

Al-Zn-Mg-Sc 합금의 고온압출에 미치는 공정조건의 영향 분석

김남용¹ · 김진호² · 김정한[#] · 염종택² · 이동근² · 임수근³ · 박노광²

Effect of Processing Condition on the Hot Extrusion of Al-Zn-Mg-Sc Alloy

Nam Yong Kim, Jin Ho Kim, Jeoung Han Kim, Jong Taek Yeom, Dong-Geun Lee, Su Gun Lim,
Nho Kwang Park

(Received October 6, 2005)

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. 서 론

항공소재의 개발은 그 기술적 어려움에도 불구하고 항공 산업의 경제성(제조비용, 유지비용 등)에 매우 중요한 과급효과를 미치기 때문에 선진 국을 중심으로 꾸준한 연구가 이루어지고 있다 [1~2]. 특히 Al-Sc 합금은 결정립 미세화에 따른 비강도의 증가 및 용접성, 응력부식 열방지 특성 향상 등에 의해 경량화, 경제성 향상, 연비절감 등을 동시에 이를 수 있어 기존 2000 및 7000 계 소재를 대체할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다 [3].

국내에서는 7000계 Sc합금을 대상으로 항공기

부품용 압출기술이 개발되어 왔으며 기존의 항공 기용 2000 및 7000계 합금 보다 우수한 특성을 보이며 기술적으로도 소형 고강도 압출 부품의 제조가능성이 확인되었다. 그러나 7000계 Sc 합금은 제조비용 및 특성 측면에서 적용 가능한 부품종류가 제한적이며 특히 항공기의 용접구조물과 같은 높은 신뢰성이 요구되는 부위에 적용되어야 하기 때문에 실용화를 위해서는 많은 노력이 요구되고 있다 [4~6].

현재 기계구조용 Sc 함유 고강도 알루미늄 소재는 압출재와 단조재가 대부분인데, 그 중 압출 소재의 분야는 상당한 기술을 보유하고 있는 반면 압출품에 대한 압력, 표면향상, 강도등의 압출

1. 동의대학교, 신소재공학과

2. 한국기계연구원, 재료기술연구소/소재성형센터

3. 경상대학교, 재료공학부

교신저자 : 한국기계연구원, 재료기술연구소/소재성형센터

E-mail:kjh1754@mail.kimm.re.kr

성 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)[7]을 도입하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 압출을 위해 사용되는 주조 빌렛은 Sc을 2wt% 함유한 모합금을 용해하여 Air-Slip Continuous Casting 법으로 제조되었으며 화학 조성은 Table 1과 같다. 한편, Fig. 1은 균질화 처리된 Al-Zn-Mg-Sc의 조직사진으로서 결정립 크기는 110μm이었다.

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

Element	Zn	Mg	Cu	Sc	Zr	Cr	Mn	Ti
Wt. (%)	5.99	2.77	0.42	0.11	0.11	<0.01	0.29	0.04

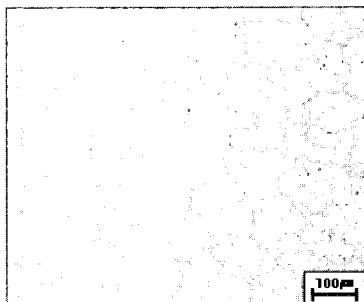


Fig. 1 As-received microstructure of Al-Zn-Mg-Sc alloy

소재의 고온물성을 평가하기 위해 Fig. 2의 열간가공재현시험기(Thermecmaster Z)를 사용하여 고온압축 실험을 수행하였다. 시편은 직경 8mm, 높이 12mm의 원통형 시편을 사용하였고 Al-Zn-Mg-Sc 잉곳의 동일 위치에서 길이방향으로 가공되었다. 시험 온도는 330°C, 380°C, 430°C이었으며 변형속도는 10/sec, 0.1/sec, 10⁻¹/sec, 10⁻²/sec의 4조건이었다. 변형 후 시편들은 급속 냉각되었으며 압축 축에 평행으로 절단하여 미세조직을 관찰하였다.

