

Al 6061 Bulk재에서 인장 및 압축 시험에 의한 상온 가공성 비교 분석

김국주*, 박종수**

Analysis of Cold Workability at the Al6061 Bulk Material by Tension and Compression Tests

K.J. Kim*, J.S. Park**

Abstract

When workability at the a certain bulk deformation process is defined as the maximum plastic deformation capability that the workpiece can sustain without causing any cracks or fracture, the workability is dependent on the microstructure, initial workpiece shape, stress state developed during the deformation process, strain rate, and presence of the interfacial friction between workpiece and tool. For a review purpose, the workability definition and test methods are summarized depending on the applied stress state at bulk deformation process in Table 1 at the text. In this study, the cold workabilities of as-cast Al6061 bulk material have been measured and comparatively analyzed at the primary tensile stress state by using tensile specimens, the primary compressive stress state by using cylindrical specimens, and the forming limit diagram by ductile fracture.

Key Words : cold workability, bulk deformation process, forming limit diagram, as-cast Al6061 alloy

1. 서 론

부피소성가공(bulk deformation process)시의 가공성(workability)을 주어진 응력상태에서 소재가 파괴될 때까지의 최대 소성변형능력이라고 정의할 경우, 가공성은 소재 종류 및 미세조직, 가공재 초기형상, 외부에서 가해지는 응력상태, 변형속도 및 금형과 소재 사이 계면에서의 마찰조건과 밀접한 관계가 있다. 표 1에 외부에서 가해지는 응력상태에 따른 가공성 정의 및 주로 사용되어지는 시험방법을 요약하였다. 본 실험에서는 연주상태의

Al6061 bulk재에 대한 냉간가공 가공성을 검토하기 위하여 주인장 응력상태, 주압축 응력상태 및 연성파괴에 의한 성형한계도(forming limit diagram)에서의 상온가공성을 비교 검토하였다. 비틀림 시험에 의한 가공성은 다른 시험기에서의 결과치와 상호 비교하기 곤란하여 본 실험에서는 제외하였으며, 압축시 성형성(formability)은 유동 응력과 가공성을 동시에 고려하여 표현하였다.

* 경남대학교 대학원 재료공학부

** 한국기계연구원, 공정연구부

Table 1 Workability definition and test method depending on the applied stress state at bulk deformation process.

Stress state	Workability definition	Test method
Primary tensile stress state	$\epsilon_{w,t} = \ln(A_0/A_f)$ $R.A. = \{1 - (A_f/A_0)\} \times 100(\%)$	Tension test
Primary compressive stress state	$\epsilon_{w,c} = \ln(h_f/h_0)$	Compression test
Fracture criteria	$\epsilon_z = \ln(h_{f,g}/h_{0,g})$ at X-axis $\epsilon_\theta = \ln(w_{f,g}/w_{0,g})$ at Y-axis (forming limit diagram)	Compression test
Shear stress state	no of rotation to failure	Torsion test

2. 실험방법 및 결과

2.1 원소재 분석

본 실험에 사용된 연속 주조상태의 직경 150mm Al6061 합금의 화학성분 및 대표적 미세조직을 표 2 및 그림 1에 나타내었다. 종단면과 횡단면에서의 미세조직은 아주 유사하였으며, 평균 미세조직 입자크기는 $62\mu\text{m}$ 이었다.

Table 2 Chemistry of the as-cast Al6061 alloy. (w/o)

Element	Si	Cu	Mg	Cr	Mn	Zn
Nominal	0.6 ± 0.2	0.27 ± 0.12	1.0 ± 0.90	0.20 ± 0.15	0.15 max.	0.25 max.
Analysis	0.76	0.31	0.90	0.18	0.02	0.01

Element	Fe	Ti	other element		Al
			each	total	
Nominal	0.7 max.	0.15 max.	0.05 max.	0.15 max.	Rem.
Analysis	0.18	0.02	-	-	Rem.

