

점진성형에서 형상의 복잡도와 다이의 종류가 성형 정밀도에 미치는 영향

이경부^a, 강재관^{b*}

Influence of the Part Shape Complexity and Die Type on Forming Accuracy in Incremental Sheet Metal Forming

Kyeong-Bu Lee^a, Jae-Gwan Kang^{b*}^a Department of Advanced Engineering, Graduate School of Kyungnam Univ., 7, Kyungnamdaehakro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 631-701, Korea^b Division of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ., 7, Kyungnamdaehakro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 631-701, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	9	June	2014
Revised	18	August	2014
Accepted	25	August	2014

Keywords:

Incremental sheet metal forming
 Negative and positive forming
 Shape complexity
 Forming error

ABSTRACT

In this paper, the influence of part shape complexity and die type on forming accuracy in incremental sheet metal forming is presented. The part shape complexities are classified into two types, namely, of one and two-step shapes. Correspondingly, die types are classified into three types, namely, of no-, partial, and full die types. The experimental tests are performed separately on negative and positive forming methods. It is shown that for the one-step shape, there are no significant differences in forming errors between the cases of no- and full die types when the negative forming method is used. Furthermore, the full die type is better than the partial die when positive forming is used. For the two-step shape case, the full die type always exhibits better forming accuracy than the no- and partial die types, irrespective of the forming method used.

1. 서론

점진성형(Incremental forming)은 설계형상의 3D CAD 정보로부터 점진성형에 관한 등고선 공구경로를 추출하고 판재물을 플레이트에 고정시킨 후 CNC 제어를 이용하여 점진적으로 성형하는 방법이다. 점진성형은 기존의 프레스 공정에서 필수적으로 요구되는 상·하 금형의 설계 및 제작에 따른 시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있어 최근 많은 연구가 행해지고 있다^[1-4].

점진성형의 방법에는 음각점진성형(이하 음각성형)과 양각점진성형(이하 양각성형)이 있다. 음각성형은 Fig. 1(a)와 같이 판재 하단에 금형을 두지 않고(이하 무금형) 판재의 윤곽 부위부터 점진적

으로 성형하여 최종 형상을 만드는 방법이며, 양각점진성형은 (b)와 같이 부분금형 위에 판재를 올려놓고 형상물의 중심 부위부터 외곽으로 점진성형하는 방법을 말한다.

양각성형은 음각성형에 비하여 작업베드를 상하 운동시킬 수 있는 가이드 장치와 일정한 압력을 유지하게 하는 공압장치 등이 부가적으로 필요하기 때문에 성형 비용이 높아지는 단점이 있지만 성형의 품질이 음각성형에 비해 우수하다고 알려져 있다^[5,6].

점진성형의 대표적인 연구자인 Jeswiet는 음각성형의 무금형(no die), 그리고 양각성형의 부분금형(partial die)과 더불어 Fig. 2와 같이 음·양각성형에서 성형물 하단에 충분금형(full die)을 두는 경우를 제시하면서 실제 현장에서 이러한 충분금형을 사용하는 경우

* Corresponding author. Tel.: +82-55-249-2703

Fax: +82-55-999-2130

E-mail address: jkang@kyungnam.ac.kr (Jae-Gwan Kang).

