응력 해석 기법을 이용한 주조 공정에서 발생하는 변형 및 균열 예측

추인호 : 마그마 엔지니어링 코리아

[요약문]

주조품 설계 및 제조에 있어서 기존의 유동 및 응고 해석뿐 아니라 최근에는 응력 해석 기법의 적용이 대두 되고 있다.

특히 자동차 산업에 있어서 부품의 경량화는 필수 불가결한 선택이며, 이는 설계자 및 제조업체에 복잡하고 얇은 알루미늄, 마그네슘 주물품에 대하여, 치수적인 문제와 강성의 문제를 동시에 해결하도록 요구하고 있다.

또한 경제적인 관점에서 긴 금형 수명이 요구되나 열 및 기계적인 피로 균열인 'heat checking' 은 이러한 금형 수명을 저하시키는 가장 흔한 요소이다.

이런 문제를 해결하기 위해 해석 기법을 이용하여 주조 설계 및 공정을 최적화 함으로써 변형의 최소화 및 금형 수명의 최대화를 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 기법을 성공적으로 적용하기 위해서는 주조 공정 해석, 재료 시험, 제품 설계 및 공정 최적화 설계가 통합적으로 이루어져야 한다.

본 고에서는 현재 최신 주조 해석 기법을 이용하여, 주조품 제조 공정에서 발생하는 응력과 관련된 문제들에 대한 수치해석 기법을 살펴보고, 이에 대한 리뷰를 제공하고자 한다.

1. 서 론

일반적으로, 치수 정도 및 강성이 요구되나, 표면적이 넓고 복잡한 형상의 제품들은 압연공정으로 제조 되어 왔다. 하지만 최근 부품 경량화 추세에 발맞추어, 압연 강판 소재의 이러한 부품들을 대체하여, 경합금을 이용한 고압 다이캐스팅 공정으로 제조가 시도되고 있으나, 다이캐스팅 공정으로의 대체는 설계 및 제조 기법에 있어서 높은 기술을 요구한다.

강성의 측면에서, 열처리가 불가능한 알루미늄 합금으로 제조 되던 부품들에 대하여 열처리가 가능한 합금으로 대체가 요구되나, 이러한 합금들은 고온 열간 균열을 야기하기 쉬운 경향이 있다. 또한 열처리 공정은 제조 원가의 상승뿐 아니라 제품의 변형을 야기한다.

변형 문제의 해결은 개별 공정뿐 아니라 각 공정간의 상호작용에 의한 형상의 비틀림 현상에 대한 정확한 이해를 요구한다.

따라서 제조 공정 전반에 대하여 다양한 변수들을 최대한 고려하여 해석을 수행하는 것은 매우 중요하다.

2. 주조품에서 잔류 응력 및 변형의 발생

잔류 응력 및 변형의 발생은 그림 1에 나타낸 간단한 예를 통해 쉽게 이해할 수 있다.

모든 주조품에 있어서, 고온에서 상온으로의 응고 및 냉각 과정은 필연적으로 제품 내 불균일한 온도 분포를 야기한다.

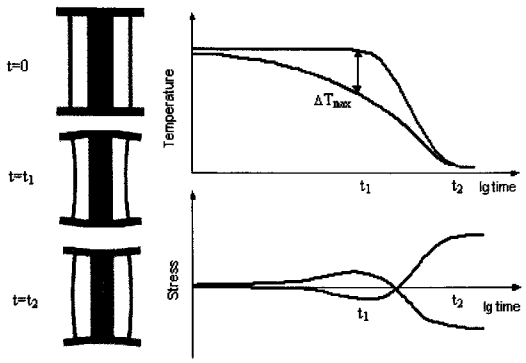

그림 1. 격자형상에서 잔류 응력 및 변형의 발생

그림 1의 예에서 나타낸 바와 같이 얇은 측면 부와 같이 빨리 냉각되는 영역에서는 열 적으로 수축하게 되고, 이에 따라 수축하지 않은 주변에 의해 구속되게 되며, 인장응력이 형성된다.

항복강도가 낮은 고온 영역에서는 열 응력이 소성변형에 의해 어느 정도 감소하게 되며, 냉각속도가 가장 빠른 곳과 가장 느린 곳과의 온도 차이가 가장 클 때 제품 내에 최대 응력 및 최대 소성 변형이 발생하게 된다(그림 1 $t=t_1$). 냉각이 진행됨에 따라, 두 곳의 온도차이는 감소하게 됨으로써 최대로 발생한 응력을 낮출 뿐 아니라, 빠른 냉각 속도를 가지는 측면 박육의 응력 상태를 인장에서 압축 응력 상태로 변화 시킨다. 반대로 느린 냉각속도를 가지는 후육부에서는 초기 압축 응력 상태에서 인장 응력 상태로 변화 된다. 이러한 응력 상태의 변화는 고온에서의 소성 변형에 의한 것이다.

