

알루미늄 합금 다이캐스팅 기술의 신전개¹⁾

西 直美

(사)일본다이캐스팅협회

New Development of Aluminum Die Casting Technology

Naomi Nishi

Japan Die Casting Association

번역 : 김기영²⁾

1. 서 언

1915년에 미국의 H. H. Doehler에 의하여 상업화된 알루미늄합금 다이캐스팅은, 미려하고 매끈한 외관과 우수한 치수정도를 가지고, 박육이며 경량인 주물을 단시간에 대량으로 생산할 수 있어서 자동차 관련부품을 시작으로 전기기계, 일반기계 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그 생산량은 그림 1에 나타난 바와 같이 1950년대 중반부터 급속히 증가하였고, 주로 자동차 산업의 발전에 견인되어 왔다. 구체적인 용도로서는 트랜스미션 케이스, 오일펌프 케이스, 로커커버 등의 케이스류 및 커버류가 주류를 이루었다. 그러나 최근에는 지구환경 파괴 및 화석 연료의 고갈 등의 재문제를 배경으로 경량화, 리사이클성 향상 등의 요구가 한창 높아지고 있어서 종래의 다이캐스팅의 레벨에서는 달성하기 어려웠던 고강도·고인성·고연성 등의 특성이 요구되는 바퀴 주변 및 차체 관계 부품의 다이캐스팅화가

진전되기 시작하고 있다. 또한 전기통신 분야에 있어서도 급속한 IT발전에 따라서 노트북, PC 및 휴대폰 등의 케이스에 박육화(일반적으로 두께 1 mm 이하)가 요구되고 있다.

이 같은 다이캐스팅 수요의 새로운 요구에 대응하기 위하여 다이캐스팅품의 신뢰성 향상은 처음부터 고품질·고기능 다이캐스팅을 목표로 한 연구개발이 행해지고 새로운 기술 및 새로운 프로세스가 계속하여 개발되고 있다. 여기서는 이들 다이캐스팅 기술의 신전개의 상황을 소개한다.

2. 다이캐스팅의 새로운 용도

표 1에 최근 주목되고 있는 새로운 알루미늄 합금 다이캐스팅품의 용도와 그 구조법에 대해서 나타낸다. 또한 그림 2에 제품 예를 나타낸다. 강도·인성·연성 등의 기계적 특성이 요구되는 서스펜션 및 압류 등의 바퀴 주변 부품, 필터 및 사이드 프레임 등의 박육장척(薄肉長尺)이며 강도·연성이 요구되는 차체 부품, 높은 내압성이 요구되는 유압기기부품 등이 다이캐스팅으로 생산되기 시작하였다.

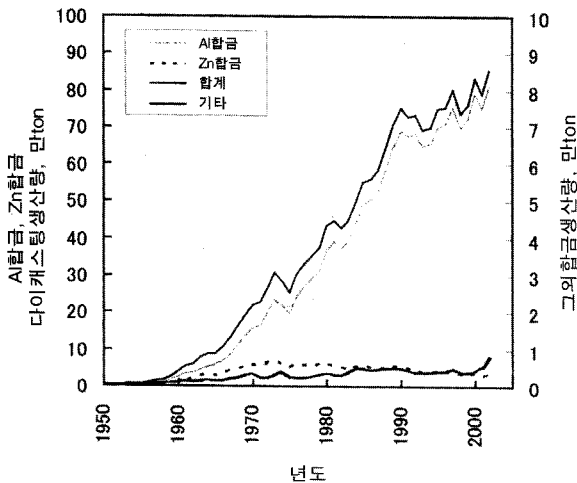


그림 1. 다이캐스팅의 생산량 추이

표 1. 알루미늄합금 다이캐스팅의 새로운 제품예와 구조법

제품	요구특성	구조법
엔진크레이틀	강도·인성·연성	Vacural
서스펜션암	강도·인성·연성	Vacural
로어링크	강도·인성·연성	NICS
서브프레임	강도·인성·연성	HIVAC-V
	박육·강도·인성·연성	MFT
브라켓트	강도·인성·연성	NI법
로어압	강도·인성·연성	반응고다이캐스팅
	강도·인성·연성	반용융다이캐스팅
유압부족	내압성	반용융다이캐스팅
자전거부품	강도·인성·연성	반용융다이캐스팅

1) 日本鑄造工學會誌 Vol. 76 No. 4 pp. 266~271에 게재된 자료임.

