

금형강의 마찰용접과 AE평가 및 고온 크리프 특성에 관한 연구

황성필* · 김일석* · 유인종* · 이연탁* · 오세규**
 * 부경대학교 대학원 ** 부경대학교 기계공학부

A Study on Friction Welding and AE Evaluation for Cold Die Steel and High Temperature Creep Properties

SUNG-PHIL HWANG* · IL-SEOCK KIM* · IN-JONG YU* · YEON-TAK LEE* · SAE-KYOO OH
 *Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea
 **School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Abstract : This paper deals with determining the proper friction welding condition and analyzing various mechanical properties of friction welded joints of the blade part heat resisting steel(STD11) for cold die punch to the shank part alloy steel(SCM440). And the in-process real-time weld quality evaluation technique by acoustic emission during friction welding of STD11 to SCM440 steels with higher confidence and reliability has been much required even though it might be the first trial approach for developing it. Also, the high temperature properties of STD11-SCM440 weld were considered in this paper.

Key word : FRW(Friction welding), HAZ(Heat affected zone), σ_t (Tensile strength), W.I(Weld interface), AE(Acoustic emission), T (Kelvin temperature, t_r (Creep rupture time)

1. 서 론

본 연구는 종래의 일반 펀치, 다이스 재료의 내구성 결여를 탈피하고, 고온(400-600°C), 내마모, 내충격체인 고가의 비자성 재료인 냉간 프레스 금형펀치나 다이캐스팅 형틀의 다이스의 날(blade)부와 고정부인 생크(shank)부를 일체형으로 사용함에 따른 고가재료의 낭비와 고정부의 기계적 가공의 난점을 탈피 개량하고 인성을 부여하기 위한 것이다. 프레스금형 펀치 날 부분은 냉간 금형강 STD11 또는 세라믹 공구재를 사용하고, 고정부는 값싸고 절삭성이 있으며 인성이 풍부한 Cr-Mo강 재료를 사용한다. 두 이종재료를 마찰용접에 의하여 금속학적 접합을 개발 성공하여 원가절감과 고온내구성과 내충격성 향상 및 펀치 고정법 간이화 달성 등 품질향상의 목적을 달성시킴으로써, 이 분야의 국제 경쟁력을 향상시킬 필요가 있다^{1, 2)}. 그러나 현재 이에 관한 연구는 전혀 없는 실정이다.

따라서 이러한 두 이종재료들의 접합을 위해 연구 개발되어 온 마찰용접 기술의 축적된 기술의 know-how³⁻⁴⁾를 적용하여 이들 이종재 마찰용접의 최적화 기술을 연구·개발함과 동시에, 냉간 금형 펀치의 마찰용접부의 고온 크리프 특성을 고찰하고, 이 마찰용접부의 품질(강도와 인성)과 고온 크리프 특성을 용접 실시시간에 음향방출법(acoustic emission)에 의해 평가할 수 있는 방법을 연구·개발하였다³⁻⁴⁾.

제 2 장 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 SCM440과 STD11의 화학조성 및 기계적 성질을 Table 2과 Table 3에 각각 나타내었다.

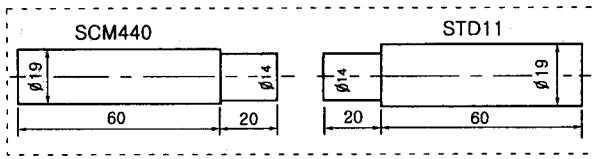
Table 1 Chemical composition(wt%) of SCM440 and STD11

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440	0.39	0.2	0.69	0.012	0.016	0.95	0.26
STD11	1.492	0.26	0.29	0.0231	0.035	11.21	0.85

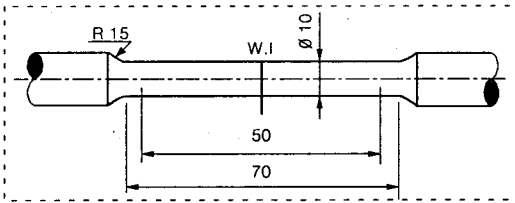
Table 2 Mechanical properties of SCM440 and STD11

Material	Tensile stress (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area ψ (%)	Hardness (H_B)
SCM440	500	17.14	-	168
STD11	713	9.07	-	227

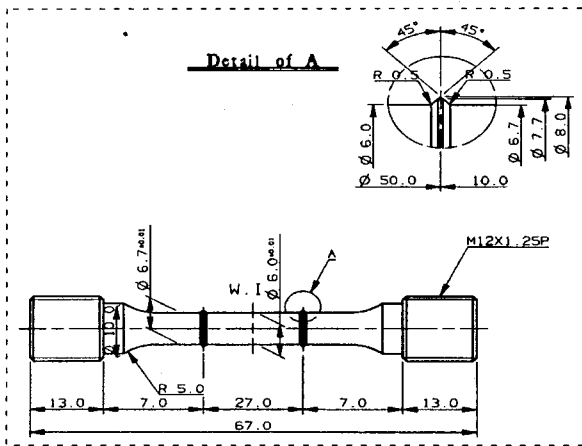
Fig. 1에서는 실험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.



