

Analysis of Shaping Parameters Influencing on Dimensional Accuracy in Single Point Incremental Sheet Metal Forming

Jae Gwan Kang* · Han Soo Kang** · Jong-Yun Jung***†

*School of Mechanical Engineering, Kyungnam University

**Department of Advanced Engineering, Kyungnam University

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

음각 점진성형에서 치수정밀도에 영향을 미치는 형상 파라미터 분석

강재관* · 강한수** · 정종윤***†

*경남대학교 기계공학부

**경남대학교 첨단공학과

***창원대학교 산업조선해양공학부

Incremental sheet forming (ISF) is a highly versatile and flexible process for rapid manufacturing of complex sheet metal parts. Compared to conventional sheet forming processes, ISF is of a clear advantage in manufacturing small batch or customized parts. ISF needs die-less machine alone, while conventional sheet forming requires highly expensive facilities like dies, molds, and presses. This equipment takes long time to get preparation for manufacturing. However, ISF does not need the full facilities nor much cost and time. Because of the facts, ISF is continuously being used for small batch or prototyping manufacturing in current industries.

However, spring-back induced in the process of incremental forming becomes a critical drawback on precision manufacturing. Since sheet metal, being a raw material for ISF, has property to resilience, spring-back would come in the case.

It is the research objective to investigate how geometrical shaping parameters make effect on shape dimensional errors. In order to analyze the spring-back occurred in the process, this study experimented on Al 1015 material in the ISF. The statistical tool employed experimental design with factors. The table of orthogonal arrays of $L_8 (2^7)$ are used to design the experiments and ANOVA method are employed to statistically analyze the collected data. The results of the analysis from this study shows that the type of shape and the slope of bottom are the significant, whereas the shape size, the shape height, and the side angle are not significant factors on dimensional errors. More error incurred on the pyramid than on the circular type in the experiments. The sloped bottom showed higher errors than the flat one.

Keywords : Incremental Sheet Forming, Shaping Dimensional Error, Experimental Design, Tables of Orthogonal Arrays

1. 서론

점진성형(Incremental sheet metal forming)은 설계형상의 3D CAD 정보로부터 점진성형에 관한 등고선 공구 경로를 추출한 뒤 판재물(blank)을 플레이트(plate)에 고정시키고 CNC 제어를 이용하여 형상을 점진적으로 성형하는 방법이다.

점진성형은 기존의 프레스 공정에서 필수적으로 요구되는 상·하 금형의 설계 및 제작에 따른 시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있어 최근 많은 연구가 행해지고 있다[1-3, 6].

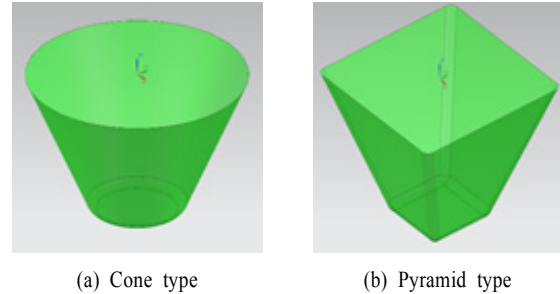
그러나 점진성형의 가장 큰 단점 중의 하나는 성형 중에 발생하는 스프링백의 영향으로 치수정밀도가 저하된다는 점이다. 절삭공정은 가공 정밀도가 우수하며 치수오차 예측이 어느 정도 가능한 반면 점진성형은 치수오차가 상대적으로 크고 그 크기를 예측하기가 용이하지 않은 문제점이 있다.

지금까지 점진 성형에서의 스프링백에 의한 치수오차에 관한 연구는 대부분 점진성형의 공정 파라미터(process parameters)와의 관계를 규명하는데 맞춰져 있다[8]. Cavalier[4]은 stainless steel 소재에 대하여 공구의 종류(직경, 코팅유무), 단위 성형깊이, 성형각도가 형상오차에 미치는 영향을 연구하였고, Radu[10, 11]은 일반강판 소재를 대상으로 공구직경, 단위 성형깊이, 이송속도, rpm을 공정 변수로 형상오차에 미치는 영향을 연구하였다. Ambrogio[2]는 알루미늄 소재를 대상으로 성형정밀도와 공정 변수와의 관계를 규명하였고 Wen[14]은 스프링백에 따른 성형치수 오차를 최소화하는 조건을 찾아낸 후 음보정(negative compensation)을 이용하여 치수정밀도를 높이는 방법을 제시하였으며 또 다른 연구[13]에서는 포밍 각이 형상의 치수오차에 미치는 영향을 분석하였다.

