

점진성형에서 표면거칠기에 영향을 미치는 공정 변수

이상윤*, 이경부**, 강재관#

(*,# 경남대학교 기계공학부, **경남대학교 대학원 첨단공학과)

Effective Process Parameters on Surface Roughness in Incremental Sheet Metal Forming

Sang-Yoon Lee*, Kyeong-Bu Lee**, Jae-Gwan Kang#

(Received 23 September 2014; accepted 28 December 2014)

ABSTRACT

Incremental forming is a relatively novel sheet forming process, in which parts can be formed without the use of dedicated dies. In this paper, the influence of the process parameters (tool diameter, step size, feed rate, existence of a die, forming methods, and kinds of tool path) on surface roughness in the case in which parts are processed by incremental forming was discussed. Al 1050 material is used in the experiments. A table of orthogonal arrays is used to design the experiments and the ANOVA method is employed to statistically analyze the results. The obtained results show that the process parameters of tool diameter, step size, and the existence of a die have a significant effect on the surface roughness, whereas the feed rate, forming methods and kinds of tool path are insignificant

Key Words : Incremental forming(점진성형), Surface roughness(표면 거칠기), Positive and negative forming(양·음각성형), Experimental design(실험계획법), Tables of orthogonal arrays(직교배열표)

1. 서 론

점진성형(Incremental sheet metal forming)은 설계형상의 3D CAD 정보로부터 점진성형에 관한 등고선 공구 경로를 추출한 뒤 Fig. 1과 같이

판재물(blank)을 플레이트(plate)에 고정시키고 CNC제어를 이용하여 형상을 점진적으로 성형하는 방법이다.

점진성형에서는 구형타입의 공구(spherical type tool)가 사용되게 되며 공구가 판재에 접촉된 상태로 등고선 공구경로를 따라 판재물을 상부에서 하부로 점진적으로 강압하면서 성형을 수행한다.

점진성형은 기존의 프레스 공정에서 필수적으로 요구되는 상·하 금형의 설계 및 제작에 따른 시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있어 최근 많은 연구가 행해지고 있다^[1-4]. Fig. 2는 상용화된

* Division of Mechanical Engineering, Kyungnam University

** Dept. of Advanced Engineering, Graduate School, Kyungnam University

Corresponding Author : Division of Mechanical Engineering, Kyungnam University
E-mail : jkkang@kyungnam.ac.kr

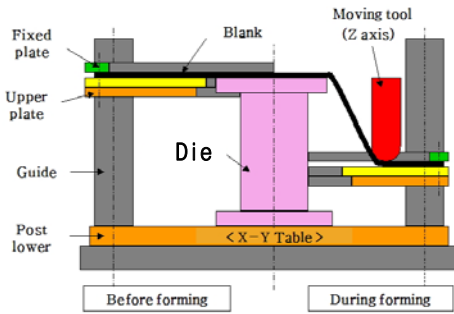


Fig. 1 Principle of incremental forming



Fig. 2 Various incremental forming products

CNC 포밍 머신으로 성형된 다양한 제품의 형상을 보여주고 있다.

점진성형은 금형 없이도 판재물을 성형할 수 있다는 장점이 있는 반면에 공구가 직접 판재물에 접촉하여 국부적으로 성형하는 방식이기 때문에 판재 표면에 공구자국이 남아 성형 후 제품의 표면조도가 크게 나빠지게 된다. 이에 따라 점진성형 후 우수한 표면 품질을 얻기 위해서는 성형에 앞서 공정 변수(process parameters)를 잘 선택하는 것이 매우 중요하다.

지금까지 절삭가공에서의 표면거칠기에 관한 연구는 많이 수행된 반면 점진 성형에서의 표면거칠기에 관한 연구는 제한적이다. Cavaler 등^[5]은 SUS소재에 대하여 공구의 종류(직경, 코팅유무), 단위성형깊이, 성형각도가 표면거칠기에 미치는 영향을 연구하였고, Radu 등^[6,7]은 일반강판소재를 대상으로 공구직경, 단위성형깊이, 이송속도, rpm을 공정 변수로 하여 표면거칠기에 미치는 영향을 연구하였다. 그리고 Lee^[8] 등은 Al 1050소재에 대하여 양-음각 점진성형에서 공구접촉면과 비접촉

면의 표면조도 차이를 연구하였다.

