

## 극저온 열처리에 의한 A16061 합금의 잔류응력 제거 및 열처리 특성 평가

고대훈\* · 박기정\*\* · 조영래\*\* · 임학진\*\*\* · 이정민\*\*\* · 김병민\*\*\*\*†

\* 부산대학교 대학원 정밀가공시스템, \*\* 부산대학교 재료공학부,  
\*\*\* (주)풍산 방산기술연구소, \*\*\*\* 부산대학교 기계공학부

### Relief of Residual Stress and Estimation of Heat-Treatment Characteristics for Al6061 Alloy by Cryogenic Heat Treatment

Dae Hoon Ko\*, Ki Jung Park\*\*, Young Rae Cho\*\*, Hak Jin Lim\*\*\*, Jung Min Lee\*\*\*  
and Min Byung Kim\*\*\*\*†

\* Precision Manufacturing System Division, Pusan Nat'l Univ.,  
\*\* Dept. of Materials Science and Engineering, Pusan Nat'l Univ.  
\*\*\* Defense Product Technical Research Laboratory, Poongsan Corporation,  
\*\*\*\*† Department of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received December 8, 2010 ; Revised July 18, 2011 ; Accepted July 20, 2011)

**Key Words** : Residual Stress(잔류응력), Cryogenic Heat Treatment(극저온 열처리), Uphill Quenching(업힐 퀴칭), Finite Element Method(유한요소법), TEM(투과전자현미경)

**초록**: 본 연구의 목적은 극저온 열처리를 통해 A16061 의 열처리 잔류응력을 제거하는 것이다. 이를 위해 유한요소해석을 이용하여 열처리 잔류응력을 예측하였으며, 열처리 조건에 따른 각 단계별 대류 열전달계수를 T6 와 극저온 열처리 실험을 수행하여 결정하였다. 예측된 잔류응력 결과는 X 선 회절법(XRD)으로 측정된 잔류응력 결과와 비교하여 유한요소해석 결과의 타당성을 확인하였다. 또한 T6 와 극저온 열처리에 대해 각각 전기 전도도와 경도를 측정하여 기계적 특성을 평가하고 TEM 관찰과 XRD 회절 분석을 통해 석출물의 크기 및 성분을 파악하였다. 이를 통해 A16061 의 T6 열처리와 비교하여 극저온 열처리를 적용함에 따른 잔류응력, 기계적 특성 및 미세조직변화를 조사하였다.

**Abstract**: The purpose of this study is to relieve the residual stress of Al6061 using cryogenic heat treatment. Experimental T6 and cryogenic heat treatments were carried out to define the convective heat-transfer coefficient, which was then applied in the finite-element method (FEM) to predict the residual stress. The predicted residual stress was compared with the residual stress measured by X-ray diffraction (XRD), and the results were in good agreement. The mechanical properties were estimated by measuring the electrical conductivity and hardness. In addition, the size and formation of the precipitations were observed by TEM and XRD analysis for both T6 and cryogenic heat treatments. The effects of the cryogenic heat treatment on the residual stress, mechanical properties, and precipitation of Al6061 alloys were thus confirmed.

### 1. 서론

열처리계 알루미늄 합금들은 단조, 압출 등의 소성가공 후, 열처리를 통해 최적의 기계적 특성을 얻을 수 있다.<sup>(1,2)</sup> 하지만 알루미늄 합금들의 대

부분은 강도 향상을 위해 400~500℃의 높은 온도로 가열한 후 상온의 물로 급냉하는 용체화처리(Solid solution heat treatment)가 적용되며 이로 인해 재료에는 과도한 잔류응력이 발생된다.<sup>(3,4)</sup>

용체화처리로 인해 발생된 잔류응력은 기계가공시, 재료에 내재하는 응력 평형이 붕괴되어 새로운 응력 평형에 도달하면서 제품의 치수정밀도를 크게 손상시킨다.<sup>(5,6)</sup> 따라서 제품의 치수정도 및 가공공차를 만족하기 위해서는 열처리로 인해 발생된 잔류응

† Corresponding Author, [bmkim@pusan.ac.kr](mailto:bmkim@pusan.ac.kr)  
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

력은 기계가공 전에 최대한 제거할 필요가 있다.

알루미늄과 같은 금속재료의 잔류응력을 제거하기 위한 일반적인 방법으로는 소성가공법, 고온가열법, Uphill quenching 법 등이 있다.<sup>(3)</sup> 소성가공법은 재료의 외형을 크게 손상시키지 않는 범위에서 인장 및 압축변형을 가해 잔류응력을 제거하는 방법이다. 하지만 이 방법은 재료에 변형을 부여하기 위한 설비가 요구되며, 제품의 형상이 복잡할 경우에 대해서는 적용이 어려운 단점이 있다.

고온가열법은 재료를 가열하고 유지하여 시간이 경과함에 따라 잔류응력을 감소시키는 방법으로 알루미늄 열처리 중 인공시효가 이 방법에 해당된다. 하지만 최적의 기계적 특성을 가지는 시효시간 이상으로 가열하면 기계적 특성이 저하되는 과시효가 발생된다. 따라서 과시효가 발생하지 않는 시효시간 내에서 행해져야 하기 때문에 용체화처리로 인해 발생된 잔류응력을 효과적으로 제거하기 어렵다.<sup>(5)</sup>

Uphill quenching 은 재료를 극저온까지 냉각한 뒤 상온 이상으로 급격히 가열하는 방법이다. 잔류응력 제거원리는 용체화처리 후에 재료의 표면에는 압축잔류응력이 생기고 내부에는 인장잔류응력이 발생되며, 반대로 Uphill quenching 은 극저온에서 급열하기 때문에 표면에는 인장잔류응력이 내부에는 압축잔류응력이 발생된다. 따라서 용체화처리 후에 Uphill quenching 을 수행하면 응력 상태가 표면과 내부에서 각각 상쇄되어 잔류응력이 제거된다.<sup>(7)</sup> 이 방법은 제품 형상의 제약이 없으며, 고온가열법 보다 효과적인 잔류응력 제거가 가능하나 완전한 제거는 할 수 없다.

