

## 강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향

—탄소강과 고속도강에 대하여—

나 석 주\* · 양 영 수\*\*

### Influence of Carbon Equivalents on Steel Friction Welds

—Carbon and High-Speed Steels—

S. J. Na, Y. S. Yang

**Key Words** : Friction welding(마찰용접), Carbon equivalent(탄소당량), Carbon steel(탄소강), High-speed steel(고속도강), Mechanical properties(기계적 성질)

#### Abstract

In this study, the influence of carbon equivalents on friction welds of dissimilar steels was investigated. Four types of carbon steels with 10mm diameter were welded to a high-speed tool steel SKH 9.

Main experimental results could be summerized as follows

- (1) Under constant friction pressure, the friction time increased almost linearly with the increasing burn-off length, while the forge length decreased almost linearly.
- (2) The maximum hardness in carbon steels increased almost linearly with the increasing carbon equivalent, but was much lower than that in the high speed steel.
- (3) After quenching and tempering of dissimilar steel friction welds, the hardness in carbon steel weldments became similar as that in the base metal, while the hardness in SKH 9 weld was still higher than that of the base metal.
- (4) Relative movement in the friction phase occurred not at the interface of the weldments, but in the high speed steel near the interface.
- (5) For considered material combinations and welding parameters, most of fractures in tension and twisting tests occurred in the base metal. And welds with so high strength could be produced in a wide range of welding parameters.

#### 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, 액상 용접시에는 용융온도의 차이와

brittle한 intermetallic compound의 발생등으로 인해서 결합이 불가능한 이종재료도 적절한 용접조건하에서는 견고한 용접부를 얻을 수 있다. 또한 값비싼 단조나 주조대신에 몇가지의 간단한 형상의 부품들을 결합하여 비교적 복잡한 제품의 제작이 가능하고 자동화가 용이하여 제품의 대량생산이 수월하며, 용접부 품질의 재생산성이 높기 때문에 자동차 공업과

\* 정희원, 한국과학기술원 생산공학과

\*\* 한국과학기술원 생산공학과

공구제조업 등 여러 분야에서 그 사용범위가 점차 넓어지고 있다.<sup>1)</sup>

최근에는 공업적으로 많은 중요성을 지니는 탄소강에 대한 연구가 매우 활발하여 탄소강 마찰용접부에 대한 재료적, 기계적 특성과 열유동에 의한 용접부의 기계적 성질 변화 및 최적 용접조건 등에 관한 다수의 논문들이 발표되었다.<sup>2-10)</sup>

그러나 지금까지는 시편의 크기는 물론 화학적 성분의 변화에 관한 고려가 없이 특정한 시편 크기와 주어진 재료에 대해서만 개별적으로 조사하였기 때문에 최적용접조건의 선정에 대해서는 각 경우마다 새로운 실험을 통하여야만 하였다. 따라서 본 연구에서는 탄소강의 화학적 성분과 마찰용접성간의 상관관계를 규명하기 위해서 탄소당량이 탄소강과 고속도강의 마찰용접에 미치는 제영향을 규명하고 이 결과로부터 최적의 용접조건을 구하는 기본방향을 제시하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

### 2.1. 실험재료 및 용접조건

실험에서는 넓은 범위에 걸친 탄소당량의 영향을 조사하기 위해서 기계구조용 탄소강인 SM20C, SM45C와 탄소공구강인 STC3 및 스프링용탄소강 SPS3을 사용하였으며 동종탄소강의 용접시에는 모든 시편의 직경을 15mm로 통일하였고, 탄소강과 고속도강(SKH9)의 용접시에는 시편의 직경을 10mm로 일정하게 하였다. 탄소당량은 사용하는 목적에 따라 여러가지 식으로 표현될 수 있으나,<sup>11)</sup> 본 연구에서는 Table 1에 표시된 것중에서 변태된 조직의 경도를 대표하는 탄소당량을 위하여 연구결과들을 해석하였다. 이 탄소당량(C.E. (3))은 일반적으로 쓰이는 C.E. (1)과는 상당한 차이가 있으나 hardenability를 나타내는 C.E. (2)와를 매우 유사한 값을 보여주고 있다.

Table 1. Chemical compositions of base metals

Material	Chemical composition(wt %)								Carbon equivalent <sup>1)</sup>		
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	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	0.032	0.081	0.005			0.723	0.616	0.609
SPS 3	0.77	0.33	0.72	0.038	0.090	0.019			1.033	0.913	0.902
STC 3 <sup>2)</sup>	1.03	0.25	0.33	0.050	0.094	0.005			1.178	1.105	1.097
SKH 9	0.85				3.88	4.38	1.67	5.28			

1) From "THE WELDING ENCYCLOPEDIA", pp. C-10.

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

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

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

2) Spheroidized carbide structure

Table 2. Mechanical properties of base metals

Material	U. T. S. <sup>1)</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Bend angle <sup>2)</sup> (°)	Impact value <sup>3)</sup> (kgf-m/cm <sup>2</sup> )	Hardness <sup>4)</sup> (Hv)	Torque (kgf-m)	
					As received	QT <sup>5)</sup>
SM 20C	50.0	>100	15.4	126	6.3	6.8
SM 45C	71.2	>100	2.2	172	9.6	10.9
SPS 3	103.0	>100	0.3	222	10.3	13.8
STC 3	65.7	>100	0.3	151	7.8	11.1
SKH 9	77.6				8.7	10.5

1) D=6.25mm, L=37mm

3) Charpy-V-notch specimen, 20°C.

2) D=15mm, L=180mm. Three-point bending

4) Micro hardness (Knoop hardness) with p=100g.

5) Quenching : 4min. at 1200°C Oil quenching

Tempering : 30min. at 550°C Air cooling

Table 2에는 실험에 사용한 모재의 기계적 성질 등을 나타내었다. STC 3을 제외한 탄소강에 대해서는 탄소당량이 증가할수록 인장강도와 경도는 증가하고, 인성은 감소하는 일반적인 경향을 보이고 있으나 탄소당량이 제일 높은 STC 3의 인장강도와 경도는 SM20C와 SM45C의 중간정도에 머무르고 있는데, 이것은 현미경 조직 조사결과 열처리에 의해서 Carbide가 구상화(spheroidizing)되었기 때문임이 판명되었다.

