

금형 냉각이 Al-Mn계 다중압출 평판관의 압출 특성 변화에 미치는 영향

신영철^{1,†} · 하성호¹ · 강태훈² · 이기안² · 이승철³

한국생산기술연구원 뿌리기술연구소^{1,†}
인하대학교 신소재공학과²
대한공조(주)³

Effects of die cooling on change of extrusion characteristics of Al-Mn-based thin-walled flat multi-port tube

Young-Chul Shin^{1,†} · Seong-Ho Ha¹ · Tae-Hoon Kang² · Kee-Ahn Lee² · Seung-Chul Lee³

Korea Institute of Industrial Technology, Research Institute of Advanced Manufacturing & Materials Technology^{1,†}
Department of Materials Science and Engineering, INHA University²
DAIHAN, Climate Control Co., LTD³

(Received November 24, 2023 / Revised December 05, 2023 / Accepted December 31, 2023)

Abstract: In order to increase the extrusion production speed of aluminum, extrusion die cooling technology using liquid nitrogen has recently attracted a lot of attention. Increasing the extrusion speed increases the temperature of the bearing area of extrusion dies and the extrusion profile, which may cause defects on the surface of extruded profile. Extrusion die cooling technology is to directly inject liquid nitrogen through a cooling channel formed between the die and the backer inside the die-set. The liquid nitrogen removes heat from the die-set, and gaseous nitrogen at the exit of the channel, covers the extrusion profile of an inert atmosphere reducing the oxidation and the profile temperature. The aim of this study is to evaluate the cooling capacity by applying die cooling to extrusion of Al-Mn-based aluminum alloy flat tubes, and to investigate the effects of die cooling on the change in extrusion characteristics of flat tubes. Cooling capacity was confirmed by observing the temperature change of the extrusion profile depending on whether or not die cooling is applied. To observe changes in material characteristics due to die cooling, surface observation is conducted and microstructure and precipitate analysis are performed by FE-SEM on the surface and longitudinal cross section of the extruded flat tubes.

Key Words: Al-Mn Aluminum Alloy, Die Cooling, Extrusion, Flat Tube, Liquid Nitrogen

1. 서론

재료의 성형성 개선과 금형 수명 향상 그리고 생산성 향상 및 불량 저감 등은 부품 성형 공정을 운용하는 과정에서 불가피하게 마주하게 되는 중요 이슈들이다. 이러한 이슈들을 해결하기 위해 다양한 기술적 방법들이 활용되고 있지만 그중에서도 냉각을 이용한 방법들은 과거부터 꾸준히 적용되어 왔

고 현재까지도 활발히 연구되고 있다¹⁻⁶⁾. 일반적으로 널리 적용되고 있는 에어(air)와 냉각수를 활용한 냉각 방법 외에도 최근에는 특히 액체질소 분사에 의한 극저온을 활용하여 소재의 성형한계를 향상시키고자 하는 연구 결과들이 보고되고 있다⁷⁻⁸⁾.

냉각을 통해 부품의 생산성을 높이고 임계성능을 향상시키고자 하는 기술은 압출 공정에서도 널리 활용되고 있고 새로운 기술들이 지속해서 개발되고 있다. 압출 후 냉각 제어를 통해 알루미늄 프로파일의 기계적 특성 및 초기 파단 저항성을 향상시키기 위한 연구가 수행되었고⁹⁾, 국내에서도 알루미늄 열간 압출 공정에서 기체 질소 냉각에 의한 결정립 성

† 교신저자: yeshin@kitech.re.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

장 제어를 통해 결정립이 미세한 고강도의 제품을 얻고자 하는 연구가 수행되었다¹⁰⁻¹¹⁾.

최근에는 액체질소를 활용한 압출 금형 냉각시스템이 유럽을 중심으로 개발 및 보급되기 시작하면서 이를 통한 생산성 향상 및 표면결함 억제 등의 연구가 진행되고 있다. 특히 금형 출구 및 압출 프로파일 전면에 액체질소를 고르게 분사하기 위한 냉각 유로 설계의 중요성이 부각되면서 이를 위한 시뮬레이션 기법 및 최적화 관련 연구들이 보고되고 있다¹²⁻¹³⁾. 국내에서도 액체질소를 통한 금형 냉각시스템을 국산화 개발하고 안정화하고자 하는 연구가 지속해서 진행되고 있으며 이를 활용하여 결합 저감 측면에서 금형 냉각시스템의 유효성을 분석한 연구 결과들이 소개되고 있다¹⁴⁻¹⁵⁾.

