[UCI]I804:24011-200000231830

2007년 2월
교육학석사(기술·가정교육전공) 학위논문

자동차 타이어 제조용 Al 합금 몰드의 열변형 특성에 관한 수치해석적 연구

조선대학교 교육대학원

기술·가정교육전공

박 성 혜

자동차 타이어 제조용 Al 합금 몰드의 열변형 특성에 관한 수치해석적 연구

Numerical Study on Thermal Deformation Characteristics of Aluminum Alloy Mold for Automobile Tire Production

2007년 2월 일

조선대학교 교육대학원

기술·가정교육전공

박 성 혜

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

100373512 2007-04-09

자동차 타이어 제조용 Al 합금 몰드의 열변형 특성에 관한 수치해석적 연구

지도교수 오 율 권

이 논문을 교육학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2006년 10월 일

조선대학교 교육대학원

기술·가정교육전공

박 성 혜

박성혜의 교육학 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교 수 김 진 홍 (인)

위 원 조선대학교 교 수 정 낙 규 (인)

위 원 조선대학교 교 수 오 율 권 (인)

2006년 12월 일

조선대학교 교육대학원

목 차

제 1 장 서 론 1

1.1 연구배경 1

1.2 연구목적 및 내용 3

제 2 장 이론해석 4

2.1 유한요소법에 의한 금형의 온도분포 해석 4

2.1.1 에너지 보존의 법칙에 의한 열전도 방정식 4

2.1.2 변분법에 의한 유한요소 정식화 7

2.2 유한요소법에 의한 금형 변형 및 응력해석 12

2.2.1 변형률과 변위와의 관계 12

2.2.2 응력과 변형률과의 관계 12

2.2.3 금형 내에서의 열변형률 14

2.2.4 금형 내에서의 초기 응력과 변형률 15

제 3 장 수치해석 방법 및 결과해석 16

3.1 수치해석 방법 16

3.2 알루미늄 합금의 온도분포 해석결과 19

3.3 알루미늄 합금의 변위분포 해석결과 29

3.4 알루미늄 합금의 응력분포 해석결과 37

제 4 장 결 론 43

참고문헌 44

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Triangular element of 3-node at two-dimension 8

Fig. 2 Convection heat loss in the *i* - *j* surface 11

Fig. 3 Schematic diagram of a structure in analysis model (Front view) 18

Fig. 4 Schematic diagram of a structure in analysis model (Side view) 18

Fig. 5 Schematic diagram of measurement points & visualization of temperature at the cooling time, [T = 0 sec] in analysis model (Front view) 21

Fig. 6 Schematic diagram of measurement points & visualization of temperature at the cooling time, [T = 0 sec] in analysis model (Side view) 21

Fig. 7 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 300 sec] by measurement points (Front view) 22

Fig. 8 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 300 sec] by measurement points (Side view) 22

Fig. 9 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 600 sec] by measurement points (Front view) 23

Fig. 10 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 600 sec] by measurement points (Side view) 23

Fig. 11 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 900 sec] by measurement points (Front view) 24

Fig. 12 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 900 sec] by measurement points (Side view) 24

Fig. 13 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Front view) 25

Fig. 14 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Front view) 26

Fig. 15 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Side view) 27

LIST OF FIGURES (Continued)

Fig. 16 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Side view) 28

Fig. 17 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Front view) 31

Fig. 18 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 1 hour] by measurement points (Front view) 32

Fig. 19 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Front view) 33

Fig. 20 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Side view) 34

Fig. 21 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 1 hour] by measurement points (Side view) 35

Fig. 22 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Side view) 36

Fig. 23 Result of stress variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Front view) 39

Fig. 24 Result of stress variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Front view) 40

Fig. 25 Result of stress variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Side view) 41

Fig. 24 Result of stress variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Side view) 42

LIST OF TABLES

Table 1 Thermophysical properties of Aluminum alloy 16

NOMENCLATURE

E_{in}	검사체적에 유입되는 에너지
U	내부에너지
Q	내부적인 열원
q	열유속
t	시간
T	온도
$\frac{dT}{dx}$	온도구배
c	비열
ρ	질량밀도
k	열전도율
h	열전달계수
T_∞	자유 유동 대기온도
E	체적탄성계수
[D]	물성행렬
[N]	형상함수
ε	변형률
σ	응력
τ	전단응력
v	포아송비
α	열팽창계수

ABSTRACT

Numerical Study on Thermal Deformation Characteristics of Aluminum Alloy Mold for Automobile Tire Production

Park, Sung-Hye
Advisor : Prof. Oh, Yool-Kwon Ph.D.
Major in Technology & Home Economics Education
Graduate School of Education, Chosun University

The manufacturing industry such as tire product must be changed to consult the taste of customers and is required to make the best product that it has improved more stability and driving performance at consumer's desire in a short time. So, many researchers have been tried to produce the mold product of good quality and to reduce the manufacturing process in mold industry. And, they are increasingly concentrated on process technique development of tire mold using aluminum (Al) alloy. Generally, there are two types of separating method in the tire mold manufacturing process. The first, and basic one, is a full-casting mold which is obtained the product of uniform quality and is easy the mass production. However, the product of width tire that tread pattern is complex is difficult.

The second type of separating method is sectional-casting mold, in which the product of width tire having a complex pattern is made without a defect because it is manufactured to 6 ~ 8 equal division. But, in this case, because rubber flush is apt to occur from division part, casting mold must have a high precision and need a long time in manufacturing process. Also, precision of casting mold can decrease by contraction during the solidification process in mold.

Therefore, this study presents numerical analysis applying a finite element method (FEM) on thermal deformation characteristics of aluminum alloy mold for automobile tire production. To analyze the thermal deformation characteristics on the inside of sectional-casting mold using Al alloy, it is investigated the temperature, thermal displacement and thermal stress of Al alloy tire mold using a FEM. The numerical results are presented to help to make the effective and the best tire mold. In addition, the introduced technique of numerical work needs to improve the precision of mold and particularly is very useful to analyze the material processing technology.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 자동차 산업, 전기·전자 및 조선 산업 등의 발전에 따라 관련 제조업에 있어 제품의 고품질, 다품종 소량 생산으로의 변화는 21세기 금형산업에게 주어진 해결해야 할 과제가 되었다. 그 중 급변하는 산업을 대변하는 것 중에 대표적인 한 분야가 자동차 산업인 것은 확연한 사실이다. 자동차가 보급되기 시작할 당시만 하더라도 소수 특권층만이 누릴 수 있는 부의 상징 중의 하나였던 자동차는, 1990년대 들어 일반 계층에게 까지 보편화가 되면서 현대 생활의 일부분이 되었고 우리의 일상 속에 깊이 들어와 있다. 특히, 인간의 이동수단으로서 힘과 스피드를 매우 중시하던 예전과는 달리 현대에 들어서는 주행성능, 안락함 및 안정성 등을 동시에 요구하고 있는 것이 시대의 흐름이다. 자동차의 여러 가지 기능적 측면에서 볼 때, 자동차의 주행성능, 진동 및 소음 등을 결정짓는 요소들은 많이 있지만 그 중에 상당한 비중을 차지하는 것이 바로 타이어라고 할 수 있다. 따라서 타이어는 차의 성능과 용도에 따라서 각기 다른 설계가 요구되고 있으며 최근에는 차의 품위를 높여주는 장식기능 또한 고려되고 있는 것이 사실이다. 특히 고객의 취향에 맞는 타이어를 얼마나 빨리 공급을 하느냐가 타이어 산업의 성패를 좌우하는 우선 조건이 되었으며, 이에 금형산업 역시 제작기간을 최대한 단축하는 것이 시급히 해결해야 할 문제로 부각되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 금형의 응고과정에서 일어나는 물리적 제반 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 해석하고 예측함으로써 설계 및 제작과정에서 금형제품 생산에 불필요한 공정의 개선과 제조시간 및 소요경비를 줄여 새로운 제품의 개발이 보다 신속하게 이루어 질 수 있다[1,2].

자동차용 타이어 생산 공정 중에서 제작된 몰드(Mold)는 트레드(Tread) 패턴을 형성하는 가류공정에서 사용되는 것으로, 트레드는 성형공정에서 그린케이스라 불리는 완제품에 가까운 모형에 열과 압력을 가하여 제작되며, 타이어의 종류에 따라 타이어가 지면에 접촉하는 트레드가 달라 자동차의 구동력 및 제동력에 영향을 미친다. 타이어 금형을 제작함에 있어 분리방법에 따라 Full type 금형과 Sectional type 금형(분할금형)으로 나눌 수 있다. Full type 금형은 타이어를 수평으로 양분할하여 제조하는 방식으로 대량생산이 쉽고 균일한 품질의 금형을 생산할 수 있는 장점이 있으나 타이어 제품을 이형 할 때 전단력이 생겨 제품에 손상이 생기거나 내부 Strain이 발생하기 때문에 트레드부의 문양이 복잡한 승용차 타이어나 광폭타이어 제조에는 부적합한 단점이 있다. 반면, 분할금형은 타이어를 수직으로 6~8등분하여 제작조립을 함으로써 타이어 성형 후 이형 시 분할금형의 타이어 외경방향으로 각각 벌어지게 되어 트레드부가 복잡한 문양이거나 광폭타이어이어도 손상이 없이 제조가 가능하다. 그러나 분할금형의 단점으로 타이어 성형시 분할부분에서 고무 Flush가 발생하기 쉬우므로 금형의 높은 정밀도가 요구되고 제작기간도 길어지는 점을 들 수 있다.

본 연구에서는 주조재 AC7A(알루미늄 합금)의 주조시 열변형을 제어하며, 분할금형의 단점인 타이어 성형시 분할 접합부에서 발생하는 고무 Flush가 생성되지 않도록 하기 위한 열변형 제어기술을 개발하여 금형의 정밀도를 높여 정밀 금형 주조기술을 개발함으로써 복잡한 문양의 타이어나 광폭타이어 제조에 보다 용이하게 적용할 수 있는 분할 금형 기술의 정밀도 및 생산성을 향상시키고자 한다.

1.2 연구목적 및 내용

타이어 제조에 사용되는 금형은 현재 1 piece로 구성되어 있으며, 이러한 금형을 제조하는데 있어 크기가 크기 때문에 제조원가 및 제작성 측면에서 불리하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 타이어 제조용 금형을 금형의 대칭성을 이용하여 6 pieces 또는 8 pieces의 형태로 구성하였다. 그러나 이러한 세분화된 금형이 전체적인 형상을 구성할 때 금형의 응고과정에서 수축[3,4] 으로 인한 제품의 정밀도가 떨어질 수 있다. 또한 응고가 진행됨에 따라 고상의 주물이 수축하여 접촉면에서 air gap이 확장됨으로써 열전달은 점차 감소되어 어느 시간 이후 일정한 값을 유지하는 것으로 알려져 있다[5,6]. 따라서, 본 연구에서는 금형의 제작과정에서 발생되는 열응력으로 인한 오차를 줄이고 제품의 정밀도를 향상시키기 위하여 응고시 치수 변화량을 정확히 예측하고자 한다.

