

論 文

大韓熔接學會誌
第3卷 第2號 1985年 11月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 3, No. 2, Nov., 1985

강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향
—동종강에 대하여—

나 석 주* · 김 성 도**

Influence of Carbon Equivalents on Steel Friction Welds : Similar Steels

by

S. J. Na · S. D. Kim

Abstract

In this study, the influence of carbon equivalents on friction welds of similar steels was investigated. Four types of steels with 15mm diameter were tested in the wide range of carbon equivalents from 0.3 to 1.1

Main experimental results are summarized as follows :

- (1) Under the constant burn-off length, the friction time becomes longer with the increasing carbon equivalent, but the upset length shows no consistent tendencies.
- (2) Due to the recrystallization in the contact area, the maximum hardness occurs some away from the contact surface. And it increases almost linearly with the increasing carbon equivalent.
- (3) Even a steel with 1.1 C.E. can be friction welded to make defect-free welds.
- (4) With the increasing carbon equivalent, the bend angle and charpy impact value decrease very rapidly in the range from 0.3 C.E. to 0.6 C.E., but remain nearly unchanged for C.E. higher than 0.6.
- (5) Heat treatment of the base metals before welding has very little influence on the mechanical properties of welds. On the other hand, normalizing of the welds improves the bend angle and charpy impact value, but its effect becomes almost negligible, when the carbon equivalents are higher than 0.6.

1. 서 론

마찰용접법은 다른 용접법에 비해 기술적인 면과 경제적인 면에서 많은 잇점을 지니고 있다. 즉, 액상용접(fusion welding)에 의한 용접부보다 열영향부의 폭이

좁고 기계적 성질이 양호한 용접부를 얻을 수 있으며, 액상용접 시에는 용융온도의 차이와 brittle한 intermetallic compound의 발생등으로 인해서 결합이 불가능한 이성재료도 적절한 용접조건 하에서는 견고한 용접부를 얻을 수 있다. 또한 값비싼 단조나 주조대신에 몇 가지의 간단한 형상의 부품들을 결합하여 비교적 복잡

* 한국과학 기술원, 정회원

** 한국과학 기술원

Table 1. Chemical compositions of base metals

Material	Chemical composition(wt %)						carbon equivalent ¹⁾		
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	C. E. (1)	C. E. (2)	C. E. (3)
SM 20C	0.20	0.27	0.50	0.016	0.012	0.005	0.393	0.287	0.285
SM 45C	0.49	0.28	0.65	0.062	0.081	0.005	0.723	0.616	0.609
SPS 3	0.77	0.33	0.72	0.068	0.090	0.019	1.033	0.913	0.902
STC 3 ²⁾	1.03	0.26	0.33	0.050	0.094	0.005	1.178	1.105	1.097

주 1) from The Welding Encyclopedia, pp.C-10

$$C. E. (1) = C\% + \frac{Mn\%}{4} + \frac{Si\%}{4} \text{ for most carbon steels}$$

$$C. E. (2) = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{Cr\%}{5} + \frac{Mo\%}{4} \text{ for hardenability}$$

$$C. E. (3) = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{Ni\%}{20} + \frac{Cr\%}{10} + \frac{Cu\%}{40} - \frac{Mo\%}{50} - \frac{V\%}{10} \text{ for hardness in the transformed structure}$$

주 2) spheroidized carbide structure

한 제품의 제작이 가능하고, 자동화가 용이하고 제품의 대량생산이 수월하며, 용접부 품질의 재생산성이 높기 때문에 자동차 공업과 공구제조업등 여러 분야에서 그 사용범위가 점차 넓어지고 있다.¹⁾

최근에는 공업적으로 많은 중요성을 지니는 탄소강에 대한 연구가 매우 활발하여 탄소강 마찰용접부에 대한 재료적, 기계적 특성과 열유동에 의한 용접부의 기계적 성질 변화 및 최적 용접조건등에 관한 다수의 논문들이 발표되었다.²⁻⁶⁾ 그러나 지금까지는 시편의 크기는 물론 화학적 성분의 변화에 관한 고려가 없이, 특정한 시편크기와 주어진 재료에 대해서만 개별적으로 조사하였기 때문에 최적 용접조건의 설정을 위해서는 각 경우마다 새로운 실험을 통하여야만 하였다. 따라서 본 연구에서는 탄소강의 화학적 성분과 마찰용접성간의 상관관계를 규명하기 위해서 탄소당량이 탄소강의 마찰용접에 미치는 영향을 규명하고 이 결과로부터 최적의 용접조건을 구하는 기본방향을 제시하고자 한다.

Table 2. Mechanical properties of base metals

Material	U. T. S. ¹⁾ (kgf/mm ²)	Bend angle ²⁾ (°)	Impact value ³⁾ (kgf-m/cm ²)	Hardness ⁴⁾ (Hv)
SM 20C	50.0	> 100	15.4	126
SM 45C	71.2	> 100	2.2	172
SPS 3	103.0	> 100	0.3	222
STC 3	65.7	> 100	0.3	151

1) $D=6.25mm$, $L=37mm$

2) $D=15mm$, $L=180mm$, three-point bending

3) Charpy V-notch specimen, 20°C

4) Micro hardness (knoop hardness) with $p=100g$

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 용접조건

실험에서는 넓은 범위에 걸친 탄소당량의 영향을 조사하기 위해서 기계구조용 탄소강인 SM 20C, SM45C와 탄소공구강인 STC 3 및 스트리밍용 탄소강 SPS 3을 사용하였으며 모든 시편의 지름은 15mm로 통일하였다.

