

고속도강(SKH55)과 기계구조용 탄소강(SM45C)의 마찰용접특성에 관한 연구

최수현*, 민병훈⁺, 김노경⁺⁺, 임형택⁺⁺⁺, 민택기⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2007. 10. 22, 심사완료일 2008. 1. 4)

A Study on the Mechanical Properties as a Result of Friction Welding With SKH55 and SM45C

Su-Hyun Choi*, Byung-Hoon Min⁺, Noh-Kyung Kim⁺⁺, Hyung-Taek Lim⁺⁺⁺, Taeg-Ki Min⁺

Abstract

This study deals with the friction welding of SKH55 and SM45C; The friction time was variable conditions under the conditions of spindle revolution 2,000rpm, friction pressure of 190MPa, upset pressure of 270MPa and upset time of 2.0 seconds. Under these conditions, the microstructure of weld interface, tensile fracture surface and mechanical tests were studied, and so the results were as follows. 1. When the friction time is 1.0 seconds, the tensile strength of friction welds was 926MPa, which is around as much as 84% of the tensile strength of base metal(SKH55), the bending strength of friction welds was 1,542MPa, which is around as much as 80% of the bending strength of base metal(SKH55), the shear strength of friction welds was 519MPa, which is around as much as 70% of the shear strength of base metal(SKH55). 2. According to the hardness test, the hardness distribution of the weld interface was formed from 964Hv to 254Hv. HAZ(Heat Affected Zone) was formed from the weld interface to 1.5mm of SKH55 and 2mm of SM45C.

Key Words : Friction welding(마찰용접), Friction time(마찰시간), Friction pressure(마찰압력), Tensile strength(인장강도), SKH55(고속도강), SM45C(기계구조용 탄소강)

* 충남대학교 교육대학원(lucking7@nate.com)
주소: 305-764 대전시 유성구 궁동 220번지
+ 충남대학교 교육대학원
++ 충남대학교 교육대학원
+++ 충남대학교 대학원
++++ 충남대학교 기계공학과

1. 서론

최근 세계적인 무역경쟁으로 인하여 생산성 향상 및 원가 절감이 산업체의 주된 목표로 등장됨에 따라 금속가공 분야에서 다각도의 노력을 기울이고 있으며 그 중 한 방법으로서 고속절삭 가공에 대한 연구가 활발하다^(1,2).

마찰용접법은 아크용접이나 저항용접, 레이저용접 등에서 발생할 수 있는 용접의 결함을 감소시킬 수 있으며 자동화 생산이 용이하다. 또한 마찰용접 시 접촉면 이외에는 온도 상승이 적으므로, 열영향부가 좁고 타 용접에 비해 용접 온도가 낮아 접촉부의 열 영향이 적으며 접합부에서만 발열되므로 일반 용접법에 비하여 열효율이 높다^(3,4).

본 연구에 사용되고 있는 고속도강(SKH55)은 고온에서도 경도가 저하되지 않고 고속 절삭 작업이 가능하며, 내마모성과 내열성이 좋아 베어링이나 드릴, 리머, 탭 등의 절삭 공구재료 등으로 많이 쓰이고 있다. 또한, 기계구조용 탄소강(SM45C)은 크랭크 축, 로드 등 기계구조 부품에 사용되고 있다^(5,6). 그러나 고속도 공구강 원자재의 지속적인 가격 상승으로 고가의 재료로 통용되고 있어 본 연구에서는 기계적 성질이 우수하고 값이 상대적으로 저렴한 탄소강(SM45C)과 고속도강(SKH55) 봉재를 마찰 용접하여 용접부에 대한 접합 특성을 고찰하고자 하였고, 이를 위하여 마찰시간을 주요 변수로 하여 용접부에 대한 총 업셋량 변화, 인장강도, 굽힘강도, 전단강도, 경도시험, 현미경 조직관찰 등을 실시하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 고속도강(SKH55)과 기계 구조용 탄소강(SM45C)의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에서 각각 나타내었고, 사용된 실험 재료는 모두 직경 12mm, 길이 100mm로 선반 가공하였다. 마찰용접 전에 용접면을 정밀하게 선삭 가공 하고 이물질 제거를 위해 아세톤으로 세척하였다.

본 실험에 사용된 마찰용접기는 브레이크 타입(NSF-30 H, 남선기공, revolution: 2,000rpm, maximum axial force: 98,000N)으로, 회전척, 고정척, 회전을 급정지시키기 위한 디스크 방식의 브레이크와 압력을 얻기 위한 유압펌프, 유압 실린더, 피스톤 등의 유압장치, 플래시 제거장치, 용접 사이클을 제어하기 위한 시간·유압 제어장치, 고정척 테이블의 운동을 제어하기 위한 리미트스위치 등으로 구성되어 있다. 마찰용접부의 기계적 시험을 위해 최대 용량 50ton의 만능 재료시험기(model: DYHU-50- AD, Dae Yeong)를 사용하

