

# Cast alloy 718 의 고온압축시 동적/정적재결정에 대한 연구

김남용<sup>1</sup>, 김정한<sup>2</sup>, 염종택<sup>2</sup>, 박노광<sup>2</sup>, 윤종원<sup>1</sup>

## Study about dynamic/static recrystallization during hot compression of Cast alloy 718

Nam Yong Kim<sup>1</sup>, Jeoung Han Kim<sup>2</sup>, Jong Taek Yeom<sup>2</sup>, Nho Kwang Park<sup>2</sup>, Jong Won Yoon<sup>3</sup>

### Abstract

Behavior of dynamic/static recrystallization during hot deformation of Cast alloy 718 was investigated. For this purpose, hot compression test and FE-simulation were conducted via Thermecmaster-Z and DEFORM-3D, respectively. The microstructural evolution during hot compression and post heat-treatment was investigated and deformation mechanism were analyzed by stress-strain curve, FE-simulation and microstructure. FE-simulation results show that the temperature difference between top-die and billet has considerable influence on the final shape of compressed specimen. The relation between applied load and processing time was predicted by the FE-simulation.

**Key Words :** Hot compression, Cast alloy 718, Finite element method, Dynamic recrystallization, Static recrystallization

### 1. 서 론

초내열합금 Alloy 718 은 Ni-Cr-Fe 기 합금조성에 Nb, Mo, Al 및 Ti 가 첨가되어 각 원소합금에 의한 고용 및 시효경화 효과를 극대화하여 고온에서의 기계적 특성을 개선한 합금으로써, 다른 초내열합금(예, Waspaloy)에 비하여 단조 성형성이 뛰어나 항공기 혹은 산업용의 가스 터빈 엔진 부품으로 가장 널리 사용되고 있는 합금 중에 하나이다[1].

열간단조의 경우 고온에서 빠른 변형율 속도(?)로 진행되기 때문에 온간단조 혹은 냉간단조에 비하여 조직의 변화가 심하게 발생되며, 조직관리를 통하여 단조품의 특성을 최적화하기 위해서는 고온 변형시 Alloy 718 의 조직변화를 예측하는 것이 선행되어야 한다[2,3].

Alloy 718 의 단조시 일어나는 미세조직, 결정립 크기의 변화는 단조시 혹은 단조 후에 일어나는 동적, 정적재결정과 관계가 깊다. 특히 Alloy 718

은 결정립 크기에 따라 그 기계적 성질이 매우 크게 변하기 때문에 소성 변형중 혹은 후열처리 시 일어나는 결정립 크기 변화를 예측하는 것은 매우 중요하다[4,5].

이전 연구자 S.C. Medeiros 와 Sebastien Coste 의 실험은 wrought 재료로 고온 압축시  $\delta$ 상이 재결정에 미치는 영향과 재결정의 거동을 연구하였다.[6,7]

본 연구는 잉곳 상태에서 최적의 Cogging 을 실제로 연구하기 위해 고온 압축시험을 통해 고온 성형시 변형율 속도, 온도, 변형율 및 고온유지시간에 따른 Alloy 718 의 미세조직변화를 고찰하고, 이러한 공정변수들의 영향에 따른 재결정 분율 및 결정립 크기 변화의 결과를 토대로 DEFORM-3D 를 이용한 유한요소해석을 통해 단조공정 중의 미세조직을 예측하였다.

이런 미세조직의 고찰로 고온 압축시 최적의 공정조건을 도출하였다.

1. 동의대학교, 신소재공학과

2. 한국기계연구원, 재료기술연구소/소재성형센터

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 초내열합금 Alloy 718 로 화학 조성은 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition of alloy 718 used in this work (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe	V
0.046	0.1	0.060	0.006	0.002	19.2	2.8	17.7	0.075
W	Cu	Al	Co	Nb+Ta	Ti	Zr	B	Ni
0.06	0.03	0.62	0.22	5.6	1.1	0.05	0.04	Bal.

