

## 전력용 슬리브 개발을 위한 동과 알루미늄의 마찰용접에 관한 연구

오세규\* · 최진호\*\* · 장지훈\*\*\* · 오명석\*\*\*\*

Study on Friction Welding of Copper to Aluminium for Developing Electrical Sleeve

Sae-kyoo Oh\*, Jin-ho Choi\*\*, Ji-hoon Jang\*\*\*, Myung-suk Oh\*\*\*\*

**Key words** : Friction welding(마찰용접), Acoustic emission technique(음향방출법), Weld quality(용접품질), Weld condition(용접조건), Optimization(최적화), Weld strength(용접부 강도), Joint efficiency(이음효율), Nondestructive evaluation(비파괴적 평가)

### Abstract

A study on optimizing the friction welding of copper(C1100) to aluminium(A1050) for developing the electrical sleeve was experimentally carried out and also on real-time nondestructive evaluation of the friction weld quality(strength) was accomplished by acoustic emission technique.

The results obtained are summarized as the following ;

- 1) The heating upset  $U_1$ (mm) or total upset  $U$ (mm) tends to increase according to the increase of heating time  $t_1$ (sec). The relations between  $U_1$  and  $t_1$  or  $U$  and  $t_1$  are computed as follows when  $n=2000$  rpm,  $P_1=4$ ,  $P_2=8$  kgf/mm<sup>2</sup>, and  $t_2=6$  sec

$$U = 1.6 e^{0.39t_1}$$

$$U_1 = 3.65 e^{0.25t_1}$$

- 2) It was notified that the proper welding conditions by considering on both strength with more than 100% joint efficiency and toughness are heating time of 1.5~2.25 sec under  $n=2000$  rpm,  $P_1=4$ ,  $P_2=8$  kgf/mm<sup>2</sup>,  $t_2=6$  sec.
- 3) It was confirmed that both AE total counts(N, counts) and the weld tensile strength( $\sigma$ , kgf/mm<sup>2</sup>) of the welded joints increase as the increase of heating time, respectively, the relations between N and  $t_1$ ,  $\sigma$  and  $t_1$  are computed from data points by regression analysis using the least square method as follows in case of the above proper condition ;

\* 부산수산대학교 공과대학  
 \*\* 한독 부산직업훈련원  
 \*\*\* 부산수산대학교 대학원  
 \*\*\*\* 부산공업대학

$$N = 50108 + 23917(\ln t_1)$$

$$\sigma = 11.85 + 2.06(\ln t_1)$$

- 4) Both empirical and calculated equations of relationship between  $\sigma$  and  $N$  are very coincident with a high reliability, as the following in case of the above proper welding condition ;

Calculated :  $\sigma = 0.00008 N + 7.5$

Empirical :  $\sigma = 8.17e^{0.0000072N}$

- 5) It was confirmed that the real - time nondestructive weld strength evaluation for friction welding of copper(C1100) to aluminium(A1050) could be possible by acoustic emission technique.

## 1. 서 론

마찰용접법은 다른 용접법에 비해 기계적인 면과 경제적인 면에서 많은 잇점을 지니고 있어, 일반 산업기계, 방위 산업기계, 우주 항공기계, 자동차 engine, 선박 등의 부품생산에 이용되며 특히, 동종 및 이종재료의 접합<sup>1)</sup>을 가능케 하였다.

한편, 송전선과 배전선은 Cu선과 Al선이 전기적으로 접속되어 현재 사용되고 있는데, 선과 선의 연결부에 Cu슬리브 또는 Al슬리브가 접속되어 컴파운드(compound)의 게재에 의한 전기부식을 방지하고 장기적 안전성을 유지할 수 있다.<sup>4)</sup>

이론적으로 동종재료를 접속하면 신뢰성이 높고 이상적이라 할 수 있을 것이다. 그러나, Cu선과 Cu슬리브, Al선과 Al슬리브 접속이 가능하도록 이종재료이지만 Cu봉과 Al봉을 결합시키는 슬리브를 개발할 필요성이 있으므로, 여기에 마찰용접법을 적용시키고자한다.

본 연구는 전력용 슬리브 개발을 위한 기초 자료가 되게 한 것으로서, 현재 상품화 되어있는 슬리브로는 분기형(H), 조인트형, 보수형 등이 있는데 이들은 Cu혹은 Al슬리브로 되어있다.