(a) Friction welding and AE test specimen



(b) Room temperature tensile test specimen



(c) High tensile test and creep test specimen

Fig. 1 Shape and dimension of specimens

2.2 실험방법

Table 3 Various Condition of dissimilar friction welding of SCM440 to STD11

Case	Rotation speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Forging pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (sec)	Forging time t_2 (sec)	Total upset U_T (mm)
1	2,000	60	120	3	4	-
		80	160			-
		100	220			-
		120	240			-
2	2,000	100	220	1~5	4	0.2~10.55

마찰가열압력 P_1 , 마찰단조압력 P_2 의 최적화를 위해서 Fig. 1(a)와 같은 시험편을 사용하여 SCM440 $\phi 14$ mm 봉 대

STD11 $\phi 14$ mm 봉의 이종재 마찰용접을 수행하였다. 이 들 재료의 마찰용접조건에 적절한 조건을 찾기 위하여 여러 문헌들^{5, 6)}을 참고하여 회전수(n), 마찰가열압력(P_1), 마찰단조압력(P_2)을 계산하여 예비시험을 수행하여 최적의 P_1 , P_2 용접조건을 선정하고, 가압시간(t_2)을 선정후에 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜서 마찰용접을 실시하였다.

Table 3은 마찰용접시험의 다양한 조건들을 나타낸다.

주파수 범위의 넓은 스펙트럼을 커버하는 광범위한 발원 으로부터 AE가 발생하기 때문에 고감도 변환기용 전치증폭기(pre-amplifier)와 함께 사용하였고, AE시스템의 증폭 (gain)은 주증폭기(main amplifier)에서 35dB gain(100~300 kHz filter), 전치증폭기에서 40dB로서 합계 75dB로 고정되 었고, 외부소음을 제거하기 위해 문턱값(threshold voltage) 을 1.0V로 설정하여 실험하였다. 본 실험에서는 초기 AE량 과 용접강도와와의 상관실험식을 만들기 위하여 용접 시작부 터 용접 완료 중에 검출된 초기 AE누적량에 관하여 해석하 였다.

제 3 장 결과 및 고찰

3.1 마찰용접의 최적화

3.1.1 마찰용접조건에의 영향

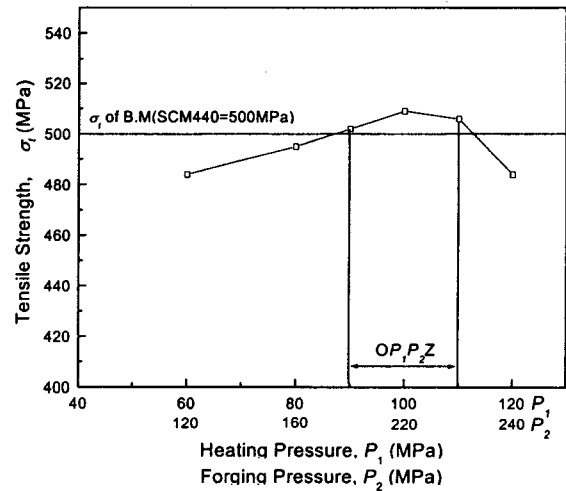


Fig. 2 σ_t , vs. P_1 , P_2 in dissimilar friction welding of SCM440 to STD11

Welding condition : as shown in Table 3 (Case 1) ($\phi 14$ bar- $\phi 14$ bar)

이 실험에서 사용된 마찰용접의 변수는 회전수(n), 마찰가 열압력(P_1), 단조가압력(P_2), 마찰가열시간(t_1), 단조가압시간

(t_2)등이며, 이종재 SCM440과 STD11의 마찰용접을 위한 최적 가열압력 P_1 과 최적 단조가압력 P_2 를 결정하기 위하여 여러가지 문헌과 실험 데이터^{5, 6)}를 참고로 마찰가열시간 $t_1=3\text{sec}$, 가압시간 $t_2=4\text{sec}$, 회전수 $n=2000\text{rpm}$ 으로 일정하게 하고 Table 3(Case 1)과 같이 마찰용접 조건을 변화시키면서 마찰용접을 수행하였다.

