

<論 文>

# 異性材料 마찰용접부의 기계적 성질검사

나 석 주\* · Jürgen Ruge\*\*

(1983년 8월 27일 접수)

## Testing of Mechanical Properties on Dissimilar Metal Friction Welds

Suck-Joo Na and Jürgen Ruge

### Abstract

Increase of the requirements on quality of welded structures necessitates the improvement of known inspection methods and the introduction of progressive new techniques. Non-destructive methods are the most advanced, but there are considerable difficulties in using the methods of radiography with electromagnetic rays and ultrasonic testing in the inspection of dissimilar metal friction welds, because their physical and mechanical properties are changed very rapidly at the interface.

The values of simple mechanical tests for dissimilar metal friction welds have always been dubious, as the strength of the bond is often greater than that of the softer materials being joined. Thus, in this paper some conventional mechanical testing methods are examined in an attempt to determine a technique for dissimilar metal friction welds, which will give a reliable quantitative indication of the weld quality. From the considered static and dynamic testing methods the impact bending test on unnotched and notched specimens are the most sensitive to find out the small joining defects in the interface.

### 1. 서 론

원통형인 두 부품을 결합하는데 주로 이용되는 마찰 용접법은 제품제작시간이 짧고 품질이 양호한 용접부의 재생산성이 높은 특성을 갖기때문에 여러 생산분야, 그중에서도 특히 자동차공업, 공구제조업등 대량생산을 위주로 하는 분야에서 차지하는 비중이 계속 높아지고 있다<sup>1)</sup>. 이에 따라서 마찰용접부의 품질에 대한 요구도 점차 증가하고있는데, 이 요구를 충족시키기 위해서는 마찰용접공정의 정확한 제어와 용접부의 물

질검사에 적합한 시험방법의 개발 및 개량이 이루어져야 한다. 화학적 성분이 같거나 비슷한 鋼의 마찰용접부에 대한 품질검사는 인장시험, 굽힘시험과 같은 정하중, 충격시험과 같은 동하중, 그리고 피로시험과 같은 반복하중하에서 별다른 문제점이 없이 이루어져 왔다<sup>2,3,4)</sup>.

위의 시험결과 강의 마찰용접부는 모재와 비슷하거나 혹은 더 좋은 기계적 성질을 갖을 수 있는 것으로 판명되었는데, 이것은 마찰용접중 발생하는 높은 온도와 소성변형에 의한 재결정현상을 통해서 용접부의 금속조직이 미세해지기 때문이다<sup>5)</sup>.

용접부의 품질검사에 널리 사용되고 있는 X선이나 초음파를 이용한 비파괴시험법의 적용은 큰 제한을 받고 있는데, 이것은 마찰용접부가 flash 를 포함하는 원

\*정회원, 한국과학기술원 생산공학과  
\*\*TU Braunschweig 용접연구소(서독)

Table 1 Chemical composition of base metals(%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Al	Mg	Cu	Ti
X 5 CrNi 18 9	≤0.07	≤1.00	≤2.00	18.0	10.0	Rest	—	—	—	—
E-Cu	—	—	—	—	—	—	—	—	99.9	—
AlMgSi 0.5	—	0.3~0.7	—	—	—	≤0.4	Rest	0.4~0.9	≤0.05	≤0.2

통형시편이라는 특이한 형상을 갖고, 또 발생하는 결함이 대부분 매우 얇기( $\mu\text{m}$  범위)때문이다<sup>6,7)</sup>. 異性材料 마찰용접부의 경계면에서는 두 재료의 물리적, 기계적 성질이 급격히 변하기 때문에 마찰면에 발생하는 결함을 찾기위해서 비파괴시험방법을 적용하는것은 同性材料의 경우보다 더 어렵다. 이와같은 물리적, 기계적 성질의 급격한 변화는 용접부의 기계적 성질을 검사하는 파괴시험법의 적용도 제한하는데, 스테인레스강과 순수알루미늄 마찰용접부의 품질검사를 연구한 Jessop<sup>8,9)</sup>은 인장시험, 굽힘시험, 충격시험등을 비교하고, 이성재료 마찰용접부의 효과적인 검사를 위해서 전단시험법(shear test)을 제안하였다. 인장시험, 굽힘시험에서는 마찰경계면에 결함이 존재해도 파단이 강도가 낮은 알루미늄의 열영향부에 발생하나, 전단시험법을 사용하면 경계면에 파단이 발생하도록 유도할 수 있기 때문에 경계면자체의 품질검사에 적합하다고 지적하였다. 銅과 알루미늄의 마찰용접공정을 연구한 Ellis 등<sup>10)</sup>은 노치가 없는 반원통형시편에 충격굽힘시험을 한 결과가 용접부의 품질과 비교적 잘 일치하는 정량적 관계가 있다고 하였다.