선진국에서는 Cu와 Al을 접합하여 사용하고 있으며, 또한 이러한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 이들 이종재료(Cu-Al)를 마찰용접을 한 후 인장강도시험, 인성시험, 용접조건과 강도 및 AE량과의 상관성조사, 용접부강도와 AE량과의 상관성조사 등을 수행하였다. 또한 시간의 변화에 따른 업셋량과의 관계를 조사하였고, 마찰용접 조건의 최적여부를 검토하였으며, 마찰용접부의 품질(강도)에 관해 AE에 의해 실시간에 비파괴적으로 정량적 평가가 가능하도록 연구한 것이며<sup>5-9)</sup>, 본 연구의 결과가 전력용 슬리브의 국산화 개발을 위한 기초자료가 되게하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

본 실험에서 사용된 시험편의 재료는 대체로 마찰용접성이 우수하고, 산업현장에서 실용화되고 있는 재료들로 Cu(C1100)와 Al(A1050)이며, 그 화학적 성분은 Table 1과 같고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

마찰용접을 위한 시험편은 Fig.1(a)와 같이 범용 선반(화천 SW 380mm)에서 선삭가공 한 후 마찰용접기(TH-25 continuous drive brake type friction welding machine)에서 마찰용접을 하였고, 인장시험편 가공은 Fig.1(b)와 같이 KSB 0801의 규정에 의하여 평행부 지름  $\phi$  28 mm, 표점거리

**Table 1 Chemical composition of test materials(wt%)**

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
C1100	-	-	99.92	-	-	-	-	-
A1050	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	99.12

**Table 2 Mechanical properties of base materials**

Materials	Tensile strength $\sigma$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of area $\phi$ (%)
C1100	21	38	33
A1050	12	28	7

60 mm로 일정하게 하였고, Al부의 슬립을 방지하기 위해 M30×2.5로 나사가공을 하였다.

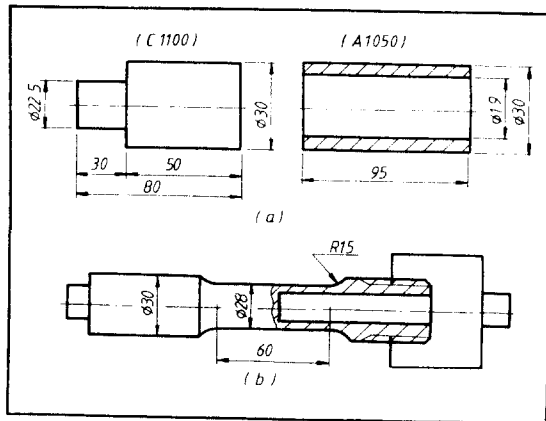
표점거리(평행부) 표면가공은 거칠기 영향을 최소화하기 위해 원통연삭기(TG6 27 200×500)에서 하였으며, 인장시험은 인장시험기(Toyo Bawldwin UTM 25T)로 인장하였고, 인장속도는 1 mm/min으로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1 마찰용접 시험의 결과

##### 3-1-1 마찰용접 조건

본 실험에 사용된 시험편의 최적 마찰용접조건을 결정하기 위하여 Fig.1(a)와 같이 가공한 시험편을 회전수(n)=2000 rpm, 마찰가열압력(P<sub>1</sub>)=4 kgf/mm<sup>2</sup>(39.2 MPa), 업셋압력 (P<sub>2</sub>)=8 kgf/mm<sup>2</sup>(78.3 MPa)로 일정하게 유지하여 가열시간(t<sub>1</sub>)과 업셋시간(t<sub>2</sub>)을 Table 3과 같이 변화시키면서 마찰용접을 수행하였다.



(a) Welding and AE test workpieces  
(b) Tension test specimen of friction welded joint and tensile absorption energy