그림 1에서 등축정 같이 보이는 밝은 부위는 초기에 응고된 수지상정이며, 수지상정 사이의 검은 띠 또는 입자 모양의 검은 부위는 최종단계에서 응고된 편석 조직이었다. 또한, 원소재 표면부위에서는 연속 주조시 급속 냉각에 의한 표면 층이 관찰되었다.

2.2 주인장 응력상태에서 진변형률에 의한 가공성 측정

앞 절에서 언급한 원소재를 표점거리 25mm의 종방향

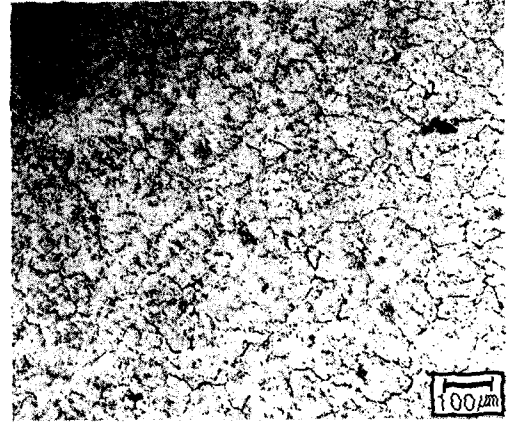


Fig. 1 Typical microstructure at the longitudinal plane of as-cast Al6061 alloy.

인장시편으로 기계 가공하여, Instron 인장시험기에서 2.5mm/min의 프레스 속도로 상온에서 인장시험한 평균 결과치를 표 3에 나타내었다.

Table 3 Average tensile test result in the longitudinal direction of as-cast Al6061 alloy.

YS (MPa)	UTS (MPa)	EI (%)	R.A. (%)	$\epsilon_{w,uts}$	$\epsilon_{w,t}$ $\ln(A_0/A_f)$	$\dot{\epsilon}$ (1/sec)
70.0	127.2	29.4	52.0	0.188	0.735	1.28~1.67 $\times 10^{-3}$

표 3에서 보여지는 바와 같이 $1.28 \sim 1.67 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 범위의 변형속도($\dot{\epsilon}$)에서 측정된 인장시험 결과로부터 균일 소성변형(uniform deformation)에 의한 가공성을 나타내는 진변형률($\epsilon_{w,uts}$)은 0.188, 불균일 소성변형(nonuniform deformation)에 의한 파괴점에서의 가공성을 나타내는 진변형률($\epsilon_{w,t}$)은 0.735이었다. 단면적 감소율에 의한 가공성 측정은 진변형률로 표시되지 아니하므로 논의 대상에서 제외하였다.

2.3 주인장 응력에 의한 파단면 관찰

인장 시편의 파단면은 전형적인 컵-콘형 연성 파괴(cup-and-cone ductile fracture)를 나타내었으며, 파단면 중심에서 축방향으로 절단하여 미세조직을 조사한 결과, 그림 2에서 보여지는 바와 같이 입자간 파괴로 관찰되었다.

2.4 주압축 응력상태에서 진변형률에 의한 가공성 측정



Fig. 2 Intergranular fracture at the tensile-fractured cross-section of as-cast Al6061 alloy.

2.1절에서 언급된 원소재를 직경 20mm×높이 30mm의 압축시편으로 기계 가공하여 200ton Tinius-Olsen 유압 프레스에서 10~15% 압축 시마다 시험을 중지하였다.

매 중지 시마다 시편높이를 실측정하고 시편 측면에서의 균열생성 유무를 확인한 후 가시적 균열(길이 2mm이하×폭0.1mm이하)이 보일 때까지 단속적 압축시험을 지속하였다. 이 때, 비교적 느린 변형속도 영역에서의 가공성에 미치는 변형속도 영향을 관찰하기 위하여 프레스속도(V)를 1, 10, 100mm/min으로 선정하여 표면조도가 1.70 μm인 거친금형(rough die)에서 윤활제 없이 압축하였으며, 압축 후의 최종 시편높이는 변형속도에 관계없이 7.78mm에서 9.97mm 범위 내에 있었고, 평균값에 의한 압축시험 결과를 표 4에 나타내었다.