그러나 지금까지 점진성형에서 고려한 공정변수는 절삭공정에서와 매우 유사한 이송률, RPM, 공구직경, 단위성형깊이 등만을 대상으로 하였다. 점진성형이 동작 메커니즘에 있어 CNC 절삭과 유사한 점이 많지만 점진성형에는 다른 공정 변수들이 많이 존재한다. 예를 들어 양각점진성형 및 음각점진성형방법은 점진성형에서 사용자가 사전에 선택할 수 있는 대안 중의 하나이며 공구경로 방식, 그리고 판재 하단에 설치하는 다이(die)의 유무 등도 성형 품질에 영향을 줄 수 있다는 측면에서 공정변수들이다.

따라서 본 연구에서는 점진성형에서 표면거칠기에 영향을 미치는 공정 변수가 어떤 것이 있는지를 알아보기 위하여 기존의 성형속도, 공구직경, 단위성형깊이 외에 양-음각 성형방법, 공구경로방식, 다이 설치유무, 소재 두께 등을 추가로 공정 변수로 선정하였다.

2. 점진성형의 공정변수

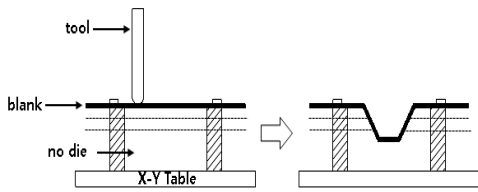
2.1 이송속도와 단위성형깊이

절삭가공에서 3대 공정변수는 이송속도, 공구회전속도, 그리고 절삭깊이이다. 그러나 점진성형에서는 공구를 회전시키는 것이 큰 이점이 없기 때문에 공구회전속도는 공정 변수에서 제외한다. 그리고 절삭가공에서 절삭깊이에 해당되는 점진성형에서의 성형깊이를 본 연구에서는 단위성형깊이(step size)로 표현하도록 한다.

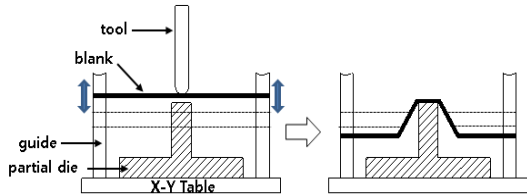
2.2 음각성형과 양각성형

점진성형의 방법에는 음각점진성형(이하 음각성형)과 양각점진성형(이하 양각성형)이 있다. 음각성형은 Fig. 3(a)와 같이 판재물과 공구의 접촉으로 형상물의 윤곽 부위부터 점진적으로 성형하여 최종형상을 만드는 방법으로서 기존의 CNC 밀링 머신 또는 머시닝센터에서 간단하게 구현할 수 있다.

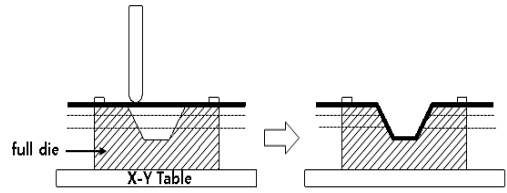
양각성형은 Fig. 3(b)와 같이 판재물과 공구의 접촉으로 형상물 중심부위부터 외곽방향으로 점진적으로 성형하여 최종형상을 만드는 방법으로 음각성



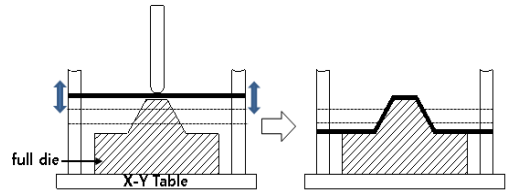
(a) Negative forming without die



(b) Positive forming with a partial die



(a) Negative forming with a full die



(b) Positive forming with a full die

Fig. 4 Incremental forming with a full die

Fig. 3 Incremental forming methods

형에 비하여 작업베드를 상하 운동을 시킬 수 있는 가이드 장치와 일정한 압력을 유지하게 하는 공압 장치 등이 부가적으로 필요하다. 성형비용이 증가하는 단점이 있지만 성형 품질이 음각성형에 비하여 우수하다고 알려져 있다^[1].

