SKH51의 반응고 상태에서의 가열 및 성형에 의한 부품 제조

이 상 용[†]

안동대학교 신소재공학부

Fabrication of a Part by Heating and Forming in the Semi-solid State of the SKH51 Material

Sang Yong Lee[†]

Dept. of Advanced Materials Engineering, Andong National University,
388 Songcheon, Andong, Gyungbuk, 760-749, Korea

Abstract The semi-solid metal forming process has been applied to realize a near-net shape fabrication of a high speed tool steel. A complicatedly shaped part out of SKH51 was successfully manufactured by introducing pertinent materials, tooling and processing conditions. A SKH51 billet with globular grains was heated at temperatures between 1300 and 1350°C using high frequency induction heater to get semi-solid microstructure before high rate injection of mushy metal into a die cavity for the forming process. It was necessary to control the pre-heating of dies between 300 and 400°C to maintain the homogeneous microstructure during the semi-solid metal forming process. Significant defects such as pores, high fraction of liquid fraction and segregation could be removed from the part by using air vents.

(Received March 7, 2014; Revised March 14, 2014; Accepted March 19, 2014)

Keywords : SKH51, Thixoforming, Induction heating, Die temperature, Microstructure, Hardness

1. 서 론

용점이 높고 가공하기 어려운 철강 소재, 예를 들면 고합금강 또는 특수강 등을 반응고 성형 기술을 응용하여 주조와 같이 1회의 성형으로 복잡한 형상의 부품을 제조하기 위한 기초 연구가 1990년대 초에 영국에서 시작되었다[1]. 이후 독일을 중심으로 고속도공구강, 고탄소강, 스테인레스강 등, 다양한 합금에 대한 개발 및 상업화를 위한 공정 개발이 지속적으로 수행되어 왔다[2-4]. 그러나 국내에서의 고용점 금속의 반응고 성형 연구 결과는 아직도 소수에 불과한 실정이다[5-7]. 고용점 금속의 반응고 성형 기술이 주조에 근접한 고온 작업이기 때문에 금형의 열화, 정밀 제어를 위한 설비 및 생산 비용이 높다는 단점이나 높은 요구 특성 등이 응용 연구의 걸림돌이 된다. 그러나 고부가가치 산업이 요구될수록 난가공성, 고용점 금속의 정형제조 필요성은 점차

증가할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 대표적인 난가공성 재료이고 다양한 형상의 부품으로 응용되며 반응고 성형을 위한 연구 자료가 축적되어 있는 고속도공구강 소재 중에서 SKH51를 성형용 소재로 선정하였다. 지금까지 수행된 고용점 금속의 반응고 성형을 위한 기초 연구를 활용하여 복잡한 형상의 SKH51 부품을 제조하는데 필요한 생산 요소 기술을 파악하고 소형 부품으로의 응용 가능성을 확인하고자 하였다. SKH51의 반응고 부품 성형을 통해 성형을 위해 필수적인 유도가열을 이용한 소재(빌렛)의 금속 및 균일 가열 조건, 빌렛의 고액 공존 온도로의 가열 및 유지시간, 금형의 예열 또는 가열조건, 성형속도, 냉각 등의 공정 조건과 함께 이를 위한 설비 조건 등을 파악하고자 하였다. 또한 성형된 부품의 특성을 미세조직과 경도 분석을 통해 확인하여 반응고 성형품으로서 개발 가능성을 확인하고자 하였다.

[†]Corresponding author. E-mail : sylee@anu.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

Fig. 1. Initial billet shape and the model of an SKH51 part for semi-solid forming.

2. 실험 방법

본 연구에서는 성형용 소재로 시중에서 공급되는 고속도 공구강인 SKH51(조성[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.)를 구입하여 사용하였다. 반응고 성형을 위해서 필요한 구형의 입자를 가지는 미세조직을 얻기 위해 구입한 소재를 열간에서 30% 비율로 압제팅 단조하였다. 지난 연구에서의 SIMA 공정을 활용하여 30% 정도 단조한 후에 빌렛을 반응고 성형 온도로 가열하면 성형하기에 적합한 균일한 구형의 입자가 나타난다[1, 2, 6].

Fig. 1은 SKH51 소재로부터 가공한 반응고 상태로의 가열전의 초기 빌렛 형상과 반응고 성형으로 얻고자 하는 부품 형상의 모델을 보여주고 있다. 초기 빌렛의 크기는 직경 50 mm, 높이 50 mm의 단순 실린더 형상으로 쉽게 준비할 수 있는 형상이다. 빌렛의 중량은 789 g으로 측정되었다. 중량 측정은 반응고 성형품에서도 측정하여 원재료의 손실정도를 비교하기 위해 수행하였다.

