

Cu-1Cr-0.5Zr 합금과 STS316L강의 마찰용접재의 고온 인장 성질과 크리프 파단 특성

Tensile Properties and Creep Rupture Characteristics of Cu-1Cr-0.5Zr/ STS316L Friction Welded Joints at Elevated Temperature

유인종 · 공유식 · 김선진

I. J. Yoo, Y. S. Kong and S. J. Kim

Key Words : Friction Welding(마찰용접), Creep Rupture Characteristics(크리프 파단 특성), Welded Joints(용접재), Elevated Temperature(고온), Tensile Properties (인장 성질), Initial Stain(초기연신율)

Abstract : In this paper, the elevated temperature tensile properties and short-time creep rupture characteristics were investigated for the friction welded joints of dissimilar materials, Cu-1%Cr-0.5%Zr and STS316L. The joining tests on Cu-1%Cr-0.5%Zr/STS316L by friction welding were performed, and optimum joining conditions of the friction welded joints were determined. The characteristics of the elevated temperature tensile strength, hardness, fractographs were examined, and the creep rupture characteristics for the optimum welded joints were investigated under uniaxial static load at 300, 400 and 500°C.

1. 서 론

Cu합금과 STS316L강은 원자로 용기 등의 부품재료로서 용기의 외부(1차벽, first wall)에는 높은 강도와 전도율을 지닌 구리합금을 사용하며 내부에는 내식성을 고려하여 스테인리스강을 사용하고 있다^{1,2)}. 최근 Cu합금과 스테인리스강의 접합 기술 개발이 diffusion bonding, brazing, roll bonding, explosive bonding, and hot isostatic pressing에 대하여 수행되었다³⁾. 한편, 이종재의 용접에 아주 유용한 용접법 중의 하나인 마찰용접에 의한 것으로는 K. Tsuchiya & H. Kawamura⁴⁾가 Cu-Cr-Zr과 SS316강의 마찰용접을 수행하여 기계적 성질을 조사한 바 있다.

그러나, 고온에서 사용되는 이들 마찰용접재에 대한 고온 기계적 성질이나 크리프 수명 등에 관한 연구는 거의 없다.

이들 재료는 원자로 내의 고온 및 부식과 방사선의 분위기에 노출될 뿐 아니라, 특히 고온(300~500°C)에서의 크리프가 문제로 될 수 있다. 그러므로 이들 용접재에 대한 고온의 기계적 성질은

물론, 크리프 특성 및 크리프 안전 수명 예측에 관한 연구가 필요하다.

고온 크리프에 대한 연구는 국내외적으로 현재 까지 많은 연구가 보고되고 있으나^{5,6)}, 특히 마찰용접재에 대한 고온 인장 및 크리프 특성에 대한 연구는 국내외적으로 거의 없는 실정이다. 그러므로 고온에 대한 인장 성질과 크리프 특성 및 수명을 예측할 수 있다면, 부품의 설계, 제작, 유지 및 관리 보수를 위한 중요한 참고 자료가 될 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 원자로 부품 등에 사용되는 Cu합금(Cu-1Cr-0.5Zr)과 STS316L의 봉대봉 이종재 마찰용접을 수행하여 최적 마찰용접조건을 결정하고 Cu-1Cr-0.5Zr/STS316L 마찰용접재의 고온 인장 시험과 단시간 고온 크리프 파단 시험을 수행하여, 고온 인장 및 크리프 파단 특성을 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 Cu합금(Cu-1Cr-0.5Zr)은 약 1%의 Cr과 약 0.5%의 Zr을 함유하는 합금으로 높은 강도와 우수한 열적·전기적 전도성을 가진

