

고온전단가공을 위한 5052 알루미늄 합금의 고온 변형거동

송신형^a, 최우천^{a*}**High-temperature Deformation Behavior of 5052 Aluminum Alloy
for Hot Shearing Process**Shin-Hyung Song^a, Woo Chun Choi^{a*}^a School of Mechanical Engineering, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	5	April	2016
Revised	8	May	2016
Accepted	12	May	2016

*Keywords:*5052 aluminum alloy
High temperatures
Tensile test
Hot shearing**ABSTRACT**

Hot shearing is a method of producing various high-quality planar machine parts by using reduced punch load. In order to predict the results of this process, the deformation behavior of work material at elevated temperatures need to be studied. In this research, a tensile test was carried out for 5052 aluminum alloy at high temperatures of 240-540°C and strain rates of 0.001-0.1/s. The results of the tensile tests were studied to predict the deformation of the alloy during the hot shearing process. The results showed that hot shearing within a temperature range of 340-440°C and a strain rate range of 0.001-0.1/s will be the most effective in reducing punch load and increasing the sheared edge in the case of 5052 aluminum alloy.

1. 서론

블랭킹, 펀칭 등의 전단가공은 프레스 장비에 놓인 판재를 펀치로 눌러 원하는 형상의 천공을 생성함으로써 다양한 평면형상의 제품을 제조하는 공정이다. 전단가공 상의 가장 큰 관심사는 가공시 펀치하중의 절감과 가공 후의 제품의 단면 품질의 향상이다. 펀치하중의 절감은 공정상의 에너지 사용 절감 및 펀치, 다이와 같은 전단공구의 수명 등과 관계가 있기 때문에 매우 중요하다. 판재의 전단 변형 시에는 먼저 가공재료에 전단 변형에 의한 단면이 생성되는데 이를 전단면이라 하며, 이후 재료의 파단과 함께 최종적으로 천공이 완성되는데 이 파단으로 생성되는 단면의 부분을 파단면이라 한다. 이렇게 전단가공 후에 제품에 전단면과 파단면이 차례로 생성되는데 최종 제품의 품질은 여러 공정조건을

최적화하여 불규칙한 파단면을 최소화하고 매끄러운 전단면을 극대화하는 정도에 따라 좌우된다. Fig. 1에 블랭크의 단면을 보여주고 있다.

펀치하중을 절감하고 최종 제품의 전단면을 극대화하는 전단가공의 공정상의 최적화 방법은 여러 가지가 있다. 품질향상 면에서 대표적으로 각광받고 있는 방식은 파인블랭킹으로, 이는 가공재료의 주변부를 돌기 같은 것으로 고정한 후 전단가공을 하는 방식인데 현재 이 파인블랭킹 공정은 산업현장에서 가장 많이 쓰이는 전단가공이라고 볼 수 있다. 품질향상을 위한 또 한 가지 방법은 가공재료의 온도를 높이는 고온전단가공인데 이는 기존의 전통적 방식의 블랭킹과 파인 블랭킹에 모두 해당이 될 수 있다. 예를 들어 가공재료가 금속인 경우 온도가 상승하면 가공재료의 인장강도가 감소하고 연신율이 증가한다. 이에 따라 감소한 인장강도로 인하여

* Corresponding author. Tel.: +82-2-3290-3361

Fax: +82-2-926-9290

E-mail address: wcchoi@korea.ac.kr (Woo Chun Choi).

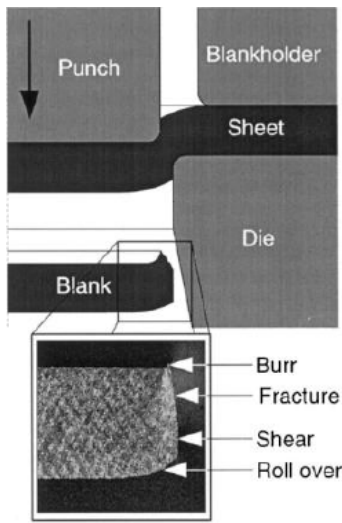


Fig. 1 Blanking process^[1]

펀치하중은 감소하고 연신율의 증가로 인하여 전단면의 길이가 늘어나며 파단면의 길이가 줄어들게 된다.

