기 술 논 문

경량 피스톤 로드를 위한 마찰용접 적용연구 (SM45C/SM45C-Pipe 사용)

민 병 훈* · 임 형 택* 민 택 기**

*충남대학교 대학원
**충남대학교 기계공학과

A Study on the Friction Welding for Light Piston-Rod (SM45C/SM45C-Pipe)

Byung-Hoon Min*, Hyung-Taek Lim* and Taeg-Ki Min**

*Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Nam National Univ., Dae-jeon 305-764, Korea
**Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Nam National Univ., Dae-jeon 305-764, Korea

Abstract

Various research to reduce weight of a car is achieving. This research is tendencious to manufacture solid piston rod of shock absorber as hollow piston rod using friction welding. This study deals with the friction welding of SM45C to SM45C-Pipe that is used in car shock absorber, The friction time was variable conditions under the conditions of spindle revolution of 2,000rpm, friction pressure of 55㎫, upset pressure of 75㎫, and upset time of 2.0seconds. Under these conditions, the microstructure of weld interface, tensile fracture surface and mechanical tests were studied of friction weld, and so the results were as follows.

1. In tensile strength, the hole processing is better than non-hole processing.
2. When the friction time was 1.5seconds under the conditions, the maximum tensile strength of the friction weld happened to be 869㎫, which is 103% of SM45C's tensile strength and 91% of SM45C's Pipe.
3. When the friction time was 2.0seconds under the conditions, the maximum bending strength of the friction weld happened to be 1599㎫, which is 80% of SM45C's bending strength and 118% of SM45C's Pipe.

*Corresponding author : hoonyx@nate.com (Received February 2, 2008)

Key Words : Friction welding, SM45C, Shock absorber, Piston rod

1. 서 론

마찰용접(Friction welding, FRW)은 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 조대화나 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 장점이 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 비강도

가 높은 소재로 교체하는 방법이 많이 쓰였다. 하지만 고강도를 유지하면서 가벼운 부품을 만들기 위해 마찰용접을 도입하는 연구는 많지 않았다.

쇽업소버는 내구성, 강성, 강도 등이 우수해야하며 특히 여러 부품 중 큰 충격 및 굽힘과 인장력을 받는 피스톤로드(piston rod)는 우수한 기계적 성질이 요구된다[6]. 현재 쇽업소버 피스톤로드는 중실(中實)의 탄소강을 사용하거나 무개를 줄이기 위해 장공(長空) 가공을 하여 생산하기 때문에 불필요한 재료, 공정과 시간 및 에너지가 소모되었다. 따라서 본 연구는 이러한 기존 중실의 쇽업소버 피스톤로드(conventional type)를 마찰압접과 파이프사용으로 중공화 하여 경량화, 자동차 연비 개선, 원자재 절감, 물류비용 절감을 하기위한 목적으로 연구하였다.

본 연구에서는 기계적 성질이 우수하여 널리 쓰이는 SM45C봉재와 값이 저렴하고 가벼운 SM45C관재를 마찰 용접하여 용접부에 대한 접합특성 및 신뢰성을 고찰하고자 하였고, 마찰압력과 시간을 주요 변수로 하여 용접품의 변형과 접합 시 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 SM45C봉재와 SM45C관재(내경 19.7mm)의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에서 각각 나타내었고, 사용된 실험 재료는 모두 직경 25.2mm, 길이를 100mm로 선반 가공하였다. 마찰용접 직전에 용접면을 정밀하게 선삭 가공하고 이물질 제거를 위해 아세톤으로 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

Table 1 Mechanical properties of materials

Materials	Mechanical properties			
	Tensile strength (Mpa)	Bending strength (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
SM45C	861	1980	11	256
SM45C-Pipe	950	1350	12	308

Table 2 Chemical compositions of materials(Wt. %)

Elements \ Materials	SM45C	SM45C-Pipe
C	0.45	0.46
Si	0.19	0.35
Mn	0.70	0.90
P	0.016	0.03
S	0.021	0.035
Cr	0.008	0.02
Mo	-	-
W	-	-
V	-	-
Co	-	-
Fe	Bal.	Bal.

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, Unitron Co., U.S.A)을 이용하였다.