본 연구는 에어컨 실외기용 응축기의 핵심부품인 평판관(Flat tube)의 압출 공정에 액체질소를 사용한 금형 냉각을 적용하기 위해 수행되었다. 일반적으로 평판관은 인서트 타입의 포트홀(porthole) 금형을 통해 압출되고 있으며 금형 홀더에 4개에서 6개의 인서트 금형을 삽입하여 다중 압출(multi-port extrusion)을 진행하고 있다. 따라서 압출과정에서 다중 홀에 빌렛 소재의 흐름을 균등하게 배분하는 것이 매우 중요하다.

평판관 내부에는 냉매가 유동하고 열을 전달할 수 있도록 격막에 의해 분리된 독립된 채널들이 형성되어 있다. 이러한 구조는 체적 대비 표면적비를 증가시켜 열전달 효율을 증가시키기 위해 고안되었다¹⁶⁾. 평판관은 지속적인 효율 향상 및 경량화 요구에 대응하기 위해 체적 대비 표면적비가 계속 증가 추세에 있으며 결과적으로 점점 미세화·박막화되어 가고 있다. 얇아진 두께로 평판관 내부에 흐르는 냉매의 압력을 견딜 수 있도록 원소재 강도 또한 증가하고 있다. 이와 더불어 부식 환경에서 높은 사용수명을 확보하기 위해서 내부식성 향상에 대한 요구도 지속해서 받고 있다. 결과적으로 평판관의 소재는 기존 1000계열 알루미늄 소재에서 강도 및 내식성이 우수한 3000계열(Al-Mn계 합금) 알루미늄 소재로 바뀌고 있으며 합금 내 Mn의 함량이 지속적으로 증가하고 있다. 압출 측면에서 합금원소의 증가는 압출성 및 생산 속도 저하, 불량률 상승 등의 문제를 야기하므로 이를 개선하기 위한 추가적인 기술 개발이 필요한 상황이다¹⁷⁾. 이러한 흐름 속에서 액체질소를 활용한 압출 금형 냉각은 매력적인 기술로 부상하고 있다.

본 논문에서는 액체질소를 활용한 금형 냉각을 통해 Al-Mn계 합금 평판관의 온도 상승을 억제함으로써, 높은 압출 속도에서도 건전한 압출 제품을 생산하는 것을 목표로 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 액체질소의 분사 압력을 자유롭게 조절할 수 있는 단순한 구조의 금형 냉각시스템을 개발하였고 이를 평판관의 다중 압출에 적용한 실험을 진행하였다. 금형 냉각이 압출 특성 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 압출재의 표면 분석을 수행하였고 SEM 분석을 통해 미세조직과 석출상, 그리고 경도 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 압출금형 냉각 실험

2.1. 평판관 다중 압출

Fig. 1은 압출 금형 냉각 실험에 사용된 평판관의 형상을 보여주고 있다. Table 1은 실험에 사용된 Al-Mn계 알루미늄 합금의 화학조성을 spark optical emission spectrometer로 분석한 결과이다.

평판관은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 금형 홀더(die holder)에 박혀있는 6개의 인서트 금형(insert dies)을 통해 다중 압출(multi-port extrusion)되게 된다. 하나의 빌렛에서 6개의 홀로 분리 압출되므로 6개의 평판관이 균질한 특성을 갖게 하기 위해서는 공정변수들의 세심한 관리가 필요하다. 이는 금형 냉각 과정에도 해당되는 것으로, 6개의 홀을 균일하게 냉각하기 위한 기술 확보가 필요하다.



(a) longitudinal cross-sectional shape

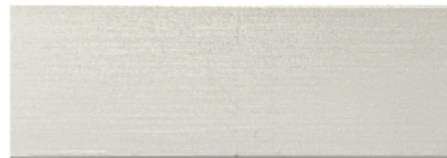


Fig. 1 Al-Mn-based micro-channel flat tube

Table 1 Chemical compositions of Al-Mn alloys used in this study (wt.%)

