

프로젝션 용접을 이용한 쾌속조형법에서 공정변수의 실험적 해석

이 상 찬* · 박 정 남*

*목포대학교 기계·해양시스템공학부

Experimental Analysis of Process Variables in Rapid Prototyping Technique by Using Projection Welding

Sang-Chan Lee* and Jeong-Nam Park*

*School of Mechanical and Marine system Engineering, Mokpo Nat. Univ., Mokpo 534-729, Korea

Abstract

Rapid Prototyping (RP) technology has helped successfully to reduce time and costs since first emerged in 1986. Recently, RP using functional materials like as metal have been researched. However RP using molten metal and brazing material have been struggling to resolve several drawbacks, such as dimensional inaccuracy, poor surface finish and post finishing because occurring shrinkage and warpage at cooling. So, the purpose of this study is to develop a new RP technique using sheet metal and projection welding for reducing several drawbacks in occurring RP using molten metal. And optimum process variables were determined using design of experiment(DOE).

* Corresponding author : sclee@mokpo.ac.kr

(Received May 24, 2004)

Key Words : Rapid prototyping technology, Projection welding, Design of experiment, Process variables

1. 서 론

쾌속 조형법은 최근 각광받고 있는 기술로서, 현재 제품개발에 있어 매우 중요한 단계인 시제품 제작공정의 혁신을 주도하고 있다. 기존의 시제품 제작공정은 대부분 수가공으로 이루어졌으며, 이는 상당한 시간과 경비의 필요로 한다. 이에 반해 쾌속 조형법은 CAD 데이터를 이용하여 빠르고 정확하게 복잡한 형상의 시제품을 만들 수 있다. 이는 시제품 제작기간을 단축하고, 경비를 절감할 수 있다. 또한, 시제품의 수정, 보완이 용이하여 전체적으로 제품개발 기간을 크게 줄일 수 있다¹⁻³⁾.

최근에는 금속을 이용한 시제품과 부품제작에 대한 쾌속조형법이 활발히 연구되고 있다. 금속 재료로 만들어진 시제품은 디자인 검증과 평가뿐만 아니라, 제품의 기계적 강도나 인성 평가와 같은 제품의 시험성 평가에

도 사용될 수 있으므로 그 효율성이 매우 높다. 소량생산의 경우에는 쾌속 조형법을 이용하여 제품을 바로 만들거나 금형을 제작하려는 시도가 이루어지고 있다^{4,5)}.

현재 금속 재료를 이용한 쾌속 조형법은 3가지 방법으로 연구가 진행되고 있다. 첫번째 방법은 Stanford 대학과 Carnegie Mellon 대학에서 연구하고 있는 SDM(Shape Deposition Manufacturing)이 있다. 이 조형법은 먼저 레이저, 플라즈마(plasma) 등의 열원을 이용하여 금속 재료를 한 층 용착시킨다. 용착된 금속 재료가 응고되면, CNC, 연삭, EDM 등의 기계가공을 이용하여 용착된 층을 원하는 두께와 윤곽형상을 가지도록 가공한다. 이 방법은 기존의 NC 장비를 이용할 수 있으나, 용융 금속이 유동성이 있기 때문에 형상을 유지하기가 어렵고 냉각 시 수축과 변형이 발생될 수 있다⁶⁾.

두번째 방법은 Nd:YAG 레이저를 이용하여 금속 표면에 국부적으로 용탕풀(melt pool)을 만든 후에 형성

된 용탕풀 내에 아르곤(argon) 가스로 금속분말을 투입시켜서 결합시킴으로써 원하는 형상을 제작하는 공정이다. 이 조형법은 금속 분말을 이용하기 때문에 제품 표면이 깨끗하지 못하며 용융된 분말이 냉각 시 변형을 유발시킬 수 있다.

세번째 방법은 용접을 이용하여 한 층을 적층한 후에 밀링을 이용하여 층의 표면과 윤곽을 가공하는 공정이다. 최근에 미국에서는 브레이징(brazing) 재료를 이용하여 박판들을 적층할 수 있는 쾌속조형 장비를 제작하였다. 이 방법은 박판 사이에 브레이징 재료를 삽입하고 200℃~300℃로 가열하여 적층하는 방법이다. 그러나 이 쾌속 조형법은 브레이징 재료의 용점이 낮기 때문에 고온에서는 사용하기가 어렵고, 용점이 높은 브레이징 재료를 사용하면 수축과 변형을 유발시킬 수 있다.

