

압출 출구 온도에 따른 Al 6061 합금의 표면 재결정층 두께 변화 및 기계적 특성 변화

김수빈¹, 박태희², 김현기³, 이상목⁴, 김희국[#]

The Thickness of Recrystallization Layer and Mechanical Properties According to Extrusion Exit Temperature

S. B. Kim, T. H. Park, H. G. Kim, S. M. Lee, H. K. Kim

(Received August 9, 2021 / Revised August 30, 2021 / Accepted September 6, 2021)

Abstract

When extruding Al6061 alloys, deformation energy is deposited inside the extruded alloy depending on the deformation and the temperature of extrusion. This creates a Peripheral Coarse Grain (PCG) on the surface, where relatively more deformation energy of the extruded alloy has been accumulated. Furthermore, since the deformation of materials continues while the materials recrystallize, it is important to examine the effect of deformation energy on dynamic recrystallization in the process of extruding Al alloys along with their microstructure. Prior studies explain the theory behind PCG growth though quantitative analysis on PCG growth of Al alloys during extrusion processes has not yet been addressed. This study aims to measure the generated PCG thickness which determines the correlation between extrusion outlet temperature and its effect on mechanical properties. Surface structure observations were performed using Optical Microscope (OM) and mechanical properties were evaluated through tensile strength and hardness measurement. Throughout this study, we endeavored to find the optimum condition of extrusion exit temperature of Al6061 and confirmed improved reliability. This study describes the effect of the complex process variables such as exit temperature on the thickness of PCG layer for the Al6061 alloy using the 200 tons extrusion press. We therefore, discovered that the PCG layer thickness was 117 μm at temperatures between 460 $^{\circ}\text{C}$ to 520 $^{\circ}\text{C}$.

Keywords : Al6061, Extrusion, Exit Temperature, Peripheral Coarse Grain, Mechanical Properties

1. 서 론

최근 산업 환경에서 고강도 및 경량화에 대한 수요 증가로 인해 Al 합금의 산업적 활용이 증가되고 있다[1,2,3]. 본 연구에서 사용하는 Al6061은 Al-Mg-Si 계 합금[4]으로 용접성과 내식성이 양호[5]하여 형

재 및 관 등의 구조물에 널리 이용되고 있다. 또한 SS400 강에 상당하는 강도를 나타내 철탑, 크레인 등에도 사용된다[6]. 이와 같은 고강도, 경량화된 부품 생산을 위해서는 압출 공정을 요한다.

하지만 Al6061과 같은 고강도 Al 합금을 압출시에는 표면 결함 중 하나인 비이상 재결정 조직(Peripheral Coarse Grain, PCG)이 일반적으로 관찰된다[7]. Al 합금 압출 시 재료는 하중을 받으면서 변형 에너지가 축적되며, 상대적으로 더 많은 변형이 일어나는 압출재 표면부에 PCG를 생성하게 된다[3].

1. 인하대학교 첨단소재공정공학과, 대학원생

2. 인하대학교 첨단소재공정공학과, 대학원생

3. 인하대학교 첨단소재공정공학과, 대학원생

4. 인하대학교 첨단소재공정공학과, 대학원생

Corresponding Author : IMIS INHA university,

E-mail: hkim1058@inha.ac.kr ORCID : 0000-0002-7217-2640

표면부에 발생하는 PCG의 성장은 제품의 기계적 특성이나 후공정에 있어 큰 영향을 끼친다[8]. 그 예로 Orange peel finish 결함을 유발하고 Anodizing 공정 후 표면이 매끄럽지 못한 현상을 나타낸다[9].

압출 현장에서는 주로 압출재 표면 상태를 육안 검사를 통해 불량 여부를 판단한다. 작업자의 경험에 의존한 불량 판단은 압출재 미세조직적 특성이 고려되지 않아 압출 후공정에서 위와 같은 문제를 야기한다. 이러한 특징들로 인해 압출재의 내부 특성이 고려된 Al 합금의 압출 공정에 관한 연구는 필수적이다. 그러므로 본 연구에서는 미세조직 관찰을 통해 표면 결함의 하나인 PCG를 관찰하고자 하였다.

