

Case Study for Casting Design of Automobile Part(Gear Box) Using CAE

Hongkyu Kwon · Moo-Kyung Jang[†]

Dept. of Industrial and Management Engineering, Namseoul University

CAE를 이용한 자동차용 부품(Gear Box)의 주조방안 설계에 대한 사례연구

권홍규 · 장무경[†]

남서울대학교 산업경영공학과

When manufacturing die casting mold, generally, the casting layout design should be considered based on the relation among injection system, casting condition, gate system, and cooling system. Also, the extent or the location of product defects was differentiated according to the various relations of the above conditions.

In this research, in order to optimize casting design of an automobile part (Gear Box) Computer Aided Engineering (CAE) was performed by using the simulation software (Z Cast). The simulation results were analyzed and compared with experimental results. During the mold filling, internal porosities caused by air entrap were predicted and reduced remarkably by the modification of the gate system and the configuration of overflow. With the solidification analysis, internal porosities caused by the solidification shrinkage were predicted and reduced by the modification of the gate system. For making a better production die casting tool, cooling systems on several thick areas are proposed in order to reduce internal porosities caused by the solidification shrinkage.

Keywords : Die Casting, Gate System, FEM(Finite Element Method), CAE, Solidification.

1. 서 론

다이캐스팅 공법은 복잡한 모양의 제품을 단번에 제조할 수 있는 경제적인 대량생산기술로서, 자동차 부품 제조에 있어서 중요한 제조기술이다. 자동차 부품이나 전자부품 등과 같은 높은 치수 안정성과 대량생산에 필

요한 경쟁력 있는 고품질, 저원가, 단납기를 요구하는 산업분야에 있어 최적의 공법으로 각광받고 있는 추세이다 [6]. 그러나 이와 같은 다이캐스팅 주조는 용탕의 고온화, 금형표면에서의 고압화, 제품형상의 복잡화 및 정밀화 등의 문제로 더욱 발전된 금형 제작기술이 요구된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 산업현장에서 널리 쓰이고 있는 CAE 기술의 적용이 다이캐스팅 영역으로까지 폭넓게 적용되고 있다. 일반적으로 다이캐스팅 금형을 제작할 때에는 금형의 레이아웃, 압출장치관계, 주조조건, 탕구계의 설계, 금형의 냉각조건 등을 고려하여 주조방안을 설계해야 한다. 또한 다양한 주조방안에 따라서 주조성형에 의하여 발생하는 제품결함의 정도나 위치가 달라진다[5]. 최근에는 CAE 기술의 발전으로 주조금형을 제

Received 10 November 2012; Accepted 20 November 2012

[†] Corresponding Author : mkjang@nus.ac.ke

© 2012 Society of Korea Industrial and Systems Engineering

This is Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>).

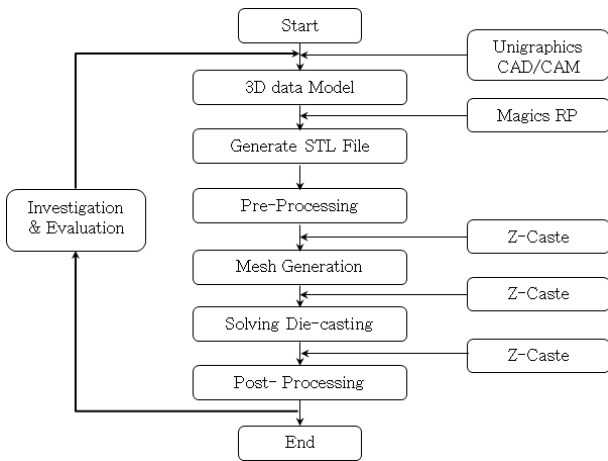
작할 때에 발생하는 기존의 시행착오 과정을 많이 줄일 수 있게 되었다. 결과적으로 생산비용 및 생산기간의 단축과 고품질의 주조품 생산이 가능하게 되었다[4, 7].

