

## 점진적 판재 성형 공정에서 스테리스 극박판의 두께에 따른 성형성 및 주름 발생 특성 분석

이준호<sup>1</sup> · 이건일<sup>1</sup> · 정문성<sup>1</sup> · 정규석<sup>2</sup> · 이창환<sup>1,2,#</sup>

### Analysis of Formability and Wrinkle Formation according to the Thickness of Ultra-thin Stainless Steel in the Incremental Sheet forming Process

J. H. Lee, G. I. Lee, M. S. Jeong, K. S. Jung, C. W. Lee

(Received August 30, 2019 / Revised September 30, 2019 / Accepted October 1, 2019)

#### Abstract

Demand for ultra-thin materials is increasing due to their light-weight and versatile properties. In this work, the formability of the ultra-thin stainless steel sheets of various thicknesses in the incremental sheet forming (ISF) process is investigated. The effects of the thickness on formability were evaluated with forming experiments of the truncated cone shape with 10° intervals. As the thickness of the material decreased, the maximum forming angle decreased and wrinkles also occurred quickly. The maximum forming angles in the truncated cone shape without the wrinkles for the thickness of 0.05 mm, 0.08 mm, and 0.1mm were 30°, 40°, and 50°, respectively. Wrinkles occurred in a twisted shape along the moving direction of the tool. As the material thickness increased, the size of the wrinkles increased.

**Key Words** : Incremental Sheet Forming (ISF), Thin Sheet, Stainless Steel, Wrinkling

## 1. 서 론

금속 판재의 프레스 성형 공정은 원하는 제품을 빠른 속도로, 대량 생산을 할 수 있다는 점에서 많이 쓰이고 있다. 최근, 전통적인 생산방식과 다른 다품종 소량생산, 유연 생산시스템의 수요가 증가하고 있다. 금형을 이용한 전통적인 생산 공정은 이와 같은 관점에서는 경제성 및 효율성의 측면에서 적합하지 않다. 유연 생산시스템의 한 방법으로, 금형이 필요하지 않은 점진적 성형 공정에 대한 수요가 증가하고 있다[1].

점진적 성형 공정이란 끝이 둥근 전용 공구를 CNC머신 혹은 로봇 팔(robot arm) 등의 장비에 장착하여 특정 형상을 정해진 경로에 따라 소성 변형을

조금씩 점진적으로 진행하여 가공하는 방법이다[2]. 점진적 성형 공정은 기존의 딥 드로잉 공정(deep drawing)이나, 인장 성형(stretch forming)등의 판재 성형방법보다 많은 변형을 할 수 있어 복잡한 형상을 가진 제품이나, 많은 변형을 요구하는 형상의 제품을 성형하는 데 적합한 공정이다 [3]. Jeswiet 등 [2], Attanasio 등 [4], Park 과 Kim [5]은 점진적 성형 공정 시의 성형 특성과 점진적 판재 성형 후의 소재의 특성에 대한 연구를 진행하며 점진적 판재 성형 공정의 성형 특성에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 SUS304H 극박판으로 점진적 성형 실험을 진행하였다. SUS304H 는 휴대전화 구성품, 마스크 플레이트, 닥터 블레이드, 커넥터, 유심 케이스, USB 연결단자 등 여러 분야에서 매우 다양한 용도로 쓰이고 있는 소재이다[6]. 소재 두께는 0.03mm 부터 0.15mm 까지 다양한 두께를 사용하였다. 스테리스 극박판은 두께가 감소할수록 성형성이 크게

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

2. 서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과

# Corresponding Author: Department of Mechanical system and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr, ORCID : 0000-0002-7848-280X

감소하며, 특히 0.05mm 이하에서 매우 낮은 성형성을 보인다[7, 8].

