creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000236685

2008년 8월
석사학위논문

타이어 몰드용 AC4C 주조재의 온도분포 및 열변형 예측에 관한 연구

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

김 영 선

2008년8월 석사학위논문 타이어 몰드용 AC4C 주조재의 온도분포 및 열변형 예측에 관한 연구 김 영 선

타이어 몰드용 *AC4C* 주조재의 온도분포 및 열변형 예측에 관한 연구

A Study on Prediction of Thermal Deformation and Temperature Distribution of AC4C Casting Material for Tire Mold

*2008*년 *8*월 *25*일

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

김 영 선

타이어 몰드용 *ACAC* 주조재의 온도분포 및 열변형 예측에 관한 연구

지도교수 오 율 권

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

*2008*년 *4*월

조선대학교 대학원

정밀기계공학과

김 영 선

김영선의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교 수 심 재 기 인

위 원 조선대학교 교 수 이 동 기 인

위 원 조선대학교 교 수 오 율 권 인

*2008*년 *5*월

조선대학교 대학원

목 차

제 1 장 서 론 ·····

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구목적 및 내용 ·····

제 2 장 이론해석 ·····

2.1 타이어 제조용 몰드의 열전달 해석 ·····

2.1.1 응고해석을 위한 3차원 열전도 해석 ····· 5

2.2 수치해석을 이용한 응고해석 방법 ·····

2.2.1 유한차분법(Finite difference method) ····· 6

2.2.2 유한요소법(Finite element method) ····· 8

2.2.3 유한요소법에 의한 열응력 해석 ····· 1

2.2.4 상변화(응고현상)의 취급방법 ·····

2.2.4.1 응고율과 온도 ·····

2.2.4.2 응고잠열의 취급방법 ·····

제 3 장 수치해석 및 실험 방법 ·····

3.1 수치해석 모델 ·····

3.2 수치해석 방법 및 절차 ·····

3.2.1 금형주조에서의 열변형 해석 ·····

3.3 실험 장치 및 방법 ·····

제 4 장 수치해석 및 실험 결과 ·····
4.1 수치해석 결과 ·····
4.1.1 알루미늄 합금 금형의 열변형 해석 결과 ····· 30
4.2 온도측정 실험 결과 ·····
4.2.1 트레드 부에서의 온도측정 결과 ····· 4
4.2.2 사이드 부에서의 온도측정 결과 ····· 4

제 5 장 결 론 ·····

참고문헌 ····· 54

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Temperature compensation at equivalent specific heat method ····· 15

Fig. 2 Rough expression of temperature recovery method ····· 16

Fig. 3 Enthalpy from function of temperature ····· 18

Fig. 4 3-dimensional analysis model of metal casting device ····· 20

Fig. 5 2-dimensional analysis model of metal casting device ····· 25

Fig. 6 Schematic diagram of the measurement points ····· 25

Fig. 7 Experimental set-up for measurement of temperature distribution ····· 26

Fig. 8 Measurement points inside the tire mold ····· 28

Fig. 9 A photography of installed thermocouples on the core ····· 28

Fig. 10 Insulation process of K-type thermocouple ····· 29

Fig. 11 Measurement apparatus of data acquisition unit ····· 29

Fig. 12 Visualization of temperature distribution and heat flux direction in numerical analysis model ····· 33

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig. 13 Thermal deformation at the measurement points during the cooling time from 0 to 25 minutes ····· 34

Fig. 14 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes ····· 35

Fig. 15 Displacement variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes ····· 36

Fig. 16 Stress variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes ····· 37

Fig. 17 Thermal deformation at the measurement points during the cooling time from 25 to 420 minutes ····· 38

Fig. 18 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes ····· 39

Fig. 19 Displacement variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes ····· 40

Fig. 20 Stress variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes ····· 41

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig. 21 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time ····· 45

Fig. 22 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes ····· 46

Fig. 23 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes ····· 47

Fig. 24 Temperature variation at the measurement points in side part during the cooling time ····· 50

Fig. 25 Temperature variation at the measurement points in side part during the cooling time from 0 to 25 minutes ····· 51

Fig. 26 Temperature variation at the measurement points in side part during the cooling time from 25 to 420 minutes ····· 52

LIST OF TABLES

Table 1 Chemical composition of AC4C casting material ····· 20

Table 2 Physical properties of AC4C casting material ····· 21

Table 3 Physical properties of Gypsum (Core) ····· 21

Table 4 Physical properties of SUS303 ····· 22

NOMENCLATURE

ρ	질량밀도
λ	열전도율
t	시간
ε	전 변형율
ε_e	탄성변형율
ε_p	소성변형율
ε_o	초기변형율
T	온도
K	평형분배 계수
L	응고잠열
Γ^e	요소의 경계
Ω^e	요소영역
f_s	응고율
C_p	비열
T_p	주입온도
T_L	액상선 온도
T_S	고상선 온도
T_M	순금속의 융점
$\triangle Q_s$	응고잠열의 방출량
$\triangle f_s$	응고율의 증가량
$[N]$	내삽함수 매트릭스
$[K]$	열전도 매트릭스
$[C]$	열용량 매트릭스

NOMENCLATURE (Continued)

$[B]$	변형율-변위 매트릭스
$[E]$	강성행렬
$[N_i]$	형상함수
$[D_{ep]}$	탄소성 매트릭스
$\{\varepsilon\}$	전 변형율 벡터
$\{\sigma\}$	응력 벡터
$\{F\}$	열유속 벡터
$\{\varnothing\}$	절점온도 벡터
$\{F_o\}_i^e$	열변형에 의한 등가절점력
$\{F_p\}_i^e$	기계적 물성치가 온도의존적인 거동함에 따른 등가절점력
$\{\triangle U\}$	변위 벡터
$\{\triangle F_T\}$	절점력 벡터

ABSTRACT

A Study on Thermal Deformation and Temperature Distribution of AC4C Casting Material for Tire Mold

Kim, Young-Sun
Advisor : Prof. Oh, Yool-Kwon Ph.D.
Dept. of Precision Mechanical Engineering
Graduate School of Chosun University

The present study was numerically and experimentally investigated on the temperature distribution and thermal deformation inside the automobile tire mold using the AC4C casting material. In this study, the AC4C casting material, one of the Al-Si-Mg system aluminum alloy, was selected as a casting material and the metal casting device was used in order to manufacture the mold product of automobile tire in the actual industrial field. For the numerical analysis, "COMSOL Multiphysics 3.3 Ver", the commercial program based on the partial differential equation (PDE), was used in order to predict the thermal deformation of the AC4C tire mold including temperature, displacement and stress. Also, the prototype was produced from the result of numerical analysis and the experimental study was performed to measure the temperature distribution inside the tire mold during the cooling process.

The numerical result revealed that the temperature distribution inside the mold occurred rapid cooling from the initial cooling to 20 minutes. And then, it was slowly cooled after separating the mold in metal casting device and the completed cooling time of casting mold took about 7 hours. Also, the results of displacement and stress distributions appeared to be larger at the center parts of tread part in mold than on its sides because of the shrinkage caused by the cooling speed difference. Moreover, when the profiles of the temperature distribution were experimentally measured and were compared with those of the numerical result, it appeared that there was a slight temperature difference because of the latent heat by phase change heat transfer. However, the result of cooling temperature and patterns were almost similar except for the latent heat interval.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

자동차의 구성품 중 하나인 타이어는 자동차의 안전과 소음, 진동, 주행성능 등 승차감을 좌우하는 핵심 구성품 중의 하나이다. 따라서 자동차의 종류 및 용도에 따라 제각기 다른 설계가 필요하고, 소비자의 취향에 맞춰 차량의 장식 기능 및 패션화를 위한 설계가 요구되고 있다. 특히, 자동차에서 보다 높은 안전성과 고도의 주행성능을 요구하는 고객의 기호에 맞추기 위해 타이어를 빠른 시일 내에 공급하는 것이 타이어 산업의 성패를 좌우하게 되고, 이를 위해서는 타이어 제조를 위해 필요한 타이어 제조용 몰드의 디자인에서 제작까지 공정시간의 단축과 함께 타이어의 정밀도를 향상시킬 수 있는 몰드제작이 해결되어야 할 문제로 부각되고 있다. 이를 위해, 타이어 몰드의 제작에 있어서 품질의 우수성과 제작공정의 단축, 그리고 복수제작이 가능한 정밀도가 높은 몰드와 공정기술 개발에 많은 연구가 이루어지고 있다.

주조는 금속을 용해한 액체상태의 용융금속을 특정한 형상의 주형에 주입하고 냉각시켜 소요한 형상의 제품을 만드는 공정으로서[1-3] 한 번의 공정으로 원하고자 하는 형태의 제품을 제작할 수 있다. 또한, 거의 모든 금속을 원하는 모양의 최종제품으로 제작할 수 있을 뿐만 아니라 재료와 공정을 적절히 조절하면 균일한 성질을 갖는 제품의 생산도 가능하다.

주물의 품질과 생산성을 향상시키기 위해서는 정확하고 신속한 주조방안의 작성이 필요하다. 주조품의 건전성은 주로 용탕이 주형내에서 응고하는 과정에서 결정된다. 따라서 응고과정에 있어서의 여러 가지 현상을 정확하게 파악하고 응고과정을 정량적으로 제어하는 것은 주조방안을 설정하는데 있어서 대단히 중요한 일이라 하겠다[4].

주물은 고온의 용탕이 냉각되면서 온도 저하에 따른 밀도 증가와 필연적인 수축을 동반하면서 형상의 복잡함이 자유수축에 대한 장애가 되므로 주물에는 변형이 발생하게 된다. 주물에서 발생한 변형 즉, 치수불량은 모형치수불량, 주형치수불량 및 응고·냉각 중의 주물 및 주형의 변형으로 구별할 수 있다. 이 중에서 응고·냉각 중의 변형은 액상에서 고상으로의 상변태를 동반하므로 변형의 주체가 응고 중에 일어나는지, 아니면 응고 후에 일어나는지, 또는 주형에 의한 구속이 어느 정도인지, 고온에서 일어나는 현상인지 정성적인 판단 기준조차 많지 않다.

이러한 변형에 대하여, 간단한 형상의 주물에 대한 변위 측정, 응력 측정 등의 연구가 이루어져 왔으나[5-10], 고온의 유체인 용탕의 거동을 정확히 예측하는 일은 쉬운 일이 아니다. 아직까지 복잡한 형상을 가지는 주물의 특성상 냉각에 따른 온도분포를 파악하고, 응력발생 및 수축현상, 치수변화가 어떻게 발생되는지에 대한 정확한 예측 및 제어방법 등의 정밀주조를 위한 전반적인 체계가 이루어 지지 않아 건전한 주조품을 만들기 위해서 많은 비용과 시간을 들여 반복적인 시작품을 제작하고 최종 제품의 설계 및 제조를 해야 하는 실정이다.

1.2 연구목적 및 내용

최근 산업현장에서 많이 사용하고 있는 알루미늄(Al) 합금 주조재 중 본 연구에서 사용한 AC4C 주조재는 Si를 6.5~7.5% 가량을 함유한 합금으로서 용탕의 유동성과 주형 충진성이 다른 합금에 비하여 우수할 뿐만 아니라, 미량의 이종 원소들을 첨가함으로서 강도의 증가는 물론 열팽창 계수를 낮추고 내마모성을 향상시킬 수 있기 때문에 주조용 합금으로 널리 이용되고 있다[11]. 또한, 이 합금은 내식성, 용접성 등이 우수하여 자동차용 부품으로 널리 사용되고 있으며, 최근에는 경량화를 위한 항공기 부품에도 적용되고 있다. 그러나 주물에 기포가 생기기 쉽고, 비중이 작으므로 산화물, 모래 등이 말려 들어가기 쉽다. 또한, 응고수축이 크고, 주물 두께의 감도가 높은 것 등 실제 주조상의 어려움이 많다. 이러한 주조결함들을 효과적으로 제어하기 위해서는 정확한 응고해석 및 응력해석을 수행하여 결함의 위치와 그 원인을 정밀하게 예측해야하고 그에 따라서 적절한 주조방안을 설계해야 한다.

최근 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 각종 기법의 연구개발에 의하여 이러한 주물의 응고·냉각에 따른 변형 및 응력을 어느 정도 예측 가능하게 되었다. 응고 및 열전달 해석은 1954년 Sarjant와 Slack[12]에 의해 처음으로 유한차분법을 이용한 주강 Ingot의 응고해석에 적용되었고, 이 후 1970년대 초에는 Comini[13] 등에 의해 유한요소법을 이용하여 응고해석이 시도되었으며, 1980년대 초에는 Hong[14]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 제품의 개발이 보다 신속하게 이루어질 수 있게 되었다[15].

따라서 본 연구에서는 타이어 제조에 사용되는 몰드의 주조과정에서 금형주조방식을 이용한 몰드의 냉각시간에 따른 내부 온도분포와 이로 인하여 발생하

는 변위 및 응력분포를 수치해석을 통하여 예측해 보고자 하였다. 또한, 수치해석 결과를 바탕으로 시제품을 제작하여 온도를 측정하고 수치해석 결과와 비교해 봄으로써 열변형 특성을 파악해 보고자 하였다. 연구 수행을 위한 세부내용은 다음과 같다.

- 타이어 제조용 몰드의 주조를 위한 주조재로는 Al-Si-Mg계 알루미늄 합금인 AC4C를 사용하였고, 수치해석을 위한 프로그램으로는 편미분방정식(PDE)으로 구현된 다중물리(Multiphysics)현상의 해석이 가능한 “COMSOL Multiphysics 3.3 Ver”을 사용하였다.

- 금형주조방식을 도입한 타이어 몰드 주조 시 금형주조장치 및 코어를 예열한 후 용탕을 주입하여 냉각시켰을 때 해석모델의 트레드 부위에서 발생하는 온도, 변위 및 응력분포를 수치해석을 통하여 예측해 보고, 각각의 측정지점에서 발생하는 열변형을 예측해 보고자 하였다.

- 수치해석 결과를 바탕으로 시제품을 제작한 후 실험을 실시하여 각각의 측정지점에서의 온도분포를 측정하고자 하였다. 또한, 측정한 실험결과와 수치해석 결과를 비교·분석함으로써 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하고, 추후 AC4C 주조재를 사용한 몰드제작 시 열변형에 따른 결함을 감소시켜 시제품 제작에 따른 비용을 줄이고 신속한 제품생산이 가능하도록 기초연구자료를 확보하고자 하였다.

제 2 장 이 론 해 석

2.1 타이어 제조용 몰드의 열전달 해석

주형 내 용탕의 응고과정을 알아보기 위해서는 용탕이 가지고 있는 열량이 어떠한 과정에 의해서 주형 및 대기로의 열전달이 일어나는지 알아야 한다.

