

## 마찰 표면개질 시스템 개발 및 공정인자의 영향 평가

천창근\* · 장웅성\* · 노중석\*\* · 정태휘\*\*\* · 조중선\*\*\*

\*포항산업과학연구원 용접센터

\*\*주식회사 태광테크 기술연구소

\*\*\*창원대학교 제어계측공학과

### Development of Friction Surface Modification System and Evaluation to the Effect of Process Parameter

Chang-Keun Chun\*, Woong-Seong Chang\*, Joong-Suk Noh\*\*, Tae-Whee Joung and Joong-Seon Joh

\*Welding research center, RIST, Pohang 790-330, Korea

\*\*R&D center, TaeKwangTech Co.,LTD, BIC P2207, RIST, Pohang 790-330, Korea

\*\*\*Control & instrumentation Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

#### Abstract

This paper describes the friction surface modification which has been successfully developed with the friction stir welding recently. There are several problems including just position control and backlash in conventional friction surface modification system. Therefore it has been developed the friction surface modification system which has been controlled precisely both position and force by driving hydraulic cylinder in this paper. The mechtrode rotation speed(N) and feeding speed(Vz), travel speed(Vx,y) are of critical importance for the width and thickness of the coating in friction surfacing process. But there is no theoretical method of determining interrelations between process parameters affect the coating width and thickness. As a result of DOE(design of experiment) with developed system, the coating thickness and width seemed to decrease according to increase the mechtrode rotation speed(N) and traveling speed(Vx,y), to decrease feeding speed(Vz) apparently. However as the result of regression analysis the main effect was only the mechtrode rotation speed in the coating thickness.

\* Corresponding author : ckchun@rist.re.kr

(Received October 5, 2005)

Key Words : Friction surfacing system, Hydraulic system, DOE

#### 1. 서 론

최근 마찰열을 이용하여 소재를 접합하거나 표면처리 하는 공정에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 마찰 열을 이용한 대표적인 공정기술은 마찰 교반용접과 마찰 표면처리 기술이다. 마찰열을 이용하는 표면처리 기술의 특징은 고온의 열원 때문에 용융을 수반하는 다른 표면처리 기술에 비하여 개질층에서 발견되는 희석물과 기공률이 낮으며 종류가 다른 이종 금속도 육성할 수 있다. 그리고 흠이나 뉘새가 발생하지 않아 환경 친화적이며 다른 표면 육성 공정에 비해 가장 큰 장점은 한

면에 약 1~3mm 정도의 두꺼운 육성층을 얻을 수 있다는 점이다<sup>1-3)</sup>.

마찰 표면처리 공정은 비소모성 환봉을 회전하여 마찰열을 발생시켜 모재의 표면 상태를 개선하는 마찰 표면개질 기술과 소모성 환봉을 사용하여 모재 표면에 특성이 다른 소재를 육성하는 마찰 표면육성 기술로 나눌 수 있다. 본 연구는 마찰 표면육성에 관한 내용으로 그 원리를 살펴보면 회전하는 육성봉(mechtrode)이 소정의 회전속도(N)에 도달한 뒤 모재(substrate) 방향으로 힘을 가하여 모재와 접촉시킨 후 이동시킨다. 그 결과 회전하는 육성봉과 모재 사이에 발생하는 마찰열에 의해 모재와 육성봉이 연화되고 육성봉의 일부가 모

재로 이동하여 모재 위에 안정한 육성층을 형성한다. 광범위한 육성층을 필요로 하는 경우에는 여러 번 육성을 행하며 두꺼운 육성층을 필요로 하면 먼저 행한 육성층에 오버랩(overlap)하여 육성을 행하면 된다. 하지만 이러한 공정인자와 육성층 두께와 폭과의 상관관계를 이론적으로 계산할 수 있는 방법은 없다<sup>4-7)</sup>.

한편 마찰 표면개질 시스템은 영국과 일본 등에서 개발하여 상품화하고 있으나 모재 방향으로 공급하는 육성봉의 상하 이송을 전동기(motor)를 이용한 일정 속도제어를 수행하고 있기 때문에 굴곡을 가진 부품에 쉽게 적용하기 어려운 문제가 있다.

