

Al6061의 고온변형특성 및 단조 시뮬레이션 적용을 통한 검증

엄재근¹, 장성민², 이민철³, 정순종⁴, 박건형⁵, 곽양섭⁶, 전만수[#]

Flow Stress of Al6061 at Elevated Temperature and Its Application to Forging Simulation for verification

J. G. Eom, S. M. Jang, M. C. Lee, S. J. Jung, M. S. Joun

Abstract

In this paper, flow stress of Al6061 is obtained by compression test in the range of temperature from 300°C to 550°C and effective strain-rate from 0.1/s to 20.0/s. The flow stress information is used to simulate an aluminum hot forging process. Non-isothermal simulation is carried out by a rigid-thermoviscoplastic finite element method. The predictions are compared with the experiments in terms of the deformed shape of material.

Key Words : Flow Stress(유동응력), Aluminum(알루미늄), Forging Simulation(단조 시뮬레이션)

1. 서론

차량의 경량화는 연비의 향상과 직결되어 있다. 이런 이유로 경량화 소재 및 고강도 소재의 적용을 위한 광범위한 시도가 이루어지고 있다. 이런 측면에서 알루미늄(aluminum)은 기존의 강(steel)을 대체할 수 있는 현실적인 대안이 되고 있다. 이미 대부분의 자동차의 차체를 알루미늄으로 만든 자동차가 등장한 일이 오래 전의 일이다. 그리고 압류, 너클, 서브프레임 등에 자동차용 주요부품에 알루미늄 소재가 적용되고 있고, 가까운 장래에 다수의 부품의 소재도 강에서 알루미늄으로 대체될 전망이다. 열간단조 알루미늄 샤시부품용 소재는 주로 Al6061과 Al6082가 사용되고 있다[2]. 그러나 알루미늄의 성형에서 필수적인 엄격한 가열 온도의 관리 문제와 소성변형량이 큰 부위에서 발생하는 재결정 조직의 입자성장 등의 문제가 있다. 즉, 기존의 철계 소성가공품에 비하여 개발과 품질 등의 측면에서 알루미늄은 다소 까다로

움이 틀림없다. 전세계적으로 알루미늄 단조는 매우 국한된 기업체에서 실시하고 있고, 알루미늄 소재가 고가이기 때문에 알루미늄 단조품의 확산을 위해서는 단조가공 시의 수율 증대 문제가 중요한 현안 문제이다.

2. Al6061의 유동응력

Fig. 1은 온도, 변형률, 변형률속도 등이 재료의 유동응력 함수에 미치는 영향을 도시한 것이다. 그림에서 T_m 은 재료의 용융점 온도를 의미한다. 저온영역에서는 변형률, 변형률속도, 온도변화 모두 유동응력 함수에 비교적 큰 영향을 미치며, 상온영역에서는 변형률속도와 온도변화의 영향이 미미한 반면, 변형률의 영향이 크다는 점을 알 수 있다. 그리고 고온으로 갈수록 변형률의 영향이 무시할 수 있을 정도로 작아지고, 변형률 속도와 온도변화가 유동응력에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

비등온공정(non-isothermal process)을 정확하게 해

1. (주)경상대 수송기계부품기술혁신센터
2. 경상대학교 기계공학과 대학원
3. 경상대학교 공학연구원
4. ㈜센트랄모터
5. ㈜센트랄
6. 대화정밀
경상대학교 기계항공공학부/항공기부품기술연구소
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

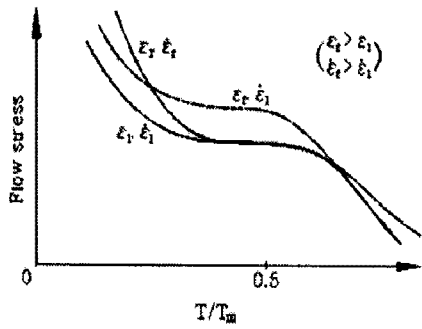


Fig. 1 The influence of temperature, strain and strain-rate on the flow stress

석하기 위해서는 온도와 변형률속도에 따른 재료의 변형저항식을 알아야 한다. 그러나 고온영역에서의 소재의 변형저항식은 구하기 어렵고, 문헌에서도 찾기가 쉽지 않다. 비록 찾았다고 하더라도 사실은 제조자에 따라 유동특성은 다소 차이가 날 수밖에 없다. 따라서 능동적인 기술자들은 자체적으로 재료의 거동특성을 파악해 둘 필요가 있다. 물론 제조자가 재료의 사용자에게 상세 정보를 제공해야 마땅하지만, 현실은 그렇지 못하다.