Table 1. 탄소당량은 사용하는 목적에 따라 여러가지 지식으로 표현될 수 있으나⁷⁾ 본 연구에서는 Table 1에 표시된 것 중에서 변태된 조직의 경도를 대표하는 탄소당량을 취하여 연구결과들을 해석하였다. 이 탄소당량(C. E. (3))은 일반적으로 쓰이는 C. E. (1)과는 상당한 차이가 있으나 hardenability를 나타내는 C. E. (2)와는 매우 유사한 값을 보여주고 있다.

Table 2에는 실험에 사용한 모재의 기계적 성질들을 나타내었다. STC3을 제외한 탄소강에 대해서는 탄소당

량이 증가할수록 인장강도와 경도는 증가하고, 인성은 감소하는 일반적인 경향을 보이고 있으나 탄소당량이 제일 높은 STS 3의 인장강도와 경도는 SM 20C와 SM 45C의 중간정도에 머무르고 있는데, 이것은 현미경 조직조사결과 열처리에 의해서 carbide가 구상화(spheroidizing)되었기 때문임이 판명되었다.

실험에 사용된 용접기는 continuous drive friction welding machine으로서, 마찰용접부의 기계적 성질에 영향을 줄 수 있는 용접변수들이 많으나(Fig. 1), 본 연구에서는 그 중에서도 마찰열과 밀접한 관계가 있는 마찰압력(friction pressure, P_1)과 마찰가열길이(burn-off length, L_1)만을 변수로 취하여 다음과 같은 용접 조건하에서 실험하였다.

- 회전수(N) : 3000rpm
- 마찰 가열길이(L_1) : 1; 2; 3mm
- 마찰 압력(P_1) : 2.5; 4.5; 6.5kgf/mm²
- 단조 압력(P_2) : 14kgf/mm²
- 단조 시간(t_3) : 4sec

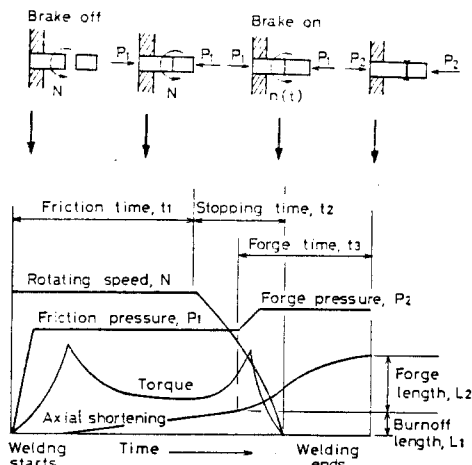


Fig. 1. Schematic diagram of typical welding parameters of continuous drive friction welding

2.2 실험방법

먼저 1차적으로 선정된 각 조건하에서 모든 재료를 마찰용접하여 얻은 용접부의 특성을 평가하기 위해서 용접변수의 해석과 용접부의 금속조직 및 경도분포 시험을 수행하였으며 용접균열이 발생할 가능성이 높은 플래쉬(flash) 부근에서의 균열발생 유무도 관찰하였다. 또한 각 용접조건에 대하여 인장시험과 3점굽힘 시험을 통해서 용접부의 기계적 성질들을 측정하였으며, 그 결과들, 특히 굽힘각도와 굽힘하중을 서로 비

교하여 최적용접 조건을 선정하였다. 따라서 탄소당량과 용접부의 특성과의 상관관계를 규명하기 위한 나머지 실험들은 다음과 같이 최적조건으로 선정된 마찰가열 길이(L_1)와 마찰압력(P_1) 하에서만 수행하였다.

- C. E. = 0.285(SM 20C) : $L_1=1mm, P_1=2.5kgf/mm^2$
- C. E. = 0.609(SM 45C) : $L_1=3mm, P_1=4.5kgf/mm^2$
- C. E. = 0.902(SPS 3) : $L_1=2mm, P_1=4.5kgf/mm^2$
- C. E. = 1.097(STS 3) : $L_1=1mm, P_1=4.5kgf/mm^2$

용접부의 인성을 탄소당량과 비교하기 위한 샤르피 충격시험은 최적마찰조건하에서 결합된 용접부에 대해서만 수행하였고, 또한 용접부에 미치는 열처리 효과를 조사하기 위해서 용접전과 용접후에 노르말라이징 처리를 하였는데, 이때 오오스테나이트가 충분히 발생하도록 재료의 성분에 따라 적절한 가열온도를 택하여 1시간 30분간 유지시킨후 공기의 유동이 없는 곳에서 공냉하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접변수의 해석

