- 190 -

논 문

응고 시뮬레이션에 의한 박육 알루미늄 다이캐스팅 금형 방안의 최적화

김영찬* • 최세원 • 조재익 • 정창열 • 강창석

한국생산기술연구원 동력부품지원센터

Optimization of the Thin-walled Aluminum Die Casting Die Design by **Solidification Simulation**

Young-Chan Kim, Se-Weon Choi, Jae-Ik Cho, Chang-Yeol Jeong, and Chang-Seog Kang[™] Automotive Components Center, KITECH, 1110-9, Oryong-Dong, Buk-Gu, Gwangju, 500-480, Korea

Abstract

Thin-walled die casting of aluminum notebook computer housing with less than 1mm thickness was investigated by using computational solidification simulation and actual casting experiment. Three different types of gate design, finger, tangential and split type, were used and the results showed that sound thin-walled die casting was possible with tangential and split type gating design because those gates allowed aluminum melt flowed into the thin-wall cavity uniformly and split type gating system was preferable gating design than tangential type at the point of view of soundness of casting and distortion generated after solidification. Also, solidification simulation agreed well with the actual die-casting and the casting showed no casting defect and distortion.

Key words : Solidification simulation, Thin-wall, Al-Si alloy, Die casting.

(Received June 21, 2008; Accepted July 20, 2008)

1. 서 루

실리콘을 주합금으로 한 알루미늄 합금은 우수한 주조성, 낮 은 밀도, 강도와 같은 기계적·물리적 특성의 구비에도 불구하 고[1,2,3,4], 두께 1 mm 이하의 박육 알루미늄 다이캐스팅 부 품은 제조가 상당히 어려운 것으로 알려졌다. 이러한 어려움 때문에 소재 산업의 영역에서 알루미늄 합금의 적용을 제한되 고 있다.

다이캐스팅 공정은 복잡한 모양의 제품을 단번에 제조할 수 있는 경제적인 주조방법 중의 하나로서 자동차 부품이나 전자 부품 등과 같이 높은 치수 정밀도, 대량 생산에 따른 경쟁력 있는 제조 단가 및 품질의 안정성을 요구하는 산업분야에 있 어 최적의 공법으로 각광받고 있다. 그러나 환경 오염과 자원 고갈 문제로 인해 부품의 경량화 및 작업 환경의 개선이 요구 되고 있고[5], 다이캐스팅 업체에서는 금형 제작 개발기간의 단 축, 주물의 고품질화, 제조 원가의 인하 등을 요구 받고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 산업 현장에서 널리 쓰이고

있는 CAE (Computer Aided Engineering)기술의 적용이 다 이캐스팅 영역으로까지 크게 증가되고 있고, 주조품의 건전성 확보 및 성능향상을 위하여 용탕이 주형 공간 내에서 충전 또 는 금형 내에 응고되는 과정에서 발생하는 제반 물리적 현상을

최근 전기 통신 분야에서도 급속한 IT 발전에 따라 노트북, PC 및 휴대폰 등의 케이스의 박육화(일반적으로 두께 1 mm 이하)가 요구되고 있다[7]. 그러나 다이캐스팅 공정에서 용탕이 캐비티 내에 충전될 때 용탕은 자신보다 낮은 온도의 슬리브. 플런저 팁, 금형 등과 만나면서 급속하게 냉각된다. 특히 1 mm 이하의 박육 성형에서는 그 현상이 심화되어 용탕의 유 동성 확보가 어렵게 되어 미성형이 발생하기 쉽다. 이러한 현 상은 인게이트를 통과하기 전까지 용탕의 온도 저하 제어 방 안, 캐비티 내로 충전되는 과정에서 균일한 충전 거동을 갖는 게이트 시스템, 가스빼기를 용이하게 할 수 있는 오버플로우 및 가스벤트의 설계 등을 통해 제어하여야 한다.

본 연구에서는 두께 1 mm 이하 박육 노트북 컴퓨터 케이스 제작을 위한 금형 방안을 설계를 위해 핑거(Finger), 탄젠셜 (Tangential), 스프릿(Split) 타입의 3가지 게이트 시스템을 적용 하였고, 충전 거동, 응고 거동 등의 결과를 분석하여 결함 및

수치해석을 통하여 예측하기 위한 연구가 주조 및 금형 기술 분 야를 중심으로 활발히 진행되고 있다[6]. 이러한 주조 해석 시 뮬레이션 프로그램을 이용하면 주조 성형 시 충전 거동과 응고 중에 발생하는 결함의 정도나 위치 등이 예측 가능하고, 주물 제작에서 시행착오가 대폭 줄어들어 시간적·경제적 효과를 얻 을 수 있다.