**Fig. 1 Spape and dimension of specimens**

**Table 3 Friction welding conditions**

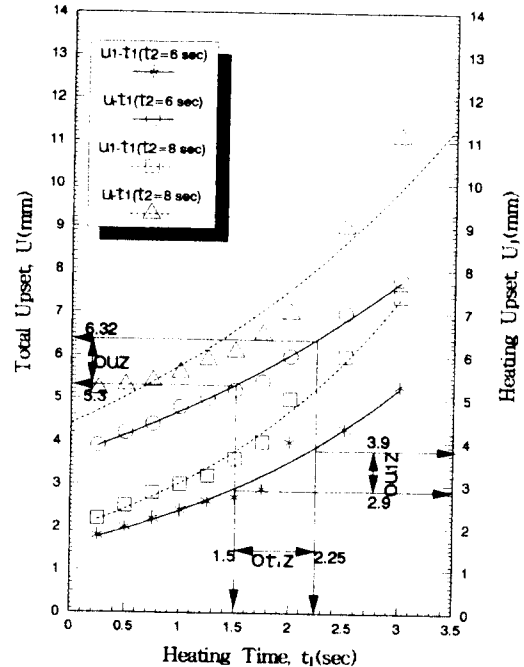
Welding material	Rotating speed n (rpm)	Heating pressure P <sub>1</sub> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Upsetting pressure P <sub>2</sub> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Heating time t <sub>1</sub> (sec)	Upsetting time t <sub>2</sub> (sec)
A1050 to C1100	2000	4	8	0.25~3	6
				0.25~3	8

#### 3 1 2 마찰용접 조건 간의 상관성

정적 마찰용접 조건을 결정하기 위해 Table 3의 조건대로 용접을 하였을 때, 가열업셋 U<sub>1</sub>(mm)과 가열시간 t<sub>1</sub>(sec), 총 업셋 U(mm)와의 상관관계 조사 결과는 Fig.2와 같다.

Fig.2에서 가열시간 t<sub>1</sub>의 증가에 대한 총 업셋량 U와 가열 업셋량 U<sub>1</sub>은 모두 증가하는 경향을 나타내고 있다.

이때 가열시간 t<sub>1</sub>과 업셋량 U<sub>1</sub>, U와의 관계에 대한 전산식은 다음과 같다.



**Fig. 2 Relation between total upset and heating time in friction welding of C1100 to A1050**  
Welding condition : n = 2000 rpm, P<sub>1</sub> = 4 kgf/mm<sup>2</sup>, t<sub>1</sub> = 0.25 ~ 3 sec, P<sub>2</sub> = 8 kgf/mm<sup>2</sup>, t<sub>2</sub> = 6 ~ 8 sec

$t_2 = 6 \text{ sec} :$

$$U = 1.6 e^{0.39t_1} \quad (1)$$

$$U_1 = 3.65 e^{0.25t_1} \quad (2)$$

$t_2 = 8 \text{ sec} :$

$$U = 1.95 e^{0.44t_1} \quad (3)$$

$$U_1 = 4.4 e^{0.25t_1} \quad (4)$$

또,  $t_2$ 에 관한 두 조건( $t_2=6, t_2=8$ )을 비교했을 때 8 sec일 때가 엽셋량이 더욱 많이 발생함을 알 수 있다.

각각의 식에 대한 신뢰도를 확인하기 위하여 기여도(R-square, coefficient of determination)를 구해보면  $R^2=0.97, 0.99, 0.98, 0.91$ 로 나타남을 알 수 있으며, 이는 매우 신뢰도가 높음을 말해주고 있다.<sup>5)</sup>

Fig.2와 식(1), (2)에서  $O_tI_Z$ (optimum  $t_1$  zone)=1.5~2.25sec에서  $U_1=2.9\sim3.9 \text{ mm}$ 이고  $U=5.3\sim6.32 \text{ mm}$ 범위가 최적임이 실험적으로 확인될 수가 있다.

### 3-2 마찰가열 시간과 용접부 인장강도와 의 상관성

인장시험은 Table 3의 압접조건 하에서 마찰용접한 것을 Fig.1(b)와 같이 가공하여 실험하였고, 용접시험편의 인장강도와 가열시간  $t_1$ (sec)을 변화시키면서  $t_2=6, 8 \text{ sec}$ 의 조건에 따라 실험한 결과는 Fig.3과 같다.

Fig.3에서 용접부의 인장강도가  $t_1$ 의 증가에 따라 다소 증가하는 경향이 있고, 가열 시간  $t_1$ 이 과도하면 인장강도가 과열에 의하여 다소 낮아짐을 알 수 있다. 그리고  $t_2=6 \text{ sec}$ 일 때가  $t_2=8 \text{ sec}$ 일 때보다 인장강도가 높음을 알 수 있다. 이들 조건 중 모재보다 높은 인장강도를 나타내고 이음효율이 100%이상인 경우는  $O_tI_Z=1.5\sim2.25 \text{ sec}$ 로서 이 경우가 가장 적절한 용접조건이라고 생각된다. 즉,  $n=2,000 \text{ rpm}, P_1=4 \text{ kgf/mm}^2, P_2=8 \text{ kgf/mm}^2, t_2=6 \text{ sec}$ 일 때  $t_1=1.5\sim2.25 \text{ sec}$ 이다.