따라서 잔류응력 제거효과의 극대화를 위해 Hill<sup>(8)</sup> 은 Uphill quenching 과 고온가열법을 접목시켜 최대 80%까지 잔류응력을 제거할 수 있다고 보고하였다. 또한 Kim<sup>(5)</sup> 등은 Al2024 합금에 대해 Uphill quenching 을 적용하여 잔류응력을 평가하고 열처리 특성을 파악하여 효과적인 잔류응력 제거를 위한 열처리 조건을 제시하였다.

본 연구에서는 Al6061 의 열처리 잔류응력 제거를 위해 Uphill quenching 과 고온가열법을 접목시킨 극저온 열처리를 적용하였다. 먼저 잔류응력 예측을 위한 대류 열전달계수를 T6 와 극저온 열처리 실험을 수행하여 결정하고 유한요소해석을 통해 잔류응력을 예측하였다. 예측된 잔류응력은 X 선 회절법으로 측정된 잔류응력과 비교하여 해석결과의 타당성을 확인하였다. T6 와 극저온 열처리에 대해 각각 전기 전도도(Electrical conductivity) 및 경도를 측정하여 석출물 생성에 따른 기계적 특성을 파악하였다. 또한 TEM(Transmission electron microscope)과 XRD 회절

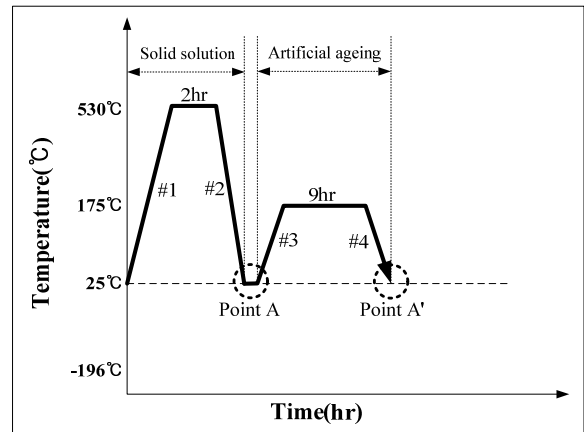
분석을 통해 석출물의 크기와 성분을 확인하였다.

## 2. 열처리 조건 및 실험

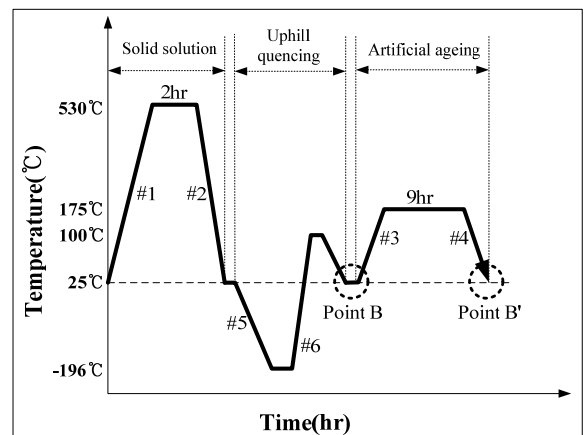
### 2.1 열처리 조건

Al6061 에 대한 T6 및 극저온 열처리 조건을 Fig. 1 에 각각 나타내었다. 그리고 Fig. 1(a)의 Point A, A'와 Fig. 1(b)의 Point B, B'는 각각 T6 와 극저온 열처리에 대하여 잔류응력을 비교하고 전기 전도도 및 경도 등의 측정하여 열처리 특성을 평가한 지점을 의미한다.

T6 열처리의 용체화처리는 530°C에서 2hr 유지, 인공시효는 175°C에서 9hr 유지하는 일반적인 상용조건으로 적용하였다. 또한 본 연구에서 고려한 극저온 열처리는 T6 열처리와 동일한 조건으로 용체화처리하여 액체질소(LN<sub>2</sub>)에 침지시켜 재료를 -196°C의 극저온까지 냉각하고 100°C의 끓는 물(Boiling water)로 가열한 후 T6 열처리와 동일한 조건으로 인공시효 하였다.



(a) T6 heat treatment



(b) Cryogenic heat treatment

Fig. 1 Heat treatment conditions of T6 and cryogenic for Al6061

2.2 T6 및 극저온 열처리 실험

극저온 열처리 실험을 수행하여 Uphill quenching 시, Al 재료가 극저온 -196°C까지 냉각될 때 발생하는 현상들을 확인하였다. 또한 T6 와 극저온 열처리의 각 단계별에 대해 소재의 온도를 측정하여 잔류응력 예측해석에 필요한 대류 열전달계수는 파악하였다.

먼저 T6 및 극저온 열처리의 실험 개략도를 Fig. 2 에 나타내었다. 시편은 D50mm x h50mm 의 크기를 가지는 원통형상이며, 온도측정지점은 시편 내부에서 위치가 각각 다른 3 곳에 대해 1 초 단위로 측정하였다. 또한 소재의 온도측정은 측정 오차가 ± 1°C 인 TDS-602 에 의해 수행되었으며, 열전대는 고온 및 저온 온도영역에 대해 K-type 과 T-type 열전대를 각각 사용하여 측정하였다. 또한 Uphill quenching 시, 액체질소와 끓는 물에서 시편의 열처리 과정을 확인하기 위해 초고속 카메라를 설치하여 실시간으로 표면 상태를 촬영하였다.

Fig. 3 에 T6 와 극저온 열처리에 대한 온도 측정 결과를 용체화처리, 인공시효 및 Uphill quenching 에 대하여 단계별로 각각 나타내었다. 온도 측정 결과, 용체화처리 시 Point 1 과 Point 3 에서 최대 온도 차가 124°C 의 온도 구배가 발생되었다. 이와 같이 재료내부에서 발생된 높은 온도 구배는 재료의 잔류응력을 유발시키는 원인으로 예상된다. 하지만 인공시효의 가열 및 냉각은 내부온도 차가 10°C 내외로 비교적 균일하게 가열되고 냉각됨을 확인할 수 있었다.

