

금형 냉각과 압출 속도가 7075 합금 압출에 미치는 영향에 대한 현상학적 분석

성상규 · 강현준 · 이상용[†]
안동대학교 신소재공학부

Phenomenological Analysis of the Effects of Die Cooling and Extrusion Speed on the Extrusion of 7075 alloy

S. G. Seong, H. J. Kang and S. Y. Lee[†]

Dept. of Advanced Materials Engineering, Andong National University,
1375 Gyeongdong-ro, Andong, Gyungbuk 36729, Korea

Abstract The extrusion experiments using the 7075 aluminum billet have been performed to investigate the effects of die cooling and ram speed on the occurrence of surface defects on the extrudate. The purpose of die cooling was to suppress overheating of the extrudate at the moment of extrusion. In the present die cooling system, liquid nitrogen has been injected in to the die and sprayed to the surface of extrudate. Ram speed was either kept or varied in the range of 1.1~1.7 mm/sec. throughout one extrusion shot to check the occurrence of surface defects. Every extrusion started at a ram speed of 1.25 mm/sec. The temperature of extrudate was measured using a laser thermometer. The 7075 billet of 180 mm in diameter and 550 mm in length was preheated at 390°C and extruded to get a single plate of 8000 mm in length, 150 mm in width and 10 mm in thickness. Each extrudate was checked by eye to find the surface defects. The microstructures were obtained in the specimen cut from each corner of the extrudate using the EBSD micrographs.

(Received July 9, 2021; Revised July 16, 2021; Accepted July 22, 2021)

Key words : 7075 alloy, Extrusion experiment, Die cooling, Ram speed change, Surface defects

1. 서 론

압출은 높은 생산성을 제공할 뿐 아니라 순간적으로 높은 변형률이 적용되어 우수한 품질을 얻기 용이하다. 압출 금형을 통과하며 발생하는 높은 압력의 작용으로 미세하고 균일한 조직이 얻어지고 내부 결함이 적다. 경량 소재가 필요한 항공기에는 오래전부터 알루미늄 합금의 압출 부품이 적용되고 있고, 항공기 각 부위의 요구 특성에 따라 다양한 알루미늄 합금들이 적용된다. 7075 합금은 가장 강도가 높은 알루미늄 합금이기에 압출 성형을 위해서는 높은 압력이 필요하며 열간 압출하는 것이 보통이다. 경량화에 대한 추세로 알루미늄 합금의 자동차 부품 적용이 증가하고 있다. 자동차의 범퍼(bumper), 프레임(frame), 차대(chassis) 등이 요구하는 기계적 특성

은 다르다. 차대 부품의 경우에는 항공기 압출 부품과 같이 안정된 강도-인성 특성이 요구되어 7075 합금의 적용이 필요할 수 있다. 반면에, 범퍼는 적당한 강도에서 파괴되고, 여러 겹으로 접히는 연신 특성이 필요하고 이를 위해 7003계 합금의 적용이 적절할 수 있다[1-3].

7075 합금의 압출에서 가해지는 높은 압력으로 압출이 진행되는 동안 압출재의 표면 온도는 빌렛의 예열 온도보다 보통 40-90°C 정도 증가하게 된다. 이 과열은 가장 흔하게는 압출재 표면에 결함을 일으키며, 압출재 내부에서는 국부적 용융 조직을 생기게 하여 부품의 사용에서 치명적인 결과를 낳게 된다. 따라서 7075 합금의 압출은 400°C 근처의 낮은 온도에서 수행하는 것이 보통이다. 압출 과열은 압출 속도가 증가해도 발생하게 된다. 7075 합금의 압출

[†]Corresponding author. E-mail : sylee@anu.ac.kr

속도는 보통 1.2 mm/sec 내외의 낮은 속도로 진행하여 결함 발생을 피하도록 한다. 압출 순간에 금형 냉각을 이용하여 압출 과열을 낮추어 압출 생산성 및 품질을 높이는 다양한 연구가 수행되고 있다[4-8]. 압출 과열의 제어가 가능해진다면 낮게 유지할 수밖에 없던 압출 온도의 증가가 가능해지며 더불어 압출 속도의 증가도 가능해져 결국 품질이 제어되며 생산성이 증가되는 장점이 얻어진다[5, 9].