스테인리스 극박판 소재를 사용한 점진적 성형 공정은 일반적으로 1mm 이하의 작은 형상을 제작하기 위해 적용되었다. 이와 같은 공정은 미세 점진성형 공정 (Micro incremental forming) 이라 한다 [9]. Obikawa and Hayashi 는 극박판 스테인리스를 성형하기 위해 점진적 성형 공정을 적용하였다. Muthusamy 등 [10] 은 마이크로 점진적 성형에서 공정 변수에 대한 효과를 분석하였다. Gau 등 [11]은 900 도 이상의 온도에서 열처리가 스테인리스 극박판의 미세구조 및 성형성에 미치는 효과를 분석하였다.

본 연구에서는 기존 점진적 성형 공정에서 극박판 판재를 사용하여 성형성, 주름 발생 특성을 분석하였다. 두께 0.03mm, 0.05mm, 0.08mm, 0.1mm 스테인리스 극박판을 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70° 의 원뿔대 형상으로 성형하는 실험을 통해 하여 재료의 두께에 따른 성형 한계를 분석하였다. 그리고 3 차원 형상 측정기를 통하여 제품의 단면 형상, 주름 발생 형상을 분석하였다.

## 2. 극박판 판재의 점진적 성형 공정

### 2.1 실험 소재 특성

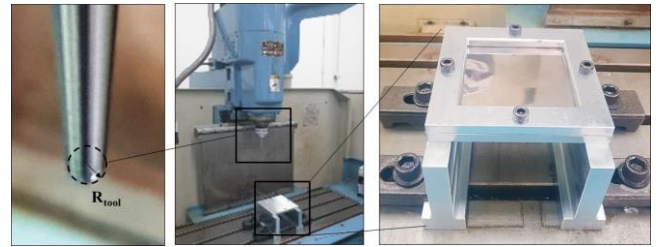
본 연구에 사용된 소재는 SUS304H 스테인리스 극박판은 0.03mm 부터 0.15mm 까지 다양한 두께의 판재 형태의 금속을 사용하였다. SUS304H 는 일반 304 강종 보다 탄소 함량이 높고, 열처리를 통해 높은 강도를 갖는다. Table 1 은 SUS304H 소재의 인장시험 결과이다[8]. 극박판은 정밀 압연공정으로 제작되는데, 두께가 감소함에 따라 소재의 가공경화로 재료의 강도는 상승하고, 연신율은 감소한다.

**Table 1 Mechanical Properties of SUS304H with respect to the thickness [8]**

Thickness (mm)	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Elongation (%)
0.1	856	671	48.14
0.08	1091	951	15.86
0.05	1130	1015	8.46
0.03	1327	1216	3.79

### 2.2 실험 공구 및 장비

본 연구에서는 NR-35 3 축 CNC 머신을사용하였다. 베드에 소재 고정 테이블을 설치하였고 Fig. 1 과 같다. 점진적 성형 공정에 사용되는 공구의 형상은 Fig. 1 와 같은 끝이 둥근 공구를 사용하였고, 공구의 지름은 8mm 이다. 윤활유는 자동차 엔진오일을 사용하였다.



**Fig. 1 Experimental set-up for incremental forming process**

### 2.3 실험 형상

점진적 성형 특성을 명확하게 파악하기 위하여 실험 형상은 Fig. 2 와 같이 초기 반지름(R)이 40mm 인 끝이 잘린 원뿔대 형상이다. 그리고 원뿔의 각도를 증가하여 성형성을 평가하였다. 공구가 최대반경을 통하여 이동하도록 G-코드를 만들어 실험을 진행하였다.