본 연구의 목적은 본 연구자가 개발한 프로젝션 용접을 이용하여 금속박판들을 적층하여 성형되는 쾌속조형품⁷⁾은 직접 부품이나 금형 등에 적용할 수 있으므로 다양한 형태의 힘을 받게 된다. 본 논문은 먼저 일반적으로 적층되는 방향인 두께방향으로 적층된 쾌속조형품에 축방향의 인장력을 받았을 때의 공정변수와 기계적 성질간의 상관관계를 실험계획법을 이용하여 밝히고 최적의 공정변수를 결정하는 시스템을 구축하는데 있다^{8,9)}.

2. 시작품 제작 및 실험

2.1 프로젝션 용접을 이용한 쾌속조형법

프로젝션 용접은 외관이 아름답고 용접속도가 빠르기 때문에 응용범위가 넓게 이용되고 있다. 프로젝션 용접기는 용접공정 중 가압력, 용접전류, 용접시간, 용접돌기, 시편의 두께, 재질 및 표면상태등 다양한 변수들에 의해서 용접품질이 결정된다. 또한 용접성의 판단은 용접공정 중에서 가압력(electrode force), 용접전류(weld current), 용접시간(weld time)의 제어를 통해 인장강도 및 전단강도 등과 용접부의 변형량을 통해 이루어진다. 따라서 용접성을 향상시키기 위해서는 위의 주요 공정변수를 조절하여 최적의 용접이 이루어지게 해야한다.

개발한 프로젝션 용접을 이용한 쾌속 조형법의 공정 순서는 다음과 같다⁷⁾. 먼저, 컴퓨터를 이용하여 3차원 제품 설계를 한 후 두께 1mm의 2차원 단면 형상으로 분할한다. 레이저 형상 절단기를 이용하여 각 단면의 형상대로 가공한다. 형상대로 가공한 금속 박판을 돌기 생성 후 프로젝션 용접기를 이용하여 용접 적층한다.

또한, 형상 경계층을 처리하기 위해 성형품 주변을 NC 머시닝을 한다.

2.2 시작품 제작 및 실험

개발한 프로젝션 용접을 이용한 쾌속조형법에서 공정변수와 조형품의 기계적 성질간의 상관관계를 실험계획법을 사용하여 알기위하여 Fig. 1 에서와 같은 KS B 0801 규정의 인장시편을 다음과 같이 두께방향으로 적층하여 두께 5mm의 인장시편을 제작하였다.

- (1) 1.5mm와 1mm의 STS304 박판과 1mm의 SS400 박판을 가공여유를 주어 준비한다.
- (2) 준비된 시험편에 돌기를 생성하기 위한 압력 다이(pressure die)와 프로젝션 용접을 위한 탄소전극을 만든다.
- (3) 압력 다이를 이용하여 준비된 시험편에 돌기(projection)를 생성한다.
- (4) 실험계획법에 의해 실험을 하기 위하여 인자와 수준을 선정하여 알맞은 직교배열표를 작성한다.

프로젝션 용접에 영향을 미치는 공정변수로는 용접전류, 용접시간, 가압력, 시편의 표면상태, 시편의 두께, 돌기의 치수, 돌기의 개수 등이 있다. 일반적으로 프로젝션 용접에서는 최적의 돌기의 치수와 개수가 정해져 있어 공정변수에서 제외하였고 나머지 공정변수는 용접전류, 통전시간, 가압력 등에 비해 용접품질에 미치는 영향이 상대적으로 적다고 판단된다. 따라서 용접전류, 통전시간,

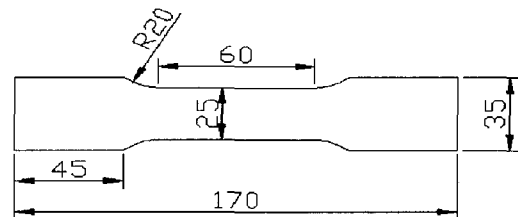


Fig. 1 Specimen diagram of tensile specimen

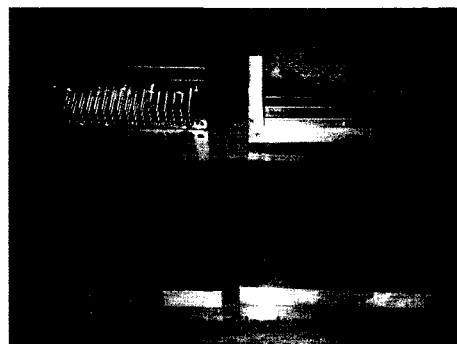


Fig. 2 Photograph of the pressure die and carbon electrode

가압력을 인자로써 선정하였다. 금속박판을 이용한 쾌속 조형법의 특성상 이종재료 적층시편의 조합도 중요한 공정변수이어서 인자로 선정하였다. 각 공정변수의 값들인 인자의 수준은 예비실험을 통하여 표면상태, 가공상태, 용접상태 등을 확인하여 Table 1과 같이 정하였다.

