

해외기술자료

# 알루미늄 차체 및 엔진 블록에의 고품질 다이캐스팅 기술의 적용<sup>1)</sup>

山縣 裕

야마하 發動機 (株)研究創發 센터프로젝트 開發室

## Aluminum Frame and Engine Block using High Quality Die Casting

Hiroshi Yamagata

R & D Operation, YAMAHA Motor Co., Ltd.

번역 : 김기영<sup>2)</sup>

### 1. 서 언

환경문제는 오늘날 가장 중요한 과제로, 타는 물건(차량 등)에 있어서는 중량 저감이 에너지 절감 및 CO<sub>2</sub> 절감에 중요한 시책이다. 경량인 알루미늄은 구조재료로서 우수한 내식성을 가지는데, 합금을 열처리에 의해서 적당한 강도 특성을 낼 수가 있다. 또한 소성가공, 주조가 용이하고 절삭성도 좋고, 용접도 가능하다. 알루미늄 제품을 만들기 위해서는 상당한 전기에너지가 필요하나 한 번 금속으로 돼버리면 그 후에는 용점이 낮으므로 리사이클이 매우 용이하다.

그림 1은 야마하 발동기에 있어서 이륜차 및 선외기(船外機)의 알루미늄 사용비율이다. 경량인 것이 중요한 포인트인 이러한 상품에서 사용량이 많고, 특히 알루미늄 사용이 제품가격에 반영되기 쉬운 대형 바이크와 선외기에 있어서 적극적으로 사용되고 있다. 그림 2는 스포츠바이크에 있어서 알루미늄 부품(캠샤프트는 제외)을 나타낸다.

자동차에 사용되는 알루미늄 제품의 제조방법은 매우 다양하나 낮은 코스트로 고품질의 물건을 만들 수 있는 다이캐스팅이 최근 주목을 받고 있다. 특히 종래의 품질을 대폭 개선한 물건에 대해서인데, 본 해설에서는 모터사이클의 알루미늄 차체 및 엔진(실린더)블록에의 고품질 다이캐스팅기술의 적용에 대해서 논한다.

### 2. 고품질 다이캐스팅

주물의 좋은 점은 자유로운 형상을 만들 수 있고, 더구나 대량생산을 향하고 있다는 것이다. 그러나 어떠한 형상이라도 자유롭게 만들 수 있는 방법이라는 것은 아니다. 주형의 재질 또는 용융 알루미늄의 주입 방법 등에 의해서 제품품질 및 생산성에 일장일단이 있으므로 목적하는 부품에 따라서 방법을 선택해야 한다.

이 중 다이캐스팅으로서 약칭되는 다이캐스팅 기술(high

pressure die casting)은 매우 생산성이 높은 기술로 제품의 정도가 좋다. 자동차 부품에서는 트랜스미션 케이스를 시작으로 많은 채용실적이 있다. 또한 다이캐스팅 중에서 고품질이 얻어지는 기술로서 진공 다이캐스팅, 스퀴즈 다이캐스팅, 반용융성형(Semi-solid metal processing, SSM) 등을 들 수 있다.





제품	모터사이클			마린엔진
	스쿠터	중소형	대형	
				
알루미늄 사용비율	10%	25%	40%	50%

그림 1. 야마하 발동기 제작 모터사이클 및 선외기의 알루미늄 사용 비율

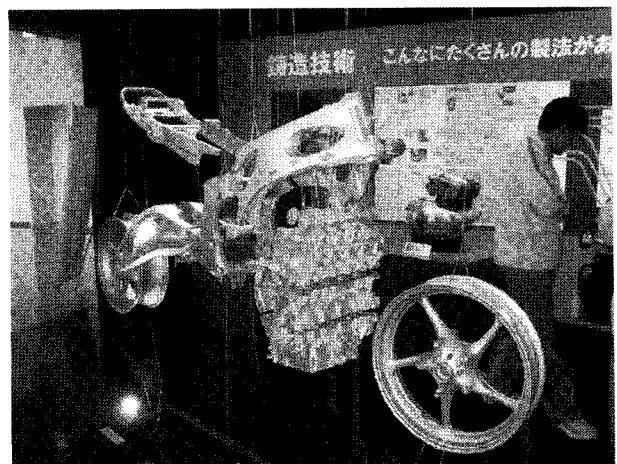


그림 2. 스포츠바이크에 있어서 알루미늄 부품(캠샤프트는 제외)

1) 日本鑄造工學會誌 Vol. 76 No. 4 pp. 272~277에 게재된 자료임.