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

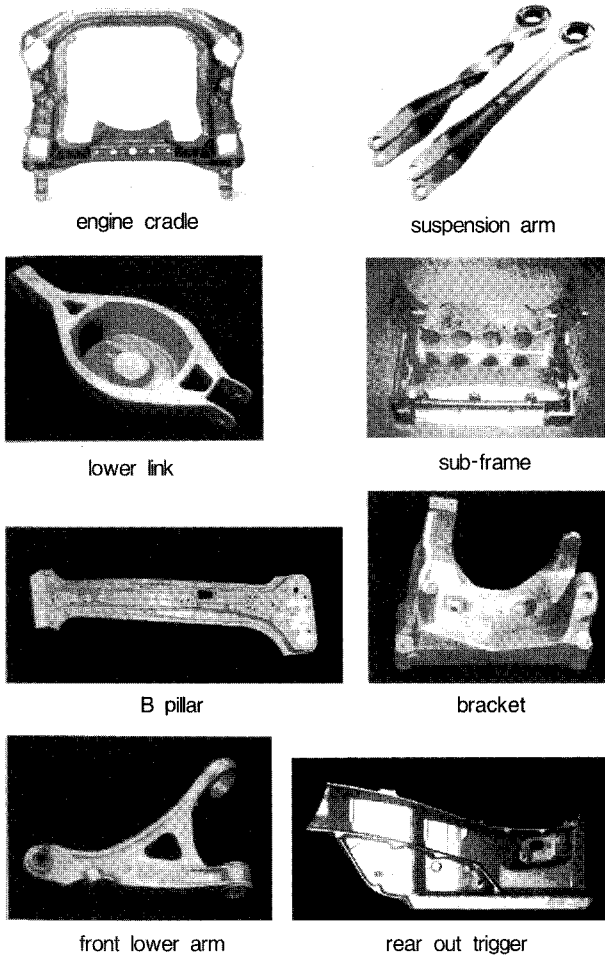


그림 2. 알루미늄합금 다이캐스팅의 새로운 제품에

이들의 신제품을 지탱하는 다이캐스팅 기술의 키워드를 들면 저속(충류), 진공(고진공), 세미솔리드(반응용·반응고), 고속사출(초고속) 등이 있다. 어느 것도 기포 결함의 대응을 중심으로 생각한 것으로 충류충전, 진공은 주로 블로우홀의 저감, 세미솔리드는 주로 수축결함의 저감이다.

3. 신뢰성 향상 · 고품질화의 대응 기술

다이캐스팅의 신뢰성·품질을 저해하는 요인은 내부결함과 외부결함으로 대별할 수 있다. 주조수축 및 이상조직 등의 내부결함은 주조 후의 육안검사로는 판별할 수 없기 때문에 주의를 요한다.

주조수축에는 주로 응고수축에 기인한 수축결함과 공기 및 윤활제·이형제 등의 분해가스 등에 기인하는 블로우홀이 있다. 표 2에 각각의 주조수축 결함에 대응하는 기술의 예를 나타낸다.

이들의 기술 중에서 주요한 것에 대해서 다음에 간단히 소개한다.

주조결함이 적은 고품질 다이캐스팅 주조에의 시도는 오래전부터 있어왔다. 그 중에서도 1996년에 GM에서 발표된 Acurad 법은 당시의 다이캐스팅법에 비하여 획기적인 것이었다. 그 구

표 2. 주조결함에 대응하는 기술

대응기술	보유기술	참고문헌
저속충전 다이캐스팅	Acurad 법	1)
	스퀴즈캐스팅	2)
	충류충전다이캐스팅법	3)
	중형저속충전다이캐스팅법	4)
	NI법	5)
	DP법	6)
국부가압법	스퀴즈병용다이캐스팅법	7)
	런너가압법	8)
	가압핀피드백제어법	9)
진공다이캐스팅법	매스벤트(칠벤트)법	10)
	GF법	
	Vacural법	
	MFT법(High Q-Cast법)	
	NICS법	
	HIVAC-V법	
분위기다이캐스팅법	CF법	15)
	PF법	16)
반응고반응용 다이캐스팅법	척소캐스팅	17),18),19)
	레오캐스팅	20),21)

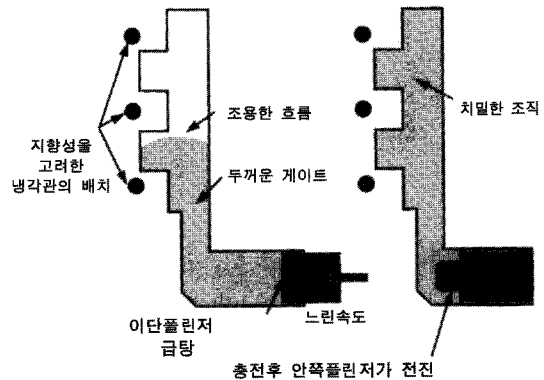


그림 3. Acurad법의 원리도

성요소 기술은 그림 3에 나타난 바와 같이 두꺼운 게이트와 낮은 사출속도에서 충류충전을 시도하여 혼입되는 수축결함을 없애는 법과, 치밀한 금형온도 제어에 의한 지향성 응고의 실현과 인너플런저에 의한 압탕 효과에 의하여 수축결함을 없애는 것으로, 치밀하고 더구나 용접가능한 다이캐스팅을 얻을 수 있다. 현재에는 장치상의 트리블 및 박육의 제품을 만들 수 없다는 등의 이유로 거의 채용되고 있지 않다. 그러나 그 기본적인 생각은 다음에 이야기하는 것 같은 저속충전하는 다이캐스팅법의 원리에 이용되고 있다. 저속에서 용탕을 캐비티 내에 충전한 후에 큰 가압력으로 수축결함의 발생을 억제하는 방법으로는 스퀴즈 캐스팅법과 충류다이캐스팅법 등이 있다.

