

# 다중재료를 이용한 경량차체 개발

배한일, 박동호, 이주엽 | 현대자동차(주), 이문용, 류성지 | (주)성우하이텍

## 1. 서론

최근의 자동차 업계에서는 성능 만족과 환경 문제의 대응이라는 상반된 두 가지의 요구에 직면하고 있으며, 이는 강판(steel plate)을 차체의 주요 소재로 사용하는 경향에 대해 심각한 의문을 제시하였다.

이에 따라 자동차 메이커들은 강판 이외의 알루미늄, 마그네슘, 복합재료 등을 차체 제조의 소재로 사용하고 있으며, 판재 이외에도 하니콤(honeycomb) 구조재, 샌드위치(sandwich) 구조재 그리고 발포용 폼(foam)재 등의 다양한 형태를 꾸준히 적용하고 있다. 아울러 선진국에서는 알루미늄이나 마그네슘 그리고 탄소섬유와 같은 경량 소재를 이용한 차체의 선행 개발을 오래 전부터 꾸준히 수행해왔으며, 수 년 전부터는 이러한 경량 소재를 이용한 차체를 양산하기에 이르렀다. 이러한 경량 소재를 효과적으로 적용하기 위해서는 기본 소재 개발 등의 연구와 더불어 다양한 차체 재료를 효과적으로 선정하여 배치하고 접합시킬 수 있는 신개념의 차체 구조 개발이 병행되어야 한다.

즉, 현재의 전형적인 차체 구조에 재질(경량 소재)만을 대체하는 것은 경량 소재 특유의 소재 특성을 활용할 수 없으므로 성능 만족·가격 경쟁력 확보가 어렵게 된다. 이에 본 연구에서는 소재의 특성, 제조 공법상의 한계 그리고 소재를 가장 효율적으로 활용할 수 있는 최적의 차체 구조 설계기술 개발을 병행하여 추진하였으며, 그에 따른 결과를 토대로 다중재료 차체 개발의 양산 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

## 2. 본론

본 연구에서는 자동차 차체가 요구되는 성능 만족 요건 중 특히 소비자들의 관심이 집중되고 있는 충돌 안전성을 주요 성능 지표로 삼아 차체 구조를 설계하고 개발하였다.

### 2.1 알루미늄 센타 플로어(panel-center floor) 개발

#### (1) Benz A-class 분석

Benz A-Class(이하 A-Class)는 소형 승용차로써 여러 가지 요구 성능 중 충돌안전 양립성(compatibility) 측면에서 가장 좋은 성능 값을 보여주고 있는 것으로 알려졌다. 이에 충돌안전 양립성 측면에서 이 차종의 주요 개발

개념을 분석하고 이를 본 다중재료 차체 연구에 응용하여 적용하였다.

① 충돌 시 엔진 거동 제어 및 플로아 면 상향

A-Class는 엔진의 형상이 일반적으로 접할 수 있는 엔진의 형상이 아니다. 즉 엔진 후반부가 차체의 대쉬 판넬(dash panel)의 형상과 유사한 형상을 보여주고 있으며, 측면에서 보면 대체로 삼각형의 형상을 나타내고 있다.

또한 플로아 면이 동급 차종에 비해 상대적으로 높다. 이것은 실제 충돌이 발생하였을 때 엔진이 대쉬 부위를 직접 타격하지 않고 대쉬 하단부로 미끄러져 하강하도록 하여 대쉬의 변형을 최소화시키고 이로 인해 충돌 시 탑승객의 안전 공간을 확보할 수 있도록 고안된 것으로 판단된다.

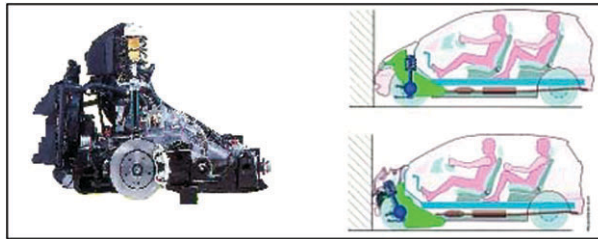


그림 1. 엔진 경사 설계 및 충돌 시 엔진이 대쉬 하부로 하강하는 구조

② 사이드 멤버 직선화

프론트 사이드 멤버의 직선화는 엔진 슬라이딩 거동과 더불어 충돌 성능을 향상시키는 주요 인자로 파악된다. 즉 높아진 플로아 면에 접합이 되는 센터 플로아 사이드 멤버는 프론트 사이드 멤버와의 높이 차인 킥-업(kick up) 량을 최소화 시켜 사이드 멤버의 직선화를 이루었다. 킥-업 량은 충돌 시 굽힘에 대한 저항력과 관계있는 인자로 그 양이 적을수록 저항력이 상승하여 보다 많은 충돌 에너지를 흡수할 수 있다.

