

Effective Process Parameters on Shape Dimensional Accuracy in Incremental Sheet Metal Forming

Jae-Gwan Kang* · Jong-Yun Jung**[†]

*Division of Mechanical Engineering, Kyungnam University

**School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University

점진성형에서 형상 정밀도에 영향을 미치는 공정 변수

강재관* · 정종윤**[†]

*경남대학교 기계공학부

**창원대학교 산업조선해양공학부

Incremental sheet metal forming is a manufacturing process to produce thin parts using sheet metals by a series of small incremental deformation. The process rarely needs dedicated dies and molds, thus, preparation time for the process is relatively short as to be compared to conventional metal forming. Spring back in sheet metal working is very common, which causes critical errors in dimensions. Incremental sheet metal forming is not fully investigated yet. Hence, incremental sheet metal forming frequently produces inaccurate parts. This paper proposes a method to minimize dimensional errors to improve shape accuracy of products manufactured by incremental forming. This study conducts experiments using an exclusive incremental forming machine and the material for these experiments are sheets of aluminum AL1015. This research defines a process parameter and selects a few factors for the experiments. The parameters employed in this paper are tool feed rate, tool diameter, step depth, material thickness, forming method, dies applied, and tool path method. In addition, their levels for each factor are determined. The plan of the experiments is designed using orthogonal array $L_8 (2^7)$ which requires minimum number of experiments. Based on the measurements, dimensional errors are collected both on the tool contacted surfaces and on the non-contacted surfaces. The distances between the formed surfaces and the CAD models are scanned and recorded using a commercial software product. These collected data are statistically analyzed and ANOVAs (analysis of variances) are drawn up. From the ANOVAs, this paper concludes that the process parameters of tool diameter, forming depth, and forming method are the significant factors to reduce the errors on the tool contacted surface. On the other hand, the experimental factors of forming method and dies applied are the significant factors on the non-contacted surface. However, the negative forming method always produces better accuracy than the positive forming method.

Keywords : Incremental Forming, Shape Dimensional Accuracy, Positive and Negative Forming, Sheet Metal Forming, Table of an Orthogonal Array

Received 12 October 2015; Finally Revised 9 December 2015;

Accepted 10 December 2015

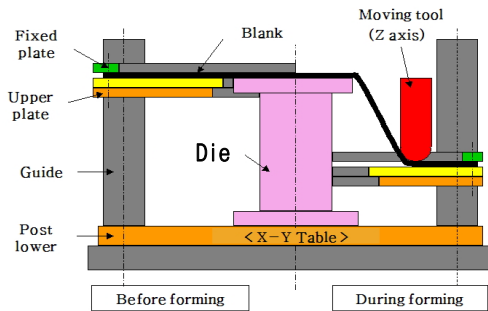
[†] Corresponding Author : jjjung@changwon.ac.kr

1. 서 론

점진성형은 금속 판재 성형(sheet metal forming)의 한 새로운 소성가공 방법으로서 얇은 금속 판재를 점진적으로 변형하여 형상을 만드는 방법이다. 전통적인 금속 판재 성형(프레스 공법)에서는 상·하형 금형 다이 사이에 금속 판재를 넣어 강한 힘으로 압착하여 성형하기 때문에 다이의 설계 및 제작에 많은 시간 및 비용이 소요된다.

이런 시간적 경제적 문제를 해결하기 위한 대안으로 제시된 점진성형공법은 소량의 금속 판재 성형을 신속히 할 수 있다는 장점이 있다. 점진성형에서는 CNC로 제어되는 반구(hemi-sphere) 형태의 공구를 생성된 경로를 따라 이동시켜 금형이 필요 없으므로 비용 측면에서 유리하다.

아래의 <Figure 1>에 점진성형을 schematic diagram으로 표현하였다. 그림과 같이 박판의 소재를 가장자리에 고정하고 가운데 부위를 반구형 공구로 강하게 누르면서 성형하는 방법이다. <Figure 2>는 점진성형으로 제작된 다양한 판재의 성형품을 보여준다.



