

# AE에 의한 마찰 용접 품질의 실시간 평가

(Real-Time Evaluation of Friction Weld Quality by Acoustic Emission)

오 세규 · 김 경균 · 오 명석 · 전태언 · 오 정환\*  
 (부산수대) (아산공업) (부산공업대) (부산수대원)  
 S.K.Oh , K.G.Kim , M.S.Oh, T.U.Jeon and J.H.Oh\*

## 1. 서론

마찰 용접은 고체상태의 두 재료를 가압하여 접착면에서 회전운동에 의해 상대운동을 일으키면서 발생하는 마찰열에 의해 두 재료가 결합되는 부분적인 확산(diffusion)과 기계적 상호작용에 의하여 이루어지며 결합온도는 소성 변형에 의하여 쉽게 하는 재료의 단조 온도(약 1,200°C) 정도이다. 유압 벨브스풀은 오늘날 자동차 공업압 기계에서 필수적인 핵심 부품으로서 매우 중요하다. 가공의 정밀성을 요구하며, 하중을 견디는 용접에 의한 품질의 불안정성을 유발하는 경우가 많은 소품이므로 그 가공의 기술 향상을 위하여 여러개의 유로구멍이 있는 벨브스풀이나 밀폐된 실린더형 벨브스풀의 라워치에서의 반경방향 유로를 갖는 복잡한 특수 벨브스풀의 제작에 있어서는 FW에 의한 실시간 평가가 그 제작상 필수적으로 중요한 사항이다. 또한 본 연구에서는 제품 실시에 AE를 측정하여 그 방출 AE량을 따라 마찰 용접 강도와 품질(강도, 인성)을 평가할 수 있는 것, 용접 조건인 회전수, 가열압, 가열 시간, 가압 시간 등 변수의 복합 요인에 의한 기계적 응력과의 상관관계를 AE법에 의해 규명하고, 평가할 수 있도록 하였다. 또한 용접 과소 정도와 가해진 에너지 공급 과소 정도에 따라, 마찰 용접부의 품질과 AE 총량과의 정량적 상관성을 실험적으로 도출하여, 용접 실시간에 AE 측정만으로 용접 품질을 평가할 수 있는 방법을 개발 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 실험재료는 기어핀, 축류 및 인성을 증시하는 부품에 쓰이고 유압 벨브스풀용으로 쓰이는 SCM415(전 SCM21)강이다. 그 화학조성과 열처리 조건 및 기계적 성질은 각각 표1과 표2와 같다. 본 연구에 쓰인 시험재료는 carburizing과 tempering 처리된 경우로서 경도는 H<sub>R</sub>85(H<sub>R</sub>B41) 정도이고, 인장강도가 50.5kgf/mm<sup>2</sup>로서 용접성과 가공성이 우수한 강재이며, 마찰용접 및 기계가공 후 침탄 열처리(carburizing)하면 경도는 H<sub>R</sub>300, 인장강도가 85kgf/mm<sup>2</sup> 이상이 될 것이다. 본 연구에서 마찰용접의 최적화를 위한 용접조건을 구하기 위하여 FW에 사용한 시

험편의 형상과 치수 및 대표적 강도인 이음부의 인장강도, 흡수에너지 등의 시험편 형상. 치수는 그림1에 나타내었다. 그림 1은  $\phi 16.8$  벨브스풀용의 마찰용접시험편으로서 외경  $\phi 18.8$  mm의 종방향에  $\phi 11$  원주 단면상  $\phi 3$  드릴 구멍(오일구멍)이 8개 있는 경우의 용접 실험편의 형상. 치수의 지름이  $\phi 16.8$ 인 봉 대봉 시험편의 형상. 치수와 강도시험편과 흡수에너지 시험편을 나타낸다. 그림 2는 연속운전 마찰용접기의 마찰용접 과정을 보여준다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 마찰 용접 최적조건하의 전산식