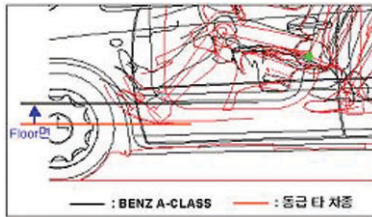


그림 2. 플로아(floor) 상향량의 결정



그림 3. 사이드 멤버의 직선화

③ 이중 플로아 구조

플로아(floor) 면의 상향으로 생긴 플로아 하부 공간을 활용하여 배터리, 퓨즈 박스 등의 기존 엔진 룸 내에 위치 하던 부품들을 적재 할 수 있다. 이는 엔진 룸 내의 충돌 에너지 흡수 공간을 보다 더 확보하게 됨으로써 충돌 안전 성능 향상에도 기여한다.

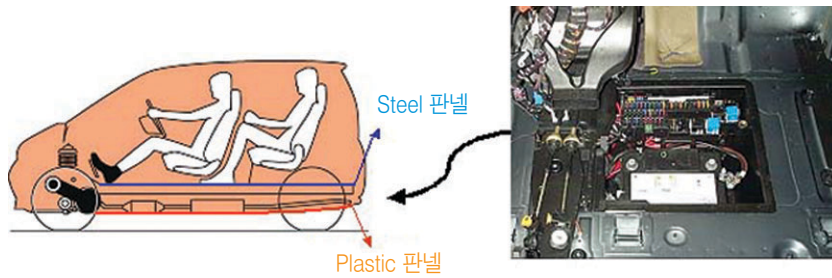


그림 4. 플로아 상향으로 인한 사이드 멤버 직선화

#### ④ 플로아 하부 평탄화

플로아 하단 지면 방향을 플라스틱 커버로 덮어 이중 플로아 구조를 유지하면서 플로아 하부를 편평하게 하여 공력 성능을 향상 시켰다. (단, 이 때 이중 플로아의 하단 평탄 플로아는 구조적인 강성 역할을 수행하는 것은 아님.) A-Class 의 경우 이중 플로아 개념을 도입하였으나 플로아 차체의 강도 · 강성 향상을 목적으로 플로아 구조를 이중으로 하였다기보다는 차량의 충돌 성능 향상을 목적으로 진행된 플로아 상향에 의해 생성된 공간의 활용과 공력 성능 향상을 목적으로 구상된 것으로 판단된다.

### (2) 개발 차체 설계 구조 개념

A-Class 분석 내용을 토대로 새로운 플로아 구조를 다음과 같이 구성하였다.

- ① 플로아 면 상향 충돌 성능 향상
- ② 플로아 면 편평화 거주성 향상
- ③ 사이드 멤버 직선화 충돌 성능 향상
- ④ 부재에 다중 재료 적용 및 2중 구조화 중량 감소 및 플로아 구조강도 · 강성 증대

A-Class의 엔진 슬라이딩 구조는 현재 개발 여건상 어려운 점이 많아 수용키 어려웠으며 대신 A-Class 에서는 구조용으로 이용되지 않은 플로아 2중 구조를 강도 · 강성용 부재로 활용하였다.

### (3) 미래형 자동차 설계

#### ① 차종 선정

현재 생산 중인 차종 중 플로아 상향 가능성이 있는 차량을 대상으로 여러 가지 적용 조건(부품 수급성, 시야 확보 등 차량의 전반적인 구성) 등을 고려하여 각 차량의 적용 가능성을 검토하여 선정하였다.

#### ② 플로아 상향량 결정

플로아 상향을 위한 적정량을 결정하기 위해 다음의 인자를 고려하였고 최종적으로 기존 플로아 대비 약 66.6mm 상향하였으며, 그림 5에 그 내역을 나타내었다.

