

마찰용접된 니켈기 초내열합금 Alloy718의 고온 크리프 파단 특성

권상우* · 공유식** · 김선진**

*부경대학교 기계설계공학과 대학원

**부경대학교 기계공학부

High Temperature Creep Rupture Characteristics of Ni-Based Alloy718 Jointed by Friction Welding

SANG-WOO KWON*, YU-SIK KONG** AND SEON-JIN KIM**

*Graduate Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

KEY WORDS: Creep characteristics 크리프 특성 Friction welding 마찰용접 Creep rupture time 크리프 파단시간 Larson-Miller parameter LMP, Steady state creep rate (SSCR) 정상상태 크리프 속도, Stress exponent 응력지수

ABSTRACT: The short-term high temperature creep rupture behavior of Ni-based Alloy718 steels jointed by friction welding was investigated at the elevated temperatures of 550 to 700 °C under constant stress conditions. The creep rupture characteristics such as creep stress, rupture time, steady state creep rate, and initial strain were evaluated. Creep stress has a quantitative correlation between creep rupture time and steady state creep rate. The stress exponents (n , m) of the experimental data at 550, 600, 650 and 700 °C were derived as 26.1, -22.4, 22.5, -18.5, 17.4, -14.3 and 6.9, -8.1, respectively. The stress exponents decreased with increasing creep temperature. The creep life prediction was derived by the Larson-Miller parameter (LMP) method and the result equation obtained is as follows: $T(\log t_r + 20) = -0.00148 \sigma^2 - 3.089 \sigma + 23232$. Finally, the results were compared with those of the base metal for Alloy718.

1. 서 론

고온 재료는 고온에서 장시간 사용되므로 고온 파괴, 즉 크리프 손상에 의한 고장 및 파손으로 경제적 손실은 물론 인명 피해까지도 발생할 수 있는 중요한 의미를 가지고 있다. 따라서 이러한 강재의 장시간 고온 크리프 특성을 단시간의 실험을 통하여 정확히 평가하고 안전 강도나 잔여 수명 등을 예측하는 평가 기법의 개발은 예기치 않은 사고 방지는 물론 인명 및 재산 손실 예방의 경제적인 차원 뿐 만 아니라 실용적인 공학적 의미에서도 매우 중요한 요소라 아니할 수 없다(Kim et al., 2000; Kim et al., 2001; Kim et al., 2008).

고온 분야에 대한 설계 수명은 통상 수만에서 수십만 시간이 대부분이다. 그러나 현실적으로 실험에 의해서 얻어지는 크리프 데이터는 수천에서 수만 시간의 경우가 대부분이다. 이는 다른 강도 데이터만큼 간단히 얻을 수 없다는 시간적, 경제적 제약 뿐만 아니라 설계 및 제조 시간의 경제적, 사회적 문제 등이 포함되어 있기 때문이라 생각된다. 따라서 비교적 단시간의 데이터에서 장시간의 크리프 특성을 정확히 추정하는 외삽법의 연구는 내열 재료의 개발이나 실용적인 활용에 크게 기여하고 있다(Endo and Fijimitsu, 2006; Kong et al., 2004).

초내열합금 Alloy718은 Ni-Cr-Fe기 합금조성에 Ti 등이 첨가되어 각 원소 합금에 의한 고용 및 시효경화 효과를 극대화하여 고온에서의 기계적 성질을 개선한 합금으로써, 다른 초내열합금에 비하여 성형성이 우수하여 항공기 혹은 산업용 가스 터빈 엔진 부품으로 가장 널리 사용되고 있는 합금 중의 하나이다. 그러나 재료가 고가이므로 우수한 고온 특성이 요구되지 않는 부품의 부위는 비교적 저가의 내열강을 접합하여 사용하는 시도가 연구되고 있다(김남용 등, 2006). 이와 같은 관점에서 이중 마찰 용접재에 대한 고온 특성을 알아보기 전에 기초적으로 동종 마찰용접재에 대한 크리프 특성치의 연구가 필요하다고 사료된다. 이와 같은 관점에서 저자 등은(권상우 등, 2008) 이미 니켈기 초내열합금 Alloy718의 동종 금속간의 마찰용접에 관한 연구를 수행하여 용접재의 강도와 인성을 고려한 최적 마찰용접조건을 결정하였다.

