

SKH51/SM45C의 마찰용접특성에 관한 연구

이세경* · 민병훈** · 최수현** · 심도기** · 민택기***

*충남대학교 대학원

**충남대학교 교육대학원

***충남대학교 기계공학과

A Study on Mechanical Properties and Friction Weldability of SKH51 and SM45C

Se-Gyoung Lee*, Byung-Hoon Min*, Su-Hyun Choi**, Do-Ki Shim** and Taeg-Ki Min***

*Graduate School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**Graduate School of Education Chungnam National University Daejeon 305-764, Korea

***Mechanical Engineering at Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract

The present study examined the mechanical properties of the friction welding of shaft made of SKH51 and SM45C, of which the diameter is 12mm. Friction welding was done at welding conditions of 2,000rpm, friction pressure of 104MPa, upset pressure of 134MPa, friction time of 0.5sec to 2.5sec by increasing 0.5sec, upset time of 2 seconds. Under these conditions, a tensile test, a bending test, a shear test, a hardness test and a microstructure of weld interface were studied. When the friction time was 1.0 second under the conditions, the maximum tensile strength of the friction weld observed to be 963MPa, which is 89% the tensile strength of SKH51 base metal and 101% of the tensile strength of SM45C base metal. When the friction time was 1.0 seconds under the conditions, the maximum bending strength of the friction weld happened to be 1,647MPa, which is 78% the bending strength of SKH51 base metal (2,113MPa) and 87% of the bending strength of SM45C base metal (1,889MPa). When the friction time was 1.0 seconds under conditions, the maximum shear strength of the friction weld was observed to be 755MPa, which is 92% the shear strength of SKH51 base metal and 122% of the shear strength of SM45C base metal. According to the hardness test, the hardness distribution of the weld interface varied from Hv282 to Hv327. HAZ was formed from the weld interface to 1.2mm of SKH51 and 1.6mm of SM45C. Upon examination it was found that the microstructure became finer along with increase of friction revolution radius.

*Corresponding author : prince54@empal.com

(Received October 19, 2007)

Key Words : Friction welding, Friction time, Friction pressure, Tensile strength, SKH51, SM45C

1. 서 론

마찰용접은 다른 용접법에 비해 기술적인 면과 경제적인 면에서 많은 이점을 지니고 있다. 마찰용접은 재료를 용해시키는 일 없이 고상 상태에서 압접(壓接)시키는 고상 용접법으로서 용융접합에서는 접합 불가능한

고용용접 금속 및 이종금속 등의 용접에 이용되고 있다¹⁾. 마찰 용접법의 특징은 국부적인 마찰열에 의해 접합부에서만 열이 발생하기 때문에 타 용접에 비해 용접온도가 낮아 금속간 화합물, 고온균열, 열영향부(HAZ)²⁾가 작게 나타난다. 아울러, 용접변수를 적절히 조절함으로써 각 재료의 장점을 살린 매우 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있다. 이러한 이유로 기계구조물의 안전성, 강

도 및 경제적인 측면에서 많이 이용되고 있다³⁻⁶⁾.

SKH51(고속도강)은 기계적성질은 뛰어나지만 값이 비싼 특징이 있고, SM45C(기계 구조용 탄소강)은 기계적 성질은 떨어지지만 값이 저렴한 특징이 있어 상호 보완관계를 이루고 있어 용접의 필요성이 대두되고 있지만, 일반용접법으로는 용접이 곤란하여 이 두 금속의 접합에 대한 연구는 매우 저조한 편이다. 본 연구에서는 이 두 금속의 마찰용접 특성을 마찰시간을 변수로 하여 총 업셋량의 변화, 인장강도, 굽힘강도, 전단강도, 경도 시험, 현미경 조직분석 등의 실험을 실시하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 SKH51과 SM45C으로 이들의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타냈다. 마찰용접하기 전에 모든 재료를 직경 12mm, 길이 100mm로 가공하고 아세톤으로 세척하였다.