소재의 변형율은 성형 후 주름 발생 때문에 일반적인 변형율 측정방법 적용이 어려워 두께를 사용한 변형율 예측 방법을 사용하였다[12]. 점진적 판재 성형에서 소재는 전단변형에 의해 변형이 발생한다. 재료의 두께는 원뿔대의 각도에 따라 표현되며, 이는 식 (1)과 같다. 또한 소성 변형율은 식 (2)와 같다. 높은 원뿔 각도가 성형 가능하다는 것은 재료의 성형성이 더 높은 것을 의미한다.

$$t_f = t_0 \sin(90-\theta) \quad (1)$$

$$\epsilon = \ln(t_0/t_f) = \ln(1/\sin(90-\theta)) \quad (2)$$

점진적 판재 성형에서는 다양한 공정 변수가 제품의 성형에 영향을 준다. 대표적인 공정 변수로는 공구 직경, 공구 회전 속도(Spindle rotation speed), 소재 이송 속도(Feed rate), 점진 성형 높이( $\Delta z$ )가 있다 [13]. 본 연구에서는 다양한 공정 변수에 대한 성형성을 분석하지 않고 재료 두께에 대한 영향만을 분석하였다. 다양한 실험을 통해 얻은 최적의 성형 조

건을 실험에 적용하였다. 적용한 공정 조건은 공구 직경 8mm, 스피들 속도 6000rpm, 이송 속도 800mm/min, 점진 성형 높이 0.3mm 이다.

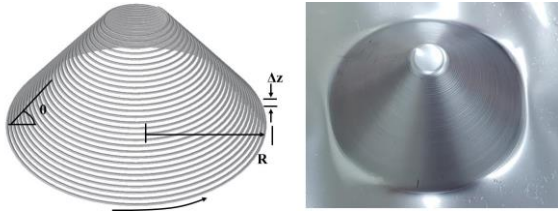


Fig. 2 Tool path and target geometry (cone shape)



Fig. 3 Classification of Experimental Results: (a) Fracture (b) Partial Fracture (c) Wrinkling (d) Success

### 3. 두께에 따른 성형성 분석

#### 3.1 성형성 판단 기준

성형성은 성형 성공 (Success), 형상 내 주름 (Wrinkling), 부분 파단 (Partial fracture), 완전 파단 (Fracture)의 4 가지 기준에 따라 판단하여 분석하였다. Fig. 3 은 각 기준 별 성형 제품 예제이다. 성형 성공은 어떠한 결함 없이 완전한 형상으로 성형된 경우를 말한다. 형상 내 주름은 파단 없이 성형에 성공하였지만, 형상 내에 다양한 형태의 주름이 발생한 경우를 말한다. 완전 파단은 성형에 성공하지 못하고 소재가 찢어져 파단이 된 경우를 말한다. 부

분 파단의 경우에는 아주 미세한 구멍 형태의 파단이 하나 혹은 다수가 발생한 경우이다. 주름이 발생한 경우, 3 차원 스캔을 통해 주름 발생 특성을 정량적으로 분석하였다.

#### 3.2 성형 각 변화에 따른 성형성 실험

원뿔의 경사각이 커질수록 성형하기가 힘든 것은 자명하다. 본 실험에서는 구체적으로 각 두께 별로 어떠한 각도에서 성형이 성공하는지, 성형 과정에서 어떠한 성형 특성이 발견되는지 파악하는 것에 초점을 두고 실험을 진행하였다. 재료 두께에 따른 점진적 성형 실험은 공구 직경 8mm, 스피들 속도 6000rpm, 이송 속도 800mm/min 에서 실험하였다. 성형성 실험 결과는 Table 2 와 같다.

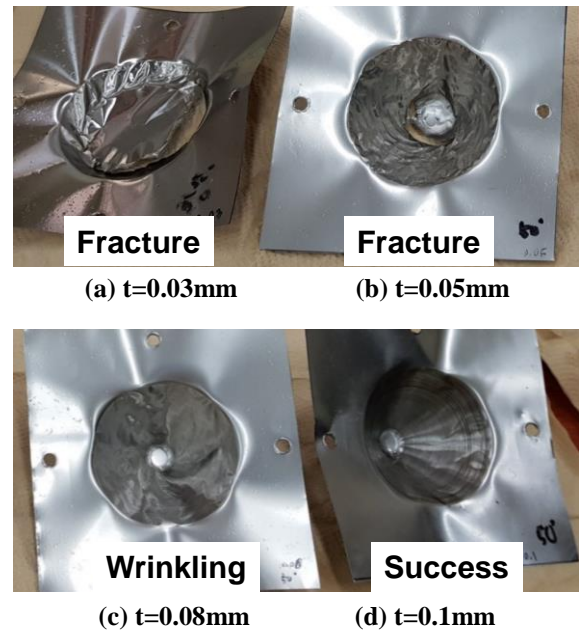


Fig. 4 Experimental result of the truncated cone shape (50°) according to the thickness of the material: (a) t=0.03mm (b) t=0.05mm (c) t=0.08mm (d) t=0.1mm