본 연구에서는 니켈기 초내열합금 Alloy718에 대한 일련의 연구 일환으로 모재에 대한 크리프 파단 특성 고찰에 이어(권상우 등, 2008), 최적 마찰용접조건에서 용접한 Alloy718 마찰용접재에 대한 크리프 파단시험을 수행하여 이들에 대한 여러 가지 크리프 파단 특성치와의 상관관계를 규명 고찰하고, Larson-Miller parameter(LMP)법에 의한 크리프 수명 예측을 수행하여 모재에 대한 결과와 비교 고찰 하였다. 본 마찰용접재에 대한 크리프 파단 특성의 평가도 모재와 동일한 온도조건인 550 °C, 600 °C, 650 °C 및 700 °C에 대하여 수행하였다.

교신저자 김선진: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-629-6163 sjkim@pknu.ac.kr

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 니켈기 초내열합금 Alloy718이며, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 각각 나타내었다. Table 3은 Alloy718 마찰용접제의 열처리 조건을 나타낸다. 또한 고온 크리프 파단 시험에 사용된 시험편의 형상과 치수는 ASTM 규격에 준하여 시험편 평행부의 직경은 15mm의 마찰용접된 환봉으로부터 6mm로 가공하였으며, 그 시험편의 형상과 치수는 참고문헌(권상우 등, 2008)을 참조하기 바란다.

Alloy718 동종 마찰용접제에 대한 크리프 시험을 수행하기 위한 시험편 재료는 권상우 등(2008)의 최적마찰용접 조건에 대하여 마찰용접을 수행하여 크리프 시험편을 작성하였다. 구체적인 마찰용접 시험 방법 등에 관해서는 참고문헌(권상우 등, 2008)을 참조하기 바란다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 크리프 시험 장치는 정적 및 동적 고온 크리프 시험이 가능한 SATEC사(Model: DLF-10-1029)의 시험기를 사용하였다. 하중과 변형의 서보제어가 가능한 전기, 기계장치의 크리프 시험기이며, 고온 크리프, 응력/완화시험, 인장 및 압축시험이 가능하다.

온도측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 약 10°C/min로 가열하였다. 그리고 부하 전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험 중 온도를 일정 온도에서 ±1°C범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 고온 크리프 시험 중 발생하는 연신은 표점거리 30mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하여 LVDT로 측정하여 시험기 자체에 연결되어있는 컴퓨터에 저장하여 고온 크리프 변형거동을 고찰하였다.

Table 1 Chemical compositions of Alloy718 (wt. %)

Al	Si	Mn	Cr	Ti	Fe	Mo	Ni
0.62	0.1	0.06	19.2	1.1	17.7	2.8	Bal.

Table 2 Mechanical properties of Alloy718

Temp. (°C)	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ψ (%)
R. T	1355	1042	24	28
550	1281	1137	28.4	44
600	1277	1112	30.8	50
650	1171	1054	25.4	27
700	1045	994	24.9	22

3. 결과 및 고찰

3.1 고온 크리프 파단 거동

Fig. 1(a), (b), (c) 그리고 (d)는 최적조건 [Welding condition: $n=2000$ (rpm), $P_1=200$ (MPa), $P_2=200$ (MPa), $t_1=8$ (sec), $t_2=5$ (sec)](권상우 등, 2008)에서 Alloy718 동종제를 마찰용접한 후 Table 3과 같이 열처리를 시행하여 네 가지 실험 온도(550, 600, 650, 700°C)에서 응력을 변화시켜 실험적으로 구한 크리프 곡선을 각각 나타낸다. 모든 온도에서 응력이 증가하면 모재의 경우와 비슷한 양상으로 크리프 속도가 빠르게 되는 전형적인 크리프 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

