

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 VI

Inconel 718 합금의 시효열처리가 기계적 성질에 미치는 영향

Effect of Aging Heat Treatment on the Mechanical Properties in Inconel 718 Alloy

강희재¹, 김정민¹, 지성환², 성지현³, 김영희⁴, 성장현^{4,✉}, 전언찬⁴
Hee Jae Kang¹, Jung Min Kim¹, Sung Hwan Jee², Jie Hyun Sung³, Young Hee Kim⁴,
Jang Hyun Sung^{4,✉}, and Eon Chan Jeon⁴

1 동아대학교 금속공학과 (Department of Metallurgical Engineering, Dong-A Univ.)

2 동아대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.)

3 대구기계부품연구원 (Mechatronics and Materials Institute, Daegu)

4 동아대학교 클러스터사업단 (Regional Technology Innovation Center, Dong-A Univ.)

✉ Corresponding author: jhsung@dau.ac.kr, Tel: +82-51-200-7751

Manuscript received: 2013.1.4 / Accepted: 2013.1.8

Inconel 718 super alloy was aging heat treated at the temperature range from 675°C to 785°C for 5~40 hours after solution annealing at 1025°C for 1 hour. The aging treated specimens were investigated microstructure, mechanical properties and thermal expansion/contraction. Precipitates appeared for a long time aging treatment were niobium carbide and also γ' phase. For the aging treatment time of 10 hours, the changes in strength and hardness with increasing aging treatment temperature showed the maximum value at the temperature of 725°C. This maximum value is to be related with the precipitation of γ' and γ'' phases. The decrease in strength, elongation and hardness during long time aging at 725°C were thought to be induced from the coarsening of the grain size and the transformation of γ'' phase to γ' phase. For the specimens treated for 10 hours, impact energy showed constant value of ~105 J with increasing the aging temperature, however this value continuously decreased with elapsing time at the aging temperature of 725°C. It was found that the decrease in impact value was induced from the coarsening of grain size and the carbide coarsening. The coefficient of thermal expansion of aging treated Inconel 718 alloy increased with raising test temperature, and the coefficient was appeared 11.57~12.09 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ and 14.28~14.39 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$, respectively, after heating to 150°C and 450°C.

Key Words: Inconel 718 Alloy, Impact Value (충격치), Tensile Properties (인장 성질), Aging Treatment (시효 처리), Dilatation (팽창수축)

1. 서론

공작기계 및 터보 블로워의 회전체에 사용되는 주축은 정밀 발란싱 회전자로서 소음과 진동이 적 으면서 효율이 극대화되도록 설계되어야 한다. 따라서 모터와 주축을 연결하고 증속 기어를 사용하여

임펠러를 돌리는 증속 기어를 없애고 모터와 주축 을 직결시키는 방식의 터보 블로워를 개발하여 고 속화, 고효율 및 소형화를 실현하려는 움직임이 점 차 확산되고 있다. 고속으로 회전하는 주축은 모터 의 도자성(permeability)은 낮지만 침투율이 큰 비자 성체 소재이면서도 고속 회전시 떨림을 최소화시켜

저 소음, 저 진동을 실현하기 위하여 항복강도가 높은 고탄성 소재이어야 하며, 고속회전에 의해 발생하는 열에도 견디기 위하여 열팽창계수가 작은 소재로 제작되어야 한다.¹ 이러한 조건을 만족하는 소재는 Ni-base 초합금을 생각할 수 있는데 Ni의 첨가량이 증가할수록 열 피로에 강하고 합금 함량변화에 따라 열팽창 계수가 달라진다.² 따라서 이러한 직결식 모터의 주축소재로서 필요한 요구조건을 만족시키기 위하여 가스터빈, 로켓 모터 등에 사용되는 Ni-base 초합금을 주축으로 사용하고 있다. Ni-base 초합금은 구조에 의해 생산 가능할 것으로 생각되나 pin hole 발생, 개재물 제거의 어려움 등으로 인하여 요구하는 강도를 만족시키지 못하여 주축 생산에 어려움을 겪고 있다.