그림 3은  $\phi 16.8$  봉 대봉 마찰용접에서 용접셋팅  $U_T$ (mm)와 가열시간  $t_1$ (sec) 및 가열압셋팅  $U_1$ (mm)과 가열시간  $t_1$ (sec)간의 상관관계를 나타내는 FW 실험결과이다. 그림 4의 마찰용접 최적화시험을 거쳐 구한  $OU_1Z$ 가 4~6초이므로 그림 3에서  $OU_1Z$ 는 7.87~11.87mm,  $OU_1Z$ 는 5.75~9.08mm였음이 실험적으로 구하여졌다.  $U_T-t_1$ ,  $U_1-t_1$  관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$$U_T = 2t_1 - 0.13 \quad (R^2 = 0.99) \dots (1)$$

$$U_1 = 1.665t_1 - 0.91 \quad (R^2 = 0.98) \dots (2)$$

그림 4는 그림 3의 용접조건하에서  $\phi 16.8$  봉 대봉 마찰용접시험편 후 그림 1의 시험편을 이용하여 용접부 인장강도  $\sigma$ (kgf/mm<sup>2</sup>), 가열시간  $t_1$ (sec)과의 상관성을 구하여 나타낸다. 이 음효율 99.7~101%가 되는 용접조건은  $n=2000$ rpm,  $P_1=9$ ,  $P_2=15$ kgf/mm<sup>2</sup>,  $t_2=4$ sec일 때,  $t_1=4\sim 6$ sec임이 확인되었다. 이때  $\sigma-t_1$  상관 관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$$\sigma = 47.76 t_1^{0.04} \quad (R^2 = 0.99) \dots (3)$$

모든 파단면은 모재부에서 파단되었고, 용접면(WI)에 2mm V-노치를 가진 용접재의 경우가 같은 노치가 있는 모재의 경우보다 인장강도가 훨씬 높았고, 이때 이음효율이 110%나 되어 마찰용접면의 강도가 매우 상승되어 이음강도가 충분함을 나타내고 있다.

### 3.2 $\phi 16$ 유압 벨브스풀의 완제품 제작

$\phi 16$  유압 벨브스풀의 기계가공은 소재

φ18.8×33 2개를 가공하고, 압접개소에 축방향 φ3드릴 길이 19.5mm로 드릴링하되, φ11원주상에 8개의 구멍을 가공한다. 마찰용접부 용접부계면에서 플래시에 의해 좌우 최소 2mm두께 즉 4mm의 경계면이 생기며 φ3×17.5의 밀폐된 구멍이 16개 생긴 셈이다. 플래시를 제거하고 가공한다. 60°-0.4폭의 V그르브를 원주 7개소에 가공한다. φ16 유압 밸브스풀의 시제품 제작은 그림3, 그림 4에서 구한 결과로부터 n=2000rpm, P<sub>1</sub>=9, P<sub>2</sub>=15kgf/mm<sup>2</sup>, t<sub>2</sub>=4sec일때 t<sub>1</sub>=4~6sec로 설정한다. 이때 이음효율은 99.6~101%가 기대될 수 있다. 그림5는 φ16 유압 밸브스풀의 용접재, 종단면, 완제품의 외관을 보여준다.

### 3.3 용접 품질의 최적화를 위한 마찰 용접 기술 개발

우수한 용접품질은 이음부의 강도만이 높아서는 바람직하지 않다. 연성이 풍부하고 인성이 충분하지 않으면 안된다. 대체로 강은 강도가 높으면 인성이 낮고, 인성이 높으면 강도가 낮으므로 적절한 열처리를 통하여 강도 높은 재료는 동시에 인성을 높일 필요가 있다. SCM415강은 여타 Cr-Mo 합금강보다 탄소량을 거의 반감하여 0.16%로 감소시켜, 기계적 용성과 용접성을 높인 것으로서 본 FW시험에 사용된 것은 모두 침탄열처리 전으로서 열처리한 상태이므로, 이 강이 마찰용접되면 용접계면에서는 최고 1200°C 정도가 되어 강압할 때는 기름담금질 후 공냉과 흡사하고 온도에 흡사하여 용접 후 모재 및 대기온도에 대해 냉각되는 속도가 유냉과 흡사하므로 다소 경화되며, 따라서 용접부의 경도와 인장강도는 모재보다 증가하며, 따라서 인장파단부는 모재측에서 파단되나 다소의 열영향을 받아 연성이나 인성(인장흡수에너지)의 변화가 있을 것이 예상된다. 따라서 용접품질의 최적화를 위하여, 이음부의 강도(이음효율 100이상)만으로 정할 것이 아니라, 이음효율 100% 내외 및 연신율이나 단면수축률 조사에 의한 연성과 인장흡수에너지 조사를 통한 인성의 영향을 고려할 필요가 있다.

