



APU Duct 성형 공정의 주름 개선을 위한 판재 성형 해석 및 실험적 연구

이남석^{a,*}

Numerical and Experimental Study on Wrinkle Improvement in Sheet-Metal Forming Process of APU Duct

NamSeok Lee^{a,*}^a Department of Smart Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	13	April	2026
Revised	9	May	2026
Accepted	18	May	2026

Keywords:

APU duct
Sheet metal forming
Wrinkling
LS-DYNA
Draw bead

ABSTRACT

This study investigates wrinkle improvement in the sheet-metal forming process of an APU duct with a complex curved geometry through numerical analysis and forming experiments. The target component was manufactured from a 1.0 mm-thick SUS304 sheet. Material properties obtained from tensile testing were applied to LS-DYNA. In the initial trial, severe wrinkles appeared in the central curved region, although the thickness distribution satisfied the allowable range. Analysis results showed that the defect was caused by localized buckling due to in-plane compressive strain. Three bead configurations in the radial direction were proposed and evaluated to suppress wrinkling. The optimal bead design effectively redistributed the material flow and reduced wrinkles in both the simulation and experiments under a 100 ton ram force and a 20 ton blank holder force.

1. 서론

항공기용 Auxiliary Power Unit (APU)는 주 추진기관과는 독립적으로 작동하는 보조 동력 장치로서, 지상 및 일부 비행 조건에서 전력 또는 압축공기를 공급하는 핵심 시스템이다. 일반적으로 APU는 항공기 후방부에 배치되며, 주 엔진이 정지된 상태에서도 전기 계통, 공조 계통 및 엔진 시동 보조 기능을 수행함으로써 항공기의 자립 운용성을 높인다.

Fig. 1은 항공기에 적용되는 APU의 위치와 역할을 개념적으로 나타낸 것으로, APU가 항공기 후방부에 탑재되어 보조 압축공기 공급과 보조 전력 발전 기능을 수행함을 보여준다. 이러한 기능적 특성으로 인해 APU는 항공기 운용 효율과 시스템 안정성 측면에

서 중요한 장치로 인식된다. 이와 같은 APU 시스템을 구성하는 덕트(duct) 부품은 공기 유동 통로를 형성하는 동시에 제한된 공간 내 조립성, 경량성 및 구조적 강건성을 모두 만족해야 하므로 복잡한 3차원 곡면 형상을 갖는 경우가 많다. Fig. 2와 같이 본 연구 대상 APU 덕트는 내측 부품(inner part)과 외측 부품(outer part)으로 구성되며, 최종적으로 조립체 형태로 완성된다.

한편, 판재 성형은 높은 소재 이용률, 경량화, 우수한 표면 품질 및 반복 생산성 측면에서 유리하여 항공기 덕트류 부품 제작에 적합한 제조 방식으로 평가된다^[1-3]. 하지만, 곡면을 갖는 비정형 부품의 경우 성형 중 재료 유입이 불균일하게 발생하여 주름, 두께 편차, 국부 좌굴 등의 결함이 발생하기 쉽다^[3-6]. 특히, 딥 드로잉(deep drawing) 공정에서는 블랭크의 면내 압축응력이 특정 구간

* Corresponding author. Tel.: +82-55-751-2079

E-mail address: nslee@yc.ac.kr (NamSeok Lee)

