고진공 다이캐스팅 공법 적용한 알루미늄 서브프레임 개발

조 영 건^{*1)} · 임 태 성²⁾ · 장 상 길³⁾ · 조 철 환⁴⁾

현대자동차 플랫폼개발2팀¹⁾ · 현대자동차 금속재료연구팀²⁾ · 동희 선행개발실³⁾ · 동희 선행해석팀⁴⁾

Front Aluminum Subframe of High Level Vacuum Die-casting

Younggun Cho^{*1)} · Taeseong Lim²⁾ · Sang-gil Jang³⁾ · Cheol-hwan Cho⁴⁾

¹⁾Platform Development 2 Team, Hyundai-motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

²⁾Metallic Materials Research Team, Hyundai-motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

³⁾Advanced Engineering Team in Advanced Research, Donghee Industrial Co., 218 Hwangsung-dong, Nam-gu, Ulsan 680-160, Korea

⁴⁾CAE Team, Donghee Industrial Co., 218 Hwangsung-dong, Nam-gu, Ulsan 680-160, Korea

(Received 13 July 2011 / Revised 3 November 2011 / Accepted 22 November 2011)

Abstract : The subframe has been generally manufactured by using stamped steel material. Recently, automotive designers are considering aluminum as lightweight material. This paper describes the development process of an aluminum subframe which is made by high level vacuum die casting process, which is beneficial for minimizing gas contents and material properties. The weight of manufactured subframe is reduced by 4kg with the comparison of steel subframe. The aluminum subframe is packaged for the current vehicle layout and the imposed requirement is to attain a better structural performance that is evaluated in terms of mounting stiffness, noise and vibration, and endurance performance. The NVH evaluation results show that sound level is decreased by 8dB with the help of high roll-rod mounting stiffness as well as high structural modes.

Key words : High level vacuum die-casting(고진공 다이캐스팅), Aluminum subframe(알루미늄 서브프레임), Rib(리브), Sound level(음향 수준), Roll rod(롤 로드)

1. 서 론

최근 유가 급등과 이산화탄소 규제 강화로 인해 차량 경량화를 통한 연비 향상에 대한 요구가 크게 증대하고 있어, 경량 소재에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다. 알루미늄 소재는 비강도가 높고 다양한 성형 공정을 통해 제품 제작이 가능하여, 엔진 부품뿐만 아니라 구조용 부품인 서스펜션에 대한 적용이 크게 증가하는 추세이다. 특히 서스펜션 부품 중에서 높은 중량의 서브프레임 부품에 알루미늄 재질을 적용하기 위한 다양한 시도^{1,2)}가 수행되고

있으며, 최근 세계적으로 대형 차종 중심으로 알루미늄 서브프레임이 확대되고 있고 있다.

알루미늄을 활용한 제품 제작 공정은 크게 단조 공정과 주조 공정으로 나눌 수 있다. 단조 공정은 기계적 물성이 우수하고, 품질 안정성이 매우 높아 다양한 구조용 부품에 적용되고 있으나, 원소재 가격이 높고 설계 자유도가 떨어질 뿐만 아니라 단단 성형 공정으로 인한 공정 비용이 높다. 반면에 주조 공정은 설계 자유도가 높고 원소재 및 공정 비용이 상대적으로 저렴하지만 제품 결함으로 인한 품질 안정성이 떨어진다.

주조 공정 중 일반적인 다이캐스팅 공정은 원소

*Corresponding author, E-mail: cyg@hyundai-motor.com

재가 저렴하고 생산성이 높을 뿐 아니라 박육 주조가 가능하여 다양한 부품에 적용되고 있으나, 공법 특성상 제품 내 가스 함유량이 높아(10~30cc/100gAl) 기계적 물성이 낮고 열처리 및 용접이 불가능하여 고강도 고연성이 요구되는 구조용 부품에는 적용하기 어렵다. 따라서 용탕 주입시 불순물의 투입을 사전 제거하고 용탕 공급시 발생하기 쉬운 공기의 침입을 방지할 수 있도록 일반적 다이캐스팅 공법을 보완한 고진공 다이캐스팅 공법 적용이 증대되고 있는 추세이다.³⁻⁵⁾