Table 4 Effect of relatively slow strain rates on the workability of as-cast Al6061 alloy by compression test at a rough die.

V(mm/min)	1	10	100
$h_{f,avg}$ (mm)	8.39	8.80	8.70
ϵ_f (1/sec)	1.99×10^{-3}	1.89×10^{-2}	1.92×10^{-1}
$\epsilon_{w,c} = \ln(h_{f,avg}/h_{o,avg})$	-1.274	-1.226	-1.238
$\epsilon_{w,c,avg}$	-1.246		

표 4에 보여지는 바와 같이, $1.99 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 에서 $1.92 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 의 변형속도 범위에서는 균열이 관찰되기 시작할 때의 최종 압축높이(h_f)를 초기 시편높이로 나눈 진변형

율 값($\epsilon_{w,c}$)이 -1.274에서 -1.226 사이로 변형속도 영향이 관찰되지 아니 하였으므로, 거친금형(rough die)에서 주압축 응력상태 하의 가공성을 나타내는 평균 진변형율($\epsilon_{w,c,avg}$)값은 -1.246에 해당되었다.

또한, 주압축 응력상태에서의 가공성에 미치는 마찰 영향을 관찰하기 위하여, 1mm/min 및 100mm/min의 프레스속도에서 마찰조건을 표면조도가 0.21 μm인 평활금형(smooth die)에서 윤활제를 사용하지 않은 경우와 분무용 graphite 윤활제를 사용한 경우에 대하여 기계 가공상태의 시편을 앞에서 설명한 바와 같이 균열이 가시적으로 관찰될 때까지 단속적 압축시험을 행하였으며, 이때 graphite 윤활제를 사용한 경우에는 매 시험 중지 시마다 시편 상하면 및 금형 표면을 재윤활하여 주었다. 압축 후의 시편높이는 압축시험 결과를 표 5에 나타내었다. 변형속도가 가공성에 미치는 영향은 앞에 언급된 바와 같이 이 경우에도 관찰되지 아니하였으며, 마찰조건에 따른 주압축 응력상태에서의 가공성은 예상했던 바와 같이 마찰계수가 감소할수록 평균 진변형율($\epsilon_{w,c,avg}$) 절대값은 1.246에서 1.464로 증가하여 가공성이 향상되었다.

Table 5 Effect of friction condition on the workability of as-cast alloy at the relatively slow strain rate range from $1.99 \times 10^{-3}/\text{sec}$ to $2.56 \times 10^{-1}/\text{sec}$

Friction condition	Rough die	Smooth die	Graphite lubricant
$h_{f,avg}$ (mm)	8.63	7.78	6.94
ϵ_f (1/sec)	1.99×10^{-3} $\sim 1.92 \times 10^{-1}$	2.14×10^{-3} $\sim 2.51 \times 10^{-1}$	2.26×10^{-3} $\sim 2.56 \times 10^{-1}$
$\epsilon_{w,c,avg}$	-1.246	-1.350	-1.464

2.5 주압축 응력상태에서 파괴조건(fracture criteria)에 의한 가공성 측정

2.3절에서의 압축시험시 파괴조건 하에서의 가공성을 나타내는 성형한계도를 작성하기 위하여, 직경 20mm×높이 30mm의 압축시편 측면에 높이 10mm×폭 10mm의 격자(grid)를 표시한 후 측면에서 균열이 관찰될 때까지의 단속 압축시험을 하였다. 압축시험 후 측정된 격자높이 및 폭으로부터 마찰조건에 따른 진변형율은 식 (1) 및 (2)에 의하여 구한 후 ϵ_z 를 X축으로 ϵ_θ 를 Y축으로 하여 각각의 변형속도에서 성형한계도를 작성하여 그림 3, 4, 및 5에 나타내었다.