2) 한국기술교육대학교 신소재공학과(Dept. of Materials Engineering, Korea Univ. Technology and Education)

다이캐스팅은 녹은 알루미늄을 피스톤 실린더 기구로 금형 중에 고속, 고압으로 주입하여 제품으로 한다. 녹은 알루미늄을 주입하므로 전사정도(轉寫精度)가 좋은 얇은 주물의 생산이 가능하다. 더욱이 형 내의 진공흡입을 병용한 진공 다이캐스팅 기술은, 감압에 의하여 주입용당의 저항이 줄어드는 탕류충전 개선 및 충전 시 공기의 혼입이 감소하는 등의 메리트가 있다. 사용 예는 많고, 진공의 병용으로 품질이 일정한 개선효과가 나타나나, 열처리 및 용접 나아가서는 소성가공에 적합한 재질을 양산하는 것은 어렵다.

다이캐스팅품의 소재품질이 떨어지는 원인은, 1) 함유가스(많은 경우는 혼입된 공기, 적은 경우는 용존수소), 2) 산화물의 혼입, 3) 슬리브 윤활제 및 4) 금형이형재의 혼입, 5) 응고편의 혼입(파단칠층) 등을 들 수 있다.

그림 3은 용탕이 사출기구에서 주입되는 양상을 나타낸다. 최근의 다이캐스팅머신은 정밀한 속도제어가 가능한 사출 기구가 장착되어 있다. 그러나 콜드챔버 방식에서는 쇼트슬리브 중에서의 응고편의 발생, 윤활제 및 기포의 제품 중의 혼입은 정도의 차는 있으나 피하기 어렵다. 일반적으로 다이캐스팅은 제품이 금형 내에서 급냉되므로 가스결함은 표면에 나타나기 어렵다. 때문에 고품질품은 잠재적으로는 요구되어 왔으나, 일본에서는 가스의 혼입 등 보다는 오히려 싸이클 타임의 단축을 시작으로 한 생산성 향상 등의 개발에 주안점이 모아져 왔다.

그림 4에 알루미늄 제품의 강도와 신율에 대한 가스량의 영향을 정성적으로 나타내었다. 종래에 보통의 다이캐스팅에서는 진공을 병용하여 탕흐름을 개선해도 20~30 mL 정도의 가스가 함유되고 혼입된 오일 및 공기 때문에 용체화처리 온도 정도 까지 가열하면 물건에 블리스터가 대량으로 나타나는 것이 일반적이다. 그러나 용체화를 필요로 하는 T6열처리 및 용접에는 알루미늄 100 g당 가스량이 10 mL 이하, 가능하면 5 mL 이하가 바람직한 레벨이다.

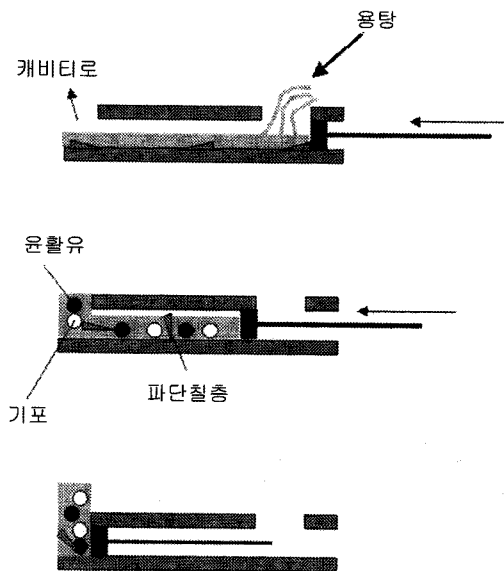


그림 3. 다이캐스팅에 있어서 사출실린더 라이너에서의 결합 발생

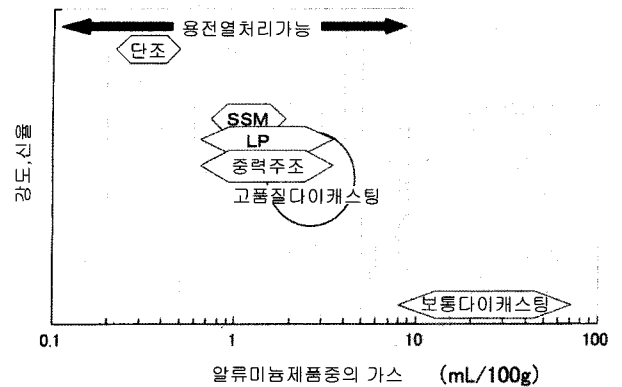


그림 4. 알루미늄 소형재 중의 함유가스량과 강도·신율의 관계

다이캐스팅과 다르게 금형 및 사형으로의 저속충전, 완만한 응고가 진행되는 중력주조 및 저압주조(LP)에서는, 상술한 1) 및 2)는 소형재의 품질을 떨어뜨리나, 제품에는 나타나기 어렵다. 또한 기구 상의 3), 4) 및 5)의 영향도 없다. 때문에 T6 열처리 또는 용접이 필요한 부재에서는 종래의 사형주조, 금형주조 또는 LP 등의 제품이 이용되어왔다.