스퀴즈캐스팅법은 그림 4에 나타난 바와 같이 경사진 중형의 사출슬리브 내로 용탕을 주탕한 후에 슬리브를 금형부에 연결하여 두꺼운 게이트로부터 용탕을 조용하게 금형 캐비티 내에 충전하는 방법이다. 50~110 MPa 고압력으로 가압하여 수

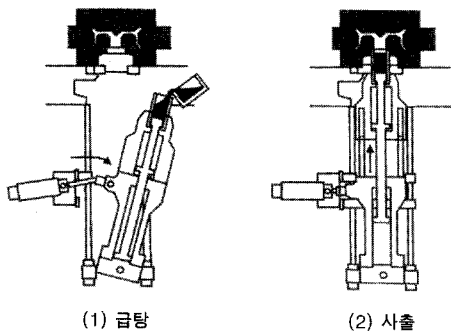


그림 4. 경전식 스퀴즈캐스팅법

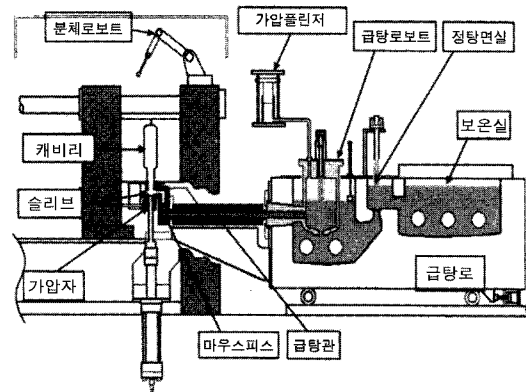


그림 6. NI법

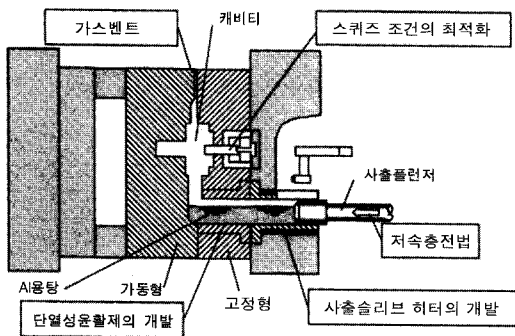


그림 5. 횡형저속충전 다이캐스팅법

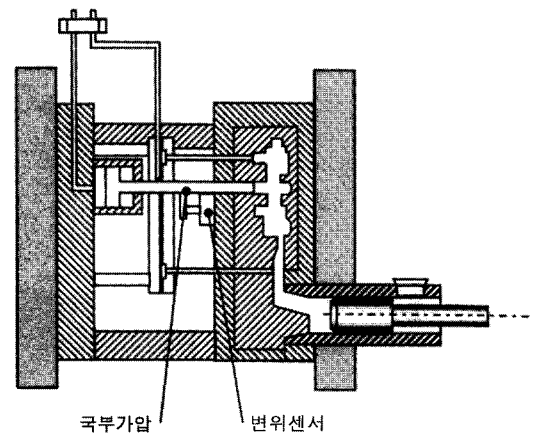


그림 7. 스퀴즈병용다이캐스팅법

축결함이 적고 미세한 응고조직을 가지는 주물을 얻을 수 있다. 또한 가스의 함유량도 1 ml/100 Al 이하로 적으므로 T6 열처리와 용접이 가능하다. 횡형의 다이캐스팅 머신을 이용해서 저속으로 용탕을 충전하는 방법에는 종류충전다이캐스팅법과 그림 5에 나타낸 바와 같은 횡형저속충전 다이캐스팅법 등이 있다. 스퀴즈 캐스팅법과 같이 수축결함, 블로우홀이 대폭 줄고, 고강도로 인성이 높은 다이캐스팅을 얻을 수가 있다. 다만 종형의 다이캐스팅 머신에 비교해서 슬리브 충전률이 낮고, 파단 칩층이 발생하기 쉬우므로 사출슬리브의 보온 등의 공리가 필요하다.