본 연구는 이러한 배경들에서 수행된 것으로 육성봉의 상하 이송은 기존 방식인 전동기 대신에 유압서보(hydraulic servo) 시스템을 적용하여 모재의 형상에 따라 속도 또는 압력제어를 교대로 수행할 수 있는 마찰 표면개질 시스템을 개발하였다. 그리고 개발된 시스템을 사용하여 마찰 표면육성 공정에서 최적 공정인자 확립을 위하여 실험계획법(DOE)에 따라 육성봉의 회전속도(N)와 공급속도( $V_z$ ), 이동속도( $V_{x,y}$ )가 변할 때 육성층의 두께와 폭이 어떻게 달라지를 통계적인 기법으로 분석하였다.

## 2. 마찰 표면개질 시스템의 개발

마찰 표면개질을 수행하기 위한 시스템은 모재 위에 육성봉을 접촉하여 충분한 마찰력을 얻기 위한 회전조절 기능(N)과 육성봉을 모재 방향으로 일정한 힘 또는 속도로 공급하는 기능(Z축), 육성봉 또는 모재를 가로 및 세로 방향으로 이동하는 기능(X축, Y축)을 구비하여 운전자가 원하는 부분에 개질이 이루어질 수 있도록 하여야 한다. Fig. 1은 개발한 마찰 표면개질 시스템의 기능 구성도를 나타낸다.

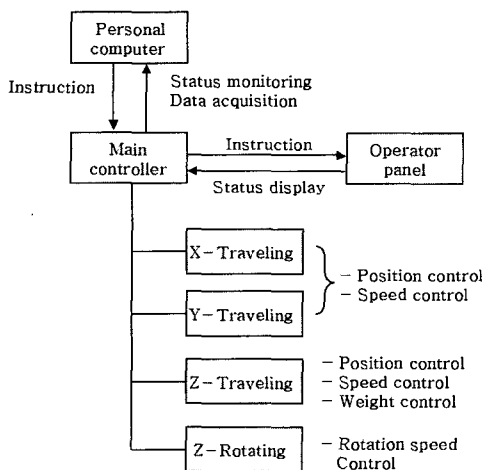


Fig. 1 Function of friction surfacing system

기구부의 기본 구조는 갠츄리(gantry) 형태로 설계하고 주축은 좌우 최대 5°까지 기울일 수 있도록 하여 다양한 형상을 가진 부품에 마찰 표면개질을 적용할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 본 연구에서 개발한 마찰 표면개질 시스템을 3차원 설계한 구성도를 나타낸다.

Table 1은 개발한 마찰 표면개질 시스템의 사양을 나타내는 것으로 육성봉의 회전속도는 최대 3,500rpm까지 설계하여 열 전달율이 좋은 알루미늄이나 동과 같은 비철금속에도 적용할 수 있도록 하였으며 가압 하중은 최대 3.5ton까지 작용하도록 설계하였다.

마찰 표면육성 공정에서 원하는 두께와 폭을 가진 육성층을 얻기 위하여 육성봉을 일정하게 공급하는 속도제어를 수행하는 것이 일반적이다. 하지만 속도제어 기능만 수행하여 육성할 경우 모재가 평면이면 문제없이 육성을 수행할 수 있지만 높이가 다른 경사진 모재일 경우에는 쉽게 육성할 수 없는 문제가 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 마찰 표면육성 시스템은 육성봉을 일정한 속도뿐만 아니라 일정한 힘으로 공급하는 기능을 구비하여야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 일반적으로 많이 적용하고 있는 전동기(motor) 시스템 대신에 하중제어를 정밀하게 수행할 수 있는 유압 서보시스템