본 연구에서는 여러가지 이성재료 마찰용접부의 파괴시험결과를 비교, 검토하여 마찰경계면 자체의 품질검사에 적합한 시험방법을 제시하고자 한다. 전단시험법은 연구범위에서 제외되었으며 인장시험과 굽힘시험을 경하중과 동하중, 그리고 반복하중하에서 시행하였다.

## 2. 실험 및 고찰

### 2.1. 실험기계

용접에 사용된 마찰용접기는 최고회전속도가 3000 rpm 이고 최대압력이 150kN 인 continuous drive type 이다<sup>11)</sup>. 이 마찰용접기에는 여러가지 제촉기들과 servo hydraulic 제어시스템, 그리고 micro computer 가 부착되어 실험 데이터 측정과 공정 제어가 동시에 가능하다. 마이크로 컴퓨터는 측정된 회전수, 전진거리, 압력, 회전토크(torque)와 같은 중요한 parameter 를 즉시

digital 로 전환시키며, 이를 사용하여 실제용접에 투입된 마찰열, 시편길이의 축소등을 매공정이 끝날때마다 계산하고 이 결과를 프린터를 통해서 인쇄할 수 있다. 컴퓨터는 또한 이러한 계산외에도 마찰용접기의 중요한 성능을 제어, 감시하여 마찰공정의 제어에 필요한 command value 를 결정하여 제어시스템에 보내는 역할도 한다. 이와같은 컴퓨터를 이용한 제어시스템을 사용한 결과 현재 압력, 회전토크, 전진속도에 대한 공정제어가 가능하고, 마찰가열과정중 한 제어방식에서 다른 제어방식으로, 예를들어 압력제어에서 전진속도 제어로, 전환할 수도 있다.

### 2.2. 실험재료 및 용접조건

실험재료로는 기계적, 물리적 성질의 차이가 큰 X 5 CrNi 18 9 과 E-Cu 및 X 5 CrNi 18 9 과 AlMgSi 0.5 를 선정하였다\*. Table 1 에는 실험재료의 화학적성분을 나타내었고 Table 2 에는 기계적 성질이 나타나 있

Table 1 Mechanical properties of base metals

Material	Yield stress* (Nmm <sup>-2</sup> )	Tensile strength (Nmm <sup>-2</sup> )	Reduction of area (%)	Impact value** (Jcm <sup>-2</sup> )
X 5 CrNi 18 9	435	633	74	236
E-Cu(I)	307	313	68	109
E-Cu(II)	265	273	73	146
AlMgSi 0.5	238	254	54	29

\* Dimension of tension test specimen: 14mm $\phi$  × 70mmL

\*\* Impact tests made at 20°C, DVM-specimen with round notch (Fig. 6b)

는데, E-Cu 는 공급조건에 따라 기계적 성질에 상당한 차이가 있었으므로 E-Cu(I)과 E-Cu(II)로 구분하였다. 스테인레스강인 X 5 CrNi 18 9 의 인장강도는 순수銅인 E-Cu 나 알루미늄합금인 AlMgSi 0.5 에 비해서 2 배이상 이 되고 충격시험치는 E-Cu 의 약 2 배,

\* 재료표시는 DIN 에 의한 것임.

그리고 AlMgSi 0.5에 비하면 약 8배에 이르고 있다.