가공재료의 온도를 높이는 방법은 한 가지 예로, 재료에 전류를 흘려주고 가공재료의 전기저항을 이용하여 재료에 국부적으로 열을 발생시키는 방식이 있다^[2]. 또한 최근에는 제품의 생산성을 높이기 위해 펀치의 분당 타발 수가 수백 회 이상인 고속블랭킹이 많이 쓰이는데, 이 때 재료변형 상의 높은 변형률 속도(strain rate)로 인하여 필연적으로 소성열이 발생하게 되며 이렇게 발생한 열로 인하여 가공재료의 연성의 증가로 펀치하중이 감소하고 전단면이 증가하여 품질이 향상될 수 있다. 이에 따라 펀치의 속도를 높여 생산성과 품질을 모두 개선시킬 수 있는 이러한 고속블랭킹에 관한 연구도 최근에 많이 이루어지고 있다.

펀치하중을 감소시키고 최종 제품의 품질을 향상시킬 수 있는 고온전단가공은 그 적용 가능한 재료가 다양한데 금속이 대표적이며 예를 들면 자동차 제조업 등에서 제품 경량화 작업에 효과적으로 쓰이고 있는 고장력강, 초고장력강 등이 있다. 이러한 고강도 철강재료는 강도가 매우 높아 성형성이 좋지 않아서 온도를 상승시켜 연성을 증대시키고 강도를 낮추는 방식이 성형성 개선에 효과적이다^[2]. 고온전단가공이 효과적으로 적용되는 또 한 가지 예는 알루미늄 합금의 적용인데 이 알루미늄 합금 역시 강도 대비 낮은 밀도로 자동차의 경량화에 전략적으로 쓰이는 재료이기도 하다. 또한 알루미늄 합금은 고온 상태에서의 성형성이 매우 좋은 재료에 해당하므로 전단가공을 비롯한 다양한 분야에 고온 상태로 가공에 적용이 되고 있는 상태이다. 따라서, 이렇게 고온에서 성형성이 향상될 수 있는 금속재료들은 해당 고온가공 환경 하에서의 변형거동에 관한 연구가 매우 중요하다.

본 연구에서는 알루미늄 합금의 고온변형 특성을 연구하였다. 알루미늄 합금은 비강도, 내부식성, 밀도 등이 우수하며 위에 기술한

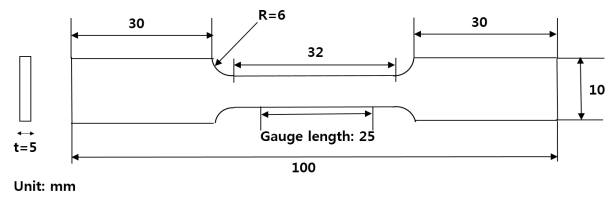


Fig. 2 Tensile test specimen

바와 같이 고온에서의 성형성이 우수하여 많은 종류의 제품 제작에 사용되는 이유로 인해 고온상태에서의 변형거동과 관련하여 다양한 종류의 알루미늄 합금들에 관한 연구가 있다. 6061 알루미늄은 자동차 샤시부품 등의 소재로 쓰이는데 6061 알루미늄 합금의 고온변형 특성의 실험에 관한 연구가 있었다^[3]. 이 연구에서는 다양한 변형률 속도, 상온보다 높은 다양한 온도 조건에서 6061 알루미늄의 고온압축 시험을 실시하였으며 그 결과를 단조 시뮬레이션에 적용하여 검증하였다.

Mg계인 5083 알루미늄 합금 역시 고온변형 시험이 이루어졌는데^[4] 이 연구에서는 온도와 변형 속도가 유동응력 및 연신율에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해 5083 알루미늄 합금을 350°C-520°C의 온도 범위에서 0.5/s, 1.0/s 그리고 3.0/s의 변형속도로 비틀림 시험하였으며 시험결과 5083 합금의 고온연화기구가 동적 재결정이라는 것을 밝혔다. 또 이 연구에서는 5083 알루미늄의 변형거동을 지수함수의 구성식으로 나타내었다.