성형치수오차와 관련된 지금까지의 연구는 Kang and Jung[7] 대부분 <Figure 1>과 같이 단일형상(특히, (a)와 같은 원추절두체(cone frustum)에 적용된 경우가 대부분으로[5] 연구의 결과를 다양한 형상에 대하여 일반화하는 데에는 제약이 따른다. 예를 들어 Lee[8]의 연구에서도 원추절두체를 실험형상으로 무금형 음각성형과 충분금형 음각성형에는 성형오차에 큰 차이가 없다는 결론을 제시하였는데 크기나 형태가 다른 실험 형상에도 동일한 결과가 나올 수 있는 지에 대한 언급이 없다.

따라서 본 연구에서는 공정 파라미터를 대상으로 한 기존의 연구와 달리 형상의 모습(크기, 경사각, 형상 등)을 대상으로 점진 성형에 의하여 스프링백이 어떤 형상에 크게 발생하는 지에 대하여 분석하고자 한다. 실험은 전용 점진성형머신을 이용하였으며 스프링백의 측정은 비

접촉식 3차원 스캐너를, 치수 오차 분석에는 측정 데이터 전용 분석 S/W를 이용하였다.

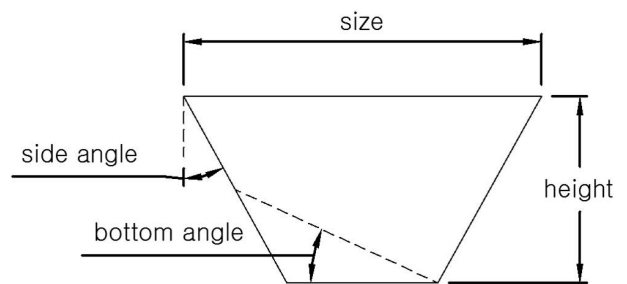


<Figure 1> Typical Experimental Forming Shapes

2. 점진성형 실험

2.1 실험용 형상

실험에 사용하는 성형 형상을 결정하는 파라미터가 <Figure 2>에 나타나 있다. 형상 파라미터로는 형상 타입(cone, pyramid), 형상 크기(size), 형상 높이(height), 옆면 테이퍼 각도(side angle), 밑면 테이퍼 각도(bottom slope angle)를 선정하였다. 형상을 결정짓는 주요 요소인 형상 지름과 높이를 기반으로 옆면의 테이퍼 각도를 추가하였으며 지지대가 없는 무금형의 특성을 고려하여 밑면 각도도 형상 파라미터[7]로 하였다. 아래 <Figure 2>에 주요 파라미터인 크기, 높이, 옆면 및 밑면 각도가 표시되어 있다.



<Figure 2> Shaping Parameters

2.2 실험의 수준 선정

위에서 선정한 5가지 파라미터를 실험 인자로 요인배치법(Factorial design)의[5] 적용을 위하여 <Table 1>과 같이 각각 2가지 수준을 설정하였다. 수준은 형상의 파라미터가 영향을 미치는지를 확인할 수 있는 범위 내에서 적절히 설정하였다.

<Table 1> Factors and Levels

Factor	Level 1	Level 2
shape type	cone	pyramid
shape size	100	150
shape height	50mm	30mm
side angle	30°	40°
bottom angle	0°	8°

