

3D 구조 알루미늄 판재의 점진판재성형 특성 평가 (제2보)

김영석^{1*}, Van-Cuong Do², 안대철²
¹경북대학교 기계공학부, ²경북대학교 대학원

Evaluation of incremental sheet forming characteristics for 3D-structured aluminum sheet - part 2

Young-Suk Kim^{1*}, Van-Cuong Do², Dae-Chul Ahn²

¹School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

²Graduate School, Kyungpook National University

요약 3차원 구조 알루미늄 판재(엠보싱 판재)는 표면적이 증가되어 방열효과가 뛰어나고 가공경화에 의해 굽힘강성 증가 효과가 있으므로 자동차 열차단 부품에 널리 사용된다. 그러나 엠보싱 판재는 평판의 판재와 비교하면 기계적 특성이 상이하고 또한 3차원 형상으로 인해 프레스 가공에 있어서 많은 제약이 따른다. 본 연구에서는 프레스 가공공정을 대신하여 최근 신제품의 디자인 검증과 시생산에 널리 채용되고 있는 점진성형공정을 대상으로 엠보싱된 판재의 성형특성을 평가하였다. 본 연구에서 채용한 공구형상을 이용한 사각 원뿔의 점진성형 결과, 엠보싱된 판재의 경우가 평판의 경우보다 더 큰 기울기를 갖는 사각 원뿔을 파단없이 성형할 수 있음을 보였다. 이는 점진성형공정에서 CNC 공구의 이동경로(tool path)하에서 공구가 엠보싱 판재의 산과 골을 눌러 복원시키면서 재료의 소성변형을 증가시키기 때문이다. 또한 공구의 이동경로가 내향 경로보다 외향 경로인 경우가 보다 큰 기울기의 제품을 성형할 수 있지만 스프링 백의 발생으로 제품의 표면품질은 열세에 있음을 보였다.

Abstract 3D-structured (embossed) aluminum sheets have been used in the heat insulation purpose for automotive exhaust parts because of increasing their surface areas and stiffness reinforcement imposed in making the embossing pattern. However, there are many restrictions in press forming of the embossed sheet compared with the flat sheet (non-embossed one) because of its difference in the mechanical properties and the geometrical 3-dimensional shape. In this paper we investigated the deformation characteristic of embossed aluminum sheet in the incremental sheet forming process which has frequently used in the design verification and the trial manufacturing of sheet products. The single point incremental forming (SPIF) experiments for the rectangular cone forming using the CNC machine with a chemical wood-machined die and a circular tool shape showed that the formability of the embossed sheet are better than that of the flat sheet in view of the maximum angle of cone forming. This comes from the fact that the embossed sheet between the tool and the elastic die wall is plastically compressed and the flattened area contributes to increase the plastic deformation. Also the tool path along the outward movement from the center showed a better formability than that of the inward movement from the edge. However the surface quality for the tool path along the outward movement evaluated from the surface deflection is inferior than that of the tool path along the inward movement

Key Words : 3D-structured panel, Embossed panel, Formability, Single point Incremental forming (SPIF), Tool path

이 논문은 2014학년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2014R1A2A2A01005903)

*Corresponding Author: Young Suk Kim(Kyungpook National University)

Tel:+82-53-950-5580 email: caekim@knu.ac.kr

Received February 10, 2015

Revised (1st March 6, 2015, 2nd March 11, 2015)

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

1. 서 론

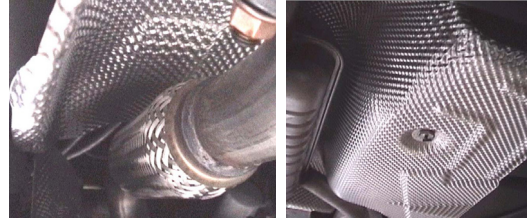
최근 자동차 산업에 있어서 지구환경 보호를 위한 많은 노력이 이루어지고 가운데 경량 소재로써 알루미늄 소재가 각광을 받고 있으며 고급차를 중심으로 차체의 내외 판넬에 알루미늄 판재가 선별적으로 사용되고 있다.[1]

그중에서도 배기계(머플러)의 경우에 $200^{\circ}C \sim 750^{\circ}C$ 정도 고열의 엔진 배기가스의 방열과 차열(heat shield)을 위한 목적으로 차체 하부에 3차원 구조 알루미늄 판넬(또는 2중 알루미늄 판넬) 혹은 알루미늄-실리콘 합금이 코팅된 강판이 널리 사용되고 있다(Figure 2).[2] 이 다양한 형태의 3차원 구조를 갖는 알루미늄 판넬(엠보싱 판넬)은 표면적이 증가되기 때문에 방열효과가 매우 뛰어나다. 또한 3차원 구조의 성형과정에서 부가된 소성변형에 의한 가공경화효과(strain hardening effect)에 의해 굽힘강성(stiffness reinforcement)이 증가한다. 그러나 3차원 구조 고유의 형상으로 인해 프레스 성형 중에 주름 발생률이 높아 성형에 많은 제약이 따른다는 것으로 알려져 있다.[3,4]