Al	Si	Mn	Fe	Cu	Ti	Mg	Zn	Cr
Bal.	0.098	0.313	0.175	0.013	0.01	0.003	0.002	0.001



Fig. 2 Multi-port extrusion of micro-channel flat tube

2.2. 액체질소 금형 냉각 시스템 개발

Fig. 3은 본 연구를 위해 개발한 액체질소 금형 냉각시스템을 보여주고 있다. 액체질소의 공급은 2개의 액체질소 탱크가 담당하게 된다. Fig. 3에 나타난 레귤레이터(regulator)가 비례제어 밸브에 공급되는 액체질소의 압력을 일정하게 유지/조절하는 역할을 한다. 비례제어 밸브(proportional valve)는 피로미터(pyrometer)가 측정한 평판관의 온도 신호를 입력받아 밸브의 개폐량을 조절하여 압출 금형에 공급되는 액체질소의 양을 조절하게 된다. Fig. 4(a)는 액체질소 공급장치 및 제어 판넬의 모습이고 Fig. 4(b)는 비례제어 밸브가 장착된 기액 분리기를 보여주고 있다. Fig. 4(c)는 압출 금형에 액체질소 공급 노즐이 체결된 모습이다. 액체질소가 흐르는 배관은 모두 진공 단열 배관을 사용하여 이송 중의 기화를 최소화하고자 하였다. 기화된 질소는 기액 분리를 통해 바깥으로 배출되므로 금형에는 액체 상태의 질소만 공급되게 된다.

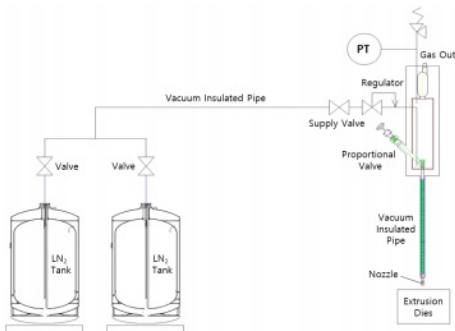


Fig. 3 Schematic diagram of liquid nitrogen supply system for extrusion die cooling

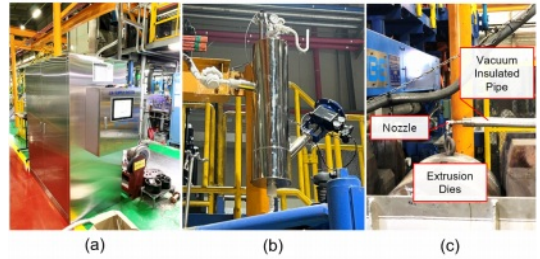


Fig. 4 Liquid nitrogen supply system for extrusion die cooling

2.3. 금형 냉각 유로 삽입 구조 설계

압출 금형 냉각을 통해 평판관의 온도를 일정하게 유지하기 위해서는 우선 적절한 최종 분사 지점을 선정해야 한다. 본 연구에서는 인서트 금형의 출구부에 액체질소를 분사하는 것을 목표로 냉각 유로 설계를 진행하였다. 6개의 인서트 금형으로 비교적 균일하게 액체질소가 분배될 수 있도록 유로를 설계하였고 이를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 액체질소는 질소 공급 노즐을 지나 백커 1의 정중앙부에 형성된 라인으로 흐른 후 6개의 분배 유로(distributor)로 분기된다. 이것이 최종적으로 환형 냉각 유로를 채우게 되고 압(pressure)이 걸린 상태에서 최종 분사구(injector)로 빠져나와 압출된 평판관과 금형을 동시에 냉각시키게 된다. 고온으로 예열되고 고압이 걸리는 압출 금형 구조상 내부에 별도의 냉각 유로 구조물을 삽입하기 어려우므로 기존의 금형 구조 내에서 기계가공을 통해 액체질소가 흐를 수 있는 공간을 마련해야 한다. Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 금형 홀더와 접하고 있는 백커 1에 냉각 유로를 기계 가공함으로써 백커 1과 금형 홀더 결합 시 그 사이에 형성되는 빈 공간을 통해 액체질소가 공급될 수 있도록 금형을 제작하였다.