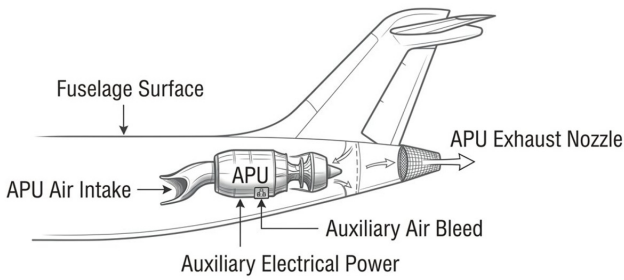


Fig. 1 Overall concept of the APU and its functions

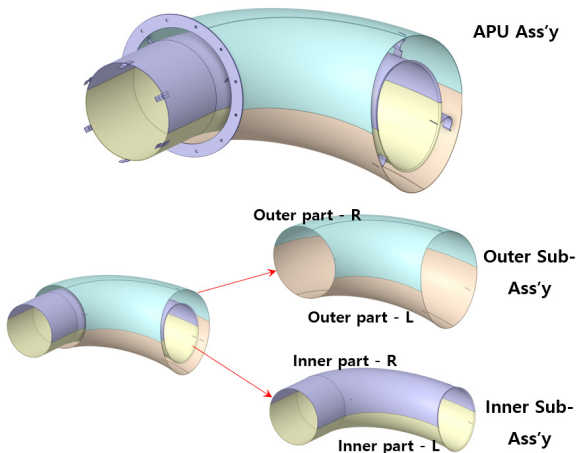


Fig. 2 Configuration of the APU duct assembly

에 집중될 경우 곡률 변화가 큰 위치에서 주름(wrinkling)이 발생할 수 있으며, 이러한 결함은 외관 품질뿐 아니라 후속 조립 공정에도 악영향을 미친다^[4-8].

관재 성형 공정에서 주름은 일반적으로 면내 압축변형률의 집중, 블랭크 홀더력의 부족 또는 불균일한 재료 유입에 의해 발생하며, 이를 제어하기 위한 대표적인 방법으로는 블랭크 홀더 조건 조정과 비드(bead) 적용이 널리 사용된다^[4, 7-10]. 기존 연구에서, 비드는 재료 유입 저항을 증가시켜 국부적인 압축상태를 완화하고 인장 지배 유동을 유도함으로써 주름 억제에 효과적인 것으로 보고되어 왔다^[7-10]. 따라서 본 연구에서는 APU 덕트 성형 공정에서 발생한 주름 문제를 대상으로, 초기 성형품의 결함 원인을 분석하고 성형 해석과 실제 성형 공정을 병행하여 개선 방안을 도출하고자 하였다. 수치해석적 방법으로 주름 발생 메커니즘을 면내 압축변형 관점에서 해석하고, 비드의 위치 배치에 따른 압축변형 및 주름 개선 효과를 비교 검토하였다.

기존 비드 관련 연구에서는 주로 접선 방향(tangential direction)으로 배치된 비드를 적용하여, 내측으로의 과도한 재료 유입에 의해 발생하는 주름을 억제하고자 했다^[10-12]. 그러나 비정형 곡면 부품에서는 주름이 반드시 내측으로의 과도한 재료 유입에 의해서만 발생하는 것은 아니며, 국부 곡면부에서는 특정 곡면 방향으로 압



Fig. 3 Hydraulic press used for deep drawing

축변형이 집중됨에 따라 발생할 수 있다. 본 연구에서는 국부 곡면부에서 발생하는 좌우 방향 재료 유동 불균형에 기인한 주름을 개선하기 위해, 해당 방향의 재료 유동을 직접 제어할 수 있는 반경 방향(radial direction) 비드 적용 방안을 제안하였다. 반경 방향 비드 적용에 따른 국부 곡면부의 주름 개선 효과를 검토하기 위해 수치해석을 수행하였으며, 최종적으로 반경 방향 비드가 적용된 실제 성형 샘플을 제작하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 실험 방법

2.1 대상 부품 및 성형 공정

본 연구의 대상은 항공기 APU 시스템에 적용되는 곡면 박판 덕트 부품이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 대상 부품은 3차원 곡률 변화를 포함하는 비정형 형상으로 구성되어 있으며, 일반적인 축대칭 딥 드로잉 부품보다 성형 난이도가 높다. APU 덕트 내측 부품과 외측 부품이 조립되어 최종 덕트를 제작하므로, 성형 단계에서 곡면부의 형상 안정성 및 두께 균일도 확보가 중요하다. 본 연구에서는 APU 덕트의 내측 부품을 대상 부품으로 선정하였다.

