



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

고생산성 대응을 위한 고진공 다이캐스팅
멀티캐비티 공법에 대한 연구

Study on the High Vacuum Die Casting Multi-Cavity
Method for High Productivity

울산대학교 산업대학원

자동차선박기술전공

이 대 호

고생산성 대응을 위한 고진공 다이캐스팅 멀티캐비티 공법에 대한 연구

지도교수 이 상 구

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

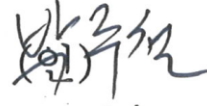


2022년 2월

울산대학교 산업대학원

자동차선박기술전공

이 대 호

이대호 의 공학석사 학위 논문을 인준함

심사위원 박 주 철 
심사위원 전 용 수 
심사위원 이 상 구 

울산대학교 산업대학원

2022 년 2 월

고생산성 대응을 위한 고진공 다이캐스팅 멀티캐비티 공법에 대한 연구

이 대 호

울산대학교 산업대학원 자동차선박기술전공

요약

본 연구는 1 개의 금형에 여러 개의 부품을 배치하는 멀티캐비티 공법을 통하여, 알루미늄 고진공 다이캐스팅 차체부품의 생산성 향상을 목적으로 한다.

현재 자동차 산업에서는 CO₂ 규제 등에 대응하기 위한 연비 전쟁이 진행중에 있다. 최근 전기차 시대로 접어들면서, 항속거리 증가를 위한 배터리 용량 등의 증대로 차량 중량은 오히려 증가 추세에 있는 상황이기 때문에, 차량 경량화는 가장 큰 시대의 화두라고 할 수 있으며, 이를 해결하기 위한 방법으로 알루미늄 다이캐스팅 공법이 적극적으로 활용되어지고 있다.

다이캐스팅 공법은 용융된 알루미늄을 고속 · 고압으로 금형에 주입하여 제품을 성형하는 방법으로 용탕의 거동에 의한 기포의 고립, 응고 수축에 의한 기공 등 제품의 내부 결함을 유발할 수 있기 때문에, 높은 기계적 물성치가 요구되는 자동차 차체부품에 적용하기 위해서는 금형내 진공을 형성하여 기포를 최소화할 수 있는 고진공 공법을 일반적으로 사용하고 있지만, 설비 투자비 및 공정 관리 비용이 증가되어지기 때문에, 본 연구에서는 멀티캐비티 공법을 통한 고생산으로 다이캐스팅품의 원가를 줄이고자 하는 데 목적이 있다. 캐비티별 품질 편차를 최소화하기 위한 동시 충전 주입방안에 대하여 다양한 주조방안 설계 및 주조 해석을 통하여 사전 검증하고, 실제 생산 주조품의 내부품질 및 인장시험 바탕으로 실물과 해석의 정합성을 확인하였다.

목차

목차	i
표 및 그림 목차	ii
I. 서론	1
II. 본론	2
1. 이론적 배경 및 시험조건	2
가. 고진공 고압주조	2
1) 고압주조 정의	2
2) 고압주조 원리	3
3) 고진공 공법 특징	4
나. 형분력을 고려한 캐비티수 선정	5
2. 연구 방법 및 시험결과	6
가. 연구 방향	6
나. 주조방안 설계	6
다. 주조해석	8
1) 경계 조건 설정	8
2) 해석 결과 1 차 분석	8
3) 해석 결과 2 차 분석	12
4) 해석 결과 3 차 분석	15
라. 평가 결과	18
1) 주조결함 분석	18
2) 기계적 물성치 분석	21
III. 결론	25
참고문헌	26

표 및 그림 목차

<표 1> 일반 고압주조와 고진공 고압주조의 비교	4
<표 2> 수직분기 타입의 주조방안별 충전 속도 비교	11
<표 3> 수평분기 타입의 주조방안별 충전 속도 비교	11
<표 4> 주조해석 1 차와 2 차의 고립공기 분율 비교	14
<표 5> 주조해석 2 차와 3 차의 고립공기 분율 비교	17
<표 6> 진공 적용 전/후 X-ray 검사 결과	18
<표 7> 캐비티별 인장강도 분석	22
<표 8> 캐비티별 인장강도 산포 비교	22
<표 9> 캐비티별 항복강도 분석	23
<표 10> 캐비티별 항복강도 산포 비교	23
<표 11> 캐비티별 연신율 분석	24
<표 12> 캐비티별 연신율 산포 비교	24
[그림 1] 고압주조 공법 개략도	2
[그림 2] 파스칼의 원리	3
[그림 3] 주조방안 A 타입(수직분기)	7
[그림 4] 주조방안 B 타입(수직분기)	7
[그림 5] 주조방안 C 타입(수직분기)	7
[그림 6] 주조방안 E 타입(수평분기)	7
[그림 7] 주조방안 E 타입(수평분기)	7
[그림 8] 주조방안 A 타입 충전 속도	8
[그림 9] 주조방안 C 타입 충전 속도	8
[그림 10] 수직분기 타입의 산화 개재물	9
[그림 11] 수평분기 타입의 초기 충전 속도	10
[그림 12] 수평분기 타입의 산화 개재물 분포	10
[그림 13] 오버플로우 게이트 분석	12
[그림 14] 고립공기 분석	13
[그림 15] 메인 런너 속도벡터 분석	14
[그림 16] 메인 런너 분기부 주조방안 수정 설계	15
[그림 17] 주조방안 수정 후 메인 런너 속도벡터 분석	16
[그림 18] 잔존공기 분석	16
[그림 19] 인장시편 평가 부위	21
[그림 20] 인장시편 형상	21

I. 서론

최근의 자동차 산업에서는 연비 및 CO₂ 규제 불만족시 차를 팔지 못하는 연비 전쟁이 진행중에 있다. 하지만 안전규제 대응, 기본 성능 강화 및 공용화 확대 적용 등으로 차량 중량은 오히려 지속 증가 추세에 있는 상황이다.

차량 중량이 약 10% 감소하면 연비는 약 4% 상승하기 때문에, 이러한 규제를 대응하기 위한 가장 현실적인 방법은 차량 경량화라고 할 수 있다. 차량 경량화를 위해서는 소재 고강도화를 통한 두께 박육화, 경량 소재의 적용, 부품의 다운사이징 등을 통한 다양한 방법이 있다.

자동차 업계에서는 전통적으로 파워트레인(엔진/변속기) 부품에 알루미늄 재질을 적극적으로 적용하여 경량화를 추진하여 왔지만, 최근 전기차 시대로 급격히 변화하면서, 다양한 차체부품으로 알루미늄 다이캐스팅(Die Casting) 공법이 적용 확대되고 있다.

다이캐스팅 공법은 20C 에 개발된 주조 공법의 한 종류로 정밀한 금형에 고온의 용융 금속을 고속·고압으로 사출하여 제품을 성형하는 방법으로 생산성이 뛰어나고, 제품의 품질이 우수하여 전 세계적으로 사용량이 점차 증대되고 있지만, 고속·고압의 사출과정 중 발생하는 기포의 혼입 및 응고 속도의 차이로 인한 수축 등 주조 결함을 내포하고 있는 공법이라고 할 수 있다.

특히 차체부품은 타부품과의 조립을 위하여 높은 기계적 물성치가 요구되어지기 때문에, 다이캐스팅 공법을 차체부품에 적용하기 위해서는, 제품내 기포 관리가 필수적이며 이를 위하여 고진공 공법이 필수적으로 사용되어지고 있다.

하지만 고진공 다이캐스팅 차체부품은 진공 설비, 고진공 금형 등으로 인한 투자비 증가 및 공정 관리의 까다로움으로 제조원가가 높아지기 때문에, 본 연구에서는 1 개의 금형에 여러 개의 제품을 배치하는 멀티캐비티 공법을 적용하여 고생산을 통한 다이캐스팅 차체부품의 원가를 줄이고자 하는 데 목적이 있다.

멀티캐비티 다이캐스팅 공법으로 생산된 제품은 용융된 알루미늄 용탕이 캐비티별로 주입되는 과정중 미세한 시간차에 의한 충전 패턴의 변화로 제품 품질의 차이를 유발하게 된다. 또한 짧은 시간내에 상변태가 이뤄지게 되므로, 응고 속도의 차이는 제품의 변형 및 내부 응력 발생을 발생시킨다.

이러한 주조 과정중의 캐비티별 품질 편차를 현장에서 예측하기란 매우 힘든 일이기 때문에, 다양한 컨셉의 주조방안을 설계하고 주조해석 프로그램을 통하여 용탕 유동성, 충전 패턴의 분석, 열적 균형을 사전 확인하였다.

최종 선정된 주조방안을 반영하여 실제 제품을 생산하고, X-ray 검사 및 인장 시험을 통하여 주조품의 내부 품질 및 캐비티별 품질 산포를 분석하였다.

이러한 연구를 통해 멀티캐비티 공법의 주조품을 선행 해석한 후, 그 결과를 제품 생산에 반영하여 개발 기간 및 비용을 절감하고 품질을 향상시킬 수 있는 방법을 고안할 수 있었다.