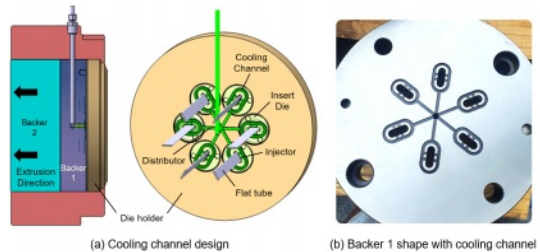


Fig. 5 Cooling channel design for supplying liquid nitrogen

3. 실험결과 및 분석

3.1. 금형 예열 여부에 따른 질소 분사 실험

금형 냉각 유로의 액체질소 균일 분사 성능 확인을 위해 압출 프레스 장착 전, 체결 상태의 금형에 액체질소 분사 노즐을 연결하여 분사 실험을 진행하였다. Fig. 6(a)를 보면 상온의 금형에서는 당초 의도했던 대로 6개의 압출 홀에서 비교적 균일하게 액체질소가 분사되어 나오는 것을 확인할 수 있다. 하지만 실제 평판관 압출 공정에서는 압출 금형을 대략 500℃ 근방으로 예열하게 되므로 고온에서의 분사 균일성 확보가 중요하다. Fig. 6(b)는 수직형 다이 오븐에서 500℃로 예열된 금형을 통해 액체질소 분사 실험을 수행한 결과로 상온인 경우와 달리 압출 홀의 위치에 따라 분사량 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 가장 하부에 있는 두 개의 홀에서 가장 많은 분사량이 관찰되고 상부로 갈수록 분사량이 줄어드는 것이 확인된다. 한편, 금형이 500℃의 고온임에도 불구하고 하부의 홀에서는 액체질소 방울이 흘러나오는 것을 눈으로 확인할 수 있었다. 이러한 분사량 편차가 발생한 이유는 액체질소의 기화와 중력의 영향에 의한 것으로 추정된다. 추가적인 연구를 통해 냉각 유로의 구조와 치수를 최적화함으로써 개선해 나가야 할 부분이다.

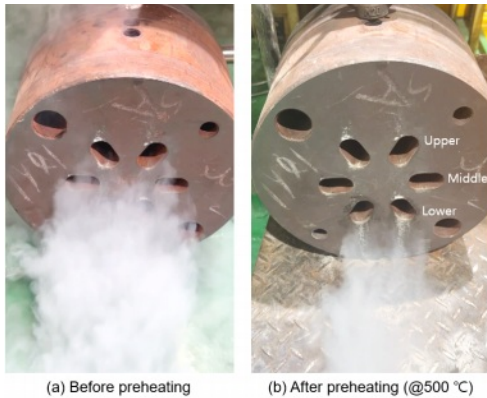


Fig. 6 Liquid nitrogen supply test results depending on the preheating temperatures of die-set

3.2. 압출재 온도 프로파일 변화

Fig. 7은 Fig. 2의 5번 홀에서 압출된 평판관의 온도 프로파일을 나타낸 그래프이다. 금형 냉각 적용에 의해 평판관의 표면온도가 15℃ 정도 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 평판관의 냉각량은 레귤레이

터를 통해 액체질소의 기준 분사 압력 조절을 조절함으로써 변화시킬 수 있다.

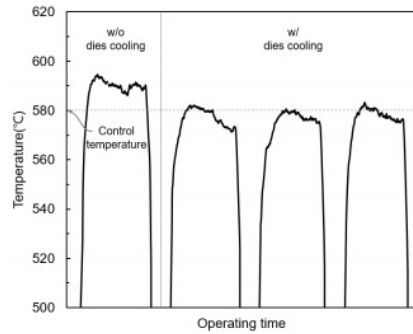


Fig. 7 Changes in the temperature profile of flat tube by die cooling

3.3 압출재 표면 품질 변화

Fig. 8은 압출된 평판관의 표면을 촬영한 결과로 금형 냉각 적용 시 표면의 광택이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 기화된 질소가 평판관의 표면을 감싸면서 산화를 억제하기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. 이 외에도 인서트 금형의 베어링부가 냉각되면서 압출재 표면과 금형 간의 소착이 방지됨에 따라 표면에서 발생하는 픽업(pick-up) 결함이 감소되는 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

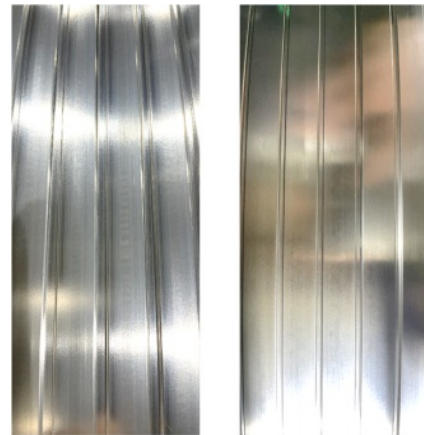


Fig. 8 Changes in surface quality due to application of die cooling

3.4 평판관 격막부 분석

Fig. 6에 나타난 액체질소 분사 시험 결과로부터 압출 홀의 수직 위치에 따라 액체질소 분사량 편차가 발생함을 확인할 수 있었다. 압출 금형은 출구 방향에서 바라볼 때 좌우 완전 대칭 구조를 가지므

로, 질소 분사량이 평판관의 압출 특성 변화에 미치는 영향을 파악하기 용이하도록 좌우의 편차는 무시하고 수직 방향(상-중-하)의 평판관 압출 샘플을 하나씩 선택하여 영향성 분석을 진행하였다. 분석 대상 압출 홀은 Fig. 2에 나타낸 홀 번호를 기준으로 4번(상), 6번(중), 5번(하)으로 선정하였다.