였으며, 경도시험은 마이크로 비커tm 경도시험기(model: MVK-H1, Mitutoyo Co., Jap)를 사용하였다. 예비실험을 통하여 회전수, 압력, 시간 범위를 설정하였다. 회전수는 척에 고정된 용접시험편이 스핀(spin)을 일으키지 않고 충분한 발열이 일어나는 2,000rpm으로 하고, 마찰압력은 충분한 발열을 할 수 있는 190MPa의 압력으로 하였다. 같은 방법으로 업셋압력 또한 용접 시험편에 척킹(chucking)력에 의한

Table 1 Chemical compositions of materials(Wt. %)

Materials Elements	SKH55	SM45C
C	0.91	0.45
Si	0.34	0.15
Mn	0.35	0.60
P	0.023	0.03
S	0.001	0.02
Cr	3.86	-
Mo	4.87	-
W	5.94	-
V	1.72	-
Co	4.54	-
Fe	Bal.	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Mechanical properties			
	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Hardness (Hv)
SKH55	1,097	1,938	737	345
SM45C	948	1,890	622	284

Table 3 Friction welding conditions

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	190	270	0.5	2.0
			1.0	
			1.5	
			2.0	
			2.5	

변형을 주지 않는 범위 내에서의 최대 압력인 270MPa로 설정하였다. 위의 조건하에서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여, 마찰시간을 변수로 하여 실험하였다. Table 3과 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였으며, 인장시험편은 Fig. 1과 같이 제작하였다.

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

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

여기서,

σ_b : 굽힘강도, M : 굽힘모멘트, Z : 단면계수,

P_{\max} : 최대하중, ℓ : 지점간 거리, d : 시험편 직경

경도시험을 위하여 같이 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 300g으로 용접면의 중심에서 축 방향 및 반지름 방향으로 0.5mm의 일정한 간격으로 측정하였다. 조직검사는 광학현미경(model : Bi-12882, Uintron Co, U.S.A)을 이용하였으며 시험편 준비는 축 단면을 절단하여 채취한 시험편을 폴리코트(Ploycoat)로 마운팅

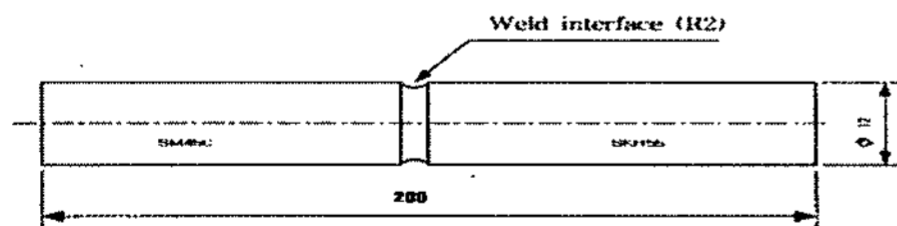


Fig. 1 Specimen of tensile test

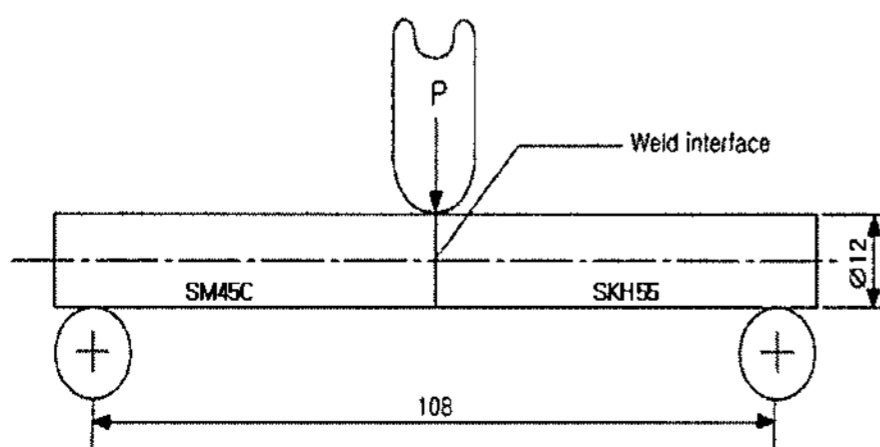


Fig. 2 3-Point Bending test specimen

한 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

Fig. 3에서 최저 업셋길이는 마찰시간(t_1)이 0.5sec일 때 4.9mm, 최고 업셋길이는 마찰시간(t_1)이 2.5sec일 때, 9.4mm로 측정되었다. 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 이물질이 접합면 밖으로 배출하는 과정으로서, 접합강도를 향상시키는 원인이 된다. 최대 인장강도를 갖는 조건에서, 업셋길이는 재료의 절약, 품질 및 생산성에 있어서 간과할 수 없는 중요한 문제라고 사료된다.

