

국부가압 다이캐스팅 공정에서 3차원 유동 및 응고해석을 통한 자동차 변속기 Gear Housing의 구조방안 설계 최적화

박진영[†] · 김어수* · 박용호 · 박익민

부산대학교 재료공학부

*한국생산기술연구원 부산분원

Optimization of Casting Design for Automobile Transmission Gear Housing by 3D Filling and Solidification Simulation in Local Squeeze Diecasting Process

Jin-Young Park[†], Eok-Soo Kim*, Yong-Ho Park and Ik-Min Park

Dept. of Material Engineering, Pusan National University

*Pusan R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology

(2006년 6월 27일 받음, 2006년 11월 1일 최종수정본 받음)

Abstract In the partial squeeze casting process, the filling behavior of liquid metal and solidification pattern in thick area have significant influence on the quality of casting products and die life. For the optimal casting design of automobile transmission gear housing, various analyses were performed in this study by using computer simulation code. MAGMASoft and the simulation results were compared and analyzed with experimental results. By air pressure criteria, internal porosities caused by air entrap during the mold filling were predicted and reduced remarkably by modification of gating system. Also, optimal squeeze-time lag to apply partial squeeze pin in thick area was calculated and the castings was free from shrinkage defects with the result of solidification analysis. Consequently, casting design for automobile transmission gear housing was optimized and approved by Computer Tomography.

Key words Local Squeeze Die casting, gating system, Filling simulation, Solidification simulation.

1. 서 론

다이캐스팅은 복잡한 모양의 제품을 단번에 제조할 수 있는 경제적인 구조방법 중의 하나로서, 자동차부품이나 전자부품 등과 같은 높은 치수안정성과 대량 생산에 따른 경쟁력 있는 제조단가 및 품질의 안정성 등을 요구하는 산업분야에 있어 최적의 공법으로 각광받고 있다. 그러나 세계화 된 국제 경쟁상황에서 다이캐스팅 업계에서는 제품 개발기간의 단축, 제조원가의 인하 및 고품질 등을 요구받고 있으며, 최근 대두되고 있는 구조 CAE (Computer Aided Engineering) 기술은 이러한 요구사항을 만족시킬 수 있는 가상 효과적인 방법으로 각광을 받고 있다.¹⁾ 이러한 구조 수치해석 방법은 1980년대 초반에 도입되어 구조기술자들이 부품의 용량충진 및 응고현상을 평가하는데 사용함으로써 시행착오를 대폭 줄이면서 고품질의 부품을 생산할 수 있게 하고 있다.

일반적으로 다이캐스팅용 금형을 설계 및 제작할 때에는 레이아웃, 구조조건, 방구계의 설계, 금형 냉각조건, 인서트 금형, 입출상지관계, 중사관계 등을 고려하면서 구조방안을 설계하여야 하며, 따라서 다양한 구조방안만큼 구조성형시 충전(mold filling)과 응고(solidification)중에 발생하는 결함의 정도나 위치, 형상도 달라지게 된다. 그러므로 품질이 우수한 다이캐스팅 부품을 제조하기 위해서는 상위의 조건들을 적절히 수정 또는 변경함으로써 구조결함을 제어해야 할 필요가 있다. 그러나 실제 현상에서는 이미 제작된 금형에 대해 이를 수정, 보완하는 데에는 시간적, 경제적 효율성에 제약을 받게 된다. 이러한 시간적, 경제적 제약은 다이캐스팅 산업의 기술개발에 있어 큰 장애요인 중의 하나라고 할 수 있다.

최근 독일의 MAGMASoft, 미국의 Flow-3D, 일본의 Adstefan, 국내의 AnyCasting 및 생산기술연구원에서 개발한 EASY FAST와 같은 구조 전용 상용 프로그램들이 현상의 공정설계 및 공정개선을 위한 tool로서 활용되고 있다.²⁾ 특히, 근래에 세계적인 이슈로 대두되고 있

[†]E-Mail : jipark7@paran.com

는 환경오염문제와 자원고갈문제로 인하여 산업전반에 부품 경량화 및 작업환경개선이 요구되고 있다. 이러한 경향은 사형주조와 같은 일반 주조공정 등이 High Pressure Die Casting(HPDC)공정으로 대체되면서 효율적인 금형 설계 및 공정설계에 전산 해석 프로그램의 활용이 더욱 활발해 지고 있는 실정이다.^{3,4)} 따라서 다이캐스팅 산업에 있어, 이러한 CAD/CAE 기술은 향후 경제적이고 효율적인 제품생산을 위한 효과적인 도구로서 한층 더 발전할 것으로 기대된다.⁵⁾ 본 연구에서는 자동차 변속기용 Gear Housing에 적용하고자 하는 세 가지 방안에 대하여 구조해석 전용 Code인 MAGMASoft를 이용하여 충전 및 응고해석을 행하고 예견되는 제품의 결함 및 결함제어 가능성을 진단함으로써 개선방안을 제안하고 최종적으로 금형설계 제작에 반영하여 실제 주조된 제품과 해석결과와 비교하고, 궁극적으로는 구조결함이 없는 최적화된 구조방안을 설계하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 전산해석 과정