본 연구에서는 고진공 다이캐스팅 공법을 적용하여 기존의 스틸 대비 중량 절감을 하되, 공정 개선을 통해서 중량 증가분 대비 재료비 상승 효과를 최소화 할 수 있는 알루미늄 전륜 서브프레임을 개발하였다. 2장에서는 고진공다이캐스팅 공법에 대해 기술하였으며, 3장에서는 서브프레임 마운팅부 및 형상 설계 최적화 내용을 설명하였다. 4장에서는 시제품 제작 내용 및 물성치 측정 결과를 나타내었으며, 5장에서는 NVH 및 내구 성능 시험 평가 결과를 기술하였다.

2. 고진공 다이캐스팅 공법

전륜 서브프레임은 로어암 및 엔진 톨 마운팅이 장착되어, 서스펜션의 기본 골격을 이루는 부품으로 고강도, 고품질의 물성이 요구된다.

고진공 다이캐스팅 공법은 일반 다이캐스팅 공법과 비교하여 금형의 캐비티 및 슬리브 내의 모든 공기를 제거하여 외부와의 접촉이 없는 청결한 용탕이 슬리브 내부로 유입시킴으로 기포가 5cc/100g 이하로 관리 가능하다. 그리고 열처리 및 용접이 가능한 소재 확보로 자유로운 부품 형상 제작이 용이하다. 또한 스틸 재질의 프레스 공법과 비교하여 일체화 성형이 가능하여, 부품수 및 용접 공정을 줄일 수 있어서 스틸 재질 대비하여 설계 자유도가 높은 장점이 있다.⁶⁾

고진공 다이캐스팅 공법은 Fig. 1에 도시된 것과 같으며, 제작 공정은 크게 4개의 단계로 나눈다. 1 단계는 강력한 고진공 장치를 이용하여 순간적으로 금형내의 캐비티 및 슬리브 내의 공기를 제거하고, 2 단계는 보온로 내에 삽입된 튜브를 통해서 슬리브

Fig. 1 High level vacuum die-casting

Table 1 Mechanical property of aluminum alloys

Material	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)	Y.S (MPa)	U.T.S (MPa)
Silafont 36	71	4.1	162	247
Steel	206	32	343	465

Table 2 Property of aluminum alloys

	Mg	Zn	Cu	Si	FE	Ti	Pb	Mn	Sr
Spec (%)	0.1~0.5	Max 0.08	Max 0.03	9.5~11.5	Max 0.15	0.04~0.15	Max 0.09	0.5~0.8	0.01~0.02

내로 용탕을 유입한다. 3단계는 진공이 유지된 상태에서 금형 내로 용탕이 공급되고, 고압으로 용탕을 충전하여 응고시키게 된다. 마지막으로 응고가 완료된 후에 서브프레임을 반출하게 된다. 진공 급탕식을 적용하여 도가니의 중앙부에서 채취된 깨끗한 용탕을 금형 내로 이송하며, 용탕 주입시 불순물의 투입을 사전 제거하고, 용탕 공급시 발생하기 쉬운 공기의 침입을 방지하였다. 또한 수직형 다이캐스팅은 수평형 대비 외부 공기 유입이 적어 기포 제어 측면에서 유리하며, 낮은 주조 압력에도 제품 생산이 용이하여, 본연구에서 수직형을 적용하였다.

Table 1에서 수직형 고진공 다이캐스팅 공법으로 제작된 알루미늄의 기계적 물성치를 스틸 물성치와 비교 도시하였으며, Table 2에서는 제작된 알루미늄 다이캐스팅 소재의 세부 화학 성분을 나타내었다.

