

외경 36mm 강관의 관대관 마찰용접 특성과 공정 변수 최적화

Mechanical Property and Process Variables Optimization of Tube-to-Tube Friction Welding for Steel Pipe with 36 mm External Diameter

공유식* · 박영환**†

Yu-Sik Kong* and Young Whan Park**†

(접수일 : 2013년 08월 14일, 수정일 : 2014년 02월 13일, 채택확정 : 2014년 03월 04일)

Abstract: Friction welding is a very useful joining process to weld metals which have axially symmetric cross section. In this paper, for the friction welding with tube-to-tube shape, the feasibility of industry application was determined using analyzing mechanical properties of weld and optimized welding variables was suggested. In order to accomplish this object, rotating speed, friction heating pressure, and friction heating time were selected as the major process variables and the experiment was performed in three levels of each parameter. Weld characteristic was investigated in terms of weld shape and metal loss, and 7mm of metal loss was regarded as the optimal metal loss. By tensile test, tensile strength and yielding strength was measured and fracture was occurred at base metal. In order to optimize the welding condition, fitness function was defined with respect to metal loss and yielding strength and the fitness values for each welding condition could be calculated in experimental range. Consequently, we set the optimal welding condition as the point which had maximum value of fitness function. As the result of this paper the optimal welding variables could be suggested as rotating speed was 1300 rpm, friction heating pressure was 15 MPa, and friction heating time was 10 sec.

Key Words : Friction Welding, Metal Loss, Mechanical Property, Fitness Function, Process Variable Optimization

— 기 호 설 명 —

1. 서 론

fitness : 호감도 함수값
 w_1, w_2 : 호감도 함수의 가중치
 ML_N : 표준화된 재료 손실량
 YS_N : 표준화된 항복강도

마찰용접은 축대칭 형상을 갖는 단면 소재에 대하여 2개의 면을 회전형 상대운동과 접촉면의 마찰을 통한 발열을 시키고 이를 가압하여 접합하는 공정이다. 마찰용접은 접촉면이 풀고루 가열되며 업셋(upset) 공정에 의한 가압 방식으로 용접

**† 박영환(교신저자) : 부경대학교 기계공학과
E-mail : parkyw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6148
* 공유식 : 부경대학교 A+LINC사업단

**† Young-Whan Park(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.
E-mail : parkyw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6148
*Yu-Sik Kong : A+LINC of PKNU, Pukyong National University.

함으로써 용접부 단면의 품질이 좋으며, 플래시의 형성으로 기공 혹은 불순물의 용접부 내재를 방지하여 건전한 용접 품질을 갖는다. 이러한 이유로 소련의 Vill¹⁾에 의해 본격화된 이후 이에 대한 연구보고가 계속 증가하고 있다. 국내에서는 1970년대 초반부터 마찰접합의 최적조건 결정과 응용 등에 관한 연구가 Oh²⁾, Suh³⁻⁴⁾, Jeong⁵⁾ 등에 의해 보고되는 등, 동종 및 이종 재료에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그런데, 내열강재의 이종재 마찰용접은 1965년 Gelifman에 의해 선박엔진 벨브의 head부와 stem부의 마찰접합에서 시작되었고, 자동차 및 그 부품소재 또는 터빈 임펠러와 축간의 초내열강과 고강인강 이종재의 마찰접합도 선진국 등에서 연구 실용단계에 있음이 1979, 1984년의 외국문헌에서 소개된 바 있다. 또한 일본 등 선진에서는 자동차 산업은 물론 전 산업분야에서 마찰접합의 장점을 활용한 산업화 응용 및 연구가 활발히 진행되고 있다.⁶⁻⁷⁾

본 연구 결과는 굴삭기용 호스 니플(Hose Nipple)과 같은 제품에 적용이 가능하다. 현재 굴삭기용 호스 니플은 일체형 단조품을 외부 선반 작업과 내부 선반 작업을 통해 제작하고 있으며, 재료 및 가공 공정 수가 많고 형상이 난이하여 제작비 및 가공 시간이 많이 소요되고, 제작 후 소비되는 소재의 양이 많다. 따라서 현재 일본 등에서는 굴삭기용 고압 호스 니플을 3개의 파트로 하여 마찰용접(Friction Welding)을 이용하여 제작하고 있다. 중공의 재료 혹은 파이프 소재를 이용하여 마찰용접을 통해 굴삭기용 호스 니플을 제작하는 경우 생산성 증대와 높은 가격 경쟁력을 확보할 수 있으며, 마찰용접을 이용하여 니플을 제작하는 경우 고품질의 제품을 대량으로 생산이 가능하다. 또한 마찰용접법으로 대체한다면 재료 비용의 저감, 가공공정수의 저감, 양산 효과의 향상 등 많은 장점을 가질 것으로 기대된다.