지금까지 연구 결과들은 3차원 구조 엠보싱 판넬의 엠보싱 깊이에 따른 기계적 특성의 변화[5] 및 딥드로잉 등과 같은 대표적인 변형 모드 하에서의 성형성[6] 등에 관한 연구가 주를 이루고 있고 실제 판넬의 성형에 관한 연구 사례는 많지 않다.[7]

최근에 자동차 현장에서 내외 판넬류 제품에 대한 디자인 평가 및 신제품의 품질평가를 위한 소규모 시제품(trial product) 제작에 있어서 CNC 머신을 이용한 점진 판재성형기술(incremental sheet forming, ISF)이 널리 사용되고 있다.[8,9,10] 이 ISF에서는 기존의 프레스 가공 공정에서와 같이 프레스와 상하금형을 이용하지 않는다. 그 대신에 CNC에 장착된 하나 또는 둘 이상의 구형 공구가 판재를 가압하면서 점진적으로 하형 또는 상형 금형과 접하도록 재료를 장출변형(stretch forming)시켜 원하는 제품형상을 가공하는 기술이다. 이 ISF 공정에서 최적 품질의 제품을 성형하기 위한 공정변수 - 공구크기, 가공피치, 공구경로, 공구속도 등 -의 영향 평가[11], 공구의 최적 이동경로 도출[12,13], 하나의 공구만을 이용하지 않고 TPIF(two point incremental forming)와 같은 복수의 공구이용[14], Ti4Al6V 등과 같이 난가공(難加工) 재료의 경우에 열원을 이용하는 하이브리드 성형기술

[15,16], ISF에서의 스프링 백의 평가[17,18,19] 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.



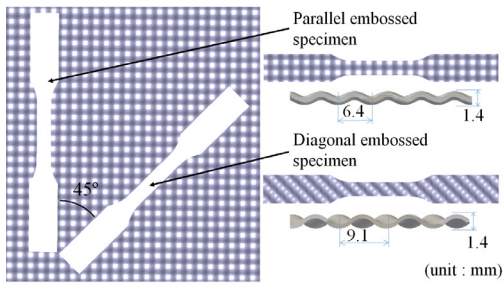
[Fig. 1] Application of embossed panels for heat protector

본 연구는 엠보싱된 알루미늄 방열 판넬의 시제품을 개발하기 위한 기초연구로써, 하나의 공구만을 이용하는 점진판재성형기술을 이용하여 사각 원뿔제품을 대상으로 점진판재성형에서의 성형특성 - 가공성과 스프링 백 - 을 평가하고 기존의 평평한 판재의 경우와 비교하였다. 또한 점진판재성형에서 재료의 성형성에 가장 영향을 미치는 것으로 알려진 공구경로의 영향을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 인장실험

본 연구에서 사용한 소재는 두께가 0.51mm 인 Al3004-P 알루미늄 판재이다. 이 판재를 엠보싱 콘 형상 롤러로 압연하여 피치 6.4mm, 높이 0.7mm의 엠보싱 콘 형상 배열 판재로 성형하였다. 소재의 기계적 특성을 구하기 위하여 KS B 0801 13호(평행부 폭 12.5mm, 평행부 길이 50mm)에 따라 엠보싱 가공 전의 평평한 원소재 시편(as-received flat specimen)과 Figure 2와 같이 엠보싱 가공된 3차원 구조의 평행 엠보싱 시편(parallel embossed specimen) 및 대각 엠보싱 시편(diagonal embossed specimen)을 레이저 절단하여 채취하였다. 이 시편을 Instron 5569의 인장시험기를 사용하여 KS B 082 규격에 따라 변위제어방식으로 인장실험을 수행하였다. 여기서 평행 엠보싱 판재는 엠보싱 가공된 산과 골이 인장방향과 동일 선상에 교대로 배치되어 있는 것을 말하며, 대각 엠보싱 판재는 엠보싱 가공된 산과 골이 서로 다른 열에 배치되어 있는 것을 의미한다.