2.2 실험방법

본 실험은 브레이크 타입(NSF-30H, revolution: 2,000rpm, maximum axial force: 98,000N)의 마찰용접기를 사용하였으며, 두 금속에 대한 마찰조건은 문헌조사 및 예비실험을 통하여 설정하였다. 회전수는 척에 고

정된 용접시험편이 스핀(spin)을 일으키지 않는 2,000rpm, 마찰압력은 충분한 발열을 일으킬 수 있는 100MPa, 업셋압력은 용접 시험편에 척킹(chucking)력에 의한 변형이 나타나지 않는 150MPa로 하였다. 위의 조건에서 용접부의 강도를 향상시킬 수 있는 시간규제법을 활용하여 마찰시간을 변수로 하였다. Table3과 같은 용접조건으로 본 실험을 실시하였으며, 인장시험편은 마찰용접하여 Fig. 1과 같이 가공하였다. 마찰용접부의 굽힘강도를 시험하기 위하여 Fig. 2와 같이 지그에 편치의 하중작용점이 용접면에 위치하도록 시험편을 장착하고 크로스헤드(cross head)의 이송속도를 1mm/min로 설정하여 굽힘시험 하였다. 굽힘강도는 다음 식(1)과 같다.

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

여기서, σ_b : 굽힘강도, M : 굽힘모멘트
 Z : 단면계수, P_{max} : 최대하중
 ℓ : 지점간 거리, d : 시험편 직경

조직검사를 위해 시험편을 나이텔(nital) 3%로 만든 에칭액을 이용하였으며, 경도 시험은 용접시험편의 측면면을 절단하여 연마(polishing)한 후, 마이크로비커스 경도시험기의 클램프에 고정시킨 후 하중을 300g의 하중으로 설정한 후 용접면 방향과 센터와 R/2지점에서 용접면을 횡단하는 방향으로 경도를 측정하였다.

Table 1 Chemical compositions of materials(Wt. %)

Materials Elements	SKH51	SM45C
C	0.88	0.43
Si	0.22	0.19
Mn	0.34	0.8
P	0.024	0.03
S	0.013	0.02
Cr	3.95	-
Mo	4.71	-
W	5.94	-
V	1.7	-
Fe	Bal.	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Mechanical properties			
	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Hardness (Hv)
SKH55	1,087	2,113	818	301
SM45C	950	1,889	616	288

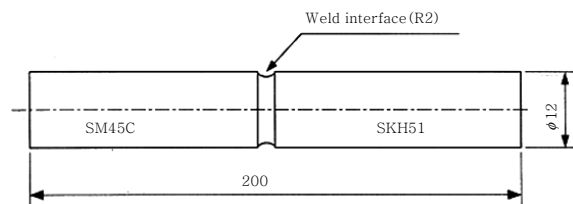


Fig. 1 Specimen of tensile test

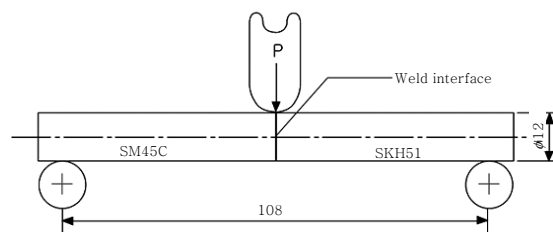


Fig. 2 3-Point Bending test specimen

Table 3 Friction welding conditions

Spindle revolution (N, rpm)	Friction pressure (P1, MPa)	Upset pressure (P2, MPa)	Friction time (t1, sec)	Upset time (t2, sec)
2,000	104	134	0.5	2.0
			1.0	
			1.5	
			2.0	
			2.5	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험 및 업셋길이 변화

Fig. 3은 회전수(N) 2,000rpm, 마찰압력(P₁) 104 MPa, (P₂)업셋압력 134MPa, 업셋시간(t₂) 2.0sec에서의 마찰시간(t₁)을 0.5sec에서 2.5sec까지 0.5sec 간격으로 변화시켰을 때 마찰시간과 인장강도와와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 인장강도는 마찰시간이 증가함에 따라서 감소하다 증가하는 경향을 나타내고 있다. 최고 인장강도는 마찰시간이 1sec일 때이며 이때의 인장강도는 963MPa이다. 이는 SKH51의 모재에 비해 약 89%에 해당하고, SM45C의 모재에 비해 101%에 해당하는 양호한 결과다. 최저 인장강도는 마찰시간 2.5sec일 때 나타났으며, 이때의 인장강도는 833MPa으로 SKH51 모재 인장강도의 약 77%, SM45C 모재 인장강도에 비해 88%에 해당하였다. 이와 같이 마찰시간이 증가하였음에도 불구하고 인장강도가 저하된 것은 소성 변형된 부분이 플래시로 과다 배출되었기 때문으로 사료된다. 업셋길이는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 마찰시간이 증가함에 따라 비례적으로 증가하였으며, 이러한 현상은 다른 금속의 마찰용접에서 일반적으로 관찰되는 현상⁸⁾과 유사하다.