銅과 알루미늄과 같이 고온에서의 강도가 낮은 재료의 마찰가열과정을 압력제어로 하는 경우 마찰이 진행됨에 따라 마찰전진속도가 점점 빨라져서 일정한 압력을 유지하지 못하는 경우가 있다<sup>10)</sup>. 따라서 본 연구에서는 마찰가열과정중 마찰전진속도를 일정하게 유지하는 전진속도제어방식을 택하고, 압접과정은 압접압력과 압접시간을 제어하는 방식 및 압접전진속도와 압접전진거리를 제어하는 방식을 택하였다. 후자의 방식은 특히 결합된 제품의 최종 길이를 임의로 조절할 수 있는 장점을 갖고 있다. 본 실험에 사용된 parameter는 다음과 같다 :

- 회전속도( $n$ ) : 1500, 3000min<sup>-1</sup>
- 마찰전진속도( $v_f$ ) : 0.5~2.5mm s<sup>-1</sup>
- 마찰전진거리( $s_f$ ) : 3, 4mm
- 압접압력( $p_v$ ) : 75~100Nmm<sup>-2</sup>
- 압접시간( $t_v$ ) : 4s
- 압접전진속도( $v_v$ ) : 20mm s<sup>-1</sup>
- 압접전진거리( $s_v$ ) : 8mm

2.3. 경도시험

마찰용접부의 경도를 측정하면 용접부의 형성에 미치는 용접 parameter의 영향과 열영향부(heat-affected-zone)의 넓이를 규명할 수 있다. 알루미늄의 열전도 계수는 스테인레스강의 그것보다 훨씬 더 높기 때문에 마찰가열과정중에서 발생하는 열중 대부분이 알루미늄쪽으로 흐르게 되고, 이결과 알루미늄에는 약 6mm 넓이의 열영향부가 형성되었다. 이에 반해서 스

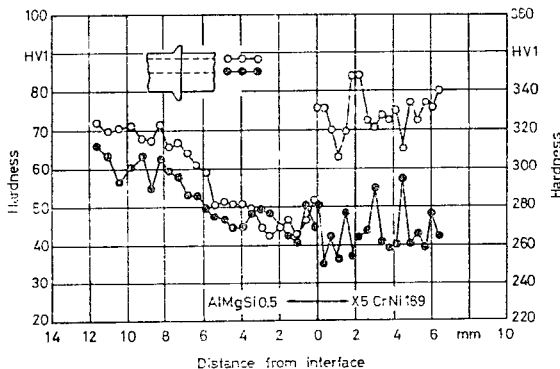


Fig. 1 Hardness distribution of a continuous-drive bar weld between X 5 CrNi 18 9 and AlMg Si 0.5, 20mmφ  
Welding parameter:  $n=1500\text{min}^{-1}$ ,  $s_f=4\text{mm}$   
 $v_f=1\text{mm s}^{-1}$ ,  $v_v=100\text{N mm}^{-2}$ ,  $t_v=4\text{s}$ .

테인레스강에는 경도의 변화가 거의 없는데, 이것은 이쪽으로 전달되는 마찰열이 적고 용접온도가 알루미늄의 액화온도를 초과하지 못하므로 스테인레스강의 재결정온도나 잔유응력제거 열처리온도가 아직 도달되지 못하였기 때문일 것이다. 스테인레스강의 중심부와 표면에서의 경도에 상당한 차이가 있는 것은 봉제조시 소성가공경화의 효과가 반경에 따라 다르게 발생하였기 때문이라 생각된다.

2.4. 인장시험, 충격인장시험 및 반복인장시험

마찰전진속도를 변화시키면서 결합한 X 5 CrNi 18 9와 E-Cu(II) 용접부에 대한 인장시험결과가 Fig. 2에 표시되어 있다. 파단은 오직 한 용접조건에서만 경계

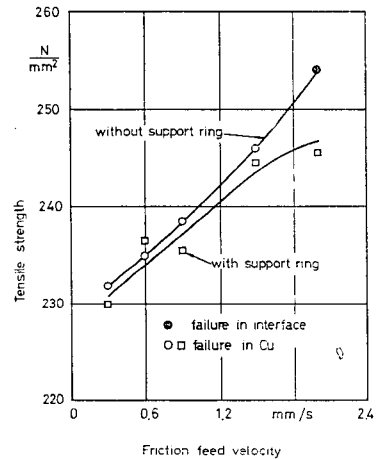


Fig. 2 Tensile strength of continuous-drive bar welds between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu(II), 20mmφ, with and without support ring  
Welding parameter:  $n=1500\text{min}^{-1}$ ,  $s_f=3\text{mm}$ ,  $p_v=75\text{Nmm}^{-2}$ ,  $t_v=4\text{s}$