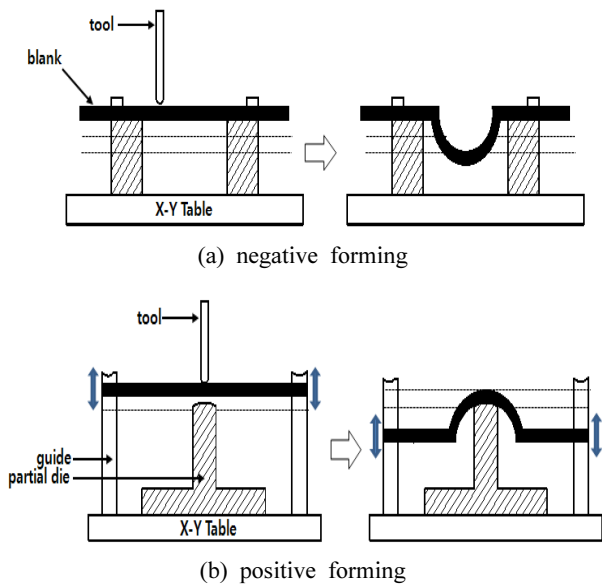


Fig. 1 Incremental forming methods

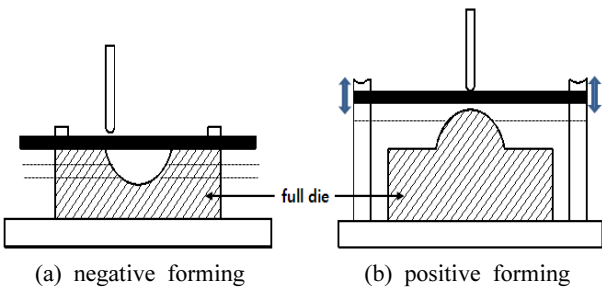


Fig. 2 Incremental forming with full die



Fig. 3 Various incremental forming products

가 있지만 이는 점진성형의 기본 철학인 무금형 원칙(dieless criteria)에 위배된다고 기술하고 있다¹⁾.

이러한 이유 때문에 지금까지 점진성형에 대한 연구는 하단에 금형을 두지 않는 무금형 또는 부분금형성형에 관한 것이 대부분이며 성형 형상물도 매우 단순한 경우가 대부분이었다¹⁷⁻⁹⁾. 그러나 실제 사용되는 판재물 형상은 Fig. 3과 같이 매우 다양하며 형상의 복잡도가 높은 경우가 많다. 이러한 형상들에 대하여도 성형을 지지할 수 있는 지지물을 사용하지 않고(무금형 또는 부분금형으로)

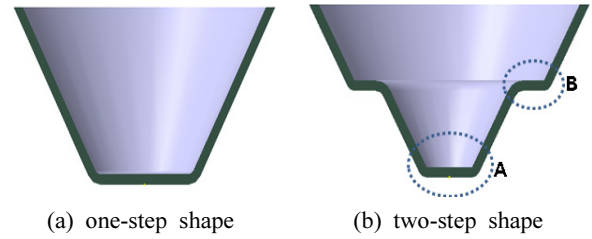


Fig. 4 Forming shapes

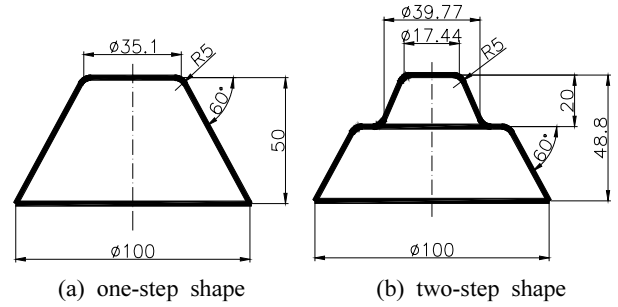


Fig. 5 CAD models used for the experiments

성형하는 경우에는 원하는 성형 정밀도를 얻을 수 있는가에 대한 질문이 본 연구의 주제이다.

예를 들어 Fig. 4(a)와 같이 형상의 복잡도가 낮은 1단 형상의 경우에는 음각성형 시 특별한 지지물이 없어도 성형이 가능하지만 (b)와 같이 단(step)이 있는 형상의 경우에는 B부위까지 성형한 후 A부위를 성형할 때 B부위 아래에 지지물이 없어 성형이 진행됨에 따라 기 성형된 판재물이 아래로 침하하면서 B부위에서 성형 오차가 커질 것이 예상되기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 성형물 하단에 무금형, 부분금형, 그리고 충분금형을 사용하는 경우에 각각 성형 정밀도에 어떤 차이가 나는지를 알아보려고 하였다. 성형물의 형상 복잡도는 Fig. 4와 같이 1단(one-step) 및 2단(two-step) 형상으로 구분하였고 각각의 형상에 대하여 음각성형과 양각성형을 적용하여 실험을 진행하였다.