접수일 : 2002년 6월 11일

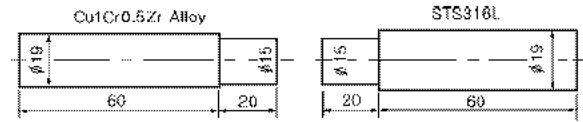
유인종 : 동명대학 기계자동화정보계열

공유식, 김선진 : 부경대학교 기계공학부

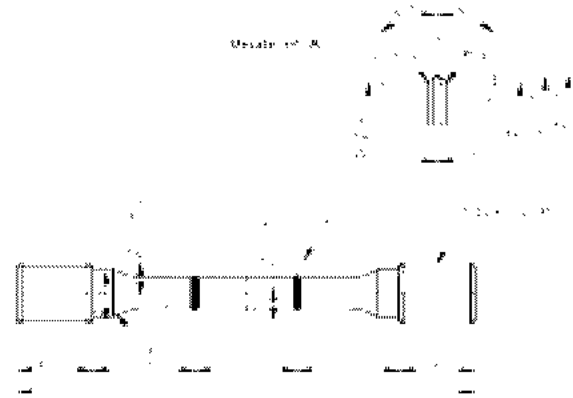
재료이다. 또한 스테인리스강(STS316L)은 저탄소 스테인리스강으로 입체부식에 강하고, Mo의 첨가로 비산화성 산에 강하고 공식에 강한 특성이 있는 재료이다. 본 연구에 사용된 이들 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. Cu합금의 인장강도는 430MPa로 STS316L강 보다 245MPa정도 낮은 강도를 가지고 있다.

Fig. 1(a)는 마찰용접시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다. 최적 마찰용접조건을 결정하는데 사용한 환봉 시험편의 직경(ϕ)은 15mm로 하였다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 사용된 고온 인장 시험편과 단시간 고온 크리프 파단 시험편의 형상 및 치수를 나타낸 것이다.

본 연구 중 마찰용접시험에 사용된 마찰용접 기계는 TOHO TH-25 연속 구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며, 크리프 시험기는 정적 및 동적 하중하의 고온 크리프 시험이 가능한 실험장치로써, 최고온도 1,093℃의 고온 크리프, 응력 및 완화시험(stress and relaxation test)과 인장 및 압축시험이 가능한 미국 SATEC사의 크리프 시험기(DLF-10, 5ton)를 사용하였다. 단시간 크리프 파단 시험의 연신은 신장계(extensometer)와 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하여 시험기 자체에 연결되어 있는 기록계를 통하여 크리프 곡선을 그렸다. 시험편의 가열공정은 두 부하상태에서 실험온도(300, 400, 500℃)까지 약 9.6℃/min으로 가열하였으며, 부하를 걸기 전에 시험로(furnace)의 온도분포가 균일하게 유지되도록 각 실험온도에서 30분간 온도를 유지시킨 후 하중을 작용시켜 크리프 파단 실험을 수행하였다. 또한,



(a) Specimens for friction welding (FW)



(b) Tensile and creep test specimen at elevated temperature

Fig. 1 Shape and dimension of test specimens

실험 중에는 실험온도의 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 실험하였으며, 초기연신율(initial strain)은 문헌^{7,8)}에 의하여 하중을 가한 후 1분이 되었을 때의 연신율로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 마찰용접의 최적화

본 실험에서 사용된 마찰용접의 변수는 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 단조가압시간(t_2) 등이며, 이중 마찰용접재 Cu-1Cr-0.5Zr/STS316L의 마찰용접을 위한 최적 마찰가열압력과 최적 단조가압력을 결정하기 위하여 여러 문헌과 실험 데이터를 참고로 하여 마찰가열시간(t_1) 3초, 가압시간(t_2) 6초, 회전수(n) 2000rpm으로 일정하게 하여 Table 3의 조건으로 마찰용접을 수행하여 Table 4와 같은 상온에서의 인장 시험 결과를 얻었다. 이 결과로부터 최적의 P_1 , P_2 는 각각 80, 140MPa로 결정되었다.

그리고 최적 마찰용접재의 모든 시험편의 파단은 Cu합금 측에서 발생하였다.

Cu-1Cr-0.5Zr/STS316L강에 대한 최적 마찰용접재의 인장강도는 Cu합금(430MPa)의 경우보다 약 8% 정도 높았다. 따라서 본 연구에서는 최

Table 1 Chemical composition of materials used (wt. %)

Comp. Mts.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Zr	Pb
Cu1Cr0.5Zr	-	-	-	0.002	-	-	0.92	-	Rem.	0.45	0.011
STS316L	0.019	0.49	1.46	0.028	0.029	12.13	16.2	2.12	0.190	-	-

Table 2 Mechanical properties of base materials

Prop. Mts.	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area Ψ (%)	Hardness (HV)
Cu1Cr0.5Zr	430	240	24.1	35	160
STS316L	675	344	49.0	73	230

적 마찰용접 조건하에서 용접된 시험편을 이용하여 다음의 검토를 행하였다.