2.3 실험의 방법

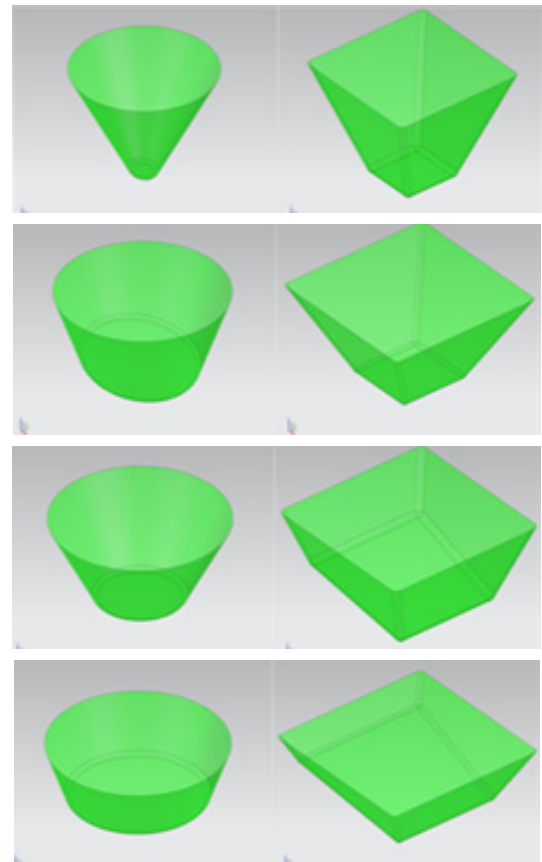
점진성형에는 양각성형(positive forming) 방법과 음각성형(negative forming) 방법이 있다. 양각성형은 성형 판재물 하단에 지지대를 두고 중앙에서 바깥쪽 방향으로 성형하는 방법이고, 음각성형은 소재의 가장자리부터 중앙부로 점진적으로 성형하는 방법이다. 양각성형이 음각성형에 비하여 성형 정밀도가 우수하다고 알려져 있으나 음각성형은 지지대와 같은 부가적인 장치 없이 일반 CNC 머신센터에서 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 음각성형 방법으로 실험을 실시하였다.

2.4 실험 계획

본 연구에서는 실험의 계획 및 분석을 위하여 실험계획법 중 하나인 2수준계 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용하였다. 직교배열표는 요인배치실험에서 사용자가 원하는 효과만을 구할 수 있도록 실험의 조건을 간단하게 제공해주는 일부실험법의 한 방법이다. 실험의 5가지 인자의 주효과를 알아보기 위하여 8번의 실험을 요구하는 $L_8(2^7)$ 직교배열표의 실험 조건이 <Table 2>에 정리되어 있고 각 실험 조건에 해당하는 실험 형상의 모습이 <Figure 3>에 나타나 있다.

<Table 2> Experimental Table

	shape type	shape size	shape height	side angle	bottom angle
1	cone	Ø100	50mm	40°	8°
2	pyramid	100	50mm	30°	0°
3	cone	Ø150	50mm	30°	8°
4	pyramid	150	50mm	40°	0°
5	cone	Ø100	30mm	40°	0°
6	pyramid	100	30mm	30°	8°
7	cone	Ø150	30mm	30°	0°
8	pyramid	150	30mm	40°	8°



<Figure 3> Eight Experimental Shapes

2.5 실험 환경

점진성형 실험에는 전용 기계인 AMINO사의 DLNC-PA(<Figure 4> 참조)를 사용하였다. 성형 조건은 공구직경 8mm, 이송속도 2,000mm/min, 단위 성형깊이 0.3mm로 일정하게 하였고 소재는 1.3t의 Al 1050-H16를 사용하였다. 성형 결과물의 형상치수오차의 측정에는 SmartSCAN 3D Scanner(<Figure 5> 참조)를 사용하였고 스캔 데이터의 분석에는 전용 S/W인 Geomagic을 사용하였다.



<Figure 4> Incremental Forming Machine(DLNC-PA)

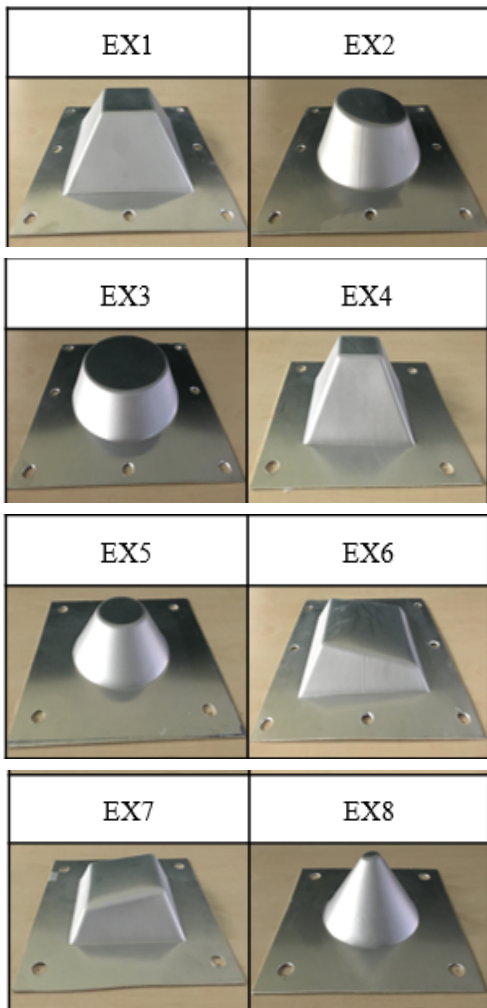


<Figure 5> 3D Scanner(Smart SCAN)

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

아래의 <Figure 6>에 8번의 성형 실험을 통해 얻어진 결과물이 순서대로 나타나 있다.



