

## A16061-T6 열처리 잔류응력의 유한요소해석 및 측정

고대훈\* · 김태정\*\* · 임학진\*\*\* · 이정민\*\*\* · 김병민\*†

\* 부산대학교 기계공학부, \*\* 미코 C&C 기술연구소, \*\*\*(주)풍산 방산기술연구소,

### FE-Simulation and Measurement of the Residual Stress in Al6061 During T6 Heat Treatment

Dae Hoon Ko\*, Tae Jung Kim\*\*, Hak Jin Lim\*\*\*, Jung Min Lee\*\*\* and Byung Min Kim\*†

\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

\*\* Technical Research Laboratory, Mico C&C Co.,

\*\*\* Defense Product Technical Research Laboratory, Poongsan Co.,

(Received October 12, 2010 ; Revised April 27, 2011 ; Accepted April 28, 2011)

**Key Words** : Al6061-T6, Residual Stress(잔류응력), Solid Solution(용체화처리), Artificial Ageing(인공시효), X-ray Diffraction(X 선 회절), FE-Simulation(유한요소해석)

**초록**: 본 연구의 목적은 Al6061 의 T6 열처리 시 발생하는 잔류응력의 변화를 예측하는 것이다. Al6061-T6 의 일반적인 열처리 조건인 용체화처리(530°C, 2hr)와 인공시효(175°C, 9hr)에서 인공시효 시간에 따라 잔류응력 변화를 고려하였다. 잔류응력 예측은 열처리 실험을 수행하여 대류 열전달계수를 확보하고, 탄소성 모델로 가정한 유한요소해석을 적용하였다. 또한 인공시효와 같이 재료가 고온에서 장시간 유지되는 경우의 Zener-Wert-Avrami 함수를 적용하여 잔류응력 변화를 확인하였다. 잔류응력의 측정은 X 선 회절법으로 측정하고 측정결과는 예측된 유한요소해석 결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 확보하고 해석기법을 확립하였다.

**Abstract**: The purpose of this study is to predict the residual stress in Al6061 during T6 heat treatment. In this study, the variable residual stress in case of the solid solution(530°C, 2h) and artificial ageing(175°C, 9h) of Al6061 subjected to T6 heat treatment is determined at different ageing times. A heat treatment experiment is conducted to determine the heat transfer coefficient, on the basis of which the residual stress during the T6 heat treatment is predicted. In order to take into account the relaxation of residual stress during artificial ageing, a Zener-Wert-Avrami function is used and elasto-plastic nonlinear analysis is conducted through FE-simulation. Further, the residual stress is measured by using the X-ray diffraction(XRD) method, and the result is compared with the result from the FE-simulation. It is found that the residual stress predicted from the FE-simulation is in good agreement with the residual stress measured by using the XRD method.

### 1. 서론

열처리계(2XXX, 6XXX, 7XXX) 알루미늄 합금들은 가공 후, 일련의 열처리를 통해 최적의 기계적 특성 얻을 수 있다. 특히 6XXX 계열(Al-Mg-Si)은 다른 열처리계 합금에 비해 다소 강도는 낮지만 열처리에 의해 강화되는 대표적인 석출경화형 합금이다.<sup>(1)</sup>

알루미늄의 대표적인 열처리 방법 중 하나인 T6 처리는 열간가공 후, 용체화 처리(Solid solution heat treatment)와 인공시효처리(Artificial ageing)를 통해 최적의 기계적 성질을 얻는 방법이다. 특히 용체화처리는 재료를 과포화 고용체로 만들기 위해 높은 온도에서 급냉하는 과정이 필수적으로 포함되며, 이때의 급냉과정에서 대부분의 잔류응력이 발생됨에 따라 내부에는 인장잔류응력, 표면에는 압축잔류응력이 발생한다.<sup>(1-3)</sup>

재료표면에 발생된 압축잔류응력은 재료의 피로 강도 향상 및 응력부식을 방지하는 등의 장점을 가지지만, 절삭가공 시에는 재료에 상당한 변형을

† Corresponding Author, bmkim@pusan.ac.kr  
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