II. 본론

1. 이론적 배경 및 시험조건

가. 고진공 고압주조(High Vacuum High Pressure Die Casting)

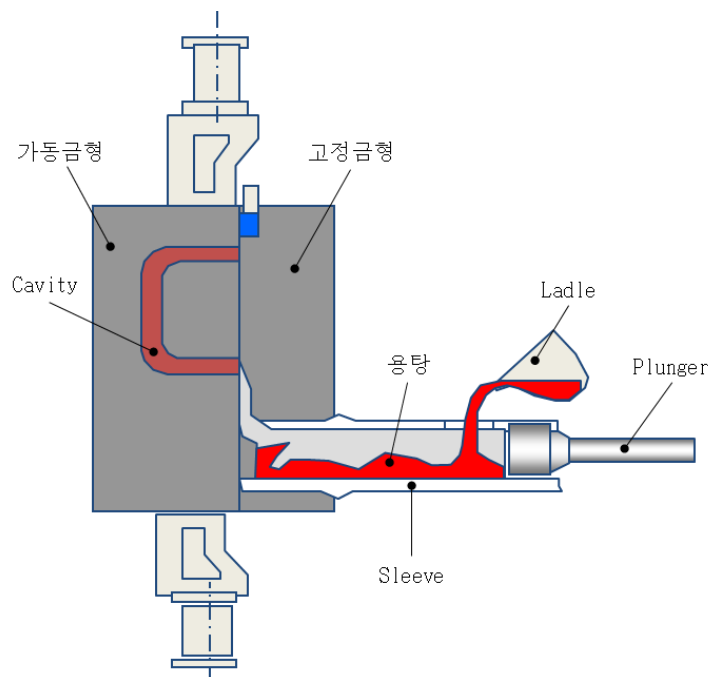
1) 고압주조 정의

고압주조 공법(High Pressure Die Casting, 이하 HPDC)은 용융 금속을 금형으로 고속·고압으로 사출하여 응고시켜 제품을 성형하는 주조 공법의 하나이다.

고압주조 또는 저압주조 라 분류하는 것은 용탕을 금형내로 주입하는 압력에 따라 분류된 명칭으로 일반적인 고압주조의 주조 압력은 400 ~ 1000 kg/cm² 이다.

복잡한 형상의 주조도 가능하며, 1 공정에서 양산할 수 있다. 또한 얇은 두께도 비교적 강도가 높은 제품을 생산할 수 있으며, 제품의 치수가 정확하고 표면이 깨끗한 장점을 가지고 있다. 경량화 효과가 높고, 대량생산이 가능하며, 후 공정의 사상작업이 타 주조품에 비해서 적다는 특징을 가지고 있다. 고압주조 금형은 일반적으로 열간공구강이 사용되는데, 제품의 재질은 금형의 용융온도(T_M)보다 낮아야 하므로 철보다는 알루미늄(Al) 또는 마그네슘(Mg)이 사용된다. 철은 그 보다 높은 T_M 을 갖는 금형 재질을 사용하기 쉽지 않으므로 사형주조 공법을 이용하고 있다.

아래 [그림 1]은 HPDC 공법 개략도이다. Ladle 을 이용해 적정량의 용탕을 Sleeve 에 주입한 후, 주조기의 Plunger 가 전진하여 용탕을 금형으로 주입한다. 응고후 Sleeve 반대편 Ejector Platen(또는 Moving Platen)이 이형되고, 각종 Slide Core(금형)가 이형되면 제품을 취출하게 된다.



[그림 1] 고압주조(High Pressure Die Casting) 공법 개략도

2) 고압주조 원리

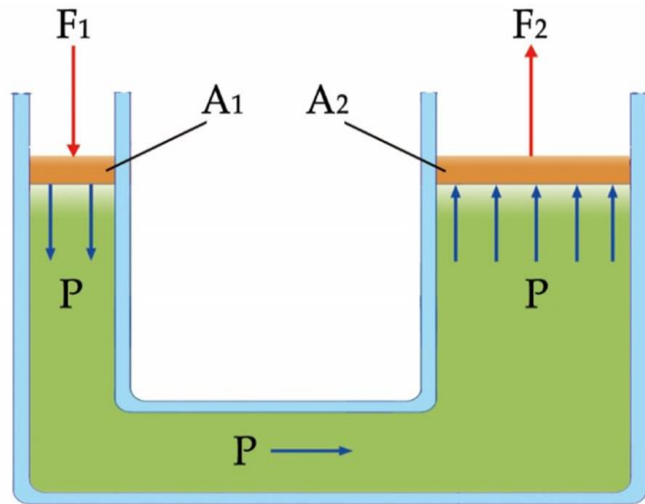
밀폐된 용기내에서 정지하고 있는 유체의 일부에 가해진 압력은 유체의 모든 부분에 전달되고 방향에 관계없이 동일하다 는 [그림 2]의 파스칼의 원리에 기초를 둔다.

즉 어떤 물체의 단면적(A)에 힘(F)를 가하면 압력(P)이 발생하게 된다.

이러한 원리를 고압주조에 적용하면, 주조장비의 사출력(F₁)이 플런저 팁(A₁)에 전달 되어 발생하는 주조압력(P)이 제품(주조 투영면적 A₂)에 작용하여 또 다른 힘(형개력 F₂)이 발생하게 된다.

주조장비는 이 형개력을 증가하는 체결력(F₁) 이 필요하며, 이 체결력이 주조장비의 필요능력이다.

$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$



[그림 2] 파스칼의 원리

3) 고진공 공법 특징

HPDC 의 장점은 무엇보다 생산성이 좋다는 점이다. 프레스 공법에 비견할 수 없지만, 여타의 주조공법에 비해 120 초 내외의 짧은 시간에 제품을 성형할 수 있다는 점이 매력적이다. 또한, 금형 형상부(Cavity)가 그대로 제품 형상으로 전사(傳寫)되기 때문에 외관 품질이 우수하다.

하지만, 밀폐된 공간으로 고속으로 용탕이 주입되면서 기포 및 각종 GAS 가 제품에 유입되며, 짧은 시간 내에 용탕이 응고되면서 제품내 열점에서 수축 결함이 발생된다.

HPDC 주조 공법으로 제품을 성형하기 위해서는 수 많은 변수에 영향을 받는다. 첫째, 제품 형상, 둘째 주조 방안(gating system, venting system), 셋째 금형 냉각 방안, 넷째 주조 조건 등이 있다.

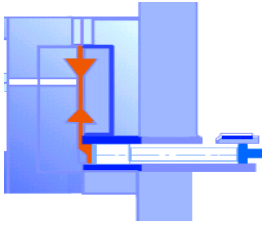
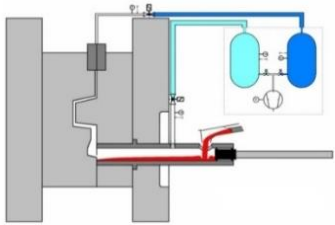
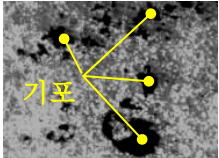
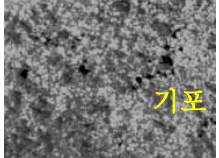
금형 냉각 방안은 짧은 시간 내에 용융 금속을 응고시키기 위해 금형을 냉각시키는 것이고, 주조 조건은 Plunger 의 사출 속도나 압력, 금형 내·외부 냉각 조건 등이다. 이런 여러 가지 변수를 적절하게 조합하여 내부 품질을 향상시킬 수 있다. 그 외 내부의 불순물을 제거하여 품질을 향상하기 위해 금형내 각종 진공장치를 사용하기도 한다.

일반적인 고압 주조 공법은 고속·고압으로 용융금속을 금형내로 주입하기 때문에, 제품내에 가스 함유량이 과다하여(약 10cc/100g), 기포결함으로 인하여 열처리가 불가능하다는 단점을 가지고 있다.

고진공 고압주조 공법은 고용량의 진공장치를 통한 캐비티부에 고진공도를 형성하여 용탕속에 잔존하는 가스를 제거하여, 열처리가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

<표 1>은 일반 고압주조와 고진공 다이캐스팅 공법을 비교하여 나타내고 있다.

<표 1> 일반 고압주조와 고진공 고압주조의 비교

공법명	일반 고압주조	고진공 고압주조
개요		
진공도	300 mbar ↑	100 mabr ↓
기포 함유량	10cc/100g	3cc ↓/100g
특징	<ul style="list-style-type: none"> 저가, 대중화 유지보수 용이 	<ul style="list-style-type: none"> 기계적 성질 우수 용접, 열처리 가능 고가, 유지보수 난이 

나 형분력을 고려한 캐비티 수 선정

주조장비의 용량은 투영면적과 주조압력에 비례하여 결정되어진다.

국내 주조공장의 인프라를 고려하여, 최대 생산가능한 3500 톤급 주조기를 대상으로 캐비티 수를 검토하였다.

하지만 주조방안 설계가 완료되어야만 정확한 투영면적 산출이 가능하므로, 검토 단계에서는 제품의 투영면적에 비례하여 주조방안 투영면적을 가정하고 아래의 식을 통하여 캐비티 수를 확인하였다.

$$\text{주조기 용량} = (\text{제품의 투영면적} + \text{주조방안의 투영면적}) \times \text{주조압력} \times \text{안전율}$$

본 연구에서는 대상 제품의 투영면적과 형분력을 고려시, 최대 캐비티 수는 4 개로 결정하였다.

