마그네슘 합금 AZ31B 판재를 이용한 자동차 하이브리드 후드 개발 프로세스

장동환[#]

Process Development for Automotive Hybrid Hood using Magnesium Alloy AZ31B Sheet

D. H. Jang

(Received January 13, 2011 / Revised January 27, 2011 / Accepted February 18, 2011)

Abstract

Weight reduction while maintaining functional requirements is one of the major goals in the automotive industry. The use of lightweight magnesium alloys offers great potential for reducing weight because of the low density of these alloys. However, the formability and the surface quality of the final magnesium alloy product for auto-body structures are not acceptable without a careful optimization of the design parameters. In order to overcome some of the main formability limitations in the stamping of magnesium alloys, a new approach, the so-called “hybrid technology”, has been recently proposed for body-in-white structural components. Within this approach, necessary level of mechanical joining can be obtained through the use of lightweight material-steel adhesion promoters. This paper presents the development process of an automotive hybrid hood assembly using magnesium alloy sheets. In the first set of material pairs, the selected materials are magnesium alloy AZ31B alloy and steel(SGCEN) as inner and outer panels, respectively. In order to optimize the design of the inner panel, the stamping process was analyzed with the finite element method (FEM). Laser welding by CW Nd:YAG were used to join the magnesium alloy sheets. Based on the simulation results and mechanical test results of the joints, the determination of die design variables and their influence on formability were discussed. Furthermore, a prototype based on the proposed design was manufactured and the static stiffness test was carried out. The results demonstrate the feasibility of the proposed hybrid hood with a weight reduction of 25.7% .

Key Words : Hybrid Hood, Magnesium Alloy, Laser Welding, Stiffness Test, Lightweight, Automotive

1. 서 론

최근에 전 세계적인 에너지 소비의 증가로 환경보호에 대한 필요성이 인식되어 자동차, 항공분야 등과 같은 수송산업분야에서 적용되는 부품에 대해 경량소재를 이용한 생산공정이 필요하게 되었다[1~3]. 그 중에서 특히 마그네슘 합금은 낮은 비중과 더불어 우수한 비강도의 소재적 특성을 갖고 있다. 따라서 저연비 차량 개발이 요구되고

있는 자동차산업 분야에서 기존 구조물에 적용되고 있는 철강소재나 알루미늄 합금을 대체 할 수 있는 소재로서 우선적으로 고려되고 있다[4]. 이러한 마그네슘 합금은 가장 경량화된 구조용 금속 소재이며 열전도도, 피로강도, 치수 안정성, 기계적 가공성 등이 우수하다[5].

현재 자동차 산업분야에서 마그네슘 합금은 조밀육방체(HPC) 결정구조로 인하여 상온에서 성형성이 떨어지기 때문에 전통적으로 다이캐스팅

[#] 교신저자: 인하공업전문대학 기계설계과,
E-mail: dhjang@inhac.ac.kr

공법을 적용하여 주로 변속기 커버, 엔진블록, 조향장치 부품 등에 적용하고 있다[4, 6]. 그러나 주조공정에서 발생하는 육불화황(SF₆)가스로 인한 지구 온난화의 문제로 인하여 점차적으로 프레스를 이용한 온/열간 판재 성형에 관심이 갖게 되었다[7]. 이러한 프레스를 이용한 마그네슘 합금 판재의 성형은 여러 가지 공정변수에 따라서 표면손상이 영향을 받기 때문에 성형성을 예측하고 향상시키고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔다[8, 9].

하이브리드 부품(hybrid component)은 2 개 이상의 서로 다른 이종소재를 부분적으로 적용하여 일체형으로 성형하거나 각각의 소재를 성형한 후에 체결하여 조립하는 부품을 말한다[10]. 이러한 부품은 전체 부품에서 적용되는 소재의 역할에 따라 구조적인 기능과 비구조적인 기능적 특성을 서로 조합하여 적용함으로써 최적화된 기계적 성능을 얻고자 하는 목적으로 사용된다. 자동차 분야에서는 일반적으로 사출공법을 이용하여 고분자-금속 하이브리드 구조물(polymer-metal hybrid structure)에 대부분 적용되고 있다[11]. 최근에는 철강소재와 비철소재를 조합하여 적용하며 이러한 부품은 단일 경량소재를 적용하였을 경우와 비교하여 중량 절감의 효과는 작은 단점이 있지만 설계 자유도가 상대적으로 높은 부분에 성형이 어려운 경량소재를 선택적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 용융 아연도금 강판(SGCEN)과 마그네슘 합금 AZ31B 를 적용하여 자동차 하이브리드 후드에 대한 시제품을 제작하였다. 제품개발을 위하여 유한요소해석을 통해 성형성을 검토하였으며 해석결과를 이용하여 금형설계에 반영하였다. 마그네슘 합금 판재를 준비하기 위하여 레이저 용접에 의해 블랭크를 제작하고 성형하였다. 또한 최종 조립된 시제품에 대해 요구되는 성능에 대한 평가를 위하여 강성시험을 수행하였다.