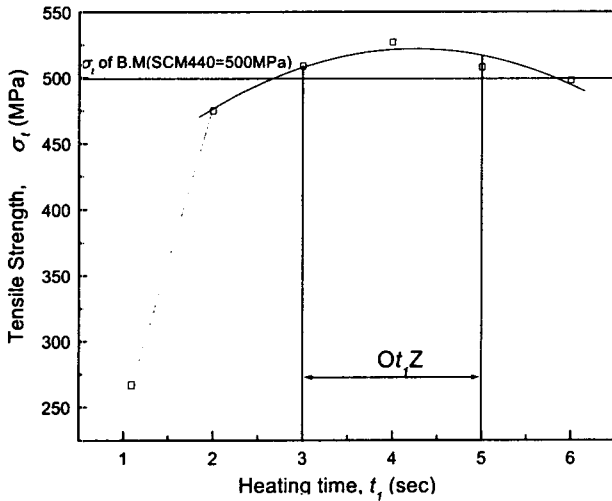


Fig. 3 σ_t vs. t_1 in dissimilar welding of SCM440 to STD11($\phi 14$ bar- $\phi 14$ bar)
Welding condition : as shown in Table 3 (Case 2)

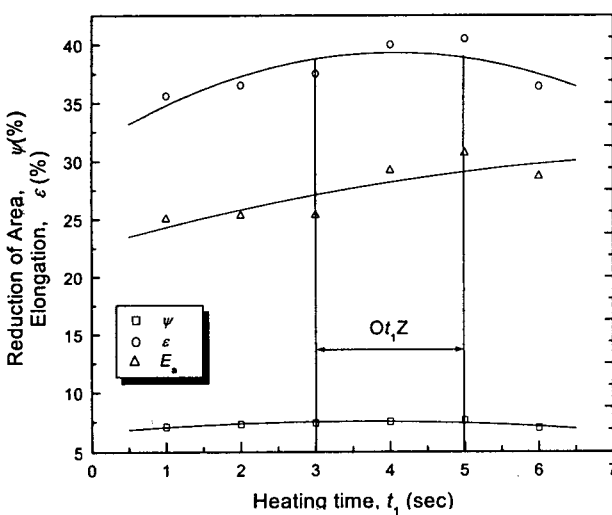


Fig. 4 E_a , ψ , ϵ vs. t_1 in dissimilar friction welding of SCM440 to STD11($\phi 14$ bar to $\phi 14$ bar)
Welding condition : as shown in Table 3 (Case 2)

3.1.2 마찰용접조건과 용접부 강도(인장강도)와의 상관성

Fig. 3은 Table 3(Case 2)과 같은 조건에서 $\phi 14\text{mm}$ 봉인 SCM440과 $\phi 14\text{mm}$ 봉인 STD11강을 마찰용접한 이종재 마찰용접재의 인장강도 $\sigma_t(\text{MPa})$ 와 가열시간 $t_1(\text{sec})$ 과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 용접재의 인장강도는 이종재중 낮은 쪽 인장강도인 SCM440모재($\sigma_t=500\text{MPa}$)에 대해 이음효율이 100% 이상인 값을 나타내는 구간인 $t_1=3\sim 5\text{sec}$ 를 마찰가열최적시간(Ot_1Z)으로 정하였다.

$$\sigma_t = -8.929t_1^2 + 75.929t_1 + 360.4 \quad (R^2 = 0.91) \quad (1)$$

3.1.3 마찰용접조건과 용접부 인성(흡수에너지, 연신률, 단면수축률)과의 상관성

Table 3(Case 2)의 용접조건에 따라 용접한 용접재의 인장시험을 한 후 마찰가열시간 t_1 에 대한 용접부의 흡수에너지, 단면수축율, 연신률과의 상관관계를 Fig. 4와 같이 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 3에서 구한 $Ot_1Z(3\sim 5\text{sec})$ 에서 인성(인장흡수에너지, 단면수축율, 연신률)이 높게 나타나므로, $Ot_1Z = 3\sim 5\text{sec}$ 는 강도와 인성면에서 모두 우수한 범위를 알 수 있다.