본 연구에서는 실제 기업에서 생산하는 압출 장비를 활용하여 7075 합금의 압출에서 압출이 진행되는 부위를 금형 냉각 시스템을 이용한 냉각법을 적용하였다. 또한, 금형 냉각을 적용해서 한 번의 압출이 진행되는 동안에 압출 속도를 변화시키는 실험을 수행하였다. 금형을 통한 압출부의 냉각이 진행되는 동안 압출 중의 압출 속도를 변화시켜 압출 결함 발생의 양상을 현상적으로 관찰하고 분석하였다.

2. 실험 방법

본 압출 연구에 사용된 알루미늄 빌렛은 7075 합금이다. 빌렛의 직경은 180 mm, 빌렛의 길이는 550 mm이었다. 빌렛 예열은 유도가열기로 수행되었으며 예열 온도는 390°C였다. 압출은 1500톤 직접 압출기에서 수행되었다. 압출후 길이 8000 mm, 폭 150 mm, 두께 10 mm의 단순 형태의 판재가 압출재로 얻어졌다. Fig 1에는 압출 장비와 압출 부위, 온도측정(pyrometer) 위치와 금형(backer) 냉각에서 액체질소의 압출재로의 분사 위치를 나타내었다. 금형의 냉각은 그림과 같은 유로로 -196°C의 액체질소 주입을 통해 수행되며, 금형 유로를 통과한다. 온도 상승으로 기체화된 질소가 빌렛이 금형을 통과하는 직후에 압출재 표면(화살표)으로 뿜어져 압출 동안에 과열된 표면 온도를 낮추어 주는 형태가 된다. 압출재 온도 측정은 레이저를 이용한 온도측정기(pyrometer)를 사용하여 압출이 진행되는 동안 기록되게 하였다. 온도측정 위치는 Fig. 1의 압출재에 "O"으로 표시하였다. 압출재가 압출기를 통과하여 외부에서 보이기 시작하는 위치에서는 열화상 카메라(thermal image camera)를 이용하여 압출재 표면 전체를 영상 녹화하여 화상으로 간접적인 표면 온도측정이 가능하도록 하였다.

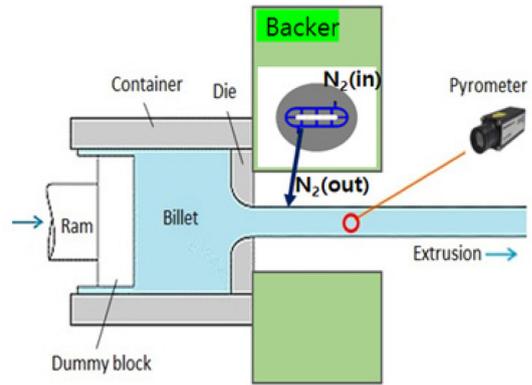


Fig. 1. Schematic presentation of extrusion process equipped with die cooling and pyrometer.

냉각 효과 비교를 위해 4가지 압출 실험이 진행되었다. 금형 냉각이 사용되지 않은 압출 실험과 3가지 형태의 금형 냉각 실험이 수행되었다. 4가지 압출 실험에서는 다양한 압출 속도가 적용되었으며 상세한 금형 냉각 및 압출 속도조건은 실험 결과 서술에서 확인할 수 있다. 4가지 압출 실험 모두에서, 초기 압출 속도는 1.25 mm/sec로 동일하게 하였다. 일정한 압출 속도로 압출을 하다가 압출 결함이 발견되지 않으면 압출 속도를 단계적으로 증가시켜 금형 냉각으로 어느 정도 압출 속도 향상 효과가 가능한지를 알고자 하였다. 압출재에서 표면 결함이 발생하는 경우에는 압출 속도를 다시 낮추어 결함 발생이 억제되는지 관찰하였다.