Fig. 4 는 성형 각도 50°에서 두께에 따른 실험 결과이다. 소재 두께 0.03mm, 0.05mm 의 경우 파단이 발생하였고, 0.08mm 는 원뿔대 형상에 주름이 발생하였다. 0.1mm 는 안정적으로 성형이 가능하였다. 각도에 따른 실험 결과, 각도와 두께에 따른 점진적 성형 공정의 특성이 우 하향 대각선 방향으로 같은 경향성을 가지는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 소

재를 성형 시 형상의 각도가 커질수록, 소재의 두께가 얇을수록 성형이 어렵다는 것을 알 수 있다.

**Table 2 Experimental result with thickness and cone angle (S: Success, W: Wrinkling, F: Fracture, PF: Partial Fracture)**

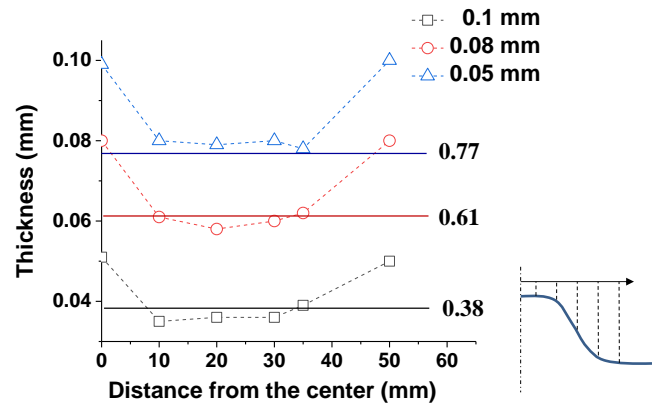
Thickness \ Angle	0.03 mm	0.05 mm	0.08 mm	0.1 mm	0.15 mm
20°	W	S	S	S	S
30°	F	S	S	S	S
40°	F	W	S	S	S
50°	F	F	W	S	S
60°	F	F	F	W	S
70°	F	F	F	F	PF

성형각도 70°, 두께 0.15mm 에는 부분 파단이라는 다른 실험과 다른 특이한 결과가 나타났다. Fig. 3 (b) 를 보면 사진 상으로 상부와 하부에 아주 미세하게 구멍이 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 파단을 부분 파단이라고 한다. 마치 소재가 굽힌 것처럼 바늘 구멍 크기의 혹은 그보다 더 작은 아주 미세한 구멍의 크기로 파단이 발생하였다.

3.3 성형 후 두께 분포

문제 없이 원뿔대 형상이 성형된 시편에 대하여 두께 분포를 분석하였다. 소재 두께 0.1mm, 0.08mm, 0.05mm, 그리고 성형 각도는 40 도에 대하여 분석하였다. 두께 분포는 포인트 마이크로미터(Mitsutoyo, 342-251)를 사용하여 중심에서부터 일정 거리에 따라 두께 분포를 측정하였다.

원뿔대 형상 벽면에서 소재의 평균 두께는 0.1mm 소재의 경우 0.080mm, 0.08mm 는 0.060mm, 0.05mm 는 0.036mm 이다. 점진적 판재 성형에서는 소재는 주로 전단 변형을 보인다. 재료의 두께는 식 (1)과 같고, 소성 변형율은 식 (2)와 같다. 40°로 성형한 원뿔대 형상의 두께 분포는, 원뿔대 형상의 빗면에서 식 (1)을 사용한 예측 값과 유사한 것을 확인할 수 있다. 0.05mm 의 경우 측정된 두께가 예측 값보다 더 얇은데, 이는 주름이 발생하여 두께가 감소한 것으로 보인다.



