

Al-Zn-Mg-Sc 합금의 고온압출에 미치는 공정조건의 영향 분석

김정한¹, 염종택¹, 김남용¹, 임수근², 박노광¹

Effect of processing condition on the hot extrusion of Al-Zn-Mg-Sc alloy

Jeoung Han Kim¹, Jong Taek Yeom¹, Nam Yong Kim¹, Su-Keun Lim², Nho Kwang Park¹

Abstract

Effect of processing condition on the hot extrusion of Al-Zn-Mg-Sc alloy was investigated. For this purpose, hot compression test and FE-simulation were conducted via Thermecmaster-Z and DEFORM-3D, respectively. The microstructure evolution during hot extrusion and post heat-treatment was investigated and deformation mechanisms were analyzed by constructing processing map. FE-simulation results show that the temperature difference between container and billet has considerable influence on the final shape of extruded T-shape bar. The relation between applied load and processing time was predicted by the FE-analysis as well as punch speed vs. stroke chart.

Key Words : Hot extrusion, Al-Zn-Mg-Sc, Finite element method, Dynamic materials model, Scandium

1. 서론

항공소재의 개발은 그 기술적 어려움에도 불구하고 항공 산업의 경제성(제조비용, 유지비용 등)에 매우 중요한 파급효과를 미치기 때문에 선진국을 중심으로 꾸준한 연구가 이루어지고 있다 [1]. 특히 Al-Sc 합금은 결정립미세화에 따른 비강도의 증가 및 용접성 향상 등의 특성으로 인해 경량화, 경제성 향상, 연비절감 등을 동시에 이룰 수 있어 기존 2000 및 7000 계 소재를 대체할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다 [2].

국내에서는 7000 계 Sc 합금을 대상으로 항공기 부품용 압출기술이 개발되어 왔으며 기존의 항공기용 2000 및 7000 계 합금 보다 우수한 특성을 보이며 기술적으로도 소형 고강도 압출 부품의 제조가능성이 확인되었다. 그러나 7000 계

Sc 합금은 제조비용 및 특성 측면에서 적용 가능한 부품종류가 제한적이며 특히 높은 신뢰성이 요구되는 부위에 적용되어야 하기 때문에 실용화를 위해서는 많은 노력이 요구되고 있다.

현재 기계구조용 Sc 함유 고강도 알루미늄 소재는 압출재와 단조재가 대부분인데, 그 중 압출소재의 분야는 상당한 기술을 보유하고 있는 반면 압출품에 대한 신뢰성 확보는 충분히 이루어지지 않고 있다. 본 연구의 목적은 Al-Zn-Mg-Sc 고강도 알루미늄 합금의 압출성을 평가하고 이에 미치는 공정변수의 영향을 평가하는 것이다. 압출성의 주요인자인 빌렛 및 다이의 초기 가열 온도와 이에 따른 미세조직의 변화를 알아보았다. 또한, Al-Zn-Mg-Sc 합금의 기본적인 변형기구를 분석하기 위해 Dynamic materials model(DMM) [3]을 도입하였다.

1. 한국기계연구원, 재료기술연구소/소재성형센터

2. 경상대학교, 재료공학부

#교신저자: 한국기계연구원, E-mail: kjh1754@kmail.kimm.re.kr

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 Al-Zn-Mg-Cu 를 기본으로 한 합금에 Sc 을 0.1wt% 정도 함유하고 Zn 및 Cu 의 함량을 변화시킨 미국의 소재회사 기준에 따르고 있다. 압출을 위한 주조빌렛은 Sc 을 2wt% 함유한 모합금을 용해하여 Air-Slip Continuous Costing 법으로 제조되었으며 화학 조성은 표 1 과 같다. 한편, 그림 1 은 균질화 처리된 Al-Zn-Mg-Sc 의 조직사진으로서 결정립크기는 ~110 μ m 이었다.