본 연구에서는 자동차용 주조제품의 내부 기포를 최소화시키고 품질의 안정성을 확보하기 위하여 유동해석 프로그램(Z-cast)을 이용한 2가지 금형설계 방안에 적용하였다. 충전 및 응고과정 등의 결과를 분석하여 결합 및 결합제어 방안을 강구하고, 실제 다이캐스팅 금형에 적용하여 생산된 제품과 응고 시뮬레이션 해석 결과를 비교 검토하여 최적의 주조방안을 도출하고자 한다.

2. 해석방법

2.1 전산해석 과정

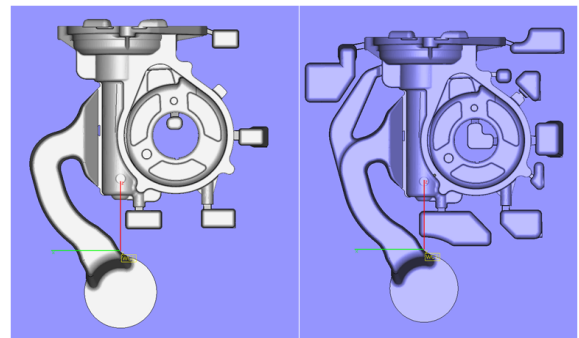
생산기술연구원에서 개발한 주조전용 상용프로그램(Z-cast)은 유한요소법(FEM)의 수치해석기법을 이용하여 용탕의 충전 및 응고해석과정을 수행한다. 일반적으로 주조시뮬레이션의 전반적인 해석과정은 <Figure 1>과 같이 크게 전처리과정, Mesh 생성, 시뮬레이션, 후처리과정으로 구분된다. 3차원 CAD 사용프로그램에서 생성된 형상 모델링을 다른 수치해석 프로그램과 마찬가지로 Z-cast는 STL 형식으로 변환하여 전처리과정에 사용한다[3].



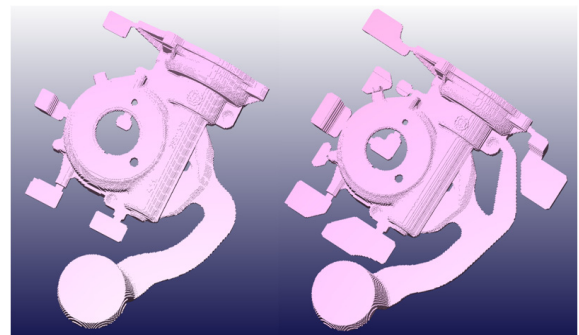
<Figure 1> Flow-Chart of the Die Casting Simulation

본 연구에서 적용된 자동차용 부품(Gear Box)은 3차원 CAD 프로그램(Unigraphics NX6)을 이용하여 3D solid 모

델링을 한 후에 <Figure 2>에서와 같이 3차원 CAD 프로그램(Magics RP)을 이용하여 STL파일로 변환하였다. 전처리과정에서 변환된 STL 파일을 이용하여 주물, Overflow, 탕구, 탕도, 게이트, 주형 등의 재료그룹을 형성한다. Mesh 생성과정에서 자동요소분할은 FEM 방식에 의하여 격자 생성이 되었고, 해석에 이용된 전체 격자 수는 19,584,000 개이다. 각각의 주조방안에 대하여 용탕의 충전 및 응고해석에 사용된 요소형상은 <Figure 3>에 나타내었다.



<Figure 2> Casting data of Gear Box (A) Case 1; (B) Case 2



<Figure 3> Meshed Data of Gear Box with Z-Cast (A) Case 1; (B) Case 2

2.2 해석조건

<Table 1>은 주조해석에 적용된 주물재질(ADC12)의 화학적 조성은 나타내었다[1]. 또한 주조해석에 적용된 해석조건은 <Table 2>에 표시한 바와 같다. 금형재질은 SKD 61종이며, 용탕의 초기온도는 680℃, 금형초기예열온도는 200℃, 주조 중 금형온도는 280℃로 설정하였다. 다이캐스팅머신은 형체력 120Ton인 Cold Chamber Type으로 Tip의

<Table 1> Chemical Property of ADC 12

Cu	Si	Mg	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
1.5~3.5	9.6~12.0	~0.3	~1.3	~0.5	~0.5	~1.0	~0.3	~0.3	~0.2	bal.

