

Cr-Mo강 봉 대 봉 동종재 마찰용접시의 AE와 용접강도의 상관성에 관한 연구

Study on Relationship between Weld Strength and AE for Friction Welding of Cr-Mo steels bar-to-bar

장지훈**, 오세규*, 김현필**, 이경우**, 박형동**

* 부산수산대 공대 기계공학과, 부산

** 부산수산대 대학원 기계공학과, 부산

1. 서론

마찰용접은 두 접합면이 높은 가압력하에서 회전 마찰하는 동안 마찰열에 의해 소성유동을 수반하여 결합하는 고상용접이다. 따라서 다른 용접법에 비해 용접비용과 용접생산성이 훨씬 우수하며, 용접부의 정확한 치수제어가 가능하다.

본 연구는 유공압 밸브스플래시로 이용되는 Cr-Mo강인 SCM415 및 SACM645의 $\phi 24$ 봉 대 봉 마찰용접의 최적 용접조건을 구하고, 이들 마찰용접강도와 인성의 최적 범위를 구할 수 있는 AE량의 범위를 실험적으로 도출하여, AE에 의해 마찰용접품질(강도와 인성)을 용접작업 실시간 중에 평가할 수 있는 방법을 개발함을 목적으로 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험재료는 Cr-Mo강인 SCM415강과 SACM645강이다.

마찰용접 최적화 실험에서는 시간조정법을 채택하여 $\phi 24$ 봉 대 봉 동종재 마찰용접을 행하였으며, 이와 병행하여 AE시험기를 부착해서 AE총량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접변수간 상관관계

Fig.1은 SCM415 및 SACM645의 마찰용접을 수행한 결과이다. 이 경우 후술할 3.2절의 마찰용접 최적화를 위한 시험결과를 참작하여 최적 용접조건이 $n=2000\text{rpm}$, $P_1=7\text{kgf/mm}^2$, $P_2=10\text{kgf/mm}^2$, $t_2=5\text{sec}$ 일 때, SCM415 및 SACM645의 $O_{t_1}Z_1$ (optimum t_1 zone for SCM415), $O_{t_1}Z_2$ (optimum t_1 zone for SACM645)가 각각 $t_1=7\sim 9\text{sec}$, $t_1=10\sim 12\text{sec}$ 이며, 이때 총열량 U_T 는 Fig.1에서 각각 $5.9\sim 8.0\text{mm}$, $4.7\sim 6.1\text{mm}$ 이고 가열열량 U_1 는 각각 $3.5\sim 5.3\text{mm}$, $3.2\sim 4.4\text{mm}$ 로 나타났다. 이 경우 U_T-t_1 , U_1-t_1 의 관계식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SCM415 : } U_T = 1.06t_1 - 1.51 \quad (R^2=0.99) \quad (1)$$

$$U_1 = 0.85t_1 - 2.41 \quad (R^2=0.99) \quad (2)$$

$$\text{SACM645 : } U_T = 0.72t_1 - 2.50 \quad (R^2=0.99) \quad (3)$$

$$U_1 = 0.58t_1 - 2.52 \quad (R^2=0.99) \quad (4)$$

여기서, R^2 은 실험식의 기여율(奇與率, coefficient of determination)이다.

t_1 의 증가에 따라 U_1 , U_2 가 직선적으로 증가하는 것은 다른 재료의 마찰용접의 경우^{1,2,3,4}와 매우 일치한다. 그 원인은 t_1 의 증가에 따른 용접 입열량의 증가에 기인한다. 재료 특성에 따라, 즉 경도나 강도가 높은 재료일수록 열량증가율이 낮게 나타났다. 그 이유는 경도나 강도가 높으면 마찰가열 온도에 의한 소성유동에 대해 저항이 크기 때문이라고 생각된다.

3.2 마찰용접의 최적화 해석

Fig.2는 SCM415 및 SACM645 마찰용접의 Fig.1과 같은 용접조건하에서 변수 t_1 의 증가

에 따른 용접이음부에 대한 인장강도 σ_t 의 분포가 3차식의 정량적 관계가 있음을 보여준다. SACM645 용접재가 SCM415 용접재의 경우보다 이음강도가 높게 나타났으나, 이음효율 100% 이상의 t_1 범위는 그 반대로 SCM415 용접재의 경우가 더 넓게 나타났다. 이 이유는 SACM645 모재의 인장강도와 경도등이 SCM415보다 높고 탄소함량도 더 많은 것이 원인이 된 것으로 생각된다. SCM415 용접재와 SACM645 용접재의 이음효율 100% 이상인 t_1 의 최적범위인 $O_{t_1Z_1}$ 는 실험치의 스캐터를 고려하여 각각 $O_{t_1Z_1}=7\sim 9\text{sec}$, $O_{t_1Z_2}=10\sim 12\text{sec}$ 인 것으로 확인될 수 있다. 이 때 σ_t-t_1 의 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SCM415} : \sigma_t = 0.08t_1^3 - 2.25t_1^2 + 20.32t_1 - 2.63 \quad (5)$$