- 플로아 상향에 따른 주변 부품들 간의 재설계가 최소화 되도록 상향

- 플로아 상향에 따른 heap point의 이동이 최소화 되도록 상향
- 사이드 멤버 직선화를 최대한 달성할 수 있도록 상향



그림 5. 개발 차량의 플로아 상향량 결정 비교

③ 새로운 구조의 센타 플로아 형상

그림 6에 기존의 스틸 프레스 성형 제품의 상향 전 형상과 새로이 제작될 센타 플로아를 도시하였다. 알루미늄 압출재와 판재, 샌드위치 판넬, 고장력강(TRIP강) 등의 이종 재료를 적용하였다.

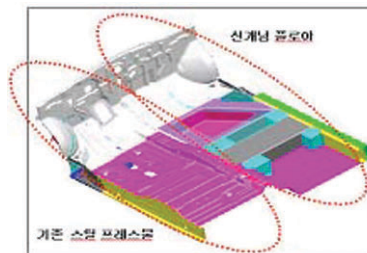


그림 6. 개발 센타 플로아 구조의 비교

그림 7에 나타난 바와 같이 ①, ③, ④, ⑤번 부품은 알루미늄 판재를 이용한 프레스 성형품이며, ②번 부품은 정면 충돌에 있어 매우 중요한 부재로 특별한 강도가 요구되어 고장력 강판을 이용한 강재 프레스 성형품이다. ⑥, ⑦번 부품은 단순 커버로 쓰일 샌드위치 판넬이고 ⑧번 부품은 알루미늄 압출재이다.

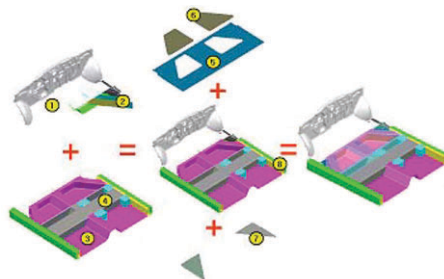


그림 7. 개발 센타 플로아 구조의 구성도

④ 접합법

널리 알려진 바와 같이 이종 재료간의 접합에 있어서의 어려움이 이종 재료의 적극적인 적용에 난점으로 작용한다. 본 연구에서는 적용하는 주요한 부재가 알루미늄과 스틸이므로 이들 이종 소재 간의 접합 방법을 고려하였다. 동일 재료간의 접합은 기존 스폿 용접이나 미그 용접을 사용하였고 스틸과 알루미늄간의 접합은 셀프 피어싱 접합

(self piercing bonding)을 고려하였다.

#### (4) 성능 평가 - 정면 오프셋(offset) 충돌시험(35 mph)

기존 차량과 개조한 신개념 차체 차량의 정면충돌 성능 평가를 해석적으로 수행하였으며, 차체 변형에 가장 불리한 것으로 알려진 정면 오프셋(offset) 충돌시험을 실시하였다. 그림 8은 전체적인 차체 변형 양상을 비교하여 나타낸 것이다.

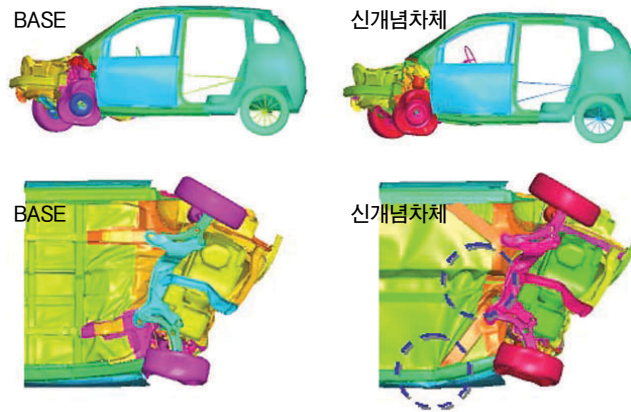


그림 8. 기존 차체와 개발 차체의 충돌(정면 offset) 해석 결과 비교

전체적인 변형 형상에는 큰 차이가 없는 듯이 보이나 그림 8의 점선 원형 표시부와 같이 개발 차체의 경우 센터 플로어 터널 중앙부의 약화로 변형이 심하게 발생하였으며, 사이드 실(side sill)과 센터플로어 사이드 멤버(center floor side member)가 만나는 부위에 집중 하중으로 꺾임이 나타남을 알 수 있다. 표 1에 차체 각 부위의 변형량을 비교하여 나타내었다.