따라서 본 논문에서는 중공 단면을 갖는 기계용 구조강재의 마찰용접에 대하여 다양한 용접 공정 변수(회전속도, 마찰 가압력, 마찰 가열시간)에 대하여 실험을 수행하였으며, 마찰용접부의 기계적 특성을 살펴보았다. 이를 통해 산업적 적용

가능성을 확인하였다. 또한 공정변수 최적화를 위해 적합도 함수를 정의하였다. 본 연구에서 실험된 내용은 모재형상과 재료 손실량에 따라 달라질 수 있으므로, 실험 결과와 적용 제품에 맞도록 용접 강도 및 재료 손실량 측면에서 정의하였고, 이 두 관점에서 실험 영역내의 최적 용접조건을 설정하였다.

2. 마찰 용접 실험

관대관 마찰용접의 기계적 특성 평가를 통한 용접성을 확인하고, 용접 공정의 최적 용접 조건을 도출하기 위하여 마찰 용접을 수행하였다. 마찰 용접에 있어서 회전수(회전속도), 마찰 가압력, 마찰 가열시간, 마찰 가압시간, 업셋 압력, 업셋 시간등의 다양한 변수가 있다.

그러나 본 실험에서는 기초 실험 및 기존 연구 결과를 통하여 마찰용접 특성에 큰 영향을 미치는 인자로 회전수, 마찰 가열압력, 마찰 가열시간을 주요 변수로 설정하였다. 실험은 실험계획법에 의해 3수준으로 하여 실험을 하였고, 각 인자의 실험 수준은 Table 1과 같다. 고정 인자로 업셋 압력은 10 MPa, 업셋 시간은 5 sec로 설정하였다.

실험에 사용된 마찰 용접기는 연속 구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며, 용량은 최대 재료치수로서 회전축과 고정축은 $\phi 60\text{mm}$ 이다. Fig. 1은 실제 용접 실험중의 사진으로 그림의 왼쪽은 회전축에 시편에 달려 회전하며, 오른쪽의 고정축에 시편이 고정되어 마찰되고, 가압하여 용접이 진행된다.



Fig. 1 Photo of friction welding process

Table 1 Welding process parameters and levels

Welding Parameter	Level		
	800	1300	1800
Rotating Speed (rpm)	800	1300	1800
Friction Heating Pressure (MPa)	10	15	20
Friction Heating Time (sec)	5	10	15

Table 2 Chemical compositions of SM20C (wt%)

Element	C	Si	Mn	P	S
Content	0.25	0.18	0.67	0.015	0.16
Element	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
Content	0.15	0.19	0.08	0.19	Re

본 연구에 사용된 실험재료는 자동차, 굴삭기 등에 사용되는 기계구조용강재 (SM20C)이다. SM20C는 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, 주된 용도는 일반기계, 자동차, 항공기 등의 축류, 치차류, 냉간 단조품, 볼트류 등에 이용된다. 소재의 화학적 조성은 Table 2와 같으며 최대 인장강도는 497 MPa 이상이다. 실험 시편의 크기는 외경 36mm, 내경은 25mm로 용접 두께는 5.5mm 이다. 용접의 회전축에 삽입되는 시편의 길이는 110 mm이며, 회전축의 안정된 회전과 그룹을 위하여 단차 가공을 하였다. 고정축에 삽입되는 시편의 길이는 205 mm 으로 용접 전의 시편의 총 길이는 315 mm 이다.

용접부의 용접성 평가를 위해 용접부 형상과 재료 손실량을 측정하였고, 용접부 내의 기공 및 계재물을 확인하기 위한 마크로 사진과 용접부의 경도를 측정하였다. 또한 용접부의 기계적 강도를 측정하기 위해서 인장 시험을 각 용접 조건마다 3 회씩 수행하였으며, 인장강도와 항복강도로 용접부의 건전성을 판단하였다.