2. 점진성형의 실험

2.1 실험용 성형 형상 및 점진성형 장비

먼저 본 연구에서 실험에 사용한 성형 형상의 도면이 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5(a)는 형상복잡도가 낮은 1단 형상을, (b)는 형상복잡도가 높은 2단 형상의 도면이다.

점진성형에는 점진성형 전용 기계인 일본 AMINO사의 DLNC-PA를 사용하였다. 사용된 점진성형의 조건이 Table 1에 나타나 있다. 공구는 직경 8 mm 볼 타입의 점진성형 공구, 이송속도는 1,000 mm/min, 성형 깊이는 0.3 mm로 하였다. 소재는 연성이 좋은 Al 1050 계열의 두께 1.2 mm를 사용하였다.

Table 1 Forming conditions

Items	Conditions
Tool	Ball type $\varnothing 8$ mm
Feed	1,000 mm/min
Forming depth	0.3 mm
Material, thickness	Al 1050-H16, 1.2t

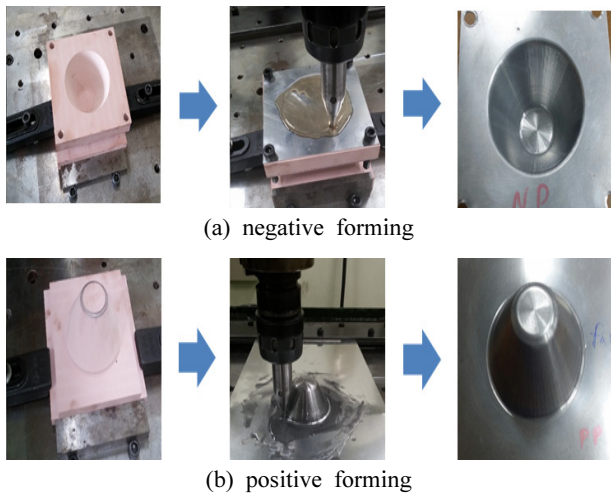


Fig. 6 Incremental forming processes (full die cases)

2.2 실험의 종류

실험은 앞서 언급한 바와 같이 1단 및 2단 형상물 각각에 2가지 성형공법인 음각성형 및 양각성형을 적용하고 무금형(또는 부분금형) 및 충분금형의 경우를 포함하여 총 8가지 경우에 대하여 실시하였다. 충분금형으로 음각 및 양각성형을 행하고 있는 모습이 Fig. 6에 나타나 있다.

이후 설명의 편의를 위하여 1단 형상의 음각무금형성형, 음각충분금형성형, 양각부분금형성형, 양각충분금형성형을 각각 ONN, ONF, OPP, OPF로, 2단 형상의 음각무금형성형, 음각충분금형성형, 양각부분금형성형, 양각충분금형성형을 각각 TNN, TNF, TPP, TPF로 표시하기로 한다. 요약표시의 첫 번째 문자는 형상의 복잡도를 나타내는데 O는 1단 형상(One-step)을 T는 2단 형상(Two-step)을 나타낸다. 두 번째 문자는 점진성형의 종류로서 N은 음각성형(Negative), P는 양각성형(Positive)을 나타낸다. 마지막 문자는 다이의 종류로서 N은 무(No)금형, P는 부분(Patial)금형, 그리고 F는 충분(Full)금형을 표시한다.

3. 성형 정밀도 분석

성형 결과물의 정밀도 분석을 위하여 성형물에 대하여 비접촉식 3차원 스캐너인 일본 Minolta사의 VIVID 910(최대 정밀도: 8 μ m)를 이용하여 스캔데이터를 획득한 뒤 스캔데이터 분석 전용