<Figure 1> Principle of Incremental Forming



<Figure 2> Various Incremental Forming Products

점진성형은 금형 없이도 판재물을 성형할 수 있다는 장점이 있는 반면에 판재의 소성가공에서 외력이 제거되고 난 후 발생하게 되는 스프링백(spring back) 현상으로 최종 형상의 치수 정밀도가 크게 나빠지게 된다. 전통적

인 판재 성형공정(프레스 공정)에서는 스프링 백에 의한 치수 정밀도에 영향을 미치는 인자로 펀치반경, 다이반경, 다이깊이, 재료두께, 금형반경, 펀치성형방향, 다단 공정수, 금형각도 등이 고려된다. 그러나 CNC 절삭 가공[7]과 유사한 제어방식으로 동작하는 점진성형에서는 공구반경, 단위성형 깊이, 이송속도 등이 주요한 공정 변수로서 연구되어져 왔다[4-7, 9].

점진성형에서 형상 정밀도에 관한 대표적인 연구로서 Radu[14, 15]는 연강을 사용한 원추대 형상의 단위 성형 깊이와 공구 직경이 성형 치수 정밀도에 유의한 인자임을 밝혔다. 다른 연구[14]에서는 알루미늄, 연강, 스테인리스강의 3가지 종류의 소재에 대하여도 성형깊이, 공구 반경이 모두 유의한 공정 변수임을 밝혔다.

Ambrogio[2, 3]는 알루미늄 소재를 대상으로 성형 정밀도와 공정 변수와의 관계를 규명하였으며 음각성형 시 공구반경이 작고 공구피치가 작을수록 성형오차가 작아진다는 결론을 제시하였다. 이와 유사한 연구[1]로서 성형치수 오차가 가장 큰 부분은 경사면과 바닥면의 경계에서 발생함을 보였고 다양한 알루미늄 소재를 각각의 성형한계(formability)를 이용하여 최대 성형경사각(α_{max})에 대한 상대경사각을 공정 변수로 보고 실험을 하여 정밀도의 관계를 파악하였다.

공구직경과 단위성형 깊이 외에 점진성형에서 추가적으로 고려할 수 있는 공정 변수로 Lee[10]는 성형방법, 다이유무, 공구경로방식, 소재두께를 제시하였다. 공정 계획자가 선택하여 제어할 수 있는 것을 공정 변수(process parameter)라 할 때 점진성형에서는 절삭공정과 달리 공구반경, 단위성형 깊이 외에도, 양각(positive) 또는 음각(negative) 성형 방법, 판재 하단의 금형 설치 유무, 그리고 소재 두께 등이 성형 품질에 영향을 미칠 수 있는 요인이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 점진성형에서 성형 후 스프링 백에 의한 형상 치수 정밀도에 영향을 미치는 인자를 규명하기 위하여 Lee[10]의 연구와 동일하게 공구이송속도, 공구직경, 단위성형 깊이와 더불어 양·음각 성형방법, 공구경로 방식, 다이 설치유무, 소재 두께 등 총 7개의 공정 변수를 주 인자(main factors)로 실험을 실시하였다. 그리고 기존의 연구와 달리 성형 면과 더불어 성형 반대면의 치수 정밀도에 영향을 미치는 요인에 대하여 실험 결과를 분석하였다.

인자가 많기 때문에 실험은 실험계획법의 직교배열표를 이용하여 실험횟수를 최소화하였으며 성형 결과물은 3차원 스캐너를 이용하여 형상의 치수 정밀도(dimensional accuracy)를 측정하였다. 측정된 데이터에 대하여 분산분석(ANOVA)을 실시하여 유의한 인자를 통계적으로 추출하였다.

2. 점진성형의 7가지 공정 변수

점진성형에서 고려해야할 7가지 공정 변수(이송속도, 공구직경, 단위성형 깊이, 소재두께, 성형방법, 금형의 유무, 공구경로방식)에 대한 자세한 내용은 기존 연구[13]에 상세하게 설명되어 있다. 이하에서는 주요한 공정 변수를 간략하게 정리한다.

