 논문

절연슬리브가 A356 알루미늄 합금의 응고과정에 미치는 영향에 대한 연구

오민주 *[†] · 유승목 ** · 조인성 *** · 김용현 ****

*인하대학교 대학원 금속공학과, **한국생산기술연구원 인천지역본부 주조기술센터

한국생산기술연구원 인천지역본부 사이버설계센터, *대신금속주식회사 기술연구소

A Study on the Effect of Insulating Sleeve on Solidification Characteristics of A356 Aluminum Alloy

Min-Joo Oh*[†], Seung-Mok Yoo**, In-Sung Cho***, and Young-Hyun Kim****

*Metallurgical Engineering, InHa University, Incheon 402-751, Korea

**Center for foundry technology Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

***Center for e-Design, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

****Daeshin metal R&D center, Changwon 641-847, Korea

Abstract

Al-Si alloys have been steadily used as a potential material for the achievement of an efficient weight reduction in the automobile and aerospace industries due to its excellent castability and high strength-to-weight ratio. In this study, riser effect and mechanical properties were investigated according to the size of the sleeve. In addition, the effects of riser size on mechanical properties of castings were investigated. On the other hand flow and solidification process were simulated with a hybrid FDM/FEM package named ZCast. As a result, results of simulation and experiments were comparable regarding to the yield strength, tensile strength, elongation and hardness of casting. It proves the reliability of the simulation. It is expected that the proper size of riser can improve the recycling rate of metallic materials and reduce the cost of casting.

Key words : A356 alloy, Casting, Insulating sleeve, Simulation, Microstructure.

(Received May 3, 2011 ; Accepted August 19, 2011)

1. 서 론

최근들어 소재의 경량화 경향이 뚜렷해지고 있어 알루미늄합금이 각광받고 있다. 이는 비강도가 높은 경량재료인 알루미늄을 사용함으로써 연비가 향상되고 자동차에서 배출되는 배기가스가 줄어들음으로서 환경오염 및 지구온난화 억제를 위한 각종규제에 대응하기 위한 것이다[1-3].

Al-Si계 주조합금은 유동성, 충전성 및 내마모성이 우수한 장점으로 인해 우수한 기계적 성질을 가지므로 높은 신뢰성이 요구되는 자동차, 항공 우주산업 등에서 각광받고 있다. A356합금의 기계적 성질은 Secondary Dendrite Arm Spacing (SDAS)와 초정입자의 크기, 공정상내의 Si입자 분포 등 미세조직에 따라 기계적 특성이 현저히 달라지게 되는데 이는 주조방법, 냉각조건 등과 밀접한 관련이 있다[4-8].

Radhakrishna 등[9]은 Chill로써 냉각속도를 제어할 수 있다고 하였으며, Chill 두께가 증가하면 냉각속도가 증가하고, 냉각속도의 조절로써 미세조직제어가 가능하다고 하였다. 또한 Zhang등

[8]과 Shivkumar등[10]은 Sand mold의 DAS값은 Copper mold보다 약 2배 정도 크다는 연구사실을 발표하였으며 이는 응고속도와 관련이 있다고 하였다.

Al-Si계 주조합금 및 제조공정의 연구는 첨가원소가 기계적 특성에 미치는 영향에 관한 연구가 주류를 이루고 있다 Zhang등[8]은 Sn의 조절로 냉각속도를 조절할 수 있다고 하였으며, 이를 통해 미세조직을 제어할 수 있다고 기술하였다. Shivkumar등[10]은 Sr첨가시 충격특성이 약 2배 정도 증가한다고 하였고, Yoon등[12]은 TiB 0.1 wt.%, Sr 0.05 wt.% 첨가시 가장 효과적인 미세한 조직을 얻을 수 있다고 하였다. 또한 Kim[13], Han 등[14] 또한 AlTi₃B1와 TiC의 첨가가 결정립 미세화에 미치는 영향을 연구하였다.