지름은 $\phi 70\text{mm}$, Shot Sleeve의 길이는 345mm로 정의하였다. Plunger의 사출조건은 0.4m/s의 저속사출과 245mm의 저속구간이며, 1.6m/s의 고속사출과 100mm의 고속구간으로 2단 사출조건을 설정하였다. 주조 사이클 시간은 50s이며, 형개시간은 5~6s. 승합(성형)시간은 4~5s 주조압력은 135~140MPa로 설정하였다.

<Table 2> Condition and Physical Property for Casting Simulation

Classification	Cast	Mold
Material	ADC12	SKD61
Initial Temperature	680℃	200℃
Casting Temperature	600℃	280℃
Geometry data	Case 1	Case 2
Part Size(mm)	243×315×149	279×319×149
Part Volume(mm ³)	517,383	593,295
Shot sleeve data		
Machine Type	120Ton Cold Chamber type	
Cast pressure	135~140MPa	
Plunger diameter	70mm	
Speed of slow shot	0.4m/s	
Speed of slow shot	1.6m/s	
Length of shot sleeve	345mm	

2.3 해석내용

본 해석에 적용된 주조방안은 <Figure 2>에서와 같이 2가지 방안으로 설정하였다. 방안 1은 주 게이트가 대칭형상을 나타내고, 게이트 사이의 블록형상은 용탕이 금형의 Cavity 중앙에 집중되지 않고 고르게 분산되도록 하기 위한 것이다. 방안 2는 주 게이트에서 한쪽으로 뻗어 나오는 가지(Branch)가 있는 형상으로 주 게이트에서 거리가 먼 부분을 고르게 충전하기 위한 것이다.

2.3.1 충전해석(Runner 및 gate system)

용탕의 유동속도는 충전 과정에서 제품의 품질 및 금형의 수명에 영향을 끼치는 매우 중요한 인자이다. 충전속도가 느린 경우, 높은 열손실로 인하여 당회, 당경 등의 불량률 유발하며, 반면 충전속도가 너무 빠른 경우에는 탕도계(Gate System) 및 금형의 Cavity부에 마모를 촉진시켜서 금형수명을 단축한다[2, 4].

일반적으로 제품의 내부기포가 제품의 품질을 결정하는 경우에는 충전속도를 느리게 한다. 즉, 용탕이 금형내부에 충전되는 동안 공기가 Overflow를 통하여 외부로 배출될 수 있는 시간을 공급하기 위한 것이다. 반면, 제품의 외관이 제품의 품질을 결정하는 경우에는 충전속도를 빠르게 하여 제품의 외관 고급화를 유도한다[5].

앞에서 언급하였듯이 자동차용 부품(Gear Box)은 자동

차 내부의 조향장치에 조립되는 제품으로 제품내부의 기포를 최소화하는 것이다. 각각의 주조방안에 따른 용탕의 흐름을 조사하고 용탕의 흐름이 내부기포에 어떻게 영향을 미치는지 알아보았다. 각각 주조방안으로 실제 금형을 제작하여 해석결과에서 도출된 최적의 주조조건을 시사출에 적용하였다. 해석결과와 비교하기 위하여 주조한 제품을 부위별로 밴드쏘와 선반으로 절단하였다. 절단된 부위별 단면은 육안 검사 및 내부기포 검사를 진행하였다.

2.3.2 응고해석

충진완료를 기준으로 응고진행률과 응고진행시간을 병행하여 응고해석 결과를 나타낸다. 제품의 후육부위는 응고수축결함이 발생할 가능성이 가장 높은 곳으로, 제품의 후육부위를 기준으로 냉각온도 및 응고 진행률을 나타내었다. 응고해석을 통하여 수축결함을 예측하고, 예측결함이 실제주조에서 어떠한 영향을 나타내는지 알아보기 위하여 주조한 제품을 부위별로 밴드쏘와 선반으로 절단하였다. 절단된 부위별 단면은 육안 검사 및 내부기포 검사를 진행하였다.