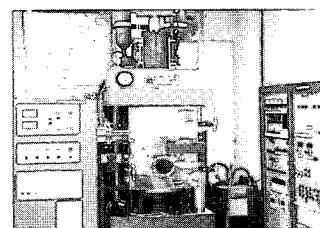


Fig. 2 Thermecmaster Z

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

Temp. (°C)	Heat Diffusion (cm ² /sec)	Specific Heat (J/g/K)	Heat Conductivity (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

압출공정의 FE-Simulation을 위해 Al-Zn-Mg-Sc 합금의 열확산, 비열, 열전도도를 측정하였다. 각각의 물성은 상온에서 450°C까지 측정되었으며 시험방법은 Laser flash method였고 실험 당시 습도는 54%였다.

압축시험결과와 Table 2의 자료를 바탕으로 압출공정의 FE-simulation을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고온압축 실험

Fig. 3은 고온 압축실험 후 얻어진 실험 결과를 보여주고 있다. 각 온도에 얻어진 stress-strain 곡선들은 380°C, 0.1/sec 조건 외에는 비교적 큰 유동이 없었고 변형율 0.6 이상에서는 대부분 안정상태(steady state)의 거동을 보여주었다.

압축시험결과를 바탕으로 공정도(Processing map)를 작성하였다. 여기서, 무차원 파라미터인 η 는 가공소재의 에너지 분산 특성을 선형 분산자의 분산특성과 비교한 값으로서 $2m/(m+1)$ 로 계산되어진다(m =strain rate sensitivity). 공정도(Processing map)에 대한 자세한 설명과 제작 방법은 Ref. [7]에 제시되어 있다. 분산효율은 10/sec의 조건에서는 온도에 상관없이 0.1 이하의 매우 낮은 효율을 보여주고 있다. 이는 고온 변형시 대부분의 외부

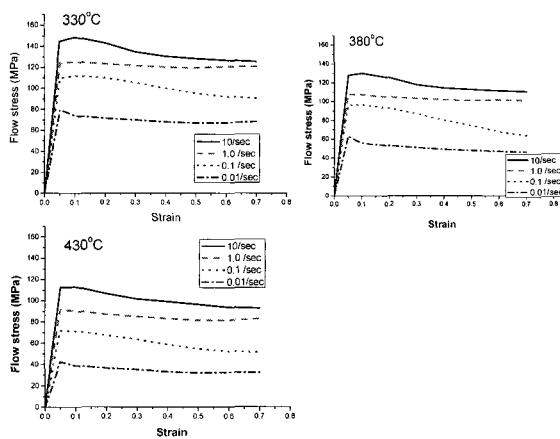


Fig. 3 True stress-true strain curves obtained from compression tests at various test condition

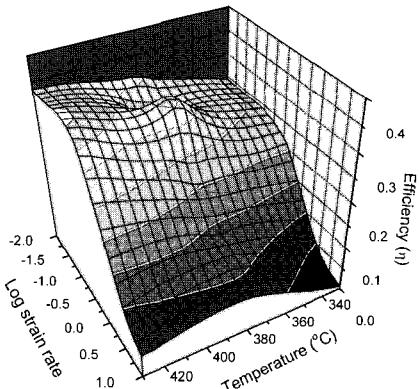


Fig. 4 Power dissipation efficiency map obtained for Al-Zn-Mg-Sc alloy at a strain of 0.6. Contour numbers represent percent efficiency of power dissipation.