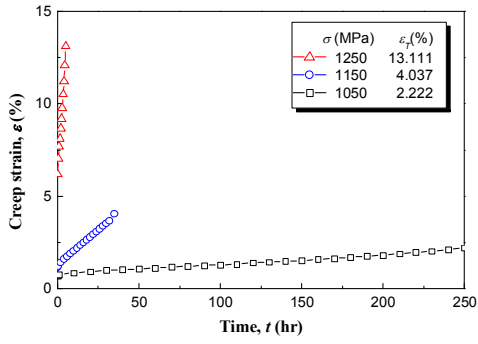
Fig. 2는 크리프 파단시간과 총 크리프 변형률과의 상관관계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 파단시간과 총 크리프 변형률과의 상관관계를 일의적으로 결론 내리기는 무리가 있을 것으로 사료되지만, 마찰용접제의 경우 650°C의 경우를 제외하면 파단시간이 길수록 총 크리프 변형률은 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 정확한 관계를 규명하기 위해서는 더 많은 실험을 통한 고찰이 필요하다고 사료된다.

3.2 크리프 응력과 파단시간과의 상관성

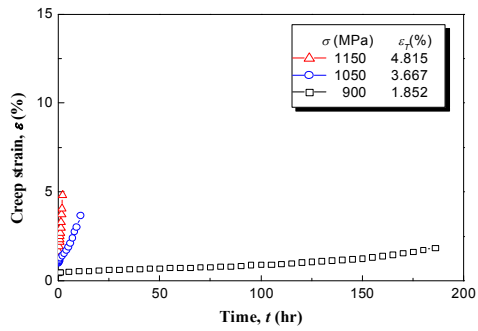
Fig. 3은 Alloy718 마찰용접제에 대한 크리프 응력(σ , MPa)과 크리프 파단시간(t_r , hr)과의 관계를 모재의 실험결과와 함께 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 마찰용접제의 크리프 파단시간과 크리프 응력사이에는 모재와 비슷하게 상관이 있음을 알 수 있다. 동일 응력에서 파단수명을 비교해 보면, 550°C/1050MPa에서는 422(hr), 250(hr)으로, 600°C/900MPa에서는 394(hr), 186(hr)으로, 650°C/700MPa에서는 188(hr), 187(hr)으로 거의 동일하게 나타났고, 700°C/450MPa에서는 205(hr), 156(hr)으로 나타났다. 따라서 550°C와 600°C에서는 마찰용접제에 비해 모재의 파단수명이 약 2배로 크게 나타났으나, 650°C와 700°C에서는 마찰용접제가 모재의 파단수명과 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 그림에서 크리프 수명은 동일 온도에서 응력이 증가할수록 감소하며, 온도가 상승할수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있다. 이는 온도 550, 600, 650, 700°C에서 응력이 결정되면 단시간 실험을 통하여 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있음을 추측할 수 있다. 그림에서 고온일수록 실제 크리프 수명이 훨씬 단축되는 것을 알 수 있다. 그러므로 단시간 실험으로 신뢰성 있는 장시간 수명예측이 가능하리라고 판단된다.

Table 3 Heat treatment conditions of friction welded Alloy718

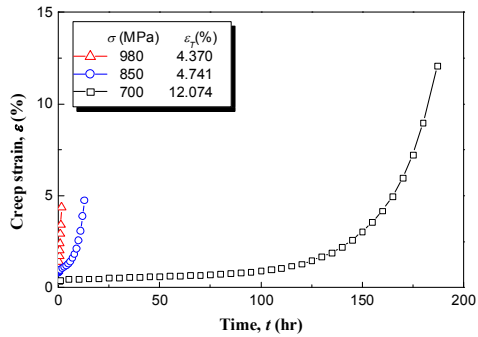
Heat treatment	Temperature x Time	Cooling
Solution treatment	1000°C x 2h	Water Q.
Aging treatment-1	718°C x 8h	
Aging treatment-2	621°C x 8h	Air Cooling