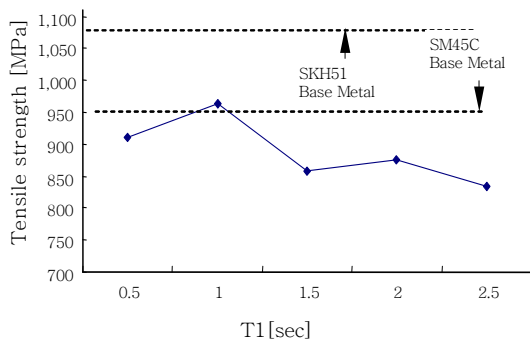


Fig. 3 Relationship between friction times and tensile strength

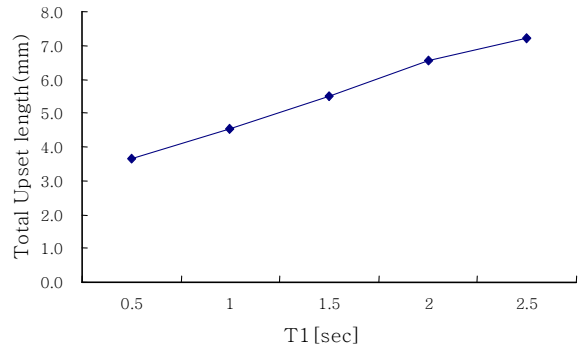


Fig. 4 Relationship between total upset length and friction times

3.2 굽힘시험

일반적으로 마찰용접 접합부에서는 재료의 섬유조직이 업셋과정으로 소성화된 영역의 플래시로 배출하게 되는데 이 때 용접면에 대하여 평행하게 재배열된다. 이러한 조직의 재배열은 축에 대한 수직방향의 부하시 취약한 성질을 띠는 것으로 여겨지고 있다. 이러한 수직 방향의 기계적 성질을 평가하기 위하여 3점지지 굽힘시험법을 이용하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서 나타나듯이 마찰시간이 1sec일 때 굽힘강도는 1,647MPa으로 SKH51의 모재굽힘강도(2,113 MPa)에 비하여 78%, SM45C의 모재강도(1,889 MPa)에 비하여 87%의 강도를 나타냈다. 그렇지만, 마찰시간이 증가함에 따라 굽힘강도는 감소하기 시작하여 2.5sec에서 SKH51의 모재굽힘강도의 64%, SM45C의 모재굽힘강도의 70%까지 감소하였다. 이러한 경향은 앞의 인장시험 결과와 유사하다.