2.1.1 응고해석을 위한 3차원 열전도 해석

상변화 과정을 포함한 3차원 열전도 미분 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + L\frac{\partial f_s}{\partial t} \tag{1}$$

여기서, ρ : 밀도 , λ : 열전도율 , C_p : 비열 , T : 온도 ,

t : 시간 , L : 응고잠열 , f_s : 응고율

용탕의 응고과정에서 잠열의 방출은 온도회복법, 등가 비열법 및 Enthalpy법 등에 의해서 계산할 수 있다. 초기 조건은 주형 내부에 용탕이 완전히 주입되어 있다고 가정한 상태에서 용탕의 초기온도를 주입온도(T_p)와 같이 본다.

$$T(x, y) = T_p, \quad t = 0 \tag{2}$$

주형 내부에서 용탕의 응고과정에 적용되는 경계조건은 다음과 같다.

(1) 경계면 Γ_1에서 온도가 주어져 있는 경우 경계조건

$$T = \overline{T}$$

(2) 경계면 Γ_2에서 열유속이 주어져 있는 경우 경계조건

$$q = \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right) = \bar{q}$$

(3) 경계면 Γ_3에서 대류 열전달에 의한 경우 경계조건

$$q = h(T_a - T)$$

2.2 수치해석을 이용한 응고해석 방법

수학적인 방법으로 응고속도, 응고시간 및 액체와 고체내부의 온도분포 등을 계산하는 방법에는 해석적인 방법과 수치적인 방법을 들 수 있다. 해석적인 방법에는 어떤 특정한 문제의 경우에만 해답을 얻을 수 있기 때문에 이러한 방법은 주물의 응고해석 시 많은 가정을 수반하게 되므로 적합하지 않다. 그렇기 때문에 응고해석에는 수치해석법을 많이 이용하고 있으며, 이러한 해석법에는 유한차분법, 직접차분법, 유한요소법 및 경계요소법 등이 있다.

합금의 응고문제에 대한 해석해는 일반적으로 주어지지 않는다. 따라서 최근에 각종 합금의 응고해석 문제를 컴퓨터를 이용한 수치해석에 의하여 풀이하고 있다.

2.2.1 유한차분법(Finite difference method)[16-17]

Taylor 전개는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{i+1} = T_i + \triangle x \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_i + \frac{\triangle x^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\Big|_i + \frac{\triangle x^3}{3!}\frac{\partial^3 T}{\partial x^3}\Big|_i + \cdots \tag{3}$$

$$T_{i-1} = T_i - \triangle x \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_i + \frac{\triangle x^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\Big|_i - \frac{\triangle x^3}{3!}\frac{\partial^3 T}{\partial x^3}\Big|_i + \cdots \tag{4}$$

식 (3)과 (4)를 이용하여 미분방정식 (1)과 경계조건 (3)을 차분화한 다음 차분식을 푸는 방법이다.

식 (3)과 (4)를 각 항끼리 더하여 나열하면 다음과 같이 되며,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\Big|_i = \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\triangle x^2} - \frac{\triangle x^2}{12}\frac{\partial^4 T}{\partial x^4}\Big|_i + \cdots \tag{5}$$

$\frac{\partial^4 T}{\partial x^4}$이상의 고차 항을 제거하면 다음과 같이 2차 미분방정식이 얻어진다. 즉, 시간 t에 있어서

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\Big|_i = \frac{T^{t_{i+1}} - 2T^{t_i} + T^{t_{i-1}}}{\triangle x^2} \tag{6}$$

시간 미분 항 $\frac{\partial T}{\partial t}$에 대해서도 동일하게 $\triangle t^2$이상을 제거하면,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T^{t+\triangle t} - T^t}{\triangle t} \tag{7}$$

가 된다. 이 차분식은 1차원 열전도 미분방정식에 적용하면,

$$\rho c_p \frac{T_i^{t+\triangle t} T_i^t}{\triangle t} = \lambda \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\triangle x_1} \tag{8}$$

와 같이 되며, 이 식을 간단히 정리하면, 다음과 같은 식이 얻을 수 있다.

$$T_i^{t+\triangle t} = T_i^t + \frac{\alpha \triangle t}{\triangle x^2}(T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) \tag{9}$$

일반적으로는 식 (9)의 오른쪽 온도를 어떤 시간에서의 온도로 택하는가에 따라 구별된다.

즉, 식 (9)의 오른쪽 항의 온도를 T'이라고 할 때

$$T' = (1 - W)T^t + WT^{t+\triangle t} \tag{10}$$

로 표시되며,

(가) W=0일 때, $T' = T^t$가 되며, 온도 $T_i^{t+\triangle t}$는 주위의 현재온도에 의하여 구해진다. (전진차분법)

(나) W=1일 때, $T' = T^{t+\triangle t}$가 되면, 연립방정식을 풀어야 된다. (후퇴차분법)

(다) W=1/2일 때, 연립방정식을 풀어야 한다. (Crank-Nicolson법)

여기서, (가)는 양적해법(explicit method), (나), (다)는 음적해법(implicit method)이라고 한다.

2.2.2 유한요소법(Finite element method)[16-19]

해석 대상을 유한한 요소로 분할하고, 요소내의 온도분포를 다음과 같이 표현하면 다음과 같다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{\varnothing t\} \tag{11}$$

여기서, $[N]$은 절점온도와 요소내의 온도를 관련시키는 내삽함수 매트릭스이며, $\{\varnothing\}$는 시간 t에 Galerkin법을 적용하면, 다음식이 얻어진다.

$$\int_{\Omega^e}[N]^T\left\{\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+Q-\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}\right\}d\Omega=0 \tag{12}$$

여기서, 상부첨자 T는 전치(전치행렬)를 , Ω^e는 요소영역을 나타낸다. 응고잠열의 방출항은 간단히 Q로 표시하기로 한다. 부분적분의 공식은 식 (12)에 적용하여 2계 편미분항을 변형하면,

$$\begin{aligned}&\int_{\Omega^e}[N]^T\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)d\Omega \\ &=-\int_{\Omega^e}\lambda\left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x}-\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial[N]^T}{\partial y}-\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial[N]^T}{\partial z}-\frac{\partial T}{\partial z}\right)d\Omega+\int_{\Gamma^e}\lambda[N]^T\frac{\partial T}{\partial n}d\Gamma\end{aligned} \tag{13}$$

여기서 Γ^e는 요소의 경계를 나타낸다.

식 (13)에 식 (11) 및 Fourier법칙을 적용하면 식 (13)의 우변은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\int_{\Omega^e}\lambda\left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x}-\frac{\partial[N]}{\partial x}+\frac{\partial[N]^T}{\partial y}-\frac{\partial[N]}{\partial y}+\frac{\partial[N]^T}{\partial z}-\frac{\partial[N]}{\partial z}\right)d\Omega\{\varnothing(t)\}-\int_{\Gamma^e}q[N]^T d\Gamma \tag{14}$$

위 식을 정리하면, 비정상 열전도 문제에 대한 요소의 유한 요소식은

$$[K]\{\varnothing\}+[C]\left\{\frac{\partial\varnothing}{\partial t}\right\}=\{f\} \tag{15}$$

라고 쓸 수 있다. 단, 매트릭스 $[K],[C]$, 벡터$\{f\}$는 다음과 같이 주어진다.

$$[K] = \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} - \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} - \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} - \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) d\Omega \tag{16}$$

$$[C] = \int_{\Omega^e} \rho c_p [N]^T [N] d\Omega \tag{17}$$

$$[f] = \int_{\Omega^e} Q [N]^T d\Omega - \int_{\Gamma^e} q [N]^T d\Gamma \tag{18}$$

해석대상 전체의 유한요소식은 식 (15)를 모든 요소에 대하여 조합하여 구할 수 있으며, 다음과 같이 표시된다.

$$[K]\{\varnothing\} + [C]\left\{ \frac{\partial \varnothing}{\partial t} \right\} = \{f\} \tag{19}$$

여기서, $\{\varnothing\}$는 전체 절점온도 벡터, $[K]$는 열전도 매트릭스, $[C]$는 열용량 매트릭스, $\{F\}$는 열유속 벡터를 나타내며, 다음과 같이 주어진다.

$$\{\varnothing\} = \sum_e \{\varnothing\},\ [K] = \sum_e [k],\ [C] = \sum_e [c],\ \{F\} = \sum_e \{f\} \tag{20}$$

여기서, $\sum_e$는 전요소에 대한 합을 나타낸다.

2.2.3 유한요소법에 의한 열응력 해석

열탄소성 응력 해석에 있어 전변형율 증분은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_o \tag{21}$$

여기서 ε_e, ε_p, ε_o는 각각 탄성변형율, 소성변형율, 초기변형율을 나타낸다. 해석 영역을 유한요소로 이산화한 후, 유한요소 내의 한 점에 대한 변위는 형상함수(shape function, $[N_i]$)를 이용하여 식(22)와 같이 표현할 수 있다.

$$\{\triangle u\}^e = [N_i]\{\triangle u\}_i^e \tag{22}$$

또한 변형율벡터 및 응력벡터는 변형율-변위행렬$[B]$와 탄소성행렬$[D_{ep}]$을 이용하여 식 (23), (24)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\triangle u\} \tag{23}$$

$$\{\sigma\} = [D_{ep}]\{\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_o\} \tag{24}$$

유한요소 정식화 과정을 통하여 i번째 유한요소에 대한 평형방정식은 식 (25)와 같이 주어진다.

$$[E]_i^e\{\triangle u\}_i^e = \{\triangle F_o\}_i^e + \{\triangle F_p\}_i^e \tag{25}$$

$$\{\triangle F_o\}_i^e = \int_\Omega [B]_i^{eT}[D_{ep}]_i(\{\alpha\}\triangle T)d\Omega \tag{26}$$

$$\{\triangle F_p\}_i^e = \int_\Omega [B]_i^{eT}[D_{ep}]_i\left(\frac{\partial[D_{ep}]_i^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}\triangle T + \frac{[D_{ep}]_i^{-1}[D_e]_i\{\sigma\}}{S}\frac{\partial f}{\partial T}\triangle T\right)d\Omega \tag{27}$$

여기서, S는 다음과 같다.

$$S = \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^f [D_e] \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} - \frac{\partial f}{\partial k}\left\{\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_p}\right\}^T \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} \tag{28}$$

식 (26)의 $\{F_o\}_i^e$는 열변형에 의한 등가절점력을 나타내며, 식 (27)의 $\{F_p\}_i^e$는 탄성계수, 포아송 비, 항복응력 등의 기계적 물성치가 온도의존적인 거동을 함에 따라 발생하는 등가절점력을 나타낸다. 해석영역 전체의 평형방정식은 각 유한요소의 기여분을 조합함으로써 얻어진다.

$$[E]\{\triangle u\} = \{\triangle F_T\} \tag{29}$$

여기서 $[E]$는 강성행렬, $\{\triangle U\}$는 변위벡터, $\{\triangle F_T\}$는 절점력 벡터이다. 위 식의 각 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[E] = \sum_{i=1}^{NE} [E]_i^e \tag{30}$$

$$[\triangle F_T] = \sum_{i=1}^{NE} \left(\{F_o\}_i^e + \{F_p\}_i^e\right)[E]_i^e \tag{31}$$

여기서 NE는 해석영역을 구성하는 유한요소의 개수이다. 위의 유한요소방정식은 등방경화성 소성거동을 표현하는 구성방정식에 기초하여 유도되었다.

2.2.4 상변화(응고현상)의 취급방법

2.2.4.1 응고율과 온도

응고과정을 포함한 열전도 방정식을 다시 표시하면,

$$\rho\left(C_p - L\frac{\partial f_s}{\partial T}\right)\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{32}$$

여기서, f_x는 응고율(고상율)을 나타낸다.

응고잠열은 응고율의 증가와 더불어 고-액 공존구간에 방출된다. 따라서 응고율과 온도와의 관계(응고잠열의 방출과정)를 파악하는 것은 응고해석 프로그램을 작성하는데 아주 중요하다. 그러나 이러한 관계를 정확하게 파악하는 일은 쉽지 않으며, 실제로는 다음과 같은 모델에 의하여 해석하고 있다.

(가) 응고잠열이 응고구간에서 균등하게 방출되는 경우

$$-L\frac{\partial f_x}{\partial T} = \frac{L}{T_L - T_S} \tag{33}$$

(나) 평형응고에 따르는 경우

$$-L\frac{\partial f_s}{\partial T} = \frac{L}{(1-K)}\frac{(T_L - T_M)}{(T_M - T)^2} \tag{34}$$

(다) Schiel식에 따르는 경우

$$-L\frac{\partial f_s}{\partial T} = \frac{L}{(1-K)}\left(\frac{T_M - T}{T_M - T_L}\right)^{\frac{2-k}{k-1}} \tag{35}$$

여기서 T_L은 액상선 온도, T_S는 고상선 온도, T_M은 순금속의 융점, K는 평형분배 계수를 각각 나타낸다. 이밖에도 액상내의 확산의 정도와 고상내의 확산을 고려하는 경우의 응고잠열의 방출식을 생각할 수 있다.

2.2.4.2 응고잠열의 취급방법

일반적으로 수치해석에서는 응고잠열의 방출을 다음과 같은 방법에 의하여 취급하고 있다.

(가) 등가비열법(Equivalent specific heat method)[20-22]

이 방법에서는 응고구간에서의 응고잠열의 방출을 다음식과 같이 비열의 증가로서 평가한다. 식 (32)에서

$$C_e = C - L\frac{\partial f_s}{\partial T} \tag{36}$$

이 때, 우변의 제 2항 $\left(-L\frac{\partial f_s}{\partial T}\right)$은 응고율과 온도와의 관계식 (33)~(35)에 의하여 취급된다.

순금속의 경우는 $T_L - T_S = 0$, 즉, $\partial f_s / \partial T \rightarrow -\infty$가 되므로, $T_L - T_S \simeq 0.1 \sim 1.0$℃와 같이 근사적으로 응고구간을 가정하여 취급하는 것이 보통이다.

그러나, 등가비열법을 이용하여 잠열방출을 취급할 때에는 다음과 같은 점에 주의를 하여야 한다. 반복계산을 할 때, 시간 t에 있어서의 열물성치(이 경우에는 비열)를 이용하여 시간$(t+\triangle t)$까지의 온도분포를 계산하기 때문에, 해석결과에 오차가 발생하게 된다. 즉, 등가비열법에서 time step $\triangle t$의 크기에 따라 해석결과가 크게 달라지는 경우가 있는데 여기에 그 원인이 있다. Fig. 1에 표시하는 것과 같이 (a)의 경우에는 시간 t에 있어서의 비열을 시간$(t+\triangle t)$(응고구간, $T_L \sim T_{t+\triangle t}$)까지 연장해서 사용하는 것이 된다. 도, (b)의 경우에는 시간 t에서의 비열(응고구간에서의 비열)을 시간$(t+\triangle t)$(응고구간, $T_S \sim T'_{t+\triangle t}$)까지 사용하는 것이 되어, 각각 응고시간을 단축 또는 연장하는 결과를 가져온다. 따라서 이와같은 경우에는 정확한 열물성치(비열)을 사용하여 온도수정을 하여야 한다.