본 연구에서는 선박 제조업 등에 쓰이는 5052 알루미늄 합금에 관한 고온 인장시험이 이루어졌다. 시험을 위해 고온전단가공 상황에 준하는 온도와 변형속도를 고려하여 240°C-540°C의 온도 범위와 0.001/s에서 0.1/s에 이르는 변형률 속도를 시험환경으로 설정하였다. 인장시험 후 각각의 온도와 변형률 속도별 응력-변형률 곡선을 구하였으며 각각의 곡선에서 유동응력과 연신율을 비교분석하였다. 또 5052 알루미늄 합금이 인장시험 조건과 비슷한 조건에서 고온전단가공이 되었을 경우를 고려하여, 이 경우 5052 알루미늄 합금의 고온변형 거동이 고온전단가공의 펀치하중과 가공재료의 단면 품질에 미칠 영향을 분석하였다. 최종적으로, 5052 알루미늄의 고온전단가공 시에 가장 적절하다고 사료되는 변형률 속도와 온도의 범위를 구하였다.

2. 인장시험

2.1 시험편 및 시험장치

5052 알루미늄 합금을 사용하여 ASTM E8 규격에 따라 판상 인장시험편을 제작하였다. Fig. 2는 인장시험 시험편의 모양과 치수를 보여주고 있다. 시험편의 두께는 5 mm가 되도록 가공하였다.



Fig. 3 Tensile test machine

Fig. 3에서는 연구에 사용된 시험장치를 보여주고 있다. 시험장치는 고온고속성형물성 시험이 가능한 인장시험기로 시편을 540°C까지 가열하여 인장시험을 수행할 수 있는 고온 챔버가 장착되어 있다. 또 사용된 인장시험기로 500 mm/min의 인장속도를 가할 수 있다.

2.2 시험방법

본 연구의 목적은 5052 알루미늄 합금의 고온전단가공에 준하는 온도 및 변형률 속도 하에서의 인장변형거동을 관찰하고, 그 결과의 분석을 통해 5052 알루미늄이 실제 고온전단가공에 적용되었을 때의 결과를 예측하고 최종적으로 5052 알루미늄의 고온전단공정의 이상적인 온도, 변형률 속도의 범위를 구하는 것이다. 본 연구에서는 시험 온도를 540°C, 440°C, 340°C, 240°C로 설정하였으며 각각의 온도별로 인장 속도를 0.001/s, 0.01/s, 0.1/s로 설정하여 총 12가지의 조건에서 시험을 수행하였다.

측정된 시편의 변형곡선에서는 응력-변형률의 관계가 분명한 선형관계를 이루는 일부 탄성구간의 기울기가 탄성영역 전체의 기울기가 되도록 측정값을 보정하여 인장시험 중 시편의 탄성변형 이외의 요소가 응력-변형률 곡선의 형태에 미치는 영향을 제거하였다. 이러한 12가지 조건에서 최종적으로 도출한 응력-변형률 곡선을 분석에 사용하였다.