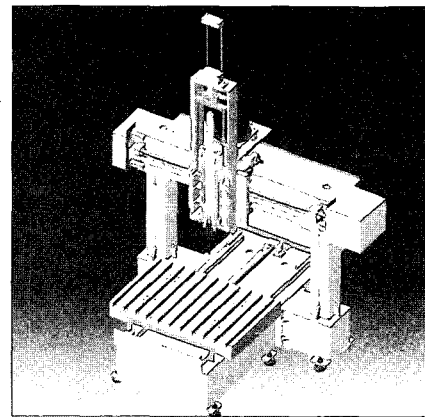


Fig. 2 Mechanical structure of friction surfacing system

Table 1 Specification of friction surfacing system

Item		Specification	
Traveling Speed (mm/sec)	X	Max	10
		During Working	0.5~2
	Y	Max	10
		During Working	0.5~2
	Z	Max	10
		During Working	0.5~2
Rotation Speed (rpm)		3,500	
Maximum Pressure (kgf)		3,500	

을 채택하였다. 일반적인 유압 시스템은 전동기 시스템에 비해 스크류(screw)를 사용하지 않으므로 백래쉬(backlash)가 적고 동작 중 하중 변동이 작다는 장점이 있지만, 시스템 구성이 복잡하고 비용이 비싼 단점이 있다.

Fig. 3은 본 연구에서 제시한 마찰 표면개질 시스템의 유압 제어시스템의 구성도를 나타내는 것으로, 위치제어기와 압력제어기를 독립적으로 구축한 뒤 모재의 종류에 따라 위치제어나 압력제어를 수행할 수 있도록 시퀀스를 구축하였다. 유량 조절 밸브는 서보밸브 1개만 사용하여 위치제어와 압력제어 때 사용하였다. Z축의 위치제어는 tempo sonic 위치센서를 실린더에 내장시켜 위치정보를 귀환하여 비례적분(proportional-integral) 제어를 수행하여 위치 정밀도 0.1mm까지 제어 가능하도록 구현하였다. 압력제어는 LS-5 로드셀을 구동축에 장착하여 하중 정보를 귀환하고 비례적분 제어를 수행하여 정확도 1% 이내에서 제어가 이루어질 수 있도록 하였다.