3. 용접부 형상 및 경도

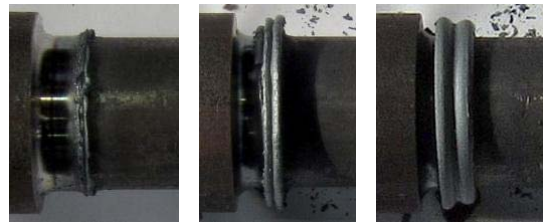
3.1 용접부 형상 및 재료 손실량

실험을 통해 얻어진 마찰용접된 시편의 그림은 Fig. 2와 같다. 마찰용접은 최종 공정이 외부 가압

에 의해 업셋 (upset)하는 공정을 통해 이루어지므로 재료가 모재 밖으로 토출되는 형상(플래시)을 갖게 된다. 모재의 길이는 용접 전과 후가 다르게 되며, 이러한 용접 전후의 모재 길이의 차이를 재료 손실량 (metal loss)으로 정의한다.



Fig. 2 Friction welded specimen



(a) Low (b) Optimal (c) Excess

Fig. 3 Shape of friction weld according to heat input

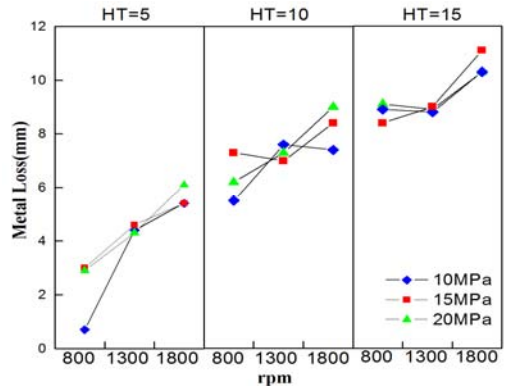


Fig. 4 Metal loss of weld

Fig. 3은 입열 조건에 따른 용접부의 용접 형상을 나타내었다. (a)의 그림은 실험 조건 중에서 입열량이 가장 적은 조건으로 회전수는 800 rpm, 마

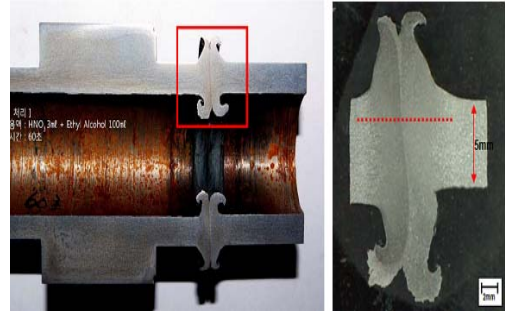
찰 가압력 10 MPa, 마찰 가열 시간은 15 sec 인 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 플래시가 거의 발생하지 않았다. 그러므로 재료의 손실량 또한 거의 발생하지 않는다.

(b)의 경우는 적정 입열 조건에서의 용접부로 회전수는 1300 rpm, 마찰 가압력 15 MPa, 마찰가열시간은 10 sec 인 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 적절한 플래시가 발생하였다. (c)의 경우는 과입열 조건에서의 용접부 형상으로 회전수는 1800 rpm, 마찰 가압력 20 MPa, 마찰 가열시간은 15 sec의 경우이다. 마찰 공정시 높은 입열에 의해 재료의 선단이 과다하게 가열되어 엷게 공정시 가압에 의해 동그랗게 말리는 형상을 보여주고 있다. 이 경우는 가열량이 증가함에 따라 재료의 손실량이 크다.

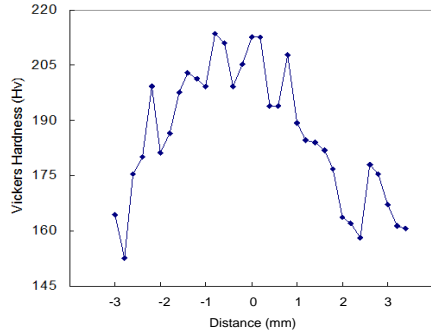
Fig. 4는 용접 조건에 따른 재료 손실량을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 가열시간이 클수록 또한 회전수가 증가할수록 재료의 손실량이 증가하고 있다. 그러나 마찰 가압력은 상대적으로 적은 상관성이 있음을 알 수 있다. 이는 재료 손실량에 있어서 그 값이 적으면, Fig. 3의 (a)와 같이 플래시의 발생이 적게되며, 용접 단면부의 다양한 불순물 특히 산화막과 같은 것이 토출되지 않고 내재될 수 있고, 냉접의 가능성이 있다. 용접부의 입열이 많은 경우는 Fig. 3의 (c)와 같은 형상이 발생되며 이것은 많은 재료 손실로 인하여 경제적인 측면에서 부적합하다. 이는 타 연구(8)에서도 일반강의 접합에서 6 mm 전후의 결과가 보고되고 있다. 따라서 재료 손실량은 7 mm 주변의 값이 적정 값으로 판단된다.