(1) 이송속도와 단위성형 깊이

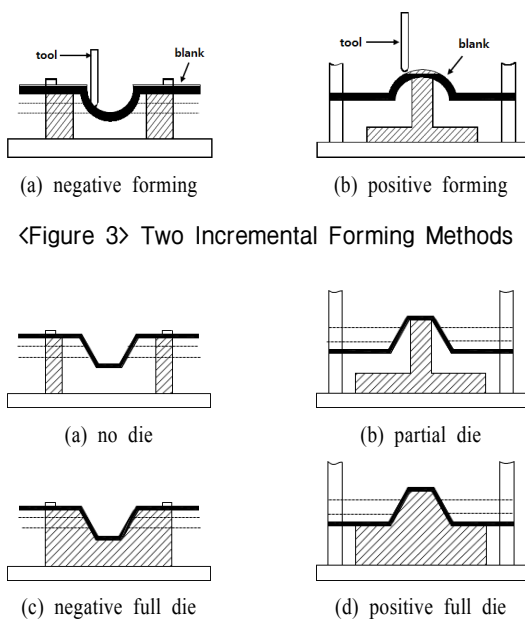
점진성형에서는 공구를 회전시키는 것이 큰 이점이 없기 때문에 공구회전속도는 공정 변수에서 제외하고 공구 이송속도(feed)와 등고선 공구경로에서 Z축 방향으로의 수직 이동거리를 단위성형 깊이(step depth)로 표현한다.

(2) 성형방법(음각성형과 양각성형)

음각성형과 양각성형의 차이는 음각성형은 <Figure 3>의 (a)와 같이 금속 박판의 오목한 부위에 공구를 강한 힘으로 눌러서 성형하는 방법으로서 소재의 가장자리부터 시작하여 중앙부로 성형하는 방법이다. 양각성형은 <Figure 3>의 (b)와 같이 부분 금형을 소재의 밑에 받치고 볼록한 부분에 공구를 압착하여 성형하며 중심부부터 성형하여 가장자리로 이동하면서 점진적으로 성형한다.

(3) 금형의 유무(무금형, 부분금형, 충분금형)

점진성형에서는 다이를 사용하지 않는 것이 일반적이고 이에 대한 다이 준비시간이 필요 없으므로 시간적인 장점이 있다. 그러나 경우에 따라 부분금형과 충분금형을 적용할 필요도 있다. <Figure 4>의 (a)와 같이 음각성형에서 다이가 전혀 사용되지 않는 것을 무금형(no die) (c)



<Figure 4> Various Forming Dies

와 같이 금형이 사용될 경우 충분금형(full die)로 구분한다. 그리고 양각성형에서는 어떤 형태의 지지대가 필요하므로 (b)와 같은 부분성형(partial die)와 (d)와 같은 충분금형(full die)으로 분류된다.

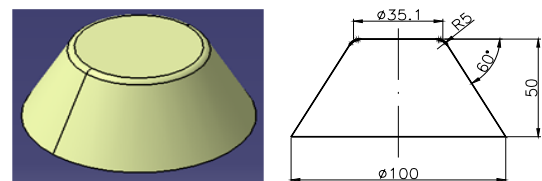
(4) 공구 경로

등고선 공구경로는 성형깊이를 일정하게 유지하면서 Z축을 따라 단계적으로 성형하면서 내려가는 방법으로서 경로는 매번 폐곡선을 그린다. 스파이럴 공구경로는 나선형으로 단위성형 깊이 만큼씩 내려가면서 연속으로 돌아가며 윤곽을 성형하는 방법이다.

3. 점진성형의 실험

3.1 실험용 성형 형상 및 점진성형 장비

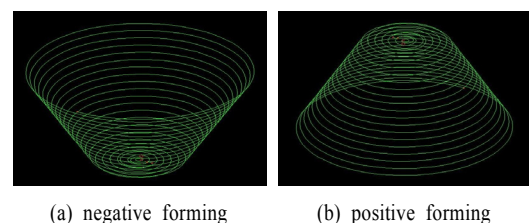
본 연구에의 실험에 사용한 성형품의 형상은 <Figure 5>와 같이 원추대(a cone frustum)로서 측면 경사각은 60도이다.



