

초내열 합금 Inconel 718 열간 헤딩 공정에서의 조직 및 기계적 특성 변화

최홍석[†], 고대철* · 김병민**

Variation of microstructures and mechanical properties of hot heading process of super heat resisting alloy Inconel 718

Choi Hong seok, Ko Dae chul, Kim Byung min

Key Words: Inconel 718(Inconel 718), Heat resisting super alloy(초내열 합금), Hot forging(열간단조), Micro structure(미세 조직), Heading(헤딩)

Abstract

Metal forming is the process changing shapes and mechanical properties of the workpiece without initial material reduction through plastic deformation. Above all, because of hot working carried out above recrystallization temperature can be generated large deformation with one blow, it can produce with forging complicated parts or heat resisting super alloy such as Inconel 718 has the worst forgeability. In this paper, we established optimal variation of hot heading process of the Inconel 718 used in heat resisting component and evaluated mechanical properties hot worked product. Die material is SKD61 and initial temperature is 300°C. Initial billet temperature and punch velocity changed, relatively. Friction coefficient is 0.3 as lubricated condition of hot working. CAE is carried out using DEFORM software before making the tryout part, and it is manufactured 150 ton screw press with optimal condition. It is known that forming load was decreased according to decreasing punch velocity.

1. 서론

Inconel 718(이하 Alloy 718)은 고온에서 우수한 기계적 특성을 발휘하는 Ni기지의 초내열 합금이다. Alloy 718은 여러 가공 방식을 통하여 항공기 및 발전기용 터빈 부품으로 많이 사용되고 있다. 그 중에서도, 고온에서의 내구성, 특히 고온 피로 특성의 우수함으로 인하여 열간 단조 공정으로 Alloy 718 소재를 성형하는 경우가 많다.¹⁾²⁾

Alloy 718 합금의 고온 기계적 성질에 영향을 미치는 내부의 상(Phase)으로는 기지 조직 γ 및

γ' , δ 상이 있다. γ 상은 합금의 연성 및 내식성에 영향을 미치며, γ' 상은 합금 내에 5% 가량 존재하며 Ti, Nb를 함유하는 구상의 석출물이다. δ 상은 합금의 연성 및 강도에 영향을 미치며 결정립계를 따라 분포하는 침상의 석출물이다. 이 δ 상은 열간 단조 시 구상화됨으로써 고온 피로 특성을 향상시킨다는 보고가 있다.³⁾

하지만 열간 단조 공정으로 제품을 성형함에 있어 그 공정 변수, 예를 들면 초기 빌렛 온도 등에 따라 성형성이 급격하게 변화되고, 고온 피로 수명을 저하시키는 입계의 δ 상이 잔존하는 등, 상당한 주의가 요구된다.⁴⁾

초내열합금 Alloy 718의 고온 인장 강도, 피로 강도를 얻기 위해 단조 과정 시에 발생하는 동적 재결정을 효과적으로 이용해야 되는 것이 많은 연구를 통해 밝혀지고 있으며, 결정립 미세화를 위한 δ 상 또한 적절히 제어되어야 한다고 할 수 있다. 하지만 단조 시 변화되는 미세 조직 변화를 예측하는 것 및 다수의 공정 변수에 맞추어

[†] 비회원, 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail : floccinau@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3074 FAX : (051)581-3075

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 부산대학교 정밀기계공학과

실제 제품의 변화를 예측한다는 것은 실제로 어려운 일이다.

여기서 우리는 Alloy 718의 열간 헤딩 공정 시에 일어나는 볼트 머리부의 미세 조직 변화 및 경도 차이를 CAE를 통한 변형률 및 빌렛 온도 등과 관련하여 해석하고, 헤딩 공정의 모델링을 위해 최적 조건을 설정하고자 한다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 시험편 분석

초기 소재 및 단조 후의 소재의 결정립 분포를 관찰하기 위하여 광학 현미경을 이용하였으며, 촬영에 앞서 시편 커팅 및 경면 연마 후, 35% H₂O₂, HCl, H₂O를 1:2:3의 비율로 섞어 약 2분간 침적하여 에칭하였다. 경도 측정에는 마이크로 비커스 경도 측정기를 이용하여 하중 200g, 휴지 시간 10초로 하여 동일 부위 5곳의 평균치를 측정하였다.