3. 시험결과 및 분석

Figs. 4-7은 각각 시편의 온도가 240°C, 340°C, 440°C 그리고

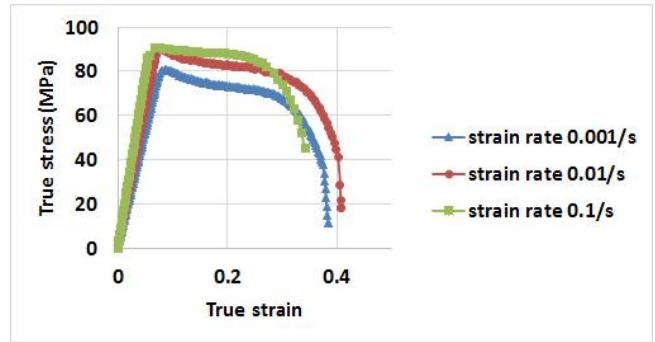


Fig. 4 True stress-True strain curves for temperature of 240°C

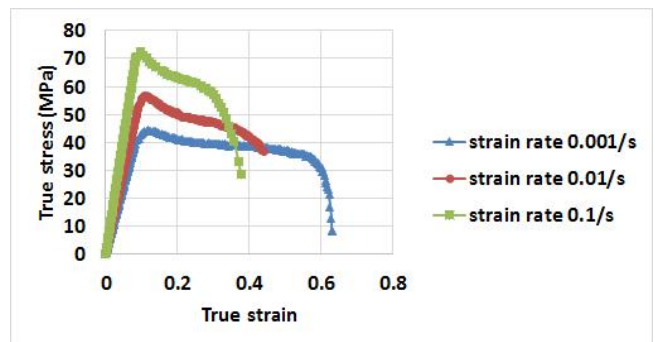


Fig. 5 True stress-true strain curves for temperature of 340°C

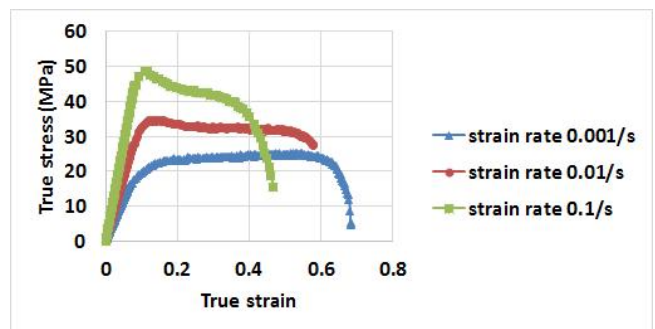


Fig. 6 True stress-true strain curves for temperature of 440°C

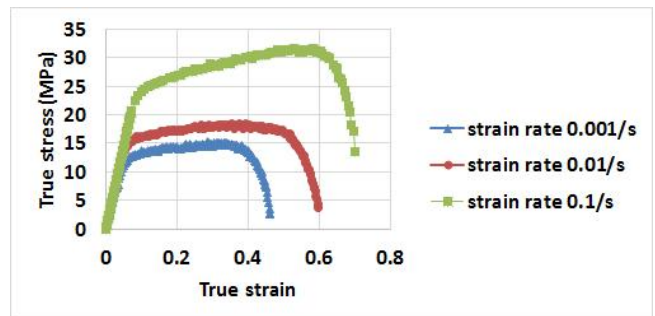


Fig. 7 True stress-true strain curves for temperature of 540°C

540°C일 때 0.001/s, 0.01/s 그리고 0.1/s의 변형률 속도 하에서의 진응력-진변형률 곡선을 나타낸 것이다. 일반적으로 다른 조건이 일정할 때 온도가 증가하면 유동응력은 감소하고 변형률 속도가

증가하면 유동응력도 증가하는 것을 보여주고 있다.

시편의 온도가 240°C일 때는 변형률 속도 증가에 의한 유동응력의 증가가 미미하다. 또한 변형률 속도 변화에 따른 연신율의 변화도 미미하거나 불규칙하다. 하지만 시편의 온도가 340°C와 440°C일 때는 유동응력과 연신율의 증감이 비교적 뚜렷하며 규칙적이다. 이 온도영역에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 유동응력이 뚜렷이 증가하며, 연신율은 감소한다. 이에 따라 실제 5052 알루미늄 합금의 고온전단가공 시에 340°C와 440°C의 온도영역 그리고 0.001/s에서 0.1/s에 이르는 변형률 속도 영역을 고려하면 펀치의 속도를 감소시켜 변형률 속도를 낮출수록 유동응력의 감소로 펀치하중이 절감될 수 있으며, 연신율의 증가로 블랭크 단면의 전단면의 길이가 늘어나는 효과를 얻을 수 있다고 예상할 수 있다.