2.3 무금형, 부분금형, 충분금형

점진성형에서는 성형에 필요한 다이틀을 사용하지 않는 것(무금형)이 원칙이다. 따라서 Fig. 3(a)와 같이 음각성형에서 판재물 하단에 어떤 지지물도 두지 않고 성형하는 경우를 무금형(no die)이라고 부른다.

그러나 양각성형에서는 지지물을 두지 않을 경우 성형 자체가 불가능하기 때문에 하단에 판재물을 지지할 수 있는 최소한의 지지대를 두게 되는데 이를 부분금형(partial die)이라고 한다.

이와 반대로 충분금형(full die)은 Fig. 4(a), (b)와 같이 판재물 하단에 최종형상물과 일치하는 형상의 지지대를 두는 경우로서 제품의 형상 복잡도가 높을 경우 무금형 또는 부분금형으로는 성형 후 형상의 정밀도를 보장할 수 없기 때문에 충분 금형을 사용하는 것이 필요하다고 알려져 있다^[9].

2.4 공구 경로

점진성형에서는 형상물의 윤곽을 따라 CNC 제어로 하부 방향으로 강압하며 순차적으로 성형하는 것이 필요하기 때문에 일반 절삭가공에서는 잘 사용하지 않는 등고선 공구경로(constant z) 또는 스파이럴(spiral) 공구경로를 사용한다.

등고선 공구경로는 Fig. 5(a)와 같이 성형깊이를 일정하게 유지하면서 Z축을 따라 단계적으로 성형하는 방법이다. 등고선 공구경로는 각 단계에서의 공구 진입 위치의 x, y좌표값이 일정하기 때문에 성형 후 공구 진입자국이 남는 단점이 있다.

이에 반하여 스파이럴 공구경로는 Fig. 5(b)와 같이 나선형으로 성형깊이 만큼 비틀려 돌아가면서



(a) Constant z

(b) Spiral

Fig. 5 Kinds of tool path

윤곽을 성형하는 방법으로서 공구진입 자국이 없어지는 장점이 있는 반면 성형 후 형상의 뒤틀림이 나타날 수 있다.

3. 점진성형의 실험

3.1 실험용 성형 형상 및 점진성형 장비

먼저 본 연구에서 실험에 사용한 성형 형상의 도면은 Fig. 6과 같이 원추대(a cone frustum) 형상이며 경사각은 60도이다.

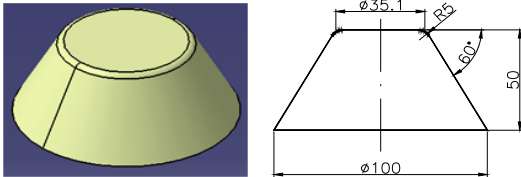


Fig. 6 CAD models used for the experiments

점진성형에는 점진성형 전용 기계인 일본 AMINO사의 DLNC-PA를 사용하였다. 전용기는 양각 및 음각 성형 모두가 가능한 기계이다. 사용된 전용기의 세부 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Machine specifications

Items	Spec.
Max blank size(mm)	1,100 × 900 mm
Max forming size(mm)	1,000 × 900 mm
Max forming depth(mm)	300 mm

실험용 소재로는 내식성이 강하고 절삭성이 우수한 Al 1050-H16을 사용하였으며 성형 결과물의 표면거칠기 분석에는 Mitutoyo사의 SV-C3000H4를 사용하였으며 표면거칠기 값으로는 중심선평균거칠기(Ra)를 이용하였다.

3.2 인자와 수준 선정

표면거칠기에 영향을 미칠 것으로 예상되는 7가지 공정변수인 이송속도(feed), 공구직경(tool size), 단위성형깊이(step size), 소재두께(material thickness), 성형방법(forming method), 다이유무(die existence),

공구경로방식(kinds of tool path)를 실험의 인자로 선정하고 각 인자에 대하여 Table 2와 같이 2가지 수준을 정하였다.

