

권홍규 · 장무경[†]

남서울대학교 산업경영공학과

Case Study for Developing Automobile Part (Steering Wheel) using Vacuum Die-Casting Mold

Hongkyu Kwon · Moo-Kyung Jang[†]

Dept. of Industrial and Management Engineering, Namseoul University

When manufacturing die casting mold, generally, the casting layout design should be considered based on the relation between injection system, casting condition, gate system, and cooling system. Also, the extent or the location of product defects were differentiated according to the various relations of the above conditions. High-qualified products can be manufactured as those defects are controlled by the proper modifications or the changes of die casting mold with the conditions.

In this research, the proper manufacturing method was derived intensively for reducing the defect of the internal porosity of steering wheel housing which is very complicated to achieve a good mold design. The method was also derived for minimizing and for guaranteeing the product quality through the analysis of the casting problem and the deduction of alternative plans.

Keywords : Die-Casting, Gate System, Steering Wheel, Vacuum Block

1. 서 론

다이캐스팅 공법은 자동차 부품 제조기술 중에서 가장 중요한 기술로서, 복잡한 모양의 제품을 단번에 제조할 수 있는 경제적인 주조기술 중의 하나이다. 자동차 부품이나 전자부품 등과 같은 높은 치수 안정성과 대량생산에 필요한 경쟁력 있는 고품질, 저원가, 단납기를 요구하는 산업분야에 있어 최적의 공법으로 각광받고 있는 추세이다[6]. 또한 글로벌화된 국제 경쟁사회에서 주조업계에서는 제품개발기간의 단축, 제조원가의 인하 및 고품질 등을 요구받고 있다[4, 7].

일반적으로 다이캐스팅 금형을 제작할 때에는 금형의

레이아웃, 압출장치관계, 주조조건, 탕구계의 설계, 금형의 냉각조건 등을 고려하여 주조방안을 설계하여야 한다. 또한 다양한 주조방안에 따라서 주조성형에 의하여 발생하는 제품결함의 정도나 위치가 달라진다[5]. 위의 조건들을 적절히 수정 또는 변경하여 주조결함을 제어함으로써 품질이 우수한 다이캐스팅 부품을 제조할 수 있다. 자동차 부품 중에서 조향장치는 주조업계에서 대표적인 제품형상으로 주조방안 설계가 상당히 난이한 제품군에 속한다[3].

본 연구에서는 주조방안 설계가 난이한 steering wheel 주조부품의 내부 기포결함을 최소화시키고 품질의 안정성을 확보하기 위하여 시제품의 문제점을 분석하고 대안을 도출하여 최적의 주조방안을 도출하고자 하였다.

논문접수일 : 2012년 05월 17일 논문수정일 : 2012년 05월 26일 게재확정일 : 2012년 06월 14일

[†] 교신저자 mkjang@nus.ac.ke

※ 논문은 2011년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

2. 실험 방법

2.1 개발목표

앞에서 언급한 바와 같이, steering wheel housing은 자동차의 조향장치를 감싸고 있는 제품으로 조향장치의 내부는 유압 또는 전자기계식으로 작동을 한다. 따라서 주조조건을 최적화하여 기포결함을 최소화하는 것이 이 제품의 특성이다. 제작된 시제품은 상용생산라인을 검증하고, 다른 부품들과 조립성 및 신뢰성 검증을 위하여 사용된다. 또한 시작금형개발에서 획득한 최적의 주조방안을 차후 양산금형개발에 적용하는 것이 부수적인 목적에 속한다.