3.2 인장시험

회전수 2,000rpm, 마찰압력(P_1) 190MPa, 업셋압력(P_2) 270MPa, 업셋시간(t_2) 2.0sec로 고정하고, 마찰시간(t_1)을 0.5sec에서 2.5sec까지 0.5sec 간격으로 변화시켜 용접한 시험편의 인장 강도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 인장강도는 마찰시간이 증가함에 따라, 증가하다 감소하는 경향을 나타내고 있다. 최고 인장강도는 마찰시간(t_1)이 1.0sec일 때이며, 인장강도는 926MPa이다. 이는 모

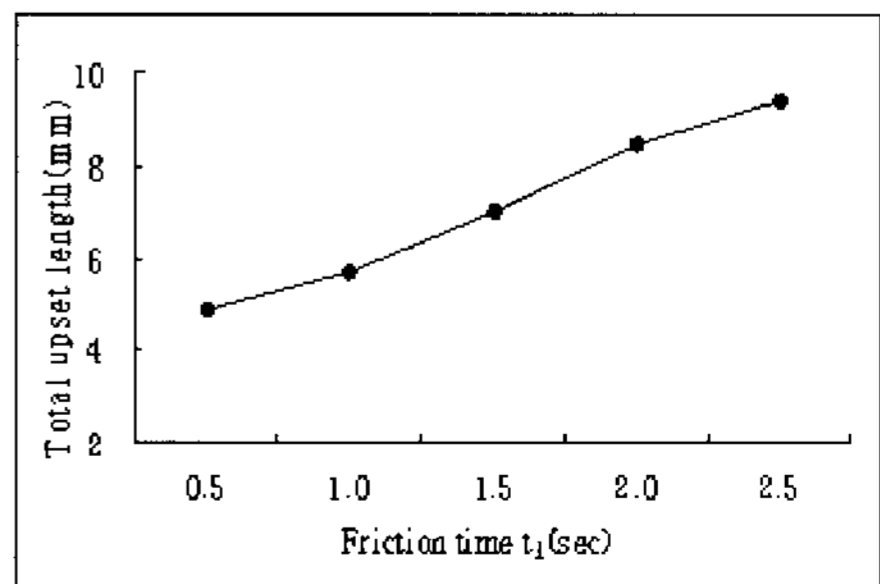


Fig. 3 Relationship between friction time and upset length

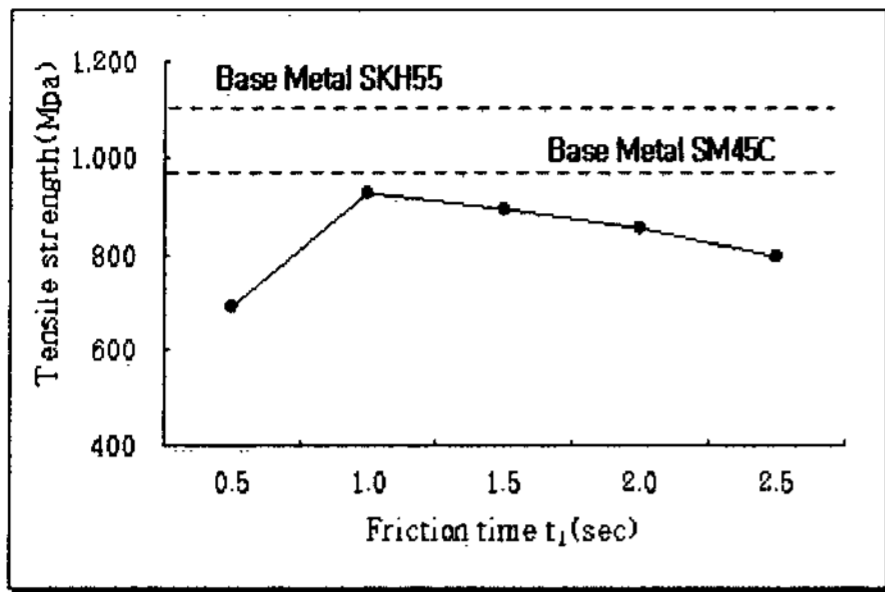


Fig. 4 Relationships between friction time and tensile strength

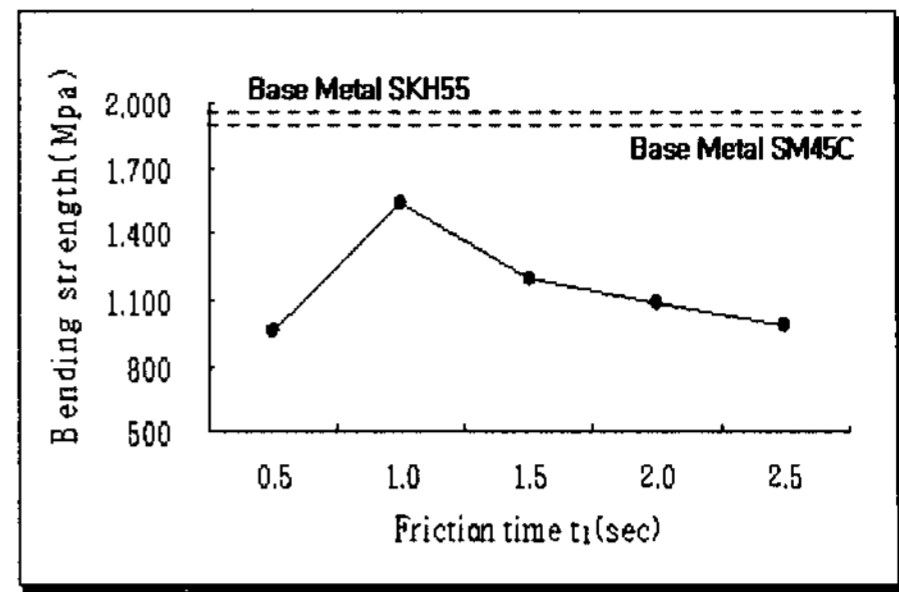


Fig. 5 Relationships between friction time and bending strength

재인 고속도강(SKH55)에 비해 84%에 해당하며, 기계구조용 탄소강(SM45C)에 비해 98%에 해당하는 결과이다. 마찰 시간이 증가함에도 불구하고 인장강도의 최고점에서 감소율을 나타내고 있다. 0.5sec에서 1.0sec 사이는 가열시간이 길어질수록 증가하였고, 1.0sec에서 2.5sec 사이에서는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 그것은 1.0sec까지는 가열시간이 길수록 많은 마찰열이 발생하여 양 소재의 구성원소가 잘 결합할 수 있는 상태에서 가압압력을 가하여 소성유동을 일으켜 접합하였기 때문이고, 가열시간이 1.0sec 이상에서는 접촉면 부근이 고온이 된 부위가 넓어 가압압력을 가할 때, 마찰열에 의해 소성 변형된 부분이 플래시로 배출되는 양이 많아 접합면에 도달하는 온도가 낮아 부적절한 용접상태가 되어 강도가 감소한 것으로 사료된다.