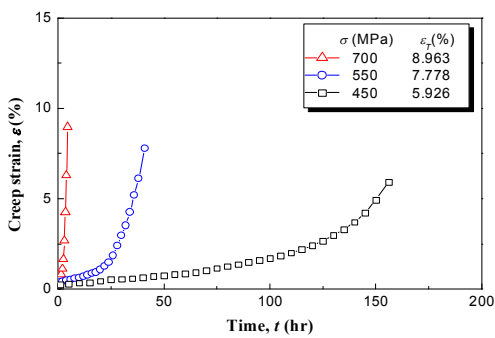
(a) 550°C



(b) 600°C



(c) 650°C



(d) 700°C

Fig. 1 Creep curves of Alloy 718 steels joined by friction welding

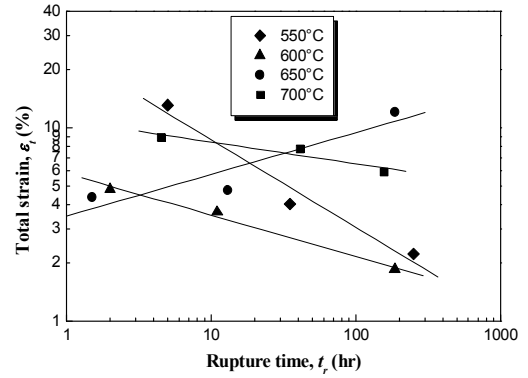


Fig. 2 Creep rupture time vs. creep total strain

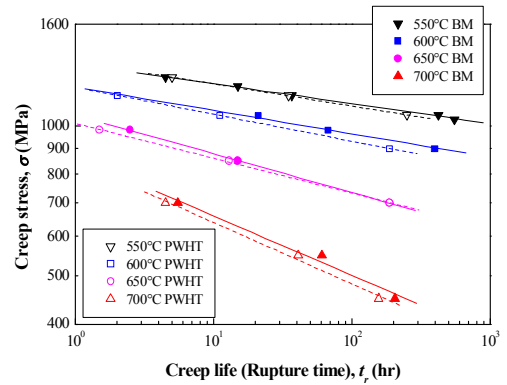


Fig. 3 Creep stress vs. creep rupture time

일반적으로 크리프 수명의 크리프 응력 의존성은 온도가 일정할 때 Norton(1910)에 의해 제안된 다음의 모델식이 자주 사용되고 있다.

$$t_r = B \cdot \sigma^m \tag{1}$$

여기서 B 는 재료상수(Material constant), σ 는 작용응력(Applied stress) 그리고 m 은 파단시간에 대한 응력지수이다.

크리프 파단시간에 대한 작용응력의 의존성이 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 얻은 실험적 상관관계식은 다음과 같다.

$$550^\circ\text{C}; \log t_r = 70.158 - 22.42484 \log \sigma \tag{2}$$

$$600^\circ\text{C}; \log t_r = 56.85353 - 18.47568 \log \sigma \tag{3}$$

$$650^\circ\text{C}; \log t_r = 42.98825 - 14.30602 \log \sigma \tag{4}$$

$$700^\circ\text{C}; \log t_r = 23.62907 - 8.06296 \log \sigma \tag{5}$$

식 (1)에 의한 크리프 응력지수(m)는 550°C는 -22.4, 600°C는 -18.5, 650°C는 -14.3, 700°C는 -8.1의 값으로 나타났으며, 온도에 미치는 응력지수의 영향을 Fig. 4에 나타낸다.