면에서 발생하고 다른 조건에서는 모두銅의 열영향부에서 발생하였다. 이때 용접부의 인장강도는 용접전銅의 인장강도보다 낮는데 이것은銅의 열영향부에서 소성가공경화효과가 제거되었기 때문이다. 인장강도는 마찰전진속도가 증가할수록 높아지는데 이것은 마찰가열거리가 일정한 조건에서 마찰전진속도가 증가하면 마찰가열시간이 짧아지고, 따라서 발생하는 마찰열이 감소하며, 이결과 열영향부의 폭이 좁아져서 파단이 발생하는銅의 열영향부에 미치는 스테인레스강과 용접영향을 받지않고 소성가공경화상태에 있는銅의 지지효과가 커졌기 때문이다. 발생된 마찰열이 너무작아

충격굽힘시험에서 중심부에 용접결함이 존재하는 것으로 판명된 용접부도 인장시험에서는 파단이 銅의 열영향부에서 발생하고 높은 인장강도를 나타내었는데 이것도 위의 지지효과에 의한 것이다. 용접중 발생하는 flash에 두 재료를 모두 참여시키기 위해서 고온에서의 강도가 낮은 銅의 용접부에 지지고리(support ring)를 씌워서도 실험하였는데 이때는 더 많은 마찰열이 발생하고, 또 압접과정중에 시편결이도 덜 축소되기 때문에 열영향부가 넓어지고 따라서 그 인장강도는 지지고리가 없는 경우보다 더 낮았다.

AlMgSi 0.5와 X 5 CrNi 18 9의 마찰을 이용한 결합에서도 최적용접조건을 선택하면 알루미늄의 열영향부보다 더 높은 인장강도를 갖는 마찰결합을 얻을 수 있었다. 銅과 스테인레스강의 마찰용접부에 대한 인장시험시와 마찬가지로 파단은 강도가 낮은 알루미늄의 열영향부에서 발생하고 이때의 인장강도도 용접전의 알루미늄에 비해서 낮았다. 이것 또한 온도가 높아짐에 따라 소성가공경화상태에 있던 알루미늄의 열영향부에 재결정현상이 발생하여 소성가공경화가 제거되었기 때문이다.

충격인장시험은 충격굽힘시험기에 장치를 부착하여 수행하였는데 충격인장력이 가해지기 시작하는 순간의 변형속도는 약  $5\text{ms}^{-1}$ 이었다. 스테인레스강과 E-Cu(I)의 마찰용접부에 대한 충격인장시험시 파단은 단순인장시험때와 마찬가지로 銅의 열영향부에서 발생하였으나(Fig. 3), 그때의 인장강도는 단순인장강도에 비해서

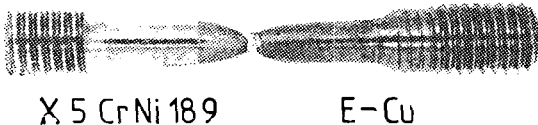


Fig. 3 Fracture position by impact tension test of a continuousdrive bar weld between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu (I)

약 30~40% 높게 나타났다. 용접전 소성가공경화상태에 있는 E-Cu의 충격인장강도와 단순인장강도의 차이는 85%까지 이르고 있으나 파단시의 단면적감소율은 두 결과가 거의 동일하였다.

반복하중을 받는 구조물에 노치가 존재하면 노치가 없을때와 비교하여 그 피로수명이 일반적으로 현저하게 감소한다. 이 노치효과가 이성재료마찰용접부의 피로수명에 미치는 영향을 규명하기 위해서 마찰경계면의 중심부에 결함이 존재하는 스테인레스강과 E-Cu(I)의 용접부에 반복인장하중을 가하여 시험하였다. 이 시험에는 직경이 20mm인 용접시편을 절삭가공한