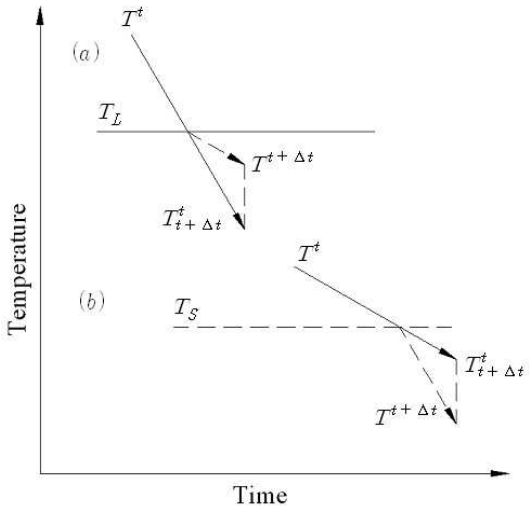


Fig. 1 Temperature compensation at equivalent specific heat method

(a)의 경우에는, 시간$(t+\triangle t)$에 있어서의 온도 $T_{t+\triangle t}$는 $T'_{t+\triangle t}$에 의해 수정되면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\int_{T_t}^{T'_{t+\triangle t}} \rho(T_t)\, C(T_t) dT = \int_{T_t}^{T_L} \rho(T_t) C(T_t) dT + \int_{T_L}^{T_{t+\triangle t}} \rho(T_L) C(T_L) dT \tag{37}$$

(b)의 경우에도, 동일하게 다음식에 의해 $T_{t+\triangle t}$가 주어진다.

$$\int_{T_t}^{T'_{t+\triangle t}} \rho(T_t)\, C(T_t) dT = \int_{T_t}^{T_S} \rho(T_t) C(T_t) dT + \int_{T_S}^{T_{t+\triangle t}} \rho(T_S) C(T_S) dT \tag{38}$$

(나) 온도회복법(Temperature Recovery Method)[23-24]

이 방법은 우선 응고잠열의 방출을 고려하지 않고 열전도해석을 한 다음, $\triangle t$마다 응고온도로부터의 온도강하량을 구하여, 아직 응고중이라면 그 요소의 온도를 응고잠열의 방출에 의해 응고온도로 회복시키는 방법이다. 따라서 시간

$\triangle t$동안의 응고잠열의 방출량 $\triangle Q_s$와 응고율의 증가량 $\triangle f_s$의 상이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\triangle Q_s = \rho C_p V \cdot \triangle T = \rho L V \triangle f_s \tag{39}$$

응고율이 $\left(\sum \triangle f_s = 1.0\right)$이 될 때까지 온도회복을 시킨다.

이 방법은 주로 순금속과 같이 일정한 온도에서 응고가 일어나는 경우에 이용되어 왔다. 이 방법을 넓은 응고구간을 갖는 합금계에 적용시키기 위해서는 다음과 같은 취급이 필요하다.

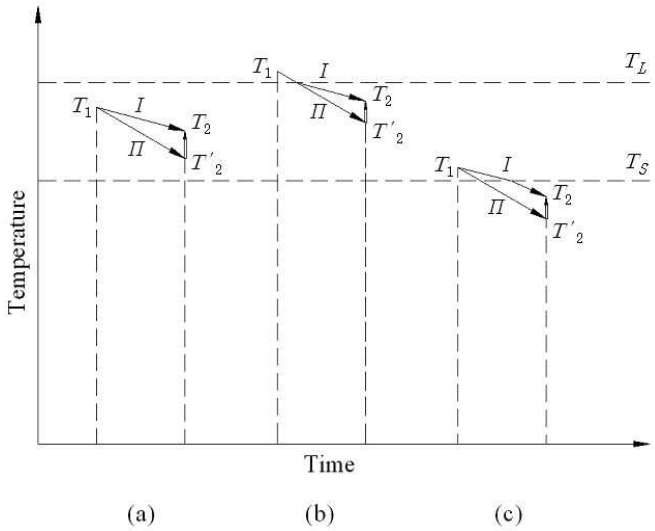


Fig. 2 Rough expression of temperature recovery method

우선 Fig. 2와 같은 3가지 경우를 생각하보면, step Ⅱ는 응고잠열의 방출을 고려하지 않고 열전도해석을 행한 경우이고, step Ⅰ은 온도회복에 의하여 응고잠열항을 온도회복 시켜준 경우이다. (a)의 경우, $\triangle t$동안의 step Ⅰ과 step Ⅱ의 경우에 있어서 전열방출량 $Q_{step\ I}$과 $Q_{step\ II}$는,

$$Q_{step\ I} = \int_{t1}^{t2} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dt + \triangle Q_s = \int_{T1}^{T2} \rho C_p dT - \int_{T1}^{T2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT \tag{40}$$

$$Q_{step\ II} = \int_{t1}^{t2} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dt = \int_{T1}^{T2'} \rho C_p dT \tag{41}$$

Fourier의 에너지 보존법칙에 의해 $Q_{step\ I} = Q_{step\ II}$이므로

$$\int_{T1}^{T2} \rho C_p dT - \int_{T1}^{T2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT = \int_{T1}^{T2'} \rho C_p dT \tag{42}$$

에 의하여 시각 $t_2 (= t_1 + \triangle t)$에 있어서의 온도 t_2가 구해진다. (b)의 경우는,

$$\int_{TL}^{T2} \rho C_p dT - \int_{TL}^{T2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT = \int_{TL}^{T2'} \rho C_p dT \tag{43}$$

(c)의 경우도 동일하게,

$$\int_{T1}^{T2} \rho C_p dT - \int_{T1}^{T2} \rho L \left(\frac{\partial f_s}{\partial T} \right) dT = \int_{T1}^{T2'} \rho C_p dT \tag{44}$$

(다) 엔탈피법(Enthalpy Method)[18,25-28]

응고구간에서 비열의 급격한 변화가 상변화의 수치적 취급을 곤란하게 하는 경우가 있는데, 엔탈피는 비열의 온도에 관한 적분값으로 주어지므로 응고구간에서의 급격한 변화를 나타내지 않는다. 이러한 점을 이용한 것이 엔탈피법이다. 응고변태를 하는 물질의 비엔탈피 H는,

$$H = H_o + \int_{T_o}^{T} C_p dT + (1 - f_s) L \tag{45}$$

로 주어진다. 여기서 H_o는 기준온도 T_o에 있어서의 비엔탈피를 나타낸다. 온도 T를 미분하면,

$$\frac{\partial H}{\partial T} = C_p - L\frac{\partial f_s}{\partial T} \tag{46}$$

이 되므로 응고를 포함하는 열전도 미분방정식(1)은 다음과 같이 된다.

$$\rho\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{47}$$

이 식을 전진차분법에 의하여 $\triangle t$시간 후의 엔탈피 $H^{t+\triangle t}$을 우선 구한다. 엔탈피 H와 온도와의 관계로부터 $H^{t+\triangle t}$에 대응하는 온도 $T^{t+\triangle t}$를 구한다(Fig. 3 참고). 이 $T^{t+\triangle t}$로부터 다시 $\triangle t$후의 H, T를 구한다. 이와 같이 하여 응고를 포함하는 열전도해석을 할 수 있다.

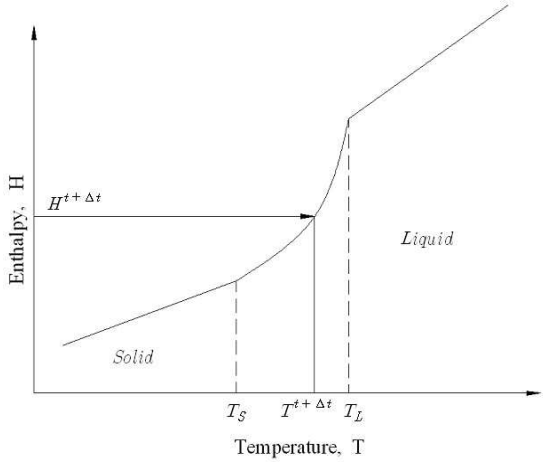


Fig. 3 Enthalpy from function of temperature

제 3 장 수치해석 및 실험 방법

3.1 수치해석 모델

본 연구에서는 Al-Si-Mg계 Al 합금인 AC4C 주조재를 사용한 자동차 타이어용 금형 제조시 금형 내부에서 발생하는 열변형 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 타이어 몰드 주조 시 몰드 내부에서 발생하는 온도분포, 변위 및 응력분포를 수치해석을 통하여 예측하고자 하였으며, 그 결과를 토대로 몰드의 정밀도 향상에 기여하고자 하였다.

수치해석을 위해 본 연구에서 사용한 상용코드인 “COMSOL Multiphysics 3.3 VER”는 편미분방정식(PDE)으로 구현된 물리현상을 시뮬레이션 할 수 있는 모델링 패키지 소프트웨어이다. 또한, 본 상용코드는 다중물리현상을 적용하여 해석할 수 있는 특징을 가지고 있다[29]. 따라서 타이어 몰드의 주조과정에서 발생하는 열변형을 해석하기 위해 열전달과 구조역학 모듈을 조합한 열-구조 해석법을 적용하여 사용하였다.

Fig. 4는 수치해석을 위한 3차원 모델링 형상으로서 금형주조기, 코어 그리고 타이어 제조용 금형으로 구성되어 있다. 각각의 구성요소에 있어 금형주조기는 스테인리스강, 코어는 석고 그리고 금형은 AC4C Al 합금으로 구성되어 있다.

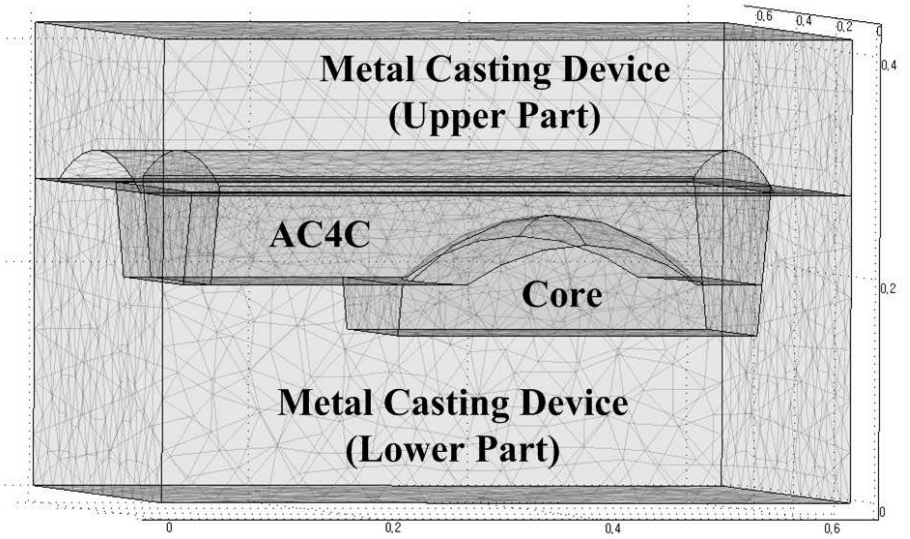


Fig. 4 3-dimensional analysis model of metal casting device

또한, 타이어 제조용 몰드의 주조재인 AC4C Al 합금은 순수 Al에 6.5~7.5%의 Si와 미량의 이종원소가 함유된 주조재로서, 세부적인 화학조성비는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 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

그리고 본 연구에서 사용되는 주조재인 AC4C Al 합금과 타이어 트레드 패턴 형성을 위해 사용된 코어의 세부적인 물성치는 각각 Table 2와 3에 정리하여 나타내었다.

Table 2 Physical properties of AC4C casting material

Properties	Unit	Value
Solidification Temperature	℃	557
Melting Temperature	℃	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	J/kg · k	963
Thermal Expansion Coefficient	1/k	21.5×10^{-6}

Table 3 Physical properties of Gypsum (Core)

Properties	Unit	Value
Thermal conductivity	W/m · k	0.1627
Young's modulus	GPa	131
Poisson's ratio	-	0.27
Density	kg/m^3	2320
Specific heat	J/kg · k	1006
Thermal expansion coefficient	1/k	4.15×10^{-6}

금형주조 방식을 이용한 수치해석을 위해 적용한 금형주조기의 재질은 스테인리스 재질로 SUS303을 선정하였으며, 세부적인 물성치를 Table 4에 정리하였다.

Table 4 Physical properties of SUS303

Properties	Unit	Value
Solidus temperature	℃	1400
Liquidus temperature	℃	1420
Thermal conductivity	W/m · k	16.2
Young's modulus	GPa	193
Poisson's ratio	-	0.25
Density	kg/m^3	8000
Specific heat	J/kg · k	500
Thermal expansion coefficient	1/k	17.8×10^{-6}

3.2 수치해석 방법 및 절차

본 연구에서는 자동차 타이어 몰드용 Al 합금인 AC4C 주조재를 사용하여 몰드 제작과정에서 몰드 내부에 발생하는 열변형 특성을 수치해석 방법을 사용하여 예측해 보고, 몰드의 가장 중요한 부분인 타이어 트레드 부분의 정밀도 향상을 위하여 열변형 제어를 위한 기초자료를 제시하고자 하였다. 따라서 타이어 몰드 주조 시 트레드 부분의 온도분포, 변위 및 응력분포를 수치해석 방법을 통하여 결과를 예측해 보았다.

3.2.1 금형주조에서의 열변형 해석

지금까지 대부분의 타이어 몰드는 사형주조에 의해 제조되어 왔다. 하지만 자동차의 보급이 급속도로 증가하면서 타이어의 수요가 증가하게 되었고, 고객의 취향 또한 다양하여 소비자의 요구에 맞춰 타이어의 디자인에서부터 제품으로 나오기까지 빠른 제작이 요구되고 있다. 따라서 타이어 제조공정에 필요한 몰드의 빠른 제작이 타이어 산업의 성패를 좌우하게 되었고, 금형주조방식의 도입이 불가피하게 되었다.

수치해석을 위해 모델링한 타이어 몰드 제조용 금형주조장치의 형상을 Fig. 5와 같이 나타내었다. Fig. 5에서 보는바와 같이 금형주조기는 상부와 하부로 나누어져 있고, 그 안에 타이어의 트레드 형상을 나타낼 코어가 안착되어 있다. 그리고 금형주조기 내부로 주입되는 Al 합금 용탕으로 구성되어 있다.