**Fig. 5 Thickness distribution of truncated cone shape (40°) with thickness of 0.05mm, 0.08mm, and 0.1mm**

3.4 극박판 판재의 성형성

재료의 두께가 얇아질수록 재료의 성형성이 감소한다. 이에 따라 얇은 두께에서 높은 각도를 갖는 원뿔대 형상의 성형이 불가능하다. 주름이 발생한 경우를 포함하여 재료의 두께별 최대 성형 한계를 비교하면 다음과 같다. 0.03mm, 0.05mm, 0.1mm 의 경우 최대 성형각도는 각각 40°, 50°, 60° 이다.

**Table 3 Comparison of plastic strain in incremental forming and elongation of material with respect to thickness**

Thickness (mm)	Maximum forming angle (°)	Plastic strain (calculated from the forming angle)	Elongation in uniaxial tension
0.03	20°	0.06	0.03
0.05	40°	0.27	0.08
0.08	50°	0.44	0.16
0.1	60°	0.69	0.48

극박판 재료의 점진적 성형에서 소재 전체 주름 발생 및 형상의 주름 발생이 심하였다. 따라서 일반적으로 변형율을 측정하는 방법을 적용하지 못하고, 두께의 변화로부터 식 (2)를 사용하여 변형율을 측정하였다. 이 때, 성형 각도로부터 재료의 변형율을 예측한 값은 Table 3 과 같다.

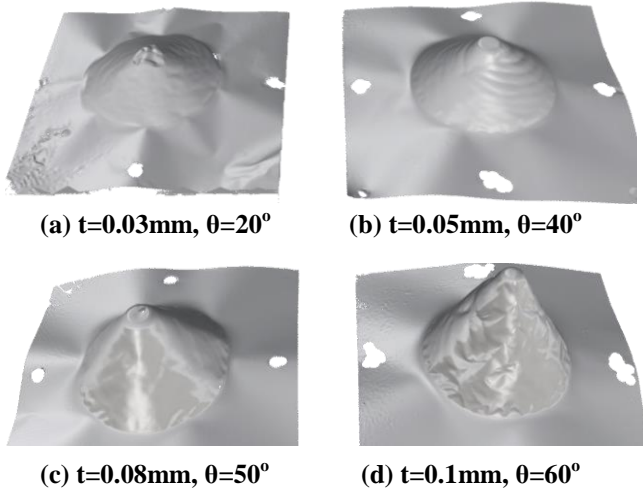
점진적 성형결과로부터 얻은 재료의 최대 소성 변형율은 Table 1 에서 측정된 재료의 1 축 인장 연신율에 비해 높은 값을 갖는다. 따라서 점진적 성형 공정을 적용하는 경우, 재료의 성형성을 다른 성형 공정보다 더 높게 증가시켜 복잡한 형상으로 제작 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 점진적 성형에서 주름 발생 특성 분석

##### 4.1 주름 발생 형상

각 소재 두께 별로 주름이 발생한 4 가지 조건에 대하여 3 차원 스캔을 하여 형상을 분석하였다. 3 차원 스캔 결과는 Fig. 6 과 같다. 형상 분석은 GOM Inspect 2018 을 사용하였다.

극박판의 점진적 성형 공정에서 소재의 주름은 형상 성형 후 전체 형상에서의 주름과 형상 내부에서 나선형 주름의 두 가지 주름 형상이 발생하였다. 소재를 성형하고 난 후 홀더에서 소재를 빼내면, Fig. 6 에서와 같이 전체 소재의 주름이 발생한다. 점진적 성형 공정에서 원뿔대 형상 성형 후 발생하는 형상의 전체 주름은 점진적 성형 공정을 통해 성형 후 잔류응력에 의해 발생한다.