Fig. 9는 압출된 평판관 단면부를 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy, MYRA 3 XMH, Tescan, Czech Republic)을 통해 관찰한 결과로 모든 샘플에서 격막부(Bulkhead)가 미성형 없이 균일하게 잘 형성된 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 격막부 미세조직을 EBSD(electron backscatter diffraction, Nordlys-COMOS detector, Oxford, United Kingdom)를 통해 분석한 결과이다. 액체질소에 의해 직접 냉각 이루어지는 표면부에는 상대적으로 미세한 결정립들이 확인되지만, 냉각의 영향을 받지 못하는 격막 중심부에서는 상대적으로 조대한 결정립들이 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

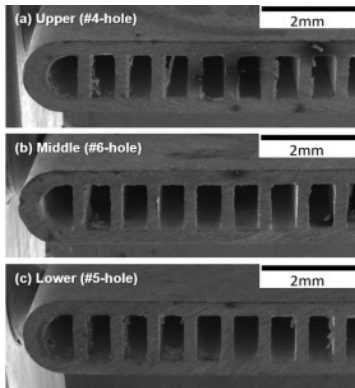


Fig. 9 FE-SEM observation results of bulkhead zone with different cooling rates

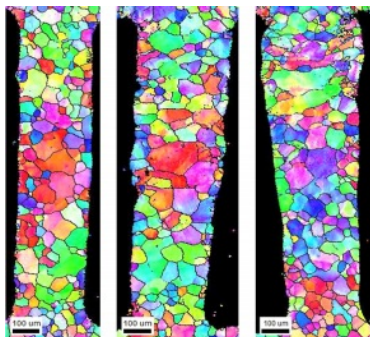


Fig. 10 EBSD IPF maps of bulkhead zone with different cooling rates

3.5 평판관 표면 미세조직 분석

Fig. 11은 평판관 표면의 미세조직을 EBSD를 통해 분석한 결과이다. 금형 냉각을 적용하지 않은 Fig. 11(a)와 금형 냉각을 적용한 Fig. 11(b),(c),(d)의 미세조직을 비교해 보면, 금형 냉각 적용을 통해 평판관의 결정립이 미세해지는 것을 확인할 수 있다. 특히 압출 홀 위치에 따른 평균 결정립의 크기 변화를 나타낸 Fig. 12를 보면 평판관의 압출 위치가 상부에서 하부로 갈수록 결정립의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 평판관의 냉각량이 많을수록 결정립이 미세해짐을 알 수 있다. 이는 액체질소에 의한 냉각량이 클수록 재결정 온도 범위를 빠르게 벗어나게 되어 결정립 성장이 억제됐기 때문으로 판단된다.

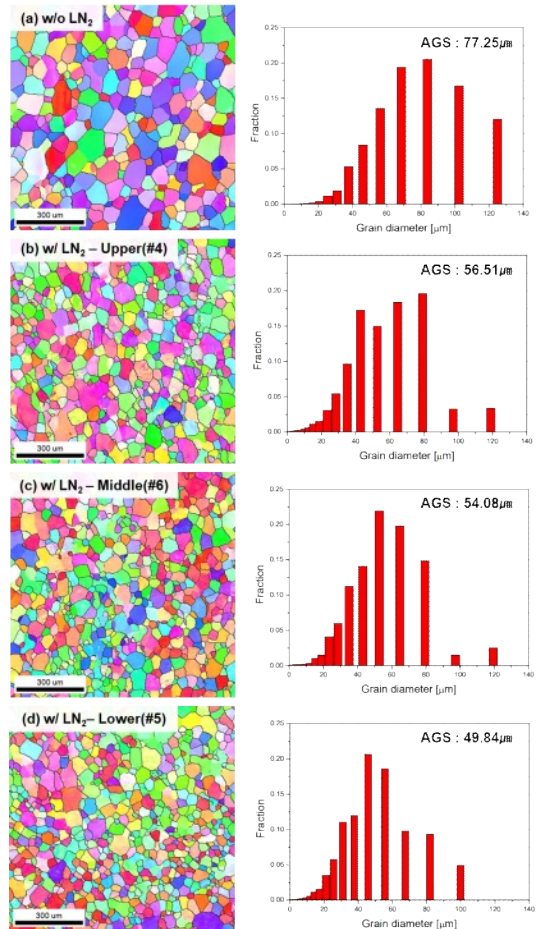


Fig. 11 EBSD IPF maps and grain size distribution analysis results of flat tube surfaces with different cooling rates

