

금형주조장치의 예열온도에 따른 타이어 몰드용 AC7A 주조재의 열변형에 관한 연구

최제세¹, 최병희^{2*}

¹조선대학교 첨단부품소재공학과, ²조선이공대학교 자동차과

A Study on Thermal Deformations of AC7A Tire Mold Casting Material by Pre-Heating Temperatures of Permanent Casting System

Je-Se Choi¹ and Byung-Hui Choi^{2*}

¹Department of Advanced Parts and Materials Engineering, Chosun University

²Department of Automobiles, Chosun College of Science & Technology

요약 타이어 몰드의 내구성과 정밀도는 타이어의 품질을 결정하는 매우 중요한 요인이다. 그러나 타이어 몰드를 제작하는데 있어서 밀폐된 주조장치 안에서 발생하는 주물의 열변형을 측정하는 데는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 금형주조장치의 예열온도에 따른 타이어 몰드용 AC7A 주조재의 온도분포, 변위, 응력과 같은 열변형을 수치해석을 통해 분석하였고, 동일 조건하에서 AC7A 주조재의 온도분포를 실험을 통해 측정하여 수치해석 결과와 비교하였다. 수치해석을 위해 상용프로그램인 "COMSOL Multiphysics"를 사용하였고, 금형주조장치의 예열온도를 150°C, 200°C, 250°C, 300°C로 바꾸어 수치해석을 실행하였다. 수치해석 결과 금형주조장치의 예열온도가 300°C였을 경우에 주조재의 평균변위와 평균응력은 각각 0.25mm와 0.351GPa로 가장 작게 나타났고, 평균온도는 374.27°C로 온도가 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 수치해석에 의한 온도분포 결과와 실험에 의한 온도분포 결과를 비교하였을 때, 냉각 초기에 상변화과정에서 발생하는 잠열로 인해 약간의 온도차이가 발생하였으나, 그 구간을 제외하고는 거의 비슷한 냉각패턴을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract The precision and endurance of tire mold are very important factors to decide the quality of tire. However, the investigation on the thermal deformation of tire mold has a lot of trouble because the tire mold is produced in airtight permanent casting material. In this study, the thermal deformations such as temperature, displacement and stress distributions inside the AC7A tire mold casting material were analyzed by numerical analysis according to the preheating temperature of permanent casting device. In order to verify the results of numerical analysis, the experiments for temperature measurement of the AC7A casting material were carried out under the same condition with numerical analysis. For the numerical analysis, "COMSOL Multiphysics" was used. The preheating temperatures were set up 150°C, 200°C, 250°C and 300°C, respectively. The thermal deformations were calculated in each case. When the preheating temperature is 300°C, displacement and stress are the lowest with 0.25mm and 0.351GPa, but the temperature is the highest with 374.27°C. When the experimental results were compared with the numerical results, there were some temperature differences because of the latent heat by phase change heat transfer. However, the cooling patterns were almost similar except for the latent heat section.

Key Words : AC7A Tire Mold Casting Material, Numerical analysis, Permanent Casting Device, Preheating Temperature, Thermal Deformation

*Corresponding Author : Byung-Hui Choi(Chosun College of Science & Technology)