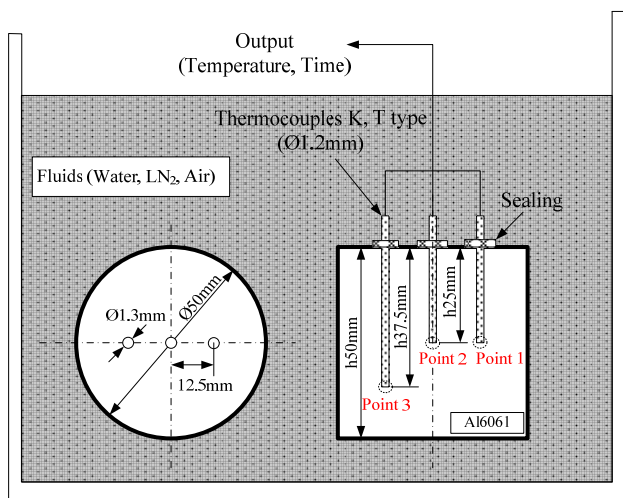
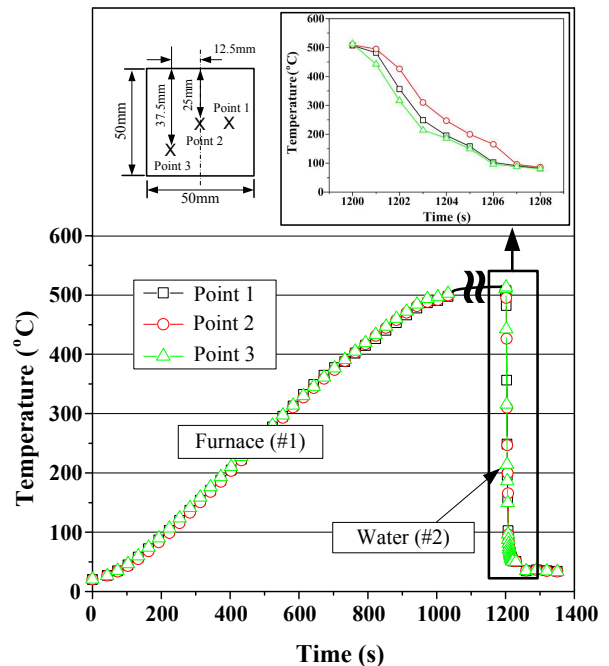
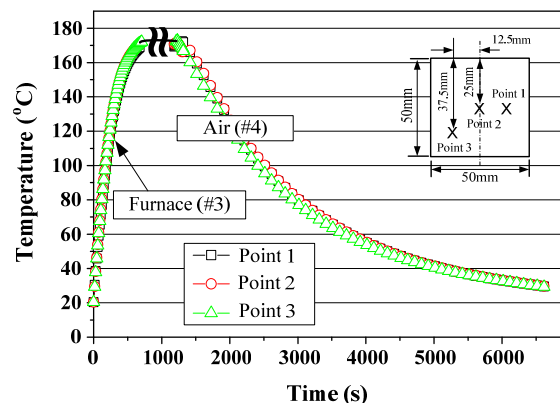


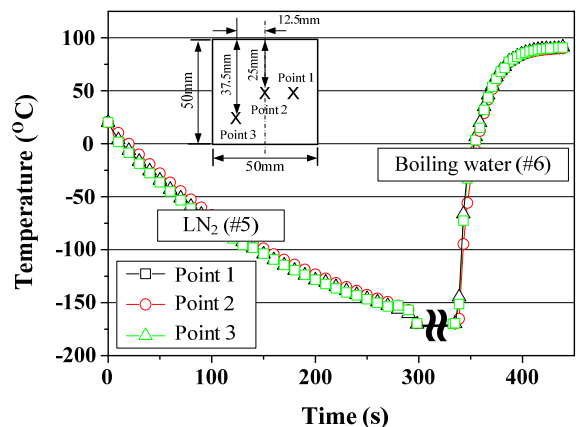
Fig. 2 Schematic view of heat treatment experiment for measuring temperature



(a) Solid solution



(b) Artificial ageing



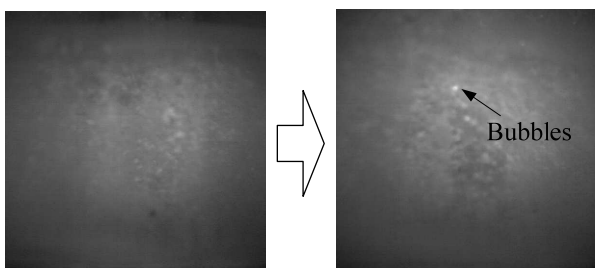
(c) Uphill quenching

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

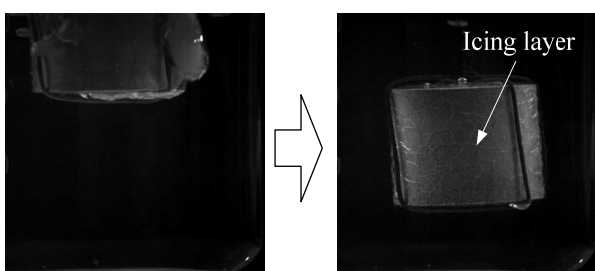
Uphill quenching 에 대해 온도를 측정 한 결과, 액체질소와 물의 냉각속도를 비교하면 액체질소는 상온에서 극저온까지 냉각 시 가지는 평균 냉각속도는 0.68°C/s 이었으나, 물은 용체화처리의 유지온도인 530°C에서 상온까지 냉각 시 가지는 평균 냉각속도는 12.1°C/s 으로 액체질소가 물보다 현저히 낮은 냉각속도를 가졌다. 이는 액체질소가 물보다 낮은 비열을 가진다는 점과 Fig. 4 와 같이 끓는 점이 -196°C인 액체질소가 상온에서 기화되어 생성된 기포(Bubble)들이 액체질소와 시편 사이의 열 전달을 방해하여 발생된 현상으로 판단된다.