<표 1> 제품 부위별 허용치 기포 급수

Location	Areas	Porosity Class
1	Machined Seal Surfaces	PK 4
2	Machined Bearing Bores/Surfaces	PK 2
3	Housing Mounting Flanges	PK 4
4	Rack Bearing Bore and Threads	PK 7
5	Housing Mounting Screw Holes	PK 4

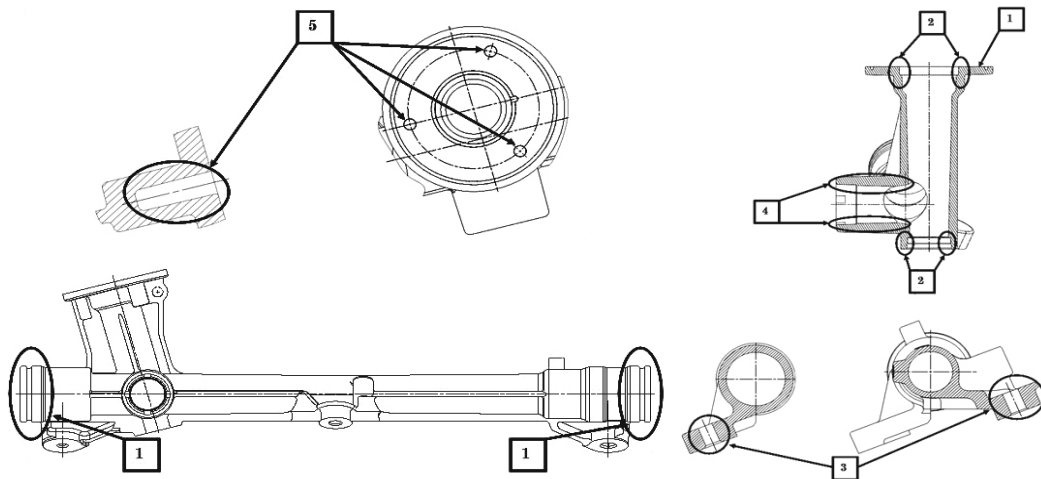
<표 1>은 제품의 부위별 허용치 기포급수를 나타내며, 제품의 부위별 기포급수는 <그림 1>에 보인 바와 같이 도식화하여 정리하였다. <표 2>는 각각의 기포급수에 대한 설명이다. 예를 들어 PK2는 기본적으로 기포지름이 0.4mm 이하이고 기포간의 간격은 8mm 이상이어야 한다. 그리고 간격 1mm 이내에 미세기포(지름 0.2mm 이하)가 3개 이상 발견되지 않아야 한다.

2.2 금형모델링 및 제작

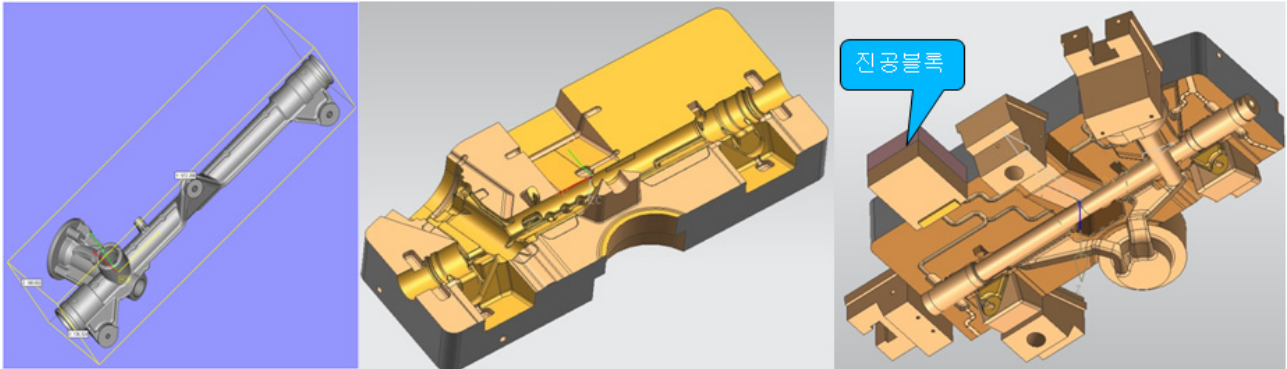
<그림 2>(A)에서 확인할 수 있듯이, steering wheel housing의 사이즈는 가로 572mm, 세로 180mm, 두께 136mm이며 3차원 형상으로 모델링 되었다. 부위별 허용치 기포급수는 <그림 1>에 나타난 바와 같이 section 1과 2부위(디스크 모양)는 전자제어 모터 및 조타 축(steering shaft)이 결합되는 부위로서 가장 까다로운 기포급수를 요구하고 있다. 고객의 요구조건을 최대한 감안하여 금형설계 과정에 진공블록(chill band type)을 설치하였다. <그림 2>(C)에 나타난 바와 같이, section 1과 2부위의 기포발생을 최소화하도록 진공블록을 설계하였다. <그림 2>(B)와 <그