<Figure 6> Eight Experimental Results

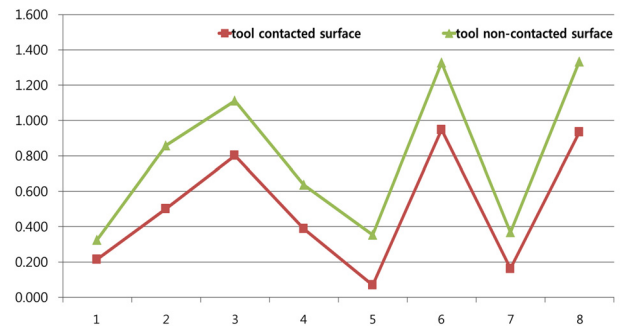
3.2 형상 치수 오차의 측정

형상의 치수오차는 성형면과 성형반대면 각각에 대하여 측정 분석하였다. 점진성형에서는 성형면이 주요면으로 사용될 수도 있지만 성형 반대면이 사용될 수도 있기 때문이다. 아래 <Table 3>은 양 면을 모두 측정한 결과이다.

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

Exp. No.	tool contacted surface	tool non-contacted surface
1	0.2163	0.3263
2	0.5027	0.8595 >
3	0.8025	1.1123
4	0.3892	0.6380
5	0.0700	0.3545
6	0.9484	1.3285
7	0.1634	0.3697
8	0.9348	1.3344

성형면과 성형반대면의 형상치수 오차의 전체적인 특징을 알아보기 위하여 각 실험별 비교 그래프를 <Figure 7>에 나타내었다.



<Figure 7> Comparison of Errors at Tool Contacted and Non-Contacted Surfaces

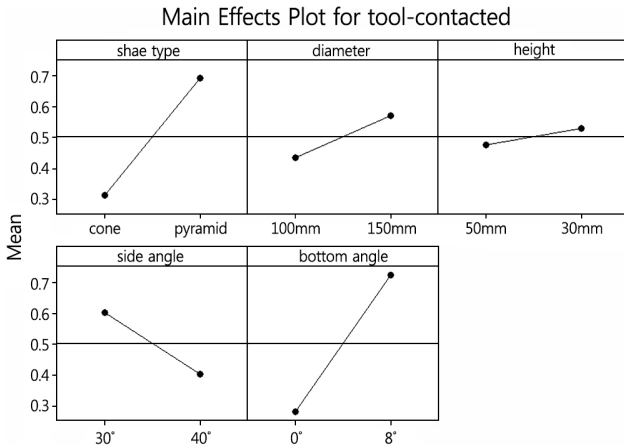
그래프를 통하여 성형면과 반대면에서 발생하는 치수 오차는 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며 성형 반대면이 전체적으로 성형면에 비하여 평균 0.48mm 정도 큰 치수오차를 보이고 있다. 이는 표면거칠기에 대한 기존의 연구결과와 유사하다[9].

3.3 분산분석(ANOVA)

실험 결과를 상용 통계분석 상용 S/W인 Minitab을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 실시하고 유의수준(significant level)은 5%로 설정하였다.

3.3.1 성형면 분석

분산분석에 앞서 주효과(Main effects) 그래프가 <Figure 8>에 나타나 있다. 그래프에서 수평선은 총 평균을 나타내고 각 점은 해당 수준에서의 평균값을 나타낸다. 그래프에서 두 점 사이의 기울기가 큰 인자는 주 효과가 수준에 따라 유효함을, 기울기 변화가 작은 경우는 상대적으로 유효하지 않는 것을 대략적으로 나타낸다.



<Figure 8> Main Effects Plot for Tool Contacted Surface

정확한 분석을 위하여 <Table 4>와 같이 분산분석(ANOVA)를 실시하였다. 그 결과 유의수준 5%에서는 유의한 인자가 나타나지 않았다.