한편 Ni-base 초합금 중에서 Inconel 718 합금은 항복강도가 높은 고탄성 소재로서 열팽창계수가 낮고 열 피로에 강하여 항공기용 엔진, 고온용 볼트 너트, 핵융합로 등 고온에서 사용되는 기계부품에 널리 사용되고 있다.³ 이 합금은 고용화 열처리 후 시효 열처리를 통해 기지와 정합을 이루는 비자성의 석출물을 생성시키는 석출경화를 이용하여 강도를 높인다. 그러나 Inconel 718 합금의 시효처리 시간은 10~20 hr 동안 장시간 시효처리 함으로 인하여 제품을 생산하는데 시간과 비용이 증가하게 된다. 이 합금을 시효 열처리하면 오스테나이트 기지에 γ' 상이 석출되어 고 강도를 유지하고 있으며, 이 γ' 상은 비 자성 석출물로서 기지와 정합을 이루어 강화된다. 따라서 열처리에 의해 석출되는 γ' 상의 양을 조절하는 것이 중요하다. 시효처리에 의해 γ' 상이 생성되거나 탄화물이 생성되면 강도는 높일 수 있지만 γ' 상은 자성체이므로² 이들 석출물의 석출은 바람직하지 못하다.

따라서 본 연구에서는 Ni-base 초합금인 Inconel 718 합금 소재를 공작기계나 터보 블로워의 주축소재로 사용할 때 고용화 열처리 후 시효처리 온도 및 시간을 변화 시켜 시효 열처리가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하여 열 변형을 최소화하면서 최적의 기계적 성질을 보이는 열처리 조건을 조사하였다.

2. 실험방법

원 소재는 Ni-Cr-Fe 계의 초합금인 Inconel 718 합금으로 Table 1에 원 소재의 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Inconel 718 superalloy

Ni	Cr	Fe	Co	Mo	Nb	Ti
53.0	18.3	bal.	0.28	3.06	5.2	1.05
Al	C	Mn	Si	B	Cu	
0.5	0.047	0.26	0.1	0.004	0.08	

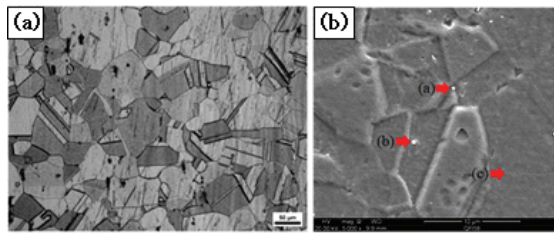
(wt.%)

이 소재는 VIM/ESR(진공유도용해/일렉트로스래그리멜팅)법 법에 의해 제조된 합금으로, 압연에 의해 2 mm의 판재 및 12 mm 판재로 제조된 2종류 판재를 시험편으로 사용하였다. 시험편의 열처리는 1025℃에서 1 시간 동안 고용화 처리한 다음 675℃~785℃의 범위에서 25℃간격으로 각각 5~40 시간 시효처리 하였다. 2 단 시효열처리는 1025℃에서 고용화 처리한 소재를 725℃에서 8 시간 시효시킨 다음 55/h 로 620℃까지 냉각하여 8 시간 유지 후 공냉하였다. 열처리가 끝난 시료는 연마 및 정마 과정을 거친 후 HCl 15 ml + HNO₃ 10 ml + acetic acid 10 ml + glycerin 1 cc 의 용액에서 부식시킨 후 광학현미경 및 주사전자 현미경(FE-SEM Inspect F 50)을 이용하여 조직관찰 및 석출물의 EDX 분석을 수행하였다. 또한 열처리가 끝난 시험편은 시효온도 및 시효시간 경과에 따른 인장성질, 충격치, 경도변화 및 열 팽창수축 변화를 조사하였다. 인장 시험편은 2 mm의 판재를 ASTM E8 규격으로 가공하여 열처리한 다음 인장시험기(Simatzu AG-25TG)에서 crosshead speed를 2 mm/min으로 정하여 시험하였다. 충격 시험편은 12 mm 판재를 KS D ISO 148-1 규격으로 가공하여 Charpy 충격 시험기를 이용하여 시험하였다. 시효처리가 끝난 시험편은 마이크로 비커스 경도기(load : 1000 g)를 이용하여 경도를 측정하였다. 열 팽창수축 실험은 시료를 3 mmΦ x 30 mm로 가공하여 dilatometer (RB Model 401 DILPATS)를 이용하여 승온 및 냉각속도를 0.5 °C/sec로 정하여 상온에서 450℃까지 팽창수축을 측정하여 열팽창계수를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시효처리에 따른 조직 변화