본 연구에서는 이러한 열변형 예측을 위하여 첫 번째로 Tire Mold용 금형이 응고되는 과정을 시간에 의한 온도분포를 예측할 수 있도록 상용화 되어 있는 유한요소 프로그램을 이용하여 온도 특성을 파악하고자 하였다. 두 번째로는 Tire Mold용 금형의 제작시 유한요소 프로그램에서 얻어진 시간에 의한 온도분포 이력을 기초로 하여 각 지점마다 발생되는 수축량 및 응력 등으로 인한 치수변화를 정확히 예측하고자 한다. 이러한 과정을 거쳐 Tire Mold용 금형의 제작형태에 따른 치수 변화를 정확히 예측하여 고정밀도 금형제작에 기여하는데 목적을 두고 수치해석적으로 분석하여 Tire Mold용 알루미늄 합금 금형의 특성을 파악해 보고자 한다.

제 2 장 이 론 해 석

2.1 유한요소법에 의한 금형의 온도분포 해석

2.1.1 에너지 보존의 법칙에 의한 열전도 방정식

대류가 없는 일차원 열전도 현상에 대한 기본 미분 방정식을 통한 에너지 보존의 법칙에 의하여[3,4],

$$E_i + E_g = \Delta U + E_{out}$$

또는

$$q_x A dt + QAdxdt = \Delta U + q_{x+dx} A dt \tag{1}$$

으로 표현할 수 있다.

여기서, E_i : 검사체적에 유입되는 에너지 [joule]

ΔU : 내부에너지의 변화량 [kW·h]

q_x : x검사체적 표면에 통해 전도되어 들어오는 열유속 [kW/m^2]

q_{x+dx}: $x+dx$검사체적 표면을 통해 전도되어 나가는 열유속 [kW/m^2]

t : 시간 [h, sec]

Q : 내부적인 열원 [kW/m^3]

이 때, 물체 내에 온도차가 있으면 열은 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르고, 이를 식으로 Fourier's의 열전도 법칙에 의하여 q_x를 정리하면,

$$q_x = -k_{xx}\frac{dT}{dx} \tag{2}$$

여기서, k_{xx} : x방향의 열전도율 [kW/m℃]

T : 온도 [℃]

$\frac{dT}{dx}$: 온도구배 [℃/m]

위의 식 (2)는 x방향의 열유속이 x방향의 온도구배에 비례함을 설명하고 있고, 테일러급수를 사용하여 2차 항까지 표현하면,

$$q_{x+dx} = -\left[k_{xx}\frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx}\left(k_{xx}\frac{dT}{dx}\right)dx\right] \tag{3}$$

내부에너지의 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\triangle U = c(\rho A dx)dT \tag{4}$$

여기서, c : 비열 [kW · h/(kg · ℃)]

ρ : 질량밀도 [kg/m^3]

위의 식 (2), (3)과 식 (4)를 식 (1)에 대입하고, $Adxdt$로 나누어서 간단히 정리하면 다음과 같은 일차원 열전도 방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + Q = \rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{5}$$

정상상태에서는 시간에 관한 미분은 0이 되어 식 (6)과 같이 타나낼 수 있다.

$$\frac{d}{dx}\left(k_{xx}\frac{dT}{dx}\right)+Q=0 \tag{6}$$

이 때, 2차원 열전도 현상을 고려하면 1차원의 경우와 유사하게 정상상태에 대해서 절대좌표 x와 y방향에 일치하는 물성치를 볼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+Q=0 \tag{7}$$

여기서 재료를 등방성 재질로 고려하면 열전도율은 $k_{xx}=k_{yy}=k$(정수)라 할 수 있고 식 (7)은 다음의 식과 같이 표현이 가능하다.

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+Q=0 \tag{8}$$

만약, 대기와 접하고 있는 전도체에서 열전달이 발생한다면 그 대기는 내부 온도와 압력차에 의해 대기 중에서 발생되는 자연대류에 의한 유동이 발생할 것이며, 이때의 대류열손실에 대한 열전도 기본 미분 방정식을 유도하기 위하여 식 (1)의 에너지 보존 방정식을 이용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$q_x A dt + QAdxdt = c(\rho A dx)dT + q_{x+dx}Adt + q_h Pdxdt \tag{9}$$

여기서, P는 일정 단면의 면적 A를 둘러싸는 주변길이를 나타낸다.

식 (9)의 모든 항들을 대류 열전달에 의한 열유동을 제외하고 정리하면 다음의 (10)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_h = h(T - T_\infty) \tag{10}$$

여기서, h : 열전달계수 [kw/(m^2 · ℃)]

T : 고체와 기체의 접촉면에서의 고체 표면온도

T_∞ : 대기온도 (자유유동 대기온도)

2.1.2 변분법을 이용한 유한요소 정식화

앞 절에서 언급한 식으로 부터 결정되어지는 온도분포는 물체 안으로 혹은 밖으로 이동하는 열의 양과 물체 내부의 응력들에 영향을 미치고, 그 열응력을 측정하기 위하여 물체 내부의 온도분포를 알아야 하며[7], 유한요소법을 이용한 해석은 물체 내부의 온도분포와 열응력을 예측하는데 아주 유용한 방법 중의 하나이다. 따라서, 유한요소 해석을 위해 각 요소마다 부여되어야 하는 경계조건의 설정은 변분법을 이용하여 2차원 열전달 방정식을 정식화 하여보면, 위의 (7)식과 (10)식을 범함수의 최소화에 의해 다음과 같이 유도하였다.

$$\pi_h = U + \Omega_Q + \Omega_q + \Omega_h \tag{11}$$

여기서, $U = \frac{1}{2}\iiint_V \int \left[k_{xx}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + k_{yy}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2\right] dV$

$$\Omega_Q = -\iiint_V \int QTdV\ , \quad \Omega_q = -\int_{S_2}\int q^* TdS$$

$$\Omega_h = \frac{1}{2}\int_{S_3}\int h\,(T - T_\infty)^2 dS$$

S_2와 S_3는 각각 열유속 q^*와 대류손실 $h(T-T_\infty)$이 발생하는 면적들이다. q^*와 h는 같은 표면 위에서 동시에 발생하는 것이 아니므로 같은 표면 위에 명시할 수 없다. Fig. 1 은 평판 해석을 위해 평판을 삼각형 요소로 분할하여 해석을 실시하는데 있어 삼각형 요소의 한 부분을 표현한 것이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 삼각형 요소는 i, j, m과 같은 절점을 가지는데 그 형상이 불규칙적이기 때문에 물체의 경계에 가장 가깝게 표현될 수 있다. 각 절점은 2개의 자유도, 즉 x와 y방향의 변위를 가진다. 여기서 u_i와 v_i를 각각 절점 i에서의 x와 y방향의 변위 성분으로 한다.

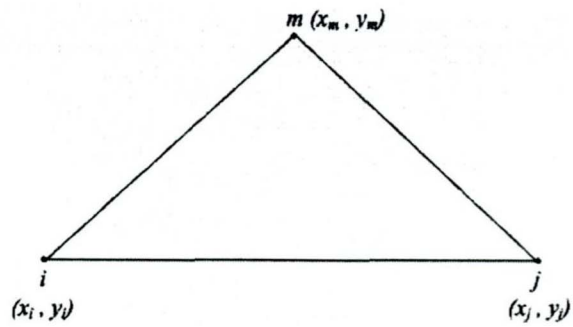

Fig. 1 Triangular element of 3-node at two-dimension

이를 바탕으로 하여 온도함수를 행렬식으로 정의하면 다음과 같이 주어진다.

$$\{T\} = [N_i \ N_j \ N_m]\begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_m \end{Bmatrix} \tag{12}$$

여기서, t_i, t_j, t_m은 각각 i, j, m절점에서의 온도이고, 형상함수$[N]$은 다음과 같이 각각 식 (13) ~ (15)로 나타낼 수 있다.

$$N_i = \frac{1}{2A}(\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y) \tag{13}$$

$$N_j = \frac{1}{2A}(\alpha_j + \beta_j x + \gamma_j y) \tag{14}$$

$$N_m = \frac{1}{2A}(\alpha_m + \beta_m x + \gamma_m y) \tag{15}$$

여기서, $\alpha_i = x_j y_m - y_j x_m$ $\alpha_j = y_i x_m - x_i y_m$ $\alpha_m = x_i y_j - y_i x_j$

$\beta_i = y_i - y_m$ $\beta_j = y_m - y_i$ $\beta_m = y_i - y_j$

$\gamma_i = x_m - x_j$ $\gamma_j = x_i - x_m$ $\gamma_m = x_j - x_i$

온도변화에 의한 온도기울기 $\{g\}$는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있고,

$$\{g\} = [B]\{t\} \tag{16}$$

여기서, $[B] = \frac{1}{2A}\begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix}$ 이다.

따라서, 열유속과 온도기울기 관계는 다음의 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -[D]\{g\} \tag{17}$$

여기서, 물성행렬 $[D] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 \\ 0 & k_{yy} \end{bmatrix}$ 이다.

열전달 현상의 해석을 위한 요소의 전도행렬을 바탕으로 요소의 강성행렬을 표현하면 식 (18)과 같이 표현된다.

$$[k] = \iiint_V [B]^T[D][B]dV + \int_{S_3}\int h[N]^T[N]dS \tag{18}$$

만일, 요소 안에서 두께가 일정하다면 식 (18)의 모든 적분 항이 상수가 되어 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[k_c] \iiint_V [B]^T[D][B]dV = tA[B]^T[D][B] \tag{19}$$

$$[k_h] = \int_{S_3}\int h[N]^T[N]dS \tag{20}$$

여기서, 식 (19)는 전체좌표계에 대한 강성행렬식 (18)에서 순수 전도에 의한 부분이고, 식 (20)은 대류에 의한 부분을 의미한다. 따라서, 식 (20)의 행렬을 곱하여 대류가 있는 삼각 요소의 절점 i와 j사이의 면을 고려하면 요소의 세 부분에서 물체에 의해 발생되는 열이 절점에서 생성된 것으로 나타낼 수 있으며 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\{f_q\} = \int_{S_2}\int q^*[N]^T dS = \int_{S_2}\int q^* \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_m \end{Bmatrix} dS \tag{21}$$

위의 식 (21)을 요소의 $i-j$, $j-m$, $m-i$면으로 각각 세분화 하여 정리하면, 각 면에서의 하중행렬은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{q^* L_{i-j} t}{2}\begin{Bmatrix}1\\1\\0\end{Bmatrix} \quad \text{on side } i-j \tag{22}$$

$$\frac{q^* L_{j-m} t}{2}\begin{Bmatrix}0\\1\\1\end{Bmatrix} \quad \text{on side } j-m \tag{23}$$

$$\frac{q^* L_{m-i} t}{2}\begin{Bmatrix}1\\0\\1\end{Bmatrix} \quad \text{on side } m-i \tag{24}$$

여기서, L_{i-j}, L_{j-m}, L_{m-i}는 요소의 측면의 길이이고, q^*는 각각의 면에서 일정하다고 가정하고 hT_∞로 대치하면 식 (21)과 유사한 계산이 가능하다.