이에 따라 주인자 중 효과가 가장 미미한 것으로 판정된 형상높이(shape height)를 오차항으로 풀링한 후 2차 분산분석을 실시하였다. 여기서 풀링(pooling)이란 F-검정 결과 유의하지 않은 주효과 및 교호작용 효과를 오차항에 넣어서 자유도가 높은 새로운 오차항을 만드는 것으로서 풀링을 실시하면 검정 검출력(power of test)이 커져 실험의 정확도가 높아지게 된다. 그 결과 <Table 5>에서 보는 바와 같이 유의수준 5%로 형상 타입과 바닥 각도가 유의한 인자로 판정되었다.

<Table 4> ANOVA Table for Tool Contacted Surface(Before Pooling)

Source	DF	SS	MS	F	P
shape type	1	0.2899	0.2899	9.17	0.094
shape diameter	1	0.0382	0.0382	1.21	0.386
shape height	1	0.0053	0.0053	0.17	0.722
side angle	1	0.0814	0.0814	2.57	0.250
bottom angle	1	0.3946	0.3946	12.49	0.072
residual error	2	0.0632	0.0316		
total	7				

<Table 5> ANOVA Table for Tool Contacted Surface(After Pooling)

Source	DF	SS	MS	F	P
shape type	1	0.2899	0.2899	12.70	0.038*
shape diameter	1	0.0382	0.0382	1.67	0.287
side angle	1	0.0814	0.0814	3.56	0.156
bottom angle	1	0.3946	0.3946	17.28	0.025*
residual error	3	0.0685	0.0228		
total	7				

3.3.2 성형반대면 분석

성형반대면에 대해서도 <Table 6>과 같이 동일한 방법으로 분산분석을 실시하였다.

<Table 6> ANOVA Table for Tool Non-Contacted Surface (Before Pooling)

Source	DF	SS	MS	F	P
shape type	1	0.4988	0.4988	6.18	0.134
shape diameter	1	0.0429	0.0429	0.53	0.542
shape height	1	0.0254	0.0254	0.32	0.631
side angle	1	0.1292	0.1292	1.60	0.333
bottom angle	1	0.4418	0.4418	5.47	0.144
residual error	2	0.1615	0.0807		
total	7	1.2995			

형상의 높이(shape height)를 1차 풀링 후의 2차 분산분석의 결과가 <Table 7>에 나타나 있다. 성형면 분석과 달리 1차 풀링 후에도 유의수준 5% 기준으로 유의한 인자가 나타나지 않았다.

<Table 7> ANOVA Table for Tool Non-Contacted Surface (After 1st Pooling)

Source	DF	SS	MS	F	P
shape type	1	0.4988	0.4988	8.01	0.066
shape diameter	1	0.0429	0.0429	0.69	0.468
side angle	1	0.1292	0.1292	2.07	0.245
bottom angle	1	0.4418	0.4418	7.09	0.076
residual error	3	0.1869	0.0623		
total	7	1.2995			

이에 따라 인자 중 효과가 가장 미미하다고 판단되는 형상지름(shape diameter)을 오차항으로 재 풀링한 후 <Table 8>과 같이 3차 분산분석을 실시하였다. 그 결과 유의수준 5%로 형상타입(shape type)과 바닥각도(bottom slope angle)가 유의한 인자로 판정되었으며 이는 성형면의 분석과 동일한 결과이다.

<Table 8> ANOVA Table for Tool Non-Contacted Surface (After 2nd Pooling)

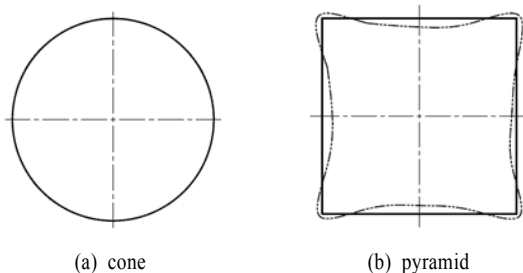
Source	DF	SS	MS	F	P
shape type	1	0.4988	0.4988	8.68	0.042*
side angle	1	0.1292	0.1292	2.25	0.208
bottom angle	1	0.4418	0.4418	7.69	0.050*
residual error	4	0.2298	0.0574		
total	7	1.2995			

4. 형상치수 오차의 원인 분석

분산분석을 통하여 5가지 파라미터 중에서 형상의 타입과 바닥 경사각이 스프링백의 크기에 영향을 미치는 인자로 밝혀졌다. 그리고 원뿔 형상보다는 피라미드형상이 형상 치수오차가 크고 바닥 경사면이 있는 경우도 없는 것보다 형상치수 오차가 더 컸다. 이 장에서는 측정데이터의 단면(section) 분석을 통하여 치수오차의 발생 원인을 알아본다.