**Table 1** Convective heat transfer coefficient ( $h$ ) according to heat treatment type

Heat treatment type.	Methods of heating and cooling	$h$ (W/m <sup>2</sup> · K)
Solid solution	Heating(#1) – Furnace	18.3
	Cooling(#2) – Water	9,400
Artificial ageing	Heating(#3) – Furnace	15.1
	Cooling(#4) – Air	1.1
Uphill quenching	Cooling(#5) – LN <sub>2</sub>	122.4
	Heating(#6) – Boiling water	1,510



**Fig. 4** Bubbling of cylindrical specimen at LN<sub>2</sub>(-196°C)



**Fig. 5** Icing layer of cylindrical specimen at boiling water(100°C)

극저온 열처리를 적용하여 효과적으로 잔류응력 제거하기 위해서는 극저온에서 신속하게 가열하여 높은 가열속도가 필요하다. 따라서 본 연구에서 고려한 끓는 물을 이용한 가열방법은 Fig. 5 와 같이 가열초기에 시편의 표면에 얼음 층이 생성됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 얼음 층의 생성은 시편과 끓는 물 사이의 열 전달을 방해하기 때문에 재료를 신속하게 가열하여 잔류응력 제거 효과를 향상시켜야 하는 측면에서는 불리하게 작용할 것으로 예상된다.

본 연구에서 고려한 대류 열전달계수의 결정은 열처리 실험을 통해 도출된 소재의 온도 측정결과와 유한요소해석에 의한 소재의 온도 예측결과를 비교하여 역으로 도출하는 방법(Inverse method)을 적용하였다.<sup>(9)</sup>

대류 열전달계수를 결정하는 방법은 먼저 열처리 실험을 통해 시간에 따른 온도변화를 파악하고 실험과 동일한 재질 및 크기를 가지는 시편에 대해 대류 열전달계수를 변화시켜 가면서 유한요소해석을 수행하였다. 소재의 동일한 온도지점에 대해 반복적으로 비교하여 해석과 실험의 시간에 따른 온도가 변화되는 곡선이 일치하게 되면, 그때의 유한요소해석에 입력한 값을 그에 해당하는 열처리의 대류 열전달계수로 판단하였다.

Table 1 에 각 열처리 단계별에 대한 대류 열전달계수를 나타내었다. 대류 열전달계수의 파악 결과, 수냉 시 9 초 동안 재료를 400°C 이상 냉각되었기 때문에 대류 열전달계수가 9,400 W/m<sup>2</sup>·K 로 가장 높은 값을 가졌고, 끓는 물도 1,510 W/m<sup>2</sup>·K 로 비교적 높은 값을 가졌다. 하지만 가열로 및 공냉의 경우는 수냉 및 끓는 물에 비해 상대적으로 매우 낮은 대류 열전달계수를 가졌다.

### 3. 잔류응력 예측 및 측정

#### 3.1 유한요소해석

T6 및 극저온 열처리의 단계별 잔류응력을 예측하기 위해 유한요소해석을 적용하였다. 유한요소해석은 탄소성으로 가정하였으며, 유한요소해석 모델 및 경계조건은 Fig. 6 과 같다. 해석방법은 열처리실험을 통해 확보된 각 단계별에 대한 대류 열전달계수( $h$ )를 입력하여 냉각 및 가열 후의 응력분포를 확인하였다. 특히 재료가 고온 장시간 노출되는 인공시효는 Zener-Wert-Avrami 식을 적용하여<sup>(10,11)</sup> 인공시효 시간에 따른 잔류응력 변화를 확인하였다.

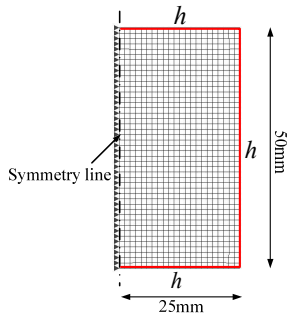


Fig. 6 FE-model and boundary condition of FEM

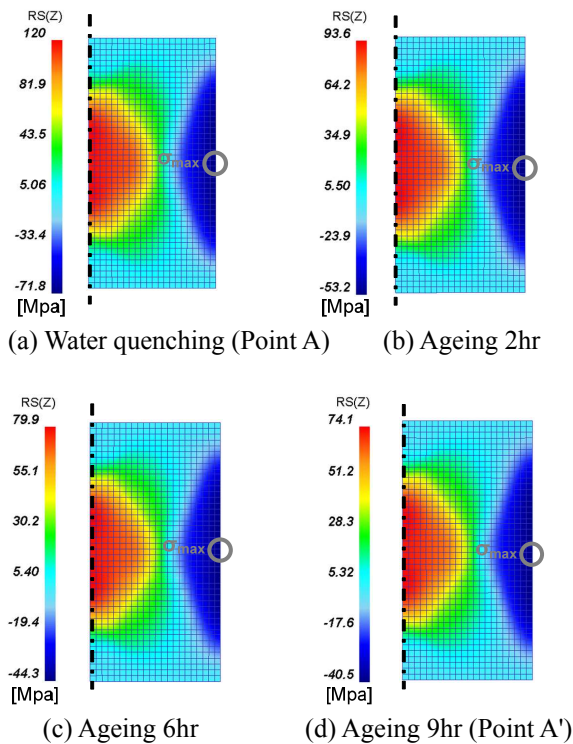


Fig. 7 Distributions of residual stress (Z) for T6 heat Treatment

T6 와 극저온 열처리에 대한 잔류응력 예측결과를 Fig. 7 과 Fig. 8 에 각각 나타내었다. 예측결과는 축(Axial) 방향의 잔류응력으로 나타내었으며, 이는 본 연구에서 고려한 원통형상의 시편은 일반적으로 축 방향에서 가장 높은 잔류응력이 발생하기 때문이다. 또한 각 열처리 조건에 따른 잔류응력을 평가하기 위한 비교 지점은 원통시편의 표면에서 중심부( $\sigma_{max}$ )에 대해 각각 비교되었다.

