

경량화 속업소바 피스톤로드에 사용되는 SM45C/SM20C-Pipe의 마찰용접에 관한 연구

민병훈*, 최수현⁺, 강정식⁺⁺, 이형호⁺⁺⁺, 민택기⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2008. 1. 7, 심사완료일 2008. 5. 23)

A Study on the Friction Welding of SM45C/SM20C-Pipe which Used in the Light Piston-Rod

Byung-Hoon Min*, Su-Hyun Choi⁺, Jeong-Sik Kang⁺⁺, Hyung-Ho Lee⁺⁺⁺, Taeg-Ki Min⁺⁺⁺⁺

Abstract

Various researches to reduce weight of a vehicle are achieving. One of these researches is tendencious to manufacture the hollow piston rod using friction welding instead of solid one of the vehicle shock absorber. This study deals with the friction welding of SM45C to SM20C-pipe that is used normally in the vehicle shock absorber. The friction time was variable conditions under the conditions of spindle revolution of 2,000rpm, friction pressure of 55MPa, upset pressure of 75MPa, and upset time of 2.0seconds. Under these conditions, the microstructure of weld interface, tensile fracture surface and mechanical tests of friction weld were studied and so the results were as follows. When the friction time was 1.5seconds under the conditions, the maximum tensile strength of the friction weld happened to be 837MPa, which is 113% of SM20C's tensile strength and 97% of SM45C's. The optimal welding conditions were $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=55\text{MPa}$, $P_2=75\text{MPa}$, $t_1=1.5\text{sec}$, $t_2=2.0\text{sec}$ when the total upset length is 1.7mm.

Key Words : Friction welding(마찰용접), Shock absorber(속업소바), SM45C(기계구조용 강), SM20C(기계구조용 강), Pipe(관)

1. 서론

마찰용접(Friction welding, FRW)은 동종재료는 물론 가

스용접, 저항용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법에서는 접합이 곤란한 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시키는 특성을 가지고 있다. 또한 경제적인 면과 기술적인 면에서도

* 충남대학교 교육대학원 (hoonyx@nate.com)

주소: 305-764 대전시 유성구 궁동 220번지

+ 충남대학교 교육대학원

++ 한국기계연구원

+++ 태산ENG

++++ 충남대학교 기계공학과

많은 이점을 지니고 있어 그 이용 범위가 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 비가열식 고상용접으로 피용접재에 회전운동과 함께 가압시켜 접촉면에서 발생하는 마찰열을 이용하여 접합하는 용접방법으로 접촉면이 용융되기 전 일정한 온도에 도달하였을 때, 압력을 가하면 소성변형을 일으키면서 접합된다⁽¹⁾. 따라서 접합강도가 우수하고, 신뢰성이 좋으며, 격심한 소성운동으로 결정의 조대하나 금속간 화합물이 생기기 어렵고, 모재부에 미치는 열 영향이 적어 용접으로 인한 변형이 작고 치수정밀도가 높다⁽²⁾.

자동차, 선박, 기계, 건설 등 각종 산업현장에서 가장 광범위하게 사용되는 탄소강은 기계적 성질 뿐만 아니라 경제적인 면에서 많은 이점이 있어 많은 연구가 있었다. 국내에서 처음 마찰용접에 관한 연구가 발표된 이래 현재 30여년의 역사를 갖고 있어 여러 관련 연구가 진행되고 있다. 최근 각종 기계부품의 재료비와 에너지 절감을 위해 마찰용접이 사용되는 연구가 활발하다⁽³⁻⁵⁾. 지금까지 자동차의 무게를 줄이기 위해 비강도가 높은 소재로 교체하는 방법이 많이 쓰였다. 하지만 고강도를 유지하면서 가벼운 부품을 만들기 위해 마찰용접을 도입하는 연구는 많지 않았다.

기존의 속업소버 피스톤로드는 중실(中實)의 탄소강을 사용하거나 무게를 줄이기 위해 장공(長空) 가공을 하여 생산하기 때문에 불필요한 재료, 공정과 시간 및 에너지가 소모되었다. 따라서 본 연구는 이러한 기존 중실의 속업소버 피스톤로드(conventional type)를 마찰압접과 파이프사용으로 중공화하여 경량화, 자동차 연비 개선, 원자재 절감, 물류비용 절감을 하기위한 목적으로 연구하였다.

