

Al 7075합금의 열간단조와 반응고 단조에 있어서 조직, 성형성 및 경도 특성 비교

이상용* · 전재일** · 이정환* · 이영선* · 신평우**

(1998년 7월 15일 접수)

Comparison of Conventional Hot Forging and Thixoforging of Al 7075 Alloy According to Microstructures, Formability and Hardness

Sang-Yong Lee, Jae-Il Jun, Jung-Hwan Lee, Young-Sun Lee and Pyung-Woo Shin

Abstract

Conventional hot forging and thixoforging of Al 7075 alloy have been compared with respect to microstructures, formability and hardness. Two distinctive temperature-strain rate ranges for hot forging of Al 7075 alloy were observed from the results of simple compression tests with strain rates of $10^3 \sim 10^4 \text{ sec}^{-1}$ in the temperatures between 250°C and 500°C. In the dynamic recovery range (low temperature-high strain rate range), multi-stage forging was necessary to form a complex shape part due to the lack of formability. In the high temperature-low strain rate range, in which dynamic recrystallization takes place, a complex shaped part could be formed by single-stage forging. About 50% cold working in the SIMA process was necessary to get a fine and homogeneous microstructures. Microstructural study suggest that thixoforged Al 7075 part has fine grains and homogeneous microstructures. Its hardness number is almost same to that of conventional hot forged part after aging treatment.

Key Words : Al 7075, Conventional Hot Forging(열간단조), Thixoforging(반응고단조), SIMA Process(변형유기 용융활성화 공정), Dynamic Recovery(동적회복), Dynamic Recrystallization(동적재결정), Formability(성형성)

1. 서 론

고비강도이면서 환경 친화적인 구조재료에 대한 수요증대에 따라 동일한 특성을 갖는 철계 소재에 비해 40%정도 경량화가 가능하고 또한 리사이클링을 통한 재활용 비

율이 매우 높은 고강도 Al 합금 단조품의 이용이 점차 증가하고 있다. 그러나 고강도 Al 합금은 성형성이 낮기 때문에 복잡 형상 구조물을 위한 단조품 제조시 기존의 열간 단조 공정에 의해서는 대부분 다공정을 통해 제조되게 되는데 이때 심한 flash의 형성으로 인한 원소재의 낭비, 중

* 한국기계연구원 소성가공연구팀

** 창원대학교 금속재료공학과

간가공 및 가열공정을 통한 생산성감소 등과 같은 경제적인 측면에서의 경쟁력이 떨어지고 또한 품질의 제어가 용이하지 않은 문제점이 있다.

이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 성형기술로서 최근 반응고금속 성형(semi-solid metal forging) 기술의 일종인 반응고 단조(thixoforging) 기술의 난성형 고강도 Al 합금에 대한 복잡형상 부품제조에의 응용이 크게 관심을 끌고 있다. 반응고금속 성형기술은 고상과 액상이 공존하는 온도 영역에서 금속 및 금속계 복합재료를 성형함으로써 기존의 주조 및 단조의 단점을 보완하고 장점을 살릴 수 있는 새로운 정형제조 기술로서 각종 성형분야에 실용화가 이루어지고 있다. 1970년대 초 그 원리가 발견된 이후 주로 주조(thixocasting) 분야에 실용화가 선행되었으나⁽¹⁾ 최근에는 단조분야에도 적용이 활발히 시도되고 있다.⁽²⁻⁵⁾

반응고 금속성형을 위해서는 미세하고 균일한 구상의 조직을 갖는 소재가 필요하다. 이를 위해 용탕의 응고 중 기계적 또는 전자기적인 교반법, 분말야금법, SIMA(strain induced, melt activated)법 등 여러 가지 반응고 금속성형용 소재제조 방법이 개발되었고, 각각의 소재 및 제품의 용도, 생산성 등을 고려하여 적절한 방법이 채택되고 있다. 여기서 SIMA법은 특히 기존의 wrought Al 합금을 그대로 사용할 수 있다는 점에서 고강도 Al 합금의 반응고 단조에 효과적인 것으로 알려져 있다. SIMA법은 가공열

처리에 의해 재결정을 일으키는 일종의 기계적열처리(thermo-mechanical treatment)법으로 wrought 합금을 냉간 또는 열간에서 가공 후 반응고 온도 영역으로 가열하여 가열 중 고상영역에서 가공도 효과에 의해 미세한 재결정을 일으키고 온도가 증가하여 반응고 영역에 도달하였을 때 재결정 입계에 저융점 금속의 용융이 일어나 반응고 성형에 적합한 균일한 반응용 조직을 얻는 방법이다.⁽⁶⁾

이와 같이 반응고 단조에 대한 연구 및 기술개발이 활발히 이루어지고 있음에도 기존의 열간단조와 반응고 단조를 체계적으로 비교한 연구 결과는 아직 미흡한 실정이다.⁽⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 Al 7075 합금을 대상으로 동일한 초기상태로부터 열간단조법 및 반응고단조법을 적용하여 동일한 형상의 부품을 제조하였을 때 미세조직, 성형성 및 기계적 특성을 비교함으로써 반응고 단조와 기존의 열간단조에 대한 장, 단점을 파악하고 궁극적으로 고강도 Al 합금 복잡 형상 구조물을 제조하는데 반응고 단조기술을 적용하는 기술개발을 위한 기초연구를 수행하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 열간단조와 반응고단조를 비교하기에 앞서 Al 7075 합금의 열간단조 영역에서 온도와 변형속도에 따라 미세조직의 변화 및 응력-변형을 곡선의 양상을 특징적으로 구분할 수 있는 온도-변형속도 관계도를 구하