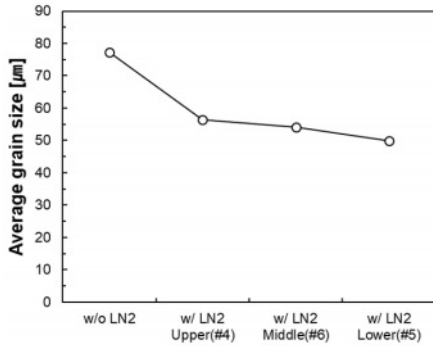


Fig. 12 Changes in the average grain size with different cooling rates

3.6 평판관 표면 석출물 분석

평판관 표면에 형성된 석출물에 대해 조사하고자 SEM 및 EDS 점 분석을 수행하였다. 분석 결과를 나타낸 Fig. 13을 통해, 평판관에서 생성된 주요 석출물은 Mn과 Fe가 높게 함유된 $Al_6(Mn, Fe)$ 금속간 화합물임을 추정할 수 있다. 압출된 평판관 표면의 석출물 분율(precipitate fraction) 변화를 나타낸 Fig. 14(a)를 보면 금형 냉각을 적용하지 않은 평판관 대비, 금형 냉각을 적용한 평판관에서 석출물 분율이 전반적으로 감소함을 확인할 수 있다. 특히 냉각량이 가장 큰 하부(#5-hole)에서 가장 낮은 석출물 분율이 관찰되고 있다. Fig. 14(b)는 석출물의 평균 크기를 측정하여 나타낸 그래프이다. 금형 냉각 적용을 통해 석출물의 크기 또한 전반적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 자체적인 실험 결과로부터 본 연구에 사용된 Al-Mn계 알루미늄 합금 소재의 석출물은 주로 500~540°C 사이의 온도 범위에서 형성되고 성장하는 것을 확인한 바 있다. 평판관 압출 과정에서 이 온도 범위를 빠르게 지나칠수록 석출물의 분율 및 크기가 줄어들게 되므로, 액체질소 분사를 통해 가장 높은 냉각 효과가 발생한 하부(#5-hole)에서 압출된 평판관의 석출물 분율이 가장 낮게 관찰된 것으로 판단된다.

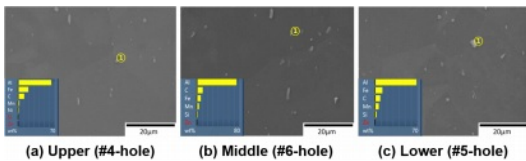


Fig. 13 SEM observation results and EDS point analysis results of flat tube surfaces with different cooling rates

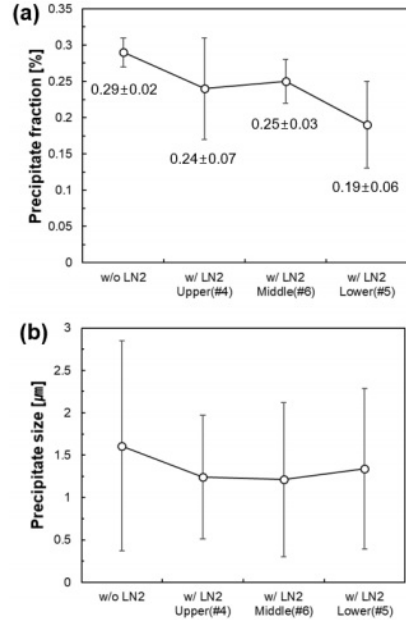


Fig. 14 Changes in the precipitate fraction and size of flat tube surfaces with different cooling rates

3.7 평판관 표면 경도 측정

Fig. 15는 평판관의 표면 경도를 비커스 경도측정기를 측정한 결과를 나타낸 그래프이다. 앞의 경향들과 다르게 6번 홀 평판관의 경도가 가장 높게 나타났으며 5번 홀 평판관의 경도는 금형 냉각을 적용하지 않은 평판관과 거의 유사하였다. 경도에 영향을 주는 인자로는 결정립의 크기와 석출물 분율 및 크기 등이 있다. 5번 홀은 평균 결정립 크기는 가장 작지만, 석출물 분율 또한 현저히 낮아졌기 때문에 경도가 낮아진 것으로 판단되며 6번 홀 평판관은 석출물 분율이 다른 홀 평판관 대비 높기 때문에 가장 높은 경도를 나타내는 것으로 판단된다.