Tel: +82-10-4634-3461 email: bhchoi@cst.ac.kr

Received March 13, 2013

Revised April 23, 2013

Accepted June 7, 2013

1. 서론

자동차 타이어를 생산하는데 있어 타이어 몰드의 정밀도와 내구성은 타이어의 품질을 결정하는 매우 중요한 요인이다[1]. 타이어의 트레드 패턴은 타이어 몰드에 의해 형성되고, 타이어 트레드는 타이어가 노면과 직접 닿는 부분으로서, 타이어의 제동력, 가속력, 승차감, 소음, 진동, 수명, 배수성, 조정안전성 등을 결정하는 중요한 부분이다. 또한, 타이어는 고성능, 오프로드, 스노우, 레인, 고연비 등 필요에 따라 다양한 특성을 가지고 있다[2,3]. 타이어 몰드 생산과 관련하여 많은 관련 업체에서는 좋은 품질의 몰드를 생산하고, 제작비용과 기간을 감소하기 위하여 많은 연구를 하고 있다. 더 좋은 품질의 타이어 몰드를 생산하기 위해서는 주조장치 내부에 있는 주물에서 발생하는 여러 가지 열전달 특성 및 온도변화를 정확하게 이해 할 필요가 있으며[4], 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구들이 실행되고 있다. Shepel 등[5]은 수치해석을 통해 금형 구조의 응고와 주입에 대해 연구한 바 있으며, Vijayaram 등[6,7]은 금형에서 주물의 응고에 대하여 수치해석을 통해 연구하였다. Kang과 Zabaras[8]는 adjoint method를 이용한 2차원적 응고과정에서 freezing interface motion의 제어에 관하여 연구하였고, Richmond와 Tien[9]은 사각주형에서 응고의 초기단계 동안 열응력과 공기구멍의 형성에 대하여 연구한 바 있다.

실제 산업현장에서 제품의 품질 향상, 비용 절감, 제작 시간 감소 등의 이유로 자동차 타이어 몰드 제작을 위해 금형주조법을 사용한다. 그러나 타이어 몰드를 제작하는데 있어 밀폐된 금형주조장치 안에서 발생하는 주물의 열변형과 온도분포를 측정하는 데는 많은 어려움이 있기 때문에 주물의 냉각과정동안 발생하는 온도분포, 변위, 응력과 같은 열변형은 거의 제조과정을 통한 경험에 의해 대부분 진행되어 왔다.

본 연구에서는 금형주조장치의 예열온도에 따른 AC7A 타이어 몰드용 주조재 내부의 온도분포, 변위, 응력 등의 열변형을 수치해석을 통해 분석하고, AC7A 주조재 내부의 온도분포를 실험을 통해 측정하여 그 결과를 수치해석 결과와 비교한 후, 수치해석 결과의 신뢰성을 입증하고자 하였다.

2. 수치해석 및 실험방법

2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 타이어 몰드용 주조재로 Al-Mg계 합금

중 하나인 AC7A 합금을 사용하였다. AC7A 합금은 타이어 제작을 위한 타이어 몰드용 금형 제작 관련 산업분야에서 널리 사용되고 있으며, Table 1과 Table 2는 AC7A 합금의 물리적 특성과 화학 조성을 나타내고 있다 [10-12]. 수치해석을 위한 모델은 실제 AC7A 합금을 이용하여 타이어 몰드를 생산하고 있는 금형주조장치와 동일하게 모델링하였다. 또한, 금형주조장치의 재질인 SUS303과 코어의 재질인 Gypsum의 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 수치해석은 AC7A 주조재 내부에서 발생하는 온도분포와 열변형을 예측하기 위하여 유한요소법을 기반으로 한 상용프로그램인 “COMSOL Multiphysics”를 사용하였다.

[Table 1] Physical properties of AC7A casting material, core(gypsum) and metal casting device(SUS303).

Properties	AC7A	Gypsum	SUS303
Solidification temperature [°C]	590		1400
Melting temperature [°C]	640		1420
Thermal conductivity [W/m·K]	140	0.1627	16.2
Young's modules [GPa]	70	131	193
Poisson's modules	0.33	0.27	0.25
Density [kg/m ³]	2670	2320	8000
Specific heat [J/kg·K]	8800	1006	500
Thermal expansion coefficient	23.6×10 ⁻⁶	4.15×10 ⁻⁶	17.8×10 ⁻⁶

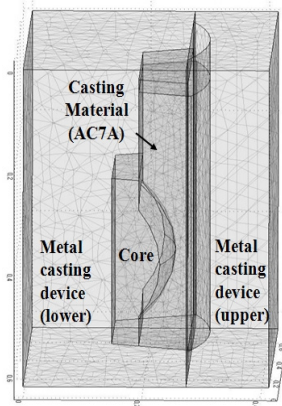
[Table 2] Chemical Compositions of AC7A casting material.