2. 연구방법 및 시험결과

가. 연구 방향

본 연구에서는 1개의 금형에 여러 개의 캐비티를 배치하였을때, 캐비티별로 발생하는 품질편차를 최소화할 수 있는 주조 방안을 다양한 케이스별로 설계하고, 해석을 통하여 비교하였다.

주조해석은 금속이 용융상태에서 상온의 고상으로 상변태되는 현상을 해석하여, 기포 고립과 같은 제품의 충전성, 응고 양상을 통한 제품 내부의 수축현상을 예상할 수 있다.

본 연구에서는 상용 열유동 해석 소프트웨어인 FLOW-3D를 사용하여, 주조방안에 따른 해석 결과를 분석하고, 추가적인 2차, 3차 재해석을 통하여 개선 사항 검증 및 실제 금형 모델에 반영하였다.

나. 주조방안 설계

주조방안은 캐비티부로 용탕이 주입되는 게이팅 시스템(Gating System)과, 용탕이 배출되는 벤팅 시스템(Venting System)으로 크게 구분할 수 있다.

특히 용탕이 주입되는 게이팅 시스템의 형상·위치의 적절성에 따라서 용탕의 유동성이 결정되어지므로, 주조품질에 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 할 수 있다.

멀티캐비티 공법에서의 게이팅 시스템은 하나의 주입구를 통하여 공급되는 용탕이 메인 런너를 먼저 채운 후에 다방향으로 분기되어 캐비티를 충전시키기 때문에, 캐비티별로 충전시점을 일치화하는 것이 매우 어렵다.

캐비티별 충전시점이 다르게 되면, 형상부 기포 고립 및 응고 속도 차이에 의한 주조품질의 악영향을 유발시킬 수 있다.

본 연구에서의 4캐비티 공법 게이팅 시스템은 용탕주입구에서 캐비티로 분기되는 방향에 따라서 크게 수직분기와 수평분기로 구분하고, 다시 용탕이 주입되는 게이트의 세부 형상에 따라 총 5가지 컨셉의 주조방안을 설계하였다.

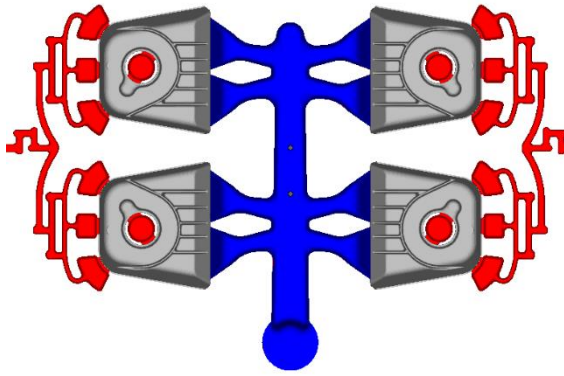
[그림 3]은 수직분기 타입 분할 게이트 타입으로 후처리 용이성을 고려하였다.

[그림 4]은 수직분기 타입 일체형 게이트 타입으로 용탕 충전성을 고려하였다.

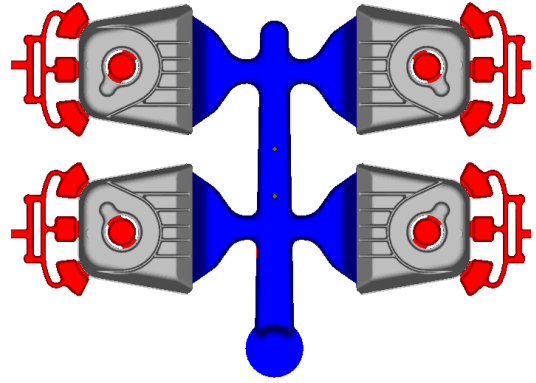
[그림 5]은 수직분기 타입 분할 게이트 타입으로 캐비티 셋업을 변경하여, 충전속도 일치화를 고려하였다.

[그림 6]은 수평분기 분할 게이트 타입으로 최단 충전속도를 고려하였다.

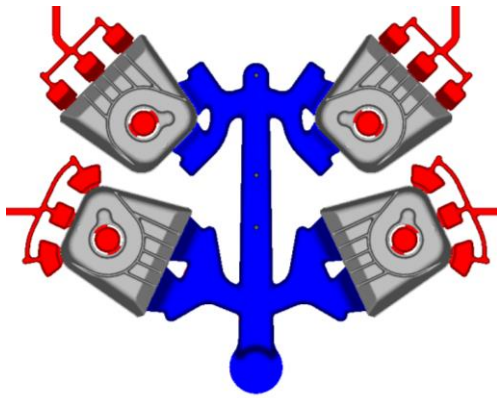
[그림 7]은 수평분기 분할 게이트 타입으로 기포 배출성을 고려하였다.



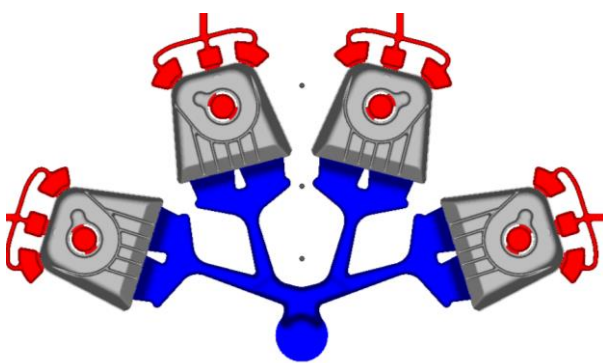
[그림 3] 구조방안 A 타입(수직분기)



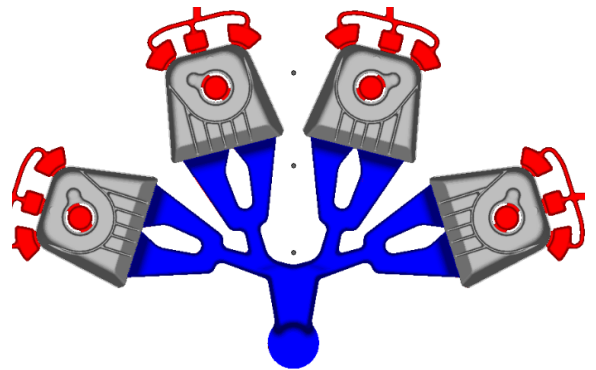
[그림 4] 구조방안 B 타입(수직분기)



[그림 5] 구조방안 C 타입(수직분기)



[그림 6] 구조방안 D 타입(수평분기)



[그림 7] 구조방안 E 타입(수평분기)

다. 주조해석

1) 경계 조건 설정

5 가지 컨셉의 주조방안에 대하여 동일한 MESH 생성 및 사출 조건을 입력하여 해석을 실시하였다.

3500 톤급 주조기를 고려하여 저속속도 0.3 m/s, 고속속도 2.5 m/s 의 일반적인 다단사출조건을 설정하였고, 게이트 속도가 40 m/s가 되도록 내경 $\varnothing 140$ 슬리브를 기준으로 만관 조건을 가정하여 해석을 실시하였다.

진공 상태 및 Prefill 0%를 기준으로 충전 및 온도해석을 실시하였다.

이 때 해석 시간을 줄이기 위하여, 좌우 대칭구조인 제품의 특징을 고려하여 미리기능을 활용하여, 절반의 제품만 해석을 실시하였다.

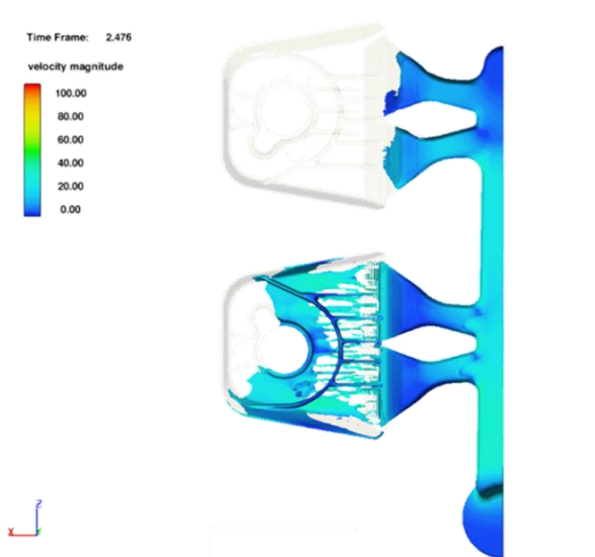
2) 해석 결과 1 차 분석

4 캐비티 공법의 수직분기 타입과 수평분기 타입의 각 게이팅 시스템을 충전 속도와 산화개재물 측면에서 해석 결과를 비교 분석하였다.

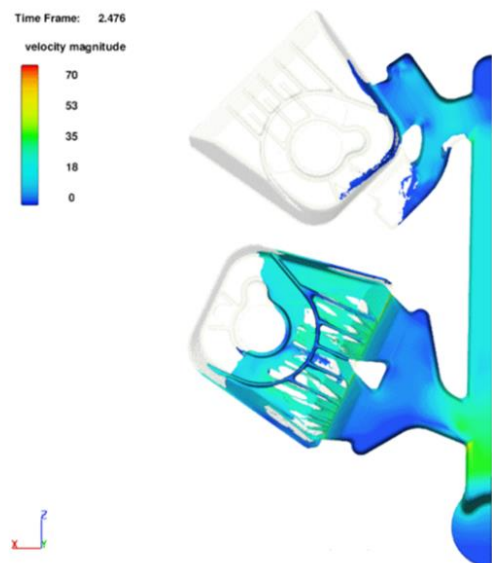
먼저 수직분기 타입의 주조 방안은 금형 사이즈가 커지지 않는다는 장점을 가지고 있지만, 캐비티별 충전시점을 일치화시키기 어려운 방안이었다.