마찰가열길이(L_1)와 마찰압력(P_1)을 일정하게 고정하였을 때 나타나는 마찰시간(t_1)과 탄소당량(C. E. (3))과의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 마찰가열길이

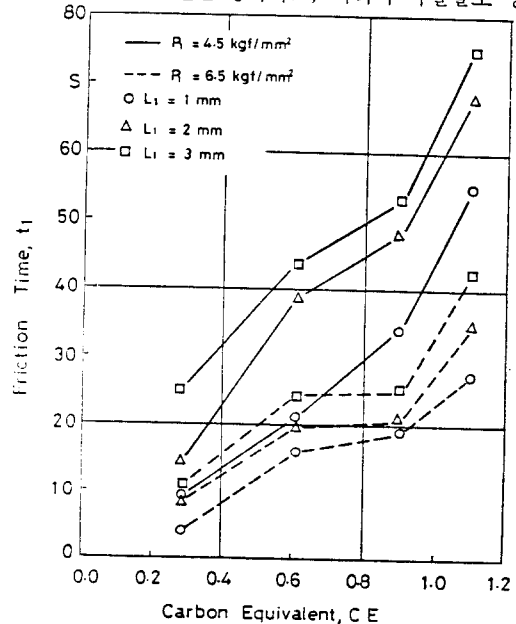


Fig. 2. Influence of carbon equivalents on friction time (t_1) of similar steel friction welds; 15mmφ, n=3000rpm, $p_2=14kgf/mm^2$, $t_3=4 sec$.

가하리라고 예상할 수 있으며, 마찰압력이 높으면 burn-off rate가 커지기 때문에 일정한 마찰가열길이에 대해서는 짧은 마찰시간을 보여주고 있다. 또한 마찰 압력과 마찰가열길이가 일정할 때 마찰시간은 탄소당량이 높아짐에 따라 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 탄소당량이 1.097인 STC 3의 경우에 burn-off rate가 최저인데 이 재료의 모재는 구상화된 carbide에 의해서 비교적 낮은 인장강도와 경도를 나타내고 있음을 고려할 때 (Table 2), 마찰 가열기간중의 burn-off 현상은 고온으로 가열된 근처에서 대부분 발생되고, 따라서 모재의 금속조직이 burn-off rate에 미치는 영향은 무시할 수 있음을 알 수 있다. 최적용접조건으로 선정된 마찰가열길이 (L_1)와 마찰압력 하에서 측정된 마찰시간(t_1)은 $C.E. = 0.285$ 인 경우에는 약 14초이었고 나머지 재료들에 대해서는 40-50초이었다.

Fig. 3에 는 탄소당량과 단조길이 (L_2)와의 관계를 도시하였다. 단조길이는 시편을 가열시키는 마찰열의 크기와 발생한 마찰열이 전도에 의해서 유출되는 마찰시간 및 재료의 고온강도등 많은 인자들에 의해서 결정되기 때문에 복잡한 양상을 나타내는데, 본 실험에서 선정된 용접조건하에서는 탄소당량의 변화에 따른 단조길이의 증감이 크게 영향을 받지 않는다.

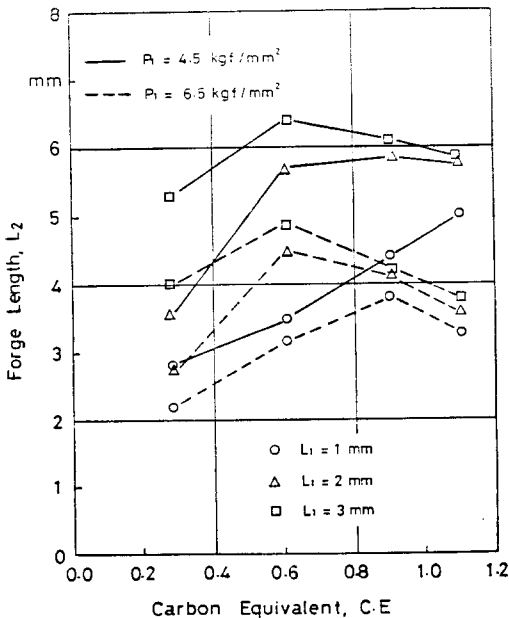


Fig. 3. Influence of carbon equivalents on forge length (L_2) of similar steel friction welds; $15mm\phi$, $n=3000rpm$, $P_2=14 kgf/mm^2$, $t_3=4sec$.