3.2 용접부 마크로 사진 및 경도

용접부의 건전성을 확인하기 위하여 마크로 사진 및 용접부 경도를 측정하였다. 용접부 전체 사진과 용접부 경도는 Fig. 5와 같으며, 용접부의 마크로 사진은 Fig. 6과 같다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 용접부 내에 기공이나 균일, 계재물이 발견되지 않았으며, 마크로 사진에서 보는 바와 같



(a) Weld cross section photo and hardness measurement point



(b) Weld hardness distribution

Fig. 5 Weld hardness

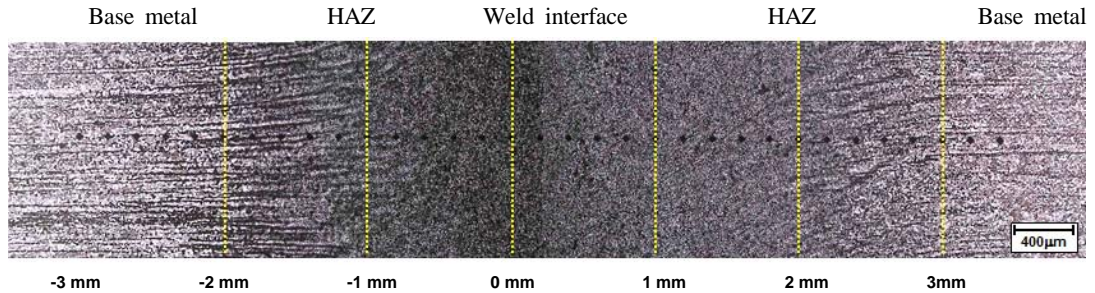


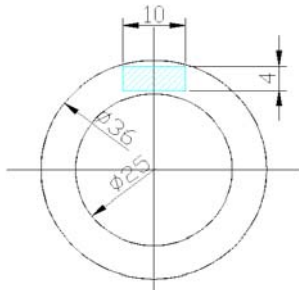
Fig. 6 Macro photo of friction weld

이 용접 업셋 공정에서 발생하는 반응용된 금속의 유동에 의한 메탈 플로우 (metal flow)가 발생된 것을 알 수 있다. 마찰 용접에 의한 건전한 용접부가 형성된 것을 확인할 수 있다.

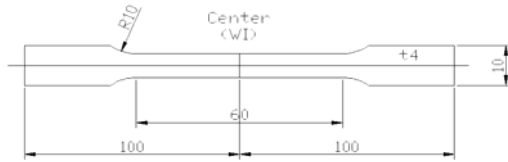
용접된 부분의 경도분포는 모재는 대략 160 Hv이며, 용접 계면(weld interface, W.I.)의 경도는 200 Hv로서 모재보다 다소 높게 나타났다. 그리고 열영향부에서 최고의 경도값(215 Hv)을 나타내고 있다. 이는 용접경계면 부근에서 마찰용접시 국부가 열과 급냉 및 단조 효과에 의하여 경도치가 증가한 것으로 사료된다.

4. 용접부 기계적 특성 평가

마찰용접 시험을 위한 시험편은 마찰 용접된 시편으로부터 Fig. 7 (a)의 위치에서 채취하였다. 채취된 시편을 (b)와 같은 형상 및 치수로 가공하였다. 인장 시험편의 형상치수로서 KS규격(KS B0801 14A)에 따라 선삭 후 연삭하고, 평행부를 사포로 1500번까지 연마하여 시험하였다. 시험은 총 3회를 수행하였다.



(a) Gathering point of test specimen from welded piece



(b) Size of tensile test specimen (KS B0801 14A)

Fig. 7 Tensile test specimen

또한 열영향부(heat affected zone, HAZ)는 용접 계면에서 약 4mm 정도로 판단된다. 또한 육안으로 보면, 열영향부의 범위가 중심부보다 원주부가 약간 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 마찰용접시 원주속도가 중심부보다 원주부에서 빠르고, 이로 인해 마찰온도가 높으며, 또 원주부의 마찰열이 중심부로 전달된다. 따라서 원주부의 온도가 중심부보다 급격히 상승함에 따른 온도구배에 의해 냉각속도가 더욱 빠르게 되어 담금질 효과가 크게 작용하기 때문이다.