3.2 내열강 이종재의 마찰용접 조건과 AE와의 상관성

3.2.1 마찰용접조건과 AE와의 상관성

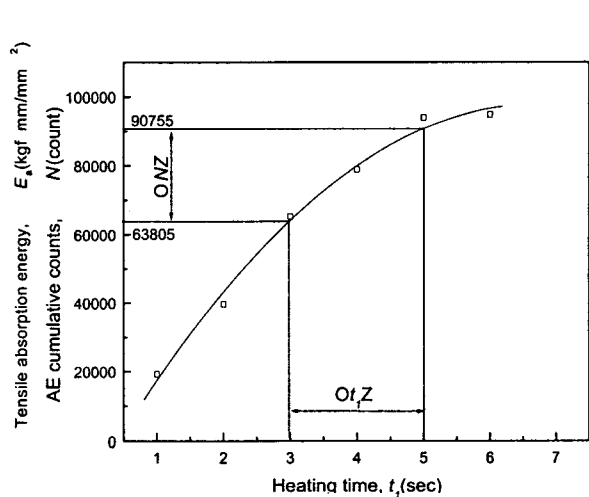


Fig. 5 N vs. t_1 in dissimilar friction welding of SCM440 to STD11($\phi 14$ bar to $\phi 14$ bar)
Welding condition : as shown in Table 3 (Case 2)

Fig. 5는 Table 3(Case 2)와 같은 용접조건하에서의 마찰용접 중 AE시험을 수행하여, 용접시작에서 용접종료까지의

AE누적총량 N 을 구한 결과로 t_1 의 증가와 더불어 AE량도 증가하는 양상을 보이고 있다. Fig. 3에서 구한 $0t_1Z(3\sim 5\text{sec})$ 에서의 AE 총량(N)은 63805~90755(count)으로 확인되었다. 이때의 AE총량 $N(\text{counts})$ 과 $t_1(\text{sec})$ 사이의 $N-t_1$ 관계 실험식은 다음과 같다.

$$N = -2495.018t_1^2 + 33318.382t_1 - 13414.9 \quad (R^2=0.99) \quad (2)$$

3.2.2 용접부 강도와 AE와의 상관성

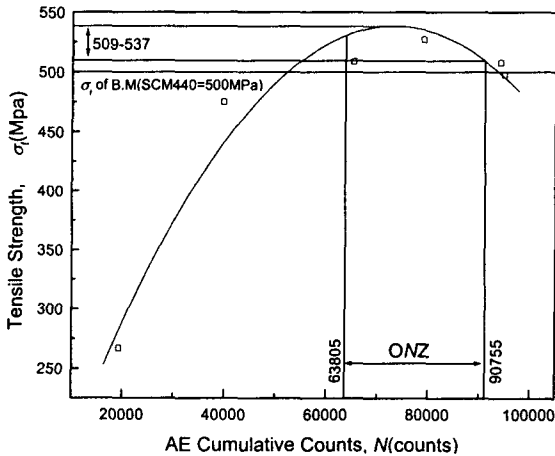


Fig. 6 σ_t vs N in dissimilar friction welding of SCM440 to STD11($\phi 14$ bar to $\phi 14$ bar)
Welding condition : as shown in Table 3(Case 2)

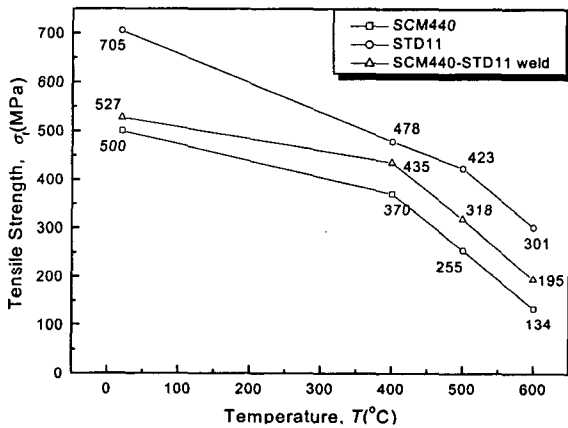


Fig. 7 Relationship of tensile strength vs. temperature for SCM440-STD11 welded joints and SCM440, STD11 base metals at 20°C, 400°C, 500°C and 600°C

Table 3(Case 2)과 같은 용접조건으로 마찰용접할 때 용접부 강도 및 AE 총량과의 상관관계는 Fig. 6과 같다.

이때의 σ_t-N 관계식은 다음과 같이 구해졌다.

$$\sigma_t = 64.716 + 0.013N - 8.881 \times 10^{-8}N^2 \quad (R^2=0.95) \quad (3)$$

3.3 마찰용접재의 크리프 특성

3.3.1 고온 인장강도 특성

Fig. 7은 마찰용접재 SCM440-STD11강에 대하여 상온(20°C), 400, 500, 600에서 인장시험을 수행한 결과를 나타낸다.