해석결과, T6 와 극저온 열처리 모두 인공시효 시간이 경과됨에 따라 수냉 및 Uphill quenching 의 잔류응력 즉, 인공시효 전의 잔류응력은 감소하는 경향으로 나타났다. 또한 T6 와 극저온 열처리의 모든 인공시효 단계에서 재료의 표면에는 압축잔류응력이 내부에는 인장잔류응력이 발생하였다.

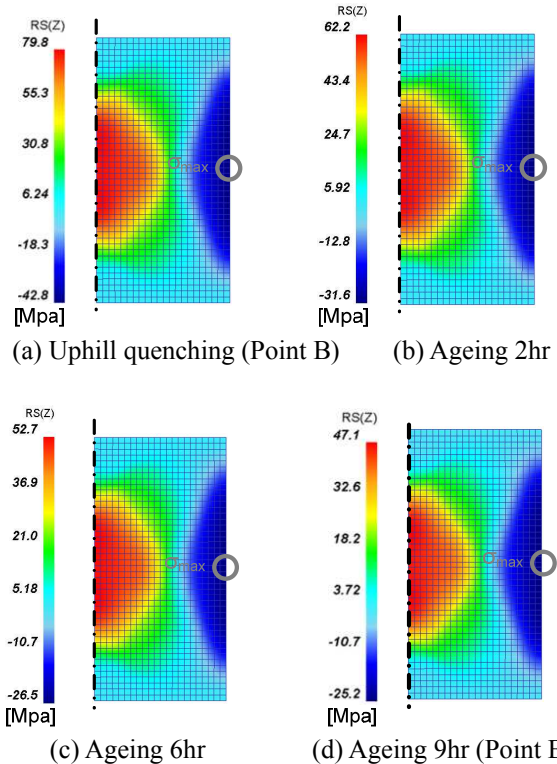


Fig. 8 Distributions of residual stress (Z) for cryogenic heat treatment

용체화처리 시, 수냉으로 인해 발생된 Point A 의 최대압축잔류응력은 인공시효 한 Point A'와 비교하면 43% 가량 감소하였다. 또한 Point A 의 잔류응력은 용체화처리 후 Uphill quenching 만 적용한 Point B 와 비교하면 40%, Uphill quenching 하고 인공시효한 Point B 와 비교하면 최대 65%까지 감소하였다. 따라서 유한요소해석을 통해 T6 및 극저온 열처리의 각 단계별 잔류응력에 대한 정량적인 예측이 가능하였다.

### 3.2 잔류응력 측정 및 비교

본 연구에서는 잔류응력을 측정하기 위해 XRD 측정법을 적용하였다. XRD 측정법은 비파괴검사로 정확한 잔류응력을 측정할 수 있기 때문에 많은 연구에서 적용되었다.<sup>(12,13)</sup>

측정조건은 알루미늄 재료에 대표적으로 사용되는 Cu-Ka(Wave length = 1.5405 Å)의 X 선을 적용하였다. 또한 Al6061 의 경우 137.4°에서 회절 피크가 나타내는 점을 고려하여 2θ 의 측정 각 범위를 132°~142°로 설정하였다. 또한 유한요소해석과 동일한 축 방향의 잔류응력을 측정하였으며, 측정된 위치도 유한요소해석과 동일한 위치( $\sigma_{max}$ )에 대해 측정하였다.

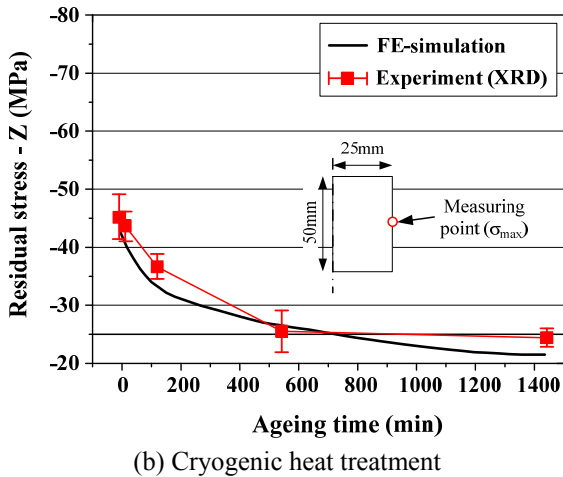
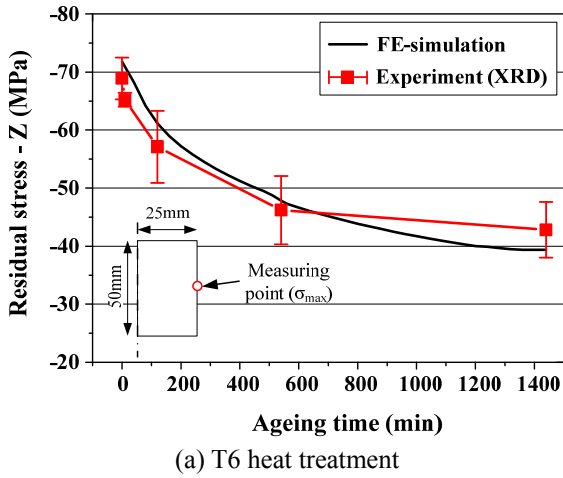


Fig. 9 Comparison of XRD and FEM for residual stress according to artificial ageing time

Fig. 9 에 T6 와 극저온 열처리에 대해 XRD 를 통해 측정된 잔류응력 결과와 유한요소해석을 이용한 예측된 잔류응력 결과를 각각 비교하여 나타내었다. XRD 측정결과, 수냉으로 인해 가장 높은 압축잔류응력이 발생한 Point A 에서의 잔류응력은 인공시효를 적용함에 따라 약 33% 감소하였다. 또한 Uphill quenching 만 적용한 Point B 의 잔류응력은 약 49%, Uphill quenching 후 인공시효한 Point B'의 잔류응력은 약 67%까지 압축잔류응력을 제거할 수 있었다.