야기시켜 치수 정밀도가 감소하는 문제가 발생된다.<sup>(4)</sup> 일반적으로 T6 열처리의 경우 인공시효를 통해 용체화처리로 발생된 잔류응력을 약 30~40% 제거가 가능하지만 완전한 잔류응력의 제거는 어렵다.<sup>(1)</sup> 따라서 재료의 특성에 따라 열처리 온도 및 시간 등을 적절하게 조절하여 잔류응력을 제어할 필요가 있으며 열처리 조건에 따른 잔류응력 예측 및 평가가 필수적이다.

열처리 잔류응력을 예측하기 위한 대부분의 유한요소해석(FEM)은 단순히 가열 및 냉각과정에서 발생하는 열응력으로 계산하였다. 하지만 Muammer<sup>(5)</sup>는 Al7075의 수냉 시, 급격한 온도변화에 따라 탄성계수 및 항복강도 변화를 각각 입력하여 잔류응력 해석결과의 정밀도를 높였다. 또한 Hossain 등<sup>(6)</sup>은 스테인리스 스틸(Stainless steel)의 열처리 해석 시, 템퍼링(Tempering)과 같이 재료가 고온 장시간 노출되는 경우에 대해 크립 모델(Creep model)을 적용하여 시효시간에 따른 잔류응력 변화를 예측하였다.

본 연구에서는 알루미늄 열처리 중 가장 널리 적용되는 T6 열처리에 대해 유한요소해석으로 Al6061의 열처리 잔류응력을 예측하였다. 이에 따라 잔류응력을 예측하기 위해 열처리 실험을 수행하여 가열 및 냉각 등의 열전달 조건에 따라 대류 열전달계수(Convective heat transfer coefficient)를 파악하였다. 또한 인공시효는 Zener-Wert-Avrami 식을<sup>(7,8)</sup> 적용하여 시효시간에 따른 잔류응력 변화를 고려하였다. 또한 유한요소해석으로 예측된 잔류응력은 X 선 회절법(X-ray diffraction)에 의해 측정된 잔류응력과 비교하여 검증하였다.

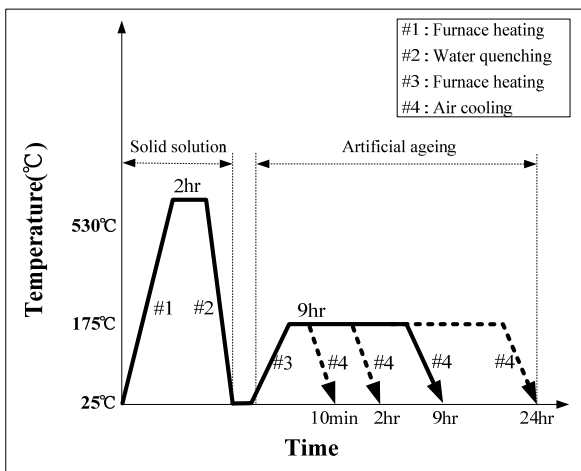


Fig. 1 Typical heat treatment curve of Al6061-T6

## 2. 재료 및 열처리 조건

본 연구에서 고려한 재료는 중강도를 가지면서 내식성이 우수한 Al6061이며, 잔류응력 해석 및 측정을 위한 시편 D50mm x H50mm의 크기를 가지는 원통이다. Fig. 1에 Al6061-T6의 가장 일반적이며 상용화된 열처리 조건과 T6 열처리에서 냉각 및 가열의 단계별에 따라 #1, 2, 3, 4으로 나타내었다.

또한 용체화처리는 530°C에서 2시간 유지한 뒤 수냉하였으며, 시간에 따라 잔류응력을 확인하기 위해 인공시효는 175°C에서 10, 120, 540, 1440min으로 각각 유지한 뒤 공냉하였다.