저자 등은 다이캐스팅의 장점을 살리고 문제점을 극복하기 위하여 진공 다이캐스팅에 다음과 같은 점에 유의함으로써 용접성 및 열처리성에 있어서 비약적인 품질 향상을 가능하도록 하였다.

① 금형캐비티 부의 진공도를 향상시키기 위하여 리크 부에 모두 셸(seal)을 넣는다. 이렇게 함으로써 3 KPa 정도의 고 진공이 조업 중에 유지된다. 진공계는 용탕이 실린더 라이너 내에 공급되어 전진하는 피스톤이 금탕부에 닿음과 동시에 미리 배기된 대용량의 진공탱크가 금형 내를 감압하도록 설계하고 있다.

② 다체널의 온도조절기에 의하여 금형의 온도제어를 정밀하게 제어한다. 이것을 적극적으로 함으로써 금형온도의 밸런스를 좋게 하고, 탕흐름을 돕고, 냉각속도를 제어함으로써 재질을 개선한다.

③ 탕흐름 시뮬레이션에 의해서 최적의 금형방안을 설정한다. 얇은 물건의 시뮬레이션에는 노하우가 필요하다.

④ 부품 형상의 최적의 주입속도의 선택 및 제어를 요한다. 특히 양산 시에 반복하여 정도를 확보한다. 그렇게 함으로써 제품의 품질의 흠어짐을 감소시킬 수 있다. 모니터링 시스템은 매 쇼트 별로 이상을 검출한다.

⑤ 제품 중의 산화물 및 가스량을 저감하기 위하여 용탕의 청정화처리를 행한다. 제품의 신율을 확보하는 데에는 파단칠층의 저감의 대책을 강구할 필요가 있다.

이들의 상승효과에 의하여 다이캐스팅 기술은, 박육, 대형 방향으로 확대되고, 제품 내의 가스 혼입량을 중력주조품 정도인 3 mL/100 g으로 할 수 있었다. 그 결과 용접과 T6열처리가 가능한 차체 부품 또는 엔진 부품 등의 제조가 가능하게 되었다.

### 3. 차체에의 이용

차체구조에 다이캐스팅품을 사용하는 데 있어서 재료강도 뿐

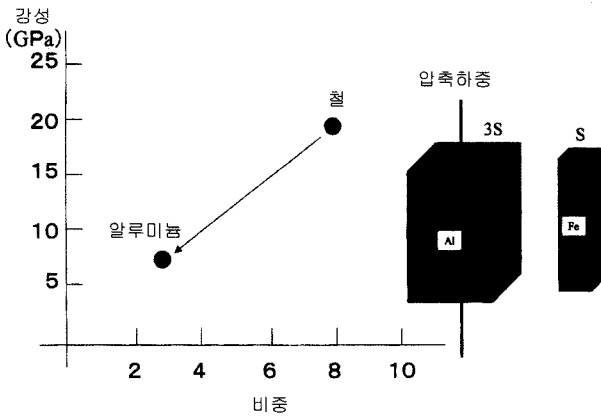


그림 5. 철과 알루미늄의 강성·비중 비교

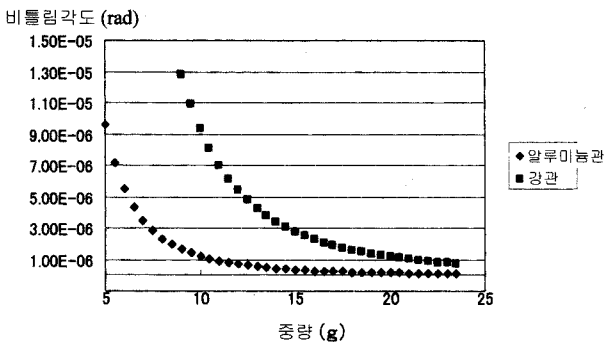


그림 6. 파이프 소재의 비틀림 강성 비교

만 아니라 차체의 강성확보가 필요하다. 그림 5는 알루미늄의 강도특성을 나타낸다. 알루미늄은 가볍기는 하나 탄성율은 철의 1/3밖에 되지 않는다. 따라서 그림 중 오른쪽과 같이 중량으로 압축되는 인장이 걸리는 경우는 탄성율이 낮은 약점이 직접 나타난다. 결과적으로 철과 동등한 부재 강성을 가지도록 하려면 3배의 단면적이 필요하다. 여기서는 부재가 크게 되면 경량화의 효과가 없어지게 된다.