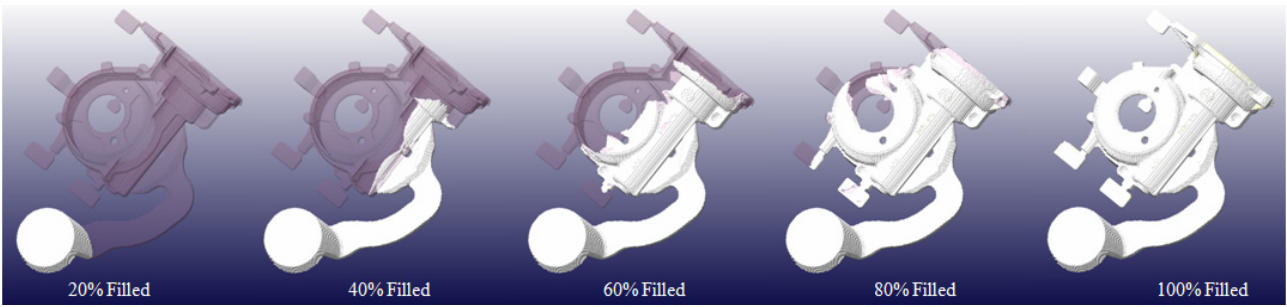
3. 해석결과

3.1 충전해석결과

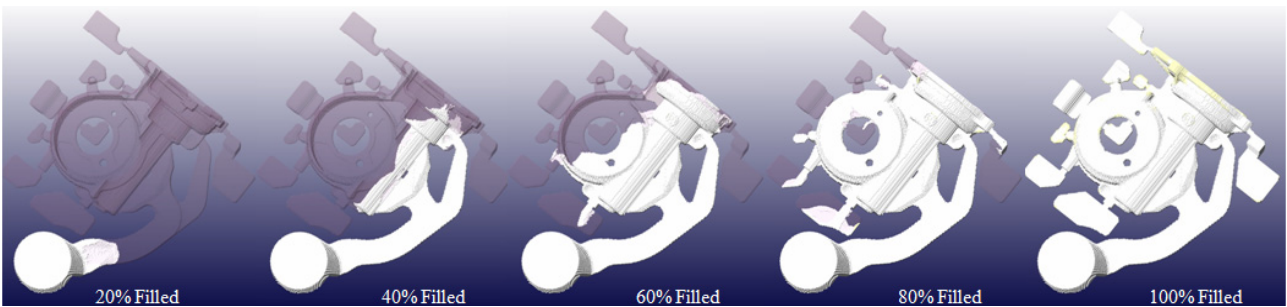
<Figure 4>와 <Figure 5>는 각각의 주조방안에 대한 충전해석 결과로 용탕의 충전거동을 나타내었다. 앞 절의 해석조건에서 언급하였듯이, 유사한 제품의 최적 양산조건 및 제품의 특성을 고려하여 경험적으로 2단 사출속도를 설정하였다. 제품의 내부기포를 최소화하기 위하여 저속(0.4m/s)에서 고속(1.6m/s)으로 속도를 전환하는 시점은 제품부의 충전이 약 95%이상정도 진행되는 시점에 설정하였다.

충진과정은 <Figure 4>와 <Figure 5>에서 나타난 바와 같이 저속구간에서 용탕의 과냉이 발생하지 않고 95%이상 충전이 원활히 되는 것을 볼 수 있다. 양방향 충전(방안 2)의 경우에는 동일한 사출속도에 비하여 탕도의 단면적이 커짐으로 용탕의 이동속도는 <Figure 5>의 20% 충전에서 볼 수 있듯이 방안1에 비하여 상대적으로 빠르게 충전이 되는 것을 볼 수 있다. <Figure 5>의 40%와 60% 충전에서 나타난 바와 같이, 주 게이트에서 거리가 먼 부분을 보조게이트가 고르게 충전하는 것을 볼 수 있다. 탕회불량의 발생가능성이 방안 1에 비하여 매우 낮을 것이라고 예측되었다.

