

# 다구찌 방법을 이용한 3 차원 용접과 밀링 공정의 최적화

신승환\*\*, 박세형\*, 송용익\*, 조정권\*, 채수원\*\*

## Optimization of 3D Welding and Milling Process by Taguchi Method

SeungHwan Shin\*\*, Sehyung Park\*, Yong-Ak Song\*, Jungkwon Cho\* and Soo-won Chae\*\*

### ABSTRACT

3D Welding and Milling is a solid freeform fabrication process which is based on the combination of welding as additive and conventional milling as subtractive technique. This hybrid approach enables direct building of metallic parts with high accuracy and surface finish. Although it needs further improvements, it shows an application potential in rapid tooling of injection mold inserts as the investigation results show. To optimize the process for higher surface quality and accuracy effectively, Taguchi method is applied to the experimental investigation. In this way, relationships between process parameters and final product qualities such as tensile strength and surface hardness are found with minimal efforts.

**Key Words** : Rapid Prototyping (쾌속조형법), Taguchi method (다구찌 방법), 3D Welding and Milling (3 차원용접)

### 기호설명

- SN = signal-to-noise ratio
- S = sums of squares
- $\phi$  = degree of freedom
- V = variance
- $F_0$  = F value (F test)
- P = percent contribution

### 1. 서론

디자인 검증 및 주조, 마스터 모형 제작에 주로 사용되고 있는 쾌속 조형법은 시작 금형 제작 쪽으로 그 응용 분야를 넓혀가고 있다. 시작 금형 제작용 쾌속 조형법으로 대표적인 것은 DTM 사의 RapidTool<sup>(1)</sup>과 Sandia National Lab.에서 개발된

LENS<sup>(2)</sup>가 있다. 그러나 RapidTool 은 플라스틱으로 코팅된 금속 분말을 사용하는 간접 방식의 쾌속조형법으로서 강도와 밀도를 향상시키기 위해서 sintering 과 infiltration 등 후처리 작업을 수행 해야 하는 단점이 있으며, LENS 의 경우에는 금속을 직접 용융 시킬 때 나타나는 표면 장력으로 인해 정밀도 및 표면 품질에 문제가 있다.

이러한 tooling 목적으로 사용되는 쾌속조형법의 단점들을 보완하기 위해서 한국과학기술연구원 CAD/CAM 센터와 한국기계연구원, 홍익대학교에서는 용접과 절삭을 이용한 3 차원 용접과 밀링이라는 새로운 하이브리드식 쾌속조형법을 개발하였다.

3 차원 용접과 밀링은 먼저 용접으로 단면을 적층한(Fig. 1.a) 후 원하는 단면의 높이를 맞추기 위해서 밀링 공구를 사용하여 절삭 작업(Fig. 1.b)

\* 한국과학기술연구원 CAD/CAM 센터

\*\* 고려대학교 기계공학과

을 수행한다. 이 과정을 반복하여 제품의 near net-shape 을 만든 후, 정밀도와 표면 조도를 향상시키기 위해서 최종 정삭 작업(Fig. 1.c)을 수행한다.

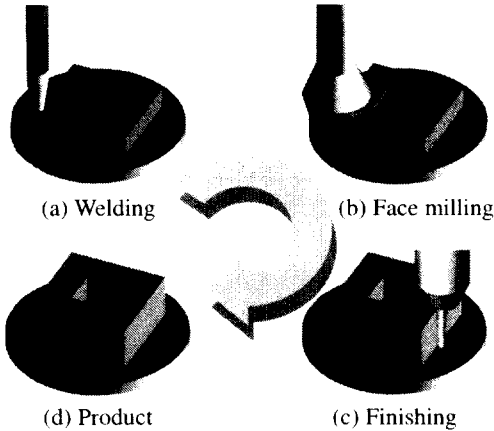


Fig. 1 Process of 3D Welding and Milling

따라서, 3 차원 용접과 밀링은 RapidTool 과는 달리 강도와 밀도를 향상시키기 위한 후처리 작업이 별도로 필요 없으며, LENS 와 비교하였을 때 정밀도 및 표면 품질이 우수하다는 장점이 있다. 또한, 3 차원 용접과 밀링은 일반 3 축 NC 머신에 용접기를 부착하여 간단하게 구현할 수 있기 때문에, 일반적인 폐속조형 장비에 비해 구현이 용이하다는 장점도 가지고 있다. Fig. 2 에는 3 차원 용접과 밀링의 공정을 구현하기 위해 한국기계연구원과 공동으로 개발된 Hybrid RP 장비가 나타나 있다.