본 연구의 대상재료인 Al6061의 고온특성을 파악하기 위하여 고온압축시험을 실시하였다.

Termehcmastor-Z를 시험장비로 사용하였으며, 시편의 재질은 Al6061이고, 지름과 높이는 각각 $\phi 8\text{mm}$ 와 12mm 이다. 시험조건으로 압축률은 50~60%, 변형률속도는 0.1~20.0/s, 그리고 시험온도는 300~550 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

고온압축시험으로부터 획득한 응력-변형률곡선을 Fig. 2~7에 나타내었다. Fig. 2~7의 응력-변형률곡선으로부터 온도가 증가할수록 유동응력이 감소하고, 변형률속도가 증가할수록 유동응력이 증가함을 알 수 있다.

그리고 특정 변형률 이하에서 변형률은 유동응력에 비교적 큰 영향을 주지만, 유동응력이 최대일 때의 변형률, 즉 피크변형률(peak strain)값에 도달한 이후에는 변형률의 증가가 유동응력의 변화에 큰 영향을 못 준다는 사실도 알 수 있다. 이는 피크변형률 이후부터 재결정이 발생하여 변형경화를 완화시킴으로써 유동응력의 증가를 저지하기 때문이다.

일반적으로 고온으로 가열된 재료, 즉 변형률속도 의존 재료의 특성을 반영하기 위한 유동응력함수는 다음의 수식으로 널리 표현되고 있다.

$$\bar{\sigma} = C\dot{\epsilon}^m \quad (4)$$

여기서 C 는 고온강도계수이고, m 은 변형률속도경화지수이다.