전단 공정에서 연신율은 전단면 길이의 증가를 가져올 수 있는 중요한 변수로 예를 들어 Mori 등²⁾은 초고장력강의 국소가열전단 공정에서 가공재료의 온도 증가가 연신율의 증가 그리고 전단면의 증가로 이어지는 과정을 시험연구로 밝혔다. 시편의 온도가 540°C일 때는 이보다 낮은 온도영역에서와는 다른 양상을 보이는데 변형률 속도가 증가함에 따라 유동응력은 마찬가지로 증가하지만 연신율 역시 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 540°C의 온

도영역에서는 펀치의 속도를 낮출수록 펀치하중이 감소하지만 블랭크 전단면의 길이 또한 줄어든다고 볼 수 있다.

Figs. 8-10은 동일한 변형률 속도 하에서 온도의 변화에 따른 유동응력의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 온도의 증가는 유동응력의 감소로 이어진다는 것을 알 수 있다. 변형률 속도가 0.001/s일 때는 온도증가에 따른 유동응력의 감소효과가 온도를 높일수록 떨어진다. 또한 온도를 높일수록 연신율의 증가효과도 떨어지는데 온도가 540°C에 이르면 연신율이 440°C나 340°C일 때보다 오히려 줄어든다. 변형률 속도가 0.01/s 이거나 0.1/s일 때는 온도의 증가에 따른 유동응력의 감소나 연신율의 증가가 비교적 규칙적인데 변형률 속도가 0.01/s일 때 온도가 240°C에서 340°C로 증가하면 유동응력이 상대적으로 크게 떨어진다거나 변형률 속도가 0.1/s일 때 온도가 540°C에 이르면 연신율이 크게 증가한다는 것 등을 관찰할 수 있다.

동일한 변형률 속도 하에서 증가하는 온도에 따른 유동응력 곡선을 분석하면 실제 5052 알루미늄 합금의 고온전단가공 시에 340°C에서 440°C에 이르는 온도영역 그리고 0.001/s에서 0.1/s에 이르는 변형률 속도 영역에서 온도의 증가에 따른 펀치하중의 감소와 연신율 증가의 효과를 얻을 수 있다고 예상할 수 있다. 참고로, 펀치하중의 감소와 연신율 증가를 가져올 수 있는 이 적정 온도