(a) Steel subframe

(b) Aluminum subframe

Fig. 2 Subframe shape (top view)

3. 알루미늄 서브프레임 개발

3.1 형상 설계

본 연구에서는 알루미늄 재료의 기본적인 경량화 효과 뿐만 아니라 공법상 자유로운 형상 구현이 가능한 장점을 활용하여, NVH 및 내구 성능 향상이 가능한 구조로 설계하였다. 특히 전륜 서브프레임은 NVH 성능에 매우 큰 기여도⁷⁾를 갖는 부품으로, 기본 골격 강성 뿐만 아니라 서스펜션 링크 마운팅부 및 롤 로드 마운팅부의 강성이 매우 중요하다. 따라서 엔진 가진력이 주로 입력되는 마운팅부에 대한 구조적인 강건성 확보하되, 주요 하드 포인트는 스티와 알루미늄 사양을 동일하게 설정하여 호환 장착 가능 구조로 개발하였다. 개발된 알루미늄 사양의 형상과 스티 사양의 형상을 Fig. 2에 비교 도시하였다.

알루미늄 서브프레임 형상에 따라서 상단 혹은 하단에 일반적으로 배치하는 리브는 메인 판넬의 구조적 변경 없이 중량 증가를 최소화 할 수 있는 효과적인 구조물이다. 따라서 롤 로드부의 강성 및 시스템 구조 강성을 최대화하기 위하여, 동일한 메인 판넬 구조물에 각기 다른 3가지 형태의 리브를 구성하였다. Fig. 3(a)는 롤로드 부위를 직선으로 배치하여 롤로드 마운팅 부의 전후 입력 강성을 확보하는 구조이며, (b)는 대각선 형상으로 배치하여 모든 부

(a) Rib A

(b) Rib B

(c) Rib C

Fig. 3 Subframe shap (bottom view)

위의 강성을 확보하는 구조이고, (c)는 롤로드 부위는 직선으로 배치하여 강성을 확보하되, 양 사이드의 스티어링 기어박스 마운팅부에 별집 형태의 리브 구조를 적용하여, 서스펜션 마운팅부의 강성을 추가로 확보하도록 구성하였다.

3.2 모드 분석을 통한 NVH 시뮬레이션

리브 형상이 각기 다른 서브프레임에 대해서 NVH 성능 비교를 위하여, HyperWorks Pre와 Radioss Solver 툴을 사용하여 모드 형상 분석을 수행하였다. 서브프레임은 별도의 구속 조건이 없는 상태에서 서브프레임의 롤로드 장착점에서 전후, 좌우, 상하 각 방향에 대해서 0 ~ 600Hz대역의 주파수 응답 특성을 분석하였다. NVH 해석 모델은 2.5mm의 TETRA 10 엘리먼트를 약 18만개로 구성하였다.

Fig. 3에 도시된 각 리브 형상별 기본 골격 모드 분석 결과는 Fig. 4에 도시하였다. 1차 토션 및 2차 벤

	Rib A	Rib B	Rib C
1 st Mode (Torsion)	1412 Hz	1537 Hz	1529 Hz
2 nd Mode (Bending)	2448 Hz	2448 Hz	2448 Hz
3 rd Mode (Lat Bending)	4820 Hz	4899 Hz	5048 Hz

Fig. 4 Results of normal mode analysis

딩 모드는 모든 리브 형상에서 유사한 특성을 보이지만, 3차 횡 벤딩 모드에서는 리브 C 모델이 리브 A, B 모델 대비 상대적으로 높은 강성을 나타낸다. 이는 롤로드 주변 리브를 직선으로 후방 끝까지 연장하는 박스 구조를 채택하여 횡 방향 리브 형상이 크게 보강되었기 때문이다.

롤로드 마운팅부의 입력점 강성(Table 3) 비교 분석 결과, 리브 C는 롤로드 상하 방향 입력점 강성이 리브 A, B 모델에 비하여 전후 및 좌우 방향은 다소 불리하나 매우 높은 강성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 반면에 다소 취약 방향인 상하 방향의 강성은 약 30%이상 향상됨을 알 수 있다.