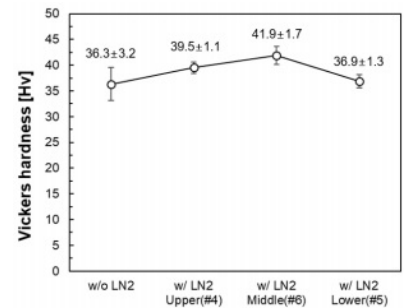


Fig. 15 Changes in Vickers hardness of the flat tube surfaces with different cooling rates

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 액체질소를 활용한 금형 냉각을 통해 Al-Mn계 합금 평판관의 온도 상승을 억제함으로써, 압출 생산 속도를 높이는 것을 목표로 실험적 연구를 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 금형 냉각은 압출된 평판관의 표면온도를 낮추는데 효과가 있고 표면 광택 증가와 찍업 결함 감소 등 표면 품질 개선에도 효과가 있음을 확인하였다.

하지만 500℃로 예열된 다중 압출 금형을 통해, 장착 전 액체질소 분사 실험을 수행해 본 결과, 예열 전과 달리 압출 홀의 위치에 따라 분사량 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 냉각량에 따른 평판관의 특성 변화 관찰에 활용하였고 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 평판관 표면부 EBSD 분석 결과를 보면 금형 냉각이 평판관의 결정립을 미세화시킨 것을 확인할 수 있고, 액체질소 분사량 많을수록 결정립 크기가 작아지는 경향을 확인하였다.

2) 평판관 격막부의 미세조직을 관찰해 본 결과 격막 중심부는 액체질소 분사량에 관계없이 냉각이 제대로 이루어지지 않아 상대적으로 조대한 결정립들이 관찰되었다.

3) 평판관의 석출물 분석에서는 금형 냉각을 수행한 샘플이 전반적으로 석출물의 크기가 작은 것을 확인하였으며 석출물 분율도 분사량이 많은 홀에서 가장 작게 나타남을 확인하였다. 이러한 경향은 금형 냉각에 의해 재결정 온도 및 석출물 형성 온도를 빠르게 지나칠 수 있었기 때문으로 판단된다.

4) 경도 측정 결과에서는 결정립 크기와 석출물 분율의 영향이 종합적으로 나타나고 있으며, 금형 냉각에 의해 결정립 크기가 작아지더라도 석출물 분율 또한 작아지므로 경도의 큰 증가는 없을 것으로 예상된다.

향후 연구에서는 다중 압출 공정에서 압출 홀별 액체질소 분사량을 균일화할 수 있는 냉각 유로 설계안을 제안하고 생산성 향상 효과를 평가하고자 한다.

후기

본 논문은 중소벤처기업부 구매조건부신제품개발사업 “전기차 콘텐츠용 마이크로 튜브 압출을 위한 고내마모성 장수명 압출 금형 개발 (S3374662)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

참고문헌

- 1) Choi, J.H., “Numerical analysis of CO₂-based rapid mold cooling technology”, *Design & Manufacturing*, Vol.17:3, pp.61-66, 2023.
<http://doi.org/10.22847/ksdme.17.3.202309.010>
- 2) Lee, S.H. and Lee, H.S., “Rapid cooling of injection mold for high-curvature parts using CO₂ cooling module”, *Design & Manufacturing*, Vol.16:4, pp.67-74, 2022.
<http://doi.org/10.22847/ksdme.16.4.202212.010>
- 3) Lim, D.W., Kim, J.H. and Shin, B.C., “Gas cooling for optimization of mold cooling”, *Journal of the Korea Society of Die & Mold Engineering*, Vol.12:1, pp.18-25, 2018.
- 4) Kim, B.M. and Kim, D.H., “Estimation of die service life for die cooling method”, *Transactions of Materials Processing*, Vol.12:4, pp.408-413, 2003.
<https://doi.org/10.5228/KSPP.2003.12.4.408>
- 5) Choi, S.C., Ko, D.S., Kim, H.Y., Kim, H.j., Hong, S.M., Ryu, S.Y. and Shin, Y.S., “Heating and cooling channel design of cross-shaped die for warm forming of magnesium alloy sheet”, *Proceedings of Korean Society for Technology of Plasticity Conference 2008 Spring*, pp.370-373, 2008.
- 6) Zheng, K., Li, D., Chen, H., Qu, S., Zhao, Z. and Zhang, Y., “Effect of cooling rate on the phase transformation and post strength of Ti-6Al-4V under hot forming conditions: Experiments and modelling”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.972, 172868, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172868>
- 7) Dong, F., Huang, S., Yi, Y., He, H., Huang, K., Wang, C., Gao, S., Jia, Y. and Yu, W., “Enhanced deep drawing formability and deformation mechanism of aluminum alloy at cryogenic temperature”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.968, 171992, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171992>
- 8) Huang, K., Yi, Y., Huang, S., He, H., Dong, F., Jia, Y. and Yu, W., “Cryogenic die-less spinning of aluminum alloy thin-walled curved components and microstructure evolution”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.92, pp.32-41, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.045>