에너지가 열로 소모되고 있음을 의미한다. 변형 속도 0.1 이하에서는 0.35~0.4 정도의 분산효율이 나타나고 있지만 전체적으로 분산효율의 최고점을 보여주는 영역의 형성은 보이지 않고 있다. 일반적으로 Al과 Cd 같은 높은 적층결합에너지를 가지는 소재의 경우 동적재결정 현상은 0.5~0.55의 높은 분산효율을 보이는 공정조건에서 발생한다. 반면 동적회복의 경우는 그 이하의 비교적 낮은 효율을 가지는 조건에서 발생을하게 된다. 따라서, 본 연구에 이용된 된 Al-Zn-Mg-Sc 합금의 주 변형기구는 동적회복으로 판단된다.

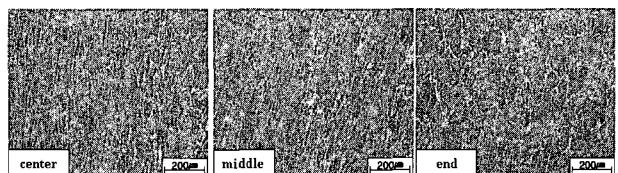


Fig. 5 Microstructures of Al-Zn-Mg-Sc specimen deformed to a strain of 0.6 at 330°C and 10^{-2} /sec. The compression axis is horizontal

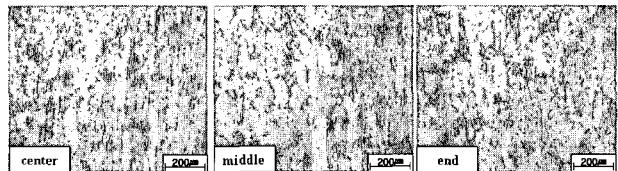


Fig. 6 Microstructures of Al-Zn-Mg-Sc specimen deformed to a strain of 0.6 at 380°C and 10^{-2} /sec. The compression axis is horizontal

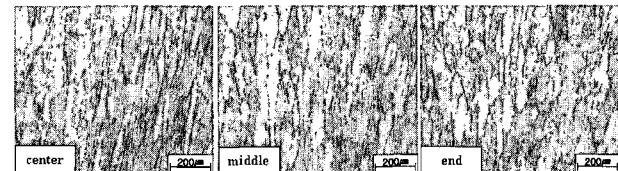


Fig. 7 Microstructures of Al-Zn-Mg-Sc specimen deformed to a strain of 0.6 at 430°C and 10^{-2} /sec. The compression axis is horizontal

고온변형 전후의 결정립도 변화 및 변형기구 확인을 위해 시편의 미세조직을 관찰하였다. 각각의 시편은 0.6의 변형량을 부과한 후 압축응력을 제거하였고 그 후 1초 이내에 질소가스로 급랭되었다. 조직 관찰 지역은 마찰로 인한 불감대를 피하여 시편의 정중앙(center), 시편의 길이방향으로 1/3 지점(middle) 그리고 시편의 최외곽 지역(end) 이었다(Fig. 8). 변형 후의 대표적인 조직이 Fig. 5~7에 제시되어 있다. 전반적으로 결정립들이 압축방향에 수직하게 눌러져 있는 형태를 보이는 것과 유동응력곡선에서 나타나는 유동연화 거동은 전형적인 동적회복에 의한 것으로 보이는데 이는 기존 연구에서[8] 보고된 것과 유사하다. 380°C/ 10^{-2} /sec, 430°C/ 10^{-2} /sec, 430°C/0.1sec 외의 조건에서도 위와 비슷한 조직 변화를 보였다. 이는 Fig. 4 공정도(Processing map)에서 변형효율이 높은 구역의 경향과 일치한다.

시편 정중앙과 1/3 지점 관찰 부위와 비교해 시편 최외곽 부분의 조직을 관찰하면 압축에 의해 수직으로 눌린 변화가 적다. 이는 시편 외곽부

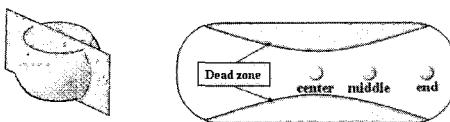


Fig. 8 Specimen observation region

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

위의 변형량이 적어서 동적회복의 매커니즘이 정 중앙, 1/3 지점 보다 적은 이유라고 판단되며, 또한 시편 최외각 부분의 온도가 압축시 순간적으로 낮아지는 이유에서 동적회복의 매커니즘이 적어진 이유라고 판단된다.

