소 모델링 작업을 수행하였다. 도어의 기하학적 형상 데이터는 CATIA 파일로 직접 받아들였으며, 두께와 물성치는 도면을 참조하여 입력하였다. 사용된 재료는 강으로 $E=207\text{GPa}$, $G=80.2\text{GPa}$, $\rho=7820\text{kg/m}^3$ 이다. 기존 설계안에서 도어 내판의 두께는 0.7mm이며, 힌지 보강판의 두께는 1.4mm이다.

형상 모델링을 완성한 후, 도어의 구조 강성을

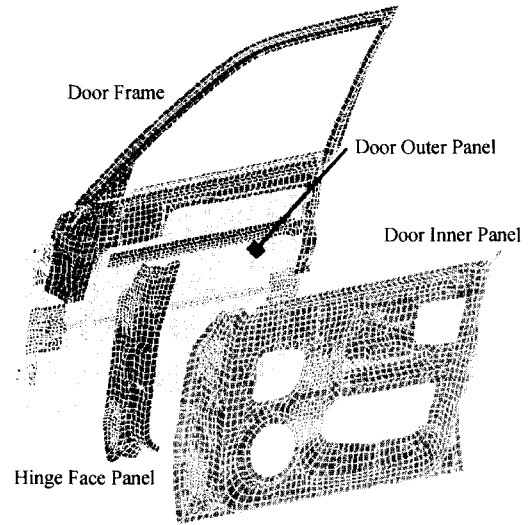


Fig. 2 Finite element model of door assembly

해석하기 위하여 2절에서 설명한대로 경계 조건과 하중 조건을 입력하였다.

3.2 도어 처짐 해석

힌지 보강판의 구조적 역할을 판단하기 위하여 기존 설계안과 힌지 보강판을 제거한 경우에 대하여 구조 강성 해석을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 Table 1과 같다. 힌지 보강판을 제거한 경우 도어 처짐량은 122%나 증가하였으나, 프레임 처짐이나 벨트라인 처짐은 상대적으로 낮은 비율로 증가하였다. 힌지 보강판의 가장 중요한 구조적 역할은 도어 처짐을 방지하는 것으로 판단된다. 이로부터 설계 과정을 다음과 같이 정하였다. 먼저 도어 처짐을 기준으로 기존 설계안의 처짐량보다 작거나 유사한 처짐량을 보이는 설계안을 제시한다. 다음으로 이 설계안에 대한 다

Table 1 Deflection change by removal of hinge face panel

Analysis Model	Door sagging	Frame def.	Belt line stiff.
	δ_{sag} [mm]	δ_{FRAME} [mm]	δ_{Belt} [mm]
Initial	4.26	3.13	1.84
w/o hinge	9.46	3.40	1.87
Variation	▲122%	▲11.8%	▲1.63%

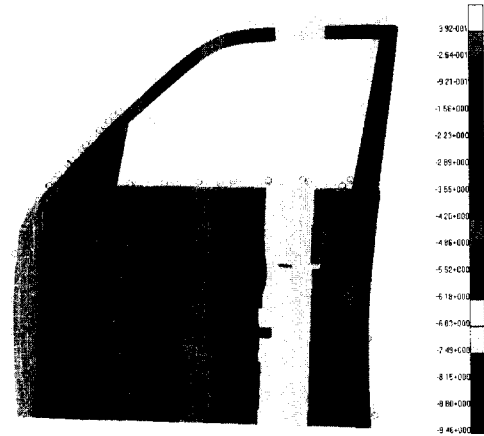
른 구조 강성 해석을 수행한다. 만약 이 안이 기타 구조 강성의 저하를 초래한다면 이는 구조적으로 불안정한 설계임을 의미하여 실제로 적용될 수 없으므로, 다시 도어 처짐 측면에서 새로운 안을 개발한다. 이와 같은 과정을 통하여 기존 설계안에 비하여 동등 내지 우세한 구조 강성을 갖는 설계안을 도출한다.