2.2 CAE 해석 조건

금형 상에서 Inconel 소재의 최적 성형성 및 온도 조건 등을 선정하기 위해 DEFOEM 2D 소프트웨어를 사용하여 선행 시뮬레이션을 수행하였다. 변수로는 펀치 속도 및 초기 빌렛 온도이며 각각 400mm/s, 600mm/s, 800mm/s 및 1050℃, 1100℃, 1150℃이다. 금형 온도는 300℃로 일정하게 적용하였으며, 그 외에 열용량 및 열전도계수는 DEFORM 소프트웨어 상에 코딩되어 있는 값을 적용하였다. 한편 마찰상수(m)는 일반적인 열간 윤활 조건으로써 0.3을 적용하였다.

2.3 헤딩 공정

CAE 상으로 선정된 조건으로 Fig. 1과 같은 150ton 스크류 프레스로 제품을 제작하였다. 빌렛을 프레스에 로딩하기 전 빌렛 초기 온도를 맞추기 위해 고주파 열처리로 일정 시간 가열하였다. 빌렛을 헤딩한 후, 광학 현미경으로 조직 분석 및 부위별 경도 측정을 통하여 Alloy 718의 헤딩 공정 시의 특성 변화를 관찰해보는 것으로 한다.



Fig. 1 150ton screw press used in experiment of the hot heading process.

3. 결과 및 고찰

3.1 원소재 분석

열간 헤딩 공정에 사용된 Alloy 718 합금의 합금 조성을 Table 1에 나타낸다. Fe 및 Cr이 18% 가량 함유되어 있고, Nb 및 Ti이 각각 5%, 1%정도이다. 나머지 기지 성분은 Ni되어 있다.

Table 1 Chemical composition of alloy 718(Wt%)

Element	Wt(%)	Element	Wt(%)
Fe	18.20	Mn	0.07
Cr	17.76	Al	0.42
Si	0.07	Ti	1.02
Mo	3.00	Nb	5.21
Co	0.35	Ta	
C	<0.02	Ni	Bal.

Fig. 2에 초기 소재, 즉 용체화 처리 후 소재의 광학 현미경 조직 사진을 나타내며 Fig. 3에는 각각의 상(phase)에 대한 SEM 촬영 사진 및 EDX 분석을 나타낸다. 분석 결과 γ 기지에 미세한 γ' 및 침상의 δ 상이 결정립계를 따라 분포하고 있음을 알 수 있다. 한편 EDX 분석에서 Nb 성분이 주로 나타나는 상이 나타났는데 이는 NbC로써 γ 상과 합금화되어 있는 성분이다.

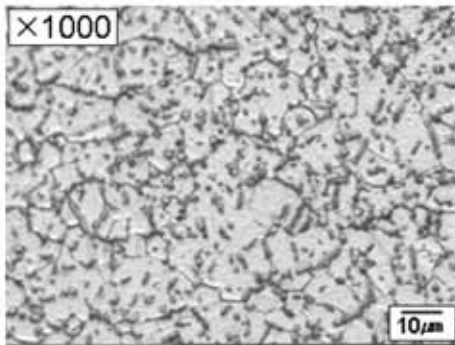


Fig. 2 The microstructure of initial Alloy 718(after solution heat treatment)