3.2 경도 및 조직 검사

모든 재료의 경우에서 마찰면을 중심으로 한 열영향부에서 높은 경도가 나타났으며, 마찰면에서 멀어질수록 경도 값이 떨어지면서 모재의 경도치에 근접해가는 분포를 보이고 있다(Fig. 4). 탄소당량이 증가함에 따라 열영향부의 경도가 높아지고 있으며, 특히 탄소당량이 1.097인 STC 3의 경우는 경화능이 가장 높으므로 모재의 경도에 비하여 열영향부에서는 실험재료중 제일 높은 경도를 나타내고 있으나, 탄소당량이 0.285인 SM 20C의 경우에는 열영향부의 최대경도치가 Hv

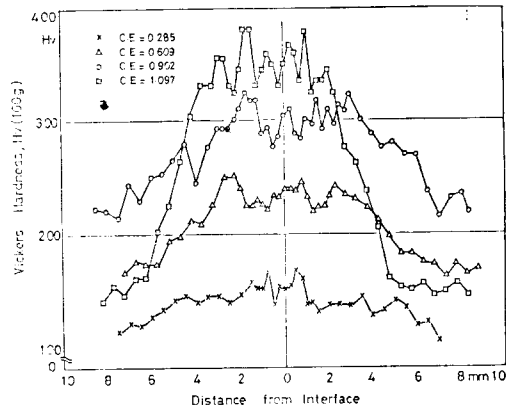


Fig. 4. Typical hardness distributions in friction welds of similar steels.

200에도 미치지 못하고 있다. 이와 같은 경도분포는 열영향부에서의 조직을 관찰함으로써 설명될 수 있는데, SM 20C의 마찰용접부의 조직변화를 Fig. 5에 나타내었다. 모재는 페라이트와 퍼얼라이트로 구성되어 있음을 알 수 있으며(Fig. 5(a)), 열영향부의 가장자리 부분에서는 마찰가열중 퍼얼라이트가 부분적으로 상변태하였다가 냉각시에 다시 퍼얼라이트로 변한 것을 볼 수 있다(Fig. 5(b)). 열영향부의 마찰면에 가까워지면 먼저 페라이트와 퍼얼라이트의 미세화된 조직이 나타나는데(Fig. 5(c)) 이것으로 미루어 보아 노르말라이징 효과도 발생하였음을 알 수 있으며, 마찰면 부근에서는 탄소량이 0.2~0.4%인 탄소강에서 자주 나타나는 Widmannstätten 조직이 생성되어 있음을 알 수 있다(Fig. 5(d)). 다른 재료들의 경우에는 모재의 조직이 용접후에는 베이나이트 및 마르텐사이트로 상변태되어 높은 경도치의 원인이 되고 있다(Fig. 6).

Fig. 4에서 나타난 바와 같이 최고 경도는 마찰면에서 얼마만큼 떨어진 부분에서 나타나고 있고 마찰면과 그 주위에서는 경도가 오히려 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 마찰면 근처의 재결정현상에 의한 것