<표 2> 제품 부위별 허용치 기포 급수

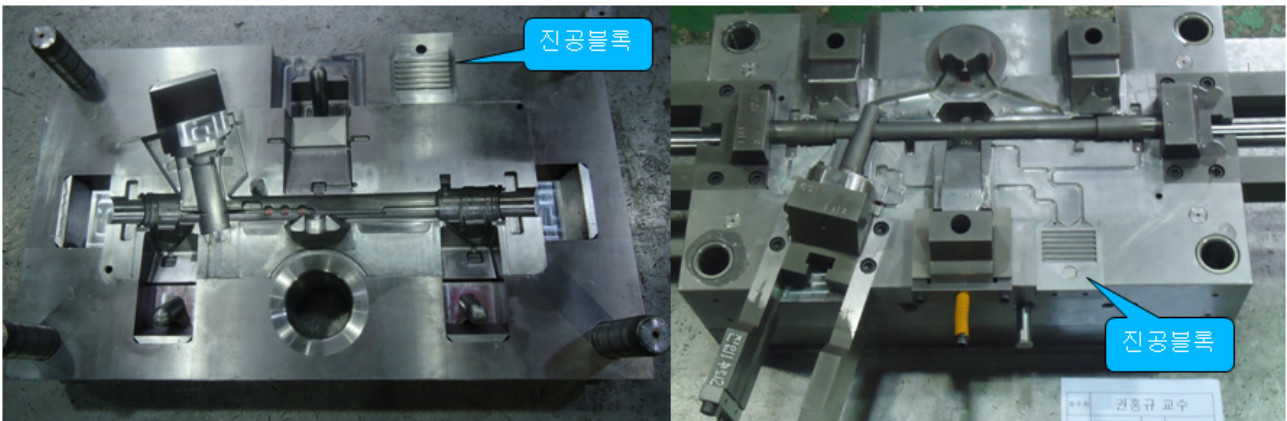
No	Parameters	Pk.2	Pk.3	Pk.4	Pk.5	Pk.6	Pk.7
1	Maximum diameter of Pores(mm)	.4	.7	1.0	2.0	3.0	4.0
2	Minimum distance between two pores(mm)	8	15	20	25	30	30
3	Are not considered pores with diameter less than or equal to(mm)	.2	.4	.6	1	1	1
4	In exception to item 1 maximum allowable porosity size as a percentage of wall cross section	N/A	N/A	30%	30%	30%	30%
5	In exception to item 2 if there is only one group of 3 pores, the minimum distance between the pores can be(mm)	1.0	1.5	2	3	3	3
6	In exception to item 1 if there is only one pore, the maximum diameter of it can be(mm)	.6	1.0	1.5	2.5	3.5	4.5



<그림 1> 제품부위별 허용치 기포급수



<그림 2> (A) 제품 모델링; (B) 금형 모델링_상측; (C) 금형 모델링-하측 및 slides



<그림 3> (A) 다이캐스팅 금형_상측; (B) 다이캐스팅 금형-하측 및 slides

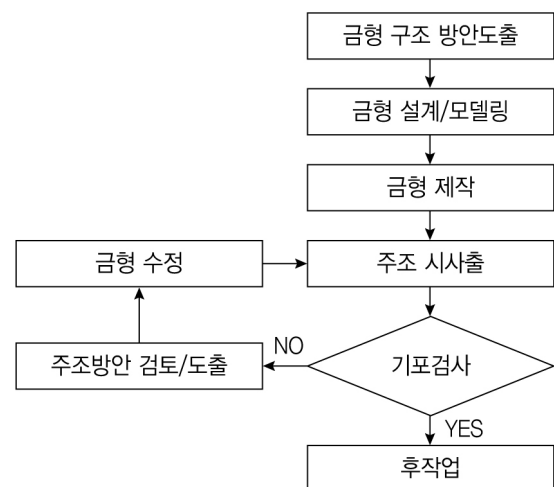
림 2>(C)의 금형 모델링에서 확인할 수 있듯이, 제품의 복잡한 구조로 인하여 금형 상하측외에 추가로 6개의 유압 slide가 작동하여야 제품을 원활하게 추출 가능한 제품이다. 제품의 사이즈 및 금형 비용을 최소화하기 위하여 다이캐스팅 기계는 850ton cold type에 적용이 가능하도록 몰드베이스를 제작하였다.