(5) 돌기가 생성된 시편을 직교배열표에 의한 수준조건으로 프로젝트션 용접기를 이용하여 한층씩 적층시켜 시편을 제작한다. 시편조합은 3가지로서 실험번호 1의 시편조합은 두께 1.5mm인 STS304 박판 2개와 두께가 1mm인 STS304 박판 2개를 적층하여 두께 5mm의 인장시편을 쾌속 조형한 것이다. 실험번호 2의 시편조합은 재료가 SS400 이다. 마지막으로 실험번호 3은 두께 1.5mm의 STS304 박판을 양쪽으로 하고 가운데에 두께 1mm의 SS400 박판 2개를 배열하여 두께 5mm의 인장시편을 쾌속 조형한 것이다.

(6) 변환한 DXF파일을 이용하여 시편의 측면을 CNC로 가공하여 적층 경계층을 처리한다.

Table 1 Process conditions for design of experiment

No.	Weld current (A)	Weld time (cycle)	Electrode force (kgf)	Composition of specimen
1	8,000	50	352	STS304
2	8,000	55	402	SS400
3	8,000	60	452	STS304 + SS400
4	9,000	50	402	STS304 + SS400
5	9,000	55	452	STS304
6	9,000	60	352	SS400
7	10,000	50	452	SS400
8	10,000	55	352	STS304 + SS400
9	10,000	60	402	STS304

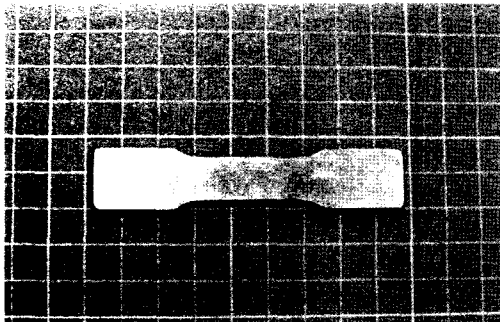


Fig. 3 Result of rapid prototyping using projection welding

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과 및 고찰

직교배열표에 의한 9가지 공정조건에 의하여 프로젝트션을 이용한 쾌속 조형법으로 인장시편을 제작하여 각 시편에 대해서 인장시험을 하였다.

Fig. 4는 인장실험 결과인데, 그림에서 알 수 있듯이 시편조합에 의하여 세 가지의 경우로 크게 데이터의 차이를 보이고 있다. 이는 공정변수 중 시편조합의 수준차가 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 2는 각 실험 조건별로 3회씩 실시한 인장실험 결과를 표로 나타낸 것이다.

여기서, σ 는 인장시편의 인장강도이며, A, B, C, D는 인자로써 각각 공정변수인 전류, 통전시간, 압력, 시편조합을 의미한다.

Table 3은 평균 인장강도를 이용하여 계산한 보조계산표이다.

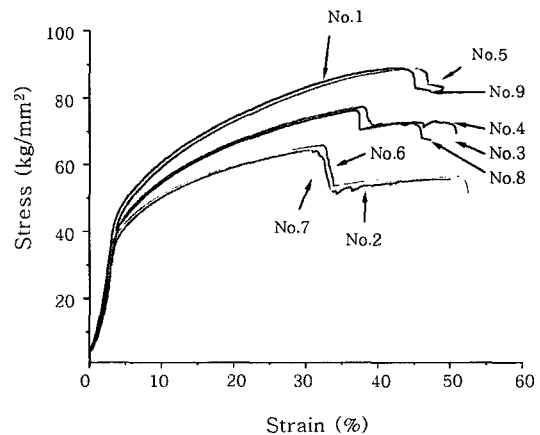


Fig. 4 Stress-strain curve of tensile specimens

Table 2 Results of tensile experiments at each process conditions

No.	Row number				Exp. results (tensile strength : kgf/mm ²)			
	1	2	3	4	σ_1	σ_2	σ_3	σ (MEAN)
No.1	0	0	0	0	88.58	88.90	88.25	88.58
No.2	0	1	1	1	64.80	64.57	64.35	64.57
No.3	0	2	2	2	76.10	73.95	74.94	75.00
No.4	1	0	1	2	76.00	76.35	77.40	76.58
No.5	1	1	2	0	87.95	88.90	89.00	88.62
No.6	1	2	0	1	64.70	65.75	64.60	65.02
No.7	2	0	2	1	65.85	64.70	65.60	65.38
No.8	2	1	0	2	77.35	77.35	77.40	77.37
No.9	2	2	1	0	89.10	88.95	89.25	89.10
Factor array	A	B	C	D				690.22