상온으로의 완전한 냉각 후에는 그림 1의 $t=t_2$에 나타낸 바와 같이, 압축 잔류 응력이 박육 부에서 나타나고, 인장 응력은 후육 부에서 나타난다[1].

주조 잔류 응력은 게이트의 절단, 열처리, 가공, 탈사 작업 등 후속 공정에 영향을 받을 수 있다. 즉 잔류된 응력은 절단 또는 기계 가공 공정에 의해 재 분배 될 수 있을 뿐 아니라 가공, 클램핑(Clapping) 또는 열처리에 의하여, 부가적으로 인장 또는 압축 응력이 주조품 내부에 발생할 수 있으며 최악의 경우 주방 상태 또는 기계 가공 시 크랙이 발생할 수도 있다[2].

주조 공정에서 발생하는 잔류응력의 계산을 위해서는, 충진 및 응고 또는 냉각 해석을 통해 주조품과 다이캐스팅 금형 전체에 대하여 공정 시간대 별 온도 분포를 계산하여야 한다. 이 온도 분포를 이용하여 변형률에 대한 증분을 설정하여 각 증분 별 온도 데이터를 이용하여 응력 계산을 수행한다.

따라서 정확한 해석을 수행하기 위해서는 열에 의존하는 온도와 조직, 주조 합금 재료의 기계적 성질뿐 아니라 금형에 의해 야기되는 구속조건에 대한 고려가 필요하다.

3. 열처리 시 발생하는 잔류 응력 및 변형

대부분의 구조용 주조품은 주방상태로서는 요구되는 기계적 성질을 만족 시킬 수 없다. 따라서 보통 고용화 처리, 퀀칭(Quenching), 인공 시효 또는 석출 처리로 구성되는 열처리를 수행하게 된다.

고용화 처리 동안 주조품은 고상선 아래의 특정 온도로 가열되게 된다. 온도가 높아 짐에 따라 재료의 항복 강도는

낮아지게 되고, 소성 변형에 의해 잔류 응력은 줄어들게 된다. 이런 온도에서 주조품은 자체 하중에 의해 변형 될 수 있다. 그 다음 공정인 퀀칭 처리시, 불 균일한 냉각이 발생하여 재료 내에 새로운 잔류 응력을 생성시킨다[3]-[5]. 이러한 응력들은 변형을 더 심하게 야기할 수 있다. 이어지는 시효 공정에서 더 많은 변형을 야기하는 크립과 소성 변형에 의해 잔류 응력은 약 20~30% 감소된다. 따라서 잔류 응력의 감소와 변형은 퀀칭 후의 응력 상태, 시효 온도 및 시효 시간에 의존한다.

4. 구조품의 변형 해석

주조 공정 해석의 시발점은 주조품, 런너(Runner), 오버플로우(Overflow), 금형 및 냉각 회로의 3차원 형상을 모델링(Modeling) 하는 것이다.

그림 2는 고압 다이캐스팅으로 제작되는 승용차의 후방 도어 락 패널의 금형 배치를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 유동, 응고, 생산 주기 및 응력 해석을 수행하기 위해 캐스팅, 런너, 오버플로우, 게이트, 금형, 냉각 채널(Channel) 등 전체 형상에 대하여 3차원 CAD 정보가 필요하며, 이들에 대하여 물성, 경계 조건, 공정 조건을 입력하여야 한다.

해석은 사출 조건, 용탕의 온도, 불 균일한 금형 온도, 금형 냉각, 스프레이, 생산 주기 등 관련된 모든 공정 조건을 고려하여야 한다. 이것을 위해 각 생산 주기를 여러 회 반복적으로 수행하여 일반적으로 다이캐스팅 공정에서 수행되는 충분한 사전 예열 작업 후에 달성되는 열적 안정상태를 고려하였다. 즉, 금형 온도 분포가 열적 안정상태에 도달할 수 있도록 충분한 생산 주기 해석을 반복한 후 유동, 응고 및 주조품의 냉각 공정 등을 해석하였다.