본 연구에서는 기계적 성질이 우수하여 널리 쓰이는 SM45C 봉재와 값이 상대적으로 저렴하고 가벼운 SM20C 관재를 마찰 용접하여 용접부에 대한 접합특성 및 신뢰성을 고찰하고자 하였고, 마찰압력과 시간을 주요 변수로 하여 용접품의 변형과 접합시 사용되는 에너지를 최소화 하고 적절한 강도를 얻기 위하여 용접부에 대한 총 업셋량 변화, 인장강도, 굽힘강도, 경도시험, 현미경 조직분석 등을 실시하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 탄소강 SM45C 봉재와 내경 13mm SM20C 관재의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에서 각각 나타내었고, 사용된 실험 재료는 모두 직경 22mm, 길이를 100mm로 선반 가공하였다. 마찰용접 직전에 용접면을 정밀하게 선삭 가공 하고 이물질 제거를 위해 아세톤으

Table 1 Mechanical properties of materials

Materials	Mechanical properties			
	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
SM45C	861	1982	11	256
SM20C(pipe)	740	1595	24	249

Table 2 Chemical compositions of materials(Wt. %)

Materials Elements	SM45C	SM20C
C	0.45	0.21
Si	0.19	0.29
Mn	0.70	1.23
P	0.016	0.008
S	0.021	0.003
Cr	0.008	-
Mo	-	-
W	-	-
V	-	-
Co	-	-
Fe	Bal.	Bal.

로 세척하였다.

2.2 시험기구

본 실험에 사용된 마찰용접기는 브레이크 타입(NSF-30 H, 남선기공, revolution: 2,000rpm, maximum axial force: 98,000N)을 사용하였다. 마찰용접부의 기계적 시험을 위해 최대 용량 50ton의 만능재료시험기(model: DYHU-50- AD, Dae Yeong)를 사용하였으며, 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(model: MVK-H1, Mitutoyo Co., Jap)를 사용하였다. 조직검사는 광학현미경(model: Bi-12882, Uintron Co, U.S.A)을 이용하였다.

2.3 실험조건

본 실험은 다음과 같이 실험조건을 설정하여 진행하였다. 회전수는 척에 고정된 용접시험편이 스핀(spin)을 일으키지 않고 충분한 발열이 일어나는 2,000rpm으로 하고, 최적 마찰압력 P₁과 최적 업셋압력 P₂를 얻기 위해 각각 Table

Table 3 Friction welding conditions by friction pressure

Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P ₁ , MPa)	Upset pressure (P ₂ , MPa)	Friction time (t ₁ , sec)	Upset time (t ₂ , sec)
2,000	40	70	1.0	2.0
	50			
	60			

Table 4 Friction welding conditions by upset pressure

Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P ₁ , MPa)	Upset pressure (P ₂ , MPa)	Friction time (t ₁ , sec)	Upset time (t ₂ , sec)
2,000	50	70	1.0	2.0
		100		
		130		

Table 5 Friction welding conditions by friction time

Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P ₁ , MPa)	Upset pressure (P ₂ , MPa)	Friction time (t ₁ , sec)	Upset time (t ₂ , sec)
2,000	50	70	0.2	2.0
			0.4	
			0.6	
			0.8	
			1.0	
			1.2	

3, Table 4와 같은 용접조건으로 실험했으며 위의 조건하에 서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여, 마찰시간을 변수로 하여 Table 5와 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였다.

2.4 실험방법

인장실험은 Table 3, Table 4 및 Table 5와 같은 용접조건으로 시편을 제작하여 본 실험을 실시하였으며, 인장시험편은 Fig. 1과 같이 제작하였다.

마찰용접부의 굽힘강도를 시험하기 위하여 Fig. 2와 같이 지그(jig)에 펀치의 하중작용점이 용접계면에 위치하도록 시험편을 장착하고 크로스헤드(cross head)의 이송속도를 1mm/min로 설정하여 굽힘시험을 하였다. 굽힘강도는 다음

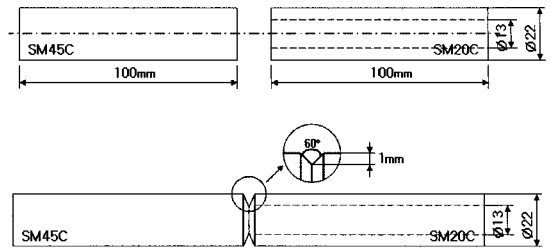


Fig. 1 Specimen of tensile test

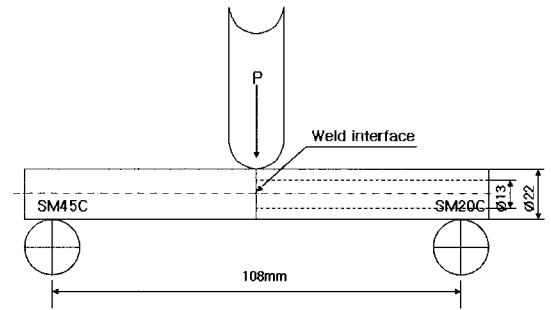


Fig. 2 3-Point bending test specimen

식 (1)로 구하였다.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{8P_{Max} \ell}{\pi d^3} \tag{1}$$