다양한 금형 냉각과 압출 속도 변화의 영향은 각각의 조건에서 얻어지는 압출재 표면 상태를 육안 또는 현미경으로 관찰하여 현상적으로 분석하였다. 압출재(extrudate)의 표면 결함은 가장자리에서 큰 찢김(tearing) 형태로 나타나고, 표면 중앙에서는 압출 방향과 수직으로 긴 균열들이 나타났다. 결함 분석은 육안관찰과 함께 Fig. 2에 나타냈듯이 압출재 좌측(L), 우측(R)에서 채취한 시편의 단면 미세조직을 EBSD로 관찰하였다. Fig. 2에 나타낸 EBSD 사진의 미세조직 특징은 Fig. 3~Fig. 6에 제시될 미세조직 사진과 같은 조직 형태이다. 더 확대된 사진으로 여기에 설명한다. Fig. 2에 (a)와 (b)는 압출과정에서 미세하고 균일한 재결정 입자이다. Fig. 2의 (C)는 압출과정에서 재결정후 발생한 2차 재결정으로 인한 조대결정립이다.

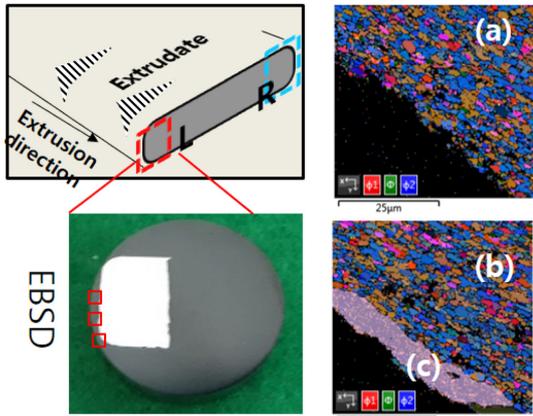


Fig. 2. Locations of specimens in an extrudate and observation using the EBSD microstructure.

3. 실험 결과

3.1 금형냉각을 적용하지 않은 압출(Type 1)

실험 결과는 비교하고자 하는 4가지 압출을 현상적으로 관찰한 결과를 정리하는 방식으로 하였다. 각각의 압출의 특징은 해당 부분의 설명에 활용된 그림에 종합하여 정리하였다. 기업에서 작업자가 7075 합금 압출재 생산에 적용하는 조건 들을 적용하였다. 빌렛 준비 및 예열, 빌렛의 압출기 컨테이너(container)로의 이송 및 장착, 컨테이너 온도 설정, 압출 속도에 영향을 미치는 램스피드(ram speed) 설정, 압출재 견인 등의 조건들이 평소 생산 공정과 같이 적용되었다. 다만 분석을 위해 레이저 온도측정 장치, 열화상 카메라에 의한 촬영이 추가되었다.

Fig. 3은 금형 냉각을 적용하지 않은 압출 실험 결과를 종합하였다. Fig. 3(a)에 압출된 약 8000 mm의 압출재 전체를 나타내었고, 압출의 시작과 끝부분의 위치를 표시하였다. 압출 속도는 램스피드(ram speed)로 표시하였고, 모든 압출은 1.25 mm/sec의 속도로 압출이 시작되도록 하였다. 일정한 압출 속도로 압출을 진행하다가 압출재에서 결함이 주기적으로 발생하기 시작하자 압출 속도를 1.1 mm/sec로 낮추어 나머지 압출이 진행되었음을 보여준다.