Al 합금의 압출 공정에서 출구 온도는 빌렛, 컨테이너, 금형의 온도 및 램 속도 등이 조합되어 얻어지는 제품의 표면온도[10]로 압출 공정의 복합적 결과물이다. 압출 출구 온도에 대한 평가는 연구 내용에서 가장 중요한 요소이며, 제품 표면의 PCG 층에 많은 영향을 끼치는 요소다. 그러나 현재까지 출구 온도에 따른 PCG와의 연관성에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 열간 압출 공정 후 생성된 PCG층 두께 및 압출 출구 온도와 상관관계를 파악하여 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 압출

실험에 사용된 Al6061 합금은 Table 1과 같은 화학 조성을 가진다. 압출 실험시에 사용된 빌렛은 직경 54mm, 길이 150mm의 실린더 형상으로 가공되었다.

Table 2와 같이 컨테이너 온도, 다이 온도, 압출비, 램 스피드 등의 압출 매개 변수를 고정하고 빌렛 온도를 390 °C에서 510 °C로 변화시켜 압출 출구 온도를 제어하였다.

Fig. 1g을 통해 압출 모식도를 표현하였고, 본 실험에서는 램 진행 방향과 압출 방향이 동일한 직접 압출을 사용하였다. 출구 온도의 측정은 접촉식 온도계를 이용하였고, Table 1의 ①과 ⑦ 구간을 측정하여 총 8번의 압출, 16개의 출구온도 조건을 도출하였다.

Table 1 The chemical composition of Al6061 in wt%

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
Content	0.4~0.8	0.7	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2
Alloy	Zn	Cr	Ni	Ti	Al
Content	0.25	0.04~0.35	0.02	0.15	remain

Table 2 Press condition

Container Temp(°C)	450
Die Temp(°C)	450
Ram Speed(mm/sec)	10
Extrusion Ratio	25.45 : 1

2.2 미세조직 관찰 및 기계적 특성 평가

압출재의 출구 온도에 따른 미세조직 변화를 관찰하기 위해 광학 현미경(Optical Microscope, OM)을 이용하였다. Fig. 1과 같이 압출재를 7개의 구간으로 나누었고 ①, ⑦ 구간의 압출재를 인장 시험에 사용하였으며 ②, ⑥ 구간에서 채취한 시편을 경도 및 미세 조직 관찰에 사용하였다. 시편은 미세연마 후 전해 연마-에칭(Electrolytic Polishing Machine) 장비를 활용하여 30 V, 120 sec 조건[11]에서 Barker 용액(H₂O 200 mL, HBF₄ 5 mL)[12]을 사용하여 에칭하였다.

인장 강도 및 경도 측정을 위해 각 측정 조건에 맞는 시편으로의 압출재를 ASTM E 8에 준하는 규격으로 가공한 후 SHIMADZU/AGS-X 장비를 이용하여 5mm/min의 속도로 인장하였다. 준비된 경도 시편의 경우 ASTM E 384-09 규격에 준해 비커스 경도 측정을 수행하였다.

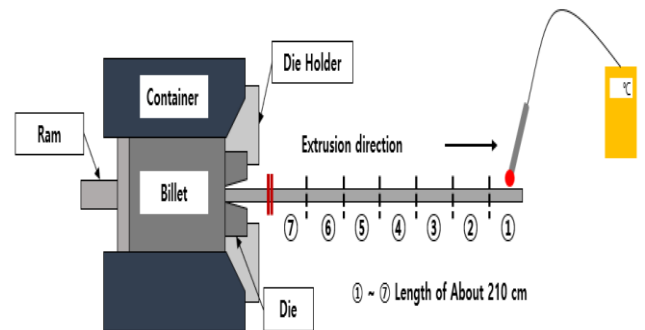


Fig. 1 Diagram of extrusion

3. 실험결과 및 고찰

3.1 출구온도에 따른 미세조직 관찰

미세 조직의 관찰은 출구온도에 따라 진행되었고 각 미세조직에서 나타난 PCG 층의 두께 평균을 측정하였다. 출구온도별 총 4개의 시편을 관찰하였으며, PCG 두께에 따른 결과 그래프에는 4개의 시편을 관찰한 평균을 나타냈다.

