

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
第5卷, 第4號, 1987年12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 5, No. 4, Dec., 1987

PLACKETT-BURMAN MODEL을 이용한 Cu-Ni 합금의 PULSE MIG 용접 변수해석

문영훈* · 이기학* · 허성도*

Application of Plackett-Burman Model in Welding Experiments

—Effects of welding parameters on bead shape in Cu-Ni PULSE MIG process—

Y. H. MOON* · K. H. LEE* · S. D. HUR*

Key Words : Plackett-Burman Model(P-B모델), Pulse MIG Process(펄스미그용접),
Correlation Coefficient(상관계수)

Abstract

The purpose of this study is to reexamine our test method in the light of statistical methods for data interpretation.

Our trial to apply Plackett-Burman statistical model in multifactorial welding experiments shows that it saves much time and cost and extracts very accurate results.

In this study, the parametric effects of bead shape on pulse MIG process in Cu-Ni alloy are investigated for verifying our trial.

1. 서 론

일반적으로 용접에는 많은 변수들이 내포된다. 따라서 정확한 용접물성을 예측하기 위해서는 관련되는 여러 변수들의 영향을 모두 고려해 주는 것이 이상적이다. 그러나, 여러 변수가 동시에 작용하는 용접시험에서 어느 한 변수가 특정물성에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 다른 모든 변수를 일정한 조건으로 두고, 관심있는 한 변수만을 변화시켜야 하므로, 많은 변수의 영향을 시험을 통해 확인해 보는 데는 많은 난점이 따른다. 따라서 본 연구에서는 적은 시험량으로 전체 시험을 거쳐서 얻어낸 결과와 동일한 시험결과를 얻어낼 수 있는 방안을 모색코자 하였으며, 이를 위해 Chai와 Eager¹⁾에 의해 실용적

시험에 적용된 바 있는 Plackett-Burman 모델²⁾을 응용하여 시험용접시 적용시킴으로써, 이러한 수학적 모델의 적용타당성 및 신뢰도를 검토해 보았다.

이를 위해, Cu-Ni 합금의 Pulse MIG 용접시 여러 용접변수가 용착비이드(bead)의 형상에 미치는 효과를 P-B 모델을 적용시켜 해석하였다.

2. 이론해석

2.1. P-B model의 일반이론

시험계획을 세울 때 가장 먼저 고려하여야 할 사항은 물성에 영향을 미치는 주요인자를 시험을 통해 정확하게 찾을 수 있는지의 여부를 점검하는 것이다. 즉, 여러 변수를 정성·정량적으로 변화시켜가면서

*정회원, 한국중공업(주) 용접기술부.

측정된 물성과 변수 사이의 상호연관성을 밝힘으로써, 다른 시험조건에서의 물성을 정확하게 예측할 수 있는 시험계획이 필요하다.

이러한 경우, 가장 이상적인 시험계획은 관련되는 모든 변수를 독립적으로 변화시켜서 각 변수의 효과를 분리해서 고려해 주는 것이겠으나 L^n 가지의 시험(n =변수의 수, L =각 변수별로 적용시킬 시험치의 수)을 수행하여야 하므로 변수가 많은 일반적인 시험에서 이러한 모든 시험을 수행한다는 것은 거의 불가능하다. 예를 들어 용접변수가 비이드폭(bead width)에 미치는 효과를 알아보기 위해 변수를 10개($n=10$: 전류·전압·속도·극성...) 선정하고, 각 변수별로 두가지의 값($L=2$: 전류 120A, 150A, 전압 20V, 25V, 속도 25cm/min, 30cm/min...)을 변화시키면서 각 시험조건별로 비이드폭을 재고자 할 경우 전체 시험시편의 갯수는 $2^{10}(=1024)$ 개가 되어야 하며, n, L 이 증가할수록 시험횟수는 더욱 증가한다. 이러한 많은 변수들의 영향을 실제시험을 전부 수행하여 구할 수는 없으므로, 시험횟수를 줄이면서도 동일한 정확도를 갖는 최적 시험방안을 찾기 위해 많은 연구^{3)~5)}가 행해져 왔다.

