유도가열에 따른 SKH51의 반응고 미세조직 특성 연구

이 상 용[†]

안동대학교 신소재공학부

The Characteristics of Microstructure in the Semi-solid State of SKH51 at High Frequency Induction Heating

Sang Yong Lee[†]

School of Advanced Materials Engineering, Andong National University,
388 Songcheon, Andong, Gyeongbuk 760-749, Korea

Abstract Semi-solid forming of the high melting point alloys such as steel is a promising near-net shape forming process for decreasing manufacturing costs and increasing the quality of the final products. This paper presents the microstructure characteristics of SKH51 (high speed tool steel) during heating and holding in the mushy zone between 1233°C and 1453°C, which has been measured by differential scanning calorimetry (DSC). The results of heating/holding experiments showed that the grain size and the liquid fraction increased gradually with temperature up to 1350°C. The drastic grain growth occurred at heating above 1380°C. The strain-induced melt-activated (SIMA) process has been applied to obtain globular grains in the billet materials. Working by mechanical upsetting and successive heating of SKH51 into the temperatures in the mushy zone resulted in globular grains due to recrystallization and partial melting.

(Received April 9, 2012; Revised April 24, 2012; Accepted May 7, 2012)

Key words: Semi-solid, SKH51, Induction heating, Thermo-mechanical treatment, Microstructure, Grain size, Liquid fraction

1. 서 론

반응고 성형 기술은 1990년대부터 활발한 상업화 연구가 진행된 이래 지금까지 Al, Mg과 같은 경량 및 저융점 합금의 경우 다양한 부품에 대한 생산이 이루어지고 있다. 반응고 금속 성형 기술의 응용을 확대하기 위해서는 동합금, 철강 등과 같은 고용점 금속에의 적용이 반드시 필요하다. 동합금의 경우 순동의 주조 온도보다 100~150°C 정도 낮은 온도인 1000~1030°C에서 반응고 성형을 하여 전동기용 로터를 제조하는데 적용한 개발 사례가 있다[1-2]. 그러나 일반적인 철강의 경우는 동합금보다 더 고온에서 성형을 수행해야 함으로서 금형의 열화가 더 빠르게 진행 될 뿐만 아니라, 반응고 성형을 위해 기본적으로 필요한 고액공존영역(mushy zone)도 매우 좁고, 저렴한 제품의 단가를 고려할 때 반응고 성형 기술의 적용은 의미가 없다. 그러나 공구강, 특히 합

금성분이 가장 많으며 가공하기 어렵고 제조비용이 고가인 고속도 공구강의 경우에는 고액공존영역이 매우 넓고, 탄소강에 비해 200~250°C 정도 낮은 온도에서 성형이 가능한 것으로 알려져 있으며 금형재료 및 코팅기술의 발달과 진공 등의 설비기술의 발달로 반응고 금속 성형 기술의 적용에 대한 가능성이 높아질 것으로 전망하고 있다[3-5]. 본 연구에서는 대표적인 고속도공구강인 SKH51을 대상으로 복잡형상 부품제조를 위한 반응고 성형성을 평가하기 위한 레올로지(rheology) 특성을 조사하고자 하였다. 특히 고주파 유도가열을 이용하여 고액공존영역으로의 급속가열 및 짧은 유지조건에 따른 SKH51의 미세조직 변화의 특징을 미세조직의 양상, 입자크기의 변화 및 액상율(liquid fraction)의 측정을 통해 분석하고자 하였다.

[†]Corresponding author. E-mail : sylee@andong.ac.kr

Fig. 1. Specimen appearance and locations for the temperature measurements.

2. 실험 방법

본 연구에서는 SKH51(표준조성[wt.%] C:0.85, Si:0.4, Mn:0.4, Cr:3.8~4.5, Mo:4.5~5.5, W:5.5~6.7, V:1.6~2.2, Fe:bal.) 소재를 사용하였다. 실험에는 그림 1과 같이 직경 20 mm, 높이 20 mm의 작은 원통형 실린더 형태로 가공된 빌렛이 사용되었다. 빠른 속도로 가열되는 고주파 유도 가열 시편의 중심 부위와 표면 부위의 온도 차이를 측정하기 위해 그림과 같은 위치에 R-type 열전대를 부착하여 온도를 측정하고 기록하였다. SKH51의 고액 공존 온도 구역을 찾기 위해 10°C/min의 가열 및 냉각 속도로 DSC 분석이 수행되었다.