Table 1 Chemical composition of Al-Zn-Mg-Sc alloy used in this work

Element	Zn	Mg	Cu	Sc	Zr	Cr
Wt. (%)	5.99	2.77	0.42	0.11	0.11	<0.01

Mn	Ti
0.29	0.04

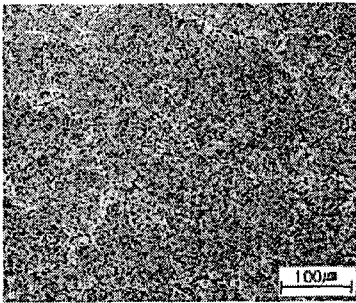


Fig. 1 As-received microstructure of Al-Zn-Mg-Sc

소재의 고온물성을 평가하기 위해 열간가공재 현시시험기(Thermecmaster Z)를 사용하여 고온압축 실험을 수행하였다. 시편은 직경 8mm, 높이 12mm 의 원통형 시편을 사용하였고 Al-Zn-Mg-Sc 잉곳의 동일 위치에서 길이방향으로 가공되었다. 시험 온도는 330 $^{\circ}$ C, 380 $^{\circ}$ C, 430 $^{\circ}$ C 이었으며 변형속도는 10/sec, 1/sec, 10⁻¹/sec, 10⁻²/sec 의 4 조건이었다. 변형 후 시편들은 급속 냉각되었으며 압축 축에 평행으로 절단하여 미세조직을 관찰하였다.

압출공정의 FE-Simulation 을 위해 Al-Zn-Mg-Sc 합금의 열확산, 비열, 열전도도를 측정하였다. 각각의 물성은 상온에서 450 $^{\circ}$ C 까지 측정되었으며 시험방법은 Laser flash method 였고 실험당시 습도는 54%였다.

Table 2 Thermal properties of Al-Zn-Mg-Sc specimen

온도 (°C)	열확산 (cm ² /sec)	비열 (J/g/K)	열전도도 (W/cm/K)
28	0.4731	0.821	1.0512
250	0.6097	1.042	1.7194
300	0.5858	0.873	1.3842
350	0.5619	0.880	1.3380
400	0.5879	0.925	1.4714
450	0.5193	1.006	1.4140

압축시험결과와 표 2 의 자료를 바탕으로 압출공정의 FE-simulation 을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고온압출 실험

그림 2 는 고온 압축실험 후 얻어진 실험 결과를 보여주고 있다. 각 온도에 얻어진 stress-strain 곡선들은 380 $^{\circ}$ C, 0.1/sec 조건 외에는 비교적 큰 유동이 없었고 변형율 0.6 이상에서는 대부분 안정상태(steady state)의 거동을 보여주었다.

압축시험결과를 바탕으로 Processing map 을 작성하였다. 여기서, 무차원 파라미터인 n 는 가공 소재의 에너지 분산 특성을 선형 분산자의 분산 특성과 비교한 값으로서 $2m/(m+1)$ 로 계산되어 진다(m = strain rate sensitivity). Processing map 에 대한 자세한 설명과 제작 방법은 Ref. [3] 에 제시되어 있다. 분산효율은 10/sec 의 조건에서는 온도에 상관없이 0.1 이하의 매우 낮은 효율을 보여주고 있다. 이는 고온 변형시 대부분의 외부에너지가 열로 소모되고 있음을 의미한다. 변형속도 0.1 이하에서는 0.35-0.4 정도의 분산효율이 나타나고 있지만 전체적으로 분산효율의 peak 을 보여주는 Domain 의 형성은 보이지 않고 있다. 일반적으로 Al 과 Cd 같은 높은 적층결함에너지를 가지는 소재의 경우 동적회복정 현상은 0.5-0.55 의 높은 분산효율을 보이는 공정조건에서 발생한다. 반면 동적회복의 경우는 그 이하의 비교적 낮은 효율을 가지는 조건에서 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에 이용된 Al-Zn-Mg-Sc 합금의 주 변형기구는 동적회복으로 판단된다.

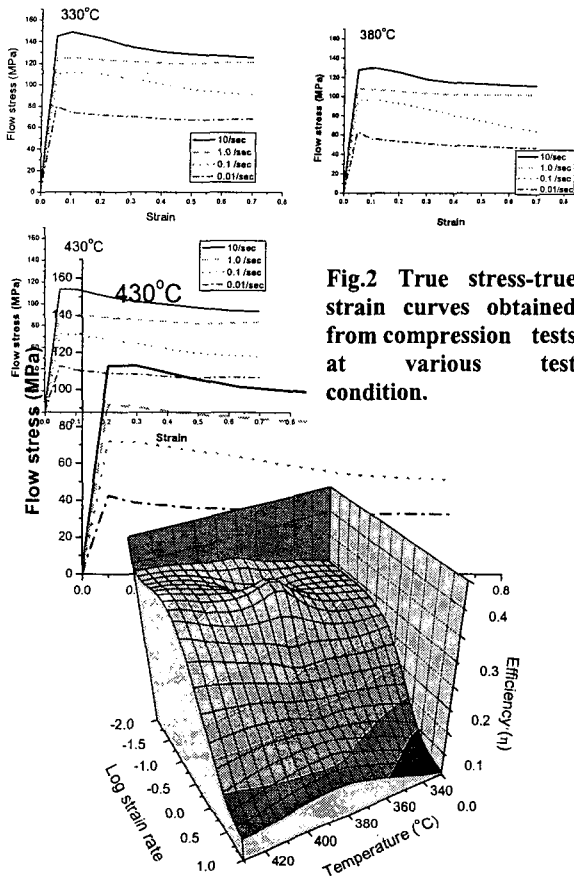


Fig.2 True stress-true strain curves obtained from compression tests at various test condition.