최근 전자펌프 및 에어가압에 의하여 직접 금형캐비티 내로 용탕을 충전하고 플런저 또는 가압자에 의하여 가압하는 NI법(New Injection Die Casting Process) 및 DP법(Direct Pouring Cast Process)이 고안되어 실용화되고 있다. 그림 6에 나타내는 NI법은 아레스티가 발명한 것으로 런너 및 캐비티 표면에 분체이형체를 도포하여 충전과정 중에서의 용탕의 냉각을 방지함으로써 파단칩층의 발생이 없고, 또한 종류로 금형캐비티 내로 용탕을 충전하므로 공기의 혼입이 적어서 기계적 성질이 우수한 주물의 생산이 가능해진다.

게이트 두께에 비하여 두께가 두꺼운 부위가 있는 제품을 다이캐스팅한 경우에 제품부보다 먼저 게이트부가 응고하여 플런저로부터 압탕이 불충분하게 되어 수축결함을 발생하는 일이 있다. 이것을 방지하는 방법으로써 국부가압법이 있고 대표적인 예로써 그림 7에 덴소(電裝)가 개발한 스퀴즈병용 다이캐스팅법을 나타낸다. 이 방법은 용탕을 고속충전하고나서 소정의 시간경과 후에 가압편을 전진시켜서 수축결함의 발생을 억제하는

것으로 기밀부품의 생산에 유효하다. 또한 제품부가 아닌 런너 부를 직접 가압하는 방법도 제안되고 있다. 도요다 자동차에서는 국부가압편의 전진에 따라서 발생하는 반력을 계측하면서 가압편의 제어를 행하여 최적의 가압효과를 얻을 수 있는 시스템을 개발하였다. 최근 금형캐비티 내의 진공도를 10 kPa 이하로 하는 진공다이캐스팅법(종래의 진공다이캐스팅법과 구별하여 고진공 다이캐스팅법이라고 부르는 경우도 있다.)가 주목되고 있다. 매스벤트법(칠벤트법), GF법 등과 같은 종래의 진공다이캐스팅법의 진공도는 20~50 kPa 정도이고, 제품 내의 가스량은 5~20 ml/100 g Al 정도로 T6 열처리와 용접 등이 곤란하였다. 그러나 최근에 외서는 금형 합평면 압출편 클리어 런스, 플런저 팁 등의 썬 방법 및 금탕 방법을 개선한 진공다이캐스팅 법이 개발·도입되기 시작하였다. 그 대표적인 예로써 Vacural법을 그림 8에 나타낸다. Vacural 법은 Muller Weingarten사와 Vaw사가 공동 개발한 공법이다. 이 공법의 특징은 사출슬리브와 모온로의 용탕이 썬선 파이프에 연결되어 있고 캐비티 내 및 슬리브 내를 진공으로 하므로 슬리브 내로 용탕을 빨아올리기 때문에 장시간의 진공 흡인이 가능하고 2 kPa 이상의 고진공도가 얻어진다. 제품내의 가스량은 1~3 ml/100 g Al으로 용접 및 T6 처리가 가능하다. Vacural 법은 Daimler Chrysler사의 엔진 크래이들 및 서브 프레임, S-Class Coupe의 필라, Pourscher 911 Coupe의 서스펜션 멤버 등에

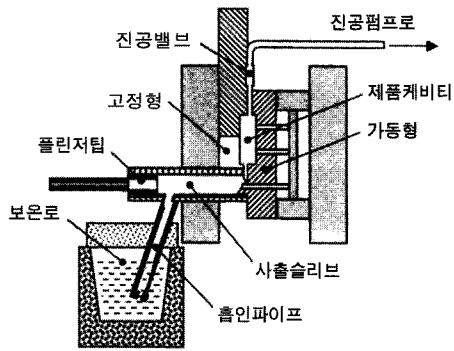


그림 8. Vacural법[11]

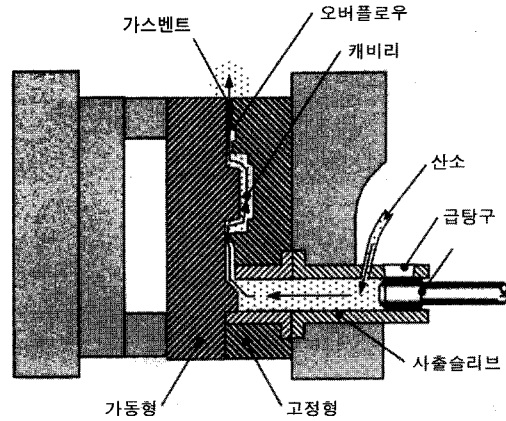


그림 9. PF 다이캐스팅법

채용되는 등 중요 보안 부품의 다이캐스팅화에 적용되고 있다. 그림 2의 로어링크는 Nissan자동차가 Vacural 법을 기본으로 다양한 기법을 덧붙여서 개발한 NICS(Nissan Innovative Casting System) 이 부품은 박육품(3~5 mm)으로 고내력·고인성·균열 없는 소성변형 등이 요구되는 바퀴 주변 부품이다. 히다찌 금속에서는 닛산자동차와 동일하게 Vacural 법을 기본으로 하여 HIVAC-V법을 개발하여 스노우모빌의 프레임 부품을 생산하고 있다.