4. 결과 및 분석

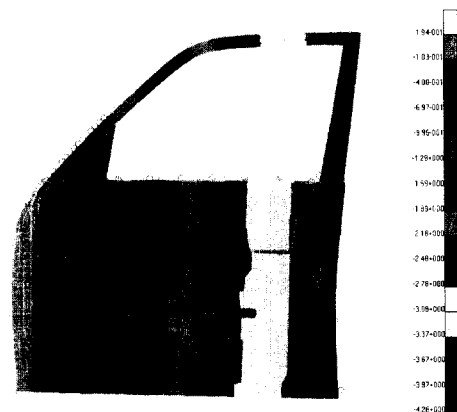
4.1 도어 처짐 해석

일반적으로 도어 처짐은 도어 자체의 변형뿐만 아니라 도어가 부착된 차체의 변형에 의해서도 발생한다. 완성차 업체에서는 이를 모두 고려하기 위하여 도어가 부착되는 차체 부분인 A-필라 부분까지 포함된 모델을 이용하지만, 부품 업체에서는 차체에 대한 데이터를 입수할 수가 없다. 본 연구의 목적이 합체박판 성형기술을 적용할 때 도어가 동등한 구조 강성을 갖는지를 확인하는 것이므로, 도어만의 처짐을 계산하여 비교하는 것은 타당하다고 판단된다. 도어의 힌지 부분을 고정하고 도어록 부분에 490N의 하중을 중력 방향으로 작용시켰을 때 발생하는 처짐량을 계산하였다. Fig. 3은 도어 처짐 해석에서 계산한 도어의 변형 모습이다. Fig. 3(a)는 기존 설계안에 대한 해석 결과이고, (b)는 힌지 보강판을 제거한 경우의 변형 모습이다. 기존 설계안의 최대 처짐은 4.26mm인데 비하여, 힌지 보강판을 제거한 경우의 최대 변형은 9.46mm로 도어 처짐이 약 2.2배 정도 증가하는 것을 볼 수 있다.

힌지 보강판을 생략하고 이의 역할을 대신하도록 도어 내판의 힌지부 두께를 증가시키고자 한다. 생산성과 재료 손실을 고려하여, 용접선은 기초 판재의 경계와 평행한 직선만을 고려하였다. 비선형 용접선에 대한 연구가 최근 들어 많이 진행되고 있으나,²⁾ 현재의 레이저 용접기술은 아직 비선형 용접선에 대해 생산성이 낮으며, 곡선이 포함된 판재를 준비하는 과정에서 스크랩이 많이 발생하여 경제성도 낮다. 이중 두께 판재



(a) Initial design with hinge face panel



(b) Hinge face panel removed

Fig. 3 Deflection from door sagging analysis

의 성형성을 확보하기 위하여 형상 변화가 심한 곳에 용접선이 위치하지 않도록 하였다. 이와 같은 조건을 만족시키는 용접선으로 Fig. 4에 나타난 두 가지 경우를 제시하였다. 도어 좌측 하단의 큰 곡선부는 성형시 재료이동이 많이 발생하여 파단이 자주 일어나는 곳이므로 이를 피하면서 가장 힌지 쪽으로 접근한 용접선이 Fig. 4(a)의 Model 1이다. Fig. 4(b)에서와 같이 스피커 구멍의 중앙을 지나도록 설정한 용접선은 Model 2이다. Model 1에 비하여 용접선 부근의 형상 변화가 심하지 않으므로 성형성 측면에서는 유리하나, 경량화 효과면에서는 불리하다.