3.2 FE-시뮬레이션을 통한 압출 공정설계

Fig. 3과 Table 2의 자료를 바탕으로 압출공정의 FE-simulation을 수행하였다. 온도조건은 비등온 조건으로 설정하여 실제 압출공정과 매우 유사하게 작용하도록 하였고 그 외의 공정조건들은 Table 3에 정리되어 있다. 한편, 압출형상은 전형적인 부품형상인 T형을 따르도록 하였다. 압출소재와 다이의 온도는 Fig. 4의 공정도(Processing map)에서 변형효율이 좋았던 400°C근방으로 설정하였다. 우선 다이의 온도를 430°C 그리고 소재의 온도를 400°C로 설정하고 압출을 시도해보았다. 이 경우 최종 압출재의 형상은 Fig. 9(b)에서 보이듯이 한쪽으로 치우쳐 휘어진 형상이 얻어졌는데 그 이유는 A지역의 온도가 반대쪽보다 높아 소재의 유동속도가 빨라졌기 때문이다. A지역이 상대적으로 온도가 높게 상승한 이유는 이 구역이 압출재 T자 형태의 상단부에 속하기 때문에 부피대비 표면적이 넓어 다이로부터 많은 열을 전달 받았기 때문이다. 위의 문제의 원인은 소재와 다이간의 온도차이 및 압출재의 형상에 기인한다. 압출성형중의 온도관리는

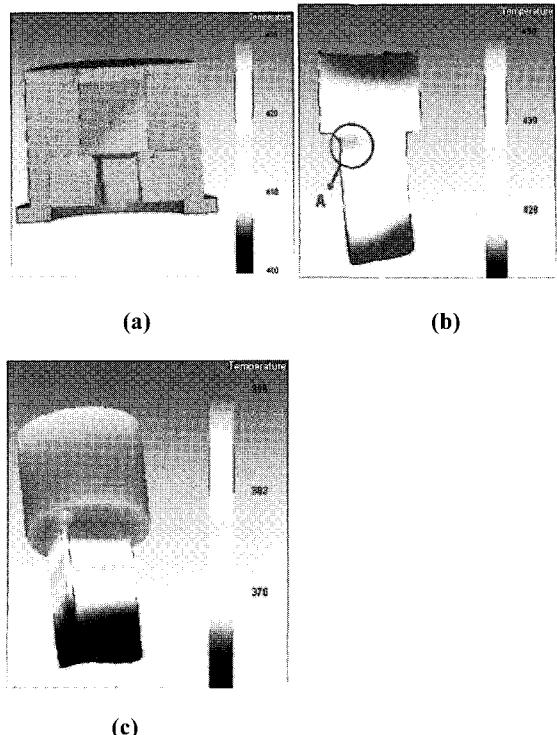


Fig. 9 FE-simulation results for Al-Zn-Mg-Sc extrusion with specimen temperature of 400°C and die temperature of (a, b) 430°C and (c) 400°C, respectively

압출변형저항은 물론 다이 출구에서의 온도차가 원인이 되어 발생하는 굽힘, 비틀림, 표면균열 등의 압출재 표면결함이나 내부조직에도 커다란 영향을 미친다. 그래서 본 연구의 목적인 T자형 압출을 위해서는 압출재 형상의 조절보다는 소재와 다이간의 온도 차이를 최소화해야 할 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위해 다이와 소재의 온도를 모두 400°C로 설정하고 FE-simulation을 재시행 해보았다. Fig. 9(c)는 위의 조건에서 얻어진 결과로서 외형적으로 건전한 압출재를 보여주고 있다.