MAGMASoft는 FVM계열의 수치해석기법⁶⁾을 이용하여 용탕의 충전 및 응고해석과정을 수행함은 물론, 자동요소분할과 빠른 계산시간의 장점이 있다.⁷⁾ 일반적으로 MAGMASoft의 전반적인 해석과정은 Fig. 1과 같이 크게 preprocessing, enmeshment, simulation, postprocessing의 4단계로 구분된다. MAGMASoft에서 형상 모델링은 상용 3차원 CAD 프로그램에서 생성된 solid를 STL 형식의 파일로 변환하여 preprocessor에서 사용한다. 본 연구에서는 Gear Housing에 적용하고자 하는 세 구조방안에 대해 Fig. 2에서와 같이 3차원 CAD 프로그램을 이용하여 3D solid 모델링을 한 후 STL 파일로 변환하였으며, 전처리과정을 통해 각각 변환된 STL 파일로부터

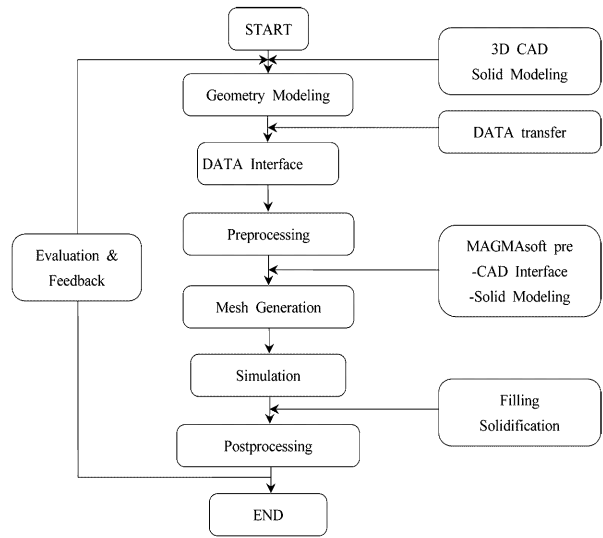


Fig. 1. Flow-chart of die casting simulation.

cast, ingate, runner, biscuit등의 material group을 형성하였고, 냉각채널, 고정금형 및 가동금형 등은 MAGMASoft의 preprocessor의 CAD tool을 이용하여 형성하였다. 요소분할(enmeshment)은 FVM(finite volume method) 방식에 의한 수직좌표 분할기법을 이용하였고 해석에 이용된 전체 요소분할 수는 21,000,000개이다.

2.2 해석조건

본 연구에서 구조해석에 사용된 구조조건은 Table 1과 같으며, Cast, 금형 및 냉각채널의 재질은 각각 ADC12, SKD61 및 water로 설정하였으며, 용탕의 초기 온도는 670°C, 금형의 초기예열온도는 180°C로 설정하였다. 그리고 용탕·금형, 금형·냉각수 등 이물질간의 열전달계수를 고려하여 경계조건을 설정하였다. 다이캐스팅머신은 형체력이 2250 ton인 cold chamber 다이캐스팅기로 tip경

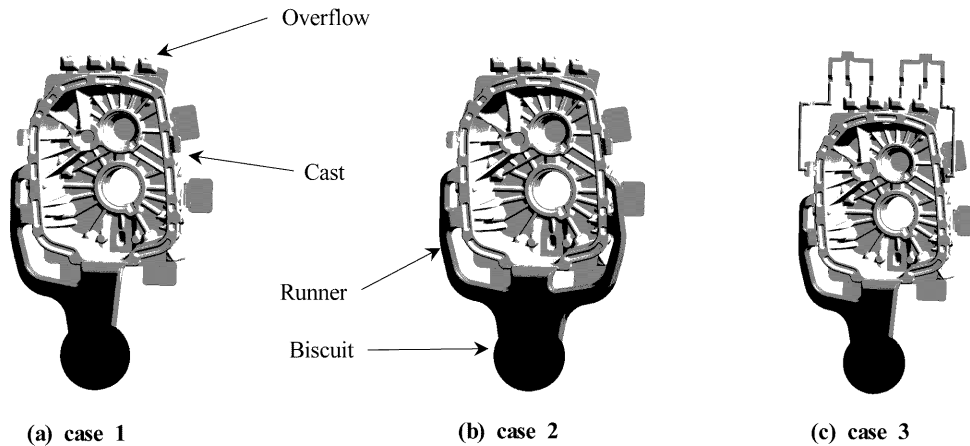


Fig. 2. Casting design of gear housing.

Table 1. Conditions for computer simulation

Classification	Condition	
Material	Cavity	ADC12
	Fixed Die	SKD61
	Moving Die	SKD61
	Cooling channel	Water
Heat Transfer Coefficient	Cast/Die	C7000 → C3500(gate용고후-)
	Overflow/Die	C7000 → C3500(gate용고후-)
	Runner/Die	C7000
	Biscuit/Die	C7000
	Water/Die	C10000
Initial Temperature	Cavity	670°C
	Die	180°C
	Cooling Channel	35°C
Machine type	TOSHIBA 2250 ton (Real Time Shot Control system)	
Filled rate of sleeve	42.339%	
Cast Pressure	700 kgf/cm ²	
Tip diameter	φ140	
Slow shot velocity	0.25 m/s	
Fast shot velocity	2.5m/s	
Length of shot sleeve	850mm	
Length of fast shot velocity	250mm	

은 $\phi 140$, shot sleeve의 길이는 850 mm로 정의하였고, plunger의 사출조건은 0.25 m/s의 저속사출과 2.5 m/s의 고속사출의 2단 사출조건이며, 고속 stroke는 250 mm로 정의하였다. 또한 진공실정은 cavity 내부 압력을 사출시작 전 1기압(1013 mbar)에서 사출시작 2초 후에 100 mbar로 감소시키는 것으로 설정하였다.