[†]E-mail : kim0chan@hotmail.com

결함 제어 방안을 강구하고 실제 노트북 다이캐스팅 금형에 적용하여 생산된 제품과 응고 시뮬레이션 해석 결과를 비교 검토하여 최적의 금형 방안을 도출하였다.

2. 해석 방법

2.1 주조 해석 시뮬레이션

상용 주조 해석 소프트웨어 중 하나인 MAGMA soft는 다 이캐스팅 공정에서 캐비티 내의 충전 거동, 응고 거동뿐만 아 니라 주조 중 발생하는 잔류 응력에 관한 해석을 동시에 진행 할 수 있다[8]. 알루미늄 노트북 케이스는 상용 3차원 CAD 프로그램을 이용하여 3D solid 모델링을 한 후 STL 파일로 변환하였고, Preprocessor 과정을 통하여 캐스팅, 인게이트, 런 너, 비스켓 등과 냉각 채널 및 금형 등을 설정하였다. 주조 공정에서의 금형 온도 변화를 관찰하기 위해서 가상의 열전대 를 설치하였고, 미세한 용당의 충전 거동을 살펴보기 위해서 입자 추적자(particle tracer)를 설정하였다. 또한 요소 분할은 FVM 방식에 의해 수직 좌표 분할 기법을 이용하였고 해석에 이용된 전체 요소 분할 수는 게이트 형상에 따라 각각 30,000,000개와 36,000,000개였다.

2.2 해석 조건

본 시뮬레이션에서 사용한 해석 조건은 Table 1과 같으며, 캐스팅 합금의 재질은 ALDC12, 초기 용탕 주입온도는 670°C, 주입된 용탕의 양은 약 250 cm³, 슬리브 충전율은 27% 이하 로 설정하였다. 금형은 SKD61로서 초기 예열 온도는 150°C 로 설정하였고, 냉각 채널은 박육 제품의 특성상 사용하지 않 았다. 또한 해석 시 금형의 열적 안정을 고려하기 위해 4 사 이클의 응고해석을 우선적으로 행한 후 5 사이클에서의 충전 및 응고 해석 결과를 분석하였다. 주조 해석 시 이종 재질 간 의 열전달 해석은 매우 중요하다. 응고 과정 중 열전달에 있 어 이종 재질 또는 분리된 재질간에는 서로 다른 열전도도에 의한 열 저항치와 불완전한 접촉에 의한 계면접촉저항(thermal

| Table 1. Conditions for solidification simulation | ation. |
|---|--------|
|---|--------|

| Classification | | Condition | |
|-----------------------|-----------------------|-----------|--|
| Material | Cavity | ALDC 12 | |
| | Fixed Die | SKD 61 | |
| | Moving Die | SKD 61 | |
| | Cooling Channel | None | |
| Initial | Melt | 670°C | |
| Temperature | Die | 150°C | |
| Machine Type | Buhler Evolution 53 D | | |
| Casting Pressure | 60 MPa | | |
| Tip Diameter | Φ 70 | | |
| Length of Shot Sleeve | 475 mm | | |
| | FT1, FT2 | | |
| Gating System Design | TT1, TT2 | | |
| | ST1, S7 | Γ2 | |

contract resistance)이 있으며, 이는 압력, 온도, 표면 상태에 의존하여 변하는 값이다[9]. 특히 용탕과 금형 간의 열전달계수 는 주조해석에 있어 중요한 인자로, 본 해석에서는 온도에 의 존하는 값으로 액상선 이상에서는 7000 W/m²k, 고상선 이하에 서는 3000W/m²k을 사용하였다.