먼저 기존 설계안의 도어 처짐보다 작거나 동

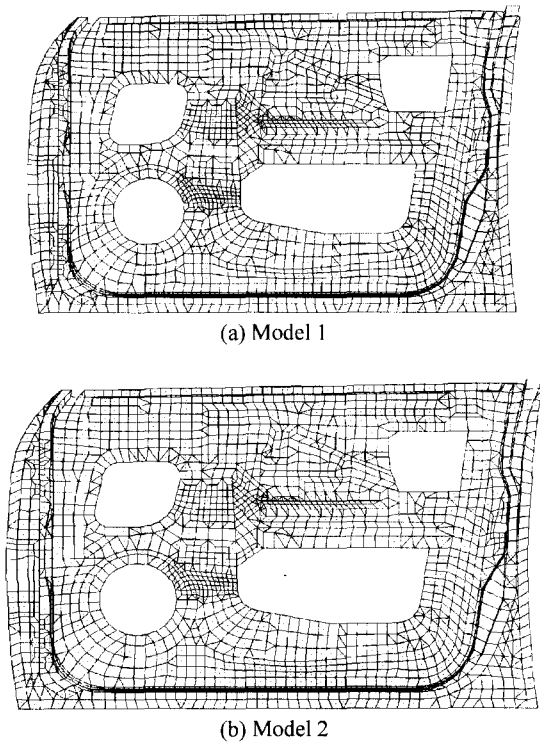


Fig. 4 Suggestion for the location of weld line

등한 처짐이 발생할 수 있도록 합체박판 성형기술 적용안을 도출하였다. 힌지 보강판의 두께가 1.4t이고 도어 내판의 두께가 0.7t인데 이들은 점 용접으로 연결되어 있으므로 훨씬 작은 두께의 단일 판재로 대체할 수 있다. 일단 Fig. 4의 두 모델에 대하여 용접선 좌측은 1.4t, 우측은 도어 내판의 두께인 0.7t로 한 경우 도어 처짐량을 계산하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 Model 1의 처짐량은 3.74mm, Model 2의 처짐량은 3.71mm로 거의 같으며, 기존 설계안의 도어 처짐량인 4.26mm와 비교하여 매우 작은 값이다. Model 1과 Model 2의 차이인 용접선 위치가 도어 처짐에 큰 영향을 주지 않으므로 중량 저감을 위하여 Model 1의 용접선으로 결정하였다. 1.4t일 경우의 도어 처짐은 기존 설계안에 비하여 작으므로, 도어 처짐만을 고려할 때는 힌지부 두께를 좀더 줄일 여유가 있다. Model 1에 대하여 도어 내판의 힌지부 두께를 1.2t와 1.0t로 한 경우에 대한 도

Table 2 Summary of door sagging analysis

Model	t_{hinge} [mm]	δ_{max} [mm]	σ_{max} [mN/mm ²]	Mass [kg]
Initial	0.7+1.4	4.26	4.20E5	5.90
w/o hinge	0.7	9.46	6.63E5	4.44
Model 1	1.4	3.74	4.10E5	5.32
Model 2	1.4	3.71	4.10E5	5.64
Model 1	1.2	4.42	4.06E5	5.07
Model 1	1.0	5.54	4.08E5	4.82

어 처짐을 계산한 결과를 Table 2에서 비교하였다. 1.0t를 사용한 경우는 도어 처짐량이 기존 설계안의 처짐량에 비하여 30% 정도 많고, 1.2t의 경우 거의 같다. 또한 최대 응력도 기존 설계안과 거의 유사한 값을 보이므로, Model 1의 용접선 좌우에 각각 1.2t, 0.7t의 판재를 사용하는 것이 도어 처짐의 측면에서 기존 설계안과 동등하다. 이 경우 도어의 질량은 기존 설계안에 비하여 1.08 kg 저감할 수 있다.