이러한 여러 이론 중에서 P-B 모델은 여러 수학적 과정을 거쳐 얻어진 Random Array에 맞게 시험변수를 적용시켜 시험을 실시한 후, 적절한 해석과정을 거치게 함으로써, L^n 가지의 시험에 의해서 얻게 되는 결과와 일치하는 결과를 얻고자 하는 수학적 모델이다.

2.2. P-B model의 적용방법

여기에서는 적용이 비교적 용이한 $L=2$ 인 경우의 예를 들어, P-B 모델의 적용절차를 서술하기로 한다.

물성에 영향을 미칠 수 있다고 생각되는 9개의 변수($n=9$)를 가지고, P-B 모델을 이용하여 각 변수의 효과를 알고자 할 경우를 가정해 보자.

$L=2$ 인 경우로 한정하였으므로, 시험을 수행하기 위해서는 각 변수별로 두가지의 값을 선정해야 하는데 이때 적용시키는 변수중 낮은 값(nominal value)을 '-'로 높은 값(extreme value)을 '+'로 표기한다.

먼저 시험시편의 수(N)는 Table 1에 나타나 있는 것 중에서 임의의 값을 선택하되, 변수의 갯수(n)보다는 큰 것을 택한다.

본 경우에는 $N=12, 16, 20$...중 어느 하나를 택할 수 있으며, $N=16$ 을 선정했으면, $L=2, N=16$ 의 조건에 맞는 Design은 Table 1에서 찾는다.

Table 1. Design Table for Plackett-Burman Trial (L=2)

N = 7	+++--
N = 12	++-+-
N = 16	++++-+-
N = 20	++-+-+--
N = 24	++++-+-+--
N = 32	++++-+-+--
N = 36	++++-+-+--
N = 40	Double design for N=20
N = 44	++++-+-+--
N = 60	++++-+-+--
N = 64	Double design for N=32
N = 68	++++-+-+--
N = 88	Double design for N=44

N=16 +++-+-+--

이 Design을 기준하여 주기적으로 ($N-2$)번 배열을 바꾼 후, 마지막 열에는 전부 '-'열을 첨가시킴으로써 완전한 random 배열을 만들어 준다.

+-	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+
++	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	+
++	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+
++	+	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
-	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+	+
-	+	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+
-	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+
-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+
-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-
-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Fig. 1. Complete design for L=2, N=16

열을 시편별 분류, 행을 변수별 분류로 구별할 경우(열과 행을 바꾸어도 무방), 시험변수가 9가지이므로, 임의의 연속적인 9개의 행만을 선택한다. 처음 1~9행을 잡을 경우, Fig.2와 같은 test design을 얻게 된다.

Specimen	Variable								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+	-	-	-	+	-	-	+	+
2	+	+	-	-	-	+	-	-	+
3	+	+	+	-	-	-	+	-	-
4	+	+	+	+	-	-	-	+	-
5	-	+	+	+	+	-	-	-	+
6	+	-	+	+	+	+	-	-	-
7	-	+	-	+	+	+	+	+	-
8	+	-	+	-	+	+	+	+	-
9	+	+	-	+	-	+	+	+	+
10	-	+	+	-	+	-	+	+	+
11	-	-	+	+	-	+	-	+	+
12	+	-	-	+	+	-	+	-	+
13	-	+	+	-	-	+	+	-	+
14	-	-	-	-	-	+	+	+	+
15	-	-	-	+	-	-	+	+	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fig. 2. Design block for L=2, N=16, n=9.

각 변수의 열을 보면, 8번의 Extreme(+)과 8번의 Nominal(-)이 완전히 대칭적으로 적용됨을 알 수 있다.

Fig. 2의 Test Design에 따라 각 시편별로 변수의 Extreme(+)과 Nominal(-) 값을 적용시켜 용접을 실시하는데, 예를 들어 5번시편의 용접조건은 '1'번 변수는 Nominal 값을 '2, 3, 4, 5'번은 Extreme 값을 '6, 7, 8'번 변수는 Nominal 값을 '9'번 변수는 Extreme 값을 적용시켜 용접을 한다.