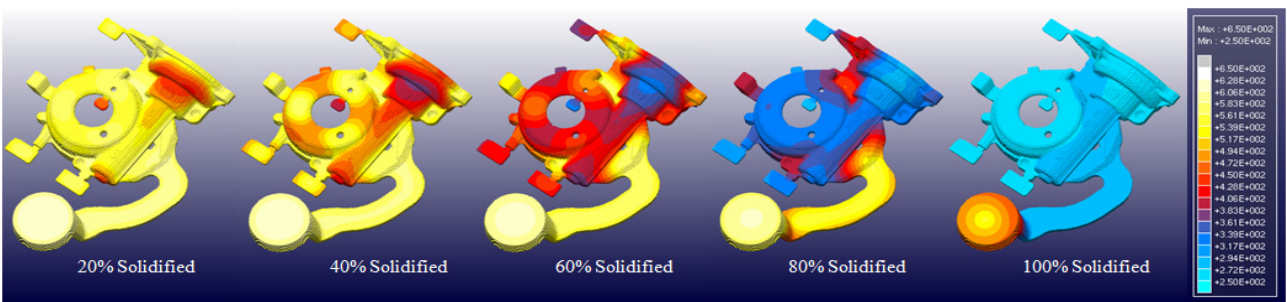
용탕이 충전되는 과정에서 Cavity 내부의 공기가 밖으로 배출되지 못할 경우 Cavity 내부에 그대로 잔존하여 기포



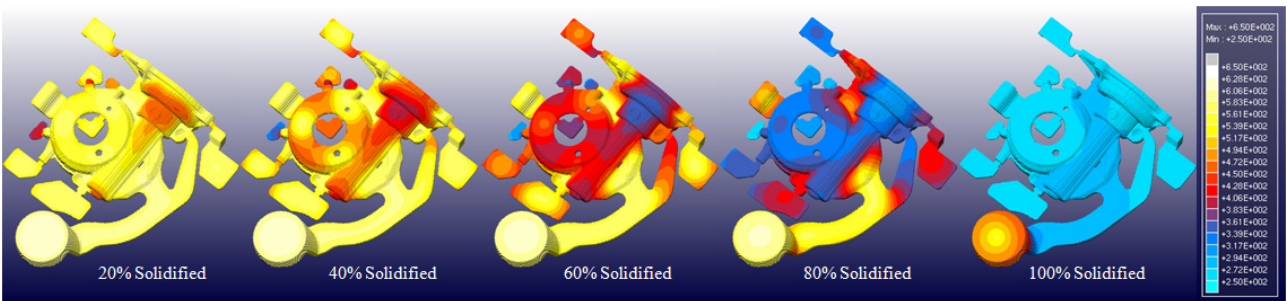
<Figure 4> Simulation Result of the mold Filling(Case 1)



<Figure 5> Simulation Result of the Mold Filling(Case 2)



<Figure 6> Simulation Result of the Solidification(Case 1)



<Figure 7> Simulation Result of the Solidification(Case 2)

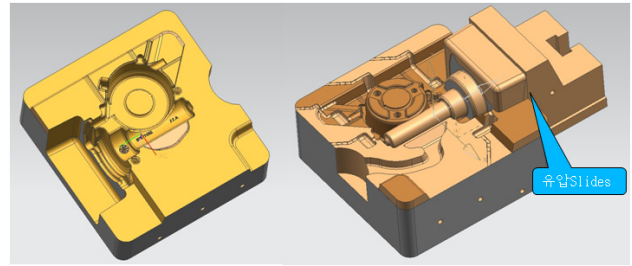
결함의 원인이 된다. 이 원인을 제거하기 위하여 용탕이 서로 만나는 부위(Flow Junction Zone)에 적절히 Overflow를 설치하여 내부기포를 밖으로 배출하여 한다. <Figure 4>와 <Figure 5>의 80%충진에서 나타난 바와 같이, 용탕

이 특정부위에서 서로 만나는 것을 볼 수 있다. 이 영역에서 필연적으로 기포고립(Air Entrap)에 의하여 기포결함의 발생이 예상된다. 이를 개선하기 위하여 방안 2에서 이 영역에 Overflow를 추가하였다.

