

하이브리드 제조공정을 이용한 자동차 로어암의 개발

소상우⁺, 황헌태⁺, 이종현⁺⁺, 최흥원^{*}

(논문접수일 2010. 10. 18, 심사완료일 2010. 11. 11)

Development of Automotive Lower Arm using Hybrid Manufacturing Process

Sang-Woo So⁺, Hyun-Tae Hwang⁺, Jong-Hyun Lee⁺⁺, Hung-Won Choi^{*}

Abstract

In order to survive in turbulent and competitive markets, automotive part manufacturers try efforts to develop new manufacturing technologies for ultra-lightweight, high-intensity and environmentally-friendly parts. Most of front lower arm is manufactured by welding process between upper- and lower panel which are produced by press stamping process. Because lower arm mounted on the cross member parts is one of the important complementary parts. So, to improve safety and lightweight of these parts, hybrid technologies are used in this paper. As hybrid technologies are applied to be front sub-frame, rear cross member and other chassis parts as well as front lower arm, the 20% lightweight has been achieved compared with existing steel parts.

Key Words : Hybrid Lower Arm(하이브리드 로어암), Lightweight(경량화), Durability(내구성), Buckling(좌굴)

1. 서론

최근 자동차 부품산업의 생산 및 제조 기술은 경량화, 모듈화, 전자화라는 세 가지 목표를 향해 진행되고 있다. 이러한 글로벌 시장욕구를 충족하기 위해서는 경쟁력 있는 제조기술의 개발이 반드시 필요하다. 대부분의 자동차용 프론트 로어암(Front Lower Arm)은 프레스공정을 이용하여 각각의 부품을 성형한 후 용접에 의해 조립되어지고 있다. 하지만 최근 선진국에서는 친환경을 위한 경량화 및 기계적 성능을 향상하기 위해 다양한 방식의 제조방법이 연구되고 있다⁽¹⁻²⁾. 자동차의 차체 및 사시 경량화는 90년대 이후 활발하게 추진되어 왔으나, 높은 제조가격 때문에 대량생산으로까지는 이루어지지 못하여 왔다. 한편 스틸과 알루미늄의 이종접합 방법이 개발되기 시작

하면서 경량소재를 이용한 조립방법의 개발이 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 자동차 프론트 로어암을 대상으로 하이브리드 제조공법을 적용하고자 하였다. 이종접합이 이루어지는 제품에서 스틸부분을 우선적으로 기계가공 및 소성가공을 통하여 전 처리를 수행하고, 스틸에 비해 녹는점이 낮은 알루미늄을 이용하여 스틸소재를 금형에 삽입하고 알루미늄을 다이캐스팅하는 주조방법을 통하여 경량화 및 기계적 성능이 우수한 하이브리드 프론트 로어암을 개발하고자 한다.

또한 제품개발에 있어서 초경량, 고강도, 친환경적인 자동차용 부품개발을 위해 새로운 공법의 최적화된 융합기술이 필요하다. 하이브리드형 로어암은 기존 제품에 비해 형상 자유도가 높고, 가벼운 소재를 사용함으로써 기존대비 동등이상의 구조

+ (재)울산테크노파크 자동차기술지원단
++ 서진산업(주) 기술연구소
* 교신저자, 울산대학교 기계기술연구소 (kuma2008@ulsan.ac.kr)
주소: 680-749 울산광역시 남구 대학로 102

적 성능을 가지고, 경량화 할 수 있는 최적의 조건을 갖추고 있다⁽³⁻⁶⁾. 이에 지속적인 신규공법을 적용하여 기술 및 가격 경쟁력을 가지는 고부가가치 제품으로 개발될 것으로 예상된다.

2. 부품분석 및 제품설계

2.1 부품분석

일반적으로 현가장치는 노면에서 발생하는 충격이 차체나 탑승자에 직접적으로 전달되지 않게 충격을 흡수하고 타이어를 노면에 확실하게 접시킴으로써 탑승자의 승차감과 차량의 조종성 및 안전성에 큰 영향을 주는 부품이다.(Fig. 1) 그 중에서도 자동차 프론트 로어암은 현가장치 형상을 결정하는 중요 부품중의 하나로 알려져 있다. 기존의 프론트 로어암은 각 부품들을 프레스에 의한 소성가공으로 제조한 후에 용접에 의해 조립하는 공정으로 생산되어져 왔다.