3.3 굽힘시험

Fig. 5는 인장시험과 동일한 조건에서 마찰용접 한 시험편의 굽힘시험 결과이다. 마찰시간이 증가하면 굽힘강도는 인장강도와 비슷하게 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 모든 마찰시간에서 굽힘강도는 모재보다 낮게 나타났다. 이것은 인성이 적은 취성 파단이 일어났기 때문으로 사료된다. 최고의 굽힘강도는 1.0sec일 때로 이때의 굽힘강도는 1,542MPa이며, 이는 고속도강(SKH55)의 모재 굽힘강도의 약 80%, 기계구조용 탄소강(SM45C)의 모재강도의 약 82%에 해당된다. 일반적으로 마찰용접 접합부에서는 재료의 섬유조직이 가압과정에서 소성화 된 영역이 플래시로 배출하게 되는데 이 때 용접계면에 대하여 평행하게 재배열된다. 이러한 조직의 재배열은 축에 대한 수직방향의 부하 (loading)시 취약한 성질이 나타나는 것으로 알려져 있다.

3.4 전단시험

Fig. 6은 인장, 굽힘시험과 동일한 조건에서 마찰 용접한 시험편을 가공하여 전단용 지그(jig)를 사용하여 전단 시험한 결과를 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 마찰시간(t_1) 1.0sec에서 최고의 전단강도는 519MPa로 모재의 고속도강(SKH55) 대비 70%, 기계구조용 탄소강(SM45C) 대비 83%의 결과를 보였다. 전단 강도가 0.5sec일 때는 충분한 마찰열이 발생되지 않아 소성접합이 될 만한 고상용접이 되지 않은 것으로 사료 되며, 2.5sec대는 과열한 마찰열로 인해 소성유동은 발생 하였으나 플래시로 배출되어 전단강도가 낮게 나타난 것으로 사료된다. 또한 위의 두 시간대를 제외한 마찰시간대에서의 전단강도의 차이는 크게 나타나지 않았으며 이는 굽힘강도나 인장강도에서 보이는 경향과 크게 벗어나지 않고 있다.

3.5 경도시험

Fig. 7과 Fig. 8은 회전수 2,000rpm, 마찰압력 190MPa, 업셋압력 270MPa, 마찰시간 0.5~2.5sec, 업셋시간 2.0sec 조건에서 최대 인장강도와 굽힘강도를 나타낸 마찰시간 1.0sec

