

SM45C 중실축의 마찰용접 기계적 특성에 관한 연구

구건섭*

(Manuscript received: Oct, 3, 2012 / Revised: Oct, 25, 2012 / Accepted: Oct, 26, 2012)

A Study on the Mechanical Properties of the Friction Welding with Solid Shaft of SM45C

Keon Seop Koo*

Abstract

In the presented study, SM45C carbon steel parts were joined by friction welding. The welding process was carried out under optimized conditions using statistical approach. The study of SM45C is conducted with various combinations of process parameters. Parameter optimization, microstructure and mechanical property correlation are the major contribution of the study. The welded joints were produced by varying spindle revolution speed, friction pressure, upset pressure and burn-off length. Tension tests were applied to welded parts to obtain the strength of the joints. Fracture properties were additionally obtained experimentally under fluctuated tensile loads. Microstructures using microphotographs were examined in the weld interface and weld region and heat affected zone and base metal and flash zone of welded parts. Finally, Hardness variations in welding zone and base metal were also obtained. Through these tests, the optimum conditions of parameters for $\varnothing 20$ SM45C in friction welding were obtained when the friction spindle revolution was 1,950 rpm, the friction pressures was 30 MPa, upset pressures was 50 MPa.

Key Words : Friction welding(마찰용접), SM45C(기계구조용 탄소강), Friction pressure(마찰압력), Upset pressure(단조압력), Burn-off length(업셋 길이), Microstructure(현미경조직), Weld interface(용접부), Heat Affected Zone(용접열영향부), Base metal(모재), Hardness(경도)

1. 서론

마찰용접(Friction welding, FW)은 가열식 고상용접으로 용접재에 회전운동과 함께 가압 시 접촉면에 발생하는 마찰열을 이용하여 접합하는 용접방법으로 접촉면이 용융되기 전 일정 온도에 도달하였을 때 압력을 가하여 소성변형을 일으키면서 접합된다⁽¹⁾.

따라서 접합 후의 강도가 우수하며 용접신뢰성이 좋다. 또한 두 소재간의 소성유동으로 인하여 금속 결정의 조대화나 금속간 화합물이 생기기 어려울 뿐만 아니라 모재부에 미치는 열영향이 적어 용접변형이 적고 용접효율이 높다⁽²⁾. 최근 기계부품의 재료와 에너지 절감을 위해 마찰용접에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽³⁻⁵⁾.

용접시 유해광선, 흡(fume), 가스 등의 인체에 유해물질이

* 한국폴리텍대학 홍성캠퍼스 산업설비자동화과
주소: 세종특별자치시 누리로 27번지 한솔동 첫마을 아파트 613동 301호

✉ Corresponding Author E-mail: kskoo@kopo.ac.kr

발생되지 않아 친환경적이며, 용접시 추가되는 용가재, 용제(flux) 등의 추가재료가 소요되지 않아 용접비용이 절감되며, 용접 전 준비사항인 개선흘 가공 등이 필요치 않고 용접시간이 짧고 용접공정이 절약된다. 특히 아크(Arc) 용접으로 효율적으로 접합하기 어려운 기계부품 축(shaft)류의 용접에 대단히 우수한 용접특성이 있다. 접합 가능한 재료로는 동종재료는 물론 접합이 곤란한 이종금속, 비철금속까지 접합이 가능한 특성을 가지고 있으며, 이종재료간의 접합에서 용접작업의 간소화 및 완성품의 경량화를 위해 SUS와 Al의 접합, 열전도율의 차이가 필요한 부위를 위해 SUS와 Cu의 접합, 전기적특성 및 기계적 특성이 필요한 부위를 위해 Cu와 Fe, Al과 Cu, Cu와 CuW의 접합, 자성과 비자성이 필요한 부위를 위해 SUS304와 S45C의 접합, 내식성 및 기계적특성이 필요한 부위를 위해 SUS304와 SCM435의 접합, 고가금속의 원가절감과 재료절감을 위하여 내열성과 내식성을 위해 Stellite와 SKH, Ag와 Cu의 접합에 이용되고 있다. 실제 적용분야의 예로 자동차 부품의 엔진벨브, 캠샤프트, 토크컨버터, 터보임펠러샤프트, 프로펠러샤프트, 사이드기어, 리어엑슬하우징, 스티어링 랙샤프트등의 접합에 사용되는데 이들은 모두 충격력, 진동, 압축력과 인장력등에 견디는 우수한 기계적 성질이 요구된다⁽⁶⁾. 본 연구에서는 기계적성