3.1.1 초기 미세 조직

Fig. 2 는 압출재가 가공되기 전의 미세조직을 관찰한 것으로 가공 전 빌렛의 미세구조는 100 μm 에서 150 μm 사이의 비교적 균일한 크기를 갖는 등축 정 결정립으로 이루어진 것을 알 수 있다.

변형률이 증가하게 되면 압출재 내부로부터 표면에 걸쳐 유효변형률의 구배가 존재하게 된다. 이러한 유효변형률의 구배에 의해 압출재 표면에 PCG 층이 형성된 것으로 사료된다[15].

따라서 본 연구에서 나타나는 PCG 층의 성장은 상기의 두 메커니즘에 기인하여 나타나는 것으로 예상하였다.

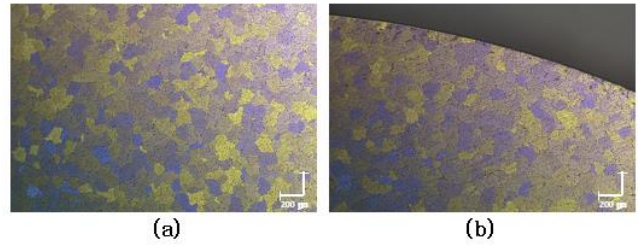


Fig. 2 (a) Billet-center (b) Billet-edge

3.1.2 압출 출구 온도에 따른 미세 조직

압출 출구 온도에 따른 미세조직을 관찰한 결과, 빌렛의 열간 소성 변형으로 인한 PCG 층이 나타난 표면과 Fig. 3 와 같이 연신 된 결정립 형태를 나타낸 내부 조직을 확인할 수 있다. Fig. 4 를 통해 16 개의 출구온도별 PCG 층의 관찰 결과를 확인할 수 있다. 또한, Fig. 4 에 나타난 PCG 층 사진은 출구온도 별로 관찰한 4 개의 시편 중 1 개의 대표시편을 나타낸 것이다.

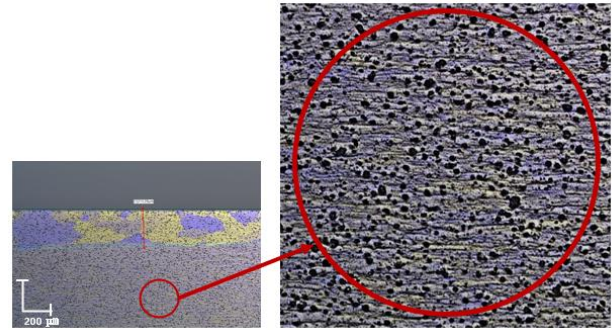


Fig. 3 Elongated Grain Structure

일반적으로 열간 소성 변형 과정을 거친 Al6061 에서 나타나는 PCG 층의 생성은 아직 완전히 연구 되지 않았지만 이론은 매우 큰 전단 변형과 높은 변형 온도의 조합이 있는 표면층의 특성을 반영하여 연구되고 있는 실정이다[13]. 이에 근거하여 본 연구에서의 PCG 생성은 지금까지 연구되어 온 다음과 같은 두 가지의 메커니즘으로 설명할 수 있다.

첫 번째는 연속재결정과 기하학적 재결정이다 [13,14]. 두 가지의 재결정 메커니즘은 재료가 높은 변형률로 심하게 가공되었을 경우 변형된 결정립 내부에서의 전위 재배열과 결정립계로의 전위의 흡수 또는 결정립계의 상호접촉에 의하여 일어나는 것으로 알려져 있다[15].

두 번째는 표면과 내부의 유효 변형률의 구배[15] 이다. 본 연구에서는 25.45:1 의 매우 높은 압출비로 압출을 수행하였으며, 이에 따라 압출재 표면에 인가된 금형과의 마찰로 인해 유효변형률의 구배를 더욱 크게 만드는 원인으로 작용한다. 즉, 열간 압출 공정으로 인한 전단 변형에 의해 압출재 표면의

3.1.3 압출 출구온도에 따른 비이상 재결정 조직(Peripheral Coarse Grain, PCG) 두께 변화

Fig. 5은 출구온도에 따른 PCG 층의 두께를 측정하여 나타낸 그래프이다. 이를 통해 PCG 두께의 변화가 급격히 나타난 온도를 기준으로 세 개의 구간을 분류하였다.