Fig. 1은 1025℃에서 1 시간 고용화 열처리 한 소재의 광학현미경 및 주사전자현미경 조직을 나타낸 것이다.



wt (%)	C	N	Ti	Al	Nb	Cr	Fe	Ni
(a)	3.30	-	2.73	-	-	18.8	19.7	55.4
(b)	2.36	9.97	62.7	1.61	21.4	1.6	-	-
(c)	3.30	-	2.73	-	-	18.8	19.7	55.4

Fig. 1 Optical and SEM micro graphs of solution annealed Inconel 718 alloy. (a) Optical micrograph (b) SEM micrograph and EDS result

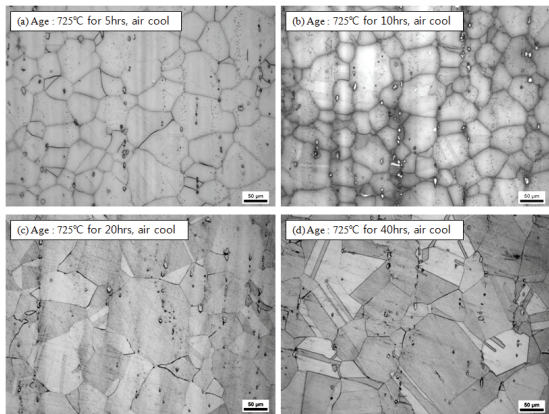
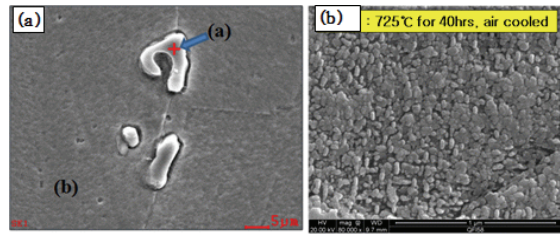


Fig. 2 Optical micrographs of aged specimen at 725°C with variation of aging time

광학현미경 관찰에서 이 소재는 (a)와 같이 고용화 열처리에 의해 어닐링 쌍정이 보이는 오스테나이트(γ)조직을 입을 알 수 있다. 고용화 열처리에 의해 석출물이 존재하는 가를 알기 위하여 SEM-EDS 분석한 결과를 (b)에 나타내었다. 희게 보이는 석출물은 탄화물[a, c: TiC] 및 질화물[b: TiN, NbN]이 존재한다.

725°C에서 시효시간 변화에 따른 광학현미경 조직변화를 Fig. 2에 나타내었다.

탄화물로 추정되는 석출물이 가공방향으로 배열되고 20시간 이상 시효 시키면 오스테나이트 결정립이 조대화 됨을 알 수 있다. 고용화 열처리한 시료에서 고 배율의 주사전자현미경에서 관찰할 수



wt (%)	C	N	Ti	Al	Nb	Cr	Fe	Ni
(a)	4.54	-	7.17	-	85.1	-	-	3.09
(b)	0.82	-	3.46	-	6.32	1.68	17.5	53.1

Fig. 3 SEM micro graphs of aged specimen at 725°C for 40 hrs. (a) Large precipitates observed by optical micro graph (b) High magnification of the matrix

있었던 미세한 탄화물(Fig. 1)이 시효 시키는 동안 조대화 되어 광학현미경으로 관찰 가능하였다고 생각된다. 또한 시효에 의해 나타나는 탄화물의 분포는 시효시간이 길어짐에 따라 점점 많아지면서 조대화 된다고 생각된다.