Fig. 2는 본 논문에서 개발하고자하는 하이브리드 프론트 로

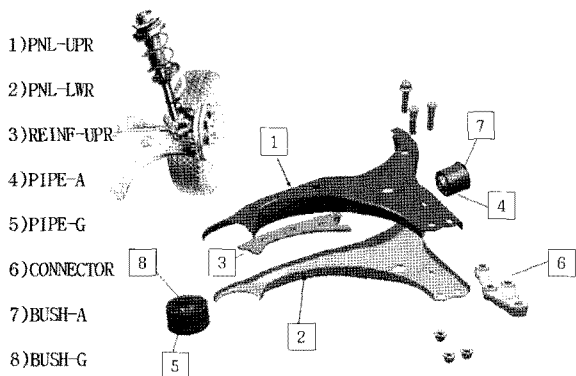


Fig. 1 The Structure of existing front lower arm

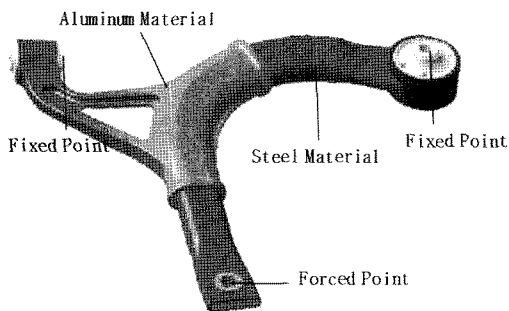


Fig. 2 Concept design of hybrid front lower arm

Table 1 Comparison of tensile properties.

Materials	Yield (MPa)	UTS (MPa)	ϵ (%)
STKM13-B	305 \uparrow	440 \uparrow	20 \uparrow
DP590	380~420	590 \uparrow	28~32

어암의 구조를 나타낸 것이다. 무엇보다도 우선 로어암의 몸체 부분을 스틸 파이프를 이용한 하이드로 포밍 공법으로 제작한 후 금형에 삽입하고 알루미늄 다이캐스팅 공법으로 로어암을 완성하는 공법이다. 요구되는 조건에 충족시키기 위해서 스틸 소재의 경우 구조강성해석을 통해 항복응력 50kgf/mm²이상을 갖는 DP590 소재와 STKM13-B소재가 선택되었다. 또한 알루미늄소재의 경우에는 이중 금속간에 발생하는 갈바닉 부식을 방지하기 위해서 부식성이 우수한 A6000계열의 소재를 선정하여 로어암의 기초설계를 수행하였다. Table 1은 구조강성해석에 사용된 소재에 대한 기계적 성질을 나타내었다.

2.2 제품설계

기존 제품과 대비하여 기계적 성능이 동등 이상인 제품 형상을 얻기 위하여 제품 구조해석을 실시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 구조안전성 해석을 범용으로 사용되고 있는 Nastran을 사용하였다. 구조해석의 구속조건은 자동차의 조립된 방향과 동일하게 구현하였으며, 하중은 자동차가 운행될 때 발생하는 설계하중을 근거로 구조해석을 실시하였다. 여기서 설계하중의 경우 소재에 따라 항복응력이 다르기 때문에 소재의 항복응력에 구조해석 후 제품에 발생하는 최대응력을 나눈 값으로 평가하였으며, 이를 구조안전율로 정의하였다.

구조해석 결과 분석을 통하여 다이캐스팅 공법으로 제작된 알루미늄부위에서의 구조강성이 기존의 부품에 비해 취약한 것으로 나타났다. 이를 보완하기 위해서 Fig. 3과 같이 구조강성을 위한 형상 보강을 수행하였다.

또한 스틸소재부위는 Table 2와 같이 소재, 형상 및 두께를 각각 다르게 하여 실시하였다. 소재의 종류는 강성확보가 가능한 2종의 소재를 선정하여, 각 소재별 3종의 파이프를 통하여 기존 제품 대비 기계적 성능을 평가하였다.

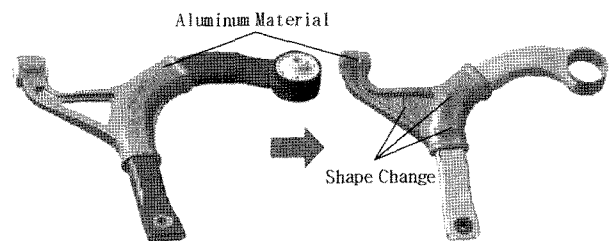


Fig. 3 Result of structure analysis using FEA

Table 2 Analysis using Material

Division	STKM13-B	Division	DP590
A	Ø38×2.6t	D	Ø40×2.6t
B	Ø40×2.6t	E	Ø42.7×2.3t
C	Ø42×2.6t	F	Ø42.7×2.6t