일반적인 금속재료에서의 재결정은 결정의 변형을 해방시켜 결함이 없는 정합 된 결정구조로 원자를 재배열하는 과정이다. 그러나 Al 합금과 같이 동적 재결정이 일어나는 경우 재결정 중에도 재료의 변형이 계속 진행되어 잔류 응력이 쌓이고, 재료 전체적으로 변형에너지는 축적된다[3]. 변형에너지는 물체가 외력 또는 체적력을 받을 때 물체 내부에 축적되는 에너지로 Al6061 의 PCG 성장의 구동력으로 작용하게 된다. 이에 각 구간에 대한 PCG 성장 메커니즘은 다음에 제시하는 바와 같다.

(1) 395 °C에서 455 °C 구간에서 평균 PCG 층 두께는 182 μm 이다. 낮은 출구 온도를 얻기 위해서는 빌렛 온도를 상대적으로 낮은 온도에서 가열·유지하여 공정을 진행하게 된다. 저온의 빌렛은 압출 공정 시 큰 힘이 작용하게 되고 표면에 마찰이 커져 큰 전단 응력의 발생으로 이어지게 된다. 전단 응력이 해소되지 못하면 잔류 응력으로 남게 되고 재료는 이를 해소하기 위한 작용을 하게 된다.

이 구간에서는 압출 시 큰 전단응력의 발생과 다른 두 구간과 비교하여 상대적으로 낮은 출구 온도로 인해 공정 중 발생한 소성 변형량이 회복되지 못하였고, 이는 PCG 성장의 구동력으로 작용[16]하여 표면 PCG 층 두께가 두껍게 나타난 것으로 사료된다[10].

(2) 460 °C에서 520 °C 구간에서는 평균 PCG 층 두께가 112 μm 로 나타났다. 이는 공정 중 열적 활성화로 인해 변형에너지를 해소함으로써 상대적으

로 적은 잔류 응력이 남게 되었고, PCG 성장의 구동력이 작아지게 되어 PCG 두께는 감소하였을 것으로 판단하였다[10,17,18].

(3) 530 °C이상의 출구 온도 구간에서 평균 PCG 층 두께는 197 μm 로 나타났다. 고온에서는 내부 축적 에너지 값이 낮지만 높은 온도로 인하여 열적 활성화가 가속된다[18]. 따라서, 열적 활성화의 가속은 PCG 성장의 구동력으로 작용하였고, 이로 인해 고온의 온도 구간에서 재결정층이 두껍게 형성된 것이라 판단하였다.

3.2 출구온도에 따른 기계적 특성 관찰

본 연구에서는 PCG 층의 두께에 따라 기계적 특성이 어떠한 영향을 받는지에 대한 상관관계를 알아보고자 하였다. 따라서 다음과 같이 PCG 층 두께 변화 구간을 기준으로 기계적 강도 변화를 관찰하였다.