**Fig. 6 Twisting and wrinkling of formed products: (a)  $t=0.03\text{mm}$ ,  $\theta=20^\circ$ , (b)  $t=0.05\text{mm}$ ,  $\theta=40^\circ$ , (c)  $t=0.08\text{mm}$ ,  $\theta=50^\circ$ , (d)  $t=0.1\text{mm}$ ,  $\theta=60^\circ$**

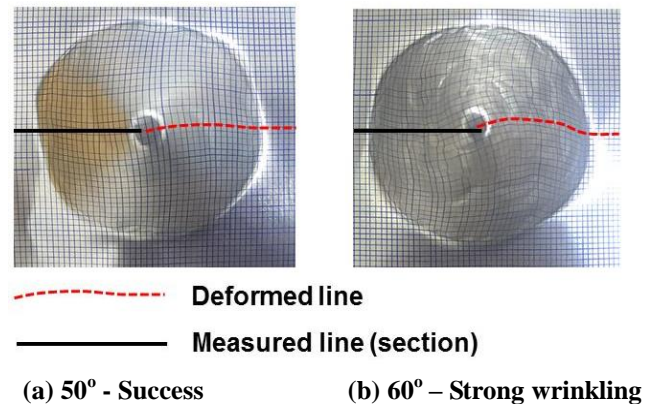
형상 내부의 주름은 Fig. 6 의 4 가지 경우 모두 성형 공구의 이동 방향으로 나선형 형상으로 주름이 발생하였다. 주름은 두께 0.1mm 에서 가장 크게 발

생하였다. 그리고 0.03mm 의 경우 소재 두께가 매우 얇아 원뿔대 형상 윗면으로도 주름이 발생하였다.

##### 4.2 원뿔대 형상 내 주름 발생

점진적 성형 공정에서는 공구이동 및 마찰로 공구 이동방향으로 형상 뒤틀림(Twisting) 이 발생한다 [14]. 일반적인 점진적 성형 공정에서는 형상의 뒤틀림이 발생해도, 전체 형상에는 큰 영향을 미치지 않는다. 하지만 극박판의 경우, 소재 두께가 얇기 때문에 이와 같은 뒤틀림이 원뿔대 형상 벽면에서의 나선형 주름으로 발생한다. 이를 분석하기 위해 주름이 발생하는 경계조건에서 형상 변형을 비교하였다.

Fig. 7 은 앞의 실험 조건에서 두께 0.1mm 재료에 격자를 그린 후  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  의 원뿔대 형상으로 성형한 결과이다. 점선의 경우 소재에 성형 전 표시한 격자 형상이며, 직선은 성형 후 단면을 측정된 위치이다.  $50^\circ$  로 성형된 원뿔대의 경우, 형상의 뒤틀림이 발생하였지만, 나선형 주름이 발생하지 않았다. 하지만  $60^\circ$  로 성형된 경우 뒤틀림이  $50^\circ$  로 성형된 경우에 비해 크게 발생하였고, 원뿔대 형상 전체적으로 나선형 주름이 크게 발생한 것을 확인할 수 있다.



**Fig. 7 Comparison of truncated cone shape (top view) with the angle of (a)  $50^\circ$  and (b)  $60^\circ$**

성형 각도가 증가하면서 소성 변형율이 증가하고, 소재의 최종 두께가 감소한다. 이 때, 재료의 변형 후 두께가 소재의 변형을 지탱할 수 있는 경우 나선형 주름이 발생하지 않지만, 두께가 감소하면서 공구 이동 방향으로 나선형 주름이 발생하였다. 일정 각도 이상으로 변형하는 경우, 소재가 변형한 형상을 더 이상 지탱하지 못하고 나선형 주름이 발생

한다. 그리고 이 이상으로 소성 변형이 발생하는 경우, 소재는 더 이상 형태를 유지하지 못하고 파단이 발생하였다.