인장강도  $\sigma \text{ kgf/mm}^2$ 와 가열시간  $t_1 \text{ sec}$ 간의 관계에 대해 전산화된 식은 다음과 같다.

$t_2=6 \text{ sec} :$

$$\sigma = 11.85 + 2.06(\ln t_1) \quad (R^2=0.98) \quad (5)$$

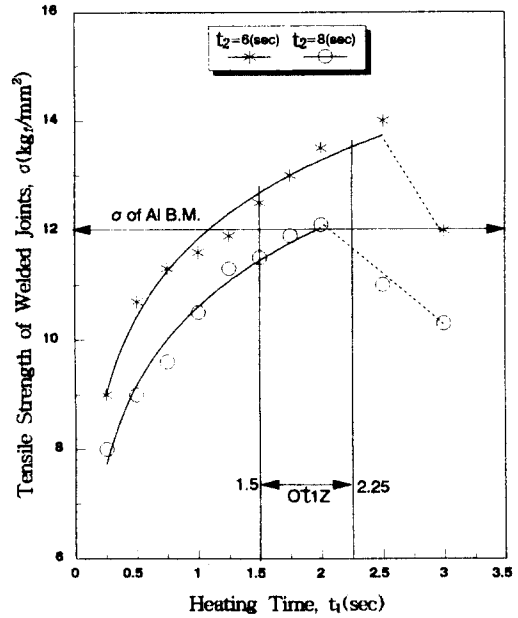


Fig. 3 Relation between heating time and tensile strength for the welded joints of C1100 to A1050  
Welding condition : as in Table 3

$t_2=8 \text{ sec} :$

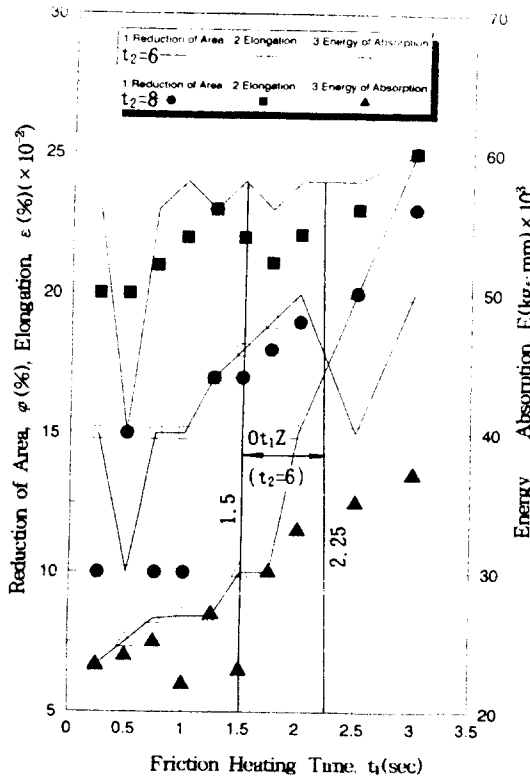
$$\sigma = 10.61 + 2.087(\ln t_1) \quad (R^2=0.97) \quad (6)$$

이때  $R^2$ 는 매우 높아 실험식의 신뢰성 역시 매우 높음을 나타내고 있다.

### 3-3 용접부 인성과 마찰가열 시간과의 상관성

Fig.4는 마찰용접재의 인장 흡수에너지  $E(\text{kgf} \cdot \text{mm})$ , 인장연신율  $\epsilon(\%)$ , 단면수축율  $\phi(\%)$ 등과 용접 조건( $t_1$ )과의 상관성을 실험적으로 구한 결과를 나타낸다.

과단은 Al측 모재에서 일어났으며, 이음효율 100% 이상에 해당하는 최적조건 범위 ( $O_tI_Z=1.5\sim2.25 \text{ sec}$ )에서 연신율, 단면수축율의 연성과 인장 흡수에너지의 인성면에서 볼 때 문제점을 발견하지 못했으며, 양호한 적정조건이라고 생각된다.