이처럼 mold의 변화, chill의 삽입, 합금원소 첨가에 따른 기계적 성질 예측에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있지만 슬리브가 압탕효과에 미치는 영향 및 슬리브 크기가 기계적 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다. Al 합금 주조시 절연슬리브를 사용함으로써 압탕효과를 개선시킬 수 있고, 이로

[†]E-mail : clickomj@kitech.re.kr

인한 제품회수율 증가 및 용해비용 절감에 긍정적인 효과를 미칠 것으로 예상된다. 본 연구에서는 슬리브의 유무, 종류에 따른 압탕효과를 고찰하고, 절연슬리브를 이용했을 때 슬리브의 크기가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 주조실험

Fig. 1은 본 연구를 위해 제작된 주형상자와 열전대의 위치를 나타내고 있다. 주형상자의 크기는 가로 400 mm, 세로 400 mm, 상형높이 155 mm, 하형높이 110 mm로 제작되었으며 중력 사형주조를 행하였다. 슬리브의 종류와 크기에 변화를 주어 모두 5번의 실험을 진행하였으며 Table 1에 실험에 사용한 슬리브의 종류를 기술하였다.

슬리브조건이 상이할 때의 압탕효과를 평가하기 위하여 슬리브를 설치하지 않은 압탕, 발열슬리브를 설치한 압탕, 절연 슬리브를 설치한 압탕의 높이 100 mm의 정중앙 부위에 열전대를 설치하였다. 또한 슬리브 크기에 따른 압탕효과와 기계적 특성의 변화를 평가하기 위해 절연슬리브를 설치한 압탕 60 mm와 100 mm의 주물의 측면에 30 mm의 Chill plate를 설치하고 냉금이 있는 면과 없는 면 각각 5 mm 지점에 K type Thermo couple를 설치하였다. Argon Bubbling에 의한 탈가스 작업을 약 15분간 시행하였고 용탕의 주입온도는 약 730°C로 주입시간은 약 5초 정도이다. 위치별 냉각속도를 측정하기 위해 설치된 열전대의 정보는 컴퓨터로 보내져 1초에 한 번씩 저장되었다.

2.2 미세조직 관찰 및 기계적 특성 평가

슬리브의 크기가 기계적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위하여 절연슬리브를 설치한 60 mm와 100 mm 압탕의 SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing) 측정, 경도 측정, 인장시험을 하였다. Fig. 1에 열전대의 위치를 나타내었다. 시편은 열전대 삽입위치인 냉금 부착면 5 mm와 비냉금면 5 mm와 최

Fig. 1. Insulating sleeve's thermocouple and mold for A356 alloy : (a) 60 mm Insulating sleeve, (b) 100 mm Insulating sleeve.

Table 1. Condition of the sleeves in experiment.

	슬리브없음	발열슬리브	절연슬리브		
지름 (mm)	80	80	60	80	100
높이 (mm)	200

Fig. 2. 3D model for A356 alloy.

Fig. 3. Tensile test specimen #14A (KS).

대한 가까운 위치에서 채취하였다. 조직사진을 관찰하기 위하여 준비된 시편을 Sand paper를 이용하여 Auto polisher로 가공하였다. SiC 연마지로 입도수치가 큰 #600을 시작으로 #800, #1000, #1200, #1500, #2000, #2400의 순서로 표면을 연마한 다음 1 μ m의 γ -Al₂O₃ 분말을 이용하여 광택 연마를 행하였다. 그 후 1분 30초간 초음파 세척기로 불순물을 제거하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 인장시편을 2D 도면으로 나타낸 것이다. 인장시험은 14A호(KS규격) 시험편을 사용하였으며, 봉상으로 제작하였다. 시편은 냉금면과 비냉금면에서 최대한 가까운 위치에서 채취하였고, 만능인장시험기(SHIMADZU 최대 하중 25 Ton)를 이용하여 인장강도, 항복강도, 연신율을 측정하였다.

경도 측정은 Rockwell Hardness Tester를 이용하였으며, F스케일로 측정하였다. 압입자는 볼지름 1/16inch(직경 1.588 mm)의 강구를 사용하였고, 시험하중 60 Kg(588.4N)으로 5회 측정 후 평균값을 산출하였다.