3.3.2 크리프 곡선

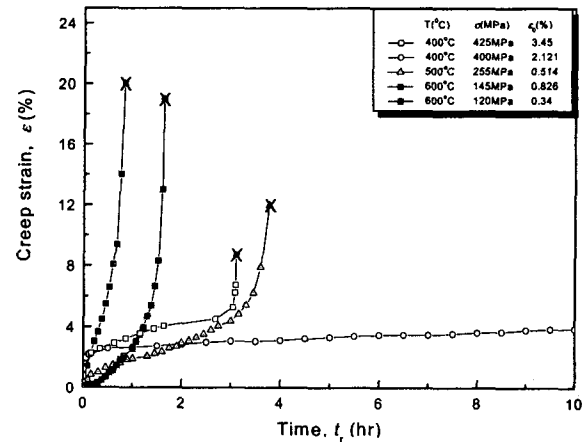


Fig. 8 Typical creep curves for frictional welded joint(SCM440-STD11) at 400°C, 500°C and 600°C
Welding condition : $n=2000$ rpm, $P_1=100\text{MPa}$, $P_2=220\text{MPa}$, $t_1=4\text{sec}$, $t_2=4\text{sec}$

마찰용접 최적조건하에서 용접된 SCM440-STD11 용접재의 고온 크리프시험을 수행하였다. 각각의 온도 400, 500, 600°C 하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 SCM440-STD11 용접재의 대표적 크리프 곡선은 Fig. 8에 표시한 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 온도나 하중하에서, 온도 또는 하중이 증가함에 따라서 크리프속도(creep rate)와 전 크리프 변형률(total creep strain)(ϵ_T)이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 초기변형률(ϵ_0)도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 크리프 수명은 반대로 감소하고 있다.

Table 4는 400°C, 500°C, 600°C에서 Fig. 8과 같이 크리프 시험을 실시한 결과의 데이터를 정리하여 응력(σ , MPa), 초기연신률(ϵ_0 , %), 정상 크리프 속도($\dot{\epsilon}$, %/s), 전 크리프 속도($\dot{\epsilon}_T$, %/s), 전 크리프 연신률(ϵ_T , %) 및 파단시간(t_r ,

hr)을 나타내고 있다. 이 모든 값들은 실험에 의해 구하여진 값들이다.

Table 4 Data of creep test of friction welded joint STD11-SCM440 under uni-axial and base metals

Mtls.	Temp	Stress	Initial Strain	Steady state creep rate	Total creep rate	Total strain	Rupture time	σ/σ_t
	°C	σ (MPa)	$\epsilon_d(\%)$	$\dot{\epsilon}(\%/h)$	$\dot{\epsilon}_T(\%)$	$\epsilon_T(h)$	$T_r(h)$	(%)
FRW Joints SCM440 -STD11	400	435	(Short-time tensile σ_t)		-	-	$<10^{-1}$	100
		425	4.162	1.526	2.8	8.6888	3.1	97.7
		400	1.673	0.003	0.25	10.388	41.55	91.9
		390	0.976	6.85×10^{-4}	0.14	13.783	98.45	89.7
		(270)	-	-	-	-	(10^4)	62.1
	500	318	(Short-time tensile σ_t)		-	-	$<10^{-1}$	100
		255	0.514	0.461	3.17	11.729	3.7	80.2
		200	0.11	0.012	1.089	16.585	15.23	62.9
		175	0.039	0.002	0.54	18.729	34.62	55
		(50)	-	-	-	-	(10^4)	15.7
	600	195	(Short-time tensile σ_t)		-	-	$<10^{-1}$	100
		145	0.826	18.034	24.284	20.034	0.825	74.4
		120	0.34	7.28	11.68	19.038	1.63	61.5
		70	0.029	0.59	1.315	17.884	13.60	35.9
		(15)	-	-	-	-	(10^4)	7.7

