

경량화 피스톤 로드에서 사용되는 SM45C/SM45C-Pipe의 마찰용접시 업셋압력이 미치는 영향

민병훈*, 최원용⁺, 민택기⁺

(논문접수일 2008. 2. 5, 심사완료일 2008. 4. 28)

Effect of Upset pressure on weldability in the Friction Welding of SM45C-Solid
and SM45C-Pipe which is used in the Piston-Rod

Byung-Hoon Min*, Won-Yong Choi⁺, Taeg-Ki Min⁺

Abstract

This research is tendencious to manufacture solid piston-rod of shock absorber as hollow piston-rod using friction welding. The SM45C has been welded to the SM45C-pipe in order to investigate the effect of upset pressure on friction weldability. The friction time and upset pressure was variable conditions under the conditions of spindle revolution of 2,000rpm, friction pressure of 55MPa, 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. When the upset pressure is sufficient, gets the high tensile strength. The optimal welding conditions were $n=2,000\text{rpm}$, $P_1=55\text{MPa}$, $P_2=95\text{MPa}$, $t_1=1.5\text{sec}$, $t_2=2.0\text{sec}$ when the total upset length is 4.5mm.

Key Words : friction welding(마찰용접), shock absorber(속업소바), piston-rod(피스톤 로드), SM45C(기계구조용 탄소강), pipe(파이프), upset pressure(업셋압력)

1. 서론

마찰용접(Friction welding, FRW)은 국부적인 마찰열에 의해 접합부에서만 열이 발생하고, 재료의 소성변형에 의한 금속원소의 확산이동으로 접합되며, 미리 정해진 용접변수에 의해 자동적으로 수행된다. 그러므로 재현성이 뛰어나고,

작업과정이 간단하며, 용접사이클이 짧아 경제적이다^(1,2). 최근 각종 기계부품의 재료비와 에너지 절감을 위해 마찰용접이 사용되는 연구가 활발하다^(3,4). 또한 자동차, 선박, 기계, 건설 등 각종 산업현장에서 가장 광범위하게 사용되는 탄소강은 기계적 성질 뿐만 아니라 경제적인 면에서 많은 장점이 있다. 최근에 자동차의 연비개선의 일환으로 자동차의 무게를

* 충남대학교 교육대학원 (hoonyx@nate.com)
주소: 305-764 대전시 유성구 궁동 220번지
⁺ 충남대학교 기계공학과

줄이기 위해 비강도가 높은 소재로 교체하는 연구가 활발하다. 그러나 높은 강도와 인성을 요구하는 몇몇 자동차 부품은 비강도가 높은 소재로 대체하지 못하기 때문에 강도를 유지하면서 무게를 줄이는 방법의 일환으로 마찰용접을 도입하는 연구가 필요하다.

속업소버의 경우 내구성, 강성, 강도 등이 우수해야하며 특히 여러 부품 중 큰 충격 및 굽힘과 인장력을 받는 피스톤로드(piston rod)는 우수한 기계적 성질이 요구된다⁽⁹⁾. 현재 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 연구에서는 기존 중실의 속업소버 피스톤로드(conventional type)의 일부를 가벼운 SM45C관재로 대체하고 마찰압력변화에 따른 재료의 플래시의 형상, 미세조직의 변화 및 강도 변화를 비교하여 공정의 단계를 줄여 생산 원가를 낮추는 등 품질 향상을 위한 최적의 용접조건을 설정하여 용접품의 경량화, 자동차 연비 개선, 원자재 절감, 물류 비용 절감을 위한 목적으로 연구하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 탄소강 SM45C봉재와 내경 19.7mm SM45C관재의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에서 각각 나타내었고, 사용된 실험 재료는 모두 직경 25.2mm,

길이를 100mm로 선반 가공하였다. SM45C봉재의 접합면은 19.7mm의 Hole processing을 하여 관재와 내경을 동일하게 하였다. 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 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

본 실험은 업셋압력 변화에 따른 기계적 특성을 비교하기

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Mechanical properties			
	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
SM45C	861	1982	11	256
SM45C(Pipe)	950	1350	12	308

Table 3 Preliminary-test results

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 ~ 3.0	2.0

Friction time (sec)	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Upset length (mm)
0.5	765	1157	1.7
1.0	839	1250	2.5
1.5	869	1298	3.5
2.0	854	1587	4.0
2.5	846	1581	4.8
3.0	847	1599	5.5

Table 1 Chemical compositions of materials(Wt. %)

Materials Elements	SM45C	SM45C Pipe
C	0.45	0.46
Si	0.19	0.15
Mn	0.70	0.90
P	0.016	0.030
S	0.021	0.035
Cr	0.008	0.2
Mo	-	-
W	-	-
V	-	-
Co	-	-
Fe	Bal.	Bal.