<Figure 5> Shape Used for the Experiments

그리고 본 실험에서 사용되는 장비는 점진성형 전용기인 일본 AMINO사의 DLNC-PA이다. 이 장비는 양·음각성형이 모두 수행 가능하며 최대 성형 사이즈 1,000×900 mm, 성형깊이는 300mm이다. 실험용 소재는 내식성이 강하고 절삭성이 우수한 AL 1050-H16을 사용하였다.

측면의 표면거칠기를 측정했던 기존 연구[10]에서는 바닥면을 성형하지 않았지만 본 연구에서는 공구와 접촉되지 않은 바닥면이 형상 치수 정밀도에 미칠 가능성이 크기 때문에 <Figure 6>과 같이 음·양각 성형 모두 바닥면까지 공구경로가 생성되도록 하였다.



<Figure 6> Forming Tool Paths Including a Bottom Surface

3.2 실험 계획

실험의 계획 및 분석을 위하여 실험의 횟수를 줄이고자 실험계획법의[8] 2수준계 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용하였다. 제 2장에서 정의한 7가지 공정 변수를 실험의 인자로 선정하고 각 인자의 수준은 <Table 1>과 같이 2가지 수준을 적용하였다.

<Table 1> Factors and Their Levels

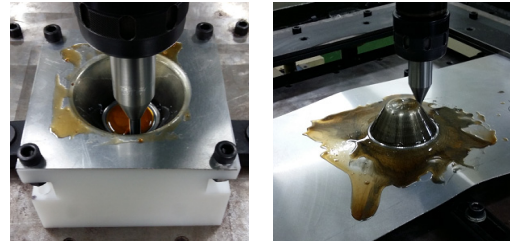
Factor	Level 1	Level 2
tool feed	2,000m/min	4,000m/min
tool diameter	5mm	10mm
step depth	0.3mm	0.9mm
material thickness	0.8mm	1.2mm
forming method	positive	negative
die existence	no die(partial)	full die
tool path method	constant z	spiral

이와 같은 인자들과 각 인자의 수준에 기준한 $L_8(2^7)$ 직교배열표의 8번의 실험 조건이 <Table 2>에 나타나 있다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 점진성형 실험결과

위의 <Table 2>의 실험조건에 의해 8번의 점진성형 실험을 실시하였다. <Figure 7>(a)는 음각 점진성형의 모습을, <Figure 7>(b)는 양각 점진성형의 모습을 보여주고 있다. 음각성형은 판재물의 네 모서리를 볼트로 고정하여 비교적 간단하게 성형이 가능한 반면 양각성형에서는 가이드를 따라 움직이는 작업베드에 판재물을 고정하여야 하므로 성형에 참여하지 않는 소재의 비율이 많게 된다.



(a) negative forming (b) positive forming

<Figure 7> Two Incremental Forming Methods

성형 실험을 통해 얻어진 결과물의 모습이 <Figure 8>에 나타나있다. 판재물 외곽의 구멍은 음각 성형에서 소재를 고정시키기 위한 볼트 구멍 자리이다.



<Figure 8> Experimental Forming Results

4.2 형상치수 정밀도 측정

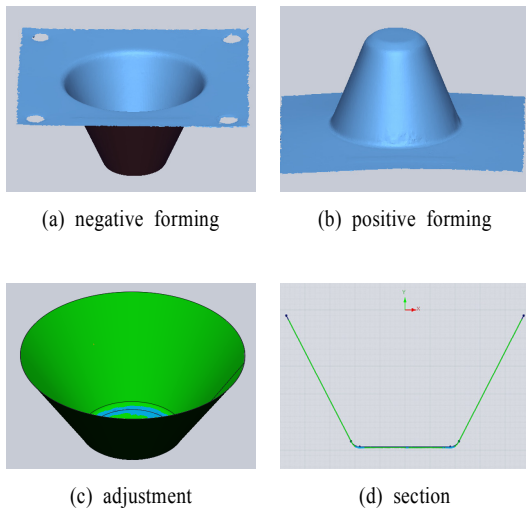
형상치수 정밀도는 스프링 백 등의 원인으로 성형물이 실제 도면 치수로부터 벗어난 정도를 말한다. 형상치수 정밀도 측정을 위하여 3차원 스캐너를 이용하였다. 3차원 스캐너는 독일 Breuckmann사의 제품이 사용되었으며 정밀도 분석은 3D Systems사의 Geomagic S/W를 이용하였다.