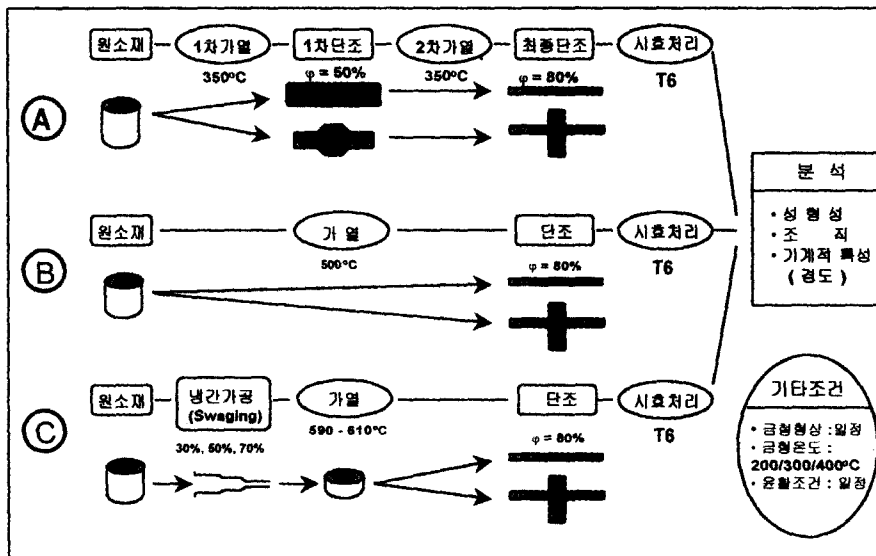


Fig. 1 Experimental procedure for multi-stage forging(A), single-stage forging(B) and thixoforging(C)

기 위해 250~500℃의 온도범위와 $10^{-3} \sim 10^1 \text{sec}^{-1}$ 의 변형 속도 범위에서 압축시험을 수행하였다.

원소재료는 연속주조에 의해 178 mm 직경으로 제조된 빌렛을 30 mm 직경으로 압출 한 Al 7075 봉재를 사용하였다. 압축시험은 직경 8 mm, 높이 12 mm의 원통형 시편을 사용하였다. Fig. 1에는 단조방법에 따른 각각의 공정단계를 개략적으로 나타내었다. 성형방법은 업세팅(upsetting)과 단조를 병행하였는데, 업세팅은 각 조건에서 정량적인 가공도를 가능한 한 상대 비교하기 위하여 수행되었다. 업세팅을 위해서는 직경 8 mm, 높이 12 mm의 시편을 사용하였고, 단조를 위해서는 직경 20 mm, 높이 20 mm의 원통형 시편을 사용하였다. 동적회복 영역에서의 열간단조에서는 가열 및 단조 온도를 300℃~450℃ 범위에서 변화시켰고 성형은 2회에 걸쳐 수행하였다. 위의 두 단조공정을 동일한 조건에서 분석하기 위해 업세팅을 이용하였는데 최종성형 단계에서 업세팅 가공도는 80%로 일정하게 하였다. 동적재결정 영역에서의 열간단조에서는 가열 및 단조온도를 450℃~550℃로 기존의 동적회복 영역에서의 열간단조에 비해 높게 유지시켰다.

반응고 단조를 위해서는 단조가열 전에 스웨이징에 의한 27%~67%의 냉간 가공을 통해 반응고 영역에서의 구상입자 형성 및 입자크기를 제어하였다. Al 7075 합금의 반응고 영역은 557℃~640℃인데⁽²⁾ 본 실험에서는 성형성과 기계적 특성을 복합적으로 고려하여 반응고 가열 유지 및 단조온도를 590℃~610℃의 범위로 수행하였다. 동적회복 영역에서의 열간단조, 동적재결정 영역에서의 열간단조는 유압프레스를 이용하여 성형하였고 성형 전 가열은 저항가열로에서 1시간 정도 가열 후 프레스로 이송하여 성형하였다. 반응고 영역으로의 가열은 고주파 유

도 가열 장치(5 KW, 350 KHz)를 이용 평균 200℃/min의 승온속도로 가열한 후 시편을 공압프레스(최대 램속도 : 200 mm/sec)로 이송하여 단시간 내에 성형함으로써 소재의 급속한 온도 저하를 방지하였다. 이 때 시편의 온도측정을 위하여 원통형 시편의 높이 방향과 직경 방향의 가장 중심부에 K-type의 열전대를 설치하였고 실시간으로 성형시험 결과를 저장하였다. 또한 가열실험된 조직검사용 시편은 유도 코일의 직하에 설치된 수냉조에서 급냉하였고, 가열 후 성형된 시편은 공냉하였다. 본 실험에서는 조절 냉각을 적용하지 않고 일단 상온으로 냉각시킨 후 동일한 실험조건(482℃/3hrs 용체화처리 → W. Q. → 120℃/24hrs 시효처리)에서 시효처리 하였다. 단조 또는 업세팅시 급형 온도의 영향을 살펴보기 위하여 급형을 200℃, 300℃, 400℃로 변화시켜 수행한 결과 300℃에서 가장 양호한 경도값 및 미세조직을 나타냈다. 따라서 동적회복 영역, 동적재결정 영역에서의 열간단조 및 반응고 단조의 비교는 급형온도를 300℃로 하여 수행하였다. 급형은 수용성 흑연계 윤활제를 이용하여 윤활처리 하였다. 시효처리 된 업세팅 시편 과 단조품에 대해서는 부위별 조직과 경도(HR30T)를 비교, 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Al 7075 합금의 온도-변형속도 관계도와 미세조직

(1) 온도-변형속도 관계도

일반적으로 금속재료의 변형에 있어 일정한 초기조직 상태에서 성형시 Fig. 2와 같은 형태의 온도-변형속도 관계를 나타낸다. 상온에서 용융점 이하의 고체상태에서는

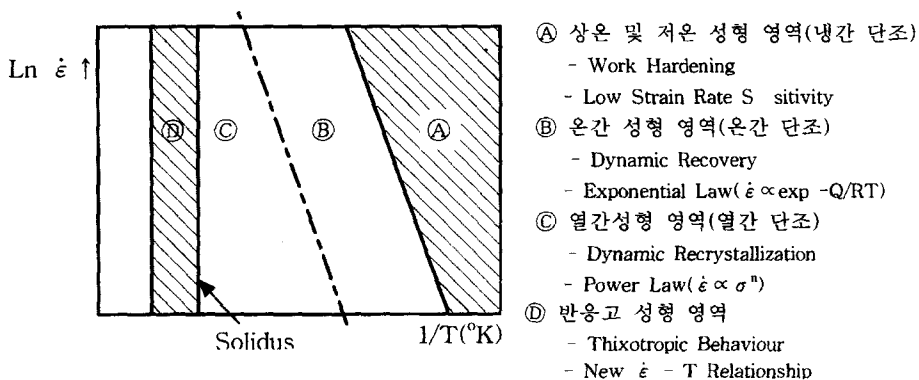


Fig. 2 Characteristic temperature-strain rate ranges for hot forming of Al alloys