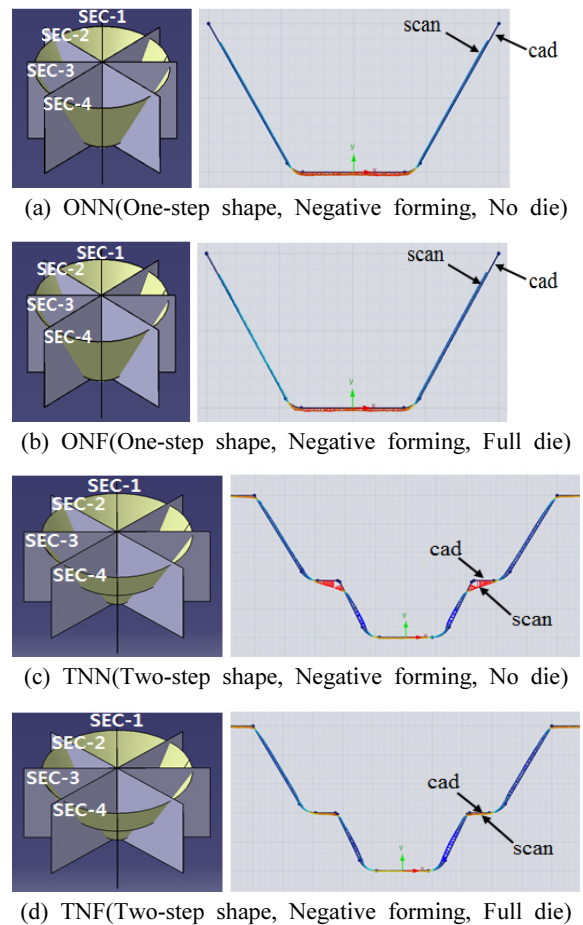


Fig. 7 Forming error analysis of negative forming

Table 2 Negative forming errors

SEC.	One step shape		Two step shape	
	No Die (ONN)	Full Die (ONF)	No Die (TNN)	Full Die (TNF)
SEC-1	0.645 mm	0.631 mm	1.323 mm	0.660 mm
SEC-2	0.664 mm	0.621 mm	1.339 mm	0.660 mm
SEC-3	0.663 mm	0.628 mm	1.300 mm	0.746 mm
SEC-4	0.665 mm	0.639 mm	1.379 mm	0.660 mm
Avg. error	0.657 mm	0.630 mm	1.335 mm	0.681 mm

소프트웨어인 Rapidform-XOV를 사용하여 성형오차를 측정하였다.

성형오차(forming error)는 측정(스캔)데이터가 CAD 데이터로부터 떨어진 거리 값으로 정의되며 본 연구에서는 Fig. 7 및 10과 같이 성형 결과물의 네 개의 단면(SEC-1,2,3,4)으로부터 오차를 측정하고 이를 평균한 값을 사용하였다.

3.1 음각 점진성형의 성형오차 비교

음각성형의 4가지 경우인 ONN, ONF, TNN, TNF에 대하여

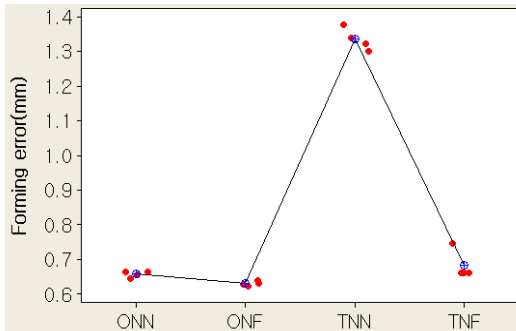


Fig. 8 Individual plot of negative forming errors

측정데이터와 CAD데이터를 비교한 모습이 Fig. 7에 나타나 있다. 각 경우에 대하여 측정된 성형오차 값을 Table 2에 정리하고 이를 Fig. 8과 같이 꺾은선 그래프로 나타내어 보았다. 만약 형상의 복잡도나 다이의 종류에 따라 성형오차에 차이가 없다면 꺾은선 그래프는 일직선에 가깝게 나타날 것이다. 그러나 평균성형오차값은 유사하지 않고 TNN(2단 형상의 무금형성형)의 성형오차가 나머지 경우에 비하여 눈에 띄게 큰 값으로 나타났다.

이를 통계적으로 검정(Test)하기 위해서 주어진 측정 데이터에 대하여 Table 3과 같이 실험계획법의 일원배치(수준수(l)=4, 반복(m)=4) 분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 통계적 검정을 위한 귀무가설(Null hypothesis)은 ‘4가지 경우의 성형오차 값에는 차이가 없다’이다.