Ingredient	Content[%]	Ingredient	Content[%]
Cu	0.25	Ni	0.05
Si	0.2	Ti	0.2
Mn	0.6	Pb	0.05
Zn	0.15	Sn	0.05
Fe	0.3	Cr	0.15
Mg	3.5 ~ 5.5	Al	92.5 ~ 94.5

Fig. 1은 수치해석에 사용된 금형주조장치의 3차원 모형을 나타내고 있다. 해석에 사용된 모형은 금형주조장치의 상부와 하부, core, AC7A 주조재로 구성되었다. 각 부분의 예열온도 조건은 core는 80°C, AC7A 주조재는 680°C로 설정하였고, AC7A 주조재는 고체 상태로 고려하여 해석하였다.

금형주조장치의 예열온도 조건은 150°C, 200°C, 250°C, 300°C로 설정하여 각각의 경우에 수치해석을 실행하였다. 금형주조장치의 경계조건은 코어(core)와 AC7A 주조재 사이의 접촉면은 전도 상태로 설정하였고, 접촉면

을 제외한 내부는 대류 상태로 설정하여 수치해석을 실행하였다. 수치해석을 통해 금형주조장치에 AC7A 주조재의 주입이 완료된 시점으로부터 주조재가 금형주조장치로부터 탈착되는 시간인 15분 동안 발생하는 온도, 변위, 응력을 계산하였다.

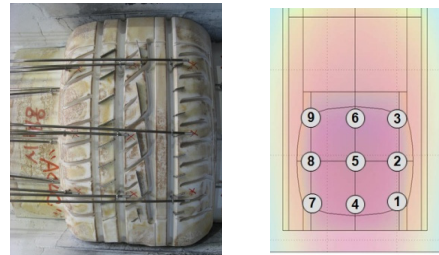


[Fig. 1] Schematic diagram of 3-dimensional analysis model.

2.2 온도분포측정 실험 방법

수치해석 결과와 비교, 검증하기 위하여, 실제 타이어 몰드 제작에 사용되는 금형주조장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험장치는 금형주조장치, 코어, 데이터 획득 장치(DAQ-100), K-type 열전대, PC로 구성되었다. AC7A 주조재의 응고과정동안 주조재 내부의 온도분포를 측정하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 9개의 열전대를 코어의 표면에 설치하였다.

모든 열전대는 장치의 보호와 단열을 위해 스테인리스강 튜브로 절연시켰다. 또한, 모든 열전대는 데이터 획득 장치와 연결하여, 측정된 온도 데이터를 자동으로 PC에 저장하였다. 용융된 AC7A 주조재가 금형주조장치에 주입되는 과정에서 주조재, 금형주조장치, 코어의 온도차로 인하여 발생하는 열변형을 최소화하기 위하여, 금형주조장치는 250℃로 예열하였고, 코어는 80℃로 예열하였다. AC7A 주조재는 680℃의 온도로 완전히 용융된 후에 금형주조장치에 주입되었다. AC7A 주조재의 내부온도는 주조재가 금형주조장치에 완전히 주입된 시점으로부터 주조재가 응고되어 금형주조장치로부터 탈착 될 때까지 약 15분 동안 1분 간격으로 측정하였다. 정확한 결과를 얻기 위하여 같은 조건에서 실험을 3회 실시하여 평균값을 사용하였다.



[Fig. 2] Schematic diagram of temperature measurement points inside the casting.