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	55	75	1.0	2.0
		95		
		115		

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	55	95	0.5	2.0
			1.0	
			1.5	
			2.0	
			2.5	
			3.0	

위해 비교적 낮은 업셋압력에서의 시간변화에 따른 인장강도, 굽힘강도, 업셋길이 변화를 측정하여 예비실험의 결과를 Table 3에 나타내었다. 최적 업셋압력 P₂를 얻기 위해 각각 Table 4와 같은 용접조건으로 실험했으며 위의 조건하에서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여 Table 5와 같은 용접조건으로 본 실험을 실시한 후 예비실험 결과와 비교하였다.

2.4 실험방법

본 실험은 용접부에 대한 총 업셋량 변화, 인장강도, 굽힘강도, 경도시험, 현미경 조직분석 등을 실시하였다.

업셋량 변화는 용접하기 전 시편의 치수와 용접 후 치수를 버니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 인장실험은 Table 4, Table 5와 같은 용접조건으로 시편을 제작하여 본 실험을 실시하였으며, 인장시험편은 Oakawa 등⁽⁶⁾이 사용했던 노치 시험편을 Fig. 1과 같이 제작 후 만능 인장시험기로 측정하였다. 마찰용접부의 굽힘강도를 시험하기 위하여 Fig. 2와 같이 지그(jig)에 하중작용점이 용접면에 위치하도록 시험편을 장착하고 크로스헤드(cross head)의 이송속도를 1mm/min로 설정하여 굽힘시험을 하였다. 경도시험을 위하여 용접시험편의 축 단면을 절단하여 마이크로 비커스 경도시험기로 하였으며, 측정은 하중 500g으로 용접면의 중심에서 측

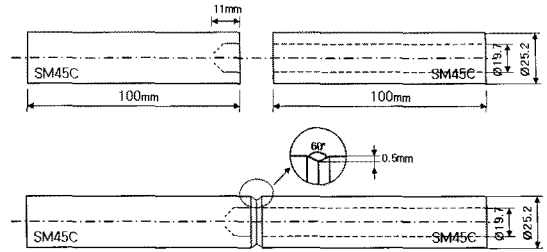


Fig. 1 Specimen of tensile test

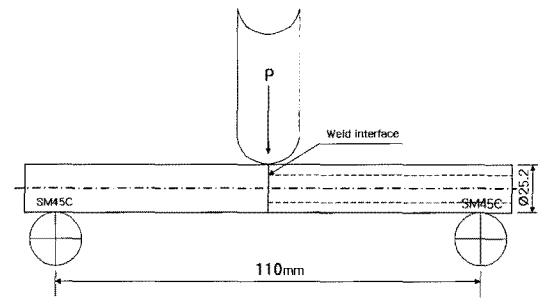


Fig. 2 3-Point Bending test specimen

방향으로 0.25mm의 일정한 등간격으로 측정하였다. 조직검사는 광학현미경을 이용하였으며 마운팅한 시험편의 축 단면을 절단하여 폴리싱 후 나이탈(nital 3%)에 3sec간 부식시켜 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 업셋길이 변화

업셋길이 변화 측정은 Table 3에서 측정된 데이터와 Table 4와 같은 용접조건으로 시편을 제작하여 용접전의 시

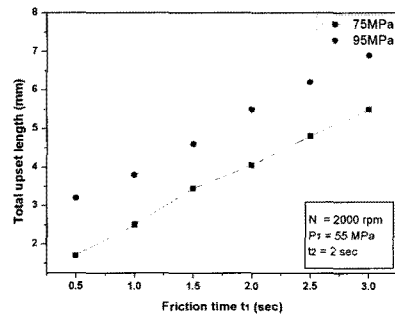


Fig. 3 Relationship between friction time t₁ and upset length

편길이와 용접 후 시편의 길이를 측정한 데이터를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

업셋압력의 변화에 따라 업셋길이 변화는 선형적으로 증가하였고 이와 같은 결과는 마찰용접의 전형적인 양상으로 소성유동이 활발해져 플래시로 많이 배출되기 때문이다.