실험에 사용된 용접기는 Continuous drive friction welding machine(TOYODA FW/5HA형)으로서 마찰용접부의 기계적·재료적 성질에 영향을 줄 수 있는 용접변수들이 많으나(Fig. 1), 본 연구에서는 그 중에서도 마찰열과 밀접한 관계에 있는 마찰압력(friction pressure :  $p_1$ )과 마찰가열 길이(burn-off length :  $L_1$ )만을 변수로 취하여 다음과 같은 용접조건하에서 실험하였다.

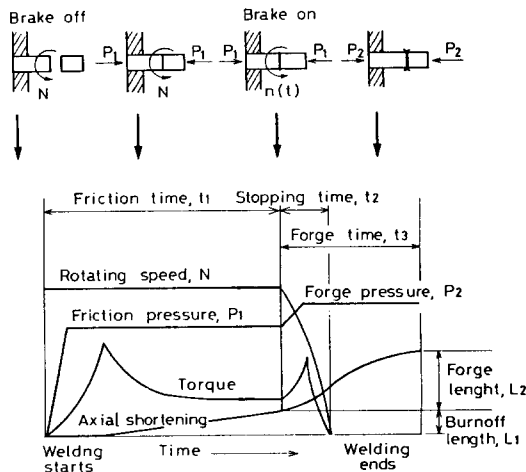


Fig. 1. Schematic diagram of typical welding parameters of continuous drive friction welding.

- 회전수(N) : 3000[rpm]
- 마찰가열길이( $L_1$ ) : 2;3;4[mm]
- 마찰압력( $p_1$ ) : 11;13;15[kgf/mm<sup>2</sup>]
- 단조압력( $p_2$ ) : 25[kgf/mm<sup>2</sup>]
- 단조시간( $t_3$ ) : 4sec

2. 2. 실험방법

고속도강용 공구강은 경화된 상태에서 기계가공하기가 매우 어려우므로 모재는 노르말라이징된 상태로 공급되는 것이 일반적이고, 따라서 기계가공에 사용한 목적으로 제작된 후에는 담금질과 풀림처리

(quenching and tempering)를 하여 원하는 경도와 인성을 얻는다.<sup>13)</sup> 본 연구에서도 용접된 시편을 담금질 및 풀림처리를 한 후에 이와 같은 열처리가 용접부에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하기 위해서 아래와 같은 조건으로 열처리한 후 열처리안한 용접부의 경도, 인장, 비틀림 시험결과와 비교, 검토하였다.

담금질 : 1200°C에서 4분간 유지

Oil quenching

풀림처리 : 550°C에서 30분간 유지

Air cooling

용접부에 대한 인장시험은 대표적인 용접조건에 대해서만 수행하였고, 용접부의 조직변화와 경도분포를 관찰하였으며, 용접부의 기계적 특성을 규명하기 위해서는 드릴링, 밀링등에서와 같이 공구에 실제로 걸리는 하중형태인 비틀림에 대한 강도를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

드릴링이나 밀링등에 사용되는 공구는 동력을 전달하는 축의 역할을 하는 부분과 실제로 작업을 하는 cutter부분으로 나눌 수 있으며, 이때 고속도강 등 특수금속을 필요로 하는 부분은 cutter 부분뿐이다. 따라서 공구의 원가절감을 위해서 값이 싼 일반적인 강으로 축부분을 구성하고 비싼 고속도강 등은 cutting 작업을 실제로 수행하는 팁부분만을 구성하기 위해서 두 가지 종류의 금속을 결합하는 시도가 많이 진행되어 왔다. 여러가지 결합방법중에서도 마찰용접법이 가장 적합하다는 의견이 지배적이며,<sup>7-10)</sup> 지금까지는 축부분 재료로서 SM45C정도의 탄소강이 일반적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 탄소당량이 마찰용접성에 미치는 영향을 규명하기 위해서 동종탄소강의 마찰용접성 시험에 사용한 탄소강을 용접재료로 선정하였고, 용접되는 고속도강으로는 SKH9를 택하였다. 각 재료에 대한 화학적 성분과 측정된 몇가지의 기계적 성질들을 Table 1과 2에 나타내었다. SKH9에는 Cr, Mo, V, W 등이 상당량 함유되어 있어 탄소강 및 저합금강의 범위를 벗어나므로 고속도강에 대한 탄소당량은 계산하지 아니하였으며, 여러가지 기계적 성질중에서도 인장강도와 비틀림 강도만을 구하였는데, 이것은 고속도강의 마찰용접부에 작용하는 하중<sup>2)</sup> 일 지배적인 것이 비틀림하중이기 때문이다.

3.1. 용접변수의 해석

마찰가열시간( $t_1$ )에 미치는 마찰가열길이( $L_1$ )와 마찰가열압력( $p_1$ )의 영향을 Fig. 2와 3에 도시하였다. 실험에 사용된 모든 재료의 조합에 대해서 마찰가열압력이 일정할 때 마찰가열시간은 마찰가열길이가 커짐에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있고, 마찰가열길이를 일정하게 유지하면서 마찰가열압력을 증가시키면 마찰가열시간은 또한 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보여주고 있는데, 이와 같은 현상은 동종탄소강을 마찰용접할 때 관찰되는 마찰가열시간-마찰가열길이, 마찰가열시간-마찰가열압력의 관계와 매우 유사하다.<sup>12)</sup> 그러나 동종탄소강을 마찰용접하는 경우에는 탄소강의 종류에 따라 마찰가열시간의 차이가 상당히 크게 나타나고 있으나, 탄소강과 고속도강을 마찰용접하는 경우에는 그 차이가 그다지 크지 않게 나타남이 관찰되고 있다.