성형하고자 하는 부품 형상의 모델링은 실험을 위해 단순하지만 반응고 금속의 성형 중 유동특성을 고려하면서 부위별 특성평가를 용이하게 할 수 있는 형상으로 선정하였다.

Fig. 2는 부품 모델링에 적합하게 제작한 금형을 나타내었다. 하부에 실린더 장치를 가지고 있는 수직식 프레스와 보조금형에 맞게 만들었으며 금형소재로는 SKD61을 사용하였다. 상부 금형에는 소재의 유동 방향으로 유동성 확보와 가공 제거를 위한 구조를 고려하여 설계하였다. 또한 직각면도 두어 소재의 충전성 정도를 판가름 할 수 있게 하였다. 하부 금형에는 소재가 주입되는 주입구($\Phi 50$)와 유동을 원활하게 하는 형상으로 만들었으며 상부 및 하부 금형

Fig. 2. Die set for semi-solid forming of SKH51.

Fig. 3. Whole tooling system for thixoforming.

의 고정을 위해 고정핀은 상부 금형에 홀은 하부 금형에 두었다. 그리고 수직방향 성형면은 원활한 성형품의 이형(ejecting)을 위해 1.5~3°의 빼기 구배를 주었다.

Fig. 3은 본 연구에 사용된 SKH51 부품의 반응고 성형에 필요한 프레스를 제외한 금형시스템 전체를 분해한 상태의 개념도를 나타내었다. 부품의 형상을 제조하는 금형과 금형의 상부지지대, SKH51 빌렛을 반응고 성형온도로 가열하기 위한 유도가열 코일박스, 상부의 금형으로 가열된 빌렛을 밀어 넣는 역할을 하는 하부 실린더(피스톤)으로 구성된다. 프레스는 금형을 지지하는데 사용하였고 성형 동력은 하부에 설치된 실린더(최대속도: 400 mm/s, 최대하중: 100톤)를 이용하였다.

세라믹팁(ceramic tip)은 소재의 유도가열시 하부 실린더가 유도 가열되는 것을 막고 소재로부터의 열

Fig. 4. Schematics of the heating, forming and ejecting process in the semi-solid state of SKH51.

전달을 차단하기 위해 사용하였다. 유도가열 코일은 직경 50 mm, 높이 50 mm의 SKH51 빌렛을 가열 하는데 적합한 크기로 제작되었으며 25 kW, 1 kHz의 사양을 가지는 고주파 유도가열기를 사용하였다.

Fig. 4에는 본 연구에 적용된 SKH51 빌렛의 반응고 성형 공정의 흐름을 단계별로 나타내었다. 1단계는 빌렛을 장착하기 전의 전체 금형 시스템을 나타낸다. 2단계에서 가열용 빌렛을 장착하고 3단계에서 금형과 빌렛을 가열한다. 금형가열 후 금형의 안쪽에는 흑연 윤활제를 뿌린다. 성형 직전의 금형온도는 300~400°C, 빌렛은 1300~1350°C로 가열하였다. 4단계에서 가열된 빌렛을 하부의 실린더가 아래에서 상부의 금형으로 고속(100 mm/s)으로 밀어 넣는 방법으로 성형이 수행된다. 충전은 고속으로 진행되나 충전후에 응고와 수축이 일어나는 시간 동안 하중이 가해진다. 충진을 위해 필요한 힘은 수 kN 정도이지만, 응고수축과정에 필요한 힘은 매우 크다. 부품의 형상에 따라 차이가 있지만 본 연구에서의 부품의 경우 약 20톤의 하중이 필요하였다. 5단계는 응고후 성형품의 이형(ejecting)단계이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SKH51의 반응고 성형 온도 조건

SKH51 소재를 이용한 반응고 성형을 위해서 적절한 성형온도는 성형에 필요한 빌렛이 압력이 가해지기 전에 가열이 진행되는 동안 흘러내리지 않고 형상을 유지할 수 있는 점도와 가열 및 성형 온도에서 입자의 형상이 구형으로 유지되어야 하고 입자크기의 급격한 변화가 없어야 한다. 적절한 성형온도 조건 조사를 위한 열분석(DSC)실험으로부터 SKH51

Fig. 5. Microstructures of SKH51 showing globular grains during heating in the mushy zone.

의 응고범위는 1233~1453°C로 얻어졌다[6].