질이 우수하고 값이 저렴한 기계구조용탄소강(SM45C)를 사용하여 용접부의 접합특성 및 기계적특성을 고찰하기위해 Fig. 1, 2에 마찰용접공정 변수 및 용접공정이 나타있는 바와 같이 마찰용접기의 회전축의 회전수, 마찰압력, 단조압력(Up-set 압력), Up-set 량의 용접조건을 변화시켜⁽⁷⁾ 용접부의 인장강도시험, 경도시험 및 현미경조직분석, 파면 육안검사 등을 시행하여 최적 용접조건을 고찰하여 보았다.

2. 실험

2.1 실험재료 및 시험편

2.1.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 기계구조용 탄소강인 SM45C를 사용하였으며, 화학조성과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다. 마찰용접의 시험편 형상은 Fig. 3과 같고 중실축 직경은 20mm이다.

2.1.2 실험장비

본 실험에 사용된 마찰용접기는 15DF(유진테크 주)(Nominal forge pressure 150KN)이고, 인장강도 시험은 한국화학융합시험연구원(KTR) (Test Standard : KSB 0802: 2003-Etc), 경도시험은 KTR (Test Standard : KSB 0811: 2003, 하중: 1Kgf), 금속조직 시험은 KTR(ASTM E407-07, 광학현미경:Olympus BX51M), 부식방법은 Nital1~5mL HNO₃+100mL ethanol)을 사용하였다.

2.1.3 실험조건

일반적으로 기계부품 축류의 마찰용접 시 접합방법은 피 용

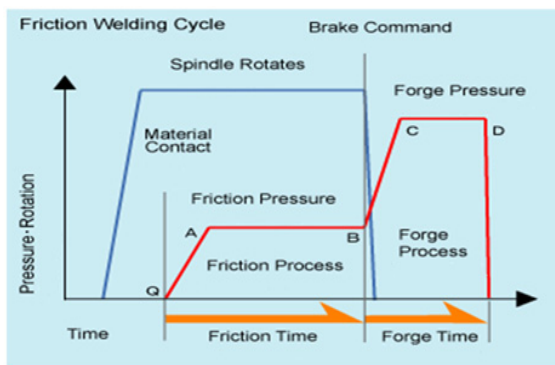


Fig. 1 process parameters of the friction welding

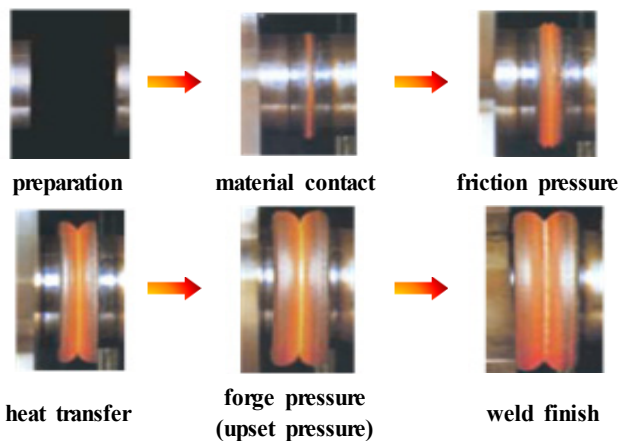


Fig. 2 Process of friction welding

Table 1 Chemical composition(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
0.45	0.19	0.70	0.016	0.021	0.008	Bal

