

AC4C와 AC7A 주조재의 열변형 수치해석적 연구

윤희성*, 오을권⁺

(논문접수일 2011. 05. 09, 수정일 2011. 07. 27, 심사완료일 2011. 08. 06)

Numerical Study on Thermal Deformation of AC4C and AC7A Casting Material

Hee-Sung Yoon*, Yool-Kwon Oh⁺

Abstract

This study was numerically investigated on thermal deformation of AC4C and AC7A aluminum alloy casting material for manufacturing the automobile tire mold. The metal casting device was used in order to manufacture the mold product of automobile tire at the actual industrial field. The temperature distribution and the cooling time of these materials were numerically calculated by finite element analysis. Thermal deformation with stress distribution was also calculated from the temperature distribution results. The thermal deformation was closely related to the temperature difference between the surface and inside of the casting. As shown by numerical analysis result, the thermal deformation of AC7A casting material became higher than AC4C casting material. In addition, the results of displacement and stress distributions appeared to be larger at the center parts of casting than on its sides because of the shrinkage caused by the cooling speed difference.

Key Words : AC4C(AC4C 알루미늄 합금), AC7A(AC7A 알루미늄 합금), Thermal Deformation(열변형), Finite Element Analysis(FEA) (유한요소해석), Casting(주조)

1. 서론

최근 국내·외 자동차용 타이어 생산 업체에서 점차 사용량이 증가하고 있는 Al 합금 주조재 중에서 AC7A와 AC4C는 Al에 여러 가지 미량의 이종원소와 더불어 각각 Mg(3.5~5.5%), Si(6.5~7.5%)를 첨가하여 내식성 및 주조성을 향상시켰다. 그러나 주조과정에서 용탕이 주형 내부로 주입되어 응고되는 과정에서 냉각시간에 따른 온도차에 의해 발생하는 수축현상^(1,2)이나 응고 진행에 따른 고상의 주물이 수축하여 접촉면에서 air gap이 확장되는 현상 등 여러 가지 문제점이 발생한다. 무엇보다 이러한 연구는 이론적 내용에 준하여 예측하거나 많은 시간

과 비용을 들여 반복적인 실험과 시작품 제작을 통하여 결과를 도출하는 것이 일반적이었다.

주조 공정에서 용융금속이 주형내부에 주입되어 응고되는 과정은 열적, 물리적으로 복잡한 현상으로서 그 과정을 정확히 규명하고 제어하는 일은 어려운 문제이다. 충전이 이루어지는 동안 용탕의 유동형태는 주형내부의 온도에 영향을 미치며, 온도분포는 용탕의 응고과정에 영향을 미친다⁽³⁾.

최근 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 각종 연구기법의 개발에 의해 이러한 주물의 응고·냉각에 따른 변형 및 응력을 어느 정도 예측 가능하게 되었다. 응고 및 열전달 해석은 1954년 처음으로 유한차분법을 이용한 주강 Ingot의 응고해석에 적용되

* 조선대학교 첨단부품소재공학과
⁺ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ygo@chosun.ac.kr)
주소 : 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

었고, 이 후 1970년대 초에는 Comini⁽⁴⁾등에 의해 유한요소법을 이용하여 응고해석이 시도되었으며, 1980년대 초에는 Hong⁽⁵⁾에 의해 경계요소법이 처음으로 주조품의 응고해석에 적용되었다. 이러한 노력의 결과로 실제 많은 시작품의 제조를 생략할 수 있게 되었고, 시간과 경비를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 새로운 제품 개발이 보다 신속하게 이루어질 수 있게 되었다^(6,7).

본 연구에서는 자동차 타이어 금형 제작을 위해 사용되는 Al 합금 주조재중의 하나인 AC4C와 AC7A 주조재를 수치해석을 통해 주조재 내부의 온도분포를 예측하고 이러한 온도분포 결과를 바탕으로 응력 및 변형을 계산함으로써 열변형 특성을 파악하고자 한다.

2. 수치해석 모델링 및 방법

2.1 수치해석 모델링

본 연구에서는 자동차 타이어 제조에 사용되는 타이어 몰드의 제작과정에서 각각의 주조재인 AC4C와 AC7A의 내부 온도분포를 예측하고 이러한 온도분포 결과를 바탕으로 주조재 내부에서 발생하는 변위 및 응력과 같은 열변형 특성을 수치해석 방법으로 예측하여 금형의 정밀도를 향상할 수 있는 제어방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해서 자동차 타이어 몰드 트레드 부분의 온도분포를 해석한 후, 변위와 응력분포를 수치해석적으로 계산하였다.