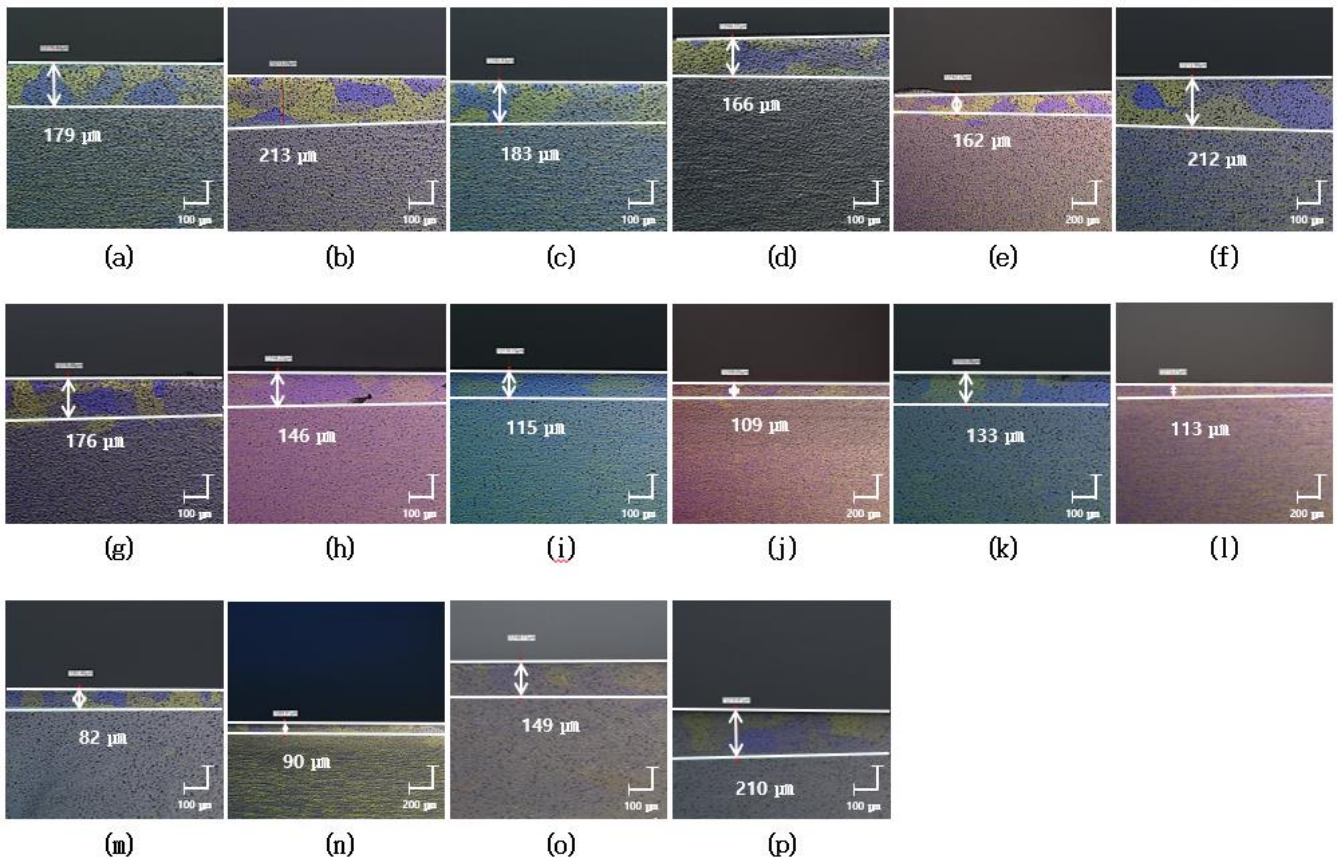


Fig. 4 Micro-structure according to exit temperature (°C) (a) 395 (b) 405 (c) 420 (d) 425 (e) 435 (f) 450 (g) 455 (h) 460 (i) 480 (j) 495 (k) 500 (l) 510 (m) 515 (n) 520 (o) 530 (p) 540

(1) 395 °C에서 455 °C 구간에서 평균 인장 강도는 164 MPa, 평균 경도는 37 Hv 로 압출 시 다른 두 구간과 비교하여 상대적으로 낮은 기계적 특성을 보였다. 이는 재결정으로 인한 결정립 크기의 성장, 입계 면적의 감소로 인장 강도 및 경도가 낮게 측정된 것으로 판단된다. Fig. 6 을 통해 결정립의 성장 결과를 확인할 수 있다. 이와 같은 결정립 크기가 기계적 성질에 미치는 영향은 Hall-Petch 의 실험식으로 널리 알려져 있다[20].

(2) 460 °C에서 520 °C 구간에서 평균 인장 강도는 206 MPa, 평균 경도는 53 Hv 로 첫 번째 구간의 평균과 확연히 차이 나는 결과를 얻었다. 이 구간에서 나타난 얇은 PCG 층 두께는 상대적으로 적은 재결정 성장의 결과이고 이로 인해 경도와 인장 강도 등의 기계적 성질이 높아짐을 알 수 있다. 또한 이 결과를 통해 출구온도에 따라 발생한 PCG 층의 두께가 Al6061 의 기계적 특성에 영향을 미치는 것으로 판단하였다.