이 결과는 본 연구에서 압력변화 및 마찰시간 변화에 따른 업셋길이 조절이 일정하게 제어가 가능함을 나타낸다.

3.2 인장시험

실험조건에 명시된 바와 같이 최적 업셋압력 P_2 를 얻기 위해 Table 4와 같은 용접조건으로 실험했으며 위의 조건하에서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여, 마찰시간을 변수로 하여 Table 5와 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 4, Fig. 5에 각각 나타내었다. 또한 시편의 플래시 형상과 파단면을 Photo. 1, Photo. 2, Photo. 3에 각각 나타내었다.

Fig. 4에서 업셋 압력이 95MPa일 때 인장강도가 1079MPa

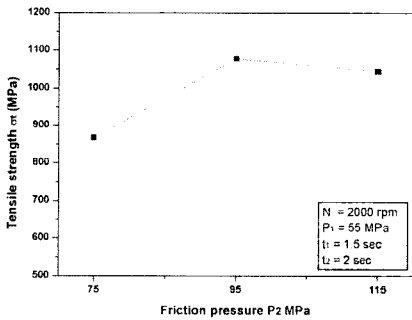


Fig. 4 Relationships between upset pressure P_2 and tensile strength

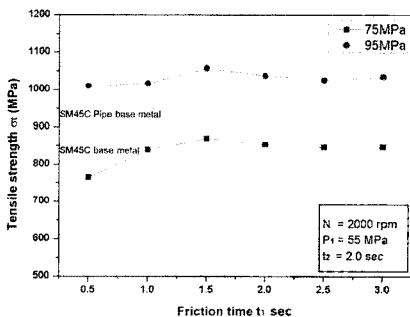


Fig. 5 Relationships between friction time t_1 and tensile strength

로 가장 높게 나왔으며 75MPa일 때 보다 약 200MPa 상승하였다. 이것은 마찰압력 변화에 따라 업셋량이 많아져 접합면에 존재하는 산화물이나 불순물 등의 이물질을 접합면 밖

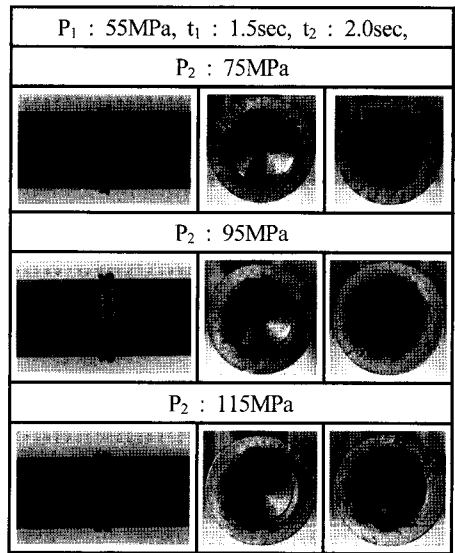


Photo. 1 Appearance of welded joint and fracture appearance of tensile test by Table 4

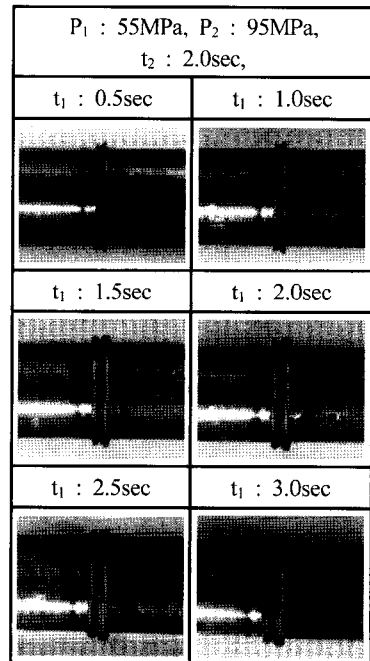


Photo. 2 Appearance of welded joint by Table 5

으로 배출하고 원소들을 강제적으로 침입, 치환 시켜 접합강도를 향상시키는 원인이 된 것으로 생각된다. Photo. 1에서 보는 바와 같이 플래시 양이 업셋압력 변화에 따라 확연히 차이가 나며 인장 파단면 사진에서 95MPa, 115MPa의 파단면이 75MPa의 파단면보다 치밀함이 나타난다.