<그림 3>(A)와 <그림 3>(B)는 제작된 다이캐스팅 금형을 보여준다. 다이캐스팅 금형 사이즈는 가로 940mm, 세로 550mm, 두께 475mm이고, 금형 코어재질은 SKD61종에 열처리를 하여 제작하였다. 금형 코어 및 slides의 경도는 46HRC로 설정되었다. <그림 2>의 금형 모델링에서 언급한 바와 같이 section 1과 2부위의 내부 기포를 최소화하기 위하여 <그림 3>에 나타난 바와 같이 요구한 진공블록(chill band type)을 다이캐스팅금형에 설치하였다.

2.3 실험조건 및 절차

<그림 4>는 실험절차를 도식화하였다. 금형 제작 후 <그림 4>에 나타난 바와 같이 주조실험을 진행하였다. 본 실험에 사용된 재료는 Al-Si-Cu계 합금(ADC12)이며

일반적으로 주조제품에 사용되는 재료 중에 가장 주조성이 뛰어난 재료이다. 이 재료는 Al-Si계 합금에 Cu를 첨가한 것으로 그 조성은 <표 3>과 같으며, 재료의 기계적 성질은 <표 4>에 나타냈다[1].



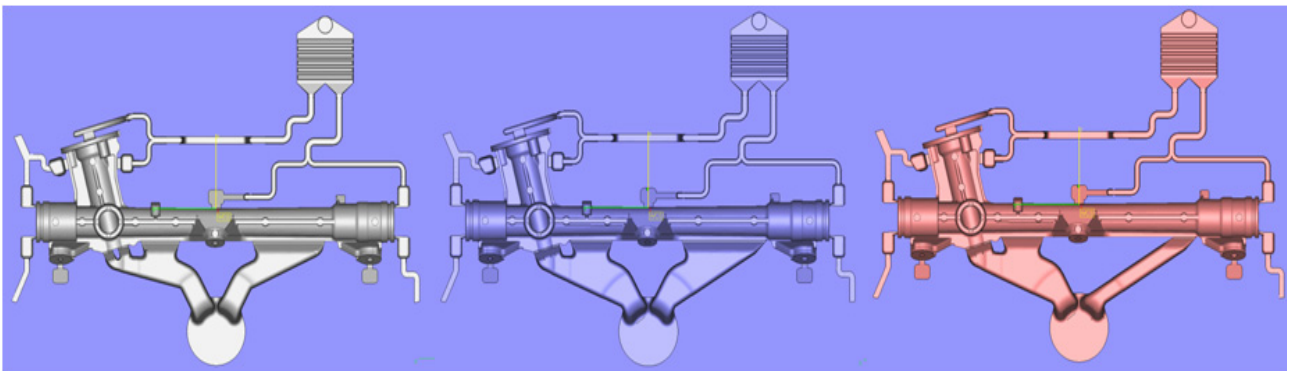
<그림 4> 실험절차

<표 3> 재료의 화학적 조성

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.

<표 4> 알루미늄 합금(ADC12)의 기계적 성질

인장강도 (N/mm ²)	0.2% 내력 (N/mm ²)	신율 %	충격치 (kJ/m ²)	피로강도(N/mm ²) 2X10 ⁷ 회
295	185	2.0	81	140



<그림 5> 주조방안 모델링_(A) Case1: (B) Case2: (C) Case3.