(3) 530 °C 이상의 출구 온도 구간에서 평균 인장 강도는 201 MPa, 평균 경도는 50.5 Hv 로 두 번째 구간과 비슷한 기계적 특성을 보임을 알 수 있다. 이 구간에서는 PCG 층 두께가 증가함에도 불구하고 인장 강도나 경도에는 큰 변화가 나타나지 않았다.

이는 Al6061 합금의 주요 공정상인 Mg₂Si 상에 의해 영향을 받은 것으로 사료된다. Mg₂Si 상은 빌렛을 가열하는 과정에서 α-Al 상으로 용해되어 Al 합금의 고용체 강화 효과를 발생하게 한다. 560 °C 미만의 온도에서 Al 합금의 가열·유지 시에 온도가 증가할수록 고용체 강화 효과가 개선됨이 선행 연구[21] 결과로 증명되었다.

따라서, 경도와 인장강도의 증가는 선행된 연구 결과를 바탕으로 Mg₂Si 상이 α-Al 상으로 용해되어 이루어진 고용체 강화 효과로 인한 결과라 사료된다.

앞서 살펴본 선행 연구 결과를 바탕으로 530 °C 이상의 출구 온도에서 나타난 인장강도와 경도측정의 결과는 PCG 층으로 인한 기계적 특성의 감소 영향보다 고용체 강화 효과가 주 영향으로 작용하여 두꺼운 PCG 층에도 인장 강도나 경도 특성이 감소하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 7 과 Fig. 8 에서는 Al6061 합금의 압출 출구온도에 따른 경도와 인장강도를 그래프로 나타냈다.

