

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.3.181>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

Al5052-O 판재의 최적 점진성형 연구

김찬일*† · 샤오샤오** · 도반크옹** · 김영석**

* 경북대학교 기계연구소, ** 경북대학교 기계공학부

Optimization of Single Point Incremental Forming of Al5052-O Sheet

Chan Il Kim*†, Xiao Xiao**, Van Cuong Do** and Young Suk Kim**

* Institute of Mechanical Engineering Technology, Kyungpook Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received July 19, 2016 ; Revised October 12, 2016 ; Accepted November 8, 2016)

Key Words: Incremental Forming(점진성형법), Taguchi Method(다구찌 방법), Grey Relational Optimization(그레이 관계형 최적화), Varying Wall Angle Conical Frustum(VWACF)

초록: 점진 판재 성형은 금형을 제작하지 않고 판재를 가공하는 방법으로써 빠른 시제품 제작과 소량 생산에 적합한 성형법이다. 이러한 점진 판재 성형의 공정 변수로 공구 직경, 매 스텝당 z-방향 깊이, 공구 이송 속도, 공구 회전 속도 등은 성형품의 품질에 크게 영향을 미친다. 본 연구에서는 Al5052-O(0.8mm) 판재를 사용하여 Varying Wall Angle Conical Frustum 모델의 점진성형을 실시하였으며, 각각의 변수들의 조합에서 성형성을 판단하였다. 다구찌 기법을 사용하여 점진성형 변수들의 조합을 찾아내고, 그레이 관계형 최적화를 통하여 최적 성형 변수 값의 조합을 찾아 내었다. 최종 성형물의 품질은 성형성, 스프링 백, 두께 감소량을 측정하여 판단하였다. 본 연구의 실험 조건에서의 최적의 변수 조합은 공구직경 6 mm, 회전속도 60rpm, 매 스텝당 z-방향 깊이 0.3 mm, 이송속도 500 mm/min으로 판단되었다.

Abstract: Single point incremental forming (SPIF) is a sheet-forming technique. It is a die-less sheet metal manufacturing process for rapid prototyping and small batch production. The Critical parameters in the forming process include tool diameter, step depth, feed rate, spindle speed, etc. In this study, these parameters and the die shape corresponding to the Varying Wall Angle Conical Frustum(VWACF) model were used for forming 0.8mm in thick Al5052-O sheets. The Taguchi method of Experiments of Design (DOE) and Grey relational optimization were used to determine the optimum parameters in SPIF. A response study was performed on formability, spring back, and thickness reduction. The research shows that the optimum combination of these parameters that yield best performance of SPIF is as follows: tool diameter, 6mm; spin speed, 60rpm; step depth, 0.3mm; and feed rate, 500mm/min.

- 기호설명 -

Φ : 최대 성형 각도
H : 바닥에서부터 공구 중심까지의 수직 높이
L : 전체 깊이
D : 표면에서 공구 하단까지의 길이
r : 공구반경
R : 성형 모형의 벽면 반경
Y : 실험결과와 S/N비

Z : 정상화 S/N비
GC : 그레이 관계형 계수
 n_j : 각 수준의 실험 j의 n번의 실험 횟수
G : 그레이 관계형 등급
Q : 수준별 실험 횟수

1. 서론

1.1 점진성형 기술 개요

점진성형이란 간단한 공구를 사용하여 판재에 국부적 소성변형을 연속적으로 가하여 성형하는 기술이다. Fig. 1~2에서 보여지는 바와 같이 점진성

† Corresponding Author, chanilkim@knu.ac.kr

형에서 일반적으로 CNC머신에 구형의 공구핀을 장착하고 판재의 외각 가장자리에서 클램프로 고정시킨 후 프로그램에 입력된 공구 경로에 따라 공구가 이동하면서 원하는 형상의 제품을 만든다. Leszak⁽¹⁾이 처음으로 다이 없이 성형하는 공정을 제시했지만 당시에는 기술이 발달하지 않아 직접적으로 많은 연구하지 못했다. 그러나 기술이 점점 더 발달하면서 Iseki 등⁽²⁾이 컴퓨터 수치제어에 의한 점진성형 기술을 개발했고 특허도 내었다. Jeswiet 등⁽³⁾은 점진성형 기술에 대해 소개를 하였다.