Fig. 5에는 반응고 상태에서 가열온도에 따른 미세조직과 입자의 크기를 나타내었다. 1200°C에서의 조직은 원소재와 큰 변화가 없다. 1250°C는 고상선을 넘어서는 온도로 단조를 통해 균일한 구형의 입자가 형성된 후 입계가 액상이 된 전형적인 반응고 성형에 적합한 조직이 나타남을 볼 수 있다. 1250~1350°C에서 균일하지만 구형의 입자크기는 15~24 μm 범위에서 미소한 증가를 나타내고 있다. 입자크기의 증가에도 액상의 입계분포는 매우 균일하며 이는 반응고 성형을 위해 필요한 가장 중요한 조건이다. 예비실험을 통해 본 실험을 위한 적절한 온도는 1300~1350°C인 것으로 나타났으며 1350°C에서 양호한 부품 성형 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 성형품의 특성 분석

Fig. 6은 SKH51 빌렛과 반응고 성형된 시제품의 형상 사진이다. Fig. 2의 모델링과 같은 외관의 성형품이 얻어졌다. 단순한 형상에서 복잡한 최종 형상으로 1회에 정형에 가까운 성형이 가능함을 보여주고 있다. 빌렛의 중량은 782 g, 성형품의 중량은 582 g으로 소재 회수율은 73% 정도였다. 소재 손실의 이유로는 빌렛이 가열될 때 국부적인 과열로 인한 흘러내림과 빌렛이 반응고 상태에서 금형주입구로 들어가면서 상당량의 소재가 소모된 것으로 판단

Fig. 6. Initial billet and sample manufactured in the semi-solid state of SKH51.

Fig. 7. Schematic of a cross section of thixoformed sample.

되었다. 즉, 가열 및 주입 과정에서 주의를 기울인다면 약 90% 이상의 소재 회수율이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 반응고 성형품의 분석을 위한 관찰 및 측정 부위를 도식적으로 나타내었다. 성형품 사진에서 약 120도 간격으로 형성된 3개의 날개에서 한 부분의 단면이다. ①은 가스제거 및 결합포집을 위한 부분, 즉 에어벤트(air vent)이며, ②는 금속유동제어 부위, ③은 성형품의 중심부위, ④는 빌렛이 주입되는 위치이자 충전이 완료된 후 실린더의 압력이 마지막까지 가해지는 부위이다.

Fig. 8에는 Fig. 7에 표기된 부위에서의 SEM 미세조직을 나타내었다. 성형공정의 특성으로 볼 때 빌렛은 ④에서 주입이 시작되어 ③과 ②를 거쳐 ①까지 도달하여 공간을 채운 후에 응고과정을 겪게 된다. 즉, ①은 성형품에서 처음 응고되는 부위이자 압력에 의해 고체입자 사이에 존재하던 액상이 가장 많이 존재 할 것으로 추정되는 부위이다. SEM 미세조직에서 검은 부분은 반응고 가열 및 성형이 진행되는 동안 고체 상태를 유지하는 조직이며 상대적으로 밝게 나타나는 부위는 액상으로 존재하다가 응고된 조직이다. ②와 ③에서 고체부위는 반응고 성형이 진행되기 전의 구형의 입자형태를 유지하고 있으

Fig. 8. SEM micrographs of a sample at locations shown in Fig. 7.

Fig. 9. Measurements of liquid fraction by image analysis from the SEM micrographs shown in Fig. 7: ①=43.5%, ②=34.5%, ③=9.2%, ④=8.5%.

며, 입자크기의 변화는 거의 없는 반면에, 액상의 비율에는 약간의 변화가 관찰된다. ②에서는 액상의 비율이 증가했음이 뚜렷하며 ①에서는 액상의 비율이 다른 부위에 비해 가장 높음을 알 수 있다.

액상의 비율을 정량적으로 측정하기 위해 Fig. 8의 SEM 미세조직에 대한 이미지 분석을 하였으며 액상의 면적 비율을 측정한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 10. Typical SEM (BEI) micrographs of grain boundary region solidified from the liquid phase during semi-solid forming of SKH51.

구형의 검은색은 반응고 성형 도중에 고체 상태로 유지된 입자를 나타내며 밝은 색의 바탕은 액상의 존재 흔적이다. 미세조직에서 관찰한 것과 같이 ①에서는 액상의 비율이 43.5%로 매우 높았으며 ②에서도 약 34.5%로 높게 나타났다. 그러나 ③과 ④에서는 각각 9.2% 및 8.5% 수준인 것으로 나타났다. 반응고 성형품의 조직에서 액상의 비율은 보통 10~20% 범위에서 균일하게 분포된 것을 전제로 낮을수록 바람직하다. 따라서 ③과 ④는 이 요구조건에 근접한 결과를 나타내고 있는 반면에 ①과 ②는 부적합하다. ①은 결합포집을 위해 준비된 부위로 결국 제거되기 때문에 문제는 없지만 ②의 부위는 액상의 비율을 낮출 수 있도록 공정조건을 설정하는 것이 필요할 것으로 본 연구에서 나타났다. 즉, ①과 ②와 같은 부위의 형상 변화를 통해 액상의 비율을 우선적으로 조절하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 Fig. 7의 ③과 같은 SKH51의 표준 반응고 성형 조직에서 반응고 가열 및 성형이 이루어지는 동안 고체 상태를 유지하는 입자 사이에 액상으로 존재하다가 응고된 부분을 SEM(BE: Backscattered Electron Image)으로 관찰한 미세조직을 아타내었다. EDS 분석에 의하면 백색 상으로 나타나는 A와 B는 Mo과 W이 주를 이루는 탄화물(M_6C)이며, C와 D는 어두운 회색으로 BEI에서 나타나고 V이 많은 탄화물(MC)로 판단된다.