시편의 가열은 5 kw/350 kHz의 용량을 갖는 고주파 유도 가열기에 의해서 이루어졌다. 코일 내부는 균일 가열을 위해 원통형의 graphite 튜브가 설치되었다. 가열은 1200-1380°C 범위에서 1200, 1250, 1300, 1350, 1380°C를 각각 목표 온도로 하여 가열하였다. 목표온도로의 가열속도는 10°C/sec로 설정하였다. 각각의 반응고 온도에서의 유지시간은 1, 3, 5, 7분으로 각각 변화 시켰다. 반응고 상태의 미세조직은 각각의 가열온도 및 유지시간에서 실험 후에 수냉된 조직을 광학현미경으로 관찰하여 비교하였다. SKH51의 효과적인 반응고 성형을 위해서는 반응고 상태로 가열하여 성형하기 직전에 입자의 형태는 구형 입자(globular grain)를 가져야 한다. 이러한 구형의 입자를 얻기 위해 알루미늄의 반응고 공정에서 사용하는 가공열처리 공정인 SIMA(Strain Induced Melt Activated)법을 적용하였다.

Fig. 2. Typical temperature traces in center and surface of SKH51 specimen during high frequency induction heating.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 유도가열에 따른 반응고 미세조직의 특징

그림 2는 직경 20 mm, 높이 20 mm의 실린더 형태의 빌렛을 1200°C로 가열할 때의 빌렛 표면과 중심의 온도 변화 곡선을 나타내고 있다. A구간에서와 같이 큐리온도(≈770°C) 이하에서 SKH51은 강자성체로서 와전류 손실 및 히스테리시스 손실에 의해서 빌렛이 가열되기 때문에 급격히 온도가 상승하나 B구간은 강이 강자성체에서 상자성체로 변화함으로 와전류 손실에 의해서 가열되게 된다. 따라서 온도의 기울기가 작아지게 된다. C구간 이상의 반응고 영역에서는 고온에 따른 복사손실이 매우 크므로 온도의 상승폭은 매우 작아지게 된다. 표면에서 복사로 방출되는 열량만큼 에너지가 외부에서 공급되어야 온도가 상승하므로 더 큰 용량으로 가열이 필요하다는 것을 의미한다. 시편의 표면과 중심부의 온도 차이는 5°C 정도로 작게 유지될 수 있었다.

그림 3에는 실험에 사용된 SKH51의 고액공존영역, 즉 고상선과 액상선 온도를 측정하기 위해 수행된 DSC 분석 결과를 나타내었다. 액상이 발생하기 시작하는 고상선은 1233°C, 완전한 액체 상태로 되는 액상선은 1453°C로 측정되었다. 고액공존영역(mushy zone), 즉 반응고 영역은 약 220°C로 비교적 넓은 온도 범위로 존재하는 것으로 드러났다.

넓은 고액공존 온도 범위는 반응고 성형을 위한 조건설정의 범위를 크게 할 수 있기 때문에 실용화

Fig. 3. DSC result showing mushy zone temperatures of SKH51.

개발에 있어 유리한 조건을 가지게 한다는 것을 의미한다. DSC 분석 결과를 바탕으로 반응고 가열을 위한 목표 온도를 고상선보다 낮은 온도인 1200°C와 고액공존구역에서 1250, 1300, 1350, 1380°C를 선정하여 실험하였다.

그림 4는 가열온도 변화에 따른 미세조직의 변화를 보여주고 있다. 고상선 온도인 1233°C보다 낮은 1200°C에서는 미세한 입계들이 보이기 는 하나 입계

부위에 액상이 형성되지 못한 것을 볼 수 있다. 그러나 1233°C보다 높은 1250°C에서는 입자의 크기가 작지만 구형의 입계가 선명하게 나타나기 시작했다. 1300°C에서는 1250°C보다 입자의 크기가 분명하게 증가하였음을 보이고 있다. 또한 대부분의 입자는 구형의 입자(globular grain)가 되어 있었고 입자와 입자사이에는 가열 중에 액상이 되었다가 수냉에 의해 그대로 액상상태에서 응고된 흔적이 관찰되고 있다. 입계뿐 만 아니라 각각의 입자 내부에도 포집된 액상(entrapped liquid)을 관찰할 수 있었다. 1350°C는 1300°C와 유사한 조직 양상을 보여주고 있으며, 1380°C에서는 입자크기가 증가하였음을 뚜렷이 보여주고 있다.