Table 3 Tensile strength of weld (unit: MPa)

Friction heating pressure (MPa)		10	15	20
Rotating Speed = 800 rpm				
Friction heating time (sec)	5	520.8	510.1	516.3
	10	512.9	519.2	523.1
	15	515.6	514.7	521.9
Rotating Speed = 1300 rpm				
Friction heating time (sec)	5	515.6	522.3	513.4
	10	518.4	523.8	518.2
	15	515.9	524.2	520.4
Rotating Speed = 1800 rpm				
Friction heating time (sec)	5	517.3	521.6	517.6
	10	518.3	513.0	515.1
	15	519.4	520.9	517.9

Table 4 Yielding strength of weld (unit: MPa)

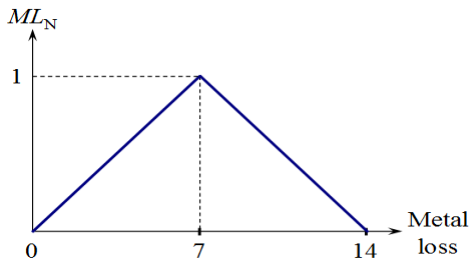
Friction heating pressure (MPa)		10	15	20
Rotating Speed = 800 rpm				
Friction heating time (sec)	5	316.3	325.1	322.8
	10	319.2	328.6	332.8
	15	328.2	336.4	333.3
Rotating Speed = 1300 rpm				
Friction heating time (sec)	5	330.4	329.5	332.3
	10	327.1	338.4	335.2
	15	335.6	344.2	336.2
Rotating Speed = 1800 rpm				
Friction heating Time (sec)	5	339.7	326.9	331.7
	10	335.5	338.9	339.8
	15	322.5	337.8	336.3

Table 3과 4는 각각 용접부의 인장강도와 항복강도를 나타내고 있다. SM20C 모재의 인장강도

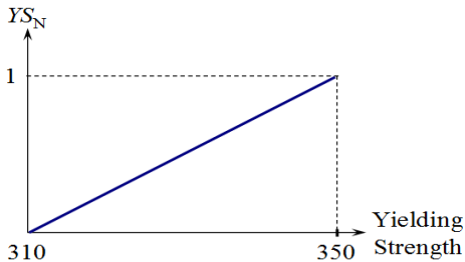
(509.6MPa)와 비교해 모두 높게 나타났으며, 회전 수 변화에 따른 차이는 나타나지 않고 거의 일정한 경향을 보였다. 또한 용접재의 과단위치는 SM20C의 모재측에서 일반적인 연성과단 되었다. 또한 용접 조건에 따른 인장강도의 변동치는 거의 차이가 없었으며, 모재강도 대비 강도비는 약 101%, 변동비도 1% 내외로 매우 높음 신뢰수준으로 나타났다.

5. 용접 공정 변수 최적화

마찰 용접에서 최적의 용접 조건을 도출하였다. 이를 위해서 용접부의 형상과 강도를 가지고 판단하였으며, 이를 정량화 할 수 있는 적합도 함수를 정의하였다. 용접부의 형상을 나타낼 수 있는 인자로 재료 손실량을 선택하였고, 용접부의 강도를 나타낼 수 있는 인자로는 용접부의 항복강도를 이용하였다.



(a) Normalized value for metal loss



(b) Normalized value for Yielding Strength

Fig. 8 Normalized process value for optimization

각각의 값은 Fig. 4와 Table 4와 같다. 그런데 이 두 값은 그 값의 차이가 크기 때문에 이를 표준화 하였다. 표준화 방법은 재료 손실량은 적정

값인 7mm를 1로 하여 표준화 하였고, 항복 강도는 실험 영역내의 값을 0에서 1의 값으로 표준화 하기 위해 최대값과 최소값의 영역 밖에 있는 310과 350의 값으로 표준화 하였다. 표준화된 값은 Fig. 8과 같다. 표준화된 값을 이용하여 적합도 함수를 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$fitness = w_1 ML_N + w_2 YS_N \quad (1)$$

여기서 w_1 과 w_2 는 가중치로서 본 연구에서는 60과 40을 두었다. 본 가중치는 용접의 관점에 따라 혹은 현장 조건에 따라 다르게 설정이 가능하다.⁹⁾