3.3 전단시험

Fig. 6는 인장, 굽힘시험과 동일한 조건에서 마찰 용접한 시편을 Fig. 1 와 같이 가공하여 전단 시험 결과를

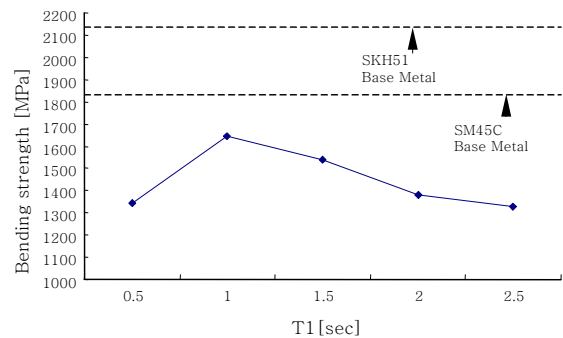


Fig. 5 Relationships between friction times and bending strength

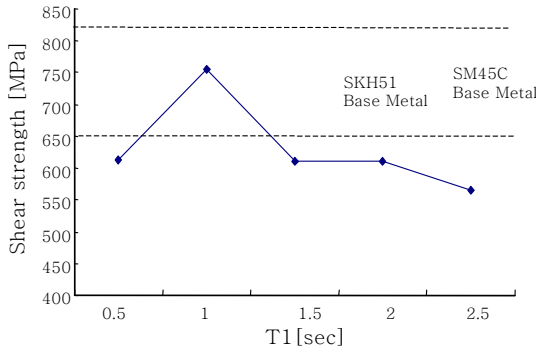


Fig. 6 Relationships between friction times and shear strength

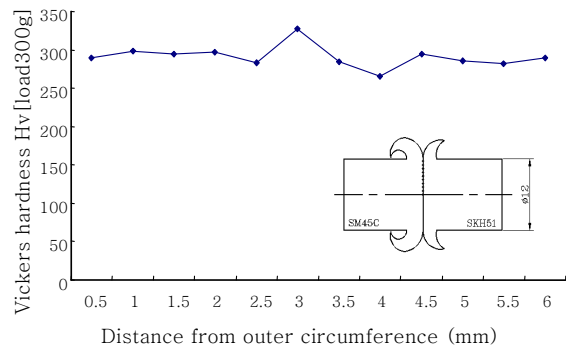


Fig. 8 Hardness distributions of weld interface

나타낸 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 마찰시간 1sec에서 최고의 전단강도는 755MPa로 SKH51 모재 대비 92%가 나타났고, SM45C에 비해 122%의 양호한 결과가 나타났다. 최저 강도는 마찰시간이 가장 긴 2.5sec대에 나타났으며, 그 값은 564MPa으로 SKH51의 모재전단강도의 69%에 해당하고, SM45C의 모재전단강도의 92%에 해당한다. 즉, 마찰시간이 0.5sec에서 1sec 까지 증가함에 따라 전단강도가 증가하였으나, 1.5sec 이후에는 소성변형된 부분이 플래시로 과다 배출되어 2.5sec까지 전단강도가 하락하였다. 이와 같은 마찰시간에 따른 강도 변화는 인장강도, 굽힘강도와 유사한 경향을 나타냈는데, 이는 마찰열의 플래시로의 배출되는 정도와 그에 따른 가압력과 마찰시간 등에 따른 압접효과가 마찰용접부의 강도에 중요한 영향을 미치는 것을 나타낸다.

3.4 경도시험

Fig. 7과 8은 인장강도, 전단강도, 굽힘강도가 가장 우수하게 나타난 조건, 회전수 2,000rpm, 마찰압력 104MPa, 엽셋압력 134MPa, 마찰 시간 1sec, 엽셋시간 2sec에서 용접한 시편의 경도 그래프이다. Fig. 7은 R/2와 센터에서 용접계면에서 횡단하여 SKH51에 6mm,

SM45C에 6mm까지 0.4mm 간격으로 측정된 것이고, Fig. 8은 용접계면을 따라 0.5mm 간격으로 측정된 것이다. 먼저 Fig 8에서 용접계면의 경도 분포를 보면 Hv282 에서 Hv327까지 형성 되었고, 가장 높은 곳은 바로 R/2 지점이 가장 높은 곳으로 나타났다. 특히 모재경도 SM45C가 Hv288, SKH51이 Hv301임을 볼 때 용접계면의 경도는 그다지 높이 않은 값을 형성하고 있다. 이러한 현상은 일반적으로 탄소강의 마찰용접에서의 전형적인 현상이라 사료된다. Fig. 7에서 보면 0.4mm부터 경도의 급격한 저하가 나타났는데, 이것은 용접계면에서 마찰용접 시 국부가열과 급랭 및 압접 압력으로 인한 조직의 조밀성으로 연화 되어 경도가 급감 했으리라 사료된다. HAZ는 SM45C에서는 1.6mm, SKH51에서는 1.2mm까지 관찰되었다. 이러한 분포의 원인은 회전축에 고정된 SM45C에서 원심력으로 인한 급랭 현상이 발생하였기 때문이라 사료되며 SKH51종은 고정축에서 마찰 용접이 되었기 때문에 마찰열의 발산이 극히 적어서 서서히 냉각 되었으리라 생각된다. 또한 경도값이 R/2 경도 분포보다 센터의 경도 분포값이 떨어지는 현상은 용접과정에서 발생한 열 영향이 R/2 경도 분포 보다는 센터의 경도분포에서의 회전 반경이 적기 때문에 마찰의 효과가 상대적으로 적어 아래와 같은 경도 분포 차이를 나타내고 있다.