2. 대상부품 및 유한요소해석

2.1 대상부품 선정

자동차 차체는 전체 구조물이 일체형으로 구성되어 있는 모노코크(monocoque) 방식과 여러 개의 독립된 구조물을 연결하여 조립된 프레임(frame) 방식으로 크게 구분한다. 이중에서 모노코크 방식

Fig. 1 The schematic of monocoque body frame and main moving component for automotive

은 차체 자체가 프레임 역할을 하기 때문에 차체 전체 구조물을 통해 외부충격을 흡수하는 특성이 있다.

Fig. 1 은 모노코크 차체 형상과 조립되는 주요 판 구조물을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 후드(hood), 펜더(fender), 트렁크 리드(trunk lead), 도어(door) 등은 모노코크 차체에서 대표적인 가동부품(moving part)으로서 차체 강성측면에서 비기능성 구조 부품으로 분류된다. 따라서 이러한 가동부품은 모노코크 차체에서 전체적인 강성에 큰 영향을 주지 않기 때문에 선진 자동차 완성업체에서는 우선적으로 가동부품에 경량소재를 적용하였다.

Fig. 2 는 본 논문에서 적용된 자동차 후드에 대한 형상과 크기를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 자동차 후드는 외판(outer panel)과 내판(inner panel)으로 구성되어 있으며 판넬의 외곽 모서리 부분을 굴곡하는 플랜징(flanging)과정과 외판과 내판을 결합하는 헤밍(hemming) 공정을 거쳐 조립된다. 이러한 자동차 후드는 엔진 룸 사이의 공간확보를 통해 보행자와 충돌시에 상해를 최소화하는 역할을 한다. 본 논문에서는 상대적으로 외판 표면품질에 대한 제약이 작고 엔진 룸과의 공간으로 설계 자유도가 높은 내판에 대해 우선적으로 마그네슘 합금을 적용하였으며 외판은 기존에 상용화되고 있는 SGCEN 강판을 동일하게 사용하였다. 적용되는 대상차종은 상용화된 마그네슘 합금 AZ31B 의 크기를 고려하여 국내 완성차 메이커인 H 사의 소형급 차량의 후드를 폭방향으로 축소하여 설계하였다.

Fig. 2 The geometric shape of hybrid hood

2.2 유한요소해석 조건

컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법은 실제 성형 공정에서 시행착오를 줄이고 비용을 절감하면서 성형공정상에서 발생할 수 있는 문제점을 예측할 수 있는 장점이 있다[12]. 특히 실제 제품들은 대부분 복잡한 형상으로 되어 있기 때문에 정성적으로 파악된 마그네슘 합금의 성형 특성 정보만으로 성형 공정상의 문제점을 미리 예측하고 설계에 반영하기가 어렵다[13].

본 논문에서는 기존에 적용되고 있는 외판을 제외하고 마그네슘 합금이 새로 적용된 내판에 대해서만 상용프로그램인 DYNIFORM[14]을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석을 위하여 사각형 쉘(shell) 요소망을 사용하였으며 열전달 해석을 위한 마그네슘 합금 AZ31B의 물성치는 문헌[15]을 참조하여 Table 1과 같은 값을 적용하였다. 성형에 사용된 블랭크 소재의 두께는 1.2mm이며 가열온도는 250℃로 설정하였다. 그 이외에 펀치, 하부 다이, 블랭크 홀더에 설정된 온도는 300℃이며 펀치의 하강속도는 60mm/min로 설정하였다. 마찰조건은 블랭크와 접촉하는 모든 경계면에 동일하게 마찰계수 0.02를 적용하였다.