앞에서 측정된 결과들을 정리하여 얻은 마찰가열시간과 탄소당량간의 상관관계를 Fig. 4에 도시하였다. SM20C, SM45C, SPS3 사이에서는 탄소당량이 증가함에 따라 마찰가열 길이는 약간 감소하는 경향을 보이고 있으나, STC3은 탄소당량이 선정된 4가지 재료중에서는 제일 높음에도 불구하고 마찰가열시간은 SPS3에서 보다 더 길게 나타나고 있다. 따라

서 앞의 3가지 재료에 대해서는 탄소당량이 증가할수록 마찰면에서 물질의 유동(주로 봉의 내부에서 바깥쪽으로)이 활발하여 재료길이의 변화가 심하다고 유추할 수 있으나, 이와 같은 근거는 STC3에 대

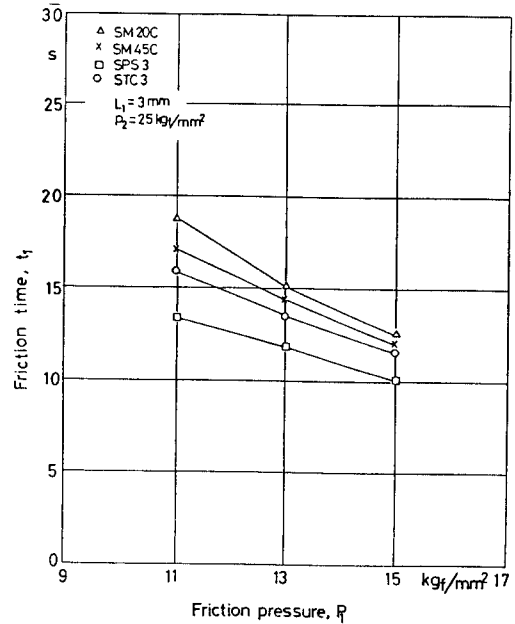


Fig. 3. Influence of friction pressure on friction time of dissimilar steel friction welding

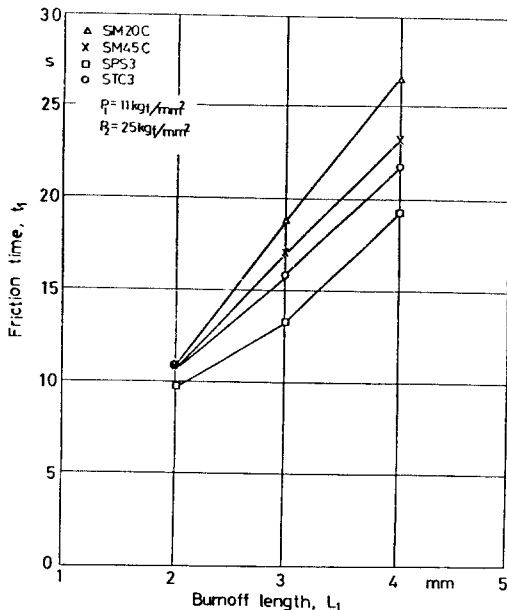


Fig. 2. Influence of burn-off length on friction time of dissimilar friction welding

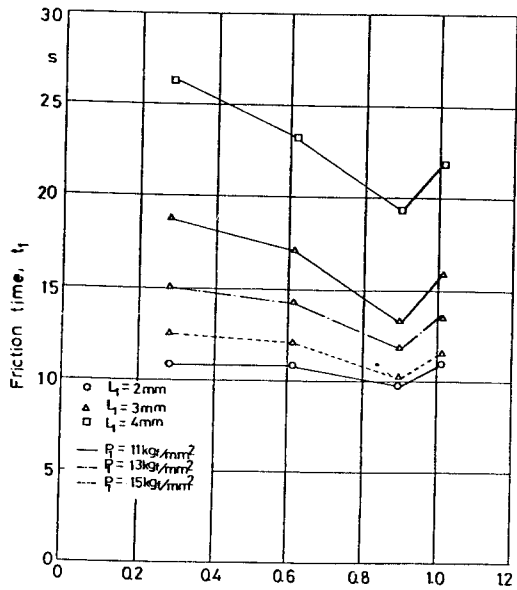


Fig. 4. Influence of carbon equivalents on friction time of dissimilar steel friction welding

해서는 적용할 수가 없다. 그러나 Table 2를 보면 4 가지 탄소강중에서 SPS3의 인장강도가 제일 높았으며, 공급된 상태에서의 비틀림강도도 SPS3이 제일 크고 담금질과 풀림열처리후에도 SPS3이 제일 높은 비틀림강도를 나타내고 있는데, 이와 같은 재료의 강도가 마찰가열길이와 상관관계를 갖는다고 볼 수 있을 것 같다. 즉 재료의 강도가 증가할수록 탄소강과 고속도강간의 경계면에서 발생하는 마찰력이 커져서 단위시간당 발생하는 마찰열이 많아지고, 따라서 재료의 길이변화도 더 활발하게 이루어진다고 유추할 수 있다.

Fig. 5에는 단조길이와 탄소당량간의 상관관계를 몇가지의 마찰가열길이와 마찰가열압력에 대해서 도시하였다. 단조길이와 탄소당량간의 상관관계는 마찰가열시간과 탄소당량간의 관계와 유사한 양상을 보여주고 있는데, 이것은 특히 단조길이는 유입된 마찰열에 의해서 연화되는 모재의 크기와 고온에서의 강도와 밀접한 관계를 갖기 때문이라 생각된다. 즉 SPS3과 고속도강의 마찰용접의 경우에 마찰가열시간이 제일 짧기 때문에, 단위시간당 발생하는 마찰열이 높게 나타날 가능성에도 불구하고 전체적인 마찰열은 매우 작게될 것이라고 추측할 수 있으며, 따라서 높은 강도를 지니는 SPS3의 경우에 단조길이가 최소로 나타난 것이라 사료된다. 따라서 단조길기도 탄소당량 자체보다는 재료의 강도와 더 밀