위의 결과를 적용하고 마찰시간을 변수로 둔 실험결과 Fig. 5를 보면 인장강도는 업셋압력 75MPa의 조건에서 마찰시간이 증가함에 따라 증가하다가 1.5sec에서부터 소폭 감소하는 경향을 나타내고 있으며 업셋압력 95MPa의 조건에서도 비슷한 경향을 보인다. 75MPa의 조건에서는 최고인장 강도가 SM45C봉재의 모재강도보다 조금 높은 869MPa 정도의 강도를 나타냈다. 반면 업셋압력 95MPa의 조건에서는 1.5sec에서 1057MPa로 최고치를 나타내었으며 모든 마찰시간 변화에서 SM45C환봉과 관재의 모재강도보다 높은 강도를 나타내었다. Photo. 2, Photo. 3은 각각 업셋압력 95MPa의 조건에서 마찰시간 변화에 따른 플래시 모양과 파단면의 형상을 나타내고 있다. 플래시의 형상과 양은 마찰시간의 변화에 따라 점차 증가하며 이것은 경도가 매우 단단하여 용접품의 가공성을 나쁘게 하므로 되도록 적게 생성되는 것이 좋다. 또한 산화막 피가 점점 증가하는 것으로 보아 마찰시간에 의해 마찰열이 일정하게 증가 한다는 것을 알 수 있다. 모든 시편은 접합부에서 파단이 일어났으며 마찰시간이 길어질수록 파단면의 거칠기가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다.

위 결과는 업셋압력이 충분하다면 적은 마찰시간으로도 충분한 강도를 얻을 수 있으며 업셋량의 변화를 최소화 할

수 있음을 나타낸다.

3.3 굽힘시험

Fig. 6은 업셋압력 75MPa일 때의 예비실험 결과와 업셋압력 95MPa인 조건의 굽힘시험 결과이다. 마찰시간의 증가와 더불어 굽힘강도 또한 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 업셋압력 75MPa의 굽힘강도는 마찰시간이 1.5sec까지는 SM45C관재의 굽힘강도보다 낮으나 2.0sec에서 상승하여 3.0sec까지 비슷한 굽힘강도를 유지한다. 반면 업셋압력 95MPa일 때의 굽힘강도는 0.5sec의 조건에서부터 모재의 (SM45C관재) 굽힘강도를 뛰어넘으며, 이후 계속 상승하여 3.0sec일 때 1797MPa를 나타냈다.

굽힘시험의 결과 업셋압력이 75MPa인 시험편은 모두 파단 되었으나 95MPa인 시험편은 Photo. 4에서 보는 바와 같이 1.5sec까지는 파단 되고 그 이후의 조건에서는 모두 접합부 주변에서 크랙이 발생하였다. 이것은 SM45C봉재 쪽의 Hole processing한 부분에 마찰용접 시 내부응력의 집중과 가공부위의 노치효과로 인해 굽힘 크랙이 발생한 것으로 사료된다.

3.4 경도시험

Fig. 7은 업셋압력 75MPa일 때 마찰시간 0.5sec와 1.5sec의 경도 예비실험 결과를 나타냈다. 용접계면을 중심으로 좌우측 각각 3.5mm를 0.25mm 간격으로 측정하여 나타난 경도 분포이다.

실험결과 전 구간에 걸쳐 마찰시간이 1.5sec일 때 보다 0.5sec일 때 경도가 높았으며 두 시편 모두 용접부의 근방에서 급격한 경도 상승을 나타냈고 각 시편의 용접계면 으로부터 경도 분포가 영문자 “M”의 형상을 나타내고 있다. 마찰