수치해석을 위해서 “COMSOL MULTIPHYSICS 3.3 VER”의 수치해석 프로그램을 이용하여 편미분 방정식(PDE)으로 구현된 물리현상을 시뮬레이션 할 수 있도록 하였다. 본 수치해석에 사용한 상용코드는 열전달(Heat Transfer), 구조역학(Structural Mechanics), MEMS(Micro Electro Mechanical Systems), 전기역학(AC/DC), 음향해석(Acoustic), 화학공학(Cheical Engineering)등과 같은 다양한 분야에서 다중물리식을 이용하여 복합적으로 모델을 쉽게 구현할 수 있고, 다중물

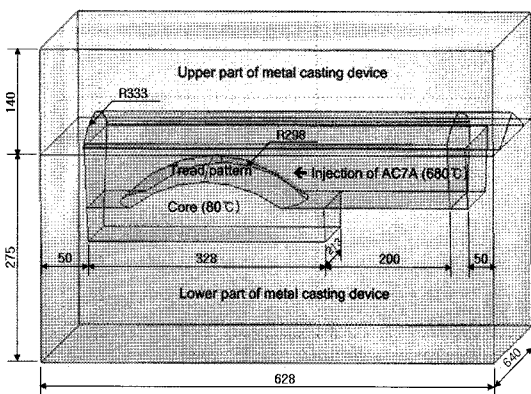


Fig. 1 3-dimensional analysis model of metal casting device

리현상을 적용하여 해석할 수 있는 특징을 가지고 있어 타이어 몰드의 주조과정에서 발생하는 열변형을 해석하기위해 열전달과 구조역학 모듈을 혼합한 열·구조 해석법을 적용하여 사용하였다.

Fig. 1은 수치해석을 위한 3차원 모델링 형상으로서 타이어

Table 1 Thermophysical properties of AC4C casting material

Properties	Unit	Value
Solidification Temperature	°C	557
Melting Temperature	°C	613
Thermal Conductivity	W/m·K	167
Young's modulus	GPa	72.4
Poisson's ratio	-	0.33
Density	kg/m ³	2680
Specific Heat	kJ/kg·k	0.96
Thermal Expansion Coefficient	1/k	21.5 × 10 ⁻⁶

Table 2 Chemical composition of AC4C casting material

Ingredient	Content[%]	Ingredient	Content[%]
Cu	0.25	Ni	0.10
Si	6.50~7.50	Ti	0.20
Mn	0.35	Pb	0.10
Zn	0.35	Sn	0.05
Fe	0.55	Cr	0.10
Mg	0.20~0.45	Al	Remain

Table 3 Thermophysical properties of AC7A casting material

Properties	Unit	Value
Solidification Temperature	°C	590
Melting Temperature	°C	640
Thermal Conductivity	W/m·K	140
Young's modulus	GPa	70
Poisson's ratio	-	0.33
Density	kg/m ³	2670
Specific Heat	kJ/kg·k	0.88
Thermal Expansion Coefficient	1/k	23.6 × 10 ⁻⁶

Table 4 Chemical composition of AC7A casting material

Ingredient	Content[%]	Ingredient	Content[%]
Cu	0.25	Ni	0.05
Si	0.20	Ti	0.20
Mn	0.60	Pb	0.05
Zn	0.15	Sn	0.05
Fe	0.30	Cr	0.15
Mg	3.50~5.50	Al	Remain

몰드용 금형, 금형주조장치 그리고 코어로 구성되어 있다. 각각의 구성요소에 있어서 몰드는 AC4C와 AC7A Al합금, 금형주조장치는 스테인리스강, 그리고 코어는 석고로 구성되어 있으며, 각각의 주조재에 대한 물리적 특성 및 화학적 조성비를 Table 1과 2 그리고 Table 3과 4에 각각 나타내었다.

2.2 수치해석 방법

수치해석을 위한 모델링 형상으로서 Fig. 1과 같이 모델링한 다음 각각의 부분에 물성치 및 경계값을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 우선 주조장치 부분의 예열온도를 약 200°C로 설정하고, 코어 부분의 예열온도를 80°C로 설정한다. AC4C Al합금의 경우 온도를 613°C로 하고 약 25분간 해석한다. 그런 다음 주조장치를 분리하여 나머지 몰드와 코어가 결합된 상태로 상온상태에서 자연냉각과정을 거쳐 측정지점의 온도가 50°C 이하가 될 때까지 해석을 수행한다.