여기서, σ_b : 굽힘강도, M : 최대굽힘모멘트, Z : 단면계수, P_{Max} : 최대하중, ℓ : 지지간 거리, d : 시험편 직경

경도시험을 위하여 용접시험편의 축 단면을 절단하여 폴리코트(polycoat)로 마운팅한 시험편을 샌드페이퍼 #200~#1500의 순으로 연마한 후, 그라인딩 폴리셔(model : 95-2810)에서 알루미나 파우더 1 μ m, 0.5 μ m의 분말을 증류수와 혼합하여 폴리싱 하였다. 용접부의 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(model : MVK-H1, Mitutoyo Co., Jap)로 하였으며, 측정은 하중 500gf으로 용접계면의 중심에서 축 방향 및 반지름 방향으로 0.25mm의 일정한 등간격으로 측정하였다. 조직검사는 광학현미경(model : Bi-12882, Uintron Co, U.S.A)을 이용하였으며 시험편 준비는 축 단면을 절단하여 채취한 시험편을 폴리코트(Ploycoat)로 마운팅한 다음 용접 단면을 샌드페이퍼로 #200~#1500순으로 1차 연마한 후 2차 연마재로 입경 0.5 μ m의 알루미나 파우더를 증류수와 혼합하여 사용하였고, 그라인드 폴리셔(model :

95-2810)로 폴리싱하였다. 시험편의 부식은 나이탈(nital 3%)로 에칭액을 만들었으며, 시험편을 에칭액에 약 3sec 담근 후에 에칭액 제거를 위하여 흐르는 물에 세척하고 알코올로 최종 씻어내어 전기 드라이어로 다시 충분히 건조시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 업셋길이 변화

업셋길이 변화 측정은 Table 3, Table 4 및 Table 5와 같은 용접조건으로 시험편을 제작하여 용접전의 시험길이와 용접 후 시험편의 길이를 측정하여 Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에 각각 나타내었다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 업셋길이의 변화는 마찰압력보다 업셋압력의 변화에 의해 더욱 크게 나타났고, 보다 정밀한 업셋길이 제어를 위해서는 마찰압력을 조절해야 함을 알 수 있다. Fig. 5에서 최저 업셋길이는 마찰시간 t_1 이 0.2sec일

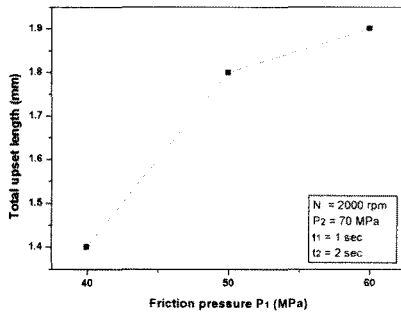


Fig. 3 Relationship between friction pressure P_1 and upset length

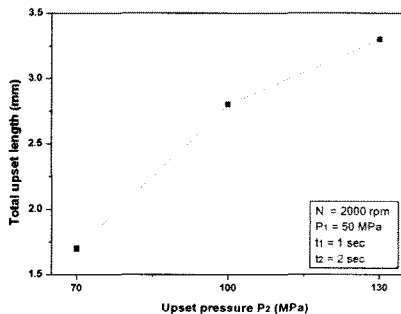


Fig. 4 Relationship between upset pressure P_2 and upset length

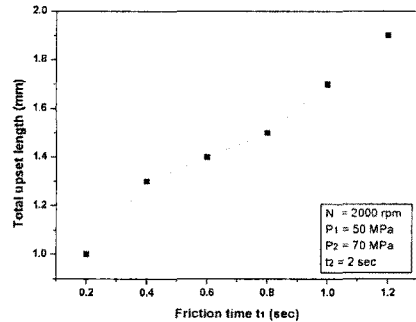


Fig. 5 Relationship between friction time t_1 and upset length

때 1.0mm, 최고 업셋길이는 마찰시간이 1.2sec일 때 1.9mm로 선형으로 증가하였다. 이와 같이 마찰시간이 증가할수록 업셋길이가 길어지는 것은 마찰용접의 전형적인 양상으로 소성유동이 활발해져 플래시로 많이 배출되기 때문이다. 업셋길이는 용접할 때 발생하는 압축변형에 의한 결과이지만, 접합면에 존재하는 산화물이나 불순물 등의 이물질을 접합면 밖으로 배출하는 과정으로서, 접합강도를 향상시키는 원인이 된다. 최대 인장강도를 갖는 조건에서, 업셋길이는 재료의 절약, 품질 및 생산성에 있어서 간과 할 수 없는 중요한 문제라고 사료된다.