Table 2 Mechanical properties

Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Elongation (%)
645	1780	17

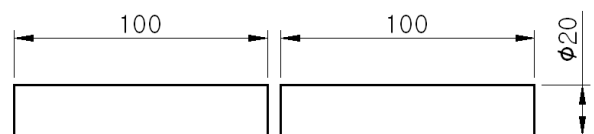


Fig. 3 Friction welding workpiece

Table 3 Friction welding conditions

Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P ₁ , MPa)	Upset pressure (P ₂ , MPa)	Net of upset pressure (P ₃ , MPa)	Up-set length (mm)
2,200	27	50	48	7.6
2,150			47	7.6
2,100			46	7.4
2,050			45	7.4
2,000			44	7.4
1,950			43	7.5
1,900			42	7.4
1,850			41	7.1
1,800			43	7.4
1,750			41	7.3
1,700			41	7.3

Table 4 Friction welding conditions

Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P ₁ , MPa)	Net of Friction pressure (P ₂ , MPa)	Upset pressure (P ₃ , MPa)	Net of Upset pressure (P ₄ , MPa)
1,950	50	49	50	48
	45	43		47
	40	36		46
	35	31		45
	30	26		44
	25	21		43
	20	18		46
	15	13		46

접단면 형상에 따라 용접이음 효율에 차이가 있으나 본 실험에서는 용접조건의 주요 변수인 마찰용접기 주축의 회전수, 마찰압력, 단조압력 변화에 따른 용접부의 기계적특성을 고찰하고자 하여 시험모재 2개를 Fig. 3과 같이 용접면을 축에 직각단면으로 가공하였다. Table 3과 같은 용접조건으로 마찰용접하여 1차 인장강도시험 결과로 인장강도에 크게 영향을 주는 적정의 주축 회전수(1,950rpm)을 구하여 표준조건으로 하고, 마찰용접부의 최적 기계적특성을 얻기위해 Table 4와 같이 주축 회전수를 1,950rpm으로 고정하고, 마찰압력을 변화시켜 2차 인장강도 시험을 실시하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서 Table 3, 4와 같은 용접조건으로 용접한 후 Fig. 7과 같이 인장시험편을 제작하여 1차, 2차 인장시험을 실시하였으며, 조직검사는 Fig. 4와 같이 용접계면부(a), 열영향부(b),

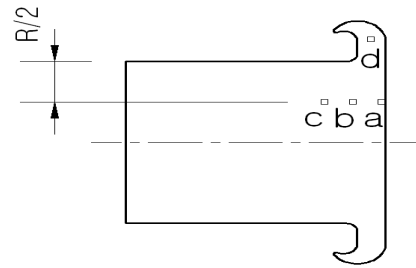


Fig. 4 Range of Macrophotograph inspection, as-welded

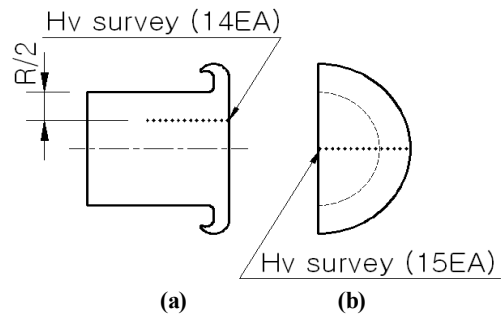


Fig. 5 Range of hardness survey, as-welded

모재부(c), Flash부(d)를 광학현미경 조직 검사하였으며, 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험이고, 측정은 하중 1kgf으로 Fig. 5(a)과 같이 용접계면 중심에서 1/2R 지점을 수평(축)방향으로 1mm의 등 간격으로 용접부를 14개소를 경도측정 하였고 Fig. 5(b)와 같이 용접계면 중심에서 수직(원주)방향으로 1mm의 등 간격으로 15개소를 경도측정 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험