그리고 AC7A Al합금의 경우 온도를 640°C로 설정하여 약 15분간 해석한다. AC4C와 동일한 방법으로 주조장치에서 분리한 다음 50°C가 될 때까지 냉각시킨다. Al합금의 초기 온도 설정은 각 합금의 녹는점을 기준으로 설정하였고, 최종 완료 시점의 온도를 50°C 이하로 설정한 것은 상온상태를 약 30°C로 가정했을 때, 금속재료의 종류에 따라 각기 온도차에 의해 발생되는 열응력은 다소 차이가 있지만 일반적으로 냉각시간에 따른 온도차가 약 25°C 이상 형성되었을 경우 열응력이 발생된다는 점을 감안하여 주형을 내부에서 타이어 몰드의 냉각이 완료되는 시점을 50°C 이하로 설정하였다. 각각의 경계부분에서는 전도 및 대류현상으로 설정하여 해석을 수행하였다.

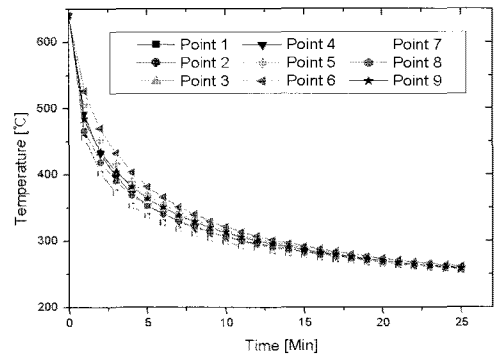
3. 수치해석 결과

수치해석을 위하여 산업현장에서 사용하는 몰드를 토대로 모델링을 하였고, 주조장치 내부로 용탕 주입과정 없이 완전히 충전된 상태인 것으로 가정하여 수치해석을 수행하였다. 또한, 주조장치는 약 200°C, 코어는 80°C로 예열된 상태인 것으로 간주하고 용탕은 주조재의 녹는 온도에 기준을 맞추었다. 용탕 주입이 완료된 후 약 15분에서 25분이 지나면 주조된 몰드를 주조장치에서 분리하여 상온상태에서 냉각시켜 50°C 이하가 될 때까지 해석을 수행하였고, 이때를 주조 완료 시점으로 놓고 수치해석을 실시하였다.

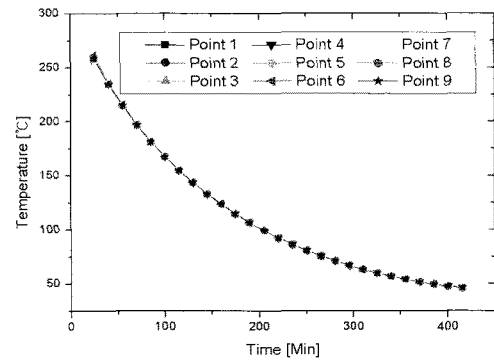
3.1 AC4C 주조재의 수치해석 결과

Fig. 2는 온도분포 결과를 나타낸 그래프로서 Fig. 2(a)는 AC4C 주조재 용탕을 주조장치에 주입한 다음 25분 동안 온도 분포 결과를 나타낸 것이다.

냉각초기에는 급격한 냉각속도를 보이다가 점차 느려지면서

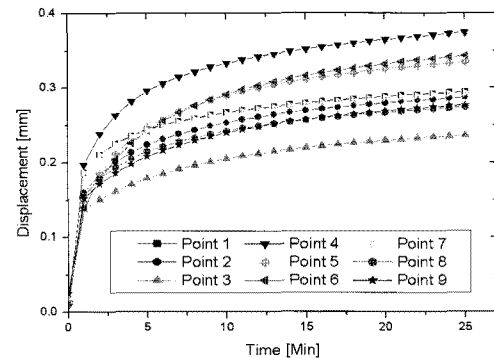


(a) From 0 to 25 minutes

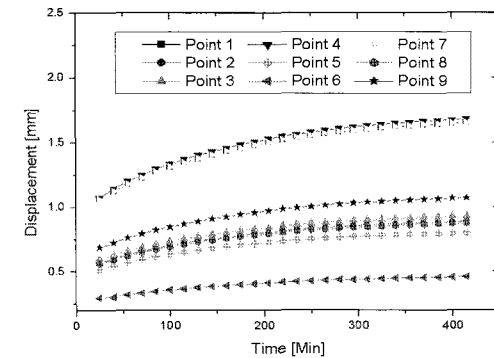


(b) From 25 to 420 minutes

Fig. 2 Temperature distribution calculated by numerical analysis (AC4C)