2.2 성형 장비 및 실험 조건

성형 실험에는 Fritz Muller 사의 유압 프레스(BZE240-10.1.2)를 사용하였다. Fig. 3은 실제 딥 드로잉 공정에 적용된 유압 프레스

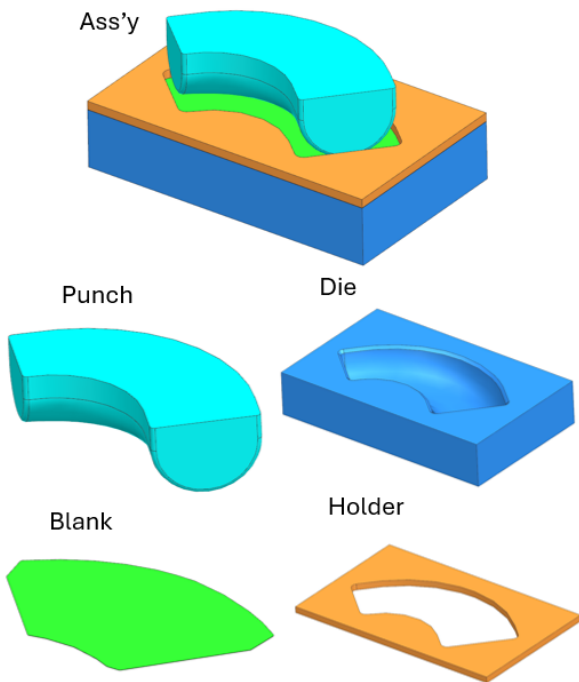


Fig. 4 3D models of punch, die, blank, and holder

스 장비를 보여준다. 해당 설비는 약 14,000 kg 급이며, 최대 램 하중은 150 ton, 블랭크 홀더의 최대 하중은 80 ton이다. 초기성형 검토 결과, 램 하중 또는 블랭크 홀더력을 증가시킬 경우, 블랭크의 유입이 억제되어 주름 발생은 일부 완화될 수 있으나, 펀치 코너부 및 곡률 변화부에서 인장 변형이 증가하여 국부 두께 감소가 커지고 두께 균일도가 저하되는 경향을 보였다. 따라서 본 연구에서는 우선적으로 두께 균일도를 확보하기 위해, 램 하중 100 ton 및 블랭크 홀더력 20 ton을 고정하여 적용하였다.

블랭크 소재는 두께 1.0 mm의 SUS304 판재를 적용하였다. SUS304는 내식성, 성형성 및 용접성이 우수하여 박판 덕트 부품에 적용성이 높으나, 성형 중 가공경화 거동이 뚜렷하여 공정 조건 제어가 중요하다^[1,3,11]. 특히, 본 대상 부품과 같이 곡률 변화가 큰 형상에서는 재료 유입 방향 및 블랭크 홀딩 조건에 따라 국부 압축이 쉽게 발생할 수 있다^[4,5].

대상 부품의 제조를 위해 펀치(punch), 다이(die), 블랭크 홀더(blank holder) 및 블랭크(blank)로 구성된 금형 세트를 설계하였다. Fig. 4는 성형 공정에 사용된 금형 세트의 3D 모델링 결과를 보여준다. 위쪽에는 조립(Ass'y) 이미지, 아래쪽에는 펀치, 다이, 블랭크, 홀더의 이미지를 각각 보여준다. 본 연구 대상 성형품이 단순 평면 변형이 아닌 실제 3차원 곡면 형상을 따라 성형되는 구조임을 확인할 수 있다.

2.3 재료 물성 및 해석 조건

성형해석에 적용하기 위하여 대상 블랭크 소재(SUS304)에 대

Table 1 Mechanical properties of SUS304 based on engineering stress and true stress

Category	Engineering strength	True strength
Elastic modulus (GPa)	200	200
Yield strength (MPa)	410	415
Tensile strength (MPa)	685	1070

한 인장시험 결과를 토대로 물성 데이터로 반영하였다. Table 1은 성형 해석을 위한 SUS304의 인장시험 데이터를 보여준다. 본 연구에서는 대변형 해석에 적합한 진응력(true strength) 기준의 기계물성 데이터를 적용하였다^[1,3,11].