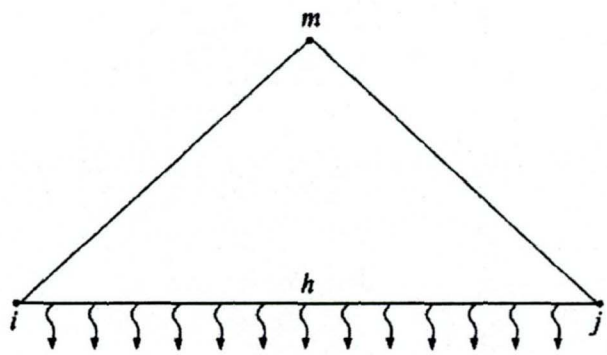

Fig. 2 Convection heat loss in the $i-j$ surface

전체좌표계에 대한 방정식을 얻기 위한 요소 방정식들의 조합과 경계조건을 위하여 두 요소사이의 공통 절점의 온도가 같다는 필요조건을 기초로 두고 있다. 절점온도 경계조건을 만족시키는 전체좌표계에 대한 절점온도를 계산하고, 식 (16)으로 부터 요소내의 온도기울기, 식 (2)로 부터 열유속을 계산한다.

2.2 유한요소법에 의한 금형 변형 및 응력해석

2.2.1 변형률과 변위와의 관계

변형률(strain)과 변위(displacement)와의 관계를 요약하면, 어느 한 점에서의 변형률은 응력변형의 요인에 의하여 설명할 수 있고, 텐서(tensor)형으로 x, y, z 축에서의 전단변형률을 표현하면 ε_{xy}, ε_{yz}, ε_{xz}로 가능하며 공학적인 측면에서는 γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{xz}로 표현이 가능하다. 미소 변위의 가정에 따르면, 수직변형률과 전단변형률은 다음과 같은 변형방정식에 의해 정리된다[8].

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \varepsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \tag{20}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \varepsilon_{yz} = \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \tag{21}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \qquad \varepsilon_{xz} = \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \tag{22}$$

또한, 대칭적 변형률 텐서 ε은 수직변형률과 전단변형률로 구성되어 있다.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \tag{23}$$

2.2.2 응력과 변형률과의 관계

금형 내에서의 응력은 x, y, z방향에 대한 수직응력 σ_x, σ_y, σ_z와 전단응력 τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{xz}로 구성되어 있는 대칭응력 텐서를 이용하여 설명할 수 있고, 식 (24)와 같이 정리할 수 있으며, 선형조건 하에서의 응력과 변형률과의 관계는 식 (25)와 같이 요약할 수 있다.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \tag{24}$$

$$\sigma = D\,\varepsilon \tag{25}$$

여기서, D는 6×6 탄성행렬이고, 응력과 변형률의 구성요소는 각각 6개의 응력과 변형률 요소를 가지는 벡터형태로 식 (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \qquad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \tag{26}$$

탄성행렬 D와 단위행렬 혹은 탄성행렬 D의 역행렬 D^{-1}은 등방성 재질(isotropic material) 혹은 이방성 재질(anisotropic material)에 따라 각기 다르게 정의되고, 등방성 재질에 있어서 탄성행렬 D와 역행렬 D^{-1}은 각각 식 (27)과 (28)로 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{E}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1-v & v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & 1-v & v & 0 & 0 & 0 \\ v & v & 1-v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2v}{2} \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$D^{-1} = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -v & -v & 0 & 0 & 0 \\ -v & 1 & -v & 0 & 0 & 0 \\ -v & -v & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+v) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+v) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+v) \end{bmatrix} \tag{27}$$

여기서, E는 탄성계수(modulus of elasticity) 혹은 Young's Modulus, v는 포아송비(possion's ratio)이다.

2.2.3 금형 내에서의 열변형률

금형 내에서 발생하는 열변형률은 연속체의 비정상 열전도 문제, 즉 시간에 따라 변화하는 온도분포에 의하여 결정되어 지므로, 온도변화에 따른 열변형률을 정의하면 식 (28)과 같이 정리할 수 있다.

$$\varepsilon_{th} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_x \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}_{th} = \vec{\alpha}\,(T - T_{ref}) \tag{28}$$

여기서, T : 측정부의 온도(present temperature)

T_{ref} : 자유응력 참고 온도(Stress-free reference temperature)

ε_{th}: 열변형률(thermal strain), $\vec{\alpha}$: 열팽창벡터(thermal expansion vector)

또한, 식 (28)에서 제시된 열팽창 벡터 $\vec{\alpha}$는 금형 해석 모델이 등방성 재질(isotropic material)인 경우 $\overrightarrow{\alpha_{is}}$와 직교이방성 재질(orthotropic material)인 경우

$\overrightarrow{\alpha_{or}}$에 따라 식 (29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overrightarrow{\alpha_{is}} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \overrightarrow{\alpha_{or}} = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{29}$$

2.2.4 금형 내에서의 초기 응력과 변형률

금형에 하중, 변위, 또는 변형이 가해지기 전의 초기 응력과 변형률은 식 (30)과 식 (31)을 이용하여 해석하였다.

$$\sigma_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x0} \\ \sigma_{y0} \\ \sigma_{z0} \\ \tau_{xy0} \\ \tau_{yz0} \\ \tau_{xz0} \end{bmatrix} \tag{30}$$

$$\varepsilon_0 = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \\ 2\varepsilon_{xy0} \\ 2\varepsilon_{yz0} \\ 2\varepsilon_{xz0} \end{bmatrix} \tag{31}$$

따라서, 본 연구에서는 위의 이론식들을 바탕으로 금형의 열응력 해석을 실시하였다.

제 3 장 수치해석 방법 및 결과 해석

3.1 수치해석 방법

본 연구에서는 Tire mold용 알루미늄 합금 금형의 열변형을 예측하고 금형의 정밀도를 향상시키기 위한 연구 방법으로 유한요소법을 이용한 Multiphysics 상용코드를 사용하여 금형의 온도분포, 변위 그리고 응력분포를 조사해 보았다. 본 연구에서 사용된 Tire mold용 알루미늄 합금 AC7A는 알루미늄 5000계열 합금으로 알루미늄(Al)이 약 94.2~96.8%, 마그네슘(Mg)이 약 3~4%가 함유되어 있으며, 세부적인 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Thermophysical properties of Aluminum alloy

Properties	Unit	Value
Solidus Temperature	℃	590
Liquidus Temperature	℃	640
Thermal Conductivity	W/m · K	140
Young's modulus	Gpa	70
Poisson's ratio	-	0.33
Density	kg/m³	2670
Specific Heat	kJ/kg · K	0.88
Thermal Expansion Coefficient	-	23.6×10^{-6}

Fig. 3과 4는 금형 내부의 열변형 해석을 위해 금형 주조장치의 형상을 모델링한 후 Mesh를 한 것으로써, Fig. 3은 알루미늄 합금이 주입되는 방향을 정면도라 하였을 때 Tire mold의 중앙부를 2차원 단면 형상화한 것이고, Fig. 4는 금형을 좌측에서 바라보았을 때 Tire mold의 중앙부를 2차원 단면 형상화 시킨 것이다. Fig. 3과 4에서 보는 바와 같이, 해석 모델은 알루미늄 합금과 석고, 그리고 금형 주조장치(SUS)로 크게 구성으로 되어 있으며 약 680℃에서 과가열에 의해 용융된 알루미늄 합금을 금형주조장치 내부에 주입하고 최초 680℃에서 냉각이 시작된 이후 완전응고 될 때까지 금형주조기와 석고를 통하여 이루어지는 열전달 현상을 알아보았다.

본 연구에서 궁극적으로 해석하고자 하는 것은 알루미늄 합금이 냉각되는 과정에서 자동차 타이어의 트레드(Tread) 부분을 결정짓는 석고와 근접해 있는 알루미늄 합금 부분의 온도변화 결과와 그로 인해 발생되는 열변형을 예측하는 것이기 때문에 석고와 맞닿아 있는 금형 부분을 중점적으로 해석해 보았다.

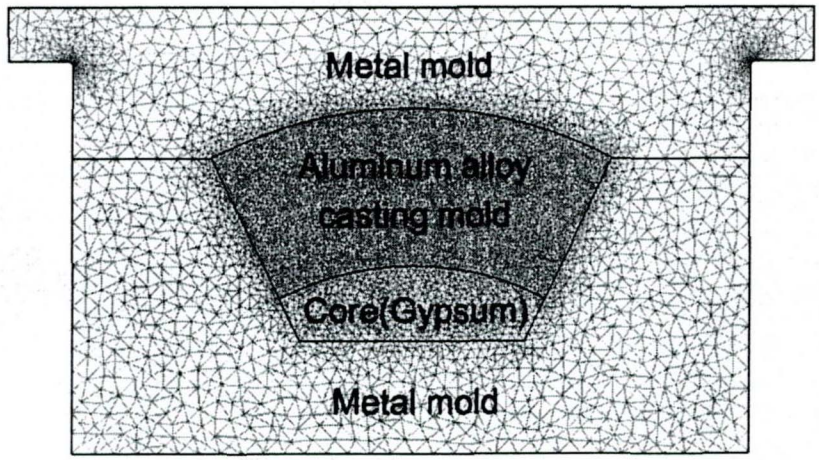

Fig. 3 Schematic diagram of a structure in analysis model (Front view)

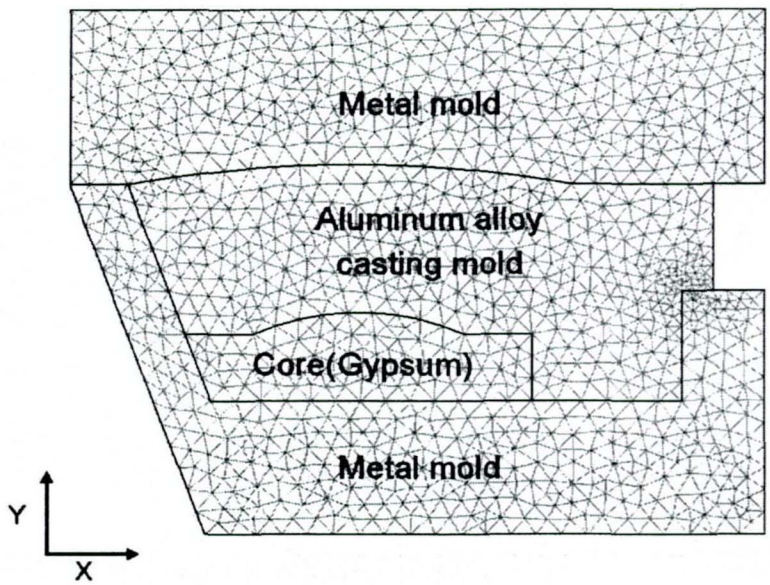

Fig. 4 Schematic diagram of a structure in analysis model (Side view)

3.2 알루미늄 합금의 온도분포 해석결과

본 연구에서는 알루미늄 합금 금형의 제작과정에서 금형이 냉각되는 동안 금형 내부에 발생하는 온도분포를 조사해 보았다. 본 연구에서 사용한 AC7A의 물성치를 고려하여 금형의 냉각 초기 온도를 953K(680℃)로 설정하였고, 금형주조장치의 온도는 초기 523K(250℃)의 온도를 유지한 상태에서 용융된 알루미늄 합금을 주입하는 것으로 하였다. 온도분포 해석을 위한 경계조건은 알루미늄 합금과 금형주조장치 내부 그리고 석고가 맞닿아 있는 부분에서의 열전달을 고려하였고, 금형주조장치의 외부 표면과 알루미늄 합금이 주입되는 용탕주입구 부분에서는 자연대류에 의해 냉각이 이루어지는 것을 고려하여 해석하였다. 특히, Tire mold용 알루미늄 합금이 냉각되는 과정에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있는 트레드 부분의 온도분포 결과는 Fig. 3과 4에서 제시한 해석모델을 이용하여 해석을 수행하였으며, Fig. 5와 6은 냉각 초기(T = 0sec)의 금형 내부의 각 구성요소의 온도와 온도측정 위치에 대해 정면과 측면으로 나누어 각각 보여주고 있다.