<Figure 9>(a)에 음각성형, (b)에는 양각성형 결과물에 대한 초기 스캔데이터가 나타나 있다. 성형되지 않은 원소재 부분까지 포함된 스캔데이터에는 많은 노이즈가 들

<Table 2> Experimental Forming Conditions

No.	Feed (m/min)	Tool Diameter (mm)	Step Depth (mm)	Material Thickness	Forming Method	Die Existence	Tool Path Method
1	2,000	5	0.3	1.2t	neg.	full	con. z
2	4,000	5	0.3	0.8t	pos.	full	spiral
3	2,000	10	0.3	1.2t	neg.	no	spiral
4	4,000	10	0.3	0.8t	pos.	partial	con. z
5	2,000	5	0.9	1.2t	pos.	partial	spiral
6	4,000	5	0.9	0.8t	neg.	no	con. z
7	2,000	10	0.9	0.8t	pos.	full	con. z
8	4,000	10	0.9	1.2t	neg.	full	spiral

어가 있기 때문에 CAD 데이터와의 비교를 위해서 필요한 부분만 남기고 나머지는 삭제하는 것이 필요하다. <Figure 9>(c)는 삭제한 후의 스캔데이터와 <Figure 5>의 CAD 데이터를 정합시킨 모습이다. <Figure 9>(d)는 정합된 두 단면의 모습이다. 기존 연구[11]에서 제시한 바와 같이 경사면과 바닥면의 경계 위치에서 많은 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다.



<Figure 9> Dimensional Comparison between Nominal and Measurement Data

성형치수 오차는 전체를 대상으로 하거나 섹션을 대상으로 구할 수도 있다. 본 연구에서는 전체 형상물에 대하여 Geomagic Verify에서 제공하는 RMS(Root Mean Square) 값을 사용하였다. RMS는 통계적으로 다음의 식 (1)로 정의되며 여기서 x_i 는 측정 데이터와 원 CAD 모델 데이터와의 차를 나타낸다.

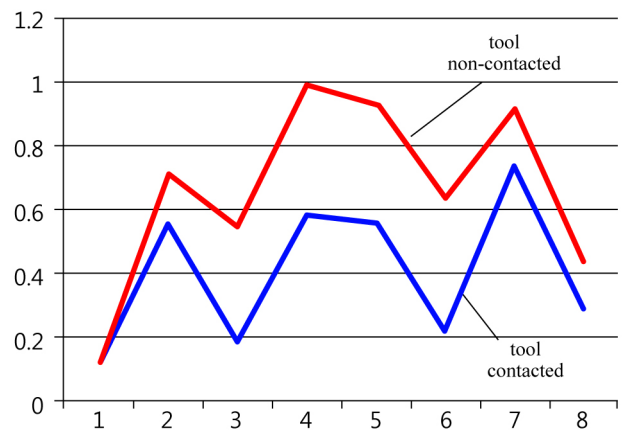
$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

그리고 3차원 스캔은 형상의 내면과 외면 모두에 대하여 실시하였다. 음각성형에서는 형상의 내면이 공구가 직접 닿은 성형 면이 되고 양각성형에서는 형상의 외면이 성형 면이 된다. 본 연구에서는 기존 연구[12]에서 사용한 표현으로서 성형 면을 tool contacted surface, 성형 반대면을 tool non-contacted surface으로 구분하여 표현하였다. <Table 3>에는 성형 면과 성형 반대면의 형상 치수 정밀도의 측정값이 나타나 있다.

성형 면과 성형 반대면의 형상 치수오차의 전체적인 특징을 알아보기 위하여 각 실험별로 비교 그래프를 <Figure 10>와 같이 나타내어 보았다.