Vacural법과 같이 MFT(Minimum Fill Time Process)법도 주목되는 진공다이캐스팅법의 하나이다. MFT법은 Alcan-BDW사에서 개발한 공법으로 급탕은 Vacural 법과 다르게 사출슬리브 급탕부에서 행한다. 단시간에 충전 완료하기 때문에 멀티런너방식을 채용해서 게이트 단면적을 크게 하는 것을 특징으로 하고 있다. 그림 2의 B필러는 MFT법으로 생산되어 Audi A2에 채용되고 있다. 최근에는 재료기술·열처리기술·이형제 기술 등을 조합하여 High Q-Cast법으로 전개되고 있다.

야마하발동기에서는 진공다이캐스팅법과 급탕온도 제어기술·주입속도제어기술 조합하여 열처리·용접이 가능한 CF법(Control Filling Process)을 개발하여 대형이륜자동차의 프레임 생산에 적용하고 있다.

그림 9에 PF다이캐스팅법(Pore Free Die Casting)의 원리를 나타낸다. 동 방법은 무공성 다이캐스팅 및 산소분위기 다이캐스팅법이라고 불리기도 한다. PF다이캐스팅법은 사출슬리브 내, 런너, 급탕캐비티 내 공기를 활성가스(주로 산소)로 치환하고 더욱이 알루미늄합금 용탕을 핀게이트로부터 고속으로 사출함에 의하여 알루미늄 합금과 산소가 반응하여 고체의 산화물을 형성하여 순간적으로 진공상태로 된다. 그 결과 블로우홀 등의 가스결함을 대폭 감소시킬 수가 있으므로 T6 열처리 및 용접이 가능해진다. 다만 미반응한 산소가 잔류하는 경우가 있으므로 배기 방안에는 주의하여야 한다.

1970년대에 미국MIT의 MC Flemings 등은 초정을 입상화 시킴에 의해서 고액공존상태에서 용의하게 주조가 가능한 레오캐스팅 법, 칩소 캐스팅 법을 제안하였다. 레오캐스팅법은 합금을 액체 상태에서부터 교반하여 냉각하여 초정을 입상으로 성장시켜서 소정의 고상율에 도달하는 시점에서 성형하는 방법으로 반응고 주조법이라고 불리기도 한다. 한편 칩소캐스팅법은 합금을 녹인 후에 교반하면서 고액공존상태까지 냉각하고 나서 일

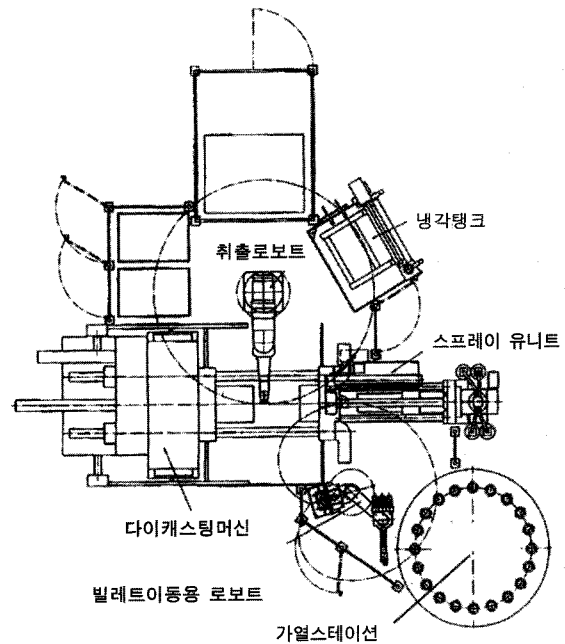


그림 10. 반응용다이캐스팅머신

단 응고시켜서 빌렛을 제작하고, 주조시에 다시 빌렛을 가열하여 고액공존상태로 하고 나서 성형하는 방법으로 반응고 주조법이라고 불리기도 한다. 1993년에 SSM법이 발표되고 실용화되고 나서부터 급속하게 주목을 받게 되었다. 응고수축량이 적어서 수축결함이 발생하기 어렵고, 점성 유동성으로 가스의 혼입이 적고, 잠열량이 적어서 급탕수명이 길다는 등의 특징이 있어서 국내외에서 사용이 증가하는 추세이다. 동경이화공업소(東京理化工業所)에서는 그림 10에 나타낸 바와 같은 칩소캐스팅머신 장치를 이용하여 강도·인성이 필요한 자전거 부품 및 내압성이 요구되는 유압기기 부품을 생산하고 있다.