3-4 마찰용접 조건과 AE총량과의 상관성

마찰가열시간  $t_1$ 과 AE총량(total AE counts)  $N$ 과의 관계는 Fig.5와 같이 실험적으로 나타내어진다.

$t_2=6$  sec일 때가 8 sec일 때보다 전체적으로 AE량이 적게 나타나고 있는데, 이것은 상기 접합시  $t_2=8$  sec일 때가 재료의 소성거동이 많이 발생하고 있음을 말해준다.

$t_1$ 이 증가함에 따라 AE총량은 증가하고 있음을 알 수 있다.

$t_1$ 과  $N$ 과의 관계를 회귀해석법에 의하여 전산화한 식은 다음과 같다.

$$t_2=6 \text{ sec} : N=50108+23917 (\ln t_1) \quad (7)$$

$$t_2=8 \text{ sec} : N=61936+15914 (\ln t_1) \quad (8)$$

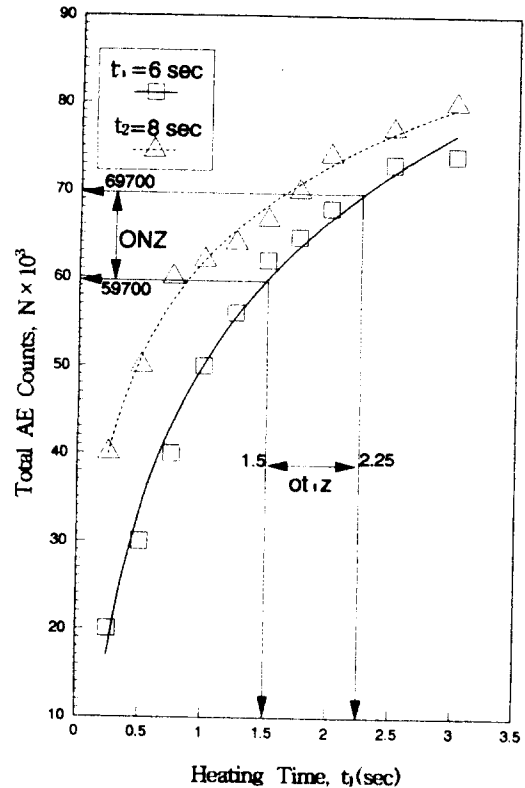


Fig. 5 Total AE count versus heating time( $t_1$ ), in friction welding of C1100 to A1050 bars  
Welding condition : as in Table 3

Fig.5와 식(7)에서 Fig.3의  $Ot_1Z=1.5\sim 2.25$  sec인 경우의 ONZ(optimum AE count zone)는 59700~69700임을 확인할 수 있다.

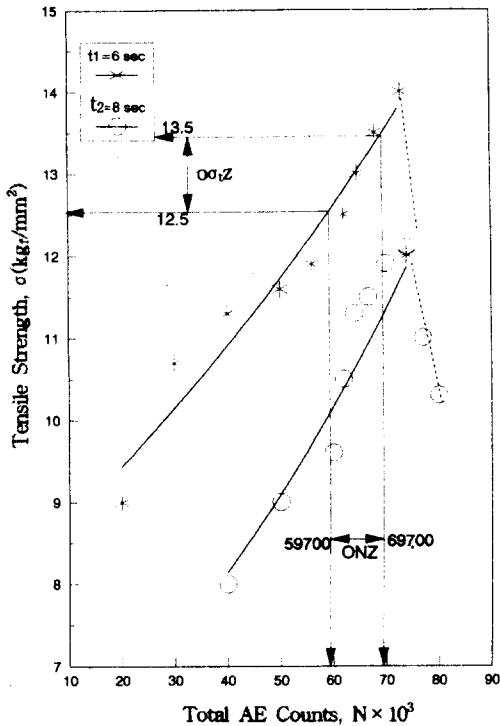
3-5 용접조건, 강도, AE와의 상관성

$n=2,000$  rpm,  $P_1=4$  kgf/mm<sup>2</sup>,  $P_2=8$  kgf/mm<sup>2</sup>의 용접조건에서  $t_2$ 가 6 sec와 8 sec일 때,  $t_1$ 을 변경시켜 각각 실험하였다. 그 결과는 Fig.6과 같이 나타낼 수 있다.