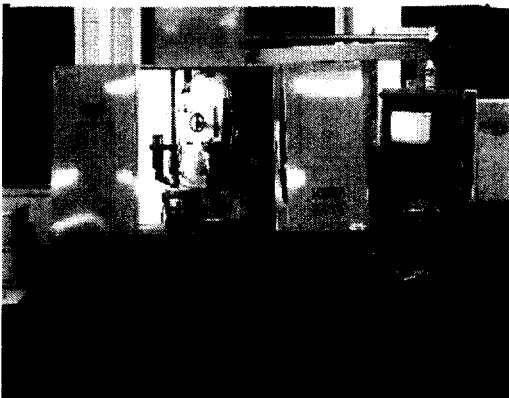


Fig. 2 Hybrid RP equipment for 3D Welding and Milling process

3 차원 용접과 밀링은 CLI 파일의 형태로 되어 있는 기하학적 단면 데이터와 공정변수를 함께 이용하여 제작에 필요한 가공 데이터를 생성하는데, 공정 변수의 변화에 따라 전체적인 공정 시간과 최종 제품의 품질이 결정된다. 시작 금형으로 사용하기 위해 필요한 최종 제품의 여러 품질 중 하나인 인장강도나 표면 경도를 향상시키기 위해서는 먼저 각 공정 변수와 최종 제품의 품질과의 관계가 조사되어야 한다. 이러한 관계를 조사하기 위해서는 공정에 대한 해석 작업이 선행되어야 하지만, 3 차원 용접과 밀링의 공정 특성 상 용접이 계속적으로 반복되면서 비드가 적층되기 때문에 용접의 수치 해석이 난해하다. 이와 같은 이유로, 수치 해석을 통한 공정 변수와 최종 제품의 관계를 찾아내기는 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 3 차원 용접과 밀링에서 사용되는 공정 변수와 최종 제품의 관계를 다루는 방법을 이용한 실험을 통하여 규명하며, 이를 바탕으로 공정을 최적화 시키는 공정 변수의 수준을 선택하는 것을 목적으로 삼는다.

## 2. 공정 변수

3 차원 용접과 밀링으로 제작된 파트의 품질에 영향을 미치는 변수는 고정 변수와 가변 변수로 나눌 수 있다. 고정 변수는 매 작업마다 바꿀 수 없는 것으로 용접 와이어의 종류 및 직경, 용접 가스 종류 및 혼합비 등이 있다. 이에 반해 절삭 속도, 단면 적층 방법 등 매 가공마다 그 값을 바꾸어 줄 수 있는 변수는 가변 변수로 분류한다. 고정 변수의 경우, 매 공정마다 값을 바꾸어 줄 수 없으므로 선행 실험을 통하여 최적화된 값을 사용하며, 가변 변수 중에서 제품 품질과 공정에 큰 영향을 미치는 변수를 공정 변수로 선택한다. 이러한 공정 변수는 각각 technology, parallel, cutting 공정 변수로 분류된다.

Technology 공정 변수는 순수한 한 개의 용접 비드의 품질에 영향을 미치는 공정 변수로서, 용접 시작 시 아크를 안정적으로 발생시키기 위한 dwell time 설정 시간 변수, crater 에 의한 용접 결함을 보상하기 위한 보상값 변수 등이 이에 속한다.