소재의 종류에 따라 항복응력이 다르고 이에 따른 안전성의 차이가 있기 때문에 구조안전율과 내구지수를 통하여 평가하였다. 여기서 내구지수는 SWT (Smith-Watson- Topper)방식으로 구하였으며, 아래의 식을 사용하였다.

$$\text{내구성 지수} = \left(\frac{(SWT)_{target}}{(SWT)_{analysis}} \right)^{0.5}$$

$$SWT = \sigma_{max} \frac{\Delta\sigma}{2}$$

$$\equiv (\sigma'_f)^2 (2N_f)^{2b} + E\sigma'_f c_f (2N_f)^{b+c}$$

안전기준으로 판단할 때 구조안전율 및 내구성 지수는 1.0이상 되어야 하며 수치가 높을수록 안전기준에 유리하다. 구조해석 결과를 Table 3에 나타내었다. STKM13-B 소재의 경우 구조안전율이 안전기준에 미달하였으며 A타입의 소재의 경우 내구성 지수도 미달되었다. DP590소재의 경우에는 3가지 소재 모두 구조안전율 및 내구성 지수를 만족하고 있으나 D 및 E타입의 경우 구조안전율이 1.0에 가까워 최종적으로는 F타입의 소재를 제품 설계에 반영하였다. 또한 형상 최적화 구조해석도 병행하여 스틸부 형상도 설계하였다.

Fig. 4는 기존의 박판을 이용하여 프레스공정을 통하여 제작된 제품과 최적화된 형상의 하이브리드공정을 통하여 제작된 제품에 구조해석이 반영된 해석결과를 나타내었다. 해석결과 내구지수 및 구조안전율은 기존의 제품에 비해 높게 나타나 안전성을 유지하는 것으로 나타났다. 또한, 경량화 측면에서는 기존제품 대비 22% 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 구조안전율 및 내구성 지수 그리고 경량화 측면에서 우수한 DP590소재의 직경 42.7mm, 두께 2.6mm의 파이프를 이용하여 하이브리드 로어암을 최종 설계하였다.

3. 시제품 제작

Fig. 5는 하이브리드 프론트 로어암 시제품 제작을 위한 공정도를 나타내었다. 먼저 스틸부분을 제작하기 위해 구조해석상에서 설계된 DP590 직경 42.7mm, 두께 2.6t 소재를 이용하여

Table 3 Result of analysis using FEA

Division	STKM13-B		Division	DP590	
	Durability Index	Structural Safety		Durability Index	Structural Safety
A	0.60	0.69	D	1.14	1.05
B	1.01	0.75	E	1.21	1.06
C	1.01	0.72	F	1.46	1.52

하이드로 포밍 공법으로 설계된 제품 형상으로 시제품을 제작하였다. 하이드로 포밍 공법으로 제작된 스틸 제품을 다이캐스팅 금형에 삽입 후 알루미늄을 고속으로 다이캐스팅 금형에 주입하여 설계된 형상의 알루미늄 부분을 제작하고, 다음공정에서 필요한 부시 및 기타 조인트를 조립하여 하이브리드 프론트 로어암 시제품을 제작하였다.

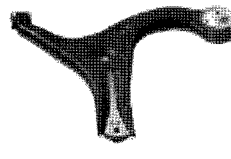
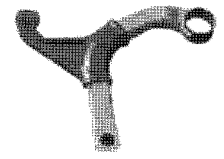
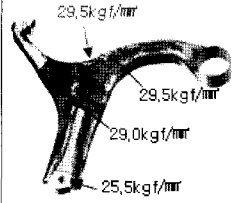
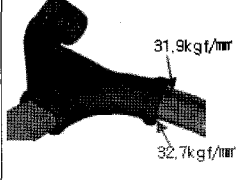
Division	Steel Lower Arm	Hybrid Lower Arm
Shape		
Result of FEA	 <p>-Max Stress:29.5kgf/mm² -Yield Stress:31kgf/mm²</p>	 <p>-Max Stress:32.7kgf/mm² -Yield Stress:50kgf/mm²</p>
Durability Index	1.43	1.46
Structural Safety	1.05	1.52
Weight	2.97kg	2.32kg
Material	SAPH45-P 2.3t	DP590 Ø42.7×2.6t