성형해석은 LS-DYNA 를 이용하여 수행하였다. LS-DYNA는 대변형 소성 해석 및 국부 좌굴 거동 해석에 널리 사용되는 프로그램으로, 판재 성형 분야에서 높은 적용성을 가진다^[12, 13]. 해석 모델은 실제 성형 공정과 동일하게 펀치, 다이, 블랭크 홀더 및 블랭크를 포함하도록 구성하였으며, 블랭크 소재는 SUS304, 초기 두께는 1.0 mm로 설정하였다. 금형-블랭크 간 접촉부에는 딥 드로잉에서의 유입 저항으로 인한 파단 등의 불량을 방지하기 위해서, 윤활유(SINCOOL社 DR-201)를 활용한 윤활이 적용되었다. 성형 해석시 접촉 조건에서 마찰 계수는 윤활유 적용 조건에서 저마찰 조건인 0.05를 적용하였다^[4, 9, 12].

성형 해석 및 공정에서의 평가 항목은 주름 발생 여부, 변위 분포, 두께 분포 및 면내 압축변형률 분포로 설정하였고, 초기 금형 조건에서의 해석을 우선 수행한 후 비드 적용안을 반영한 각 설계안을 비교 평가하였다. 특히, 주름의 발생 가능성은 제품 표면 방향의 면내 압축변형률 분포를 중심으로 검토하였다^[4,6].

3. 결과 및 고찰

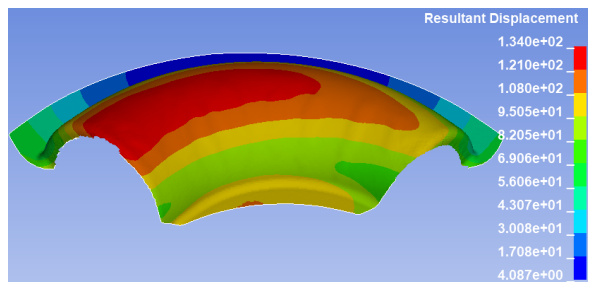
3.1 1차 성형 해석 및 원인 분석

1차 샘플 제작 결과, 두께 변화는 허용 스펙(-25~15%)을 만족하였으나, 제품의 굽은 중앙부를 따라 다수의 주름이 발생하였다. Fig. 5는 1차 성형품에서 발생한 실제 주름 불량을 보여주며, 중앙 곡면부를 따라 주름이 집중적으로 형성된 모습을 확인할 수 있다. 이는 성형 공정 중 블랭크 소재가 다이 금형 내부로 과도하게 유입되면서 국부적으로 재료가 좌우 방향으로 축적되었음을 의미한다.

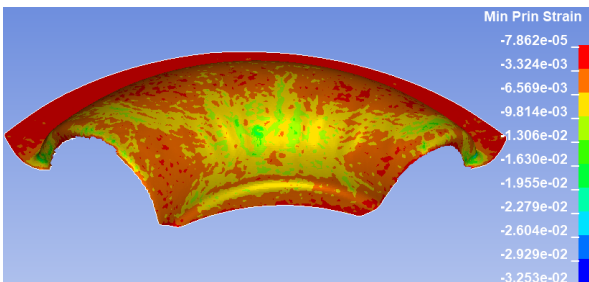
Fig. 6은 초기 성형 조건에 대한 해석 결과를 보여준다. 해석 결과에서도 실제 성형품과 유사하게 중앙부 주름이 확인되었다. Fig. 6에서 보는 것과 같이, 주름 발생 형상과 함께 최소 주변형률(min principal strain) 및 x-y 변형률(x-y strain) 분포가 실제 실험 결과와 유사한 경향으로 나타남을 볼 수 있다. 중앙 곡면부에서 최소 주변형률 값이 집중되어 면내 압축변형이 크게 발생하였고, 좌우 방향의 국부적인 좌굴이 발생하였음을 확인할 수 있다.