Parallel 공정 변수는 단면 적층 방법을 설정하고 단면의 품질 및 공정 시간에 영향을 미치는 공

정 변수로서, 내부 단면을 채우는 용접 경로, 각 단면간의 적층 방향, 외각선 용접 경로 등이 이에 속한다.

Cutting 공정 변수는 절삭 작업을 설정하는 공정 변수로서, 한 단면 적층 후 혹은 최종 정삭 시 절삭량을 조절한다. Cutting 공정 변수로는 절삭 속도와 공구 반경, 비드 사이의 간격 등이 있다. 비드 사이의 간격은 내부 단면을 채울 때 각 비드 사이의 거리를 설정하는 공정 변수로서, 각 비드 사이의 겹치는 양을 결정하기 때문에, 최종적으로 한 단면 적층 후의 페이스 밀링 절삭량 결정에 영향을 준다.

### 3. 다구찌 방법을 이용한 실험

공정 변수와 최종 제품의 품질간의 관계 규명 및 최적화 작업에 사용될 실험 방법은 우선 실험 횟수를 최소화 하여 시간과 경제적 부담을 줄여야 하며, 실험에서 결정되는 공정 변수가 잡음에 대하여 강건해야 하는 요구사항을 만족시켜야 한다. 즉 최적화 작업을 통해 사용될 공정 변수는 외부 교란 인자가 작용해도 최종 제품의 품질이 강건하게 유지되도록 해야 한다. 이러한 실험 요구 조건을 만족시키기 위한 대표적인 실험 계획법으로 다구찌 방법을 사용하였다.<sup>(3,4)</sup> 다구찌 방법에서는 교란 인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위해서 SN 비(signal-to-noise ratio)를 사용한다. SN 비는 신호 대 잡음의 비율을 의미하는 것으로, 신호 입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로서 나타낸다. 즉 각각의 조절 인자의 SN 비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 잡음에 대하여 강건해진다. SN 비는 목적 함수, 즉 특성치에 따라서 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(normal is best), 망소(lower is better), 망대(higher is better) 특성으로 나뉘어진다. 망목 특성은 도달하고자 하는 값이 있는 경우며, 망소 특성은 그 값이 작을수록 좋은 것으로 불량률, 고장률 등이 있다. 망대 특성은 값이 클수록 좋은 것으로 인장 강도, 경도, 효율 등이 이에 속한다.

공정 변수와 최종 제품의 품질간의 관계를 규명하는 최적화 실험을 실시하기 전에 공정 변수로 선택되지 않은 변수의 수준을 설정하기 위해서 선행 실험을 실시하였다. 공정에서 요구되는 용접

품질을 얻기 위해 선행 실험에서는 중요 용접 변수의 수준을 결정한다. 총 4 개의 용접 변수에 대해 실험을 실시하며, 각 실험 인자의 수준은 세가지의 수준계를 가진다. 따라서 전조 실험을 실시할 경우, 실험 횟수는 총 81 번이 되나  $L_9$  직교배열표를 이용하면 실험횟수는 9 번으로 줄어든다. 또한 다구찌 방법을 사용하여 선정된 용접 변수는 잡음에 대하여 강건해지기 때문에 균일한 용접 품질을 얻을 수 있다는 장점도 있다.

선행 실험에서 결정된 용접 변수를 이용하여 최적화 실험에서는 최종 제품의 품질에 영향을 미칠 것으로 예측되는 중요 공정 변수를 선정하여 최종 제품의 품질과 공정 변수간의 관계를 규명하고, 이를 바탕으로 공정 시간과 제품의 품질을 향상 시키는 공정 변수의 수준을 선택한다. 용접 방법으로는 아크 용접과 레이저 용접 모두 가능하지만 본 실험에서는 아크 용접을 사용하였다.