3.3.3 정상 크리프 속도와 크리프 응력과의 상관성

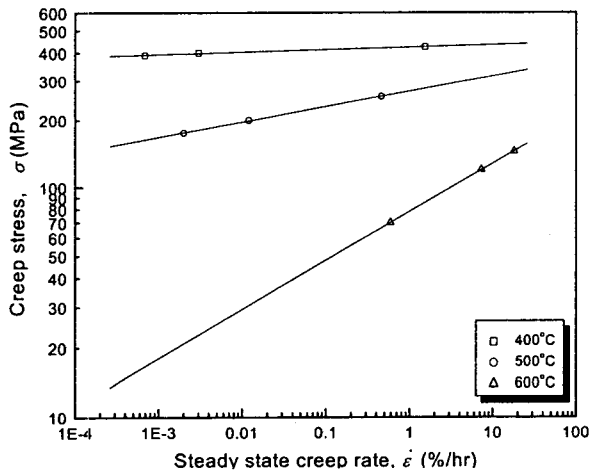


Fig. 7 Relationship of stress versus steady state creep rate of SCM440 -STD11 weld at 400°C, 500°C and 600°C

Fig. 7은 400, 500, 600°C에서의 크리프 시험결과에서 크리프 응력 σ (MPa)과 정상 크리프 속도 $\dot{\epsilon}$ (%/h)와의 상관성을 나타내는 그림이다.

양대수 직교 좌표 평면에서 정상 크리프 속도는 응력이 높아질 수록 직선적으로 증가하며, 온도가 상승할 수록 그 증가율이 높아지고 있음을 알 수 있다.

양대수 좌표평면상에서 직선적 상관성을 나타내고 있는 σ - $\dot{\epsilon}$ 의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

400°C : $\log \sigma = 2.627 + 0.011 \log \dot{\epsilon}$ ($R^2=0.99$) (4)

500°C : $\log \sigma = 2.431 + 0.069 \log \dot{\epsilon}$ ($R^2=0.99$) (5)

600°C : $\log \sigma = 1.894 + 0.213 \log \dot{\epsilon}$ ($R^2=0.99$) (6)

3.3.4 고온 크리프 응력과 파단수명과의 상관성

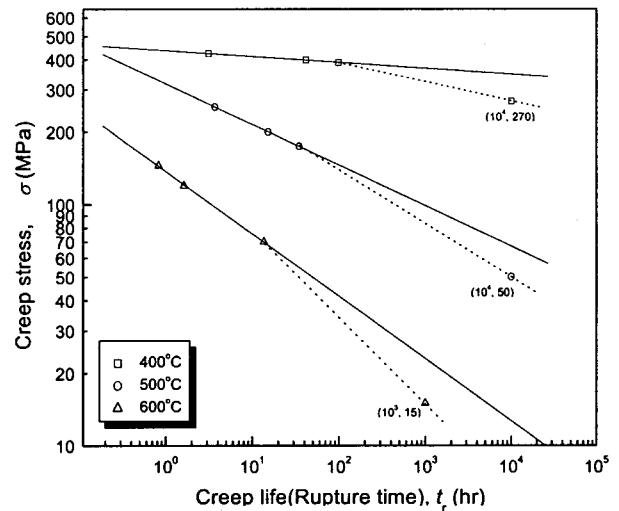


Fig. 8 Creep stress vs. creep life(rupture time) for SCM440-STD11 weld at 400, 500 and 600°C

Fig. 8은 400, 500, 550, 600°C에서의 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과로서, 크리프 설계 곡선(creep design curve)이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할 수록 감소하며, 온도가 상승할 수록 그 감소율이 더욱 심각함을 알 수 있을 것이다. 이들의 정량적 상관 관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

400°C : $\log \sigma = 2.641 - 0.025 \log t_r$ ($R^2=0.99$) (7)

500°C : $\log \sigma = 2.502 - 0.1693 \log t_r$ ($R^2=0.99$) (8)

600°C : $\log \sigma = 2.137 - 0.258 \log t_r$ ($R^2=0.99$) (9)

식(7)~(9)는 양대수 좌표평면에서 직선으로 나타나며, 온도 400, 500, 600°C에서 응력이 결정되면 단기간 실험을 통하여 외삽에 의해 장기간의 크리프 수명을 예측할 수 있으나(10^3 h까지는 대체로 안전) 고온일 수록 장기간($10^3 \sim 10^5$ h)에서는 실제 수명(Fig. 8에서 점선의 경우)이 계산 예측치

보다 훨씬 단축되므로, 장기간 예측은 매우 위험할 것으로 생각된다.