Table 3 Supplementary table

Process variables	Supplementary calculation	Sum
A (Weld current)	T _{0...} = 88.58 + 64.57 + 57	228.15
	T _{1...} = 76.58 + 88.62 + 65.02	230.22
	T _{2...} = 65.38 + 77.37 + 89.1	231.85
B (Weld time)	T _{0..} = 88.58 + 76.58 + 65.38	230.54
	T _{1..} = 64.57 + 88.62 + 77.37	230.56
	T _{2..} = 75 + 65.02 + 89.1	229.12
C (Electrode force)	T _{..0} = 88.58 + 65.02 + 77.37	230.97
	T _{..1} = 64.57 + 76.58 + 89.1	230.95
	T _{..2} = 75 + 88.62 + 65.38	229.00
D (Composition of specimen)	T _{...0} = 88.58 + 88.62 + 89.1	266.30
	T _{...1} = 64.57 + 65.02 + 65.38	194.97
	T _{...2} = 75 + 76.58 + 77.37	228.15

Fig. 5는 각 인자들의 수준에서의 인장강도를 나타내고 있다. 여기서 관심있게 보아야 할 점은 A(전류)인자와 C(압력)인자이다. A인자는 수준이 2일 때 가장 큰 값을 가지고 있다. 이는 더 높은 전류의 값에서 더 좋은 인장강도가 나올 수 있음을 암시한다. C인자는 0수준일 때 가장 큰 강도를 나타낸다. 마찬가지로 더 낮은 가압력에서 더 좋은 강도가 나오는 것을 알 수 있다.

3.2 직교배열법의 해석

(1) 분산분석표 분석

Table 4의 분산분석표(Analysis of Variance)에서 보듯이 금속을 이용한 쾌속조형법으로 제작한 인장시편의 인장강도는 인자 D인 시편의 조합이 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 다음으로는 전류(A), 가압력(C), 통전시간(B)의 순서임을 알 수 있다.

여기서, S는 인자 변동값, ϕ는 자유도, V는 분산값을 의미하고 e는 오차 값이다. 그리고 F₀는 검정값을 의미한다.

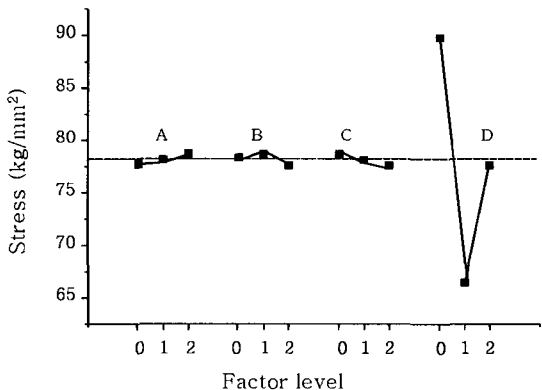


Fig. 5 Representation of tensile strength in each factor level

Table 4 ANOVA(Analysis of variance) table

Variables	S	ϕ	V	F0	α
A	6.89	2	3.44	10.42	0.001
B	1.38	2	0.69	2.08	0.154
C	1.98	2	0.99	2.99	0.076
D	2545.16	2	1272.58	3848.58	0.000
e	5.95	18	0.331		
Sum	2561.36	24			

(2) 최적 공정조건의 결정

Table 4에서 유의확률(α)로부터 A인자와 D인자는 유의수준 5%에서 유의하고, C인자는 유의수준 10%에서 유의하다. 나머지 B인자도 유의수준 10%에서 유의하지 않지만 무시할 수 없다고 판단되므로 무시하지 않고 인장강도를 최대로 하는 최적조건을 구한다. Table 4로부터 A₂와 B₁ 그리고 C₀, D₀이 인장강도를 가장 크게 함을 알 수 있다. 따라서 최적조건은 A₂, B₁, C₀, D₀이다. 즉, 최적의 공정조건은 Table 5와 같이 전류(A)는 10,000A, 통전시간(B)는 55cycle, 가압력(C)는 352kgf, 시편의 조합(D)는 STS304 로만 적층된 것이다.