3.2 인장시험

실험조건에 명시된 바와 같이 최적 마찰압력 P_1 과 최적 업셋압력 P_2 를 얻기 위해 각각 Table 3, Table 4와 같은 용접조건으로 실험했으며, 위의 조건하에서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여, 마찰시간을 변수로 Table 5와 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 6, Fig. 8 및 Fig. 10에 각각 나타내었다. 또한 시험편의 플래시 형상과 파단면을 Fig. 7, Fig. 9, Fig. 11 및 Fig. 12에 각각 나타내었다.

Fig. 6에서 마찰압력이 40MPa일 때 인장강도는 SM20C의 모재강도 보다 낮게 나왔으며 50MPa일 때 가장 높게 나왔다. Fig. 7에서 플래시의 양은 거의 일정하며 산화막 제거 점차 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8에서 업셋 압력이 70MPa일 때 인장강도가 가장 높게 나왔으며 100MPa, 130MPa 조건에서는 오히려 낮게 나왔다. 이것은 Fig. 9에서 플래시의 폭이 급격히 증가하는 것에 관계하여 과도한 가압에 의하여 반 용융 상태의 접합 구간이 전부 플래시로 배출되었기 때문으로 사료된다.

위의 결과를 적용하고 시간규제법을 활용하여, 마찰시간을 변수로 둔 실험결과 Fig. 10을 보면 인장강도는 마찰시간이 증가함에 따라 증가하다 1.2sec에서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 최고 인장강도는 마찰시간 t_1 이 1.0sec 일 때이며, 인장강도는 837MPa이며 모재인 SM20C관재에 비해 113%에 해당하는 결과로 나타났다. 이는 1.0sec까지는 접합에 필요한 마찰열이 충분히 발생하여 양 소재의 구성원소가 잘 결합할 수 있는 상태가 되어 양호한 소성유동을 일으켜 접합하였기 때문이고, 가열시간이 1.0sec

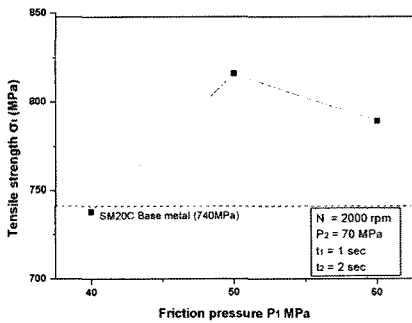


Fig. 6 Relationship between friction pressure P_1 and tensile strength

이상에서는 필요 마찰열 이상으로 발열하여 플래시로 배출되는 양이 많게 되어 접합면에 도달하는 온도가 낮아 결국 부적절한 용접상태가 되어 강도가 감소한 것으로 사료된다.

Fig. 11은 마찰시간 조건변화에 따른 플래시 모양을 나타낸다. 플래시의 모양과 양은 거의 일정하나 엷게 길이가 줄어드는 것으로 보아 플래시의 일부가 내부에서 점차 증가하며 형성되는 것으로 사료된다. 또한 산화막 피가 점점 증가하는 것으로 보아 마찰시간에 의해 마찰열이 증가 한