광학현미경에서 관찰된 석출물의 종류를 SEM-EDX로 분석하여 Fig. 3에 나타내었다.

이 석출물 분석에서 a로 표시된 석출물은 Nb 및 Ti이 풍부한 NbC 및 TiC 탄화물로 판단된다. 한편 725°C에서 시효 시키면 γ'' 상이 존재할 것이라고 판단³하여 40시간 동안 시효 시킨 시료를 깊게 부식시켜 고 배율의 주사전자현미경으로 관찰한 조직을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 725°C에서 장시간 시효에 의해 γ'' 으로 추정되는 많은 석출물이 존재하고 있음을 알 수 있다. 즉 본 소재의 강화는 γ'' 상의 석출 때문에 생긴다고 생각된다. γ'' 상은 원래 기지와 정합(coherent)을 이루는 석출물로⁴ 디스크형인데 부식을 아주 심하게 시키면 나타날 것으로 생각 되지만 본 실험에서는 부식이 불충분하여 구형으로 나타났다고 판단된다.

3.2 시효처리에 따른 기계적 성질변화

Fig. 4(a)는 고용화 열처리된 소재를 675°C~785°C의 온도범위에서 25°C간격으로 각각 10시간 시효처리 한 시료의 경도 값 변화를 나타낸 것이다.

경도 값은 시효온도 상승에 따라 급격히 증가하다가 725°C에서 Hv410로 최대 peak를 이룬 후 서서히 감소하고 있다. 최대경도를 나타내는 725°C에서 시효시간 경과에 따른 경도변화를 Fig. 4(b)

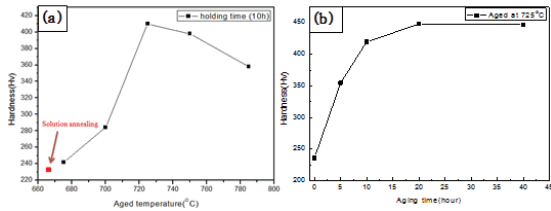


Fig. 4 Hardness as a function of aging temperature and time. (a) Aged at various temperature of 10 hrs (b) Aged at 725°C for various time

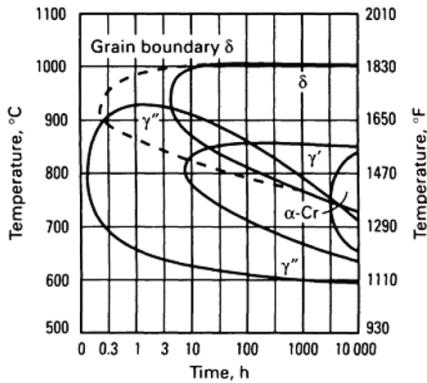


Fig. 5 Transformation diagram of Inconel 718 alloy⁴

에 표시하였다. 시효시간 경과에 따라 경도는 증가하다 20 시간 이후에는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 시효처리 시의 이러한 경도변화는 석출되는 γ' 상 및 γ'' 상과 관련되는데 fcc 결정구조를 가진 비 자성 석출물인 γ' 상은 기지인 γ 상과 정합을 이루는 각형의 석출물로서 경화에 기여하여 고강도를 유지한다고 보고되고 있다.⁴ 그러나 주된 경화 상은 bcc 결정구조를 가진 disk 형태의 γ'' 상이라고 알려져 있지만 γ'' 상은 자성체^{4,5} 이므로 비자성 특성을 가져야 하는 주축소재로서는 바람직하지 못하다고 판단된다.