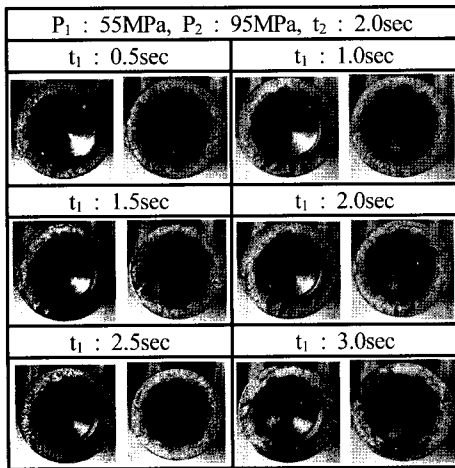


Photo. 3 Fracture appearance of tensile test by Table 5

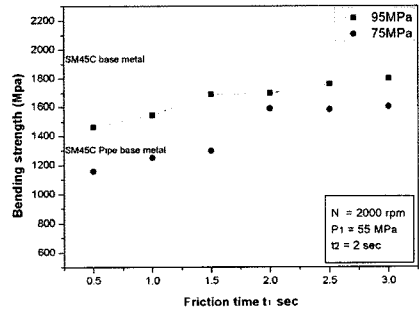


Fig. 6 Relationships between friction time and bending strength

시간 1.5sec의 조건일 때 가장 경도가 높은 곳은 용접부에서 SM45C관재 쪽으로 0.25mm 떨어진 지점에서 497Hv로 나타났다. 마찰시간 0.5sec의 조건일 때는 용접부 경도가 442Hv로 1.5sec의 용접부 경도(384Hv)보다 높고 용접부로부터 양쪽 모재방향으로 0.25mm 떨어진 지점에서는 각각

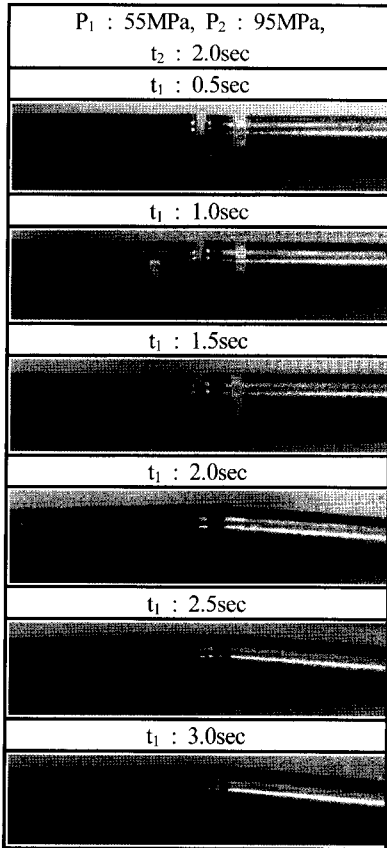


Photo. 4 Appearance of bending test

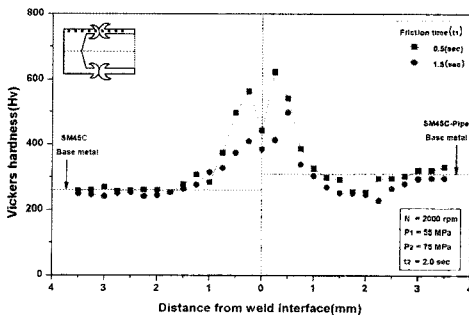


Fig. 7 Hardness distributions of friction weld(75MPa)

563Hv, 622Hv로 1.5sec일 때보다 다소 높게 나타났다.

Fig. 8은 업셋압력 95MPa일 때 마찰시간에 따른 경도분포의 차이를 알아보기 위해 0.5sec와 3.0sec의 경도시험 결과이다.

결과에서 보듯이 마찰시간 0.5sec일 때는 경도분포가 영문자 "M"과 같은 형상을 보이고 있으나 마찰시간 3.0sec는 뚜렷한 형상은 나타내고 있지 않다. 마찰시간 3.0sec의 조건일 때 가장 경도가 높은 곳은 용접부에서 SM45C관재 쪽으로 0.25mm 떨어진 지점에서 350Hv로 나타났다. 마찰시간 0.5sec의 조건일 때는 용접부 경도가 367Hv로 3.0sec의 용접부 경도 342Hv보다 높고 용접부로부터 양쪽 모재방향으로 0.25mm 떨어진 지점에서는 각각 418Hv, 448Hv로 3.0sec일 때보다 다소 높게 나타났다. 모재경도 이하로 낮아지는 열영향부는 마찰시간이 긴 3.0sec가 0.5sec보다 넓게 퍼져있고 전체적인 경도분포는 0.5sec가 높다. 위와 같은 결과는 마찰열에 의해 연화된 부분이 플래시로 배출되어 경도 상승의 요인이 제거되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 업셋압력에 따른 경도 분포를 알아보기 위해 업셋압력 75MPa와 95MPa일 때 마찰시간 0.5sec의 경도시험