7mm 직경의 시편을 사용하였기 때문에 시편중심부의 결함이 시험시편의 피로강도에 미치는 효과는 flash만을 제거한 용접시편에 미치는 효과보다 더 크다. 가해진 최고인장응력은  $100\sim 170\text{Nmm}^{-2}$ 이었고 최저응력은 항상  $0\text{Nmm}^{-2}$ 이었다. 이 시험결과 파단은 항상 銅의 열영향부에서 발생하였으며 그 위치는 마찰경계면에서 3~4mm 떨어진 지점이었다. 이것은 강도가 높은 스테인레스강이 마찰경계면에 미치는 변형저지효과에 의해서 변형이 강도가 낮은 E-Cu의 열영향부에 집중적으로 발생하였기 때문일 것이다. 위의 시험결과 단순인장시험, 충격인장시험, 반복인장시험이 마찰경계면자체의 품질검사에 적합치 않음을 알 수 있다.

## 2.5. 굽힘시험 및 반복굽힘시험

이성재료의 마찰용접부에 대한 3점지지 굽힘시험에서는 대부분의 변형이 강도가 낮은 재료의 열영향부에서만 집중적으로 발생하였는데, 이역시 강도가 높은 재료가 마찰경계면에서 발생하는 소성변형을 억제하였기 때문이다. 따라서 이와같은 이성재료의 마찰용접부에서 얻어지는 파단시의 굽힘각도는 비교적 작으며 이 크기를 동성재료의 용접부에 대한 시험결과와 비교할 수는 없다.

굽힘시험에서 얻어지는 파단면은 경계면 혹은 그 근처에서 발생되었기 때문에 마찰경계면자체의 품질검사에 인장시험보다 더 적합하였다. 용접한후 flash만을 제거한 20mm 직경의 원통형시편(E-Cu(I)+X 5 CrNi 18 9)을 굽힘시험하여 얻은 스테인레스강쪽의 파단면을 Fig. 4에 나타내었다. 대부분의 파단면은 銅으로 덮여 있는데 그 두께는 약 5mm까지 되었다. 마찰열의 발생이 제일 낮은 시편의 중심부에는 용접결함이 명확히 보이고 있는데 똑같은 시편의 인장시험에서는

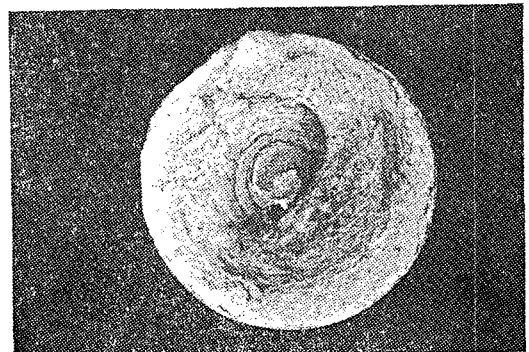
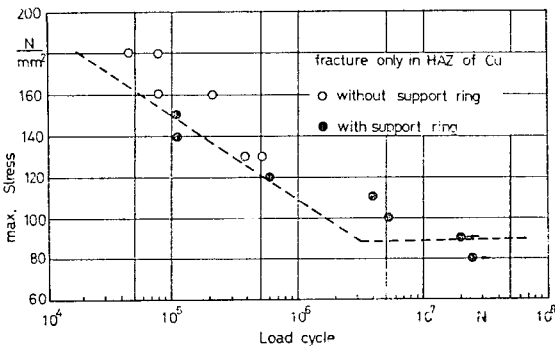


Fig. 4 Bending test fracture face of a continuousdrive bar weld between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu(I), 20mmφ

과단이 항상 銅의 열영향부에서 발생하였기 때문에 용접결합의 존재를 확인할 수가 없었다.