한편, 중공파이프의 비틀림 조건을 생각해 보자(그림 6). 그림은 두께를 2mm로 일정하게 한 파이프를 비틀림을 준 경우의 비틀림에 의한 강성을 폭 10mm의 재료에서 비교하였다. 사용 재료의 중량을 횡축, 중축은 회전각도를 나타내었다. 중량을 증가시키면 파이프의 직경이 증가한 것 같이 계산이 된다.

그림으로부터 명백한 바와 같이 예를 들면 비틀림각 3E-6 rad에서 비교하면 철의 경우 15g의 부재가 필요하나 알루미늄에서는 7g으로 약 반의 중량으로 같은 강성이 가능하게 된다. 다만 파이프의 직경은 알루미늄에서 약 60mm, 강에서 40mm로 된다. 알루미늄에서는 직경을 약간 증가시킬 필요가 있다 이것이 알루미늄의 경우 중공형상으로 하여 경량화를 꾀하는 포인트이다.

차체에서 강성이 필요한 부재는 종래에도 중공형상으로 해왔다. 그림 7은 알루미늄의 압출재, 주물, 판을 조합시킨 차체의 예이다. 부재 단면형상을 그림 중에 표시하였다. 성형한 판을 중공형상으로 용접한 것 및 중공단면의 부재를 조합함에

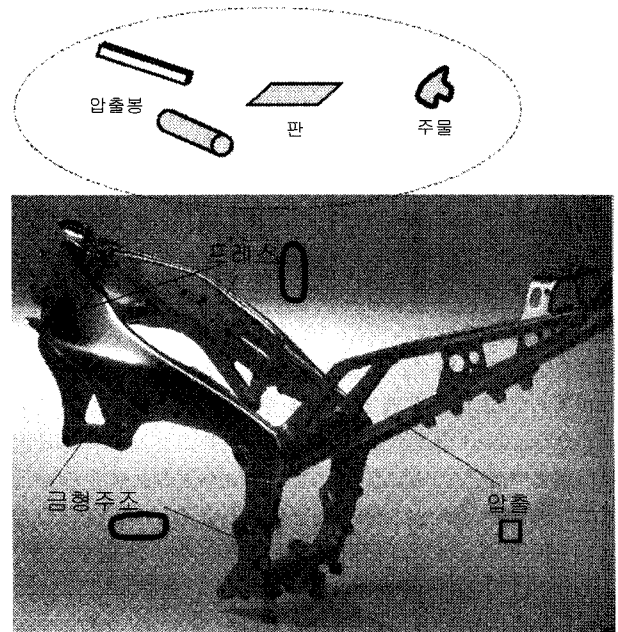


그림 7. 판 및 압출봉을 조합한 알루미늄 프레임 단면 형상 표시

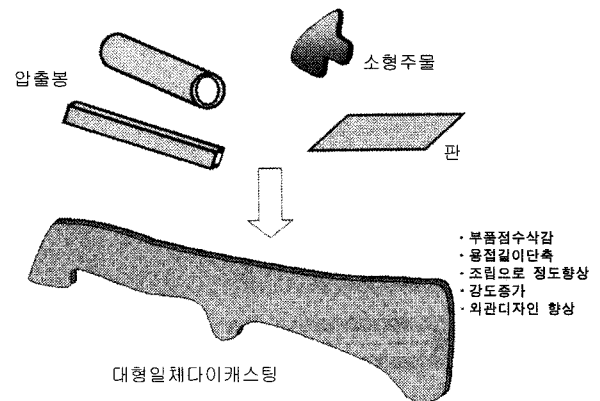


그림 8. 대물 알루미늄 다이캐스팅의 장점

의하여 의해서 차체는 구성된다.

다이캐스팅 부재를 사용한 중공형상은 용접을 사용하면 가장 간단하게 가능해진다. 차체에 얇고 큰 물건의 다이캐스팅을 사용하므로 종래에 소형 부재를 여러 개 조합한 구조는 크게 단순화된다(그림 8). 예상되는 장점으로는 정도가 나오기 쉽다는 것과 강도가 높아진다는 것, 외관 디자인성의 향상 등이 있다. 용접 길이의 저감과 부품수 저감으로 코스트 메리트가 생긴다.

또한 다이캐스팅 부재는 리브(rib)를 면에 세운 박육 형상으로 할 수가 있다. 때문에 중공단면 정도의 강성을 필요로 하지 않는 설계에서는 용접을 전혀 사용하지 않는 부재도 가능하다. 그림 9 및 10은 이 예이다.