#### 3.1 선행 실험

선행 실험에서는 외관상으로 용접 품질을 쉽게 판단할 수 있게 하는 스패터의 양과 비드의 폭을 목적함수로 삼는다. 스패터의 양은 용접 품질과 직결된 것은 아니나 3 차원 용접과 밀링의 공정 특성 상 스패터의 양에 따라 최종 정삭 양이 결정되며 각각의 단면 용접 시 단면 품질에 영향을 미치기 때문에 스패터의 양을 최소로 하는 것을 목적 함수로 삼는다. 스패터의 양은 스패터 지수(spatter index)로 나타내는데, 스패터 지수는 실험 시 발생한 스패터의 질량을 실험에 사용된 용접 와이어의 질량으로 나눈 값으로 정의된다. 공정에서 요구 되는 비드의 폭은 5mm 정도이므로<sup>(5)</sup> 비드는 망목 특성을 가진 목적 함수이다.

실험 인자로 고려될 수 있는 용접 변수로는 용접 속도, 용접 전압, 와이어 송급 속도, 노즐과 모재 사이의 거리, 보호 가스를 들 수 있다.<sup>(6)</sup> 용접 전압, 와이어 송급 속도는 용접기 변수로서, 전압과 와이어 송급 속도의 조합에 따라 최적의 용접 속도가 결정이 된다.<sup>(7)</sup> 따라서 선행 실험에서는 용접 속도를 고정 시킨 상태에서 전압과 송급 속도를 변화 시켜 목적하는 용접 품질을 얻도록 하였다. 본 실험에서 설정된 용접 속도는 1200mm/min 이다.<sup>(5)</sup> 이 이상의 용접 속도도 가능하나 이에 비례한 용접 전압의 증가에 따라 용접 비드의 폭의 증가와 열 변형으로 인한 제품의 정

밀도 저하 문제가 발생하게 된다.

3 차원 용접과 밀링에 사용되는 용접 와이어는 AWS ER 70S-6 규격의 연강이다. 연강의 경우 보호 가스로 이산화탄소와 아르곤을 사용한다.<sup>(7,8)</sup> 보호 가스의 종류와 혼합 비율이 스패터 발생에 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에 본 실험 실험에서는 이산화탄소와 아르곤의 혼합비를 실험 인자로 선택하였다. 또한 용접 품질에 영향을 주는 모재와 노즐 사이의 간격을 설정하기 위해서 모재와 노즐 사이의 간격도 실험 인자로 포함시켰다. 최종적으로 선택된 실험 인자로는 용접 전압, 와이어 송급 속도, 보호 가스 혼합 비율, 노즐과 모재 사이의 간격이며, 각 인자는 세개의 수준계를 가진다.

Table 1 Levels of initial experiment factors

	Lev. 1	Lev. 2	Lev. 3
Voltage[ V ]	14	20	26
Wire feed rate[ m/min ]	3	5	8
Gas ratio CO <sub>2</sub> : Ar	3:7	2:8	1:9
Nozzle-to-workpiece distance[ mm ]	6	8	10

세가지 수준의 4 개의 실험 인자임으로 L<sub>9</sub> 직교 배열표에 각 인자를 배열하여 실험한다. Table 1 은 실험에 사용된 각 인자의 수준을 나타낸다. 실험은 용접 전압, 와이어 송급 속도, 보호 가스비, 노즐과 모재 간격을 L<sub>9</sub> 직교배열표의 각 열에 순서대로 배열한 후 용접 속도 1200mm/min 에서 100mm 길이의 비드를 용접하고 이 때 발생한 스패터의 양과 비드의 폭을 측정한다. 2 회 반복 실험을 실시하며 인위적인 잡음 인자를 실험에 작용시킬 수 없으므로, 각 실험 순서는 직교 배열표의 순서가 아닌 무작위로 진행함으로써 실험의 잡음 인자에 의한 영향으로 간주한다.

Table 2 에는 실험 실험 결과가, Table 3 에는 이에 대한 분석 결과가 나타나 있다. 분산 분석 결과 혼합 가스비는 스패터의 양과 비드의 폭에 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 혼합 가스비는 전체적인 공정 비용을 낮추는 방향으로 이산화탄소의 비율이 가장 높은 7:3 을 혼합 가스비

로 선택하였다. 용접 전압과 와이어 송급 속도는 분산 분석에서 확인할 수 있듯이, 스패터의 양과 비드폭에 큰 영향을 끼친다. 이것은 용접 전압과 와이어 송급 속도의 조합으로 용접 속도가 결정되기 때문에 용접 속도가 고정되어 있는 상태에서는 전압과 송급 속도가 용접 품질에 주인자로 작용하기 때문이다.