<Table 3> Results of Dimensional Shape Error(mm)

No.	Tool Contacted Surface	Tool Non-Contacted Surface
1	0.1172	0.1180
2	0.5567	0.7096
3	0.1870	0.5476
4	0.5831	0.9971
5	0.5549	0.9323
6	0.2170	0.6331
7	0.7368	0.9142
8	0.2838	0.4391



<Figure 10> Dimensional Error Graph of Two Formed Surfaces

성형 면과 성형 반대면의 형상 치수 오차는 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며 성형 반대면이 전체적으로 성형 면에 비하여 더 큰 성형오차를 보이고 있다. 어떤 공정 요인이 치수오차의 차이를 가져오는 가를 알아보기 위해서는 ANOVA 분산분석이 필요하다.

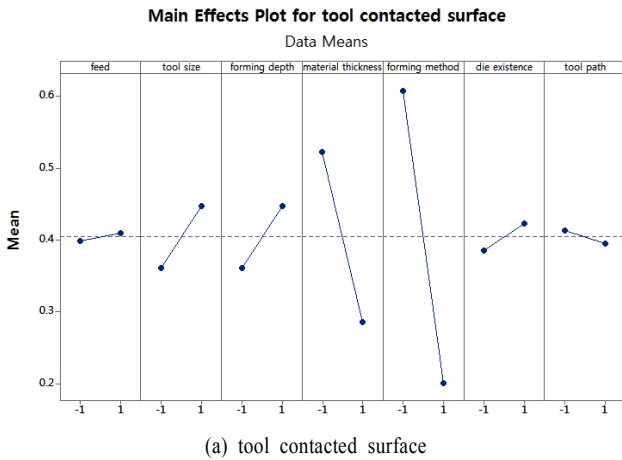
4.3 분산분석(ANOVA)

위의 <Table 3>의 실험결과를 상용 통계 분석 S/W인 MINITAB을 이용하여 분산분석을 하였다. 유의수준 오차는 5%로 정하고 분석에서 P값이 0.05 이하이면 해당 공정 변수를 유의한 요인으로 판정하였다.

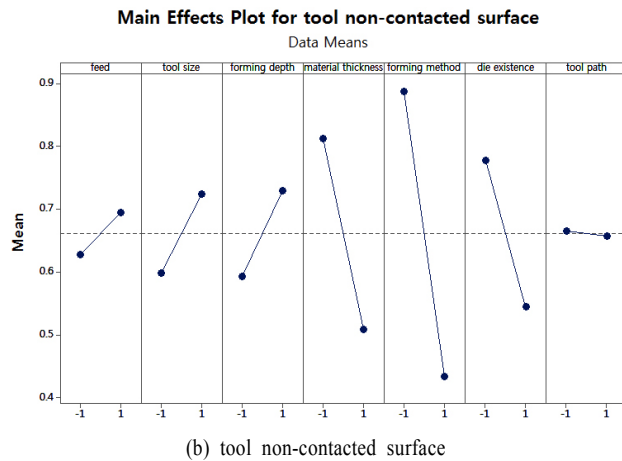
형상오차 측정 결과를 분석하여 공구가 접촉한 성형 면의 주 효과 그래프를 <Figure 11>(a)에, 성형 반대면의 주 효과 그래프를 (b)에 나타내었다.

주효과 그래프에서 기울기가 큰 인자는 수준에 따른 형상 치수 정밀도에 차이가 있음을 나타내고 기울기 값이 작은 인자는 차이가 적음을 나타낸다.

본 연구에서 사용한 $L_8(2^7)$ 실험은 7인자에 대하여 8번의 실험을 하기 때문에 분산분석에서 오차항의 자유도가



(a) tool contacted surface



(b) tool non-contacted surface

<Figure 11> Main Effect Graphs of 7 Factors

0이 되어 F-검정이 불가능하게 된다. 따라서 <Figure 11>에서 성형 면과 성형 반대면 양쪽 모두 그래프의 경사가 가장 완만하고 1차 분산분석에서 MS값이 가장 작은 공구이송속도와 공구경로 인자를 오차항으로 풀링(pooling)한 뒤 2차 분산분석을 실시하였다.

분산분석에서 풀링은 검정의 검출력(power of test)을 높이기 위해 주효과나 교호작용 효과 중에 유의하지 않은 인자를 오차항에 포함시켜 오차항의 자유도를 높게 하는 것이다.