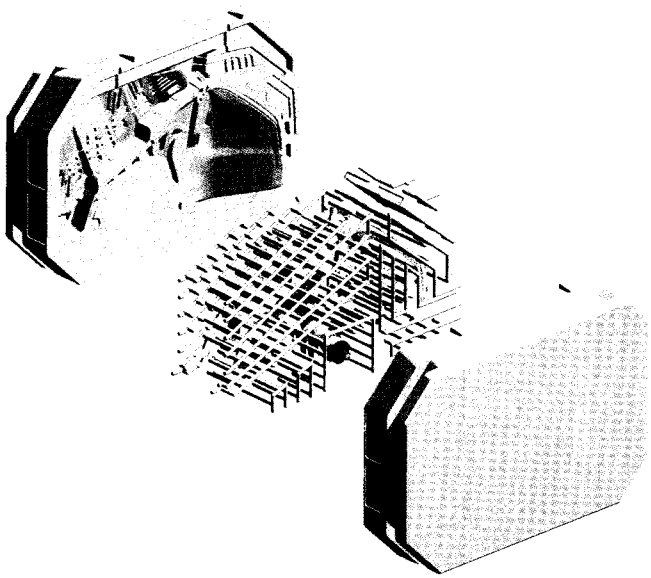

그림 2. 해석에 적용된 게이트 시스템 및 냉각, 보온 채널을 포함한 금형 형상

계산된 전체 온도 분포는 다음의 응력 해석에서 주조품 및 런너 등 온도 차에 의해 발생하는 외적 하중으로 적용된다. 빠르게 냉각 되는 영역은 응고가 발생하고, 급격하게 수축을 시작하게 된다. 이러한 수축은 금형으로부터 멀어지는 방향으로 발생할 수 있으나, 그렇지 않은 영역에서는 국부적 또는 대부분 영역이 금형에 의해 구속되게 된다. 이

것은 제품의 형상에 의해 결정되는 요소이다. 이렇게 금형에 의한 구속의 영향으로 인해 제품 내에 인장 응력이 발생한다. 그림 3에 취출 직전 금형 내에서의 최대 주응력 값을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 금형으로부터 취출되기 바로 직전에 거의 전체 영역이 인장 응력 상태이며, 이는 금형에 의한 구속 때문이다.

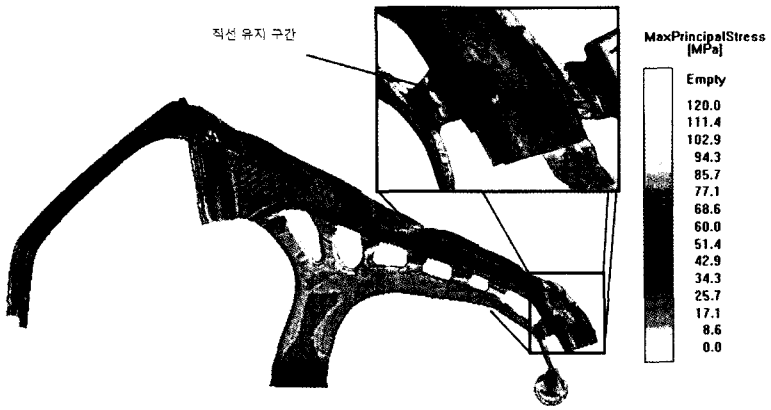

그림 3. 사출 직후 후방 도어 락 패널의 최대 주응력 분포

취출 후 금형에 의한 수축에 대한 구속은 사라지게 되므로, 주조품 및 런너는 자유롭게 수축될 수 있다. 런너와 게이트는 사출 방향으로 굽어진 주조품의 수축에 영향을 미친다. 그림 4에 나타낸 취출 시의 온도 분포는 상온으로 냉각 되는 동안 발생하는 응력과 변형에 대한 기본 값이 된다.

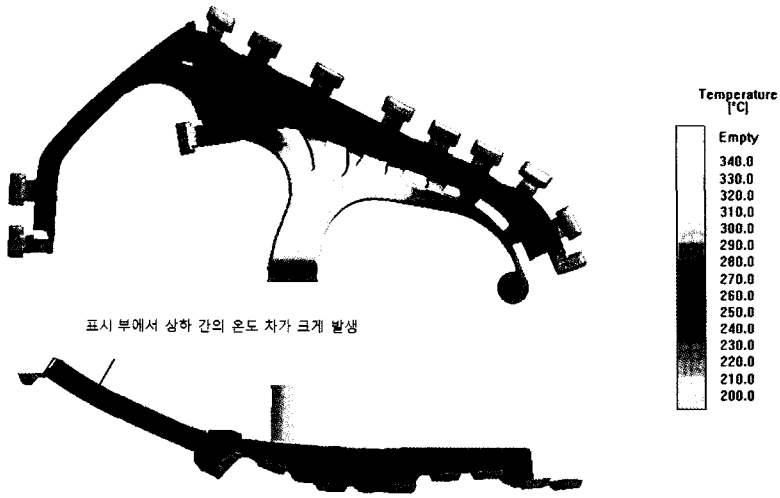

그림 4. 취출 직후 주물과 런너에서의 온도 분포

일반적으로 런너는 제품 보다 더 두껍게 설계되므로 냉각되는 동안 더 높은 온도를 유지하기 때문에, 냉각 과정에서 런너는 제품 보다 더 많은 수축을 하게 되고, 상대적으로 얇은 주조품을 런너 방향으로 잡아당기게 된다(그림 5).