Fig. 4 Result of structure analysis using FEA

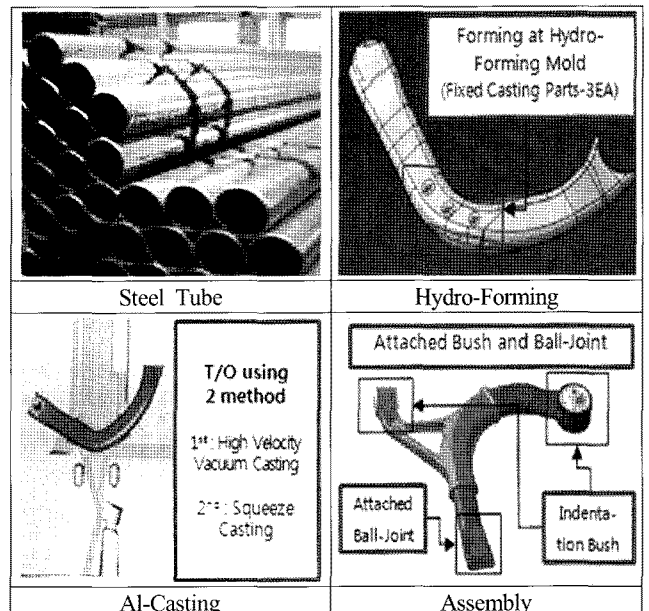


Fig. 5 Manufacturing process of hybrid lower arm prototype

4. 강도시험 및 결과분석

4.1 좌굴시험 및 결과분석

좌굴시험은 기존의 프레스 공정으로 제작된 부품과 하이브리드 공정으로 제작된 부품의 강도 및 내구시험 경계조건을 고려하여 시험하였다. 시험방법은 자동차에 조립조건과 동일하게 하기 위해 Fig. 6과 같이 실차 장착조건과 동일하게 시험하였으며, 하중조건은 유압 실린더를 통하여 반복 하중 조건으로 시험하였다. 시험부품은 기존의 프레스 공정으로 제작된 부품과 구조해석결과에서 도출한 DP590 파이프를 사용한 하이브리드 프론트 로어암 부품을 사용하여 좌굴시험을 실시하였다. 시험조건은 Fig. 6과 같은 방향으로 하중을 가하였으며 이는 자동차가 주행 시 하중을 받은 방향과 같은 방향이다. 좌굴시험의 판정조건은 규정하중4G(1G=429kgf)이상에서 변형이 없고, 최대하중 8G×0.8에서는 차량 주행에 유해한 균열 및 파손이 없어야 하는 조건으로 시험을 실시하였다.

좌굴시험결과 기존의 스틸 프론트 로어암과 동등 또는 이상의 결과를 얻을 수 있었다. 기존 부품의 프론트 로어암의 경우 규정하중에서 22.73mm의 변형이 발생되었으며, 하이브리드

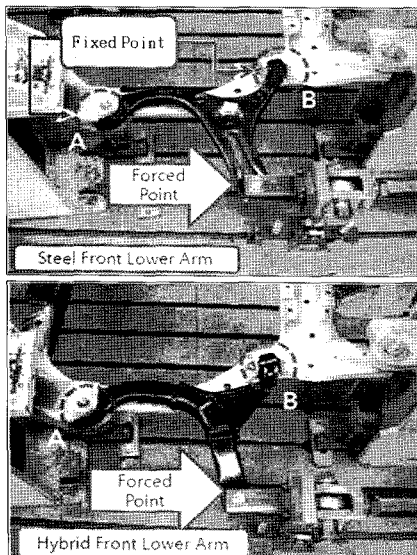


Fig. 6 Buckling test of front lower arm

Table 4 The result of buckling test

Division	Deformation(mm)		Review of Test Result
	Standard Load (1716kgf)	Maximum Load (2745kgf)	
Steel Lower Arm	22.73	53.93	Under the 4.96G, Deformation occurred
Hybrid Lower Arm	22.46	71.28	Under the 8G×0.8, Deformation occurred

프론트 로어암의 경우 규정하중에서 22.46mm 변형으로 기존 부품의 로어암 보다 0.27mm 변형이 적게 발생하였다. 또한 최대하중에서는 기존 부품의 로어암은 53.93mm, 하이브리드 로어암의 경우는 71.28mm로 변형이 발생하였으며, 기존 부품의 로어암의 경우 4.96G의 부하에서 균열이 발생하였으나, 하이브리드 로어암의 경우 최대하중 8G×0.8의 부하에서 균열이나 파손이 발생하지 않았다. 이는 좌굴시험의 판정조건으로 규정 하중에서 변형이 적고 최대하중에서 균열이나 파손이 발생하지 않아야 하기 때문에 기존의 로어암의 경우 4.96G에서 파손이 발생하여 좌굴시험에 만족하지 못하였으며, 하이브리드 로어암의 경우 최대하중 8G×0.8에서도 균열이나 파손이 발생하지 않아 좌굴시험에 만족하는 것으로 나타났다.(Table 4)