이 외에 설상차 차체, 이륜차의 후륜의 서스펜션 암 등으로 생산이 확대되고 있다. 그림 9의 차체에 있어서 종래의 강관구조에서는 부품개수가 88점이었으나, 4점으로 줄었고, 중량도

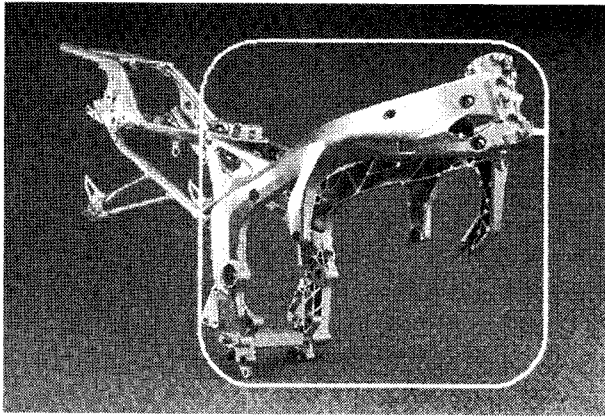


그림 9. 스포츠바이크(FZ6) 대형 다이캐스팅 프레임, 사각 밖은 강관제

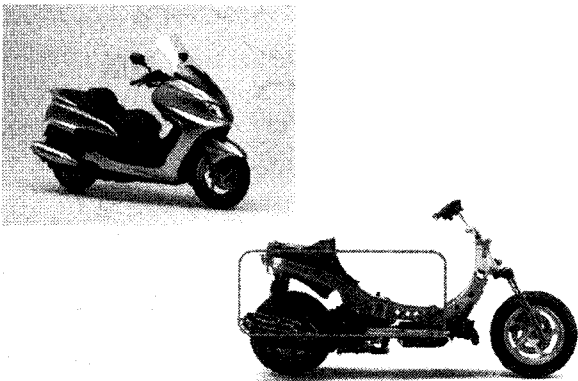


그림 10. 스쿠터(YP400)용 대형 다이캐스팅 프레임, 프레임 전 반은 금형 주조품

33% 줄일 수가 있었다. 그림 10은 대형의 다이캐스팅을 금형 주조 헤드부재와 용접하여 사용하고 있는 스쿠터 프레임의 예이다. 이것도 부품 개수는 크게 줄고 있다.

이들 다이캐스팅품은 어느 것도 주조 후 곧바로 용체화하여 실행하고 시효경화처리를 추가한다. 이렇게 함으로써 변형을 피하고 강도의 향상을 피하고 있다.

#### 4. 엔진(실린더)블록에의 이용

최근 저자 등은 알루미늄 20% 실리콘 합금을 사용하여 고품위 다이캐스팅 기술을 조합하여 T6처리 가능한 다이캐스팅제의 올 알루미늄 실린더 블록(all aluminum cylinder block)을 실용화하였다. 이 절에서는 이 기술에 대해서 논한다.

시장에는 아직 주철의 실린더 블록이 많으나, 경량화 및 냉각성의 향상을 위하여 알루미늄합금블록은 증가하고 있다. 알루미늄 블록은 주철 블록과 다르게 알루미늄 기지 그 상태에서는 피스톤 링의 접동(摺動)에 견딜 수 없으므로, 자동차 엔진에서는 주철에 실린더 라이너를 삽입하는 타입이 일반적이다. 그림 11은 주철 실린더 라이너의 인서트타입의 단면사진이다. 그림의 오른쪽 아래에 삽입되는 실린더 라이너, 오른쪽 위에