2.3 응고해석

응고해석은 열유동해석프로그램(Z-CAST)를 이용하였다. 실제 실험과 비교하여 슬리브 크기에 따른 압탕효과와 기계적 특성의 변화를 예측하기 위하여 절연슬리브를 설치한 압탕 60 mm와 100 mm의 주물의 측면에 30 mm의 Chill plate를 설치하고 냉금이 있는 면과 없는 면 각각 5 mm 지점에 열전대를 설치하였다. 용탕 주입온도는 730°C이며 주입시간은 5초로 설정하였다.

Fig. 4는 열유동해석프로그램(Z-CAST)를 이용하여 60 mm의 절연슬리브를 사용하였을 때 주물의 온도 분포를 나타낸 것이다. 응고 시작 약 3초 후, 냉금부위가 빠르게 응고되는 것을 확인할 수 있으며, 약 8초 후 냉금면의 응고는 상당히 진행된 반면 비냉금면의 응고는 거의 진행되지 않은 것으로 보아 냉금면을 기준으로 방향성 응고가 진행되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 100 mm의 절연슬리브를 사용하였을 때의 주물의 온도 분포를 나타낸 것으로서, 전체적으로 60 mm의 절연슬리브를 사용했을 때 보다 응고시간이 더 길어진 것을 확인할 수

Fig. 4. solidification time for ϕ 60 insulating sleeve. Fig. 5. solidification time for ϕ 100 insulating sleeve.

있다. 60 mm의 절열슬리브와 마찬가지로 주물 내부가 가장 늦게 응고되는 양상을 보이고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 슬리브 조건에 따른 압탕효과

Fig. 6 은 슬리브 조건에 따른 A356 합금의 응고시간을 나타낸 그래프이다. 일반적으로 알루미늄 주물의 압탕에는 슬리브

를 사용하지 않으며 주철 주물에서 발열슬리브를 사용한다. 주철의 주입온도는 약 1300~1350°C로 용탕주입 시 발열슬리브가 발화되어 자발적으로 열을 발생시켜 발열이 되지만 알루미늄의 주입온도는 약 680~720°C로 발열슬리브가 발화되지 않아 슬리브의 효과가 충분히 나타나지 않기 때문에 알루미늄합금에서 발열슬리브는 사용되지 않고 있다. Fig. 5 에서 발열슬리브를 설치한 80 mm 압탕과 슬리브를 부착하지 않은 80 mm 압탕의 응고시간은 약 1370초와 약 880초로 나타나는 것을 확인할 수

Fig. 6. Solidification time for uninstalled sleeve, exothermic sleeve and insulating sleeve.

있었다. 발열슬리브를 알루미늄합금에 설치 시 슬리브로서의 효력이 어느정도 있는 것으로 판단되며, 이는 발화에 의한 온도유지가 아닌 주형으로의 열전달 저하에 의한 온도 유지로 사료된다. 절연슬리브를 설치한 80 mm의 응고시간은 약 1680초이며, 발열슬리브보다 약 20%정도 압탕효과가 증가한 것으로 나타났다. 절연슬리브는 열전달을 억제하여 단열의 효과로 압탕의 온도를 유지시키고 발열슬리브는 발화로 인한 열 발생으로 온도를 유지시키므로 녹는점이 비교적 낮은 알루미늄합금에서는 절연슬리브의 사용이 적절할 것으로 판단된다.

3.2 슬리브 크기에 따른 기계적 특성

미세조직을 분석하기 위하여 광학 현미경을 이용하였으며 100배율로 조직사진을 관찰하였다. Fig. 7 은 각 시편의 조직사진을 나타낸 것으로 60 mm 압탕의 냉금면에서 채취한 시편 조직이 가장 미세하고 100 mm 압탕의 비냉금면에서 채취한 시편이 가장 조대한 것을 관찰 할 수 있다. Fig. 8 은 SDAS를 측정하는 것이다. SDAS는 스케일바를 기준으로 500 μm 에 해당하는 길이의 수직상정 결정립계 개수를 파악한 후 그 값으로 500 μm 을 나눈 값으로 나타내었다. 이 과정을 10회 반복 후 평균값을 산출하였다.

Fig. 7. Microstructures of specimen for A356 ($\times 100$).