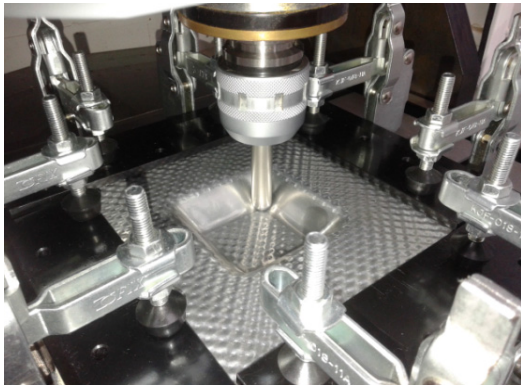


[Fig. 2] Schematics of the cone-shaped embossing sheet

2.2 점진판재성형실험

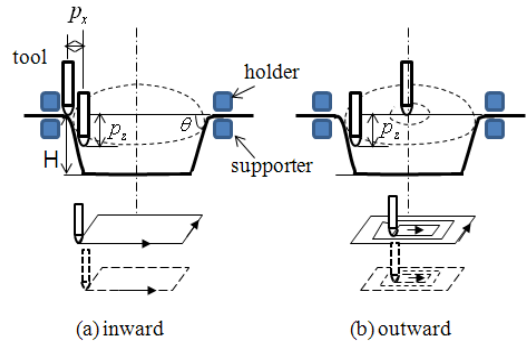
단일 공구를 이용한 점진성형(single point incremental forming, SPIF) 실험에 사용한 CNC M/C의 외관과 SPIF 중인 시편의 모양을 Figure 3에 나타내었다.

시편의 크기는 100mm*100mm, 하형 다이의 크기는 다이 입구의 크기가 80mm*80mm, 다이 어깨 반경이 10mm 이다. CNC 공구의 직경은 12mm 이며, 공구의 이송속도는 500mm/min, 공구의 회전속도 2rpm, 공구의 가공피치는 0.5mm 로 하였다. 실험 전에 시편의 상부에 충분한 가공 윤활유를 도포하여 공구와 시편간의 마찰을 가능한 억제하도록 하였다. 또한 시편의 외곽 경계(outer perimeter)를 톨클램프로 강하게 가압하여 가공과정 중에 항상 장출성형만이 발생하도록 하였다.



[Fig. 3] CNC-based incremental forming machine using cylindrical tool and toggle clamp jig

엠보싱된 판재의 성형특성을 평가하기 위하여 Figure 4에 나타낸 것과 같이 원뿔의 깊이 H 를 50mm로 고정하고 원뿔의 기울기 θ 를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.



[Fig. 4] Schematic view of the single point incremental forming process for two tool paths, (a) inward movement of tool path (b) outward movement of tool path

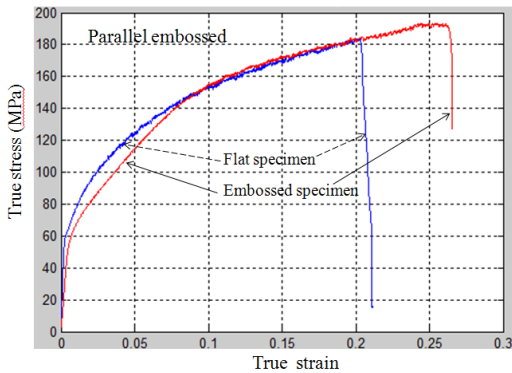
또한 SPIF에서 중요한 공정변수인 공구경로가 가공성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Figure 4에 공구가 성형할 제품의 외관 형상만을 따라 이동하는 경우(내향 공구경로)와 제품의 내부로부터 판재의 외곽으로 이동하는 경우(외향 공구경로)에 대해서 검토하였다. 본 연구에서는 공구경로의 생성에 Cymatron SW를 사용하였다. Fig.4에서 H 는 성형깊이, P_x 는 공구의 중심방향 이동피치, P_z 는 공구의 아래방향 이동피치, θ 는 사각 원뿔제품의 기울기이다.

2.3 인장실험 결과

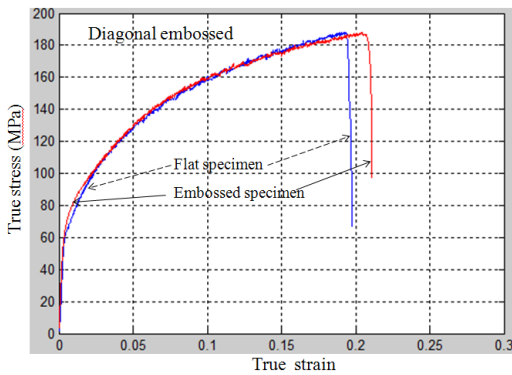
Figure 5와 Figure 6에 각각 평형 엠보싱 판재와 대각 엠보싱 판재의 인장응력-변형률 선도(유동곡선)를 평평한 원소재와 비교하여 나타내었다. Table 1에 인장실험 결과를 요약하였다.