3.3 실험 계획

본 연구에서는 실험의 계획 및 분석을 위하여 실험계획법의 2수준계 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 사용하였다. 직교배열표는 요인실험에서 사용자가 원하는 효과만을 구할 수 있도록 실험의 조건을 간단하게 제공해주는 일부실험법의 한 방법이다. 8번의 실험을 요구하는 $L_8(2^7)$ 직교배열표의 실험 조건이 Table 3에 정리되어 있다.

Table 2 Factors and levels

Factor	Level 1	Level 2
feed	2,000 m/min	4,000 m/min
tool size	5 mm	10 mm
step size	0.3 mm	0.9 mm
material thickness	1.0 t	1.5 t
forming methods	positive	negative
die existence	no die(partial)	full die
kinds of tool path	constant z	spiral

Table 3 Experimental forming conditions

no	feed (m/min)	tool size (mm)	step size (mm)	material thickness (mm)	forming methods	die existence	tool path
1	2000	5	0.3	1.5	neg.	full	con. z
2	4000	5	0.3	1.0	pos.	full	spiral
3	2000	10	0.3	1.0	neg.	no	spiral
4	4000	10	0.3	1.5	pos.	partial	con. z
5	2000	5	0.9	1.5	pos.	partial	spiral
6	4000	5	0.9	1.0	neg.	no	con. z
7	2000	10	0.9	1.0	pos.	full	con. z
8	4000	10	0.9	1.5	neg.	full	spiral

4. 실험결과 및 분석

4.1 점진 성형 실험결과

점진성형의 실험은 Table 3의 실험조건에 의해 실시하였으며, Fig. 7은 실험 조건들 중에서 층분

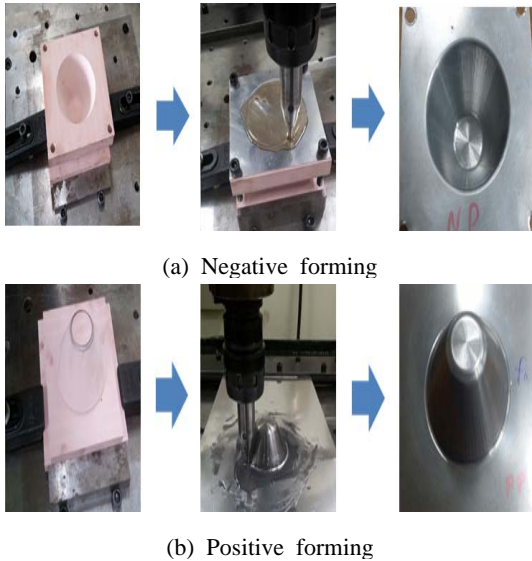


Fig. 7 Incremental forming process

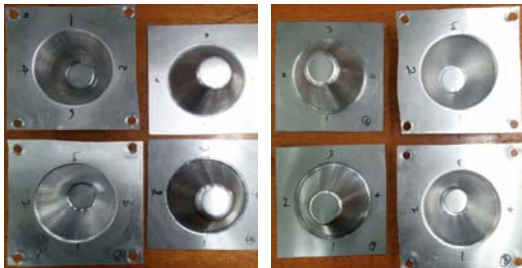


Fig. 8 Experimental results

금형으로 음각성형(a)과 양각성형(b)를 행하고 있는 모습이다. 또한 Fig. 8은 8번의 성형 실험을 통해 얻어진 결과물의 모습이다.

4.2 표면거칠기 측정

점진 성형의 특징상 바닥면은 공구가 접촉하지 않기 때문에 형상의 경사면에 대해서만 표면거칠기를 측정하였다.

공구가 직접 판재물에 접촉되는 면은 음각성형과 양각성형이 서로 반대이므로 Fig. 9와 같이 음각성형의 경우에는 내면, 양각성형의 경우에는 외면을 90도 간격으로 4개의 영역에서 측정하였으며 측정값은 중심선 평균 거칠기(Ra)값을 사용하