2.3 실험조건

마찰용접은 재료 끝단이 면일 경우 추가적인 가공이 필요치 않는다. 하지만 설계문제나 강도향상을 고려하여 가공이 필요하다[6]. 본 실험에서는 Fig. 1과 같이 SM45C봉재의 끝단 부분을 내경 19.7mm로 드릴가공한 시편과 가공하지 않은 시편을 각각 SM45C관재와 Table 3의 조건으로 마찰용접한 후 강도를 측정하여 용접시편의 형상을 결정하였다. 또한 예비실험을 통해 적절한 마찰압력 P1, 업셋압력 P2를 산출하여 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여 Table 4와 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였다.

2.4 실험방법

인장실험은 Table 3, Table 4와 같은 용접조건으로

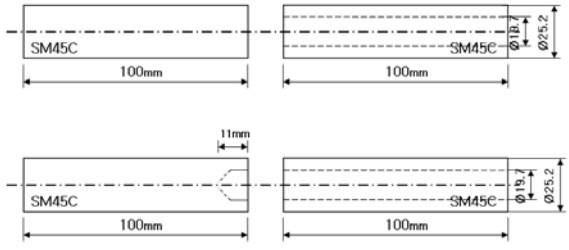


Fig. 1 Specimen

Table 3 Friction welding conditions with Hole processing

Processing	Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P_1, MPa)	Upset pressure (P_2, MPa)	Friction time (t_1, sec)	Upset time (t_2, sec)
Hole	2,000	55	75	0.5	2.0
				1.0	
Non-Hole	2,000	55	75	0.5	2.0
				1.0	

Table 4 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	55	75	0.5	2.0
			1.0	
			1.5	
			2.0	
			2.5	
			3.0	

시편을 제작하여 본 실험을 실시하였으며, 인장시험편은 Oagawa 등[7]이 사용했던 노치 시험편을 Fig. 2과 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 식(1)으로 구하였다.

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

여기서, σ_b : 굽힘강도, M : 최대굽힘모멘트, Z : 단면계수, P_{Max} : 최대하중, ℓ : 지점간 거리, d : 시험편 직경경도시험을 위하여 용접시험편의 축 단면을 절단하여 폴리코트(polycoat)로 마운팅한 시험편을 샌드페이퍼 #200~#1500의 순으로 연마한 후, 그라인딩 폴리셔(model : 95-2810)에서 알루미나 파우다 1㎛, 0.5㎛의 분말을 증류수와 혼합하여 폴리싱 하였다. 용접부의 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(model : MVK-H1, Mitutoyo Co., Jap)로 하였으며, 측정은 하중 500gf으로 용접계면의 중심에서 축 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 0.5μm의 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.

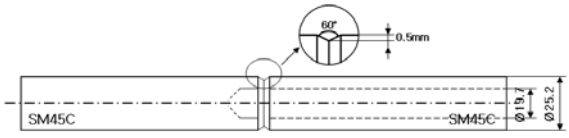


Fig. 2 Specimen of tensile test

3.1 인장시험

실험조건에 명시된 바와 같이 SM45C봉재에 Hole을 만든 시편과 본래의 시편 중 접합특성이 우수한 접합부 형상을 고려하기 위해 예비실험을 Table 3와 같은 조건으로 실험하였다. Fig. 4에서 보는바와 같이 Hole가공을 한 시편이 그렇지 않은 시편보다 약 7%강