최근 점진성형에 관한 연구가 이슈가 되는 가운데 Minutolo 등⁽⁴⁾이 점진성형 최대 성형각도에 대해서 연구를 수행하였으며, Ambrogio 등⁽⁵⁾은 공정 변수가 실험결과와 정밀도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, Leon 등⁽⁶⁾과 Kim 등⁽⁷⁾이 공정변수가 점진성형의 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하였고, 공구직경, 이송속도, 회전속도, Z-방향 피치 등이 점진성형 공정에서 아주 중요한 변수라고 강조하였다. 그리고 Jeswiet 등⁽⁸⁾과 Shim 등⁽⁹⁾은 알루미늄 판재 점진성형에 대해 연구하였다. 이어서 Park 등⁽¹⁰⁾이 점진성형에서 공구회전에 의한 공구와 판재의 마찰열을 이용하여, 상온에서 성형이 어려운 마그네슘 판재를 성공적으로 성형하였고, Do 등⁽¹¹⁾은 점진성형에서 엠보싱(Embossing)이 된

알루미늄 판재를 사용하여 평평한 판재보다 성형성이 향상됨을 보여주었다. Ganesh 등⁽¹²⁾은 다구찌 방법(Taguchi method)을 바탕으로 그레이 관계형 최적화(Grey relational optimization)를 이용하여 각 변수에 대해서 평가하였고, 최적 변수 조합을 찾아내었다.

최근에 환경문제로 인해 무거운 스틸 판재 보다 가벼운 알루미늄 판재에 대한 관심이 증대되고 있으며, 대량 생산이 가능함에 따라, 본 연구에서 Al5052-O 판재를 선택하게 되었다.

1.2 연구목표

다구찌 방법은 단일 변수를 최적화 할 수 있는 실용적인 방법이지만 점진성형에서 원하는 결과를 얻기 위해 공구 직경, 이송 속도, 회전 속도, Z-방향 피치 등 많은 변수를 고려해야 한다. 그레이 관계형 최적화 기술은 다중 응답들에 대한 변수들의 상호 작용(Interrelationships among multiple responses)을 평가하여 변수들을 최적화할 수 있기 때문에 본 연구에서 이용하였다.

본 연구에서는 Al5052-O 판재를 점진성형을 할 때 성형성, 스프링백 양과 두께 감소량을 목적함수로 하여 각 변수들이 실험결과에 대해 어떤 영향을 미치는지 알아보고, 실험 결과를 통해서 최적 변수조합을 찾는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 내용

2.1 점진성형 성형성 평가

본 연구에서는 최대 성형각도로 성형성을 평가한다. Fig. 3과 같이 Jeswiet 등⁽¹²⁾이 제시한 Varying Wall Angle Conical Frustum(VWACF) 모델을 이용하였다. 이 모델에서 성형각도는 40°부터 90°까지 점점 증가하기 때문에 파단 할 때까지 식 (1)과 식 (2)를 통해 최대 성형각도 ϕ 를 한번에 도출할 수 있다는 장점이 있다.