마찰용접부의 중심부에 결함이 존재하는 경우 이것이 용접부의 피로수명을 감소시키는 노치의 역할을 하는가를 규명하기 위해서 반복굽힘시험을 수행하였다. 여기에 사용된 시편은 따라서 충격굽힘시험결과 마찰경계면에 작은 결함이 발생하는 것으로 판명된 용접조건하에서 제작되었다. 시험부분의 직경이 9.48mm 인 스테인레스강과 E-Cu(I)의 시편에 표면에서의 최고응력이 80~180Nmm<sup>-2</sup> 인 반복하중을 가하여 얻은 결과가 Fig. 5에 도시되어있다. 이들 시편중 일부는 지지



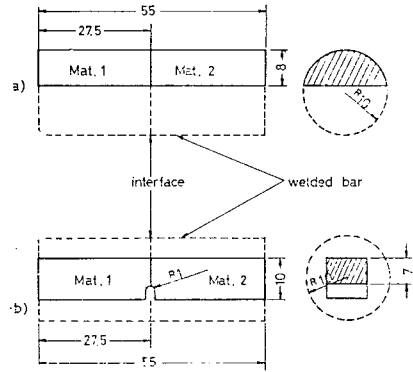
**Fig. 5** Results of rotating bending test on continuous-drive bar welds between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu(I), 20mmφ, with and without support ring

Welding parameter:  $n=3000\text{min}^{-1}$ ,  $v_f=2.5\text{mms}^{-1}$ ,  $s_f=4\text{mm}$ ,  $p_v=85\text{Nmm}^{-2}$ ,  $t_v=4\text{s}$

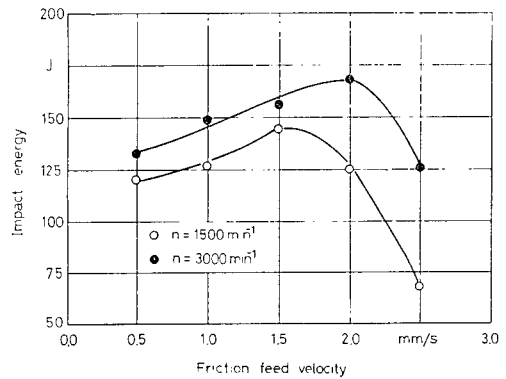
고리(support ring)를 銅에 씌워서 제작하였는데, 이때 지지고리에 의한 마찰열의 증가를 방지하기 위해서 지지고리를 경계면에서 약 6mm 떨어진 곳에 장치하고 마찰전진거리를 4mm로 제한하였다. 위의 시험결과 지지고리가 이성재료 마찰용접부의 피로거동에 미치는 영향은 거의 없고, 시험부표면에서의 최고응력이 100Nmm<sup>-2</sup> 이상인 반복굽힘하중하에서는 과단이 항상 銅의 열영향부에 발생함을 알 수 있었는데 이것은 앞에서와 마찬가지로 변형의 대부분이 銅의 열영향부에 집중되었기 때문일 것이다. 따라서 반복굽힘시험법도 이성재료 마찰경계면에 발생하는 미세한 용접결합을 발견하는에는 적합치 않음을 알 수 있다.

## 2.6. 충격굽힘시험

충격굽힘시험에는 노치가 있는 시편과 없는 시편을 사용하였으며, 하나의 검사조건에 대해서 적어도 3개의 시편을 시험하였다. 노치가 없는 충격시험을 위해서는 용접된 원통형의 시편을 반으로 나눈다음 절단면



a) unnotched specimen, b) notched specimen  
**Fig. 6** Specimen for impact bending test



**Fig. 7** Results of unnotched-bar impact bending test on continuous-drive bar welds between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu(I), 20mmφ

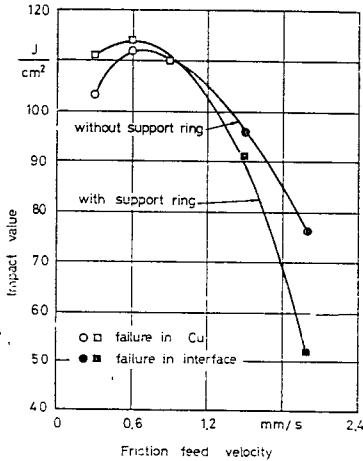
Welding parameter:  $s_f=4\text{mm}$ ,  $s_v=8\text{mm}$ ,  $v_v=20\text{mms}^{-1}$ ,  $t_v=4\text{s}$