이렇게 해서 용접이 끝난 16개의 시험편으로부터, 관심있는 물성을 측정하여 기록한 후, 다음과 같은 절차를 거쳐 결과를 해석한다.

2.3. 결과분석

'2.2'항의 시험결과로부터 각각의 변수가 물성에 미치는 영향은, 변수와 측정된 물성사이의 상관관계로 비교·검토한다.

일반적으로 많은 변수가 복합적으로 작용하는 system에서, 어느 한 변수의 영향을 알고자 할 경우에는 상관계수(correlation coefficient)의 개념이 도

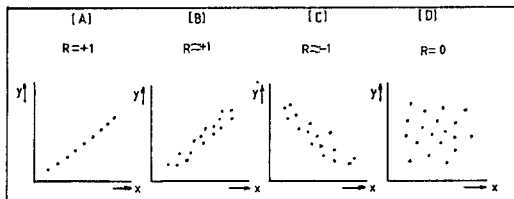


Fig. 3. Illustration of various correlation between x and y.

입된다.^{3),4)}

Fig. 3의 [A]와 같이 'x' 변수가 증가할수록 'y' 값이 증가할 경우 상관관계가 크다고 하며 [D]와 같이 변수에 무관하게 'y' 값이 변하면 상관관계가 없다고 한다. 반면 [C]와 같이 'x' 변수가 증가할수록 'y'가 감소하는 경우는 음의 상관관계를 보인다고 한다.

이러한 두 변수사이의 관계를 수학적으로 표기한 것을 상관계수 (R)라고 하는데 상관계수는 상관관계의 정량적 척도로서 -1≤R≤1 사이의 값을 갖는다. (R=1: perfect correlation, R=0; No correlation, R= -1: negative correlation)

상관계수는 다음과 같이 구한다.

$$R = \frac{\text{covariance of } x \text{ and } y}{\text{square root of product of variance } x \text{ and } y}$$

$$= \frac{\text{covariance } (x, y)}{(\text{variance } x, \text{variance } y)^{1/2}}$$

$$\text{variance } x = \sigma_x^2 = \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)$$

$$\text{variance } y = \sigma_y^2 = \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)$$

$$\text{simple mean } \bar{x} = \sum_i^n x_i / n$$

$$\text{simple mean } \bar{y} = \sum_i^n y_i / n$$

$$\text{cavariance}(x, y) = \left(\frac{1}{n-1} \right) \cdot$$

$$\sum_i^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$$

$$\text{standard deviation} = \sigma = \sqrt{\text{variance}}$$

$$R = \frac{n \cdot \sum_i^n x_i \cdot y_i - \sum_i^n x_i \cdot \sum_i^n y_i}{\left[\left(n \cdot \sum_i^n x_i^2 - \left(\sum_i^n x_i \right)^2 \right) \cdot \left(n \cdot \sum_i^n y_i^2 - \left(\sum_i^n y_i \right)^2 \right) \right]^{1/2}}$$

3. 시험방법

Pulse MIG 용접시, 용접변수가 Ni-Cu 합금의 용접비이드 형상에 미치는 영향을 P-B모델을 이용하여 구하기 위해 L=2, N=12의 P-B design을 선정하였고, 본 시험에서 택한 독립변수와 적용시험치는 Table 2에 나타내었다.

N=12에 맞는 trial design이 Fig. 4에 나타나 있는데, 변수의 수가 5개이므로 1~5열을 선택하여 1열을 peak current, 2열을 average current, 3열을 welding speed, 4열을 electrode extension, 5열을

Table 2. Independent variables for Plackett-Burman Trial Design

Variables	Level (-)	Level (+)
Peak Current(A)	300	400
Average Current(A)	140	180
Welding Speed(Cm/min.)	30	40
Electrode Extention(mm)	18	22
Frequency(PPS)	60	120

	1	2	3	4	5
1	+	-	+	-	-
2	+	+	-	+	-
3	-	+	+	-	+
4	+	-	+	+	-
5	+	+	-	+	+
6	+	+	+	-	-
7	-	+	+	+	-
8	-	-	+	+	+
9	-	-	+	+	+
10	+	-	-	+	+
11	-	+	-	-	+
12	-	-	-	-	-