표 1. 기존 차체 및 신개념 차체 각 부위의 변형량 비교

	TOE PAN			DOOR OPEN'G
	LH	CTR	RH	
BASE	1	1	1	1
미래차	0.79	0.89	1.18	0.91

센터 플로어 오른쪽 부위의 밀림 현상이 기존 모델 대비 신개념 차체 모델이 심하게 발생하였으나 전반적으로 동등한 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 반면 전체 중량에 있어서는 기존 스틸 플로어 판넬을 경량의 알루미늄 판넬로 대체하고 보강재 등의 삭제를 통하여 BIW(body in white) 기준으로 7.5%의 경량화를 달성하였다.

## 2.2 알루미늄 압출재를 이용한 하이드로포밍 프론트 사이드 멤버 개발

### (1) 제품설계

본 연구의 대상이 되는 양산 차량의 프론트 사이드 멤버(front side member)는 다수의 프레스 성형품의 결합체

로써 길이 방향의 단면적 변화 및 곡률 변화가 심하게 나타나 하이드로포밍 공법을 적용하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 기존 부품의 형상을 주변 부품과의 간섭, 마운팅 및 요구 성능 등을 고려하여 알루미늄 압출튜브재를 사용한 하이드로포밍이 가능하도록 최대한 단순화하여 그림 9 및 10과 같이 설계하였다.

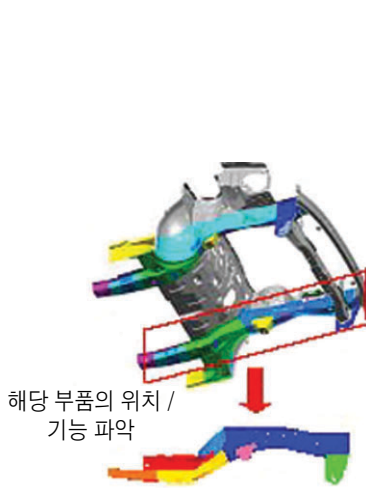


그림 9. 기존 형태의 프론트 사이드 멤버

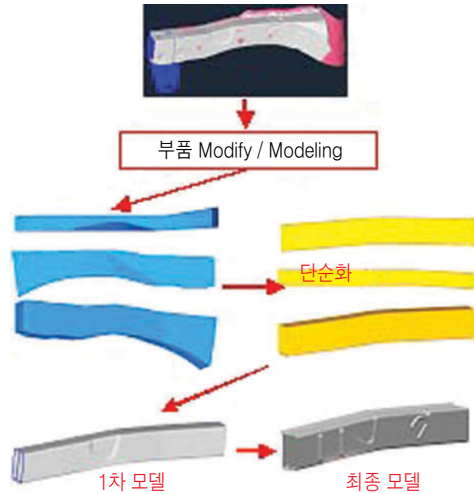


그림 10. 하이드로포밍 부품 설계

또한 지금까지의 하이드로포밍 부품은 단순한 중공형 형태의 관재를 사용했으나 현실적으로는 부품의 기능과 성능의 요구 조건에 따라 별도의 보강재가 필요한 경우가 대부분이다. 하이드로포밍 공법은 일반 프레스 성형 공법에 비해 소성가공 효과가 높지만 그 이상의 강도 및 강성 확보를 위해서는 보강재 적용 및 구조 변경이 불가피하다. 특히, 소성가공효과가 상대적으로 낮은 석출경화형 6000계열 알루미늄 합금의 경우는 더욱 그러하다. 따라서 본 연구에서는 제품의 구조강성 및 충돌성능 향상을 목적으로 하이드로포밍 제품 단면의 중공부에 격막(rib)을 추가하였고, 타 부품과의 조립성을 높이기 위하여 그림 11과 같이 플랜지(flange)를 추가하여 타 부품과의 조립이 용이하도록 설계하였다.