Figure 5와 Figure 6 그리고 Table 1로부터 알 수 있듯이 엠보싱된 판재는 원소재와 비교하면 인장방향에 따라 서로 다른 인장특성을 보인다. 특히 Figure 5의 평형 엠보싱 판재의 경우는 엠보싱된 산과 골이 인장방향과 동일 선상에 교대로 배치되어 있기 때문에 판재가 인장을 받으면 엠보싱 가공된 산과 산, 골과 골 사이에 굽힘력이 작용하여 산과 골이 각각 소성복원되면서 항복직후에 유동응력이 원소재 대비 낮게 나타난다.

그러나 소성변형률이 일정한 크기 이상이 되면 (약 0.085 이상) 엠보싱 형상이 복원되어 거의 펴진 상태가 되기 때문에 원소재의 유동곡선을 따른다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 5] Tensile stress-strain curves for as-received and parallel embossed specimens



[Fig. 6] Tensile stress-strain curves for as-received and diagonal embossed specimens

[Table 1] Mechanical properties for as-received flat and embossed specimens evaluated by $\sigma = K\epsilon^N$

Direction	As-received	Embossed	
	Mean	Parallel	Diagonal
σ_Y (MPa)	60.5	57.4	64.0
σ_{TS} (MPa)	183	193	184
E (GPa)	70.0	47.0	58.3
Strain hardening exponent, N	0.30	0.32	0.27
Strength coefficient, K (MPa)	312	317	296
Elongation (%)	0.2	0.27	0.21
Plastic anisotropic coefficient, R	0.59	0.03	0.23

한편 엠보싱 가공된 판재의 최대 연신율은 약 27% 정도로 원소재와 비교하면 7% 정도 향상되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 엠보싱된 판재의 경우에 인장 초기에는 낮은 항복응력을 보이고 파단 연신률이 크게 나타나기 때문에 평평한 원소재와 비교하면 점진판재성형 공정에서도 가공성이 향상될 것이 예상된다.

Figure 6의 대각 엠보싱 판재의 경우는 엠보싱 가공된 산과 골이 서로 다른 열에 배치되어 있기 때문에 판재가 인장을 받으면 산과 골이 각각 인장하중을 지탱하면서 초기의 엠보싱된 형상을 유지하기 때문에 항복직후 유동응력이 원소재에 비하여 높게 나타나지만 이후 점차 원소재의 유동곡선을 따른다는 것을 알 수 있다.

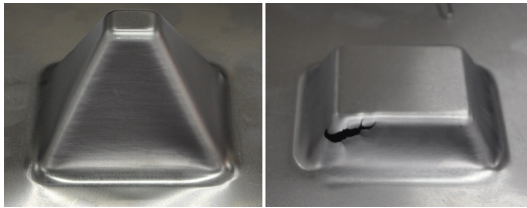
2.4 점진판재성형실험 결과

Figure 7과 Figure 8(a), (b)에 평평한 원소재와 엠보싱된 소재의 점진판재성형 후의 외관 형상을 나타내었다.

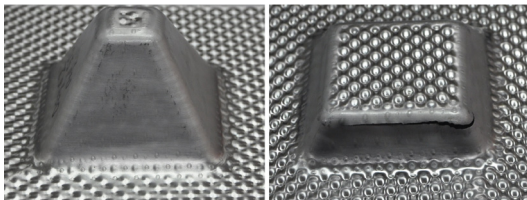
원소재의 경우 동일한 50mm 성형깊이에서 원뿔의 기울기가 60도까지 파단발생이 없이 성형이 가능하였으나 62도에서는 사각 원뿔의 코너부에서 조기에 파단이 발생하였다. 한편 엠보싱 소재의 경우는 Figure 8(a)의 내향 공구경로에서 62도 까지, Figure 8(b)의 외향 공구경로에서는 64도 까지 파단 발생없이 성형이 가능하였다. 엠보싱 소재의 경우도 모두 사각 원뿔의 코너에서 파단이 발생하였다. 이 결과를 Table 2에 요약하였다.

파단없이 성형된 모든 사각 원뿔제품에서 원뿔의 각 면에서 크기의 차이는 있으나 모두 제품의 안쪽으로 휘어져 있는 상태이다(면처짐 발생). 이는 본 점진성형 공정에서는 외부의 하형 다이를 사용하지 않고 구형 공구만을 이용하여 판재를 성형하기 때문에 발생하는 것이다. 즉 원뿔 단면의 외주를 이동하는 공구에 의해 굽힘장출-전단 가공된 판재가 공구의 이동 후에 역굽힘력을 받아 스프링 백에 의해 제품의 안쪽으로 굽는 형태가 된 것이다. 그러나 사각 원뿔형 하형 다이를 사용한 경우는 두께 방향으로 큰 가압력과 전단력이 작용하기 때문에 이런 면처짐은 거의 발생하지 않았다.