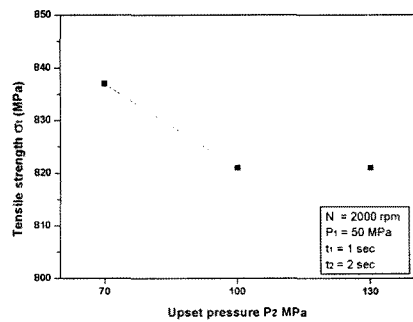


Fig. 8 Relationship between upset pressure P_2 and tensile strength

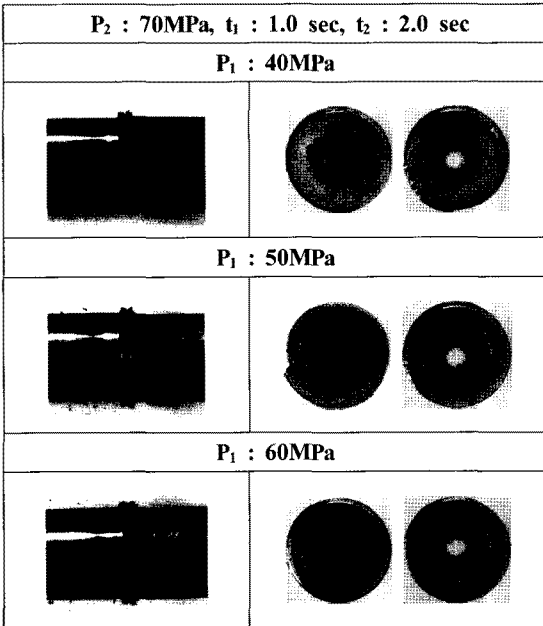


Fig. 7 Appearance of welded joint and fracture appearance of tensile test by Table 3

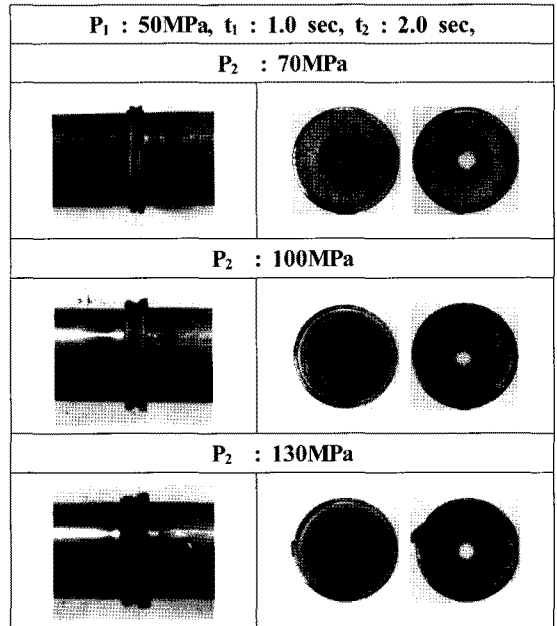


Fig. 9 Appearance of welded joint and fracture appearance of tensile test by Table 4

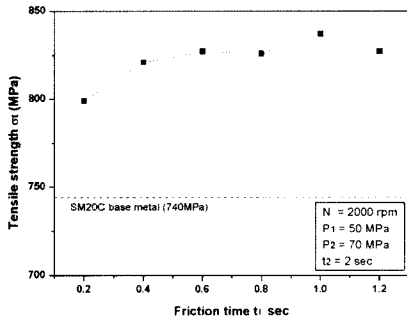


Fig. 10 Relationships between friction time t_1 and tensile strength

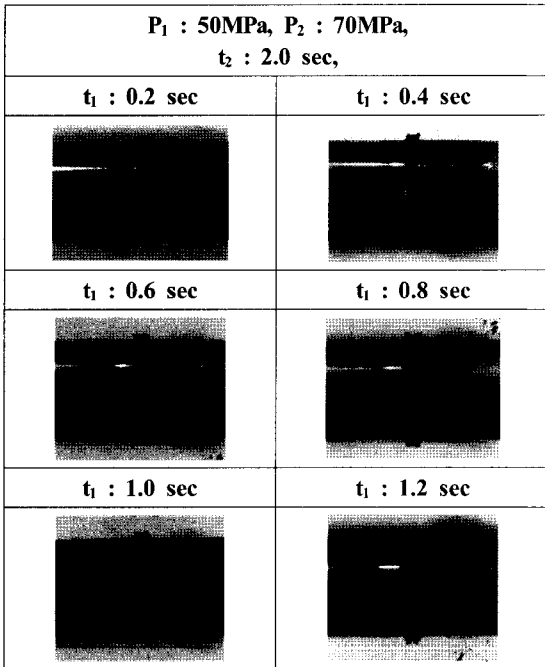


Fig. 11 Appearance of welded joint by Table 5

다는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 파단면의 형상을 나타내고 있다. 몇몇 시편에서는 접합부가 아닌 모재부에서 파단이 일어난 것을 확인 할 수 있다. 이것은 파단이 접합부가 아닌 모재부에서 일어날 정도로 접합의 강도가 우수하다는 것을 보여준다.