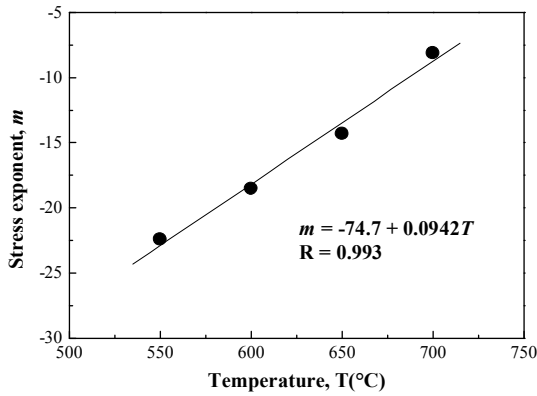


Fig. 4 Effect of stress exponent (m) on temperature

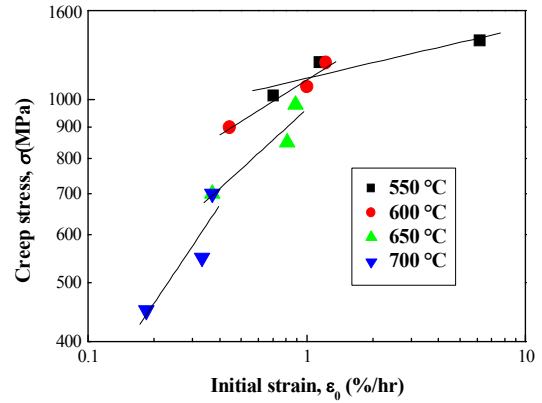


Fig. 5 Creep rupture time vs. initial strain (IS)

3.3 크리프 초기연신을 거동

초기연신율은 시간 의존적인 크리프 변형과는 독립적인 변수이나 크리프 응력과 온도에는 매우 민감한 변수이다. 마찰용접체에 대한 크리프 응력과 초기연신율과의 관계를 Fig. 5에 나타낸다. 초기연신율은 크리프 하중을 부하한 후 1분이 경과 되었을 때의 변형 값으로 정의하였다. 전체적으로 볼 때 일정 온도에서 응력에 따라 초기연신율이 증가하고 있음을 알 수 있다.

이는 모재의 결과와도 비슷한 경향을 보였다. 이 결과로부터 얻은 실험관계식은 다음과 같다.

$$550^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 3.035 + 0.084 \log \epsilon_0 \quad (6)$$

$$600^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 3.032 + 0.227 \log \epsilon_0 \quad (7)$$

$$650^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 2.980 + 0.329 \log \epsilon_0 \quad (8)$$

$$700^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 3.040 + 0.537 \log \epsilon_0 \quad (9)$$

즉, 다음 식으로 모델링할 수 있다.

$$\sigma = K'(\epsilon_0)^q \quad (10)$$

한편, 온도에 따른 기울기 값(q)의 변화는 Fig. 6에 나타내었다. 온도의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

3.4 정상상태 크리프 속도와 크리프 응력과의 관계

Fig. 7은 마찰용접체의 정상상태 크리프 속도(Steady state creep rate, $\dot{\epsilon}$)가 크리프 응력에 대한 의존성을 나타낸 결과이다. 크리프 응력이 증가함에 따라 정상상태 크리프 속도도 증가하는 것을 알 수 있다. 정상상태의 크리프 속도는 응력에 대해 의존함을 알 수 있다. 실험결과에서 얻어진 정상상태 크리프 응력지수(Stress exponent, n)는 550°C는 26.1, 600°C는 22.5, 650°C는 17.4이며, 700°C에서는 6.9의 값으로 나타났다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이, 550°C에서는 응력지수의 값이 큰 값으로 나타났지만, 700°C에서는 거의 1/4이나 낮은 응력지수의