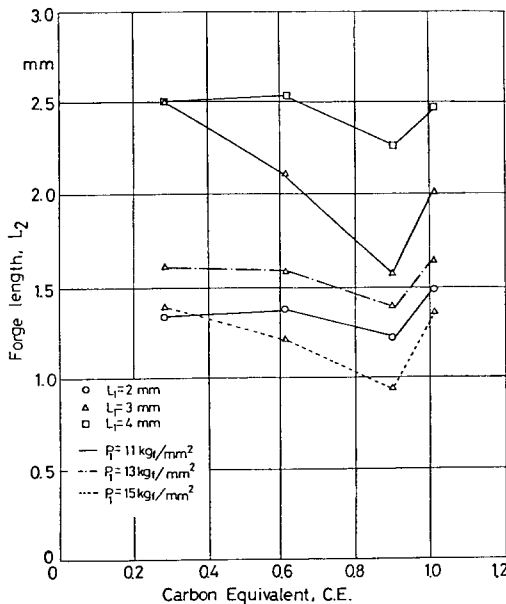


Fig. 5. Influence of carbon equivalents on forge length of dissimilar steel friction welds

접한 관계를 갖는다고 볼 수 있을 것이며, 그 크기는 재료의 강도가 높을수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.

### 3.2. 경도 및 조직검사

용접에 사용된 모든 재료에 대해서 마찰면 부근에서 최고 경도를 나타내고 있으며, 마찰면에서 멀어질수록 그 경도치는 급격히 감소하여 마찰면에서 5 mm 이상 떨어진곳에서는 모재의 경도치에 도달하고 있다. 용접후에 열처리를 하지 않은 상태에서 용접부에 나타나는 경도분포를 Fig. 6에 나타내었는데, 특히 가공을 고려하여 노르말라이징 상태로 공급된 고속도강의 경우에 용접부에 나타나는 경도의 증가가 매우 큼을 알 수 있다. 사용된 경도 측정기의 상태가 동종탄소강 마찰용접부를 관찰할때와 약간 달라져서 탄소강에서 나타나는 경도치의 절대값은 동종탄소강의 경우와 조금 차이가 있으나 전체적인 경향은 매우 유사하다. 즉 SPS3의 모재는 STC 3과 SM45C의 모재보다 더 낮은 경도를 갖고 있으나 열영향부에서는 탄소강중에는 제일 높은 경도치를

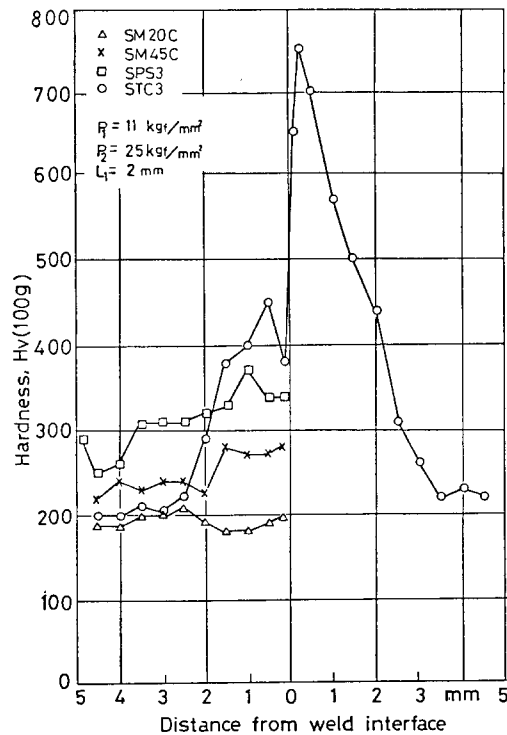


Fig. 6. Typical hardness distributions in friction welds of dissimilar steels (as welded)

나타내고 있어 마찰용접부의 최대 경도치는 모재의 탄소당량과 밀접한 관계가 있다는 앞에서의 관찰과 일치하고 있다.<sup>12)</sup>

목적에 부합되게 가공된 고속도강은 일반적으로 담금질과 풀림열처리를 한 후에 실제로 사용되게 된다. 본 연구에서도 고속도강과 탄소강들을 마찰용접으로 결합한 후에 2.2에 설명한 바와같이 열처리를 한후에 용접부의 금속적·기계적 성질을 관찰하였다. Fig. 7에는 마찰용접부를 열처리한후에 다시 경도 분포를 조사하여 도시하였는데 용접부의 경도가 상당히 감소하였음을 알 수 있다. 특히 STC3을 제외한 다른 탄소강들은 용접부의 경도도 모재의 경도와 거의 같게 되었음을 알 수 있고, STC3의 경우에는 모재의 구상화 되었던 조직이 QT조직으로 변함에 따라 모재의 경도가 증가하여 탄소강중에서 제일 높은 경도치를 보여주고 있다. 고속도강의 모재는 QT 열처리를 함에 따라 노르말라이징 상태보다는 더 높은 경도를 나타내고 있으나, 용접부는 여전히 모재보다 상당히 더 높은 경도를 보여주고 있다.

Fig. 8에는 SM45C와 SKH9를 마찰용접하였을 때 관찰되는 용접부의 모양과 미세조직을 나타내었다. SM45C의 모재(a)는 페라이트와 퍼얼라이트가 거의 비슷한 비율로 섞여 있는 조직을 보여주고 있으나, 용접면에 가까와 질수록 페라이트의 양이 점차 감소하고 있다(b). 이것은 마찰면에 가까와질수록 용접시에 발생하는 최고온도가 높아지게 되고, 따라서 오오스테나이트로 상변태되는 조직이 차지하는 비율이 점점 커지게 되는 사실로써 설명할 수 있다. 즉

마찰용접시 용접재료의 열영향부가 겪게되는 냉각속도는 아직까지 낮은 온도상태에 있는 용접재료의 뒷부분과 clamping 장치로의 열전도에 의해서 매우 높