용접부의 1차 인장강도를 위한 용접시험편 11개가 Fig. 6(a)에 나타나 있고, 인장시험편은 Fig. 7과 같이 용접계면 외경부 Flash를 외경가공 후 홈각도 45°, 홈깊이 1mm로 가공 하여 인장시험한 결과 인장강도 시험값은 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서와 같이 회전수 변화에 따른 인장강도값은 회전수 2,100 rpm에서 최대 인장강도 1,008MPa이 되었다. 이는 모재 SM45C 인장강도(645MPa)에 비해 156%에 해당한다. 최저인장강도는 회전수 2,200rpm에서 946MPa로서 용접모재 SM45C (645MPa)에 비해 146%에 해당한다. 용접부의 2차 인장강도시험은 위해서는 1차 인장강도시험에서 구한 회전수 1,950rpm으로 고정하고 마찰압력을 15MPa에서 50MPa로 변화를 주고 업셋압력 50MPa로 고정하고 마찰용접한 시험편 8개가 Fig. 6(b)에 나타나 있고, 인장강도 측정값은 Fig. 9에 나타나 있는데 마찰압력 30MPa에서 최대인장강도 1,014MPa로 나타나는데 이는 모재인장강도의 157%이고 최저인장강도는 마찰압



(a) specimens(11 EA) (b) specimens(8 EA)

Fig. 6 Friction welded specimens of SM45C

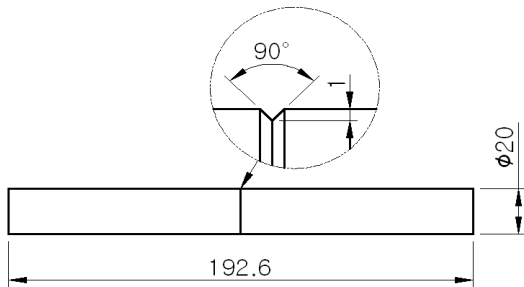


Fig. 7 Tensile test specimen of the friction welding



Fig. 8 Relationship between tensile strength vs. spindle revolutions

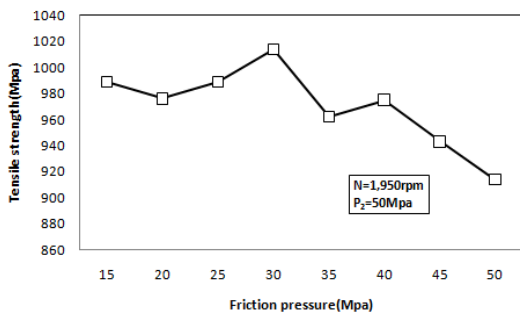


Fig. 9 Relationship between tensile strength vs. friction pressures

력 50MPa에서 914MPa로 나타나 있다. 이 그래프에서 마찰압력 증가에 따라 인장강도는 감소하고 있는 현상이 관찰되는데 이는 적절한 마찰시간과 마찰압력으로 적정 마찰열이 발생되어 용접부(Weld interface)금속이 충분히 연화가 이루어져 적정 단조(forge)가 되기 전에 과도한 마찰압력은 이 조건에 부작용 현상으로 판단된다. Fig. 8과 Fig. 9에서 인장강도가 급격히

Mpa rpm	50Mpa	45Mpa
1,950rpm		
	40Mpa	35Mpa
	30Mpa	25Mpa
	20Mpa	15Mpa

Fig. 10 Fractures of friction welded joint in tensile test

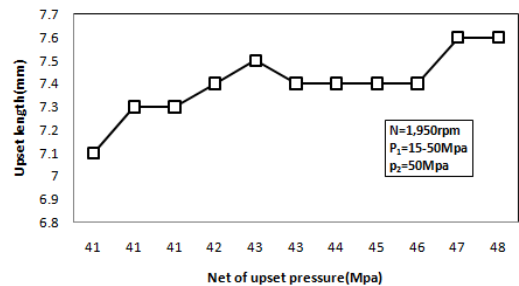


Fig. 11 Upset length profile vs. upset pressures

감소하는 요인은 주축의 회전수가 너무 높거나 마찰압이 너무 높으면 용융부 금속이 원심력에 의하여 용접계면 원주방향으로 배출되는 Flash양의 증가로 접합면 온도가 낮아져 적정 용접온도 조건이 되지 않아 인장강도가 급격히 감소된 것으로 판단된다. Fig. 10은 2차 인장시험조건일 때 인장시험 결과 파단면을 마찰압력에 따라 배열하였다. 파단면 조직이 모두 치밀한 조직을 보이고 있으며 마찰압력 30MPa일 때 파단면조직이 매우 치밀한 양상을 보이고 있는데 이는 회전수와 마찰압력이 적당하여 적정 접합온도가 형성되어 용접계면에서 Flash의 적정 배출로 인한 결과로 판단 된다.