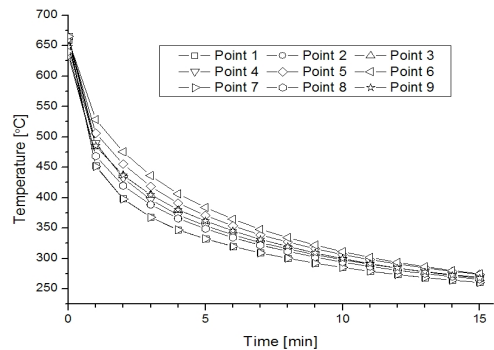
3. 수치해석 및 실험결과

3.1 수치해석 결과

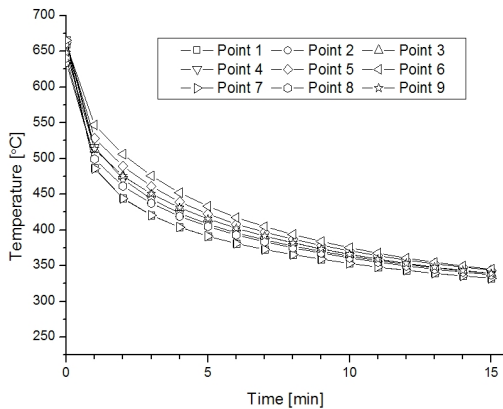
3.1.1 온도분포 해석결과

Figs. 3 ~ 6은 수치해석에 의해 계산된 금형주조장치의 예열온도에 따른 AC7A 주조재 내부의 온도분포를 나타내고 있다. 그림에서 보여준 바와 같이 냉각초기에는 주조재의 온도가 급격하게 떨어졌다. 금형주조장치와 주조재가 닿는 부분에서 이들의 온도차로 인해 급격한 온도의 변화가 발생하였고, 이 때문에 금형주조장치와 주조재가 직접 닿지 않는 중앙부, 즉 측정지점 4, 5, 6의 온도가 다른 지점에 비해 더 높게 나타났다.

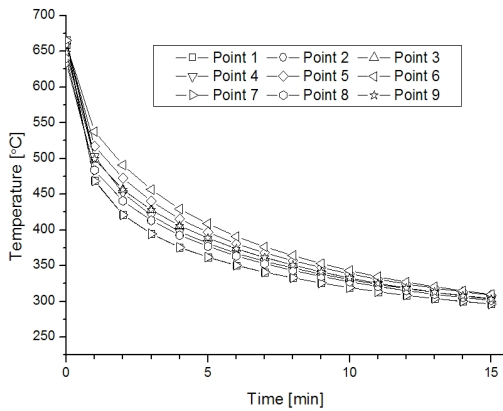
금형주조장치의 예열온도에 따른 주조재의 평균온도를 보다 쉽게 비교하기 위하여, Table 3은 각각의 예열온도에 따라 주조재가 금형주조장치로부터 탈착될 때 주조재의 평균온도를 나타냈다. 금형주조장치를 150℃로 예열하였을 경우에는 탈착시점에서 주조재 평균온도는 약 267.33℃로 나타났고, 300℃로 예열하였을 경우의 평균온도는 374.27℃로 나타났다. 온도분포 해석결과를 통해 금형주조장치의 예열온도에 따라 주조재의 냉각속도에 많은 차이가 보이는 것을 확인할 수 있었다.



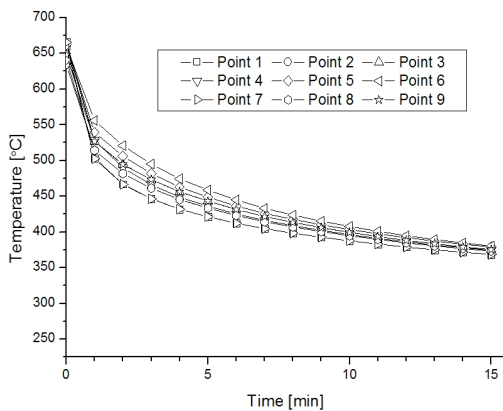
[Fig. 3] Temperature distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 150℃.



[Fig. 4] Temperature distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 200°C.



[Fig. 5] Temperature distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 250°C.



[Fig. 6] Temperature distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 300°C.

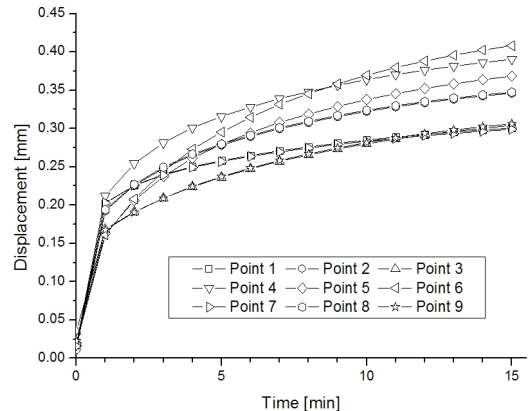
[Table 3] Average temperatures after 15 minutes calculated according to variations of preheating temperature by numerical analysis.