사출 부와 접하고 있는 주물품의 윗부분이 취출 후 아래 부분보다 더 높은 온도 분포를 나타냄으로써, 스완 네크(Swan neck)라 불리는 영역은 위쪽 방향으로 이동하는 양상을 나타낸다.

그림 5. 상온으로 냉각된 후 주조품의 변형 양상

그림 6에 주조 후 23개의 측정 부위에 대하여 측정된 치수와 해석 치수와의 편차를 나타내었다. 측정은 15개 표본에 대해 수행하였으며, 측정된 값과 도면 치수 값과의 편차에 대한 평균값을 청색 실선으로 나타내었다. 청색 점선은 측정된 값과 도면 치수 값과의 상, 하한 선을 나타내고, 해석 값을 적색 실선으로 나타내었으며 2개의 기준점을 붉은 점으로 표기하였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 계산 치와 실측 치의 평균값이 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

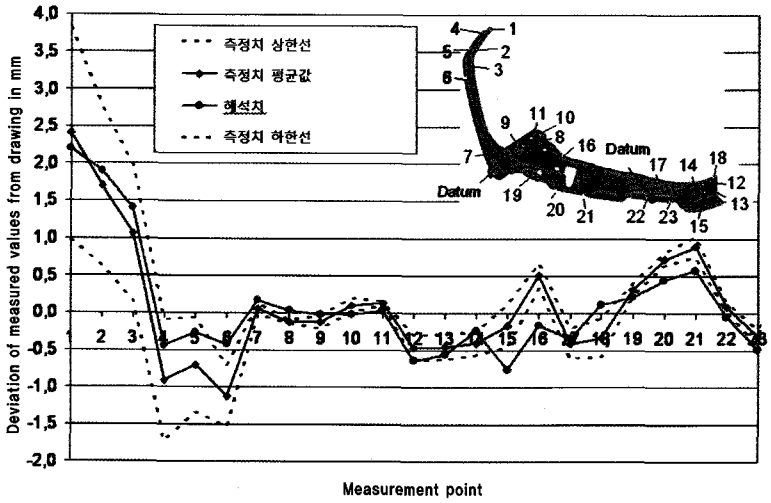

그림 6. 게이트 절단 전 변형량 비교

일반적으로 제품이 상온으로 냉각되면, 제품으로부터 런너와 게이트(Gate)를 제거하게 되며 이런 절단 작업은 제품의 변형량을 변화시킨다. 실제 공정에서는 이 치수가 더 중요하다.

그림 7에 게이트 절단 작업 후 측정 값과 해석 값을 비교하였다. 게이트에 의한 구속이 사라짐에 따라 제품 바깥쪽은 미세하게 원래 방향으로 복원 된다. 하지만 여전히 게이트 방향으로의 변형이 어느 정도 남아 있음을 알 수 있다. 게이트를 절단한 후 비교 수치 역시 해석 결과와 실측 치가 매우 잘 일치함을 나타내고 있다.