Fig. 4. Design block for $L=2, N=12, n=5$

Table 3. Base, Filler metal chemical compositions

Description	Chemical Compositions									
	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Al	Ti
Base metal (C-Steel)	0.18	1.04	rem.	0.099	0.002	0.22	-	-	-	-
Filler metal (ERNiCu-7)	0.02	2.46	0.15	0.007	0.001	0.18	rem	63.17	0.21	1.86

Table 4. Welding condition and Measured Result

P-B Trial Design (N=12, L=2, n=5)	Test Condition					Result		
	Peak Amp. (A)	Aver. Amp. (A)	Weld Speed (Cm/Min)	Elect. Exten. (mm)	Frequency (PPS)	Bead width (mm)	Reinforcement height (mm)	Penetration depth(mm)
+ - + - -	400	140	40	18	60	8.8	2.6	1.0
+ + - + -	400	180	30	22	60	13.4	2.5	1.6
- + + - +	300	180	40	18	120	12.9	2.7	0.8
+ - + + -	400	140	40	22	60	8.7	2.7	1.0
+ + - + +	400	180	30	22	120	13.5	2.5	2.2
+ + + - +	400	180	40	18	120	11.4	2.3	2.0
- + + + -	300	180	40	22	60	12.3	2.5	1.7
- - + + +	300	140	40	22	120	8.8	2.7	0.9
- - - + +	300	140	30	22	120	10	2.4	1.1
+ - - - +	400	140	30	18	120	8.2	2.5	0.5
- + - - -	300	180	30	18	60	13.5	2.5	1.5
- - - - -	300	140	30	18	60	11	2.5	0.7

pulse frequency로 하여 시험조건을 정했다.

용접은 자동이송 대차를 이용하여 bead on plate 방식으로 균일하게 하였으며, 모재 및 용가재(filler metal)의 화학조성을 Table 3에 나타내었다.

비이드 형상은 비이드폭(width)과 높이(reinforcement height), 용입깊이(penetration depth)를 여러 단면에서 측정후 평균을 취하였다.

4. 시험결과 및 고찰

Table 4에 각 시험조건 및 결과치를 나타내었다.

이상의 결과로부터 앞의 '2.3'에서 설명한 상관계수를 구한 결과가 Table 5에 나타나있다.

Table 5의 결과를 보면, 비이드폭의 경우 average current와 가장 큰 상관관계를 보이는 반면, peak current와 speed는 음의 상관관계를 보이는 것으로 나타나고 있다.

비이드 높이는 전체적으로 변수와의 상관관계가 낮게 나타나고 있으며, speed에 비교적 민감한 것으로 나타났다.

용입깊이는 average current가 증가하면, 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Table 5. Correlation coefficient

DEPENDENT VALUES	INDEPENDENT VALRIABLES	CORRELATION COEFF.
BEAD WIDTH	PEAK CURRENT	-.19
BEAD WIDTH	AVERAGE CURRENT	.9
BEAD WIDTH	WELD'G SPEED	-.29
BEAD WIDTH	ELEC. EXTENSION	.03
BEAD WIDTH	PULSE FREQUENCY	-.13
REINFOR. HEIGHT	PEAK CURRENT	-.15
REINFOR. HEIGHT	AVERAGE CURRENT	-.29
REINFOR. HEIGHT	WELD'G SPEED	.42
REINFOR. HEIGHT	ELEC. EXTENSION	.14
REINFOR. HEIGHT	PULSE FREQUENCY	-.15
PENETRATION	PEAK CURRENT	.34
PENETRATION	AVERAGE CURRENT	.73
PENETRATION	WELD'G SPEED	-.11
PENETRATION	ELEC. EXTENSION	.27
PENETRATION	PULSE FREQUENCY	.06

이상의 P-B trial test 결과를, 여러 경우의 시험을 통하여 얻은 결과와 비교해 보았다.