Preheating Temperature	Average Temperature After 15minutes
150 °C	267.33 °C
200 °C	302.86 °C
250 °C	338.41 °C
300 °C	374.27 °C

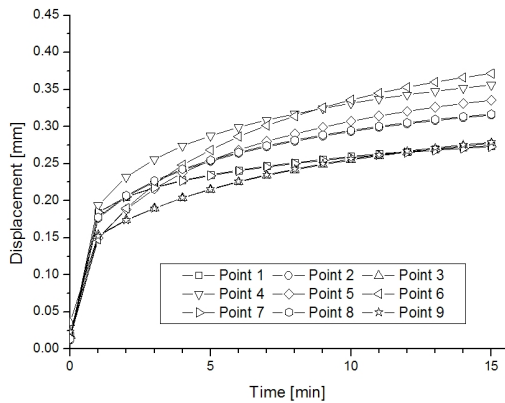
3.1.2 변위 해석결과

Figs. 7 ~ 10은 앞 절의 수치해석을 통해 얻은 온도분포 결과를 토대로 계산된 AC7A 주조재의 변위해석 결과를 보여주고 있다. 변위해석 결과에서, 모든 예열온도 조건에서 중앙부에 위치한 4, 5, 6번 지점이 다른 지점에서 보다 변위가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 예열온도에 따른 변위결과를 더 쉽게 알아보기 위해, Table 4에 각각의 예열온도에 따라 주조재가 금형주조장치로부터 탈착될 때 주조재의 평균변위를 나타냈다. 150°C로 예열하였을 경우 주조재의 탈착시점에서 평균변위는 약 0.341mm로 가장 크게 나타났고, 300°C로 예열하였을 경우 평균변위는 약 0.25mm로 가장 작게 나타났다.

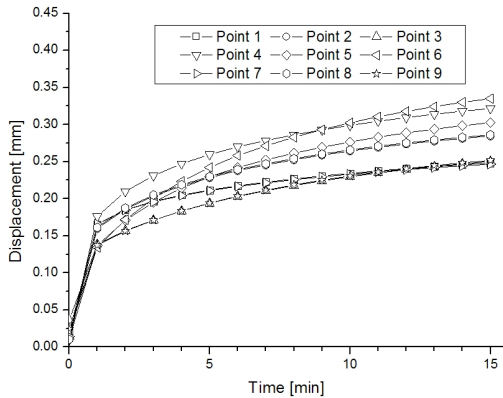
변위해석 결과에서 금형주조장치의 예열온도가 높을수록 AC7A 주조재의 전체적인 변위가 더 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



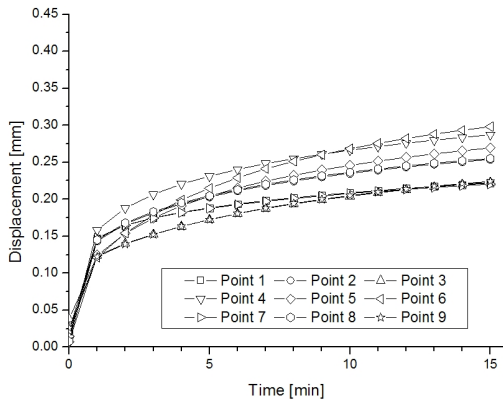
[Fig. 7] Displacement distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 150°C.



[Fig. 8] Displacement distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 200°C.



[Fig. 9] Displacement distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 250°C.



[Fig. 10] Displacement distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the pre-heating temperature 300°C.

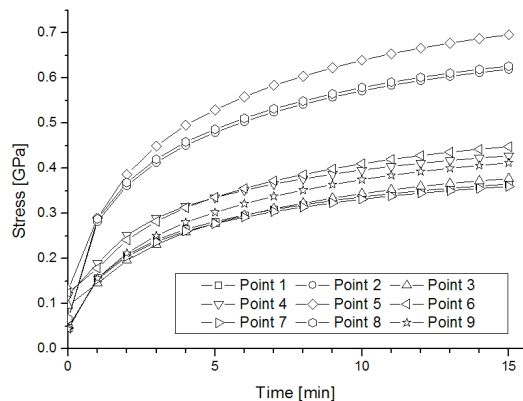
[Table 4] The average displacements after 15 minutes calculated according to variations of preheating temperature by numerical analysis.