소재의 미세구조 변화를 평가하기 위해 Fig. 1 의 열간가공재현시험기(Thermecmaster Z)를 사용하여 고온압축 실험을 수행하였다. 시편은 직경 8mm, 높이 12mm 의 원통형 시편을 사용하였고 Alloy 718 잉곳의 주상정 위치에서 길이방향으로 가공되었다. 시험 온도는 1000℃, 1050℃, 1100℃, 1150℃이였으며 변형율 속도는 10/sec, 10<sup>-1</sup>/sec 이었다. 변형 후 시편들은 급속 냉각되었으며 압축 축에 평행으로 절단하여 미세조직을 관찰하였다.

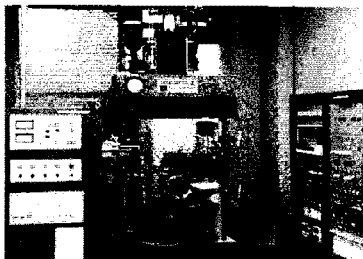


Fig. 1 Thermecmaster Z

고온압축시험은 동적재결정 관찰을 위해 수행하였고, 압축 후 정적재결정 관찰을 위해 압축 조건에 따라 1050℃, 1100℃, 1150℃에서 각각 100sec, 10min, 30min 의 유지시간을 두었다.

고온압축 시험후 미세구조를 예측하기 위해 동적/정적재결정 분율과 결정립 크기의 결과를 토대로 하여 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석의 결과로 고온 압축시 시료의 각 부위에 변형율을 알아내어 변형율에 따른 미세구조의 변화를 관찰하였다.

압축시험결과를 기준으로 실제 Cogging 공정을 수행하였다.

## 3. 결과 및 방법

### 3.1 고온 압축 실험과 유한요소해석을 통한 압축 공정

Fig. 2 은 고온 압축 실험 후 얻어진 실험 결과를 보여주고 있다. 각 변형율 속도에서 얻어진 stress-strain 곡선들은 10<sup>-1</sup>/sec, 10/sec 조건에서 비교적 큰 유동이 없었고 변형율 0.5 에서 대부분 안정상태(steady state)의 거동을 보여주었다.

유동응력과 변형율은 온도가 감소하고 변형율 속도가 증가할수록 증가한다. 또한 유동연화 현상은 낮은 변형율 속도에서 두드러지게 나타난다.

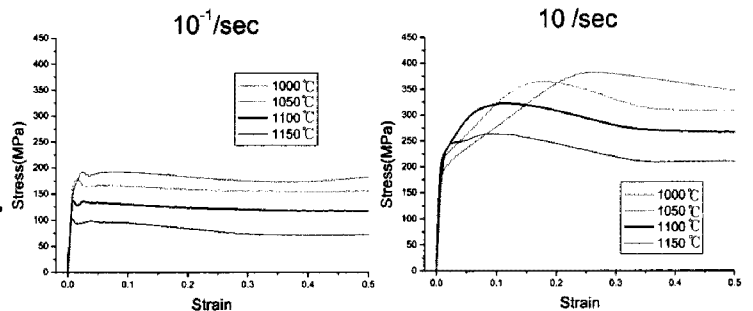


Fig. 2 Ture stress-ture strain curves obtained from compression tests at various test condition.

고온 변형후 동적재결정 분율과 결정립 크기 변화를 확인을 위해 시편의 미세조직을 관찰하였다.

조직 관찰 지역은 마찰로 인한 dead zone 을 피하여 시편의 정중앙(center), 시편의 길이방향으로 1/3 지점(middle) 그리고 시편의 최외곽 지역(end) 이었다(Fig. 4). 변형 후의 대표적인 조직이 Fig. 3 에 제시되어있다.