분산분석 결과 역시 4가지 경우의 성형오차 간에는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. ANOVA표에서 p-value=0.0은 설정한 귀무가설을 기각할 경우 오류를 범할 위험률이 0%임을 의미한다.

분산분석을 통해서 음각성형에서 형상이 복잡도와 다이의 유무는 결과물의 성형오차에 큰 차이를 가져온다는 것을 알게 되었다. 그러나 구체적으로 개별 경우(수준) 간의 차이가 있는지를 알아보기 위해서는 두 경우간의 차에 관한 검정을 다시 실시하여야 한다.

세부적인 두 수준간의 차이를 검정하기 위해서 본 연구에서는 ANOVA분석 후 수준 간의 차이를 검정하는 LSD (Least Square Difference) 방법을 이용한다^[10]. LSD 방법은 일반적으로 많이 사용하는 두 경우 각각을 모집단으로 하여 평균치간의 차를 검정하는 일반적인 방법에 비하여 오차의 자유도가 크기 때문에 검정력이 높아지는 장점을 가진다. 두 모평균 차의 검정에 사용되는 LSD 값은 식 (1)과 같다.

$$LSD = t(\phi_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{2V_E}{m}} \quad (1)$$

여기서 $t(\phi_E; (\alpha/2))$ 는 오차항의 자유도 ϕ_E 를 갖는 t분포에서 누적확률이 $(1 - (\alpha/2))$ 인 위치값이다. 그리고 V_E 는 오차항의 제곱평균(Mean Square)을 나타낸다.

Table 3 ANOVA of negative forming errors

Source	DF	SS	MS	F	p-value
Level (l)	3	1.389	0.463	604.44	0.000
Residual error (E)	12	0.009	0.0008	-	-
Total	15	1.398	-	-	-

Table 4 LSD test results

	Absolute diff. value of average errors	LSD	Test result
ONN-TNN	0.678	0.044	S
TNN-TNF	0.654		S
ONN-ONF	0.027		N/S

(S: Significant, N/S: Non-Significant)

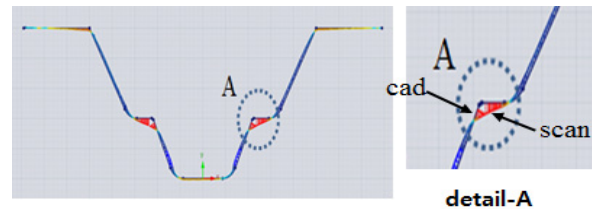


Fig. 9 Forming errors of TNN

그러므로 비교하는 두 경우의 평균오차 차의 절대값이 LSD보다 큰 값을 가지면 두 경우 사이에는 통계적으로 유의하다고 판단한다. 유의수준 α 를 5%로 했을 때 t분포표로부터 $t(12; 0.025) = 2.18$ 이고 Table 3에서 $V_E = 0.0008$, $m = 4$ 이므로 $LSD = 0.044$ 가 된다.

LSD 검정방법으로 본 연구에서 가장 관심이 있는 경우들인 ONN와 TNN, TNN와 TNF, ONN와 ONF간의 비교를 실시한 결과가 Table 4에 정리되어 있다. 이하는 각각의 경우에 대한 세부적인 설명이다.

3.1.1 1단 및 2단 형상의 무금형 성형오차 비교(ONN-TNN)

먼저, 1단 형상(ONN)과 2단 형상(TNN)에 대하여 무금형으로 성형한 경우 통계적으로 유의할 정도로 성형오차에 큰 차이가 있다는 것을 알게 되었다.

성형오차가 크게 나타난 TNN (2단 형상 무금형성형)에 대하여 측정된 데이터를 CAD 데이터와 비교한 그림이 Fig. 9에 나타나 있다. 꺾인 면(A)에서 심한 오차가 발생한 것을 확인할 수 있는데 이는 2단 형상의 성형 시 꺾인 면에 지지물이 없기 때문에 성형이 아래로 진행됨에 따라 처짐 현상이 발생한 것으로 볼 수 있다. 이를 통해 무금형 음각성형에서 형상의 복잡도가 높아지면(1단 → 2단) 성형오차도 함께 커짐을 알 수 있다.