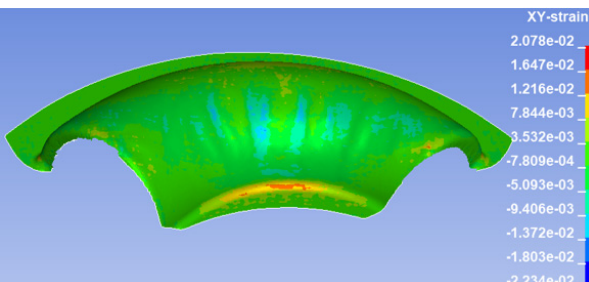
Fig. 5 Wrinkle defect observed in the first forming trial



(a)



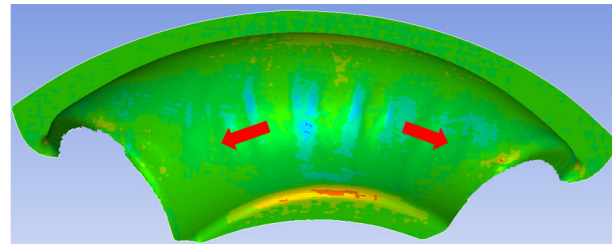
(b)



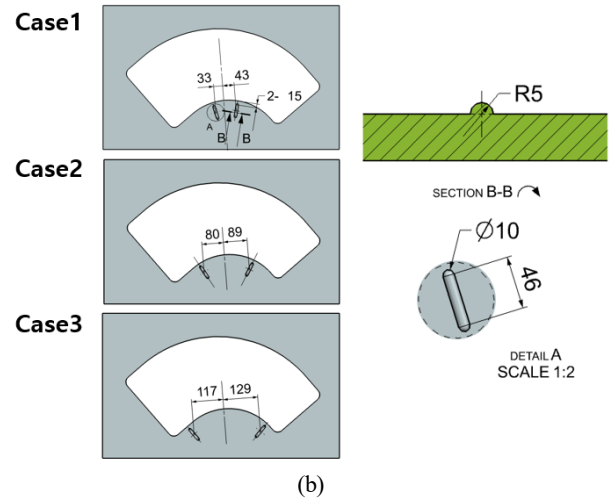
(c)

Fig. 6 Simulation results of the initial forming process with wrinkle occurrence: (a) displacement, (b) min principal strain, (c) x-y strain

Fig. 6에서 보는 바와 같이, 주름은 최소 주변형률에서 확인되는 압축 변형률의 집중에 의해 발생하는 국부 좌굴 현상으로 파악되었다. 또한, x-y 변형률 분포가 주름 발생부와 유사한 분포를 나타내어, 해당 영역에서 비균일한 재료 유동 및 전단 성분이 동반되었음을 보여준다. 즉, 성형 중 블랭크 유입이 균일하게 제어되지 못하면서 중앙부에 압축변형이 집중되어 주름이 형성된 것으로 확인된다^[4-8].



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Basic concept diagram for wrinkle improvement and (b) Proposed radial directed bead design of blank holder for wrinkle improvement

3.2 개선 설계 반영 해석 결과

주름 개선을 위해 판재 표면 방향의 면내 압축을 완화하고 인장 지배 유동을 유도할 수 있는 비드 적용안을 검토하였다. Fig. 7(a)는 주름 개선을 위한 기본 개념을 나타낸 것으로, 주름이 발생하는 중앙부에서 좌우 방향의 압축응력과 변형을 억제하기 위해 화살표 방향으로 재료 거동 제어가 필요함을 보여준다. Fig. 7(a)에 나타낸 바와 같이, 중앙부 주름의 주요 원인을 좌우 방향 면내 압축변형의 집중임을 판단할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 내측 유입 억제보다는 좌우 방향 재료 유동 제어에 초점을 맞추어, 반경 방향 두 개의 비드 배치를 적용했다.

Fig. 7(b)는 딥 드로잉 성형 시 좌우 방향 인장응력을 유도하기 위한, 블랭크 홀더의 세 가지 비드 설계안을 보여준다. Case 1은 중앙 주름 특화형, Case 2는 보다 넓은 주름 발생 영역을 포함하도록 설계된 형상, Case 3은 좌우 방향 제어 범위를 확장한 형상으로 각각 구성되어 있다. 비드의 단면 형상 및 비드 배치는 Fig. 7(b)에서 보는 것과 같다.