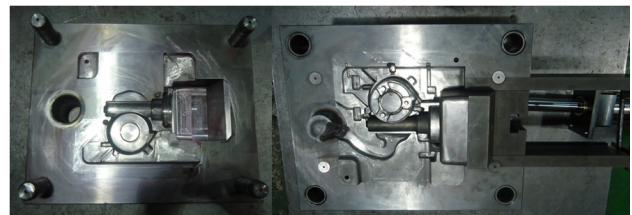
3.2 응고해석 결과

앞에서 언급한 바와 같이, 응고거동은 충전이 완료된 이후에 진행이 되므로 주조방안이나 주조조건 등이 응고에 미치는 영향이 미미하여 해석결과에 크게 차이가 나타나지 않는다. <Figure 6>과 <Figure 7>에서 나타난 바와 같이, 응고가 60% 이상 진행하여도 제품의 후육부 및 게이트에서 먼 부위는 액상선 부근의 온도인 540~590℃의 온도분포를 보이고 있으며 또한 응고속도가 매우 느리게 진행되고 있다.

응고가 거의 완료되기 직전인 80%의 응고율에서도 후육부 2개소는 430~470℃의 온도분포를 보이고 있으며 응고속도도 매우 느리게 진행됨을 알 수 있었다. <Figure 6>과 <Table 7>의 80% 응고율에서 나타난 바와 같이, 동일한 후육부 2개소가 최종 응고부위로 잔존하게 되어 응고수축의 결함을 예측하게 되었다. 후육부 2개소는 수축기공 발생을 예측하고 실 주조품의 동일부위를 절단하여 육안검사 및 수축기공을 측정하여 결과를 비교하였다.



<Figure 8> Tool Modeling of Gear Box
(A) Upper; (B) Lower



<Figure 9> Die-casting Tool of Gear Box
(A) Upper; (B) Lower

4. 실험결과 및 비교

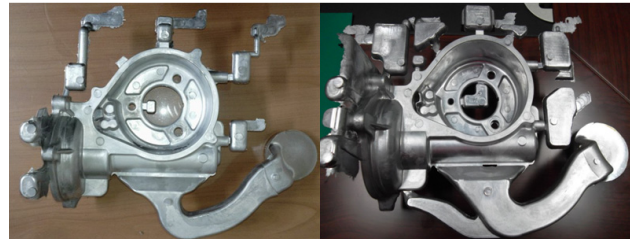
앞에서 언급한 바와 같이 각각의 주조방안에 따라 제품을 주조한 후에 제품은 부위별로 절단하여 육안검사를 하고 내부기포를 디지털 버니어캘리퍼스로 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

4.1 금형모델링 및 제작

<Figure 8>에서 확인할 수 있듯이, 주조 시뮬레이션 결과를 감안하여 금형설계를 하였다. <Figure 8>(B)의 금형모델링에서 확인할 수 있듯이, 제품의 구조로 인하여 금형 상하측 외에 추가로 1개의 유압 슬라이드가 작동하여야 제품을 원활하게 추출할 수 있는 제품이다. 제품의 사이즈 및 금형비용을 최소화하기 위하여 다이캐스팅 기계는 120Ton Cold Type에 적용이 가능하도록 몰드베이스를 제작하였다.

<Figure 9>(A)와 <Figure 9>(B)는 제작된 다이캐스팅 금형을 보여준다. 다이캐스팅 금형사이즈는 가로 460mm 세로 570mm 두께 460mm이고, 금형코어 재질은 SKD61 종에 열처리를 하여 제작하였다. 금형코어 및 슬라이더의 경도는 46HRc로 설정되었다. <Figure 8>의 금형모델링에서 언급한 바와 같이 제품 추출을 원활히 하기 위하여 유압 슬라이더를 다이캐스팅금형에 설치하였다.