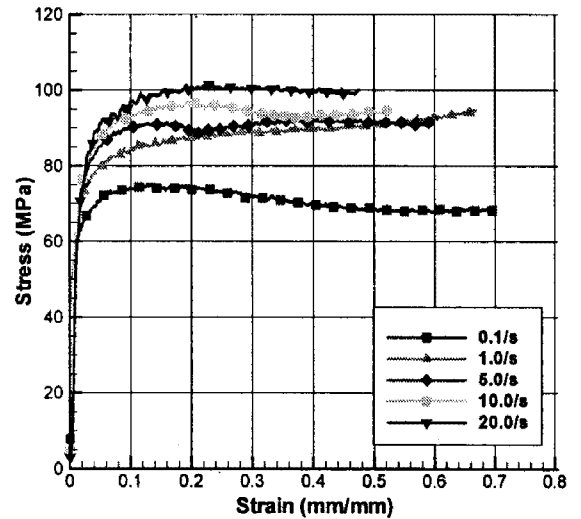


Fig. 2 True stress-strain curves at 300 $^{\circ}\text{C}$

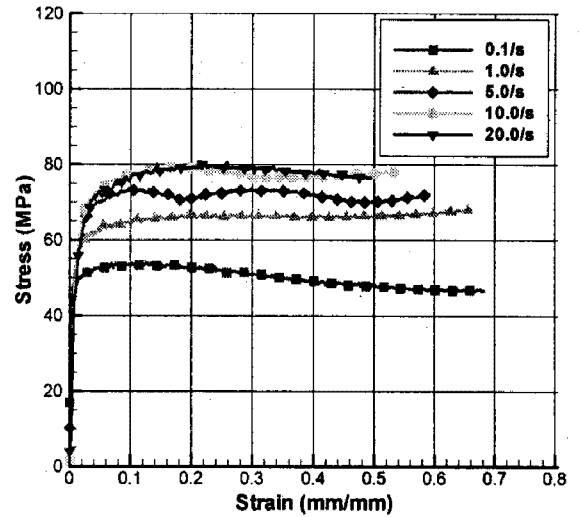


Fig. 3 True stress-strain curves at 350 $^{\circ}\text{C}$

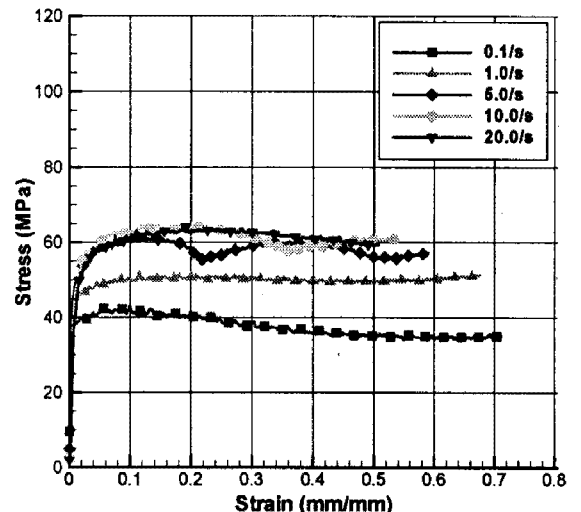


Fig. 4 True stress-strain curves at 400 $^{\circ}\text{C}$

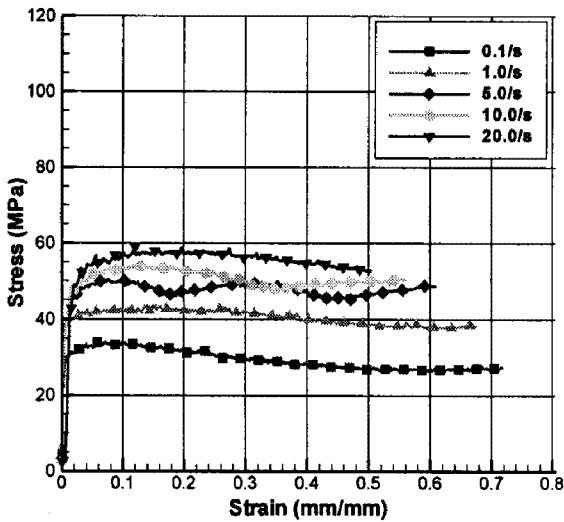


Fig. 5 True stress-strain curves at 450 °C

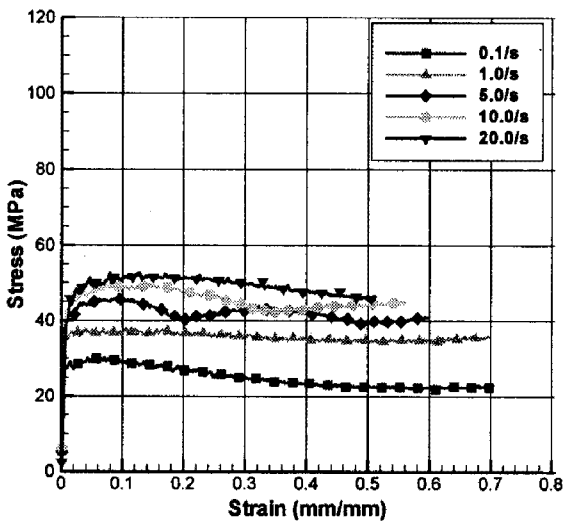


Fig. 6 True stress-strain curves at 500 °C

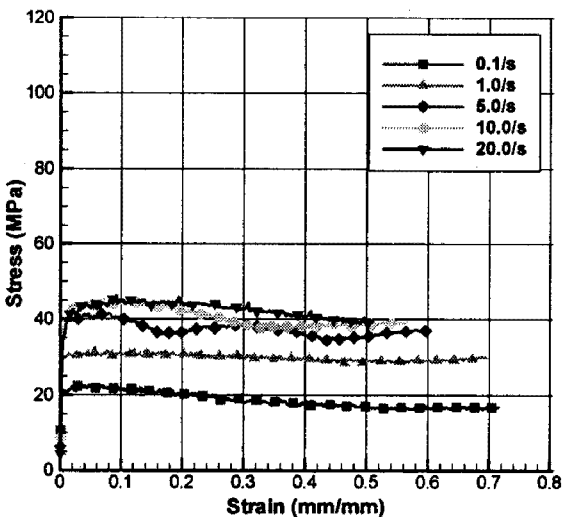


Fig. 7 True stress-strain curves at 550 °C

고온압축시험으로 획득한 Fig. 2~7의 정보와 식 (4)의 수식모델을 이용하여 최소자승법에 바탕을 둔 곡선피팅법으로 각각의 변형률과 온도에 따른 Al6061의 강도계수 C 와 변형률속도경화지수 m 를 구하여 Table 1에 정리하였다. 본 시험에서 실시한 변형률속도의 범위에서는 변형률이 0.4 이상일 경우, 재료상수는 변형률의 영향을 크게 받지 않는다는 사실을 확인할 수 있다.

3. 실험 결과의 검증

Fig. 8은 검증 목적으로 선택된 OTR(Outer Tie Rod)의 알루미늄 열간단조 공정의 초기소재와 금형의 형상을 나타내고 있다. 소재의 초기온도는 530 °C이다.