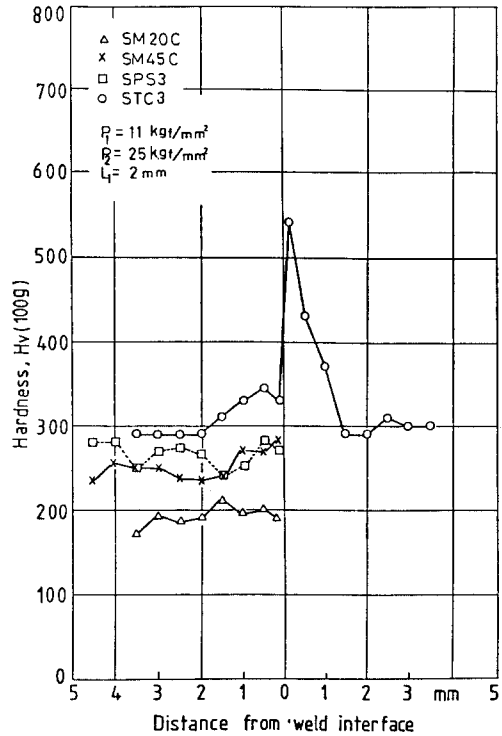
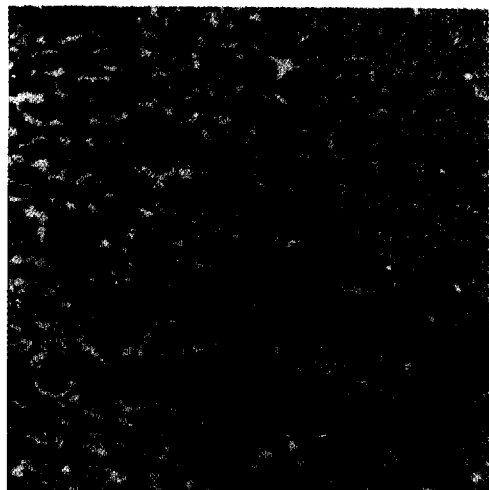


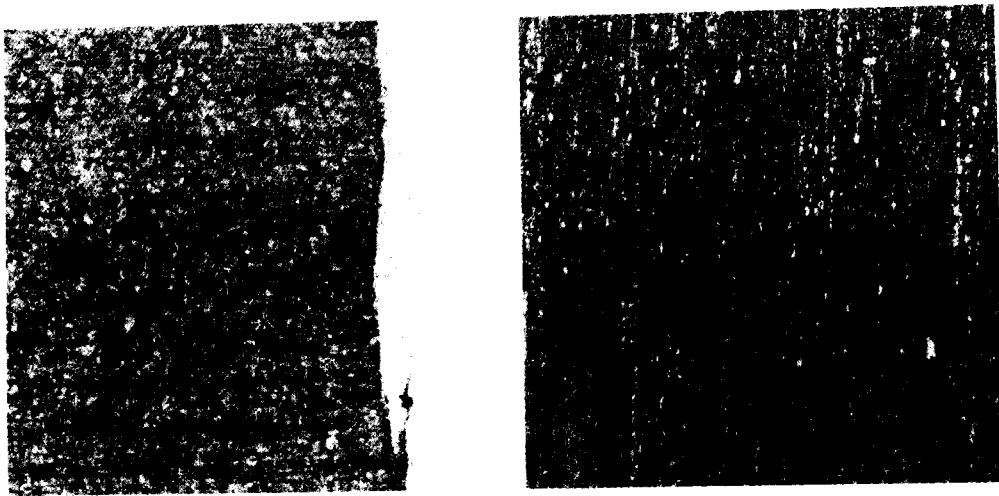
Fig. 7. Typical hardness distributions in friction welds of dissimilar steels (quenched and tempered)



a) Base metal of SM45C



b) SM45C near the interface



c) interface

d) SKH9 near the interface

Fig. 8. Microstructural change in a dissimilar steel friction weld between SM45C and SKH9.



Fig. 9. Typical HAZ shape in SKH9 of a dissimilar steel friction weld between SKH9 and carbon steels (A case of SM20C is shown)

기 때문에 일단 오오스테나이트로 상변태된 SM45C는 상온에서 대부분이 마르텐사이트의 조직을 갖기 때문이다(c). SKH9와 SM45C의 경계면에서는 두 재료가 어느정도 기계적으로 mixing 되어짐을 볼 수 있는데, 이것은 주로 마찰가열에 요구되는 상대운동시 두 재료가 혼합되기 때문이라 추측된다. 탄소강에 비해서 SKH9의 열영향부와 모재의 금속조직상에는 큰 차이가 나타나지 않고 있다(d).

SKH9의 열영향부는 시편의 중심부에서 제일 크게 나타나고 바깥쪽으로 갈수록 점점 좁아지는 경향을 나타내고 있는데(Fig.9) 이것은 강을 마찰용접할 때 나타나는 일반적인 열영향부의 형태와는 상반되는 현상이다. 즉 마찰용접시 일정한 회전속도하에서는 선속도가 반경에 비례하고, 따라서 마찰력이 전체 마찰면에 걸쳐서 일정하다면 단위시간당 발생하는 마찰열도 반경에 비례하게 되며, 봉의 중앙에서는 실제적인 마찰열이 0이 된다. 그러나 마찰력은 선속

도가 클수록 감소하는것이 일반적인 현상이고, 또한 열전도에 의해서 온도의 평균화가 이루어지기 때문에 열영향부는 반경에 관계없이 거의 일정하게 발생하나, 적절치못한 용접조건하에서는 용접봉의 중심에서 제일 좁은 열영향부가 나타나고, 반경이 커질수록 열영향부의 폭도 증가하는 경우가 발생할 수 있으나 SKH9의 경우에는 그 반대의 현상이 관찰되었다. Fig.9에서 관찰되는 SKH9열영향부의 형태는 인장시험시의 파단면과 밀접한 관계를 갖고 있음이 인장시험 결과 관찰되었다.