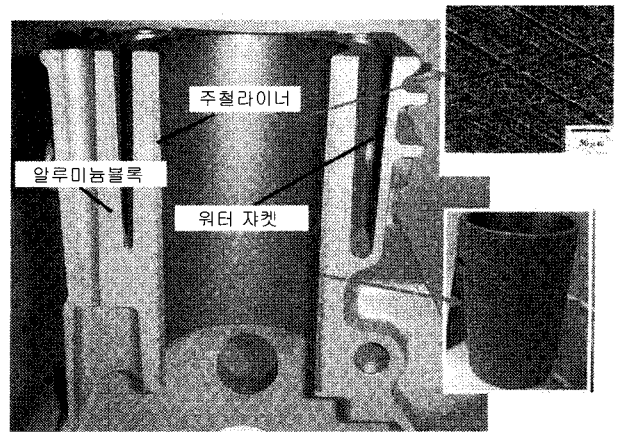


그림 11. 주철 실린더 라이너 인서트 알루미늄 블록. 우상은 호닝된 실린더 라이너 표면, 우하는 주철 실린더라이너

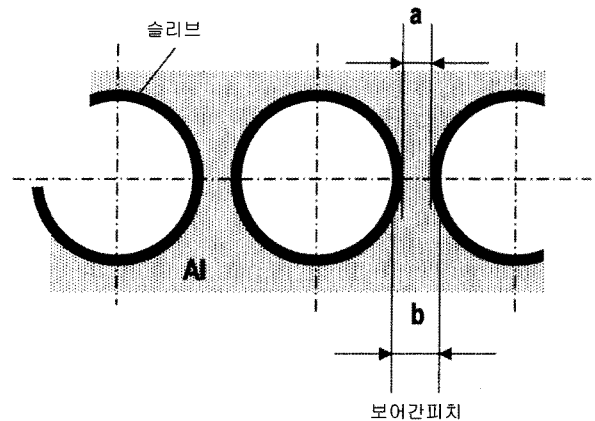


그림 12. 다기통엔진의 보어피치

보어 표면의 호닝(honing) 후의 크로스헤치를 나타낸다. 주철 실린더 라이너를 넣은 타입에서는 알루미늄 블록과 주철실린더 라이너의 열팽창율로 차로 인한 실린더 보어의 바람직하지 않은 변형이 생기기 쉽고, 이 변형을 막는 데는 실린더 라이너의 두께가 일정 이상으로 필요하고 다기통엔진의 경우 보어(bore) 간의 피치(그림 12의 치수 b)가 좁히기 어렵고, 결과적으로 엔진을 콤팩트하게 할 수 없다는 것이 과제이다. 또한 실린더 라이너자신의 좋지 않은 열전도도 및 알루미늄 블록과 라이너 간의 생기는 에어갭이 보어 면의 방열을 저해하고 고출력 엔진에서는 보어 면의 온도를 낮추기 어렵다는 약점이 있다.

실린더 라이너를 사용하지 않고 알루미늄 블록의 접동표면을 얻는 기술로서는, 섬유강화 등의 복합재료 혹은 분산 도금 등이 제안되고 있다. 이러한 부가적인 처리를 하지 않은 알루미늄 실린더 블록으로서 이전부터 17%Si 함유 과공정 Al-Si-Cu합금을 사용한 올 알루미늄 실린더 블록이 채용되고 있다. 접동부인 실린더보어를 포함하는 실린더 블록 전체가 내마모성이 있는 과공정 A390합금으로 만들어 진다. 독일에 대배기량 엔진(예를 들면, 최근의 예로써 폭스바겐사의 W12, W8 엔진 등)을 중심으로 채용되고 있다.

과공정합금은 Si이 높기 때문에 용접도 높고, 주조로 안정한 Si입자의 분산을 얻기 어려운 점, 또는 블록의 경시변형을 피하기 위하여 과시효상태를 필요로 한다. 때문에, 품질을 안정적으로 얻기 쉬운 LP주조가 이용되어 왔다. 이 기술은 얇은 주물을 만들기 어려운 점과 주조의 사이클 타임이 긴 등의 약점이 있다. 그래서 저자 등은 과공정 알루미늄 실리콘 합금(AI-20 mass%Si-Cu)의 올 알루미늄 실린더 블록(DiASil 실린더블록)을 LP 대신에 고품질 다이캐스팅 기술로 만드는 것을 시도해 보았다.

그림 13에 DiASil 실린더 블록의 다이캐스팅의 모식도를 나타낸다. 실린더 블록은 일반적으로 형상이 복잡하고 많은 슬라이드 코어를 필요로 하며, 고진공을 유지하는 데는 슬라이드부의 통상의 켈로서는 내구성에 문제가 생긴다. 저자 등은 Vacuum Glove box법이라 불리는 방법을 채용하고 있다. 이 방법은 금형 전체를 진공상자로 덮어서 리크(leak)를 막는 방법으로 여러 개통의 진공회로에서 배기하는 구조로 되어 있다.

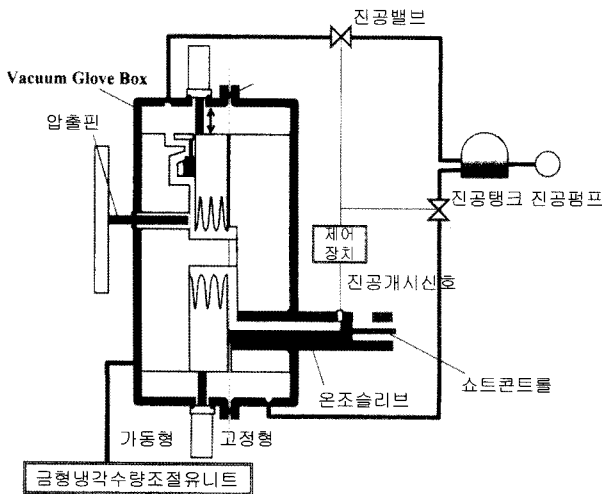


그림 13. 실린더 블록의 Vacuum Glove Box법 다이캐스팅기술

고진공도로 주조하는 것에 의해서 박스 결합은 상당히 줄일 수 있고 품질은 안정화된다.