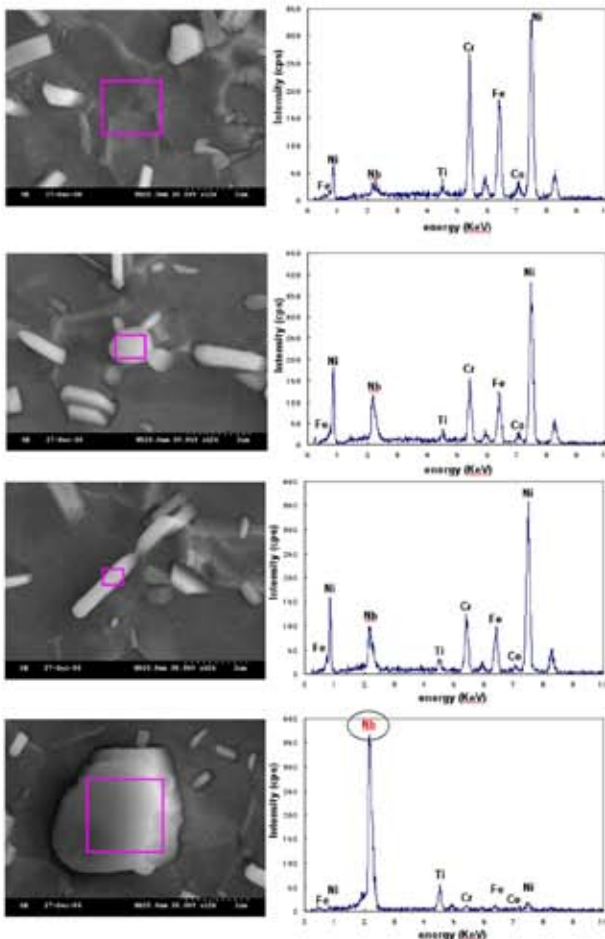


Fig. 3 Microstructure of each phase and element distribution.(×5,000)

3.2 CAE 해석 결과 및 고찰

Fig. 4(a)에 본 열간 헤딩에 사용된 금형의 헤딩부 단면을 나타내며 Fig. 4(b)에는 시뮬레이션 초기 격자 및 배치도를 나타낸다. 초기 빌렛의

크기는 성형량 및 코너부 filling을 감안하여 31.5mm×311mm로 결정하였으며 요소는 2000개로 하여 축대칭 모델로서 성형해석을 수행하였다. 성형 해석을 통하여 가장 펀치 하중이 적고, 성형성이 양호한 조건을 이용하여 실제 제품의 성형에 들어갔다.

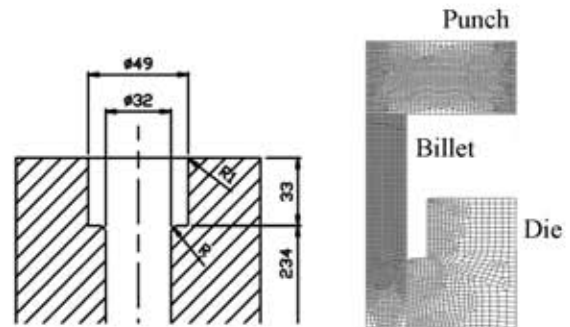


Fig. 4(a) Schematic of hot heading die(left)
4(b) FEM meshes for heading process(right)

Table 2에 빌렛 온도, 성형 속도에 따른 유동응력의 분포를 나타낸다. 초기 빌렛 온도가 높을수록 유동 응력이 감소하고 있는 것을 알 수 있으며, 펀치의 속도가 빠를수록 대체적으로 응력은 감소하는 경향을 보였다. 이것은 초기 빌렛 온도의 증가 및 펀치 속도에 따라 재질이 연화되어 성형에 필요한 하중이 줄어드는 것으로 생각할 수 있다. Fig. 5에 성형 후의 소재의 최대 유효응력값의 그래프를 나타낸다.

Table 3에 초기 빌렛 온도 및 성형 속도에 따른 변형률 분포를 나타낸다. 표에서 나타낸 바와 같이, 동일 온도 상에서 변형률 분포가 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있고, 펀치 속도에 따라서는 약간의 차이가 발생하였다. 이것은 펀치의 속도가 빨라지면, 상대적으로 변형률 속도가 증가기 때문이다.