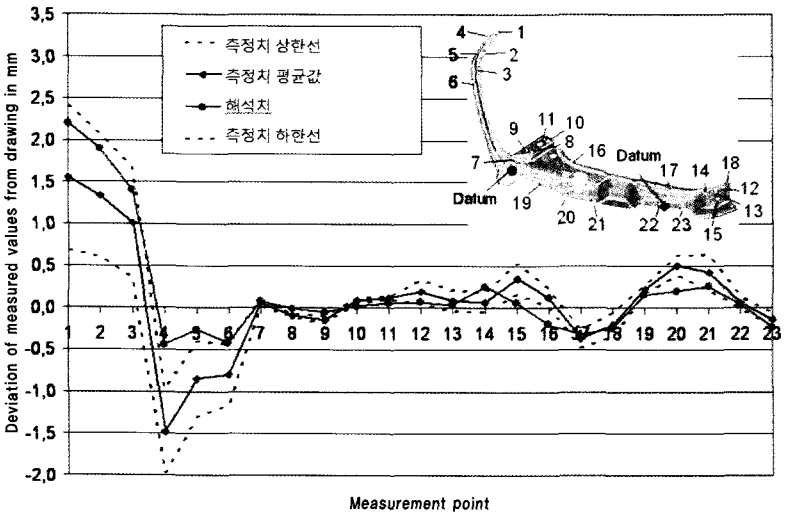

그림 7. 게이트 절단 후 변형량 비교

5. 고압 다이캐스팅 부품의 고온 균열 해석

변형 해석에 추가하여, 고압 다이캐스팅 부품에 있어서 고온 균열을 예측하는 것은 또 새로운 도전이라 할 수 있다. 고온 균열은 응고 과정에서 발생하는 일종의 인장 균열이다. 이 균열은 보통 액상 보급이 어렵고, 응고 수축으로 인해 기계적인 하중이 작용하는 후육 부에서 흔히 발생하며, 금형에 의한 구속 역시 큰 영향을 끼친다. 따라서 주형의 강도가 약한 사형에서의 발생 빈도는 비교적 낮은 편이다. 고온 균열 경향은 또한 합금 원소의 종류 및 조성에 의해 변하며, 높은 응고 수축률을 가지는 합금 및 응고 구간 긴 합금에서 발생하기 쉽다.

고온 균열이 발생할 가능성이 높은 영역은 고온 균열 예측 기법을 이용한 해석을 통하여 찾아낼 수 있다. 그림 8은 플라이 휠(Flywheel) 부품의 고온 균열 해석 결과와 실제 제품에서 발생한 균열 양상 및 위치를 나타낸 것으로 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 고온 균열의 발생은 공정 조건, 냉각 조건의 개선 또는 형상의 변경 등을 통해 방지할 수 있다.

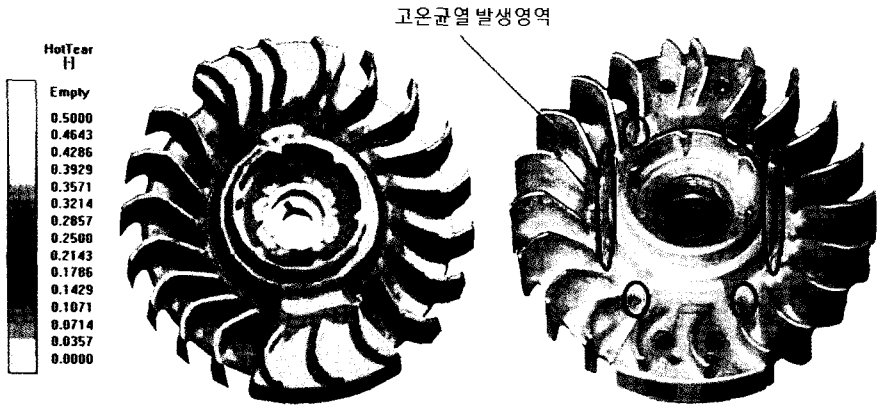

그림 8. 고온 균열 예측 기법을 이용한 fly wheel에서의 고온 균열 예측

6. Cast bulk head의 열처리 과정에서의 변형 해석

자동차 부품을 제조하기 위한 고압 다이캐스팅 공정은 열처리 공정을 포함하는 경우가 있다. 주방 상태의 잔류 응력은 크립 변형을 위한 필요 응력 수준을 낮추어 주는 어닐링(Annealing) 동안의 온도 상승에 의해 감소하며 이러한 공정을 고려하기 위해서는 기존의 탄성 또는 소성 외에 점소성 변형률을 고려할 수 있는 해석 모델이 필요하다.

벌크 헤드(Bulk head) 부품의 어닐링 공정 해석을 위하여 점소성 모델을 적용하였으며 그림 9에 해석에 적용된 벌크 헤드 부품의 형상을 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 열처리 동안 발생하는 변형을 최소화 하기 위해 주물품의 양쪽 측면에 지그(Jig)를 설치하였다. 또한 형상이 대칭이므로, Symmetry 경계 조건을 부여하여 전체 형상의 1/2에 대한 해석을 수행하였다.

그림 9. 열처리 공정 시 벌크 헤드의 지그 위치

측정 값 분석 결과, 용체화 처리 공정이 전체 변형 량에 가장 중요한 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다. 그림 10은 용체화 처리 후의 응력 및 변형 값을 나타내고 있다. 그림 10(좌)에 나타난 바와 같이 최대 응력은 0.9MPa로 매우 낮은 수준이다. 일반적인 주방 상태의 주물품의 전형적인 응력은 20~50MPa 정도이다. 이후 계속되는 어닐링 열처리 공정 후 발생한 최대 변위 값은 대략 4.6mm였다. 그림 10(우).