그림 5와 그림 6에는 각각 반응고 온도 영역에서의 가열에 따른 입자크기의 변화와 액상율(f_L : liquid fraction)의 변화를 측정하여 그래프로 나타내었다. 입자크기와 액상율은 각각 광학현미경 사진을 이용한 이미지 분석(image analyzing)을 활용하여 측정하였다. 입자크기는 평균 직경을 나타내며, 액상율은 액상의 면적을 고상의 면적으로 나눈 값에 100을 곱한 퍼센트 값이다. 입자크기는 1250°C~ 1350°C의

Fig. 4. Optical micrographs showing the developments of globular grains during heating in the mushy zone temperatures between 1200°C and 1380°C of SKH51.

Fig. 5. The variation of grain size according to heating temperatures in the mushy zone of SKH51.

Fig. 6. The variation of liquid fraction according to heating temperatures in the mushy zone of SKH51.

온도범위에서 점진적인 증가양상을 보이다가 1350°C 이상에서는 급격하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 1250°C~1350°C의 온도범위에서 입자크기는 직경 15~26 μm의 범위를 나타내었고, 1380°C의 온도에서는 입자의 평균크기는 65 μm 이상으로 크게 증가하였다. 반응고 온도 영역에서의 액상율(f_L)의 온도에 따른 변화 양상은 입자크기의 변화 형태와 매우 유사함을 보이고 있다. 1250°C~1350°C의 온도범위에서 액상률은 4%에서 9% 정도로 입자크기가 증가하는 비율과 같은 형태로 증가하였다. 또한 1350°C 이상에서는 입자크기와 같이 액상율도 약 18% 정도까지 급격하게 증가하고 있음을 볼 수 있다.

그림 7에는 SKH51의 일정한 반응고 가열온도

Fig. 7. Optical micrographs showing globular grains according to holding times during heating at 1350°C in the mushy zone of SKH51.

Fig. 8. Grain sizes according to holding times during heating at 1350°C in the mushy zone of SKH51.

(1350°C)에서 가열 유지시간에 따른 미세조직의 변화를 비교하였다. 가열 온도의 영향과 유사한 입자변화 형태를 보이고 있다. 즉, 1350°C에서 유지시간을 증가시키는 것은 가열온도를 증가시키는 것과 같은 효과를 얻을 수 있음을 보여 주고 있다.

그림 8과 9에는 1350°C에서 유지시간에 따른 입자 크기와 액상률(f_L) 변화를 나타내었다. 입자크기는 유지시간에 비례하여 26 μm에서 약 43 μm로 뚜렷하게 증가하고 있음을 볼 수 있다.

반응고 온도 영역에서의 1~2분의 유지시간 증가로도 입자크기의 변화가 뚜렷하게 발생하고 있음을 볼

Fig. 9. Liquid fractions according to holding times during heating at 1350°C in the mushy zone of SKH51.

수 있다. 가열 유지시간을 수분 이내로 설정한 것은 SKH51과 같은 고온에서의 반응고 성형을 고려하여 설정한 것이다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 1~3분의 유지시간에도 입자크기의 증가가 있지만 그 크기 변화는 미세하다고 볼 수 있다. 이와 같은 데이터를 실제의 성형에 적용할 경우, 성형용 소재의 부피를 고려하여 균일한 가열에 필요한 최소한의 유지시간을 선정하는 참고 값으로 활용이 가능하다. 액상률은 유지시간에 의해 크게 증가하지는 않았다. 이는 그림 6의 가열온도에 따른 액상률의 변화보다 매우 작은 증가 양상이다. 이 차이는 가열온도에 도달하는 시간과 도달한 가열온도에서 유지하는 시간과의 차이에서 기인한 것으로 해석할 수 있다. 즉, 그림 2의 가열 곡선에서 보는 바와 같이 SKH51의 경우 목표온도에 도달하는 데에는 비교적 많은 시간이 소요된다. 즉 온도를 증가시키면 소요시간은 더욱 더 많은 시간이 필요하며 이 시간들은 그림 7~9의 유지시간인 1~7분 보다 수배에서 수십 배 이상의 시간이 필요한 것으로 보면 된다. 이와 같은 결과를 고려하여 실제 반응고 성형을 위한 가열에서는 균일가열시간을 가능한 줄일 수 있는 설비조건이 필요하게 된다는 것을 말해준다.