<Table 4> ANOVA Table for Tool Contacted Surface

Source	DF	SS	MS	F	P
Tool Diameter	1	0.0149	0.0149	33.33	0.029*
Forming Depth	1	0.0152	0.0152	34.03	0.028*
Thickness	1	0.0031	0.0031	7.04	0.118
Forming Method	1	0.3307	0.3307	741.14	0.001*
Die Existence	1	0.0029	0.0029	6.52	0.125
Residual Error	2	0.0009	0.0005		
Total	7				

성형 면에 대한 풀링 후 2차 분산분석의 결과가 <Table 4>에 나타나 있으며 공구직경, 단위성형 깊이, 성형방법은 유의한 인자로 소재의 두께, 다이의 유무는 유의하지 않은 것으로 판정되었다. 유의한 인자인 공구직경은 작을수록, 단위성형 깊이도 작을수록, 그리고 성형방법은 음각성형이 더 나은 형상치수오차를 보였다.

성형 반대면에 대한 2차 분산분석의 결과는 <Table 5>에 나타나 있으며 성형방법과 다이의 유무가 유의한 인자로 판명되었고 공구직경, 성형깊이, 소재의 두께는 유의하지 않은 인자로 판정되었다. 유의한 인자인 성형방법은 음각성형이, 다이의 유무는 충분금형(full die)를 두는 것이 더 나은 결과를 나타냈다.

<Table 5> ANOVA Table for Tool Non-Contacted Surface

Source	DF	SS	MS	F	P
Tool Diameter	1	0.0319	0.0319	7.05	0.117
Forming Depth	1	0.0373	0.0373	8.26	0.103
Thickness	1	0.0126	0.0126	2.80	0.236
Forming Method	1	0.4120	0.4120	91.14	0.011*
Die Existence	1	0.1079	0.1079	23.88	0.039*
Residual Error	2	0.0090	0.0045		
Total	7	0.6108			

이 결과로부터 성형 면은 공구가 직접 접촉하기 때문에 공구직경과 단위성형 깊이 등이 주요한 인자로 작용하고, 공구가 접촉하지 않는 성형 반대면의 경우에는 다이유무가 성형 치수 정밀도에 유의한 인자로 나타난 것으로 보인다. 단 성형방법은 성형 면 성형 반대면 모두 주요한 인자로 판명되었으며 음각성형이 양각성형보다 치수 정밀도에서 더 우위인 것으로 나타났다.

5. 결론

판개 성형의 새로운 공법인 점진성형에서도 소성가공에서 발생하는 스포링 백 현상으로 성형 후 형상의 치수 정밀도가 저하되게 된다. 본 연구에서는 점진성형에서 형상 치수정밀도에 영향을 미치는 공정 변수를 알아보기 위하여 원추대 형상을 대상으로 사용자가 선택 가능한 7개의 공정 변수에 대하여 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 이용하여 실험을 실시하고 성형 면과 성형 반대 면에 대하여 각각 분산분석을 통하여 유효한 인자의 차이를 규명하였다.

성형 면의 경우에는 공구직경과 단위성형 깊이, 성형방법이 유의한 인자로 나타났다. 이는 공구직경과 단위성형 깊이가 유의한 인자로 판명되었던 기존의 연구[13]과 일치되는 결과이며 양·음각 성형방법이 유의한 공정 변수로 새롭게 추가되어야 함을 시사한다.

아울러 성형반대면의 경우에는 기존 연구에서 유의하였던 공구직경과 단위성형 깊이가 유의하지 않은 인자로 판명되었으며 오히려 성형방법과 다이유무가 주요한 인자로 판명되었다.

성형 면과 성형 반대면 모두에게 영향을 미치는 주요 인자는 양·음각 성형방법이며, 이송속도, 소재두께, 공구경로 방법은 치수 정밀도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

그러므로 점진성형에서 성형 치수 오차를 줄이기 위해서는 양각성형보다는 음각성형을 하는 것이 항상 좋으며 이송속도, 소재두께 및 공구경로 방법은 고려하지 않아도 좋으나 공구직경, 단위성형 깊이, 다이유무는 성형 후 주요하게 사용하는 면이 성형 면인지 또는 성형 반대면인지에 따라 신중하게 결정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 선택한 공정 변수의 주효과(Main effect)만 고려하였기 때문에 공정 변수들 간의 교호작용(Interactive effects)은 오차항에 교락되어 검증하지를 못하였다. 교호작용까지 고려하기 위해서는 실험을 횟수를 더 증가시키는 것이 필요하다. 또한 실험 형상을 원추대만 대상으로 하였기 때문에 연구결과의 일반화에 부족함이 있다.