탄소강과 고속도강을 마찰용접할 때 탄소강의 탄소당량과 탄소강에 발생하는 열영향부폭간의 상관관계를 Fig.10에 도시하였다. SPS3까지는 탄소당량이 클수록 열영향부의 폭이 감소하는 경향을 보여주고 있으나, STC3의 경우에는 그 값이 SPS3 보다 오히려 커지고 있는데, 이와 같은 현상은 마찰가열시간이나 단조길이와 탄소당량간의 관계에서와 매우 유

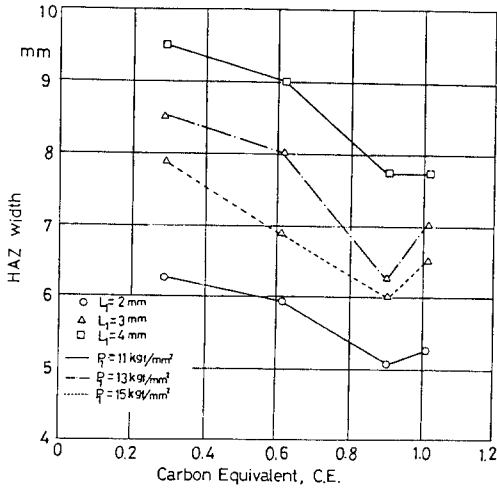


Fig. 10. Influence of carbon equivalents on HAZ width of dissimilar steel friction welds.

사하다. 따라서 Fig. 10에서 보여지는 열영향부의 폭과 탄소당량간의 상관관계도 모재의 강도가 마찰가열시간과 단조길이에 미치는 영향의 복합적인 효과에 의해서 나타난다고 사료된다.

3. 3. 인장시험

탄소강과 고속도강의 마찰용접부를 인장시험하였을 때 발생하는 파단의 위치는 마찰용접조건과 열처리 유무등에 따라 모재 혹은 용접부에서 발생할 수 있음이 관찰되었다. Table 3. 많은 조건하에서 파단이 SKH9의 열영향부에서 발생하고 있는데, 이때 파단의 정확한 위치는 앞에서 관찰된 SKH9의 열영향부와 모재사이의 경계임을 관찰할 수 있었다.

Fig. 11 파단면을 SEM으로 관찰한 Fig. 12에 의하

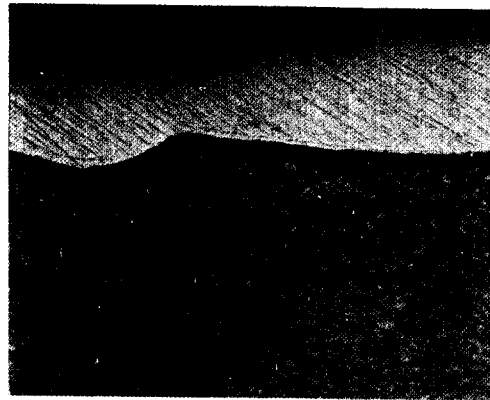


Fig. 11. Longitudinal section of a dissimilar steel friction weld after tension test.



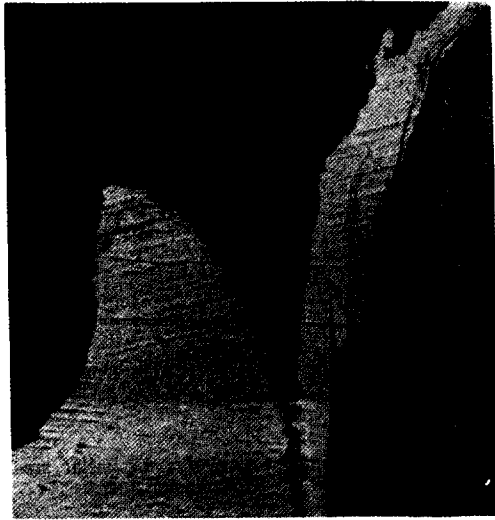
Fig. 12. Fracture surface of a dissimilar steel friction weld between SKH9 and sM20C (on the side of SM20C)

Table 3. Results of tension teating on dissimilar steel friction welds

Material Results Condition <sup>2)</sup>	SM20C+SKH9		SM45C+SKH 9		SPC3+SKH 9		STS3+SKH9	
	UTS <sup>1)</sup>	fracture place	UTS	fracture place	UTS	fracture place	UTS	fracture place
P <sub>1</sub> = 11 P <sub>2</sub> = 30 L <sub>1</sub> = 2 as welded	52.8	SKH9 HAZ	71.7	SKH9 HAZ	79.2	SKH9 B. M.	52.3	SKH9 HAZ
P <sub>1</sub> = 11 P <sub>2</sub> = 25 L <sub>1</sub> = 3 as welded	3)	SM20C B. M.	3)	SM20C B. M.	3)	SKH9 HAZ	3)	SKH9 HAZ
P <sub>1</sub> = 11 P <sub>2</sub> = 25 L <sub>1</sub> = 3 QT	3)	SM20C B. M.	3)	M45C B. M.	3)	SKH9 HAZ	3)	STC3 B. M.

1) UTS in kgf/mm<sup>2</sup>    2) P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> in kgf/mm<sup>2</sup>    3) UTS was not obtained due to testing error.  
L<sub>1</sub> in mm    N = 3000rpm    t<sub>3</sub> = 4sec