3.1.2 2단 형상의 무금형과 충분금형 성형오차 비교(TNN-TNF)

무금형이 아닌 2단 형상에 충분금형을 사용하는 경우(TNF)에는

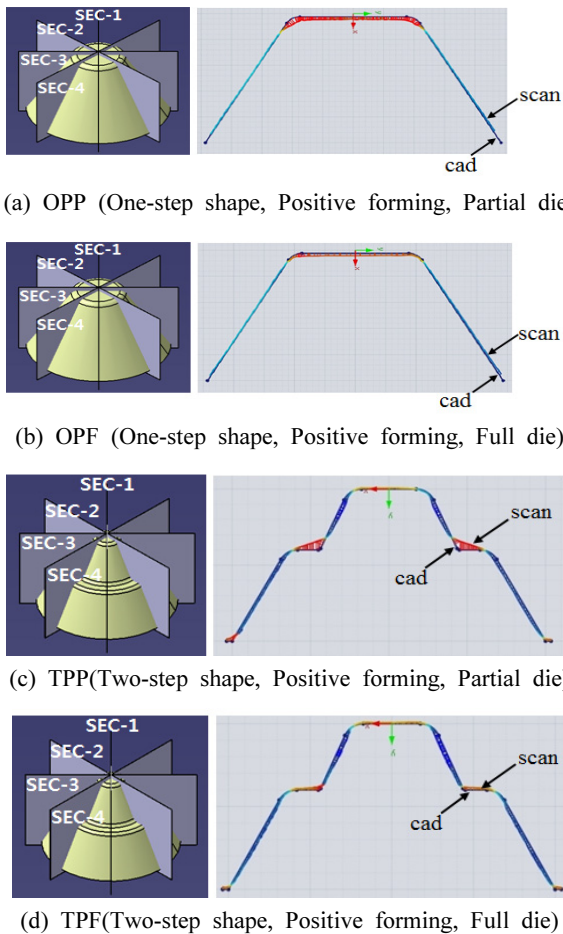


Fig. 10 Forming error analysis of positive forming

무금형(TNN)보다 성형오차가 크게 감소하였다(1.335 → 0.681). 그러므로 형상의 복잡도가 높은 형상의 경우에는 성형물 하단에 층분금형을 두어야만 원하는 성형오차를 얻을 수 있다고 말할 수 있다.

3.1.3 1단 형상의 무금형과 층분금형 성형오차 비교(ONN-ONF)

2단 형상에서 무금형보다 층분금형을 사용하는 것이 성형오차를 감소시킨다는 것을 확인하였기 때문에 1단 형상의 경우에도 무금형성형(ONN)과 층분금형성형(ONF)을 비교하였다. 그 결과 두 경우 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 즉, 1단 형상의 경우에는 성형물 하단에 층분금형을 설치하여도 성형 정밀도 향상에 큰 기여를 하지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.2 양각 점진성형

양각성형에서는 무금형 성형이 불가능하기 때문에 부분금형이 음각성형의 무금형성형에 해당한다. 양각점진성형의 4가지 경우 (OPP, OPF, TPP, TPF)의 성형 오차값을 Table 5에 정리하였고 Fig. 11는 각 경우를 꺾은선 그래프로 나타낸 것이다.

Table 5 Positive forming errors

SEC.	One-step shape		Two-step shape	
	Partial die (OPP)	Full die (OPF)	Partial die (TPP)	Full die (TPF)
SEC-1	0.781 mm	0.541 mm	1.086 mm	0.538 mm
SEC-2	0.781 mm	0.555 mm	1.066 mm	0.512 mm
SEC-3	0.754 mm	0.583 mm	1.052 mm	0.523 mm
SEC-4	0.751 mm	0.551 mm	1.021 mm	0.511 mm
Avg. error	0.767 mm	0.558 mm	1.056 mm	0.521 mm