축방향 압축 진변형율

$$\epsilon_z = \ln(h_{f,g}/h_{o,g}) \quad \text{-----} \quad (1)$$

($h_{0,g}$; 초기격자높이, $h_{r,g}$; 균열시 최종격자높이)
 원주방향 인장 진변형율

$$\epsilon_\theta = \ln(w_{r,g}/w_{0,g}) \quad (2)$$

($w_{0,g}$; 초기격자높이, $w_{r,g}$; 균열시 최종격자높이)

표 4에서 보여지는 바와 같이, $1.99 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 에서 $1.92 \times 10^{-1}/\text{sec}$ 사이의 변형속도에서는 가공성에 미치는 변형속도 영향이 미미한 것으로 관찰되었기 때문에, 프레스속도 10mm/min(그림 4)의 경우에는 거친금형에서만 ϵ_z 및 ϵ_θ 를 측정하였다. 프레스속도 1mm/min(그림 3) 및 100mm/min(그림 5)의 경우에는 거친금형, 평활금형 및 graphite 윤활제를 사용하여 구한 ϵ_z 및 ϵ_θ 가 각각의 그림 내에서 함께 표시되어 있다. 그림 3, 4 및 5를 비교할 때 비균질 압축변형선(nonhomogeneous compression line)의 위치가 거의 일치함을 알 수 있으며, 이는 본 실험에서 측정된 변형속도 범위 내에서는 가공성에 미치는 변형속도의 영향이 성형한계도에서도 매우 미미하다는 것을 의미하고 있다.

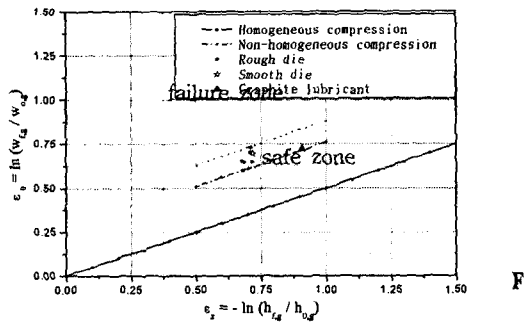


Fig. 3 Forming limit diagram of the as-cast Al6061 alloy at 1mm/min press speed. (ϵ_r ; 2.0 to $2.3 \times 10^{-3}/\text{sec}$)

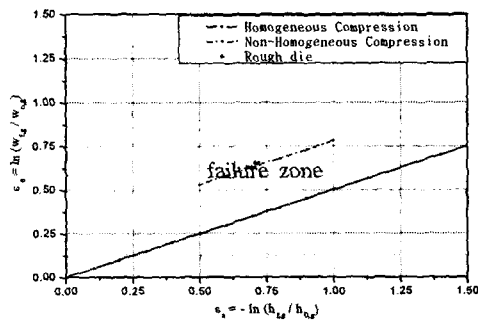


Fig. 4 Forming limit diagram of the as-cast Al6061 alloy at 10mm/min press speed. ($\epsilon_r \cong 1.9 \times 10^{-2}/\text{sec}$)

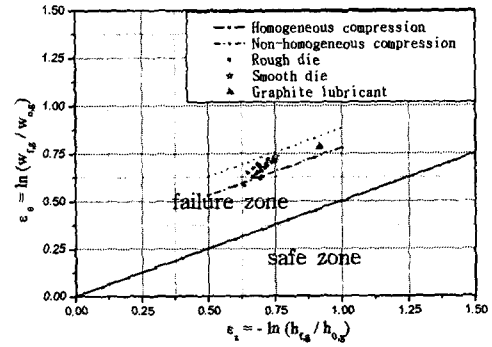


Fig. 5 Forming limit diagram of the as-cast Al6061 alloy at 100mm/min press speed. (ϵ_r ; 1.9 to $2.6 \times 10^{-1}/\text{sec}$)

2.6 주압축 응력에 의한 균열경로(crack path) 관찰
 배럴(barrel)부위에서의 가시적 균열은 축방향과 45° 방향으로 진행되었으며, 균열경로를 조사한 결과, 변형속도 및 마찰조건에 관계없이 모든 압축실험 조건에서 그림 6에서 보여지는 바와 같이 입자간 균열현상이 관찰되었다. 이때의 균열 깊이는 1.5mm이하로 사료되었다.