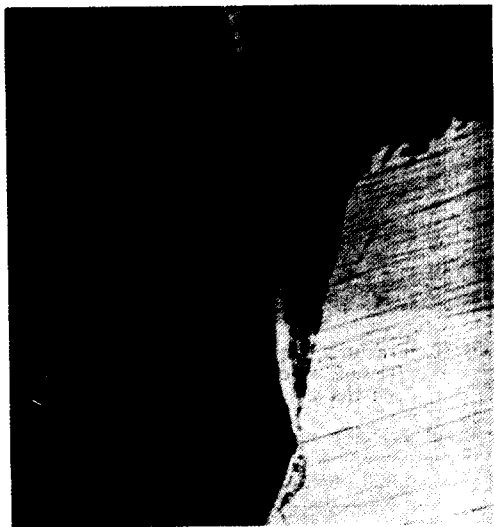




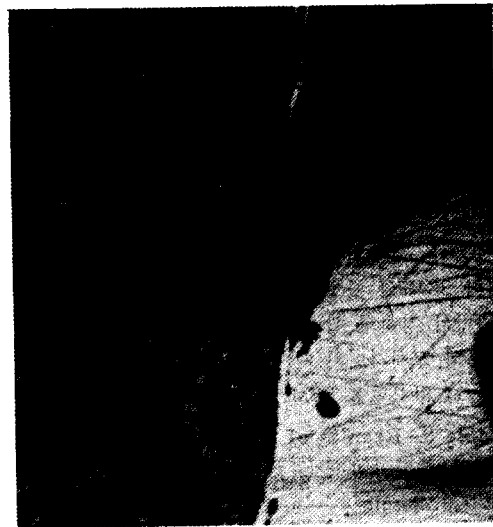
a) SM20C+SKH9



b) SM45C+SKH9



c) SPS3+SKH9



d) STC3+SKH9

**Fig. 13.** Formation of flash of dissimilar steel friction welds.

면 인장시험에 의한 파단면의 일부는 마찰가열 단계에서 상대운동이 일어나는 경계이었음을 알 수 있는데, 파단면의 여러 위치에서 EDXA(Energy-Dispersive X-ray Analysis)에 의한 성분조사를 실시한결과 주합금 성분이 Mo, Cr, V, W으로서 모두 고속도강의 성분을 갖고 있음을 알 수 있었다.

이와 같이 파단면의 고속도강에 상대운동의 흔적이 남아 있는 것은 Fig. 13에 의해서 확실하게 관찰될 수 있다. 그림에서 탄소강의 flash에는 상당량의

SKH9이 결합되어 있으며 마찰면의 시작을 나타내는 wedge부는 고속도강과 탄소강과의 경계면이 아니라 고속도강 내부에 존재하고 있음을 알 수 있다.

### 3.4. 비틀림 시험

탄소강과 고속도강을 마찰용접으로 결합한후에 용접부에 형성된 flash 부분만을 제거하고 비틀림시험한 결과를 Table 4에 표현하였다. 먼저 같은 재료를 동일한 조건으로 용접한 시편을 비틀림 시험하여

**Table 4. Results of torsion testing on 10m D as welded specimen of dissimilar steel friction welds**

Material Results Condition <sup>2)</sup>	SKH9 + SM20C		SKH9 + SM45C		SKH9 + SPS3		SKH9 + STC3	
	Fracture torque <sup>1)</sup>	Fracture place	Fracture torque	Fracture place	Fracture torque	Fracture place	Fracture torque	Fracture place
L <sub>1</sub> = 2 P <sub>1</sub> = 11	5.6 6.0	SM20C SM20C	3)		9.8	SPS3	3.4 7.3	weld STC3
L <sub>1</sub> = 3 P <sub>1</sub> = 11	6.0	SM20C	9.2	SM45C	8.3	SPS3	8.4 9.0	STC3 SKH9
L <sub>1</sub> = 4 P <sub>1</sub> = 11	6.0 5.5	SM20C SM20C	8.0 8.6	SM45C SM45C	9.2 9.5	SPS3 SPS3	8.2 9.7	STC3 STC3
L <sub>1</sub> = 3 P <sub>1</sub> = 13	4.8	SM20C	9.1	SKH9	8.2	SKH9	9.0	STC3
L <sub>1</sub> = 3 P <sub>1</sub> = 15	3)		3)		2.6	weld	7.5	STC3

1) Fracture torque in kgf-m 2) L<sub>1</sub> in mm, P<sub>1</sub> in kgf/mm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub> = 25 kgf/mm<sup>2</sup>, N = 3000 rpm, t<sub>3</sub> = 4sec  
3) No experiment

**Table 5. Results of torsion testing on 10mm D QT specimen of dissimilar steel friction welds.**

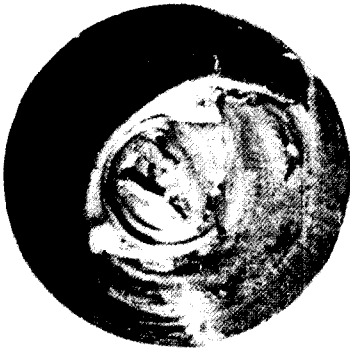
Material Results Condition <sup>2)</sup>	SKH9 + SM20C		SKH9 + SN45C		SKH9 + SMS3		SKH9 + STC3	
	Fracture torque <sup>1)</sup>	Fracture place	Fracture torque	Fracture place	Fracture torque	Fracture place	Fracture torque	Fracture place
L <sub>1</sub> = 2 P <sub>1</sub> = 11	5.1 6.8	Weld SM20C	4.0 10.1	Weld <sup>3)</sup> Weld	5.3 10.5	Weld <sup>3)</sup> SKH9	2.8 10.1	Weld <sup>3)</sup> STC3
L <sub>1</sub> = 3 P <sub>1</sub> = 11	4.8 4.6	SM20C SM20C	8.8 8.8	SM45C SM45C	8.6 9.8	SKH9 SKH9	9.6 9.0	STC3 STC3
L <sub>1</sub> = 4 P <sub>1</sub> = 11	7.5 5.9	SM20C SM20C	9.0 7.3	SM45C SM45C	9.2 9.8	Weld SKH9	13.2 10.6	Weld SKH9
L <sub>1</sub> = 3 P <sub>1</sub> = 13	6.4	SM20C	8.9	SM45C	13.3	Weld	11.1 9.1	Weld STC3
L <sub>1</sub> = 3 P <sub>1</sub> = 15	6.7 6.3	SM20C SM20C	11.6	SM45C	9.0	Weld	14.8 9.6	Weld SKH9

1) Fracture torque in kgf-m 2) L<sub>1</sub> in mm, P<sub>1</sub> in kgf/mm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub> = 25 kgf/mm<sup>2</sup>, N = 3000 rpm, t<sub>3</sub> = 4 sec  
3) Prior cracking due to heat treatment

똑같은 모재에서 파단이 발생할 경우에도 파단시의 비틀림강도에는 상당한 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 넓은 범위의 용접조건에 걸쳐서 비틀림 파단은 주로 탄소강의 모재 부분에서 발생하고 있으며, 따라서 탄소강과 고속도강을 마찰용접으로 결합하여 제작한 공구의 비틀림강도는 모재의 비틀림강도중 낮은 값과 같다고 가정할 수 있을 것이다. 그러나 용접조건이 적절한 조건에서 벗어나면 파단은 용접부에서 발생하고, 이때의 비틀림강도도 매우 낮기 때문에 주의할 요한다.