Fig. 8은 각 설계안 별 해석 결과를 보여준다. 각 설계안의 해석 결과를 비교한 결과, Case 1과 Case 2에서는 중간 영역에 여전히 좌우 방향의 음(-)의 압축변형률이 발생하였으며, 주름이 완전히

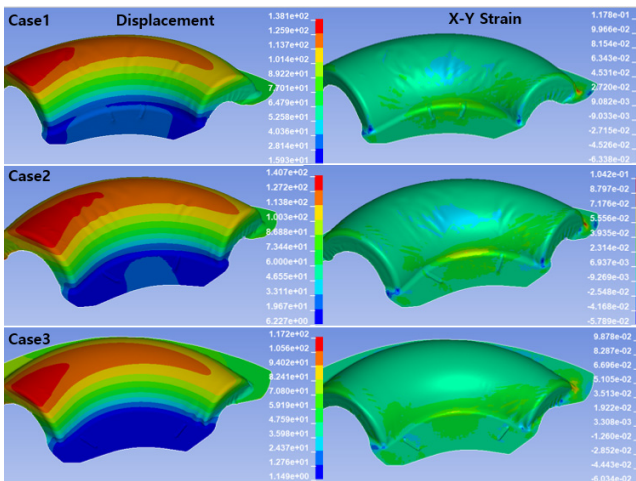


Fig. 8 Comparison of simulation results for each bead design case

Table 2 Quantitative comparison of maximum X-Y strain and wrinkled area ratio by bead design case

Category	Max. x-y strain	Wrinkled area ratio (%)
W/O bead	-1.22E-02	25
Case 1	-1.30E-02	16
Case 2	-1.26E-02	13
Case 3	-8.00E-03	Under 3%

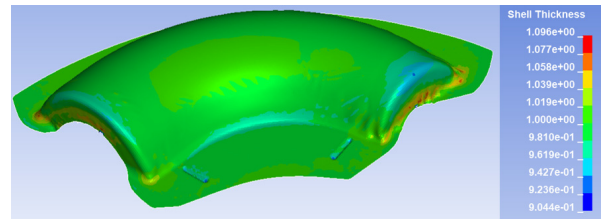
개선되지 않았다. 이는 중앙부 국부 제어만으로는 전체 재료 유입 경로를 충분히 재분배하지 못하였기 때문으로 판단된다^[7-10]. 반면, Case 3의 경우 비드 배치에 의해 좌우 방향 재료 흐름이 보다 효과적으로 제어되었으며, 성형 과정에서 판재 표면 방향의 압축변형이 현저히 완화되었다. Fig. 8의 해석 결과에서 Case 3은 다른 안에 비해 주름 발생이 감소되어 형상 안정성이 개선된 모습을 보였다. 이는 비드가 단순히 국부 저항을 부여한 것이 아니라 성형 중 전체 유입 균형을 조정하여 면내 압축 변형을 줄이고 인장 지배 유동을 유도했기 때문으로 해석된다^[7-10, 13].

Table 2는 각 비드 설계안에 따른 최대 x-y 변형률 및 주름 면적률(wrinkled area ratio)을 정량적으로 비교한 결과이다. 주름 개선 효과를 정량적으로 비교하기 위해, 트림 후 실제 제품으로 사용되는 영역을 평가 영역으로 설정하고, 해당 영역 내에서 주름이 발생한 영역의 면적 비율을 주름 면적률로 정의하였다. 개선 전에는 중앙 곡면부를 중심으로 주름 영역이 넓게 분포하였으며, 유효 제품 영역 대비 약 25%의 주름 면적률을 보였다. 이때 주름 발생부의 최대 x-y 변형률은 -1.22×10^{-2} 로 나타나, 해당 영역에서 좌우 방향의 면내 압축 변형이 발생하고 있음을 확인하였다.