[그림 8]과 [그림 9]와 같이, 용탕이 주입될 때 메인 런너를 채우면서 하단의 캐비티가 먼저 충전이 되고, 상단의 캐비티는 시간차를 두고 충전되는 형태를 가지고 있다. 이러한 충전속도 차이에 의하여, 캐비티별 품질편차가 발생할 수 있고, 하단의 캐비티가 충전이 완료된 후에도 상단의 캐비티는 충전이 되어야만 하므로, 용탕 충전 과정에서 압력이 증가하여 금형 손상까지도 우려될 수 있다.

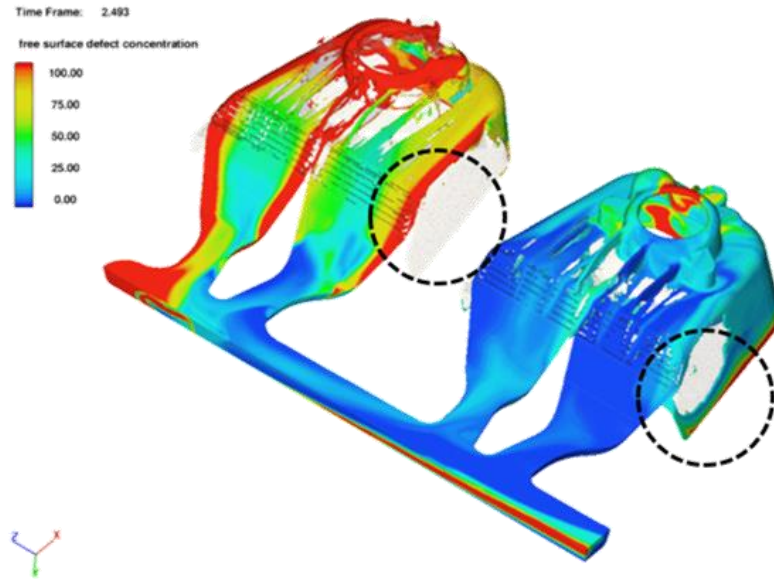
또한 [그림 10]와 같이 제품 측벽부내 와류 발생에 따른 기포 및 산화개재물 고립으로 외관품질 관리가 어려울 수 있다.



[그림 8] 주조방안 A 타입 충전 속도



[그림 9] 주조방안 C 타입 충전 속도



[그림 10] 수직분기 타입의 산화 개재물

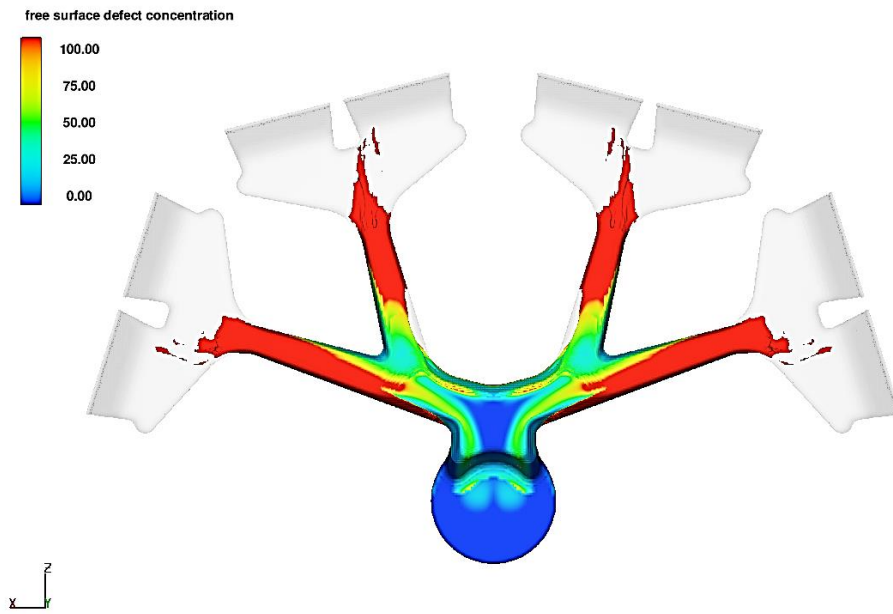
수평분기 타입의 주조 방안은 캐비티 배치를 부채꼴 형태로 구성하여야 하기 때문에, 금형 사이즈가 커진다는 단점을 가지고 있지만, 캐비티별 충전시점을 일치화시키기는 유리한 방안이었다.

[그림 11]과 같이 용탕이 주입될 때 메인 런너를 채우면서, 4 개의 캐비티로 동시에 충전이 이루어지는 형태를 가지고 있다.

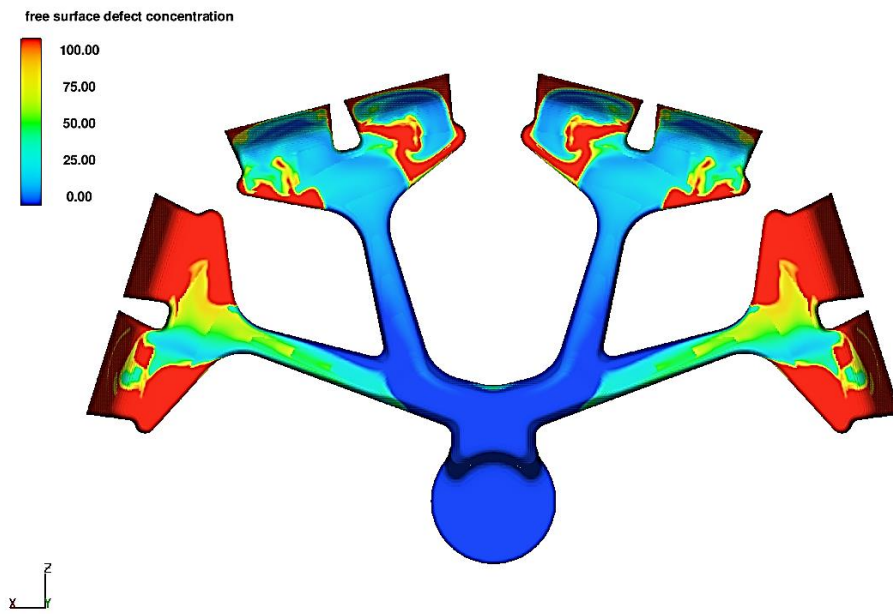
또한 메인 런너의 분기 이후 캐비티까지의 충전 유동거리가 짧기 때문에, 산화개재물 관리 측면에서도 훨씬 유리한 조건임을 확인할 수 있었다.

[그림 12]와 같이 메인 런너의 분기 이후, 캐비티별 미세한 충전속도 차이에 의하여 좌·우측 최외곽에 배치된 캐비티에 산화개재물이 일부 집중되는 경향이 있으나, 이것은 주조방안의 재설계에 의하여 충분히 개선 가능할 것으로 판단된다.

또한 진공 및 용탕 관리 등의 공정 조건 제어를 통해서도 충분히 관리가 가능한 영역이기 때문에, 충전 속도 및 산화개재물 비교시 유리한 수평분기 타입을 기본 컨셉으로 추가적인 주조해석을 진행하였다.



[그림 11] 수평분기 타입의 초기 충전 속도



[그림 12] 수평분기 타입의 산화 개재물 분포

<표 2> 수직분기 타입의 주조방안별 충전 속도 비교

구분		주조방안 A	주조방안 B	주조방안 C
캐비티별 입구시점 충진속도	캐비티 A	2.351s	2.348s	2.353s
	캐비티 B	2.403s	2.409s	2.420s
	캐비티 C	2.354s	2.353s	2.355s
	캐비티 D	2.405s	2.403s	2.420s
비교	최대(Max)	2.405s	2.409s	2.420s
	최소(Min)	2.351s	2.348s	2.353s
	차이(최대-최소)	0.054s	0.061s	0.067s