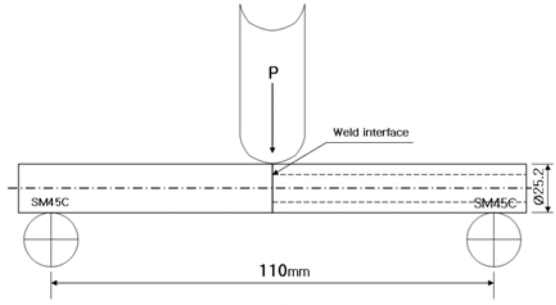


Fig. 3 3-Point Bending test specimen

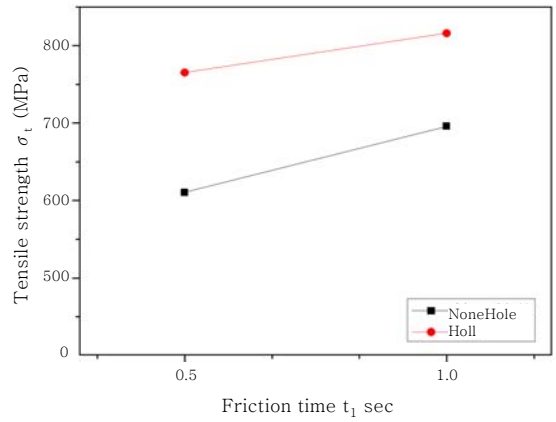


Fig. 4 Relationship between Hole processing and tensile strength

도향상의 효과가 있었다. 이것은 SM45C에 Hole가공을 하지 않은 시편은 재료의 질량효과에 의해 마찰용접 시 발생하는 열이 접합부에 충분히 집중되지 못하고 분산되므로 Hole 가공을 한 시편보다 결합강도가 낮아지기 때문으로 사료된다.

앞으로 실험의 시편을 모두 내경 19.7mm로 가공하여 진행하였고 위의 조건하에서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여 Table 4와 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 위 조건으로 접합한 시편의 접합부 형상과 인장시험 후 파단면을 Photo. 1, Photo. 2에 각각 나타내었다. Fig. 5를 보면 인장강도는 마찰시간이 증가함에 따라 증가하다가 2.0sec부터 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 최고 인장강도는 마찰시간 t_1이 1.5sec일 때 869MPa이며 모재인 SM45C봉재에 비해 103%, SM45C관재에 비해 91%에 해당한다. 이는 1.5sec까지는 접합에 필요한 마찰열이 충분히 발생하여 양 소재의 구성원소가 잘 결합할 수 있는 상태가 되어 양호한 소성유동을 일으켜 접합하였기 때문이고, 가열시간이 1.5sec 이상에서는 필요 마찰열 이상으로 발열하여 플래시로 배출되는 양이 많아지고 접합면에 도달하는 온도가 낮아 결국 부적절한 용접상태가 되어 강도가 감소한 것으로 사료된다. Photo. 1은 마찰시간 조건변화에 따른 플래시 모양이 나타난다. 플래시의 양과 모양은 시간변화에 따라 점차 커지며 안쪽으로 감기는 형상이다. 또한 산화막 띠가 일정 간격으로 증가하는 것으로 보아 마찰시간에 의해 마찰열의 증가가 비례 하는 것으로 사료된다. Photo. 2는 파단면의 형상을 나타내고 있다. 전체적으로 접합부에서 파단이 되었으며 취성파괴 형상이다. 마찰시간이 적은 시편은 파면의 굴곡이 적으며 거칠기가 양호한 모양이지만 마찰시간이 많은 시편은 파면의 굴곡이 많으며 몇몇의 시편에서는 모재측의 일부분이 붙어있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 플래시 형상과 파단면의 형상으로 최소한의 성공 여부를 예측 하는 자료로 활용 될 수 있으리라 사료된다.