3.3 유한요소해석 결과

Fig. 3은 유한요소 해석결과에 의해 성형이 완료된 후에 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 유효변형률은 후드의

Table 1 Process parameters used in simulation[7]

Parameters	Values
Yield tensile strength	150MPa
Modulus of elasticity	45GPa
Poissons ratio	0.35
Shear modulus	17.0GPa
Density	1,770 kg/m ³
Heat capacity	1,000J/kg·℃
Thermal conductivity	96W/m·℃
Heat transfer coefficient	2.95W/m ² ·℃

Fig. 3 The distribution of effective strain

중심부분에서 가장 크게 나타났다. 이러한 이유는 후드의 형상 특성상 중심부분을 기준으로 양쪽 방향으로 곡률이 있기 때문에 중심을 기준으로 소재의 유동이 주로 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 성형한계도(forming limit diagram)를 나타낸 것이다. 앞에서와 동일하게 유효변형률이 가장 높게 나타난 후드의 중심부분과 곡률이 있는 부분에서 파단의 위험이 예상되었다. 또한 곡률반경이 급격히 변경되는 후드의 모서리 부분을 따라 압축응력에 의해 주름이 발생할 것으로 나타났다. 이러한 모서리 부분은 트리밍(trimming) 공정에서 제거되는 부분으로 금형설계에서 별도로 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 성형이 완료된 후에 블랭크의 두께를 나타낸 것이다. 그림에 표시된 부분에서 두께 변화가 상대적으로 크게 분포하였으며 최소 두께는 0.93mm로서 22.5%의 두께 감소율을 나타내었다.

Fig. 4 Forming limit diagram

Fig. 5 The distribution of thickness variation

3. 블랭크 제작 및 설계변경

3.1 레이저 용접을 이용한 블랭크 제작

마그네슘 합금의 용접은 거의 모든 방법으로 가능한 것으로 알려져 있으나 일반 철강재와 비교하여 상대적으로 용점 및 비점이 낮고 용융 잠열 및 비열이 작은 특성이 있다. 또한 열전도도 및 열팽창 계수가 높기 때문에 결함 없는 용접 이음부를 얻기 위해서는 용접 입열을 억제할 필요가 있다. 따라서 다른 용접공법과 비교하여 상대적으로 입열이 적고 고속용접이 가능한 레이저 용접이 마그네슘 합금을 위한 최적화된 용접방법으로 알려져 있다[16,17].

본 논문에서 적용된 마그네슘 합금 AZ31B는 중국 Chongqing Aobo 유한공사의 제품으로서 판재의 크기는 690mm(W)×1,200mm(L)이기 때문에

Fig. 6 The photograph of welded magnesium alloy AZ31B sheet by CW Nd:YAG laser

후드의 크기를 고려하여 별도로 용접작업에 의한 판재의 접합이 필요하게 되었다. 이를 위하여 우선적으로 시험편을 제작하고 Nd:YAG 레이저를 이용하여 다양한 용접조건에 따른 맞대기 용접실험을 수행하고 최적화된 조건을 선정하였다. 또한 인장시험 및 경도시험을 실시하여 모재에 대한 용접부의 기계적 특성을 평가하였다. 전체적인 실험결과 레이저 출력 1.5kW와 용접속도 80mm/sec 조건에서 모재의 인장강도와 연신율이 각각 103%와 47.1%로 향상되었다. Fig. 6은 Nd:YAG 레이저를 이용한 맞대기 용접에 의해 제작된 마그네슘 합금 블랭크에 대한 사진이다[16, 17].

3.2 설계변경

일반적으로 드로잉 공정에서 편치와 하부다이의 모서리 반경은 중요한 설계변수이며 과도하게 작은 경우에는 파단이 발생할 수 있다[18]. 본 논문에서는 유한요소해석 결과와 레이저 용접에 의한 시험 시험결과를 이용하여 금형 수정을 위해 Fig. 7과 같이 내판에 대해 설계변경을 수행하였다. Fig. 7(a)는 후드가 차량에 조립되는 형상을 기준으로 내판 단면 A-A에 대한 곡률반경의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 다양한 곡률 반경값에 대해 금형의 모서리 반경을 크게 하기 위하여 최소곡률 반경을 R7로 증가시켜 변경하였다. Fig 7(b)의 음영부분은 유한요소해석 결과에 따라 파단과 두께감소에 의한 터짐이 예상되는 지점에

(a) section view and radius of curvature

(b) modified design area

Fig. 7 The redesigned model of hood inner panel

증가된 곡률 반경값을 이용하여 수정한 부분을 나타낸 것이다. 그림에서 형상 변경제한이 있는 래치(latch)와 경첩(hinge)이 체결되는 부분을 제외하고 상대적으로 설계 자유도가 높은 곳을 중심으로 변경된 곡률 반경값을 적용하였다. 여기에서 유한요소해석 결과에 의해 파단이 예상되는 후드의 중심부는 설계변경에서 제외하였다. 이러한 이유는 중심부분은 레이저 용접에 의한 이음부로서 용접실험 결과 맞대기 용접부분이 상대적으로 모재보다 기계적 성능이 향상되어 결합없는 성형이 가능한 것으로 판단되었기 때문이다.