3.2 업셋길이 변화

일반적으로 업셋길이 변화는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 업셋압력 실제값에 대한 업셋길이 변화를 나타낸 그래프로써 업

셋압력의 증가에 따라 업셋길이는 증가되고 있다.

업셋길이가 증가요인은 스핀들 회전수의 증가, 마찰압력의 증가, 업셋압력의 증가, 마찰시간의 증가에 따라 마찰열의 증가로 용융금속이 마찰압력과 원심력에 의하여 원주방향으로 유동되어 Flash화 되어 업셋길이는 증가된다. 적절한 업셋길이는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 마찰압력 30MPa에서 최대인장강도 1,014MPa이 되었는데 마찰압력 30MPa은 Table 4와 같이 업셋압력 실제값 44MPa에 해당하므로 이때의 압력이 최적의 상태로 판단되고 최적의 업셋길이는 7.4mm로 판단된다.

3.3 경도시험

마찰용접조건(회전수1,950rpm,마찰압력 30MPa, 업셋압력 50MPa)시 Fig. 5(a)와 같이 마찰용접부를 축방향으로 1/2 절단하여 경도측정 시험편을 제작하여 원중심에서 R/2지점을 용접계면에서 0.1mm~13.1mm까지 축방향으로 1mm 등 간격으로 총 14개소의 빅커스 경도값을 측정한 그래프가 Fig. 12와 같이 나타나 있는데, 최고경도값은 0.1mm지점에서 398Hv, 최저경도값은 12.1mm지점에서 227Hv를 나타내고 있는 바와 같이 용접계면에서부터 완만하게 낮아지고 있다.

최고경도 값을 나타내고 있는 것은 마찰용접 시 용접계면에서 고온의 마찰열이 생성된 후 공냉시 Normalizing 효과에 의하여 결정립의 미세화로 경도가 증가되었으며, 이중 최저경도값은12.1mm 지점에서 227Hv를 나타내고 있는데 용접계면에