3.3.5 초기 변형률과 고온 크리프 특성과의 상관성

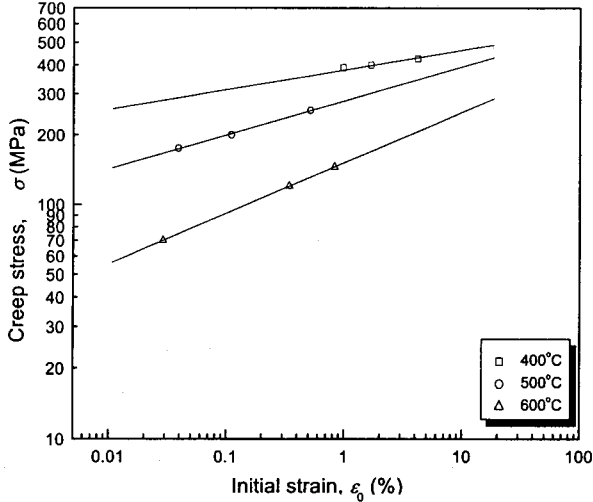


Fig. 9 Relationship of creep stress versus initial strain of friction welded joint of SCM440-STD11 at 400°C, 500°C and 600°C

Fig. 9는 마찰용접재 SCM440-STD11 용접재의 크리프 응력 σ (MPa)와 초기 연신률 ϵ_0 (%)과의 상관성을 나타내며, 양대수 좌표평면상에서 서로 선형적이다. 그림에서 초기 연신률은 응력이 높아질수록 증가하고, 온도가 상승할수록 그 증가률도 더욱 상승함을 알 수 있다.

이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$400^\circ\text{C} ; \log \sigma = 2.560 + 0.085 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 0.94) \quad (10)$$

$$500^\circ\text{C} ; \log \sigma = 2.447 + 0.147 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 0.99) \quad (11)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \sigma = 2.180 + 0.218 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 0.99) \quad (12)$$

식 (10)~(12)에서 초기 연신률은 크리프 응력과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화시킬 수 있으며, 이는 여러 재료에 대한 Oh 등의 보고⁸⁻⁹⁾와 모두 잘 일치한다. 이를 일반화하면 다음과 같다.

$$\sigma = A \epsilon_0^B \quad (13)$$

여기서, A, B는 재료와 온도의 함수이다.

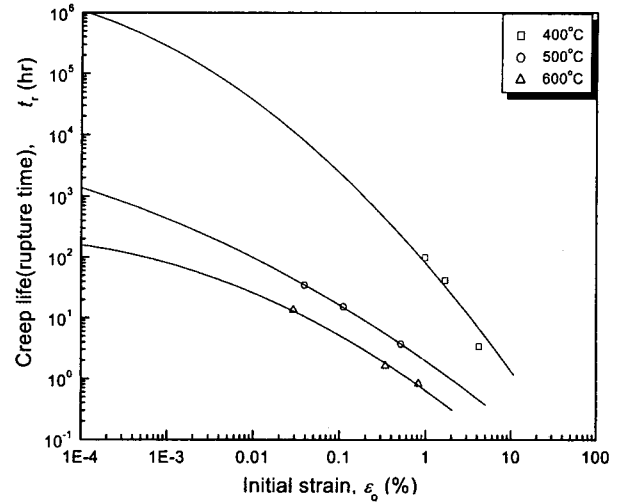


Fig. 10 Relationship of rupture time versus initial strain of SCM440-STD11 weld at 400°C, 500°C and 600°C

Fig. 10은 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과 초기 연신률 ϵ_0 (%)과의 상관관계를 나타내며, 양대수 좌표평면상에서 2차 함수적 관계가 있다. 그림에서 초기 연신률이 증가할수록 크리프 수명이 감소하며, 그 감소률도 온도가 상승할수록 더욱 급격함을 알 수 있다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

400°C :

$$\log t_r = 1.895 - 1.628 \log \epsilon_0 - 0.149 (\log \epsilon_0)^2, \quad (R^2 = 0.99) \quad (14)$$

500°C :

$$\log t_r = 0.291 - 0.987 \log \epsilon_0 - 0.069 (\log \epsilon_0)^2, \quad (R^2 = 0.99) \quad (15)$$

600°C :

$$\log t_r = -0.194 - 1.008 \log \epsilon_0 - 0.103 (\log \epsilon_0)^2, \quad (R^2 = 0.99) \quad (16)$$

식 (14)~(16)에서 초기 연신률은 크리프 수명과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화시킬 수 있으며, 이는 여러 재료에 대한 Oh 등의 보고⁸⁻¹⁰⁾에서는 $\log t_r$ 이 $\log \epsilon_0$ 의 1차식으로 표시되었으나 여기서는 2차식으로 표시된 것이 서로 다르다.