<표 3> 수평분기 타입의 주조방안별 충전 속도 비교

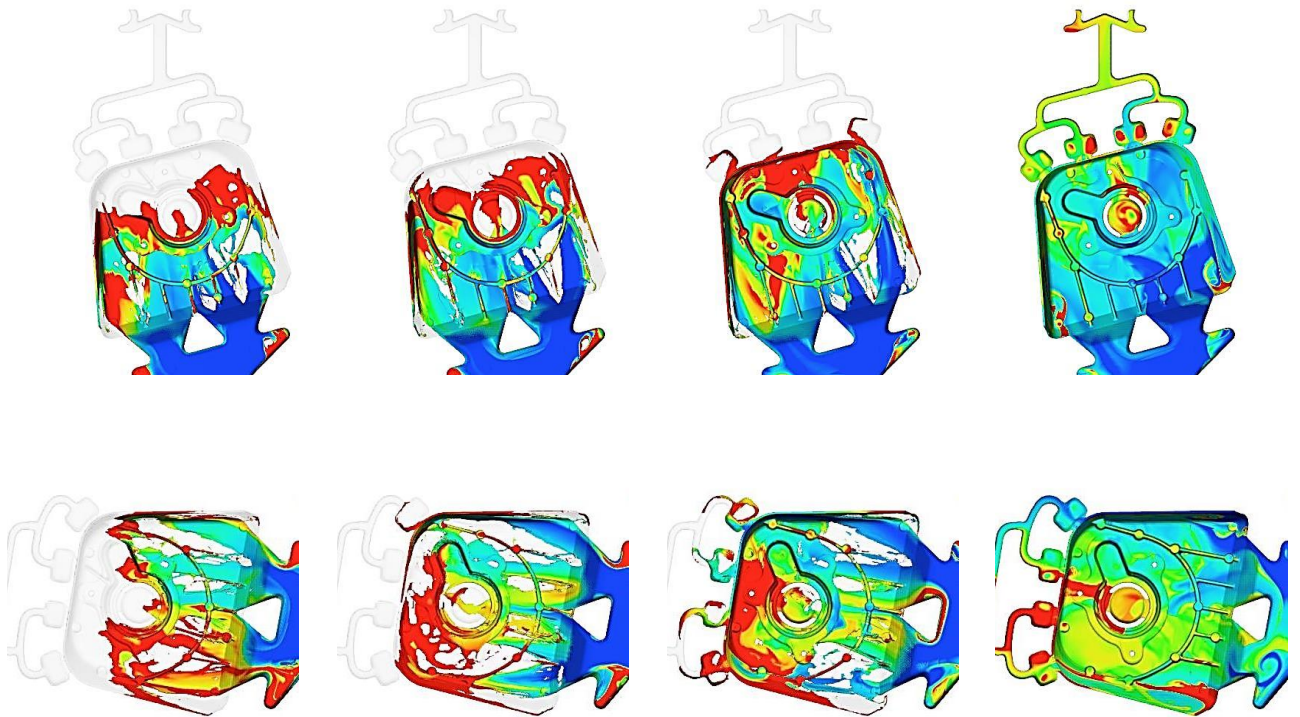
구분		주조방안 D	주조방안 E
캐비티별 입구시점 충진속도	캐비티 A	2.331s	2.339s
	캐비티 B	2.356s	2.367s
	캐비티 C	2.333s	2.342s
	캐비티 D	2.356s	2.367s
비교	최대(Max)	2.356s	2.367s
	최소(Min)	2.331s	2.339s
	차이(최대-최소)	0.025s	0.028s

2) 해석 결과 2차 분석

수평분기 타입 주조방안에 좌·우측 최외곽에 배치된 캐비티에 산화개재물이 집중되는 경향을 개선하기 위하여, 용탕의 충전패턴을 확인하였다.

초기 공급된 용탕이 빠져나가지 못하고, 가장 늦게 충전되는 부위에 산화개재물이 집중될 수 있기 때문에, 오버플로우 게이트 분석을 실시하였다.

[그림 13]과 같이 용탕이 충전될 때, 제품 진입방향으로 연결된 중심홀의 오버플로우 게이트에 의하여, 제품 측벽부의 깊은 형상을 미처 채우지 못한채 용탕이 빠져나가기 때문에, 제품 진입방향의 오버플로우 게이트를 단절시키고 깊이 방향의 체적을 증가시켜 배출능을 향상시키는 방법으로 추가적인 개선을 시도하였지만, 해석 결과 큰 효과는 확인할 수는 없었다.

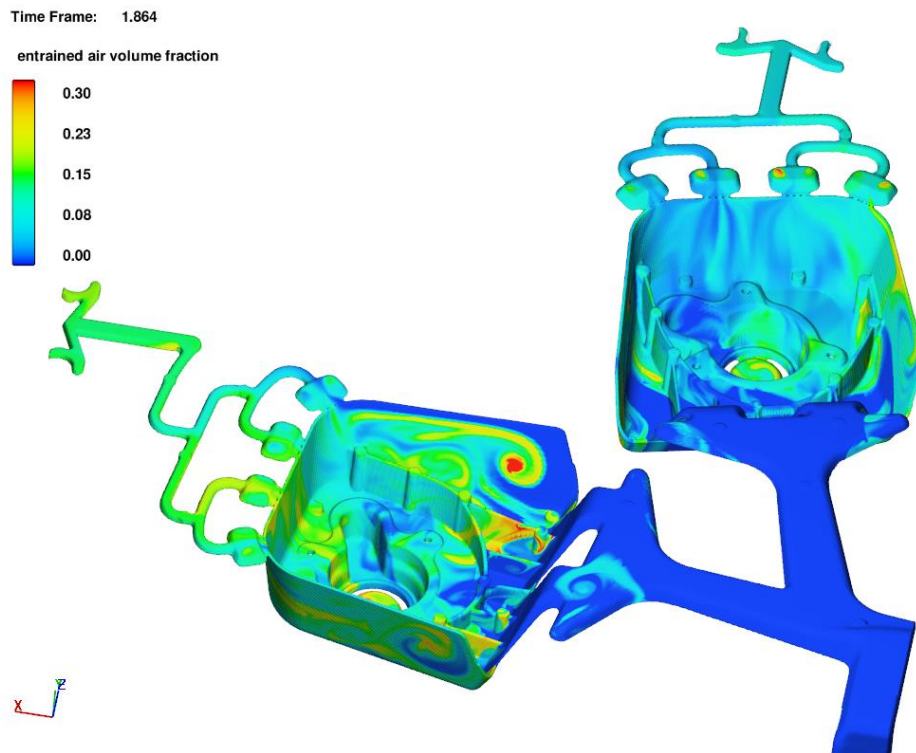


[그림 13] 오버플로우 게이트 분석

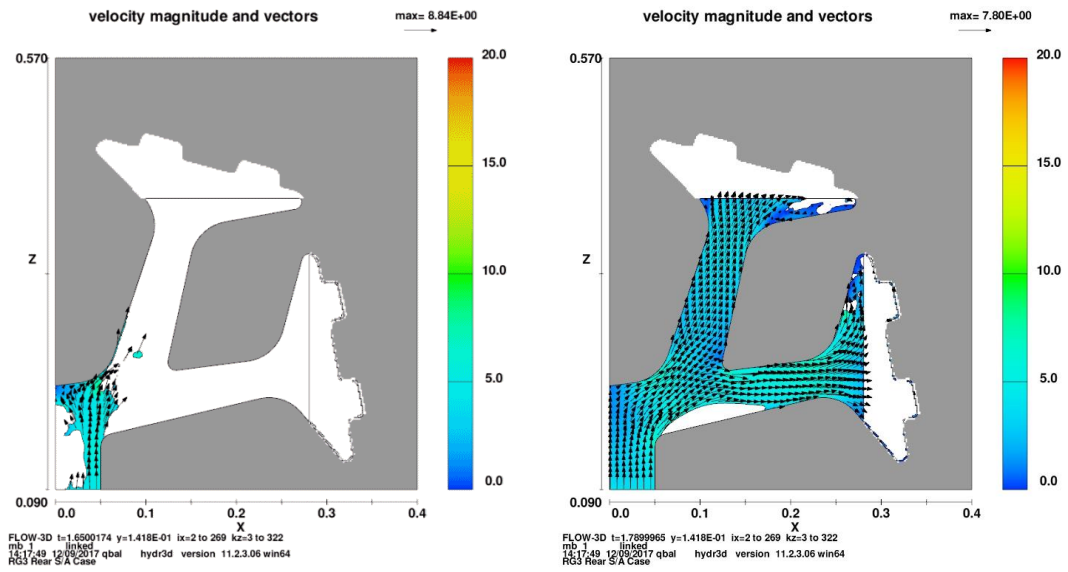
추가적인 고립공기 분석을 실시한 결과, [그림 14]과 같이 제품 측벽부의 고립공기 분율이 높게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 현상은 포집된 공기가 제품 측벽부로 흘러 들어간 것을 의미하는 것이기 때문에, 비정상적인 공기 포집부를 확인하기 위하여 충전 부위별로 속도벡터를 분석하였다.

이 중 [그림 15]과 같이, 메인 런너의 분기되는 부위에서 속도벡터의 유동저항을 확인할 수 있었으며, 원활한 용탕 충전성 확보를 위하여 추가적인 구조해석을 실시하였다.