Tire mold용 금형을 제작함에 있어 트레드 부분은 고 정밀도를 요구하게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 트레드 부분에서 형성되는 온도분포를 측정한 후, 온도분포 결과를 토대로 측정 지점의 변위와 응력분포를 예측하고자 하였다. Tire mold용 AC7A 알루미늄 합금의 액상 온도는 약 913K(640℃)이며 용융된 AC7A를 금형주조장치에 주입하는 과정에서 알루미늄 합금이 주입되기 전 응고되어 제품의 정밀도를 저하시키는 것을 방지하기 위하여 953K(680℃)까지 과가열시켜 용융된 AC7A 알루미늄 합금을 주입하도록 하였다. Fig. 7 ~ 12는 각각 Fig. 5와 6에서 제시한 지점(Point 1 ~ 6)에서 용융된 AC7A 알루미늄 합금의 주입이 시작된 이후 냉각이 진행되어 시간이 지남에 따라 금형 내부에서 발생하는 온도변화 결과를 가시화하여 나타낸 것이다.

또한, Fig. 13 ~ 16의 그래프는 Fig. 7 ~ 12에서 나타낸 가시화 결과를 그래프로 정리하여 보여주고 있다.

Fig. 13은 해석모델로 제시한 Fig. 5의 각 지점별 (Point 1 ~ 3) 온도측정 결과를 그래프로 나타낸 것으로써, 용융된 AC7A의 주입 초기 온도인 953K(680℃)에서 냉각이 진행되는 과정을 보여주고 있으며, 주입 시작(0sec)에서 냉각이 진행되는 약 15분 동안 극심한 온도 변화를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한, 초기온도 953K(680℃)에서 냉각이 진행되는 15분까지의 냉각되는 과정을 세부적으로 확인해 보기 Fig. 14와 같이 그래프로 나타내어 보았다.

Fig. 14에서 보는 바와 같이 중앙부 2번 지점의 냉각 곡선이 1, 3번 지점의 냉각 곡선보다 완만한 것을 알 수 있다. 이는 1, 3번 지점은 금형주조장치의 내부 벽면과 가깝게 위치하고 있어 금형주조장치와 AC7A 알루미늄 합금의 열전도율을 고려할 때 두 물체 사이에 열전달 현상이 급격하게 이루어지고 있는 반면, 2번 지점은 금형주조장치와 맞닿아 있는 부분이 없고 석고의 열전도율 또한 AC7A 알루미늄 합금과는 달리 극히 낮기 때문에 다른 1, 3번 지점보다 완만한 냉각 곡선을 나타내고 있다. 또한 알루미늄 합금이 완전히 응고되는 온도 863K(590℃)에서의 온도분포 차를 살펴보면, 1번 지점과 3번 지점은 약 100초 후에 응고가 되고 2번 지점은 약 130초 후에 응고가 되며 1, 2, 3번 지점 모두 응고가 되는 130초의 온도분포는 약 50℃의 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이에 시간이 지남에 따라 열평형이 이루어져 각 지점의 온도분포는 약 15min이 지나면 그 차이는 약 10℃이하로 줄어든다. 결국, 냉각이 진행되고 있는 영역별로 온도차가 심할 경우 알루미늄 합금 금형 표면의 함몰이나 돌출이 발생할 수 있고, 금형의 정밀도에 상당한 영향을 미칠 수 있게 된다.

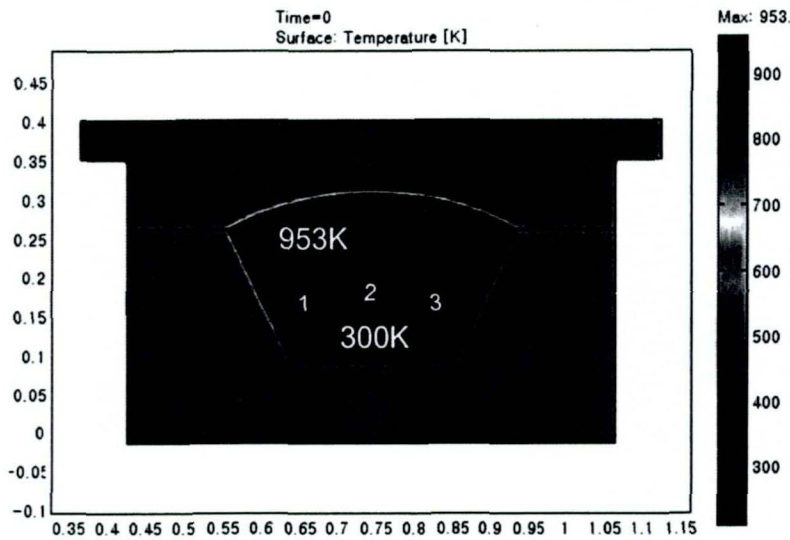

Fig. 5 Schematic diagram of measurement points & visualization of temperature at the cooling time, [T = 0 sec] in analysis model (Front view)

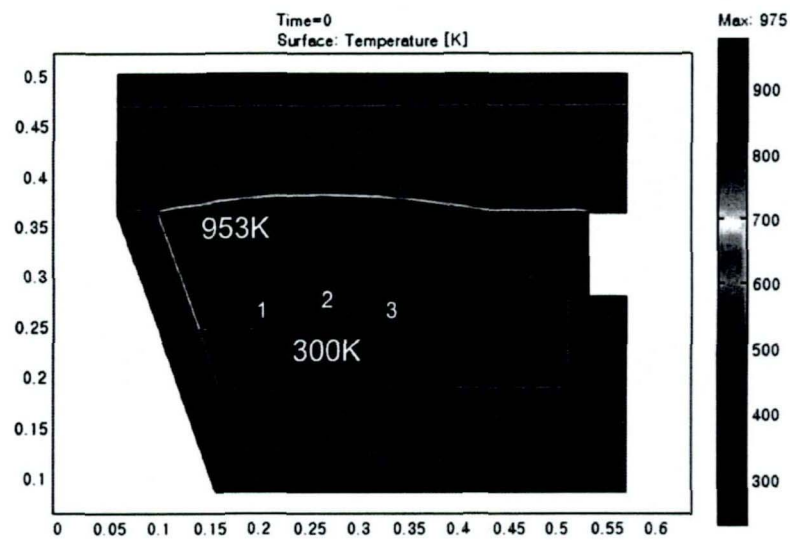

Fig. 6 Schematic diagram of measurement points & visualization of temperature at the cooling time, [T = 0sec] in analysis model (Side view)

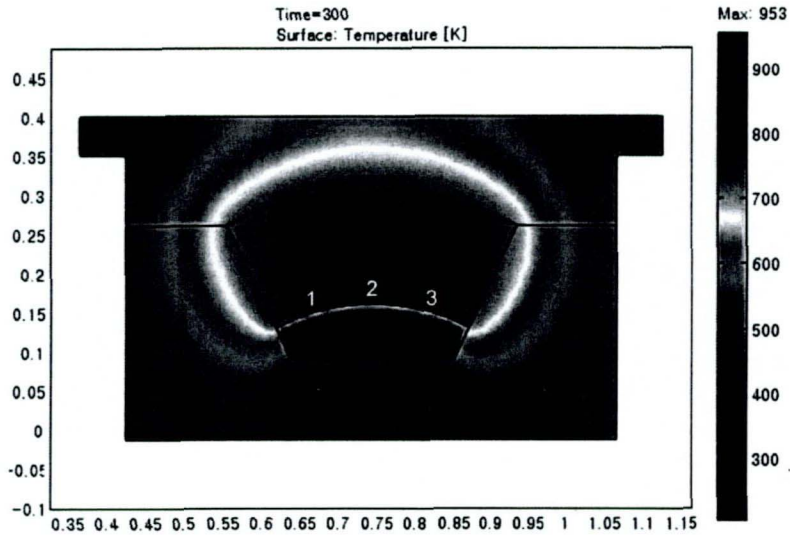

Fig. 7 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 300 sec] by measurement points (Front view)

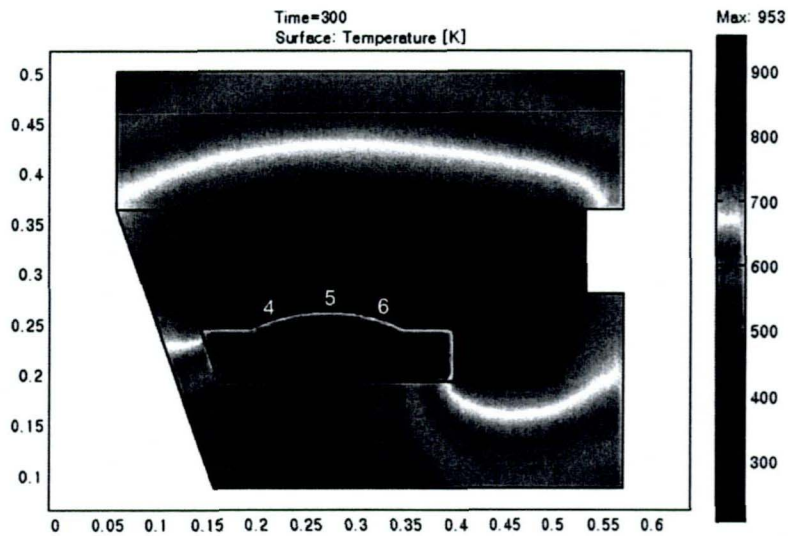

Fig. 8 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 300 sec] by measurement points (Side view)