그러나 칩소캐스팅법은 조적이 잘 조정된 특수한 빌렛트를 채용용하므로 코스트적으로 문제가 있다. 이에 대해서 최근에는 레오캐스팅법을 다이캐스팅에 응용하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 히다찌(日立)금속에서는 그림 11에 나타낸 바와 같은 전자교반장치를 장착한 스퀴즈캐스팅 머신의 사출슬리브 내로

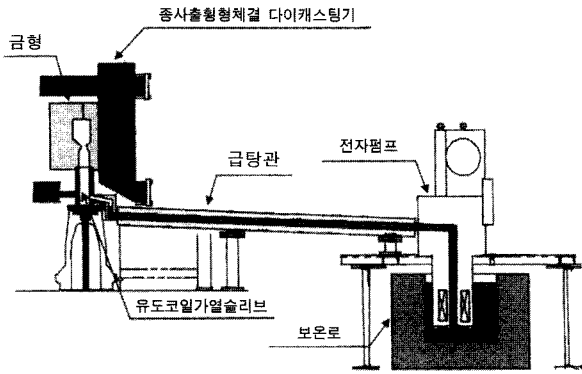


그림 11. 반응고다이캐스팅법

용탕을 공급하여, 슬리브 내에서 입상의 조정을 생성한 후에 사출 충전하는 방법을 개발하였다. 그림 2에 나타난 바와 같은 암(arm) 부품을 주조하고 있다. 또한 우베홍산에서는 저온의 용탕을 일단 슬러리 제조 용기에 주탕하여 소정량의 고상을 정출시킨 후에 스퀴즈 머신의 사출슬리브에 고액공존상태의 슬러리를 주입하여 사출충전하는 방법을 개발하였다.

4. 박육화에의 대응 기술

다이캐스팅의 박육화를 진행하는데 저해하는 요인은 탕흐름성·충전성에 기인하는 외부결함이 있고, 주로 결함으로서는 탕회불량, 탕주름, 탕경 등이 있다. 그 원인으로써는 주탕으로부터 캐비티 충전과정에 있어서 용탕온도의 저하, 가스빠기가 불충분하여 캐비티 내에서 발생하는 배압 및 주조기 자체의 사출력이 부족한 경우 등을 들 수 있다. 이들을 개선하기 위하여 단열개의 윤활제와 세라믹 슬리브 사용, 고체윤활제의 이형제의 사용, 대량 가스빠기 밸브 사용 등을 대응하고 있다.

최근 주목되고 있는 기술에는 고속사출다이캐스팅법이 있다. 통상의 다이캐스팅머신에서는 고속사출속도가 2~3 m/s임에 대하여 공타에서 10 m/s 정도의 고속으로 사출가능한 다이캐스팅머신으로, 박육·복잡 다이캐스팅의 외관품질을 높이는 데 적합한 주조법이다. 이 주조법에서는 충전시간을 현저하게 단축시킬 수가 있고, (주)프로그레스(Progress)에서는 그림 10에 나타난 바와 같은 두께 6 mm의 노트북 PC 케이스를 알루미늄 합금으로 다이캐스팅화 하고 있다. 또한 동사에서는 초소형 CF 타입의 하드디스크로 일반두께 0.48 mm, 최소 두께 0.25 mm 제품도 실용화하고 있다.

산키(회사명임)에서는 아연합금과 마그네슘합금으로 일반적으로 사용되고 있는 핫챔버식 다이캐스팅을 알루미늄다이캐스팅으로 적용하였다. 그림 13에 나타난 바와 같은 노즐과 사출실린더의 분리 및 이중 세라믹 구조의 채용이라는 독자 기술의 개발에 의하여 과제를 해결하여 실용화에 성공하였다. 개발된 형체력 147 kN~490 kN 의 알루미늄용 핫챔버형 다이캐스팅 머신의 특징은 수시 노즐 가까이에 용탕의 탕면이 있으므로 용탕 온도의 저하가 적어서 박육품을 다이캐스팅과 고품질 다이캐스팅 생산에 적합하다. 그림 14에 동 방법으로 시작한 히트싱크의 예를 나타낸다.

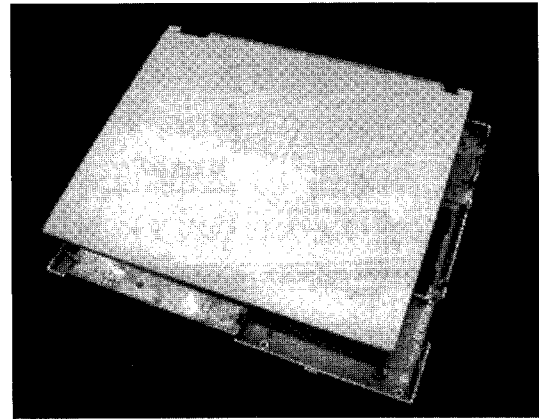


그림 12. 두께 0.6 mm의 Al 합금 다이캐스팅제 노트북 P/C의 케이스 ((주)프로그레스 제공)