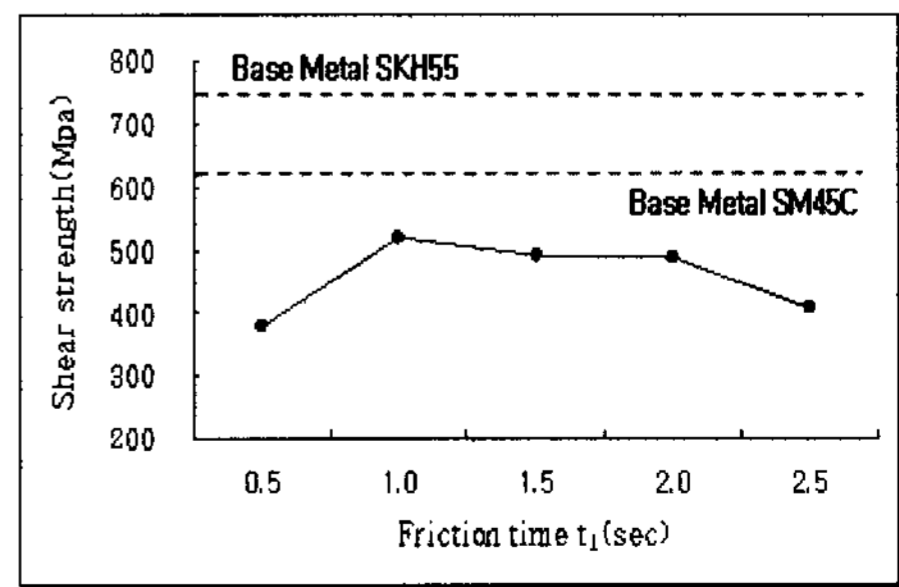


Fig. 6 Relationships between friction time and Shear strength

의 조건으로 경도 시험편을 만들어 R(6mm) 부분의 용접계면에서 수직방향으로 2mm씩 중심부 쪽으로 증가해가면서 0.5mm 간격으로 측정하여 나타낸 경도 분포이다. 마찰 용접면의 경도 분포는 열영향부(HAZ)가 모재부의 경도보다 매우 높은 경도값을 나타냈다. 이는 높은 열에 의한 조직변화와 결정립 미세화로 인한 것으로 사료된다.

먼저 Fig. 7에서 용접계면의 경도 분포를 보면, center지점(963.5Hv)이 가장 높은 곳으로 나타났다. 마찰용접재의 모재 경도에 비해 월등히 높은 경도값을 나타내고 있다. 경도 분포에서 나타난 것처럼 급격한 경도의 급상승 및 하강 현상이 나타나고 있는데, 이것은 가압압력과 마찰열에 의한 열영향부(HAZ) 사이의 조직 변화가 발생한 경계 부분으로 미세화된 조직과 모재조직으로 혼합영역이 나타나 급격한 경도의 변화를 보이는 것으로 사료된다. Fig. 7의 열영향부에서 SM45C보다 SKH55모재 쪽이 조금 더 길게 나타나고 있는데, 이는 회전축에 고정된 SM45C에서 원심력으로 인한 급랭 현상이 발생되었고, SKH55모재는 고정척에서 냉각되었기 때문에 마찰열의 발산이 극히 적어 열영향부(HAZ)가 길게 나타났으리라 생각된다. Fig. 8은 용접 계면의 중심부에서 가장 자리 쪽으로 반지름 방향으로 경도 분포를 나타

내고 있다. 여기서 특별히 주목하고자 하는 것은 중심부 쪽에서의 경도와 플래시의 경도가 거의 일치하게 나타나고 있는 것이다. 이는 마찰열에 의해 두 모재 속에 포함된 각각의 구성원소의 확산과정에서 압력압력으로 인해 중심부에서는 소성유동된 성분이 잔존되었고 나머지 일부는 플래시로 배출되었기 때문에 경도가 비슷하게 나타났다고 보아진다.

3.6 용접부의 미세조직

현미경 조직은 마찰시간(t1)을 1.0sec 조건으로 마찰 용접한 시험편의 모재부, 용접계면, 열영향부(HAZ)부를 현미경으로 1,000배 촬영하여 관찰하였다.

Photo. 1의 사진에서 보면, 기계구조용 탄소강(SM45C)의 모재부는 백색 부분과 흑색 부분 그리고 층상의 회색부분으로 구분되어 있는데, 강을 부식시키면 펄라이트가 먼저 부식된다. 그리하여 사진에 나타난 것과 같이 펄라이트는 백색으로 펄라이트는 흑색과 층상의 회색 부분으로 구분된다. 흑색의 가는 선은 펄라이트 입계를 나타내며 펄라이트 기지의 가운데 점상으로 나타난 흑점은 개재물로서 산재해 있음을 알 수 있다. 고속도강(SKH55)은 기계구조용 탄소강(SM45C)보다 니켈, 크롬, 텅스텐 등 내식성이 강한 성분이 많은 강으로 부식이 약하게 되었지만 미세한 결정립을 확인할 수 있다.