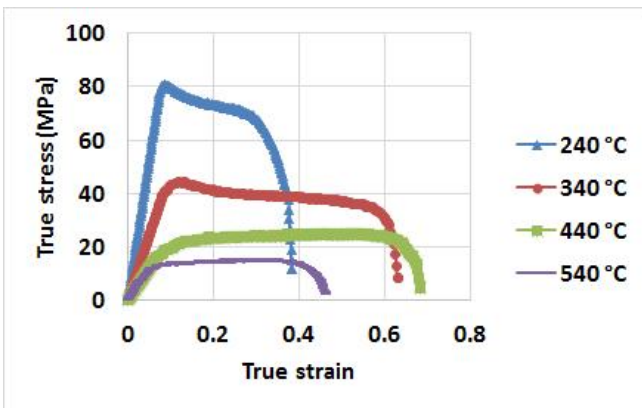


Fig. 8 True stress-true strain curves for strain rate 0.001/s

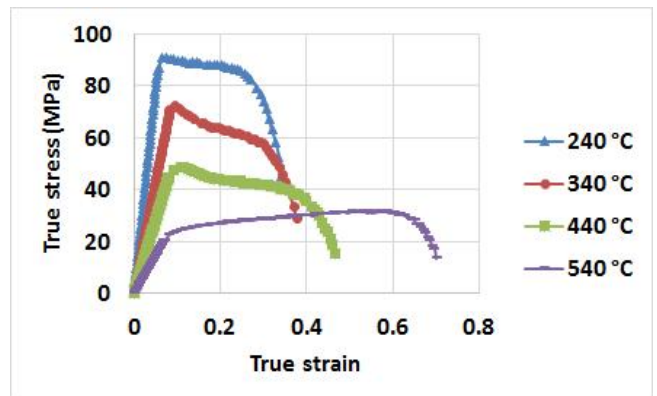


Fig. 10 True stress-true strain curves for strain rate 0.1/s

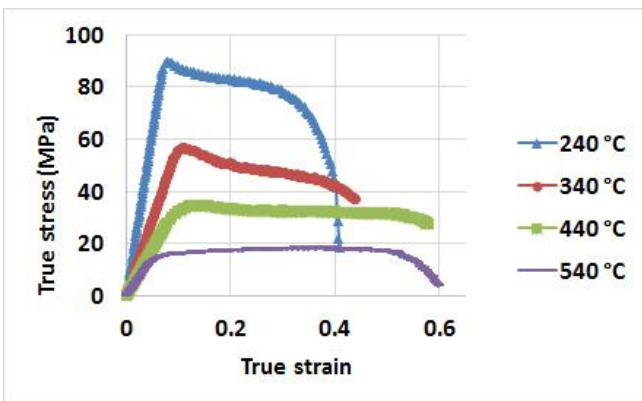


Fig. 9 True stress-true strain curves for strain rate 0.01/s

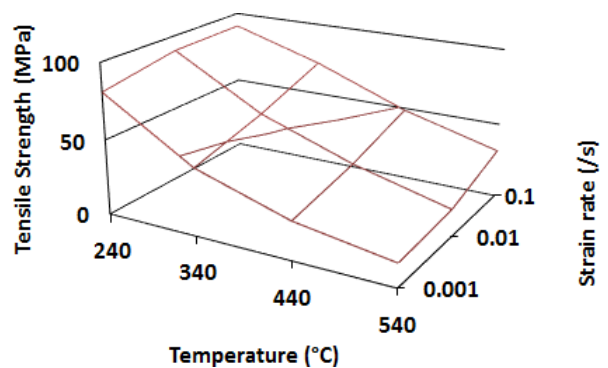


Fig. 11 Tensile strength graph

영역은 철강재료의 경우보다는 낮은 것으로 Mori 등^[2]의 연구에서는 초고장력강의 국소가열전단공정의 실험에서 약 800°C 정도의 온도일 때 펀치하중의 감소와 연신율 증가 및 전단면의 증가의 효과를 얻었다.

Fig. 11에서는 온도와 변형률 속도의 전 영역에 대한 인장강도의 변화를 나타내었다. 온도가 증가하면 인장강도가 감소하고 변형률 속도가 증가하면 인장강도 역시 증가하는 것을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 5052 알루미늄 합금의 고온인장 시험을 수행하여 온도와 변형률 속도의 변화 시 유동응력과 연신율의 변화를 관찰하고 실제 고온전단가공 시 얻을 수 있는 펀치하중과 전단면 크기의 변화를 분석하였다. 시험 결과를 분석한 결과, 5052 알루미늄 합금의 변형률 속도가 0.001/s이 되는 펀치의 저속영역에서는 펀치하중 절감과 전단면 증가의 효과가 높은 온도일수록 떨어진다는 것을 볼 수 있었다. 또 온도가 240°C일 때는 펀치하중의 절감과 전단면 증가의 효과가 미미하거나 불규칙한 것으로 나타

났다. 따라서, 온도가 340°C에서 440°C에 이르며 변형률 속도가 0.001/s에서 0.1/s에 이르는 구간에서 펀치속도를 낮추거나 온도를 증가시키면 펀치하중의 절감과 전단면 증가의 효과를 뚜렷이 얻는 것으로 나타났다.

References

- [1] Brokken D., Brekelmans W. A. M., 1998, Numerical Modelling of the Metal Blanking Process, *J. Mater. Process. Technol.*, 83:1 192-199.
- [2] Mori, K., Maeno, T., 2012, Punching of Ultra-high Strength Steel Sheets using Local Resistance Heating of Shearing Zone, *J. Mater. Process. Technol.*, 212:2 534-540.
- [3] Eom, J. G., Jang, S. M., 2009, Flow Stress of A16061 at Elevated Temperature and Its Application to Forging Simulation for Verification, *Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference*, 474-477.
- [4] Ko, B. C., Kim, J. H., 1998, The Effects of Temperature and Strain Rate on Flow Stress and Strain of AA5083 Alloy during High Temperature Deformation, *Transactions of materials processing*, 7:2 168-176.