Table 3 Friction welding conditions for Cu1-Cr0.5Zr/STS316L joints

Cu1Cr0.5Zr/STS316L	
t_1 (s)	3
t_2 (s)	6
P_1 (MPa)	20 30 40 50 60 70 80 90
P_2 (MPa)	30 40 60 80 100 120 140 160

Table 4 Results of tensile tests

Specimen (P_1, P_2)	Tensile Strength (MPa)
A(20, 30)	350
B(30, 40)	330
C(40, 60)	352
D(50, 80)	375
E(60, 100)	400
F(70, 120)	428
G(80, 140)	468
H(90, 160)	420

3.2 고온 인장강도의 특성

마찰용접재 Cu-1Cr-0.5Zr/STS316L, 모재 Cu-1Cr-0.5Zr, STS316L강에 대한 상온(20), 300, 400, 그리고 500°C에서 인장시험을 수행한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실험온도 300~600°C의 범위에서 인장강도와 온도 사이에는 거의 선형적인 상관관계가 존재하는 것처럼 보였다. 상온에서는 마찰용접재가 모재 Cu-1Cr-0.5Zr 합금의 경우보다 인장강도가 높게 나타났으나, 300°C에서 600°C의 온도범위에서는 오히려 더 낮게 나타났다. 이것은 파단이 Cu-1Cr-0.5Zr에서 일어났으며, 고온 강도면에서 Cu-1Cr-0.5Zr측이 STS316L강보다 더욱 약하기 때문인 것으로 생각된다.

다음에 Cu-1Cr-0.5Zr/STS316L 마찰용접재의 경도 변화를 Fig. 3에 나타낸다. 모재의 경도 값은 STS316L이 Cu1Cr0.5Zr보다 높게 나타났으며, STS316L측의 용접계면(weld interface)에서 최고의 경도치를 보였다. 이는 용접면 부근에서 마찰용접시 극부 가열과 급냉 및 단조 효과에

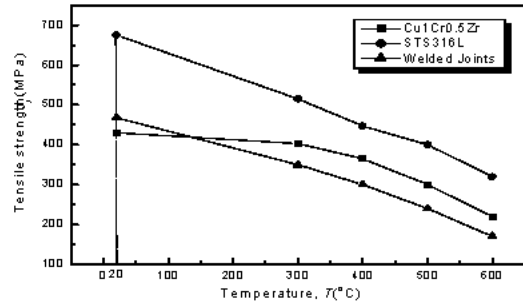


Fig. 2 Relationship between tensile strength and temperature for Cu1Cr0.5Zr, STS316L and welded joint at 20°C, 300°C, 400°C, 500°C and 600°C