$$\text{SACM645} : \sigma_t = 0.06t_1^3 - 2.3t_1^2 + 25.99t_1 - 29.09 \quad (6)$$

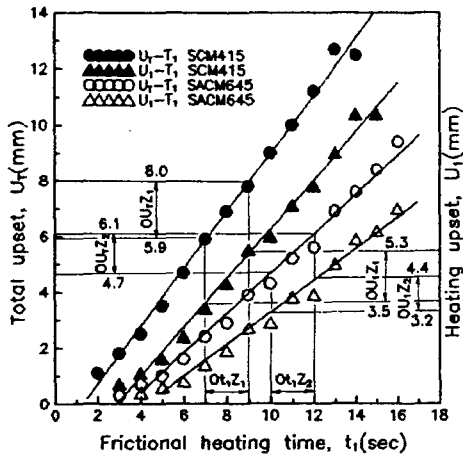


Fig.1 U_T-t_1 and U_1-t_1 as friction welding

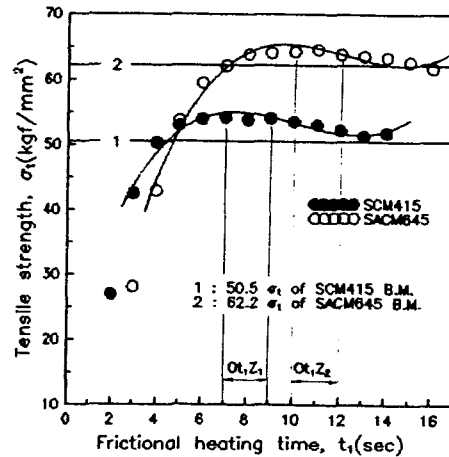


Fig.2 σ_t-t_1 of friction welded joints

한편 용접부의 인성(샤르피 충격치 $I \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$)과 마찰가열시간($t_1 \text{ sec}$)의 상관성을 실험적으로 조사한 결과는 Fig.3에서 2차함수적 상관성이 있음이 밝혀졌으며, 그 상관식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SCM415} : I = -0.048 t_1^2 + 0.797 t_1 + 19.40 \quad (7)$$

$$\text{SACM645} : I = -0.075 t_1^2 + 2.099 t_1 + 8.60 \quad (8)$$

Fig.2에서의 이음부의 강도가 이음효율 100%를 넘는 t_1 의 최적범위인 $O_{t_1Z_1}$ 과 $O_{t_1Z_2}$ 는. Fig.3에서 어느 용접재에서도 모재보다 높은 충격치를 갖고 있으므로 충분한 강도와 인성을 나타내는 최적 t_1 의 범위임을 알 수 있다.

용접재 이음부의 강도 특성을 고찰해 볼 때, 인장강도와 충격치는 SCM415 용접재와 SACM645 용접재 모두 모재보다 더욱 높은(이음효율 100% 이상) σ_t , I 를 갖는 마찰 가열 시간 t_1 의 범위가 존재함이 확인되었다. 이는 용접부의 강도와 인성을 동시에 가질 수 있는 우수한 용접이 얻어졌다는 것을 의미하므로 이러한 t_1 의 범위 $O_{t_1Z_1}$ 및 $O_{t_1Z_2}$ 가 최적 용접조건이 됨을 의미한다.

Fig.2에서의 마찰용접 이음부 인장강도의 분포와 Fig.3에서의 이음부의 인성(샤르피 충격치)의 분포가 t_1 의 증가와 더불어 각각 100% 이상의 이음효율에 해당되는 점을 고려해 볼 때, SCM415 및 SACM645의 마찰용접의 최적조건은 각각 다음과 같다.