최초 Al 합금의 온도는 650℃로 설정하였고, 금형주조기는 250℃ 그리고 코어는 80℃로 예열된 상태로 설정하여 수치해석을 수행하였다. 일반적으로 몰드 주조시 주조재는 용해로 내부에서 용융온도 이상으로 과가열되는 것을 볼 수 있는데, 이는 용탕 내부에 혼합되어 있는 습기 및 불순물을 제거하고, 금형주조기 내부로 용탕 주입시 금형주조기와의 급격한 온도차로 인하여 용탕이 미처 완전히 충진되지 못하고 응고되는 것을 예방하기 위한 것이다. 또한, 금형주조기와 코어를 예열하였는데, 이는 고온의 용탕인 주조재가 금형주조기 내부로

주입 되었을 시 급격한 냉각으로 인해 발생할 수 있는 열변형 및 수축현상을 최소화하기 위한 것이다.

위에서 설정한 조건 하에서 금형주조기 내부로 주입된 Al 합금 용탕을 25분 동안 냉각시킨 후 금형주조기에서 탈착하여 상온상태에서 자연냉각하여 50℃이하로 냉각되도록 하였다. 이는 선행연구에서 AC4C 주조재가 냉각초기 약 20분 동안 급격한 냉각이 이루어지는 것을 볼 수 있었고, 그 후 완만한 냉각속도를 보이고 있기 때문에 제품 생산시간 및 공정의 효율 측면에서 용탕이 주입된 후 25분이 경과한 뒤 몰드를 금형주조기에서 분리하여 상온상태에서 냉각시키는 것을 고려하였다.

Fig. 6은 수치해석을 통한 타이어 몰드의 열변형 해석시 타이어 트레드 패턴이 형성되는 부분에서 9개 지점을 미리 선정하여 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 언급한 9개 측정지점은 트레드 부분의 양쪽 사이드 부와 중앙부로 나눌 수 있다. 즉, 트레드 패턴 부분 에서 용탕주입구로부터 가장 멀리 떨어져 있는 곳이 1, 4, 7번 지점이고, 트레드 중앙부분이 2, 5, 8번 지점 그리고 용탕주입구에서 가장 가까운 부분이 3, 6, 9번 지점이다.

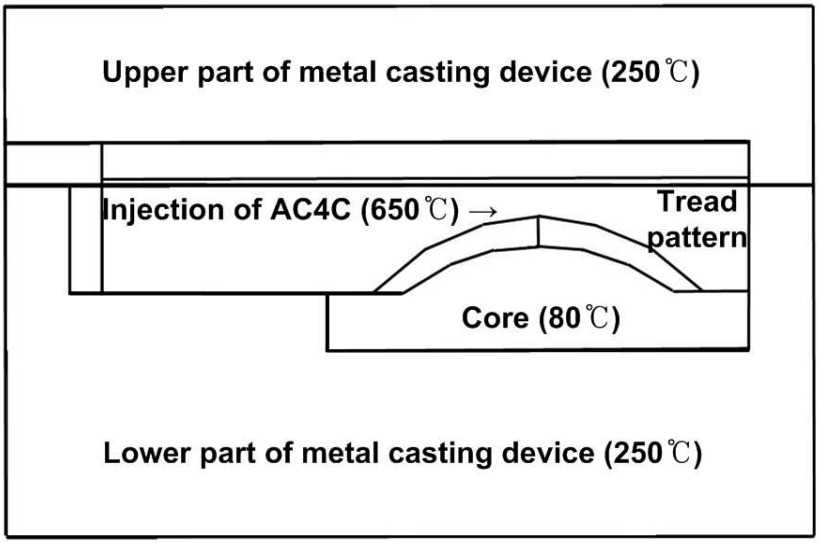


Fig. 5 2-dimensional analysis model of metal casting device

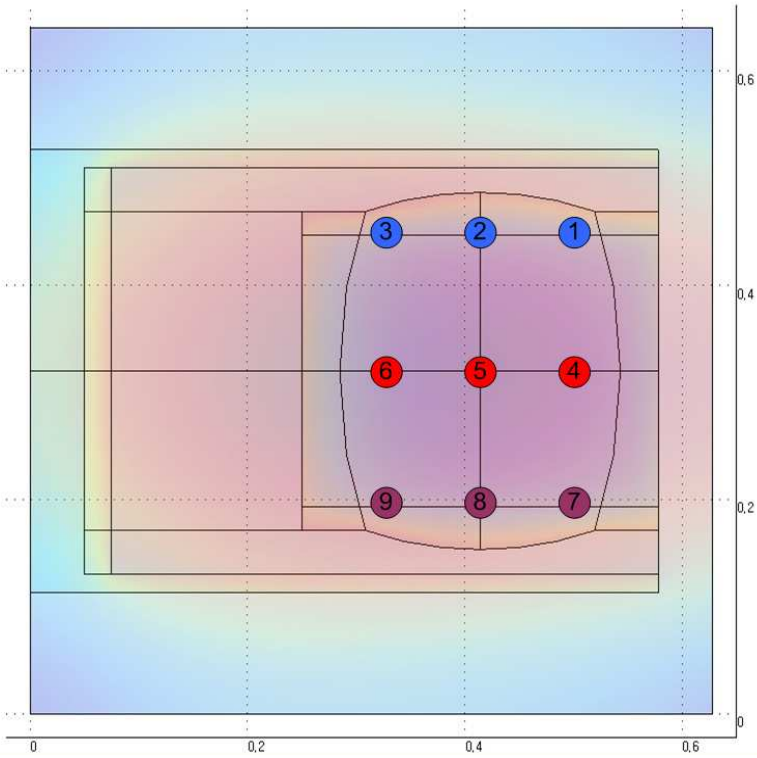


Fig. 6 Schematic diagram of the measurement points

3.3 실험 장치 및 방법

수치해석 결과를 토대로 시제품을 제작하여 실험을 통한 온도측정 결과와 수치해석 결과를 비교·분석함으로써 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

앞 절의 수치해석 방법 및 절차에서 언급한 바와 같이 실험방법 또한 금형주조장치에 용탕을 주입한 후 25분이 경과하면 타이어 몰드를 금형주조기에서 분리하여 상온상태에 도달할 때까지 외부에서 자연냉각을 시키도록 하였다. 또한, 용탕이 주입되기 전 금형주조기는 250℃, 코어는 80℃로 예열하여 실험하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 사용된 실험장치 구성요소의 개략도를 나타낸 것으로 코어와 금형이 포함된 금형주조장치와 몰드 내부 트레드 부분의 온도를 측정할 K-type의 열전대, 데이터 획득장치(DA 100) 그리고 측정된 온도 데이터를 저장할 수 있는 PC로 구성되어 있다. 몰드가 있는 부분에는 650℃로 과가열된 AC4C 주조재가 주입되고, 고온에서도 온도측정이 가능한 열전대를 사용함으로써 트레드 부분의 주조재의 온도변화를 측정할 수 있도록 하였다.

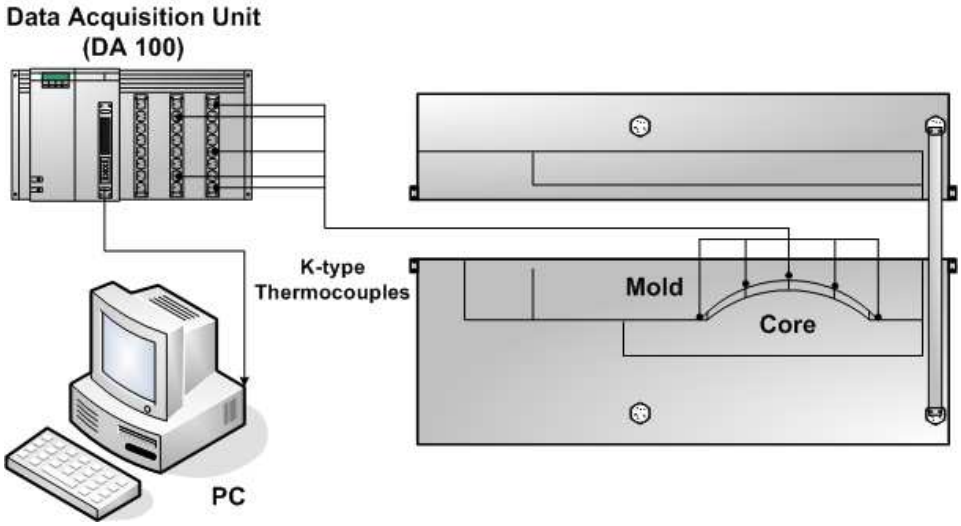


Fig. 7 Experimental set-up for measurement of temperature distribution

Fig. 8은 타이어 몰드 트레드 부분의 냉각시간에 따른 온도분포를 파악하기 위해 15개 측정지점에서 온도를 측정한 것이다. 1～9번 측정지점은 Fig. 6에서 설명한 것과 같고, 10～15번 측정지점은 트레드 양쪽 끝부분 중 용탕주입구에서 가장 멀리 떨어져 있는 부분이 10, 11, 12번 지점이고, 용탕주입구에서 가장 가까운 부분이 13, 14, 15번 지점이다.

Fig. 9은 실제 실험에서 트레드 표면의 온도를 측정할 열전대를 코어의 표면에 고정시킨 모습이다. 각각의 15개 지점에 열전대를 설치하여 용탕 주입에서부터 완전냉각이 이루어지는 시간까지 온도를 획득할 수 있도록 하였다.

Fig. 10은 실제 실험에 사용된 K-type의 열전대로서 -200℃～1400℃정도의 온도를 측정할 수 있다. 또한, 온도측정부분을 제외한 나머지 부분을 스테인리스 튜브로 절연하여 열전대 자체를 통한 열전도 현상을 최소화시키도록 하였다. 그리고 열전대의 리드선은 몰드의 탈착 및 이동 자유롭도록 하기 위하여 4m 정도의 여유를 가지도록 제작하였다.

Fig. 11은 열전대를 통해 들어오는 데이터를 획득할 수 있는 데이터획득 장치로서 온도 데이터를 5초 간격으로 PC에 전송하여 저장 및 기록할 수 있도록 하였다.

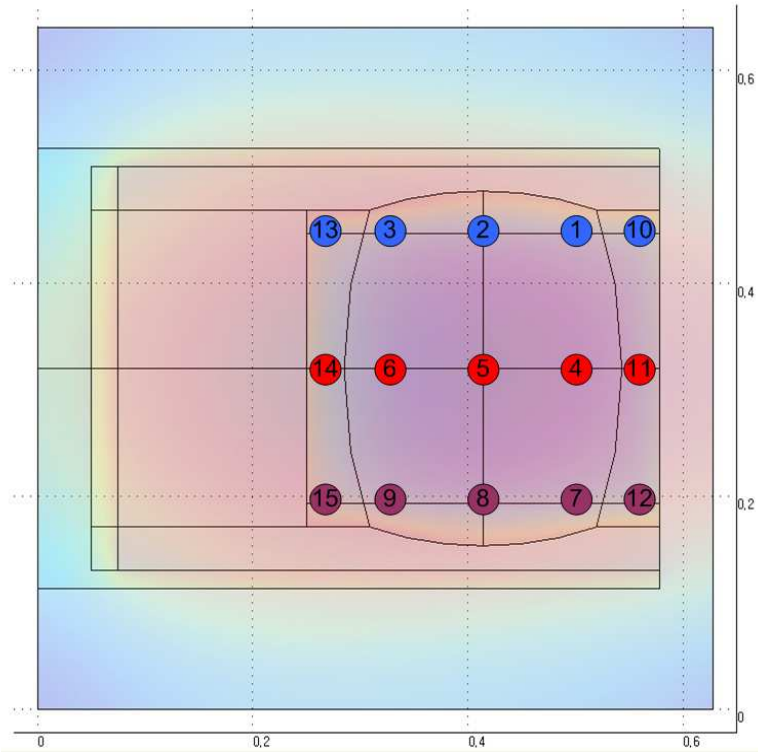


Fig. 8 Measurement points inside the tire mold

Fig. 9 A photography of installed thermocouples on the core

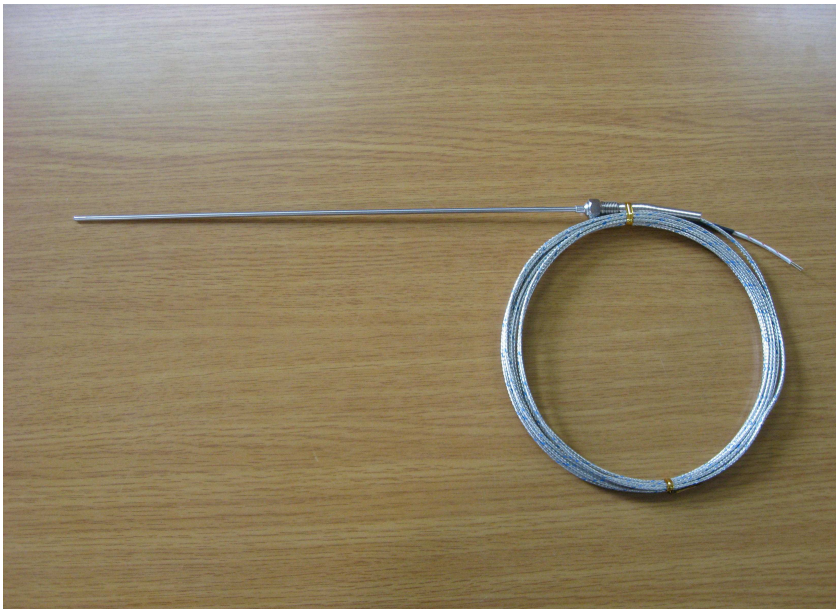


Fig. 10 Insulation process of K-type thermocouple

Fig. 11 Measurement apparatus of data acquisition unit

제 4 장 수치해석 및 실험 결과

4.1 수치해석 결과

수치해석을 위해 산업현장에서 사용하는 몰드를 토대로 모델링 하였고, 금형주조기 내부 용탕은 주입되는 과정을 생략하고 순간적으로 충만된 것으로 가정하여 수치해석을 수행하였다. 또한, 금형주조장치는 250℃, 코어는 80℃로 예열시키고, Al 합금 용탕은 650℃로 과가열 용융된 것으로 설정하였다. 용탕을 과가열 한 이유는 앞 3.2.1절에서 언급한 바와 같다.

용탕 주입이 완료된 후 약 25분이 지나면 주조된 몰드를 금형주조기에서 분리한 다음 상온상태에서 냉각시켜 50℃이하로 떨어질 때까지 해석을 수행하는데, 이때를 주조 완료 시점으로 놓고 해석시간을 설정하여 수치해석을 실시하였다.

Fig. 12는 수치해석 결과를 3차원 형상으로 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 용탕주입 후 25분이 지난 수치해석 결과를 그림으로 나타낸 것으로서, 온도분포와 열유속을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 12(b)는 금형을 주조기에서 분리한 뒤 완전냉각상태에 이른 몰드로써 코어의 온도분포와 열유속을 표현한 것이다. 여기서 열유속은 화살표로 방향과 크기를 표현하였다.