4.1 형상의 타입

원뿔형상과 피라미드형상의 단면에서 스프링백 크기가 <Figure 9>에 나타나 있다(그림에서 오차의 양은 실제 값의 10배 큰 값으로 표현하였다). 원뿔형상(<Figure 9> (a))의 경우 측정데이터와 CAD 데이터 사이에 큰 차이가 없는 반면 피라미드형상의 경우 <Figure 9(b)>는 모서리 부분과 4개 면의 중앙부에서 오차가 많이 발생하였다.

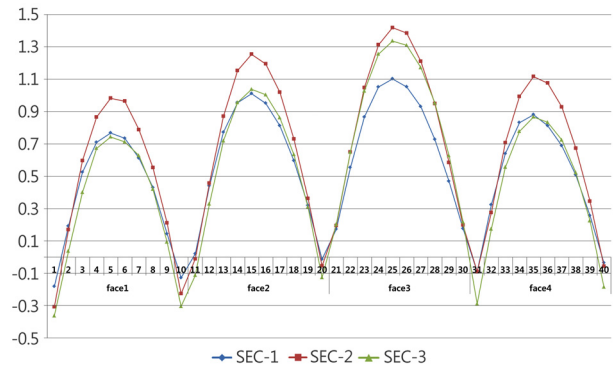


<Figure 9> Horizontal Section View of Dimensional Errors

이를 통해 피라미드형상과 같이 단면이 사각형(rectangle)인 경우는 원(circle)인 경우에 비하여 스프링백 현상이 크게 발생함을 알 수 있다.

다음 <Figure 10>은 pyramid type을 3개의 횡단면상의 치수 오차를 4각형의 둘레에 대한 상대적인 오차를 비교한 것이다. <Figure 10>의 sec. 1은 높이의 100% 위치에서의 횡단면이고 sec. 2는 85%, sec. 3은 70%에서의 횡단면이다. <Figure 10>에서 보듯이와 같이 85% 위치에서

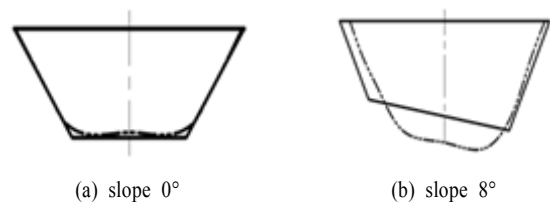
오차가 가장 크게 나타났으며 절대오차 비교에서도 sec. 2가 가장 크다.



<Figure 10> Relative Dimensional Errors at Different Heights

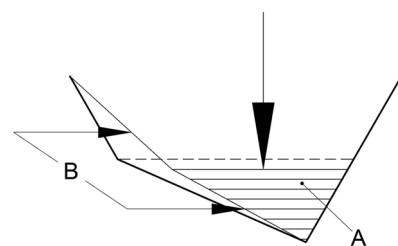
4.2 밑면 경사

밑면 경사가 0도인 경우와 8도인 경우의 단면에서의 스프링백의 크기가 <Figure 11>에 나타나 있다(그림에서 오차의 양은 실제의 10배 큰 값이다). 밑면의 경사각이 0°인 평편한 면보다 경사가 있을 경우 바닥면 성형에서 큰 오차가 나타났다.



<Figure 11> Vertical Section View of Dimensional Errors

이는 경사진 바닥면을 성형할 때 아래쪽으로 인장력이 발생해서 생기는 오차로 볼 수 있다. 즉 밑면이 평평하지 않고 경사진 경우에는 점진성형이 <Figure 12>와 같이 진행되고 공구가 아래방향으로 힘을 가하면 측면과 함께 기성형된 B부위에도 성형력이 다시 영향을 미쳐 아래쪽으로 밀려나오는 현상이 발생한 것으로 볼 수 있다.



<Figure 12> Forming Mechanism in the Area of Sloped Bottom

5. 결론

본 연구에서는 음각점진성형에서 형상이 치수오차에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 5개의 형상 파라미터(형상타입, 형상크기, 형상높이, 옆면각도, 밑면각도)를 대상으로 실험계획법의 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 이용하여 실험을 실시하고 분산분석을 통하여 유효한 인자를 규명하였다.