SCM415 : $n=2000\text{rpm}$, $P_1=7$, $P_2=10\text{kgf/mm}^2$, $t_2=5\text{sec}$ 일 때, $t_1=7\sim 9\text{sec}$
 SACM645 : $n=2000\text{rpm}$, $P_1=7$, $P_2=10\text{kgf/mm}^2$, $t_2=5\text{sec}$ 일 때, $t_1=10\sim 12\text{sec}$

Fig.3에서 σ_t 에 의한 t_1 의 최적범위인 $O_{t_1}Z_1$ 에 속한 용접재의 샤르피 충격치의 모재에 대한 강도비가 SCM415와 SACM645의 경우에 각각 약 102.3%, 104.7%였으며, 인장강도의 경우는 Fig.2에서 각각 약 108.9%, 104.5%였다. 따라서 다른 자료^{1,2,3,4)}와 비교해서 본 실험의 결과, 매우 우수한 용접부를 얻었다고 할 수 있으며, 상기 용접조건도 최적이라 할 수 있다.

3.3 마찰용접시의 AE와 용접강도의 상관성

Fig.4는 마찰용접시(용접조건은 Fig.1과 동일) AE시험을 병행하여, 마찰가열시간 t_1 에 따른 AE총량 N 의 변화를 실험한 결과이다. t_1 의 증가에 따라 N 은 대수함수적으로 증가함을 알 수 있으며, 이 때, $N-t_1$ 의 상관식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{SCM415 : } N = 22.68 \times 10^3 \ln t_1 + 14.35 \times 10^3 \quad (9)$$

$$\text{SACM645 : } N = 27.95 \times 10^3 \ln t_1 - 14.35 \times 10^3 \quad (10)$$

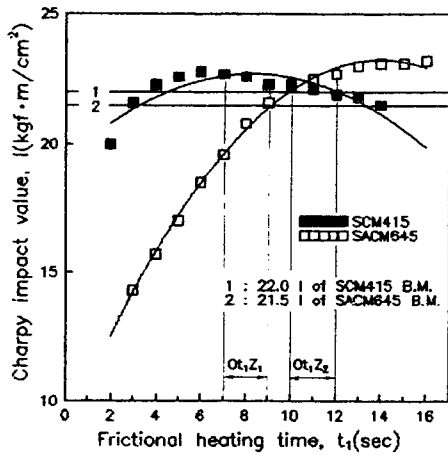


Fig.3 I- t_1 of friction welded joints

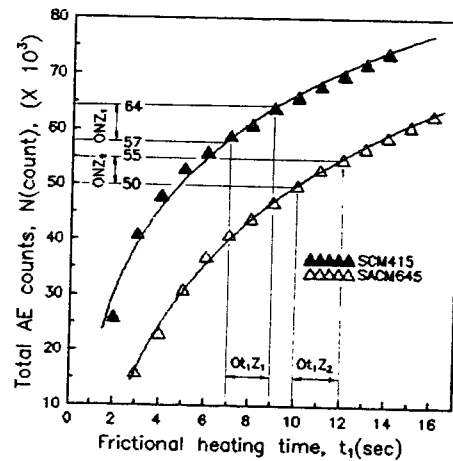


Fig.4 N- t_1 of friction welded joints

SCM415의 $O_{t_1}Z_1$ 에서 ONZ_1 (optimum N zone)은 약 $(57\sim 64) \times 10^3$ counts이며, SACM645의 $O_{t_1}Z_2$ 에서 ONZ_2 는 약 $(50\sim 55) \times 10^3$ counts임이 확인되었다.

Fig.5는 마찰용접시(용접조건은 Fig.1과 동일) 이음부 인장강도 σ_t 와 AE총량 N 의 상관성을 조사한 결과이다. 이때 σ_t-N 의 상관식은 다음과 같다.

$$\text{SCM415 : } \sigma_t = -0.02 \times 10^{-6} N^2 + 2.59 \times 10^{-3} N - 26.85 \quad (R^2=0.99) \quad (11)$$

$$\text{SACM645 : } \sigma_t = -0.03 \times 10^{-6} N^2 + 3.12 \times 10^{-3} N - 14.58 \quad (R^2=1.00) \quad (12)$$

Fig.4에서 구한 SCM415의 $O_{t_1}Z_1$ 에서의 ONZ_1 은 약 $(57\sim 64) \times 10^3$ counts인데, 이 N 의 범위에서의 이음효율은 Fig.5에서 약 105%가 되어 만족스러운 용접품질임을 확인할 수 있다. 그리고, SACM645의 $O_{t_1}Z_2$ 에서 ONZ_2 는 약 $(50\sim 55) \times 10^3$ counts 범위인데, 이 N 의 범위에서의 이음효율도 Fig.5에서 약 104.2%가 되어 만족스러운 용접품질임을 확인할 수 있다.