4.2 기타 구조 성능 확인

앞 절에서 합체박판 성형기술 적용시 가장 영향이 큰 도어 처짐을 기준으로 합체박판 성형기술 적용안을 도출하였다. 이 안이 프레임 강성이나 벨트 라인 강성과 같은 다른 구조 강성의 저하를 유발한다면 이는 구조적으로 불안정한 설계임을 의미하므로 실제로 채택될 수 없다. 이를 확인하기 위하여 기존 설계안과 합체박판 성형기술 적용안에 대하여 프레임 처짐 해석, 벨트 라인 강성 해석, 그리고 진동 해석을 수행하였다. 각 해석에 대한 해석 방법과 경계 조건은 2절에서 설명하였으며, 도어 처짐에 사용된 유한요소 모델에 각각의 경계 조건과 하중을 입력하여 해석하였다. 그 결과를 요약하면 Table 3과 같다.

프레임 강성 해석의 경우, 합체박판 성형기술 적용안의 변형량이 기존 설계안의 변형량보다 0.13mm 작아졌으며, 벨트 라인 강성의 해석 결과는 거의 같은 값을 보인다. 진동 해석 결과에서

Table 3 Stiffness change due to application of TWB to door inner panel

Analysis Model	Frame def.	Belt line stiff.	Modal analysis
	δ_{FRAME} [mm]	δ_{Belt} [mm]	Freq. [Hz]
Initial	3.13	1.84	31.6
TWB	3.00	1.83	31.9
Variation	▽0.13	▽0.01	▲0.3

도어 내판의 모드 형상이 거의 같았으며, 고유 진동수는 합체박판 성형기술을 적용하여 0.3Hz 증가하였는데, 이는 질량 감소의 효과로 보인다.

이상의 해석을 통하여 합체박판 성형기술 적용안이 기존 설계안에 비하여 약간 우수한 구조 강성을 보임을 확인하였다.

4. 결론

자동차 도어의 경량화를 목적으로 도어 내판과 힌지 보강판에 합체박판 성형기술을 적용하여 힌지 보강판을 제거하였다. 힌지 보강판을 대신하여 도어 내판의 일부는 두꺼운 판재를 사용하여야 하는데, 용접선의 위치 및 판재의 두께를 결정하기 위하여 유한요소해석을 이용한 구조 설계를 수행하였다.

생산업체의 성형 가공 경험을 근거로 경제성 및 생산성을 고려하여 용접선 위치를 두 가지 제시하고, 유한요소 해석을 이용하여 동등 내지 우수한 구조 강성을 갖도록 용접선 위치와 판재 두께를 결정하였다. 그 결과 도어의 질량을 1.08kg 정도 저감하였으며, 1개의 부품을 줄임으로써 이 부품의 제작 및 조립 비용을 절감할 수 있을

것이다.

향후 위의 합체박판 성형기술 적용안에 대한 성형성 해석과 시제품 제작을 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 2000년 중소기업 기술혁신 개발사업에 의해 지원되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 백승준, 구분영, 금영탁, 강수영, 이호기, "합체 박판 성형 기술의 개발 현황과 전망," 자동차공학회지, 제19권 제1호, pp.3-10, 1997.
- 2) 정우창, "초경량 철강 자동차 차체 제조기술," 자동차공학회지, 제23권 제4호, pp.15-22, 2001.
- 3) 三浦登, 福田水穂, 自動車設計と解析シミュレーション, 培風館, 1990.
- 4) 이종분, 김상주, 금영탁, "테일러드 도어인너 패널의 현장 트라이아웃," 박판성형기술 2000, pp.202-208, 한국소성가공학회, 2000.
- 5) 안덕찬, 이정돈, 인정제, "TB Door Inner의 최적 설계를 위한 연구," 한국자동차공학회 추계학술대회, pp.599-604, 1999.
- 6) H. Kusuda, T. Takasago, F. Natsumi, "Formability of tailored blanks," Journal of Materials Processing Technology, Vol.77, pp.134-140, 1997.
- 7) A. P. Lee, E. Feltham, J. V. Deventer, "Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications," SAE 960817, 1996.
- 8) 이권희, 배급종, 박경진, 송세일, "최적화 및 실험계획법을 이용한 자동차 도어의 경량화 설계," 한국자동차공학회 추계학술대회, pp.925-930, 2000.