Fig. 9 는 실험과 해석의 응고시간을 나타낸 그래프이다. 압탕의 크기가 60 mm이고 냉금부위의 열전대인 S_1의 응고시간이 가장 빠른 것을 확인할 수 있으며 S_2, S_3 순으로 응고시간이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 실험과 해석의 고상선에 도달하는 시간이 매우 유사하게 나타났으며 액상선과 고상선 사이에 온도차이가 나타나는 것은 실제실험의 열전달계수는 매 순간마다 변하게 되는데 해석의 열전달계수는 상수 값으로 입력이 되기 때문에 조금의 차이가 있는 것으로 사료된다. 압탕의 크기가 클수록 냉각속도가 더 느려짐을 알 수 있다.

Table 2는 실험에서의 냉각속도에 따른 SDAS를 나타낸 것이

Fig. 8. Method adopted for the measurement of SDAS.

Fig. 9. Cooling curve of the casting : (a) Experiment (b) Simulation.

Table 2. Cooling rate and SDAS for experiment.

위치	experiment	
	Cooling rate (°C/sec)	SDAS (μm)
S_1	5.46	34.96
S_2	2.54	44.62
S_3	1.82	47.62
S_4	1.37	50.81

Fig. 10. Cooling curve vs. SDAS for experiment.

다. 슬리브의 크기가 클수록 냉각속도가 느려지며, 냉각속도가 느릴수록 SDAS의 값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 냉각속도가 빠르면 DAS 및 결정립 조직이 미세해지며 용질원자의 고용 한이 확대되고 편석이 감소할 뿐만 아니라 제2상 입자의 정출 량이 감소하고 크기도 작아지며, 수축공 및 기공이 감소하고 미

Table 4. Mechanical property for simulation and experiment.

위치	SDAS [μm]		[HRF]		UTS [MPa]		YS [MPa]		EI [%]	
	expt.	sim.	expt.	sim.	expt.	sim.	expt.	sim.	expt.	sim.
S_1	34.96	33.68	39.8	39.12	142	141.8	62	62.1	8	7.99
S_2	44.62	44.20	34.1	35.5	137	133.4	60	59.8	7	6.04
S_3	47.62	48.12	32.3	33.5	126	129.0	59	58.5	4	5.01
S_4	50.81	50.57	32.1	32.3	124	126.2	56	57.8	4	4.37

세하게 분산된다[15].

Fig. 10 은 실험의 냉각속도와 SDAS 의 상관관계를 Curve fitting 한 그래프이며 A356에서 냉각속도와 SDAS와의 관계식은 아래와 같다. 측정자료와 이론식을 비교함으로써 측정자료에 근사하는 이론식의 계수를 추출하는 수치 해석방법인 Curve fitting을 통하여 K와 n을 도출하였다. K와 n은 알루미늄 합금에 따른 상수 및 지수로 각 합금에 따라 그 값은 달라지며 A356합금에서의 K값은 55.80, n값은 -0.27이다.

Curve Fitting을 통해 도출된 K와 n과 해석의 냉각속도를 이용하여 해석의 SDAS를 예측하였으며 이를 Table 4 에 나타내었다.

$$SDAS = K \left(\frac{T_L - T_S}{t_f} \right)^n \quad (1)$$

$$SDAS = 55.80 (\text{cooling rate})^{-0.27} \quad (2)$$

Fig. 11 은 실험의 SDAS와 경도, 인장강도, 항복강도, 연신

Fig. 11. SDAS vs. mechanical property for experiment.

Fig. 12. Shrinkage of three sleeve : (a) ϕ 60 insulating sleeve, (b) ϕ 80 insulating sleeve, (c) ϕ 100 insulating sleeve.

율의 상관관계를 Curve Fitting 하여 관계식을 도출한 것이다.