롤로드 마운팅부의 전후 강성은 스틸 사양 6,920에서 알루미늄 사양이 8,405kgf/mm로 크게 증대되었다. 반면에 상하 방향의 경우 알루미늄 사양이 박스 구조인 스틸 모델에 비하여 상대적으로 불리한 오픈 구조를 채택하고 있어 강성이 떨어지지만, 입력점 강성이 1,108kgf/mm으로 매우 높은 수준을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그런데 알루미늄 서브프레임의 롤로드 마운팅부를 스틸 사양 수준으로 확보 하기 위해서는, 롤로드 마운팅 구조의 하면을 스틸 사양과 유사하게 박스 구조로 막는 형상을 채택해야 하나, 알루미늄 제작 공법상의 제약으로 별도

Table 3 Stiffness of roll rod mounting

		Rib A	Rib B	Rib C
Local stiffness @Roll rod (kgf/mm)	X	11,828	9,691	8,405
	Y	25,452	26,096	23,595
	Z	843	851	1,108

Table 4 Global modes

		Steel	Aluminium
Global Mode (Hz)	Torsion	245.8	152.9
	Bending	229.1	244.6
	Lateral bending	397.7	504.6

의 구조물 장착은 고려하지 않았다.

본 연구에서 개발된 리브 C의 형상으로 개발된 전륜 서브프레임에 대한 전체 모드 해석 결과를 Table 4에 나타내었다. 스틸 모델은 1차에서 수직 벤딩 모드, 2차에서 토션 모드, 3차에서 2차 수직 벤딩 모드, 4차에서 횡 벤딩 모드가 나타난다. 반면에 알루미늄 모델의 경우 1차에서 토션 모드가, 2차에서 수직 벤딩 모드, 3차에서 횡벤딩 모드가 나타나 좌우 순서가 변경됨을 알 수 있다. 또한 서스펜션의 로어암 하중이 주로 들어오는 좌우 방향 가진 상관성이 높은 2와 3차 모드에 대해서 알루미늄 사양이 스틸 사양 대비 각기 15.5Hz, 106.9Hz 증가됨을 알 수 있다.

3.3 내구 시뮬레이션

서브프레임이 기본적으로 확보해야하는 성능인 내구 특성에 대한 해석 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 전후 하중의 경우 리어 마운팅 주변 리브에서 내구 수명 2,400만회, 내구지수 1.42로 만족하며 좌우 및 상하향 조건에서는 모두 내구지수 2.00 이상으로 우수한 내구 성능을 보임을 알 수 있다.

내향, 외향, 전후, 그리고 상하 대하중의 해석 조건에서도 최소 강도지수가 내향 대하중 조건에서 1.35수준으로 내구 성능 목표 수준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

4. 시제품 제작

4.1 제작 공정

서브프레임과 같이 대형 부품의 다이캐스팅 주조를 위해서는 탕구 방안의 확립이 중요하다. 따라서 이를 위해 3회에 걸쳐 금형의 유동 해석을 실시하여 금형을 제작하였다. 또한 금형 내부의 진공도 유지를 위해 이젝팅되는 가동측 금형의 내부에도 진공 밸브를 설치하여 진공 밀폐를 하였다. Fig. 6은 본 공법을 적용하기위해 개발된 수직형 진공급탕식 다이캐스팅 금형의 구조도를 나타내며, Fig. 7은 고진공 다이캐스팅 공법을 통해서 주조된 제품의 실물 사

Fig. 6 Mold structure of high level vacuum die-casting

Fig. 7 Photography of manufactured subframe

진을 나타내었다.