4. 시제품 제작 및 평가

4.1 시제품 제작

마그네슘 합금 소재를 적용한 하이브리드 후드를 제작하기 위하여 외판과 내판에 대해 각각 시작금형을 가공하였다. 펀치, 블랭크 홀더, 하부다이

Fig. 8 The final product of hood inner panel **Fig. 9 Hybrid hood assembly**

제작에 적용된 금형소재는 모두 FC300이며 소재와 접촉하는 모든 면에 대해 최종적으로 사상작업을 수행하였다. 마그네슘 합금 블랭크는 고주파 가열로를 이용하여 해석조건과 동일하게 250℃로 가열하였으며 금형은 별도의 장치없이 화염방사를 이용하여 금형 표면을 300℃까지 직접 가열하고 적외선 비접촉식 온도계를 이용하여 확인하였다. 윤활조건은 온도에 의한 소착 가능성에 대비하여 Boron Nitride(BN) 스프레이 도포방식으로 블랭크에 대해 직접 윤활 처리하였다. 성형을 위하여 1,000ton 유압프레스를 사용하였으며 블랭크 홀더력(BHF)은 40ton이고 슬라이드의 하강속도는 120mm/sec로 설정하였다.

Fig. 8은 최종적으로 성형이 완료된 후드 내판에 대한 사진으로서 육안으로 확인결과 표면손상, 국부 터짐, 주름 등과 같은 성형불량은 나타나지 않았다. 성형된 내판을 레이저 절단을 이용하여 트리밍 작업을 수행하였고 별도로 제작한 래치와 경첩을 지능형 인버터 용접기를 이용하여 체결하였다. 최종적으로 완성된 내판은 플랜징과 헤밍작업을 통해 외판과 조립하여 Fig. 9와 같이 완제품으로 제작되었다.

Fig.10 The method for stiffness test

Fig. 11 The photograph of stiffness test equipment

Table 2 Specifications and results for hood

Conditions	Values	Results
Bending stiffness (mm)	3↓	2.7
Torsion stiffness (mm)	15↓	12.8

4.2 시제품 평가

본 논문에서는 완성된 시제품의 성능에 대한 타당성 검토를 위해 중량 측정에 의한 경량화 평가와 강성시험을 수행하였다. 중량을 비교하기 위하여 위하여 기존의 SGCEM 강판을 이용하여 앞서와 동일한 방법으로 후드를 별도로 가공/제작하였다. 중량측정 결과 전체적으로 SGCEM 강판(16.94kgf)을 적용한 것과 비교하여 하이브리드 후드(12.58kgf)가 약 25.7%의 경량화 효과가 있었다.

강성시험을 위하여 국내 완성차 메이커인 H사의 시험규격을 적용하였으며 Fig. 10 은 시험평가 방법을 나타낸 것이다[19]. 그림에서와 A, B지점은 경첩이 체결되고 C 지점은 래치가 각각 체결되는 부분이다. 굽힘 강성시험에서는 A, B 두 지점에 각각 10kgf의 하중을 가압한 상태에서 C지점에 동등한 하중을 압축하여 최대변형 변위를 측정하

였다. 또한 비틀림 강성 시험에서는 각각의 A, B 지점에 순차적으로 15kgf의 하중을 가압한 상태에서 최대변형 변위를 측정하였다. Fig. 11 은 강성시험 평가장치에 대한 사진으로서 미국 MTS사의 선형 유압 액츄에이터를 이용하여 시험을 수행하였다. Table 2 는 강성시험에 대한 요구성능 조건과 시험결과를 나타낸 것으로서 본 논문에서 적용된 하이브리드 후드가 모든 성능조건을 만족함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 최근 경량화의 목적으로 차량에 많이 적용되고 있는 마그네슘 합금 판재를 이용한 자동차 하이브리드 후드의 개발 프로세스에 관한 것이다. 이를 위하여 수치해석적 결과와 블랭크 접합을 위한 용접시험 결과를 바탕으로 결함없는 성형이 가능한 금형을 설계하고 시제품을 제작하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 마그네슘 합금 AZ31B 를 이용하여 유한요소 해석을 수행하고 해석된 결과를 이용하여 금형설계에 반영하였다.

(2) 하이브리드 부품에 대해 마그네슘 합금 소재를 적용할 경우에는 성형성의 어려움을 고려하여 우선적으로 설계 자유도가 높은 부분에 적용하는 것이 유리하다.