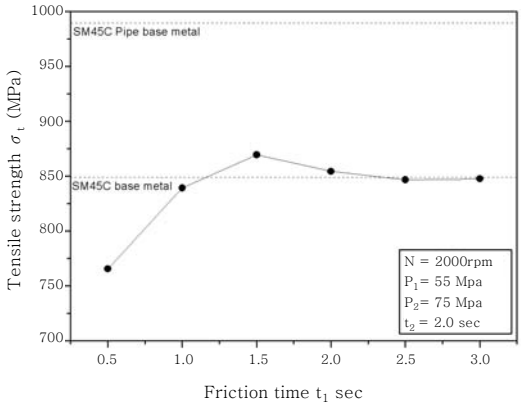


Fig. 5 Relationships between friction time t_1 and tensile strength

Photo 1 Appearance of welded joint

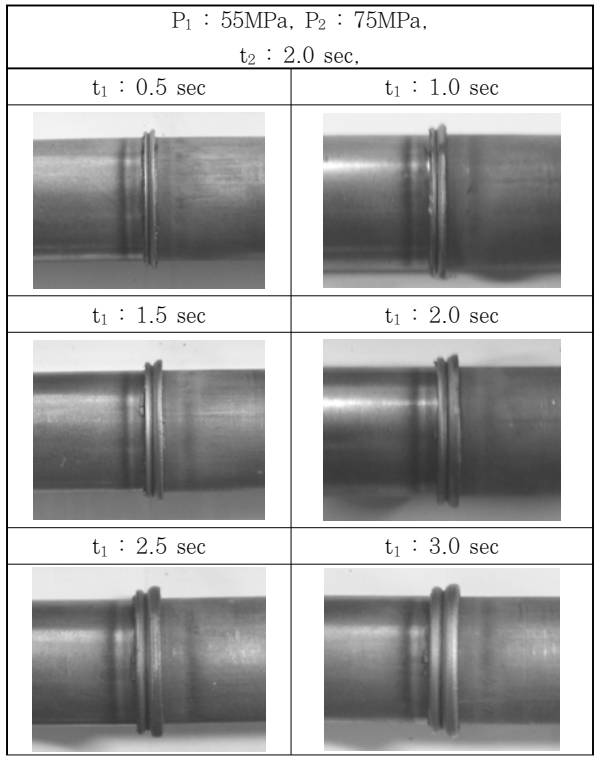


Photo 2 Fracture appearance of tensile test

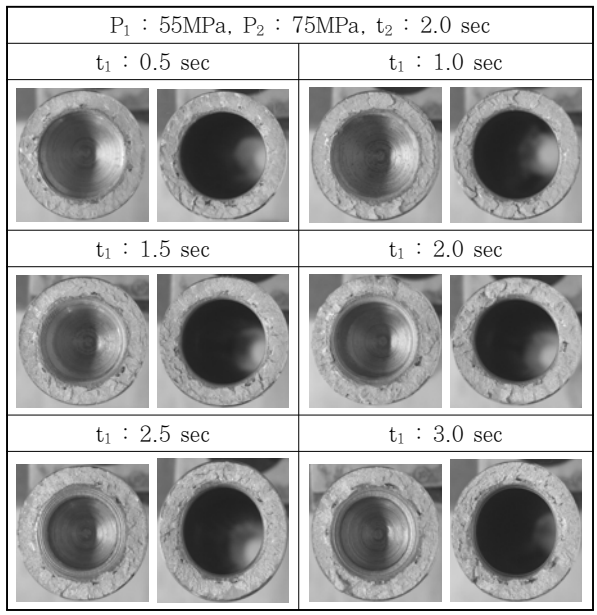


Photo. 2에서 내부 플래시의 형상이 상대적으로 강도가 약한 SM45C봉재에서 더욱 크고 두껍게 형성되어 플래시에 의한 직경변화가 SM45C관재 보다 크게 관찰된다.

3.2 업셋길이 변화

업셋길이 변화 측정은 Table 4와 같은 용접조건으로 시편을 제작하여 용접전의 시편길이와 용접 후 시편의 길이를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 최저 업셋길이는 마찰시간 t_1이 0.5sec일 때 1.7mm, 최고 업셋길이는 마찰시간이 3.0sec일 때 5.5mm로 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 배출하면서 접합부의 신뢰성을 높이고 더불어 접합강도를 향상시키는 원인이 될 수 있다. 최대 인장강도를 갖는 조건에서, 업셋길이의 조절은 재료의 절약, 품질 및 생산성에 있어서 간과 할 수 없는 중요한 문제라고 사료된다.