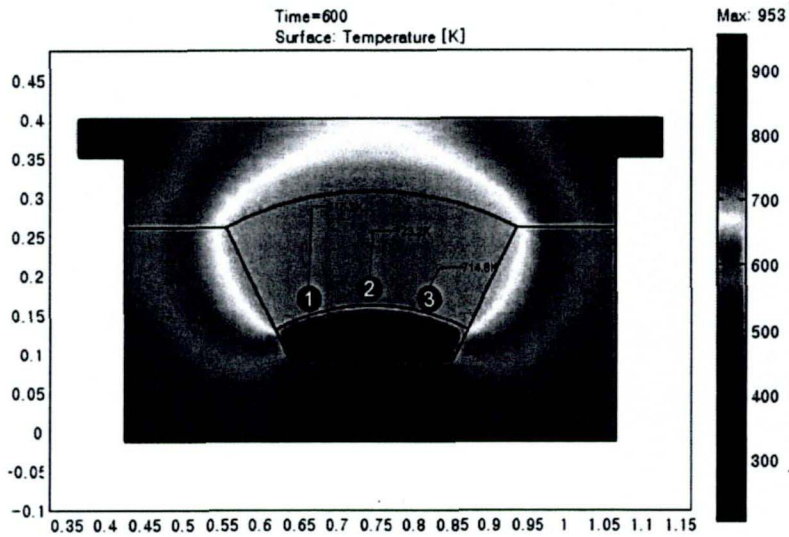

Fig. 9 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 600 sec] by measurement points (Front view)

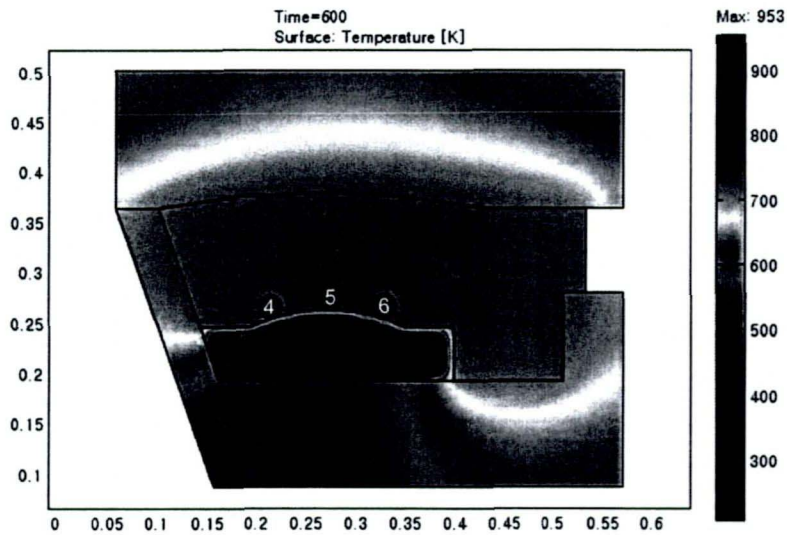

Fig. 10 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 600 sec] by measurement points (Side view)

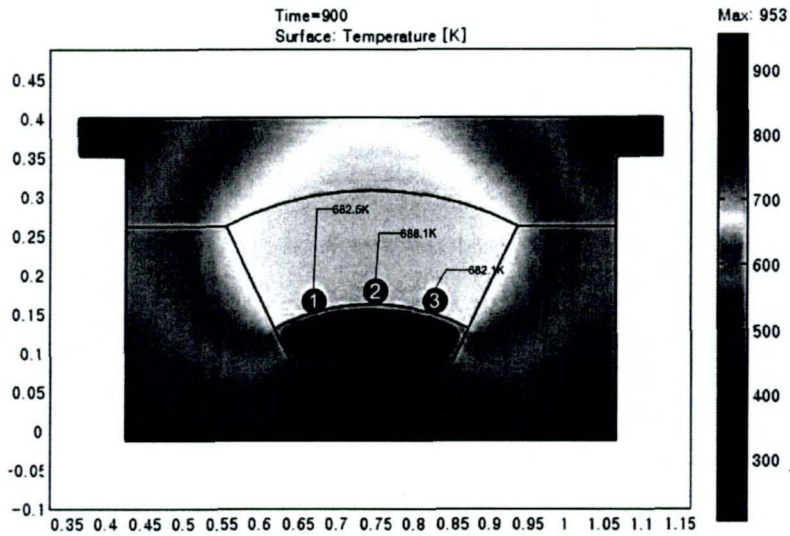

Fig. 11 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 900 sec] by measurement points (Front view)

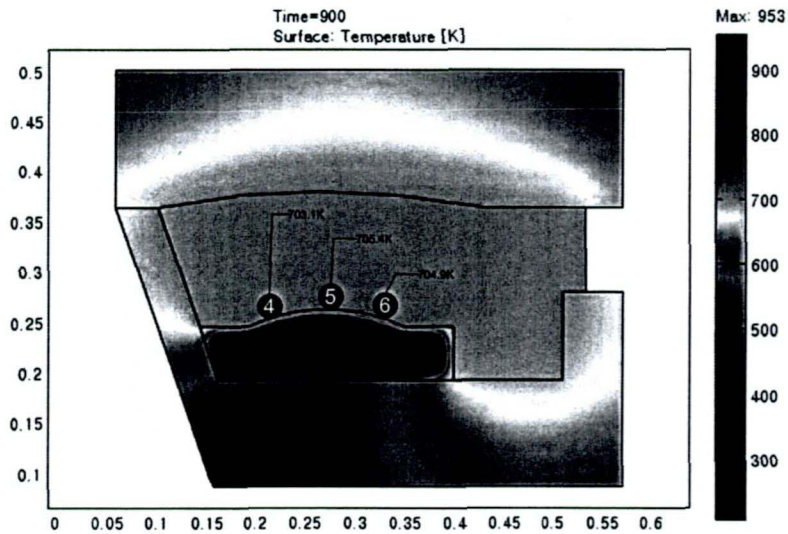

Fig. 12 Visualization of temperature distributions at cooling time, [T = 900 sec] by measurement points (Side view)

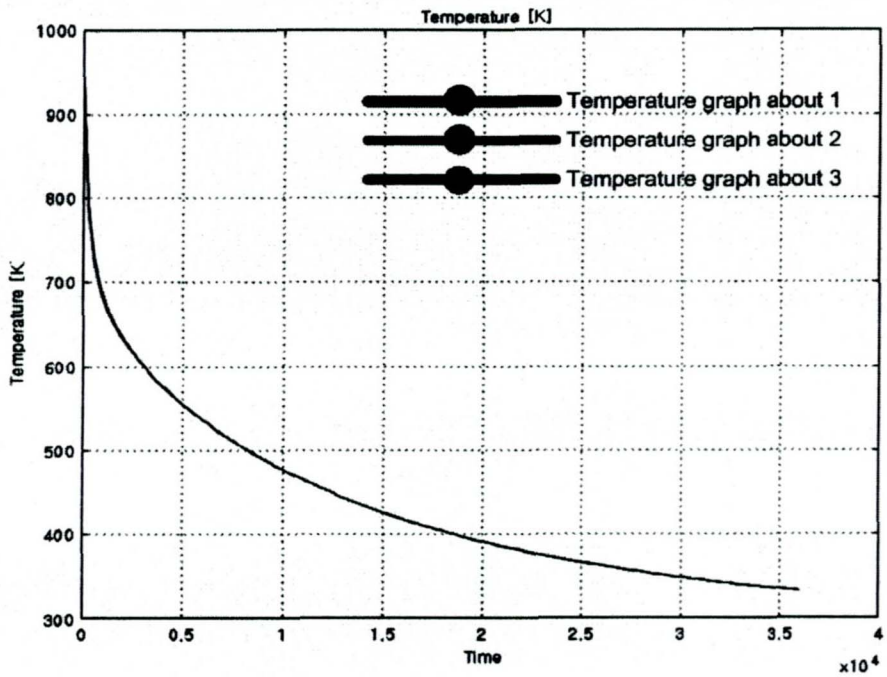

Fig. 13 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Front view)

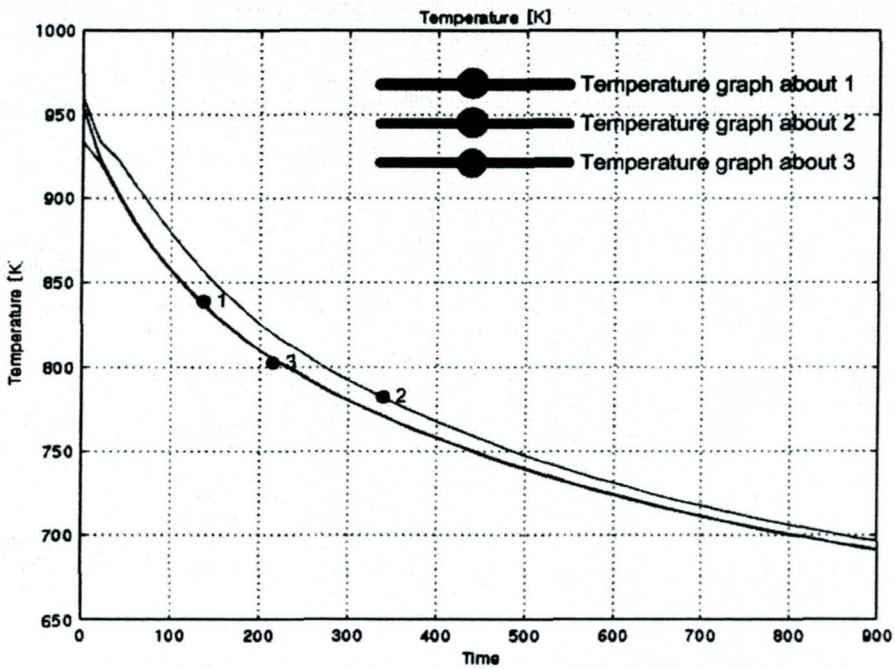

Fig. 14 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Front view)