4.1.1 알루미늄 합금 금형의 열변형 해석 결과

Fig. 13과 Fig. 17은 타이어 몰드 주조시 몰드 내부 트레드 부분의 9개 측정지점별 온도분포, 변위 및 응력분포를 계산한 결과로써 Fig. 13은 AC4C 주조재를

이용하여 만든 용탕을 최초 주입시부터 25분이 경과한 시간까지 해석결과를 나타낸 것이고, Fig. 17은 몰드를 금형주조기에서 분리하여 상온상태에 이르는 주조 완료 시점까지 해석결과를 나타낸 그래프이다.

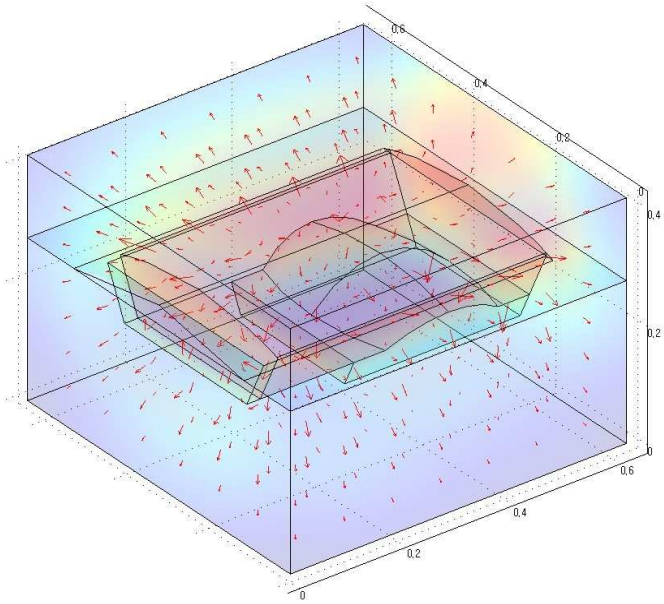
Fig. 13(a)를 살펴보면, 주조되는 몰드는 용탕이 주입된 후 금형주조장치 내부에서 25분 동안 약 350℃까지 냉각되고 점차적으로 온도평형을 이루어 가는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 6에서 제시한 온도측정지점 중 6번 지점에서 온도가 가장 느리게 냉각되는 것을 볼 수 있는데, 이는 트레드 부분에서 5번 지점이 중앙이지만 몰드 전체적인 형상을 볼 때는 6번 지점이 중앙이 되어 온도가 가장 느리게 냉각되기 때문이다. 결국, 몰드의 냉각속도는 주조장치와 가장 근접한 위치에 있는 부분부터 빠른 냉각속도를 보이고 몰드 중앙부분으로 갈수록 점차 냉각속도가 느려지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Fig. 17(a)에서 볼 때, 주조기에서 분리한 25분 이후부터 7시간 동안 냉각되면서 모든 온도측정지점이 열평형을 이루어 균일한 냉각패턴을 형성하며 냉각되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13(b)와 Fig. 17(b)는 몰드가 주조기 내부에서 냉각되는 25분 동안과 주조기에서 분리한 후 7시간 동안 각 측정지점별 발생하는 변위분포결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 13(b)의 변위분포 결과를 살펴보면, 주조기 내부에서 냉각되는 25분 동안 주조기의 영향을 가장 많이 받는 4번 지점에서 변위가 0.37mm로 가장 높게 나타났고, 열의 집중현상을 보이는 중앙지점의 5, 6번 지점에서 변위가 다른 부분에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 또한, 주조기에서 분리하여 냉각되는 동안 변위분포 결과를 Fig. 17(b)에서 살펴보면, 트레드 부분에서 외기와 가장 가깝게 위치해 있는 1, 4, 7번 지점에서 변위가 0.6mm로 가장 높게 나타났으며, 상대적으로 냉각이 느리게 진행되었던 6번 지점에서는 0.17mm로 가장 낮게 나타났다.

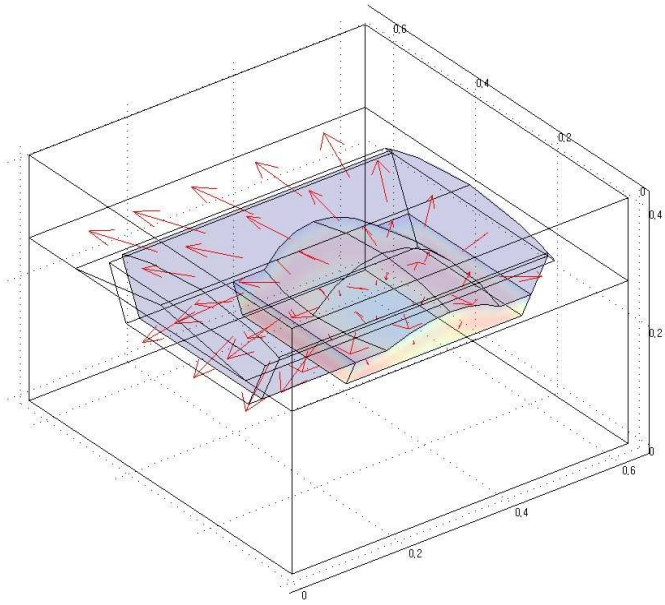
냉각 초기 25분 동안 응력분포 결과를 Fig. 13(c)에서 살펴보면, 용탕주입 후 주조기 내부에서 냉각되는 동안 응력측정지점 5번에서 0.65GPa로 가장 큰 응력

이 발생하는 것을 볼 수 있고, 그 다음으로 2, 8번 지점에서 거의 동일한 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서, 응력발생 지점을 고려해 보면 2, 5, 8번 측정지점의 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 코어의 중심부분에 해당한다. 이 중 5번 측정지점은 2, 5, 8번 측정지점 중에서 중앙부분에 해당하고 또한, 금형주조장치의 표면 즉, 외기와 가장 먼 거리에 위치해 있다고 볼 수 있다. 따라서 시간에 따른 냉각패턴으로부터 유추할 수 있는 것처럼 용탕의 냉각은 주조장치와 맞닿는 부분에서 냉각이 빨리 진행되고 열이 중앙으로 집중되면서 상대적으로 측면부와 급격한 온도차가 발생하기 때문에 열응력이 크게 형성되는 것으로 사료된다. 또한, 몰드를 주조장치에서 분리한 후 7시간 동안의 응력분포를 Fig. 17(c)에서 확인해 보면, 몰드가 냉각되는 동안 약간의 차이는 있으나 Fig. 13(c)와 유사한 응력패턴을 형성하는 것으로 보이며, 냉각이 진행되는 동안 거의 모든 측정지점에서 일정한 응력패턴을 형성하는 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 14, Fig. 15 그리고 Fig. 16은 Fig. 13(a), Fig. 13(b) 그리고 Fig. 13(c)의 온도, 변위 및 응력분포 결과를 1, 4, 7번 지점, 2, 5, 8번 지점 그리고 3, 6, 9번 지점으로 나누어 몰드가 주조장치 내에서 냉각되는 25분 동안 트레드 부분에서의 측정결과를 나타낸 것이고, Fig. 18, Fig. 19 그리고 Fig. 20은 Fig. 17(a), Fig. 17(b) 그리고 Fig. 17(c)의 온도, 변위 및 응력분포 결과를 1, 4, 7번 지점, 2, 5, 8번 지점 그리고 3, 6, 9번 지점으로 나누어 몰드를 주조장치에서 분리하여 50℃까지 냉각되는 동안 트레드 부분에서의 측정결과를 나타낸 것이다.

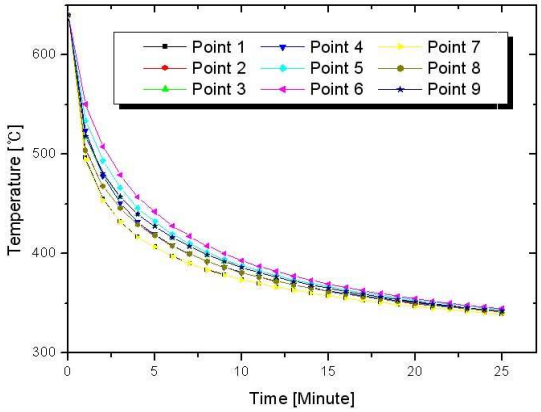


(a) From 0 to 25 minutes

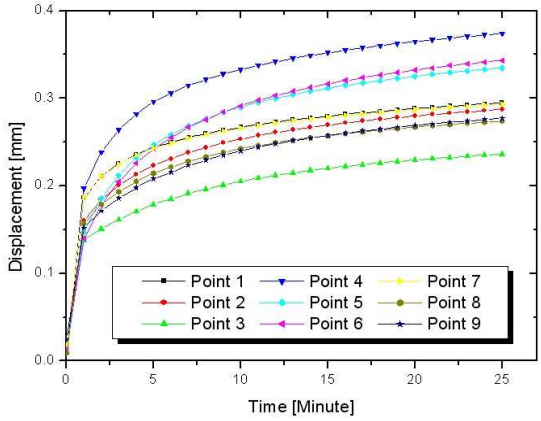


(b) From 25 to 420 minutes

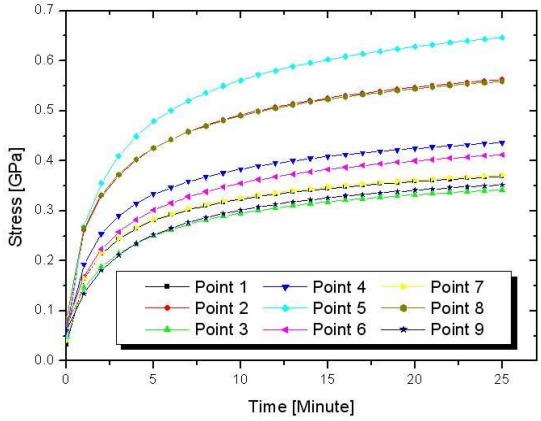
Fig. 12 Visualization of temperature distribution and heat flux direction in numerical analysis model



(a) Temperature variation

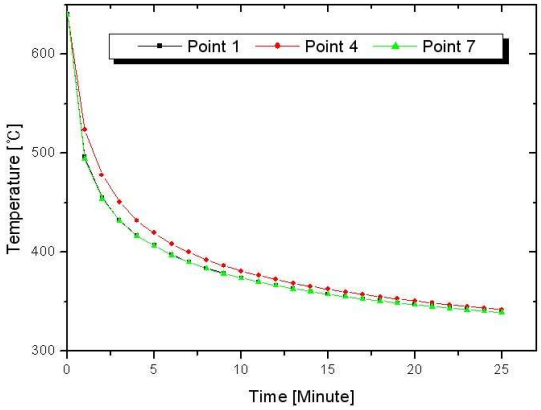


(b) Displacement variation

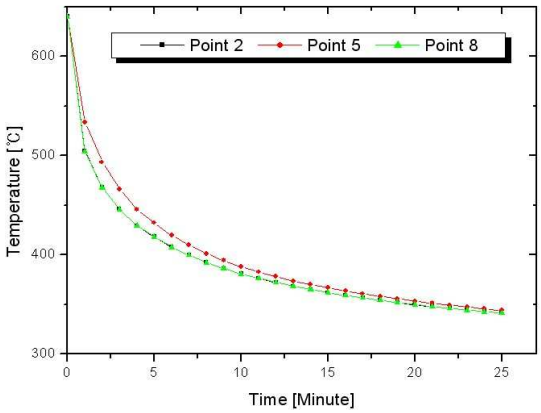


(c) Stress variation

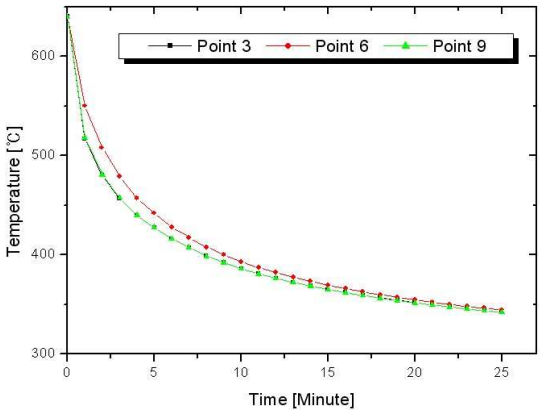
Fig. 13 Thermal deformation at the measurement points during the cooling time from 0 to 25 minutes



(a) Measurement point 1, 4 and 7

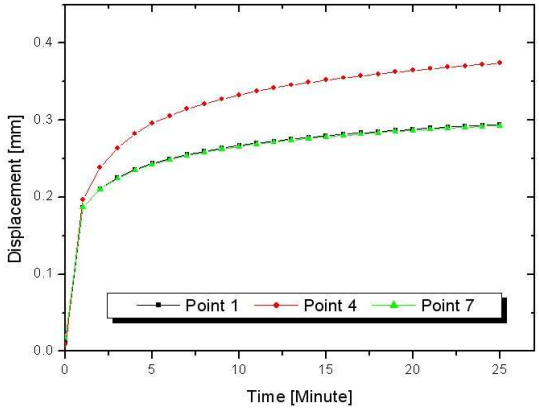


(b) Measurement point 2, 5 and 8

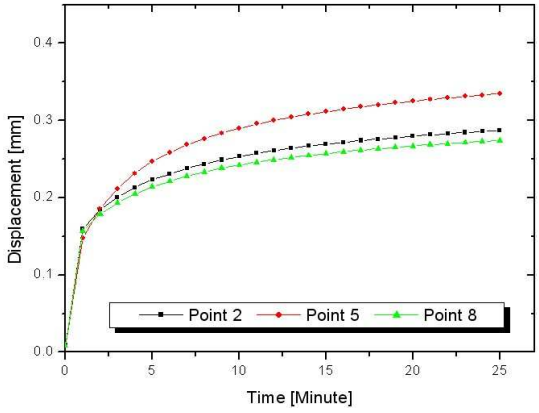


(c) Measurement point 3, 6 and 9

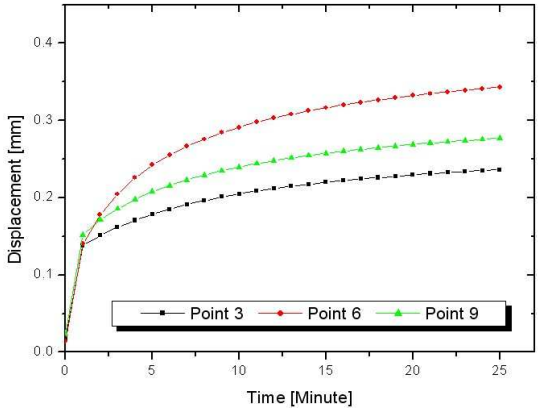
Fig. 14 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes