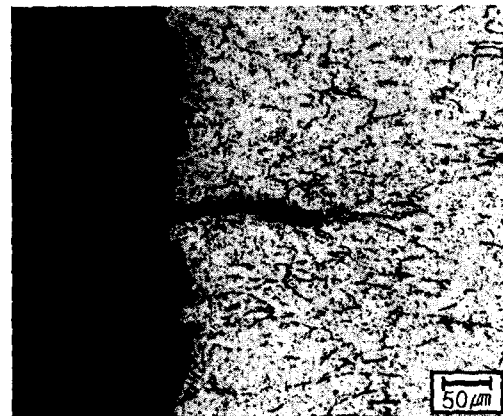


Fig. 6 Typical intergranular crack path at the barrel area of compressed as-cast Al6061 alloy. (Graphite-lubricated 6.94mm h_r specimen at the $2.6 \times 10^{-1}/\text{sec}$)

3. 결과 분석 및 고찰

3.1 주인장 응력상태에서 진변형율에 의한 가공성

최대 인장강도까지는 평면응력 하에서 전단 선변형에 의하여 균일 소성변형이 일어나고, 최대 인장강도 이후에는 소재 내부의 취약한 부위(입계 교차점, 개재물 또는 편석부위)에서 전단변형에 의하여 진공상태의 미소한 공동(void)들이 형성되기 시작하므로 이 부위에 변형이 집중되어 네킹(necking) 현상이 나타나기 시작한다. 이후 3축 응력상태에서 미소한 공동이 지속적으로 성장하여 불균일 소성변형에 의한 네킹 현상이 더욱 심화되며, 최종적으로 성장된 공동들이 내부에서 상호 연결될 때 3축 응력상태에 따른 평면변형이 일어나고, 표피 부위에서는 평면 응력에 따른 전단 선변형이 일어나 컴-콘형 연성 파괴를 나타내면서 파괴점에 도달하게 된다. 따라서, 표 3에 나타난 바와 같이 인장시험에 의한 주인장 응력상태에서의 가공성은 미소 공동이 형성되기 직전인 전단 선변형에 의한 균일 소성변형 시의 가공성, $\epsilon_{w,uts}$,와 3축 응력상태에서의 평면변형에 의한 불균일 소성변형 시의 가공성, $\epsilon_{w,t} = \ln(A_0/A_t)$,을 각각 측정하여, 다음 절에서 주압축 응력상태에서의 가공성 결과와 비교 검토하였다.

3.2 주압축 응력상태에서 진변형율에 의한 가공성

금형과 소재사이 계면에서 마찰력이 존재하지 않는 이상적인 압축조건 하에서는 축방향 압축방향에 의하여 전단에 의한 균질 변형(homogeneous deformation)이 일어나 시편 측면에서는 배럴링(barreling) 현상이 나타나지 않으므로 원주방향 인장응력(circumferential tensile stress)이 생성되지 아니한다. 따라서, 배럴 표면 부위에서의 균열 또는 소재 내부에서의 미세공동형성이 억제되므로 무한 압축변형이 가능하게 된다.

현실적인 상온 압축조건 하에서는 윤활에도 불구하고 금형과 소재 사이 계면에서 마찰력이 존재하므로 다이록킹(die-locking) 현상이 나타나 소재 상하면에서 소재유동이 억제되는 데드존(dead zone)을 형성하게 된다. 이때 상하부 계면 중앙 부위에서 최대 마찰력이 형성되며, 데드존 사이의 내부 영역에서 변형량이 현저하게 증가하게 되므로 소재 측면에서 배럴링 현상이 나타나는 비균질 변형(nonhomogeneous deformation)이 일어나게 된다. 따라서, 배럴 표면 부위에서는 축방향으로의 1차 압축응력과 원주방향으로의 2차 인장응력 크기는 직경대비높이 비(aspect ratio), 즉 계면에서의 접촉면적 크기 및 윤활조건에 따른 마찰응력 크기와 밀접한 관계가 있다.