Case 1 및 Case 2에서는 주름 면적률이 각각 약 16% 및 13%로 감소하였으나, 최대 x-y 변형률은 은 각각 -1.30×10^{-2} 및 -1.26×10^{-2} 로 나타나 중앙부의 압축 변형 성분이 여전히 잔존하였다. 반면,



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Formed part after applying the improved bead design, and (b) simulated thickness distribution of the APU duct (thickness deviation: ± 0.095 mm)

Case 3에서는 x-y 변형률이 -8.00×10^{-3} 로 감소하였으며, 이는 개선 전 대비 x-y 변형률 절댓값이 약 34.4% 감소했음을 볼 수 있다. 또한, Case 3의 주름 면적률은 3% 이하로 감소하여, 개선 전 대비 주름 발생 영역이 현저히 축소되었다. 따라서 Case 3의 비드 배치는 좌우 방향 재료 유동을 효과적으로 제어하여 면내 압축 변형을 완화하고, 주름 발생을 가장 효과적으로 억제한 것으로 판단된다. 결론적으로, 세 가지 설계안 중에서는 3안이 가장 우수한 주름 저감 효과를 나타내었으며, 실제 금형 수정안으로 적용하였다.

3.3 실험 결과

Case 3의 비드 배치를 실제 금형에 반영한 후 성형 공정을 수행하였다. 공정 조건은 초기 성형 공정과 동일하게, 램 하중 100 ton, 블랭크 홀더력 20 ton으로 각각 설정하였다. Fig. 9는 개선된 금형을 적용한 후, 실제 성형 결과 및 성형품의 두께 분포를 각각 보여 준다. Fig. 9에서 보는 바와 같이, 초기 성형품에서 관찰되던 중앙부 주름이 현저히 개선되었으며, 제품의 전체 곡면 형상도 안정적으로 형성되었다. 실제 성형품의 두께는 주요 곡률 구간에서 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 해석 결과에서 예측된 두께 편차는 ± 0.095 mm로 나타났으며, 이는 실제 성형품의 측정 두께 편차인 ± 0.1 mm와 유사한 수준을 보였다. 이러한 결과는 본 해석이 실제 성형 거동을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 시사한다.

또한 성형품의 표면 형상 및 형상 균일도가 향상되어 후속 트림(trim) 공정에 대한 적용성이 개선되었으며, 트림 이후에도 양호한



Fig. 10 Final product after (a) trimmed inner part of APU duct and (b) welded APU duct assembly

형상 품질을 유지하였다. 이후 용접 조립을 거쳐 최종 APU 덕트 조립체 구현이 가능함을 확인하였다. Fig. 10은 최종 APU 덕트 조립체의 결과를 보여준다. 이는 해석에서 예측한 주름 개선 효과가 실제 성형 공정에서도 유효하게 재현되었음을 보여준다. 특히, 초기 조건에서는 주름으로 인해 제품 품질이 확보되지 못하였으나, 개선 후에는 주름 억제와 형상 안정화가 동시에 달성되었다. 이는 비정형 곡면 박판 부품의 성형 공정에서 해석 기반의 반경 방향 비드 설계가 실제 제조 품질 개선에 효과적인 접근 방법임을 의미한다^[8-10, 14,15].

4. 결론

본 연구에서는 두께 1.0 mm의 SUS304 판재를 이용한 APU 덕트 딥 드로잉 공정에서 발생한 주름 불량을 대상으로, LS-DYNA 성형해석과 실제 성형 실험을 병행하여 개선 방안을 도출하였다. 초기 성형 결과에서는 두께 변화가 허용 범위 내에 존재하였음에도 중앙 곡면부를 중심으로 다수의 주름이 발생하였으며, 해석에서도 실제 실험과 동일한 위치 및 경향의 주름 형성이 예측되었다. 이를 통해 본 공정의 주름은 제품 표면 방향의 면내 압축변형률 집중에 따른 국부 좌굴 현상으로 판단하였다.

본 연구에서는 기존 연구에서의 접선방향 비드 적용이 아니라, APU 덕트 성형 중 발생하는 좌우 방향 재료 재료 유동 불균형과 중앙부 압축변형을 제어하기 위해 반경방향 비드 배치를 적용하고,

이를 해석적으로 비교·최적화하였다. 세 가지 반경방향 비드 설계를 비교한 결과, Case 3가 좌우 방향 재료 유동을 가장 효과적으로 제어하는 최적 설계안으로 도출되었다.