이에 따라 Al6061 의 경우 수냉으로 인해 과도하게 발생된 잔류응력은 끓는 물을 이용한 극저온 열처리를 적용하여 최대 67%까지 제거가 가능하였음을 확인할 수 있었다. 또한 Uphill quenching 시, 재료를 끓는 물보다 신속하게 가열할 수 있는 매체를 사용하면 더욱 우수한 잔류응력 제거 효과를 가질 것으로 예상된다.

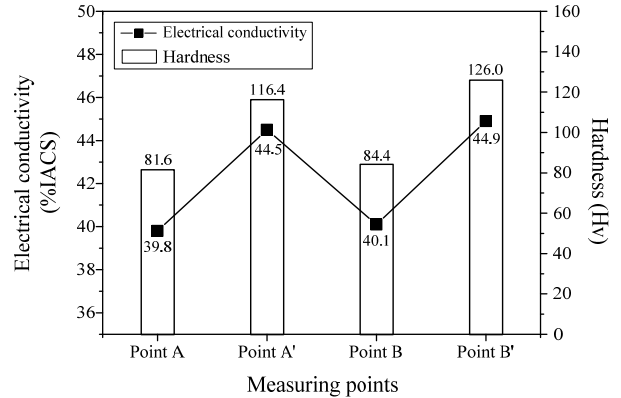


Fig. 10 Results of electrical conductivity and hardness for Al6061 alloy according to heat treatment conditions

잔류응력을 비교결과, 유한요소해석과 XRD 결과에서 동일하게 모두 인공시효로 인해 잔류응력은 감소하였다. T6 및 극저온 열처리의 각 단계별에서 잔류응력이 제거되는 양상이 XRD 와 유한요소해석이 일치하였다. 따라서 유한요소해석을 이용한 잔류응력 예측결과의 신뢰성과 타당성을 확보할 수 있었다.

#### 4. 물성평가 및 TEM 관찰

##### 4.1 전기 전도도 및 경도 측정

본 연구에서는 T6 와 극저온 열처리에 대해 석출물 생성여부에 따른 기계적 특성을 확인하기 위해 전기 전도도 및 경도를 측정하였다. 전기 전도도와 경도는 동일 열처리 조건에 대해 각각 5 회 측정하여 평균값으로 산출하였다. 전기 전도도의 경우는 순 구리가 100% IACS 일 때 그 상대적인 값으로 나타내었으며, 경도는 Vickers(Hv) 측정법을 사용하였다.

일반적으로 금속 재료는 용체화처리 시 고용도가 높을수록 전기 전도도는 감소하는 반비례 관계를 가지며, 인공시효 시 석출물 생성이 증가할수록 전기 전도도가 증가하는 비례 관계를 가진다.<sup>(14,15)</sup> 이는 인공시효하지 않은 Point A, B 의 경우가 인공시효한 Point A', B' 보다 석출물이 생성되기 시작하는 G. P. Zone 이 재료의 전반에 걸쳐서 형성되며, 이러한 G. P. Zone 은 전자들을 산란(Scattering)시키는 성질을 가지기 때문에 인공시효하지 않은 경우가 낮은 전기 전도도를 가진다. 또한 인공시효됨에 따라 G. P. Zone 으로부터 Mg, Si 등 용질원자들이 석출되어 정제효과(Purification effect)로 인해 전기 전도도는 증가한다.<sup>(16)</sup>

Fig. 10 에 T6 (Point A, A')와 극저온 열처리(Point B, B')의 각각의 단계별에 대하여 전기 전도도 및 경도를 측정된 결과를 각각 나타내었다. 측정결과, Point A 와 B 에서 인공시효함에 따라 각각 전기 전도도와 경도는 매우 증가하였다.

또한 T6 열처리와 극저온 열처리에 대하여 단계별로 각각 비교하면 Point B 가 Point A 보다 0.3% IACS, Point B'가 Point A' 보다 0.4% IACS 미소하게 높은 전기 전도도를 가졌다. 또한 경도를 측정된 결과에서도 Point B 가 Point A 보다 2.8 Hv, Point B'가 Point A' 보다 9.6 Hv 가량 다소 높은 값을 가졌다. 이는 극저온 열처리의 경우, 극저온까지 냉각하고 다시 끓는 물로 가열하는 과정에서 받은 열에너지로 인해 석출물이 생성되어 다소 높은 전기 전도도와 경도를 가지는 것으로 판단된다. 또한 Point B'가 Point A' 보다 높은 전기 전도도 및 경도를 가지는 점도 Uphill quenching 시 끓는 물의 영향으로 인해 나타난 결과라고 판단된다.

하지만 T6 와 극저온 열처리에 대해 전기 전도도 및 경도를 각각 측정된 결과, 극저온 열처리를 적용함에 따라 경도 등의 기계적 특성이 미소하게 증가하였으나, 획기적인 향상은 기대할 수 없었다.

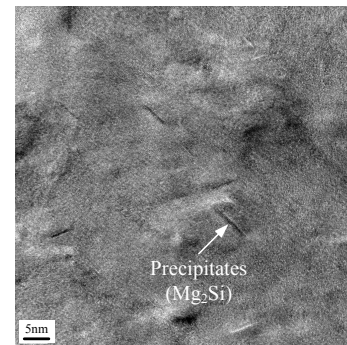
#### 4.2 TEM 관찰 및 XRD 성분 분석

T6 와 극저온 열처리에 대해 각각 TEM 을 관찰하여 석출물의 분포 및 크기를 확인하였다. 석출물을 관찰한 열처리 조건은 비교적 석출물의 생성이 많을 것으로 예상되는 T6 열처리의 Point A'와 극저온 열처리의 Point B'에 대해서 각각 관찰하였다. 시료는 집속이온빔(Focused ion beam; FIB)을 이용하여 두께를 100  $\mu\text{m}$  이하로 가공하여 관찰하였다.