## 3. 열처리 실험 및 대류 열전달계수

### 3.1 Al6061-T6 열처리 실험

본 연구에서는 잔류응력 예측에 필요한 대류 열전달계수( $h$ )를 결정하고 열전달 조건에 따른 냉각 및 가열온도를 파악할 목적으로 열처리 실험을 수행하였다.

T6 열처리 실험의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 열처리 시편의 온도측정은 재료내부의 위치가 각각 다른 3곳의 지점에 대해 매 1초의 간격으로 측정을 하였으며, 재료내부의 온도가 분위기의 온도와 평형이 이루어진 정상상태까지 측정하였다.

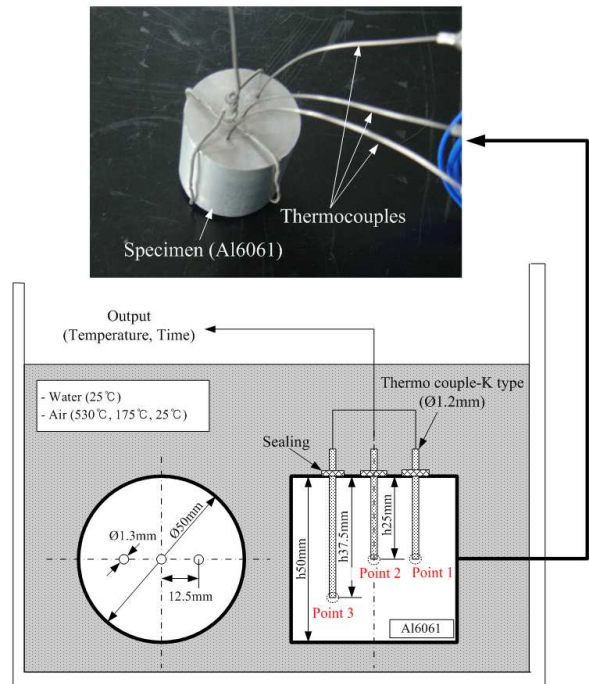
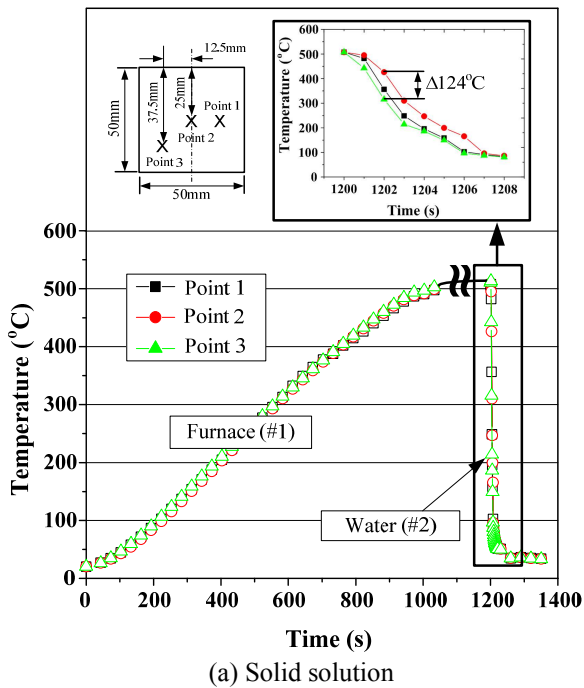


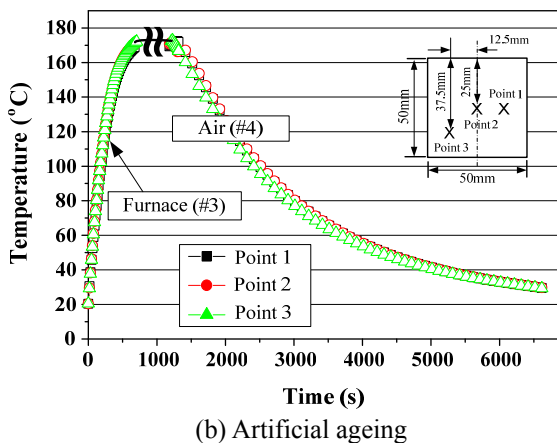
Fig. 2 Schematic view of heat treatment experiment for measuring temperature

Fig. 3 에 Al6061-T6 의 열처리 실험을 수행하여 용체화처리와 인공시효처리에 대한 가열 및 냉각에 대한 온도곡선을 각각 나타내었다.