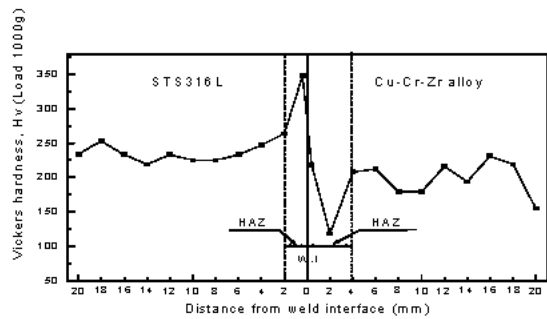


Fig. 3 Hardness change of FW joints

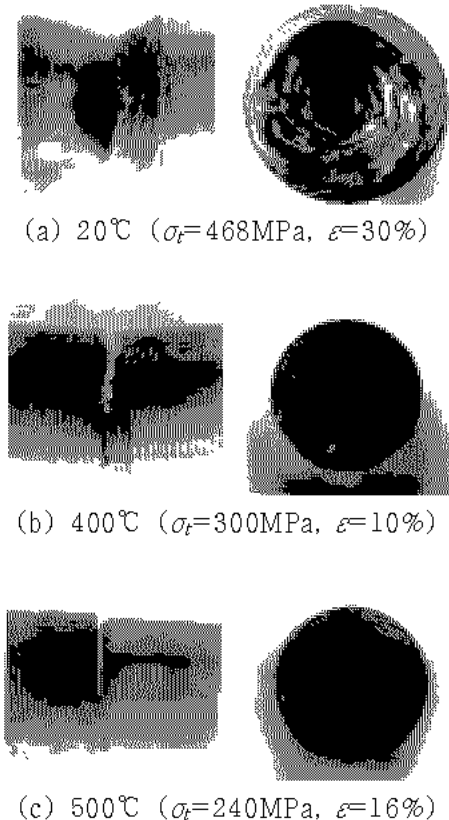


Fig. 4 Fractographs of friction welded joints

의한 경도치의 상승이라 사료된다. 그림에서 알 수 있듯이 Cu합금의 용접계면에서는 모재보다도 낮은 경도를 보이고 있다. 이는 마찰용접재의 고온에 대한 중요한 영향이 있음을 보여준다.

Fig. 4는 마찰용접재의 인장 파단의 마크로 사진을 보여준다. 연신율은 상온에서 30%, 400℃에서 10%, 500℃에서 16%로 이는 마찰열에 의한 취성화와 고온에서의 Cu합금층 열영향부의 취화로, 고온(400, 500℃)에서 상온보다 연신율이 낮은 것으로 사료되며, 500℃에서는 400℃보다 연신율이 더 높은 결과를 보였다. 이는 고온연화 현상이 일어난 것으로 사료된다. 파단면을 고찰해보면, 용접재의 경우 상온에서는 연성과 취성이 혼합된 파괴 양상을 보였고, 고온에서는 모두 연성을 나타내다가 Cu합금의 열영향부측은 취성파단을 나타내었다.

3.3 단시간 크리프 파단 거동

Fig. 5는 300, 400, 500℃의 실험온도 하의 일정 크리프 응력하에서 실험적으로 구한 단시간 크리프 파단 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 6은 이에 대한 크리프 파단 특성을 관찰한 사진이다. 그리고 Table 5는 300℃, 400℃, 500℃에서 단시간 크리프 파단 시험을 통하여 얻은 결과의 데이터들 응력(σ , MPa), 초기변형률(ϵ_0 , %), 파단시간 t_r (h)과 함께 나타내었다. 이상에서 알 수 있듯이 대체로 크리프 변형은 작용 응력이 클수록 증가함을 알 수 있고, 크리프 변형거동은 시험조건, 즉 온도, 응력 등에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 그리고 동일 온도하에서 응력이 증가함에 따라 초기연신율은 모두 증가하는 것으로 나타났다. 이는 타 재료의 마찰용접재의 경우와 같은 결과를 보여주고 있다.

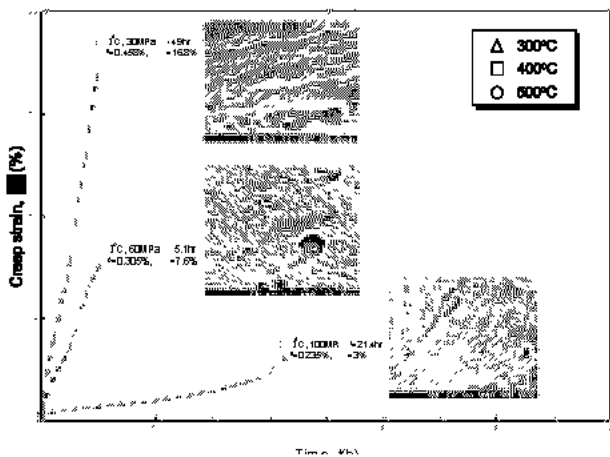
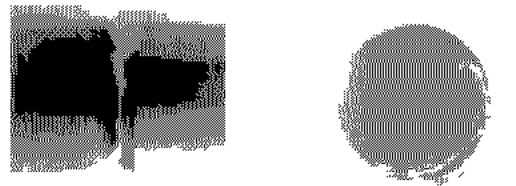


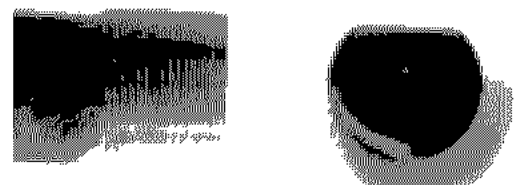
Fig. 5 Typical creep curves for the welded joint