크게 3구역으로 구분될 수 있다. 즉 가공경화(work hardening)와 낮은 변형속도 민감도(strain rate sensitivity)에 의해 변형이 지배되는 냉간성형 영역(㉔), 동적 회복 즉 연화(softening)가 일어나는 온간성형 영역(㉕), 동적재결정이 지배적이거나 유동응력과 변형속도 관계가 power law에 따르는 열간성형 영역(㉖)으로 구분할 수 있다.⁽⁶⁾ 용융점 이상에서는 반응고 성형 영역(thixotropic range)(㉗)이 존재한다. 그림에서 알 수 있듯이 고체상태에서는 각 성형영역의 경계는 일정한 기울기를 나타내며 이 기울기는 합금조성에 좌우되고 변형을 위한 활성화에너지를 의미한다. 이 경계선이 기울기를 갖는다는 것은 성형조건이 온도 뿐만 아니라 변형속도에 의해서 결정해야 된다는 것을 의미한다. 이와 같은 고온변형 거동분석을 통하여 각각의 온도 및 변형속도에서의 성형조건이 어느 구역의 변형거동에 해당하는지를 판단할 수 있다. 이러한 온도-변형속도 관계도는 인장 또는 압축 시험을 통해 얻어질 수 있으며 다음과 같은 두 가지 방법이 있다. 즉 변형량이 적은 경우(일반적으로 $\epsilon \leq 0.3$) 일정한 온도 및 변형속도에서의 인장시험에서 얻어지는 응력-변형률(σ - ϵ) 곡선의 양상을 통해 분류할 수 있고 또한 일정한 온도에서 변형속도를 변화시킬 때 변형속도 변화 직후 온도-변형률 곡선의 전이양상으로 구분할 수 있다. 여기서 변형거동을 구분하는 기준은 온간성형 영역의 연화 현상이다. 즉 이 구간의 특징은 가공경화보다는 전위밀도의 감소가 지배적인 현상인데 이것은 Fig. 3의 동적회복 영역(dynamic recovery range)에서(㉕) 어느 정도의 변형이 수반된 이후 정상응력에 도달되는 것이 특징이다. 즉 변형속도가 크게 증가된 직후 정상 유동응력에 도달할 때까지는 일정한 변형량이 필요하다. 이것은 변형중에 전위밀도의 감소가 지배적이기 때문에 이 전위밀도의 감소를 보충하기 위해

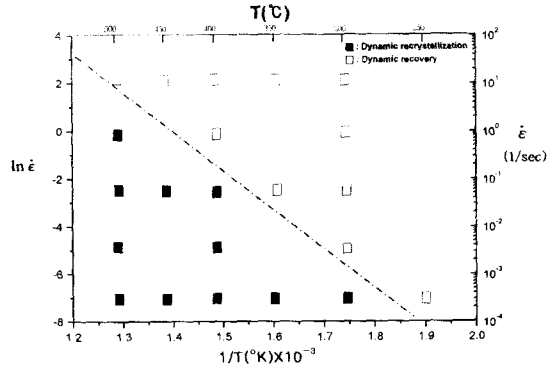


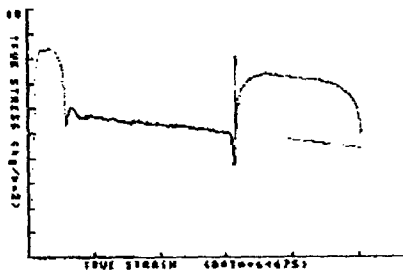
Fig. 4 Temperature-strain rate map of Al 7075 alloy.

서는 더 큰 변형량, 즉 가공도가 필요하기 때문이다. 동적회복이 지배적인 온간성형 영역과는 대조적으로 동적재결정이 지배적인 열간성형 영역에서는(㉖) 변형속도가 증가된 직후 변화된 변형조건에 상응하는 정상유동응력(flow stress for steady state)에 도달하는데 필요한 변형량이 극히 적다는 것이 특징이다. 즉 이 영역에서는 변형에 따른 전위의 움직임이 거의 순간적으로 일어나는 것이 가능함을 나타낸다. 상기와 같이 Al 7075 합금에 대하여 변형속도 변화시험 및 일정 변형속도 시험을 250℃~500℃, $10^{-3} \sim 10^1$ /sec의 조건에서 수행한 결과 Fig. 4의 온도-변형속도 관계도를 얻었다.

(2) 고체상태에서의 열간압축 성형조직

Fig. 5에는 10^{-1} /sec의 변형속도로 300℃, 350℃, 450℃ 및 500℃의 온도에서 각각 압축 시험된 조직과, 10^{-3} /sec의 변형속도로 450℃에서 압축 시험된 시편의 미세조직을 나타내었다. 300℃와 350℃에서 시험된 시편의 미세조직을 살펴보면 압축에 의해 변형된 조직을 볼 수 있