Fig. 4는 개발한 마찰 표면개질 시스템의 공정관리

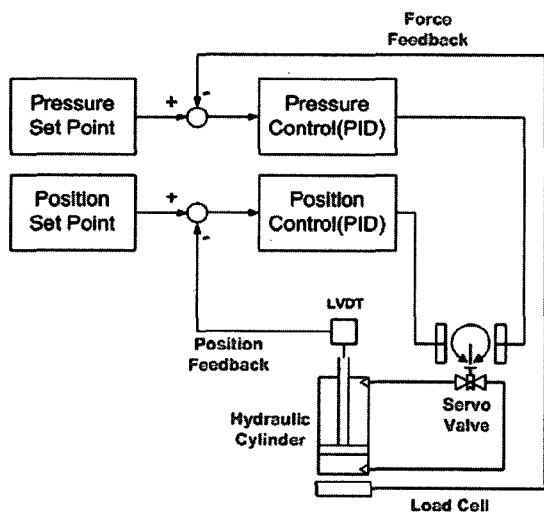


Fig. 3 Control diagram of hydraulic system

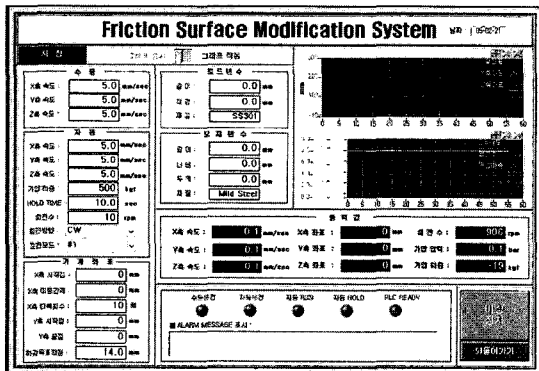


Fig. 4 Display of data collection and storage software

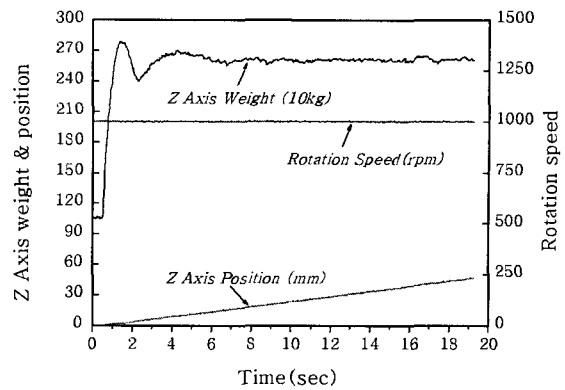


Fig. 5 Process data collected

프로그램을 나타내는 것으로 LABVIEW를 이용하여 제작하였다. 주요 기능은 공정인자인 육성봉의 회전 및 공급속도, 이송속도 등을 하달하는 지시기능과 공정인자와 설비상태를 모니터링하고 수집하는 기능으로 구성되어 있다.

Fig. 5는 개발한 시스템을 이용하여 마찰 표면 육성 시험을 수행할 때 주요 공정인자를 수집하여 나타내는 것으로, 시험조건은 육성봉 회전 속도를 1000rpm, 공급속도 2.5mm/s, 이송속도를 2.5mm/s로 설정하였다. 그 결과 육성봉의 회전속도는  $\pm 0.3\%$  정밀도 내에서 제어가 수행되었으며, 작용하는 하중은 약 2.6ton으로 안정되게 유지됨을 확인하였다.

### 3. 실험방법 및 재료

마찰 표면육성에 있어서 육성층의 코팅과 접착력에 영향을 미치는 주요한 공정인자는 Fig. 6에서와 같이 소모성 육성봉을 모재 방향으로 공급하는 공급속도 (feeding speed =  $V_z$ )와 육성봉의 회전속도 (rotation speed =  $N$ ), 모재의 이동속도 (travel speed =  $V_{x,y}$ )이다.

하지만 이러한 공정인자와 육성층 두께 T와 폭 W와의 상관관계를 이론적으로 뚜렷하게 계산할 수 있는 방

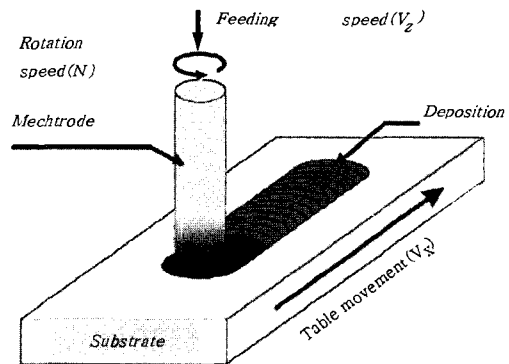


Fig. 6 Schematic diagram of friction surfacing process

법은 없다. 따라서 경험과 이론적인 가정을 바탕으로 하는 실험을 통하여 상관관계를 도출하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 세 가지 공정인자를 Table 2와 같은 실험 조건으로 완전요인(full factorial) 설계방법에 의한 실험계획법(DOE)으로 실험하였다.

본 실험에서 사용된 소재는 길이 200mm, 폭 150mm, 두께 10mm의 S45C 평판 플레이트에 지름 20mm의 STS304 육성봉을 육성하였다. 육성 공정은 육성봉을 시계 반대 방향으로 회전시킨 뒤 모재방향으로 하강시켜 마찰을 발생시키고 일정 시간 후, 육성봉과 모재가 마찰열에 의하여 충분히 연화되면 육성봉은 일정 공급속도로 모재 방향으로 하강시킴과 동시에 X축 방향 일정 속도로 진행하였다. 육성층의 두께와 폭의 측정은 육성시험 완료 후, 두께와 폭이 일정한 구간에서 여러 번 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 공정인자 영향 평가

공정 인자인 육성봉의 회전속도, 이동속도, 공급속도를 변경하면서 실험한 결과, 육성층의 비드형상과 상태는 Fig. 7에서와 같이 대체로 양호한 결과를 보였으며, 각 인자의 변동에 따라 육성층 비드의 두께와 폭이 약

Table 2 Friction surface modification parameters.