(a) Measurement point 1, 4 and 7

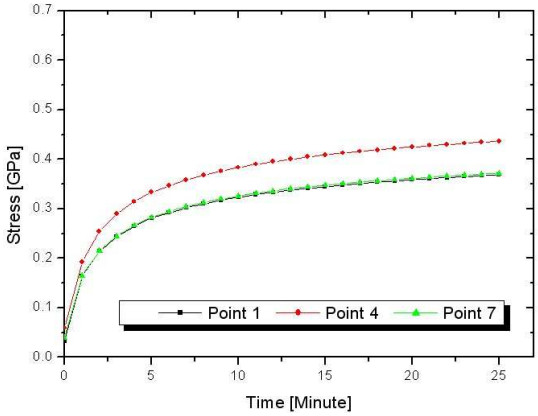


(b) Measurement point 2, 5 and 8

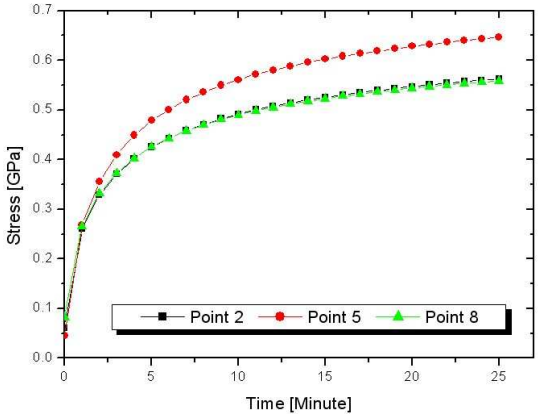


(c) Measurement point 3, 6 and 9

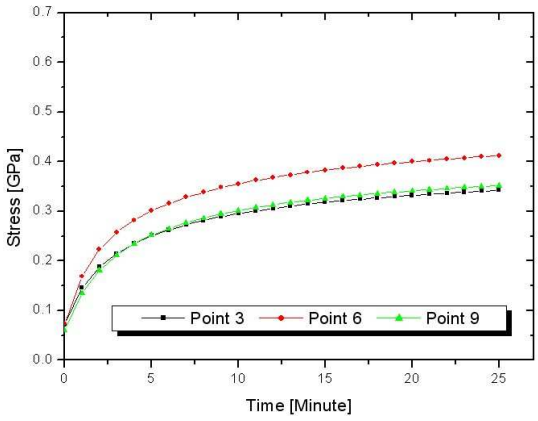
Fig. 15 Displacement variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes



(a) Measurement point 1, 4 and 7

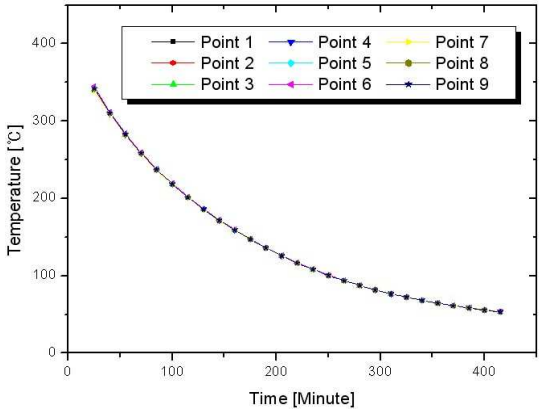


(b) Measurement point 2, 5 and 8

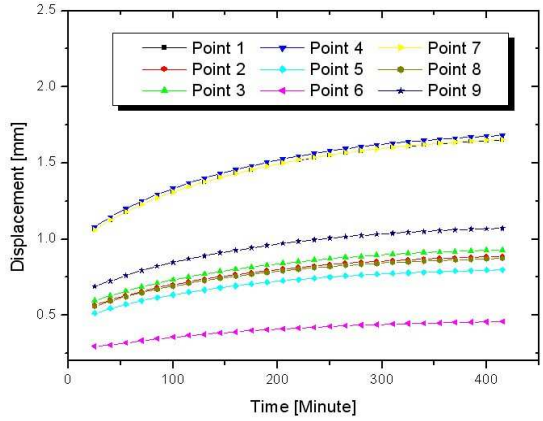


(c) Measurement point 3, 6 and 9

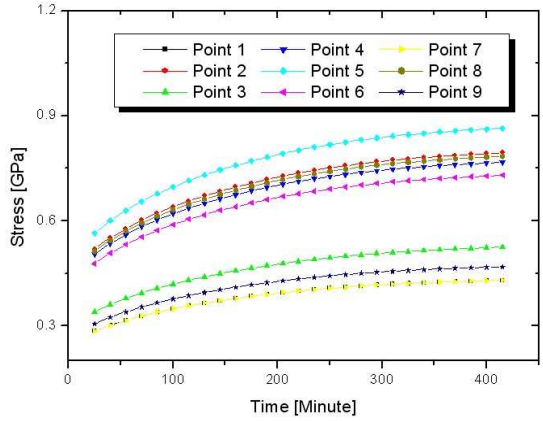
Fig. 16 Stress variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes



(a) Temperature variation

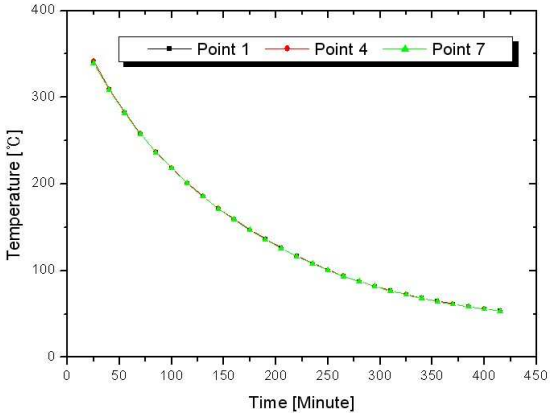


(b) Displacement variation

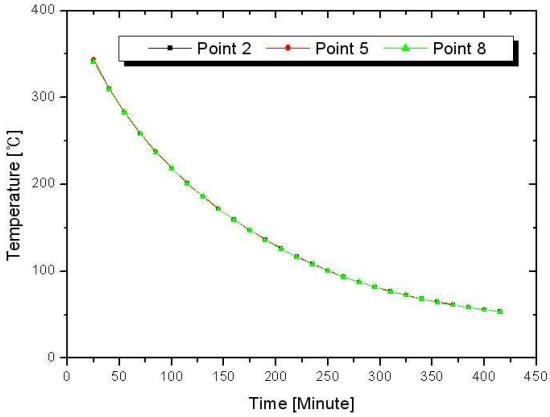


(c) Stress variation

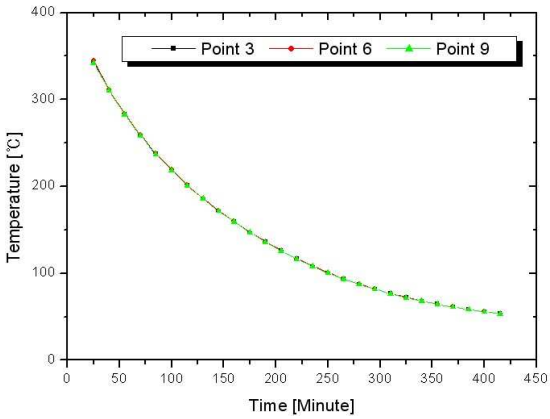
Fig. 17 Thermal deformation at the measurement points during the cooling time from 25 to 420 minutes



(a) Measurement point 1, 4 and 7

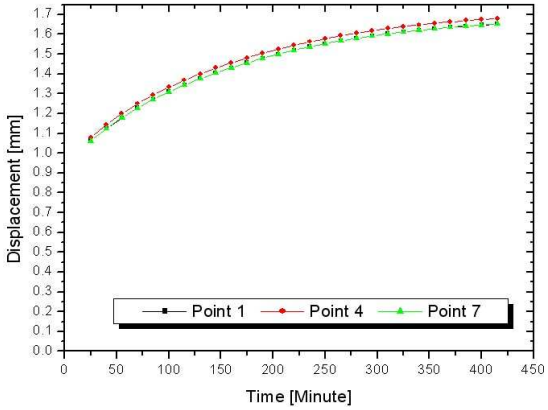


(b) Measurement point 2, 5 and 8

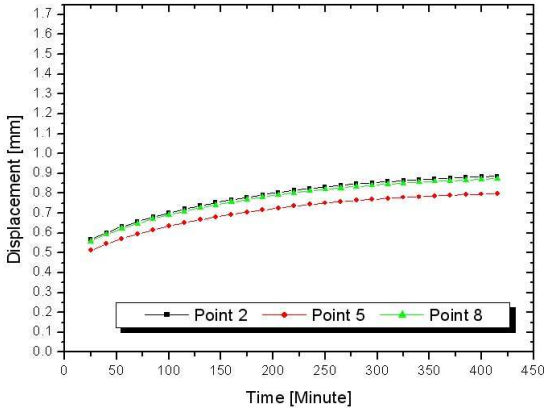


(c) Measurement point 3, 6 and 9

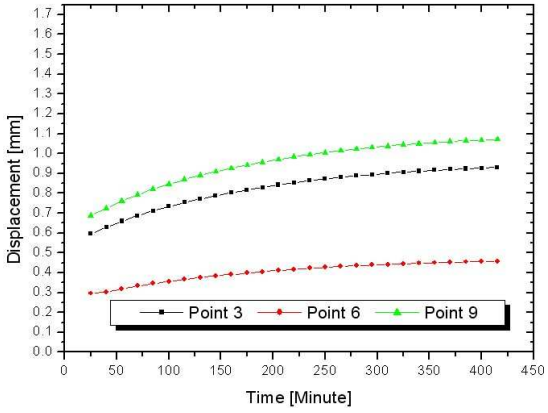
Fig. 18 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes



(a) Measurement point 1, 4 and 7

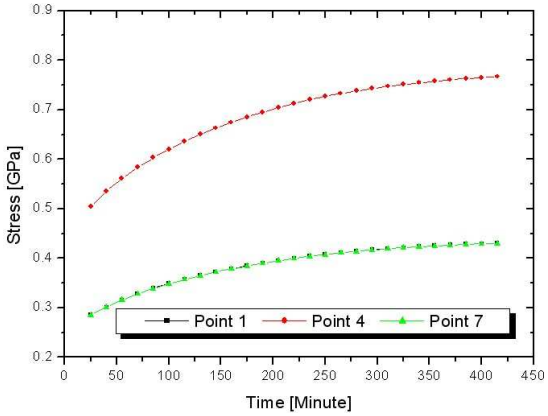


(b) Measurement point 2, 5 and 8

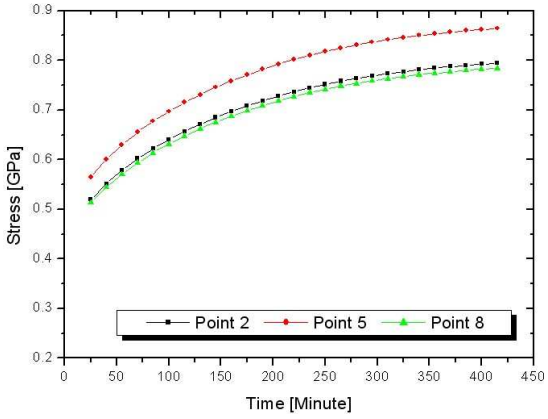


(c) Measurement point 3, 6 and 9

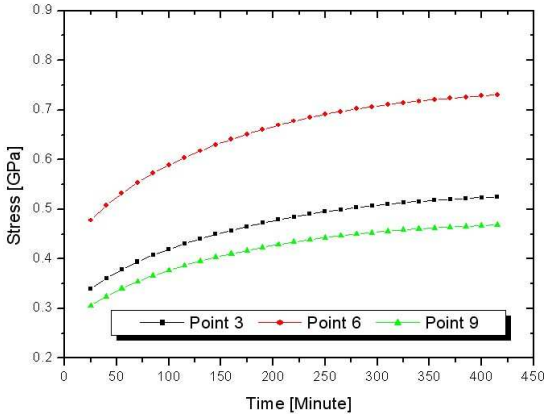
Fig. 19 Displacement variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes



(a) Measurement point 1, 4 and 7



(b) Measurement point 2, 5 and 8



(c) Measurement point 3, 6 and 9

Fig. 20 Stress variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes

4.2 온도측정 실험 결과

4.2.1 트레드 부에서의 온도측정 결과

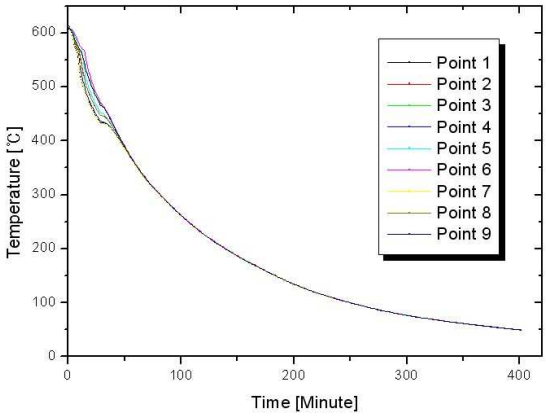
본 연구에서는 앞서 수행한 수치해석 결과를 통해 동일한 조건으로 실험을 수행하였고, 타이어 몰드 내부 트레드 부분의 냉각시간에 따른 온도분포를 측정하여 수치해석 결과와 비교, 검증해 봄으로써 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 앞 절에서 수치해석시 적용한 조건과 동일하게 주조장치 및 코어를 예열하고, 용탕 주입 및 탈착 방식을 실제 주조장치에 적용하여 초기 용탕 주입부터 주조 완료 시점까지 열전대를 이용하여 온도측정 실험을 수행하였다. 온도측정은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 15개 지점에서 측정하였고, 먼저 수치해석과 동일한 9개 측정지점에서 온도측정 결과를 분석해 보았다.