Curve Fitting을 통해 도출된 K와 n과 해석의 SDAS를 이용하여 해석의 기계적 성질(경도, 인장강도, 항복강도, 연신율)을 예측하였으며, 이를 실제 실험과 비교하여 Table 4에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{HRF}[\text{HRF}] &= -0.47 \text{ SDAS} + 55.68 \\ \text{TS}[\text{MPa}] &= -1.08 \text{ SDAS} + 179.84 \\ \text{YS}[\text{MPa}] &= -0.30 \text{ SDAS} + 72.66 \\ \text{EI}[\%] &= -0.25 \text{ SDAS} + 16.79 \end{aligned} \quad (3)$$

해석과 실험의 SDAS를 비교 한 결과 약 99.2% 일치하는 것으로 나타났으며, 경도 약 98.5%일치, 인장강도 약 99.7%일치, 항복강도 99.5%일치, 연신율 98.5%가 일치하였다. 이로써 해석의 타당성을 입증하였으며, 해석을 통해 기계적 성질 예측이 가능하다고 사료된다.

SDAS는 냉각속도에 영향을 받으며 SDAS는 기계적 성질에 영향을 미친다는 연구가 있었는데[4-8], 본 실험을 통해 슬리브의 크기가 커질수록 항복강도, 인장강도, 연신율, 경도는 작아지는 것을 확인함으로써 슬리브의 크기가 작아짐에 따라 기계적 성질이 개선되는데 도움이 된다는 것을 알 수 있었다.

3.3 Simulation을 이용한 결함예측

Fig. 12는 해석을 통한 수축변화를 나타낸 것이다. Fig. 11(a)는 60 mm 압탕에 절연슬리브를 설치 후 나타나는 수축변화를 해석으로서 나타낸 것이다. 최종 응고 후 압탕 하부의 주물 내측에 응고부위가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 주물의 최종 수축부위에 압탕으로부터 용탕이 공급 되어 수축공의 발생을 억제하는데, 압탕의 응고시간이 주물의 응고시간보다 빠르기 때문에 주물내부에 결함이 생긴 것으로 판단된다. 압탕의 높이 200 mm중 약 45 mm가 수축하였으며 총 부피는 약 565,200 mm³ 중 수축한 압탕의 부피는 약 130,702 mm³이다. 수축공의 부피는 약 370 mm³ 정도이며, 압탕의 가장 중요한 역할중 하나인 용탕보급이 잘 안된 것으로 미루어보아 압탕방안이 적절하지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 12의 (b)는 80 mm 압탕에 절연슬리브를 설치 후 나타나는 수축변화이다. 60 mm의 슬리브와 달리 주물내에 응고수축부위가 없는 것을 확인할 수 있다. 압탕 총길이 200 mm 중 14.8 mm가 수축하였으며, 압탕의 총 부피 1,004,799 mm³ 중 75,077 mm³가 수축하였다. 수축공이 나타나지 않은 것으로 보아 적절한 압탕방안으로 판단된다.

100 mm의 압탕에 절연슬리브를 설치한 후 나타나는 수축변

화를 Fig. 12(c)에 나타내었다. 80 mm 절연슬리브를 설치했을 때 수축공이 나타나지 않았으므로 100 mm의 절연슬리브의 경우에도 나타나지 않았지만 적절한 압탕방안이라고 판단하기 어렵다. 그 이유는 회수율과 관련이 있는데, 압탕이 필요이상으로 커지게 되면 제품 회수율이 저하되기 때문에 압탕방안으로 부적절한 것으로 판단하였다. 압탕의 총길이 200 mm 중 7.5 mm가 수축하였으며, 압탕이 수축한 부피는 총 1,570,000 mm³ 중 58,556 mm³이다.

4. 결 론

A356 합금에서 슬리브가 압탕에 미치는 영향과 슬리브 크기에 따른 기계적 특성 평가 및 해석을 통한 주조 결함 예측에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 각 슬리브 별로 압탕효과를 평가하기 위하여 슬리브조건을 변경하여 압탕의 응고시간을 측정하고 냉각속도를 산출하였다. 슬리브를 사용하지 않는 것보다 사용하는 것이 압탕효과에 도움이 되었으며, 발열슬리브보다 절연슬리브의 압탕 효과가 더 뛰어나다는 것을 알 수 있었다.