Table 5 Test conditions and the results

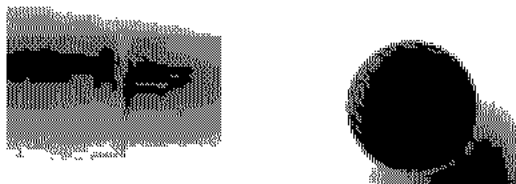
Materials	Cu1Cr0.5Zr/STS316L			$d\sigma_r$ $\times 100$	Fracture position
	Temperature	Stress	Initial strain		
T (°C)	σ (MPa)	ϵ_0 (%)	t_r (h)	(%)	
300 ($\sigma_r=350$)	140	0.387	1.3	40	Cu alloy HAZ
	120	0.286	6.2	34.3	"
	100	0.208	21.4	28.6	"
	90	0.155	72.2	25.7	"
400 ($\sigma_r=300$)	80	0.466	1.7	26.7	Cu alloy HAZ
	60	0.324	5.1	20	"
	50	0.243	16.6	16.7	"
	40	0.174	47.8	13.3	"
500 ($\sigma_r=240$)	40	0.803	1.8	16.7	Cu alloy HAZ
	30	0.545	4.9	12.5	"
	20	0.281	18.1	8.3	"
	15	0.184	40.1	6.3	"



(a) 300℃, $\sigma=100$ MPa, ($d\sigma_r=28.6\%$)
 $\epsilon=3\%$, $t_r=21.4$ h, $\epsilon_0=0.205\%$



(b) 400℃, $\sigma=60$ MPa, ($d\sigma_r=20\%$)
 $\epsilon=7.6\%$, $t_r=5.1$ h, $\epsilon_0=0.324\%$



(c) 500℃, $\sigma=30$ MPa, ($d\sigma_r=12.5\%$)
 $\epsilon=16.8\%$, $t_r=4.9$ h, $\epsilon_0=0.545\%$

Fig. 6 Typical creep fracture properties

3.4 크리프 응력과 파단시간의 관계

크리프 시험에서 응력과 파단시간과는 멱수법칙의 관계가 존재한다고 알려져 있다. Fig. 7은 마찰용접재에 대한 300, 400, 500°C에서의 크리프 응력 σ (MPa)와 파단시간 t_r (h)과의 관계를 나타낸 것이다. 단시간 크리프 파단 실험으로부터 얻은 마찰용접재에 대한 응력과 파단시간과의 관계는 각 온도별로 다음과 같이 나타내어진다.

$$300^\circ\text{C}: \log\sigma = 2.161 - 0.113\log t_r \quad (1)$$

$$400^\circ\text{C}: \log\sigma = 1.939 - 0.202\log t_r \quad (2)$$

$$500^\circ\text{C}: \log\sigma = 1.688 - 0.315\log t_r \quad (3)$$

이와 같이 본 마찰용접재의 경우에 있어서도 응력과 파단시간 사이에는 멱수법칙이 존재함을 알 수 있다. 한편, 기울기의 거동을 살펴보면 기존 단축 인장 크리프 시험에서의 기울기 거동과 동일하게 온도의 증가에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있다.

3.5 크리프 응력과 초기연신율과의 관계

Fig. 8은 크리프 응력과 초기연신율과의 관계를 나타낸다. 양대수 좌표평면상에서 직선의 상관관계가 성립함을 알 수 있다. 그림에서 초기연신율은 응력이 높아질수록 더욱 커짐을 볼 수 있다. 실험으로부터 얻은 이들의 관계식은 각 온도별로 다음과 같이 나타내어진다.

$$300^\circ\text{C}: \log\sigma = 2.346 + 0.493\log\epsilon_0 \quad (4)$$

$$400^\circ\text{C}: \log\sigma = 2.129 + 0.699\log\epsilon_0 \quad (5)$$

$$500^\circ\text{C}: \log\sigma = 1.659 + 0.657\log\epsilon_0 \quad (6)$$

식(4)~(6)에서 알 수 있듯이 초기연신율(ϵ_0)은 크리프 응력(σ)과 선형적인 정량적 상관성이 존재함을 알 수 있으며, 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬 수 있다. 이는 여러 재료에 대한 정, Oh 등의 보고^{9,10)}와 잘 일치하였다.

$$\sigma = A \epsilon_0^B$$

여기서, A, B는 재료와 온도에 의한 실험상수이다.