3.3 굽힘시험

Fig. 13는 인장시험과 동일한 조건에서 마찰용접한 시험

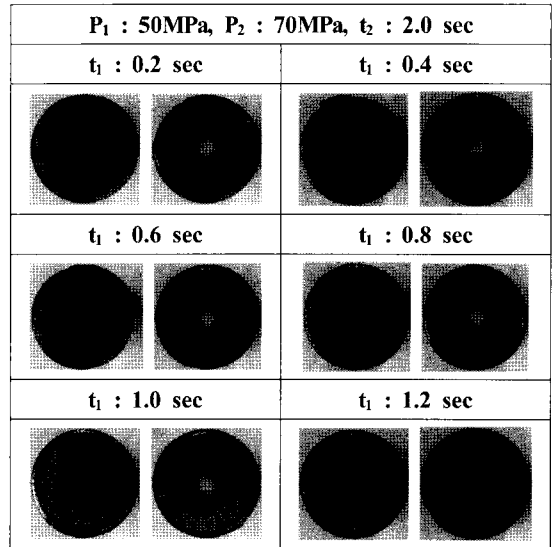


Fig. 12 Fracture appearance of tensile test by Table 5

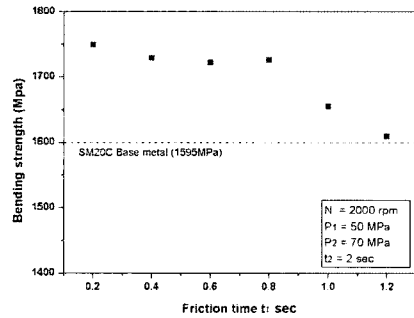


Fig. 13 Relationships between friction time and bending strength

편의 굽힘시험 결과를 보여주고 있다. 마찰시간이 증가하면 굽힘강도는 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며 1.2sec는 모재의 굽힘강도와 비슷하고 그 외 모든 마찰시간에서 굽힘강도는 모재보다 높게 나타났다.

Fig. 14에서 보는 바와 같이 마찰시간이 길어질수록 굽힘 각도가 커진다. 이것은 마찰시간이 길어질수록 마찰열이 많이 발생하고 급격히 냉각 되므로 인성이 적은 취성 파단이 일어났기 때문으로 사료된다. 최고의 굽힘강도는 0.2sec일 때로 이때의 굽힘강도는 1,749MPa로 SM45C 봉재 굽힘강도의 약 88%, SM20C판재의 약 109%에 해당 된다.

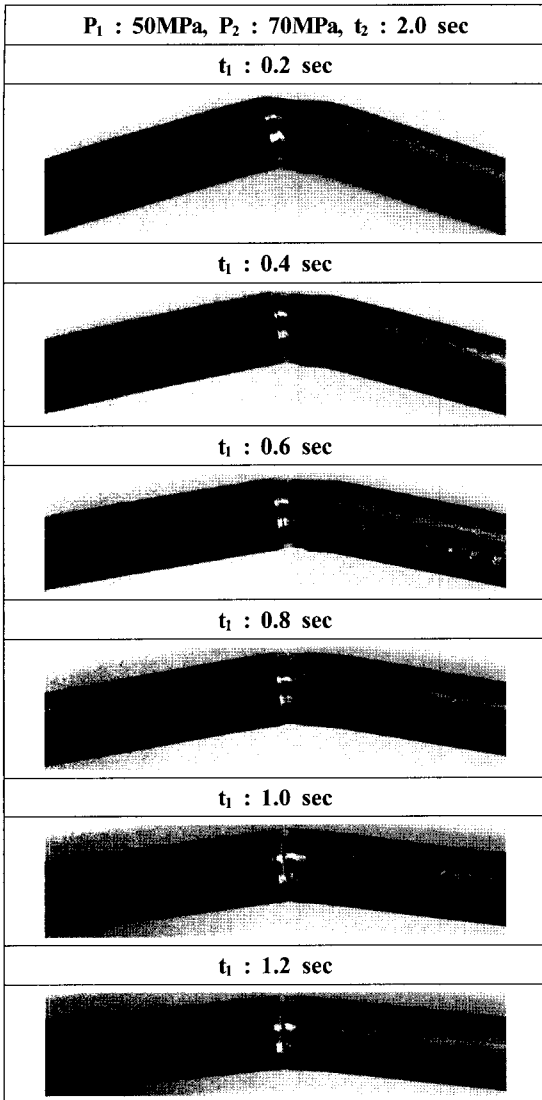


Fig. 14 Appearance of bending test

3.4 경도시험

Fig. 15는 회전수 2,000rpm, 마찰압력 50MPa, 업셋압력 70MPa, 마찰시간 0.2~1.2sec, 업셋시간 2sec 조건에서 최대 인장강도를 나타낸 마찰시간 1sec와 최소 인장강도를 나타낸 마찰시간 0.2sec의 조건으로 경도 시험편을 만들어 용접계면을 중심으로 좌우로 각각 4mm를 0.25mm 간격으로 측정하여 나타낸 경도 분포이다.