표 5에서 보여지는 바와 같이 직경대비높이가 일정한 압축시편에서의 가공성을 나타내는 평균 진변형율($\epsilon_{w,c}$) 절대값(윤활 조건에 따라 1.246 에서 1.464 사이)이 주인

장 응력상태에서의 가공성을 나타내는 균일 변형 및 불균일 변형에 의한 진변형율 값(표 3에서의 $\epsilon_{w,uts} = 0.188$ 및 $\epsilon_{w,t} = 0.735$)보다 높게 나타났다. 그 이유는 인장시험에서의 응력상태는 2축 인장응력이 작용하는 평면 응력상태($\epsilon_{w,uts}$ 의 경우), 또는 3축 인장응력이 작용하는 평면 변형상태($\epsilon_{w,t}$ 의 경우)이나, 압축시험에서의 응력상태는 배럴 표면 부위에서 압축 및 인장응력이 동시에 작용하는 평면 응력상태이기 때문이다. 따라서, 주압축 응력상태에서는 실제 소성가공 조건과 유사한 응력상태로써 주인장 응력상태에서보다 더 향상된 소성가공성을 나타낸다. 또한, 표 5에서 마찰계수가 감소할수록 계면에서의 마찰응력이 감소되므로 배럴링 현상이 작게 나타나 원주방향으로의 2차 인장응력이 감소하기 때문이다.

표 4에서 가공성에 미치는 변형속도 영향이 나타나지 않는 이유는 본 실험에서는 적용된 변형속도 범위가 느리기 때문이라고 추측된다. 따라서, 변형속도 영향을 관찰하기 위해서는 더욱 빠른 변형속도 하에서 가공성을 측정할 필요가 있다고 생각되어진다.

주인장 및 주압축 응력상태에서의 균열 거동은 두 경우 모두 입자간 균열현상(그림 2 및 6)을 나타내었다. 주인장 응력상태에서의 균열 경로는 시편 내부에서 공동형성 및 결합이 이루어지면서 시편 외부 쪽으로 진행되었고, 주압축 응력상태의 경우에는 배럴 표면 부위에서 균열이 시작되어 원주방향 2차 인장응력이 증가함에 따라 시편 내부 쪽으로 진행되었다.

3.3 주압축 응력상태에서 진변형율에 의한 가공성

그림 3, 4, 5의 성형한계도에서 균질 압축변형선(homogeneous deformation line)은 $\epsilon_0 = -1/2\epsilon_2$ 를 나타내며 소성가공 안정영역(safe zone)과 파괴영역(failure zone)을 구분하기 위한 비균질 압축변형선(nonhomogeneous deformation line)은 측정값 분포도 하부로 결정하는 것이 합리적이라고 사료되었다. 그림 3 및 5의 성형한계도에서 측정 결과치 값의 분포가 비교적 넓은 폭을 이루고 있는 이유는 연주상태에서 편석된 화학성분에 기인하는 것으로 추측되며, 다른 윤활조건 하에서의 가공성 측정치가 각각의 성형한계도 내에 동시에 표시되어 있다. 따라서, 성형한계도에서는 윤활조건에 따른 가공성 변화를 한 도표 내에 표시할 수 있는 장점이 있고, 비균질 압축변형선의 위치에 따른 안정영역의 크기, 즉 비균질 압축변형선 위치가 소재의 가공성을 나타낸다.