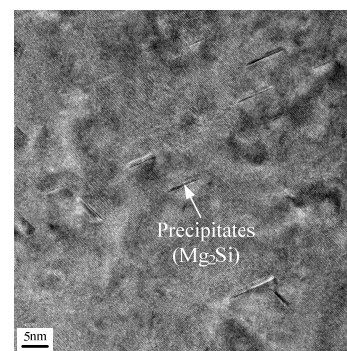
또한 Al6061 석출물의 성분을 분석하기 위해 XRD 를 이용한 회절 분석을 수행하였다. 측정조건은 잔류응력 측정과 동일한 X 선을 이용하였으며, 회절 각  $2\theta$  는  $10^\circ \sim 100^\circ$  까지 고려하였다. 그리고 Scan speed 는 0.2 sec/step, Increment 는 0.02sec 로 설정하였으며 각각의 성분에 대한 고유의 회절 피크는 PCPDFWIN S/W 를 통해 확보하였다.

먼저 Fig. 11 에 T6 및 극저온 열처리에 대한 TEM 관찰결과를 각각 나타내었다. 관찰결과 T6 와 극저온 열처리 모두 Al-Mg-Si (6XXX)계 합금에서 일반적으로 나타나는 침상(Needle shape) 석출물이 생성되었으며, 또한 석출물은 5~10 nm 의 크기를 가지는 것으로 확인할 수 있었다.

Fig. 12 과 13 에 T6 및 극저온 열처리에 대한 XRD 회절 결과를 각각 나타내었다.  $10^\circ \sim 100^\circ$  까지



(a) T6 heat treatment (Point A')



(b) Cryogenic heat treatment (Point B')

Fig. 11 TEM micrographs of Al6061 alloy for T6 and cryogenic heat treatment

측정된  $2\theta$  회절 각도에서 대부분이 Al( $2\theta$ :  $38.47^\circ$ ,  $44.72^\circ$ ,  $65.10^\circ$ ,  $78.23^\circ$ ) 성분이 주를 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 Al6061 의 석출물로 예상되는  $\text{Mg}_2\text{Si}$  의 고유 회절 피크가  $24.10^\circ$  와  $39.86^\circ$  에서 주로 나타내는 점을 고려하면 T6 및 극저온 열처리의 인공시효 전/후에 따라 다른 양상을 보였다. 특히 인공시효를 적용한 Point A'와 B'가 인공시효 하지 않은 Point A 와 B 보다  $24^\circ$  와  $40^\circ$  부근에서 상대적으로 높은 회절 피크를 확인할 수 있었다. 따라서 인공시효를 통해  $\text{Mg}_2\text{Si}$  의 석출물이 생성되었다고 할 수 있으며, 이를 통해 TEM 에서 관찰된 석출물을 검증할 수 있었다.

또한 석출물이 생성된 양을 판단할 수 있는 회절 강도(Intensity)의 세기가 T6 와 극저온 열처리에 따른 차이는 확인할 수 없었으며, 이는 TEM 으로 석출물을 관찰한 결과와 일치하였다. 이에 따라 TEM 관찰과 XRD 성분 분석을 한 결과, T6 와 비교한 극저온 열처리는 석출물의 크기 및 분포 등의 미세조직 변화에 대한 영향은 크게 없는 것으로 확인할 수 있었다.