Rotation speed (rev/min)	Travel speed (mm/s)	Feeding speed (mm/s)
1000	3.5	1.5
2000	4.5	2.5

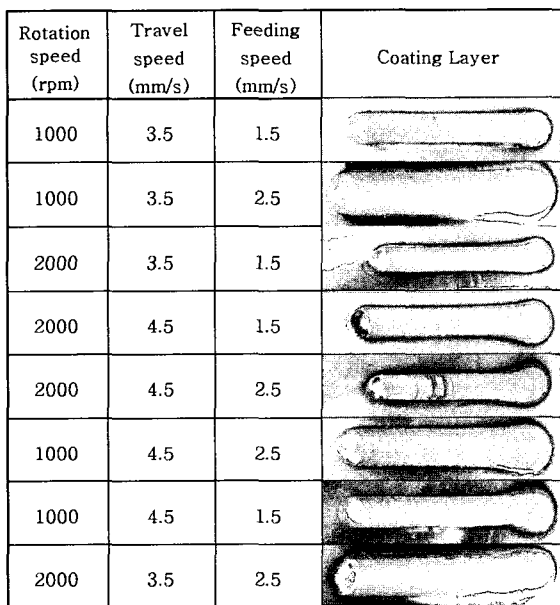
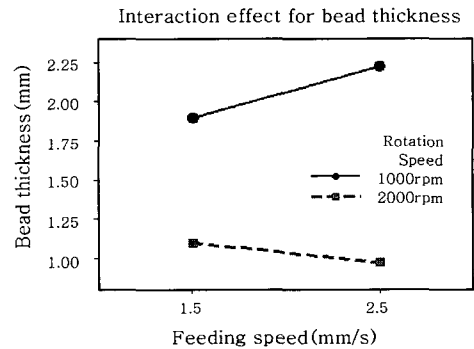


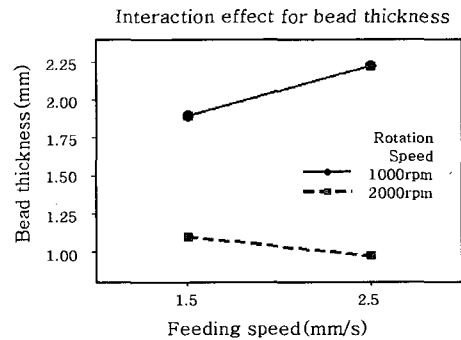
Fig. 7 Coating layer of friction surfacing

간씩 차이가 발생함을 관찰할 수 있었다.

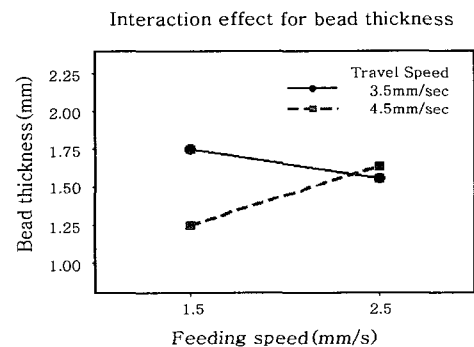
실험결과 분석은 공정인자인 회전속도와 이동속도, 공급속도 사이의 상호작용(interaction effect)이 육성층 비드 두께 및 폭에 영향을 미치는지 관찰하였다. 그 결과 육성층 비드 두께의 경우 Fig. 8에서와 같이 회전속도-이동속도(a), 회전속도-공급속도(b) 간의 상호작용은 회전속도 1000rpm인 경우와 2000rpm인 경우에 서로 교차하지 않았으므로 상호작용이 없는 것으로 판별되지만, 이동속도-공급속도(c) 간의 상호작용은 이동속도 3.5mm/s인 경우와 4.5mm/s인 경우에 서로 교차하였으므로 상호작용이 약간 있어 보인다. 그래서 유의의 수준 10%로 설정하여 각 인자들 사이의 상호작용



(a) Rotation speed-travel speed



(b) Rotation speed-feeding speed



(c) Travel speed-feeding speed

Fig. 8 Interaction plot of bead thickness

용에 대한 확률(probability)을 계산한 결과 회전속도-이동속도는 0.670, 회전속도-공급속도는 0.514, 이동속도-공급속도는 0.428로 모두 0.1보다 크므로, 모든 공정인자 사이는 상호작용이 없는 것으로 판단된다.