Fig. 3(b)는 표시된 압출재 범위에서 압출재 외관(표면)의 대표적인 결함 종류, 결함 빈도를 확대하여 보여주고 있다. 압출이 시작된 후 전체 압출재 약 1/3까지는 외관 결함이 없다가 결함이 주기적으로 발

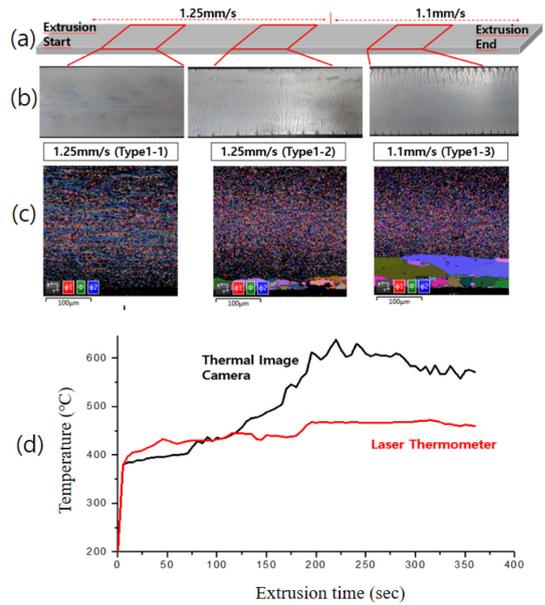


Fig. 3. Extrusion of 7075 without die cooling system.

생하였다. 결함은 가장자리 찢어짐(coner tearing)이 두드러지지만 압출재 상부 중앙에서도 발생하였다. 이렇게 발생하기 시작한 결함은 압출 속도를 낮추었음에도 계속 발생하였으며, 결함 발생 주기는 빨라지는 것을 볼 수 있다. 압출 도중에 시행된 압출 속도 변화가 결함 발생을 억제하기에는 부족한 조건임을 말해준다.

Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)에서 제시된 압출재의 가장자리 단면 부위의 EBSD 미세조직이며 Fig. 2에서 관찰 위치를 확인할 수 있다. 다수의 시편을 확인하여 대표적인 EBSD 미세조직 사진을 제시하였다. Type1-1, Type1-2, Type1-3은 압출이 진행되는 순서이며, 표면의 미세조직이 특징적으로 차이가 있음을 보여준다. 압출 초기에는 없던 조대한 결정립 조직이 Type1-2에서 관찰되었고, 표면의 조대한 결정립 조직은 Type1-3에서 범위가 표면에서 내부로 확대되었고 약 100 µm의 두께로 존재하였다. 조대한 결정립을 제외한 내부의 미세조직에서는 3개의 사진이 차이가 없다. 10-20 µm 크기의 균일한 미세결정립으로 구성되어 있다. 미세결정립은 압출 동안의 재결정이며, 조대한 결정립은 재결정, 입자 성장 또는 2차 재결정 등의 전형적인 열간 가공에서의 조직 변화로 판단된다. 이러한 조직 변화에 영향을 미치는 가장 중

요한 변수로는 변형률(strain)과 온도인데, 압출재 단면의 표면에서 같은 거리에 있는 부위의 변형률은 일정하다고 판단되기 때문에, 조대한 결정립의 크기와 범위는 온도의 영향이 가장 지배적임을 유추할 수 있다.

온도의 영향은 Fig. 3(d)에 나타낸 온도측정 곡선으로 확인된다. 열화상 카메라의 온도 측정은 판재 전체의 온도 분포 차이를 보기 위한 참고용이다. 이 카메라의 온도측정 위치는 판재에서의 거리 및 위치가 일정하지 않아 판재 온도를 해석하는 데에는 적절치 않다. 따라서 압출재의 일정한 위치(Fig. 1의 "O"로 표기한 위치)에서 측정된 레이저 온도측정 결과가 해석에 활용되었다. 물론 이 온도도 압출 순간이 지난 부분을 측정하였기 때문에, 실제 압출 순간의 압출재 온도와는 차이가 있지만 해석하는 데에는 문제가 없다. 전체 압출 소요 시간은 약 380초였다. 초기 압출 온도는 390°C였지만 Type1-1에서는 420°C, Type1-2에서는 약 440°C, Type1-3에서는 약 460°C로 증가하고 있음을 볼 수 있다. Type1-3에서 압출 속도를 1.25 mm/sec에서 1.1 mm/sec로 낮추는 것이 표면 온도 제어에 영향을 미치지 못했음을 알 수 있다. 앞에서 설명한 EBSD 미세조직의 조대한 결정립의 변화는 압출재의 표면 온도의 변화와 직접적인 관련이 있음을 알 수 있었다.