$$H = L - D + r \tag{1}$$

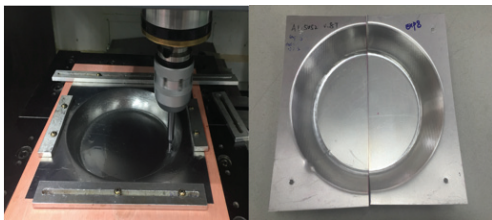


Fig. 1 General overview of the SPIF process and specimen

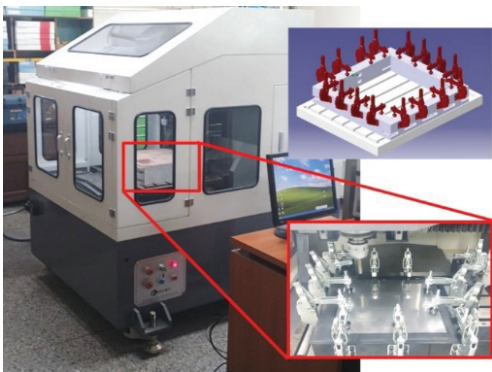


Fig. 2 CNC machine for incremental sheet forming and clamping device of sheet

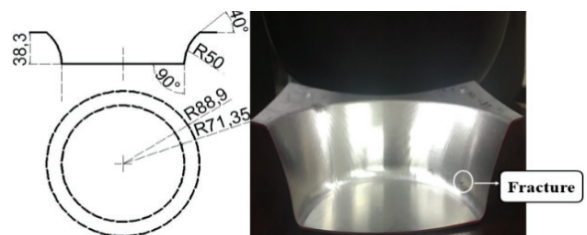


Fig. 3 Drawings of VWACF test shape and section view of formed part

Table 1 Properties of Al5052-O material

Properties	Al5052-O
Density (g/cm ²)	2.7
Young's modulus (GPa)	70
Yield strength (MPa)	183
Tensile strength (MPa)	230
Elongation (%)	11
Strain hardening exponent, n	0.1

Table 2 Level of selected parameters

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
a : Tool diameter (mm)	6	10	14
b: Spindle speed (rpm)	60	120	180
c: Step depth (mm)	0.3	0.5	0.7
d: Feed rate (mm/min)	500	1000	1500

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{H}{r+R}\right) \quad (2)$$

여기서 D 는 최종 성형 깊이이고 R 는 50mm이다. L 은 38.3mm 이며 r 는 공구직경이다.

2.2 재료의 선정

본 연구에서 두께가 0.8mm인 Al5052-O 판재를 사용하여 실험하였다. Al5052-O의 재료 물성은 Table 1에 나타내었다. 다구찌 방법을 사용하기 위한 변수는 점진 성형성에 영향을 미치는 공구의 크기, 스피들의 회전 속도, 매 스텝당 z-방향 깊이, 공구 이송 속도를 선정하였고, 각각은 다시 3가지 독립된 조건으로 교차 실험 하였다. Table 2에서 각각의 실험 변수의 조건을 정리하였다.

2.3 다구찌 방법

다구찌 방법을 사용하기 위해 Table 3과 같이 제어 및 변수를 따라서 L9 직교표를 작성하였다. 각각의 실험 조건에 따라 VWACF 모델을 사용해서 점진성형을 수행하였으며, 각각의 실험은 Fig. 4와 같이 각 실험 중에 VWACF의 밑면에서 시편에 파단이 발생하였을 때까지 성형을 진행하였다. 파단이 발생한 시점의 최종 성형 깊이 D 를 이용하여 식 (1)을 통해 H 값을 구하고, 식 (2)를 통해 성형성(최대 성형 각도)을 평가하였다.

점진성형 중 발생하는 스프링백 양의 측정은 Fig. 5와 같이 15mm 깊이에서 측정된 판재 형상과 목표 형상의 차이를 양쪽에서 측정하여 평균값으로 취하였다. 또한, 두께 감소량은 같은 위치에서

Table 3 Taguchi orthogonal array

Exp	Parameters				D (mm)	Max angle Φ (°)	Δ Spring back (mm)	Δ Thickness (mm)
	a	b	c	d				
1	1	1	1	1	30.15	77.856	0.785	0.390
2	1	2	2	2	29.45	77.080	0.760	0.410
3	1	3	3	3	29.05	76.636	0.770	0.406
4	2	1	2	3	28.45	74.336	0.885	0.402
5	2	2	3	1	30.45	76.489	1.250	0.406
6	2	3	1	2	31.65	77.771	0.910	0.401
7	3	1	3	2	29.70	74.116	1.125	0.390
8	3	2	1	3	27.50	71.803	0.940	0.399
9	3	3	2	1	30.45	74.899	0.990	0.390