을 연삭하여 높이가 8mm 되게 하였으며 전체 길이를 55mm로 하였기 때문에 일반충격굽힘시험기를 직접 사용할 수가 있었다. 이와같은 형상의 시편을 사용하면 직육면체형상의 규격화된 노치충격굽힘시편에 비해서 가공이 비교적 간단하고 또 넓은 마찰경계면을 일시에 검사할 수 있는 장점이 있다. Fig. 7에 도시된 스테인레스강과 E-Cu의 마찰용접부에 대한 충격굽힘시험결과에 의하면 마찰전진속도가 증가함에 따라 충격에너지도 높아짐을 알 수 있다. 이와같이 용접결합이 없을 때는 마찰경계면에 균열이 생기지 않고 銅의 열영향부가 많은 소성변형을 겪으면서 굽혀졌다. 그러나 마찰전진속도가 어느 한계를 넘으면 마찰면의 중심부에 결함이 발생하여 과단이 마찰경계면에서 유발되므로 소성변형에 흡수되는 충격에너지가 감소하였다.

노치가 있는 시편을 제작할때는 모든 시편이 마찰용접부의 동일한 위치에서부터 만들어지도록 유의하여야

한다. 이것은 마찰면의 중심부에서 발생하는 마찰열이 나 소성변형이 가장자리에서 발생하는 것과 상당한 차이가 있고, 따라서 용접부의 기계적 성질도 반경에 따라 다르기 때문이다. V노치를 갖는 충격굽힘시험제작 시에는 또한 노치의 끝이 마찰경계면에 정확히 위치하도록 주의하여야 한다. V노치의 끝이 마찰경계면에서 조금만 떨어져도 충격에너지의 변화가 크기 때문에 본 연구에서는 Fig. 6b에 도시된 바와 같이 노치의 끝이 둥근시편(DVM 시편)을 사용하였다.

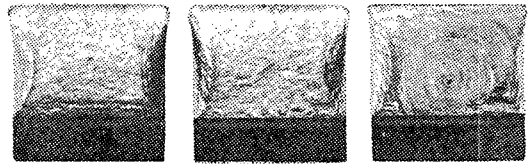
스테인레스강과 E-Cu(II)의 마찰용접부 중심으로부터 제작한 DVM 시편에 대한 충격굽힘시험의 결과가 Fig. 8에 표시되었다. 마찰용접부의 충격시험치는銅의



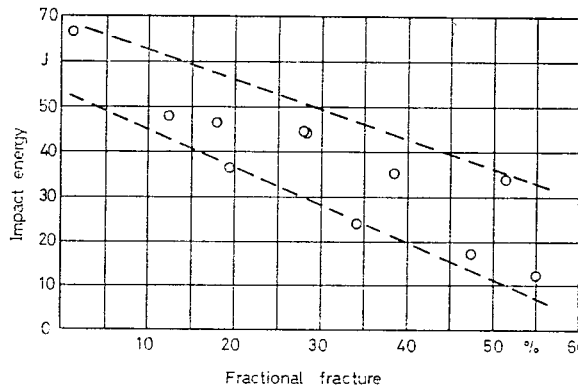
**Fig. 8** Impact value of continuous-drive bar welds between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu(II), DVM-specimen at 20°C  
Welding parameter as in Fig. 2

용접전 충격시험치보다 낮고 그 크기는 용접조건에 따라 큰 차이를 보이고 있는데 이 결과는 동일한 용접부에 대한 인장시험결과(Fig. 2)와 비교할 때 그 추세가 전혀 다를 수 있다. 즉, 충격굽힘시험에는 마찰경계면에 용접결함이 존재한 경우 파단이 경계면에서 발생하고 그 때의 충격에너지도 급격히 감소하는데 반해서 인장시험에서는 강도가 낮은 재료의 열영향부에 파단이 발생하고 따라서 인장강도도 높은 값을 유지하였다. 이 시험에서 생성된 파단면을 비교한 Fig. 9를 보면 마찰전진속도가 너무 커서 용접결함이 존재하면 (Fig. 9c) 소형변형이 아주 미세하였으며, 측정된 충격에너지와 용접결함크기와의 관계는 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 거의 직선적으로 표시될 수 있었다.