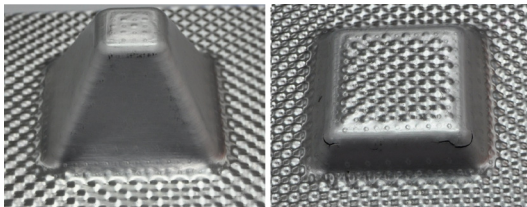
하형 다이를 사용하지 않는 점진성형공정에서 발생하는 이런 스프링 백을 예측하고 보상하기 위한 방법에 대한 후속 연구가 필요할 것이다.



[Fig. 7] Deformed shapes of flat specimen for the cone angles $\theta = 60^\circ$ (safe formed, left) and 62° (failure occurred, right) in the case of inward movement tool path



[Fig. 8(a)] Deformed shapes of embossed specimen for the cone angles $\theta = 62^\circ$ (safe formed, left) and 64° (failure occurred, right) in the case of inward movement tool path



[Fig. 8(b)] Deformed shapes of embossed specimen for the cone angles $\theta = 64^\circ$ (safe formed, left) and 66° (failure occurred, right) in the case of outward movement tool path

[Table 2] Maximum forming angle for flat specimen and embossed specimens

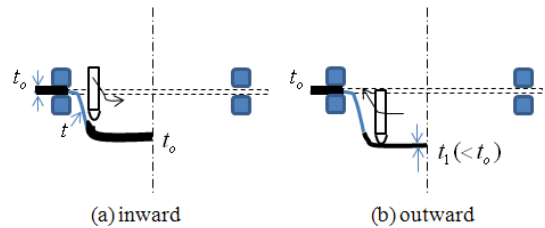
		Maximum formable angle($^\circ C$)			
		60	62	64	66
Flat sheet		○	×		
Embossed sheet	Inward path	○	○	×	
	Outward path	○	○	○	×

○: safe forming, ×: failure occurred

이러한 점진성형 결과로부터 엠보싱된 판재의 경우가 평판의 경우보다 더 큰 기울기를 갖는 사각 원뿔을 파단 없이 성형할 수 있음을 알 수 있다. 이는 엠보싱 판재의 경우는 공구가 엠보싱 판재의 산과 골을 눌러 복원 (restoration)시키면서 재료의 소성변형을 증가시키기 때문이다.

한편 동일한 엠보싱 판재의 경우라도 외향 공구경로가 내향 공구경로보다 더 큰 경사 제품을 성형할 수 있었다.

이것은 Figure 9에 도시한 것과 같이 외향 공구경로의 경우는 제품의 중심부로부터 시작하여 점차적으로 제품의 외주로 공구가 이동함에 따라, 이미 앞선 공정에서 소성가공을 받아 가공면 전체에서 두께차이가 크지 않으므로 공구위치 주변에서의 소성변형이 균일하게 진행되기 때문이다. 반면 내향 공구경로의 경우 성형이 이루어진 외곽부와 소성변형을 받지 않은 중심부의 두께차이로 인해, 중심부에서의 변형저항이 커지게 되어 외곽 경사면에서의 파단이 주기에 발생하는 것으로 판단된다.



[Fig. 9] Explanation of the difference of forming characteristic of embossed specimen between two tool paths, where t_0 is the original thickness, t is the deformed thickness at the cone-wall area, and t_1 is the deformed thickness at the cone-bottom area

Jeswiet [20]는 두께가 1.2mm의 AA3003-O 판재에 대해서 원뿔 성형실험을 통해 파단 발생없이 성형가능한 기울기를 다음 식으로 나타내었다.