1000℃, 10/sec 에서 압축된 조직을 보면 동적재결정이 거의 일어나지 않았는데 stress-strain curve 에서는 동적재결정이 일어나는 curve 형태를 보이고 있다. 이는 10/sec 조건으로 압축시 10<sup>-1</sup>/sec 에서 압축시 보다 훨씬 빠른 속도로 압축되면서 압축에 의한 내부 변형열이 발생된다. 이 변형열이 외부의 의해 낮아지는 시간이 충분하지 않기 때문에 변형열에 의한 유동연화가 일어나는 것으로 판단된다.

시편 최외곽 부위는 시편 정중앙과 1/3 지점 관찰 부위보다 비교적 재결정분율이 적다. 이는 최외곽 부위가 압축시 온도변화가 크고 변형율이 낮아서 재결정 매커니즘이 낮아지기 때문으로 판단된다.

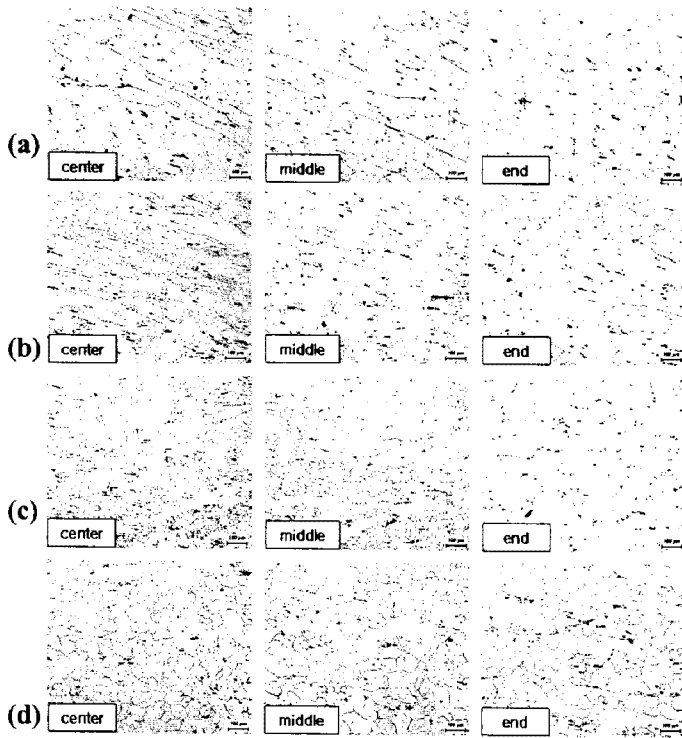


Fig. 3 Microstructures of Alloy 718 specimen deformed (a) at 1000°C and 10/sec, (b) at 1050°C and 10/sec, (c) at 1100°C and 10/sec, (d) at 1150°C and 10/sec. The compression axis is horizontal.

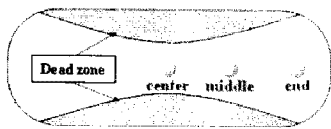


Fig. 4 Specimen observation region.

Fig. 6 에 보이듯 고온 압축후 후열처리는 재결정 분율을 상승시키는데 큰 영향이 있다. 또한 고온 압축후 잔여 전위 에너지는 후열처리시 정적재결정의 매커니즘으로 작용하여 결정립 미세화에 기여를 한다. 하지만 후열처리 온도가 1050°C 이상으로 증가하면 상의 고용으로 결정립 성장이 이루어진다.

최적의 고온압축공정 선정조건은 먼저 미세한 결정립 크기와 균일한 재결정 분율, 재현성의 정도이다. Fig. 6 은 1100°C, 10/sec 조건으로 압축 후 1050°C, 1100°C, 1150°C로 후열처리시 관찰된 미세조직이다. Fig. 6 (a), (b), (c)는 각각 재결정분율은 100%이지만 결정립 크기가 (b), (c)는 100 μm, 138 μm로 성장되므로 36 μm의 결정립 크기를 가지는 (a)의 조건이 최적의 공정이라고 판단된다.

Fig. 2 의 자료를 바탕으로 압축공정의 유한요소 해석을 수행하였다. 온도조건은 등은 조건으로 설정하여 하였고 그 외의 공정조건들은 Table 2 에 정리되어 있다.