3.2 금형 냉각 및 일정한 압출 속도(Type 2)

본 실험 압출은 Type 2로 표기하였으며 금형(backer)에 액체질소를 유동시킬수 있는 유로를 설치하여 액체질소를 주입하고 유동시켜서 압출재가 압출 금형을 통과해서 나오는 순간에 질소가 압출재 표면에 분사되는 형태로 금형 냉각을 진행하였다. 유로의 형태, 설치된 금형 위치, 질소의 주입 및 배출의 형태는 Fig. 1 및 Fig. 4의 온도측정 곡선에서 볼 수 있다. Die(1)은 뒤에 언급될 4번째 실험에 사용된 개량형 유로가 설치된 금형인 Die(2)와 구별하는 표기이다. 금형 사진을 제외하면 Fig. 4에 사용된 그림들의 내용과 목적, 해석 방법은 같다. Type 2에서는 금형 냉각의 적용과 함께 압출 속도를 Type 1과 같은 1.25 mm/sec로 하였고, 압출 내내 같은 속도를 유지하였다. 압출 시간은 약 330초였다. 부위별 압출재 외관 사진에서 결함이 관찰되지 않았다. 이에 맞

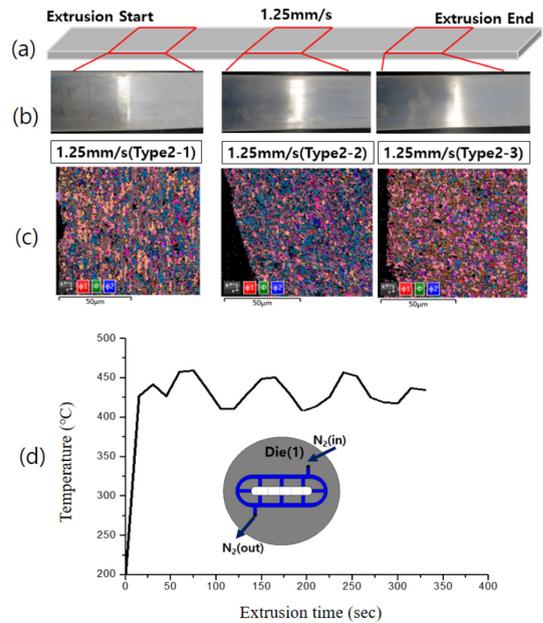


Fig. 4. Extrusion of 7075 with die cooling system(1) and constant ram speed.

게, 각 부위 가장자리에서 얻은 단면의 EBSD 미세조직 사진에서 조대한 결정립이 표면에 형성되지 않았음을 확인할 수 있었다. 압출재의 온도는 410-450°C 사이에서 유지되었다. 금형 냉각으로 압출재 결합 발생이 억제될 수 있음이 확인되었다.

3.3 금형 냉각 및 압출 속도 변화(Type 3)

본 실험 압출은 Type 3로 표기하였으며 금형 냉각은 Type 2와 같으나 압출 속도를 다양하게 변화시킨 것이 차이이다. Type 2에서 금형 냉각으로 결합 발생이 억제되었기에 압출 속도를 증가시켜 어느 속도에서 어떤 형태의 결합이 발생하는지를 확인하고자 하였다. Fig. 4에 실험 결과를 나타내었다. 압출 속도를 1.25 mm/sec로 시작한 초기에는 결함이 발생하지 않았음이 압출재 외관 사진(Type3-1)과 EBSD 미세조직 사진에서 관찰되었다. 압출 도중에 압출 속도를 20%, 즉, 1.5 mm/sec로 증가시켰다. 증가된 압출 속도에서 압출재 외관사진 (Type3-2)에서 몇 개의 작은 결함들이 압출재 가장자리에서 발견되었다. EBSD 미세조직에서도 간헐적으로 조대한 결정립 층을 확인할 수 있었다. 압출은 다시 1.4 mm/sec로 낮추어 마무리되었다. 압출 속도를 낮추어도 불구