2.3 해석내용

2.3.1 Runner 및 gating system(충진해석)

충진과정에서 용탕의 유동속도는 제품의 품질과 금형 모두에 매우 중요한 요인으로서 충진속도가 매우 느린 경우 높은 열손실(heat loss)과 함께 탕회, 탕경 등의 불량을 유발하며, 반면 너무 빠른 용탕의 충진속도는 gating system 및 금형의 cavity부의 마모(crosion)를 촉진시키므로 적절한 용탕의 유동속도를 유지할 수 있는 runner부의 설계가 요구된다. 본 해석에 적용된 주조방안은 Fig. 2에서와 같이 크게 3가지 방안으로 방안1은 runner형상이 주 runner에서 가지(branch)가 한쪽으로 뻗어 나오는 형상이고, 방안2는 가지가 양쪽으로 뻗어 나오는 대칭형 형상이다. 그리고 방안3은 방안1과 동일한 주조방안에 상부에 진공을 사용할 수 있도록 진공runner를 설계한 형상이다. 본 연구에서는 충진해석을 통해 각각의 방안에 따

른 용탕의 흐름을 조사하고 각 방안이 용탕의 흐름에 어떠한 영향을 미치는지를 알아 보았다. 또한 Air pressure criteria를 이용하여 cavity 내부의 압력을 예측하고 이를 통하여 gas에 의한 결함의 발생가능성을 알아 보았다. 이렇게 해석결과에서 도출된 최적의 주조방안으로 방안을 선택하여 실제 금형제작에 반영하였으며, Cavity내부의 Air pressure의 영향을 확인하기 위해 진공사용을 선택적으로 할 수 있도록 금형실제 제작하였다. 해석결과는 실주조물의 컴퓨터 단층촬영(Computer Tomography, CT)으로 비교 분석 하였다.

2.3.2 용고해석

용고해석은 충전완료율 기준으로 용고진행율과 용고진행시간을 단위로 병행하여 그 결과를 나타 내었으며, 용고가 느린 수축 용고결함의 발생 가능성이 높은 것으로 예상되는 제품의 중심 후속부위를 가상 절단하여 각 방안의 수축 용고결함 발생위치, 온도 및 냉각속도, 용고진행률 등을 나타내었다. 또한 Feeding criteria를 통한 분석으로 수축결함의 발생 가능성을 예측하고 예측된 위치에 수축결함이 실제주조에서는 어떠한 양상으로 나타나는지를 알아보기 위해 실주조물을 CT로 촬영하여 비교하였다.

2.3.3 국부가압력의 효과 및 가압개시시간

용고해석 결과에서 예견된 최종 충전부인 제품 후속부의 용고거동을 통해 용고시 필연적으로 동반되는 수축결함을 예측하고, 수축결함을 근본적으로 제어할 수 있는 국부가압방식의 적용을 위해 가압력의 영향을 예측하고 적절한 가압개시시간을 도출하여 실제에 반영하고자 하였다.

3. 결 과

3.1 충진해석결과

3.1.1 주조방안에 따른 충진거동 해석

각 방안에 대한 충진해석 결과로부터 용탕의 충진거동을 Fig. 3, 4, 5에 나타내었다. 2단 사출속도에 의해 경험적으로 유사제품의 최적 양산조건인 runner부를 모두 채우고 제품부의 충진이 약 30% 정도 진행되는 시점에서 저속에서 고속으로 속도를 전환하는 것으로 조건 설정하였다. 즉, 방안1은 저속(0.25 m/s) 사출시작 2.402초 후에 고속(2.5 m/s) 전환이 이루어지며 cavity의 고속충진은 0.086초 후에 완료되었다. 충진과정은 Fig. 3에 보인 바와 같이 충진율 30%인 (b)영역까지는 저속구간으로 선행용탕의 과냉이 비교적 빠르게 진행되어 570-590°C 정도의 액상선 온도까지 용고가 부분적으로 진행되며 고속사출로 전환되면서 후속으로 공급되는 용탕에 의해 온도가 급격하게 상승되나 최종 충전부에 과냉된 용탕이 잔존하는 것을 알 수 있었다. 양방향 충진(방안2)의 경우