그림6은 φ16.8 마찰용접재의 인장 흡수에너지 E kgf·mm, 인장연신률 ε%, 단면수축률 φ% 등과 용접조건(t<sub>1</sub>sec)과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타낸다. 파단부가 모재부이므로 인장연신률과 단면수축률은 다소 증가하거나 거의 변화가 없는 것이 특징이고, 다만 흡수에너지는 용접조건의 증가에 따라 증가하는 추세이다. 그림 3에서의 이음효율 100%내외에 해당되는 최적조건 OTZ, OUZ의 범위가 그림 6에서 연신률, 단면수축률의 연성과 흡수에너지의 인성면에서 볼때, 그림 6에서의 모든 최적조건 OTZ(4-6 초)는 강도, 연성, 인성 면에서 문제없는 양호한 적정 조건이라고 할 수 있다.

이때 상관관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$$E = 17965.5 + 57692.95 (\ln t_1) \quad \text{--(4)}$$

$$\epsilon = 20.10 + 1.01 (\ln t_1) \quad \text{-----(5)}$$

$$\phi = 60.56 + 0.135 (\ln t_1) \quad \text{-----(6)}$$

### 3-4 용접부 특성의 조사

그림 7은 SCM415 φ16.8 봉 대 봉 마찰용접부 인장파단면의 SEM 파단면 사진을 나타내고 있다. 그림 (a)의 B.M, (b), (c)에서 알 수 있듯이 모재부 인장파단부로서 많은 딩플(dimple)을 볼 수 있는 연성파단을 나타내고 있고, 그림 (a)의 W.I, (d), (e), (f)에서 알 수 있듯이 용접계면에 노치가공하여 인장파단이 용접계면에서 생긴 인장파단면 사진으로서 원주부는 연성파단이나 중앙부는 벽개파면을 나타내는 취성파단임이 확인될 수 있다. 따라서 본 FW시험의 인장파단부가 모두 모재부 파단이란 점에서 볼 때, 연성과 인성이 상당히 풍부한 것으로 생각될 수 있다.

### 3-5. AE 총량과 밸브스풀 용접품질과 상관성

일반적으로 AE는 재료내에서의 스트레인 에너지의 급속한 방출로부터 일어나는 현상이므로 이 에너지의 일부는 재료의 표면에서 검출이 가능한 탄성파의 형태로서 발원으로부터 방출된다. AE의 주된 발원기구는 재료에 미치는 기계적, 열적, 급속적 원인에 기인할 수 있다. 마찰용접은 고압과 고온하에서 수행되므로 결과적으로 압접면으로부터 재료의 대규모 소성 유동을 유발시켜 플래시(flash)를 형성케 하는데, 용접 사이클 중 마찰열과 다음의 단조작용이 끝난 후인 냉각기 중의 상변태 중에 후기 AE가 발생하는 반면에, 초기 AE는 마찰용접 중(용접시작으로부터 용접끝까지)에 회전수, 압력, 시간 등에 복합적으로 지배되는 단조작용의 기계적 응력과 이때 발생하는 열응력에 의한 대규모의 주된 소성변형과 용접면에서의 결합, 전위, 슬립, 파괴, 재결합 등 일련의 복합적, 반복적 요인에 의해 볼과 수초 사이에 발생되며, 이는 초기 AE 검출이 가능함을 알 수 있다.

### 3-6. 가열 시간과 AE 총량

그림 8에서 φ16.8 bar-to-bar 용접에서 OTZ가 4~6sec 일 때 총 AE량 N은 ONZ=80,500~97,000 counts이고, 이때 N-T<sub>1</sub> 관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$$N = 43,600 t_1^{0.45} \quad (R^2=95) \quad \text{--(7)}$$

φ16.8 봉 대 봉 마찰용접시 총 AE량 ONZ가 80,000~97,000 counts이면 이때의 이음효율은 99.7~101%이고, 그림 9는 이때의 σ-N 관계 실험식을 나타내며 회귀 해석법에 의한 전산식은 다음과 같다.

$$\sigma = 20.15 N^{0.08} \quad (R^2=0.96) \quad \text{--(8)}$$

### 3-7. 용접품질의 실시간평가 자동화의 개발과 응용

종래의 조건 감시적 품질관리 장치는 그대로 사용하되 소재의 물성이나 형상척수 등의 오차로 인해 생기는 불의의 용접불량 또는 합격보증을 특히 제품의 강도와 인성의 품질