2) 절연 슬리브의 크기에 따른 기계적 특성을 평가하기 위하여 슬리브 크기를 변경하여 기계적 특성을 평가하였다. 절연슬리브의 크기가 커질수록 기계적 특성이 저하되었으며, SDAS가 작아질수록 기계적 특성에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

3) A356의 SDAS가 작아질수록 기계적 성질에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 실험과 해석의 냉각속도를 일치시켜 해석결과를 검증하고 실험의 냉각속도를 이용하여 SDAS의 관계식을 도출하였다. 도출된 관계식을 통해 해석의 SDAS를 유추한 후 이를 통해 기계적 성질을 산출한 결과 실험값과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 따라서 해석을 통해 기계적 성질 예측이 가능하다고 사료된다.

4) 해석을 이용하여 수축공과 같은 결함예측이 가능하므로 제품개발기간 단축과 품질개선에 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 응고수축에 따른 압탕부피의 감소를 예측할 수 있으므로 효율적인 압탕크기의 선택이 가능하고 이로써 제품회수율 증가 및 용해비용 절감에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Toshihiro Chikada : J. of Japan institute of light metals, Vol. 40,

- No. 12, (1990) 944
- [2] C. H. CH Caceres and B. I selling, *Mater. Sci.&Eng.* A220 109 (1996)
 - [3] Korea Institute of Science and Technology Information, "Aluminum alloy", 2007
 - [4] Chong Do Lee "Effect of microporosity on tensile properties of A356 aluminum alloy", *Mater. Sci.&Eng. A* 464 (2007) 249-254
 - [5] A. M. Gokhale, G. R. Patel, *Scripta Mater.* 52 (2005) 237-241
 - [6] L. Y. Zhang, B. D. Zhou, Z. J. Zhan, Y. Z. Jia, S. F. Shan, B. Q. Zhang, W. K. Wang "Mechanical Properties of cast A356 alloy, Solidified at cooling rate enhanced by phase transition of a cooling medium", *Mater. Sci.&Eng. A* 448 (2007) 361-365
 - [7] Y. -N. Kwon, S. S. Kim, Y. S. Lee and J. H. Lee "Deformation behavior with the variation of microstructure of A356 alloy", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* Vol. 43, No. 12, (2005)
 - [8] L. Y. Zhang, Y. H. Jiang, Z. Ma, S. F. Shan, Y. Z. Jia, C. A. Fan, W. K. Wang "Effect of cooling rate on solidified microstructure and mechanical properties of aluminum - A356 alloy", *Journal of materials Processing Technology* 207 (2008) 107-111
 - [9] K. Radhakrishna, S. Seshan, M. R. Seshadri "Dendrite Arm Spacing in Aluminum Alloy Castings", *American Foundry Society Transactions* (2006) 695-702
 - [10] S. Shivkumar, L. Wang, and C. Keller "Impact properties of A356-T6 Alloys", *Journal of Material Engineering and performance* vol.3 (1) February (1997) 83-90
 - [11] Hyun Yo Kim, Sang Won Han and Hyuck Mo Lee "The effect of Mn On the Crystallization of α -Al(Fe,Mn)Si phase in A356 Alloys", *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* Vol.43, No.6, (2005) 413-417
 - [12] Ji-Hyun Yoon, Eun-Cheol Seol, Eok-Soo Kim, and Kwang-Hak Lee "A study on the Microstructural Changes with Modification and Cast-forging in Hypoeutectic Al-Si Alloys", *Journal of the Korean Foundrymen's Society* Vol. 22, No. 1, (2002) 26-33
 - [13] Chung-Kun Kim "The effect of AlTi5B1 Additions on the Grain Refinement of Aluminum", *Journal of the Korean Foundrymen's Society* Vol. 9, No. 4, (1989) 320-326
 - [14] Yun-Sung Han, Chang-Ock Choi "Study on Grain Refinement of Al-7Si Based Alloys with TiC", *Journal of the Korean Foundrymen's Society* Vol. 23, No. 2, (2003) 63-68
 - [15] J. K. Lee, C. S. Park and M. H. Kim, "Effects of the mold temperatures on the microstructure and mechanical properties of low pressure die cast product", *J. Kor. Foundry's Soc.*, vol. 18, No. 3, (1998) 254-261