Preheating Temperature	Average Displacement After 15minutes
150°C	0.341mm
200°C	0.311mm
250°C	0.281mm
300°C	0.250mm

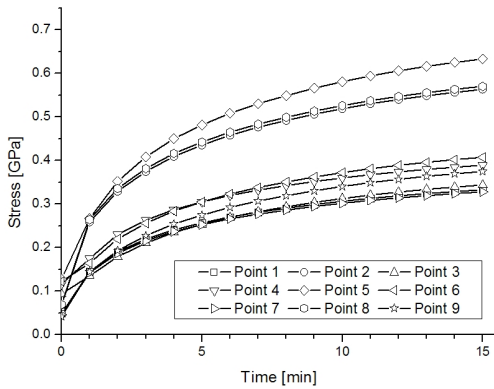
3.1.3 응력 해석결과

Figs. 11 ~ 14는 앞 절의 수치해석을 이용한 온도분포, 변위해석 결과를 토대로 계산된 금형주조장치의 예열온도에 따른 타이어 몰드용 AC7A 주조재 내에 형성된 응력해석 결과를 보여주고 있다. 또한, 예열온도에 따른 주조재의 응력해석 결과를 보다 쉽게 알아보기 위하여, Table 5에 예열온도에 따라 주조재가 금형주조장치로부터 탈착될 때 주조재의 평균응력을 나타내었다. 금형주조장치를 150°C로 예열하였을 경우에 주조재의 탈착시점에서 평균응력은 대략 0.481GPa로 가장 크게 나타났으며, 금형주조장치를 300°C로 예열하였을 경우의 평균응력은 약 0.351GPa로 가장 작게 나타났다.

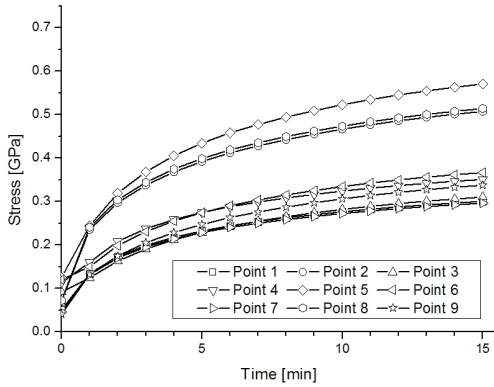
응력분포 해석결과를 통해 금형주조장치의 예열온도가 높을수록 AC7A 주조재의 전체적인 응력이 더 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



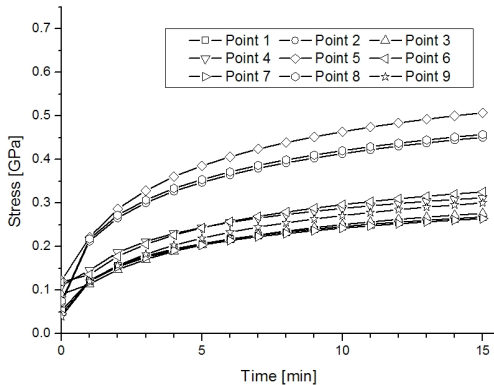
[Fig. 11] Stress distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 150°C.



[Fig. 12] Stress distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 200°C.



[Fig. 13] Stress distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 250°C.



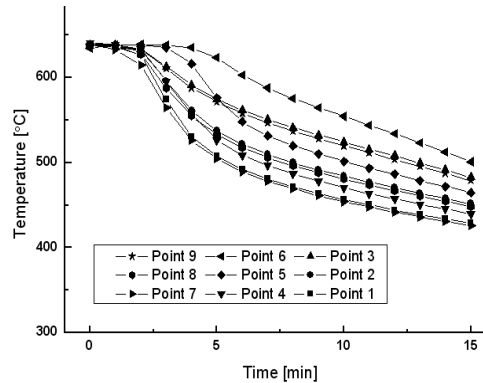
[Fig. 14] Stress distribution result calculated by numerical analysis inside the casting by the preheating temperature 300°C.