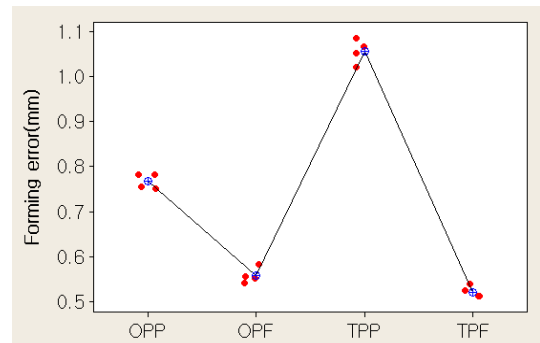


Fig. 11 Individual plot of positive forming errors

Table 6 ANOVA of positive forming errors

Source	DF	SS	MS	F	P
Level (<i>l</i>)	3	0.724	0.241	644.70	0.000
Residual error (E)	12	0.005	0.0004	-	-
Total	15	0.729	-	-	-

Table 7 LSD test results

	Absolute diff. value of average errors	LSD	Test result
OPP-TPP	0.289	0.031	S
TPP-TPF	0.535		S
OPP-OPF	0.209		S

(S: Significant, N/S: Non-Significant)

음각성형과 마찬가지로 TPP(2단 형상의 부분금형성형)의 경우가 나머지 세 경우에 비하여 성형오차가 가장 큰 것으로 나타났으며 1단형상의 부분금형성형(OPP)에서도 성형오차가 상당히 발생한 것으로 보여진다.

통계적 검정을 위하여 Table 6과 같이 분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 양각성형 역시 각 경우 간에는 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 판정되었다(p-value=0.0).

세부적인 두 경우간의 차를 알아보기 위하여 음각성형과 동일하게 LSD방법을 적용하였다. 그리고 가장 관심이 있는 경우인 OPP와 TPP, TPP와 TPF, OPP와 OPF간의 비교 결과를 Table 7에

요약하였다. 음각성형과 달리 세 경우 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다($\alpha=5\%$).

3.2.1 1단 및 2단 형상의 부분금형 성형오차 비교(OPP-TPP)

양각 성형에서도 TPP(2단 형상 부분금형성형)는 OPP(1단 형상 부분금형성형)에 비하여 성형오차가 크게 나타났다. 1단형상에 비해 1.3배($=1.056/0.767$) 정도로 오차가 증가하였다.

Fig. 12는 TPP의 측정 데이터를 CAD 데이터와 비교한 모습이다. 음각형상과 마찬가지로 꺾인 면(A)에서 심각한 오차가 발생한 모습을 볼 수 있다. 이 역시 2단 형상의 성형 시 꺾인 면 A에 지지물이 없기 때문에 성형이 진행됨에 따라 아래쪽으로 발생하는 인장력으로 기 성형된 A부위가 위쪽으로 상승하였기 때문으로 보여진다.

3.2.2 2단 형상의 부분금형 및 충분금형 성형오차 비교(TPP-TPF)

TPF (2단 형상 충분금형성형)의 경우에는 TPP (2단 형상 부분금형 성형)에 비하여 유의할 정도로 성형오차가 감소하였다(1.056 \rightarrow 0.521)으로 크게 감소하였다. 그러므로 양각성형의 경우에도 2단 형상인 경우에는 성형물 하단에 충분금형을 두어야만 성형오차를 크게 줄일 수 있다고 말할 수 있다.

그리고 TPF의 성형오차(0.521)는 TNF (2단 형상의 음각 충분금형성형)의 성형오차(0.681)보다도 낮은 값을 보였다. 이 결과는 양각성형이 음각성형보다 성형품질이 우수하다는 기존의 연구결과^{15,6)}와 일치하는 결과이다.

3.2.3 1단 형상의 부분금형 및 충분금형 성형오차 비교(OPP-OPF)

OPP (1단형상 부분금형성형)과 OPF (1단형상 충분금형성형) 사이에도 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 이는 3.1절의 음각성형에서 ONN과 ONF 사이에 통계적으로 유의한 차이가 없었던 것과는 다른 결과이다. 그러므로 양각성형 시에는 1단 형상과 같이 형상의 복잡도가 낮은 경우에도 가능하면 충분금형을 하단에 두고 성형을 하는 것이 성형 정밀도를 높일 수 있는 방법이라고 볼 수 있다.