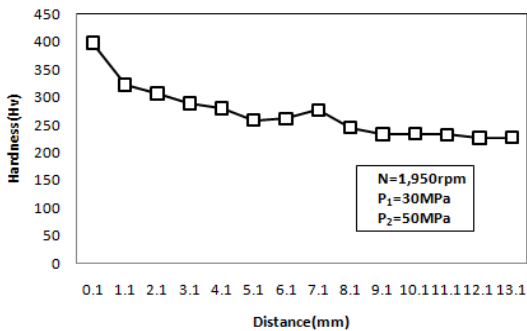


Fig. 12 Hardness profile to distance of axis direction

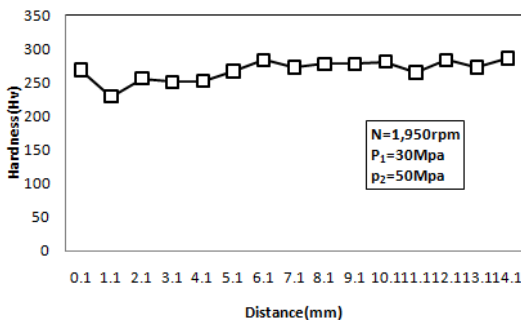


Fig. 13 Hardness profile to distance of circumference direction

서 12.1 mm 지점은 마찰용접 시 마찰열이 크게 작용하지 않은 모재부에 해당하므로 경도값 227Hv는 모재부의 경도값으로 판단된다. 또한 경도값을 측정한 Fig. 13은 마찰용접조건 (회전수1,950rpm, 마찰압력 30MPa, 업셋압력 50MPa)시 Fig. 5(b)와 같이 용접계면 중심에서 원주방향 Flash부 끝단까지 0.1mm~14.1mm까지 1mm 등 간격으로 총 15개소의 빅커스 경도값을 측정한 그래프로 최고경도값은 14.1mm 지점에서 286Hv, 최저경도값은 1.1mm지점에서 229 Hv를 나타내고 있는 바와 같이 용접계면 중심으로 부터 외경 끝단의 Flash부로 경도 값이 완만하게 상승하고 있다. 최고경도 값을 나타내고 있는 지점은 외경 끝단과 Flash부로서 최대 원주속도로 마찰열의 증가로 고온의 마찰열과 업셋압력에 의해 용융금속이 Flash화한 후 공냉시 Air quenching 효과에 의하여 martensite 생성으로 경도가 증가되었으며, 이중 최저경도 값은 1.1mm 지점에서 229 Hv를 나타내고 있는데 용접계면 중심부로 원주 속도가 0 rpm에 가까와 마찰열이 적게 발생되어 열처리 효과가 적은 결과로 판단된다.

3.4 용접부의 미세조직

Fig. 14부터 Fig. 21까지는 최적의 마찰용접조건(회전수1,950 rpm, 마찰압력 30MPa, 업셋압력 50MPa)으로 마찰용접한 시험편의 용접계면부, 열영향부, 모재부, Flash부를 광학현미경으로 100배, 500배로 촬영한 현미경 금속조직 사진이다. Fig. 14, Fig. 15는 용접계면부 현미경 조직사진으로 마찰용접시 적정한 회전수, 마찰압력, 업셋압력에 의해 용접금속의 용융과 소성유동으로 플래시의 외부로의 배출이 유용한 구조로 이상적인 접합면 사진으로 금속결정립은 고온, 고압으로 매우 미세화된 pearlite 조직내에 잔류 ferrite 조직이 매우 치밀하고 선명하게 보이고 있다. Fig. 16, Fig. 17은 열영향부(Heat Affected Zone)조직으로 용접조직과 모재부 조직과의 경계가 ARC용접의 용융용접 조직과 같이 열영향부 경계가 명확하지 않으며 용접조직과 모재부조직의 혼합조직으로 입자가 모재조직보다 미세조직을 보이고 있고, 용접계면부로 부터 고온고압의 영향으로 소성유동 흔적이 있는 미세금속조직이 관찰된다. 이러한 조직이 용접계면 으로부터 1.3mm~1.5mm에 걸쳐 분포하고 있고 그 이후로는 Fig. 18, Fig. 19와 같은 모재부 조직이 나타나고 있어 마찰용접조직(단조조직)은 용접계면으로부터 1.3mm~1.5mm까지로 판단되고 열영향을 적게 받은 모재부 금속조직으로 인발 시 소성유동으로 형성된 특유의 섬유질과 흡사한 결정배열 모양인 단류선(metal flow)⁽⁸⁾이 뚜렷이 나타나 있으며 ferrite가 커다랗게 형성되어 있는 것이 보인다. Fig. 20과 Fig. 21은 Flash부 조직사진으로 고온의 단조금속이 공기중에 급냉되어 Air quenching 효과로 유사 bainite 조직이 생성되어⁽⁹⁾ 매우 경화된 조직을 나타내고 있고 빅커스경도 273Hv~

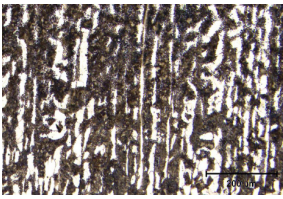


Fig. 14 Interface region(fig4 a) (X100)

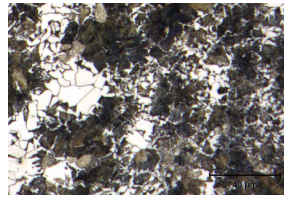


Fig. 15 Interface region(fig4 a) (X500)

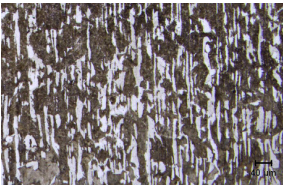


Fig. 16 HAZ region(fig4 b)(X100)