본 실험에서 적용하고자 하는 steering wheel housing의 3가지 주조방안에 대하여 <그림 5>에서와 같이 CAD 프로그램(Unigraphics Nx6)을 이용하여 3D solid 모델링을 하였다. 실험에 사용된 주조조건으로 용탕의 초기온도는 6700c, 금형초기에열온도는 2000c, 주조 중 금형온도는 2800c로 설정하였다. 다이캐스팅머신은 형체력 850ton인 cold chamber type으로 tip의 지름은 $\phi 80\text{mm}$, shot sleeve의 길이는 1045mm로 정의하였다. Plunger의 사출조건은 0.72 m/s의 저속사출과 270mm의 저속구간이며, 1.6m/s의 고속사출과 775mm의 고속구간으로 2단 사출조건을 설정하였다. 주조 cycle time은 80s이며, 형개시간은 15~16s. 승합(성형)시간은 21~24s 주조압력은 130~140MPa로 설정하였다.

시사출후에 제품의 내부기포를 부위별로 검사하기 위하여 1차로 밴드쏘와 선반으로 단면을 절단하여 육안 검사를 하였다. 2차로 X-ray 방사선 투과 검사를 이용하여 부위별 내부기포 검사를 진행하였다. 검사결과를 부위별 기포 허용치와 비교하여 고객의 요구조건에 도달하지 못할 경우, 전문가 및 작업자의 의견을 취합하여 주조방안을 도출하였다. 도출된 주조방안을 근거로 하여 금형수정을 진행하였고 다시 시사출을 하여 기포검사를 진행하였다. 고객의 요구조건을 만족할 때까지 위와 같은 방안(trial and error 방법)을 반복하여 최적의 주조방안에 근접한 시작 다이캐스팅 금형을 제작하였다.

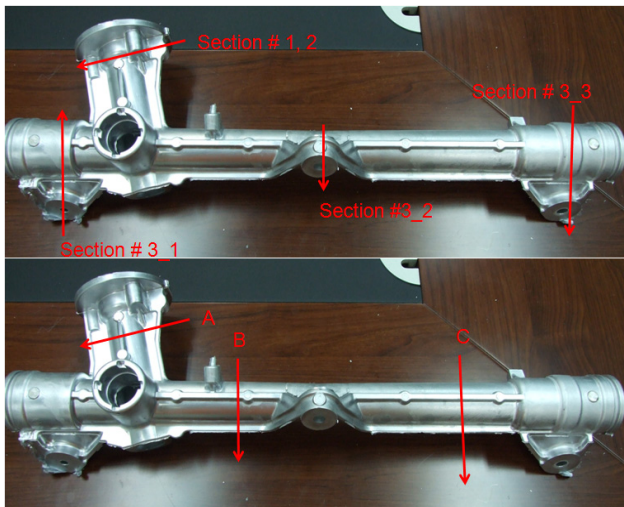
2.4 실험내용

충진 과정에서 주조조건(즉, 유동속도, 온도, 기타 등등) 및 gate의 위치는 제품의 품질과 금형 모두에 중요한 요인으로서 충진 속도가 매우 느린 경우 높은 열손실과 함께 미성형 및 탕경 등의 불량률 유발하며, 또한 내부의 가스가 적절히 배출되지 못하여 가스의 포집 및 개재물에 의한 드로스(dross)를 유발한다. 반면 너무 빠른 충진속도는 높은 유동압력으로 인하여 gate 및 금형의 상부에 마모를 촉진시키므로 적절한 유동속도를 유지할 수 있는 탕구 및 탕도, 그리고 탕도계(gate system)의 설계가 요구된다[2].

본 실험에서 적용된 주조방안은 <그림 5>에서와 같이 크게 3가지 방안으로 방안 1은 주탕도(runner)와 보조탕도(branch)가 양쪽으로 뻗어 나오는 대칭형 형상이고, 방안 2는 방안 1에서 제품 내부의 충진을 원활히 하고 가스배출을 돕기 위하여 gate의 폭을 최대한 넓게 한 형상이며, 방안 3는 제품 중앙의 housing mounting flanges에 발생하는 난류를 방지하기 위하여 보조탕도(branch)의 gate 폭을 크게 축소 한 형상이다.