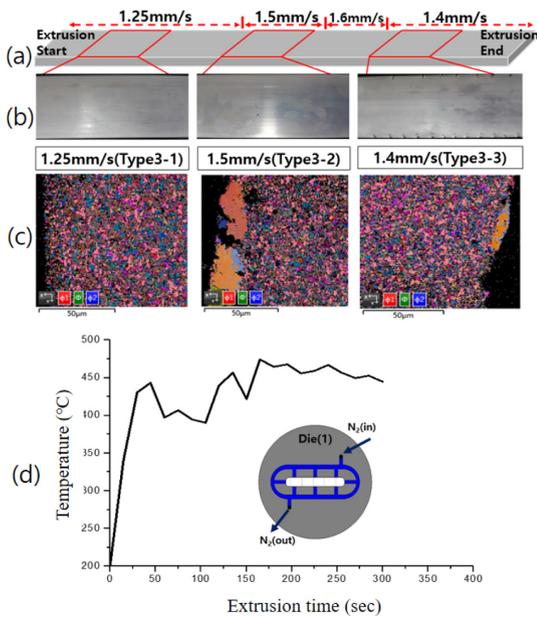


Fig. 5. Extrusion of 7075 with die cooling system(1) and variable ram speeds.

하고 가장자리의 결함은 크기가 커지고 주기적으로 나타났다. 그러나 가장자리를 제외한 대부분의 압출재 표면에는 결함이 관찰되지 않았다. 미세조직에서는 분명하지 않지만, 온도측정 곡선의 변화는 결함의 발생 및 증가와 더 일치한 결과를 보여주고 있다. 온도의 제어, 측정 및 관리가 압출 공정 및 품질 제어에 중요한 요소로 유추된다.

3.4 금형 냉각 개량 및 압출 속도 변화(Type 4)

본 실험 압출은 Type 4로 표기하였으며 Type 2, 3에서 적용된 금형 냉각을 개량하여 적용하고 Type 3과 같이 압출 속도를 다양하게 변화시켜 결함 발생 양상을 확인하고자 하였다. 개량된 금형 시스템을 Die(2)로 표기하였고 Fig. 6에서 유로 형상을 나타내었다(Fig. 6(d)). 개량의 목적은 질소 냉각 효과를 증가시키는 것이었다. 압출의 시작 속도는 1.25 mm/sec였고, 이 속도에서 압출재 외관(Type4-1)에서의 결함은 발견되지 않았으며, EBSD 미세조직 사진(Fig. 6(c))에서도 같은 결과를 얻었다. 냉각 효과를 개선하였기에 압출 중의 속도 변화를 가장 큰 1.7 mm/sec까지 변화시켰으나 압출재에서 결함은 나

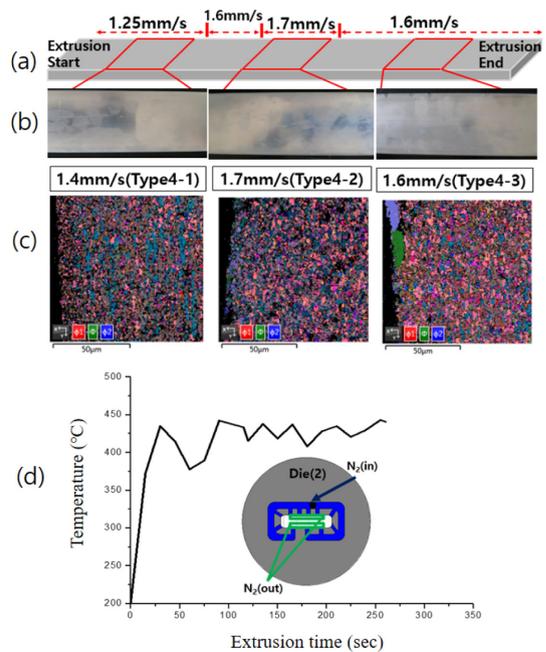


Fig. 6. Extrusion of 7075 with die cooling system(2) and variable ram speeds.