[그림 14] 고립공기 분석



[그림 15] 메인 런너 속도벡터 분석

<표 4> 구조해석 1 차와 2 차의 고립공기 분율 비교

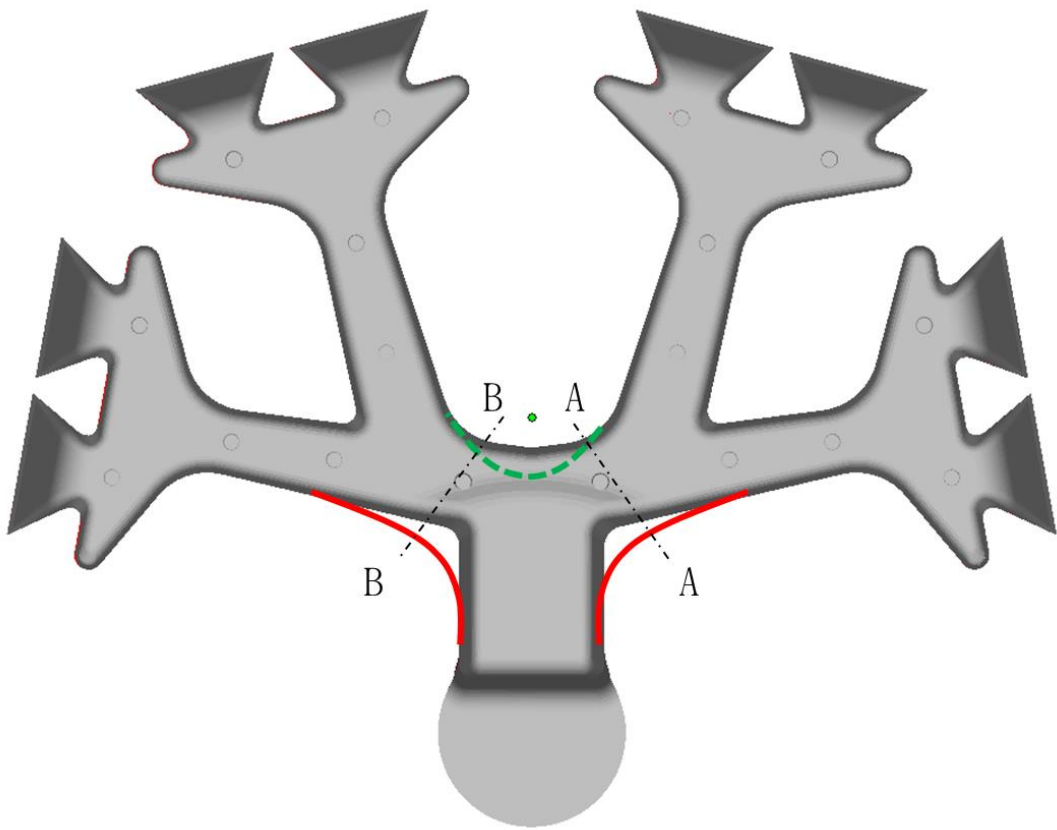
구분	구조해석 1 차	구조해석 2 차
캐비티 A	0.32	0.25
캐비티 B	0.22	0.17
캐비티 C	0.18	0.17
캐비티 D	0.35	0.23
최대 (Max)	0.35	0.25

4) 해석 결과 3차 분석

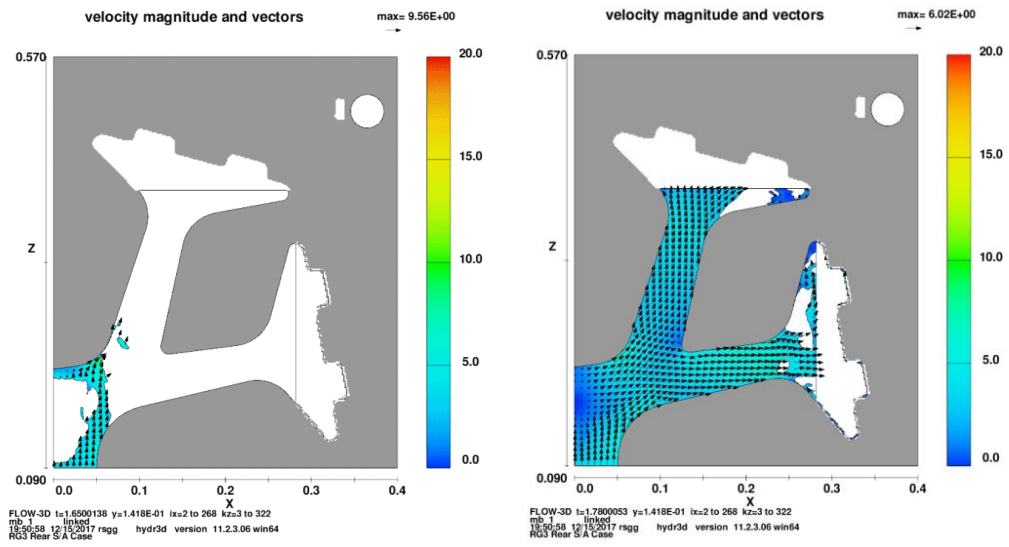
메인 런너의 분기되는 부위에서 발생하는 비정상적인 공기포집을 개선하기 위하여 [그림 16]과 같이 구조방안을 수정 설계하였다.

최외곽에 배치된 캐비티의 충전속도 편차를 해소하기 위하여, 분기되는 중심부의 형상과 A-A 단면, B-B 단면이 분기되는 런너부의 단면을 수정 설계하였다.

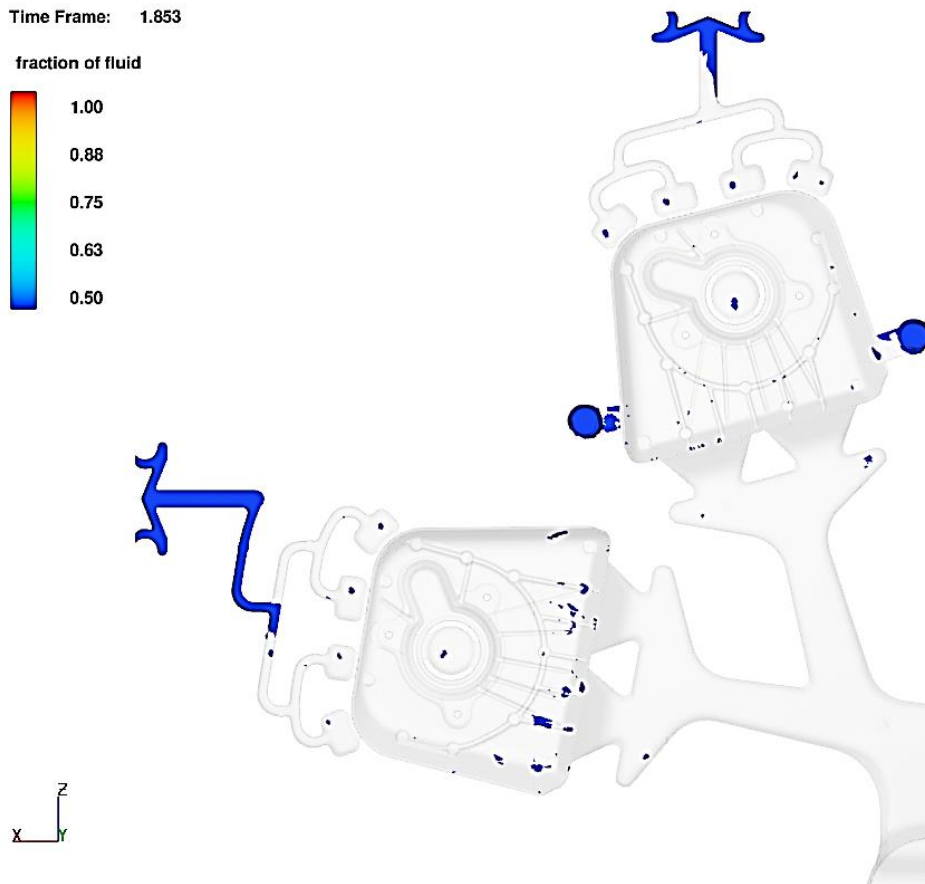
[그림 17]과 같이 메인 런너부의 속도벡터 분석 결과 비정상적인 공기 포집은 개선 확인하였으며, [그림 18]와 같이 기존의 제품 측벽부에 고립되어 있던 잔존공기량이 감소하는 것을 최종 확인할 수 있었다.



[그림 16] 메인 런너 분기부 구조방안 수정 설계



[그림 17]. 구조방안 수정 후 메인 런너 속도벡터 분석



[그림 18] 잔존공기 분석

<표 5> 주조해석 2 차와 3 차의 고립공기 분율 비교

구분	주조해석 2 차	주조해석 3 차 (최종)
캐비티 A	0.32	0.08
캐비티 B	0.22	0.06
캐비티 C	0.18	0.05
캐비티 D	0.35	0.06
최대 (Max)	0.35	0.08

라. 평가 결과

1) 주조결함 분석


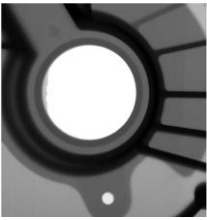


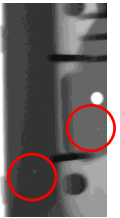



4 캐비티 공법의 주조해석 결과를 바탕으로 선정된 최종 주조방안을 반영하여, 3500톤 주조기용 고진공 다이캐스팅 금형을 제작하였다.