주름 발생을 정량화 하기 위해 3 차원 측정된 결과를 정량적으로 분석하였다. 단면은 3 차원 스캐너를 통해 외부 형상을 스캔 한 후, 재료 압연 방향 중심에서 단면 형상을 추출하여 비교하였다. Fig. 8 은 50°와 60°의 단면 형상을 나타낸 그림이다.

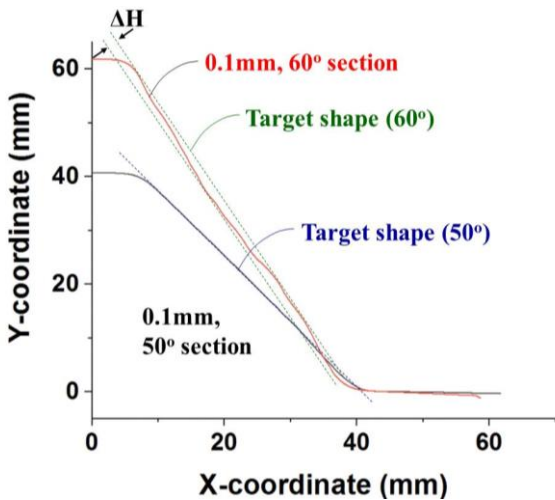


Fig. 8 Sectional view of formed product with angle of 50° and 60°

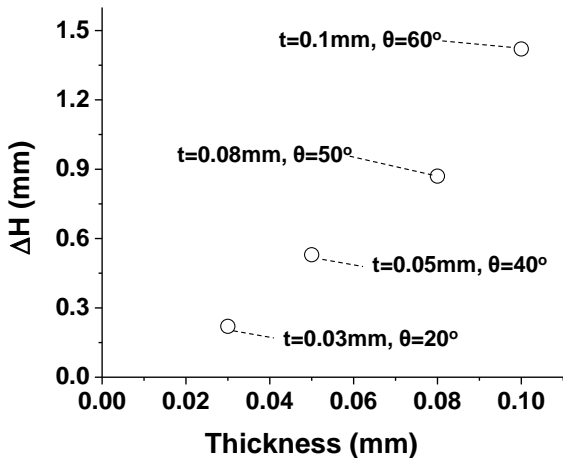


Fig. 9 Distribution of  $\Delta H$  according to thickness of the material

나선형 주름이 발생하지 않은 50°로 성형된 시편의 경우, 단면이 목적 형상과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 나선형 주름이 발생한 60°로 성형

된 시편의 경우 단면 형상이 목적 형상과 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 나선형 주름의 형상을 따라 단면 형상에서 오차가 발생한다. 여기서, 단면 형상의 거리 차( $\Delta H$ )를 통해 주름 발생 정도를 정량화 하였다. 60도의 경우  $\Delta H$ 는 1.42mm였다.

마찬가지 방법으로 주름이 발생한 0.03 mm, 0.05mm, 0.08mm 시편에 대하여 비교하였다. 이 결과는 Fig. 9와 같다. 소재 두께가 증가할수록 소재의 성형성이 증가하여 높은 각도로 성형 가능하며, 높은 각도에서 주름이 발생한다. 또한 주름 발생형상 역시 크게 발생한다. 상대적으로 두꺼운 소재는 소재가 더 많이 변형할 수 있어서 주름 발생에서도 큰 소성 변형이 발생하는 반면, 얇은 소재는 소성 변형이 적게 발생 가능하여 큰 주름이 발생하기 어렵다.

### 5. 결론

스테인리스 극박판 소재의 경우 매우 낮은 성형성을 갖기 때문에 일반적인 소성가공 방법으로는 성형이 어렵다. 본 연구에서는 극박판 스테인리스의 점진적 성형 공정에서 소재 두께에 따른 성형특성 및 주름 발생 특성을 분석하였다.