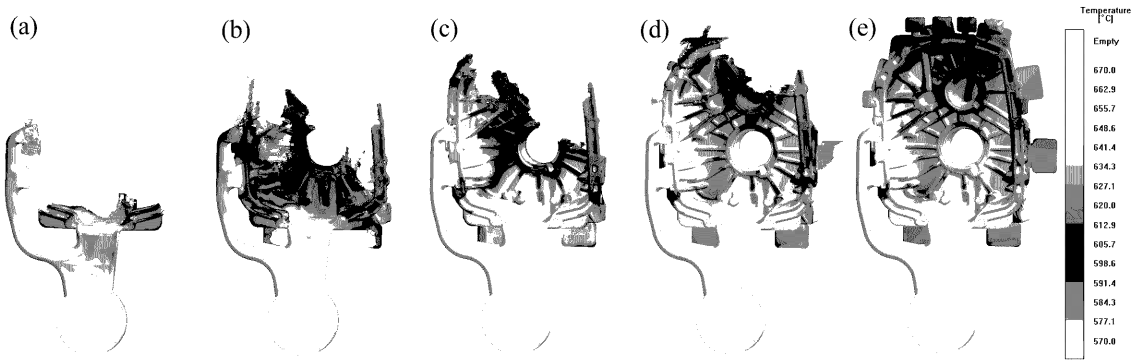


Fig. 3. Sequences of mold filling simulation (case 1).

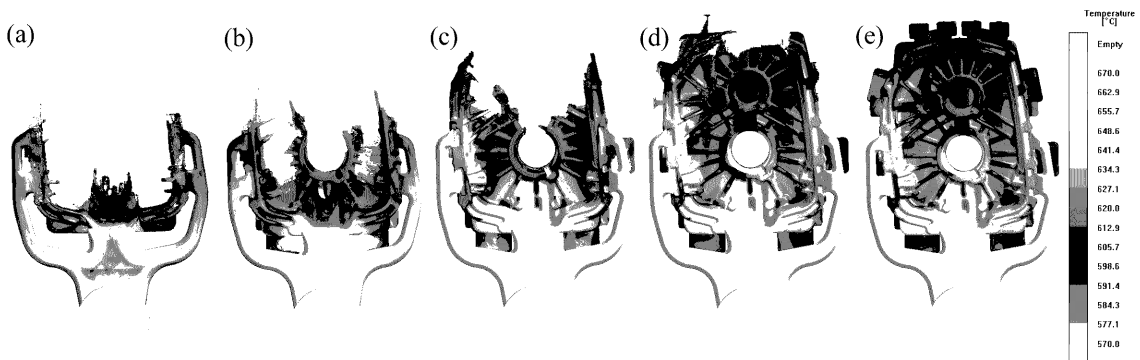


Fig. 4. Sequences of mold filling simulation (case 2).

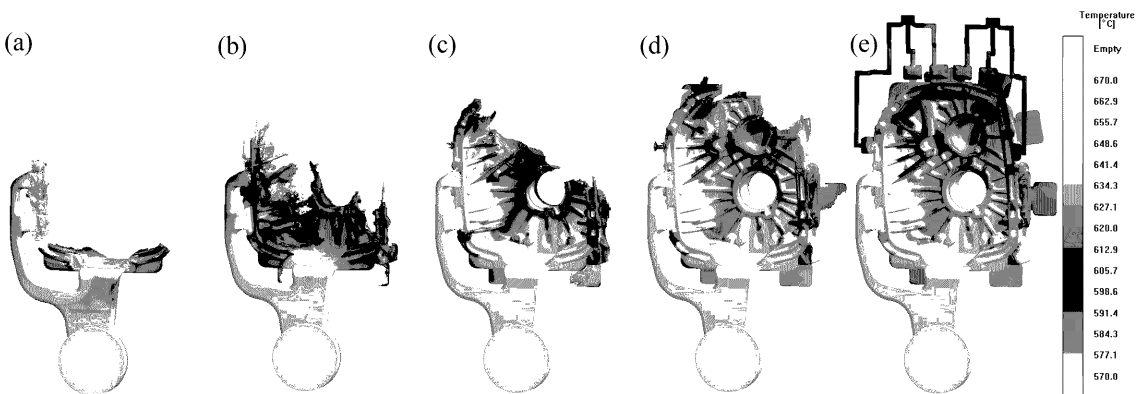


Fig. 5. Sequences of mold filling simulation (case 3).

에는 동일한 plunger속도에 gate단면적이 커짐으로 인해 gate통과 속도는 방안1에 비해 상대적으로 낮아지면서 표면적이 넓은 cavity 중심부의 충전속도가 늦어져 용탕의 과냉이 cavity 상단부에 넓은 영역에 걸쳐 잔존되어 탕 회불량의 발생가능성이 매우 높을 것으로 예측되었다. 방안1에 진공조건을 설정하여 cavity내부압력을 사출start 2 초 후에 100 mbar로 감압 설정한 방안3의 경우, 저속충진시의 양상은 방안1과 유사하게 진행되나 고속절환 위

치(2.402초) 보다 0.402초 이전인 진공절환(2.0초) 위치에서 용탕의 흐름이 매우 안정적인 laminar flow양상으로 바뀌면서 선행 충전되어 과냉되었던 용탕도 후속 용탕의 공급으로 온도상승과 함께 cavity내부에는 매우 건전한 용탕만 잔존하는 이상적인 충전거동을 나타내었다. Fig. 6은 각 방안별 최종 충전부위를 비교하여 나타낸 것이다. 양방향으로 충전되는 방안2의 경우 최종 충전부에 고립영역이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이로 인해 과