마찰시간 1.0sec의 조건일 때 용접계면의 경도 분포를 보면, 가장 높은 곳은 중심부에서 조금 벗어난 지점(589Hv)으

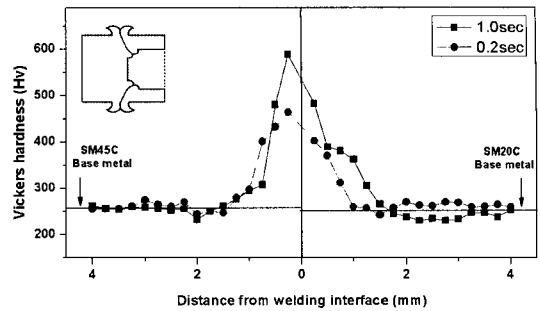


Fig. 15 Hardness distributions of friction weld

로 나타났다. 마찰용접면은 경도가 높은 SM45C조직과 상대적으로 낮은 SM20C조직의 혼합으로 SM45C의 열영향부보다 경도가 낮은 것으로 사료된다. 마찰시간 0.2sec의 조건일 때 1.0sec의 최고경도보다 낮은 465Hv를 나타냈으며 전체적인 경도분포의 경향은 두 조건이 비슷하게 나타났다.

경도 분포에서 나타난 것처럼 급격한 경도의 급상승 및 하강 현상이 나타나고 있는데, 이것은 마찰용접 시 발생하는 마찰열에 의해 고온이 된 접촉면과 열영향부가 공랭하면서 조직의 변화가 생겼으며 그에 따른 경도상승 효과가 발생했기 때문으로 사료된다.

3.5 용접부의 미세조직

현미경 조직은 마찰시간(t_1)을 1.0sec 조건으로 마찰 용접한 시험편의 모재부, 용접계면, 열영향부(HAZ)부를 현미경으로 1,000배 촬영하여 관찰하였다.

Fig. 16에서 A와 E는 각각 SM45C와 SM20C의 모재부이다. SM45C의 모재부는 페라이트와 시멘타이트, 층상의 펄라이트 부분으로 되어 있는데, 강을 부식시키면 시멘타이트가 먼저 부식된다. 그리하여 사진에 나타난 것과 같이 페라이트는 백색으로 펄라이트는 흑색과 백색의 층상으로 시멘타이트는 흑색으로 나타나게 된다. 관재인 SM20C의 모재부는 탄소함량이 적어 대부분이 결정립이 큰 페라이트 조직과 시멘타이트 조직으로 이루어져 있으며 인발에 의해 결정립이 길게 늘린 모양으로 형성되었다. B와 D는 각각의 열영향부이다. SM45C는 마찰 시 발생한 열에 의해 높은 온도까지 올라 압접 후 상온에서의 비교적 빠른 냉각속도에 의해 마르텐사이트와 유사한 침상조직이 형성되었고 SM20C는 압접 시 SM45C로 부터의 탄소확산과 마찰열에 의한 고온으로 줄무늬 펄라이트 조직과 약간의 마르텐사이트 유사조직의 혼합조직을 형성하였다. C는 용접계면의 사진이다.

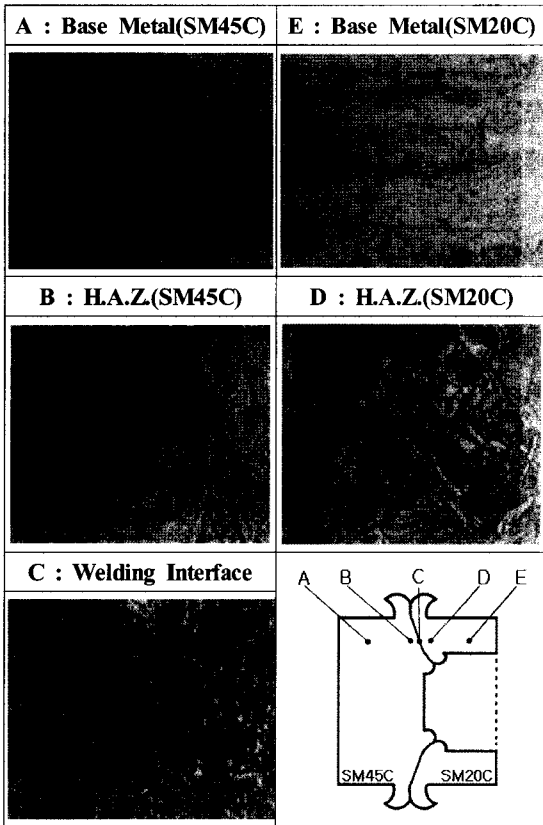


Fig. 16 Micro-structure of friction welds(x1000)