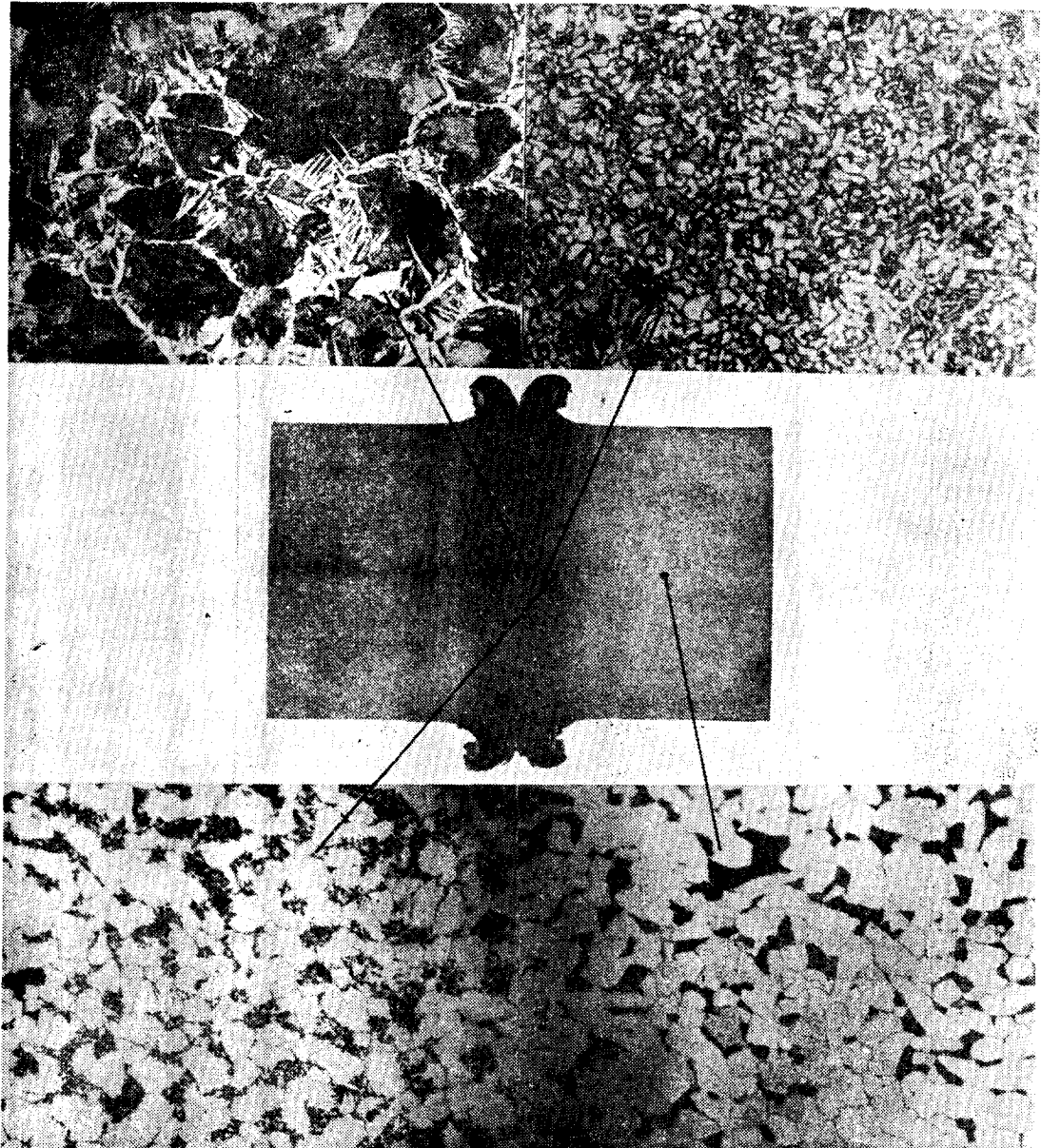


Fig. 5. Typical microstructure of low carbon steel friction welds, C. E. = 0. 285; $15mm\phi$, $n=3000rpm$, $P_1 = 2.5 kgf/mm^2$, $L_1=1mm$, $P_2=14 kgf/mm^2$, $t_3=4sec$; 3% Nital, $\times 200$.

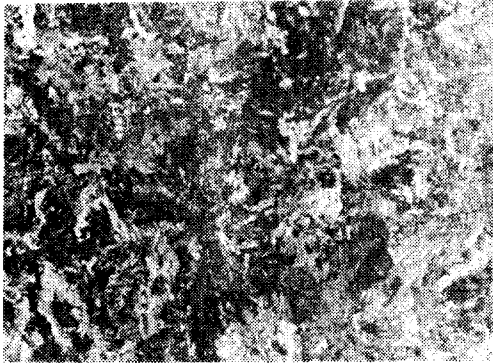


Fig. 6. Typical microstructure of high carbon steel friction welds, C.E. = 1.097; 15 mmφ, n = 3000rpm, P₁ = 4.5 kgf/mm², L₁ = 1 mm, P₂ = 14 kgf/mm², t₃ = 4 sec; 3% Nital, ×200

이라고 추측된다. 즉, 마찰면과 그 주위의 재료는 고온 하에서 연속적인 소성변형을 겪어와서 매우 미세한 입자가 생성되며, 이 미세한 입자는 냉각중 확산에 의한 상변태를 용이하게 하여 입계를 따라서 적은 양의 α-페라이트 혹은 carbide가 석출된 후에 나머지 오오스테나이트가 마르텐사이트 혹은 베이나이트로 변태되기 때문에 이 구역에서의 경도는 최고치보다 약간 낮은 값을 나타내리라 추측된다. Fig. 7에는 C.E.가 0.609인 SM 45C 마찰용접부의 마찰면 부근을 고배율로 찍은 사진인데, 사진의 중앙부에는 미세한 입자의 입계를 따라 석출된 페라이트를 볼 수 있으나 그 둘레에서는 페라이

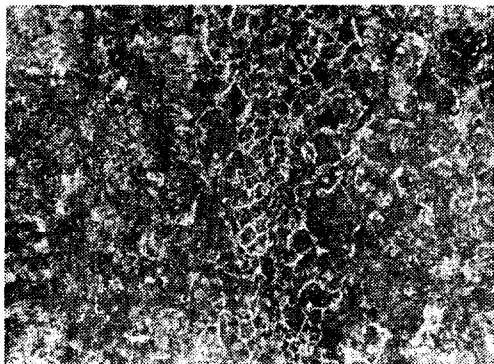


Fig. 7. Grain refinement and formation of ferrite on the grain boundary in friction zone, C.E. = 0.609 (SM 45C); 15 mmφ, n = 3000rpm, P₁ = 4.5kgf/mm², L₁ = 2mm, P₂ = 14kgf/mm², t₃ = 4sec; 3% Nital, ×200.

트의 석출을 관찰할 수가 없다.

마찰용접부 내의 열영향부에서 측정되는 최고 경도치와 탄소당량과의 관계를 Fig. 8에 도시하였다. 마찰용접부에서 나타나는 최고 경도는 모재의 탄소당량이 높아짐에 따라 거의 직선적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 일반탄소강의 액상용접시 관찰되는 현상과 비슷하다.⁸⁾ 이 그림에서는 또한 발생하는 마찰열