온도측정결과, 용체화처리 시 고용온도에서 수냉하면 재료내부의 Point 2 과 Point 3 의 최대 온도차가 124°C의 온도 구배가 발생되었다. 이와 같이 수냉과정에서 나타난 재료내부의 높은 온도 구배로 인해 잔류응력이 크게 발생하는 원인으로 예상된다. 하지만 인공시효의 경우는 가열 및 냉각과정에서의 재료내부의 온도 차는 10°C 내외로 비교적 균일하게 가열 및 냉각 되었다. 따라서 인공시효는 가열 및 냉각과정에서의 잔류응력 영향은 미비할 것으로 예상되며, 유지시간에 따른 잔류응력의 파악이 중요할 것으로 판단된다.



(a) Solid solution

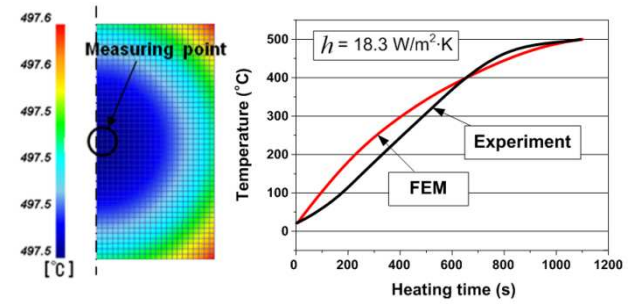


(b) Artificial ageing

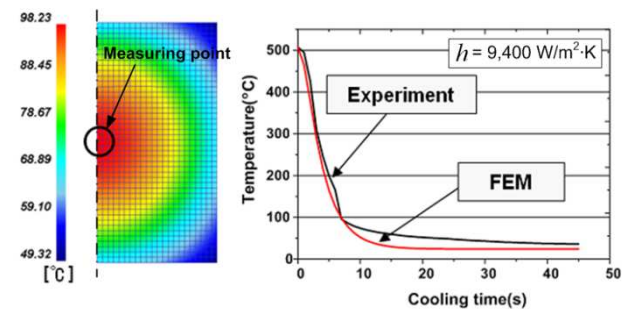
Fig. 3 Results of measuring temperatures for solid solution, artificial ageing.

3.2 열전달 조건에 따른 대류 열전달계수

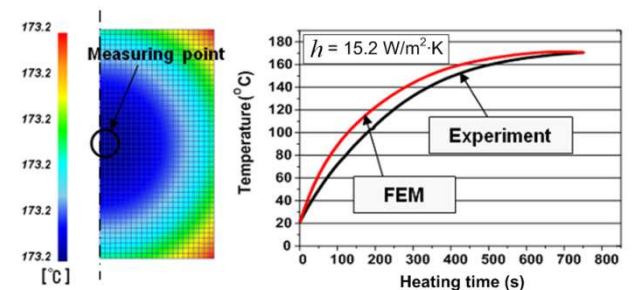
T6 열처리의 단계별에 대한 대류 열전달계수를 결정하기 위해 본 연구에서는 열처리 실험을 통해 확보된 시간에 따른 온도변화와 유한요소해석 결과를 비교함으로써 대류 열전달계수를 역으로 결정하는 방법(Inverse method)을 적용하였다.