스테인레스강과 AlMgSi 0.5를 적절한 마찰용접조



a)  $v_f=0.3\text{mm/s}^{-1}$ , b)  $v_f=0.9\text{mm/s}^{-1}$ , c)  $v_f=2\text{mm/s}^{-1}$   
**Fig. 9** Impact bending test fracture face of continuous-drive bar welds between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu(II), DVM-specimen at 20°C



**Fig. 10** Correlation of impact energy with fractional fracture by U-notch impact bending test of continuous-drive bar welds between X 5 CrNi 18 9 and E-Cu(II), DVM-specimen at 20°C  
Welding parameter as in Fig. 2

건하에서 결합하면 용접부의 중심에서부터 제작된 DVM 시편의 충격시험치가 52Jcm<sup>-2</sup>까지 도달하여 용접전 알루미늄의 충격시험치인 29Jcm<sup>-2</sup>(Table 2)와 비교하여 거의 2배나 되었는데 이것은 소성가공경화상태에 있던 알루미늄의 열영향부가 높은 용접온도의 영향으로 재결정 현상을 겪었기 때문일 것으로 생각된다.

### 3. 결 론

이성재료 마찰용접부의 경계면에 발생한 용접결함을 찾아내기 위해서 여러가지 파괴시험법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접부의 경도를 측정하면 열영향부의 크기를 결정할 수 있다.
- 2) 단순인장시험, 반복인장시험, 충격인장시험, 반복굽힘시험에서는 마찰경계면에 결함이 존재해도 파단은 강도가 낮은 재료의 열영향부에 발생하기 때문에 이성재료의 마찰경계면 자체에 대한 품질검

사가 어렵다.

- 3) 이성재료 마찰용접부에 대한 3점 지지 굽힘시험에서는 파단이 마찰경계면에서 발생하기 때문에 마찰경계면의 정성적인 검사가 가능하다.
- 4) 충격굽힘시험을 통하면 파단이 마찰경계면 혹은 그 주위에 발생하기 때문에 마찰경계면 자체의 검사가 가능하다. 이때 충격에너지는 마찰경계면의 상태에 따라 큰 차이를 나타내므로 최적용접조건을 구하는 척도로 사용하기에 적합하다.

참 고 문 헌

- (1) C.R.G. Ellis, Friction welding: where industry uses it, "Welding Design and Fabrication", Aug. 1981, pp. 78—81.
- (2) A. Hasui and S. Wakida, "Friction Welding of Sulphur Free Machining Steel", Trans. of Japan Weld. Soc., Apr. 1981, pp. 8—13.
- (3) H.-H. Klick, "Dauerfestigkeit von Reibschweissverbindungen", ZIS-Mitteilungen, Jul. 1975, pp. 1047—1051.
- (4) D. Kokenbrink and W. Beitz, "Tragfähigkeit Reib- und Abbrennstumpfgeschweisster Bauteile bei Dynamischer Belastung", Konstruktion, Jun. 1980, pp. 227—230.
- (5) F. Erdmann-Jesnitzer, "Nahtnahe Kornfeinerung

Beim Reibschweissen Durch Thermische Sowie Thermomechanische Einflüsse", X.Schweisstechnisches Hochschulkolloquium im Haus der Technik, Essen, 1977, pp. 13—27.

- (6) G. Tutzschky, "Probleme bei der Ultraschallprüfung von Reibschweissverbindungen", Schweisstechnik, Apr. 1980, pp. 166—167.
- (7) O.R. Zaborovskii and V.T. Bobrov, "Detection of Defects by Ultrasonic Inspection in Seams Produced by Friction Welding", Defektoskopiya, Feb. 1972, pp. 122—126 (transl. as Soviet Journal of Nondestructive Testing).
- (8) T.J. Jessop and W.O. Dinsdale, "Mechanical Testing of Dissimilar Metal Friction Welds", Welding Research Int., 6(2), 1976, pp. 1—22.
- (9) T.J. Jessop, E.D. Nicholas and W.D. Dinsdale, "Friction Welding of Dissimilar Metals", Advances in Welding Processes, 4. int. conf., Harrogate, May 1978, pp. 23—36.
- (10) C.R.G. Ellis and E.D. Nicholas, "Determination of a Procedure for Making Friction Welds between Electrical Grade Aluminium and Tough Pitch Copper", Welding Research Int., 5(1), pp. 1—32.
- (11) S.-J. Na, "Das Reibschweissen ungleichartiger Metalle", TU Braunschweig 박사학위논문, 1983.