(a) From 0 to 25 minutes



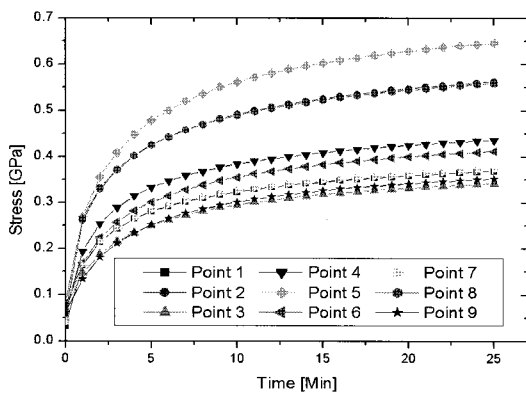
(b) From 25 to 420 minutes

Fig. 3 Displacement distribution calculated by numerical analysis (AC4C)

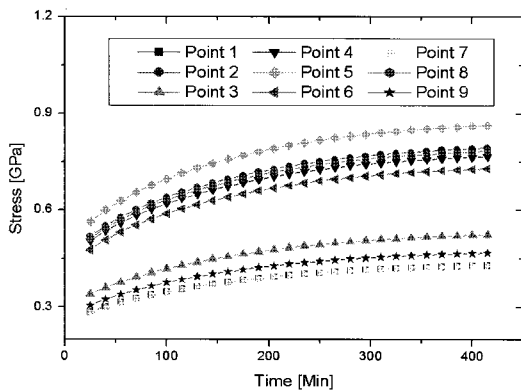
온도평형을 이루어 가는 것을 볼 수 있고, 특히, 외기와 가장 가깝게 위치한 부분에서 가장 빠른 냉각속도를 보이고 있고, 몰드의 중심부분에 해당하는 4, 5, 6번 지점 중 특히, 6번 지점에서 가장 느린 냉각속도를 보이고 있다. 이후 Fig. 2(b)에서는 몰드의 탈착 후 냉각과정을 나타낸 것으로서 50°C가 될 때 까지 각각의 측정지점에서 유사한 온도패턴을 보이며 서서히 냉각되면서 온도평형을 이루어 가는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 3은 몰드의 변위분포를 나타낸 것으로서 Fig. 3(a)를 보면 냉각 초기에는 급격한 변위폭을 보이고 있으나 점차 그 폭이 줄어들어 가는 것을 볼 수 있었고, 특히, 4, 5, 6번 지점에서 변위량이 높게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 또한, Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 25분이 지나고 몰드를 탈착한 후에는 외기와 가장 가까운 곳에 위치한 1, 4, 7번 지점에서 변위값이 높게 나타났다. 이는 온도변화가 급격히 일어나는 곳의 변위가 높다는 것을 보여준다.

Fig. 4는 몰드의 응력분포를 나타낸 것으로서 냉각초기 그래프인 Fig. 4(a)를 살펴보면 2, 5, 8번 지점에서 응력값이 높게 나타났고, 25분이 지난 후 몰드를 주조장치에서 탈착한 후에도 또한 동일한 지점에서 응력값이 높게 나타났다. 이는 다른 측정 지점과의 냉각속도차가 큰 곳이 응력값도 높게 나타난다는 것을 알 수 있었다.



(a) From 0 to 15 minutes



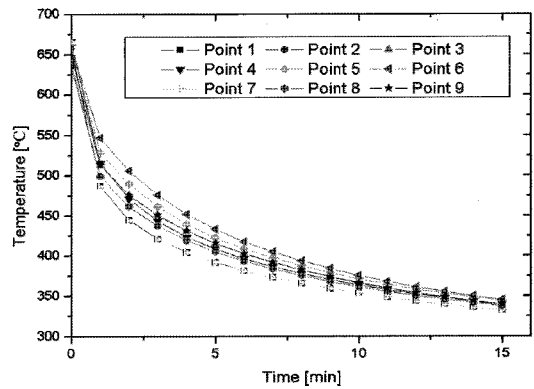
(b) From 25 to 420 minutes

Fig. 4 Stress distribution calculated by numerical analysis (AC4C)