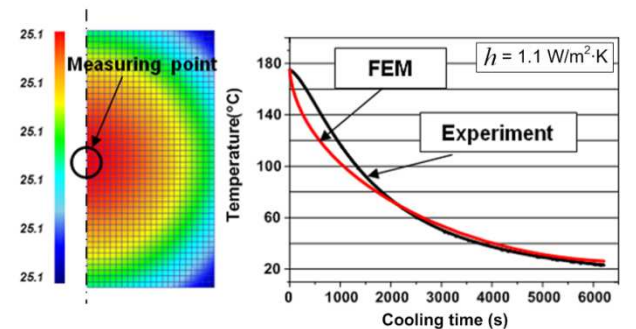
(a) Furnace heating - #1



(b) Water quenching - #2



(c) Furnace heating - #3



(d) Air cooling - #4

Fig. 4 Results of FEM and experiment according to heat treatment conditions.

본 연구에서 적용한 대류 열전달계수의 결정 방법은 먼저 열처리 실험을 수행하여 시편의 중심부의 시간에 따른 온도변화를 파악하고 동일한 시편의 크기에 대한 유한요소해석을 대류 열전달계수를 변화시켜 가면서 수행하였다. 해석결과와 실험결과를 동일한 온도측정지점에 대해 온도곡선을 반복적으로 비교하여 온도곡선이 일치하게 되면 유한요소해석에 입력한 값을 대류 열전달계수로 결정하였다.

Fig. 4 에 T6 열처리의 단계별에 대한 유한요소해석과 실험의 온도곡선을 비교한 결과와 결정된 대류 열전달계수를 나타내었다. 가열로를 이용하여 재료를 가열하는 #1, 3 경우의 대류 열전달계수는 비슷한 값을 가졌으며, #4 의 공냉 조건은 1.1W/m<sup>2</sup>K 로 비교적 낮은 값을 가졌다. 하지만 수냉 조건인 #2 는 9 초 동안 재료를 400℃ 이상 냉각되었기 때문에 대류 열전달계수는 9,400W/m<sup>2</sup>K 으로 매우 높은 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

4. 유한요소해석 및 잔류응력 측정

4.1 유한요소해석을 통한 잔류응력 예측

T6 열처리의 단계별 잔류응력을 예측하기 위해 유한요소해석을 적용하였다. 유한요소해석의 모델 및 경계조건은 Fig. 5 와 같으며, 재료는 탄소성으로 가정하였다. 해석방법은 열처리실험을 통해 확보된 각각의 대류 열전달계수를 입력하여 냉각 및 가열 후의 응력분포를 확인하였다. 특히 인공시효 처리와 같은 재료가 고온에서 장시간 동안 노출이 되는 경우에 대해 본 연구에서는 Zener-Wert-Avrami 식에 대해 사용자 정의 변수(USRUPD)의 User-subroutine 을 이용하여 시간에 따른 잔류응력 변화를 확인하였다.

인공시효 열처리에 대한 잔류응력을 예측하기 위한 Zener-Wert-Avrami 는 식 (1)과 같다.

$$\sigma^{RS} / \sigma_0^{RS} = \exp[-(At_a)^m] \tag{1}$$

여기서,  $\sigma^{RS}$  는 시간에 따라 변화하는 잔류응력이며,  $\sigma_0^{RS}$  는 초기잔류응력 즉, 인공시효처리 전의 잔류응력이다. 또한  $m$  은 잔류응력의 완화 정도를 결정하는 재료상수이며,  $t_a$  는 시효시간(min),  $A$  는 재료 및 온도에 의존하는 재료상수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A = B \exp(-\Delta H / kT_a) \tag{2}$$

여기서,  $B$  는 재료상수이며,  $k$  는 볼츠만 상수 (eV/K)이다. 또한  $\Delta H$  는 활성화 엔탈피(eV),  $T_a$  는 인공시효온도(K)이다. 그리고 본 연구에서 고려한 Al6061 의 인공시효 실험을 통해 확보된 재료상수를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Material constants of Al6061 alloy