을 공정 실시간에 검출 감시되고 보증할 수 있는 방법이 AE에 의한 용접품질의 실시간 평가 자동화 시스템의 개발이고, 마찰 용접부의 품질과 AE총량과의 정량적 상관성을 실험적으로 도출하여 용접 실시간에 품질 평가를 하도록 하였다.  $\phi 16.8$  봉대봉 시험편의 마찰용접에서 용접조건  $n=2,000\text{rpm}$ ,  $P_1=9$ ,  $P_2=15\text{kgf/mm}^2$ ,  $t_2=4\text{sec}$ 의 실험식 (3)과  $N-t_1$  실험식 (7)을 연립해서  $t_1$ 을 소거시키면 다음과 같은  $\sigma-N$  관계 계산식이 도출 된다

$$\sigma = 19.84N^{0.082} \text{ ---- (9)}$$

그림 10은  $\sigma-N$  계산식 (9)와,  $\sigma-N$  실험식 (8)을 비교하여 신뢰성을 비교한 것으로 실험식과 계산식이 매우 일치함을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

AE에 의한 마찰용접(FW) 품질의 실시간 평가에 관한 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1.  $\phi 16$  특수 유압 밸브스풀의 FW에 의한 제작 기술 개발을 달성하였다.

2. 용접조건은  $n=2000\text{rpm}$ ,  $P_1=9$ ,  $P_2=15\text{kgf/mm}^2$ ,  $t_2=4\text{sec}$ 일때,  $t_1=4-6\text{sec}$ 일때 최적의 용접 조건임이 확인 되었다.

3. 파단부가 모재부이므로 인장연신률과 단면 수축률은 다소 증가하거나 거의 변화가 없는 것이 특징이고, 다만 흡수에너지는 용접조건 증가에 따라 증가하는 추세이다. 모재부 파단이라는 점으로 볼때 연성과 인성이 상당히 풍부한 것으로 생각된다

4. 외국수입에 의존하던 유공압 밸브스풀의 FW에 의한 제작 가능한 자체설계능력과 FW의 최적화 기술을 보유하게 되었다.

5.  $\phi 16.8$  bar-to-bar 용접에서 OTI가 4~6sec 일때 총 AE량  $N$ 은  $ONZ=80,500\sim 97,000$  counts이고,  $N-t_1$  관계식은 다음과 같이 전산되었다.

$$N = 43,600 t_1^{0.45}$$

6.  $\phi 16.8$  봉대봉 마찰용접시 AE량과  $\sigma-N$  관계 실험식은 다음과 같이 전산화 된다.

$$\sigma = 20.15 N^{0.08}$$

7. 마찰 용접부의 품질과 AE총량과의 정량적 상관성을 실험적으로 도출하여 용접 실시간에 품질 평가를 하도록 하였다.  $\sigma-N$  관계 계산식은 다음과 같다.

$$\sigma = 19.84N^{0.082}$$

\*본 연구는 과학 기술처 "91 특정 연구 개발 사업"의 연구 결과의 일부이며 감사를 드립니다.

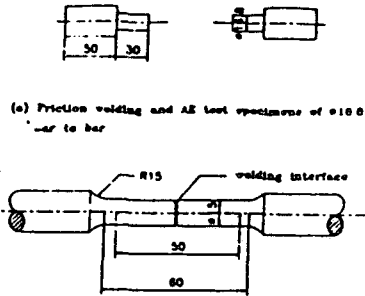


Fig. 1  $\phi 16.8$  bar-to-bar specimen for manufacturing  $\phi 16$  special valve spool

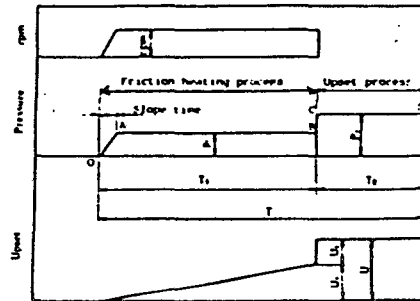


Fig.2 Schematic friction welding cycle (continuous drive brake type)

(Table 1 Chemical composition of SCM415(SCM21)) (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SCM415	0.1	0.2	0.7	0.0	0.0	-	0.9	0.1
(SCM21)	0.06	0.05	0.03	0.009	0.007	-	0.09	0.007

(Table 2 Mechanical properties of SCM415)

Material	Tensile Strength $\sigma$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of Area $\psi$ (%)	Hardness H <sub>v</sub>	Heat Treatment
SCM415	50.5	32	58	85	863°C Annealed
(SCM21)	(85)	(16)	(40)	(300)	850°C Oil-Quenched, 200°C Tempered, Air Cooling