총 AE량  $N$ (count)이 증가할수록 인장강도  $\sigma$  (kgf/mm<sup>2</sup>)는 증가하고 있으며,  $t_2=6$  sec인 경우가 같은 AE count량에 대해서 인장강도가 더욱 높음을 알 수 있다.

$\sigma-N$ 의 관계에 대해 전산화된 식은 다음과 같다.

$$t_2=6 \text{ sec} : \sigma=8.17 e^{0.0000072N} \quad (9)$$



**Fig. 6 Empirical  $\sigma$  vs.  $N$  in friction welding of C1100 to A1050**  
 Welding cond. :  $n=2000$  rpm,  $P_1=4$ ,  $P_2=8$  kg/mm<sup>2</sup>,  $t_1=0.25 \sim 3$  sec,  $t_2=6, 8$  sec

$t_2=8$  sec :

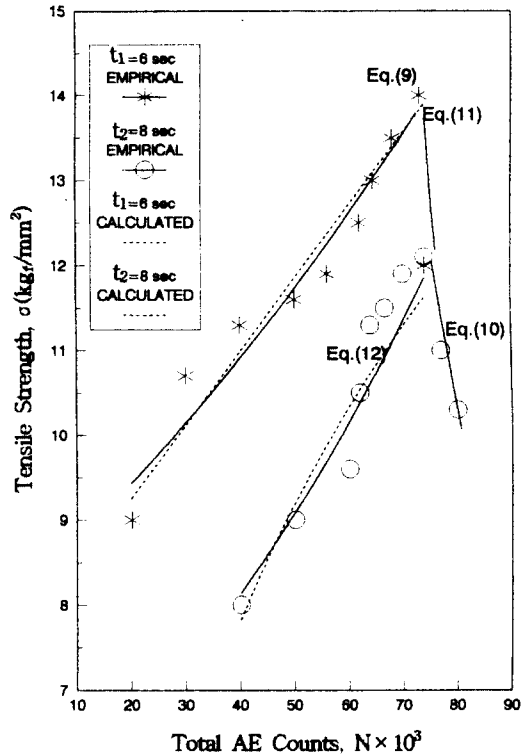
$$\sigma = 5.23 e^{0.0000110N} \quad (10)$$

Fig.6과 식(9)에서 알 수 있듯이, Fig.5에서 도출한 ONZ=59700~69700 counts에서의  $\sigma$ -Z는 12.5~13.5 kgf/mm<sup>2</sup>로서 이음효율 100%이상인 경우를 나타낸다.

3-6 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 품질의 실시간 평가에 관한 고찰

마찰용접 강도와 품질의 실시간 평가를 통한 제품 신뢰성 향상법은 일반 비파괴 검사 개념과는 다르다.<sup>5)</sup>

AE에 의해 균열등의 결함을 찾는 것이 아니고, 마찰용접이 마찰가열, 가압에 의한 금속의 대 소성 변형을 유발하며 압접에 의해 수행되기 때문에 이



**Fig. 7 Empirical and calculated relation comparison for  $\sigma$  vs.  $N$  in friction welding of C1100 to A1050**  
 Welding cond. :  $n=2000$  rpm,  $P_1=4$ ,  $P_2=8$  kg/mm<sup>2</sup>,  $t_1=0.25 \sim 3$  sec,  $t_2=6, 8$  sec

때의 가열압, 가열시간, 단조가압력, 가압시간, 회전수 등과 함께 용접부 강도와 품질이 상관성이 있듯이 용접부에서 발생된 AE총량도 용접조건이나 용접부 강도와 품질에 정량적 상관성이 있음이 실험적으로 입증<sup>7)</sup>되었기 때문에 용접 중에 발생하는 AE 총 누적량(cumulative AE count)으로 실시간에 용접부 품질(강도)을 평가하는 기술이 가능하게 되었다.<sup>8,9)</sup>

또한, 마찰용접에서 용접조건인 회전수(rpm)나, 가열, 가압력 및 업셋량이나 용접시간  $t_1$ ,  $t_2$  설정에 의존하는 것은 소재 자체의 물성치와 형상치수의 오차를 고려치 않은 문제점이 있기 때문에, 먼저 가열시간  $t_1$ 을 설정한 후 마찰용접 중의 품질 특성을 AE 량에 의해 측정하여 품질제어하는 것이 훨씬 합리적이고 더욱 완전<sup>8)</sup>에 접근한 것이라고 생각된다.<sup>6-9)</sup>