Material constants	$m$	$B$	$\Delta H$ (eV)
Values	0.336	1.169	5.417e+08

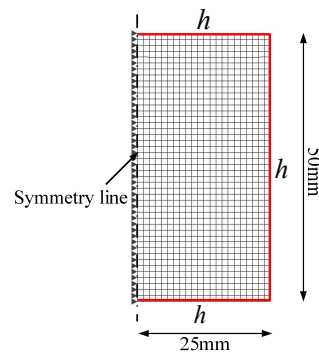


Fig. 5 FE-model and boundary condition of FEM

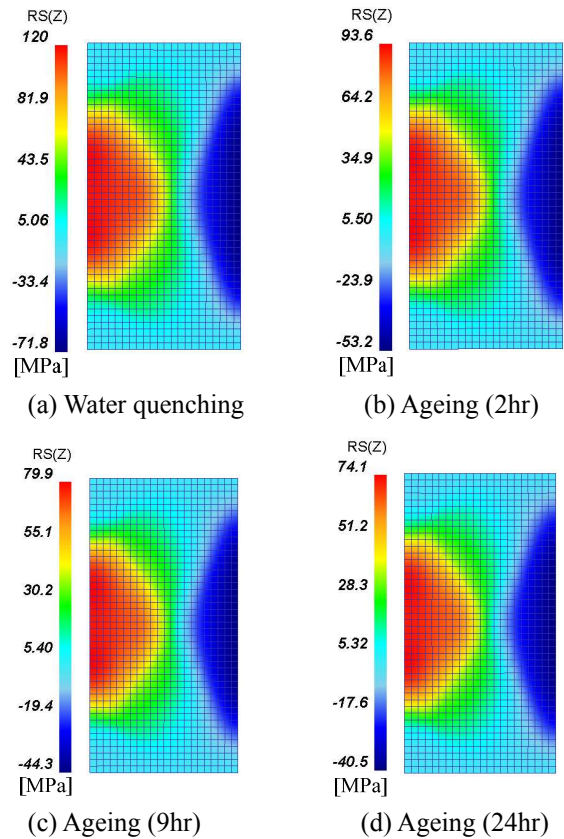


Fig. 6 Results of FE-simulation for Residual stress(Z) of Al6061-T6



Al6061의 T6 열처리 잔류응력을 예측한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 예측된 잔류응력은 축(Axial) 방향의 응력으로 나타내었으며, 이는 본 연구에서 고려한 원통형상의 경우는 일반적으로 축 방향으로 가장 높게 나타나기 때문에<sup>(6,9)</sup> 축 방향의 잔류응력을 파악하고 예측하는 것이 타당하다고 판단된다.

유한요소해석결과, 수냉 후 재료의 표면에서 -71.8MPa로 최대 압축잔류응력이 발생하였다. 또한 인공시효가 진행됨에 따라 표면 압축잔류응력은 점차 감소되는 경향을 나타내었으며 9hr 후에는 -40.5MPa로 수냉 후 인공시효를 적용함에 따라 잔류응력이 약 40% 가량 완화됨을 확인할 수 있었다. 따라서 유한요소해석을 통해 잔류응력을 예측하여 T6 열처리 잔류응력을 정량적으로 파악할 수 있었다.

#### 4.2 XRD를 이용한 잔류응력 측정

잔류응력을 정량적으로 측정하기 위해 본 연구에서는 XRD(X-ray diffraction)를 이용한  $\sin^2\psi$  방법을 사용하였다. XRD 측정법은 일종의 비파괴검사로 정확한 잔류응력을 측정할 수 있기 때문에 많은 연구에서 적용되었다<sup>(9-11)</sup>.

XRD를 이용한 잔류응력 측정은 측정결과에 대한 정밀도를 높이기 위해 서로 다른 7개의  $\psi$  각도에 대해 측정하여 회절피크의 위치와  $\sin^2\psi$ 의 그래프에서 기울기로부터 잔류응력을 측정하였다. Al 재료의 XRD 측정 시 널리 사용되는 Cu-K $\alpha$ (wavelength = 1.5405 Å)의 X 선을 사용하였으며, 회절각(diffraction angle:  $2\theta$ )이  $137.4^\circ$ 에서 알루미늄의 (422) 면의 회절 피크가 나타나는 점을 고려하여 회절각이  $134^\circ \sim 140^\circ$ 의 범위에서 회절 피크의 변화를 관찰하였다.