3.2 SIMA 공정에 의한 반응고 가열 조직 제어

어떤 금속을 반응고 성형에 적용하기 위해서는 두 가지 요소를 필수적으로 만족시켜야 한다. 즉, 고액 공존영역(mushy zone)을 나타내기 위해 금속은 합

금이어야 한다. 또한 고액공존영역에서 반응고 가열된 상태에서 성형압력이 가해지기 직전에 미세조직의 입자는 구형이어야 한다. 입자가 구형이어야 고액공존영역으로의 가열 중에 입계가 액상이 되고 이 액상이 소재 전체에 균일하게 분포되어 성형압력이 가해지는 과정 중에 고상간의 직접적인 접촉마찰이 생기지 않게 하는 윤활작용을 하여 주조와 같은 성형이 가능해지는 것이다.

구형입자(globular grain)를 얻는 방법에는 여러 가지가 있지만 대표적인 것이 SIMA(Strain Induced, Melt Activated)법이다[6-7]. SIMA법은 가공 및 재결정과 유사한 방법이다. 즉, 가공도를 부여하고 가열하여 재결정을 통해 미세하고 균일한 입자를 얻는 방법을 활용한다. 다른 점은 가열온도이다. 일반적인 재결정은 고체상태의 고온으로 가열하지만 SIMA법에서는 가열온도를 고액공존영역의 온도로 한다. 가열 중에 입계에 액상이 형성되도록 하는 것이다. 일반적으로 재결정과 유사하게 가공도에 따라 입자크기를 제어하는 것이 가능하다.

본 연구의 SIMA 공정에서는 SKH51에 대해 소성가공도를 부여하기 위해 단순압축을 가하였다. 압축시험은 SKH51의 높은 강도를 고려하여 200톤 프레스를 이용하여 상온에서 수행하였다. 변형은 10 mm/min의 속도로 이루어졌으며 윤활제는 사용하지 않았다. 시편의 크기는 직경 8 mm 높이 12 mm의 전형적인 압축시편 형태로 가공하여 사용하였다. 가공도는 일반적인 업세팅 가공도 계산 방식을 적용하였으며 본 연구에서는 5~48% 범위에서 약 5~10%의 간격으로 가공도 변화를 얻은 후, 각각의 압축시편에 대해 일정한 온도인 1350°C로 가열하여 목표온도에 도달되는 즉시 유냉한 후 미세조직을 관찰하였다.

SIMA공정 후의 가공 정도에 따른 미세조직을 그림 10에서 보여주고 있다. 5%의 작은 가공 정도에서 뿐만 아니라 48%까지의 모든 가공 정도에서 가공 후의 반응고 가열조직은 모두 구형의 입자를 나타내고 있으며, 모든 가공 정도에서 유사한 형태의 입자형상, 입계액상 흔적의 양상을 볼 수 있었다. 즉, 매우 적은 양의 가공도에서도 반응고 성형이 가능한 구형입자(globular grain)가 얻어졌다. 이는 본 연구에 사용된 원소재(as received) 상태로 이해 할 수

Fig. 10. Optical micrographs showing globular grains of SKH51 during heating into 1350°C according to working ratio.

Fig. 11. The change of grain sizes of SKH51 according to working ratio.

있다. 즉, 본 연구에서는 시중에서 구입이 가능한 봉 형태의 반제품 상태의 소재이다. 즉, 다양한 고속도 공구강 부품(예: 드릴, 엔드밀 등)을 최종 기계가공으로 형상을 얻기만 하면 되는 상태이며, 이는 이미 어느 정도의 가공이 부여되어 있다는 것을 의미한다. 그림 11에는 가공에 따른 입자크기의 변화를 측정하여 그래프로 나타내었다. 가공도가 증가할수록 입자크기가 미세해지는 경향을 보이고 있지만 전체적으로 입자크기의 미세화는 적은 편으로 보인다. 이는

Fig. 12. SEM image and EDS results of SKH51 after heating at 1350°C.

앞에 언급했듯이 이미 존재하는 사전 가공량이 충분히 있었고 추가 가공의 효과는 적다고 볼 수 있다. 이 결과를 달리 해석한다면 반제품으로 제조된

Fig. 13. SEM observation and EDS line scan results of SKH51 after heating at 1350°C.