Fig. 11. XRD profiles of SKH51: ① as received, ② semi-solid formed, ③ solution treated after semi-solid forming.

Fig. 12. Hardness measurements on the cross section of a SKH51 sample.

M_6C 는 반응고 성형 중에 액상으로 존재하다가 입계에서 응고하면서 층상(lamella) 응고된 부분에 해당되며 MC는 M_6C 보다는 작은 입자형태로 주로 존재한다[7, 8]. 이와 같은 탄화물의 생성은 SKH51의 상태도에서 쉽게 확인할 수 있으며 또한 본 연구에서 수행한 Fig. 11의 XRD 분석 결과에서도 확인할 수 있었다.

Fig. 12에는 SKH51 반응고 성형품의 단면부에서 측정된 경도값을 측정부위에 따라 나타내었다. 경도 측정은 비커스 경도계를 사용하였고 하중 1 kg과 10 초의 압축시간을 주었다. 얻어진 비커스 경도값은 경

도환산표를 이용하여 HRC로 환산되어 표시하였다. 각 측정 부위에서 적어도 3번의 측정 후에 평균값으로 구하였다. 단면의 ⑧에서 가장 높은 경도를 나타내었고 ⑪에서 가장 낮은 경도 값을 나타내었다. 전체적으로 고른 경도 값을 나타내었고 평균 경도는 HRC 64이었다. 비교적 균일한 경도값을 나타내고 있다. 주로 액상이 충전되어 응고한 부분(⑩, ⑪)의 경도값이 다른 부위보다 낮은 이유는 원소재에 미세하게 분포하고 있던 탄화물이 액상에 완전히 고용된 후 재석출하는 과정에서 조대한 탄화물로 석출됨으로서 경도의 저하를 가져왔기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

SKH51 고속도공구강에 반응고 성형기술을 적용하여 형상이 복잡한 부품으로 1회의 성형으로 최종 형상에 가깝게 결함이 없는 상태로 제조할 수 있었다. 본 연구에서 적용된 부품의 형상과 부피에 대해 필요한 소재, 금형시스템, 성형공정 조건이 도출되었고 성형품의 특성에 심각한 영향을 끼치는 성형 결함의 발생을 억제할 수 있었으며 비교적 균일한 내부의 미세조직을 얻을 수 있었다. 성형용 소재인 빌렛의 가열을 위한 적절한 고액 공존 온도 범위는 1300~1350°C, 금형의 예열 온도는 300~400°C, 성형을 주입속도는 100 mm/s, 성형후 응고 과정에서 수축 결함을 방지하기 위한 추가적인 가압이 필요했다. 반응고 성형품에서의 단면 부위별 경도 값은 HRC 기준으로 62~67의 범위에서 분포한 것으로

성형품 상태에서는 양호한 것으로 판단되었다. 경도 값과 미세조직은 연관성을 나타낸 것으로 판단되며 고온에서의 반응고 성형에도 불구하고 미세조직의 조대화는 관찰되지 않았다. 본 연구를 통해 SKH51 소재에 반응고 성형을 적용하여 형상이 복잡한 부품을 제조하는 것에는 기술적으로 충분히 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다.

References

1. P. Kapranos, D. H. Kirkwood and C. M. Sellars : Journal De Physique IV, **3** (1993) 835.
2. A. Alfian, M. Z. Omar, J. Syarif and Z. Sajuri : J. of Applied Sciences, **10**(13) (2010) 1255.
3. R. Kopp, J. Kallweit, T. Moeller and I. Seidl : J. of Mat. Proc. Tech., **130-131** (2002) 562.
4. A. Rassili and H. V. Atkinson : Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **20** (2010) 1048.
5. K. Y. Sohn, D. W. Suh and S. Y. Lee : Mat. Sci. Forum, **449-452** (2004) 685.
6. S. Y. Lee : J. of Korean Society for Heat Treatment, **35**(3) (2012) 126.
7. Z. Y. Liu, N. H. Loh, K. A. Khor and S. B. Tor : Mat. Sci. & Eng., **A293** (2000) 46.
8. B. Amin-Ahmadi and H. Aashuri : J. of Mat. Proc. Tech., **210** (2010) 1632.