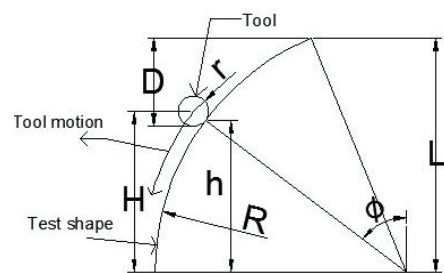


Fig. 4 Geometry used to determine the wall angle Φ for a given tool position

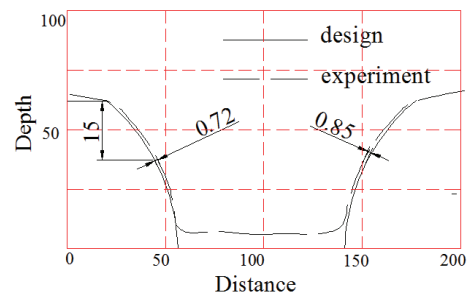


Fig. 5 Springback measurement for experiment No. 1

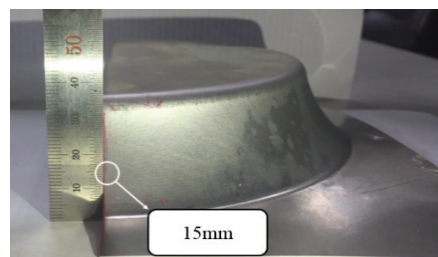


Fig. 6 Thickness measurement for experiment

Fig. 6과 같이 마이크로미터로 측정하여 평균값을 취하였다. 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 실험 결과로부터 성형성에 있어서는 실험1의 경우가 가장 큰 각도 성형되었으며, 스프링 백량은 실험2의 경우, 두께 변화량은 실험1의

경우가 가장 우수하게 나타났다.

2.4 그레이 관계형 최적화

Ganesh 등⁽¹²⁾이 제시했던 그레이 관계형 최적화 기술을 이용하여 다음의 식 (3)~(6)을 통해서 복수 응답간의 그레이 관계형 등급(G_n)을 구하였다. 여기서 변수 n_j 는 각 수준의 실험 j 의 n 번의 실험 횟수의 결과이다. Y 는 실험결과의 S/N비이고 Z 는 정상화한 S/N비이다. GC 는 그레이 관계형 계수이며 δ 는 0.5로 취하였다.

이번 연구에서 성형성(성형각도)은 클수록 좋기 때문에(망대특성) 식 (3)을 이용하였고, 반면에 스프링백 양과 두께 감소량은 작을수록 좋기 때문에(망소특성) 식 (4)를 이용하였다.

$$Z_{nj} = \frac{Y_{nj} - \min(Y_{nj})}{\max(Y_{nj}) - \min(Y_{nj})} \tag{3}$$

$$Z_{nj} = \frac{\max(Y_{nj}) - Y_{nj}}{\max(Y_{nj}) - \min(Y_{nj})} \tag{4}$$

$$GC_{nj} = \frac{Z_{\min} + \delta Z_{\max}}{Z_{nj} + \delta Z_{\max}} \tag{5}$$

$$G_n = \left(\frac{1}{Q}\right) \sum GC_{nj} \tag{6}$$

3. 결 과

3.1 S/N비와 그레이 관련 계수 계산

그레이 관계형 최적화 기법을 이용하여 그레이 관계형 계수와 등급을 Table 4에 나타내었다. 최종

그레이 관련 등급이 클수록 실험 결과가 더 우수하기 때문에 성형성, 스프링백 양, 두께 감소량을 목적함수로 하여 최적화하는 변수 조합은 실험1의 경우이다. 여기서 그레이 관계형 계수의 해석에서 성형성의 경우 큰 값 일수록 좋은 결과이기 때문에 상대적으로 그레이 관계형 계수의 값은 작아진다. 반대로 스프링백 양이나 두께 감소량의 경우 작은 값일수록 우수한 결과이기 때문에 그레이 관계형 계수의 값이 큰 실험이 더 좋은 결과라 말할 수 있다. 따라서 성형성만으로 평가할 때 실험1이 가장 좋은 결과값이고, 스프링백 양만으로 평가할 때 실험2, 두께 감소량만으로 평가할 때 실험1이 가장 좋은 결과값을 나타낸다.