㉕ Dynamic Recovery Range



㉖ Dynamic Recrystallization Range

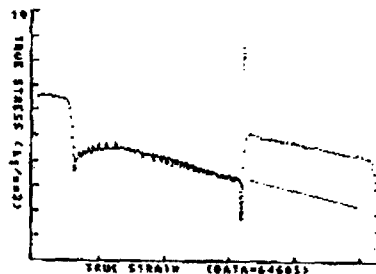


Fig. 3 σ - ϵ curves at strain rate change test

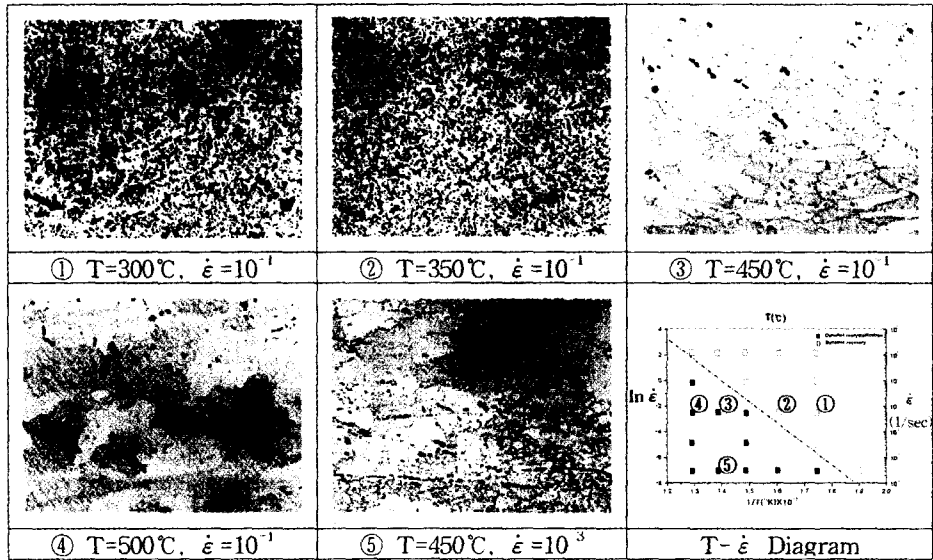


Fig. 5 Microstructures of Al 7075 upsetted in different temperature and strain rates

으나 어느 부위에서도 재결정된 조직은 나타나지 않는다. 반면 450℃와 500℃의 경우 변형된 결정립 부근으로부터 동적재결정 된 조직이 나타나고 있으며 500℃의 경우 일부 동적 재결정된 조직을 선명하게 볼 수 있다. 10⁻³/sec의 변형속도로 450℃에서 고온 압축된 시편의 경우도 역시 동적재결정 조직이 형성되었음을 알 수 있는데, 변형속도가 비교적 빠른 10⁻¹/sec에 비해 더 많은 재결정 조직을 관찰할 수 있다. 따라서 이러한 결과를 토대로 동일한 변형속도에서는 400℃를 기준으로 그 이상의 온도에서는 동적재결정이 발생되고 있음을 알 수 있고, 동일 온도일지

라도 변형속도가 낮을수록 더 많은 동적재결정이 발생함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 4의 온도-변형속도 관계도와 매우 잘 일치한다.

(3) 고온압축 시험에 의한 유동응력(flow stress behaviour) 거동

온도 및 변형속도에 따른 압축시험에 의한 유동응력 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 350℃의 경우 높은 변형속도인 10¹/sec에서 16 kg/mm²의 최대응력(peak stress)을 보인 반면, 500℃의 경우 최대응력은 10kg/mm²를 초과하지 않고 있다. 동일한 온도일 경우 변형속도가 높을수록

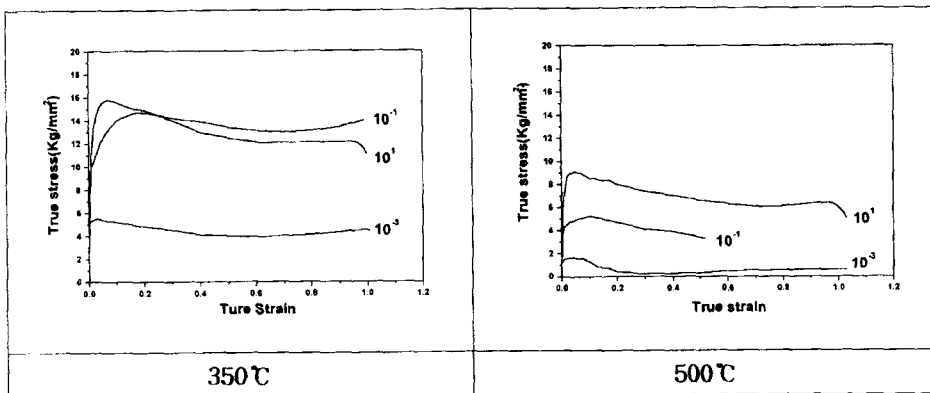


Fig. 6 Comparison of flow stress curves according to temperature and strain rates

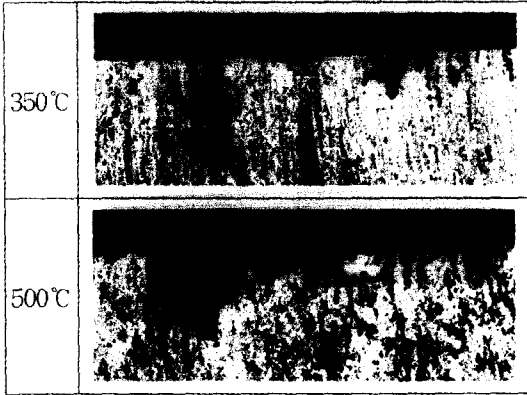


Fig. 7 Defects in upsetted specimens of Al 7075 alloy

최대응력은 크게 증가하고 있는데 이러한 유동응력 거동에 의해 온도가 증가하거나 변형속도가 낮을수록 변형 저항력이 크게 낮아져 성형성이 향상될 수 있음을 알 수 있었다. M. Ueki 등에 의하면⁽⁹⁾ 열간변형 동안 온도 T에서 최대 유동응력(σ_p)과 변형속도($\dot{\epsilon}$)의 상관관계를 다음과 같은 방정식에 의해 표현하고 있다.

$$f(\sigma_p) = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (1)$$

여기서 Q는 열간변형에 대한 활성화 에너지, R은 기체상수이다. 즉 응력합수 $f(\sigma_p)$ 는 상대적으로 낮은 응력에서의 power 곡선과 높은 응력에서의 exponential 곡선을 나타내며, 오른쪽 항은 온도가 보정된 변형속도($\dot{\epsilon}$)항이다. 또한 동적재결정은 최대 유동응력 직하에서 발생되어 정상 유동응력에서 완료된다고 규정하고 있다. 본 실험의 압축시험시 350°C의 온도에서는 exponential 곡선을 나타내는데, 최대 응력(σ_p)에 도달하기 위해서는 power 곡선을 갖는 500°C에 비해 더 많은 변형이 요구된다. 따라서 변형저항의 측면에서 동적회복 영역인 350°C가 500°C에 비해 높기 때문에 성형성은 상대적으로 떨어짐을 유추할 수 있다.