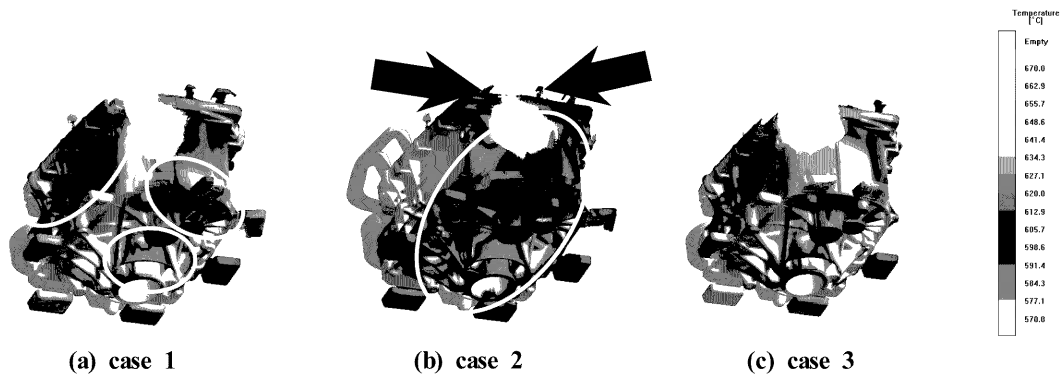


Fig. 6. Final flow junction zone.

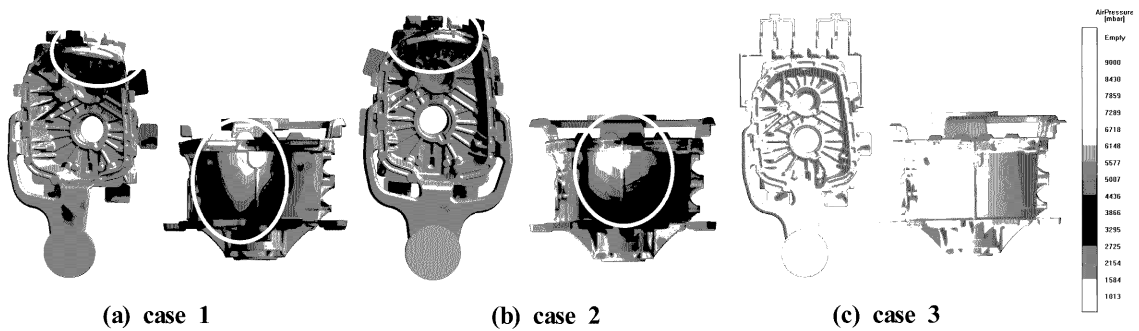


Fig. 7. Porosity defects predicted by air pressure criterion.

냉각된 용탕이 overflow로 빠져나가지 못하고 고립되어 광범위에 걸쳐 탕회 및 탕경결함이 예측되며, 방안1의 경우에도 방안2에 비하여 양호한 충전거동을 보이나 국부적인 과냉층이 cavity에 고립되어 부분적인 탕회결함이 예상된다. 하지만 방안3의 경우 cavity내부의 진공효과에 의해 전면에 걸쳐 매우 양호한 온도분포를 보이며 최종충진부위도 cavity내에 고립되는 현상이 없는 이상적인 충전거동을 얻을 수 있었다.

3.1.2 Air pressure분석에 의한 결함예측

용탕이 충전되는 과정에서 cavity 내부의 공기가 밖으로 배출되지 못할 경우 그대로 cavity 내부에 잔존하여 기포 결함의 원인이 된다. Fig. 6의 최종충진부의 양상에서 예측할 수 있었던 바와 같이 방안1,2의 경우, Fig. 7(a),(b)의 air pressure 분석 결과에서도 최종 충전되는 용탕의 고립부에서 약 10 bar에 달하는 높은 air pressure를 확인할 수 있으며, 이 영역에서 필연적으로 air entrap에 의한 기포결함의 발생이 예상된다. 이를 개선하기 위하여 진공조건을 설정한 Fig. 7(c)의 경우 cavity 부분의 air pressure가 1기압(1013 mbar)을 넘지 않는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 기포 결함의 발생가능성은 매우 낮을 것으로 예측되었다.

이러한 기포 결함 여부를 확인하기 위해 최종 충전부위에 CT 촬영을 행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타

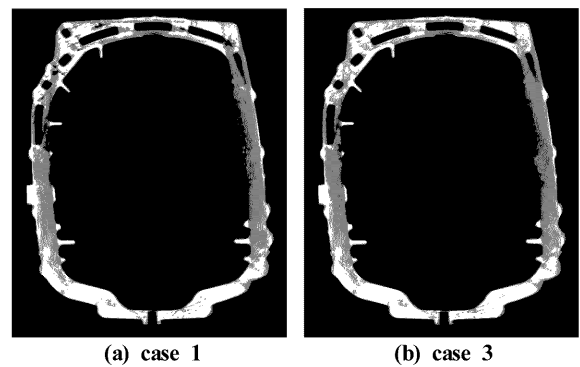


Fig. 8. Porosity defects by Computer Tomography.

내었다. 진공적용 전의 최종 충전부에서는 다수의 기포 결함이 발생한 것을 확인할 수 있으나, 진공이 적용된 방안에서는 기포결함이 없는 우수한 품질의 제품을 얻을 수 있었다.