3.2 각 변수들이 실험결과에 미치는 영향

Table 5는 Table 2에 나타난 각 파라미터의 레벨에 따라 Table 3의 실험 세트에서 구한 그레이 관계형 계수들의 평균값을 취해서, 각 변수의 영향을 정략적으로 평가하였다. 실험 초기에 설정한 네 가지의 변수에 있어서 그레이 관계형 등급의 최대값과 최소값의 차이가 클수록 결과에 더 많은

Table 5. 1 Average grey relational grade for each input parameters about formability

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Max-Min
Tool diameter	0.360	0.422	0.683	0.324
Spin speed	0.478	0.584	0.403	0.182
Step depth	0.556	0.464	0.445	0.112
Feed rate	0.404	0.420	0.641	0.237

Table 4 Grey relational coefficient and grade

Exp No.	S/N(*) formability	S/N(**) Δ thickness	S/N(**) spring back	Z-S/N formability	Z-S/N Δ thickness	Z-S/N spring back	GC-formability	GC-spring back	GC- Δ thickness	Grey relational grade	Rank
1	37.826	8.190	2.103	1	0	0.065	0.333	0.885	1	0.739	1
2	37.739	7.744	2.384	0.876	1	0	0.363	1	0.333	0.566	6
3	37.689	7.840	2.270	0.805	0.785	0.026	0.383	0.950	0.389	0.574	5
4	37.424	7.926	1.061	0.428	0.592	0.306	0.539	0.620	0.458	0.539	7
5	37.672	7.829	-1.938	0.781	0.809	1	0.390	0.333	0.382	0.369	9
6	37.816	7.937	0.819	0.987	0.567	0.362	0.336	0.580	0.468	0.462	8
7	37.398	8.179	-1.023	0.392	0.025	0.788	0.561	0.388	0.952	0.634	4
8	37.123	7.981	0.537	0	0.470	0.427	1	0.539	0.516	0.685	2
9	37.489	8.179	0.087	0.522	0.025	0.531	0.489	0.485	0.952	0.642	3

*: S/N ratio (dB) = (-10) * log $\sum 1 / (Y_{nj})^2$ (larger-the-better)

** : S/N ratio (dB) = (-10) * log $\sum (Y_{nj})^2$ (smaller-the better)

Table 5. 2 Average grey relational grade for each input parameters about spring back

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Max-Min
Tool diameter	0.945	0.511	0.471	0.474
Spin speed	0.631	0.624	0.672	0.048
Step depth	0.668	0.702	0.557	0.145
Feed rate	0.568	0.656	0.703	0.135

Table 5. 3 Average grey relational grade for each input parameters about thickness reduction

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Max-Min
Tool diameter	0.574	0.436	0.807	0.371
Spin speed	0.803	0.410	0.603	0.393
Step depth	0.661	0.581	1.723	1.142
Feed rate	0.778	0.584	0.454	0.324

Table 5.4 Average grey relational grade for each input parameters

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Max-Min
Tool diameter	0.626	0.456	0.654	0.197
Spin speed	0.637	0.540	0.559	0.098
Step depth	0.629	0.582	0.525	0.103
Feed rate	0.583	0.465	0.599	0.134

영향을 끼친다고 알려져 있다.