3. 실험결과 및 고찰

<그림 6>(A)에 나타난 바와 같이 각각의 주조방안에

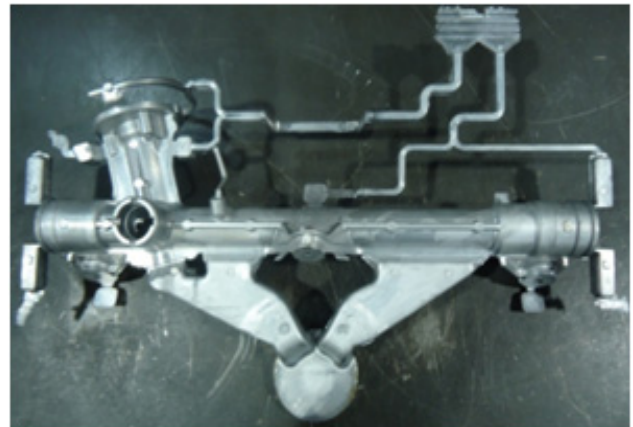


<그림 6> 절단방향_(A) 육안검사 위치; (B)X-ray 검사

대하여 제품을 주조한 후에 1차적으로 제품은 부위별로 절단하여 기포검사를 진행하였다. <그림 6>(B)와 같이 검사의 신뢰도를 높이기 위하여 제품을 절단하여 X-ray 검사를 추가로 실시하였다. 다음의 장에서 각각의 주조방안에 대한 현상분석 및 새로운 방안도출과정을 상세하게 설명할 것이다.

3.1 주조방안 1에 대한 현상분석

<그림 7>은 주조방안 1로 주조한 제품의 사진을 나타낸다. <그림 7>에서 나타난 바와 같이 <그림 5>(A)에서 나타낸 <주조방안 1>의 모델링 데이터와 외관상 비슷한



<그림 7> 주조방안 1의 주조제품

형상을 나타낸다. <표 5>는 주조방안 1에 대한 육안 및 X-ray 검사에 대한 결과를 나타냈다. 또한 각 부위에 대한 기포급수를 <표 5>에 요약하였다. 절단 후에 기포의 크기를 버니어캘리버로 측정한 결과, section 1과 2에서는 직경 2.5mm 이상이 되는 기포가 발견되었고, section 3_1과 3_3에서는 직경 1.0mm 이하의 기포가 발견되었으며, section 3_2에서는 직경 3.0mm 이상의 기포가 발견되었다. <표 5>의 X-ray 검사결과에서 나타난 바와 같이 section 1과 2에서는 후육부위에 집중적으로 기포가 분포하는 것으로 판단되고 section 3_2에서 가장 많은 기포들이 넓게 분포하는 것으로 판단된다. 또한 section 3_1과 3_3에서는 미세 기포들이 넓게 분포하고 있다. 현재 나타난 현상에 대하여 특성요인 분석을 전문가 및 작업자의 의견을 바탕으로 새로운 주조방안을 도출하였다.

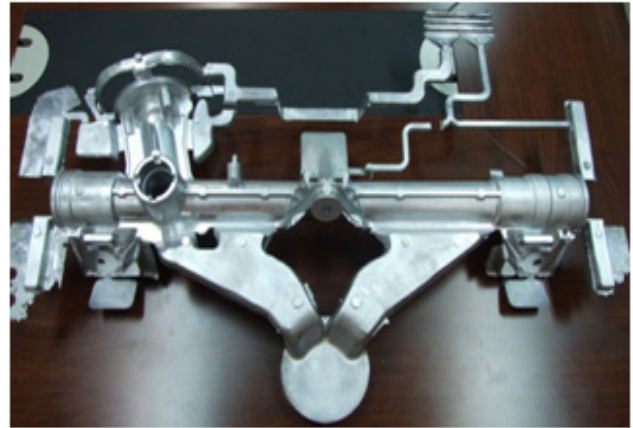
<표 5> 주조방안 1에 대한 내부 기포검사

	section # 1 & 2	section # 3_1	section # 3_2	section # 3_3
육안 검사				
X-ray 검사				
부위별 기포급수	PK6	PK4	PK7	PK4

3.2 주조방안 1에 대한 대책

앞에서 언급한 바, 주조방안 1에서 나타난 부위별 기포를 최소화하기 위하여 다음의 대책을 도출하여 주조방안 2에 적용하였다.