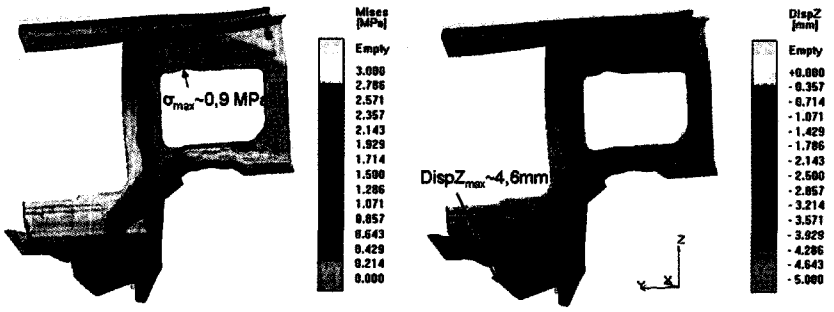

그림 10. 용체화 처리 후 벌크 헤드의 응력(좌) 및 어닐링 후 변형 분포(우)

앞의 도어 패널의 예와 같이 해석치와 실측치의 최대, 최소 및 평균값의 도면 치수에 대한 편차를 그림 11에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 측정 위치 14곳에 대한 측정 값의 최대 및 최소 그리고 평균 값과 해석 값을 비교하였다.

결과에 나타난 바와 같이 해석의 변형 값과 실측치의 평균 값이 잘 일치함을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이, 어닐링 처리의 해석을 수행하기 위해서는 점소성 이론에 대한 충분한 고려가 필요하다.

7. 고압 다이캐스팅 금형의 피로 수명 예측

고압 다이캐스팅 금형은 보통 고주기 열 하중에 의해 야기되는 금형 표면의 열 피로 균열 또는 히트 체킹(Heat checking)에 의해 금형 수명이 결정된다.

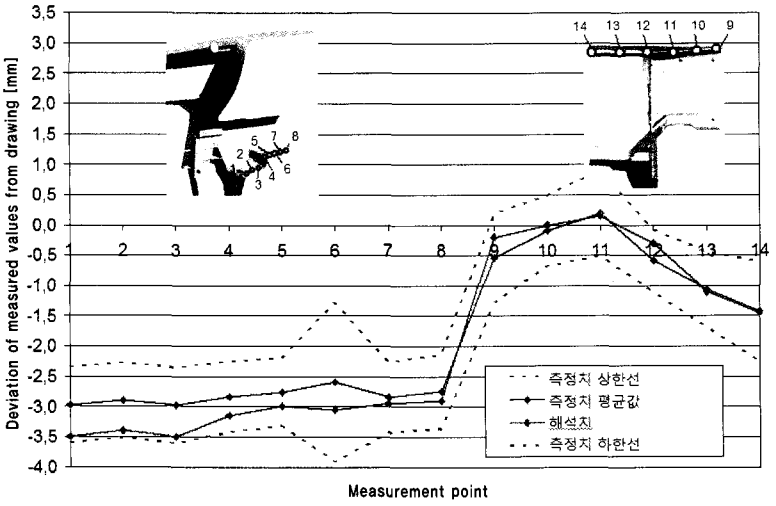

그림 11. 열처리 후 벌크 헤드의 변형량 비교

공정상에서 주로 발생하는 가열과 냉각 주기 및 이에 따라 발생되는 응력 주기를 그림 12에 나타내었다.

금형 내 액상 금속이 빠르게 충진 되고 응고 되는 과정 동안 금형 표면은 급격한 온도 상승을 하게 된다. 제품이 취출 되면 반대로 금형 표면은 주위로 열을 공급하는 열원이 된다.

일반적인 고압 다이캐스팅 공정에서 제품이 취출 되어 금형으로부터 분리되고 나면 금형 표면의 냉각 및 취출 시 이격을 용이하게 하기 위한 이형제가 분사, 도포되게 된다. 이 이형제의 주성분은 수분이므로 이형제 도포 시 금형 표면에서 물의 증발함에 따라, 금형 표면은 급격하게 냉각되게 된다.

앞에서 언급한 바 충진 및 응고 과정에서 금형 표면의 온도가 급격히 상승하게 됨에 따라, 표면은 팽창하려고 하나, 내부에 온도 상승이 느린 영역은 팽창 량이 작으므로 팽창하려는 금형 표면을 구속하게 되어 금형 표면에는 압축 응력이 발생하게 된다. 반대로 취출 후에는 금형 표면 온도가 저하됨에 따라, 금형 표면의 압축 응력은 줄어들게 된다.