최대 경도를 나타내는 725°C에서 석출되는 상을 알기 위하여 Inconel 718 합금의 상태를 Fig. 5에 나타내었다.⁵

이 상태도에 의하면 최대 경도를 나타내는 725°C에서 주축소재로 사용되는 비자성의 γ' 상의 석출은 적어도 40 시간이 지난 후에야 나타나므로, 장시간 열처리로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 결정립 조대화가 일어나 기계적 성질의 저하가 우려된다. 또한 이 그림에서 γ' 상의 변태 시간은 시효온도가 상승하면 급격히 짧아져서 785°C에서는 10

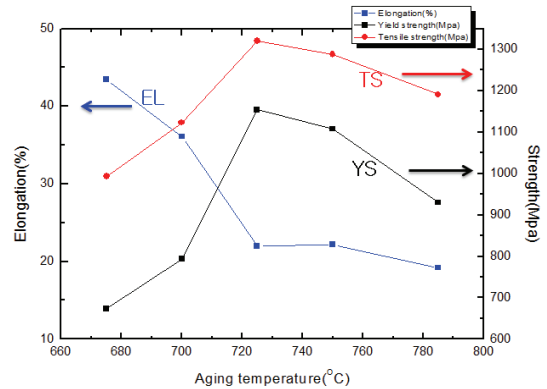


Fig. 6 Tensile properties as a function of aging temperature at 10 hrs

시간 시효처리에 의해 γ' 상을 얻을 수 있다. 따라서 공작기계나 터보 블로워용 주축소재로서 Inconel 718을 선정할 경우, 짧은 시효처리 시간에 자성을 띄지 않게 하는 방법은 가급적 높은 온도에서 시효시키는 것이 바람직하다고 생각된다.

Fig. 6은 시효처리 온도를 변화시켜 10시간 시효처리 한 경우 온도변화에 따른 인장성질 변화를 나타낸 것이다. 인장강도와 항복강도는 시효처리 온도가 상승에 따라 급히 증가하다가 725°C에서 최대 peak를 이룬 후 서서히 감소하고 있으며 연신율은 온도상승에 따라 급히 감소하다가 725°C에서부터 서서히 감소하고 있다. 즉 725°C에서 항복강도 1320 Mpa 연신율 22%를 보이고 있으며 785°C에서는 항복강도 930 Mpa 연신율 19.2%를 나타내고 있다. 이러한 강도의 증가와 감소는 경도변화와 거의 동일한 경향을 보이는 것으로 725°C이상에서 강도가 감소하고 연신율도 감소하는 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 시효온도 상승에 따라 강한 γ'' 상이 γ' 상으로 바뀌기 때문으로 생각된다.

시효시간에 변화에 따른 인장성질변화를 조사하기 위하여 10시간 시효처리에서 가장 강도 값이 높은 725°C에서 5~40시간 시효처리 한 시료에 대하여 시효시간 경과에 따른 항복강도, 인장강도 및 연신율 변화를 도시하여 Fig. 7에 나타내었다.

항복강도는 시효시간 10시간에서 1154 Mpa로 최대 peak를 이룬 후 서서히 감소되고 있으며 연신율은 시효처리 시간 20시간에서 23.7%를 나타낸 후 40시간 시효시키면 13.28%로 낮은 값을

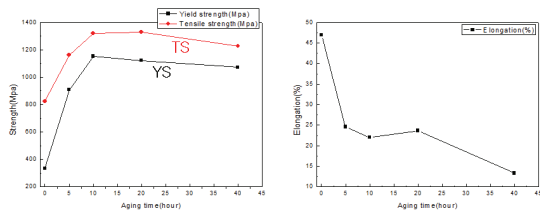


Fig. 7 Changes in tensile properties with increasing aging time after aging at 725°C