3.6 파단시간과 초기연신율과의 관계

Fig. 9는 Cu1Cr0.5Zr-STS316L 마찰용접재에 대한 300, 400, 500°C에서의 크리프 파단시간 t_r (h)과 초기연신율 ϵ_0 (%)과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 같은 온도에서는 초

기연신율이 증가할수록 크리프 파단시간이 감소하며, 동일 초기연신율이 약 100 h 미만일 때는 고온일수록 수명이 더욱 길게 나타나지만, 100 h 이

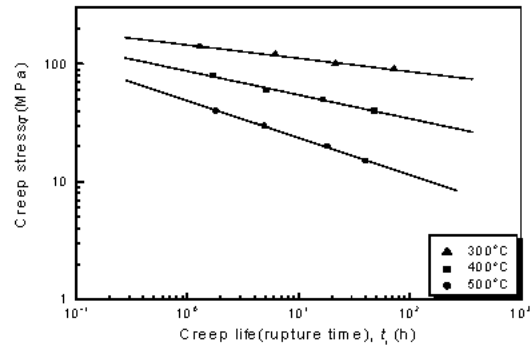


Fig. 7 Creep stress vs. creep rupture time for friction welded joints (Cu1Cr0.5Zr-STS316L) at 300, 400 and 500°C

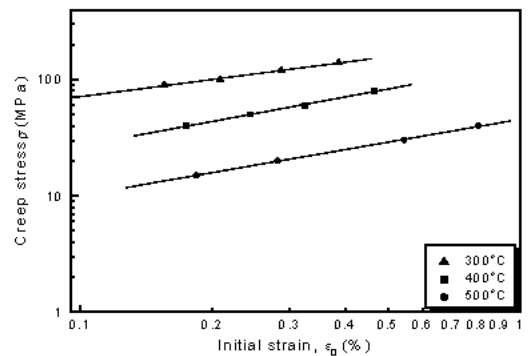


Fig. 8 Creep stress vs. initial strain for friction welded joint (Cu1Cr0.5Zr-STS316L) at 300, 400 and 500°C

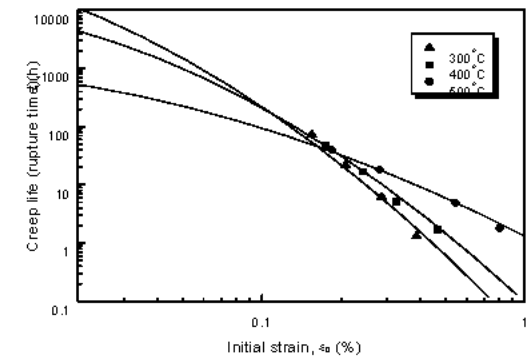


Fig. 9 Relationship of rupture time vs. initial strain for friction welded joint (Cu1Cr0.5Zr-STS316L) at 300, 400 and 500 °C

상 일 때는 그 반대이다. 각 온도에 대한 이들의 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$300^{\circ}\text{C}: \log t_r = -1.572 - 4.785 \log \epsilon_0 - 0.873 (\log \epsilon_0)^2 \quad (8)$$

$$400^{\circ}\text{C}: \log t_r = -1.013 - 4.186 \log \epsilon_0 - 0.849 (\log \epsilon_0)^2 \quad (9)$$

$$500^{\circ}\text{C}: \log t_r = 0.121 - 2.314 \log \epsilon_0 - 0.459 (\log \epsilon_0)^2 \quad (10)$$

식 (8)~(10)에서 알 수 있듯이 초기연신율과 파단시간 사이에는 어떤 정량적인 상관이 존재하는 것처럼 보였으며, 이는 Oh^{11,12)}의 연구결과와도 매우 유사하다. 그러나 초기연신율의 정의와 본 실험에 대한 외력의 크기 등에 의하여 실제 장시간에서도 이와 같이 초기연신율과 파단시간과의 상관성이 성립할 것인지는 앞으로 연구할 필요가 있다.