이후 금형 표면에 이형제를 분사하게 되면, 금형 표면 온도는 급격하게 냉각 되고 수축하게 되며, 금형 내부의 온도 저하 속도가 느린 영역에서 표면의 수축을 구속하게 되어 금형 표면 부에서는 인장 응력이 발생하게 되어, 이형제

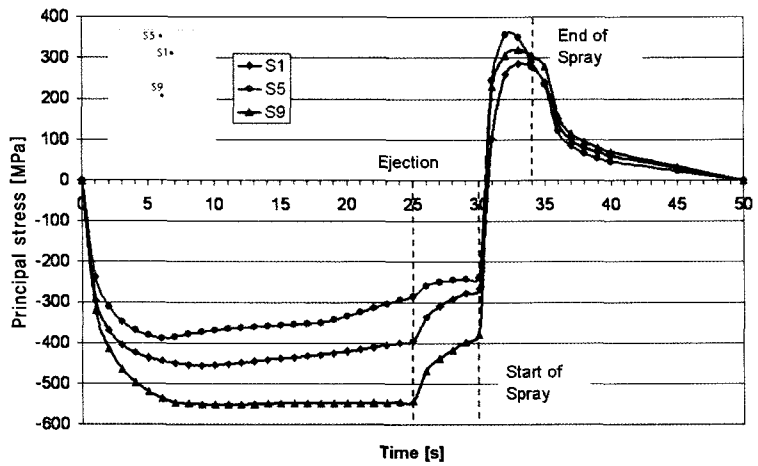

그림 12. 한 주기 에서 금형 표면에서 발생하는 전형적인 응력 변화 양상

분사 공정의 끝 단계에서 인장응력은 가장 높은 상태가 된다. 이런 공정이 수 천회 이상 지속적으로 반복되어 금형 표면에 피로 크랙을 야기하여, 금형 표면에 히트체킹으로 불리는 미세 균열로 나타난다. 이 때 발생한 크랙은 금형 표면의 잔류 응력을 감소 시키는 역할을 한다. 이러한 열 하중뿐만 아니라 금형 가공, 금형 재질, 제품 재질, 열처리 금형 설계 등도 금형 수명에 매우 큰 영향을 끼친다[6]-[8].

고압 다이캐스팅 금형 수명 예측을 위하여서는 3단계의 절차로 해석을 수행하였다. 첫 번째, 금형의 반복적인 작업에 따른 온도 분포를 구하기 위하여 금형 안정화 온도까지 응고 및 금형 스프레이(Spray), 블로우(Blow) 과정 등을 포함한 해석을 반복하고, 금형 온도가 정상 상태가 되었을 때, 최종적으로 충진을 포함한 생산 주기 해석을 수행하여 부위별 금형 온도 분포를 구하였다. 이 때 금형내부의 냉각 회로, 스프레이와 블로우 공정에 대한 고려도 반영하여야 한다. 두 번째, 이렇게 구해진 온도 분포는 금형 내 열응력 계산을 위한 외력으로 적용시켜 응력 해석을 수행하였다. 마지막으로, 계산된 주기적 응력 하중이 열 균열 발생에 영향을 미치는지에 대한 피로 수명 분석을 수행하였다.

앞서 그림 3~5에 후방 도어 패널의 고압 다이캐스팅 금형의 한 생산 주기 동안에 발생한 열응력을 나타내었으며, 이 결과를 이용하여 금형의 기대 수명을 예측하기 위한 해석을 수행하였다. 수행된 해석 결과는 50,000회 사출을 수행한 실제 금형에서 발생한 크랙 양상과 비교하였다. 그림 13에 금형 수명 결과를 나타내었다. 청색에서 흰색으로 갈수록 금형의 수명이 긴 것을 나타낸다. 그림 13에서 나타난 바와 같이, 런너의 취출 핀 주변에 크랙이 방사상으로 발생한 것을 알 수 있다. 이 부분에 대한 해석에서 계산된 피로 수명은 2,000 회였다.

또한 런너가 분기되는 단면이 가장 큰 부분에서 크랙이 심하게 나타나며, 해석에서도 같은 부분에서 피로 수명이 짧게 예측 되었다. 제품의 스완 네크(Swan neck)부에서도 크랙이 많이 분포하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 이 부분은 노치 형상을 가짐에 따라, 노치 효과에 의해 응력이 집중되어 낮은 피로 수명이 예측 되는 것으로 판단할 수 있다.