Fig.3 Power dissipation efficiency map obtained for Al-Zn-Mg-Sc alloy at a strain of 0.6. Contour numbers represent percent efficiency of power dissipation.

고온변형 전후의 결정립도 변화 및 변형기구 확인을 위해 시편의 미세조직을 관찰하였다. 각각의 시편은 0.6의 변형량을 부과한 후 압축응력을 제거하였고 그 후 1 초 이내에 nitrogen gas 로 급랭되었다. 조직 관찰 지역은 시편의 정중앙(center), 시편의 길이 방향으로 1/3 지점(middle) 그리고 시편의 최외곽 지역(end) 이었다. 변형 후의 대표적인 조직이 Fig.4-6 에 제시되어있다. 전반적으로 결정립들이 압축방향에 수직하게 눌러져 있는 형태를 보이고 있는데 이는 전형적인 동적회복에 의한 변형양상이다. 380°C/10⁻²/sec, 430°C/ 10⁻²/sec, 430°C/0.1sec 외의 조건에서도 위와 비슷한 조직

변화를 보였다. 이는 Fig.3 processing map 에서 변형효율이 높은 구역의 경향과 일치한다.

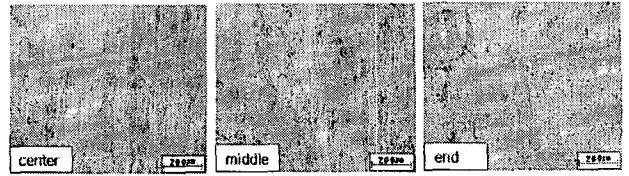


Fig. 4 Microstructures of Al-Zn-Mg-Sc specimen deformed to a strain of 0.6 at 330 °C and 10⁻²/sec. The compression axis is horizontal.

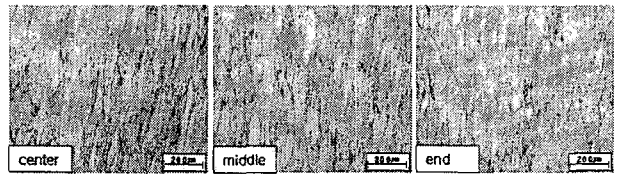


Fig. 5 Microstructures of Al-Zn-Mg-Sc specimen deformed to a strain of 0.6 at 380 °C and 10⁻²/sec. The compression axis is horizontal.

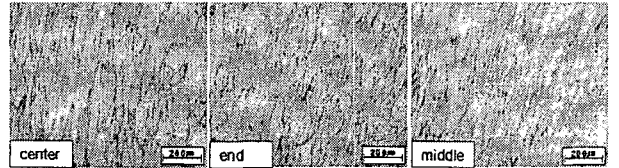


Fig. 6 Microstructures of Al-Zn-Mg-Sc specimen deformed to a strain of 0.6 at 430 °C and 10⁻²/sec. The compression axis is horizontal.

3.2 FE-시뮬레이션을 통한 압출 공정설계

Table 3 Process parameters and conditions

Process parameter	Value
Inner diameter of container	50mm
Extrusion ratio	11
Initial temp. of billet	400, 370°C
Initial temp. of die & land	430, 400°C
Temp. of environment	22°C
Ram speed	0.17mm/sec
Friction factor (m)	0.5

Fig.2 와 표 2 의 자료를 바탕으로 압출공정의 FE-simulation 을 수행하였다. 온도조건은 비등온 조건으로 설정하여 실제 압출공정과 매우 유사하게 작용하도록 하였고 그 외의 공정조건들은 표 3