Table 1 Strain rate strength coefficient C (MPa) and strain rate sensitivity exponent m

Temp.(°C)	300		350	
Strain	C	m	C	m
0.1	84.979	0.0445	64.866	0.0538
0.2	87.693	0.0438	66.600	0.0582
0.3	89.257	0.0384	65.921	0.0647
0.4	89.844	0.0394	65.858	0.0548
Temp.(°C)	400		450	
Strain	C	m	C	M
0.1	49.826	0.0684	41.543	0.1051
0.2	50.602	0.0729	42.216	0.1032
0.3	50.871	0.0698	41.915	0.1003
0.4	49.737	0.0671	40.092	0.1044
Temp.(°C)	500		550	
Strain	C	m	C	M
0.1	36.822	0.1092	31.407	1.1184
0.2	37.104	0.1082	30.896	0.1209
0.3	36.168	0.1075	29.760	0.1217
0.4	35.539	0.0987	29.276	0.1094

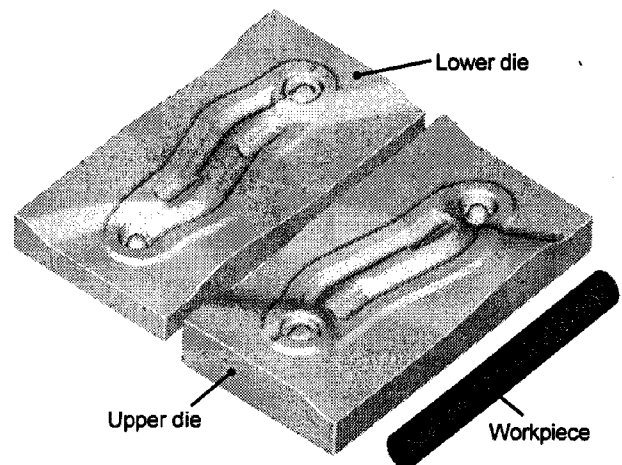


Fig. 8 Geometries of dies and workpiece

단조시뮬레이션을 위하여 금형의 초기온도는 200℃로 균일하다고 가정하였고, 금형과 소재 사이는 쿨롱마찰법칙을 따르며 마찰계수는 0.3으로 일정하다고 가정하였다. 단조 시뮬레이션 중 금형의 온도변화는 무시하였다. Fig. 9에서는 최종형상까지 변해가는 과정을 나타내었다. Fig. 10에서는