타나지 않았다. 압출의 후반부에서는 1.6 mm/sec로 압출 속도를 약간 낮추어 결함 발생을 최소화할 수 있었다.

4. 고찰

본 연구에서 수행된 실험 압출의 의미는 실험실 규모가 아닌 생산 현장에서 실물 규모의 압출이라는 점이다. 따라서 실물 규모의 압출 실험을 통해 공정 조건이 압출재 전체에 영향을 미치는 결과를 얻는 것이 가능하였다. 개발의 초기에서 금형의 냉각을 통한 압출 온도를 간접 제어되고, 압출재의 온도와 측정 온도와의 차이가 존재하였지만, 금형 냉각의 효과와 압출 속도의 변화라는 가장 중요한 공정 변수들의 영향을 정성적, 현상적으로 의미 있게 관찰할 수 있었다.

본 실험에 사용된 7075 압출의 수행에서 현장에서 금형 냉각이 없이 적용하는 압출 속도는 약 1.25 mm/sec였다. 본 연구에서는 이보다 25% 증가된 압출 속도를 초기 속도로 설정하였고 결함이 없는 순간 최대 압출 속도는 1.7 mm/sec였다. 즉, 기존의

압출 속도를 40%까지 증가시킬 수 있었다. 빌렛 가열, 컨테이너 가열, 금형 구조 등 주요 공정조건들이 적절하게 조정된다면 압출 속도 2배 증가의 생산성 향상을 안정된 품질에서 얻는 것이 가능하다는 예상이다. 가장 핵심적인 변수는 압출 온도의 정확한 제어이다.

5. 결론

7075 알루미늄 합금에 대해 금형 냉각을 적용하고 압출 속도를 변화시키는 압출 실험을 수행하였다. 금형의 냉각을 통해 압출 온도를 제어하고자 하였다. 압출 온도제어를 통해 7075 합금의 결함 없는 압출을 목적으로 압출 속도를 증가시키는 방향으로 변화시켰다. 금형의 냉각은 액체질소를 활용하였으며, 두 가지 형태의 액체질소 유로 시스템을 갖춘 금형 냉각을 적용하였다. 시작 압출 속도는 1.25 mm/sec로 하였고, 압출 도중의 결함 발생 양상에 따라 최저 1.1 mm/sec에서 최대 1.7 mm/sec로 변화시켰다. 직경 180 mm, 길이 550 mm의 7075 빌렛의 압출에서 8000 mm의 압출재가 얻어졌고, 압출재의 외관에서 결함을 관찰하고, 미세조직을 EBSD로 측정하여 관찰하였다. 금형 냉각을 적용하지 않으면 압출이 진행되는 과정에서 많은 결함이 발생하였다. 금형 냉각

의 적용은 압출 결함을 크게 억제할 수 있었고, 압출 속도를 높이는 것이 가능하였다. EBSD 분석에서, 압출재에서 발생한 결함은 표면의 온도 상승으로 인한 조대결정립에 기인함이 확인되었다. 금형 냉각을 통한 압출 온도 상승과 결함 발생이 억제되며, 결함 없이 압출 속도를 높일 수 있음을 현상적으로 확인하였다.

References

1. T. Sheppard : Extrusion of Aluminum Alloys, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1999).
2. J. Hirsch : Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **24** (2014) 1995.
3. A. Guzel : PhD Thesis, TU Dortmund (2014).
4. G. Lange and H. P. Stüwe : Z. Metall., **62** (1971) 571.
5. T. Chanda, J. Zhou, and J. Duszczyk : J. Mater. Process. Technol., **114** (2001) 145.
6. F. Parvizian, T. Kayser, C. Hortig, and B. Svendsen : J. Mater. Process. Technol., **209** (2009) 876.
7. A. F. Bastani, T. Aukrust, and S. Brandal : J. Mater. Process. Technol., **211** (2011) 650.
8. X. Duan and T. Sheppard : Mater. Sci. Eng. A, **351** (2003) 282.
9. L. Li, J. Zhou and J. Duszczyk : J. Mater. Process. Technol., **146** (2004) 203.