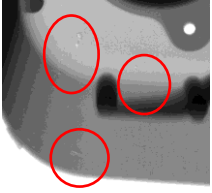

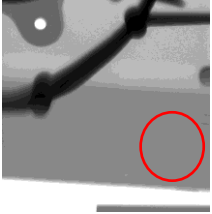
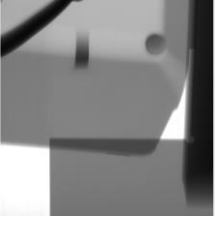
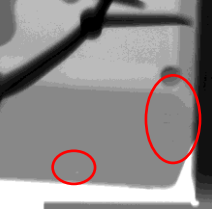
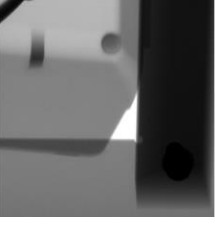

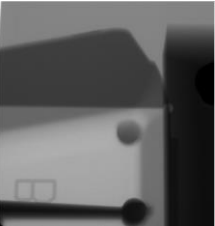
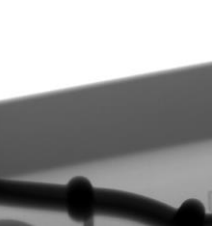
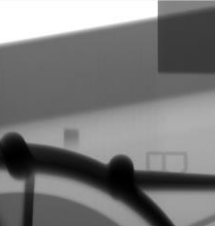
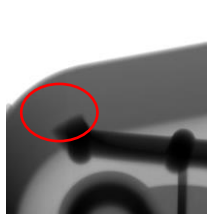


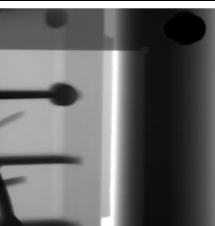
이 때 공정조건에 따른 품질 편차를 동시에 확인하기 위하여, 동일 LOT 제품을 진공 적용 전/후를 구분하여 생산하였다.

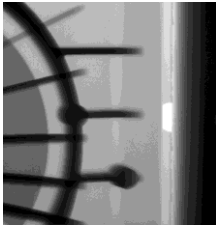
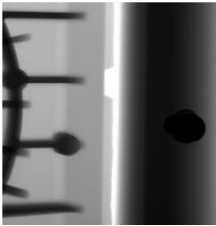
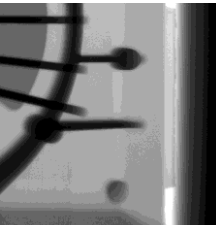
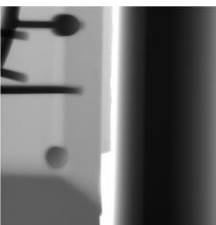
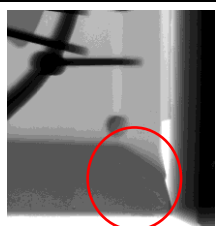
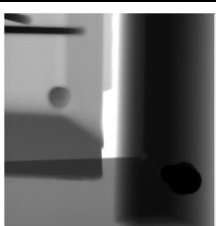
주조품질이 가장 열세할 것으로 예상되는 최외곽 캐비티를 14 개소로 구분하여 X-ray 검사를 실시하였고, 진공 적용 전/후의 X-ray 검사 결과를 ASTM-E155 기준으로 등급을 판정하였다.

<표 2>와 같이, 진공 적용전에는 2~4 등급 수준의 주조결함을 가지고 있었지만, 진공 적용후에는 1~2 등급 수준의 굉장히 양호한 수준의 주조결함을 확인할 수 있었다.

<표 6> 진공 적용 전/후 X-ray 검사 결과

구분	진공 적용 전		진공 적용 후	
	X-ray	등급	X-ray	등급
1		3		1
2		2		1
3		3		1
4		3		1

5		3		1
6		2		1
7		4		2
8		1		1
9		1		1
10		2		1
11		3		1

12		2		1
13		2		1
14		4		1

2) 기계적 물성치 분석

4 캐비티 공법 제품 내부의 산화개재물 등을 평가하기 위하여, 인장시험을 실시하여 기계적 물성치를 확인하였다.

용탕이 충전되는 위치에 따라서 기계적 물성치 편차가 발생될 수 있기 때문에, 주조해석상 가장 기포 및 산화개재물 고립이 크게 발생하였던 [그림 19]의 #3 부위에 [그림 20]과 같이 인장시편을 제작하여 평가하였다.

인장강도는 <표 3>과 같이 4 개의 캐비티 모두 스펙 만족 수준이었으며, 캐비티별 품질 편차는 $\pm 3\%$ 수준이었다.

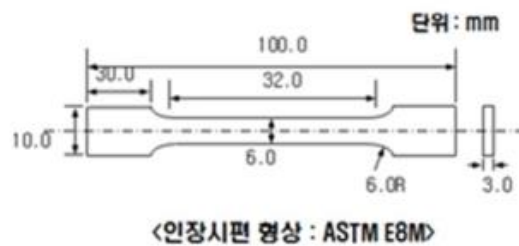
항복강도는 <표 4>과 같이 4 개의 캐비티 모두 스펙 만족 수준이었으며, 캐비티별 품질 편차는 $\pm 4\%$ 수준이었다.

연신율은 <표 5>과 같이 4 개의 캐비티 모두 스펙 만족 수준이었으며, 캐비티별 품질 편차는 $\pm 5\%$ 수준이었다.

시험 결과, 인장강도, 항복강도, 연신율 모두 SPEC 만족 수준이었으며, 특히 캐비티별 편차도 최대 $\pm 5\%$ 내외로 굉장히 양호한 수준의 품질 산포 수준을 확인할 수 있었다.

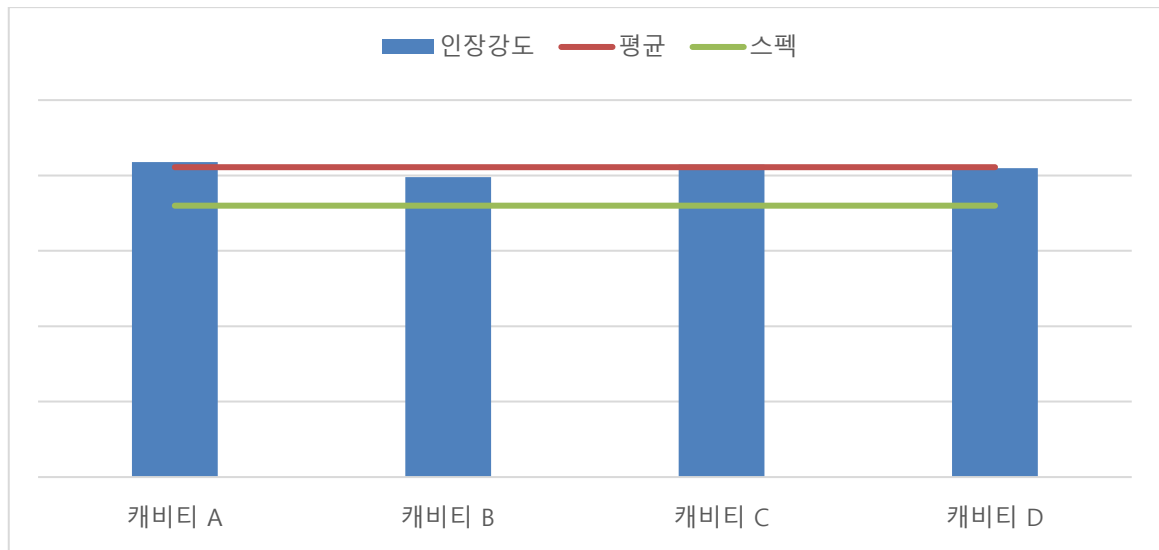


[그림 19] 인장시편 평가 부위



[그림 20] 인장시편 형상

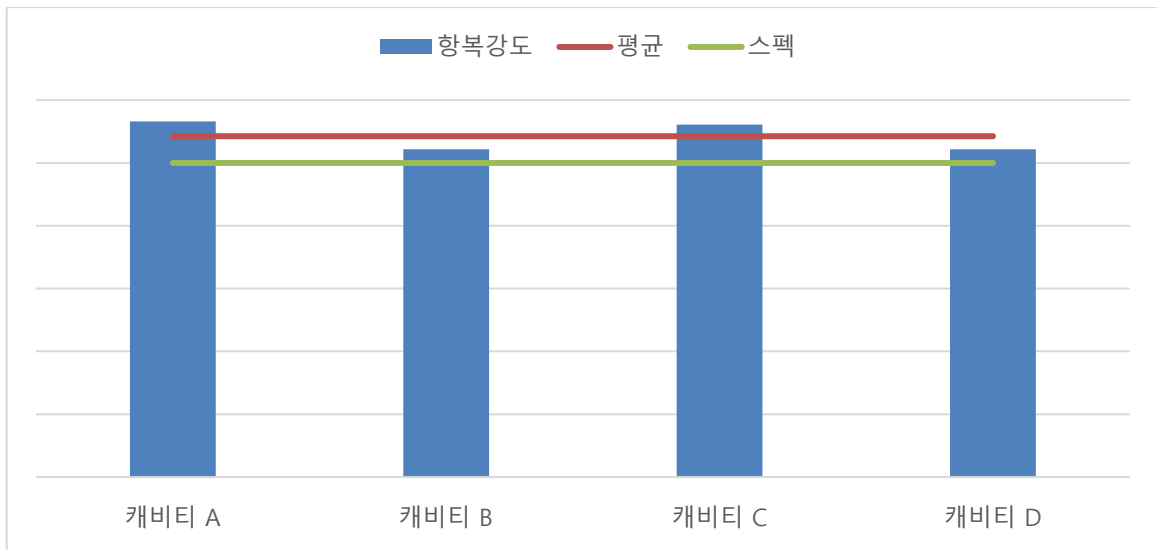
<표 7> 캐비티별 인장강도 분석



<표 8> 캐비티별 인장강도 산포 비교

구분	실측 값	평균 대비 산포
캐비티 A	209.0 MPa	2.0 %
캐비티 B	199.0 MPa	-2.9 %
캐비티 C	207.2 MPa	1.1 %
캐비티 D	204.8 MPa	-0.1 %
평균	205.0 MPa	-