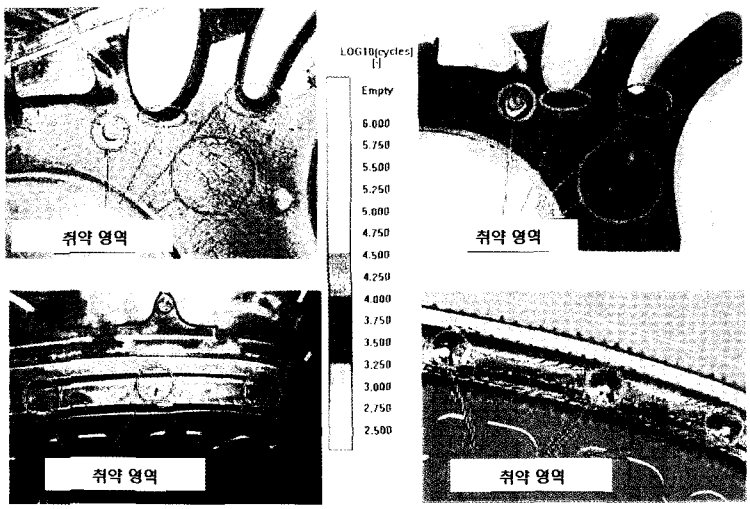

그림 13. 게이트 부와 swan neck 부에서 발생하는 실제 크랙 양상(좌)과 해석 결과(우)의 비교

8. 결 론

고압 다이캐스팅으로 제조되는 대형 박육 구조물에서 변형의 제어는 엔지니어들에게 매우 해결하기 어려운 문제이다. 이러한 문제를 풀기 위한 선행 조건은 제품의 형상 설계만 아니라 변형이 발생 기구에 대하여 정확하게 이해하는 것이 필요하다.

최신 주조 해석 기술을 이용하여 주조 공정, 게이트 분리 및 가공, 열처리 등에서 발생하는 변형을 정확하게 예측할 수 있게 되었다. 이러한 공정에 대한 정확한 이해와 해석 능력을 활용하여 변형에 대한 예방 조치로 금형 설계에서 선제 변형을 적용하거나 열처리 방향 또는 지그 방법 등을 결정할 수도 있다.

잔류 응력과 변형의 예측처럼 최근에는 제품에서 열간 균열이 발생하기 쉬운 영역을 예측할 수 있고 열 피로 해석을 통한 금형에서 발생하는 히트 체크를 예측할 수 있다. 이러한 해석 기법의 개발을 통하여, 최근 증가하고 있는 박육 다이캐스팅 구조물의 개발 및 생산에 대한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

⚜ 참고 문헌

[1] Egner-Walter, A.: "Berechunung der Entstehung von Spannungen beim Gießen" Hoppenstedt, Gussprodukte' 99, 1999

[2] Wieckowicz, P., Olive, S.: "Redidual Stress and Casting Cracking during Machining. A Case Study", published in MAGMAtimes 03/2003, Vol. 8 Publication of MAGMA GmbH, Sept. 2003

[3] Maaßen, F.; Loeprecht, M.; Egner-Walter, A.: "Recunerische Optimierung von hochbelasteten Zylinderköpfen aus Aluminium Dauerlaufsimulation". 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Herausgeber, Ort, S. 805-841, 2000

[4] Auburtin, P., Morin, N.: "Simulation thermomechnique du traitement thermique de culasses en aluminium" Mecanique & Industies 4, S.319-325, 2003

[5] fent, A.: "Einfluss der Wämebehandlung auf den Eigenspannungszustand von Aluminiumgussteilen", Dissertation Tech. Universität Müchen, 2002

[6] Nogowizin, B., Friebe, G.: "Standzieten der Druckgießformen", Druckguss-Praxis 4/2002, S. 101-108

[7] Pries, H., Liluashvili, S., Dilger, K.: "Brandrissentstehung an Druckgießformen", Druckguss-Praxis 4/2002, S. 135-140

[8] "Vershleißmechanismen an Druckgießformen", Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 12685, TU Braunschweig, 2003

[9] Egner-Walter, A., Olive, S.: "Using Stress Simulation to tackle Distortion and Cracking in Castings", Foundry trade journal, Vol 181, 294-297, 2007

이 논문은 Egner-Walter, A., Olive, S.에 의해 작성된 ["Using Stress Simulation to tackle Distortion and Cracking in Castings", Foundry trade journal, Vol 181, 294-297, 2007"]를 번역, 편집하였습니다.

추 인 호

· 마그마 엔지니어링 코리아 E/S 팀장
· 관심분야 : 주조 및 사출 공정 해석
· E-mail : ihchoo@magmasoft.co.kr