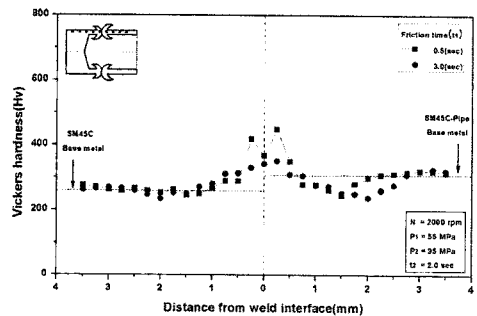


Fig. 8 Hardness distributions of friction weld(95MPa)

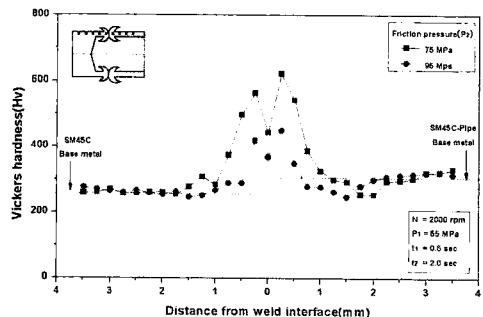


Fig. 9 Hardness distributions of friction weld(0.5sec)

결과를 비교해 보았다.

Fig. 9에서 보듯이 두 압력변화의 조건에서 모두 영문자 “M”과 같은 형상의 경도분포를 보이고 있으며 압력조건이 비교적 낮은 75MPa일 때 경도분포가 더욱 높게 나타나는 양상이다. 위 결과는 업셋과정 시 플래시로 배출되지 않고 접합부에 잔류하는 양이 비교적 많을 때 담금질 효과의 영향을 더 많이 받게 됨을 나타내며, 또한 굽힘강도를 나타낸 Fig. 9와 비교해 볼 때 위와 같은 담금질 효과로 인해 접합부의 취성이 높아지므로 굽힘응력의 작용 시 취성파괴를 일으키는 것을 알 수 있다.

3.5 용접부의 미세조직

Photo. 5은 마찰압력 75MPa일 때 마찰시간을 0.5sec와

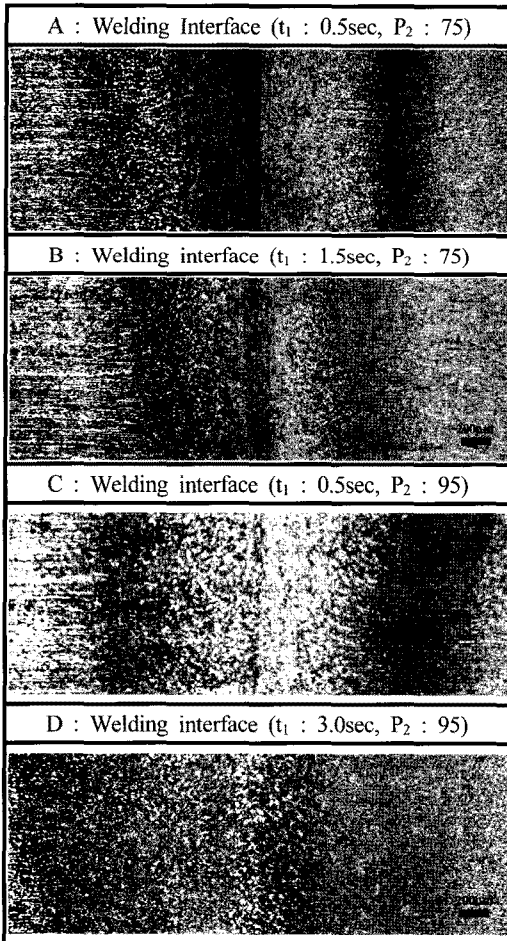


Photo. 5 Micro-structure of friction welds(x50)

1.5sec으로, 마찰압력 95MPa일 때 마찰시간을 0.5sec와 3.0sec의 조건으로 마찰 용접한 시험편의 용접계면을 현미경으로 50배 촬영한 결과이다.