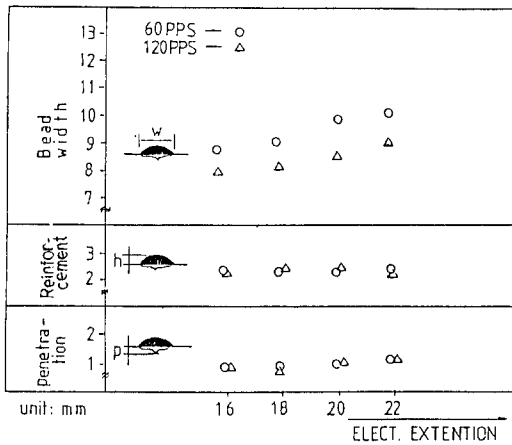


Fig. 5. Effect of peak current on bead shape

Extension 18mm, weld speed 30cm/min, Ar gas flow rate 18l/min, average current 150A의 일정 조건하에서, peak current 변화에 따른 비이드 형상변화를 보면, peak current가 증가함에 따라, 비이드 폭의 감소가 관찰된다. peak current가 증가하면, average current를 일정하게 유지시키기 위해 base current가 감소하게 된다.⁶⁾ 이로 인한 pulse amplitude의 증가는 peak current에서의 유지시간(duration time)을 감소시키므로⁶⁾ arc plasma의 폭이 감소하게 되며,⁶⁾ 따라서 비이드폭이 감소한다. average current가 일정하므로, 용입깊이와 높이는 큰 변화를 보이지 않았다.

동일 current에서 frequency 60pps의 비이드폭이

120pps 보다 큰 것은 60pps의 plasma 폭이 120pps의 plasma 폭 보다 크기 때문인데, 이는 frequency가 증가함에 따른 peak current에서의 cycle당 유지시간(duration time)이 감소함에 기인한다.^{6),9)}

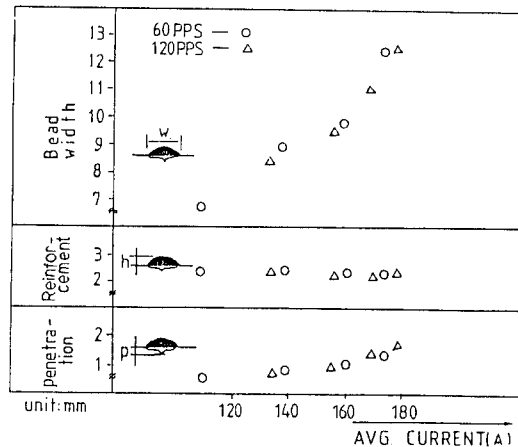


Fig. 6. Effect of average current on bead shapes.

Peak current 400A, extension 18mm, weld speed 30cm/min Ar gas flow rate 18l/min의 조건에서, average current를 변화시킬 경우, average current가 증가함에 따라 비이드폭과 용입깊이는 크게 증가하는 경향을 보이고 있으나, 비이드높이는 큰 차이를 보이지 않았다.^{7),8)} 따라서 pulse MIG 용접의 경우는 standard MIG 용접에 비하여 average current와 비이드높이 사이에 상관관계가 크게 없음을 알 수 있다.

Peak current 400A, xextension 18mm. average current 140A, Ar gas flow rate 18l/min의 조건하

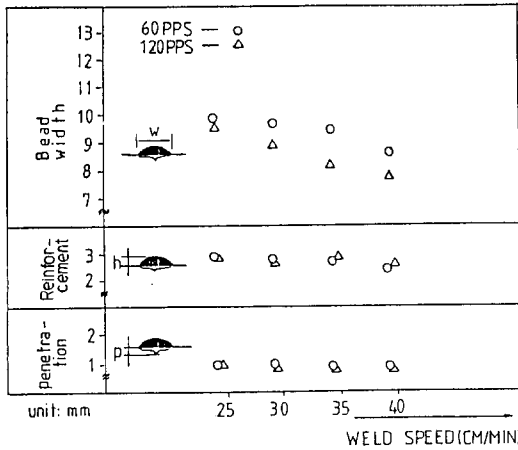


Fig. 7. Effect of weld speed on bead shape

에서 weld speed를 변화시킬 경우, 비이드폭의 감소는 현저하나 비이드높이 및 용입깊이는 큰 변화가 없었다.