다이캐스팅 머신은 530 ton 콜드 챔버 다이캐스팅 머신으로, 시출 플런저 직경은 Φ70 mm, 사출 슬리브 길이는 475 mm로 조건을 설정하였고, 플런저 시출 조건은 0.35 m/s의 저속 시출 속도와 2.2 m/s, 3.2 m/s의 고속사출 속도로 설정하였다. 주조 압력은 60 MPa로 설정하였다. 공정 시간은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 주물과 금형이 접촉하는 시간을 8초, 형개 후 외부 경계와 만나는 시간을 7초, 다음 사이클을 위해 준비하는 시간 을 3초, 총 1 사이클 시간은 18초로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 게이트 시스템에 대한 충전 거동

박육 알루미늄 노트북 케이스 성형을 위한 최적의 게이트 시스템을 선정하기 위해 3가지의 게이트 시스템, 핑거 타입 (FT), 탄젠셜 타입(TT), 스프릿 타입(ST)에 따른 용탕의 충전 거동 및 충전 시의 온도 분포에 관하여 시뮬레이션을 실시하 였다. 우선 핑거 타입은 손가락 형상과 같은 게이트 시스템으 로 충전 시 용탕의 온도 유지 및 분배에 용이한 게이트로 90°와 120°의 입사각을 갖는 게이트 형상에 대한 충전 거동을 시뮬레이션 분석하였고, 그 결과 Fig. 2에 나타낸 것과 같다. FT1, FT2 모두 용탕이 초기에 인게이트를 통과하여 얇은 캐 비티 벽을 통과하면서 빠르게 냉각되어 액상선 이하의 온도를 가진다. 그 후 중심부에서 빠른 속도의 용탕은 비산되며 캐비 티 내에서 균일한 충전 거동을 이루지 못하였고 중심부 지배 적인 충전 거동을 보였다. 또 인게이트 통과 이후 게이트 간 의 간섭이 발생하였다. 이는 각 보조 게이트에서 용탕 도달 시간이 균일하지 못하므로 선행 용탕의 냉각이 빠르게 진행되 어 용탕이 응고되는 현상이 발생하기 때문에 캐비티 내의 충



Fig. 1. Cycle time of die casting process.



Fig. 2. Temperature distribution for FT gating system; (a) FT 1, (b) FT 2.



Fig. 3. Temperature distribution for TT gating system; (a) TT1, (b) TT2.

전을 완전히 이루지 못하였다. 이 결과로 볼 때 FT 게이트 시스템은 용당의 인게이트 도달 시간을 균일하게 조절하기가 상당히 어려운 방안으로 균일한 흐름이 요구되는 제품의 성형 보다는 중심부가 두껍고, 사이드 면이 보조 역할을 하는 제품 의 성형에 적합할 것으로 판단된다.

한편 용탕이 인게이트를 통과하여 캐비티를 충전하는 동안 방향성과 연속성을 갖는 용탕 거동을 확보할 수 있고, 각 게 이트 간의 간섭이 없는 탄젠셜 게이트 시스템에서는 Fig. 3에 서와 같이 주조면 전체에 걸친 인게이트의 형상을 갖는 TT1 과 주조면의 85%의 길이를 갖는 TT2에 대한 충전 거동을 시 뮬레이션 분석을 하였다. TT1의 경우 용탕이 캐비티의 얇은 벽을 지나면서 급격히 냉각되어 중심부에서 액상선 이하의 온 도 영역이 존재하나, FT 게이트와는 달리 용탕이 비산되지 않 았다. 또, 양끝과 중심부에서의 용탕 속도가 현저히 빨라 용탕 은 캐비티를 채우기 전에 먼저 오버플로우 영역에 도달하였다. 이러한 충전 거동은 오버플로우의 위치 변경을 통하여 초기 냉각된 용탕의 제어가 가능할 것으로 판단된다. 한편 TT2의 경우 인게이트 부근에 용탕이 주입된 이후 TT1에 비해 균일 한 용탕의 온도 분포를 나타내었다. 전체적으로 연속적인 충전 거동을 보이나, 최종 충전부에서 TT1과 마찬가지로 용탕 온도 저하 영역이 발생하였다. 특히 인게이트의 길이가 짧으므로 일 부 영역에서 용탕의 충전이 원활하지 못하고, 용탕이 고립되는 현상이 발생하였다. 용탕이 고립되는 현상은 지속적으로 유입되 는 용탕과 증압에 의해 사라지나, 그 과정에서 발생된 백 플 로우(back flow)에 의해 미충전 영역이 충전되므로 주조결함이 발생될 것으로 예상된다. TT 게이트 시스템에서는 인게이트의 길이를 최대한 확장하여 용탕의 연속적인 거동을 유지함과 동 시에 용탕의 고립을 방지할 수 있는 TT1의 경우가 TT2에 비



Fig. 4. Temperature distribution for ST gating system; (a) ST1, (b) ST2.

해 박육 케이스 성형에 더 적합할 것으로 판단된다.