주조 공정조건 중에 기공 결함에 큰 영향을 주는

Fig. 5 Results of strength analysis

Table 5 Casting condition for diecasting

Case	Metal Temp (°C)	Metal pressure (bar)	Vacuum pressure (mbar)
1-1	660	138.0	31.0
1-2	662	139.8	44.2
1-3	663	140.2	55.7
1-4	661	139.8	72.4
2-1	661	238.2	33.9
2-2	662	235.8	42.9
2-3	663	231.7	56.0
2-4	664	235.3	68.2

Table 6 X-ray grade w.r.t. casting condition

Case	L1	L2	L3	R1	R2	R3	ave.
1-1	4	5	3	3	5	4	4.0
1-2	5	3	4	3	5	3	3.8
1-3	4	3	3	3	4	4	3.5
1-4	4	3	2	3	3	5	3.3
2-1	4	3	2	2	2	3	2.7
2-2	4	3	2	1	3	3	2.7
2-3	3	3	3	1	3	3	2.7
2-4	3	3	2	2	3	3	2.7

주조압(Metal pressure)과 진공도(Vacuum pressure)에 따른 기포상태의 변화를 분석하기 위하여, Table 5와 같이 주조압을 140, 235bar, 진공압력을 30~70 mbar로 변화시키면서 주조를 수행하여, 공정 조건에 따른 X-Ray 결함 등급을 분석하였다. 분석 결과 Table 6과 같이 주조압 235bar의 경우 기공 결함이 줄어드는 것을 알 수 있었으며, 진공압력의 경우 30~70mbar 범위 내에서는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다.

4.2 시제품 제작 결과

고진공 다이캐스팅 공법을 적용하여 알루미늄 개발 결과, 호환 장착 가능한 유사한 구조의 스틸 사양의 중량 대비 중량 4kg 절감을 달성하여 30% 수준의 중량 절감을 이루었음을 알 수 있다. 또한 스틸 사양은 34개의 여러 부품으로 구성되었으나, 알루미늄 서브프레임은 1개의 부품으로 개발하였다.

시제품에 대한 품질 점검을 위하여, Fig. 7의 각 위치에 대해서 X-Ray 기포 결함 검사 및 기계적 물성치를 측정하였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 기포 결함 검사 측정 결과를 보면 일부 후유부(위치 5)를 제

Location	L-1	L-2	L-3
X-Ray
Level	2	2	2
Location	L-4	L-5	L-6
X-Ray
Level	2	5	3

Fig. 8 X-ray testing

Table 7 The measured material properties

	Y.S (MPa)	U.T.S (MPa)	Elongation (%)
Sample 1	234	263	5.1
Sample 2	255	276	6.0
Sample 3	216	255	5.7
Average	235	265	5.6

외하고는 3급 이상으로 나타났다. 이러한 수준은 대부분의 해외 주요 차량 평균인 4cc/100g의 이하인 2cc/100g로 해외 차종 이상 수준으로 평가된다. 기계적 물성의 경우 Table 7에서와 같이, 항복강도 235MPa, 인장강도 265MPa, 연신율 5.6% 수준으로 해외 고급 차종과 비교시 동등 이상으로 개발되었음을 알 수가 있다.

5. 부품 성능 검증

5.1 NVH 성능

NVH 성능 평가 검증을 위하여, 서브프레임 단품의 자유단 상태에서의 고유 진동수를 계속하였다. 측정 결과 Fig. 9와 같이 단품 강성은 1차 토션 모드를 제외하고는 주요 모드 주파수가 상향되어 구조적으로 서브프레임 강성이 증대됨을 알 수 있으며, 1개 부품으로 개발된 알루미늄 서브프레임 구조의 간결성으로 500Hz이내의 모드 개수가 줄어든다는 것을 알 수 있다.

개발된 서브프레임을 실차에 장착하여, 전 좌석에서의 음향 감도 측정 결과(Fig. 10), 음향 감도는 약 4,200rpm대역의 140Hz에서 8dB가 개선됨을 실

Fig. 9 Modal testing of aluminium and steel subframe

Fig. 10 Booming testing at front seat

험적으로 확인하였으며, 또한 C2 부밍 성능은 스틸 사양 대비 14dB 개선되어, 알루미늄 서브프레임 적용시 주요 주파수대역에서 NVH 성능이 개선됨을 알 수 있다.