먼저 형상치수오차에 유의한 영향을 미치는 인자는 형상 타입과 바닥면 각도였으며 형상크기, 형상높이, 옆면각도 등은 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 성형면 및 성형 반대면 모두 동일한 결과였다.

형상 타입의 경우 원뿔 형상이 피라미드 형상보다 치수오차가 작았으며, 바닥면 각도의 경우 평편한 바닥면이 경사진 바닥면보다 형상치수오차가 더 작은 것으로 나타났다. 피라미드 형상은 원뿔 형상에 비교하였을 때 각 면의 중앙부와 모서리부에서 스프링백에 의한 치수 오차가 많이 발생하였으며 바닥면의 경우 경사가 있을 때 성형시 발생하는 인장력으로 측면과 바닥면에서 상대적으로 큰 오차가 발생함을 확인하였다.

따라서 피라미드 형상과 같이 단면이 사각인 형상을 성형할 경우에서 스프링백을 고려한 공구경로 생성과 같은 방법[12]을 고려할 필요가 있으며 바닥면이 경사진 경우에는 바닥면 하단에 지지대 등으로 보완을 하여야 치수오차를 줄일 수 있을 것이다.

Acknowledgement

This research is financially supported by Changwon National University in 2015~2016.

References

- [1] Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., and Muzzupappa, M., Application of Incremental Forming Process for High Customized Medical Product Manufacturing, *J. of Material Processing Technology*, Vol. 162-163, 2005, pp. 156-162.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 J. of Mechanical Engineering and Physics*, 2010, Vol. 1, No. 2, pp. 87-98.
- [5] Jang, D.H., Mutual Information as a Criterion for Evaluating the Degree of the Orthogonality of Nearly Orthogonal Arrays., *J. of the Korean Society for Quality Management*, 2008, Vol. 36, No. 13, pp. 13-20.
- [6] Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., and Allwood, J., Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Annals*, 2005, Vol. 54, No. 2, pp. 88-114.
- [7] Kang, J.G. and Jung, J.Y., Effective Process Parameters on Shape Dimensional Accuracy in Incremental Sheet Metal Forming, *J. of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2015, Vol. 38, No. 4, pp. 177-183.
- [8] Lee, K.B. and Kang, J.G., Influence of the Part Shape Complexity and Die Type on Forming Accuracy in Incremental Sheet Metal Forming, *J. of Korean Society of Manufacturing Technology*, 2014, Vol. 23, No. 5, pp. 513-518.
- [9] Lee, K.B., Oh, H.M., and Kang, J.G., Forming Accuracy Comparison between Positive and Negative Incremental Forming of AL 1050, *J. of Korean Society of Manufacturing Technology*, 2013, Vol. 22, No. 5, pp. 800-805.
- [10] Radu, C., Effects of Process Parameters on The Quality of Parts Processed by Single Point Incremental Forming, *International J. of Modern Manufacturing Technology*, 2011, Vol. 3, No. 2, pp. 91-96.
- [11] Radu, C., Eugen, H., Cristea, I., and Schnakovszky, C., Analysis of The Surface Quality of Parts Processed by Single Point Incremental Forming, *J. of Engineering Studies and Research*, 2013, Vol. 19, No. 3, pp. 76-79.
- [12] Wei, H., Chen, W., and Lin, G., Spring-back Investigation on Sheet Metal Incremental Formed Parts, *International J. of Mechanical, Aerospace, Industrial, Manufacturing Engineering*, 2011.
- [13] Wen, H., Huang, S., and Shi, P., Research on Influence of Forming Angle on The Single-Point Incremental Forming Accuracy, *Forming and Stamping Technology(In Chinese)*, 2015, Vol. 40, No. 7, pp. 62-67.
- [14] Wen, H., Huang, S., Shi, P., and Du, X., Influence of Metal Sheet Incremental Forming Parameters on Spring-back Based on Orthogonal Test, *Hot Working Technology(In Chinese)*, 2015, No. 44, Vol. 15, pp. 109-115.

ORCID

- Jae Gwan Kang | <http://orcid.org/0000-0003-1931-6286>
 Han Soo Kang | <http://orcid.org/0000-0003-2777-595X>
 Jong-Yun Jung | <http://orcid.org/0000-0003-2621-4229>