스프릿 타입 게이트 시스템은 용탕의 분배 조절이 가능하고, 런너의 수축에 의한 변형을 최소화할 수 있으며 용탕의 인게 이트 도달 시간을 용이하게 조절할 수 있는 장점을 가진다. 이 게이트 시스템에서는 4개의 보조 런너를 갖는 ST1과 6개 의 보조 런너를 갖는 ST2에 대해 충전 거동을 살펴보았다. Fig. 4의 시뮬레이션 결과와 같이 ST1의 경우 인게이트 간의 간격이 커서 얇은 캐비티 내로 유입된 용탕의 온도 하강이 발 생하여 미충전이 발생하는 것으로 나타났다. 충전이 진행됨에 따라 용탕은 하나로 합쳐지지만, 캐비티 내에서 온도가 저하된 용탕은 제품 내에 탕경을 포함한 주조 결함을 발생시킬 가능 성이 크다. ST2는 보조 런너의 인게이트 간 간격을 최소화하 므로 용탕 온도 저하를 최소화하였고. 연속적인 충전 거동을 보였다. 충전이 진행됨에 따라 중심부 부근에서 온도가 저하된 일부 용탕은 지속적으로 주입되는 용탕에 의해 액상선 이상의 온도로 회복되었으며, 초기 냉각된 용탕은 제품의 중심부에 모 여 있으므로 오버플로우를 이용하여 제거할 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 ST2가 ST1보다 박육 성형성이 더 우수한 것으로 판단된다.

3.2 게이트 형상에 따른 충전 및 응고 해석

3.1에서 살펴본 6가지 게이트 방안의 충전 거동을 비교·분 석한 결과 박육 알루미늄 케이스 성형에 적합한 형태는 주조 면 전체에 걸친 인게이트의 형상을 갖는 TT1과 6개의 보조 런너를 갖는 ST2으로 판단되며 이 두 게이트 형상에 따른 속 도 분포 및 응고 거동을 살펴보았다. Fig. 5에 나타낸 것과 같이 두 게이트 방안의 속도분포는 충전 영역에 따라 조금 차 이가 나타나지만 대부분 50~60 m/s 사이에 속도를 나타내고 있다. TT1는 인게이트의 일부 영역과 오버플로우 부근에서 60 m/s의 속도를 나타내며, 캐비티에서 중심부가 양 끝단에 비 해 낮은 속도 분포를 보였다. 한편 ST2는 인게이트 영역 이후



Fig. 5. Velocity distribution for TT1 and ST2 gating system; (a) TT1, (b) ST2.

캐비티와 오버플로우에서 전체적으로 60 m/s의 속도 분포를 나 타내었다. 박육 다이캐스팅의 경우 일반 다이캐스팅과는 달리 얇은 캐비티 때문에 작은 면적의 인게이트를 가지므로 고속 시출구간에서는 60 m/s 이상의 속도를 나타낸다. 충전속도가 20 m/s 이하로 떨어질 경우 인게이트에서 충분한 분사효과를 얻지 못하므로 충전은 벌크 형태로 이루어지게 되며 표면 장 력 및 점도의 영향에 의해 주조 결함이 발생할 가능성이 커진 다. 또 인게이트 속도가 60 m/s를 넘을 경우, 금형을 필요 이 상으로 가열시키고, 금형의 마모를 증가시키므로 금형 표면에 소착이 발생할 가능성이 존재한다.

용탕의 응고 거동을 관찰함으로 최종 응고영역에서 발생할 수 있는 핫스팟(hot spot)을 예측하였고 이러한 분석을 통해 제품 내 고립되어 응고되는 부분을 예측할 수 있다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 두 게이트 시스템 모두 캐비티 내의 충전 후 0.9초가 지난 시점에서는 매우 고른 온도 분포를 가지며, 사출 후 1.3초에서도 제품 내 핫스팟이 존재하지 않는다. 이러 한 균등한 응고 양상은 제품 내에 수축에 의해 형성된 결함이 존재할 가능성이 적음을 나타낸다. TTI의 경우 인게이트 응고 시간은 약 0.8초이며 이때까지 제품은 전체적으로 증압에 의한 압력을 받게 된다. ST2의 경우 제품이 완전히 응고될 때까지 인게이트를 통한 증압이 계속 유지되므로 TTI보다 높은 품질 의 표면 품질을 나타낼 것으로 기대된다.