에 정리되어 있다. 한편, 압출형상은 전형적인 부품형상인 T 형을 따르도록 하였다. 압출소재와 다이의 온도는 Fig.3 의 processing map 에서 변형효율이 좋았던 400℃근방으로 설정하였다. 우선 다이의 온도를 430℃그리고 소재의 온도를 400℃로 설정하고 압출을 시도해 보았다. 이 경우 최종 압출재의 형상은 그림 7(b)에서 보이듯이 한쪽으로 치우쳐 휘어진 형상이 얻어졌는데 그 이유는 A 지역의 온도가 반대쪽보다 높아 소재의 유동속도가 빨라졌기 때문이다. A 지역이 상대적으로 온도가 높게 상승한 이유는 이 구역이 압출재 T 자 형태의 상단부에 속하기 때문에 부피대비 표면적이 넓어 다이로부터 많은 열을 전달 받았기 때문이다. 위의 문제의 원인은 소재와 다이간의 온도차이 및 압출재의 형상에 기인한다. 본 연구의 목적인 T 자형 압출을 위해서는 압출재 형상의 조절보다는 소재와 다이간의 온도 차이를 최소화해야 할 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위해 다이와 소재의 온도를 모두 400℃로 설정하고 FE-simulation 을 재시행 해보았다. 그림 7(c)는 위의 조건에서 얻어진 결과로서 외형적으로 건전한 압출재를 보여주고 있다.

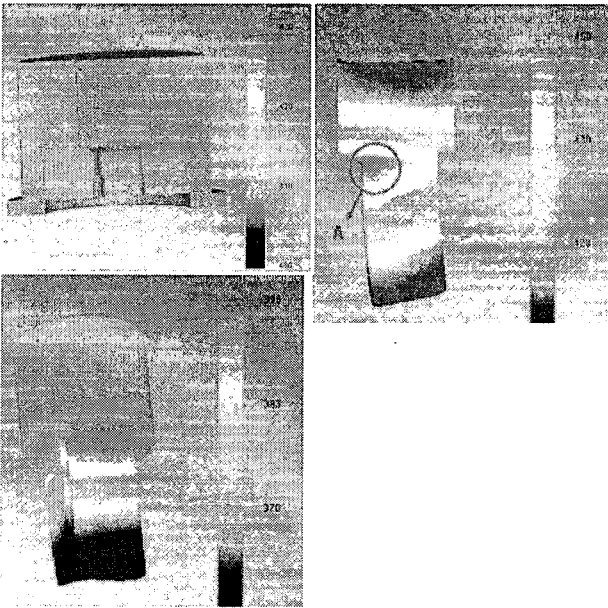


Fig. 7 FE-simulation results for Al-Zn-Mg-Sc extrusion with specimen temperature of 400℃ and die temperature of (a, b) 430℃ and (c) 400℃, respectively.

Fig.8 은 압출시 소재에 부과되는 압력을 알아보기 위해 하중-시간의 관계를 조사해보았다. 최대 하중은 $\sim 4 \times 10^5 \text{N}$ 으로 일반적인 프레스의 하중 부과 가능 범위 안에 드는 것으로 나타났다. Punch 부에서 발생하는 하중은 압출과정 중 거의 일정했다. 한편, 압출에 걸리는 시간은 40 초 정도로 계산되었다

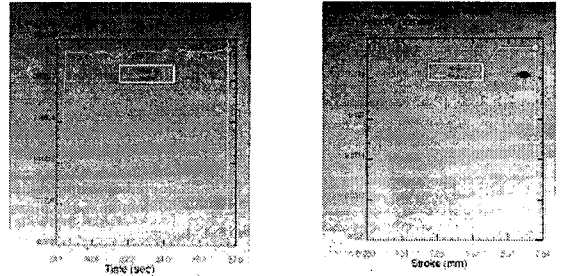


Fig. 8 Applied load vs. processing time and punch speed vs. stroke chart.

4. 결론

Al-Zn-Mg-Sc 합금의 압출에 미치는 공정조건의 영향을 분석하였다. 이를 위해 압축시험과 FE-시뮬레이션을 수행하였다. DMM 모델을 통해 주변형기구가 동적회복임을 확인하였다. T 자형 압출재의 성형에서 빌렛과 다이의 온도구배가 매우 중요함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] A.F. Norman, P.B.R.S. McEwen, 1998, Solidification behavior of dilute Al-Sc alloys, Acta Mater., Vol. 46, pp. 5715~5732.
- [2] E.A. Marquis, D.N. Seidman, 2001, Nanoscale structural evolution of Al₃Sc precipitates in Al(Sc) alloys, Acta Mater., Vol. 49, pp. 1909~1919.
- [3] Y.V.R.K. Prasad and S. Sasidhara, Hot Working Guide-a compendium of processing maps, Materials Park, OH 44073-0002, ASM International, 1997.