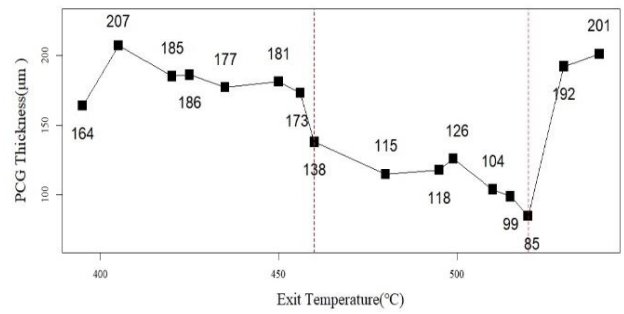


Fig. 5 PCG thickness according to exit temperature

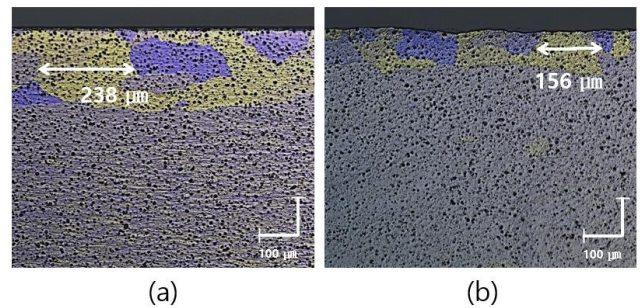


Fig.6 Comparison of grain size (a) Section.1 (b) Section.2

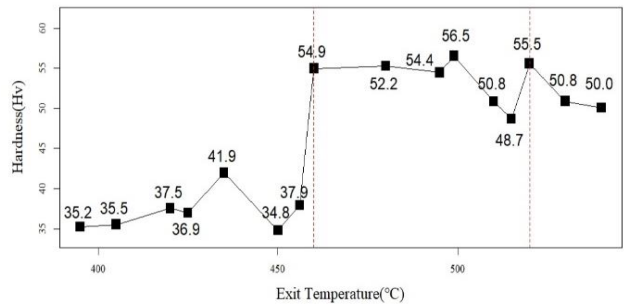


Fig.7 Vickers-hardness according to Exit Temperature

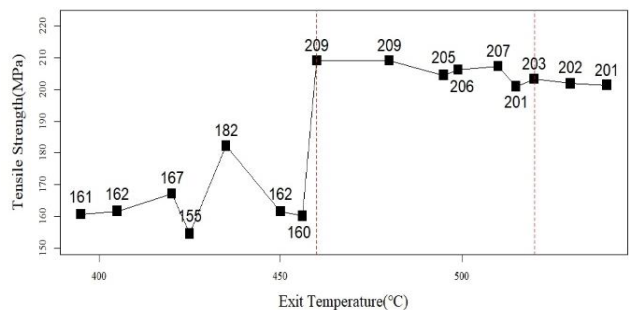


Fig.8 Tensile Strength according to Exit Temperature

4. 결 론

Al6061 합금을 압출하여 출구 온도를 기준으로 PCG 층과 기계적 특성의 상관관계를 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Al6061의 압출 시 출구온도에 따라 PCG 층의 변화를 확인할 수 있었다. PCG 층의 급격한 변화가 나타난 온도를 기준으로 PCG 층의 성장 메커니즘을 제시하였고 주어진 압출 조건에서 압출 출구온도가 460 °C에서 520°C일 때, 평균 112 μm 의 얇은 PCG 층을 얻을 수 있었다.

① 출구온도 395 °C에서 455 °C 범위는 상대적으로 저온의 온도 구간으로 재료가 받은 큰 전단 응력을 해소하지 못하여 잔류 응력이 남아 재결정 성장의 구동력으로 작용하였다. 이에 따라 압출재 표층부에 두꺼운 PCG 층을 형성하였고 이는 기계적 특성 저하의 결과를 나타냈다.

② 460 °C에서 520 °C 범위의 출구 온도구간에서는 저온 영역에서 보다 높은 온도의 빌렛이 압출에 사용됨으로써 압출 시 재료가 받는 힘이 작아지게 되고 열적 활성화로 인해 전단 응력이 해소되었다. 이로 인해 PCG 층의 두께가 가장 얇게 관찰되었고 상대적으로 향상된 기계적 특성을 얻을 수 있었다.

③ 고온 영역의 530 °C 이상의 출구 온도에서는 열적 활성화가 가속되어 재결정 성장의 구동력을 작용하였고 이로 인해 PCG 층의 두께를 증가시켰다. 하지만 두꺼운 PCG 층에 비해 높은 기계적 특성을 관찰하였고 이는 Al6061의 주요공정상인 Mg_2Si 로 인한 고용체 강화 효과의 결과라 사료된다.

(2) Al6061 압출 시 표층부에 발생하는 PCG 층은 제품의 기계적 특성이나 후공정에 있어 큰 영향을 끼친다. 그러므로 압출 공정 시 이를 제어하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서 살펴본 출구 온도에 따른 PCG 층과 기계적 특성과의 상관관계를 통해 주어진 압출 조건에서 Al6061 합금의 압출 시 460 °C 미만, 520 °C 이상의 출구온도 제한을 통해 압출 공정을 진행하는 것이 PCG 층 감소에 가장 도움이 될 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원

으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구임(No. 1415168922)

본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0008425, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)

REFERENCES

- [1] E.A.Starke, J.T. Staley, Progress in Aerospace Sciences, Application of modern aluminum alloys to aircraft, Vol.32, No. 2-3, pp.131-172(1996).
[https://doi.org/10.1016/0376-0421\(95\)00004-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6)
- [2] SH.Cho, JY.Jang, Journal of the KSMTE, Strength Analysis of Die-cast Aluminum-alloy Brake Pedals for use in Lightweight Cars, Vol.25, No.2, pp.138-142(2016).
<https://doi.org/10.7735/ksmte.2016.25.2.138>
- [3] HT.Kim, KISTI, Limitations and Challenges of Al Alloy Plastic Working, pp.329-336(2014).
- [4] Tasuo SATO, J.Japan Institute of Light Metals, Kenji MATSUDA, History of research and development of Al-Mg-Si alloys, Vol.53, No.11, pp.449-453(2003).
<https://doi.org/10.2464/jilm.53.449>
- [5] JM.Kim, KD.Seong, JH.Jun, KT.Kim, WJ.Jung J.Korea Foundry Society, Variation of Fluidity and Mechanical Properties of Al-Mg Alloys with the Addition of Si, Mn, and Zn, Vol.24, No.3, pp.138-144(2004).
- [6] KH.Lee, BS.Seo, JM.An, MS.Kang, SJ.Choi, SM.Yang, HY.Kang, JS.Kwon, The Korean Society Of Automotive Engineers, The Small Crane Design of Weight Lightening with ATOS80 and Al6061-T6, No.4, pp.48-49(2016).
- [7] Y. Demirci, Z.Zorlu, S.Mutlu Ayan, K.Cakir, O.Keles, J. Aluminum Extrusion, Peripheral Coarse Grain Formation in High Silicon Containing AlMgSi Alloys, Vol.2, pp.15-20(2015).
- [8] T.Pettersen, S.Abtahi, J.A.Saeter, T.Fure, H.E.Ekstrom, Proc.9th.Int.Conf.onAluminum Alloys, Effect of Material Flow during Extrusion on Recrystallization of AA6082, pp.457-463(2004).
- [9] W.T.Jinan, A.F.Padilha, Int. Eng. J, Microstructure evolution during the extrusion of a 6351 aluminum alloy tube, Vol.72, No.3, pp.479-484(2019).