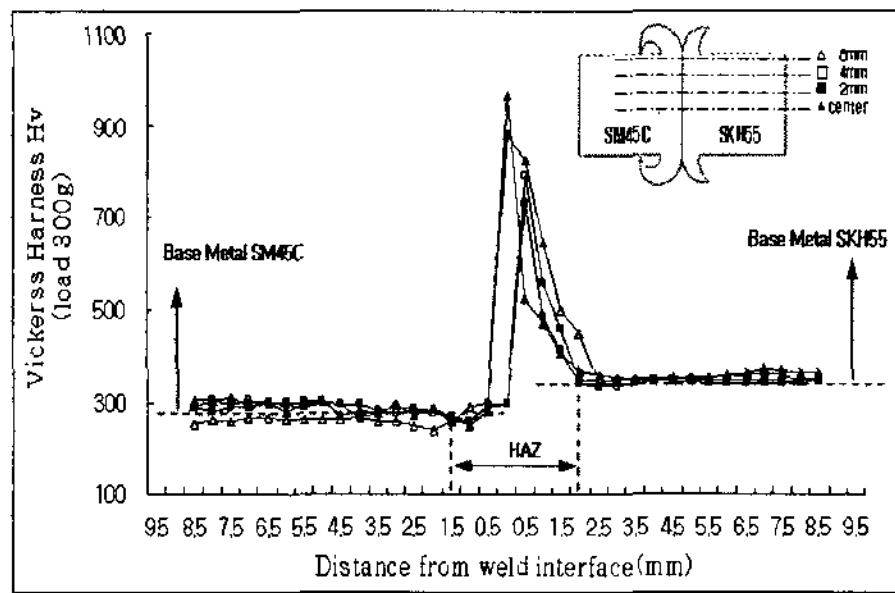


Fig. 7 Hardness distributions of friction weld

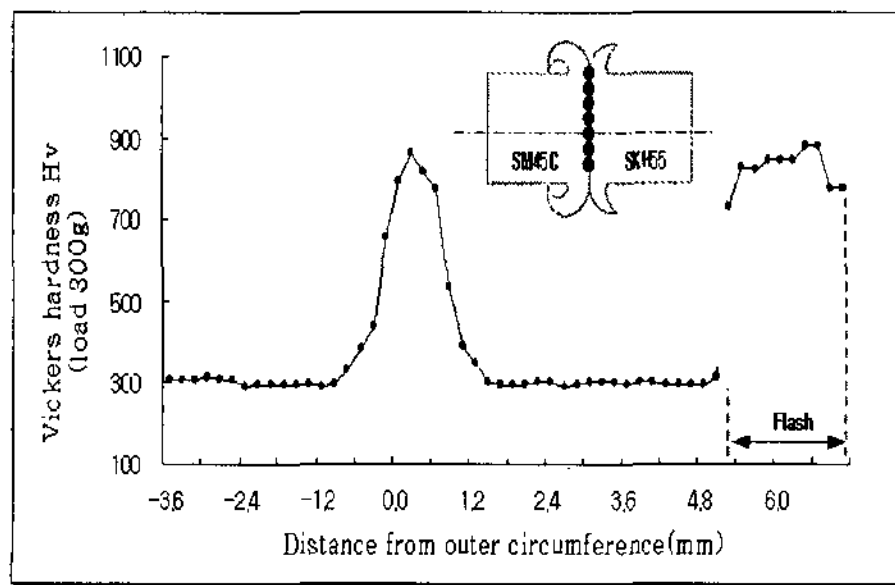


Fig. 8 Hardness distributions of weld interface

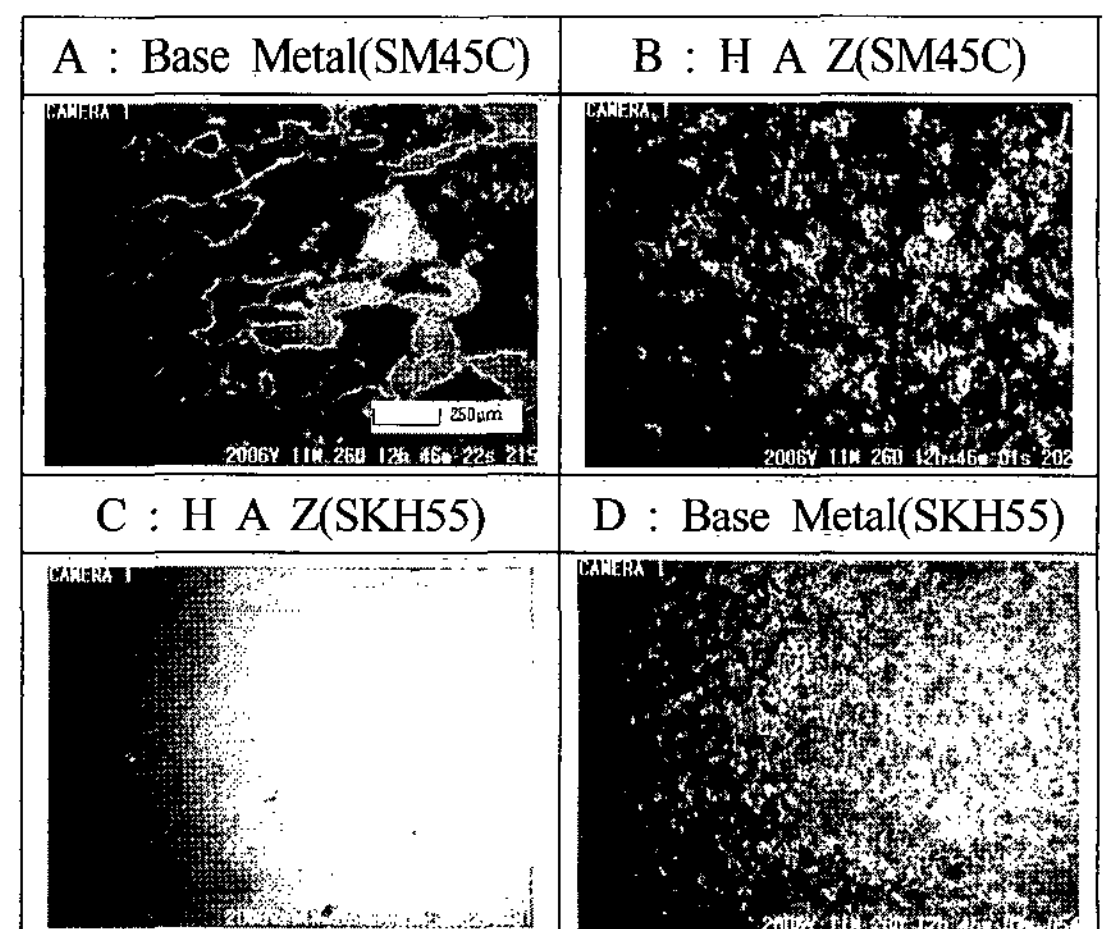
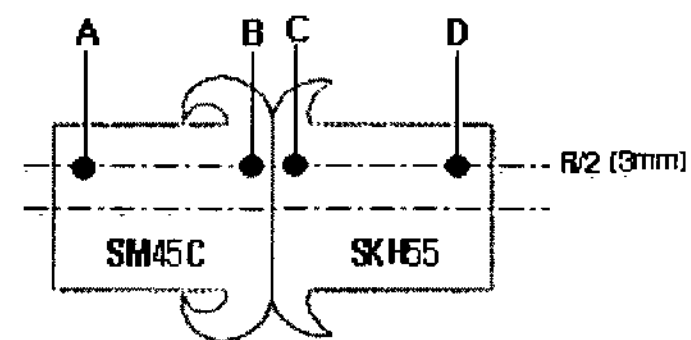