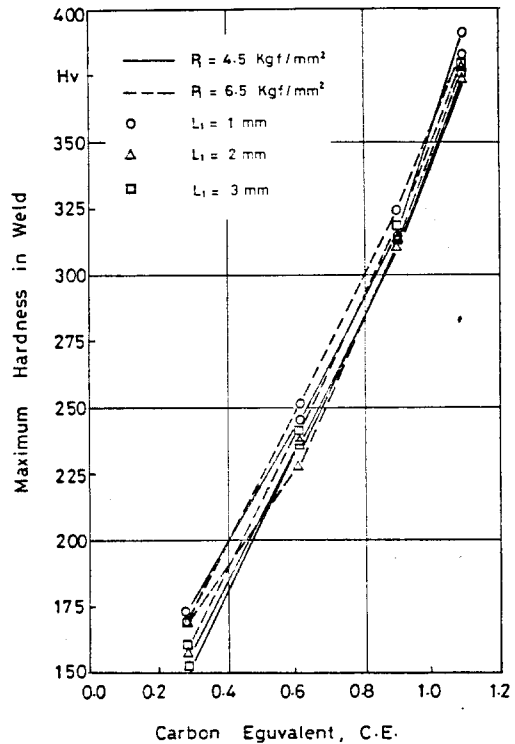


Fig. 8. Relationship between carbon equivalent and maximum hardness of similar steel friction welds; 15mmφ, n = 3000 rpm, P₂ = 14 kgf/mm², t₃ = 4 sec.

과 밀접한 관계가 있는 마찰가열길이와 마찰압력이 변하여도 마찰용접부의 최고 경도치는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이것으로 미루어 보아 서로 다른 용접 조건하에서는 마찰열과 시편길이의 감소(upset) 현상등에 큰 차이가 있는 마찰용접에 의한 탄소강 열영향부의 최고 경도치도 선정된 용접조건하에서는 재료의 탄소당량에 의해서 결정될 수 있음을 알 수 있다.

3.3 인장 및 굽힘 시험

인장시험의 결과 용접부는 모든 용접조건하에서 모재

와 거의 같은 인장강도를 나타내었으며 파단은 항상 열 영향부에서 약간 떨어진 모재에서 발생하였다. 특히 탄소당량이 매우 큰 재료에서 균열과 같은 용접결함이 없는 용접부를 얻을 수 있었으며 인장시험시 역시 모재에서 파단이 일어났는데, 이와 같은 결과는 앞에서 얻은 용접부의 경도분포에 의해서 충분히 이해될 수 있다.

굽힘시험시 탄소당량이 0.285인 재료의 용접부에서는 파단이 없이 100°까지 변형하였고 나머지 재료들에서는 모두 열영향부에서 파단이 발생하였다. 따라서 마찰용

접부의 기계적 특성 비교에는 인장시험보다 굽힘시험이 더 적합함을 알 수 있다.

굽힘시험시에 측정되는 굽힘하중과 indenter의 이동거리와의 관계곡선을 $C.E.=0.609$ 인 SM 45C를 예로 하여 Fig. 9에 도시하였다. 이들 곡선들로부터 직경이 15mm인 시편에 균열이 발생하기까지의 굽힘각도와 최대굽힘하중을 측정할 수 있으며, 곡선과 가로축이 이루는 면적이 용접부의 인성과 비례하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 이 그림에서는 $P_1=4.5kgf/mm^2$ 이고 $L_2=3mm$ 인 (B)의 경우에 인성, 굽힘각도, 최대