본 연구의 마찰용접 실험에서 용접조건  $P_1=4 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $P_2=8 \text{ kgf/mm}^2$ 에 대한  $\sigma-t_1$ 의 실험식 (5), (6)과  $N-t_1$  실험식 (7), (8)을 연립해서  $t_1$ 을 소거시키면 다음과 같은  $\sigma-N$  관계 계산식이 도출된다.

$$t_2=6 \text{ sec} : \\ \sigma=0.00008N+7.5 \quad (11)$$

$$t_2=8 \text{ sec} : \\ \sigma=0.00013N+9.8 \quad (12)$$

Fig.7은  $\sigma$ 와  $N$ 의 계산식과 실험식을 비교하여 신뢰성을 비교한 것으로 실험식과 계산식이 거의 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

전력용 슬리브 개발을 위한 C1100과 A1050과의 이종 마찰용접 적정조건을 결정하기 위한 실험과 용접부의 강도(품질)를 AE에 의해 실시간에 비파괴 검출하는 실험에서 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 가열시간  $t_1$ 에 따라 가열 업셋량  $U_1$ 은 증가하는 경향이 있다. 이들의 전산화된 식은 다음과 같다.

$$U=1.6 e^{0.39t_1} \\ U_1=3.65 e^{0.25t_1}$$

2) 용접부의 이음효율이 100%이상인 경우, 인성을 고려한 적정 용접조건은  $n=2000 \text{ rpm}$ ,  $P_1=4 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $P_2=8 \text{ kgf/mm}^2$ ,  $t_2=6 \text{ sec}$ 일 때  $t_1=1.5 \sim 2.25 \text{ sec}$ 임이 확인되었다.

3) 가열시간  $t_1$ 과 total AE count량  $N$  및 용접부 강도  $\sigma$ 의 관계에서  $t_1$ 의 증가에 따라  $N$ 이나  $\sigma$ 가 증가함을 알 수 있고, 상기 적정 조건하의 경우 회귀해석법에 의한 전산화된 식은 각각 다음과 같다.

$$N=50108+23917(\ln t_1) \\ \sigma=11.85+2.06(\ln t_1)$$

4) 상기 적정 조건하에서  $\sigma$ 와  $N$ 의 계산식과 실험식은 각각 다음과 같고, 이들은 매우 일치한다.

$$\text{(계산식)} \sigma=0.00008 N+7.5 \\ \text{(실험식)} \sigma=8.17 e^{0.0000072N}$$

5) AE에 의해 C1100과 A1050의 마찰용접부의 강도(품질)를 실시간에 비파괴적으로 평가 할 수 있음이 확인되었다.

#### 참고문헌

- 1) Gelifman, E.Y. and M.D. Temirov(1965) : The friction welding of marine engine valves. J. Auto weld. 18, p. 55 - 58
- 2) Vill.V.I.(1962) : Friction welding of metals. svarcohnoc prolvodstvo, 3. p. 19 - 23.
- 3) Oh, S.K.(1974) : Study on friction welding of valve materials SUH3 SUH31, J.Korean soc. Mech.Engr., 14, p. 221 - 232
- 4) 諭子次男: 마찰압접법의 電力用 슬리브 への 應用, 日本ベロンデイ(株)
- 5) Oh, S.K.(1982) : Study on strength analysis of friction welded joints and in-process monitoring of the welding using acoustic emission techniques. Ph. D. Thesis, Keio University, Japan, p. 147 - 314
- 6) Oh, S.K. and K. K. Wang(1983) : Effect of welding parameter on weld strength and acoustic emission in friction weld. J. of Korean Soc. of Marine Engineers. 7(1), p. 23 - 33.
- 7) Oh, S.K.(1983) : Quantitative analysis of friction weld strength by acoustic emission, Transactions of KSME, 7(2), p. 226 - 232.
- 8) 吳世奎(1982) : 어쿠우스틱 에밋션法에 의한 摩擦 鎔接強度解析(1), 대한기계학회지, 22(3), p. 184 - 190
- 9) 오세규, 임우조, 김형자(1985) : 마찰용접기계의 자동생산 품질제어 실시간 평가, 대한기계학회 논문집, 9(6), p. 757 - 766