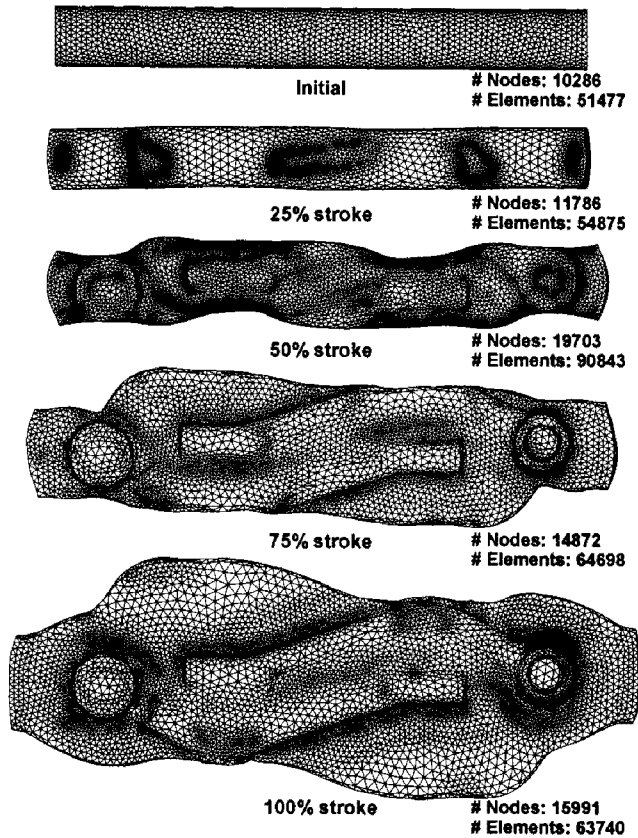
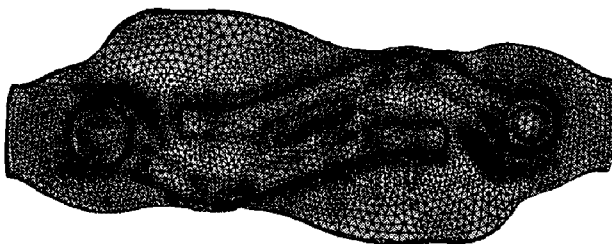


Fig. 9 Simulation results of the process



a) Experiment



b) Prediction

Fig. 10 Comparison of experiment and prediction

해석 결과인 최종 변형 형상을 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 실제 형상과 거의 유사함을 알 수 있다. 초기의 소재 위치에 따라 약간의 차이가 불가피한 공정임을 감안할 때 비교적 신뢰할만한 결과라고 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 실험적으로 획득한 알루미늄 Al6061의 고온 유동응력 함수를 제시하였으며, 이를 외측타이로드 알루미늄 열간단조 공정에 적용하였다. 그 결과, 해석결과와 실험결과가 정량적으로 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지역전략기획기술개발 사업 및 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0066590).

참 고 문 헌

- [1] 장계원, 이우식, 김대업, 전진화, 오개희, 2008, 가변곡률압축 기술적용 알루미늄 컨트롤암 개발, 한국자동차공학회 30주년 기념 학술대회, pp.1507 ~ 1510.
- [2] 정달희, 구자식, 이호도, 2005, 알루미늄 프런트 로워 컨트롤암 개발, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp.1473 ~ 1478.
- [3] G. Lucas, 1996, Aluminum structural application, *Advanced Material & Processes*, Vol. 149, No. 5, pp.29.
- [4] Y. Nishimura, 1993, Car and aluminum-relation with some legal regulations, *Sumitomo Light Metal Tech. Report*, Vol. 34, No. 4, pp. 66.
- [5] T. Chikada, 1990, Light alloy parts for automotives, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 40, pp. 994.
- [6] D. Mann, 1998, Focus on materials for lean weight vehicles, *Automotive engineer*, Vol. 23, No. 3, pp. 44.
- [7] K. Lange, 1985, *Handbook of metal forming*, Society of Manufacturing Engineers.
- [8] S. Z. Hong and R. G. Hu, 1989, A Study of the Roll Forging Technology for Turbine Blades of a Supercharger, *Rotary Forming in Proc. Int. Conf.*, Int. Academic Publishers, Beijing, pp. 230 ~ 233.
- [9] Z. Y. Cai, 2005, Precision design of roll-forging die and its application in the forming of automobile front axles, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 168, pp. 95~101.
- [10] G. H. Liu, G. S. Ren and C. G. Xu, 2007, Simulation of 3-D deformation and material flow during roll forging process using system of over-round groove, *Acta Metal. Sim.*, Vol. 20, No. 5, pp. 380 ~ 384.