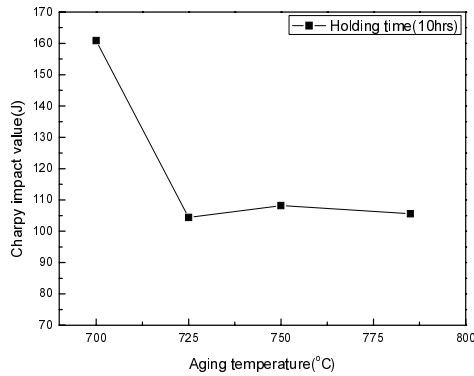


Fig. 8 Impact value as a function of aging temperature for 10 hrs

나타내고 있다. 장시간 시효 시킬 때 시효시간이 증가 할수록 강도가 감소하는데도 불구하고 연신율도 같이 감소하는 이유는 725°C에서 시효시간 증가에 따라 결정립 조대화 와 함께 γ (FCC)기지에서 γ "상 석출되고 시간이 더 길어지면 γ 상이 석출되는데 이때 γ 상도 조대화 되기 때문⁶으로 판단된다.

Fig. 8 은 고용화 열처리된 소재를 700°C ~785°C의 범위에서 25°C간격으로 각각 10 시간 시효처리 한 시료의 Charpy 충격치 변화를 나타낸 것이다. 시효처리 온도가 상승 할수록 충격치는 급격히 감소하다가 725°C이상에서 약 105 J로 거의 일정하게 나타났다. 10 시간 시효 시킬 때 충격치는 석출상의 종류에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig 9 는 1025°C에서 고용화 열처리 후 725°C에서 시효 시킬 때 시효시간 경과에 따른 충격치 변화를 나타낸 것이다.

충격치는 시효시간 5 시간에서 113 J을 보인 후 시간이 길어지면 감소하여 40 시간에서 75 J을 보이고 있어 시효시간 10 시간에서 시효온도 변화에

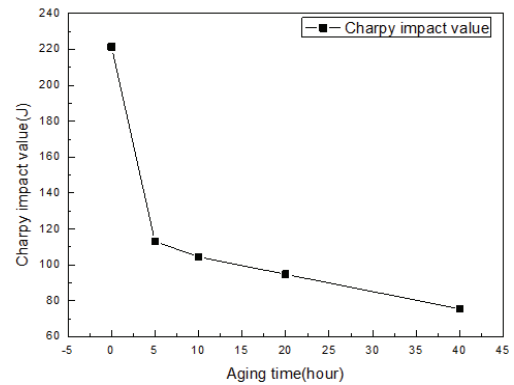


Fig. 9 Changes in impact value with increase aging time at 725°C

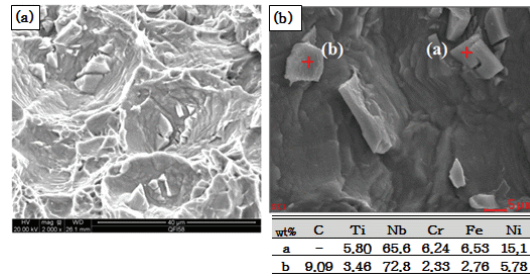


Fig. 10 SEM micro graphs and EDX analysis result of aged specimen at 725°C. (a) Aged for 10 hrs, (b) Aged at 40 hrs

따른 충격치 변화와 다른 양상을 보이고 있다. 앞의 Fig. 2 에서 시효시간이 길어지면 석출된 탄화물의 분포가 많아지고 조대화 됨을 알 수 있었는데 이러한 조대한 탄화물은 충격치를 감소시키는데 큰 역할을 한다고 알려져 있다.⁷ 따라서 시효시간이 길어지면, 결정립 조대화 현상(Fig. 2) 및 탄화물의 조대화가 일어나 충격치가 감소하였다고 판단된다.

Fig. 10 은 725°C에서 시효시간 경과에 따른 충격 시험편의 파단면을 주사전자 현미경으로 관찰한 것이다. 충격시험편의 파단면은 (a)사진에서와 같이 모두 딴플형의 연성파단이 일어났으며 딴플 내에는 γ 상으로 추정되는 석출물이 존재하고 있음을 알 수 있다.