3.2 응고해석결과

3.2.1 냉각조건에 따른 응고거동 해석

응고거동은 충전이 완료된 이후에 진행이 되므로 주조 방안이나 진공조건 등이 응고에 미치는 영향은 너무나 미미하여 해석결과에서는 차이가 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서는 냉각조건에 따른 응고거동을 관찰하였으

며, 온도조건은 용탕주입온도 670°C, 금형온도 180°C, 냉각수 35°C로 실 구조조건과 유사하게 설정하여 Fig. 9의 (a)와 같이 초기 냉각조건을 설계하여 응고해석하였다. 그 결과 Fig. 10의 (a)에 나타난 바와 같이 예측 가능했던 제품의 최 후육부 2개소(reverse gear부, main shaft hole부)에서 응고가 15초 이상 진행되어도 액상선 부근의 온도인 550~570°C의 온도분포를 보이며 응고속도가 매우 느리게 진행되어 최종 응고부로 남게 됨을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 9의 (b)와 같이 후육부 2개소의 냉각설계를 보강(reverse gear부: 1개소 추가, main shaft hole부: 냉각홀의 단면적 3배 확장)한 후 응고해석을 진행하였으며, 그 결과는 Fig. 10의 (b)에서와 55%의 응고율에서 약 0.229초, 70%의 응고율에서 0.360초, 그리고 응고가 거의 완료되기 직전인 85%의 응고율에서 0.390초 정도의 응고속도의 변화는 나타났지만 기대했던 만큼의 응고거동의 변화는 보이지 않았고 역시 동일한 후육부 2

개소가 최종 응고부위로 진존하게 되어 냉각channel의 설계 개선만으로는 응고수축의 결함을 근본적으로 피하기는 어려울 것으로 예측 되었다.

3.2.2 후육부 feeding성 분석에 의한 결함예측

Feeding이란 인자는 각 차분요소의 상대밀도를 나타내는 값으로서 용탕이 진전한 경우 100%, 수축공과 같이 비어있는 요소는 0%로 표시되며 그 사이의 값들은 수축공의 발생정도를 평가하는데 사용되며 그 수치가 낮을 수록 수축공의 발생확률이 높음을 의미한다.⁸⁾

Fig. 10의 응고거동을 통해 예측되는 수축결함 확률을 알아보기 위해 Fig. 11과 같이 제품의 후육부 2개소를 가상절단하여 응고양상 및 feeding에 의한 수축공 발생을 예측하고 실 구조품의 동일부를 컴퓨터단층촬영(CT) 결과와 비교하였다. 그림에 보인 바와 같이 후육부 2개소의 단면 응고거동 결과에서도 타 부위에 비하여 역시 응고진행속도가 매우 느림을 관찰할 수 있으며, Feeding

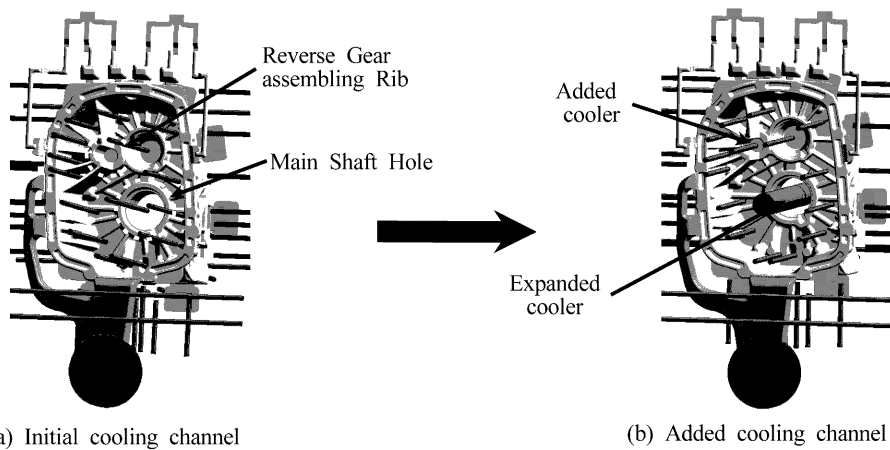


Fig. 9. Modification of Cooling channel design.

Solid Fraction	40%	55%	70%	85%	Temperature [°C] Empty 558.0 637.8 625.7 613.6 601.4 589.3 577.1 565.0 552.9 540.7 528.6 516.4 504.3 492.1 480.0
Solidification Simulation					
(a) Initial cooling channel	5.14s	9.779s	15.45s	23.40s	
(b) Added cooling channel	5.14s	9.55s	15.09s	22.01s	

Fig. 10. Sequences of solidification simulation.