고속도공구강은 추가적인 SIMA 공정의 적용이 없어도 반응고 성형에 직접 활용하는 것이 가능할 수 있다는 것을 의미한다. 추가적인 공정의 배제는 생산성과 경제성을 증가시키는 긍정적인 요소로 작용할 수 있다.

그림 12는 1350°C로 가열한 후 즉시 유냉한 조직의 SEM 사진과 SEM 조직의 ①, ② 부위에 대한 EDS 결과를 함께 나타내었다. SEM 조직에서 ① 부위는 1350°C의 반응고 온도에서도 고체상태로 존재하다가 냉각된 입자의 전형적인 조직을 나타내고 있다. 크고 작은 구형의 입자 형태가 뚜렷하다. ② 부위는 1350°C의 반응고 온도로 가열되는 동안 고

상선인 1233°C 근처에서 용융되는 입자의 가장자리 부위로서 액상으로 존재하다가 냉각된 조직이다. ① 부위의 고체상태의 입자를 둘러싸고 있는 경계임이 뚜렷이 보인다. ② 부위의 조직은 γ 와 Fe_3C 의 층상 구조 조직으로 보인다. EDS 결과에서 ①, ② 부위의 성분의 큰 차이는 W, Mo, V, Cr, C에 있는 것으로 나타났다. 이 원소들은 고속도공구강의 주된 합금원소로서 미세한 카바이드를 형성하는 주요 성분들이 액상(② 부위)으로 많이 이동하여 존재하고 있음을 알 수 있다. ① 부위가 비록 반응고 가열 중에 고체 상태로 유지되고 있었지만 W, Mo, V, Cr, C와 같은 주요 합금 성분의 고상에서 액상으로의 이동이 뚜렷하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

W, Mo, V, Cr, C와 같은 주요 합금 성분의 고상과 액상에서의 농도의 차이는 그림 13에 나타난 EDS(line scan) 결과에서 뚜렷하게 보여지고 있다. SEM 조직사진에 노란색으로 표기된 66 μm 선을 따라 분석된 각 성분의 위치에 따른 분포로부터 고상과 액상에 존재하는 각각의 성분들이 가열 전후에 변화를 보인 것이 분명해졌다. 이와 같은 성분 변화가 소재 및 부품의 요구 특성에 어떤 영향을 미치는가에 대한 체계적인 분석은 향후에 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

SKH51의 고주파 유도 가열에 의한 반응고 상태에서의 미세조직의 특징을 미세조직 관찰, 입자크기 및 액상율의 측정 및 비교를 통해 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SKH51의 반응고 성형성에 큰 영향을 미치는 고액공존 온도구역은 1233~1453°C로 약 220°C의 넓은 온도 범위로 나타났으며 넓을수록 실제 성형에 유리하다.
2. SKH51의 입자크기 및 액상율은 반응고 성형에 적당한 온도범위인 1350°C 내외에서 제어가 가능한 수준으로 변화를 보인 것으로 나타났다. 필요한 입자크기를 제어하는 데에는 일정한 온도에서 유지시간을 변화시키는 것이 바람직한 것으로 나타났다.
3. SKH51를 반응고 성형에 활용하기 위해 필요한 구형 입자(globular grain)는 SIMA법의 적용에 의

해 용이하게 제어가 가능한 것으로 나타났다. 다만 일반적인 반제품은 SIMA법의 적용 없이도 구형입자 (globular grain)를 반응고 상태에서 얻는 것이 가능한 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2011학년도 안동대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. K. Y. Sohn, D. W. Suh and S. Y. Lee : Mat. Sci. Forum, **449-452** (2004) 685.
2. S. Y. Lee and S. Y. Lee : Solid State Phenomena, **116-117** (2006) 84.
3. A. Rassili and H. V. Atkinson : Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **20** (2010) 1048.
4. R. Kopp, J. Kallweit, T. Moeller and I. Seidl : J. of Mat. Proc. Tech., **130-131** (2002) 562.
5. P. Kapranos, D. H. Kirkwood and C. M. Sellars : Proc. Intn. Mech. Engrs., **207** (1993) 1.
6. S. Y. Lee, J. H. Lee and Y. S. Lee : Journal of Materials Processing Technology **111** (2001) 42.
7. S. Y. Lee and S. I. Oh : Journal of Materials Processing Technology **1130-131** (2002) 587.