<Figure 2>에서와 같이 제품은 각각의 주조방안에 따라 제작된 금형에 게이트 방안을 수정하여 주조하였다.



<Figure 10> Casted Gear Box
(A) Case 1; (B) Case 2

각각의 주조방안에 대하여 시뮬레이션 결과와 실제 주조품의 결과를 비교하기 위하여 <Figure 10>에서 나타난 바와 같이 제품을 주조하였다.

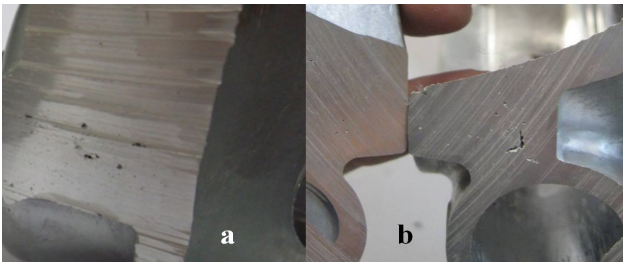
4.2 결과비교 및 고찰

<Figure 11>는 시뮬레이션 결과와 실제 주조품의 결과를 비교하기 위하여 제품의 절단방향을 표시하였다. <Figure 6>과 <Table 7>의 응고해석에서 제품의 후육부 (A, B section) 및 게이트에서 먼 부위(C section)는 응고속도가 매우 느리게 진행됨을 알 수 있었다. 또한, 80% 응고율에서 나타난 바와 같이 최종 응고부위로 잔존하게 되어 응고수축의 결함을 예측하게 되었다. 실제 주조품의 동일부위를 절단하여 육안검사 및 수축기공을 측정하여 결과를 비교하였다.

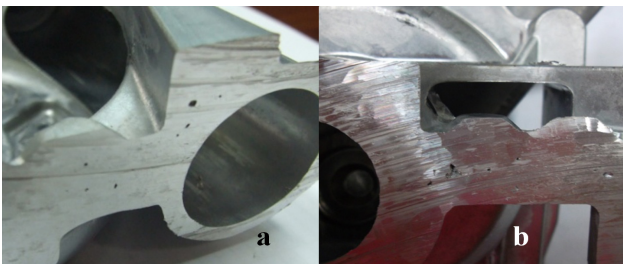
<Figure 12>~<Figure 14>는 각각의 주조방안에서 주조된 제품의 절단부위를 보여준다. <Figure 12>~<Figure 14>

에서 나타난 바와 같이, 주조방안 1이 대체적으로 많은 기포를 내포하고 있다. 기포의 크기는 디지털 버니어캘리퍼스를 이용하여 개략적으로 측정하였다.

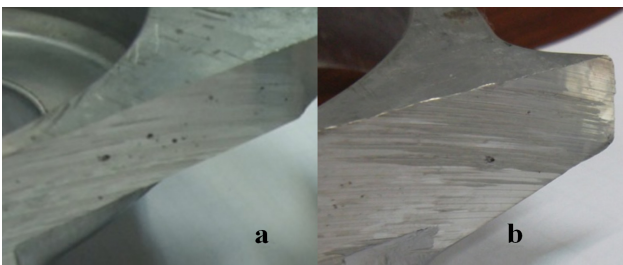
- <Figure 12>에서 나타난 바와 같이, 절단부위 A는 주조방안 1에서 크기가 1mm 이상인 기포가 여러 개 관측되었고, 주조방안 2에서 크기가 1mm 이상인 기포가 한 개 관측되었다.
- <Figure 13>에서 나타난 바와 같이, 절단부위 B는 주조방안 1에서 크기가 1mm 이상 또는 0.5mm 이상의 기포가 여러 개 관측되었고, 주조방안 2에서 1mm 이상 또는 미세기포가 관측되었다.
- <Figure 14>에서 나타난 바와 같이, 절단부위 C는 주조방안 1에서 크기가 1mm 이상 또는 미세 기포가 여러 개 관측되었고, 주조방안 2에서 1mm 미만의 미세기포가 관측되었다.