특히 725°C에서 40 시간 동안 장시간 시효처리 한 파단면 에는 γ 상이 보이는 각형의 석출이 관찰되는데 이는 장시간 시효 처리하면 γ 상이 구형에서 각형으로 바뀌기 때문으로 생각된다. 파단

Table 2 Mechanical properties after 2 step aging treatment

Heat treatment : 1025°C for 1 hr water quenching → aged at 725°C for 8 hrs → cooled 55°C/h to 620°C for 8 hrs → air cooling			
Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)	Charpy impact value (J)
1086.2	799.2	16.2	106.8

면에서 관찰되는 각형과 구형의 석출물의 성분은 분석한 결과는 (b)사진에서와 같이 각형의 석출물은 a와 같이 Nb 함량이 매우 높고 Ni, Ti 등이 검출되지만 탄소는 검출되지 않는 것으로 보아 정합상태의 γ' 또는 γ'' 상으로 판단된다. 반면에 b는 구형의 석출물로서 탄소와 Nb 이 높은 것으로 보아 Nb 탄화물임을 알 수 있다.

2 단 시효에 의한 기계적 성질변화를 조사하기 위해 1025°C에서 고용화 열처리한 시료를 725°C에서 8 시간 시효 시킨 다음 55°C/h로 620°C까지 냉각하여 이 온도에서 8 시간 유지 후 공냉 하였다. Table 2는 2 단 시효 후 기계적 성질변화를 나타낸 것이다. Table 2에서와 같이 2 단 시효에 의해 충격치는 1 단 시효와 비슷한 값을 가지나 연신율과 항복강도 값은 1 단 시효에서보다 낮은 값을 보이고 있다. 2 단 시효에 의해 연신율과 항복강도가 낮은 값을 보이는 이유는 기지와 정합상태로 존재하는 γ' 또는 γ'' 상의 석출이 1 단 시효에서보다 불충분하게 이루어졌기 때문으로 생각된다.

3.3 Inconel 718 합금의 열팽창 계수 측정

Inconel 718 합금의 열팽창 계수는 dilatometer를 이용하여 0.5°C/sec의 속도로 측정하였다. Fig. 11은 1025°C에서 고용화 열처리한 소재를 450°C까지 가열하여 열 팽창수축을 측정한 결과이다. 고용화 열처리만 수행한 시료의 가열 시 열팽창계수는 150°C까지 또는 450°C까지 각각 12.31 및 14.45 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 로 나타났다.

또한 이 그림에서 열팽창 수축은 가열 시 보다 냉각 시에 더 많이 발생한다는 것을 알 수 있다.

고용화 열처리 후 725°C에서 10 시간 및 20 시간 시효 시킨 시료의 열팽창계수를 측정한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 고용화 열처리 후 725°C에서 시효 시킨 시료의 열팽창계수는 450°C까지 가열할 때는 모두 14 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 이상이나 150°C까지 가열

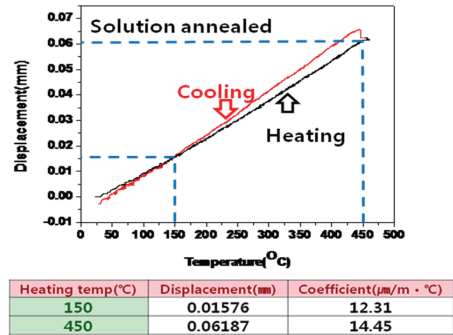


Fig. 11 Changes in displacement with increasing temperature for the dilatation specimen after solution annealing

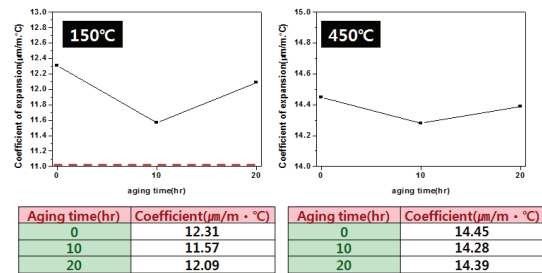


Fig. 12 Variation of coefficient of expansion as a function of aging time in Inconel 718 alloy

하면 10 시간 및 20 시간 시효 시킨 시료에 대하여 각각 11.57 및 12.09 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 로서 10 시간 시효처리한 시료가 20 시간 시효 시킨 시료보다 낮은 열팽창 계수 값을 보인다.