[Table 5] Average stresses after 15 minutes calculated according to variations of preheating temperature by numerical analysis.

Preheating Temperature	Average Stress After 15minutes
150°C	0.481GPa
200°C	0.438GPa
250°C	0.395GPa
300°C	0.351GPa

3.2 온도분포 실험 결과

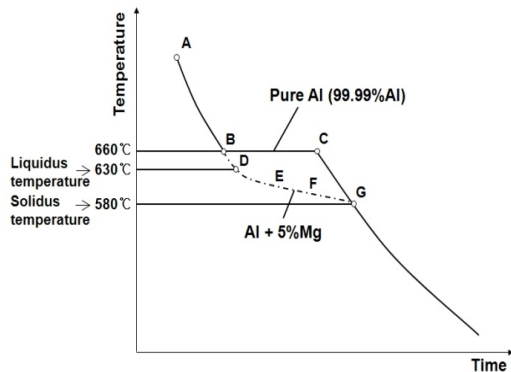
Fig. 15는 금형주조장치의 예열온도를 250°C로 설정하고, 수치해석과 동일한 조건하에서 열전대를 이용하여 금형주조장치 내에서 AC7A 주조재를 이용한 타이어 몰드 제작과정에서 주조재 내에 형성되는 온도분포를 실험을 통해 얻은 결과를 보여주고 있다. Fig. 15에서 보는 바와 같이, 온도분포 측정결과는 초기에 용융된 AC7A 주조재가 응고되면서 상변화 과정에서 발생하는 잠열에 의해 냉각초기부터 약 5분 동안은 온도가 이후 냉각시간에 비해 빠르게 낮아지지 않고 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이 상변화 과정 구간을 제외하면 모든 측정지점에서의 냉각패턴은 앞의 수치해석 결과에서 나타난 온도분포 결과와 거의 유사하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 15] Experimental result of temperature distribution inside the casting by the pre-heating temperature 250°C.

Fig. 16은 순수 알루미늄과 알루미늄에 마그네슘이 5% 함유된 알루미늄 합금의 온도분포 곡선을 나타내는 것으로, 순수 알루미늄과 알루미늄 합금이 완전용융 상태에서 시간의 변화에 따라 고체 상태로 응고되는 과정을 보여주고 있다. Fig. 16의 그래프에서 보는 바와 같이, 용

용된 알루미늄 합금이 응고되는 과정인 상변화 과정에서 잠열로 인해 고-액 상변화 구간 동안에는 시간에 따른 온도의 변화가 급격하게 나타나지 않고 있음을 확인할 수 있으며, 고체 상태로 진행되는 냉각온도가 580°C 이하에서의 온도분포는 시간에 따라 급격하게 낮아지고 있음을 볼 수 있다.



[Fig. 16] Thermal curve interpretation of pure Aluminum and Aluminum-5% Magnesium alloy.

4. 결론

본 연구에서는 금형주조장치의 예열온도에 따른 타이어 몰드용 AC7A 주조재 내부에서 발생하는 열변형에 대하여 수치해석을 통해 조사하였다. 또한, 수치해석을 통해 얻어진 결과를 검증하기 위하여, 실제 타이어 몰드 제조에 사용하는 금형주조장치를 이용하여 수치해석과 동일한 조건하에서 온도분포 측정실험을 실행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

수치해석을 통해 계산된 온도분포 결과, 금형주조장치의 예열온도를 300°C로 하였을 때 평균온도는 374.27°C로 다른 예열온도 조건의 결과에 비해 냉각속도가 가장 늦었고, 150°C로 예열하였을 경우 평균온도는 267.33°C로 가장 빠르게 냉각되는 것을 확인할 수 있었다. 온도분포 결과를 토대로, AC7A 주조재 내부의 냉각과정 동안의 변위, 응력과 같은 열변형은 금형주조장치의 예열온도가 300°C일 때 변위는 0.25mm, 응력은 0.351GPa로 가장 작게 발생하였고, 150°C일 경우 변위는 0.341mm, 응력은 0.481GPa로 가장 크게 발생하였다. 한편, 온도분포 측정 실험 결과와 수치해석을 통한 온도분포 결과를 비교하였을 때, 냉각초기 약 5분 동안 용융된 주조재가 응고되는 상변화 과정에서 발생하는 잠열에 의해 온도패턴이 약간 다르게 나타났으나, 상변화 과정 이후의 각 측정지점에