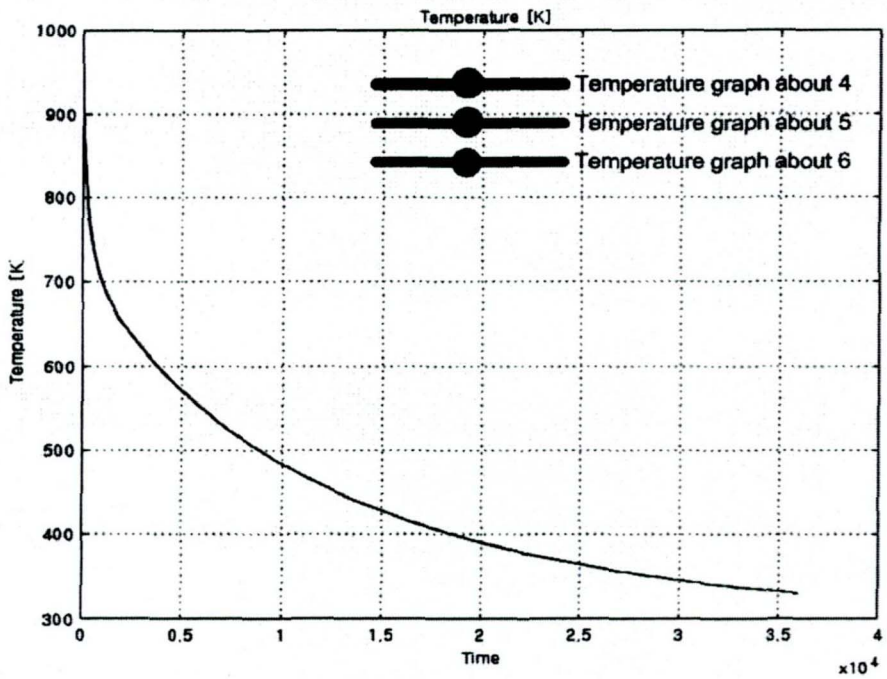

Fig. 15 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Side view)

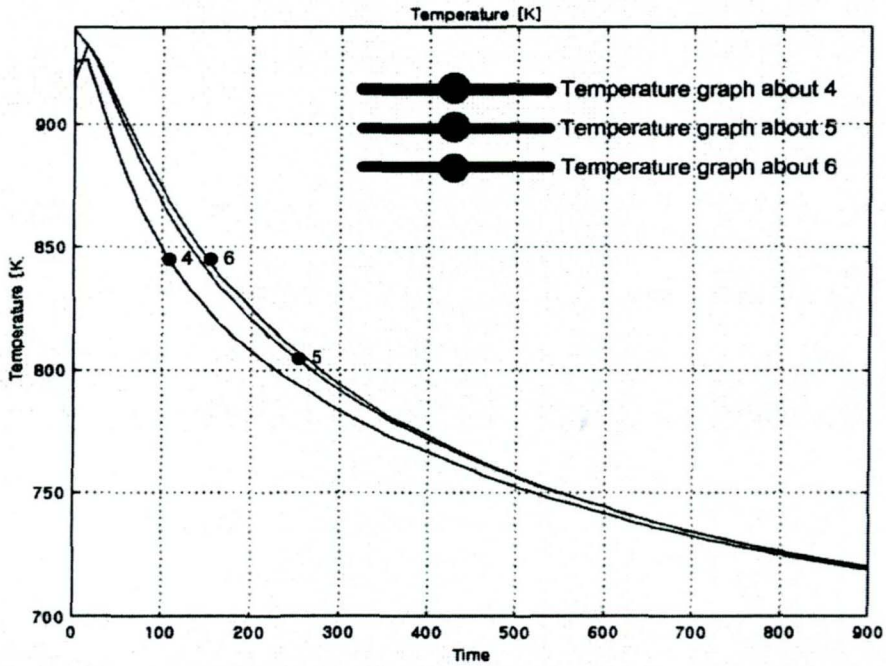

Fig. 16 Result of temperature variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Side view)

3.3 알루미늄 합금의 변위분포 해석결과

본 연구에서 Tire mold 용 알루미늄 합금의 변위 해석은 AC7A의 물리적 특성을 도출하여 해석하였으며, 탄성 및 소성영역에서 전 변형율 증분을 이용하였다. 하중조건은 냉각과정 동안의 시간에 따라 온도분포 이력을 적용하였으며, 경계조건은 금형주조기의 좌측면의 하단부분과 우측면의 하단부분을 구속하여 실시하였다. 금형 내부의 변위 해석을 위한 측정 지점은 알루미늄 합금 몰드에서 가장 중요하다고 판단되는 트레드 부분에서의 온도분포 측정 지점과 동일한 지점을 선정하여 해석하였다. 앞 절의 온도분포 결과를 보면 초기 냉각 시점부터 약 15분 동안 온도분포의 변화를 나타내는 곡선의 기울기가 크게 나타났고 이러한 온도변화 결과는 Tire mold용 알루미늄 합금의 변위 발생에 큰 영향을 미치는 것을 Fig. 17 ~ 22의 변위 해석 결과에서 확인할 수 있다.

Fig. 17 ~ 19는 Fig. 5의 해석모델에서 제시한 1, 2, 3 지점에서 금형의 냉각이 시작된 이후 시간에 따른 변위 분포 결과를 나타내고 있다. Fig. 17은 금형의 냉각이 시작된 이후 약 10시간동안의 변위 해석 결과를 그래프로 도시한 것으로, 금형이 냉각되기 시작되면서 변위는 약 15분 이전까지 급격한 증가 추세를 보이고 있고, 약 20 ~ 25분 정도에서 최대 변위를 형성하게 되고 이후, 점차 감소하는 형태의 결과를 나타내게 된다.

Fig. 18은 금형의 냉각이 시작된 이후 1시간 동안의 변위 해석 결과를 보여주고 있는 것으로, Fig. 17의 변위 해석 결과를 좀 더 구체적으로 확인해 보기 위해 제시한 것이다. Fig. 18에서 보는 바와 같이 1번 지점과 3번 지점은 1500초일 때 변위 값이 최대를 나타냈으며 2번 지점은 1200초일 때 최대를 이루고 있다.

Fig. 19는 금형이 냉각되기 시작하여 변위 값이 최대에 이르기 전인 약 15분까지의 변위 해석 결과를 그래프로 도시한 것으로, 변위의 크기는 1, 3번 지점보다 2번 지점에서 큰 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

결국 Fig. 17 ~ 19의 정면도에서 금형 내부의 변위 해석 결과를 종합해 보면, 알루미늄 합금 내부에서의 변위 분포는 각각의 측정 지점에서 열평형이 이루어지고 있으며, 냉각이 진행되는 과정에서 냉각시간이 짧을수록 변형이 크게 일어난다는 결론을 내릴 수 있다.

Fig. 20 ~ 22는 Fig. 6의 해석모델에서 제시한 4, 5, 6 지점에서의 변위 해석 결과를 그래프로 도시한 것으로, Fig. 20의 측면도 해석 결과는 Fig. 17의 정면도에서 해석한 그래프 결과와 유사한 형태로 변위가 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 21과 22에서 보는 바와 같이, 측정 지점 4번의 변위 값이 가장 낮게 나타났고 상대적으로 5번과 6번 지점에서의 변위 값이 비교적 크게 나타났다. 냉각속도가 5번과 6번 지점에 비해 빠른 4번 지점에서 변위 값이 상대적으로 작게 나타난 이유는 Fig. 6의 해석모델에서 확인할 수 있듯이 4번 지점은 금형주조장치의 좌측면이 밀폐되어 있어 용탕 주입구 쪽인 5, 6번 지점으로 알루미늄 합금의 변형이 이루어져 변위 분포 결과가 언급한 바와 같이 나타난 것으로 사료된다.

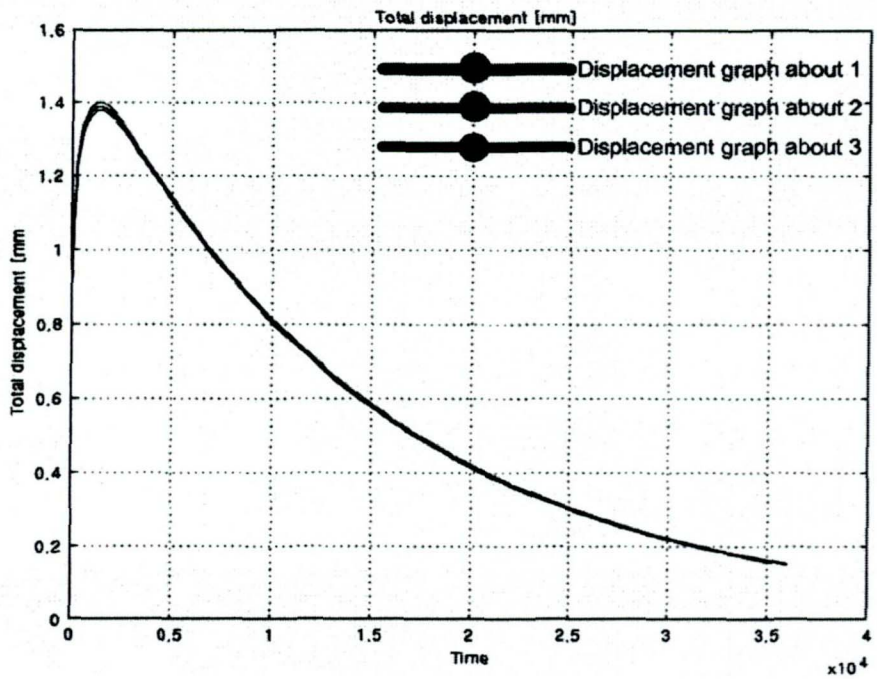

Fig. 17 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Front view)

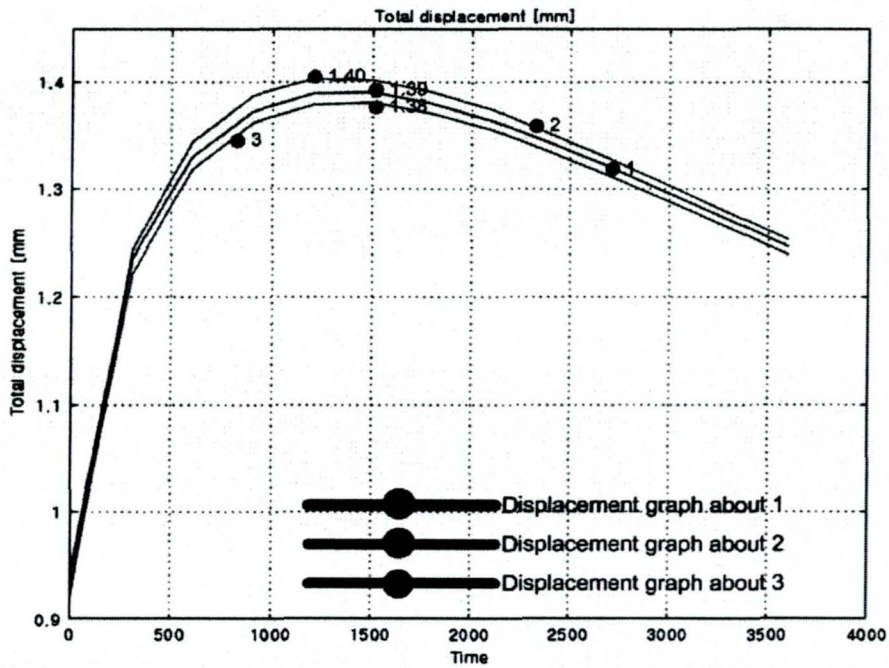

Fig. 18 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 1 hour] by measurement points (Front view)