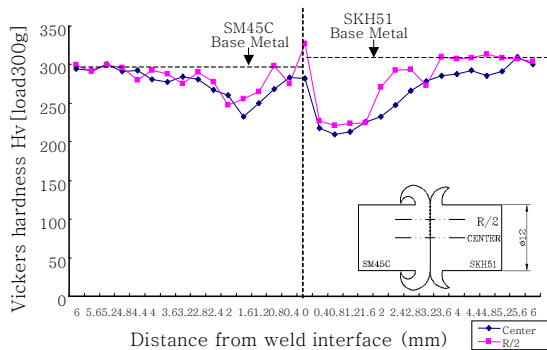
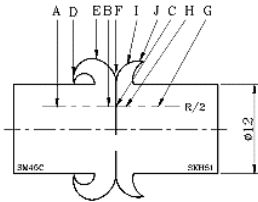


Fig. 7 Hardness distributions of friction weld

3.5 접합부의 현미경 조직

현미경 조직은 회전수 2,000rpm, 마찰압력 104MPa, 엽셋압력 134MPa, 마찰 시간 1sec, 엽셋시간 2sec에서 용접한 시편을 현미경으로 100배, 400배로 촬영하였다. Fig. 9, 10(C)에서 알 수 있는 바와 같이 SM45C보다 SKH51이 과 부식된 것을 볼 수 있다. 이는 SKH51에 Cr(3.95%) 과 Mo(4.71%)을 많이 함유 하여 내식성이 우수한 반면 SM45C에는 그러한 성분이 전혀 없기 때문이라 사료된다. Fig. 9, 10(A)에서의 SM45C강은 인발

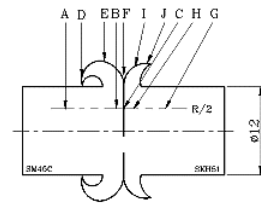
된 봉재로서 페라이트와 펄라이트가 층상 조직을 이루고 있으며 주축방향으로 방향성을 지니고 있다. 또한 SM45C 모재에서 열영향부로 갈수록 페라이트와 펄라이트 조직이 점차 미세화되는 것과 모재에서 층상구조의 형태로 나타나고 있고, Fig. 9, 11(G)에서 고속도강 모재의 뚜렷한 결정조직형상에 비해 HAZ(H)에서 결정조직은 선명하지 못하며 용접계면으로 갈수록 결정조직이 나타나지 않았다. Fig. 9(B)는 조직들은 접합부 근처



A : Base Metal Of SM45C	B : H.A.Z Of SM45C
C : Weld Interface	D : End Flash Of SM45C
E : Flash Of SM45C	F : Flash Divided Point
G : Base Metal Of SKH51	H : H.A.Z Of SKH51
I : Flash Of SKH51	J : End Flash Of SKH51

Fig. 9 Location of microstructure (X100)

에서 유동라인들을 형성 하면서 원주 방향으로 방향이 바뀌었으며 이러한 변화는 이 영역내의 온도 기울기가 비교적 급하다 것을 보여주며 이러한 소성 영역에서의 유동은 모재 금속 방향에 수직으로 형성되고 금속 간 혼합물의 재배열을 가져오며 용접계면은 평행하고 바깥 방향은 방사상으로 나타난다. 따라서, 시험편의 중심에서 바깥쪽으로 나가는 소성유동 영역은 외주부에 가까울수록 점차 넓어지고, 결국 플래시 형태로 배출된다. 소성유동 영역의 폭은 중심에서 바깥으로 가면서 비례적으로 증가하며 마찰과정에서 발생한 석출물과 불순물들이 플래시부로 배출되어 마찰용접부의 인장강도에 긍정적인 영향을 미친 것으로 사료된다. Fig. 9, 11 (D, E, F, I, J)에 이러한 현상이 나타나 있다. Fig. 9, 10(C)은 용접계면 사진이다. 용접계면형상은 거의 직선적이고, 두 재료가 혼합되어 생기는 혼합층(mixed layer)은 잘 나타나지 않았다. 또한, 두 재료의 열 영향부를 살펴보면, 마찰용접 과정에서 알 수 있는 가압력과 소성유동, 기계적 압접효과 등에 의해 미세화 되었었지만, 경도는 오히려 모재(SKH51: Hv301, SM45C: Hv288)보다 훨씬 떨어짐을 볼 수 있는데, 이것은 마찰열에 따라 HAZ가



A : Base Metal	B : H.A.Z
C : Weld Interface	D : End Flash
E : Flash	

Fig. 10 SM45C microstructure of friction welds (X400)