Fig. 7은 인공시효 9hr에서의 XRD 측정결과로써 7개의  $\psi$  각도에 대한 회절피크를  $K\alpha_1$ 과  $K\alpha_2$ 가 고려된 실제 측정 값(Original value)과  $K\alpha_2$ 의 보정된 값(Compensation value)으로 각각 나타내었다. 또한 측정된 잔류응력 방향 및 지점은 유한요소해석과 동일한 축 방향의 잔류응력을 측정하였으며, 가장 높은 압축잔류응력이 나타난 표면의 중간지점( $\sigma_{max}$ )에 대해 측정하였다.

재료표면 잔류응력에 대하여 유한요소해석을 통해 예측된 잔류응력과 XRD로 측정된 잔류응력 결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 유한요소해석과 XRD 측정결과 모두 수냉 후, 재료표면에 압축잔류응력이 가장 크게 발생하였으며, 인공시효 처리가 진행됨에 따라 압축잔류응력은 점차 감소

하는 경향을 나타내었다. 그리고 해석과 측정된 잔류응력의 완화되는 경향이 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서 Zener-Wert-Avrami 식을 적용하여 수행된 유한요소해석의 잔류응력 예측결과에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었다.

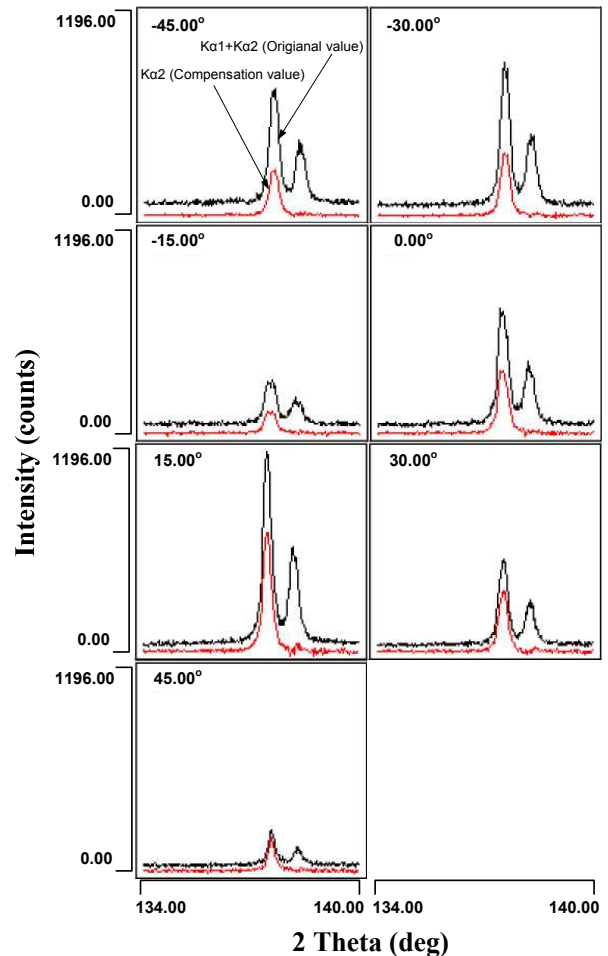


Fig. 7 Result of XRD for Al6061-T6(ageing: 9hr)