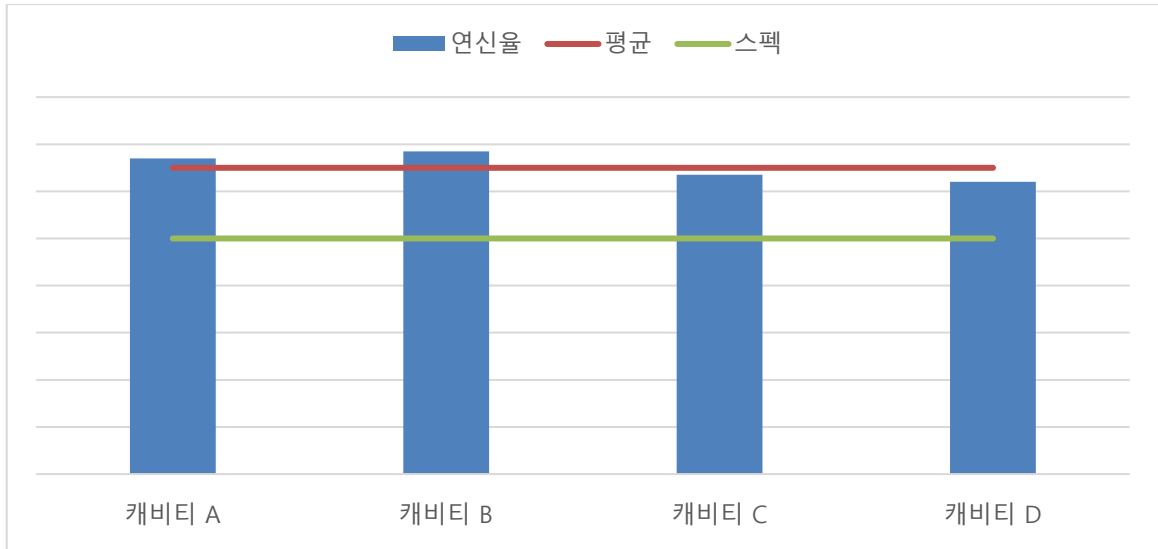
<표 9> 캐비티별 항복강도 분석



<표 10> 캐비티별 항복강도 산포 비교

구분	실측 값	평균 대비 산포
캐비티 A	113.2 MPa	4.3 %
캐비티 B	104.3 MPa	-3.9 %
캐비티 C	112.2 MPa	3.4 %
캐비티 D	104.4 MPa	-3.8 %
평균	108.5 MPa	-

<표 11> 캐비티별 연신율 분석



<표 12> 캐비티별 연신율 산포 비교

구분	실측 값	평균 대비 산포
캐비티 A	13.4 %	2.7 %
캐비티 B	13.7 %	5.0 %
캐비티 C	12.7 %	-2.7 %
캐비티 D	12.4 %	-5.0 %
평균	13.1 %	-

Ⅲ. 결론

본 연구에서는 고진공 다이캐스팅 멀티캐비티 공법에 대하여 캐비티별 품질편차를 최소화할 수 있는 방안에 대하여 집중적으로 검토하였다.

다양한 주조방안 설계 및 주조해석과 실물 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 멀티캐비티 공법에서는 용탕이 주입될 때 캐비티를 동시에 충전시킬 수 있는 수평 분기 타입의 주조방안이 유리하다는 것을 확인하였다.
- 2) 수평분기 타입의 주조방안에서도 미세한 충전속도 차이가 발생할 수 있기 때문에, 메인 런너의 속도벡터 분석 등을 통한 고립 공기 분석이 필요하다는 것을 확인하였다.
- 3) 용탕의 충전거리가 길어지면 온도저하에 따른 산화개재물이 증가될 수 있기 때문에, 최단 충전속도를 확보하는 것이 유리하다는 것을 확인하였다.
- 4) 메인 런너부의 분기 각도와 단면 형상에 따라서, 제품 전체의 용탕 유동성 및 공기 고립에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인하였다.
- 5) 고진공 고압주조 공법에서 진공의 영향에 따라서 주조품질(주조결함)에 큰 차이가 발생한다는 것을 확인하였다.
- 6) 본 연구를 통하여 멀티캐비티 공법에 적합한 주조방안 설계와 주조해석을 실물 검증할 수 있었고, 향후 다양한 자동차 차체 주조부품에 확대 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Andresen, William. *Die Cast Engineering: A Hydraulic, Thermal, and Mechanical Process*. CRC Press, 2004.
- [2] M.C. Flemings, *Solidification Processing*, McGraw-Hill, 1974.
- [3] W. Kurz, D.J. Fisher, *Fundamentals of Solidification*, Trans Tech Publications, 1998.
- [4] P.A. Tøndel, PhD thesis, Norwegian Institute of Technology (Trondheim), 1994
- [5] Lung-Jieh Yang and Tze-Jung Yao and Yu-Chong Tai, *J Micromech Microengineering* 14, 220 (2004).
- [6] A.W. Woods, *J. Fluid Mech.*, 1992, 239, 429-448.
- [7] G. Hansen, A. Hellawell, S.Z. Lu, R.S. Steube, *Met. Mat. Trans. A*, 1996, 27A, 569-581.
- [8] P. Paliani, L. Zalewski, J. Barreto, N. Tsumagari, J. Brevick, C. Mobley, *NADCA Trans.*, 1995, 18, 149-155
- [9] L.W. Garber, *Die Casting Eng.*, 1982, 26, 14-22
- [10] Marta, Constantin, et al. "Theoretic and experimental studies on the casting of large die-type parts made of lamellar graphite grey pig irons by using the technology of polystyrene moulds casting from two sprue cups." *Modelling and Simulation in Engineering* 2012 (2012): 32.
- [11] Chen, Liping, et al. "Study on the interfacial heat transfer coefficient between AZ91D magnesium alloy and silica sand." *Experimental Thermal and Fluid Science* 54 (2014): 196-203
- [12] Liu, Hanwu, Fan Feng, and Junming Liu. "Finite Element Analysis of Semi-Solid Die-Casting Technology of Magnesium Alloy Hook Based on AnyCasting." *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*. Atlantis Press, 2012.
- [13] Truong Quoc Vo, Murat Barisik, BoHung Kim. "Near-surface Viscosity Effects on Capillary Rise of Water in Nano-tubes." *Physical Review E*, Revised Manuscript Submitted, October 2015.
- [14] Wang, Cheng Zhi, Guo Hai Yao, and Feng Guo Liu. "Numerical Simulation of Die Casting for Semi-Solid Aluminum Alloy and its Mould Research." *Advanced Materials Research*. Vol. 534. 2012.
- [15] Wang, Ye, et al. "Optimization of Tilt-Casting of Aluminum Alloy Automobile Drain Pipes through Numerical Simulation." *Materials Science Forum*. Vol. 762. 2013

- [16] P.W. Cleary, J. Ha, M. Prakash, T. Nguyen. *3D SPH flow predictions and validation for high pressure die casting of automotive components*. Applied mathematical modelling, 2006.
- [17] Joseph Ha, Paul Cleary, Vladimir Alguine, and Thang Nguyen. *Simulation of die filling in gravity die casting using SPH and MAGMAsoft*. Second International conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Australia, 1999.
- [18] Paul Cleary, Joseph Ha, Vladimir Alguine, and Thang Nguyen. *Flow modelling in casting process*. Applied mathematical modelling, 2002.
- [19] Paul W. CLEARY and Joseph HA. *Three dimensional modelling of high pressure die casting*. Second International conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Australia, 1999.
- [20] A. Krimpenis, P.G. Benardos, G.C. Vosniakos, A. Koukouvitaki. *Simulation-based selection of optimum pressure die-casting process parameters using neural nets and genetic algorithms*. International Journal of Advanced manufactory technology, 2006.
- [21] Raimo Helenius, Otto Lohne, Lars Arnberg, and Hans I. Laukli. *The heat transfer during filling of a high-pressure die-casting shot sleeve*. Materials science and engineering A, 413–414, 2005.
- [22] Guo Zhi-peng, Xiong Shou-mei, Liu Bai-Cheng, Mei Li, and John Allison. *Determination of the heat transfer coefficient at metal-die interface of high pressure die casting process of AM50 alloy*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 6032–6038, 2008.
- [23] Guilherme Ourique Verran, Rui Patrick Konrad Mendes, and Macro Aurelio Rossi. *Influence of injection parameters on defects formation in die casting Al12Si1,3Cu alloy: Experimental results and numeric simulation*. Journal of Materials processing technology, 179 (2006) 190–195.
- [24] S.G. Lee, A.M. Gokhale, G.R. Patel, and M. Evans. *Effect of process parameters on porosity distributions in high-pressure die-casting AM50 Mg-Alloy*. Materials science and engineering A 427 (2006) 99–111.
- [25] S. Mathieu, C. Rapin, J. Hazan, and P. Steinmetz. *Corrosion behavior of high pressure die-cast and semi-solid cast AZ91D alloys*. Corrosion science 44 (2002) 2737–2756.
- [26] Xinghao Du, and Erlin Zhang. *Microstructure and mechanical behavior of semi-solid die-casting AZ91D magnesium alloy*. Materials letters, 61 (2008) 2333–2337