Table 2 Results of initial experiment based on the orthogonal array (L<sub>9</sub>)

No.	Spatter index			Bead width		
	Index	SN		Width(mm)	SN	
1	0.11	0.12	18.78	3.1	3.0	32.70
2	0.09	0.01	23.87	3.7	3.8	34.49
3	0.13	0.145	17.22	4.1	4.2	35.37
4	0.032	0.037	29.22	4.6	4.7	36.36
5	0.011	0.015	37.62	5.1	5.0	37.08
6	0.021	0.028	32.13	5.2	5.3	37.41
7	0.12	0.141	17.66	3.7	3.8	34.49
8	0.09	0.095	20.67	3.9	4.0	34.94
9	0.08	0.078	22.05	4.2	4.3	35.58

Table 3 Results of variance analysis (ANOVA) based on Table 2

	Factor	S	φ	V	F <sub>0</sub>
S p a t t e r	Voltage	335.337	2	167.669	147.34 <sup>#</sup>
	Wire feedrate	46.821	2	23.41	20.57 <sup>++</sup>
	distance	21.561	2	10.78	9.47 <sup>+</sup>
	Error	2.275	2	1.138	.
	T	405.994	8	.	.
W i d t h	Voltage	12.092	2	6.046	25.218 <sup>#</sup>
	Wire feedrate	3.934	2	1.967	8.204 <sup>++</sup>
	Error	0.959	4	0.24	.
	T	16.985	8	.	.

# : 99% confidence level, ++ : 95% confidence level  
+ : 90% confidence level

Table 2 의 결과를 Fig. 3 에 그래프로 나타내었

다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 용접 전압 20V 에서 스패터의 양과 비드 폭이 모두 최대 SN 비를 가지므로 용접 전압은 20V 로 선택하였다. 와이어 송급 속도의 경우, 스패터의 양은 5m/min 에서 최대 SN 비를 가지며 비드의 폭은 8m/min 에서 최대 SN 비를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 송급 속도가 5m/min 에서 8m/min 으로 변할 때 얻는 비드 폭 SN 비의 변화는 스패터 양 SN 비의 변화보다 적기 때문에 송급 속도는 스패터 양의 SN 비를 최대로 하는 5m/min 의 수준을 선택하였다.

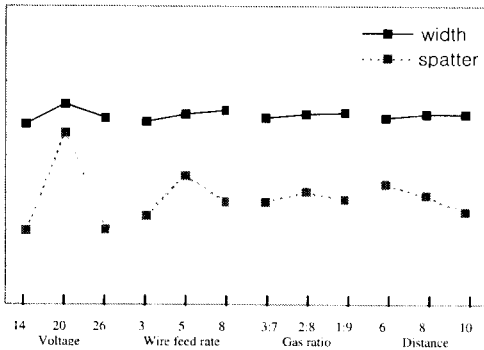


Fig. 3 SN ratio graph based on Table 2

Table 4 Confirming experimental results of initial experiment (3 repetitions)

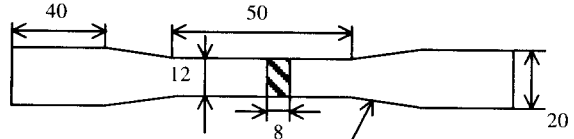
	1	2	3	T
Spatter index	0.011	0.012	0.009	0.0107
Width (mm)	4.9	5	4.8	4.9

노즐과 모재 사이의 간격은 비드의 폭에 큰 영향이 없는 것으로 나타났으므로 스패터의 양을 최소화하는 6mm 의 수준을 선택하였다.