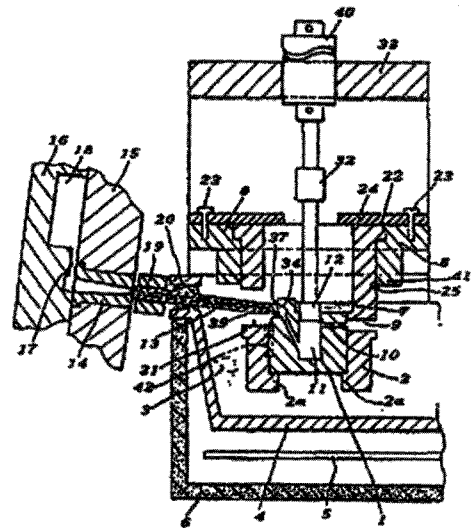


그림 13. Al용 핫챔버기

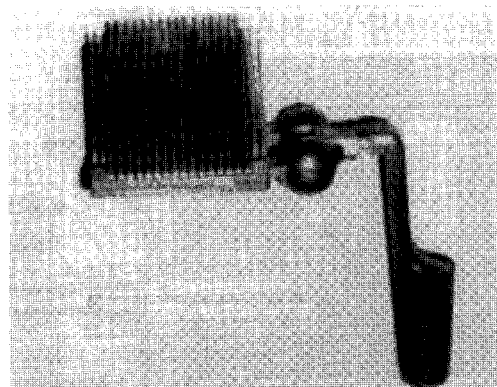


그림 14. Al용 핫챔버기에서 시작한 히트싱크

5. 신합금재료의 적용

알루미늄 합금 다이캐스팅은 JIS 109H 5302:2000에 14종

류가 규정되어 있다. 최근의 일본다이캐스팅 협회의 조사에서는 다이캐스팅 메이커 146사의 알루미늄 다이캐스팅 합금 생산량(약 46만톤)의 약 94%가 ADC12이다.(그림 15) ADC12는 합동 실루민 합금으로 Al-Si 공정에 가까운 조성을 기본으로 Cu가 1.5~3.5mass% 첨가된 합금으로 주조성과 기계적 성질이 우수한 벨런스가 있는 재료이다.

그 외에 특수용도로써 내식성이 우수한 ADC5, ADC6과 같은 Al-Mg 계의 합금과 내마모성이 우수한 과공정 Al-Si 합금인 ADC 14 합금이 있다. 앞에서 이야기 한 특수 다이캐스팅 법은 T6처리가 가능하나, 열처리를 고려한 다이캐스팅 합금이 적어서 주물용 합금 및 ADC10, ADC12 등을 열처리 하는 경우가 많다. 구미에서는 새로운 용도 및 프로세스에 대응한 합금재료가 개발·실용화되고 있다. 그림 2에 나타난 엔진 크레이들, 서스펜션 압 등은 Rheinfelden사가 개발한 Al-Si-Mg 계의 Silifont-36 합금이 이용되고 있다. 이 합금은 인성을 확보하기 위하여 Fe를 0.5 mass% 이하로 억제하고, Mn을 0.5~0.8mass%로 하여 소착, 용손 방지를 위한 합금이다. Sr을 100~200 ppm 첨가하여 공정 Si의 개량처리를 행하고 있다. 또한 그림 2에 나타난 Nissan 자동차의 로어링크도 Fe 함유량이 적은 특수한 합금을 사용하고 있다.

최근에는 컴퓨터 및 전자기기의 소형화 고속도화가 급속하게 진전되어 컴퓨터 케이스 및 히트싱크의 방열특성의 향상 요구가 높아지고 있다. 복잡한 형상을 한 히트싱크의 제조는 다이캐스팅이 적합하고, 고열전도의 다이캐스팅의 재료의 개발이 필요하게 되어 왔다. 대기(大紀)알루미늄공업소에서는 Al-Si-Fe 계의 고열전도 다이캐스팅용 알루미늄 합금을 개발 실용화하였다. 다이캐스팅한 동합금 재료를 400°C에서 소둔함에 의해 190 W/(m·K) 이상의 높은 열전도율이 얻어진다. 이들 신재료는 전자기기 관계뿐만 아니라 EV등의 차세대 자동차 부품용으로 기대할 수도 있다고 생각된다.