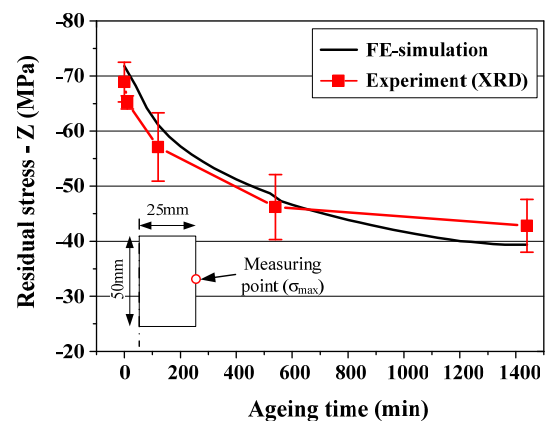


Fig. 8 Result of FE-simulation for Residual stress(Z) of Al6061-T6

## 5. 결 론

본 연구에서는 Al6061 의 T6 열처리 시, 열처리 잔류응력을 예측하기 위한 목적으로 열처리 실험과 XRD 를 이용한 측정을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) T6 열처리 시, 냉각 및 가열되는 단계별에 대해 온도측정실험을 수행하여 각각의 조건에 대한 대류 열전달계수를 산출하였다.
- (2) 대류 열전달계수를 확인한 결과 수냉조건에서  $9,400\text{W/m}^2\text{K}$  로 매우 높은 값을 가졌으며, 따라서 높은 냉각속도 및 재료내부의 온도구배로 인해 수냉 후 잔류응력이 가장 크게 발생되었다.
- (3) 인공시효처리에서의 잔류응력을 예측하기 위해 Zener-Wert-Avrami 식을 적용하고, XRD 을 이용하여 측정된 잔류응력 결과로부터 Al6061 의 재료물성을 확보하였다.
- (4) 유한요소해석을 통해 예측된 잔류응력 결과는 XRD 측정결과와 비교하여 해석결과의 신뢰성을 확보함에 따라 Al6061-T6 의 열처리 잔류응력 예측을 위한 해석기법을 확립하였다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청의 민군겸용기술개발사업 과제(09-DU-MP-02) 연구비 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Jang, H. S., 1997, "The Handbook of Advanced Aluminum Technology," Hanlimwon.
- (2) Kang, D. H., Lee, B. J., Yun, C. B. and Kim, K. W., 2010, "Study on Torsional Strength of Induction-Hardened Axle Shaft," Transactions of the KSME A, Vol. 34, No. 5, pp. 645~649.
- (3) Rogante, M., Battistella, P. and Rustichelli, F., 2004, "Residual Stress Measurement by Neutron Diffraction in AA6082 Extruded Samples Submitted to Different Quenching Rates," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 378, pp.335~338.
- (4) Ian, M., 2004, "Residual Stress Reduction During Quenching of Wrought 7075 Aluminum Alloy," Master's Thesis.
- (5) Muammer, K., John, C. and Taylan, A., 2006, "Prediction of Residual Stress in Quenched Aluminum Block and Their Reduction through Cold Working Processed," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.174, pp. 342~354.
- (6) Hossain, S., Truman, C. E., Smith, D. J., Peng, R. L. and Stuhr, U., 2007, "A Study of the Generation and Creep Relaxation of Triaxial Residual Stresses in Stainless Steel," *International Journal of Solid and Structure*, Vol. 44, pp. 3004~3020.
- (7) Juijerm, P. and Altenberger, I., 2006, "Residual Stress Relaxation of Deep-Rolled Al-Mg-Si-Cu Alloy during Cyclic Loading at Elevated Temperature," *Scripta Materialia*, Vol. 55, pp. 1111~1114.
- (8) Juijerm, P., Altenberger, I. and Scholtes, B., 2007, "Influence of Ageing on Cyclic Deformation Behavior and Residual Stress of Deep Rolled As-Quenched Aluminum Alloy AA6110," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 1374~1382.
- (9) Simsir, C. and Gur, C. H., 2008, "3D FEM Simulation of Steel Quenching and Investigation of the Effect of Asymmetric Geometry on Residual Stress Distribution," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 207, pp. 211~221.
- (10) Berger, M. C. and Gregory, J. K., 1999, "Residual Stress Relaxation in Shot Peened Timetal 21s," *Material Science and Engineering A*, Vol. 263, pp. 200~204.
- (11) Alberg, H. and Berglund, D., 2003, "Comparison of Plastic, Viscoplastic and Creep Models when Welding and Stress Relief Heat Treatment," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 192, pp. 5189~5208.