Fig. 6에 위 성형 조건에 따른 펀치의 하중을 그래프로 나타낸다. 앞서 서술한 바와 같이 소재의 유동응력이 줄어들어 따라 펀치에 걸리는 하중 또한 낮아짐을 알 수 있고, 이것은 곧 금형의 수명에도 관계가 있을 것으로 사료된다. 단, 초기 빌렛의 온도를 너무 올려버리면 헤딩이 아닌 보다 가혹한 변형을 받는 공정에서 성형 중 소재가 용융되어 용탕상태에 이를 수도 있기 때문에 주의가 필요하리라 판단된다. 여기서 우리는 최적의 헤딩 공정 조건으로써, 펀치의 하중이

Table 2 Effective stress distribution during heading process.

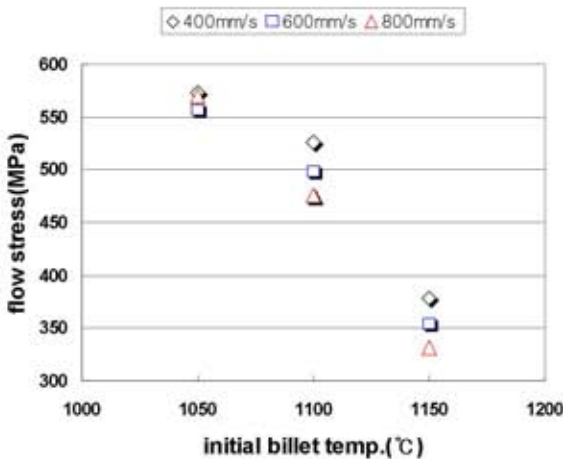
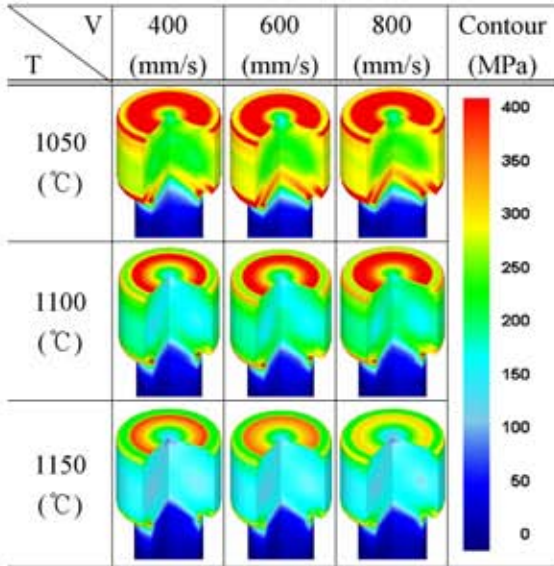


Fig. 5 Flow stress distribution according to each heading condition

약 128 ton가량으로 가장 적게 나타난 펀치 속도 600mm/s, 초기 빌렛 온도 1150°C의 조건으로 Alloy 718의 열간 헤딩을 수행하여 각 부위별 조직을 비교하고 경도 분포를 검토하였다.

Fig. 7에 열간 성형된 소재의 헤딩부 단면 사진을 부위별로 예칭하여 나타낸다. 예칭의 정도는 변형률의 분포와 비슷한 양상을 나타내고 있었는데, 이는 성형된 소재의 기계적, 화학적 특성이 변형률의 분포에 의존한다고 할 수 있다. 변형률이 큰 부위일수록 내부 결정 조직이 미세화되어 부식성이 향상된 것을 알 수 있으며, 1, 7번 부위와 같이 상대적으로 변형률이 작은 구간에서는

Table 3 Effective strain distribution during heading process.