또한 Fig. 7과 같이 표면에 결함이 형성될 가능성이 있는데 변형저항이 상대적으로 낮은 500°C의 경우가 성형성은 350°C에 비해 우수하나 결함 유발 가능성이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 높은 소재온도에 비해 낮은 금형온도에 의한 온도편차와 윤활 특성의 저하에 의한 마찰력 증가

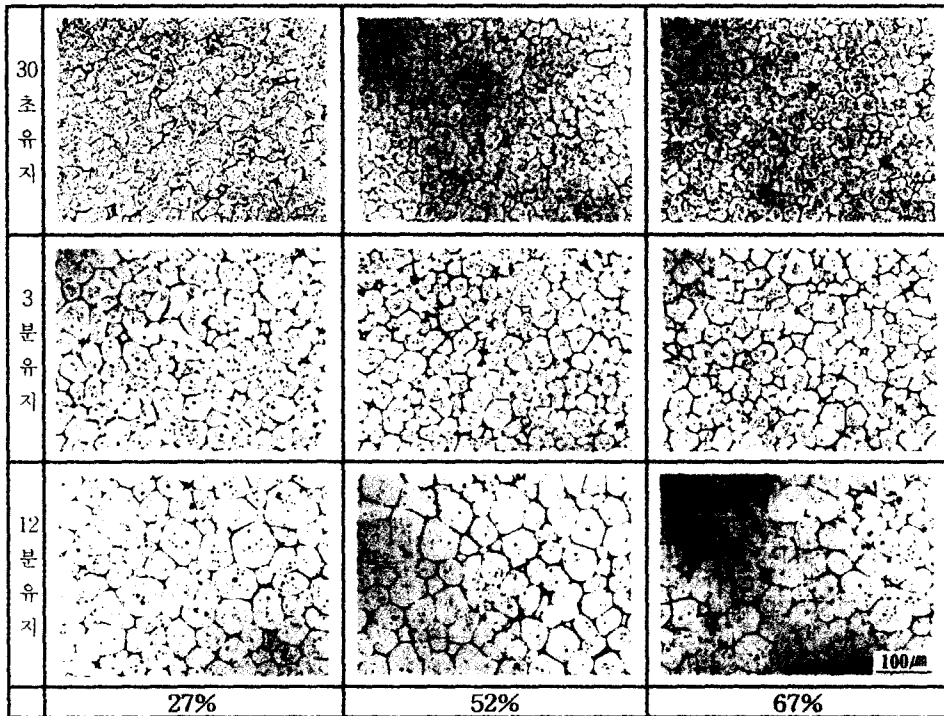


Fig. 8 Semi-solid microstructures of Al 7075 according to holding time and cold working ratio

등이 그 원인인 것으로 생각된다.

(4) 반응고 온도 영역에서의 미세조직

일정한 반응고 유지온도(600℃)에서 유지시간과 냉간 가공도에 따른 미세조직을 Fig. 8에 나타내었다. 가공도가 증가할수록 입자는 매우 미세하고 균일하게 분포하고 있으며, 유지시간이 짧을수록 미세하며 구형인 비수지상 조직을 형성하고 있다. 그러나 유지시간을 3분, 12분으로 증가시켰을 경우 각각의 가공도에 대한 입자조대화는 나타나지만 같은 유지시간의 경우(12분)에는 가공도가 증가해도 입자의 미세화에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 즉 장시간 유지할 경우에는 가공도에 따른 입자 미세화의 효과를 기대하기 어렵다는 것을 나타내는 결과이다. 이러한 결과로 비추어 볼 때 반응고 영역에서는 입자의 미세화

및 입자주위에 액상물이 균일하게 유지될 수 있도록 유지 시간이 되도록 짧게 하는 것이 필요하다. 그러나 가공도가 낮을수록(27%) 조직은 구상화되지 못하고 전체적인 입자의 불균일성을 초래하게 되어 반응고 성형성이 낮아질 가능성이 있으며, 52%이상으로 가공도가 증가해도(67%) 입자 크기는 작아지지 않음을 확인할 수 있었다. 오히려 가공도가 너무 높으면 냉간가공에 의해 소재의 내부결합을 유발할 우려가 있고 반응고 조직적인 측면에서 크기가 서로 다른 입자들이 불균일하게 분포할 가능성이 커지므로 유의할 필요가 있다.

3.2 반응고 단조품과 열간단조품의 특성 비교

Fig. 9에는 소재 온도를 각각 350℃와 450℃로 하여

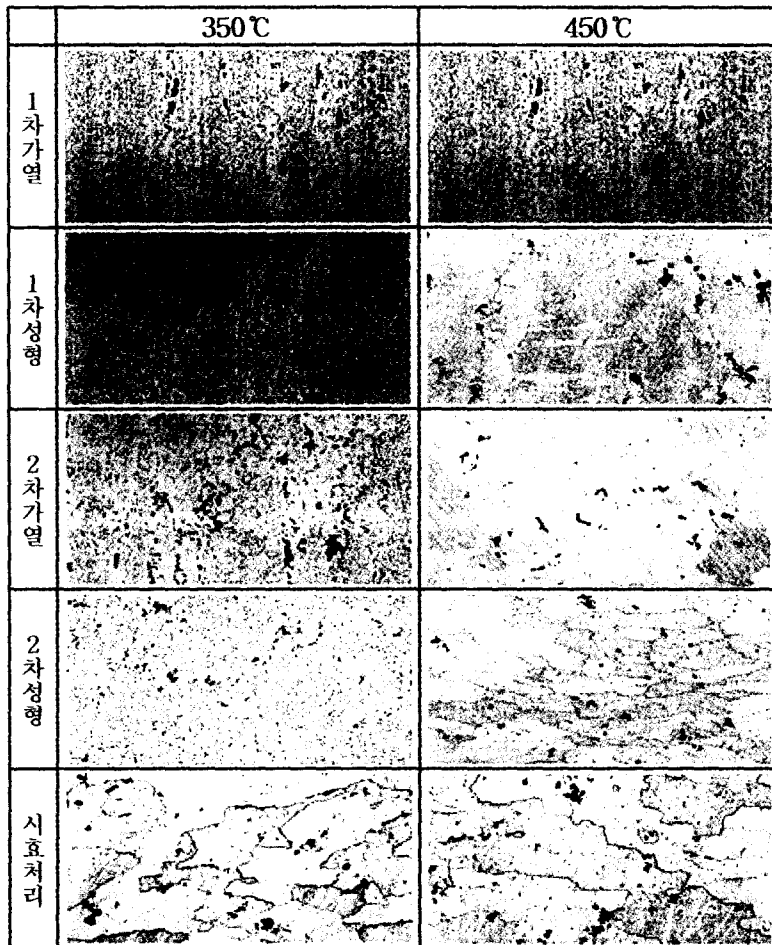


Fig. 9 Microstructures of Al 7075 in each stage of upsetting process at 350° C and 450° C