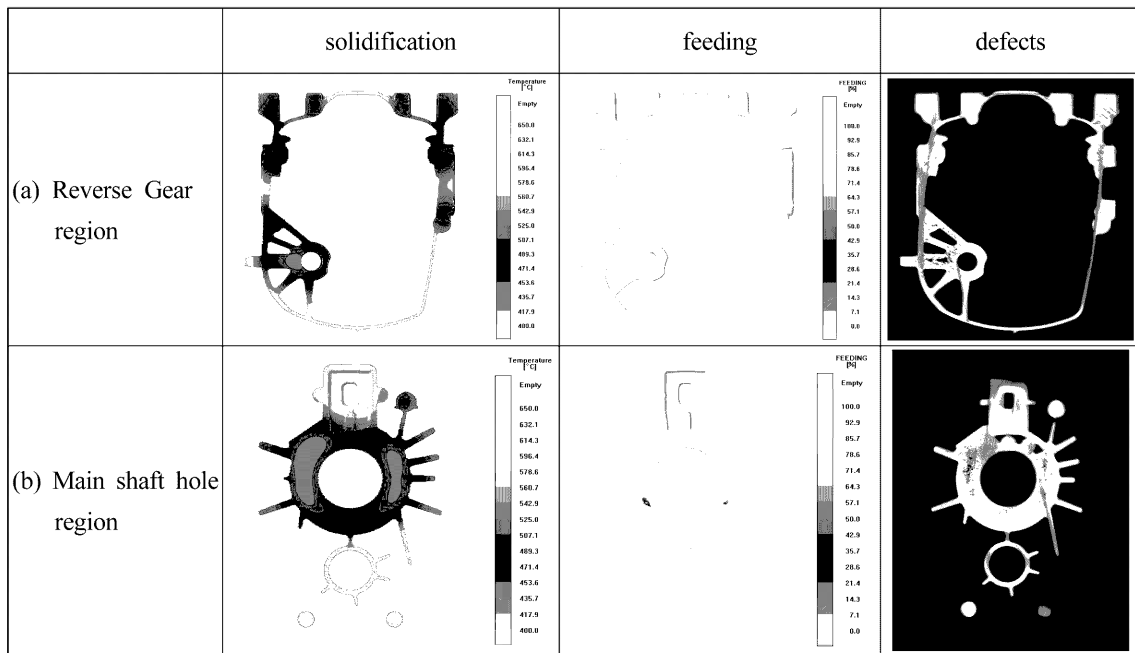


Fig. 11. Shrinkage defects predicted by solidification and feeding criterion.

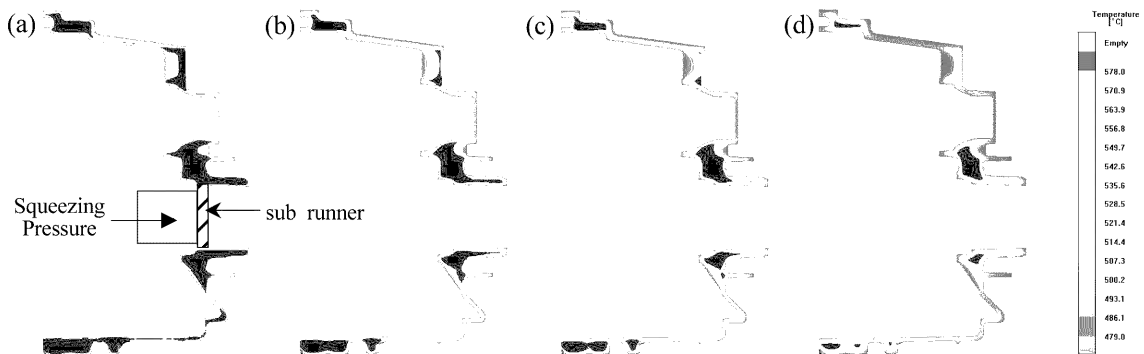


Fig. 12. Solidification simulation of main shaft hole region for the squeeze time design.

성의 해석 결과에서는 reverse gear부위는 비교적 feeding이 양호한 것으로 해석되었으나 main shaft hole부의 feeding성은 국부적으로 10~60% 정도로 feeding성이 낮은 부위가 2개소 나타났으며, 이 부위에 수축결함이 예상된다. 또한 실 주조를 통하여 얻어진 제품의 후육부 2개소를 컴퓨터단층촬영(CT)한 결과, Fig. 11에 보인 바와 같이 feeding성 해석결과와는 완전하게 일치하지는 않았지만 응고해석의 결과에서 가장 높은 온도분포를 보인 최종 응고부에서 조대한 porosity가 발생함을 알수 있었다.

3.3 국부가압효과 및 가압개시시간

수축결함의 발생이 예측되었고 실 주조에서 확인된 후육 2개소에 대한 개선대책으로 응고시 부족분에 대한 용

탕을 국부적으로 가압 충전해주는 방식의 국부가압시스템의 적용을 위한 최적 설계를 위해 Fig. 12와 13에 문제 후육부 2개소의 응고시간별 고액온도 분포를 나타내었다.

해석 결과, Fig. 12의 main shaft hole부의 응고시 온도분포는 응고가 10% 진행 중인 3.1초에서 비교적 결함이 예측되던 전부위가 액상온도영역에 있어 국부가압시에도 가압 충전의 효과가 양호할 것으로 판단되며, 그 이상의 응고진행에서는 액상의 온도영역이 급격히 줄어들면서 가압효과가 매우 떨어질 것으로 예상된다. 단, Main shaft hole의 국부가압을 위해서는 Fig. 12(a)와 같이 hole 가운데 원형의 sub runner의 추가 설치가 필요하다. 또한 Fig. 13의 reverse gear부의 응고온도 분포는 응고율이 30% 진행되는 시점인 4.3초까지는 비교적 문