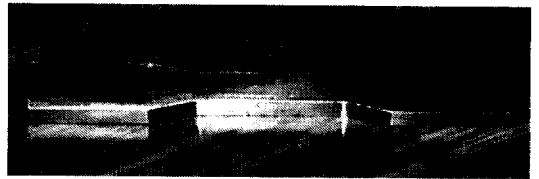
선행 실험을 통해 선정된 용접 전압은 20V, 와이어 송급 속도는 5m/min, 혼합 가스비는 7:3, 노즐과 모재 사이의 간격은 6mm 이며, 결정된 각 인자의 수준으로 3 회 확인 실험을 실시한 결과는 Table 4 와 같다. 스패터 지수와 비드 폭 모두 90% 의 신뢰구간에 위치함을 확인할 수 있다. 확인 실험에서 얻은 스패터 지수의 평균값은 0.0107 로서 발생하는 스패터는 거의 없는 것으로 간주할 수 있다.

### 3.2 최적화 실험

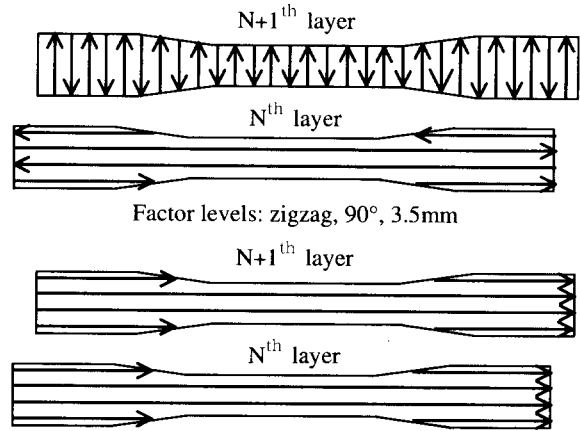
Parallel, cutting 공정 변수 중에서 제작 시간과 품질에 영향이 있는 변수는 내부 단면 용접 방법, 각 단면의 적층 방향, 비드 사이의 간격 등이다. 최적화 실험에서는 이들 공정 변수들이 최종 제품의 현장 사용 적합성을 결정하는 품질인 인장강도와 표면경도에 미치는 영향을 조사하고 이를 개선하는 것을 목표로 한다.



(a) Dimensions of specimen for optimization experiment



(b) Specimen fabricated by 3D Welding and Milling



(c) Welding paths according to optimization experiment factors

Fig. 4 Welding paths and dimensions of specimen for optimization experiment

따라서 목적 함수로는 3 차원 용접과 밀링으로 제작된 시편의 인장강도와 표면경도로 정하였

으며, 인장강도와 표면경도는 높을수록 좋으므로 망대 특성치가 된다.

내부 단면의 용접 방법, 각 단면간의 적층 방향, 비드 사이의 간격을 실험인자로 선택하였으며 각각의 실험 인자는 두개의 수준계를 가진다. 각 인자간의 교호 작용을 살펴 보기 위해서 두 인자간의 교호 작용의 검토가 가능한  $L_8$  직교배열표를 사용하였다. 공정 변수인 내부 단면 채우는 방법 (one-way, zigzag), 단면 적층 방향( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ), 비드 사이의 간격(2.5mm, 3.5mm)을  $L_8$  직교배열표의 1,2,4 열에 순서대로 배열한 후 시편을 제작하였다. 단면 적층 방향이  $0^\circ$ 인 경우에는 비드는 항상 시편의 축 방향으로 생성되며 단면 적층 방향이  $90^\circ$ 인 경우에는 매 단면마다 용접 방향을  $90^\circ$ 씩 회전하여 용접을 수행 한다. 실험에 사용되는 시편은 KS B 0801, 7 호 규격에 따라 제작하였다. Fig. 4 는 시편의 dimension<sup>(9)</sup>과 제작된 시편, 실험에 사용된 내부 단면 채우는 one-way, zigzag 용접 방법과 각 단면간의 적층 방향 설정 방법을 나타내고 있다.