5.2 내구 성능

제품의 신뢰성 평가를 위하여 Table 8과 같은 내구 시험 조건으로 내구 성능 검증을 수행하였다. 평가 결과 전후, 좌우, 상하 내구 기준을 모두 만족시키고 있음을 검증하였다.

정강도 평가는 내향, 외향, 전향, 후향, 상향, 하향의 6가지 시험 조건으로 검증을 수행하였다.⁸⁾ 시험 장비는 Fig. 11에 도시하였으며, 정강도 하중 인가하여 평가 결과(Fig. 12), 서브프레임에 균열, 좌굴 등의 문제가 미발생되어 방향별 모든 평가 항목에 대

Table 8 Durability testing condition

Direction	Test condition	Results
For and backward	2Hz, 500000cyc	OK
Lateral	2Hz, 700000cyc	OK
Up and down	2Hz, 200000cyc	OK

Fig. 11 Testing facilities

Fig. 12 Strength test results

해서 정강도 기준을 만족함을 검증하였다.

6. 결론

본 연구에서는 중량 절감 효과가 큰 고진공 다이캐스팅 공법을 국내 최초 적용하여, 차량 중요 안전 부품 중의 하나인 전륜 서브프레임을 알루미늄 소재를 적용하여 개발하였다.

- 1) 고진공 다이캐스팅 공법을 적용함으로써, 스틸 사양의 서브프레임 대비하여 4kg의 중량 절감 효과를 달성하여, 차량 연비 개선 및 이산화탄소 절감에 기여하였다.
- 2) 서브프레임 하단의 리브 구조 형상을 벌집 구조의 형상으로 최적 개발하여, 1,108kgf/mm 수준 이상 수준의 물 로드 마운팅부 상하 강성을 확보하였다. 또한 스틸 사양 서브프레임과 동등 이상

수준의 글로벌 강성을 확보였다. 그 결과 완성차량에서의 음향 감도 평가하여, 140Hz 대역에서 8dB 개선됨을 검증하였다.

- 3) 시제품에 대한 기포 결함 수준은 2cc/100g이하 수준으로 해외 경쟁차 수준 대비 크게 향상되었으며, 내구 및 정강도 시험 기준을 만족함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 부품소재기술개발사업(과제번호:10031359)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) D. Triantos and M. Michaels, "Design and Fabrication of an Aluminum Engine Cradle for a General Motors Vehicle," SAE 1999-01-0659, 1999.
- 2) A. Mikuni, O. Itagaki and M. Suzuki, "Development of Aluminum Vacuum Die Cast Subframe," JSAE Autumn Conference, JSAE, 20045658, 2004.
- 3) T. Gakamoto, K. Kira and H. Kambe, "Development of Automotive Suspension Part by High Vacuum Die Casting," Journal of Japan Foundry Engineering Society, Vol.76, No.4, pp.283-288, 2004.
- 4) M. Tashiro, K. Kudoh, Y. Konno and K. Takagi, "Development of Nissan Innovative Casting System for Aluminum Casting Suspension Parts," Nissan Technical Review, No.49, 2001.
- 5) A. Mikuni, O. Itagaki and M. Suzuki, "Development of Aluminum Vacuum Die Cast Subframe," JSAE Annual Congress, JSAE, No.81-04, 2004.
- 6) G.-M. Yoon, D.-H. Kang, Y.-J. Ko and J.-D. Lim, "Application of High Level Vacuum Die-casting for the Automotive Parts," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.1540-1546, 2009.
- 7) S.-Y. Park, D.-C. Park, K.-S. Yoon and M.-S. Lee, "A Study of Front Subframe System Optimization for Improving Vehicle NVH Performance," SAE 2009-01-2097, 2009.
- 8) M.-S. Kim, T.-S. Li, K.-M. Yoon, Y.-J. Ko, J.-M. Kim and K.-H. Kwak, "Development of Cast-forged Knuckle Using High Strength Aluminum Alloy," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1048-1055, 2010.