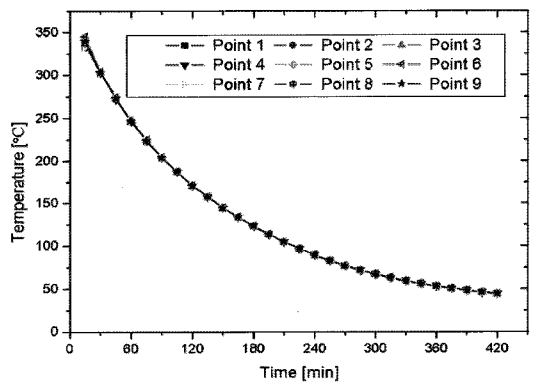
3.2 AC7A 주조재의 수치해석 결과

AC4C 주조재에 대한 수치해석과 동일한 모델링을 가지고 수치해석을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다. Fig. 5(a)는 AC7A 주조재의 용탕을 주조장치에 주입하여 15분이 경과할 때까지의 온도분포를 나타낸 것으로서 초기에 급격한 온도저하가 일어나는 것을 볼 수 있고, 점차 냉각속도가 줄어들면서 측정지점의 온도가 평형을 이루어 가는 것을 볼 수 있다. 또한, 외부와 가장 가까운 위치에 있는 1, 4, 7번 지점에서 가장 빠른 냉각속도를 보이고 있고, 몰드의 중앙부분인 4, 5, 6번 지점 중 특히, 6번 지점에서 냉각속도가 매우 느린 것을 알 수 있다. 이는 전체적인 몰드 형상을 볼 때 6번 지점이 가장 중앙부분에 해당하기 때문으로 사료된다. Fig. 5(b)에서는 15분이 지난 후 주조장치에서 분리한 다음 자연냉각과정동안의 온도분포 결과로서 각각의 측정지점이 거의 비슷한 온도를 유지하며 50°C까지 냉각되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 변위분포를 나타낸 그림으로서 Fig. 6(a)는 용탕주입 후 15분 동안 변화를 나타내고 있다. 변위분포를 살펴보면 냉각이 급격하게 진행되는 초기에 많은 변위량을 보이고 있고, 이후 변위폭이 점차 줄어들어 가는 것을 볼 수 있다. 또한, 열의 집중 현상을 보이는 4, 5, 6번 지점에서 가장 높은 변위량을 볼 수

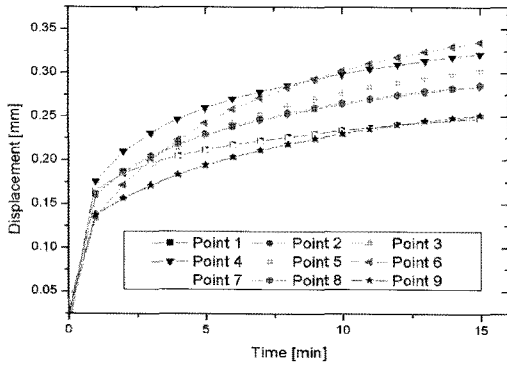


(a) From 0 to 15 minutes

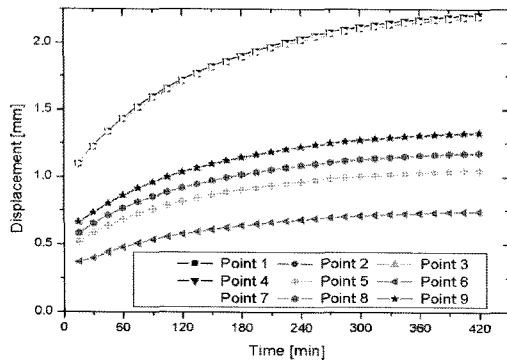


(b) From 15 to 420 minutes

Fig. 5 Temperature distribution calculated by numerical analysis (AC7A)