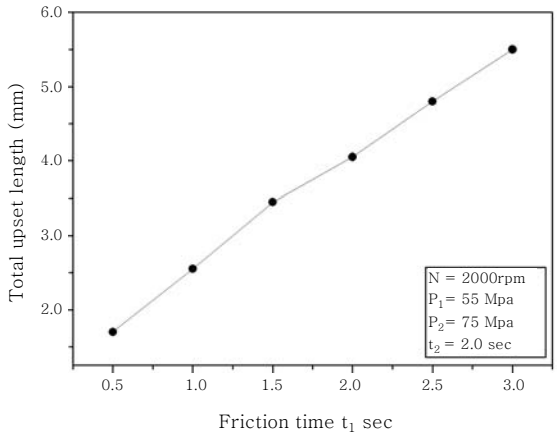


Fig. 6 Relationship between friction time t_1 and upset length

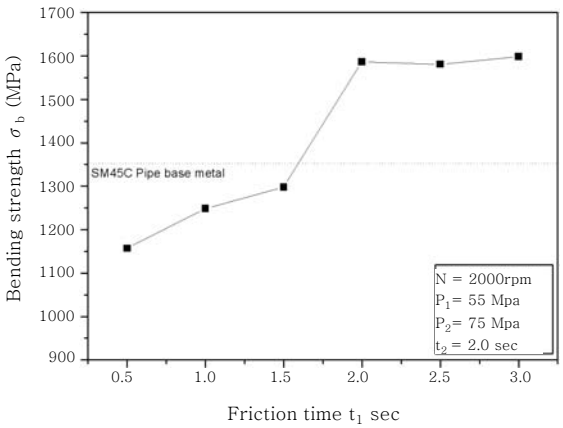


Fig. 7 Relationships between friction time and bending strength

3.3 굽힘시험

Fig. 7는 인장시험과 동일한 조건에서 마찰용접한 시험편의 굽힘시험 결과를 보여주고 있다. 마찰시간이 증가하면 굽힘강도 또한 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며 1.5sec는 모재의 굽힘강도와 비슷하고 그 이상의 마찰시간에서는 SM45C관재의 강도를 넘어 섰다. 최고의 굽힘강도는 3.0sec일 때 이며 굽힘강도는 1,599MPa로 SM45C관재 굽힘강도의 약 118%, SM45C봉재의 약 80%에 해당된다. 본 실험의 경우 최대 인장강도는 1.5sec에서 나타났으나 이때의 굽힘강도는 SM45C관재의 모재 굽힘강도 보다 낮게 나왔으므로 본 실험의 최적 조건을 산출시 고려해야 할 부분으로 사료된다.

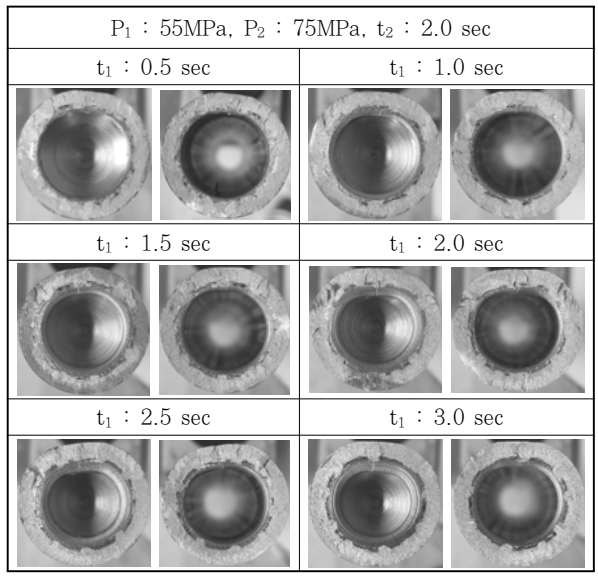
Photo. 3에서 보는 바와 같이 마찰시간에 관계없이 모두 굽힘 파단 되었다. 파단부가 모두 취성 파면의 형상을 띄는 것으로 보아 열 효과를 많이 받는 SM45C의 특성상 마찰에 의해 발생된 열이 접합부를 취성이 큰 조직으로 변화시켰기 때문에 취성 파괴가 일어나는 것으로 사료된다.

3.4 경도시험

Fig. 8은 실험조건에서 최대 인장강도를 나타낸 마찰시간 1.5sec와 최소 인장강도를 나타낸 마찰시간 0.5sec의 조건으로 경도 시험편을 만들어 용접계면을 중심으로 좌우측 각각 3.5mm를 0.25mm 간격으로 측정하여 나타낸 경도 분포이다.

실험결과 전 구간에 걸쳐 마찰시간이 1.5sec일 때 보다 0.5sec일 때 경도가 높았으며 두 시편 모두 용접부의 근방에서 급격한 경도 상승을 나타냈다. 각 시편