Fig. 5 에서 관찰부위에 따른 변형율과 온도를 나타내었다. 변형율의 차이로 Fig. 3 에서 관찰부위별로 재결정 분율이 다른 것을 설명할 수 있다. 정중앙(center)의 변형율이 1.17 이고 1/3 지점(middle)은 1.13, 최외각(end)는 1.08 로 변형율이 높을수록 재결정 분율이 높았다.

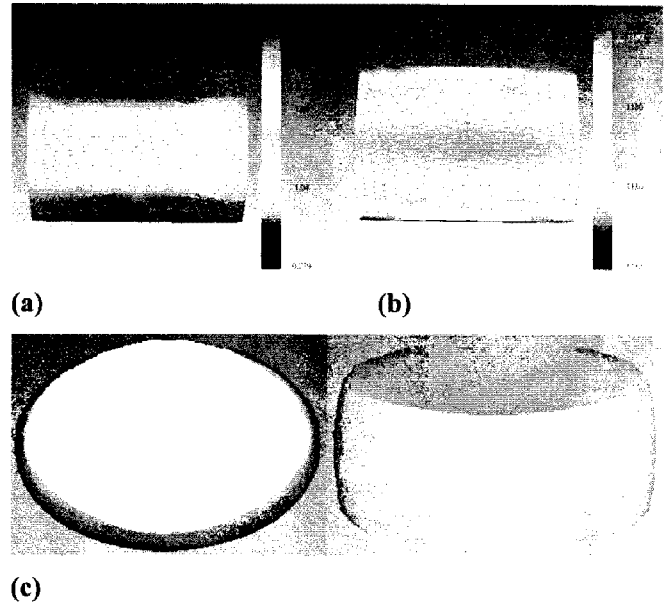


Fig. 5 FE-simulation results for Alloy 718 compression with specimen temperature of 1150°C and die temperature of 1150°C.

(a) Strain of observation region, (b) Temperature of observation region, (c) Hot compression form.

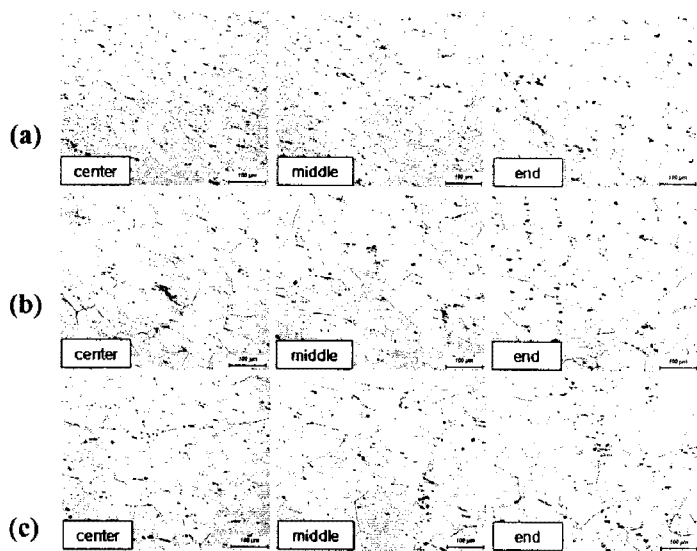


Fig. 6 Microstructures of Alloy 718 specimen deformed at 1100°C and 10/sec then, (a) heat

treatment 1050°C and 30min, (b) heat treatment 1100°C and 30min, (c) heat treatment 1150°C and 30min. The compression axis is horizontal.

Table 2 Process parameters and conditions

Process parameter	Condition
Inner diameter of container	50mm
Initial temp. of billet	1000, 1050, 1100, 1150°C
Initial temp. of die & land	1000, 1050, 1100, 1150°C
Temp. of environment	22°C
Strain rate	10 <sup>-1</sup> /sec, 10/sec
Friction factor (m)	0.3

Fig. 5 (c)은 압축형상은 항복함수타입을 Hill's quadratic(R value) 바탕으로 하여 X, Y, 45 도 방향으로 0.8, 4.5, 1.2 비율로 시험을 수행하였다.