- 충진을 원활히 하기 위하여 gate의 폭을 최대한 넓힌다.
- 가스빼기를 원활히 하기 위하여 진공블럭과 연결된 연결선의 폭을 2배로 넓힌다.
- 진공블럭과 연결된 불필요한 연결선은 가스빼기에 방해가 됨으로 차단한다.
- 내부기포를 줄이기 위하여 현 상태의 overflow를 2.5배 이상 크게 한다.
- 내부기포를 줄이기 위하여 필요한 부위에 overflow를 추가한다.



<그림 8> 주조방안 2의 주조제품

3.3 주조방안 2에 대한 형상파악

<그림 8>은 주조방안 2로 주조한 제품의 사진을 나타낸다. <그림 8>에서 나타난 바와 같이 주조제품은 <그림5>(B)에 나타난 주조방안 2의 모델링 데이터와 외관상 유사한 형상을 나타내고 있다. <표 6>은 주조방안 2에 대한 육안 및 X-ray 검사에 대한 결과를 나타냈다. 또한 각 부위에 대한 기포급수를 <표 6>에 요약하였다. 각각 부위별로 기포의 크기를 버니어캘리버로 측정한 결과, section 1과 2에서는 직경 0.5mm 이하의 기포가 발견되었고, section 3_1과 3_3에서는 직경 0.7mm

이하의 기포가 발견되었으며, section 3_2에서는 직경 1.5mm 이하의 기포가 발견되었다. X-ray 검사결과에서도 section 1과 2에서는 후육부위의 기포가 거의 제거된 것으로 판단되고 section 3_1과 3_3에서는 아직 미세 기포들이 분포하고 있다. Section 3_2는 절단검사에서 미세기포가 발견되었지만 X-ray 검사결과에서는 가장 많은 기포들이 넓게 분포하는 것으로 판단된다. 검사결과에 나타난 바와 같이 부위별 기포결함은 주조방안 1에 비하여 많이 향상되었으나, 실제 pilot 생산에서 section 3_2의 기포불량으로 인하여 불량률이 50%에 도달하였다. Section 3_2의 내부기포문제를 개선하기 위하여 전문가 및 작업자의 의견을 바탕으로 새로운 주조방안 및 대책을 도출하였다.

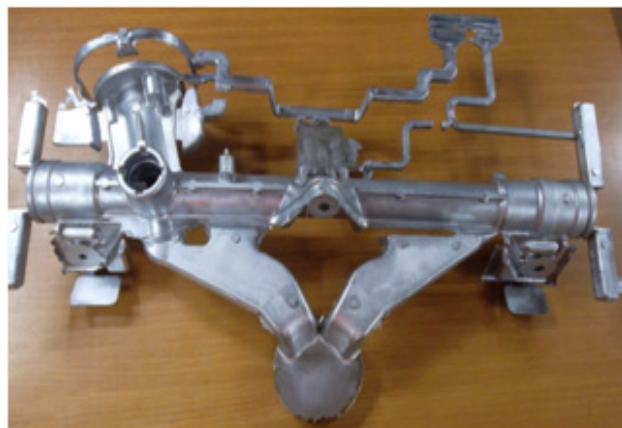
<표 6> 주조방안 2에 대한 내부 기포검사

	section # 1 & 2	section # 3_1	section # 3_2	section # 3_3
육안 검사				
X-ray 검사				
부위별 기포급수	PK2~PK3	PK3	PK5	PK3

3.4 주조방안 2에 대한 대책

전문가 및 작업자의 의견을 취합한 결과, section 3_2 부위별 기포는 용탕의 와류현상에 의한 것으로 판단되었다. 일반적으로 와류현상이 발생하는 부위에 overflow를 추가하여 내부기포를 줄이지만, 금형구조상 section 3_2에 overflow를 추가할 수가 없다. 와류현상을 최소화하기 위하여 주탕도와 보조탕도에서 section 3_2에 도달하는 용탕의 시차를 적용할 필요가 있다고 판단되었다. 다음의 도출방안을 주조방안 3에 적용을 하였다.