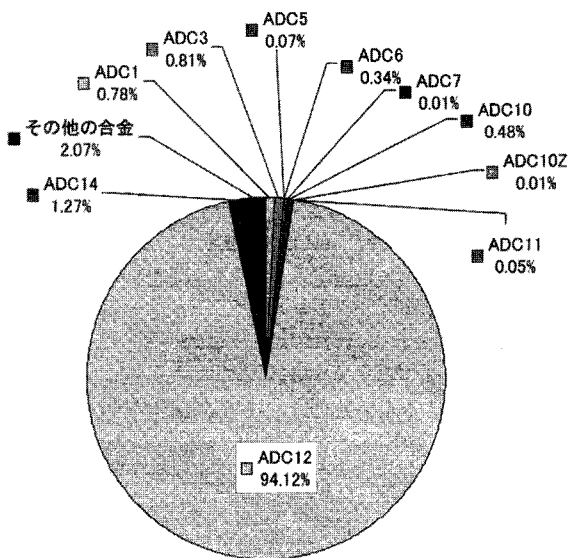


그림 15. 다이캐스팅의 합금별 생산비율(2001년)

6. 결 언

이상 이야기한 바와 같이 다이캐스팅 신뢰성 향상 고품질·고기능 다이캐스팅을 향한 기술개발은 착실하게 진전되어 각종 새로운 기술, 프로세스가 개발되어 왔다. 이들에 의하여 새로운 다이캐스팅의 용도가 개척되고 생산량의 향상이 기대된다. 그러나 예를 들면 소착결함 및 균열결함과 같이 해결이 어려운 문제도 아직 산적되어 있다. 또한 프로세스의 진전에 대응한 합금재료의 개량·개발이 필요함에도 불구하고, 일본에서의 알루미늄합금 다이캐스팅은 ADC12에 집중되어 있고 재료의 다양화가 늦어지고 있다. 금후 다이캐스팅의 용도를 확대하여 국제 경쟁력을 높여가기 위해서는 이들의 제 문제에 대해서 산학관이 연계하여 해결을 꾀할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Maclaren : 會報グイカスト29(1967) 9.
- [2] 安達充 : 鑄造工學 71(1999) 131.
- [3] 吉田実 : 輕合金鑄物・グイカストにおける最近の進歩講座テキスト(素形材センター)(1987) 51.
- [4] 竹久文隆 : 深谷絃一, 横井光義 : 鑄物 66(1994) 506.
- [5] 赤瀬誠, 生井臺, 大出克洋, 李紹敏, 蘇田峰隆, 宮地英俊, スワボン K. ボシュ : 日本グイカスト會議論文集(2002) 215.
- [6] 仁井貴志, 上中勳, 中島, 石田晴久 : 日本グイカスト會議論文集(1998) 135.
- [7] 杉浦恒之, 泉鈴木治男 : 輕金屬 36(1986) 105.
- [8] 横井光義, 藤井邦夫, 西川浩司 : 1996年日本グイカスト會議論文集 JD 96-29(1996) 197.
- [9] 唐木滿尋, 野崎美紀也, 乾滿, 二村建人 : 1996日本グイカスト會議論文集 JD 96-28(1996) 191.
- [10] 曾瀬護 : 高品質アルミニウムグイカスト合金シンポジウム(輕金屬協會)(1985) 17.
- [11] H. Woithe and W. Schwab : Aluminium 60(1984) 790.
- [12] H. Thurner : Trans. 11th International Die Casting Congress(1981) Paper No. G-T81-144.
- [13] 田代政巳, 神戸洋史, 淺井宏一, 工藤勝弘 : 2002年日本グイカスト會議論文集 JD 02-37(2002) 235.
- [14] 金内良夫, 今井具哉, 板橋一彦, 小畑克洋, 福田能隆, 佐藤弘康, 小澤賢久, 中野英治 : 2002年日本グイカスト會議論文集 JD 02-27(2002) 167.
- [15] 山縣裕 : 輕金屬 53(2003) 309.
- [16] I. Miki and T. Kido : Die Casting Engineer, March-April 22(1974).
- [17] M. C. Flemings, R. G. Riek and P. K. Young : Materials Science and Engineers 25(1976) 103.
- [18] K. P. Young : Proceedings of 3rd int. cnf. on semi-solid alloys and composites(1994) 155.
- [19] 松野慎也, 宍蘇正央, 菊池政男 : 1996年日本グイカスト會議論文集 JD 96-31(1996) 209.
- [20] 金内良夫, 柴田良一, 今村具哉 : 鑄造工學 74(2002) 9, 595.
- [21] 安達充, 佐藤智, 佐々木寛人, 川崎隆, 原田康則, 明本春生, 坂本達雄 : 1998年日本グイカスト會議論文集 JD 98-19(1998) 123.
- [22] 久保本勳, 久保田正光, 辻眞, 横手應周, 中村輝直 : 1998年日本グイカスト會議論文集 JD 98-20(1998) 129.
- [23] 三木功, 鈴木一雄 : 2000年日本グイカスト會議論文集 JD 00-22(2000) 137.
- [24] 西直美 : 會報グイカスト 119(2004) 62.
- [25] 大成直人, 宮尻聰, 法邑幸雄, 川井清文, 鈴木喬雄 : 2002年日本グイカスト會議論文集 JD 02-15(2002) 89.