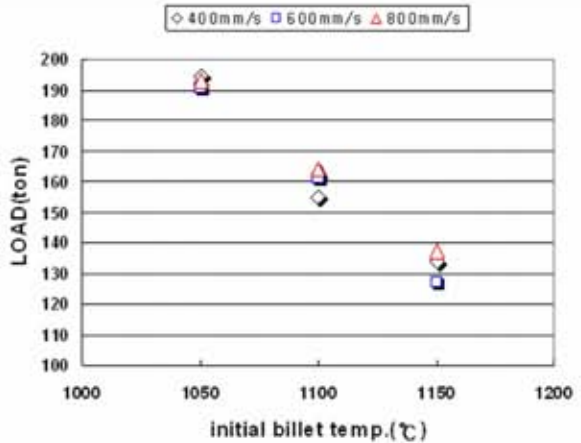
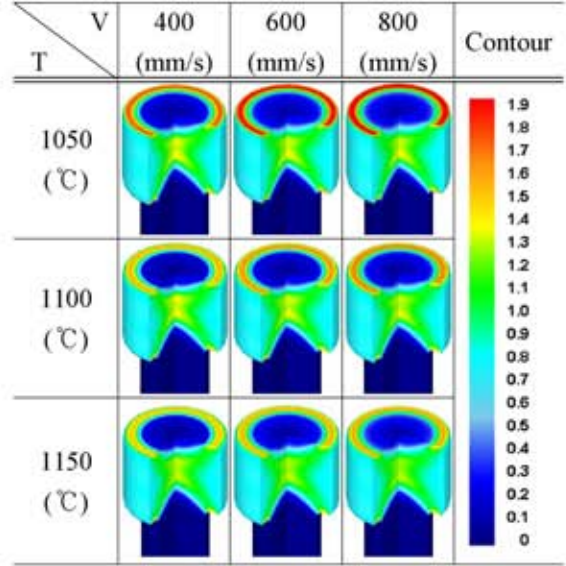


Fig. 6 Punch load distribution according to each heading condition

결정립계가 선명하게 보였고 결정립 또한 다른 구간에 비해 커진 것을 알 수 있다. 이것은 변형률이 적기 때문에 열간 성형 시 일어나는 재결정 온도 이상에서 동적인 효과보다는 온도에 따른 결정립 성장이 일어났기 때문으로 생각된다. 한편, 7번 부위에는 부분 재결정으로 인하여 큰 결정립의 결정립계에 미세한 결정립이 혼재되어 있으며, 이는 변형률 증가에 따른 동적 재결정 효과가 대부분 영향을 미친 것으로 사료된다.

Table 4는 헤딩부의 부위별 경도 측정값을 나타낸다. 결정 구조와는 다르게 경도 분포는 전체적으로 HV 500전후로 나타나고 있으며, 원래 소