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

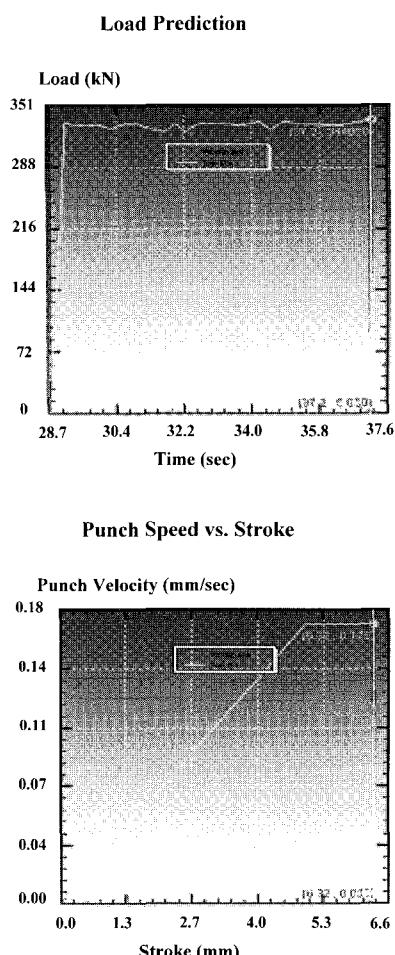


Fig.10 Applied load vs. processing time and punch speed vs. stroke chart

4. 결론

Al-Zn-Mg-Sc 합금의 압출에 미치는 공정조건의 영향을 분석하였다. 이를 위해 압축시험과 FE-시뮬레이션을 수행하였다. DMM 모델과 압축시험 결과를 바탕으로 한 공정도(Processing map)을 통해 주변형기구가 동적회복임을 확인하였다. T 자형 압출재의 성형에서 빌렛과 다이의 온도구배가 매우 중요함을 알 수 있었다. 실제 압출성은 빌

렛의 제조방법과, 적절한 균질화 조건 등과 소재의 다이의 구배 적절한 가열방법으로 향상시킬수 있다고 판찰되었다. 또한 조직판찰 부위에서 외곽부위가 중심부위보다 동적회복의 경향이 현저함을 알 수 있었다. 이는 온도의 차이와 변형량의 차이 때문이라고 판단된다.

후기

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

참고문헌

- [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] B. Lenczowski, R. Rauh, D. Wieser, G. Tempus, G. Fisher, J. Becker, K. Folkers, R. Braun, G. Lütjering, 2000, Weldable AlMgSc Alloys for Transportation Technology, pp. 200~203.
- [3] E. A. Marquis, D. N. Seidman, 2001, Nanoscale Structural Evolution of Al₃Sc Precipitates in Al(Sc) Alloys, *Acta Mater.*, Vol. 49, pp. 1909~1919.
- [4] S. Kramer, W. T. Tack, M. T. Fernandes, 1997, in: Proceedings of the Alumitech'97, The Aluminum Association, USA, pp. 1231~1236.
- [5] H. G. Paris, T. H. Sanders Jr., Y. W. Riddle, 1998, in: T. Sato, S. Kobayashi, Y. Murakami (Eds.), Proceedings of the Sixth International Conference on Aluminum Alloys, Japan Institute of Light Metals, pp. 499~504.
- [6] V. G. Davydov, V. I. Elagin, V. V. Zakharov, T. D. Rostova, 1997, *Met. Sci. Heat Treatment*, Vol.38, pp 347~352.
- [7] Y. V. R. K. Prasad and S. Sasidhara, 1997, Hot Working Guide-a Compendium of Processing Maps, Materials Park, OH 44073-0002, ASM International.
- [8] Sung-II Kim, Byung-Chul Ko, Ho-In Lee, Yeon-Chul Yoo, 2003, *Met. Mater.-Int.*, Vol. 9, No. 5, pp. 447~451.