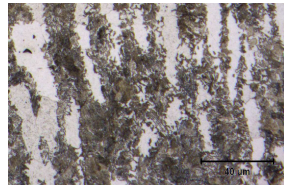


Fig. 17 HAZ region(fig4 b)(X500)

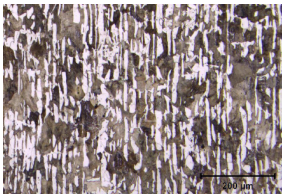


Fig. 18 Base metal(fig4 c)(X100)

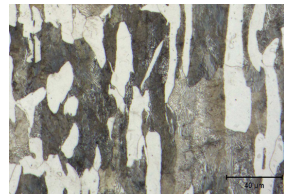


Fig. 19 Base metal(fig4 c)(X500)

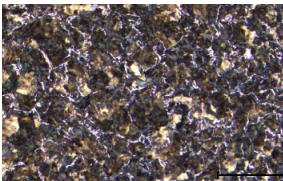


Fig. 20 Flash region(fig4 d)(X100)

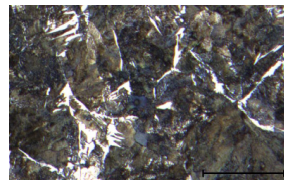


Fig. 21 Flash region(fig4 d)(X500)

286Hv를 나타내므로서 용접계면상에서는 최고경도치를 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SM45C 강 중실축의 마찰용접에서 용접조건 회전수(rpm), 마찰압력(MPa), 업셋압력(MPa)의 용접조건 변화를 주고 마찰용접하여 용접부의 인장강도 시험, 파면 육안검사, 경도시험 및 현미경 조직검사 등을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최적의 마찰용접조건은 주축의 회전수1,950rpm, 마찰압력 30MPa, 업셋압력 50MPa이었고, 이때의 최대 인장강도가 1,014MPa로 중공축 모재 인장강도에 비해 약 157%이었다.
- (2) 용접계면에서 축방향의 경도분포는 용접계면에서 0.1mm 지점에서 398Hv, 모재부 경도 227Hv이었다. 용접계면 중심에서 원주방향의 경도분포는 최고경도값은 14.1mm 지

점에 286Hv, 최저경도값은 1.1mm지점에서 229Hv를 나타내었다.

- (3) 용접부의 현미경 조직검사 결과 용접계면은 고온 고압과 냉각에 의해 조직이 미세화 되어 경도 상승에 영향을 주었으며, HAZ부 조직은 ARC용접 조직과 같이 열영향부 경계가 명확히 나타나 있지 않았고 마찰용접조직과 모재부 조직과의 혼합된 조직으로 나타나 있으며, 플래시부는 공기중 급냉되어 273Hv~286Hv를 나타내었다.

References

- (1) Manideep, D., and Balachandar, K., 2012, "Welding Parameters-metallurgical Properties Correlation of Friction Welding of Austenitic Stainless Steel and Ferritic Stainless Steel," *Journal of Applied Sciences*, Vol. 12, No. 10, pp. 1013~1019.
- (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, viewed 17 September 2012, "What Industrial Needs to Know about Friction Welding", *Manufacturing Technology, Inc.*, <<http://www.mtiwelding.com/files>>
- (5) Ozdemir, N., Sarsirlmaz, F., and Hascalik, A., 2007, "Effect of Rotational Speed on Interface Properties of Frictional Welded AISI-304L to 4340 Steel", *Material & Design*, Vol. 28, No. 1, pp. 301~307.
- (6) Jeong, J. H., 2001, *A study on the Welding Properties of SM25C Carbon Steel Rod and SMn420 Alloy Steel Pipe*, A Thesis for a Master, Chung-Nam Univ., Republic of Korea.
- (7) 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.
- (8) Altan, T., Oh, S., and Gegel, H., 1983, *Metal Forming : Fundamentals and Applications*, American Society for Metals, USA. pp. 353.
- (9) Schumann, H., 1996, *Metallographie*, Hakmun Publishing Co., Korea, pp. 434.