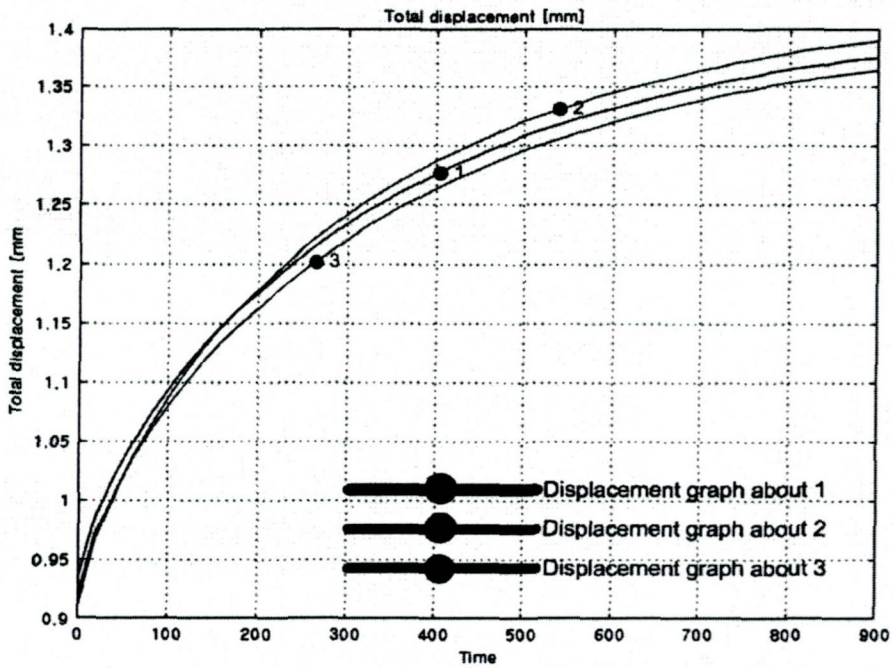

Fig. 19 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Front view)

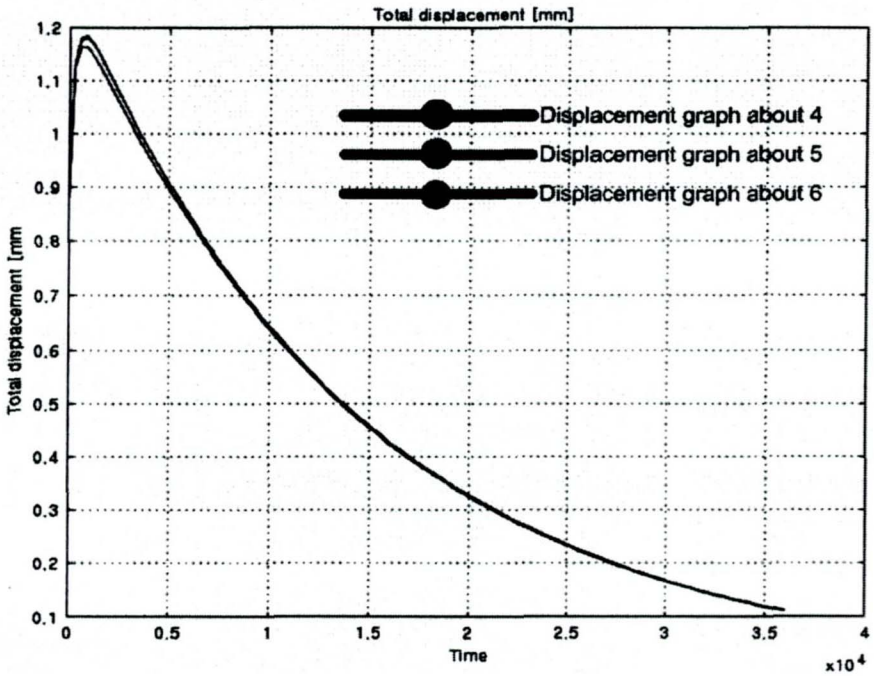

Fig. 20 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Side view)

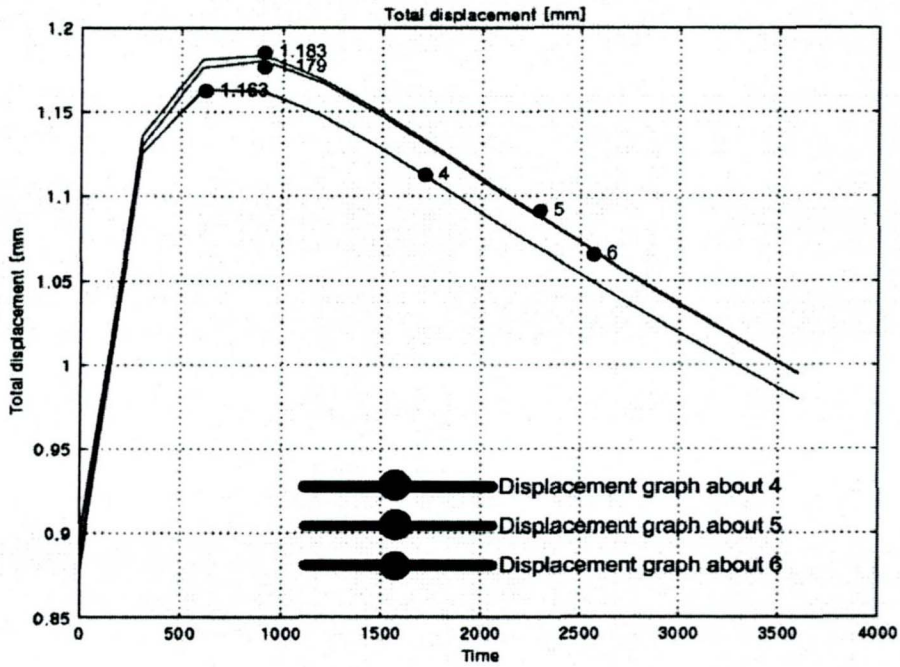

Fig. 21 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 1 hour] by measurement points (Side view)

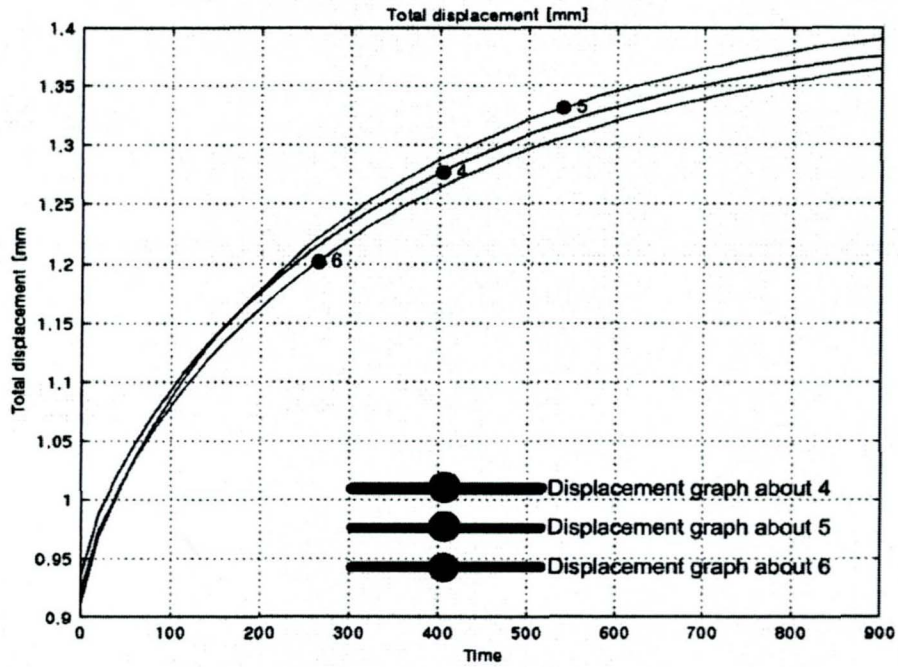

Fig. 22 Result of displacement variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Side view)

3.4 알루미늄 합금의 응력분포 해석결과

본 연구에서는 3.2절의 온도분포 결과를 기초로 하여 응력과 변위 그리고 변형률의 관계식에 의해 AC7A 알루미늄 합금 금형 내부의 응력분포 해석 결과를 도출하여 보았다. 일반적으로 열에 의해 형성되는 응력은 금속성 물질의 경우 균일하지 못한 온도분포로 인하여 수축과 변형이 일어나고 응력분포가 집중되는 현상이 발생하게 된다. 본 연구에서 해석하고자 하는 Tire mold용 알루미늄 합금 금형 내부에도 이러한 원인에 의해 응력은 형성될 것이고 보다 구체적으로 각 측정지점에서 어떠한 응력분포가 형성되는지 알아보고자 하였다.

Fig. 23은 알루미늄 합금의 냉각 초기부터 약 10시간 동안의 냉각과정에서 금형 내부에 발생하는 응력분포 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 23에서 볼 수 있듯이, 냉각이 시작된 지 약 15분 동안 응력분포 곡선은 급격하게 떨어지고 그 이후의 응력분포 곡선은 완만하게 진행이 이루어지고 있다. 금형의 온도분포 결과에서 나타났던 결과와 같이 금형의 냉각 초기부터 급격하게 냉각이 진행되는 약 15분 동안 응력분포 결과 또한 최대응력이 형성된 이후 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이후 금형 내부에 열평형이 진행되면서 각 지점의 온도분포가 균일해지기 시작하고 응력 또한 점차 감소하게 되어 일정시간이 지난 이후에는 각 지점에서 균일한 응력분포가 형성되는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 24는 냉각 초기부터 약 15분까지의 응력분포 결과를 측정 지점별로 확인해 보기 위해 도시한 그래프로써, 측정지점 1 ~ 3 까지의 응력 해석결과를 살펴보면 1, 3번의 응력값은 2번 지점의 응력값과 비교해 보았을 때 상대적으로 낮게 측정되었다. 이는 앞 절의 온도분포 및 변위분포 해석에서 제시한 결과와 유사한 결과가 나타났음을 확인할 수 있으며, 결국 Fig. 14의 온도분포 해석결과에서 보았던 바와 같이 냉각 초기부터 약 15분 동안 금형 내부의 냉각속도가

급격하게 이루어지면 Fig. 19의 변위분포 해석결과에서 언급한 바와 같이 금형 내부에는 수축과 변형이 발생이 되고 그로 인하여 응력 발생이 더욱 증가된다는 것을 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 25에서 보는 바와 같이 금형주조장치의 측면부에서 해석한 결과를 살펴보면, 금형 내부의 응력분포 결과는 Fig. 23과 비슷한 결과값을 나타내고 있으나 냉각 이후 약 15분 동안의 측면부에서의 응력분포 결과를 나타내는 Fig. 26의 그래프를 살펴보면 좌측의 4번 지점이 5번과 6번 지점에 비해 상대적으로 낮은 응력값을 갖고 6번 지점에서 가장 큰 응력값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 3.3절의 변위분포 해석 결과에서 언급한 바와 같이 4번 지점의 금형주조장치 좌측면이 밀폐되어 냉각으로 인한 변형이 용탕 주입구 쪽에서 많이 발생하기 때문에 응력 해석결과 또한 4번 지점의 응력값보다 6번 지점의 응력값이 상대적으로 더 크게 나타났다고 할 수 있다.