4. 결 론

원자로 부품용 재료인 Cu1Cr0.5Zr과 STS316L의 이중재 마찰용접을 수행하여 최적 마찰용접조건을 결정하여, 고온 인장 시험과 단시간 고온 크리프 시험을 수행하여 고온 인장 및 크리프 특성을 살펴보았다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 실험으로부터 구한 Cu1Cr0.5Zr/STS316L의 최적 마찰용접조건은 마찰가열시간 3초, 가압시간 6초, 회전수 2000rpm으로 일정하게 하여 구한 최적의 P_1 , P_2 는 각각 80, 140MPa로 결정되었다.
2. 상온에서는 마찰용접재가 모재 Cu-1Cr-0.5Zr 합금의 경우보다 인장강도가 약 8% 높게 나타났으나, 300에서 600°C의 온도범위에서는 오히려 더 낮게 나타났다. 또한 고온에서 온도의 증가에 따라 강도는 선형적으로 감소하는 경향이 있었다.
3. Cu-1Cr-0.5Zr/STS316L 마찰용접재의 경도는 STS316L측이 Cu-1Cr-0.5Zr측보다 높게 나타났으며, STS316L측의 용접계면에서 최고치를 보였다.
4. 마찰용접재에 대한 단시간 크리프 시험에서 응력과 파단시간 사이에는 멱수법칙이 존재함을 알 수 있으며, 즉 양대수 좌표평면상에서는 직선의 상관관계가 성립하였고 그 기울기는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있었다.
5. 응력과 초기연신율 사이에도 양대수 좌표평면상에서 직선의 상관관계가 성립하였으며, 초기연신율은 응력이 높아질수록 증가하였다.
6. 크리프 파단시간과 초기연신율 사이에도 어떤

상관관계가 존재하는 것처럼 보였으며, 본 실험의 동일 온도에서 초기연신율이 증가하면 파단시간이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 이에 대한 고찰이 더욱 요구된다.

참 고 문 헌

1. O. K. Harling, G. P. Yu, N. J. Grand and J. E. Meyer, Journal of Nuclear Materials pp.103~104, pp.127, 1981
2. G. J. Butterworth and C.B.A. Forty, Journal of Nuclear Materials 189, pp.237, 1992
3. Nishi, H. Y. Muto and T. Araki, NREGAL. 36, pp.432, 1994
4. K. Tsuchiya, H. Kawamura, "Mechanical Properties of Cu-Cr-Zr alloy and SS316 Joints Fabricated by Friction Welding Method," Journal of Nuclear Materials pp.233~237, pp.913~917, 1996
5. 김동운 外 5인, "12%Cr Steel Rotor 개발 보고서(I)~(II)", KHIC 기술연구 보고문집, 1986~87
6. 藤田利夫, 門馬義雄, "クリーブ破断強度外挿法精度標準化", 鐵と鋼, 第3號, pp.29~37, 1984
7. 오세규, 윤명환, 정순억, 오정환, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기실시간 예측법-(1), SUH3과 SUS303의 마찰용접 최적화와 용접재의 고응력 고온 크리프 특성", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제3호, pp.512~519, 1993
8. 오세규, 정순억, 오정환, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기실시간 예측법-(2), SCM4와 SUS304 및 그 용접재의 고응력 고온 크리프 특성과 초기 변형률의 상관성", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제3호, pp.520~526, 1993
9. 오세규 외 3인, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온크리프 수명의 초기실시간 예측법 (1), (2), (3)", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제3호, pp.512~519, pp.520, 526, 제17권, 제4호, pp.746~754, 1993
10. 정민화, 이상국, 윤병식, 오세규, 송정근, 심문식, "발전소 고온배관재료의 크리프 손상 특성 평가(3)-2.25Cr1Mo강의 크리프특성과 LMP

에 의한 크리프 수명의 예측", 한국해양공학회
1997년도 춘계학술대회 강연논문집, pp.73
~77, 1997

11. S. K. Oh, S. J. Kim and T. E. Jeon,
"Development of Long-Time Creep
Safety life Prediction of Steam Turbine
Rotor Steel and AE Evaluation : 1st
Report-Possibility of Creep Prediction
by Initial Strain Method", Proc. of 6th
Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol.4,
No.1, pp.275~279, 1996
12. 오세규, 이원석, 송정근, 이상국, 정민화, "엔
진 배기벨브의 내열강 이종재 마찰용접의 최
적화와 고온크리프의 실시간 예측 및 AE에
의한 실시간 평가(1), (2)", 한국해양공학회강
연논문집, pp.249~254, pp.281~287, 1996