$$\theta_{\max} = 8.5t_0 + 60.7 (^\circ C) \quad (1)$$

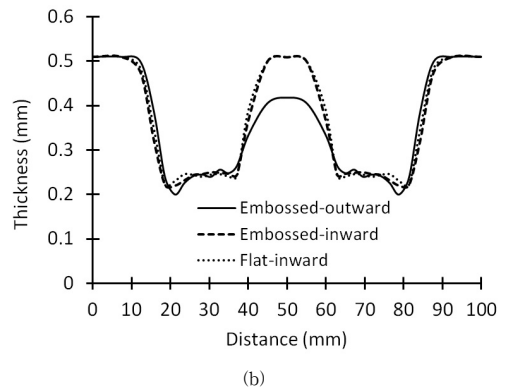
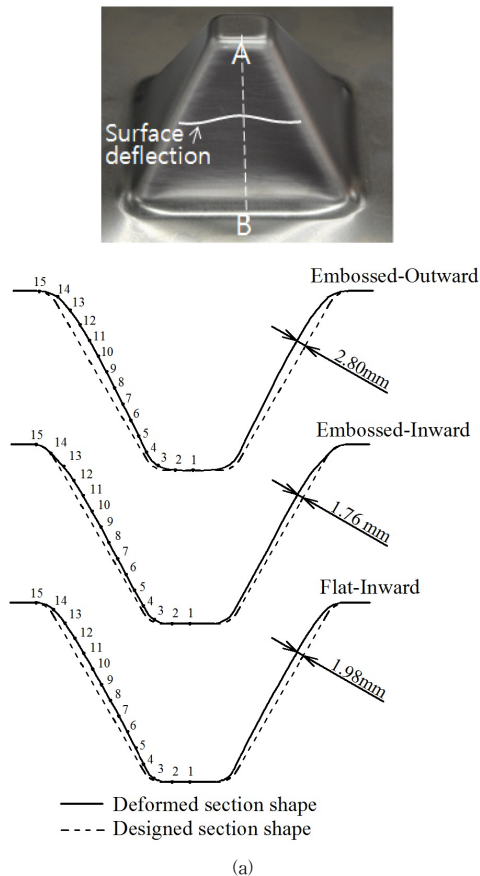
이 식에 따르면 본 연구에서 사용한 두께 0.51mm 판재의 경우 사각 원뿔에 대한 성형 가능한 최대 기울기는 약 65.3도이다. 그러나 실제 본 연구에서 얻어진 결과는 60도~64도 범위에 있다. 이 오차는 성형하는 제품의 형

상 및 가공조건에 기인하는 것으로 판단된다.

Figure 10(a), (b)에 모든 경우에 파단이 발생하지 않는 기울기 60도에서 사각 원뿔 횡단면의 형상과 단면에서의 두께 분포를 나타내었다.

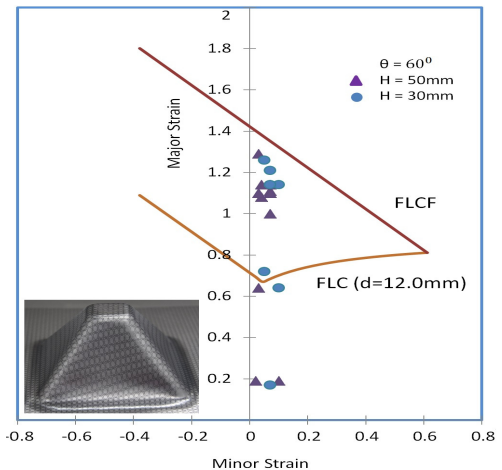
성형된 원뿔의 횡단면의 형상을 측정하기 위하여 제품의 단면을 와이어 컷팅한 후 단면형상을 측정하였다. Figure 10(a)에서 알 수 있듯이 성형된 제품의 벽부분에서 스프링 백이 발생하여 안쪽으로 휘어진 면처짐이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 면처짐량은 엠보싱된 소재에 대해서 외향 공구경로와 내향 공구경로일 때 각각 2.80mm, 1.76mm 이며, 평평한 소재의 경우가 1.98mm이었다.

따라서 Table 2와 Figure 10(a)의 결과로부터 엠보싱된 소재의 경우에는 원소재와 비교하여 더 큰 기울기를 갖는 사각 원뿔제품을 성형할 수 있지만, 외향 공구경로의 경우는 제품 표면품질 면에서 상대적으로 열세에 있음을 알 수 있다.



[Fig. 10] (a) Cross section view of deformed shape and (b) thickness distributions along the section line AB for the flat specimen and the two embossed specimens at the cone angle $\theta = 60^\circ$

한편 Figure 10(b)의 횡단면 길이방향으로 측정된 두께분포로부터 가장 두께 감소가 크게 일어난 위치는 사각 원뿔 밑면으로부터 약 20mm 위치임을 알 수 있다. 평평한 원소재와 엠보싱 소재의 내향 공구경로의 경우에 이 위치에서의 최대 두께 감소율은 56.8%, 엠보싱된 소재의 외향 공구경로의 경우가 60.7%이었다. 한편 엠보싱된 소재의 외향 공구경로의 경우 사각 원뿔의 정점 근처에서는 두께가 15.6% 정도 얇아진 것으로 나타난다.