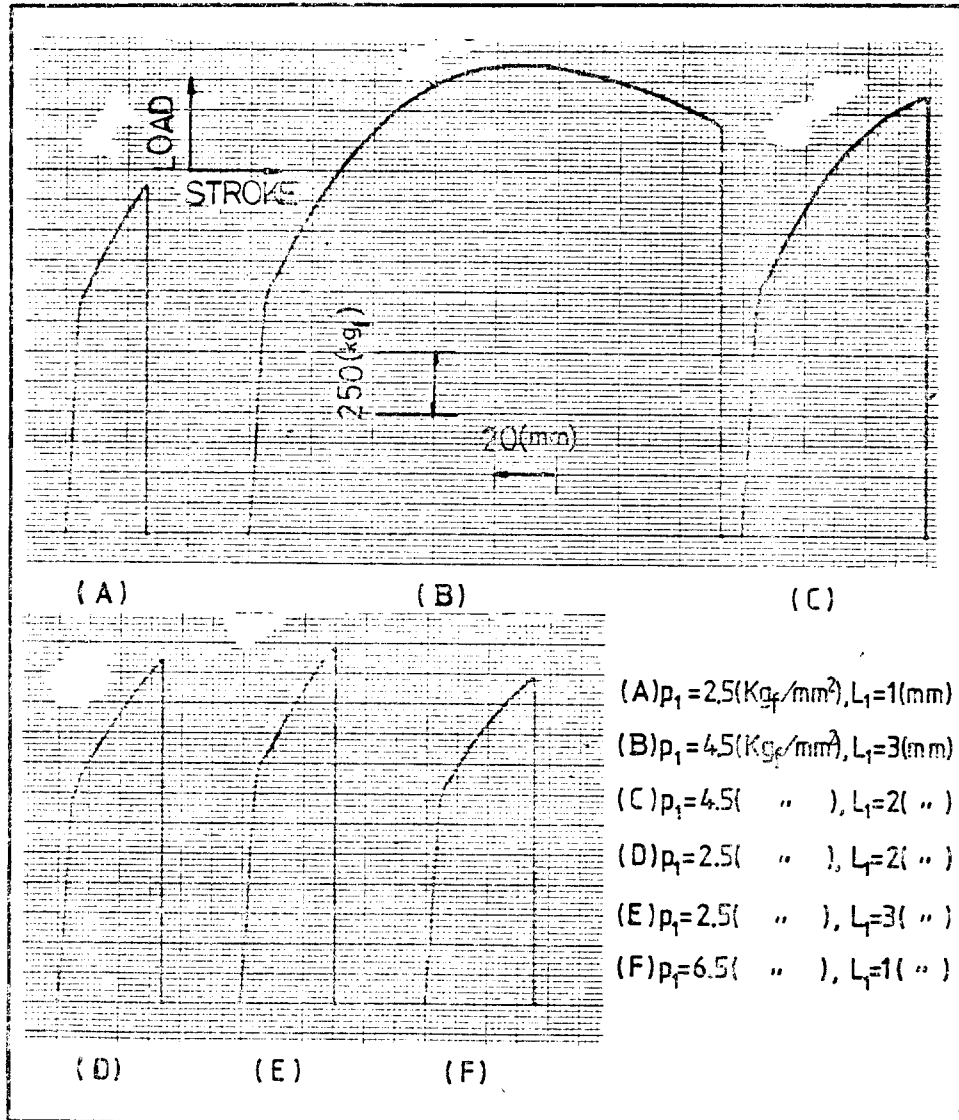


Fig. 9. Load-stroke curves in bend test of similar steel friction welds, C.E. = 0.609; 15mmφ, n=3000 rpm, $P_2=14 kgf/mm^2$, $t_3=4 sec$.

하중이 제일 양호함을 알 수 있어 이 조건을 최적 용접 조건으로 선정할 수 있으며 다른 재료들에 대해서도 이와 동일한 방법으로 최적용접조건을 조사하였다.

최적용접조건 하에서 결합된 용접부의 굽힘 각도와 탄소당량과의 상관 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 탄소당량이 높아짐에 따라 균열이 발생되기까지의 굽힘 각도는 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이와 같은 굽힘각도의 감소 경향은 탄소당량이 0.3과 0.6 사이에서 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러

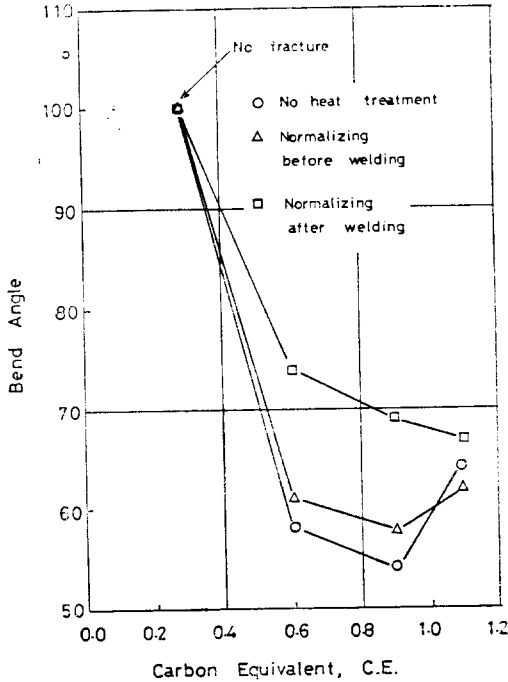


Fig. 10. Influence of carbon equivalents on bend angle of similar steel friction welds; 15 mmφ, optimal welding conditions.

나 탄소당량이 0.6 이상인 재료에 대해서는 굽힘 각도가 거의 일정하게 측정되었으며, 특히 탄소당량이 1.097인 STC3의 용접부는 그보다 탄소당량이 낮은 SM45C나 SPS3보다 더 큰 굽힘 각도를 보여주고 있는데 이것은 구상화된 carbide를 함유하고 있는 조직을 갖는 모재의 경도와 인장강도가 낮아서 굽힘을 용이하게 하기 때문이라 추측된다. 이 그림에서 또한 용접전 모재에 대한 노르말라이징과 용접후 용접부에 대한 노르말라이징이 굽힘각도에 미치는 영향도 볼 수 있는데, 용접전 노르말라이징 처리는 용접부의 굽힘각도와 거의 무관하나 용접후의 노르말라이징에 의해서는 용접부의 굽힘각도가 상당히 향상될 수 있음을 알 수 있다.