Fig. 21은 주조장치에 용탕을 주입하여 약 25분동안 주조장치 내부에서 냉각시키고, 25분이 지난 후 몰드를 주조장치로부터 분리하여 상온상태에서 몰드 내부의 온도가 50℃로 냉각 될 때까지 자연냉각되는 과정을 9개 측정지점에서 측정한 온도분포 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 21(a)는 용탕을 주입한 순간부터 몰드가 50℃에 도달할 때까지 각 측정지점별 온도를 그래프로 나타낸 것이다. 650℃로 과가열한 용탕이 탕도를 따라 주조장치 내부로 주입되면서 주조장치의 가장 안쪽인 1, 4, 7번 지점에서부터 3, 6, 9번 지점으로 용탕이 차올라 주조기 안으로 용탕이 충만되게 된다. 용탕이 주조장치 내부로 주입되면서 약간의 열손실이 발생하게 되고, 따라서 열전대를 이용한 초기 측정온도가 용탕온도보다 약간 낮은 온도인 약 620℃에서 시작되는 것을 볼 수 있다. 또한, 용탕 주입 초기 약 20분 동안 급격한 냉각을 보이고 있는데, 이는 고온의 용탕과 상대적으로 낮은 온도를 가지는 주조장치와의 열전달 현상 때문으로 분석된다. 냉각 초기 측정지점별 온도분포를 살펴보면, 용탕 주입 후 초기 온도데이터가 다소 균일하지 못한 것을 볼 수 있는데, 이는 용탕 주입 과정에서 안쪽으로부터 순차적으로 주입이 이루어지기 때문이다. Fig. 21(b)를 살펴보면, 수치해석

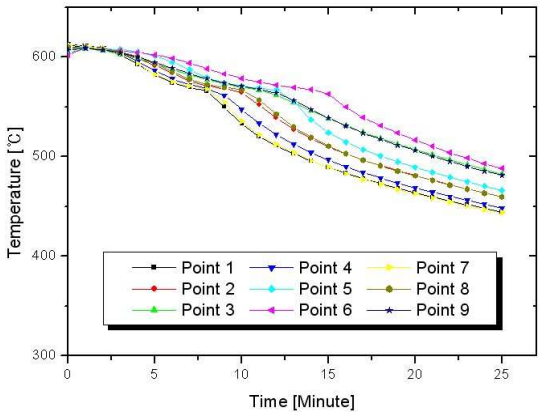
결과와 같이 6번 측정지점에서 가장 늦게 냉각되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 몰드 전체로 볼 때 6번 지점이 가장 중앙에 위치해 있기 때문으로 해석된다. Fig. 21(c)를 보면, 냉각 초기에 비해 모든 측정 지점에서 균일한 온도분포를 보이며 완전냉각상태에 이를 때까지 서서히 냉각되는 것을 볼 수 있는데, 이는 몰드 내부에서 대류에 의한 열전달이 일어나 모든 측정지점이 점차 열평형을 이루어 동일한 온도를 유지하며 냉각되기 때문으로 해석된다.

실험과정에서 냉각초기 약 15분 동안 몰드의 냉각패턴이 수치해석과정에서 볼 수 없었던 상이한 냉각패턴을 보이고 있는데, 수치해석에서는 냉각 초기 급격한 냉각속도를 보이며 온도가 떨어지는 것을 볼 수 있으나, 실제 실험에서는 이와는 다르게 느린 냉각속도를 보이며 냉각되는 것을 볼 수 있다. 수치해석 결과와 실험결과를 비교해 볼 때, 몰드의 냉각초기 상이한 온도분포를 보이는 이유는, 본 실험에서는 AC4C 주조재 용탕을 650℃로 과가열하여 금형주조기에 주입하게 되는데, 이때 용탕이 냉각되면서 액상의 용탕이 열전달을 통해 고체상태로 변하는 동안 상변화(phase change)가 발생하기 때문이다. 즉, 순수 금속의 경우에는 어느 일정한 온도에서 상변화가 일어나지만, 합금의 경우에는 일정 온도범위에 걸쳐서 상변화가 일어난다. 또한, 응고는 액상온도(liquidus temp.)에서 시작하여 고상온도(solidus temp.)에서 완료되며, 이러한 온도범위에서는 고상과 액상의 2상영역(mushy zone)이 공존하게 된다[30]. 이러한 이유로 순수한 알루미늄의 경우에는 용융온도인 660℃에서 액상에서 고상으로의 상변화 과정 동안 잠열 발생에 의해 일정한 온도를 유지하다가 고상으로 완전히 변하면 그 때부터 다시 냉각이 이루어지지만, 본 연구에 사용한 AC4C 주조재는 Al-Si-Mg계 Al 합금으로서 6.5～7.5%의 Si와 그 외 몇몇의 이종원소가 혼합되어 있어서 함유물의 영향으로 순수 Al의 용융온도보다 낮은 온도인 약 610℃에서 상변화가 시작되고 있고, 상변화 과정 또한 잠열과 혼합물의 영향으로 매우 느린 냉각속도를 보이고 있으며, 상변화가 완료된 시점인 약 560℃에서부터 다시 정상적인 냉각속도를 보이고 있다.

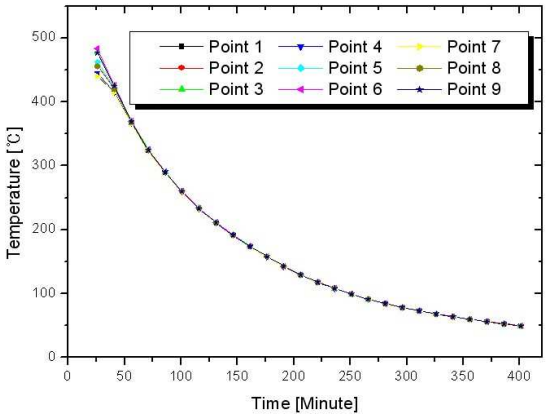
Fig. 22와 Fig. 23은 Fig. 21(b)와 Fig. 21(c)에서 나타난 온도측정 결과를 1, 4, 7번 지점, 2, 5, 8번 지점 그리고 3, 6, 9번 지점으로 나누어 주조장치 내에서 25분 동안 냉각이 진행되는 경우와 주조장치에서 분리한 후 몰드가 50℃ 이하로 냉각되는 완전 냉각이 이루어지는 시점까지 온도측정 결과를 구간별로 나누어 각각 나타낸 것이다.



(a) From 0 to 420 minutes

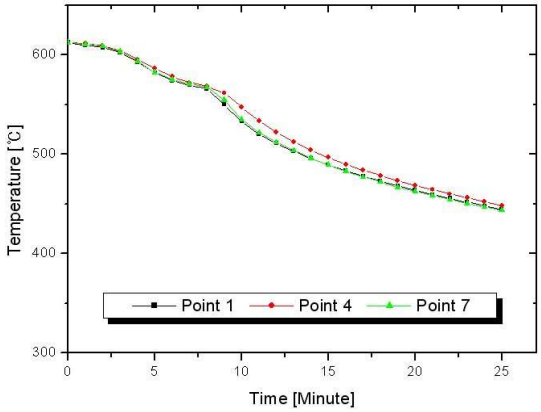


(b) From 0 to 25 minutes

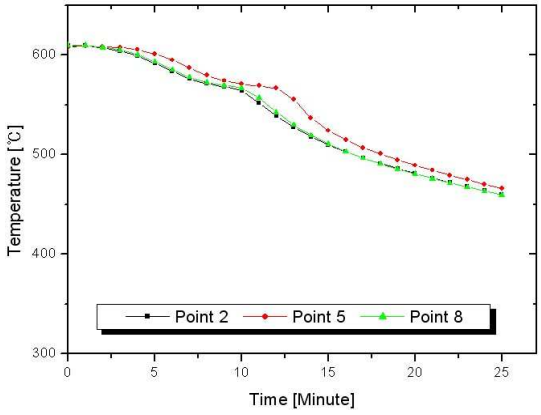


(c) From 25 to 420 minutes

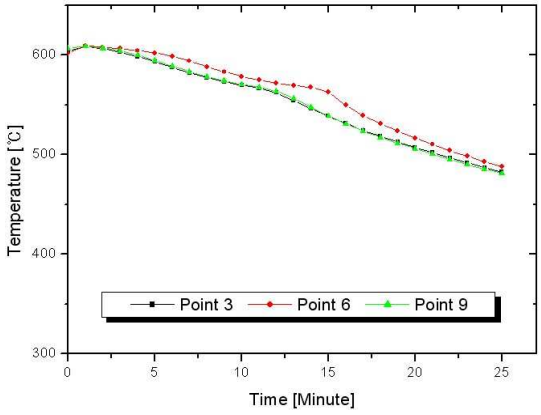
Fig. 21 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time



(a) Measurement point 1, 4 and 7

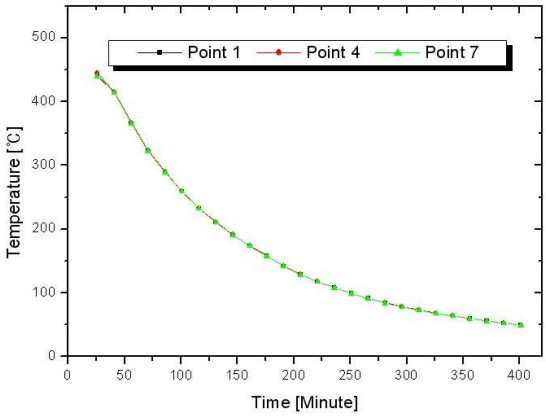


(b) Measurement point 2, 5 and 8

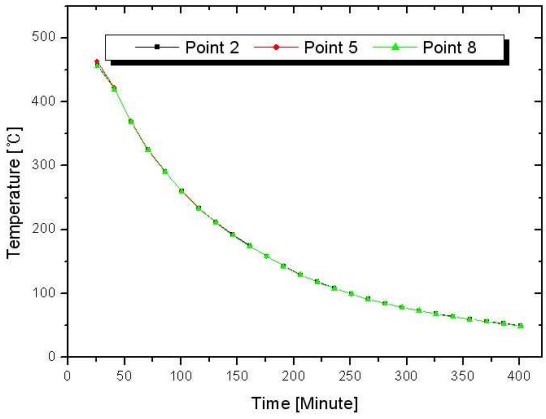


(c) Measurement point 3, 6 and 9

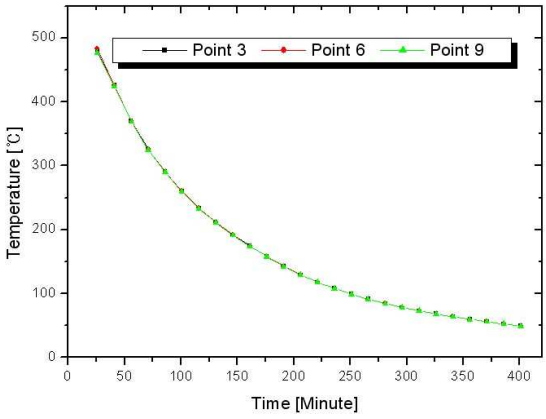
Fig. 22 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 0 to 25 minutes



(a) Measurement point 1, 4 and 7



(b) Measurement point 2, 5 and 8



(c) Measurement point 3, 6 and 9

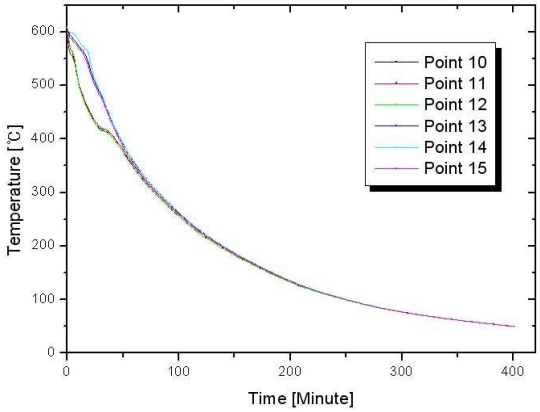
Fig. 23 Temperature variation at the measurement points in tread part during the cooling time from 25 to 420 minutes

4.2.2 사이드 부에서의 온도측정 결과

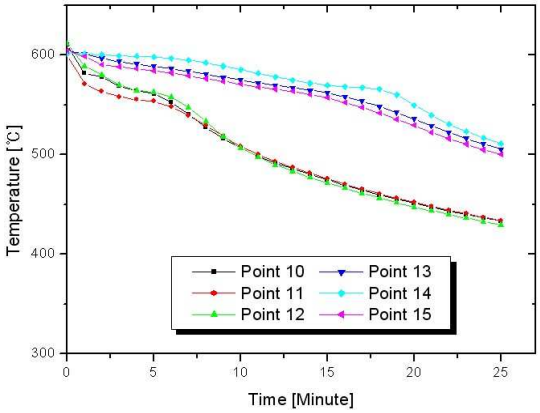
Fig. 8을 보면 타이어 트레드 형상이 있는 1~9번 지점 외에 타이어 몰드 트레드 부분의 사이드 면에 해당하는 10~15번 지점이 있는 것을 볼 수 있는데, 주입된 용탕이 냉각되는 과정에서 트레드 부분에 영향을 줄 수 있다고 사료되어 트레드 사이드 부분의 온도분포를 측정하고 그 결과를 확인해 보았다.

Fig. 24는 용탕 주입 후 약 25분 동안 주조기 안에서 냉각되는 몰드의 온도분포와 25분 후 몰드를 주조장치에서 분리시켜 완전냉각이 이루어지는 상온상태에 이를 때까지 트레드 부분의 사이드부에서 각 측정지점별로 발생하는 온도분포 결과를 나타낸 것이다. Fig. 24(a)는 용탕 주입부터 약 7시간 동안 사이드부에서 발생하는 온도분포 결과를 나타낸 그래프로서 하단부인 1, 4, 7번의 아래부분에 10, 11, 12번 지점이 있고, 3, 6, 9번 지점 위에 13, 14, 15번 측정지점이 있다. 사이드 부에서의 온도분포 패턴 또한 용탕 주입 후 약 25분 동안 측정지점별로 냉각시간에 따른 온도분포가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이를 구체적으로 확인해 보기 위해 Fig. 24(b)에 냉각 초기부터 25분 동안 측정지점별로 발생하는 온도분포 결과를 나타내어 보았다. 용탕이 탕로를 따라 주조기 안으로 주입되는 과정에서 10, 11, 12번 지점이 가장 먼저 채워지고, 13, 14, 15번 지점이 가장 늦게 용탕이 채워진다. 따라서 10, 11, 12번 지점의 온도는 용탕이 주조기에 채워지는 과정에서 맨 먼저 주조장치와 접촉하여 초기 약 3분 이내에 급격한 냉각이 이루어지고, 맨 마지막에 채워지는 13, 14, 15번 지점은 상대적으로 서서히 냉각된다. 특히, 14번 지점에서의 온도는 다른 측정지점에 비해 냉각이 서서히 진행되는데, 이러한 현상은 주조장치와 맞닿아 있는 다른 측정지점은 냉각이 빠르게 진행되는 반면 14번 지점의 경우에는 전체적인 금형 형상에서 중앙부분에 위치해 있기 때문에 상대적으로 느린 냉각속도를 보이고 있는 것으로 보인다. 하지만 25분이 지난 후 몰드를 주조기에서 탈착한 뒤에는 Fig. 24(c)에서 볼 수 있듯이 몰드가 어느 정도 열평형을 이룬 상태가 되어 트레드 부분에서 측정한 온도분포와 비슷한 온도분포를 볼 수 있다.