먼저 소재 두께에 따라 각도 별 원뿔대 형상 성형실험을 통해 재료 두께에 따른 성형성을 분석하였다. 점진적 성형 공정을 통하여 극박판 스테인리스 재료의 성형성을 크게 향상시킬 수 있었다. 소재 두께가 얇아짐에 따라 재료의 연신율이 감소하고, 이에 따라 소재의 성형성이 감소하였다. 소재 두께 별로 주름 없이 안정적으로 성형 가능한 최대 성형 각도를 알 수 있다. 본 연구에서 적용한 공구 직경 8mm, 스핀들 속도 6000rpm, 이송 속도 800mm/min 조건에서는 0.05mm의 경우 30°, 0.08mm의 경우 40°, 0.1mm의 경우 50°까지 성형할 수 있었다.

앞 조건 이상의 각도로 성형한 경우 원뿔대 형상에서 나선형 주름이 발생하였다. 점진적 성형 공정에서는 공구와 재료의 마찰로 재료의 뒤틀림이 발생한다. 극박판의 경우 일정 각도 이상으로 성형하는 경우 형상을 유지하지 못하고 나선형 주름이 발생하였다. 또한 주름의 크기는 높은 성형성을 갖는 0.1mm 소재에서 가장 크게 발생하였다. 그리고 나선형 주름이 발생한 각도 이상으로 성형하는 경우 재료의 파단이 발생하였다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행하였습니다.

## REFERENCES

- [1] T. A. Dean, 2000, The net-shape forming of gears, *Materials and Design*, Vol. 21, No. 4, pp. 271~278.
- [2] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, and J. Allwood, 2005, Asymmetric Single point Incremental Forming of Sheet Metal, *Ann. CIRP*, Vol. 52, No. 2, pp. 88~114.
- [3] W. C. Emmens, Gerd Sebastiani, and Antonius H. van den Boogaard, 2010, The technology of incremental sheet forming—a brief review of the history, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, No. 8, pp. 981~997.
- [4] A. Attanasio, E. Ceretti, C. Giardini, 2006, Optimization of tool path in two points incremental forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 409~412.
- [5] J. J. Park, Y. J. Kim, 2003, Fundamental Studies on the Incremental Sheet Metal Forming Technique, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 140, No. 1~3, pp. 447~453.
- [6] Ammar Adil, Al-Bakri, 2016, Tensile and fracture behaviour of very thin 304 stainless steel sheet, *J. Technol(Sci & Eng)*, Vol. 78, No. 6-9, pp. 45~50.
- [7] Y. Marumo, H. Saiki, and L. Ruan., 2007, Effect of sheet thickness on deep drawing of metal foils, *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, vol.20, No. 1-2, pp.479~482
- [8] H. W. Yoon, Y. S. Choi, W. I. Song, W. J. Hwang, H. Y. Hwang, C. W. Lee, 2018, Study on the mechanical property of ultra-thin stainless steels, 2018 Fall conference of Korea Society of Die & Mold Engineering OREA SOCIETY OF DIE & MOLD ENGINEERING
- [9] T. Obikawa, S. Satou, T. Hakutani, 2009, Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils, vol.49, No. 12-13, pp. 906~915.
- [10] T. Muthusamy, A. K. Jeevanantham, R. Kishore, and A. Rajeshkanan, 2018, Formability and Force Analysis of Steel Foils in Single Point Micro-Incremental Forming (SPMIF), *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, No. 5, pp. 12772~12781.
- [11] J. T. Gau, P. H. Chen, H. Gu, and R. S. Lee, 2013, The coupling influence of size effects and strain rates on the formability of austenitic stainless steel 304 foil, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 3, pp. 376~382.
- [12] T. J. Kim, D. Y. Yang, 2000, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, No. 7, pp. 1271~1286
- [13] K. Hamilton, J. Jeswiet, 2010, Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences, *Annals of CIRP*, Vol. 59, No. 1, pp. 311~314.
- [14] J.R. Duflou, H. Vanhove, J. Verbert, J. Gu, I. Vasilakos, P. Eyckens, Twist revisited: Twist phenomena in single point incremental forming, *Annals of CIRP*, Vol., 59, No. 1, pp. 307~310.