DiASil실린더는 호닝에 의해서, 주조조직 중의 Al 매트릭스를 선택적으로 제거하고 Si입자를 떠오르게 해서 내마모성을 확보하고 있다. 그림 14에 기술의 포인트를 종합해서 정리하여 보여준다. 매트릭스에서 돌출한 Si와 Al기지와의 갭에 윤활유를 유지시켜, 주행하는 피스톤 링의 유체윤활상태에서의 운전을 가능하게 한다(그림 15). 때문에 그림 11에 나타난 윤활유 저장용의 크로스해치는 불이지 않는다. 파인 호닝(fine honing) 후의 실리콘을 돌출시키는 처리로 Si입자는 그림 16과 같은 단면형상으로 된다.

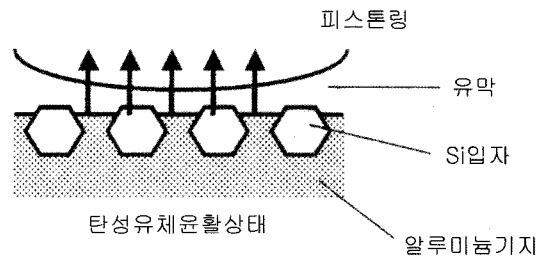


그림 15. 탄성유체윤활의 형성

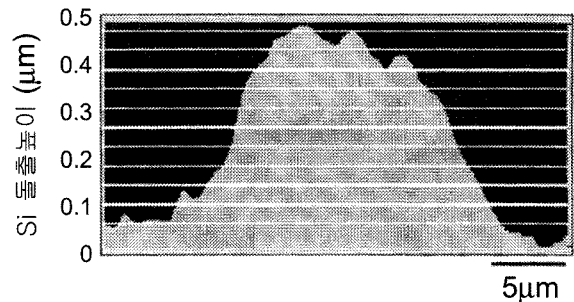


그림 16. 조정 Si의 단면형상

DiASil 실린더블록의 기술적 포인트

- 1) 과공정 Al-Si 합금의 다이캐스팅기술
- 2) 실린더보어호닝기술

- 1) 과공정 Al-Si 합금다이캐스팅기술  
과공정 Al-Si 합금(AI-20%Si-Cu)의 Si 입자의 입경 및 분산상태를 균일화한다  
제품 중의 가스량을 줄여서 열처리불가능하게 한다  
방법: 시출제어 및 온도 Vacuum Glove Box법
- 2) 호닝기술  
유체윤활상태를 확보한다  
방법: 다이아몬드석에 의한 경면가공 탄성저석에 의한 Si 입자 돌출가공

그림 14. DiASil 실린더블록의 기술의 포인트

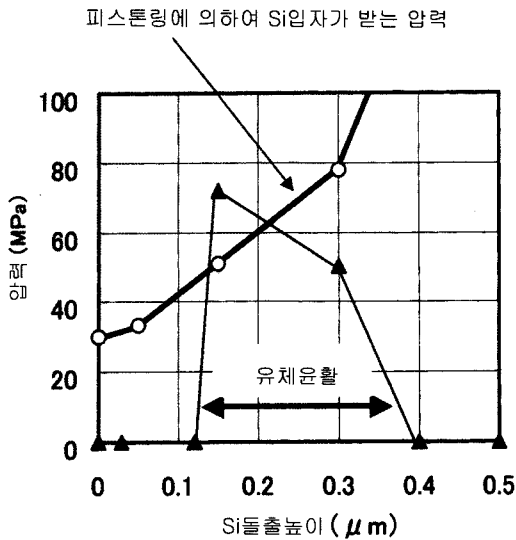


그림 17. Si 돌출높이가 유막압력(▲) 및 입자가 받는 압력(○)에 미치는 영향

그림 17은 피스톤 링으로부터 Si 입자가 받은 압력과 유막으로부터 발생하는 압력에 미치는 실리콘의 돌출 높이의 영향을 나타낸다.