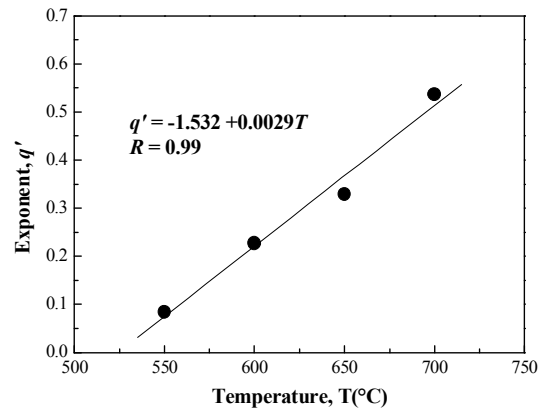


Fig. 6 Effect of exponent (q) on temperature

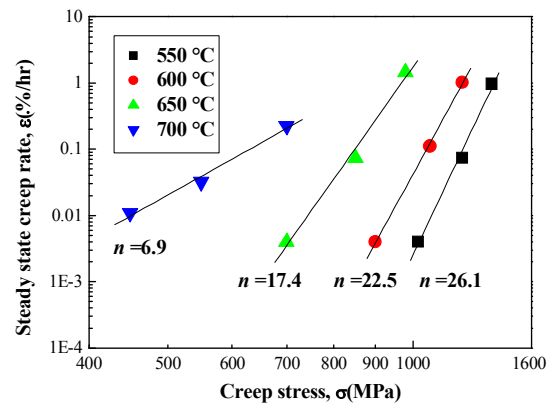


Fig. 7 Steady state creep rate (SSCR) vs. creep stress

값으로 나타났다. 이는 온도 영향에 의한 미세 조직내의 고용 강화 원소의 감소와 이로 인한 전위이동의 활성화에 기인한 결과로 생각된다. 이상의 작용 응력에 따른 정상상태의 크리프 속도 관계로부터 얻은 실험관계식은 다음과 같다.

$$550^{\circ}\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -80.905 + 26.099 \log \sigma \quad (11)$$

$$600^{\circ}\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -68.807 + 22.474 \log \sigma \quad (12)$$

$$650^{\circ}\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -51.865 + 17.366 \log \sigma \quad (13)$$

$$700^{\circ}\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -20.241 + 6.873 \log \sigma \quad (14)$$

즉, 아래와 같은 모델식으로 잘 표현될 수 있음을 알았다.

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \quad (15)$$

여기서 A 는 재료상수(Material constant), σ 는 작용응력 (Applied stress), n 은 정상상태 크리프 응력지수(Stress exponent)이다.

또한 SSCR 응력지수(n)에 미치는 온도의 영향은 Fig. 8과 같다.

3.5 LMP에 의한 크리프 파단 수명예측

실제 요구되는 온도보다 몇 백도 높은 온도에서의 응력-파단 시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 크리프 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 Larson and Miller(1952)에 의해 다음과 같이 정의되고 있다.

$$LMP = T(\log t_r + C) \quad (16)$$

식(16)에서 T 는 절대온도(K)이고, C 는 20이며, 재료정수이다. 그러므로 LMP는 응력의 2차 함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LMP = T(\log t_r + 20) = K_1 \sigma^2 + K_2 \sigma + K_3 \quad (17)$$

여기서 K_1, K_2, K_3 은 재료상수이다. 그러므로 Fig. 9에서 도출된 K_1, K_2, K_3 의 값과 LMP식은 다음과 같이 정리된다.

$$T(\log t_r + 20) = -0.00148 \sigma^2 - 3.089 \sigma + 23233 \quad (18)$$

이상의 후열처리된 마찰용접재(PWHT)에 대한 결과를 Fig. 10에 모재의 경우와 비교하여 보면, 마찰용접재에 대한 고온 크리프 특성이 모재와 거의 동등한 수준이며, 또한 LMP법에 의한 수명도 거의 동일한 수준으로 평가됨을 알 수 있다.

3.6 파단면의 조직관찰

일례로 Fig. 11 및 Fig. 12에 550°C와 650°C에서 가장 낮은 응력조건으로 크리프 실험된 시험편의 파단면의 거시조직과 미시조직 사진을 각각 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 크리프 시험편의 파단면은 모두 매끄러운 형태를 나타내었으며, 지면 관계상 나타내지 않았지만