열간단조 한 후 각 단계에서의 미세조직을 나타내었다. 350℃의 경우 재결정이 일어나지 않는 동적회복 영역으로 각 공정단계별로 큰 조직 차이는 보이지 않는다. 그러나 성형성이 상대적으로 떨어지기 때문에 반드시 다공정으로 성형하는 것이 필요하다. 반면 온도를 450℃로 증가시켜 단조한 경우 각 단계에서 재결정 조직이 형성되었음

을 볼 수 있는데 앞 절에서 언급한 바와 같이 이 영역은 동적재결정을 일으키는 영역으로 Fig. 1의 [B]에 해당되는 공정이다. 온도를 증가시키는 것이 조직의 조대화 가능성이 커지고, 윤활 특성의 저하, 금형손상 등의 문제를 일으킬 수도 있지만 성형시간을 제어할 경우 성형성 향상으로 인해 1회 정밀성형이 가능할 수 있으며, 단조온도가 높기 때문에 단조 후 처리시간을 짧게 하여 용체화 처리 공정을 생략할 수 있는 가능성이 있다.

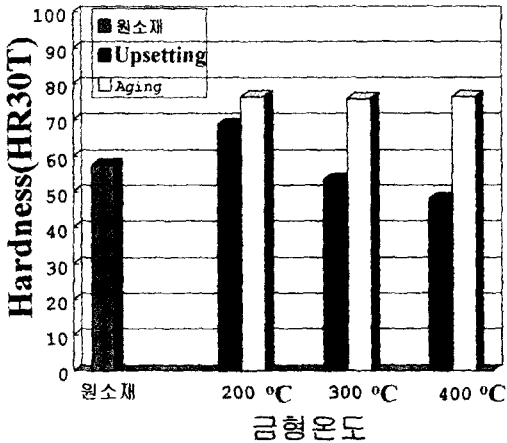


Fig. 10 Effect of die temperature on hardness of Al 7075 part after single-stage forging (upsetting temp. =500°C)

Fig. 10에는 동적재결정 영역에서 열간 압세팅하였을 때 금형 온도에 따른 경도를 비교하였으며, 소재 가열 및 성형 온도는 500℃이었다. 압세팅 성형시 금형 온도가 증가할수록 단조품의 경도는 크게 감소하는 반면 시효처리 후의 경도값은 금형 온도의 영향에 관계 없이 거의 유사한 값이 얻어지고 있다. 소재 가열온도가 500℃이고 금형 온도가 200℃ 일 때 시효처리 후 경도값에 근접한 값을 얻는 것은 곧 단조 후 냉각 및 용체화처리를 거치지 않더라도 금형 온도를 통해 단조 후 직접 시효처리가 가능하다는 것을 보여주는 것이다. 또한 조직 변화에 미치는 최적의 단조 가열 온도, 적정 냉각속도 및 온도, 단조 속도, 냉각시 유지시간 및 단조품의 형상 즉 금형의 형상과 윤활에 대한 영향 등의 여러 가지 인자의 복합적인 고려가 필요하다.

Fig. 11은 단조공정에 따른 조직과 성형 단면을 비교하

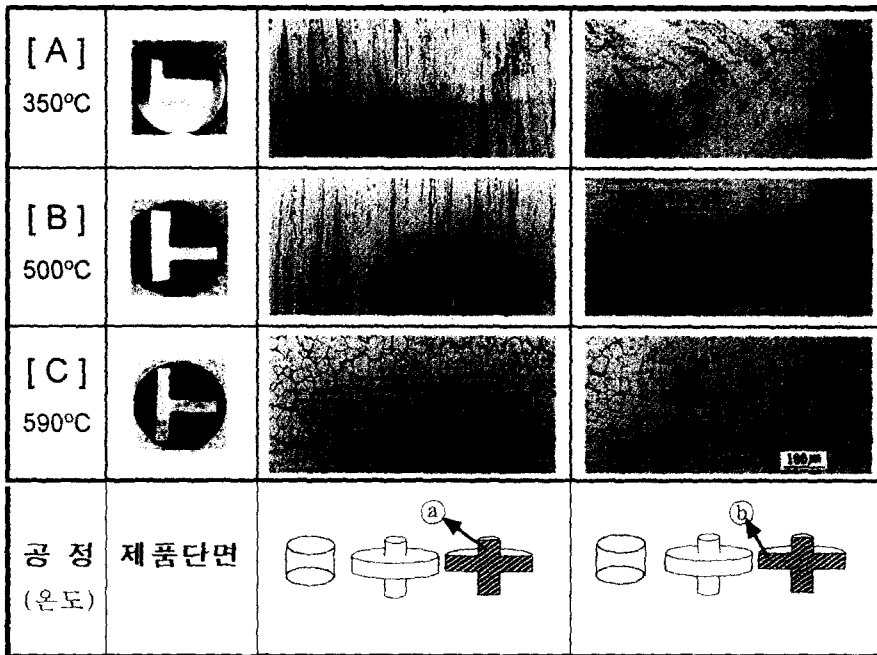


Fig. 11 Comparison of macrostructures of Al 7075 forged parts according to different forming procedures