Photo. 1 Micro-structure of friction welds(R/2, x1000)

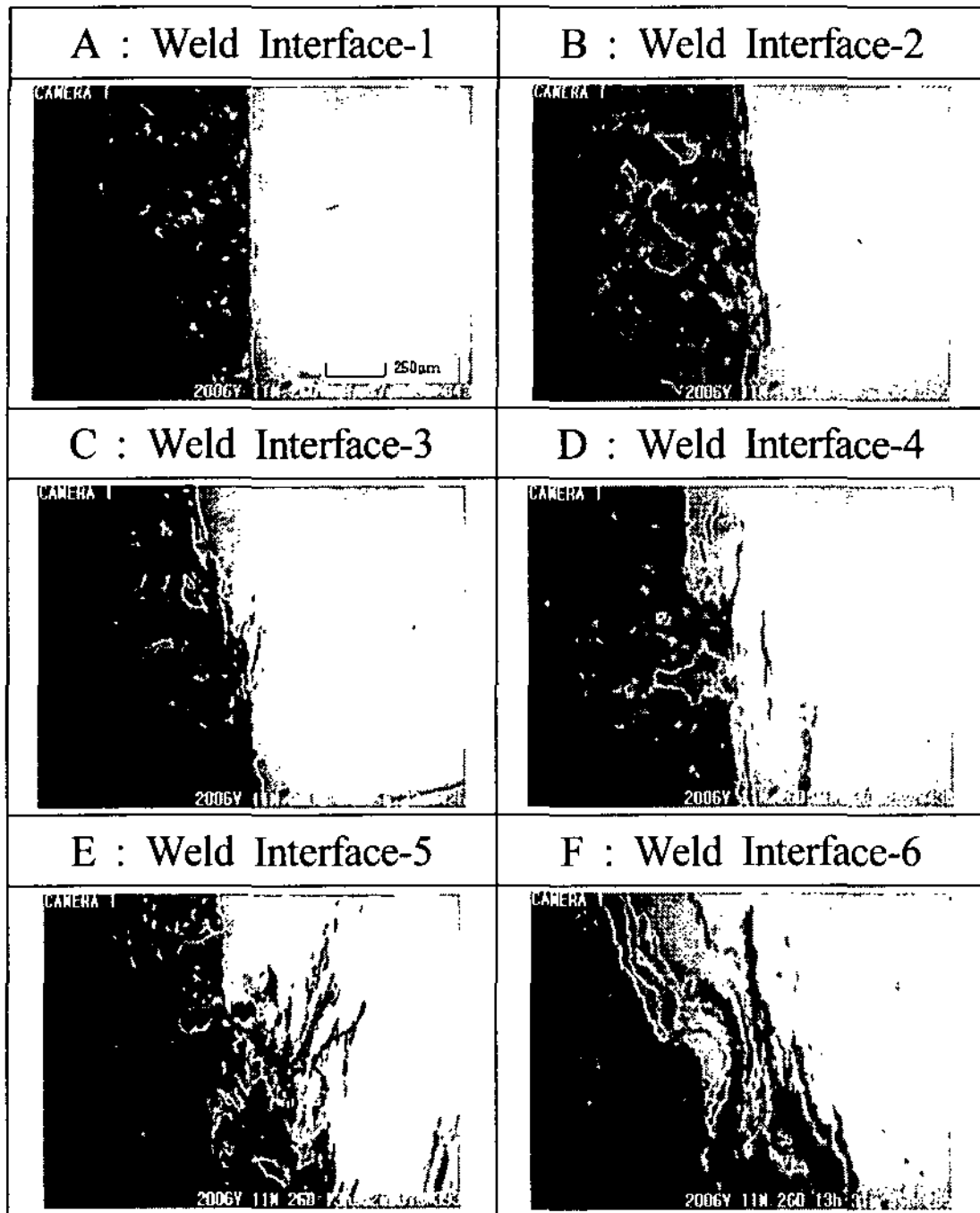
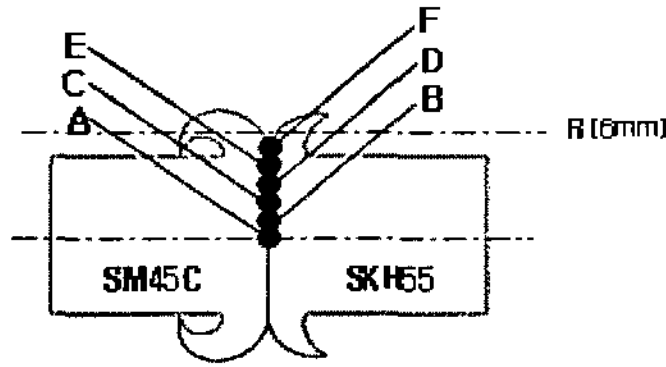