Table 5 Fitness function value according to welding condition

Friction heating pressure (MPa)		10	15	20
Rotating Speed = 800 rpm				
Friction heating time (sec)	5	12.30	40.81	37.66
	10	56.34	76.03	75.94
	15	61.91	74.40	65.30
Rotating Speed = 1300 rpm				
Friction heating time (sec)	5	58.11	58.93	59.16
	10	71.96	88.40	82.63
	15	70.17	77.06	69.91
Rotating Speed = 1800 rpm				
Friction heating time (sec)	5	75.99	63.19	73.99
	10	82.07	76.90	72.66
	15	44.21	52.66	58.01

식 (1)과 같이 정의된 적합도 함수에 대하여 각 용접 조건에 따라 얻어진 재료 손실량과 항복강도를 계산한 값은 Table 5와 같다. 각각의 값으로부터 얻어진 적합도 함수의 값이 최대인 조건을 최적 용접 조건으로 설정할 수 있으며, 그 조건으로는 회전수는 1300 rpm, 마찰 가열압력은 15 MPa, 마찰 가열시간은 10sec로 정의할 수 있으며, 그 적합도 함수의 값은 88.4 이었다. 그 이외도 적합도 함수가 70이 넘는 조건은 적절한 용접 조건으로 사료되며, 현장에서 이용할 때 적용될 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 기계구조용 강재 SM20C의 외경 36 mm 강관에 대한 관대관 마찰용접의 용접 특성을 분석하였고, 현장 적용을 위한 최적 용접 조건을 제안하였다. 마찰 용접에 있어서 다양한 용접 공정 변수 중에서 주요 인자인 회전수, 마찰 가열압력, 마찰 가열시간을 3개의 수준으로 나누어 실험을 수행하였다. 그리고 용접부의 특성을 알아보기 위하여 용접부 형상, 재료 손실량, 단면 사진, 경도, 인장 특성으로 용접성을 판단하였다. 이를 통해 7mm 정도의 재료 손실량일 때 가장 좋은 플래시를 얻을 수 있었으며, 용접부 내에 게재물이나 기공과 같은 결함이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 강도 역시 전체적으로 모재 과단 이상의 강도를 갖고 있었다. 용접 공정 변수를 최적화하기 위하여 재료 손실량과 항복강도 측면에서 적합도 함수를 정의하고 이를 최대화할 수 있는 조건을 선정하였다. 그 조건은 회전수는 1300 rpm, 마찰 가열압력은 15 MPa, 마찰 가열시간은 10sec로 설정할 수 있으며, 그 적합도 함수의 값은 88.4인 용접 조건을 제안할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년 C-D-2013-0418)에 의해 연구되었음.

References

1. KWS, 1998, "Welding · Joining", KWS, pp. 663-664.
2. S. K. Oh., Y. S. Kong and H. T. Yang, 1999, "Creep Prediction by Initial Strain Method for Aging Treated Friction Welds of Heat Resisting Steels", International Journal. of Ocean Engineering and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 13-18.
3. C. M. Suh, D. Y. Suh and D. J. Lee, 1995, "A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM 55C Carbon Steel(1)", Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers (A), Vol. 19, No. 4, pp. 918-928.
4. C. M. Suh, D. Y. Suh, and D. J. Lee, 1995, "A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM 55C Carbon Steel(2)", Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers (A), Vol. 19, No. 4, pp. 929-940.
5. H. S. Jeong and T. Shinoda, 1997, "Fundamental and Basic Application of Friction Welding", Journal of Korean Welding Society, Vol 15, No 6, pp. 1-12.
6. W. T. Jeong, Y. S. Kong and S. J. Kim, 2006, "The Mechanical Properties and the Nondestructive Evaluation of Dissimilar Friction Welded Steel Bars", The Korea Society for Power System Engineering, Vol 10, No 1, pp. 77-82.
7. S. K. Jo, Y. S. Kong and Y. D. Kim, 2005, "The Effects of pH on the Corrosion Characteristics in Dissimilar Friction Welded Zone of IN713LC-SCM440", The Korea Society for Power System Engineering, Vol 19, No 2, pp. 53-59.
8. Y. S. Kong and S. J. Kim, 2006, " Mechanical Properties of Dissimilar Friction Welded Steel Bars in Relation to Post Weld Heat Treatment", Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers (A), Vol. 30, No. 4, pp. 402-408.
9. Y. W. Park and S. Rhee, 2008, "Process Modeling and Parameter Optimization Using Neural Network and Genetic Algorithms for Aluminum Laser Welding Automation", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 37, No. 9-10, pp. 1014-1021.