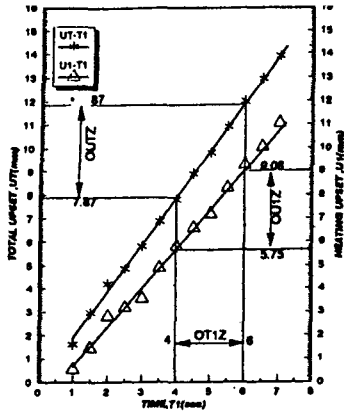


Fig. 3  $U_T$  Vs.  $t_1$  and  $U_1$  Vs.  $T_1$  for  $\phi 16.8$  bar-to-bar friction welding of SCM415

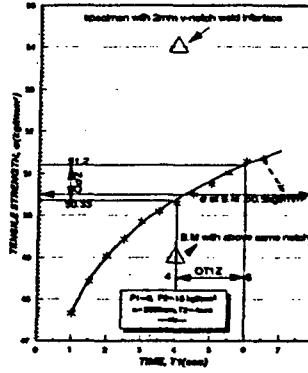


Fig. 4  $\sigma$  Vs.  $t_1$  of friction welded joints of  $\phi 16.8$  bar-to-bar of SCM415



Fig. 5 Appearance of weld, longitudinal half section and finished product of  $\phi 16$  hydraulic valve spool

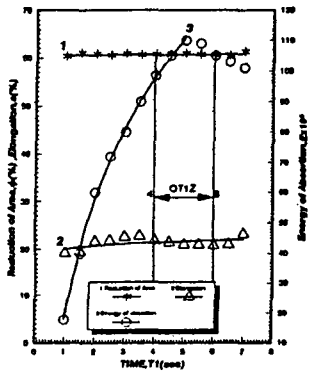


Fig. 6 Energy of absorption  $E$  vs.  $t_1$  +  $V_s$   $t_1$  and  $\phi$  Vs.  $t_1$  of friction welded joints of SCM415  $\phi 16.8$  bar-to-bar

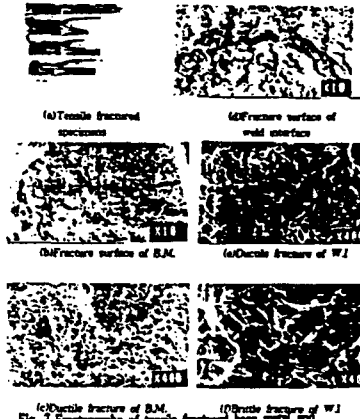


Fig. 7 Fractographs of tensile fractured base metal (B.M.) weld interface of  $\phi 16.8$  SCM415 bar-to-bar FW

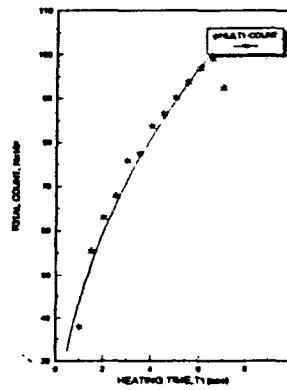


Fig. 8  $T_c$  Vs.  $T_1$  in friction welding of  $\phi 16.8$  bar-to-bar FW

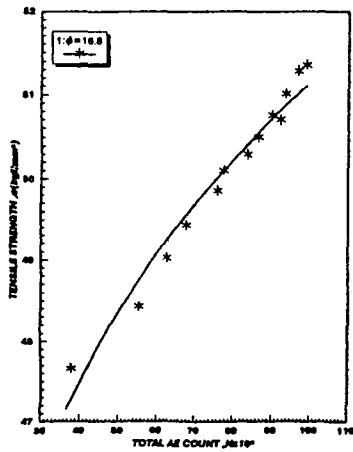


Fig. 9  $\sigma$  Vs.  $N$  in friction welding of  $\phi 16.8$  bar-to-bar

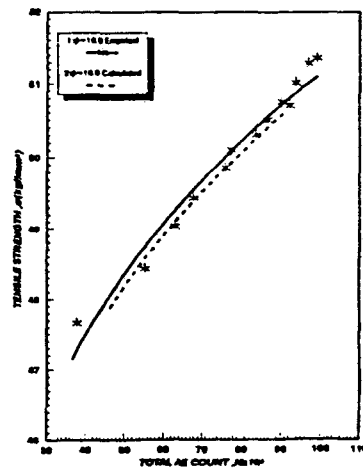


Fig. 10 Comparison between empirical and calculated equation for  $\sigma$  Vs.  $N$  in friction welding of SCM415  $\phi 16.8$