경도 실험에서는 시편 중앙부 여섯 지점에서 비커스 경도를 측정하여 평균한 값을 사용하였다. 실험 번호 1(실험 인자:one-way,  $0^\circ$ , 2.5mm)의 동일한 조건 아래, 3 개의 시편을 제작한 후 실험 인자를 달리 제작한 시편의 표면 경도, 인장 강도와 비교하였다.

Table 5 Results of optimization experiment based on the orthogonal array ( $L_8$ )

No.	Surface hardness		Tensile strength	
	HV	SN	kgf/mm <sup>2</sup>	SN
1	260	48.30	61.46	35.77
2	264	48.43	62.50	35.92
3	237	47.49	52.08	34.33
4	228	47.16	53.02	34.49
5	238	47.53	60.42	35.62
6	275	48.79	61.98	35.84
7	240	47.60	52.08	34.33
8	244	47.75	53.33	34.54
Variance	261.4	.	23.47	.

F 검증을 수행하여 선택한 실험 인자가 제작한 시편의 표면 경도, 인장 강도에 미치는 영향을

조사하였다. 경도 측정에는 Shimadzu 사의 마이크로 비커스 미소경도계를 사용했으며, 하중 조건은 100g 에 10 초를 사용하였다. 인장 실험에는 10 톤인 Instron 사의 model 1127 을 사용하였다.

Table 5 는 실험 인자를 변화 시키면서 제작한 시편의 표면 경도와, 인장 강도 결과이다. Table 6 은 실험 번호 1 의 동일한 조건 아래에서 제작한 3 개의 시편의 인장 강도와 표면 경도의 실험 결과이며, Table 5 의 결과와 F 검증을 실시한 결과를 나타낸다.

Table 6 Results of experiment at identical factor level (one-way,  $0^\circ$ , 2.5mm) and F-test of Table 5

	1	2	3	V	F <sub>0</sub>
Surface hardness (HV)	240	267	255	183	1.428
Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	58.54	59.01	60.93	1.6	14.67 <sup>+</sup>

# : 99% confidence level, ++ : 95% confidence level  
+ : 90% confidence level

Table 7 Results of analysis of variance (ANOVA) for tensile strength based on Table 5

Factor	S	$\Phi$	V	F <sub>0</sub>	P(%)
Deposition direction	3.727	1	3.727	1242 <sup>*</sup>	97.86
Bead distance	0.066	1	0.066	22.2 <sup>*</sup>	1.74
Error	0.015	5	0.003	.	0.4
T	7.617	7	.	.	100.00

# : 99% confidence level, ++ : 95% confidence level  
+ : 90% confidence level

표면 경도는 Table 6 에서 알 수 있듯이 실험 인자나 각각의 실험 인자 사이의 교호 작용에 영향을 받지 않는 것으로 나타났으나, 인장 강도의 경우에는 각각의 실험 인자의 변화에 영향을 받는 것으로 나타났다. Table 7 의 분산 분석 표에서 확인할 수 있듯이 내부 단면 적층 방향( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ )이 인장 강도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 용접 방향성과 관계된 것으로서, 내부 단면 적층 방향을  $0^\circ$ 로 했을 때는 시편이 받는 하중과 적층 방향이 동일하여  $90^\circ$ 의 방향으로 적층 했

을 때보다 더 많은 하중을 받을 수 있기 때문이다. 내부 단면 적층 방향 이외에 비드 간격이 인장 강도에 영향을 미치나 비드 간격이 미치는 영향은 1.74%로 내부 단면 적층 방향 실험 인자에 비해 기여도가 매우 작다고 볼 수 있다.