이상의 열팽창수축 실험결과에서 공작기계 또는 터보 블로워에 사용되는 Inconel 718 합금의 주축소재는 가열할 때보다 냉각할 때에 더 많은 열변형을 받기 때문에 회전주축의 온도 상승이 되지 않도록 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

1025°C에서 1 시간 동안 고용화 열처리 후 680°C, 700°C, 725°C, 750°C, 785°C에서 각 10 시간씩 시효 처리를 하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고용화 열처리 후 존재하고 있었던 탄화물은 시효 시키면 조대화 되어 가공방향으로 길게 늘어져 있었으며 725°C에서 장시간 시효 시키면 결정립이 조대화 되었다. 장시간 시효시킨 후 나타나는 석출물은 Nb 함량이 높은 탄화물과 Nb 과

Ti 함량이 높은 γ 상과 γ' 상으로 밝혀졌다.

2) 10 시간 시효 시킨 경우 시효 온도변화에 따른 강도 및 경도변화는 725°C에서 최대값을 나타내고 있었는데 이는 γ' 상과 γ 상의 석출과 관련이 있다고 판단된다. 시효처리 온도 725°C에서 장시간 열처리하면 강도, 연신율 및 경도 값은 γ' 상의 γ 상으로의 변태 및 결정립 조대화로 인하여 감소된다고 생각된다.

3) 10 시간 시효 시킨 경우 시효처리 온도상승에 따른 충격치 변화는 약 105 J 로 일정한 값을 보이고 있었지만, 725°C에서 시효시간이 경과할수록 충격치는 계속 감소하고 있었다. 이러한 충격치 감소원인은 시효시간이 길어지면 결정립 조대화와 함께 탄화물의 조대화로 인한 것으로 밝혀졌다.

4) Inconel 718 합금을 시효 시킨 후 열팽창 계수는 가열온도가 상승할수록 증가하며 150°C까지 가열하면 11.57~12.09 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$, 450°C까지 가열하면 14.28~14.39 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 의 값을 나타내고 있었다.

5) 공작기계 및 터보 블로워 회전체로 사용되는 Inconel 718 합금의 주축을 비자성체인 γ 상의 석출로 강화시키기 위해서는 가급적 높은 온도로 시효 시키는 것이 바람직하며 시효 후 소재의 열팽창수축은 가열할 때보다 냉각할 때 더 많이 발생한다는 것을 고려하여야 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업[RT104-01-03] 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Shin, J. H. and Lee, C. M., "A Study on Spindle Shape Design using Design of Experiments," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No. 4, pp. 120-127, 2009.
2. Mankins, W. L. and Lamb, S., "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM Metals Handbook," ASM International, Vol. 2, p. 1374, 1991.
3. Loria, E. A., "The Status and Prospects of Alloy 718," J. of Metals, Vol. 40, No. 7, p. 36, 1988.
4. Davis, J. R., "Heat Resistant Materials, ASM Specialty Handbook," ASM International, p. 298, 1997.

5. DeAntonio, D. A., Duhl, D., Howson, T., and Rotherman, M. F., "Heat Treating, ASM Metals Handbook," ASM International, Vol. 4, p. 1757, 1991.
6. Slama, C. and Abdellaoui, M., "Structural characterization of the aged Inconel 718," J. of Alloys and Compounds, Vol. 306, pp. 277-284, 2000.
7. Keough, J. R., Larid, W. J., and Godding, A. D., "Heat Treating, ASM Metals Handbook," ASM International, Vol. 4, p. 162, 1991.