서의 온도패턴은 거의 유사하게 나타났다. 이를 통해, 본 연구에서 생산현장에서 파악하고자 하는 고체상태에서의 AC7A 주조재의 냉각에 따른 열변형 결과의 확인을 위한 수치해석적 접근은 수치해석 및 실험을 통해 얻은 온도분포 결과를 통해 신뢰성을 확보할 수 있는 결과라고 볼 수 있다. 결국, 금형주조장치와 AC7A 주조재 사이의 온도차에 의해서 발생하는 열변형의 최소화는 금형주조장치의 예열온도를 높게 할수록 적게 발생하지만, 제품의 정밀도 및 제품생산에 소요되는 비용과 시간을 고려하면, 금형주조장치의 예열온도를 250°C로 설정하는 것이 가장 적절하다고 사료된다.

References

- [1] G. W. Kim, H. S. JUNG, J. R. CHO, Y. S. YANG, Finite element analysis in residual aligning torque and frictional energy of a tire with detailed tread blocks. Transactions of KSAE, pp. 173-180, Vol. 12, No. 6, 2004.
- [2] B. G. Rhee, S. M. Oh, Study on the friction characteristics for automotive tires. The Korea Academia-Industrial Cooperation Society, pp. 1535-1540, Vol. 9, No. 6, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2008.9.6.1535>
- [3] D. W. Lee, S. R. Kim, S. S. Cho, Optimization of Tire Contour by using GA and DOE. The Korea Academia-Industrial Cooperation Society, pp. 1063-1069, Vol. 12, No. 3, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.3.1063>
- [4] Y. K. OH, H. S. YOON, H. D. YANG. A study on thermal deformation of AC4C aluminum alloy casting material for tire mold in metal casting method. International Journal of Modern Physics B, pp. 2243-2248, Vol. 24, No. 15-16, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217979210064733>
- [5] S. V. SHEPEL, M. PAOLUCCI. Numerical simulation of filling and solidification of permanent mold casting. Applied Thermal Engineering, pp. 229-248, Vol. 22, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00068-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00068-0)
- [6] T. R. VIJAYARAM, S. SULAIMAN, A. M. S. HAMOUDA, M. H. M. AHMAD. Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic mold. Journal of Materials Processing Technology, pp. 29-33, Vol. 178, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.025>

- [7] C. P. HONG, T. UMEDA, Y. KIMURA. Boundary Elements. Berlin: Spring-Verlag, Vol. 153, 1983.
- [8] S. KANG, N. ZABARAS. Control of the freezing interface motion in two-dimensional solidification processes using the adjoint method. International Journal for Numerical Methods in Engineering, pp.63-80, Vol. 38, No. 1, 1995.
- [9] O. RICHMOND, R. H. TIEN. Thermal stress and air-gap formation during the early stage of solidification in a rectangular mold. Journal of Mechanics, pp. 481-486, Vol. 49, 1971.
- [10] Aluminum Association. Aluminum standard and data, Aluminum Association, Inc. 2000.
- [11] Aluminum Association. International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys, Aluminum Association, Inc. 2001.
- [12] H. E. BOYER, T. L. GALL. Metal Handbook, American Society for Metals, Materials Park, 1985.

최 제 세(Je-Se Choi)

[정회원]



- 2010년 2월 : 조선대학교 첨단부품소재공학과(공학석사)
- 2011년 2월 ~ 현재 : 조선대학교 첨단부품소재공학과(박사과정)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 전남도립대학교 조선기계과 초빙교수

<관심분야>
기계, 열유체

최 병 희(Byung-Hui Choi)

[정회원]



- 2006년 2월 : 조선대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 2008년 2월 : 조선대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 2009년 4월 ~ 현재 : 조선이공대학교 자동차과 교수

<관심분야>
기계, 자동차