### 3.2 최적의 Cogging 공정

압축시험과 유한요소해석을 통한 최적의 공정조건(1100°C, 10/sec 압축후 1050°C, 30min 후열처리)을 실제 Cogging 공정에 도입하였다.

Fig. 7 은 Cogging 후 압축전과 압축후 미세조직을 비교하였다.

잉곳 상태에서 압축한 시편보다 Cogging 후 (wrought specimen) 압축한 시편이 결정립 크기가 20 µm 정도 더 미세함을 알 수 있었다.

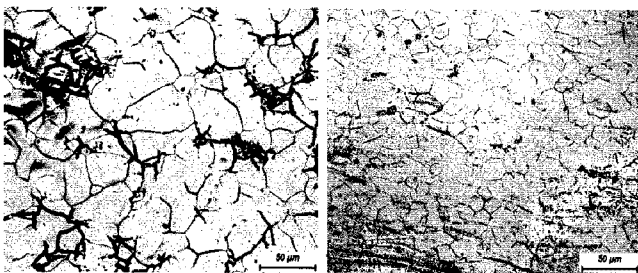


Fig. 7 Microstructures of Alloy 718 after Cogging (a) before hot compression, (b) compressed at 1100°C and 10/sec.

## 4. 결론

Cast alloy 718 합금의 고온압축에 미치는 공정조건을 분석하여 최적의 공정조건을 도출하였다. 이를 위해 압축시험과 유한요소해석을 수행하였다. 압축시험과 후열처리의 결과를 바탕으로 주

변형기구가 동적재결정과 정적재결정을 확인하였다. stress-strain curve 에서 변형을 속도가 증가하고 온도가 감소할수록 유동응력이 증가하였다. 1000°C, 10/sec 의 stress-strain curve 에서 미세조직에서는 보이지 않는 동적재결정은 내부 변형열의한 유동연화의 결과로 판단된다. 정적재결정은 압축후 잔여 전위에너지의 의해 재결정 분율을 증가와 결정립 크기 미세화가 일어나므로 최적의 압축공정에서 후열처리는 매우 중요하다. 후열처리 온도가 1050°C 보다 1100°C, 1150°C 에서 재결정된 결정립 크기가 증가하였다. 이는 1050°C 이상에서 δ상의 고용 때문으로 판단된다. 유한요소해석의 결과로 변형율이 높을수록 재결정 분율이 증가함을 알 수 있었다. 또한 조직 관찰 부위에서 외곽부위가 중심부위보다 동적재결정이 현저함을 알 수 있었다. 이는 변형율의 차이 때문이라고 판단된다.

최적 공정조건에 의한 Cogging 공정 후 압축시험한 시료는 잉곳에서 압축 시험한 시료보다 20 µm 정도 결정립 크기가 감소하였다.

## 후기

이 과제는 산업자원부의 민군겸용기술개발 사업의 일환으로 이루어 졌으므로 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

- [1] J.F. Radavich, E.A. Loria (Eds.), Superalloy 718, TMS, 1989, pp. 229.
- [2] G. Shen, J. Rollins, D. Furrer, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International symposium on Superalloys, TMS, 1996, pp. 613.
- [3] D. Zhao, P.K. Chaudhury, in: E.A. Loria (Eds.), Proceedings of the International symposium on Superalloy 718,625,706 and Various Derivatives, TMS, 1994, pp. 303.
- [4] W. Roberts, H. Boden, B. Ahlblom, Met. Sci., Vol. 3, 1979, pp. 195.
- [5] M.J. Luton, C.M. Sellars, Acta Metall, Vol 26, 1978, pp. 801.
- [6] S.C. Medeiros, Y.V.R.K. Prasad, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 293, 2000, pp. 198-207.
- [7] Sebastien Coste, Eric Andrieu, Mater. Sic. Eng. A, Vol. 396, 2005, pp. 92-98.