Photo 3 Fracture appearance of Bending test



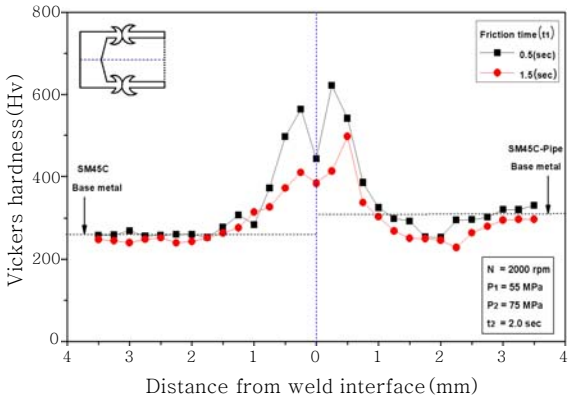


Fig. 8 Hardness distributions of friction weld

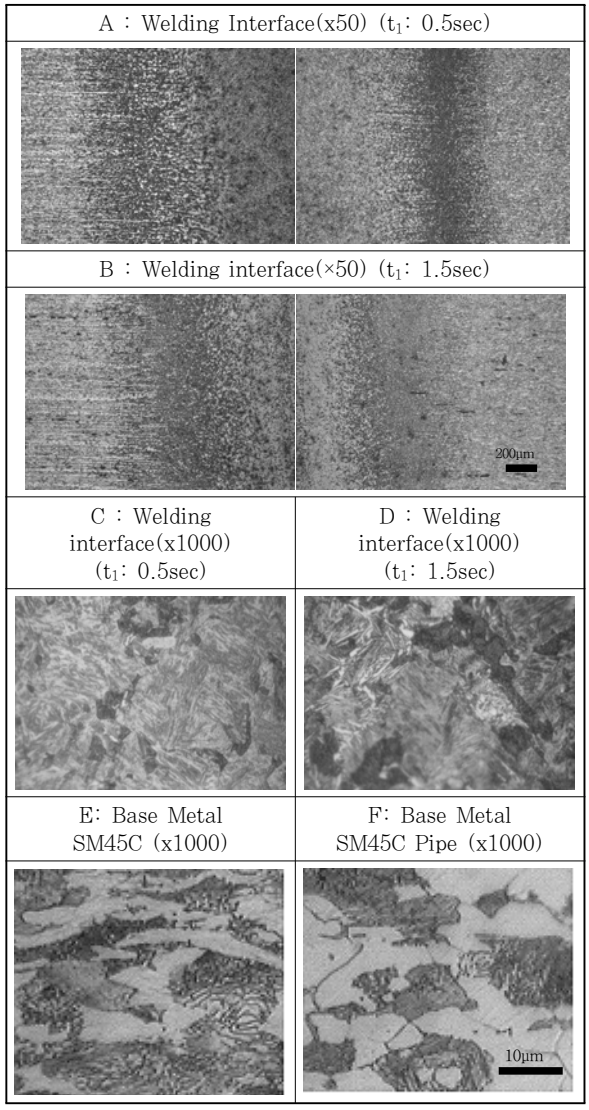
의 용접계면 으로부터 경도 분포를 보면, 마찰시간 1.5sec의 조건일 때 가장 경도가 높은 곳은 용접부에서 SM45C관재 쪽으로 0.25mm 떨어진 지점에서 497Hv로 나타났다. 접합부를 중심으로 각 모재방향으로 약 1.5mm 떨어진 지점부터는 각각 250Hv과 300Hv 안팎으로 거의 일정하게 나타난다. 마찰시간 0.5sec의 조건일 때는 용접부 경도가 442Hv로 1.5sec의 용접부 경도 384Hv보다 높고 용접부로부터 양쪽 모재방향으로 0.25mm 떨어진 지점에서는 각각 563Hv, 622Hv로 1.5sec일 때보다 다소 높게 나타났다. 접합부를 중심으로 각 모재방향으로 약 1.5mm 떨어진 지점부터는 각각 250Hv와 310Hv안팎으로 나타났다. 마찰시간 0.5sec, 1.5sec 두 조건의 시편 모두 SM45C관재 2mm 부근에서 경도 저하가 나타났는데 이것은 마찰용접 시 국부가열에 의한 어닐링 효과와 업셋압력 작용에 의한 내부응력의 영향인 것으로 사료된다. 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 사료되며 선행연구와 비슷한 결과이다[6,8].

3.5 용접부의 미세조직

Photo. 4은 마찰시간을 0.5sec, 1.5sec 조건으로 마찰 용접한 시험편의 용접계면, 모재부를 현미경으로 50배, 1,000배 촬영하여 관찰하였다.