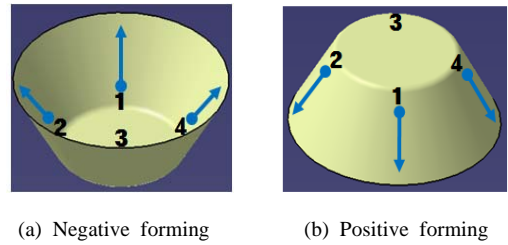


Fig. 9 Surface roughness measurement strategies

Table 4 Result of surface roughness measurement(μm)

no	1	2	3	4	avg.
1	0.801	0.904	0.842	0.888	0.859
2	0.688	0.822	0.742	0.751	0.751
3	0.402	0.417	0.346	0.355	0.380
4	0.433	0.405	0.399	0.408	0.411
5	2.634	2.655	2.634	2.676	2.650
6	2.200	2.459	2.339	2.422	2.355
7	0.987	0.946	0.951	0.939	0.956
8	1.102	1.099	1.071	0.937	1.052

였다. 4개 영역의 측정값과 평균값이 Table 4에 나타나 있다.

4.3 분산분석(ANOVA)

실험 결과에 대하여 상용소프트웨어인 MINITAB을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 유의수준(significant level)은 5%로 설정하였으므로 P값이 0.05보다 작은 값이면 해당인자가 유의하다고 판단한다.

1차 분산분석을 실시한 분산분석표(ANOVA table)가 Table 5에, 주효과 그래프가 Fig. 10에 나타나 있다. 주효과 그래프에서 수평선은 총평균을 나타내고 각 점은 해당 수준에서의 평균값을 나타낸다. 그래프에서 두 점사이의 기울기가 큰 경우의 인자(공구직경, 성형깊이, 다이유무)와 기울기 변화가 작은 인자(이송속도, 소재두께, 성형방법, 공구경로방법)를 구분되었다.

Table 5의 분산분석표에서 F값과 P값이 나오지 않은 것은 7인자에 대하여 8번만의 실험은 오차항의 자유도(DF : degree of freedom)를 0으로 만들기 때문이다. 이에 따라 Fig. 10에서 그래프의 경

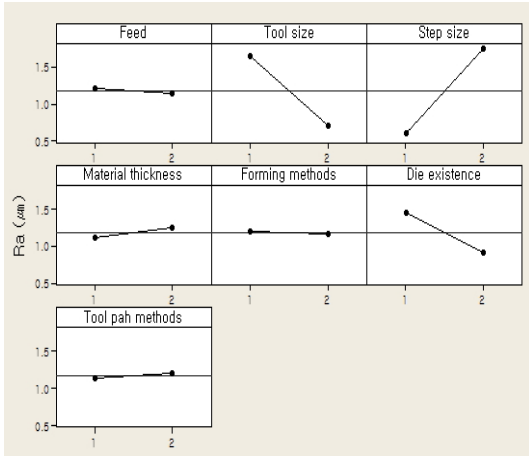


Fig. 10 Main effects plots for 8 factors

Table 5 ANOVA table

Source	DF	SS	SS	MS	F	P
feed	1	0.00952	0.00952	0.00952	**	-
tool size	1	1.82023	1.82023	1.82023	**	-
step size	1	2.65882	2.65882	2.65882	**	-
material thickness	1	0.03511	0.03511	0.03511	**	-
forming methods	1	0.00186	0.00186	0.00186	**	-
die existence	1	0.59296	0.59296	0.59296	**	-
tool path	1	0.00797	0.00797	0.00797	**	-
residual error	0	*	*	*	**	-
total	7	-	-	-	-	-

사가 가장 완만하고 Table 5에서 MS값이 가장 작은 인자인 성형방법(=0.00186)과 공구경로(=0.00797) 인자를 오차항으로 풀링한 뒤 2차 분산 분석을 실시하였다.

여기서, 풀링(pooling)이란 F-검정 결과 유의하지 않은 주효과 및 교호작용 효과를 오차항으로 넣어서 자유도가 높은 새로운 오차항을 만드는 것으로서 풀링을 실시하면 검정 검출력(power of test)의 커져 실험의 정확도가 높아지게 된다.