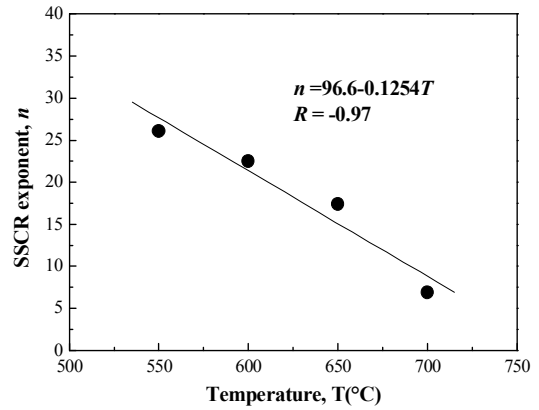


Fig. 8 Effect of SSCR exponent (n) on temperature

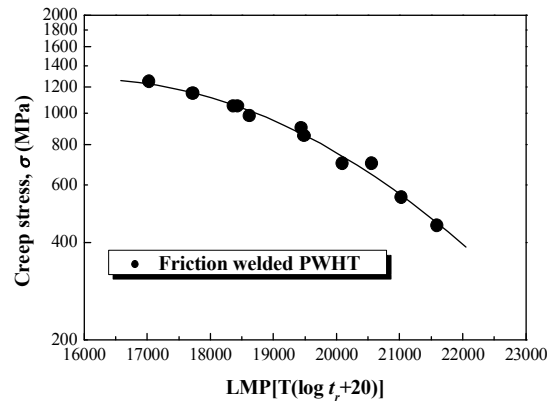


Fig. 9 LMP plot for Alloy718 steels jointed by friction welding

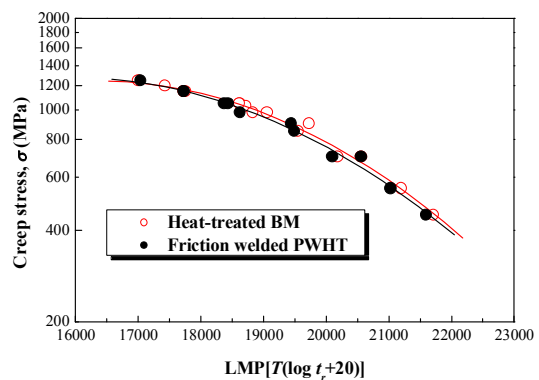


Fig. 10 Comparison of LMP plot for Alloy718 steels jointed by friction welding and the base metal results

Fig. 12에서와 같이 파단부 부근의 조직은 델타상이 거의 사라진 형태를 관찰할 수 있었다. 이는 크리프 실험에서의 파단이 용접부에서 일어났음을 짐작할 수 있는 결과이다.

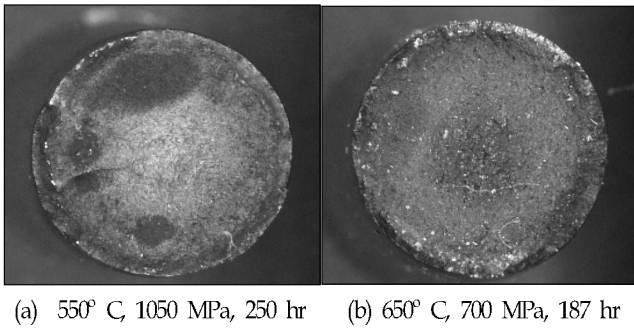


Fig. 11 Macrostructure of creep rupture specimen

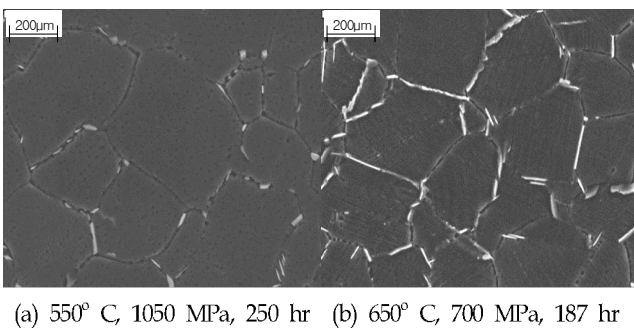


Fig. 12 Microstructure of creep rupture specimen (SEM)

즉, 마찰용접에 의해 용접부 부근은 온도가 델타상 고온온도 (~1038°C) 이상으로 상승하기 때문인 것으로 사료된다.