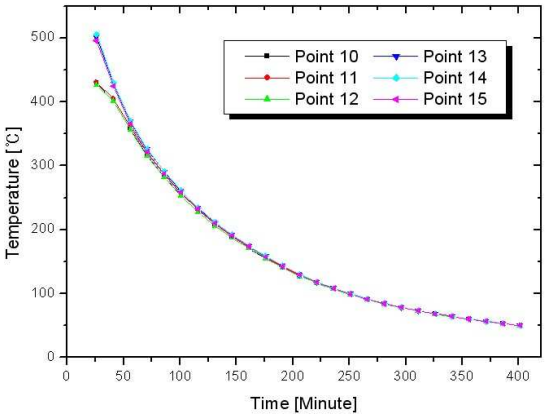
또한, Fig. 25와 Fig. 26은 Fig. 24(b)와 Fig. 24(c)에서 나타난 온도측정 결과를 10, 11, 12번 지점과 13, 14, 15번 지점으로 나누어 주조장치 내에서 25분 동안 냉각이 진행되는 경우와 몰드를 주조장치에서 분리한 후 주조 완료 시점까지 냉각이 진행되는 동안 발생하는 온도측정 결과를 구간별로 나누어 각각 나타낸 것이다.



(a) From 0 to 420 minutes

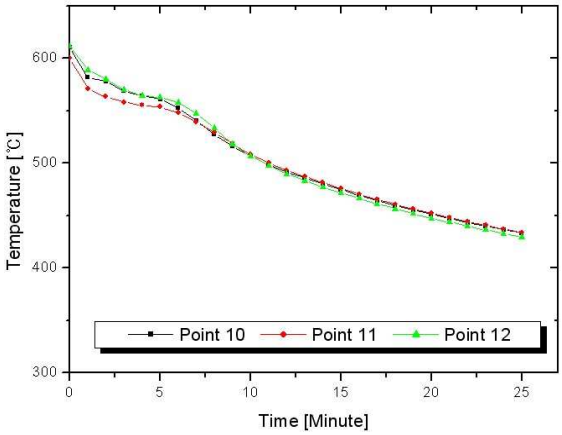


(b) From 0 to 25 minutes

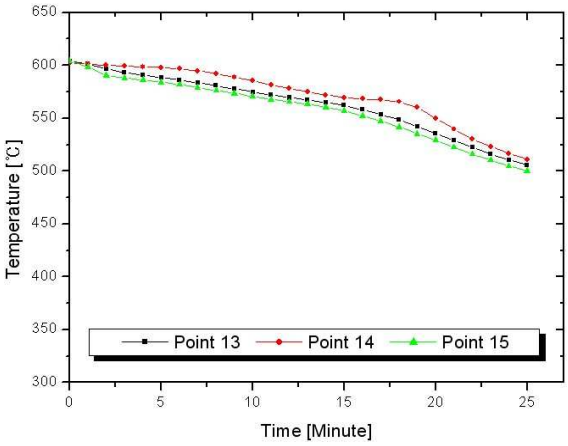


(c) From 25 to 420 minutes

Fig. 24 Temperature variation at the measurement points in side part during the cooling time

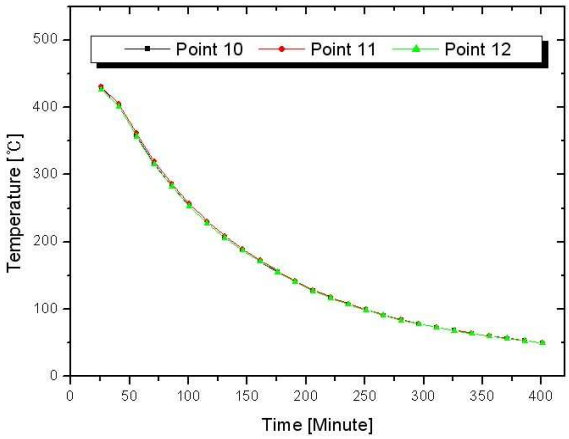


(a) Measurement point 10, 11 and 12

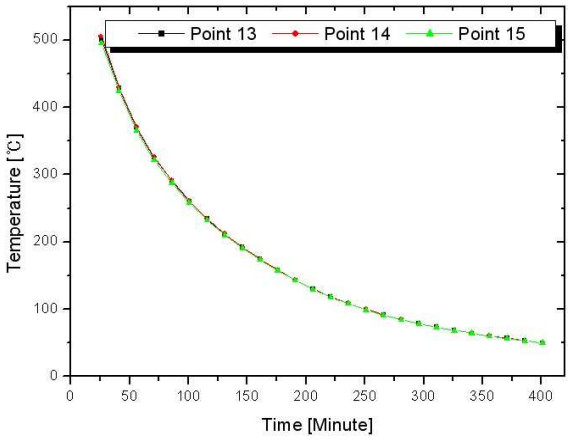


(b) Measurement point 13, 14 and 15

Fig. 25 Temperature variation at the measurement points in side part during the cooling time from 0 to 25 minutes



(a) Measurement point 10, 11 and 12



(b) Measurement point 13, 14 and 15

Fig. 26 Temperature variation at the measurement points in side part during the cooling time from 25 to 420 minutes

제 5 장 결 론

본 연구에서는 자동차 타이어 몰드용 AC4C 주조재의 온도분포 및 열변형 예측에 관한 연구에 있어 금형주조방식을 적용하여 타이어 몰드의 냉각과정 동안 몰드 내부에서 발생하는 온도분포, 변위 그리고 응력분포를 편미분방정식(PDE)을 적용한 상용코드인 “COMSOL Multiphysics 3.3 Ver”을 이용하여 수치해석적 방법으로 예측해 보았다.

1. 수치해석을 통해 금형 내부의 온도를 예측한 결과, 금형주조장치 내부에서 금형이 냉각되는 약 25분 동안 급격한 냉각속도를 보이며 냉각되는 것을 볼 수 있었고, 금형을 주조기에서 분리한 후 완전 냉각 상태로 보는 50℃까지 냉각되는 동안의 온도분포를 살펴보면, 금형의 모든 측정지점에서 온도평형을 이루어가며 유사한 냉각속도를 보이면서 서서히 냉각되는 것을 볼 수 있었다.

2. 수치해석 결과를 토대로 시제품을 제작하여 실시한 실험에서 수치해석에서는 볼 수 없었던 용탕 주입 초기 약 15분 동안 냉각이 서서히 진행되는 것을 볼 수 있었는데, 이는 고온의 용탕이 액상에서 고상으로 되는 과정 중 상변화에 따른 잠열의 발생으로 인해 그러한 온도분포를 보이는 것으로 판단된다.

3. 수치해석을 통해 제품의 예비성능평가를 수행할 수 있게 되었고, 향후 고정밀도의 몰드제품의 생산에 있어서 시제품 제작에 따른 시간적, 경제적 투자비용의 절감을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 향후 관련 산업체의 기초연구자료로의 활용이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. J. Szekely and A. S. Jassal, Metall. Trans, Vol. 9B, pp. 389, 1978.

2. J. Cambell, Mat. Sci. & Tech, Vol. 17, pp. 885, 1991.

3. Y. T. iM, “Solidification Analysis of Casting and Semi-solid Forging”, Vol. 21, No. 3, pp.155-162, 2001.

4. 홍준표 : 대한기계학회지 추계특집호, Vol. 30, pp. 173-190, 1990.

5. S. Engler, D. Boenisch and B. Kohler, “Matal and Mold Wall Movement during solidification of Cast Iron”, AFS Cast Metals Research Journal, Vol. 3, pp. 20-30, 1973.

6. B. B. Nyichomba, V. Kondic and G. H. J Benett, “Dimensional Tolerances of Sand Castings Made of Aluminum and Grey Cast Iron”, Transactions of AFS, Vol. 102, pp. 813, 1994.

7. W. C. Faustine, R. C. Voigt and F. E. Peters, “Dimensional Variability of Aluminum Castings”, Transactions of AFS, Vol. 107, pp. 829-838, 1999.

8. F. E. Peters, R. Velaga and R. C. Voigt, “Assessing Dimensional Repeatability of Metalcasting Processes”, Transactions of AFS, Vol 104, pp. 181-190, 1996.

9. D. R. Gunasegaram, A. K. Dahle and T. T. Nguyen, “Mechanism of Gap Formation During Solidification of Commercial Al-Si Alloys”, Transactions of AFS, Vol. 107, pp. 257-164, 1999.

10. K. Y. Kim et al, “Displacement of the Solidified Shell and Metal Mold for AC4C Alloys”, J. of JFS, Vol. 61, pp. 171-176, 1989.

11. Willian F. Smith, “Structure and Properties of Engineering Alloys”, 2nd ed., McGraw-Hill Inc., U.S.A. pp. 218, 1981.

12. R. J. Sarjant and M. R. Slack, J. Iron Steel Inst., Vol. 177, pp. 428, 1954.

13. G. Comini and S. Del Guidice, Int. J. Number. Methods Engineering, Vol. 8, pp. 612, 1974.

14. C. P. Hong T. Umeda and Y. Kimura, Boundary Elements (Eds. C.A.Breibbia et al.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 153, 1983.

15. J. K. Choi and C. P. Hong, Modeling of Casting and Solidification Processes 1991 (Eds. C.P.Hong et al.), Yonsei Univ. Press, pp. 337, 1992.

16. G. M. Dusinberre, “Heat Transfer Calculation by Finite Differences”, Int. Texbook Co., Scranton PA., 1961.

17. W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow, G. E. Schneider and R. H. Pletcher, IN Handbook of Numerical Heat Transfer, Hohn Wiley & Sons, Inc., 1988.

18. K. Morgan, R. W. Lewis and O. C. Zienkiewicz, Int. J. Numer, Methods Engng., Vol. 12, pp. 1191, 1978.

19. I. Ohnaka and T. Fukusako, IMONO, Vol. 48, pp. 139.

20. V. Pashkis, Trans, AFS, Vol. 53, pp. 90, 1945.

21. E. A. Mizikar, Trans. AIME, Vol. 239, pp. 1747, 1967.

22. E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa and S. Saito, AFS Int. Cast Metals J., Vol. 7, pp. 352, 1982.

23. C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura, Metal. Trans., Vol. 15B, No. 1, pp. 91-99 and pp. 101-107, 1984.

24. C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura, J. Japan Inst., &etas. Vol. 49, No. 11, pp. 1099, 1984.

25. R. J. Sarjant and M. R. Slack, J. Iron Steel Inst., Vol. 177, No. 428, 1954.

26. G. Comini and S. Del Guidice, Int. J. Numer, Methods Engng., Vol. 8, pp. 612, 1974.

27. P. N. Hansen, “Solidification and Casting of Metals”, The Metals Socirty, London, pp. 350, 1979.

28. K. Imafuku, Japan Soc. Mech. Eng., 805-2, 115, 1980.

29. C. H. Kim, “다중물리 해석 프로그램 : COMSOL Multiphysics”, J. of KFMA, Vol. 9, No. 6, pp. 74-80, 2006.

30. M. S. Yeo et al, “A study on the phase change in the cylindrical mold by the enthalpy method”, J. of SAREK, Vol. 11, No. 6, pp. 891-897, 1999.

감사의 글

대학 4년 부족했던 공부를 더해 보고자 하는 마음에 열공학실험실의 문을 두드린 지 어느덧 2년이라는 세월이 흘러 졸업이라는 이별을 앞두게 되었습니다. 영원한 이별은 아닐지라도 기쁨과 슬픈, 아픔을 열공학실험실 식구라는 이름으로 함께했던 정든 이곳을 떠난다니 가슴 한곳이 아려옵니다.

제 인생에 있어서 대학원 2년이라는 기간은 가장 즐거웠고, 가장 힘들었으며, 가장 보람 있었던 시간이었습니다. 저에게 이러한 생활이 가능할 수 있었던 건 “항상 나만 믿고 따라 오너라!”라고 말씀하시며 저의 앞길을 환히 밝혀주시던 오율권 교수님이 계셨기에 가능한 일이었습니다. 이 기회를 빌어서 진심으로 가슴속 깊이 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 더불어 누구보다 열정적으로 가르침을 주시고 바쁘신 중에도 보다 훌륭한 논문을 위해 조언과 격려로써 논문심사를 해주신 심재기 교수님과 이동기 교수님께 머리 숙여 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 누구보다 학과를 위해 노력을 아끼지 않으신 김영석교수님, 유영태교수님, 김재열교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

겉으로는 태연한척 하지만 마음속으로는 노심초사하는 호동형, 힘든 일이든 궂은일이든 마다않는 희성이, 나의 푸념을 싫은 내색 하나 없이 잘 들어주는 제세 그리고 지금은 졸업해서 직장생활하고 있는 친구이면서 많은 의지가 되어주었던 용범이 다들 너무 감사합니다. 더불어 지금은 대학원을 졸업하고 열공학실험실을 떠나계시는 여러 선배님들 항상 저를 볼 때마다 많은 조언과 사랑을 주셔서 감사합니다. 그리고 대학원생활하면서 나태함을 경계하도록 항상 지켜봐주신 호준형을 비롯한 많은 선배님들과 힘들 때 많은 위안이 되어주었던 동기 병헌이와 승현이 그리고 후배님들 감사합니다. 또한, 대학원 생활했던 학

과는 다르지만 많은 의지가 되어준 상문이 그리고 우채에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

제가 대학원을 무사히 마칠 수 있도록 도와주고 격려해준 종하와 민수, 현호, 병욱이, 준이, 원호 그리고 소리ㄱ름 선배님들과 동기들, 소리공간 선배님들과 후배님들께 고마움을 전하고 싶습니다. 그리고 얼굴만 보고 안부만 물어도 고마운 규현이와 민철이, 복희 그리고 진희에게도 감사의 마음을 전합니다.

이 외에 일일이 모두 다 명시하지 못했지만 저를 위해 항상 기원해 주시고 격려해 주시는 많은 분들께 감사의 뜻을 전합니다.

마지막으로 저에게 항상 변함없는 응원과 변치 않는 믿음을 주는 형들과 누나들, 매형과 조카 미리와 상석이 그리고 지금의 제가 있도록 해주시고 항상 저의 안위를 걱정해주며 저를 위해 자신의 많은 것을 포기하신 저의 영원히 변치 않는 우군이신 아버지께 저의 모든 것을 담아 감사의 마음을 전하고자 합니다.

2008년 여름의 문턱에 서서...

김 영 선 올림

저작물 이용 허락서

학 과	정밀기계공학과	학 번	20067525	과 정	석사과정
성 명	(한글) 김 영 선 (한문) 金 永 瑄 (영문) Kim, Young-Sun				
주 소	전라남도 화순군 화순읍 청전 APT 101-608				
연락처	E-mail : sobasic1964 @ nate.com				
논문제목	(한글) 타이어 몰드용 AC4C 주조재의 온도분포 및 열변형 예측에 관한 연구				
	(영문) A Study on Prediction of Thermal Deformation and Temperature Distribution of AC4C Casting Material for Tire Mold				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포・전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송・출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2008년 8월 일

저작자: 김 영 선 (인)

조선대학교 총장 귀하