(3) 모평균의 추정

최적조건에서 모평균(μ̂)는 다음과 같은 식으로 구해진다¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} \hat{\mu}(A_2B_1C_0D_0) &= \overline{A_2} + \overline{B_1} + \overline{C_0} + \overline{D_0} - 3\overline{T} \\ &= \frac{231.85}{3} + \frac{230.56}{3} + \frac{230.97}{3} + \frac{266.30}{3} - 3 \times \frac{690.22}{9} \\ &= 77.28 + 76.85 + 76.99 + 88.77 - 230.07 = 89.82 \end{aligned}$$

여기서, $\overline{A_2}, \overline{B_1}, \overline{C_0}, \overline{D_0}$ 는 동일한 조건에서 3번의 반복실험을 하였으므로 각 최적의 공정조건들에서 구한 인장강도들의 평균값이다.

(4) 신뢰구간 추정

조건에서 모평균의 95%신뢰구간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_e} &= \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{3}{25}, \quad n_e = 1.213 \\ \hat{\mu}(A_2B_1C_0D_0) \pm t(\phi_e; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_e}{n_e}} \\ &= 89.82 \pm 2.101 \sqrt{\frac{0.331}{1.213}} = (88.72, 90.92) \end{aligned}$$

(5) 최적조건에서의 인장실험

Fig. 6은 Table 5에 표시된 최적조건으로 인장시편을 제작하여 3회의 인장실험을 통하여 얻은 응력과 변

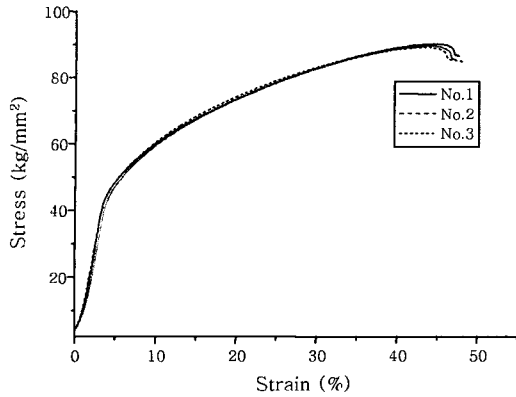


Fig. 6 Stress-strain curve of tensile experiments in optimum conditions

Table 5 Optimal processing conditions of RP using projection welding (tensile test)

Variables	Weld current (A)	Weld time (cycle)	Electrode force (kgf)	Composition of specimen
Optimum value	10,000	55	352	STS304 (1.5mm×2개 + 1mm×2개)

형율의 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 위에서 추정한 최적조건에서의 인장강도가 모두 모평균 신뢰구간 안에 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

프로젝션 용접을 이용한 쾌속 조형법으로 제작한 인장시편의 기계적 특성을 실험계획법을 이용하여 분석한 결과 공정변수가 제품의 품질에 다음과 같은 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다.

1) 금속박판을 프로젝트 용접을 이용하여 쾌속조형품을 제작 시 가장 중요한 공정변수는 재질이 다른 금속박판들의 조합임을 알 수 있다.

2) 프로젝션을 이용한 쾌속조형법에서 조형품의 인장강도에 영향을 미치는 공정변수는 시편조합(D), 전류(A), 가압력(C)과 통전시간(B)의 순서임을 알 수 있다.

3) 위의 공정조건에서 최적의 조건은 전류(A)는 10,000A, 통전시간(B)은 55cycle, 가압력(C)는 352kgf 이고 시편조합(D)은 STS304로 구성하는 것이다. 또한, 최적 조건에서의 모평균은 89.82 이며, 모평균 95% 신뢰구간은 (88.72, 90.92)이다.

참 고 문 헌

- J.P. Kruth : Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, Annals of the CIRP, **40** (1991), 603-614
- M. Fallon : Desktop Manufacturing' Takes You from 'Art to Part', Plastics Technology, 1989, 78-82
- R.B. Aronson : So Rapid Prototyping Works, Now What?, Manufacturing Engineering, 1993, 37-42
- D. Hauber : Automatic Production of P/M Parts Directly From A Computer Aided Design Model, The Int. J. of Powder Metallurgy, **24** (1998), 337-342
- P. Hilton : Making the leap to rapid tool making, Mechanical Engineering, 1995, 70-
- Y.S. Yang and S.J. Na : A Study on Residual Stresses in Laser Surface Hardening of a Medium Carbon Steel, Surface and Coatings technology, **38** (1989), 311-324
- S.C. Lee and J.H. Choi : Development of Rapid Prototyping Technique using Sheet Metal and Projection Welding, Journal of KWS, **22-2** (2004), 144-148 (in Korean)
- Madhav and S. Phadke : Quality Engineering Using Robust Design, PTR Prentice-Hall Inc., 1989, 41-66
- Phadke : Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall International Editions, 1989, 35-87
- 이상복 : 기초부터 현장까지 알기쉬운 다구찌기법, 창조사 , 2000, 15-128 (in Korean)