그림 11. 하이드로포밍 적용을 위한 프론트 사이드 멤버

또한 제품 설계 시 전체적인 확관률은 2% 이하로 최소화하고, 국부적인 최대 확관률은 5~7%로 국한시켰다. 이것은 하이드로포밍 시 가공 경화 효과를 유도하기보다는 열처리를 통한 강도 향상과 그에 따른 연신율의 감소를 사전에 감안하여 그에 적합한 최적의 확관률로 판단되어 설정한 것이다. 통상적으로 A6061 압출재를 하이드로포밍 하기 위해서는 성형 전 연화처리를 통해 성형성을 확보하고 성형 후에는 강화열처리(T6)를 통하여 강도를 확보하는 방법이 사용되지만, 이러한 방법은 생산성이 저하되고 치수정밀도 등의 품질확보가 쉽지 않다. 특히, 강화

열처리 후 제품의 뒤틀림, 휨, 찌그러짐 현상 등 후 열처리 과정에서 발생된 불량은 전량 폐기할 수밖에 없다. 이에 본 연구에서는 최소의 확관률 설정을 통해 실제품의 치수와 크게 차이나지 않도록 압출재를 제작하였고, 제작된 압출재를 T6 열처리를 통하여 성형 전 강도를 확보하였다. 이 과정에서도 물론 압출재의 치수 상 산포가 다소 존재하지만 이것은 하이드로포밍 성형 과정을 통해 모두 해결 가능한 수준으로 판단된다.

즉, 하이드로포밍 시 내부압력의 상승에 따른 압출재의 소성 변형 및 그 형상의 유지를 통하여 제품의 치수정밀도를 확보할 수 있기 때문이다.

### (2) 압출재 제작

본 연구에서 사용한 압출재의 형상은 단면적에 비해 두께(2.0mm)가 상대적으로 얇아 압출과정에서 격막(rib)에 주름이 발생하는 문제와, 격막의 두께는 증가하면서 상대적으로 다른 부위의 두께가 얇아지는 현상이 종종 발생하였으나, 압출 금형의 수정 및 금형과 코어(core) 간의 브릿지(bridge) 보강을 통해 요구된 치수의 압출재를 제작할 수 있었다. 압출재 제작에 사용된 장비는 직접식 압출기(1,650 ton)를 사용하였고, 알루미늄 괴(ingot)의 가열온도는 510~520℃를 유지하였으며, 압출 후 즉시 수냉하였다.



금형앞면(형상 제어용)    금형뒷면(소재유입 분할용)

그림 12. 압출용 금형

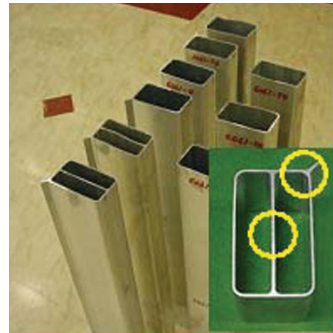


그림 13. 제작된 알루미늄 압출재

### (3) 하이드로포밍 공정

#### ① 1차벤딩 (벤딩 머신)

직관형의 압출재를 우선 금형에 장입하기 위하여 벤딩 장치에 의한 1차 굽힘 가공이 필요하다. 그림 14와 같이 해당 압출재를 미리 제작된 벤딩(bending) 금형과 맨드릴을 사용하여 6°로 1차 굽힘 가공을 실시하였다.



그림 14. 압출재의 굽힘

굽힘 가공 후 공정에 따라 부품을 하이드로포밍 성형하였다. 금형은 상형의 클로징(closing)과 동시에 프리 벤딩(pre-bending)이 이루어지도록 설계하였고, 펀치 실링 이후 가압공정이 진행되도록 설계하였다. 가압 공정 시 축 방향 소재유입(axile feeding)은 전혀 없고, 열처리된 튜브 자체의 성형성만으로 확관이 이루어지도록 구성하였으며, 이 때 가해진 내부 압력은 800~900 bar로 나타났다. 900 bar 이상의 압력에서는 펀치와 압출재의 실링(sealing)부위에서 소재변형으로 인한 압력 누출로 더 이상의 압력 상승이 어려웠으며, 그림 15에 나타난 바와 같이 성형 후 대부분의 형상이 양호한 성형상태를 나타내었다.



그림 15. 하이드로포밍 후 제품의 성형 상태

(4) 제품 정도 평가

표 2에서와 같이 압출재의 실제 치수와 설계상의 치수 사이에는 많은 차이가 발생하였다. 기준은 KSD 6759에 의거하여 측정된 수치이며, 해당 압출재의 제품 수준은 진직도 평가에서 최대 37%, 비틀림 평가에서는 최대 53%로 허용 공차 기준을 훨씬 넘어서는 결과를 나타내었다. 즉, 압출재 자체적으로는 제품의 치수 정도를 확보할 수 없는 결과를 나타내었으나 이를 하이드로포밍 성형 과정을 통해 극복할 수 있음은 이미 앞 절에서 언급한 바와 같다. 실제 성형 후 제품을 3차원 측정기로 측정한 결과, 총 19 개소의 측정 위치에서 약 ±0.5mm 허용 공차를 만족하는 위치가 14개소이다. 이는 프레스 성형 제품인 현 양산 제품과 비교하였을 때 동등 이상의 치수 정밀도를 나타내었다. 그림 17에 그 측정 결과를 나타내었다.