기 위해 나타내었는데, 단조품의 형상은 원통형 소재로부터 동일한 금형을 이용하여 단면으로 +자 형으로 성형되었으며 단면사진에서는 반쪽인 T자형만 나타내었다. 미세조직은 ㉔부위와 ㉕부위에서 동일조건에서 시효처리 후 관찰하였다. 성형성 측면에서는 가열 및 성형온도가 증가할수록 금형 형상에 가깝게 성형되었고 특히 반응고 단조 공정 [C]에서는 완전한 충전 상태를 얻을 수 있었다. 기존의 동적회복 영역에서의 열간단조공정 [A]에서는 ㉔부위와 ㉕부위에서 metal flow의 차이가 뚜렷이 관찰된다. 단조온도를 500℃로 증가시킨 동적재결정 영역에서의 열간단조 [B]에서 부위의 조직에는 차이가 없으나 ㉕부위의 조직은 [A] 공정과 달리 수평방향으로 조밀한 metal flow를 나타내었다. 이는 상대적으로 높은 온도에서 성형됨으로 인해 변형이 가장 극심한 부위에서의 변형저항이 동적회복 영역에서의 열간단조에 비해 낮다는 것을 나타낸다. 반응고 단조 공정 [C]를 거친 단조품은 ㉔부위와 ㉕부위의 조직이 거의 동일하고 성형전의 구상의 입자가 거의 변형되지 않고 그대로 유지되고 있음을 알 수 있는데, 고상 입자 주위에 액상이 적절하게 분포함으로써 변형저항이 저감되고 성형에 따른 입자 이동이 양호하여 소재 내부의 잔류응력이 감소하여 균열발생의 한계로 설명되는 변형능 또한 우수함을 나타낸다. 이러한 결과를 토대로 반응고 단조의 성형성은 매우 우수하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12에는 각각의 단조공정에 따른 단조품의 경도를 비교하였다. 단조온도가 증가할수록 단조품의 경도는 크게 감소하였으나 시효처리 후의 경도값은 350℃에서 수행된 동적회복 영역에서의 열간단조(A)와 동적재결정 영역에서의 열간단조(B) 및 반응고 단조(C)에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉 조직, 성형성, 경도 측면에서

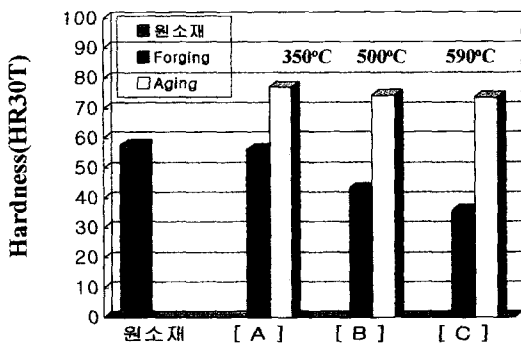


Fig. 12 Comparison of hardness properties of Al 7075 parts according to used forging procedures

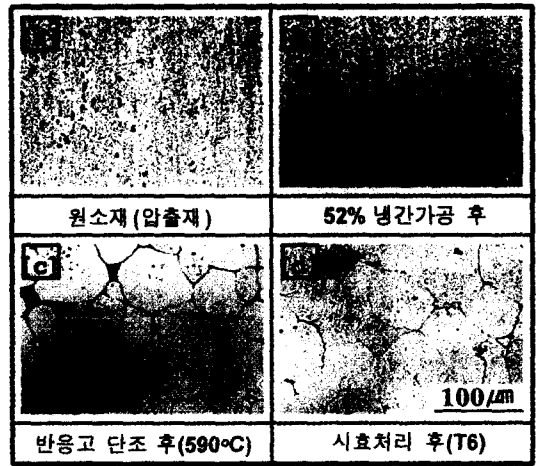


Fig. 13 Microstructures of Al 7075 at each stage during the process of thixoforming

동적재결정 영역에서의 열간단조 또는 반응고 단조의 경우가 기존의 동적회복 영역에서의 열간단조 보다 유리할 수 있다는 것을 보여주는 결과이다. 특히 반응고 단조의 경우는 부위별로 조직(Fig. 11-C)의 차이가 없는 것이 특징이다. 특히 반응고 단조 직후 입계에 존재하는 액상이 시효처리를 통해 정성적인 입계 형태로 변화하고 있는 것을 Fig. 13에서 보여주고 있는데, 이는 Fig. 12에서 각 공정의 시편이 시효처리 후 유사한 경도값을 보인 것에 대해 미세조직적으로 보여주는 결과이다.

Fig. 14는 열간 및 반응고 온도영역에서 온도에 따른 주요 합금조성의 부위별 분포의 변화에 대한 SEM 조직사진 및 선 분석(line analysis) 결과를 보여주고 있다. 350℃의 온간성형 영역에서는 Zn, Cu, Mg 합금이 균일하게 분포되어 있으며 온도가 500℃로 증가되었을 때는 재결정이 일어나고 입계에서 Cu 원소의 농도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 590℃ 반응고 조직을 보면 입계의 Cu 원소 증가가 더욱 뚜렷하다. 즉 반응고 가열시 입계의 저용점 조직은 Cu 원소에 의해 영향받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 반응고 성형품에서 반응고 성형직후와 성형품을 T6처리하였을 때의 선분석 결과를 나타내고 있다. 590℃로 반응고 성형된 후 냉각된 상태의 입계는 반응고 상태의 조성이 거의 그대로 유지되고 있음을 나타낸다. 즉 입계에는 Cu 함량이 증가되어 있고 Mg와 Al은 평균조성 이하임을 알 수 있다. 그러나 T6 처리후의 조직을 살펴보면 Cu를 비롯 Zn, Mg가 거의 석출물로 균일 분포하여 국부적인 농도증가는 일어나지 않았다.