[Fig. 11] The strain distribution and forming severity evaluated using forming limit curve at fracture of the flat specimen

Figure 11에 평평한 원소재를 원뿔의 기울기 60도에 대해서 성형깊이 30mm 와 50mm 까지 성형하였을 때의

변형률 분포를 성형한계선도상에 도시하였다. SPIF 공정 중에 판재가 받는 변형률을 분석하기 위하여 평평한 원 소재에 직경 2.54mm 크기의 그리드를 마킹하고, 성형 후 그리드의 주변형률과 부 변형률을 측정하였다. 함께 표현된 과단성형한계선(forming limit curve at fracture, FLCF)은 본 연구자들이 개발한 프로그램을 이용하여 도출하였다.[21, 22]

계산된 과단성형한계선은 $\epsilon_1 = -\epsilon_2 + 1.42$ 로 나타내진다.

사각 원뿔의 횡단면에서 측정된 변형률은 부변형률이 0~0.1 사이에 존재하여 원뿔의 점진성형공정은 거의 평면변형 상태에서 있음을 알 수 있다. 또한 이 변형률분포는 통상의 프레스 공정에서 정의되는 판재의 성형한계선(forming limit curve, FLC)을 넘어서지만 점진성형공정에서 정의되는 과단성형한계선 FLCF 보다는 아래에 존재하여 과단이 발생하고 있지 않음을 알 수 있다.

엠보싱된 소재의 경우는 표면의 돌출형상으로 변형률 측정이 어려워 본 연구에서는 과단성형한계선과 비교하지 못하였다.

본 연구에서와 같이 사각 원뿔형 하형 다이가 존재하지 않는 자유 성형에서는 외향 공구경로의 경우가 내향 공구경로와 비교하여 경사가 더 큰 원뿔을 성형할 수 있었으며 원하는 제품형상에 근접한 제품을 얻을 수 있었다. 그러나 Kitazawa 등의 연구[23]에 따르면 하형 다이가 존재하면 외향 공구경로의 경우가 성형한계가 낮은 반면에 보다 양호한 제품이 성형된다는 상반된 결과를 보였다.

3. 결론

본 연구에서는 자동차용 열차단 제품으로 널리 사용되고 있는 알루미늄 3D 구조판넬(엠보싱 판넬)을 대상으로 점진성형공정에 대한 엠보싱 판재의 성형특성을 연구하였다.

본 연구에서 채용한 공구형상을 이용하여 사각 원뿔형상제품을 성형하는 경우에 0.51mm 두께의 Al 3004-P 판재는 최대 성형가능한 기울기가 평평한 원소재의 경우에 60도이며, 엠보싱된 소재의 경우 약 62~64도이다. 이로부터 엠보싱된 판재의 경우가 평판의 경우보다 더 큰 기울기를 갖는 사각 원뿔을 과단없이 성형할 수 있음을 알 수 있다. 이는 점진성형공정에서 CNC 공구의 이동경

로(tool path)하에서 공구가 엠보싱 판재의 산과 골을 눌러 복원시키면서 재료의 소성변형을 증가시키기 때문이다.

또한 공구의 이동경로가 내향 경로보다 외향 경로인 경우 2도 정도 큰 기울기의 제품을 성형할 수 있음을 보였다. 그러나 표면품질면에서는 외향경로의 경우가 오히려 열세에 있다.

하형 다이를 사용하지 않는 점진성형공정에서 발생하는 면처짐을 예측하고 보상하기 위한 유한요소해석 연구가 진행 중에 있다.

References

- [1] Y.S. Kim, K.S. Kim, N.C. Kwon, Press formabilities of aluminum sheets for autobody application, J. Korean Soc. Auto. Eng., Vol.2, No.1, pp.73-83, 1994.
- [2] Y.S. Kim et al., Evaluation apparatus and method for insulation efficiency of the heat protector of the automobile, Korea Patent, No.10-1004202, 2010
- [3] http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/alusi/alusi_specific_applications/EN
- [4] Y.S.Kim, J.H. Cho, Van-Cuong Do, D.W.Shin, Evaluation of mechanical properties and springback for 3D-structured aluminum sheet - part I, J. Korea Academia-Ind. Coop. Soc., Vol.16, No.2, pp.921-926, 2015.
- [5] H.Guler, R.Ozcan, Effects of the rotary embossing process on mechanical properties in aluminum alloy 1050 sheets, Met. Mater. Int., Vol.18, No.2, pp.225-230, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12540-012-2004-8>
- [6] T. Abe, T. Yasota, Y. Nonaka, S. Saka, T. Kuwabara, Forming simulation of emboss formation by roll forming, Proc. 208 Japanese Spring Conf. Technol. Plasticity, pp.253-254, 2008
- [7] M. Melnykowycz, D. Caprioli, Development of aluminum heat shield designs using optistruct and Hyperform, 4th European HyperWorks Tech. Conf., Versailles, France, 2010.
- [8] H. Iseki, K. Kato, S. Sakamoto, Flexible and incremental sheet metal bulging using a path-controlled spherical roller, Trans Japan Soc. Mech. Engng., Vol. 58-554, pp 3147-3155, 1992 (in Japanese).
- [9] W.C. Emmens, G. Sebastiani, A.H. van den Boogaard, The technology of incremental sheet forming- A brief review of the history, J. Mater. Process. Technol., Vol.210, pp. 981-997, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2010.02.014>