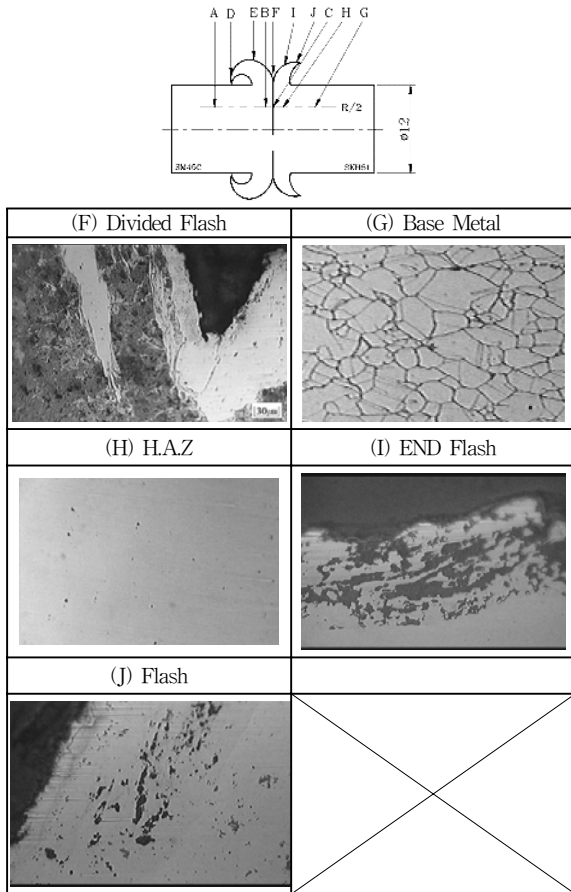


Fig. 11 SKH51 microstructure of friction welds ($\times 400$)

급랭되고 연화되었기 때문이다.

4. 결 론

본 연구는 직경 12mm인 SKH51과 SM45C를 회전수 (N) 2,000 rpm, 마찰압력(P_1) 104MPa, 압셋압력(P_2) 134MPa, 압셋시간(t_2) 2sec으로 하고, 마찰시간(t_1)을 0.5sec, 1.0sec, 1.5sec, 2.0sec, 2.5sec로 변화시켜 마찰용접을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인장강도, 굽힘강도, 전단강도 모두 마찰시간이 1sec일 때 최고값을 나타낸 후, 마찰시간이 증가함에 따라 다시 감소하는 현상이 나타났다. 이것은 마찰시간이 과도하게 증가하면 마찰열이 과다 발생하여 소성 변형된 부분이 플래시부로 과다 배출되기 때문이다.

2) 용접계면의 경도는 Hv282에서 Hv327까지 나타났고, HAZ는 SM45C에서 1.6mm, SKH51에서 1.2mm까지 분포되었다.

3) 용접부의 조직사진 관찰 결과 모재의 조직과 열영향부의 조직은 명확히 구분되었으며 용접계면의 중심부로 갈수록 조직이 미세화 되었으며 재배열되었다.

참 고 문 헌

1. Min Taeg-Ki : 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, (1992), 4-5
2. Lee Sang-Yun, Yun Byeong-Soo : Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C Transaction of KSMTE, 10-1, (2001), 65-70
3. Spindler, D. E. : What Industrial Needs to Know about Friction Welding, Welding Journal, Mar, (1994), 37-42
4. Nicholas, E. D. : Where Industry Uses Friction Welding, Welding Design and Fabrication, Aug. (1997), 74-76
5. Toms H. Hazlett : Properties of Friction Welds between and Dissimilar Metals, Welding Research Supplement, Oct. (1962), 448-450
6. Vill, V. I. : Friction Welding of Metals, svarochne Proizvodstvo, 3-9, (1957), 8-23
7. Park Keun-Hyung, Min Taeg-Ki, Yoon Young-Joo, Park Chang-Soo : A Study on the Joint Properties according to the Friction Welding Area Change of Carbon Steel(SM25C), Transaction of KSMTE, 15-1, (2006), 102-107
8. Lee Se-Gyoung, Min Taeg-Ki; A Study on the Properties in Friction Weldability of Dissimilar Aluminum Alloys A2024-T6/ A6061-T6, Transaction of KSMTE, 15-1, (2006), 63-69