Photo. 4 A와 B는 각각 마찰시간 0.5sec, 1.5sec의 조건으로 용접한 시편의 접합부를 50배로 촬영한 사진이다. 접합부의 폭이 1.5sec의 조건으로 용접된 시편에서 더욱 좁은 것을 알 수 있다. 이것은 긴 마찰시간에 의해 충분히 연화된 부분이 업셋압력에 의해 모두

Photo 4 Micro-structure of friction welds



외부로 배출되어 플래시로 형성이 되었기 때문이다. 또한 A와 B 사진을 통해 접합계면으로부터 조직이 변화되는 구간을 한눈에 볼 수 있고 이와 같은 조직의 변화는 강도 및 경도 등 재료의 접합특성에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. C, D는 위 시편들의 접합부를 1000배로 확대한 사진이다. C사진은 마찰 시 발생한 열에 의해 높은 온도까지 올라 압접 후 상온에서의 비교적 빠른 냉각속도에 의해 마르텐사이트와 유사한 조직이 형성된 것으로 보이고 D사진은 마르텐사이트 유사조직과 펄라이트의 혼합조직으로 구성되어 있다. 이것은 플래시로 배출되고 남은 연화구역의 영향으로 비교적 고온에 도달했다가 냉각되면서 조직의 혼합현상이 나타난 것으로 사료된다. E와 F는 각각 SM45C봉재와 관재의 모재부 조직사진이다. 두 사진 모두 전형적인 SM45C의 페라이트와 시멘타이트, 층상의 펄라이트를 관찰할 수 있다.

위 결과로 보아 마찰시간 0.5sec, 1.5sec로 용접된 두 시편 모두 용접결함 없이 잘 접합되었으며, 마찰과정에서 열을 받아 냉각되는 과정에서 모재에 비해 접합부가 열처리된 조직으로 변화하였음을 알 수 있다. 또한 마찰시간에 따라 발열된 온도가 다르기 때문에 접합부의 조직과 연화정도가 달라져 경도 및 접합강도 변화에 영향을 끼쳤으리라 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 우수한 용접강도와 최소의 치수변화를 위해 SM45C봉재에 홀(Hole) 가공 유무에 따른 접합특성을 살펴보았고 위 실험의 결과에 마찰시간 t_1을 0.5sec에서 3.0sec까지 0.5sec씩 증가시켜서, 업셋길이 변화, 인장시험, 굽힘시험, 경도시험, 현미경 조직검사를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 홀 가공한 시편이 약 7%의 인장강도 향상을 보였다.

2) 최대 인장강도는 마찰시간 t_1이 1.5sec일 때 869MPa이며 모재인 SM45C봉재에 비해 103%, SM45C관재에 비해 91%에 해당하는 결과이다.

3) 굽힘강도는 1.5sec일 때 모재의 굽힘강도보다 조금 낮은 1298MPa이며 그 이상의 마찰시간에서는 1600MPa부근으로 급격한 상승이 나타났다.

4) 본 실험의 결과를 고려한 최적의 조건은 회전수 2000pm, 마찰시간 2.0sec, 업셋시간 2.0sec, 마찰압력 55MPa, 업셋압력 75MPa이다.

참 고 문 헌

1. Vill, V. I : Friction Welding of Metals, Svarochne Proizvodstvo, **3-9**(1957), 8-23
2. Sang-Yun Lee, Byeong-Soo Yun : Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C, KSMTE, **10-1**(2001), 65-70
3. Ho-Shin Jeong : Fundamentals and Basic Application of Friction Welding, KWS, **15**(1997) 1-12
4. Spindler, D. E : What Industrial Needs to Know about Friction Welding, Welding Journal, Mar (1994), 37-42
5. Nicholas, E. D : Where Industry Uses Friction Welding, Welding Design and Fabrication, Aug (1997), 74-76
6. Joong-Hoon Jeong : A study on the Welding Poperties of SM25C Carbon Steel Rod and SMn420 Alloy Steel Pipe, M. S. Thesis(2001), Chung-Nam Univ
7. K. Oagawa, H. Yamaguchi, S. Kaga and K. Sakaguchi : Optimization of Friction welding Condition for S45C Carbon Steel Using a Statical Techique Tansactions of the Welding Society, **24-2**(1993), 133-139
8. Keun-Hyung Park, Taeg-Ki Min, Young-Joo Yoon and Chang-Soo Park : A Study on the Joint Properties accoding to the Friction Welding Area Change of Carbon Steel(SM45C), KSMTE, **15-1**(2006), 102-107