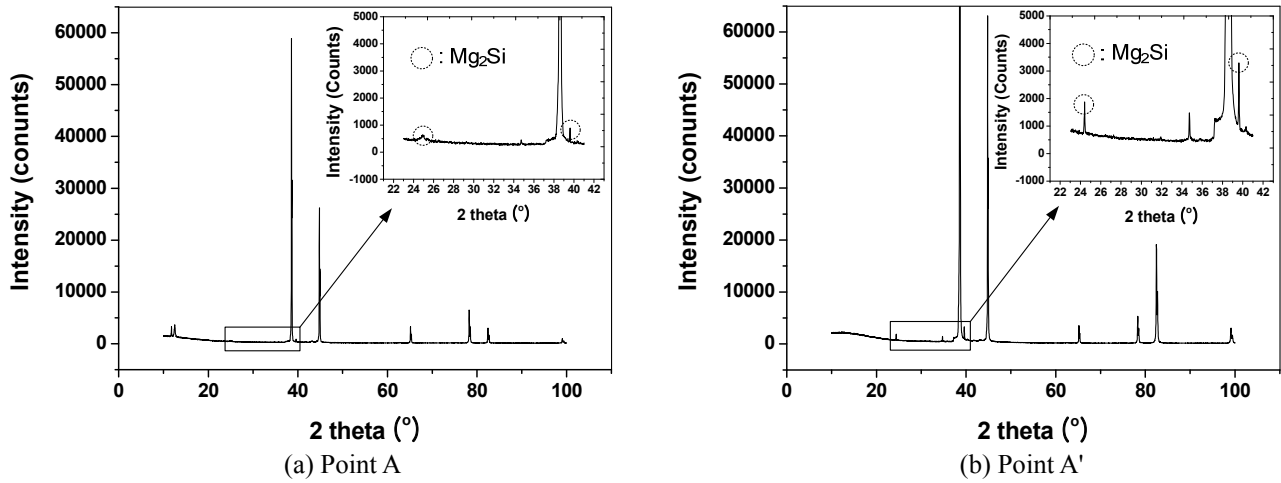


Fig. 12 Results of XRD analysis for T6 heat treatment

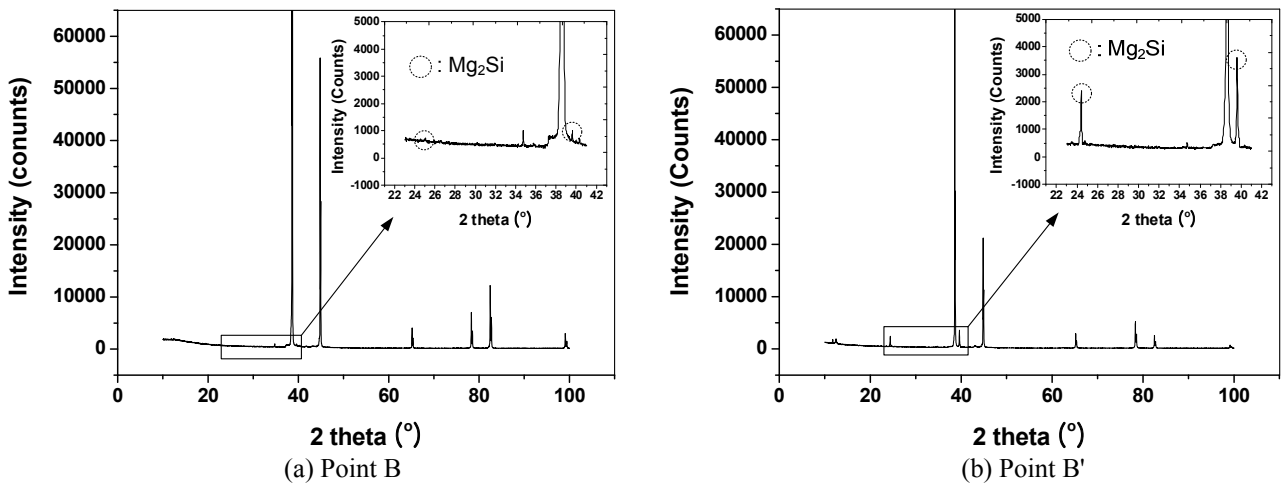


Fig. 13 Results of XRD analysis for cryogenic heat treatment

5. 결론

본 연구에서는 Al6061의 열처리 잔류응력을 제거하기 위해 극저온 열처리를 적용하여 유한요소 해석 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) T6 및 극저온 열처리 실험을 수행하여 유한요소 해석에 필요한 각 열처리 단계별 대류 열전달 계수를 확보하였다. 또한 극저온 열처리의 Uphill quenching 시 액체질소의 냉각특성 및 끓는 물의 가열특성을 파악하였다.

(2) T6와 극저온 열처리에 대해 각각 유한요소 해석을 수행하여 잔류응력을 예측하고 예측된 결과는 측정된 결과와 비교하여 해석결과의 신뢰성

및 해석기법의 타당성을 확인하였다.

(3) 잔류응력 측정결과, 용체화처리 시 수냉으로 인해 발생된 잔류응력은 극저온 열처리를 적용함에 따라 최대 67%까지 제거할 수 있었다.

(4) Al6061의 T6와 극저온 열처리에 대해 각각 전기 전도도와 경도를 측정하고 TEM 관찰 및 XRD 성분 분석을 수행한 결과 극저온 열처리는 기계적 특성 저하 및 조직변화 없이 잔류응력을 획기적으로 제거할 수 있는 열처리 방법이다.

후기

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



## 참고문헌

- (1) Jang, H. S., 1997, "The Handbook of Advanced Aluminum Technology," *Hanlimwon*, pp. 921~933.
- (2) Myhr, O. R., Grong, O. and Andersen, S. J., 2001, "Modelling of the Age Hardening Behavior of Al-Mg-Si Alloys," *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 65~75.
- (3) Park, S. H., Koo, S. H., Lee, B. U. and Eun, I. S., 1997, "Analysis and Measurement of Residual Stress of Al7075 Ring Rolls after Quenching and Stress Relieving," *Journal of the Korean Society Propulsion Engineers*, Vol. 1, No. 1, pp.104~110.
- (4) Dolan, G. P. and Robinson, J. S., 2004, "Residual Stress Reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017A-T4 Aluminum Alloys Using Quenching Factor Analysis," *Jour. Mater. Pro. Tech.*, Vol. 153, pp. 346~351.
- (5) Kim, H. S. and Lee, D. N., 1978, "Relief of Residual Quenching Stresses in 2024 Aluminum Alloy," *Kor. J. Met. Mater.*, Vol. 16, No. 4, pp. 233~242.
- (6) Ian, M., 2004, "Residual Stress Reduction During Quenching of Wrought 7075 Aluminum Alloy," Master's Thesis.
- (7) Lados, D. A., Apelian, D. and Wang, L., 2010, "Minimization of Residual Stress in Heat-Treatment Al-Si-Mg Cast Alloys Using Uphill Quenching: Mechanical and Effects on Static and Dynamic Properties," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, pp. 3159~3165.
- (8) Hill, H. N., Barker, R. S. and Willey, L. A., 1960, *ASM*, Vol. 52, pp.657~674.
- (9) Ko, D. H., Kim, T. J., Lim, H. J., Lee, J. M. and Kim, B. M., 2011, "FE-simulation and Measurement of Residual Stress for Al6061-T6 Heat Treatment," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 35, No. 7, pp. 717~722.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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," *Jour. Mater. Pro. Tech.*, Vol. 207, pp. 211~221.
- (13) Berger, M. C. and Gregory, J. K., 1999, "Residual Stress Relaxation in Shot Peened Timetal 21s," *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 263, pp. 200~204.
- (14) Yamamoto, Y., Sasaki, G., Yamakawa, K., Ota, M., 2000, "High-Strength and High Electrical Conductivity Copper Alloy for High-Pin-Count Leadframes," *Hitachi Cable Review*, No. 19, pp. 65~70.
- (15) Rosen, M., 1989, "Eddy Current Analysis of Precipitation Kinetics in Aluminum Alloys," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 20A, pp. 605~610.
- (16) Salazar-Guapuriche, MA, Zhao, YY., Pitman, A. and Greene, A., 2006, "Correlation of Strength with Hardness and Electrical Conductivity for Aluminum Alloy 7010," *Material Science Forum*, Vols. 519~521, pp. 853~858.