식 (14)~(16)은 $\log t_r - \log \epsilon_0$ 가 2차 함수적 관계식이므로 다음과 같이 모델화시킬 수 있다.

$$\log t_r = \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 \quad (17)$$

$$\text{즉, } t_r = A' \epsilon_0^{B+C \log \epsilon_0} \quad (18)$$

여기서, A', B', C'는 재료와 온도의 함수이다.

제 5 장 결 론

금형강에 사용되는 SCM440과 STD11의 봉(φ14) 대 봉(φ14) 이중재 마찰용접을 수행한 연구결과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(1) 두 이중재의 인장시험에서 인장강도가 약한 SCM440측의 열영향부에서 파단이 되었고, 최적 마찰용접 조건에서의 용접부 이음효율은 모재의 강도(SCM440=500MPa)에 비교해 볼 때 100% 이상을 나타내었으며, 용접강도, 인성을 고려한 최적 마찰용접 조건은 다음과 같다.

$n=2,000 \text{ rpm}$, $P_1=100 \text{ MPa}$, $P_2=220 \text{ MPa}$, $t_1=3\sim 5\text{sec}$, $t_2=4 \text{ sec}$

(2) 적정 마찰가열시간 t_1 이 3~5sec일 때, 용접실시간에 용접시작에서 종료까지 측정된 AE 누적총량 $N(\text{count})$ 의 범위는 $N = 63805\sim 90755 \text{ counts}$ 이었고, 이때의 인장강도 $\sigma_t(\text{MPa})$ 는 이음효율 100% 이상을 나타낸 509~537 MPa 이었다.

$$\sigma_t = -8.881 \times 10^{-8} N^2 + 0.013N + 64.716$$

(3) 고온 크리프응력과 파단수명과의 사이에는 양대수 좌표평면에서 직선으로 나타나며, 단기간 실험을 통하여 외삽에 의해 장기간의 크리프 수명을 예측할 수 있으나, 고온일 수록 장기간에서는 실제 수명이 훨씬 단축되므로, 장기간 예측은 매우 위험할 것으로 생각된다.

(4) 초기연신률과 크리프 응력, 파단시간사이에는 양대수 좌표평면에서 선형적인 정량적 상관성이 존재한다. 따라서, 온도, 응력, 초기연신률을 알 때, 크리프수명(크리프파단시간)의 예측이 가능하다.

참 고 문 헌

- 1) (주)한국금형정보센터, "월간 금형저널", 92년 6월호, p.102-104, 140-146, 1992.
- 2) 최재찬, 김병민, "퍼스날 컴퓨터에 의한 냉간단조공정 및

금형설계의 자동화에 관한 연구(1)," 대한기계학회 논문집, 12-4, p.712-720, 1988.

3) 오세규(1982), "어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)", 대한 기계학회지, 제 22권, 제 3호, p.184~190, 202.

4) Oh, S. K., S. J. Kim, T. E. Jeon(1996), "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", Proceedings of 6th(1996 International Offshore and Polar Engineering Conf., ISOPE, LA, p.275-279

5) 오세규, 장홍근, 이향동, 신국식, 정문식, 송윤섭, "로켓모터용 노즐의 동종재 마찰용접의 최적화와 고온 크리프 예측 및 AE평가(2)-고온 크리프 예측 및 AE평가", 한국해양공학회 추계 학술강연 논문집, p. 90-96, 1996

6) 오세규, 장홍근, 장지훈, "Cr-Mo강의 마찰용접 최적화와 음향방출법에 의한 실시간 비파괴적 평가", 한국비파괴 검사학회지, 제 15권 제 4호, p. 511-519, 1995

7) Oh, S. K., H. K. Chang and J. W. Oh, "Development of Real Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission ; 2nd Report - Effects of Welding Parameters on Weld Strength and AE", Proc. Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, p.177-184, 1996

8) 오세규, "국산 내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 Creep 수명의 초기실시간 예측법개발", 학술진흥재단 지원 연구결과 보고서(87-89), p.11-153, 1989.

9) 오세규, 윤명환, 정순억, 오정환, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온Creep 수명의 초기 실시간 예측법-(1), SUH3과 SUS303의 마찰용접 최적화와 용접재의 고온력 고온Creep 특성", 대한 기계학회 논문집, 제 17권 제 3호, p.512-519, 1993.

10) 오세규, 정순억, 오정환, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 Creep 수명의 초기 실시간 예측법-(2), SCM4와 SUS304 및 그 용접재의 고온력 고온 Creep 특성과 초기 변형률의 상관성", 대한 기계학회 논문집, 제 17권 제 3호, p.520-526, 1993.