용접한 시편을 담금질과 풀림처리를 한후에 비틀림시험한 결과를 Table 5에 나타내었는데 L<sub>1</sub> = 2mm, p<sub>1</sub> = 11kgf/mm<sup>2</sup>인 경우를 제외하고는 모두 모재의 비

틀림 강도에 상당하는 강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 용접부에서 파단이 발생하는 경우 그 비틀림강도는 모재에서 파단이 발생하는때보다 상당히 더 크게 나타나는데, 이것은 SKH9의 용접부에는 경화현상이 심하게 발생하여 경도 및 강도가 높게되고, 따라서 이곳에서 비틀림 파단이 발생할려면 더 큰 토오크가 필요하기 때문이라 생각된다. 마찰 가열길이 2mm인 경우에는 SKH9과 SM45C, SPS3 및 STC3 사이의 마찰용접부를 QT 처리하였을 때 그 비틀림강도가 매우 낮게 나타나는데, 이것은 열처리에 의해서 용접부에 균열이 발생되었음이 파단면의 조사결과 관찰되었다, Fig. 14. 그림에서 좌측상단 부분이 까맣게 나타나 있는데 이것은 열처리시



**Fig. 14.** Fracture surface of a dissimilar steel friction weld between SKH9 and SPS3 due to torsion test after quenching and tempering.

균열이 발생한 표면에 산화작용이 발생하였기 때문인데, 이와 같은 균열은 탄소강과 고속도강의 열팽창계수가 서로 다르기 때문에 발생된다고 추측된다.<sup>14)</sup>

#### 4. 결 론

탄소당량이 다른 4가지의 탄소강과 고속도강 SKH 9을 마찰용접하여 용접부를 시험·조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 마찰가열 압력을 일정하게 유지하고 마찰가열 길이를 변화시키면 모든 재료의 조합에 대해서 마찰가열시간 및 단조길이는 마찰가열 길이와 거의 직선적인 관계를 갖는다.

2) 탄소강의 용접부에 나타나는 최고경도는 동종 탄소강의 마찰용접시와 마찬가지로 탄소당량에 비례한다.

3) 탄소강과 고속도강의 마찰용접부를 고속도강을 기준으로하여 담금질 및 풀림처리하였을 때 탄소강의 용접부는 모재부분과 거의 비슷한 경도를 나타내나 고속도강의 용접부는 모재보다 더 높은 경도를 나타낸다. 이때 열처리시 두 재료의 열팽창계수가 서로 다르기 때문에 용접부에 균열이 발생할 수 있다.

4) 탄소강과 고속도강의 마찰용접시 상대운동에 의한 마찰현상은 사용된 모든 실험재료에 대해서 두 재료의 경계면에서가 아니라 고속도강의 내부에서 발생하고, 탄소강에 flash가 생성될때 이곳에 고속도강이 결합되어 이동된다.

5) 인장시험 및 비틀림 시험시 파단이 발생하는 위치는 대부분 모재이며, 이와 같이 모재 보다 높은

강도를 갖는 용접부가 넓은 범위의 용접조건에서 제작될 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 학술연구비로 지원되어 이루어졌다. 이에 재단과 관계자 여러분에게 깊이 감사드리며, 마찰용접시 많은 도움을 주신 주식회사 상진의 손 영직 공장장님을 위시한 관계자 여러분에게도 감사를 드린다.

#### 참 고 문 헌

1. Ellis, C. R. G., "Friction welding : where industry uses it", welding Design and Fabrication, Aug., 1981, pp. 76-81.
2. Ellis, C. R. G. and E. D. Nicholas, "Matallurgical Characteristics and Mechanical properties of Cold Drawn Mild Steel Friction Welds," TWI Member Report, May, 1969, pp. 39-69.
3. Squire, I. F., "Thermal and Mechanical Characteristics of Friction Welding Mild Steel," British Welding Journal, Nov., 1966, pp. 652-657.
4. Ellis, C. R. G., "Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel." Weld. Jul. Res. Suppl. 54 (4), pp. 183-197.
5. Schober, D. and s. Buchholz, "Reibschweissen des Werkstoffes 37 MnSi 5," Schweisstechnik (Berlin), 1974, pp. 455-456.
6. Hasui, A. and H. Tanaka, "Fricion Welding of Cr-Mo steel and Carbon Steel," Transact. of Japan Weld. Soc., 1979, pp. 30-35.
7. Egorov, V. I. et al, "Improving the Quality of Welded Blanks of Cutting Tools," Sear. Proiz., 1982, No9, pp. 13-16.
8. Fomichev, N. I., "The Friction Welding of New High-Speed Tool steels to Structural Steels," Svar. Proiz., 1980, No. 4, pp. 23-28.
- 9) Brekhov, K. V., "The Weldability of Blanks Made of Cuttings of a High-Speed Tool Steel," Svar. Proiz., 1980, No. 12. pp. 15-16.
10. Vill, V. I. et al., "Friction welding High-Speed steel R6F2K8M5 to Steel 45." Svar. Proiz., 1970, No. 8, pp. 20-22.
11. Jefferson, T. B., "The Welding Encyclopedia," Monticello Books, Inc., Lake Zürich, 1974.
12. 나석주·김성도, "강의 마찰용접에 미치는 탄소당량의 영향—동종강에 대하여·, 대한용접학지, 1985, 제 3권 제 2호, pp. 1-9.
13. ASM, "Metals Handbook," 8th ed., Vol. 2, pp. 235.
14. 염영하, "최신금속 재료학," 동명사, 1968.