4.2 내구시험 및 결과분석

내구시험은 Fig. 6과 같이 좌굴시험과 같은 지그 시스템에서 실시하며 시험조건으로는 하중 1G로 반복하중 2Hz 가진 주파수로 50만회 이상에서 균열 및 변형이 없어야 한다.

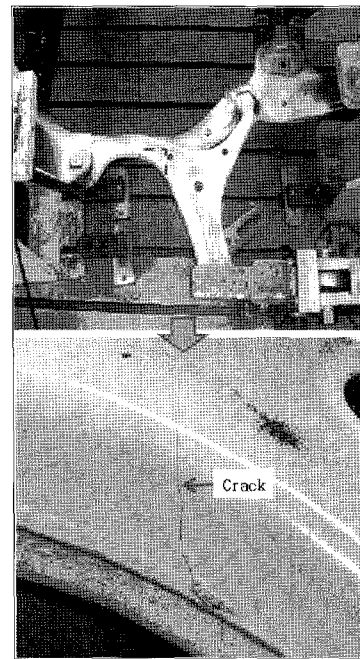


Fig. 7 Crack area of steel front lower arm after Buckling test

Table 5 The result of durability test

Division	Test condition	Review of Test Result
Steel Lower Arm	Cycled of regulation	No crack after 5×10^5 cycle
	Cycled of limit	crack after 5.9×10^5 cycle
Hybrid Lower Arm	Cycled of regulation	No crack after 5×10^5 cycle
	Cycled of limit	crack after 10×10^5 cycle

Table 5는 내구시험결과를 나타낸 것으로 기존 부품인 로어암의 경우 규정내구 50만회 시험 후 균열이나 변형은 발생하지 않았으나, 한계내구 59만회에서 Fig. 7과 같이 균열에 의한 파손 및 변형이 발생하였다. 하이브리드 로어암의 경우도 규정내구 50만회에서 균열이나 변형이 발생하지 않았으며, 한계내구 100만회 이상에서도 균열이나 변형이 발생하지 않았다.

5. 결론

본 논문에서는 하이드로포밍 공정을 이용한 스틸 파이프와 다이캐스팅 공정을 이용한 알루미늄과의 하이브리드 자동차 프론트 로어암 부품을 개발하여 내구성평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부품 구조해석을 통하여 기존의 부품 대비 기계적 성능이 우수한 하이브리드 프론트 로어암 형상 설계를 하였다.
- (2) 기존 프레스 공정 기반으로 수행된 스틸 소재 부품에 대비하여 하이브리드 프론트 로어암의 경우에는 약 22%의 경량화를 이룰 수 있었다.
- (3) 구조해석을 통한 제품 설계 후 시제품 제작한 하이브리드 프론트 로어암 부품이 기존 대비 구조안전율이 약 44% (1.05 → 1.52)향상 되었다.
- (4) 내구시험 결과 기존의 프론트 로어암 부품은 59만회에서 균열이 발생하였으나, 하이브리드 프론트 로어암 부품의 경우 100만회 이상 내구수명을 가졌다.

참고 문헌

- (1) Han, M. S., and Cho, J. U., 2009, "Durability Analysis On Automotive Lower Arm," *Korean Society of Machine Tool Engineers*, pp. 151~154.
- (2) Han, M. S., and Cho, J. U., 2009, "Durability and Stress Analysis On Automotive Lower Arm," *Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 376~380.
- (3) Leblond, J. B., Mottet, G., and Devaux, J. C., 1986, "A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steels during Phase Transformations I," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, pp. 395~409.
- (4) Leblond, J. B., Mottet, G., and Devaux, J. C., 1986, "A Theoretical and Numerical Approach to the Plastic Behaviour of Steel during Phase Transformations II," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, pp. 411~432.
- (5) Kang, S. S., and Cho, S. K., 2010, "Structural Design and Analysis for the Reinforced Frame of Vehicle," *Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 504~510.
- (6) Souloumiac, B., Boitout, F., and Bergheau, J. M., 2002, "A New Local-Global Approach for the Modelling of Welded Steel Component Distortions," *Institute of Materials Report*, pp. 573~590.