따라서 Table 5.1~3에서 나타낸 바와 같이 성형성과 스프링백 양에는 공구직경이 가장 큰 영향을 미치며, 두께 감소량에서는 매 스텝당 z-방향 깊이가 가장 큰 변수임을 확인할 수 있다. Table 5.4에서 나타낸 것처럼 본 연구에서 선택된 점진 성형의 변수들 중에서는 공구 직경이 가장 중요한 역할을 담당하는 변수라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 두께가 0.8mm인 A15052-O관재를 이용하여 VWACF 모델을 점진성형하는 경우에 성형성, 스프링백 양과 두께 감소량을 목적함수로 하여 최적 변수조합에 대한 연구하였다.

(1) 성형성, 스프링백 양, 두께 감소량을 종합적으로 평가할 때 공구직경은 6mm, 회전속도는 60rpm, Z-방향 피치는 0.3 mm, 이송속도는 500 mm/min일 때 성형품질이 제일 좋다는 것을 알 수 있었다.

(2) A15052-O 관재를 이용하여 VWACF 모델을 점진 성형하는 경우에 성형성과 스프링백 양에는 공구직경이 가장 큰 영향을 미치며, 두께 감소량에서는 매 스텝당 z-방향 깊이가 가장 큰 변수이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 중점연구지원사업(2010-0020089)과 기초연구지원사업(NRF-2013R1A1A2058808)지원에 의해 수행된 연구임.

참고문헌 (References)

- (1) Leszak, E., 1967, "Apparatus and Process for Incremental Die Less Forming," Patent US3342051 A.
- (2) Iseki, H., Kato, K. and Sakamoto, S., 1992, "Flexible and Incremental Sheet Metal Buckling used a Path-controlled Spherical Roller," *Trans. JSME*, Vol. 58, No. 554, pp. 3147~3155.
- (3) Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J. and Allwood, J., 2005, "Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, pp. 88~114.
- (4) Capece Minutolo, F., Durante, M., Formisano, A. and Langella, A., 2007, "Evaluation of the Maximum Slope Angle of Simple Geometries Carried Out by Incremental Forming Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 194, No. 1~3, pp. 145~150.
- (5) Ambrogio, G., Costantino, I., De Napoli, L., Filice, L., Fratini, L. and Muzzupappa, M., 2004, "Influence of Some Relevant Process Parameters on the Dimensional Accuracy in Incremental Forming: a Numerical and Experimental Investigation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153~154, pp. 501~507.
- (6) Leon, J., Salcedo, D., Ciaurriz, C., Luis, C. J., Fuertes, J. P., Puertas, I. and Luri, R., 2013, "Analysis of the Influence of Geometrical Parameters on the Mechanical Properties of Incremental Sheet Forming Parts," *Procedia Engineering*, Vol. 63, pp. 445~453.
- (7) Kim, Y. H. and Park, J. J., 2002, "Effect of Process Parameters on Formability in Incremental Forming of Sheet Metal," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130~131, pp. 42~46.
- (8) Ham, M. and Jeswiet, J., 2006, "Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*,

- Vol. 55, No. 1, pp. 241~244.
- (9) Shim, M. S. and Park, J. J., 2001, "The Formability of Aluminum Sheet in Incremental Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1~3, pp. 654~658.
- (10) Park, J. G., Kim, J. H., Park, N. K. and Kim, Y. S., 2010, "Study of Forming Limit for Rotational Incremental Sheet Forming of Magnesium Alloy Sheet," *Metallurgical and Materials Transaction A*, Vol. 42, pp. 97~105.
- (11) Do, V. C., Nguyen, D. T., Cho, J. H. and Kim, Y. S., 2016, "Incremental Forming of 3D Structured Aluminum Sheet," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 2, pp. 217~223.
- (12) Sundarasrinivasan, A. and Ganesh, P., 2015, "Experimental Study of Incremental Forming in Stainless Steel (AISI 316) for a Truncated Pyramid Shape," *Journal of Chemical Pharmaceutical Sciences*, Vol. 9, pp. 454~462.
- (13) Jeswiet, J., Adams, D., Doolan, M., McAnulty, T. and Gupta, P., 2015, "Single Point and Asymmetric Incremental Forming," *Advances in Manufacturing*, Vol. 3, No. 4, pp. 253~262.