Photo. 5에서 각 접합부의 사진에서 용접부의 폭을 비교해 보면 업셋압력 75MPa일 때는 B, 95MPa일 때는 D조건이 용접부의 폭이 좁다. A와 C조건인 경우 마찰시간이 짧아 충분히 연화되지 못한 부분이 플래시로 배출되지 않고 내부에 잔류하면서 열전달 및 공냉에 의해 급냉 되므로 취성이 높은 조직으로 변화된 것으로 생각된다. B와 D조건은 마찰시간이 길어 충분히 연화된 부분이 A와 C조건보다 많이 배출되므로 조직변화의 폭이 좁아진다. 이와 같은 결과를 굽힘 시험 후 시편의 형상을 보여준 Photo. 4와 비교해 보면 취성의 구간이 넓은 C의 조건에서 취성파괴가 일어났고, 연화된 구간이 거의 배출된 D의 조건에서는 취성이 높은 구간이 거의 존재하지 않아 취성파괴가 일어나지 않음을 알 수 있다. 또한 A와 C를 비교해볼 때 마찰시간이 0.5sec로 비교적 짧지만 업셋압력의 변화만으로도 약 250MPa의 인장강도가 향상되었고 이것은 높은 마찰열과 업셋압력의 작용으로 두 재료간의 접합이 보다 치밀해지기 때문에 강도가 상승하는 것으로 사료된다.

Photo. 5에서 A와 B사진을 비교해 볼 때 열영향부 폭이 좁을수록 인장강도와 굽힘강도가 높게 나타나지만 C와 D사진에서는 두 조건이 열영향부폭의 차이가 상당히 남에도 불구하고 인장강도의 변화는 크지 않다. 그러나 굽힘강도는 열영향부의 폭이 아주 좁은 D의 조건이 C의 조건보다 330MPa 높다. 이와 같은 결과는 업셋압력이 충분하면 마찰시간을 비교적 짧게 해도 충분한 인장강도를 얻을 수 있음을 나타낸다. 다만 굽힘강도와 업셋길이 등을 고려하여 적절한 접합 조건을 선정해야 한다.

4. 결론

본 연구는 파이프와 환봉의 접합 시 업셋압력이 미치는 영향을 알아보기 위해 최적의 업셋압력을 적용 후 마찰시간 t_1 을 0.5~3.0sec까지 0.5sec씩 증가시켜서, 업셋길이 변화, 인장시험, 굽힘시험, 경도시험, 현미경 조직검사를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 업셋압력이 충분하면 마찰시간이 짧아도 높은 인장강도를 얻을 수 있으며 마찰시간에 따라 업셋길이를 최소한으로 조절할 수 있다.
- (2) 접합부의 경도상승이 인장강도에 큰 영향을 주지 않지

- 만 높은 취성으로 인한 굽힘강도 저하의 원인이 된다.
- (3) 마찰열에 의해 연화된 구간을 플래시로 많이 배출 할수록 인장 및 굽힘 강도가 높아진다.
- (4) 본 실험의 결과를 고려한 최적의 접합 조건은 회전수 2000rpm, 마찰시간 1.5sec, 업셋시간 2.0sec, 마찰압력 55MPa, 업셋압력 95MPa이다.

참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) Jeong, H. S., 1997, "Fundamentals and Basic Application of Friction Welding," *KWS*, Vol. 15, No. 6, pp. 1~12.
- (3) Spindler, D. E., 1994, "What industry needs to know about friction welding," *Welding Journal*, Vol. 73, Issue. 3, pp. 37~42.
- (4) Nicholas, E. D., 1977, "Where Industry Uses Friction Welding," *Welding Design and Fabrication*, Vol. 50, No. 8, pp. 74~76.
- (5) Min, B. H., Lim, H. T., and Min, T. K., 2008, "A Study on the Friction Welding for Light Piston-Rod (SM45C/SM45C-Pipe)," *KWJS*, Vol. 26, No. 2, pp. 55~61.
- (6) Oagawa, K., Yamaguchi, H., Kaga, S., and Sakaguchi, K., 1993, "Optimization of Friction welding Condition for S45C Carbon Steel Using a Statical Technique," *Transactions of the Welding Society*, Vol. 24, No. 2, pp. 133~139.
- (7) 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.
- (8) 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.