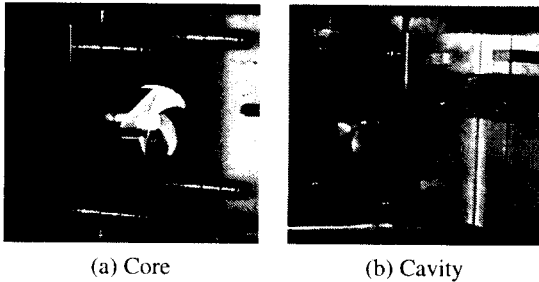


Fig. 5 Fan mold inserts fabricated by 3D Welding and Milling

Fig. 5 는 최적화 실험을 통하여 선정된 공정 변수를 이용하여 3 차원 용접과 밀링으로 제작된 fan 사출 금형 인서트의 core 와 cavity 를 나타낸다. 금형의 경우 여러 방향에서 하중을 받으므로 단면의 적층 방향을 90°로 설정했으며, 단면 용접 방향은 공정 시간이 최소화 되도록 zigzag 로, 비드의 간격은 3.5mm 로 설정하였다. 시사출 실시 결과 선정된 변수를 이용한 금형 제작 시 제품 품질과 금형의 강도에 문제가 없음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 쾌속 조형법으로 직접 3 차원 금속 시제품을 제작할 수 있는 3 차원 용접과 밀링 방식의 공정 변수를 최적화 시키기 위한 연구를 수행하였다. 실험을 통하여 표면 경도는 공정 변수의 영향을 받지 않는 것으로 나타났지만, 인장 강도의 경우에는 내부 단면 적층 방향에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 비드의 적층 방향과 하중 방향의 관계에 따른 결과로서 3 차원 용접과 밀링으로 파트를 제작할 경우에는 제품 사용 시 작용하는 하중 방향을 고려하여 내부 단면 적층 방향을 설정해야 함을 의미한다. 즉 인장 시편과 같이 단 방향의 하중에 놓인 파트의 경우에는 하중 방향으로 내부 단면을 적층 하는 것이 인장 강도에 유리하며, 여러 방향으로 하중 상태에 놓인 파트의 경우에는 내부 단면 채우는 방

향을 각 층마다 변화 시키면서 적층 하는 것이 인장 강도를 여러 방향으로 균일하게 만든다. 내부 단면 적층 방향 이외의 공정 변수는 인장 강도에 큰 영향이 없으므로 전체적인 공정 시간을 줄이는 zigzag 용접 방향과 비드 사이 간격을 3.5 mm 로 설정하는 것이 유리하다.

최적화 실험을 통해서 내부 단면 적층 방향 설정 시 하중 방향을 고려해야 한다는 결론을 얻을 수 있었으나 하중 방향이 일정하여 적층 방향을 한 방향으로 고정시키면 한 적층 방향으로만 열 응력이 집중하여 열변형이 발생하게 된다. 따라서 3 차원 용접과 밀링 공정시 열응력의 분포에 따른 열변형을 고려하여 제품의 품질을 최적화하는 것이 향후 연구 과제로 남아 있다.

#### 참고문헌

1. <http://www.dtm-corp.com>
2. [http://mfgshop.sandia.gov/1400\\_ext/1400\\_ext\\_LE\\_NS.htm](http://mfgshop.sandia.gov/1400_ext/1400_ext_LE_NS.htm)
3. 박성현, "응용 실험 계획법," 영지 문화사, pp. 175-188, 1990.
4. Phillip J. Ross, "Taguchi Techniques for Quality Engineering," McGraw-Hill, 2<sup>ND</sup> Ed., pp. 43-73, 1996.
5. 송용익, 박세형, "3D Welding and Milling For Rapid Tooling," 한국 정밀공학회 98 년도 춘계 학술대회 논문집(II), pp. 940-944, 1998.
6. 이종희, "Gas Metal Arc Welding 의 자동화를 위한 최적 용접 전원 제어에 관한 연구," 한국과학기술원, pp. 6-7, 1986.
7. Richard L. Little, "Welding and Welding Technology," McGraw-Hill, pp. 191-242, 1973.
8. 나석주, "가스 메탈 아크 용접에서 스파터 감소를 위한 최적 용접 조건에 관한 연구," 한국과학기술원, pp. 1-3, 1995.
9. 한국표준협회, "금속재료 인장 시험편," KS B 0801, 1981.