- [10] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy, J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, CIRP Annals- Manuf. Technol., Vol.54(2), pp.88-114, 2005.
- [11] Y.H. Kim, J.J. Park, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, J. Mater. Process. Technol., Vol.130-131, pp. 42-46, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00788-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00788-4)
- [12] T.J. Kim, D.Y. Yang, Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process, Int. J. Mech. Sci., Vol.42, pp. 1271-1286, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00047-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00047-8)
- [13] M. Azaouzi, N. Lebaal, Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method, Simul. Model. Pract. Theory, Vol.24, pp.49-58, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2012.01.008>
- [14] K. Jackson, A. Allood, The mechanics of incremental sheet forming, J. Mater. Process. Technol., Vol.209, pp. 1158-1174, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2008.03.025>
- [15] B. Taleb Araghi, A. Gottmann, M. Bambach, G. Hirt, G. Bergweiler, J. Diettrich, M. Steiners, A. Saeed-Akbari, Review on the development of a hybrid incremental sheet forming system for small batch sizes and individualized production, Prod. Engng., Vol.5(4), pp.393-404, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-011-0325-y>
- [16] A. Gottmann, J. Diettrich, G. Bergweiler, M. Bambach, G. Hirt, P. Loosen, R. Poprawe, Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts, Prod. Eng. Res. Devel. Vol.5(3), 2011, pp.263-271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-011-0299-9>
- [17] F. Han, J.H. Mo, H.W. Qi, R.F. Long, X.H. Cui, Z.W. Li, Springback prediction for incremental sheet forming based on FEM-PSONN technology, Trans. Nonferrous Metals Soc. China, Vol.23(4), pp.1061 - 1071, 2013. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62567-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62567-4)
- [18] Z. Jettler, H. Rezaei, G. Hirt, Springback compensation for incremental sheet metal forming applications, LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, C-1-21~C-1-32, 2008.
- [19] M.S. Khan, F. Coenen, C. Dixon, S.El-Salhi, M. Penalva, A. Rivero, An intelligent process model: predicting springback in single point incremental forming, Int J Adv Manuf Technol, 2014, be in print. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6431-1>
- [20] J. Jeswiet, E. Hagan, A. Szekeres, Forming parameters for incremental forming of aluminum sheet metal, IMECHE part B, J. Engng. Manuf., Vol.216, pp.1367-1371, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/095440502320405458>
- [21] D.T. Nguyen, Y.S. Kim, A numerical study on establishing the forming limit curve and indicating the formability of complex shape in incremental sheet forming processes, Int. J. Prec. Engng. Manuf., Vol.14, No.12, pp. 2087-2093, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-013-0283-8>
- [22] D.T. Nguyen, S.H. Yang, D.W. Jung, T.H. Choi, Y.S. Kim, Incremental sheet metal forming: numerical simulation and rapid prototyping process to make an automobile white-body, Steel Research Int., Vol.82 (7), pp.795-805, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/srin.201000284>
- [23] K. Kitazawa, A. Wakabayashi, K. Murata, K. Yaejima, J. Light Metals, Vol.46(2), pp.65-70, 1996 (in Japanese). DOI: <http://dx.doi.org/10.2464/jilm.46.65>

김 영 석(Young-Suk Kim)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 4월 : 일본 Kobe 대학교 기계공학 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1994년 2월 : 포항 산업과학연구원 연구실장
- 1994년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

생산공학, 소성역학, 나노/마이크로역학, FEM 및 Biomechanics

Van-Cuong Do

[정회원]



- 2013년 5월 : Ha Noi University of Science and Technology
- 2013년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 대학원 박사과정 재학 중

<관심분야>

판재 소성가공, 복합재료 가공 기술

안 대 철(Dae-Cheol Ahn)

[정회원]



- 2011년 5월 : 대구카톨릭대학교 기계공학과
- 2013년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 대학원 석사과정 재학 중

<관심분야>

판재 소성가공, CAE