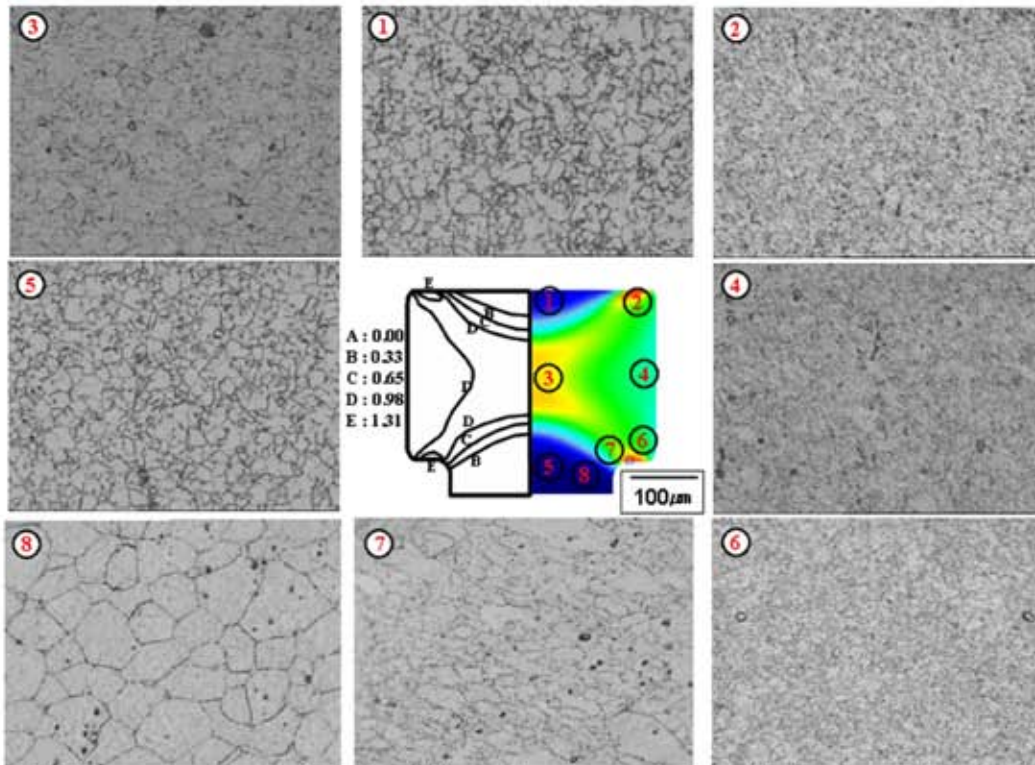


Fig. 7 Microstructure observed at the different locations and strain distribution of forged Alloy 718

Table 4 Hardness distribution of the each location

location	1	2	3	4	5	6	7
HV	496	514	497	503	490	517	527

재의 경도보다 약 HV 50 이상 증가하였다. 이것은 열간 성형 시 발생하는 재결정으로 인한 결정립 변화 및 입내 석출물의 영향으로 생각된다. 성형부의 코너부에 발생하는 necklace 형태의 결정립 혼재 구간에서는 성형의 과속함 및 변형률 속도의 증가로 인하여 경도가 증가된 것으로 사료된다. 따라서, 변형률의 분포가 Alloy 718 열간 성형 시 재결정의 관점에서 볼 때, 경도 등의 기계적 특성 및 내부 석출물 등에서 부식성 등의 화학적 성질에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났으며, 온도 및 변형률 분포를 적절히 조절함으로써 제품의 특성을 변화시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

1. Alloy 718의 헤딩 공정을 유한요소해석을 통해 일치시키고 조직 변화를 관찰하였다.
2. 초기 소재의 조직에서 침상의 δ 조직이 결

정립계를 따라 분포하고 있음을 알 수 있으며, 미세한 γ' , γ'' 가 결정립 내로 석출되어 있다.

3. CAE를 통한 Alloy 718의 헤딩 공정에서 펀치 속도 600mm/s 및 초기 빌렛 온도 1150°C에서 가장 성형 하중이 낮게 나타났다.

4. 헤딩 공정 시, 성형하중은 온도의 증가 및 변형률 속도의 증가에 따라 감소하지만, 적절한 조절을 통해 최적의 성형 조건을 찾는 것이 중요하다.

5. 헤딩부의 미세 조직은 변형률의 분포에 의존성이 있으며 각 부위의 조직은 변형률뿐만 아니라, 정적 및 동적 재결정의 측면에서 볼 때, 많은 차이를 보이고 있다.

6. 각 부위별 경도 분포에서, 변형률이 큰 부분일수록 경도값이 상승하는 것으로 나타났으며, 이는 변형률이 증가함에 따른 재결정의 영향으로 판단된다.

7. 향후, SEM 및 EDX를 통한 조직 분석을 통한 미세 상의 구조 분석 및 Alloy 718의 Creep 시험을 통하여 변형률이 기계적 성질에 미치는 영향을 연구할 것이다.

후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) H.L.Eiselstein, 1965, ASTM STP, 65, pp. 369
- 2) J.F.Barker, D.R.Chang, 1985, "Thermomechanical processing of Inconel 718 and Its effect on properties in advanced high temperature alloys", ASM, pp.125
- 3) J.M.Oblak, D.F.Paulonis and D.S.Duvall, 1969, J. of Metals, pp.34
- 4) I.S.Kim, 1999, "Dynamic and Meta-Dynamic Recrystallization behavior of Alloy718 during high temperature deformation" J, Kor. Inst. Met. & Mater. Vol.37, No.10, pp. 1198~1203.