1차 풀링 후의 2차 분산분석의 결과가 Table 6

Table 6 ANOVA table after error terms pooling

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
feed	1	0.0095	0.0095	0.0095	1.94	0.298
tool size	1	1.8202	1.8202	1.8202	371.53	0.003**
step size	1	2.6588	2.6588	2.6588	542.70	0.002**
material thickness	1	0.0351	0.0351	0.0351	7.17	0.116
die existence	1	0.5930	0.5930	0.5930	121.03	0.008**
residual error	2	0.0098	0.0098	0.0098	-	-
total	7	5.1264	-	-	-	-

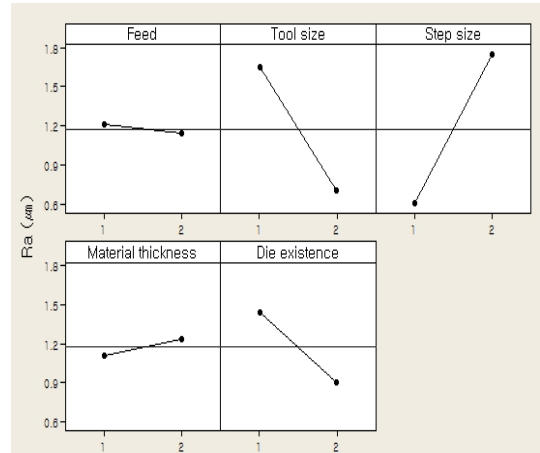


Fig. 11 Main effects plots for 6 factors

에 나타나 있으며 공구직경, 단위성형깊이, 다이유무는 유의한 인자로 이송속도와 소재두께는 추가로 유의하지 않은 인자로 판정되었다.

그리고 유의한 3개의 인자에 대해서는 Fig. 11의 주효과 그래프로부터 공구 직경은 클수록, 성형깊이는 작은 값일수록, 그리고 다이는 두는 경우가 표면거칠기에 더 좋은 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

5. 결론

점진성형에서는 성형공구와 판재물 사이에 지속적인 마찰이 일어나기 때문에 성형 후 점진성형

면의 표면거칠기가 크게 나빠지게 된다.

본 연구에서는 점진성형에서 표면거칠기에 영향을 미치는 공정 변수를 알아보기 위하여 점진성형에서 사용자가 선택할 수 있는 7개의 공정 변수를 대상으로 실험계획법의 $L_8(2^7)$ 직교배열표를 이용하여 실험을 실시하고 분산분석을 통하여 유효한 인자를 규명하였다.

먼저 점진성형에 있어서 표면거칠기에 가장 영향을 미치는 인자는 단위성형깊이, 공구직경, 다이유무이며 양-음각의 성형방법, 공구경로 방법, 이송속도, 소재 두께는 표면거칠기에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

그리고 유의한 공정변수에 대해서는 단위성형깊이는 작을수록, 공구직경은 클수록, 그리고 성형물을 지지하는 다이(die)는 충분금형을 사용할 때 표면거칠기가 더 양호해지는 것으로 나타났다.

절삭가공에서는 공구 이송속도가 표면거칠기에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만 본 연구의 결과 점진성형에서는 이송속도가 크게 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 유의한 인자로 판정되었던 기존의 연구^[7]와 배치되는 결과로서 소재 종류 또는 실험 횟수 및 실험형상의 차이 때문인지 추후 발전된 연구를 진행할 필요가 있다.

REFERENCES

- Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., Allwood, J., "Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal", CIRP Ann., 54(2), pp.88-114, 2005.
- Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., Muzzupappa, M., "Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing", J. Mater. Process. Technol. 162-163, pp.156-162, 2005.
- Araghi, B. T., Manco, G. L., Bambach, M., Hirt, G., "Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming", CIRP Ann., 58(1), pp.225-228, 2009.
- Ambrogio, G., Gagliardi, F., Bruschi, S., Filice, L., "On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys", CIRP Ann., 62(1), pp.243-246, 2013.
- 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. Eng. phys., 1(2), pp.87-98, 2010.
- Radu C., "Effects of Process Parameters on the Quality of Parts Processed by Single Point Incremental Forming", Int. J. Mod. Manuf. Technol., 3(2), pp.91-96, 2011.
- Radu C., Eugen H., Cristea I., and Schnakovszky C., "Analysis of the Surface Quality of Parts Processed by Single Point Incremental Forming", J. Eng. Stud. Res., 19(3), pp.76-79, 2013.
- 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 Soc. of Manuf. Technol., 22(5), pp.800-805, 2013.
- 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 Soc. of Manuf. Technol., 23(5), pp.32-43, 2014.