<Figure 12> Cut Section A of the Casted Parts : (A) Case 1; (B) Case 2



<Figure 13> Cut Section B of the Casted Parts : (A) Case 1; (B) Case 2



<Figure 14> Cut Section C of the Casted Parts : (A) Case 1; (B) Case 2

5. 결 론

자동차 제품(Gear Box)을 유동해석 프로그램 (Z-Cast)을 이용하여 주조방안에 대한 해석 및 간이 다이캐스팅 금형을 이용한 시험주조에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 충전해석 결과에서 주조방안2가 주조방안1보다 용탕의 흐름이 고르게 분포하는 것을 볼 수 있었다. 또한 탕회불량이 가능한 부위를 확인할 수 있어서 시행착오를 대폭 줄일 수 있었다.
- 2) 충전해석 결과에서 용탕이 서로 만나는 부위 (Flow Junction Zone)에 적절히 Overflow를 설치하여 시행착오를 줄이고 내부기포를 적절히 제거할 수 있었다.
- 3) 저속구간에서 가능한 느린 속도로 용탕을 충전하여 내부기포가 외부로 배출될 수 있도록 한다. 본 실험에서 다음의 사출조건이 0.4m/s의 저속사출과 245mm의 저속구간이 가장 좋은 것으로 판단되었다.
- 4) 응고해석 결과에서 응고수축에 의하여 발생하는 수축결함 위치를 파악할 수 있었고, 실제 주조제품의 절단부위를 비교한 결과 유사한 위치 및 결과를 얻을 수 있었다.
- 5) 실제 주조제품의 절단부위를 비교한 결과 부위별로 약간의 차이가 있으나 주조방안 2가 주조방안 1보다 수축결함에 의하여 발생하는 내부기포를 대폭 줄일 수 있었다.
- 6) 양산금형의 주조방안을 설계하기 위하여 최종 후유부에 추가적인 냉각시스템을 설치함으로써 수축에 의하여 발생하는 내부 기포를 완전히 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2012년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

- [1] Hong, S.K., Series I : Melting and casting of Aluminum Alloys. *Journal of The Korea Foundry Society*, 2008, Vol. 28, No. 2, p 45-51.
- [2] Kim, E.S., Park, J.Y., Kim, Y.H., Son, G.M., and Lee, K.H., Evaluation of Diecasting Mold Cooling Ability by Decompression Cooling System. *Journal of The Korea Foundry Society*, 2009, Vol. 29, No. 5, p 238-243.
- [3] Kim, J.K. and Kim K.Y., Improvement of Mold Filling in Aluminum Gravity Die Casting by Vacuum Suction. *Journal of The Korea Foundry Society*, 2009, Vol. 29,

- No. 3, p 138-143.
- [4] Kim, Y.C., Choi, S.W., Cho, J.I., Jeong, C.Y., and Kang, C.S., Optimization of the Thin-walled Aluminum Die Casting Die Design by Solidification Simulation. *Journal of The Korea Foundry Society*, 2008, Vol. 28, No. 4, p 190-194.
- [5] Park, J.Y., Kim, E.S., Park, Y.H., and Park, I.M.; Optimization of Casting Design for Automobile Transmission Gear Housing by 3D Filling and Solidification Simulation in Local Squeeze Diecasting Process. *Korean Journal of Materials Research*, 2006, Vol. 16, No. 11, p 668-675.
- [6] Park, Y.K. and Yang, J.M., Scheduling of a Casting Sequence Under Just-In-Time (JIT) Production. *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2009, Vol. 32, No. 3, p 40-48.
- [7] Shin, H.W., Chung, Y.J., and Kang, S.G., A Study on Die Casting Process of the Automobile Oil Pan Using the Heat Resistant Magnesium Alloy. *Journal of KSEM*, 2009, Vol. 17. No. 3, p 45-53.