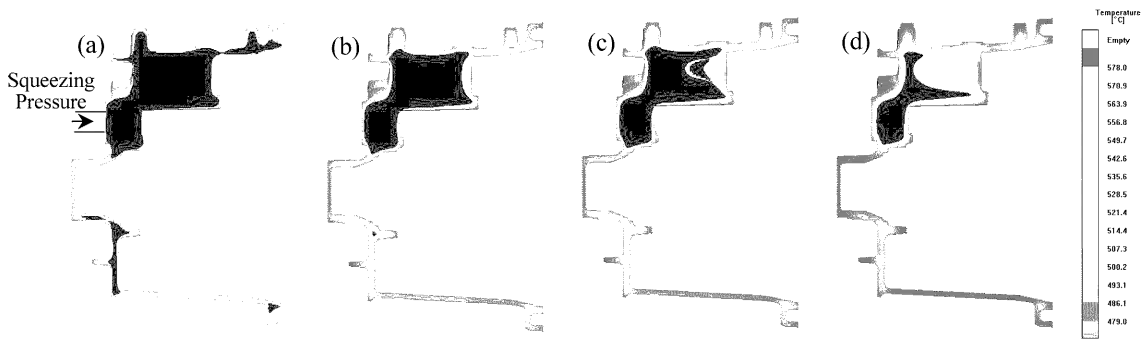


Fig. 13. Solidification simulation of reverse gear region for the squeeze time design.

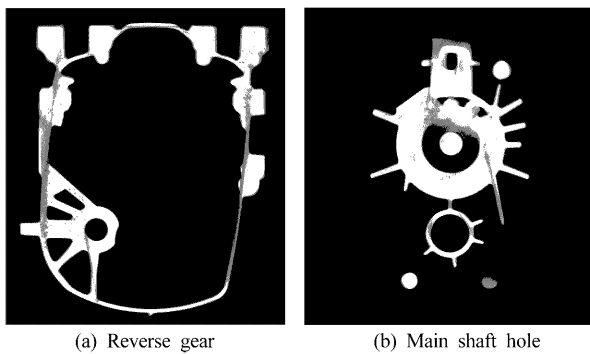


Fig. 14. CT photographing results by Local squeeze effect.

제부의 액상영역이 양호하게 분포되어 가압시 가압충진의 양호한 효과를 기대할 수 있으나 그 이상의 응고진행에서는 급격하게 액상영역이 줄어들면서 가압의 효과가 떨어질 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 국부가압효과에 가장 큰 영향을 미치는 가압력과 가압개시시간의 설정에 있어 가압력은 주조압력의 5배에 해당하는 약 350 MPa의 압력으로 설계하였으며, 가압개시시간은 본 해석 결과로 얻어진 결과를 토대로 reverse gear 부위는 4.0초, main shaft hole 부위는 3.0초로 설정하여 실 주조에 적용하였으며, 그 결과 Fig. 14의 컴퓨터단층촬영(CT) 결과에서와 같이 문제부위의 결함을 완전하게 제거 할 수 있었다.

4. 결 론

MAGMASoft를 이용하여 자동차 변속기용 gear housing에 대하여 구조해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충전해석 결과 충전과정 중 용탕의 온도 변화를 파악하여 탕회불량의 발생가능성을 확인할 수 있었으며, 이를 바탕으로 시행착오를 대폭 줄일 수 있는 구조방안의 설계 및 overflow 위치의 정확한 설정이 가능함을 알 수 있었다.

2) Air pressure criteria를 적용하여 최종 충전부위의 기포결함 발생 여부를 예측할 수 있었으며, X-ray 촬영(CT)을 통해 실 주조품과 비교한 결과 비교적 해석결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

3) 응고해석 결과 응고거동 및 feeding 분석을 통해 수축결함의 위치를 예측할 수 있었고, 이를 X-ray 촬영을 통해 실 주조품과 비교한 결과 응고거동의 결과는 실제 결함의 위치와 유사하게 해석되었으나 feeding성의 해석 결과와는 다소 차이를 보였다.

4) 결함이 예상되는 후육부의 단면 응고시간의 분석을 통하여 최적의 국부가압개시시간을 예측할 수 있었으며, 실 주조에 국부가압장치를 적용하고 최적조건을 설정한 결과 완전한 결함의 제거효과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 이뤄졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chang Ho Lee, Jae Kwon Choi and Tae Woon Nam, J. Kor. Foundrymen's Soc., **20**(6), 400 (2000).
2. C. P. Hong, J. Kor. Foundrymen's Soc., **15**(1), 5 (1995).
3. Nahad A. El-Mahallawy, Mohamed A. Taha, Engenius Pokora and Friedrich Klein, J. of Mat. Sci. and Tech., **73**(1), 125 (1998).
4. Jing Tao, Anzai Koichi and Niyama Eisuke, in Proceeding of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes, (1996).
5. Zhang Weishan, Xiong Shoumei and Liu Baicheng, J. of Mat. Sci. and Tech., **63**(2), 707 (1997).
6. Jae Kyung Lee, Jeong Kil Choi and Chun Pyo Hong, J. Kor. Foundrymen's Soc., **18**(6), 555 (1998).
7. MAGMA Giβereitechnologie GmbH, MAGMASOFT User's Tutorial Manual., (1997).
8. In Ho Choo, Sung Kon Yu and Jeong Kil Choi, J. Kor. Foundrymen's Soc., **18**(6), 578 (1998).