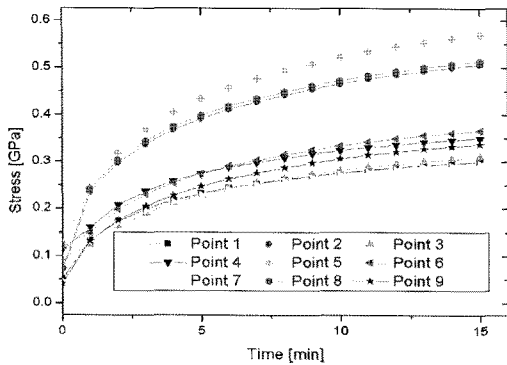


(a) From 0 to 15 minutes

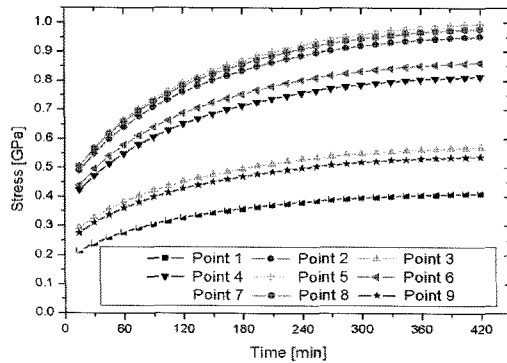


(b) From 15 to 420 minutes

Fig. 6 Displacement distribution calculated by numerical analysis (AC7A)



(a) From 0 to 15 minutes



(b) From 15 to 420 minutes

Fig. 7 Stress distribution calculated by numerical analysis(AC7A)

있었다. 하지만, 15분이 지난 후 몰드를 탈착하면 외기와 가장 가까운 부분에 위치해 있는 1, 4, 7번 지점에서 변위량이 가장 높게 나타났다.

Fig. 7은 응력분포를 나타낸 그림으로서 Fig. 7(a)는 용탕주입 후 15분 동안 응력의 변화를 나타내고 있다. 응력분포를 살펴보면 각 측정지점 중에서 2, 5, 8번 지점이 가장 높은 값을 나타내는 것을 볼 수 있고, 또한, Fig. 7(b)에서 보는 것처럼 탈착 후에도 동일한 지점에서 가장 높은 값을 보였다. 이는 열이 집중되는 곳으로서 주변과 온도차가 가장 높게 나타난 곳에서 이러한 현상이 발생하며 탈착 후에도 동일한 현상을 보이는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 타이어 급형 제작을 위해 사용되는 Al 합금 주조재중의 하나인 AC4C와 AC7A 주조재를 수치해석을 통해 주조재 내부의 온도분포를 예측하고 이러한 온도분포 결과를 바탕으로 응력 및 변형을 계산함으로써 열변형 특성을 파악하여 보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수치해석을 통한 온도분포 결과 두 가지 주조재 모두 유사한 냉각패턴을 보여주고 있었으며, 두 가지 주조재의 변위를 비교한 결과 변위값이 4번 지점에서 동일하게 높게 나타났으나 AC7A가 22mm로 AC4C에 비해 약 0.5mm 높게 나타났다. 그리고 응력분포를 살펴보면, 두 주조재 모두 5번 지점에서 높게 나타났으며, AC7A의 응력값이 0.98GPa로서 AC4C에 비해 0.1GPa 높게 나타났다.
- (2) 이로서 두 주조재의 수치해석 결과를 비교한 결과, AC7A 주조재의 경우 AC4C 주조재에 비하여 탈착시간이 짧기 때문에 생산성 부분에서는 우수하다고 사료되지만, 변위값과 응력값이 AC7A가 AC4C에 비해 높게 나타났고, 이는 제품의 정밀도에 영향을 미치게 되므로 AC4C 주조재를 이용할 시 보다 높은 정밀도를 가지는 제품을 제작할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- (1) Cheon, B. W., 1994, *The Effect of the Metallic Mold Cooling System on the Solidification Structures and the Mechanical properties for Al alloy Casting*, A Thesis for a Doctorate, Dong-A University, Republic of Korea.
- (2) Sung, B. S., Kim, M. A., Cha, Y. H., Kim, J. D., Kim, D. J. and Lee, Y. S., 2006, "A Study on the Molding

- Analysis of Automobile Regulator Housing using the Die Casting,” *Proceedings of the KSMTE Autumn Conference 2006*, pp. 454 ~ 459.
- (3) Mikhailov, M. D., Comini, G., and Guidice, S. Del, 1977, “Determination of thermal wave distributions by the finite element method,” *Int. J. Heat Mass Tran.*, Vol. 20, No. 3, pp. 195 ~ 200.
- (4) Hong, C. P., Umeda, T., and Kimura, Y., 1983, *Boundary Elements* (Eds. Breibbia, C. A., et al.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 153.
- (5) Choi, J. K., and Hong, C. P., 1992, *Modeling of Casting and Solidification Processes 1991* (Eds. Hong, C. P., et al.), Yonsei Univ. Press, Korea, pp. 337.
- (6) Kim, S. M., 2009, “A Study on Thermal Analysis in Ventilated Disk Brake by FEM,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 18, No. 5, pp. 544 ~ 549.