초기에 뾰족하게 있었던 Si입자는(그림 16) 운전개시와 더불어 사각형으로 마모하는 형태로 된다. 실리콘의 돌출 높이는 줄어서 사각형으로 되므로 피스톤링과 닿는 면적이 증가하고 입자에 걸리는 압력이 감소한다.(그림 17 ○) 또한 윤활 시물레이션에 의하면 Si의 알루미늄 기지로부터의 돌출량이 0.15 μm 정도일 때, 표면에 형성되는 유막이 가장 두껍게 된다.(그림 17▲)

실제로 작동 시 피스톤링의 접동에 의해서 Si이 마모되고, 유체윤활이 일어나는 0.15 μm 부근에서 마모는 멈춘다. 계산상으로도 그림 중 0.15 μm 부근의 유막에서 발생하는 압력은 Si

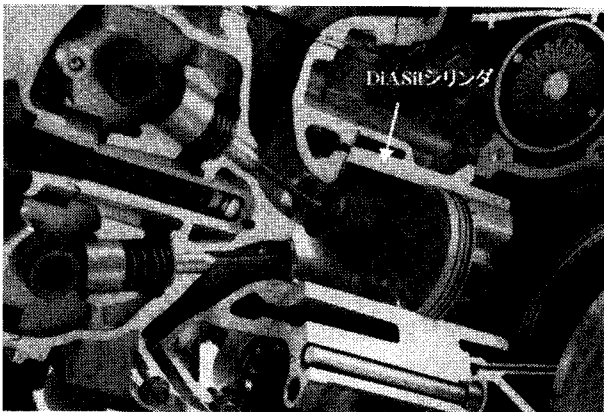


그림 18. DiASil 실린더 블록을 장착한 엔진의 단면, YP 250 Grand Majesty에 탑재

입자에 걸리는 압력보다 높게 되고 있다. 이 윤활성이 좋은 상태로 실리콘 돌출량은 자기조직화 된다고 말할 수 있다. 저자 등은 윤활유동점도를 변화시켜 마모량과 Si 돌출 높이의 관계를 조사하여 과공정 Al-Si 마모형태에 미치는 Si 돌출 높이의 영향을 검토하고 있다.

그림 18은 DiASil 실린더를 채용한 250cc 스쿠터 엔진의 단면이다. 피스톤 표면에는 동종재료의 접동을 피하고 소착을 방지하기 위해서 철도금을 실시한 것이다. DiASil 실린더는 박육 경량이고 또한 냉각성능이 좋은 고강도의 실린더를 짧은 사이클 타임으로 제조할 수 있다. 금후 채용을 확대해나갈 예정이다.

### 5. 금후의 기술개발의 방향성

다이캐스팅품의 고생산성을 잃어버리지 않고 소재품질을 개선함으로써 다이캐스팅품의 적용범위가 확대된다. 반응고상태 또는 스퀴즈 기술을 병행하는 것에 의해서 보다 나은 발전이 기대된다. 종래 주물은 주조하기 쉬운 재료로 생산하여 왔으나, 이들 기술은 주조하기 어려운 재료의 새로운 이용을 가능하게 한다. 그러나 안정된 품질을 양산하는 데에는 종래에 방법에 비하여 훨씬 더 복잡한 관리레벨이 요구되고, 형상적으로는 아직 두께를 자유롭게 변화시켜 자유로운 형태를 만든다고 하는 정도까지는 도달해있지는 않다. 주조기술자의 노력을 촉구하고 싶다.

### 6. 결 언

종래의 고압다이캐스팅 기술은 치수정도, 생산성이 뛰어나나, 열처리·용접이 불가능하고, 재질 상으로는 만족스럽지 못하였다. 그리하여 고진공 및 시출조건의 정밀제어를 피한 고품질 다이캐스팅 기술을 개발하여, 대물·박육의 차체부품 및 고 Si의 DaASil 실린더블록의 생산을 실현하였다. 금후 더욱 기술의 개량이 진행되면 합금성분의 제약이 제거되는 등 고품질 다이캐스팅의 한 걸음 더 나아가는 발전이 예상된다.

### 참 고 문 헌

- [1] High Interrity Die Casting Process : E. J. Vinarcik (John Wiley & Sons, Inc.) New York (2003) 10.
- [2] 山縣 裕 : 經金屬 53 (2003) 309.
- [3] T. Kitsunai, H. Yamagata and T. Koike : SAE Paper, 2003-01-2869.
- [4] 山縣 裕 : 現代の鍊金術—엔진用材料의科學と技術—(山海堂) (1998)
- [5] H. Kurita, H. Yamagata, H. Arai and T. Nakamura : SAE Paper 2004-01-1028.
- [6] 栗田洋敬, 山縣裕, 荒井大樹, 中村保 : 日本金屬學會誌 68 (2004) 1.