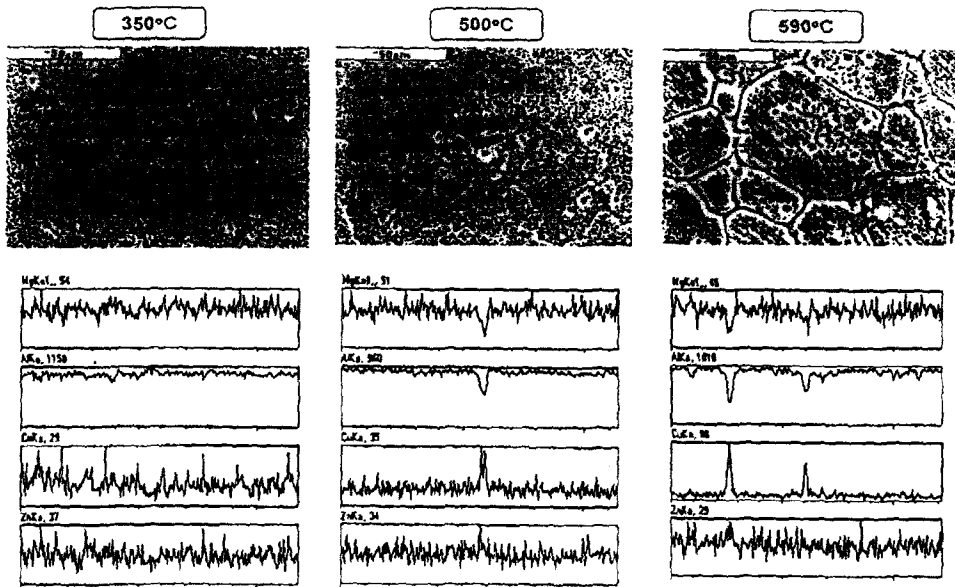


Fig. 14 Results of line analysis of Al 7075 at different temperatures

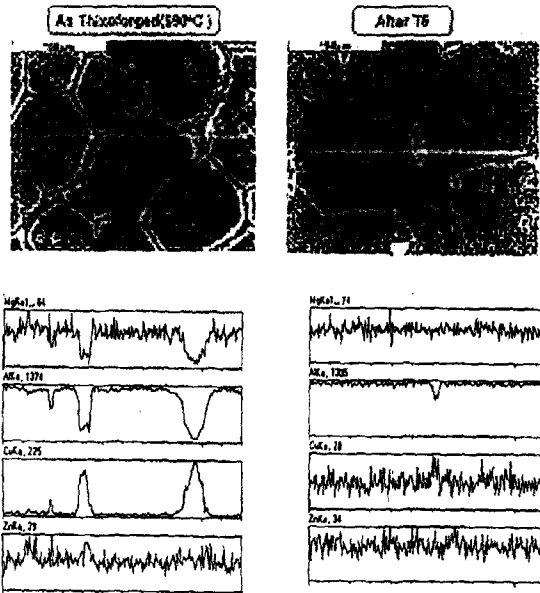


Fig. 15 Results of line analysis in thixoforged Al 7075 parts before and after T6 treatment

4. 결 론

Al 7075 합금을 대상으로 동일 형상의 부품을 성형하였을 때 열간단조와 반응고 단조에 대한 미세조직, 성형

성 및 경도특성을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 250~500℃의 온도 범위에서의 압축시험을 통해 얻은 응력-변형을 곡선의 양상과 미세조직 분석에 의해 열간성형을 위한 온도-변형속도 관계도를 구하였으며, 동적회복이 지배적인 온도-변형속도 영역과 동적재결정이 지배적인 온도-변형속도 영역으로 구분할 수 있었다.

(2) 동적회복이 지배적인 영역(낮은 온도-높은 변형속도 영역)에서는 가열 및 단조가 여러차례 반복되는 다공정 열간단조가 수행되었다. 이때 용체화처리 전 공정까지는 가열 및 단조(또는 업세팅)를 반복하여도 재결정은 일어나지 않았지만 부위별로 가공도의 차이가 나타나고 이것이 용체화처리 후의 불균일 재결정조직 형성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(3) 동적재결정이 지배적인 영역(높은 온도-낮은 변형속도 영역)에서는 다공정 열간단조를 수행할 경우 각각의 가열 및 성형 공정에서 재결정이 일어나 최종 용체화처리 후 매우 불균일한 조직이 얻어지기 쉽기 때문에 가능한 1회 성형에 의해 최종제품으로 성형할 수 있는 성형조건을 선택하는 것이 중요하였다. 이 온도영역에서는 비교적 성형온도가 높기 때문에 표면부위의 조대결정립 형성 및 이로 인한 입계 파괴가 일어나지 않도록 주의하여야 한다.

(4) 반응고온도 영역에서 미세하고 균일한 미세조직을 얻기 위해서는 약 50%의 냉간 가공이 적절하였다. 반응

고단조에 의해서는 열간단조에 비해 매우 낮은 성형 압력으로 복잡 형상 부품의 정밀성형이 가능하였다. 반응고단조 후의 입자크기 및 분포는 냉간가공 후 반응고가열에 의해 얻은 것과 큰 차이가 없었다. 또한 반응고 단조품의 부위별 조직도 미세하고 균일하게 유지하는 것이 가능하였다.

(5) 열간단조품과 반응고단조품의 경도값을 비교해 볼 때 반응고단조품, 동적재결정 영역에서의 1회 열간단조품, 동적회복에서의 다공정 열간단조품 순으로 경도가 증가하였다. 그러나 용체화 및 시효처리(T6) 후에는 반응고 단조품의 경도값도 다공정 열간단조품의 경도값과 거의 동일한 수준으로 향상되었다. 따라서 단순형상의 제품이면서 고강도를 요구하는 경우에는 기존의 열간단조가 비교적 유리하지만 복잡 형상 부품 성형에는 반응고 단조가 상대적으로 우수함을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Proc. of 2nd Int. Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, (1992), USA
 (2) A. L. Tietmann, 1993: ph. D. Thesis, RWTH

Aachen, Germany
 (3) G.Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen, 1994: The 5th International Conference on Metal Forming 1994. The University of Birmingham. September 13~15.
 (4) G.Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann, T. Witulski, M. Zillgen, 1994: 3th Int. Conf. on the Semi Solid Processing of Alloys and Composites, June 13~15, Tokyo, Japan
 (5) A Turkeli and N. Akbas, 1996: 4th Int. Conf. on semi-solid processing of Alloys and Composites, Sheffield, England, June 19~21, p.71.
 (6) P. Kapranos, D. H. Kirkwood, C. M. Sellars, 1993: Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 207.
 (7) E. Doege, W. Polley, 1996: Schmiede-Journal, September, Germany, p.19.
 (8) S. Y. Lee, 1993 : Ph. D Thesis, RWTH Aachen, Germany.
 (9) M. Ueki, S. Herie, T. Nakamura, 1987 : Materials Science and Technology , Vol 3, May.