- <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720174>
- [10] KH.Oh, YS.Min, SW.Park, GW.Jang, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., The Thickness of Recrystallization Layer during Aluminum Extrusion Process, pp.266-269(2005).
- [11] George F.Vander Voort, ASM, Metallography and Microstructures, Vol.9(2004). ISBN electronic 978-1-62708-177-1
- [12] Hakem.M, Lebaili.S, Mathieu.S, Miroud.D, Lebaili.A, Cheniti.B, Effect of microstructure and precipitation phenomena on the mechanical behavior of AA6061-T6 aluminum alloy weld, Vol.102, pp.2907-2918(2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03401-1>
- [13] Y.Mahmoodkhani, J.Chen, M.A.Wells, N.C.Parson, Metall Mater Trans A, The Effect of Die Bearing Geometry on Surface Recrystallization During Extrusion of an Al-Mg-Si-Mn Alloy, Vol.50, pp.5324-5335(2019).
- [14] SK.Kim, YO.Yoon, DI.Jang, HH.Jo, J.Korea Foundry Society, Development of Thixoextrusion Process for Light Alloys – Part 2. Thixoextrusion Process for Light Alloys, Vol.26, No.5, pp. 217-221(2006).
- [15] H.K.Yi, D.W.Suh, SY.Lee, K.H.Lee, S.G.Lim, Trans. Mater. Process, Microstructural Characterization of Hot Extruded Al-Zn-Mg-Cu Alloys Containing Sc, Vol.13, No.1, pp.53-58(2004).
- [16] DU.Kim, J. KWS, A Study on the Optimum Bonding Preparation Condition of Single Crystal Superalloy, Vol.19, No.2, pp. 191-199(2001).
- [17] W.H.V.Geertruyden, H.M.Browne, W.Z.Misiolek, P.T.Wang, Metall Mater Trans A, Evolution of Surface Recrystallization during Indirect Extrusion of 6xxx Aluminum Alloys, Vol.36, pp.1049-1056(2005). <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0298-6>
- [18] HW.Lee, TK.Ha, HK.Park, SH.Min, Korean J. Mater. Res., Recrystallization Behavior of Aluminum Plates Depending on Their Purities, Vol.26, No.12, pp688-695(2016). <https://doi.org/10.3740/MRSK.2016.26.12.688>
- [19] YP.Kwon, Engineering Master's Thesis, The Prediction of Dynamic Recrystallization and Grain Size of 304 Stainless Steel during Hot Deformation, Korea Maritime & Ocean University(2001)
- [20] YJ.Rhee, YS.Kim, YS.Park, J. Corros Sci. Soc. of Korea, Effects of Grain Size and Phase on Corrosion Resistance and Mechanical Properties of AISI 304 and AISI 430 Alloys, Vol.21, No.2, pp.95-110(1992)
- [21] X.Z.Zhang, T.J.Chen, Mat.Res, Solution Treatment Behaviors of 6061 Aluminum Alloy Prepared by Powder Thixoforming, Vol.21, No.8(2018). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0057>