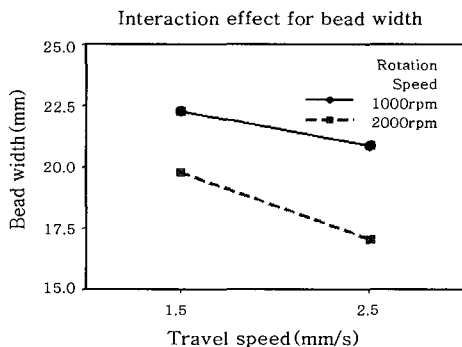
육성층 비드 폭의 경우에는 Fig. 9의 관찰 결과 주어진 실험 범위 내에서 회전속도-이동속도(a), 회전속도-공급속도(b), 이동속도-공급속도(c) 모두 교차하지 않는 것으로 보아 상호작용이 없는 것으로 판단되며, p-value 계산 결과도 회전속도-이동속도는 0.419, 회전속도-공급속도는 0.584, 이동속도-공급속도는 0.220으로 0.1보다 크므로 상호작용이 없음을 알 수 있었다.

따라서 육성층 비드의 두께와 폭에 영향을 미치는 공

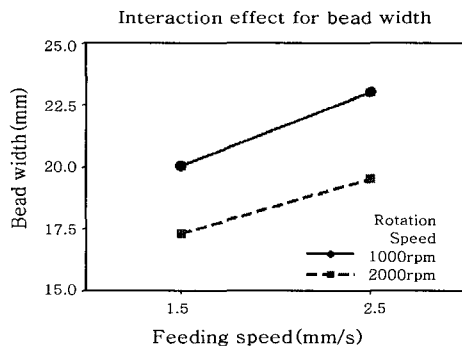
정인자를 독립변수로 설정하여 주 효과를 분석한 결과 Fig. 10과 같이 이동속도와 공급속도의 변화는 비드 두께에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되지만, 회전속도의 변화는 비드 두께에 영향을 미치는 주 인자로서 회전속도가 감소하면 비드 두께가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 감소된 회전속도의 마찰동안 토크의 증가와 증가된 육성층의 변형률로 인한 육성층의 두께 증가 때문인 것으로 사료되며, 상관 회귀식은 신뢰도( $R^2$ ) 84%를 가진 식 (1) 과 같다.

$$T = 3.72 - 0.001N - 0.21 V_{xy} + 0.01 V_z \quad (1)$$

육성층 비드 폭의 경우는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 세 가지 공정인자 모두가 뚜렷하게 영향을 미치는



(a) Rotation speed-travel speed



(b) Rotation speed-feeding speed

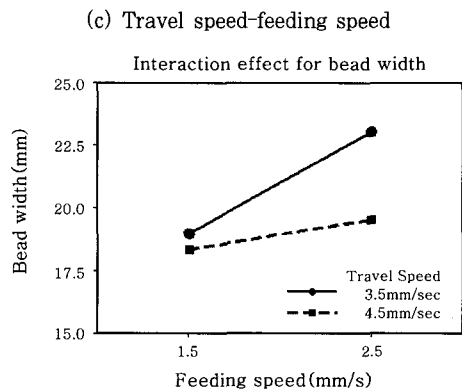
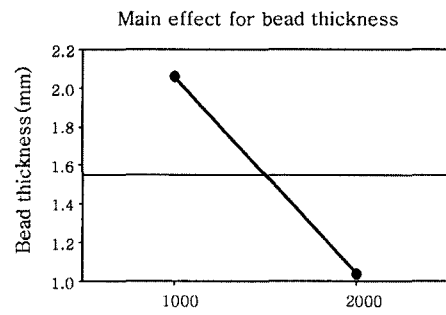
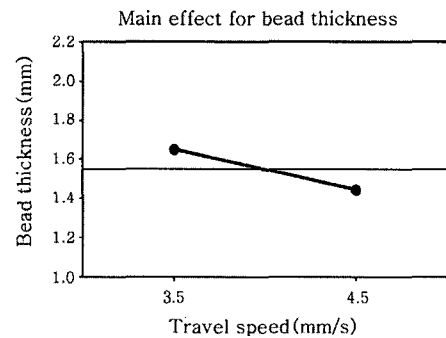