SM45C(왼쪽)와 SM20C(오른쪽)의 접합부분에서 두 재료가 용접결합 없이 잘 접합되었으며, 두 조직이 열을 받아 냉각되는 과정에서 모재에 비해 열처리된 조직과 같음을 알 수 있는데 이는 경도 및 접합강도 상승에 영향을 끼쳤으리라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 우수한 마찰용접강도와 최소의 치수변화를 위해 최적의 마찰압력 P_1 과 업셋압력 P_2 를 산출하여 다시 마찰시간 t_1 을 0.2sec에서 1.2sec까지 0.2sec씩 증가시켜서, 업셋길이 변화, 인장시험, 굽힘시험, 경도시험, 현미경 조직 검사를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마찰압력 P_1 은 40MPa일 때 모재강도 이하로 낮게 나왔으며 50MPa일 때 가장 우수한 강도를 나타냈다. 업셋압

력 P_2 는 70MPa일 때 가장 우수한 강도와 최소의 치수변화를 나타냈다.

- (2) 최대 인장강도는 마찰시간이 1.0sec 일 때이며, 인장강도는 837MPa이다. 이는 SM20C관재에 비해 113%에 해당하는 결과가 나타났다. 최저 업셋길이는 마찰시간이 0.2sec일 때 1.2mm이며 마찰시간이 증가함에 따라 선형적으로 증가됨을 알 수 있었다.
- (3) 굽힘시험 결과 최고의 굽힘강도는 마찰시간이 0.2sec일 때이며 굽힘강도는 1,749MPa로 SM20C관재 굽힘강도의 약 110%에 해당하는 값으로 나타났으며 0.8sec이상의 조건에서는 굽힘강도가 급격히 줄어들었다. 또한 마찰시간이 증가하면 굽힘의 정도가 줄어들며 취성파괴 현상을 나타냈다.
- (4) 본 실험의 결과를 고려한 최적의 조건은 다음과 같다. 마찰압력 P_1 은 50MPa, 업셋압력 P_2 는 70MPa, 마찰시간 t_1 은 1.0sec이며 이때의 업셋길이 변화는 1.7mm이다.

후 기

본 논문은 중소기업청이 지원하는 “선도형 기술혁신 전략 과제 지원사업”의 연구결과로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Vill, V. I., 1957, “Friction Welding of Metals,” *Svarochne Proizvodstvo*, Vol. 3, No. 9, pp. 8~23.
- (2) Lee, S. Y. and Yun, B. S., 2001, “Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C,” *KSMTE*, Vol. 10, No. 1, pp. 65~70.
- (3) Jeong, H. S., 1997, “Fundamentals and Basic Application of Friction Welding,” *KWS*, Vol. 15, No. 6, pp. 1~12.
- (4) Spindler, D. E., 1994, “What Industrial Needs to Know about Friction Welding,” *Welding Journal*, Vol. 73, Issue 3, pp. 37~42.
- (5) Nicholas, E. D., 1977, “Where Industry Uses Friction Welding,” *Welding Design & Fabrication Magazine*, Mar, pp. 74~76.
- (6) Park, K. H., Min, T. K., Yoon, Y. J., and Park, C. S., 2006, “A Study on the Joint Properties

according to the Friction Welding Area Change of Carbon Steel(SM45C),” *KSMTE*, Vol. 15, No. 1, pp. 102~107.

- (7) Oh, S. K., Park, J. B., and Kong, Y. S., 1999, “A Study on Optimization of Friction Welding of Automobile Component Materials(SM40C) and Its Real Time Quality Evaluation by AE,” *KCORE*,

Vol. 13, No. 1, pp. 88~93.

- (8) Park, K. H. and Min, T. K., 2007, “A Study on Mechanical Properties According to the Radius Change Position of Outer Circumference in A2024-T4 Friction Welding,” *KSMTE*, Vol. 16, No. 3, pp. 109~116.