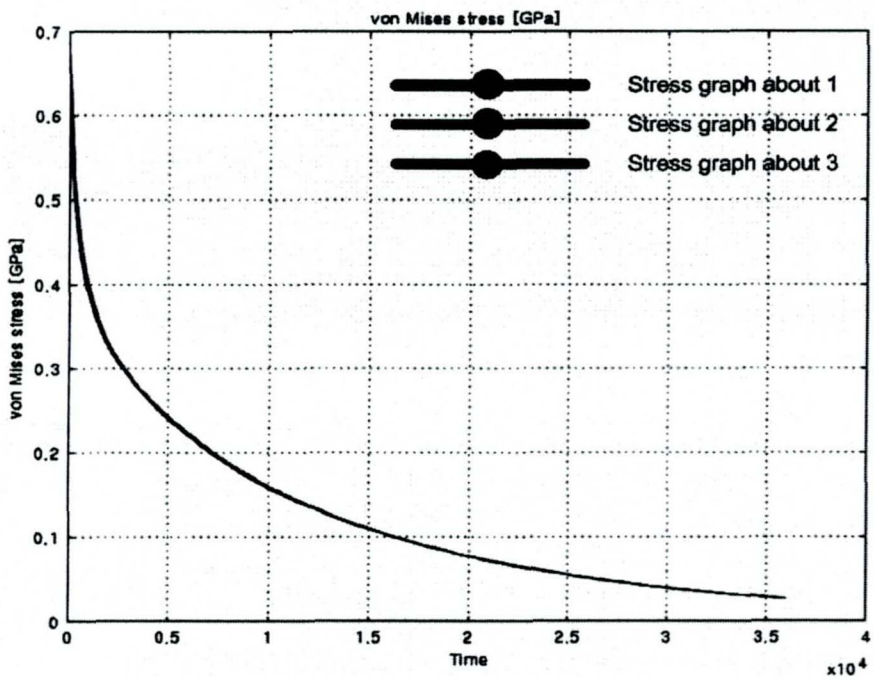

Fig. 23 Result of stress variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Front view)

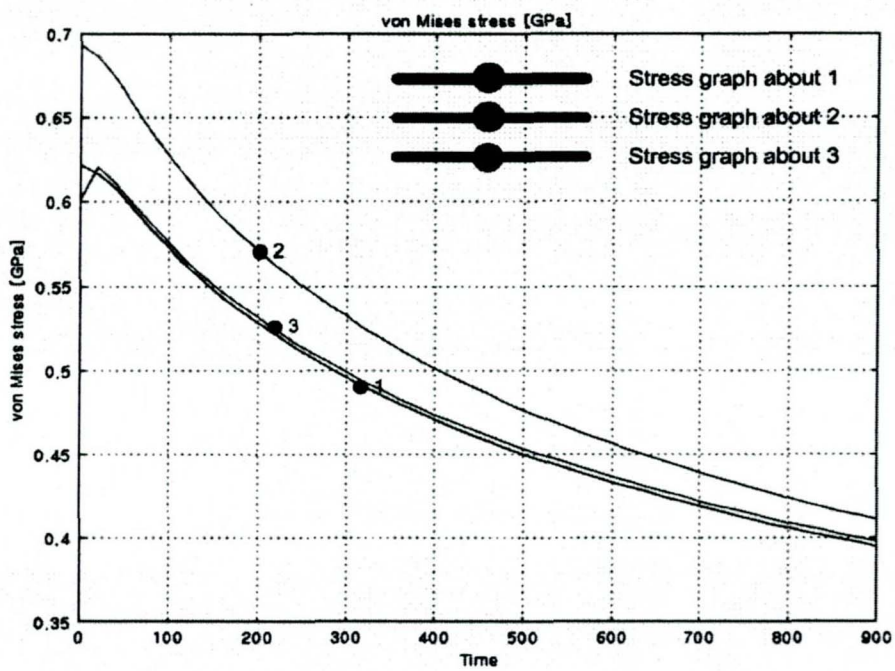

Fig. 24 Result of stress variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Front view)

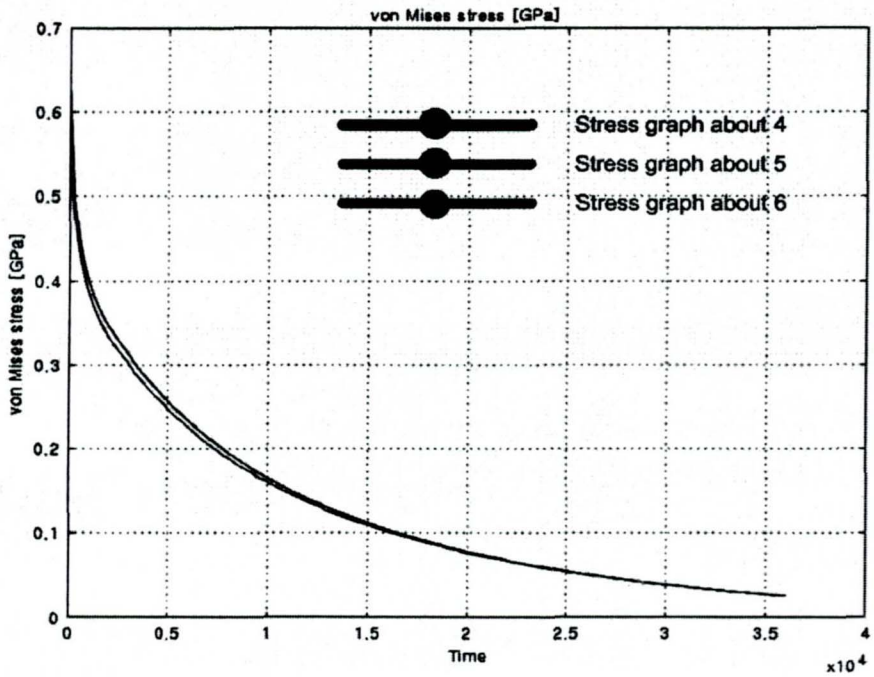

Fig. 25 Result of stress variations during the cooling time, [T = 10 hours] by measurement points (Side view)

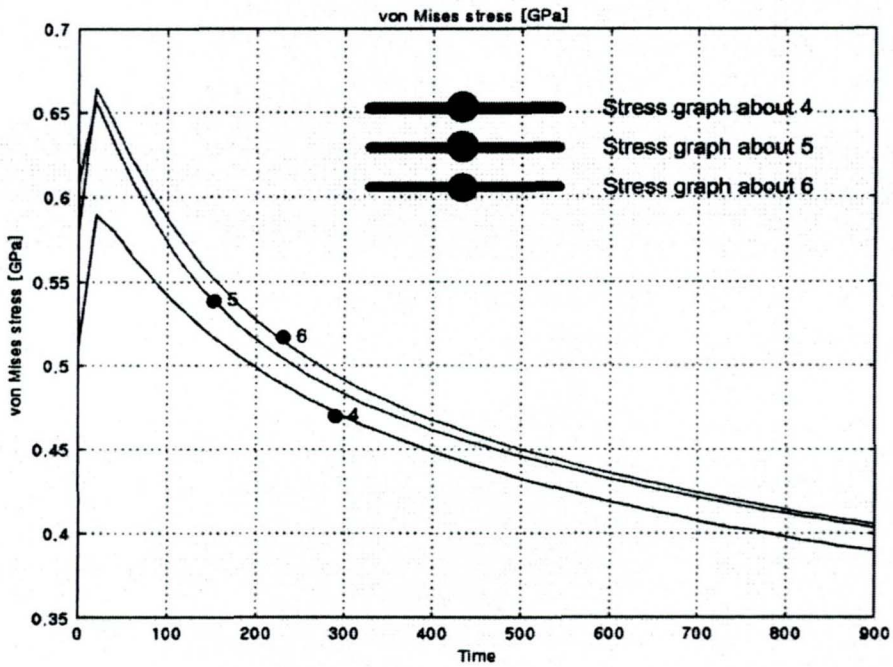

Fig. 26 Result of stress variations during the cooling time, [T = 15 minutes] by measurement points (Side view)

제 4 장 결 론

본 연구에서는 자동차용 타이어 생산에 필요한 AC7A 알루미늄 합금을 사용한 Tire mold를 제작함에 있어 금형 제품의 정밀도를 향상시키기 위한 연구방법의 하나로 유한요소법을 적용한 Multiphysics 상용코드를 사용하여 알루미늄 합금 금형 내부의 온도분포, 변위 및 응력분포에 대해 조사해 보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Tire mold용 알루미늄 합금은 AC7A 주조재를 용융, 용탕주입구를 통해 주입하여 금형의 냉각이 시작된 이후 약 15분 동안 급격한 온도변화를 가지며 금형의 트레드 부분에 있어서 측정지점 별 온도차는 약 50℃ 정도가 나타났고 15분 이후부터는 각 구성 물질간의 열평형 과정이 진행되어 점차적으로 균일한 온도분포를 가진다.

2) 주입된 AC7A 주조재는 금형 내부의 냉각 초기부터 약 15분 동안 금형 내부의 냉각속도가 급격하게 이루어지면서 변위가 급격하게 증가하게 되고 수축 및 변형을 수반함과 동시에 응력 발생을 더욱 증가시킨다.

3) 본 연구의 수치해석 결과, Tire mold용 알루미늄 합금 금형은 냉각과정에서 온도분포를 최대한 균일하게 하면 변형 및 응력을 감소시켜 금형 제품의 정밀도 향상에 기여할 수 있다고 본다.

참 고 문 헌

1. S.C. Oh, J.m Kim, "Analysis of Solidification pattern by Temperature Monitoring in Aluminum Alloy Casting", J. of KSAE, Vol 6, pp. 698-703, 1998.

2. 생산기술연구원 : 컴퓨터를 이용한 주조기술 지원 사례집

3. Cheon, B. W, "The Effect of the Metallic Mold Cooling System on the Solidification Structures and the Mechanical properties for Al alloy Casting", Dong-A University, 1994.

4. J.H. Perepezko, S.E. Lebean, "Aluminum Transformation Technology and Application", J. of ASM, 1981.

5. Sully, "The Thermal Interfaces Between Casting and Chill Molds", AFS Transactions, Vol 84, pp. 735, 1976.

6. S.D. Moon, S.I. Kang, "Inverse Heat Transfer Analysis at the Mold/Casting Interface in the Aluminum Alloy Casting Process", J. of KSME, Vol 22, pp. 760-765. 1988.

7. 손선천 "Thermal Stress Analysis of Coated Materials Using the Finite Element Method, 蔚山大學校.

8. G.H. Geiger, D.R. Poirier, "Transport Phenonena in Metallurgy", 1991.