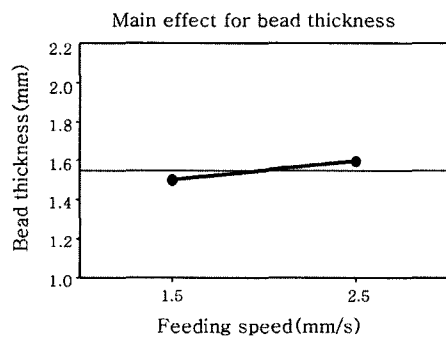
Fig. 9 Interaction plot of bead width



(a) Rotation speed



(b) Travel speed



(c) Feeding speed

Fig. 10 Main effect plot of bead thickness

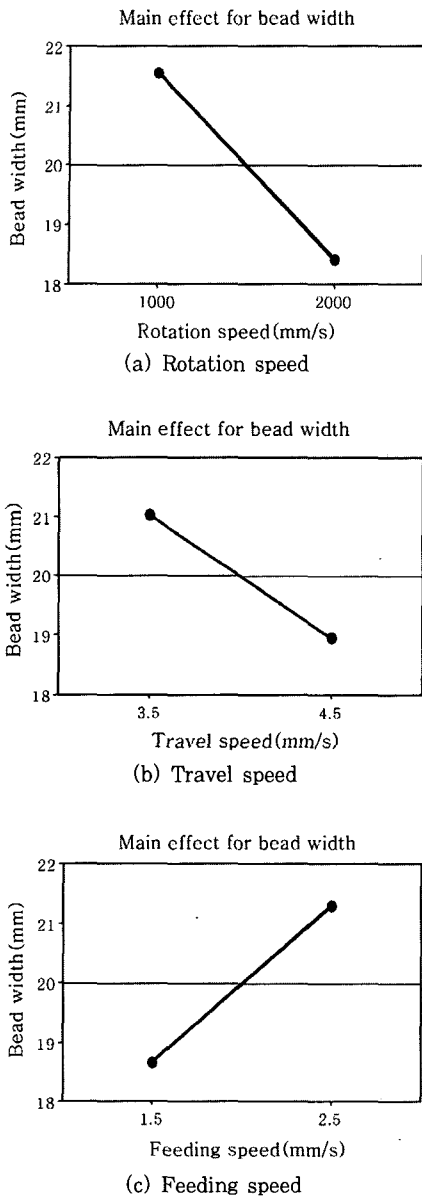


Fig. 11 Main effect plot of bead width

것을 알 수 있으며, 회전속도와 이동속도가 감소하고 공급속도가 증가하면 비드 폭이 증가되는 것을 관찰할 수 있다. 비드 폭에 대한 상관 회귀식은 신뢰도( $R^2$ ) 88%를 가진 식 (2) 과 같다.

$$W = 27.7 - 0.003N - 2.07V_{x,y} + 2.62V_z \quad (2)$$

도출된 상관 회귀식 (1)과 (2)를 검증하기 위하여 공정인자를 Table 3과 같이 5가지 경우로 분류하여 실험하였다. 그 결과 Fig. 12에서 관측되는 바와 같이 실험을 통하여 측정된 비드 두께 및 폭이 상관 회귀식에 의하여 계산된 비드 두께 및 폭과는 약간의 차이를 보이지만 유사한 결과를 나타내었다.

Table 3 Experiment condition on process parameter

	case1	case2	case3	case4	case5
rotation speed(rpm)	1000	1,250	1,500	1,750	2,000
travel speed(mm/s)	3.5	3.8	4.0	4.3	4.5
feeding speed(mm/s)	1.5	1.8	2.0	2.3	2.5