9) Vazdirvanidis, A., Papadopoulou, S., Symeonidis, G., Aslanis, F., Rikos, A. and Stachouli, E., "Examination of the effect of cooling rate after extrusion to formability of 6061 automotive profiles", Applied Sciences, Vol.13:6, 3763, 2023. <https://doi.org/10.3390/app13063763>

10) Ko, D.H., Lee, S.H., Ko, D.C., Kim, H.G. and Kim, B.M., "Reduction of grain growth for Al6061 alloy by the die cooling system in hot extrusion process", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.33:7, pp.673-680, 2009. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2009.33.7.673>

11) Ko, D.H., Kang, B.H., Ko, D.C. and Kim, B.M., "Improvement of mechanical properties of Al6061 extrudate by die cooling with N2 gas during hot extrusion", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.27:1, pp.153-161, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1213-x>

12) Reggiani, B. and Donati, L., "Prediction of liquid nitrogen die cooling effect on the extrusion process parameters by means of FE simulations and experimental validation", Journal of Manufacturing Processes, Vol.41, pp.231-241, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.002>

13) Pelaccia, R., Negozi, M., Reggiani, B. and Donati, L., "Assessment of the optimization strategy for nitrogen cooling channel design in extrusion dies", Key Engineering Materials, Vol.926, pp.460-470, 2022. <https://doi.org/10.4028/p-f7i0y2>

14) Lee, S.Y., "The effect of die cooling on the surface defects of the aluminum 7075 extrudates", Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol.35:6, pp.319-326, 2022. <https://doi.org/10.12656/jksht.2022.35.6.319>

15) Seong, S.G., Kang, H.J. and Lee, S.Y., "Phenomenological analysis of the effects of die cooling and extrusion speed on the extrusion of 7075 alloy", Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol.34:4, pp.185-190, 2021. <https://doi.org/10.12656/jksht.2021.34.4.185>

16) Fang, W., Tang, D., Wang, H., Li, D. and Peng, Y., "Optimization of die design for thin-walled flat multi-port tube with the aid of finite element

simulation", Journal of Materials Processing Technology, Vol.277, 1116418, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116418>

17) Kang, T.H., Huang, Y., Shin, Y.C., Choi, H.J., Roh, H.R. and Lee, K.A., "Microstructure, high temperature deformation behavior and hot formability of modified Al-0.7Mn alloy", Transactions of Materials Processing, Vol.31:6, pp.365-374, 2022.

<http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.6.365>

저자 소개

신영철 (Young-Chul Shin)



- 2009년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2022년 2월 : 인하대학교 금속-재료 공정공학과 (공학박사)
- 2009년 6월 ~ 12월 : 현대하이스크, 연구원
- 2009년 12월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 금형성형연구부, 수석연구원

< 관심분야 >

소성가공해석, 금형냉각, 공정장비 개발

하성호 (Seong-Ho Ha)



- 2011년 9월: 일본 동북대학대학원 재료공학과 (공학박사)
- 2012년 10월~현재: 한국생산기술연구원 수석연구원

< 관심분야 >

금속소재, 미세조직, 열역학 계산

강태훈 (Tae-Hoon Kang)



- 2023년 12월: 인하대학교 신소재공학과 (공학박사)

< 관심분야 >

소성가공, 적층제조, 분말야금

이 기 안 (Kee-Ahn Lee)



- 2005년 3월: 안동대학교 금속공학과, 교수
- 2023년 1월 ~ 현재: 한국소성·가공학회 부회장
- 2023년 1월 ~ 현재: 한국분말재료학회 부회장
- 2017년 3월: 인하대학교 신소재공학과, 정교수

< 관심분야 >

비철합금, 소성가공, 적층 제조

이 승 철 (Seung-Chul Lee)



- 2017년 2월 : 호남대학교 전자공학과 (공학학사)
- 2022년 2월 : 인하대학교 금속·재료 공정공학과 (공학박사)

< 관심분야 >

제조설계, 성형