Photo. 2 Micro-structure of friction welds(Weld Interface, x1000)

Photo. 2에서 접합부분을 보면 왼쪽이 기계구조용 탄소강(SM45C)이고, 오른쪽이 고속도강(SKH55)로서 접합부분에서 두 재료가 용접결합 없이 잘 접합되었음을 알 수 있으며, 두 조직이 마찰열을 받아 냉각되는 과정에서 모재에 비해 굉장히 미세화 된 조직을 관찰 할 수 있는데 이것이 재료의 경도에 영향을 주었으리라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 지름 12mm인 SKH55와 SM45C의 봉재를 회전수 2,000rpm, 마찰압력 190MPa, 업셋압력 270MPa, 업셋시간(t2) 2.0sec로 설정하고, 마찰시간(t1)을 0.5sec에서 2.5sec까지 0.5sec씩, 업셋길이 변화, 인장시험, 굽힘시험, 전단시험, 경도시험, 현미경 조직검사를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최대 인장강도는 마찰시간이(t1) 1.0sec 일 때이며, 926MPa이다. 이는 고속도강(SKH55)에 비해 84%에 해당하며, 기계구조용 탄소강(SM45C)에 비해 98%에 해당한다.
- (2) 최대 굽힘강도는 마찰시간(t1) 1.0sec일 때이며, 1,542MPa이며, 이는 고속도강(SKH55)의 약 80%, 기계구조용 탄소강(SM45C)의 약 82%에 해당한다.
- (3) 최대 전단강도는 마찰시간(t1) 1.0sec일 때이며, 519MPa로 모재의 고속도강(SKH55)의 70%, 기계구조용 탄소강(SM45C)의 83%에 해당한다.
- (4) 경도는 254Hv 에서 964Hv 까지 형성되었고, 가장 높은 곳은 center 지점이다. 용접계면을 중심으로 2mm 이내의 열영향부를 형성하였으며 용접부의 결정립 미세화가 경도 상승에 영향을 주었음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Komanduri, R., Schroeder, T. A., B. F. Von Turkovich, and Flow, D. G., 1982, "On the Catastrophic Shear Instability in the High Speed Machining of an AISI 4340 Steel," *Trans. ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 104, pp. 121~131.
- (2) Yang Min-Tang, 1988, "Optimization of cutting tool for high speed machining," *Transaction of KSME*, Vol. 12, No. 6, pp. 1290~1295.
- (3) Cheng, C. J., 1962, "Transient Temperature Distribution During Friction Welding of Two Similar Materials in Tubular Form," *Welding Research Supplement*, Vol. 41, No. 12, pp. 542s~550s.
- (4) Cheng, C. J., 1963, "Transient Temperature Distribution During Friction Welding of Two Similar Materials in Tubular Form," *Welding Research Supplement*, Vol. 42, No. 5, pp. 233s~240s.
- (5) Park Keun-Hyung, Min Taeg-Ki, Yoon Young-Joo, and Park Chang-Soo, 2006, "A Study on the Joint Properties according to the Friction Welding Area Change of Carbon Steel(SM45C)," *Transaction of KSME*, Vol. 15, No. 1, pp. 102~107.
- (6) Min Taeg-Ki, 1992, "Properties of Friction Welding Between the Back Metal of Bushing Part and Flange Part in A-Sn Alloy Metal Bearing," Dong-A University, Busan, Korea, pp. 4~5.
- (7) Vill, V. I., 1957, "Friction Welding of Metals," *American Welding Society*, Vol. 3, No. 9, pp. 8~23.