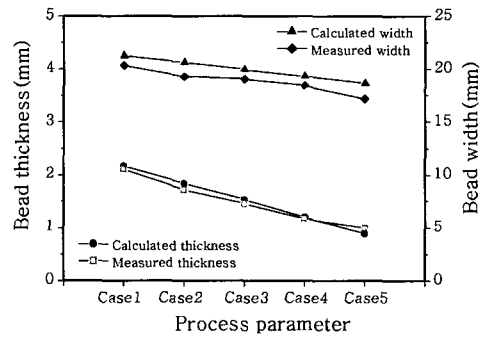


Fig. 12 Comparison between experiment and regression in bead width & thickness

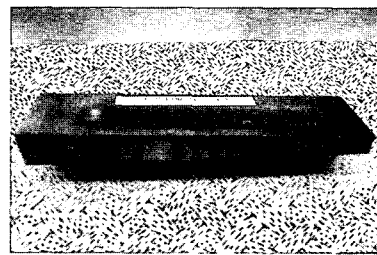


Fig. 13 View of coating on substrate with 3° slope

## 4.2 하중제어 실험결과

본 연구에서 개발한 마찰 표면개질 시스템의 장점인 일정 하중제어를 이용하여 길이 200mm, 폭 100mm, 두께 14 ~ 24mm, 경사각도 3°를 가진 S45C 플레이트 상부에 STS304 육성층을 3ton 하중으로 일정하게 힘을 가한 상태에서 이동속도(travel speed) 3.5mm/s로 고정하여 실험한 결과 Fig. 13과 같이 일정한 두께를 가진 육성층을 얻을 수 있었다.

## 5. 결 론

모재의 형상에 따라 속도 또는 압력제어를 정밀하게 수행할 수 있는 유압 구동형 마찰 표면개질 시스템을 개발하여 안정성을 확인하였으며, 개발한 시스템을 사용하여 마찰 표면육성 공정의 인자인 육성층의 회전속도와 이동속도, 공급속도가 육성층의 두께와 폭에 다음과 같은 영향을 미침을 알 수 있었다.

1. 마찰 표면육성 공정의 주인자인 회전속도(N)와

공급속도( $V_z$ ), 이동속도( $V_{x,y}$ ) 간의 상호작용은 육성층 두께 및 폭에 영향을 주지 못하는 것으로 사료된다.

2. 육성층의 두께는 육성봉의 회전속도( $N$ )와 이동속도( $V_{x,y}$ )에 반비례하고 공급속도( $V_z$ )에 비례함을 알 수 있었다. 하지만 육성층 두께와 공정인자들과의 상관 회귀식을 도출한 결과 육성봉의 회전속도는 육성층 두께에 큰 영향을 미치지만 공급속도와 이동속도는 그 영향이 작음을 확인하였다.

3. 육성층의 폭과 공정인자들과의 상관 회귀식을 도출한 결과 육성봉의 회전속도( $N$ )와 공급속도( $V_z$ ), 이동속도( $V_{x,y}$ ) 모두가 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. T. Shinoda, S. Okamoto, S.Takemoto, Y.kato, T.Shimizu : Depositon of Hard Surfacing Layer by Friction Surfacing, Welding Inter, 10-4, 1996, 288-294
2. K. Fukakusa : On the Characteristics of the Rotational Contact Plane-A Fundamental Study of Friction Surfacing, Welding Inter, 10-7, 1996, p524-529
3. A.W.Batchelor, S.Jana, C.P.Koh, C.S.Tan : The Effect of Metal Type and Multi-layering on Friction Surfacing, Journal of Materials Processing Technology 57, 1996, 172-181
4. I.I Voutchkov, V.I Vitanov, G.M. Bedford : Neurofuzzy Model-based Selection of Process Parameters for Friction Surfacing Application, Proceedings of the Thirteenth National Conference on Manufacturing, Glasgow, UK, 9-11 Sep, 1997, 491-495
5. V.I Vitanov, I.I Voutchkov, G.M. Bedford : Decision Support System to Optimise the Fritec (friction surfacing) Process, Journal of Materials Processing Technology, 2000, 236-242
6. V.I Vitanov, I.I Voutchkov, G.M. Bedford : Neurofuzzy Approach to Process Parameter Selection for Friction Surfacing Application, Surface and Coating Technology 140, 2001, 256-262
7. G.M. Bedford, V.I Vitanov, I.I Voutchkov : On the Thermo-mechanical Events during Friction Surfacing of High Speed Steels, Surface and Coating Technology, 141, 2001, 34-39