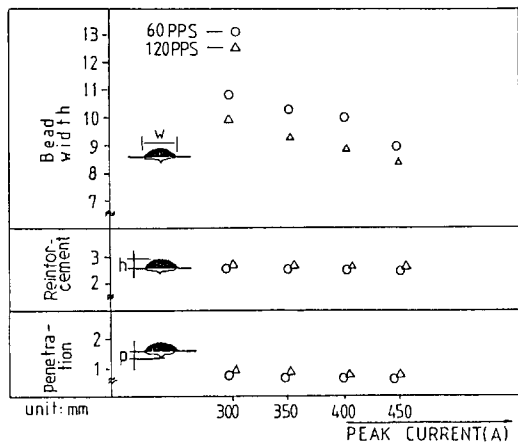


Fig. 8. Effect of electrode extension on bead shape.

peak current 400A, average current 140A, weld speed 30cm/min의 조건에서, electrode extension을 변화시킬 경우, extension이 길어질수록 비이드폭과 용입깊이는 증가하며, 비이드 높이는 큰 차이를 보이지 않는다.

이는 wire extension에 따른 average current의 증가에 기인한 것으로, average current의 경우와 동일하게 해석되어진다.

이상에서 볼 때, P-B trial test 결과와 실제 시험 결과는 거의 일치함을 알 수 있으며, 이로 미루어볼 때 다변수시험(multifactorial experiment)에서 P-B 모델의 적용은 매우 효과적이고 경제적인 시험방법

중의 하나임을 알 수 있으며, 범위를 넓혀 $L=3.4\dots$ 의 경우로 적용의 폭을 확대시켜 나가면 더욱 광범위한 시험까지도 가능하게 될 것으로 생각된다.

4. 결 론

Pulse MIG 용접시 용접변수가 ERNiCu-7의 비이드 형상에 미치는 효과를 Plackett-Burman model로 해석해 본 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 비이드폭은 average current에 가장 크게 의존하며, average current가 증가할수록 증가하며, peak current와 weld speed가 증가할수록 감소한다. 비이드 높이는 전체적으로 용접변수에 크게 영향을 받지 않으며, 용입깊이는 average current가 증가할수록 증가한다.

2) 다변수시험에 P-B 모델을 적용하면, 적은 시험량으로 모든 경우의 실제시험을 거치는 것과 유사한 결과를 얻을 수 있으므로 매우 경제적이며, 많은 변수를 동시에 고려해 줄 수 있다.

3) P-B 모델의 의미를 정확하게 이해한 후, 모델의 특성을 최대한 살릴 수 있는 시험계획을 세워야 하며, 통계학적 개념이므로 형식을 엄격히 따라야 한다.

후 기

자료수집을 위해 수고해 주신 한국기계연구소 소재개발실의 최 재영님과 표면처리실의 백 운승님께 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. C.S. Chai, T.W. Eager, "The Effect of SAW Parameter on Weld Metal Chemistry", Welding Journal, Vol.59(3), (1980), pp.93-S-98-S.
2. R.L. Plackett, J.P. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments", Biometrika, Vol. 33, (1946), pp.305-325.
3. C. Lipson, N.J. Sheth, "Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments", Mc Graw-Hill (1973).
4. R.E. Walpole, R.H. Myers, "Probability and Statistics for Engineers and Scientists", 2nd edition, Macmillian Publishing Co. (1978)
5. A.H. Bowker, G.J. Lieberman, "Engineering Statistics", Prentice-Hall. (1963).

6. A. Lesnewich, "MIG Welding with Pulsed Power", WRC Bulletin (170), (1972).
7. Welding Handbook, "Welding Processes-Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing, and Soldering", Vol. 2, 7th Edition, AWS, pp. 137-142.
8. 神戸良雄, "Pulse MIG. MAG 용접재료의 선택 및 사용방법". 일본 용접기술지, Vol. 31(2), (1983), pp. 20-27.
9. E. H. Paggett, W. E. Zircher, "New Developments in Pulsed Spray Welding", Welding Journal, Vol. 49(10), (1970), pp. 780-787.