Fig.6은 샤르피 충격치의 경우이며, Fig.5의 이음효율 100% 이상이 되는 N 의 최적범위 ONZ_1 과 ONZ_2 일 때 모두 100% 이상의 충격치 강도비를 갖고 있음이 확인되었다. 따라서

강도와 인성을 동시에 만족하는 AE총량 N의 범위는 각각 $(57\sim64)\times 10^3$ counts와 $(50\sim55)\times 10^3$ counts임을 알 수 있다. 이 때 I-N 관계식은 다음과 같다.

SCM415 :

$$I = -3.74 \times 10^{-5} N^3 + 2.63 \times 10^{-3} N^2 + 6.91 \times 10^{-2} N + 17.1 \quad (R^2=0.98) \quad (13)$$

SACM645 :

$$I = -1.66 \times 10^{-4} N^3 + 1.85 \times 10^{-2} N^2 - 4.08 \times 10^{-1} N + 16.9 \quad (R^2=1.00) \quad (14)$$

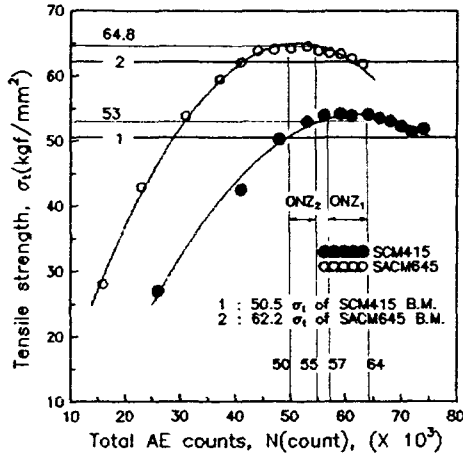


Fig.5 σ_t -N of friction welded joints

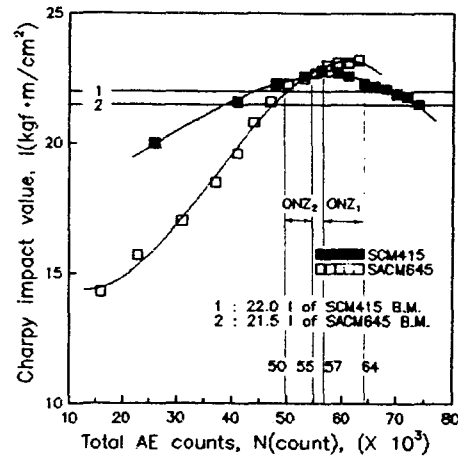


Fig.6 I-N of friction welded joints

4. 결 론

1. $\phi 24$ 봉 대 봉 SCM415 및 SACM645 동종재 마찰용접의 최적화 기술을 개발하였으며, 그 용접조건은 이음효율 100% 이상의 강도와 인성을 실험적으로 구할 수 있었다.
2. $\phi 24$ 봉 대 봉 마찰용접부의 인장강도 σ_t (kgf/mm²), 충격치 I(kg·m/cm²)와 AE총량 N(counts) 사이에 정량적 상관식이 도출되었고, 이음효율 100% 이상의 최적 N범위가 구명되었으며, AE에 의한 마찰용접부 품질(강도, 인성) 실시간 평가의 새로운 방법이 개발되었다.

5. 참고문헌

1. 日本摩擦壓接研究會, "摩擦壓接", 코로나社, 1979, p.46, 145-150, 184.
2. 日本摩擦壓接協會, "摩擦壓接協會20年誌", 1984, p.1-106.
3. S.K.Oh, K.K.Wang and G.R. Reif, "In-process quality detection of friction welds using acoustic emission techniques," Welding Journal of AWS, Vol.61, No.9, Research Supplement, 1982, p.312-316.
4. S.K.Oh, K.K.Wang, G.R. Reif, "In-process quality detection of friction welds using acoustic emission techniques," Proc. of 63rd Annual American Welding Society Convention in Kansas, USA, Tech. Sess.5, Apr. Welding Journal of American Welding Society, welding Research Supplement, vol.61, No. 9, 1982, p.312-316.
5. Oh, Sae Kyoo, "Quantitative analysis of friction weld strength by a coustic emission", Transactions of KSME, Vol.7, No.2, 1983, p.226-232.
6. AWS, "Welding Handbook", Chap.50, Friction Welding, 1970, p. 3-5,37.