3.4 충격시험

Fig. 11에는 상온(20°C)에서 행한 Charpy V-notch impact test를 통해서 측정된 흡수에너지와 탄소당량과의 상관관계를 도시하였다. 굽힘시험의 결과와 마찬가지로 탄소당량이 높아질수록 흡수에너지는 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이때의 감소정도는 탄소당량이 0.3과 0.6사이에서 현저하게 나타나며, 탄소당량

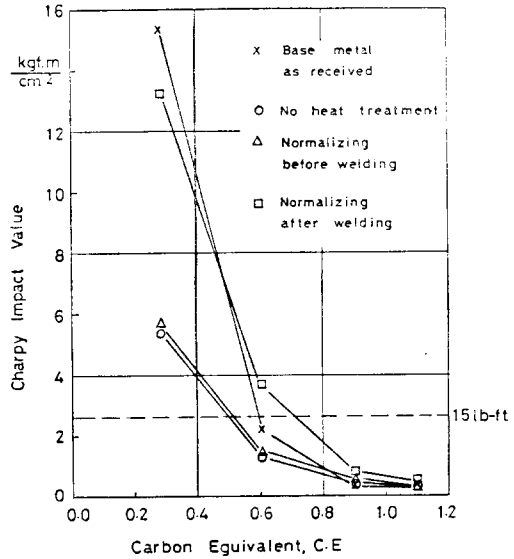


Fig. 11. Influence of carbon equivalents on Charpy impact value of similar steel friction welds; 15 mmφ, optimal welding conditions, Charpy v-notch impact test at 20°C

이 0.6이상이면 흡수에너지의 절대값이 매우 낮기 때문에 탄소당량에 따른 흡수에너지의 변화도 거의 무시할 정도이다. 또한 용접전 노르말라이징은 용접부의 인성에 아무런 영향도 주지 못하나 용접후에 노르말라이징을 하면 용접부의 인성이 상당히 증가하였다. 그러나 이와 같은 용접후 노르말라이징에 의한 용접부의 인성 향상도 탄소당량이 낮을 때는 현저하게 나타나나, 탄소당량이 0.9 이상일때는 그 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 이때 노르말라이징 처리를 한 용접부의 인성은 모재의 인성과 거의 같게 되었다.

4. 결 론

서로 다른 탄소당량을 갖는 동종 탄소강에 대한 마찰 용접성 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마찰가열길이의와 마찰압력등 용접조건을 일정하게 유지하면 재료의 탄소당량이 커질수록 마찰시간은 증가하나, 탄소길이는 일정한 영향을 받지 않는다.

(2) 마찰용접부의 경도분포는 모재에서부터 마찰면까지 점점 증가하는 경향을 보이고 있으나, 마찰면과 그 주위에서는 고온하에서 일어나는 소성변형에 의해서 재결정 현상이 발생하기 때문에 최고경도치는 마찰면에서 조금 떨어진 곳에서 나타난다.

(3) 마찰용접부의 최고경도치는 용접조건이나 모재의 원래 금속조직과는 관계 없이 탄소당량이 커질수록 거의 직선적으로 증가한다.

(4) 탄소당량이 1.1이 되는 탄소강도 마찰용접을 이용하면 균열의 발생이 없는 견고한 용접부를 얻을 수 있으며, 인장시험시 파단은 모재에서 발생한다.

(5) 굽힘시험시 파단은 대부분 열영향부에서 발생하기 때문에 최적용접조건 선정에는 인장시험보다 굽힘시험이 더 적합하다.

(6) 굽힘각도와 충격흡수에너지는 탄소당량이 0.3과 0.6사이에서는 탄소당량이 증가할수록 급격히 감소하나 탄소당량이 0.6이상이 되면 탄소당량의 영향을 거의 받지 않는다.

(7) 용접전 열처리하는 용접후 열처리에 비해서 용접부의 기계적 성질에 미치는 영향이 거의 없으며, 용접후 열처리도 탄소당량이 비교적 낮은(0.6이하) 탄소강의 마찰용접부에 대해서는 굽힘각도 및 충격흡수에너지를 향상시키는 작용을 하나 탄소당량이 큰 재료에 대해서는 그 효과가 미비하다.

후 기

본 연구는 1984년도 한국과학재단 학술연구비로 지원되어 이루어졌다. 이에 재단과 관계자 여러분에게 깊이 감사한다. 또한 마찰용접시 많은 도움을 주신 주식

회사 상진의 손영직 공장장님을 위시한 관계자 여러분에게 감사를 드린다.

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) C. R. G. Ellis, and E. D. Nicholas, *Metallurgical Characteristics and Mechanical Properties of Cold Drawn Mild Steel Friction Welds*, TWI Member Report, May, (1969). pp. 39~69.
- 3) I. F. Squire, *Thermal and Mechanical Characteristics of Friction Welding Mild Steel* British Welding Journal, Nov., (1966), pp. 652~657.
- 4) C. R. G. Ellis, *Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel*, Weld. Jnl. Res. Suppl. 54(4), pp. 183~197.
- 5) D. Schober, and S. Buchholz, *Reibschweissen des Werkstoffes 37 MnSi 5*, Schweisstechnik (Berlin), 1974. pp. 455~456.
- 6) H. Hasui and A. Tanka, *Friction Welding of Cr-Mo steel and Carbon Steel*, Transact. of Japan Weld. Soc., (1979). pp. 30~35.
- 7) T. B. Jefferson, *The Welding Encyclopedia*, Monticello Books, Inc., Lake Zurich, (1974).
- 8) G. E. Linnert, *Welding Metallurgy : Carbon and Alloy Steels*, American Welding Society, (1967).

마 음 마 다 과 학 심 고 손 끝 마 다 기 술 심 자