References

- [1] Ambrogio, G. and Filice, L., Improving Industrial Suitability of Incremental Sheet Forming Process. *International Journal of Manufacturing Technology*, 2013, Vol. 58, pp. 941-947.
- [2] Ambrogio, G., Constatino, I., De Napoli, L., Filice, L., Fratini, L., and Muzzupappa, M., Influence of Some Relevant Process Parameters on the Dimensional Accuracy in Incremental Forming : a Numerical and Experimental Investigation. *Materials Processing Technology*, 2004, Vol. 153-154, pp. 501-507.
- [3] Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., and Muzzupappa, M., Application of Incremental Forming Process for High Customised Medical Product Manufacturing, *J. Mater. Process. Techno*, 162-163, 2005, pp. 156-162.
- [4] Ambrogio, G., Gagliardi, F., Bruschi, S., and Filice, L., On the High-Speed Single Point Incremental Forming of Titanium Alloys. *CIRP Annals*, 2013, Vol. 62, No. 1, pp. 243-246.
- [5] Araghi, B.T., Manco, G.L., Bambach, M., and Hirt, G., Investigation into a New Hybrid Forming Process : Incremental Sheet Forming Combined with Stretch Forming. *CIRP Annals*, 2009, Vol. 58, No. 1, pp. 225-228.
- [6] Cavaler, L.C.C., Schaeffer, I., Rocha, A.S., and Peruch, F., Surface Roughness in the Incremental Forming of AISI 304L Stainless Steel Sheets. *Far East Journal of Mechanical Engineering and Physics*, 2010, Vol. 1, No. 2, pp. 87-98.
- [7] Hou, X.Y. and Jung, J.Y., Surface Roughness of Turned Aluminum in MQL. *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2011, Vol. 34, No. 1, pp. 52-59.
- [8] Jang, D.H., Mutual Information as a Criterion for Evaluating the Degree of the Orthogonality of Nearly Orthogonal Arrays. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2008, Vol. 36, No. 13, pp. 13-20.
- [9] Jeswiet, J., Micari, F., Bramley, A., Dufflou, J., and Allwood, J., Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals*, 2005, Vol. 54, No. 2, pp. 88-114.
- [10] Lee, K. and Kang, J.G., Influence of the Part Shape Complexity and Die Type on Forming Accuracy in Incremental Sheet Metal Forming. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 2014, Vol. 23, No. 5, pp. 513-518.
- [11] Lee, K., Lee, S., and Kang, J.G., Effective Process Parameters in Incremental Sheet Metal Forming. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 2011, Vol. 10, No. 2.
- [12] Lee, K., Oh, H., and Kang, J.G., Forming Accuracy Comparison between Positive and Negative Incremental Forming of AL 1050. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 2013, Vol. 22, No. 5, pp. 800-805.
- [13] Radu, C., Effects of Process Parameters on the Quality of Parts Processed by Single Point Incremental Forming. *Int. J. Modern Manufacturing Technologies*, 2011, Vol. 3, No. 2, pp. 91-96.
- [14] Radu, C., Eugen, H., Cristea, I., and Schnakovszky, C., Analysis of the Surface Quality of Parts Processed by Single Point Incremental Forming. *Journal of Engineering Studies and Research*, 2013, Vol. 19, No. 3, pp. 76-79.
- [15] Radu, M.C. and Cristea, I., Processing Metal Sheets by SPIF and Analysis of Parts Quality. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, Vol. 28, pp. 287-293.

ORCID

Jong-Yun Jung | <http://orcid.org/0000-0003-2621-4229>
 Jae-Gwan Kang | <http://orcid.org/0000-0003-1931-6286>