Case 3에서는 최대 x-y 변형률이 -8.00×10^{-3} 로 나타났으며, 이는 비드 미적용 조건의 -1.22×10^{-2} 대비 압축 변형률 절대값이 약 34.4% 감소한 결과이다. 또한 유효 제품 영역 기준 주름 면적률은 비드 미적용 조건의 약 25%에서 Case 3 적용 후 3% 이하로 감소하여, 주름 발생 영역이 현저히 축소되었다. 최종적으로 Case 3 비드 설계를 반영한 개선 금형을 실제 성형 공정에 적용한 결과, 해석에서 예측한 바와 같이 중앙부 주름이 현저히 감소하고 형상 안정화가 개선되었다.

특히, 비드 미적용 조건에서는 해석이 실제 주름 발생 위치와 경향을 잘 재현하였고, Case 3 비드 적용 조건에서도 해석에서 예측한 주름 개선 효과가 실험적으로 확인되어 성형해석 모델의 예측 타당성을 확인할 수 있었다. 또한 트림 및 용접 조립을 통해 최종 APU 덕트 조립체 제작 가능성을 확인하였다. 결론적으로, 해석 기반 반경방향 비드 설계 및 최적화는 APU 덕트와 같은 비정형 곡면 박판 부품의 주름 저감과 실제 공정 안정화에 효과적인 접근 방법임을 확인하였다.

후 기

이 연구는 연암공과대학교 교비연구과제 (과제번호: 202406) 지원으로 진행되었습니다.

References

- [1] Hosford, W. F., Caddell, R. M., 2011, Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, 4th ed., Cambridge University Press, New York, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976940>.
- [2] Kalpakjian, S., Schmid, S. R., 2014, Manufacturing Engineering and Technology, 7th ed., Pearson, New Jersey.
- [3] Wagoner, R. H., Chenot, J. L., 2001, Metal Forming Analysis, Cambridge University Press, New York.
- [4] Cao, J., Boyce, M. C., 1997, Wrinkling Behavior of Rectangular Plates under Lateral Constraint, International Journal of Solids and Structures, 34:2 153-176, [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(96\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(96)00008-X).
- [5] Kawka, M., Olejnik, L., Rosochowski, A., Sunaga, H., Makinouchi, A., 2001, Simulation of wrinkling in sheet metal forming, J. Mater. Process. Technol., 109:3 283-289, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00813-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00813-X).

- [6] Belytschko, T., Liu, W. K., and Moran, B., 2000, Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Wiley, New York.
- [7] Levy, B. S., 1983, Development of a Predictive Model for Draw Bead Restraining Force Utilizing Work of Nine and Wang, J. Applied Metalworking, 3 38-44, <https://doi.org/10.1007/BF02833875>.
- [8] Nine, H. D., 1978, Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, Mechanics of Sheet Metal Forming, 179-211, https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2880-3_8.
- [9] Demeri, M. Y., 1993, Drawbeads in Sheet Metal Forming, Journal of Materials Engineering and Performance, 2 863-866, <https://doi.org/10.1007/BF02645686>
- [10] Altan, T., Tekkaya, A. E., 2012, Sheet Metal Forming: Fundamentals, ASM International, Materials Park, <https://doi.org/10.31399/asm.tb.smff.9781627083164>.
- [11] Yi, S., Hyun, D., Hong, S., 2025, The Real-Time Prediction of Cracks and Wrinkles in Sheet Metal Forming According to Changes in Shape and Position of drawbeads Based on a Digital Twin, Appl. Sci., 15:2 700, <https://doi.org/10.3390/app15020700>.
- [12] Meng, B., Wan, M., Wu, X., Yuan, S., Xu, Xu., Liu, J., 2014, Inner Wrinkling Control in Hydrodynamic Deep Drawing of an Irregular Surface Part Using Drawbeads, Chinese J. Aeronaut., 27:3 697-707, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.04.015>.
- [13] ASM International Handbook Committee, 1994, ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, Materials Park, OH, <https://www.asminternational.org/results/-/journal_content/56/06181G/PUBLICATION/>.
- [14] Hallquist, J. O., 2006, LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- [15] Livermore Software Technology Corporation, 2019, LS-DYNA Keyword User's Manual, LSTC, Livermore, CA.



NamSeok Lee

Professor in the Department of Smart Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology. His research interests include micro/nano fabrication in the OLED and semiconductor process.

E-mail: nslee@yc.ac.kr