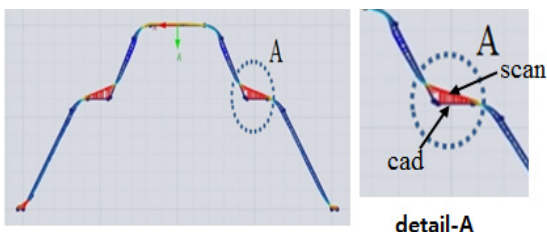


Fig. 12 Forming errors of TPP

4. 결론

점진성형에서 음각성형과 양각성형은 성형비용에 차이가 크며 금형의 선택(무금형, 부분금형, 충분금형)도 성형 시간 및 비용에 큰 차이를 가져온다. 본 연구는 점진성형 시 판재물 하단에 설치하는 다이의 종류가 성형물의 형상복잡도에 따라 성형오차에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 시행되었으며 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

먼저 형상의 복잡도가 낮은 1단 형상의 음각성형에서는 무금형과 충분금형 사이에 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 그러나 형상의 복잡도가 높은 2단 형상의 경우에는 무금형은 충분금형에 비하여 성형오차가 매우 크게 발생하였다.

양각성형의 경우에는 1단 형상의 경우와 2단 형상의 경우 모두 부분금형은 충분금형에 비하여 성형오차가 크게 나타났으며 2단 형상의 경우에는 더욱 크게 발생하였다.

이로부터 1단 형상과 같이 형상의 복잡도가 낮은 경우에는 원가 절감의 측면에서 무금형 음각성형을 선택할 수 있으며 이는 지금까지 알려지지 않았던 음각성형 대비 양각성형의 절대 우위성에 대치되는 결과이다. 그리고 2단 형상과 같이 형상의 복잡도가 높은 경우에는 무금형 또는 부분금형으로 성형할 경우 성형오차가 커지므로 충분금형을 사용해야 원하는 성형 정밀도를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 매우 간단한 형상을 대상으로 하였으며 따라서 본 연구의 결과가 모든 다양한 형상에 대하여 일반화될 수는 없을 것이다. 향후 일반화를 위한 형상의 다양화에 관한 연구 그리고 성형오차 발생에 관한 소성역학적 해석 등의 발전된 연구가 요구된다.

References

- [1] Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., Allwood, J., 2005, Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, CIRP Ann. 54:2 88-114.
- [2] Ambrogio, G., DeNapoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., Muzzupappa, M., 2005, Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing, J. Mater. Process. Technol. 162-163 156-162.
- [3] Araghi, B. T., Manco, G. L., Bambach, M., Hirt, G., 2009, Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming, CIRP Ann. 54:1 225-228.
- [4] Ambrogio, G., Gagliardi, F., Bruschi, S., Filice, L., 2013, On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys, CIRP Ann. 62:1 243-246.
- [5] Allwood, J. M., Bramley, A. N., Ridgman, T. W., Mileham, A. R., 2006,

- A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming, *Proceedings of the Institution Mechanics Engineers* 220:2 323-327.
- [6] Lee, K. B., Oh, H. M., Kang, J. G., 2013, Forming accuracy comparison between positive and negative incremental forming of Al 1050, *J. of Korean Soc. of Manuf. Technol. Eng.* 22:5 800-805.
- [7] Hussain, G., Dar, N. U., Gao, L., Chen, M. H., 2007, A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming, *Mater. Process. Technol.* 187:188 94-98.
- [8] Thibaud, S., Ben Hmida, R., Richard, F., Malécot, P., 2012, A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process: Numerical feasibility and experimental validation, *Simul. Modell. Pract. Theor.* 29 32-43.
- [9] Minutolo, F. C., Durante, M., Formisano, A., Langella, A., 2007, Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process, *J. Mater. Process. Technol.* 194:1-3 145-150.
- [10] Park, S. H., 1982, *Modern Experimental Design*, Daeyoungsa, Seoul, Republic of Korea.