(3) 제작된 자동차 하이브리드 후드의 시제품에 대해 성능시험을 평가한 결과 기계적 성능조건을 모두 만족하면서 경량화가 이루어졌다.

(4) 저연비 차량 개발을 위해 모노코크 차체의 기타 다른 가동부품에 대해서도 마그네슘 합금 판재를 이용한 적용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2009 년도 인하공업전문대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] K. U. Kainer, 2003, Magnesium Alloys and Technology, Wiley-VCH, Cambridge
- [2] A. A. Luo, 2002, Magnesium: Current and Potential Automotive Applications, J. Met, Vol. 54, No. 2, pp.

- 42~48.
- [3] A. A. Luo, 2005, Wrought Magnesium Alloys and Manufacturing Processes for Automotive Applications, SAE Trans-J. Mater. Manuf., pp. 411~421.
- [4] S. Begum, D. L. Chen, A. A. Luo, 2009, Low Cycle Fatigue Properties of an Extruded AZ31 Magnesium Alloy, Int. J. Fatigue, Vol. 31, pp. 726~735.
- [5] M. M. Avedesian, H. Baker, 1999, Magnesium and Magnesium alloys, ASM Specialty Handbook, Second Printing, ASM International, Ohio.
- [6] J. Lubliner, 1990, Plastic Theory, Macmillan Publishing Co., New York.
- [7] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada, 2002, Forming Limit of Magnesium Alloy AZ31 and AZ61, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 124, pp. 607~614.
- [8] U. Noster, B. Scholtes, 2003, Isothermal Strain-Controlled Quasi-Static and Cyclic Deformation Behavior of Magnesium Wrought Alloy AZ31, Z Metallkd, Vol. 94, No. 5, pp. 559~563.
- [9] S. Hasegawa, Y. Tsuchida, H. Yano, M. Matsui, 2007, Evaluation of Low Cycle Fatigue Life in AZ31 Magnesium Alloy, Int. J. Fatigue, Vol. 29, pp. 1839~1845.
- [10] M. Grujicic, B. Pandurangan, W. C. Bell, M. Daqaq, L. Ma, N. Seyr, M. Erdmann, J. Holzleitner, 2008, A Computational analysis and Suitability of Cold-Gas Dynamic Spraying of Glass-Fiber-Reinforced Poly-Amide 6 for Use in Direct-Adhesion Polymer Metal Hybrid Components, App. Surf. Sci., Vol. 254, pp. 2136~2145.
- [11] M. Grujicic, V. Sellappan, B. Pandurangan, G. Li, A. Vahidi, N. Seyr, M. Erdmann, J. Holzleitner, 2008, Computational Analysis of Injection-Molding Residual-Stress Development in Direct-Adhesion Polymer-to-Metal Hybrid Body-in-White Components, J. Mat. Proc. Tech, Vol. 203, pp. 19~36.
- [12] B. N. Nguyen, S. K. Bapapapalli, 2009, Forming Analysis of AZ31 Magnesium Alloy, Sheets, by Means of a Multistep Inverse Approach, Mat. & Des., Vol. 30, pp. 992~999.
- [13] H. K. Kim, W. R. Lee, S. K. Hong, J. D. Kim, B. K. Kim, 2006, Finite- Element Analysis of Warm Square Cup Drawing Process of Magnesium Alloy AZ31 Sheet, KSTP, Vol. 15. No. 3, pp. 232~240.
- [14] ETA, 2006, DYNIFORM 5.5, Eng. Tech. Asso. Inc.
- [15] www.matweb.com
- [16] J. D. Kim, J. H. Lee, G. H. Sim, D. H. Jang, 2008, A Study on Laser Weldability of Magnesium Alloy for Light Weight, Proc. KSME 2008 Spring Annual Meeting, pp. 232~236.
- [17] J. D. Kim, J. H. Lee, G. H. Sim, D. H. Jang, M. Y. Lee, 2008, Weldability of Magnesium Alloy Sheet by Nd:TAG Laser: Comparison of Laser for Weldability According to Properties of Base Metal, Proc. KWJS 2008 Spring Annual Meeting, p. 47.
- [18] ASM International, 2006, Metalworking: Sheet Forming Handbook, ASM International, Ohio.
- [19] Woojin Co, 2008, The Development of Automotive Hybrid Hood(Steel-Mg) Assembly using Magnesium Alloys in Warm Forming, Innovative Cluster Project of Ulsan Industrial Complex, Ulsan.