성형한계도에서 Y축 절편값의 물리적 의미는 격자에

서 축방향 압축 소성변형은 일어나지 않고($\epsilon_z = 0$), 원주방향 인장 소성변형만이 일어나는 경우($\epsilon_\theta > 0$)로써, 격자에서의 축방향 압축응력은 탄성한계 내에 있고, 원주방향 2차 인장응력만이 원주 축면에서 균열을 일으킬 수 있는 임계치에 도달하는 것을 의미한다. 그림 3, 4, 5에서 직선 외삽법에 의하여 구한 Y축 절편값은 평균 0.27에 해당하였으며, 이는 격자에서의 축방향 압축응력은 탄성한계 이내이므로 무시할 만큼 작다고 간주하고 원주방향 2차 인장응력만으로 전단 선변형에 의하여 발생한 것으로 가정할 경우, 인장시험에서의 축방향 인장응력에 따른 전단 선변형에 의한 미세공동이 형성되기 직전의 균일 소성변형 시의 가공성을 나타내는 진변형률값($\epsilon_{w,uts}$) 0.188을 구할 때와 응력상태가 서로 유사하다고 가정할 수 있다. 여기서 $\epsilon_{w,uts}$ 값이 Y축 절편값보다 작은 이유는 두 시험법에서의 측정 균열크기 차이와 직선 외삽법의 타당성 여부와 관련이 있는 것으로 사료된다. 또한 인장시험 시 평면변형에 의한 불균일 소성변형 시의 가공성을 나타내는 진변형률값($\epsilon_{w,t}$)을 구할 때의 응력상태는 Y축 절편값에서의 응력상태와 서로 상이하기 때문에 상호 비교하지 아니하였으며, Y축 절편값과 $\epsilon_{w,uts}$ 값의 상호 비교를 합리화하기 위하여서는 앞으로 더욱 많은 노력이 필요한 것으로 생각된다.

성형한계도는 현재 a) 가공성이 우수한 미세조직 선정, b) 블랭크(blank) 형상 선정 및 프리폼(preform) 설계 적용, c) 복합응력 형성을 위한 방안, d) 변형경로(strain path) 개선을 위한 윤활조건 선정 등과 같은 분야에 활용되고 있다.

4. 결론

연주 상태에서의 Al6061 bulk재에서

- (1) 주인장 응력상태에서의 (a) 전단 선변형에 의한 균일 소성변형 가공성을 나타내는 $\epsilon_{w,uts} = 0.19$, (b) 평면 변형에 의한 불균일 소성변형 가공성을 나타내는 $\epsilon_{w,t} = 0.74$ 이었다.
- (2) 주압축 응력상태에서의 (a) 마찰조건에 따른 가공성은 표면조도가 $1.7\mu\text{m}$ 인 거친금형에서는 $\epsilon_{w,c} = 1.25$, 표면조도가 $0.2\mu\text{m}$ 인 평활금형에서는 $\epsilon_{w,c} =$

1.35, graphite 윤활제에서는 $\epsilon_{w,c} = 1.46$ 이었으며, 이때 마찰계수가 감소함에 따라 가공성이 향상되는 이유는 비균질 압축변형에 의한 배럴링 현상이 감소하기 때문이었으며, (b) 주인장 및 주압축 응력상태에서의 가공성 측정치가 다른 이유는 응력상태가 상이하기 때문이다.

- (3) 성형한계도에서 (a) 윤활 조건에 따른 가공성 변화는 동일한 도표 내에 비균질 압축 변형선으로 나타낼 수 있고, (b) 가공성은 비균질 압축 변형선의 위치에 따른 안정영역의 크기로 표시되므로 소성 가공성을 성형한계도로 표시하는 것이 합리적이었다.
- (4) 성형한계도에서 직선 외삽법에 의한 Y축 절편값(0.27) 및 $\epsilon_{w,uts}$ 측정치에서 전단 선변형을 위한 응력상태 및 균열경로가 유사할 경우, 비교적 느린 변형속도 범위에서 두 값의 상호관계를 유추하므로써, 주인장 및 주압축 응력상태에서의 가공성을 동일한 도표내에 표시할 수 있는 가능성이 제시되었다.
- (5) 본 실험에서 사용된 연주상태의 Al6061 bulk재는 냉간가공이 가능한 것으로 판명되었다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 소재성형기술 개발사업에서 “3차원 형상 Seamless 플랜지류 복합점진 일체화 성형기술” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Serope Kapakjian, “Manufacturing Processes for Engineering Materials”, Addison-Wesley Publishing Company, 1997
- (2) George E. Dieter, “Workability Testing Techniques”, American Society for Metals Park, OH, 1984