용탕이 section 3_2 부위에 도달하는 도달시점을 다르게 하기 위하여 보조탕도의 gate 폭을 축소한다.



<그림 9> 주조방안 3의 주조제품

3.5 주조방안 3에 대한 형상파악

<그림 9>는 주조방안 3으로 주조한 제품의 사진을 나타낸다. <그림 9>에서 나타난 바와 같이 주조제품은 <그림 5>(C)에 나타난 주조방안 3의 모델링 데이터와 외관상 유사한 형상을 나타내고 있다. <표 7>은 주조방안 3에 대한 육안 및 X-ray 검사에 대한 결과를 나타냈다. 또한 각 부위에 대한 기포급수를 <표 7>에 요약하였다. 각 부위별로 기포의 크기를 버니어캘리버로 측정한 결과, section 1과 2에서는 주조방안 2와 비슷한 결과로 직경 0.5mm 이하의 기포가 발견되었고, section 3_1과 3_3에서는 직경 0.4mm 이하의 기포가 발견되었으며 주조방안 2보다 우수한 결과를 보였다. 특히, section 3_2에서는 직경 0.5mm 이하의 기포가 발견되어 고객의 요구조건을 만족하게 되었다. X-ray 검사결과도 section 1과 2에서는

후육부위의 기포가 거의 제거된 것으로 판단되고 section 3_1, 3_2, 3_3의 미세 기포들이 거의 제거된 것으로 판단되었다. 검사결과에 나타난 바와 같이 부위별 기포결함이 주조방안 2에 비하여 많이 향상이 되었고, 실제 pilot 생산에서 section 3_2의 기포불량으로 인하여 불량률을 5% 미만으로 낮추게 되었다.

4. 결 론

자동차 제품 중 power steering housing은 주조방안을 설계하기가 상당히 난해한 제품군에 속한다. 일반적으로 부분 감압장치를 사용하거나, 또는 감압 진공블럭을 사용한다. 본 연구에서 부분 감압장치를 사용하지 않는 간

<표 7> 주조방안 3에 대한 내부 기포검사

	section # 1 & 2	section # 3_1	section # 3_2	section # 3_3
육안 검사				
X-ray 검사				
부위별 기포급수	PK2~PK3	PK2	PK3	PK2

이 다이캐스팅금형 개발의 사례연구에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 부위별 내부기포를 적절히 제거하기 위하여, 특히 후육부에 overflow와 가스빼기가 충분하게 설계되어 기포가 외부로 충분하게 배출되어야 한다.
- 2) 저속구간에서 가능한 느린 속도로 용탕을 충전하여 내부기포가 외부로 배출될 수 있도록 한다. 본 실험에서 다음의 사출조건이 0.72m/s의 저속사출과 270 mm의 저속구간이 가장 좋은 것으로 판단되었다.
- 3) 일반적으로 용탕의 충진을 원활히 하여 내부기포가 외부로 배출되도록 가능한 gate의 폭을 크게 한다. 본 실험에서 gate 폭을 크게 하는 것도 좋은 방안이지만, 특정부위에 와류현상이 발생하지 않도록 gate의 위치를 적절히 조정하여야 한다.
- 4) 생산성 및 사상비용을 고려한 양산금형의 구조방안을 설계하기 위하여 추가적으로 유동해석(computer simulation)을 이용한 최적의 설계방안을 찾는 것이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- [1] Hong, S. K.; "Series I : Melting and casting of Aluminum Alloys," *Journal of The Korea Foundry Society*, 28(2) : 45-51, 2008.
- [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*, 29(5) : 238-243, 2009.
- [3] Kim, E. S.; "Industrial Technology of Squeeze Casting," *Proceedings of 98 KOREAN-GERMAN Technomart for Automotive Technologies*, Pusan National University, Korea, 1998.
- [4] 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*, 29(3) : 138-143, 2009.
- [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*, 16(11) : 668-675, 2006.
- [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*, 32(3) : 40-48, 2009.
- [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*, 17(3) : 45-53, 2009.