한편, 550°C와 650°C의 온도에 따른 크리프 시험편 조직상의 차이는 결정립부근의 공공(Void)이 650°C의 경우 더 많이 존재함을 관찰할 수 있는데, 이는 이 온도조건에서 크리프 변형을 더 많이 받았음을 의미하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

니켈기 초내열합금 Alloy718의 마찰용접에 대하여 550°C, 600°C, 650°C 및 700°C에 대한 고온 크리프 파단시험을 수행하여 크리프 파단 특성치의 상관관계와 LMP 수명 예측에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마찰용접제의 경우도 모재와 동일하게 파단시간과 초기 연신을 사이에 정량적 상관관계가 성립함을 알 수 있었다.
- (2) 정상상태 크리프 속도와 크리프 응력사이에는 정량적 상관성이 존재함을 확인할 수 있었고, 크리프 응력지수(n)는 550°C는 26.1, 600°C는 22.5, 650°C는 17.4이며, 700°C에서는 6.9의 값으로 나타났다.
- (3) 파단시간에 의한 응력지수(m)는 550°C는 -22.4, 600°C는 -18.5, 650°C는 -14.3, 700°C는 -8.1의 값으로 나타났다. 이는 정상상태의 크리프 속도에 의해 도출된 응력지수의 결과와 비슷

한 거동을 보였다.

- (4) LMP법에 의한 수명예측식은 다음과 같이 도출되었다.

$$T(\log t_r + 20) = -0.00148\sigma^2 - 3.089\sigma + 23233$$

- (5) 마찰용접제에 대한 고온 크리프 특성이 모재와 동등한 수준을 보였으며 또한 LMP법에 의한 수명 평가도 거의 동일한 수준으로 평가되었다.

- (6) 파단면의 조직 관찰 결과 고온으로 갈수록 결정립 부근의 공공이 더 많이 존재함을 알았다.

참 고 문 헌

권상우, 공유식, 김선진 (2008). "Alloy718 마찰접합조건에 최적화와 비파괴평가", 한국해양공학회지, 제22권, 제1호 pp 53-57.

권상우, 정원택, 양용모, 공유식, 김선진 (2008). "원자력 발전소용 밸브스텝제의 고온크리프 특성", 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp 2418-2421.

김남용, 윤종원, 김정환, 염종택, 박노광 (2006). "마찰용접한 Alloy718 및 SNCrW강의 기계적 성질", 2006년도 KWS 추계학술대회 발표논문집, pp 237-239.

Endo, T. and Fijimitsu, M. (1996). "Recent Advance in Creep Behavior Analysis and Its Application to Structural Materials", Materia Japan, Vol 36, pp 225-231.

Kim, I.S., Trevor, B., Yeom, J.T. and Park, N.K. (2000). "Characterization of Deformation Behavior for Waspaloy under Creep-Fatigue Interaction", Int. J. of Metals and Materials, Vol 6, No 5, pp 407-413.

Kim, S.J., Kong, Y.S., Roh, Y.J. and Kim, Y.G. (2008). "Statistical Properties of Creep Rupture Data Distribution for STS304 Stainless Steels", Materials Science and Engineering A, Vol 483-484, pp 529-532.

Kim, W.G., Kim, S.H. and Ryu, W.S. (2001). "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model", KSME Int. J., Vol 15, No 11, pp 1463-1471.

Kong, Y.S., Yoon, H.K., Park, Y.H. and Kim, S.J. (2004). "Creep Life Prediction of High Temperature Tube Materials for Power Plants", Key Engineering Materials, Vol 261-263, pp 1115-1122.

Larson, F.R and Miller, J.J. (1952). "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the ASME, pp 765-775.

Norton, F.H. (1910). "The Creep of Steel at High Temperatures", McGraw Hill, New York, 67 p.

2008년 11월 21일 원고 접수

2008년 12월 15일 최종 수정본 채택