시뮬레이션 결과 1 mm 이하의 박육 성형에 적용 가능한 TT1 및 ST2 형태를 갖는 금형을 각각 제작하였고, 사용 다이 캐스팅 알루미늄 합금인 ALDC12를 이용하여 실제 제품을 제 조하여 응고 시뮬레이션 결과와 비교하였다(Fig. 7). 실제 제작 된 TT1 게이트 시스템에 의해 제조된 노트북 컴퓨터 케이스 는 표면에 탕주름과 함께 미충전 구간이 존재하며, 백 프레셔 (back pressure)에 의해 형성된 영역에서는 거친 표면을 형성 하였다. 시뮬레이션 결과와 같이 초기 냉각된 용탕은 응고 시 결함을 형성하였고, 오버플로우가 존재하는 영역 부근에서 스월 (swirl) 및 에어 포켓(air pocket)에 의해 형성된 결함이 관찰 되었다. ST2 게이트에는 표면 결함이나 크랙이 발생하지 않은



Fig. 6. Solidification behavior of TT1 and ST2 gating system; (a) TT1, (b) ST2.



(a) (b)

Fig. 7. Actual die casting; (a) TT1, (b) ST2.

건전한 케이스가 얻어진 반면 TT 게이트 시스템은 많은 주조 조건의 변화에도 불구하고 오버플로우 성형을 이루지 못한 미 충전과 많은 주조 결함이 발생하였다. 응고 시뮬레이션 결과와 실제 다이캐스팅 주조 결과는 충전 양상 및 결함 발생 위치에 서 거의 일치하였다.

4.결 론

응고 시뮬레이션을 이용하여 1 mm 이하 박육 알루미늄 노 트북 케이스에 대한 주조 해석을 실시한 결과 다음과 같은 결 론을 얻었다.

 응고 시뮬레이션을 통하여 게이트 시스템에 대한 주조결 함의 발생 가능성을 확인할 수 있었으며, 이를 바탕으로 최적 의 박육 알루미늄 다이캐스팅 금형 방안을 선정할 수 있었다.

2) 박육 알루미늄 다이캐스팅 성형에서는 주조 결함의 발생 을 제어하기 위해 연속적인 용탕의 충전 거동과 용탕의 온도 저하를 최소화하는 게이트 시스템이 필요함을 알 수 있었다.

3) 응고 해석 결과 충전 및 응고 거동에 대한 관점에서 6개 의 런너를 갖는 스피릿 게이트 시스템이 박육 알루미늄 노트 북 케이스 성형에 적합함을 알 수 있었다.

4) 응고 시뮬레이션 결과는 실제 다이캐스팅 주조 공정과 충 전 양상 및 결함 발생 위치는 거의 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- ASM handbook, casting. Metal Park, Ohio: ASM international; 1989. 785-91
- [2] N. Kawagoishi, H. Nisitani, T. Toyohiro, N. Yamamoto and T. Tsuno, "Influence of Microstructures on the Crack Growth Behavior of Small Fatigue Cracks in Squeeze-Cast Aluminium Alloys", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Part A, Vol. 60, No 570, 1994, 358-363
- [3] Lasa L, Ibabe JMR. "Effect of composition and processing route on the wear behaviour of Al-Si alloys", Scr. Mater 2002; 03.01
- [4] Kori SA, Murthy BS, Chakraborthy M. "Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium", Mater Sci Eng 2000;A283;94-104
- [5] Jin-Young Park, Eok Soo Kim and Ik-Min Park, J. of KFS, "Die Casting Process Design of Automobile Gear Housing by Metal Flow and Solidification Simulatuion", Vol. 24, No.6, 2004, 347-355
- [6] Y. Yamamoto, Y. Iwata and M. Nakamura: Imono, "Metal Flow and Solidification Behavior of Aluminum Die Castings", Vol. 60, 1988, 770-776
- [7] Naomi Nishi: "New Development of Aluminum Die Casting Technology" J. of KFS, Vol. 25, No 3, 2005, 109-114
- [8] Jörg C. Sturm, Preben N. Hansen Götz Hartmann, Achim Egner-Walter, "Optimized Development for Castings and Casting Processes-Increase in Value by applying an integrated CAE Chain for the Development of Automotive Magnesium Castings", World Foundry Congress 2002
- [9] D.G.R, Sharma, M. Krishnan, "Simulation of Heat transfer at casting metal-mold interface" AFS Transactions, (1991) 429-438