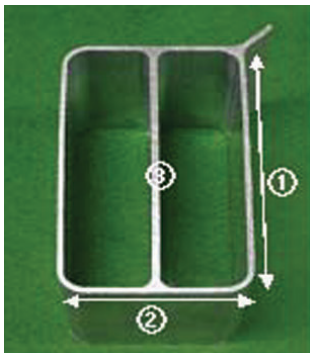


그림 16. 주요 측정 위치

표 2. 압출재의 주요 치수 측정 결과

치수 검사 내역	부위	①부위	②부위	③부위	기준
	규격		119.2	67.2	2
공차		±0.86	±0.61	±0.15	
측정치(5EA)		119.36	67.65	2.04	
길이		965.50	964.90	965.05	
진직도		1.30	2.20	1.30	1.61 이하
비틀림		0.79	1.22	1.10	0.8 이하



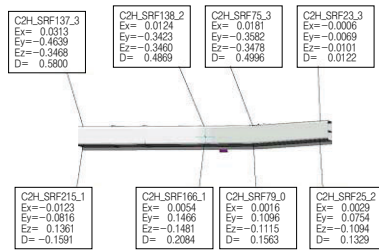


그림 17. 위치별 치수 측정 결과

### 3. 결론

- 1) 기존 양산차를 선정하여 개발 차체 안을 적용한 결과 기존 모델 대비 동등 수준의 정면 오프셋(offset) 충돌 성능을 확인하였다.
- 2) 경량의 알루미늄 판넬을 적극 적용하고 보강재를 삭제함으로써 전체 BIW 기준으로 7.5 %의 경량화를 달성하였다.
- 3) 알루미늄 압출재를 이용하여 차량의 프론트 사이드 멤버를 대상으로 하이드로포밍 공법을 적용하였으며, 성형 결과 제품 치수 정도가 양산 품질 이상의 수준임을 확인하였다.
- 4) 현재 플로어 컴프리트가 제작 중이며, 향후 차량 전체 개발 과정을 통해 세부적인 형상 및 치수를 조정할 계획이다.

### 참고 문헌

- [1] H. I. Bae, J. M. Lim, and K. H. Park, "Vehicle Compatibility in Car-to-Car Frontal Offset Crash", Paper No.156, 17th ESV (2001)
- [2] Johnny K. Larsson and Lutz Hanicke, "Multi-material Approach with Integrated Joining Technologies in the New Volvo S80", SAE 1999-01-3147 (1999)
- [3] Nico A. J. Langerak and Simon P. Kragtjwijk, "The Application of Steel and Aluminum in a New Lightweight Car Body Design", SAE 982285 (1998)
- [4] 이문용, 강창룡, 류성지, "열처리형 Al 압출재를 이용한 하이드로포밍 부품개발", 열처리공학회지, 17 (2004) 165-172



배 한 일

· 현대자동차 남양연구소 선행개발센터 선행해석팀  
· 관심분야 : 충돌안전 CAE  
· E-mail : hibae@hyundai-motor.com



박 동 호

· 현대자동차 남양연구소 선행개발센터 선행해석팀  
· 관심분야 : 고안전차체개발  
· E-mail : crash200@hyundai-motor.com



이 주 엽

· 현대자동차 남양연구소 선행개발센터 선행해석팀  
· 관심분야 : 경량차체개발  
· E-mail : crash@hyundai-motor.com



이 문 응

· (주)성우하이텍 기술연구소  
· 관심분야 : 차체레이저용접, 스틸 및 알루미늄  
하이드로포밍, 고안전경량차체개발  
· E-mail : mylee@swhitech.co.kr



류 성 지

· (주)성우하이텍 기술연구소  
· 관심분야 : 알루미늄 열처리,  
하이드로포밍, 단조  
· E-mail : ryusjs@empal.com