

액압 성형을 이용한 내부복합파형 고효율 이중관 제조 기술

한상욱¹ · 김대용² · 문영훈^{3, #}

Manufacturing of High-Performance Double Layered Tube with Corrugated Internal Pattern via the Hydroforming Process

S. W. Han, D. Y. Kim, Y. H. Moon

(Received May 8, 2022 / Revised May 17, 2022 / Accepted May 18, 2022)

Abstract

The purpose of this study was to investigate an innovative hydroforming process for the cost-effective manufacturing of double layered tube with circumferentially corrugated patterns. Conventional double pipe heat exchanger has relatively poor heat transfer efficiency because of the limited contact area resulting from the concentrically arranged simple cylindrical structure. As a promising alternative to enhance heat transfer efficiency, double layered tube with corrugated internal pattern was considered in this study. To fabricate corrugated inner tube, innovative tube hydroforming system was developed. The customized loading paths were established using the simulated forming pressure and contracting stroke at various bar diameters. Experimentally obtained cross-sectional profiles were analyzed to evaluate the reliability and applicability of the hydroformed tube with various patterns. The results demonstrate that the proposed hydroforming process can be a feasible alternative for manufacturing high-performance double-tube heat exchangers.

Keywords: Hydroforming, Double Pipe Heat Exchanger, Corrugated Tube, Loading Path, Finite Element Method

1. 서론

최근 엄격해진 환경규제 및 온실가스 배출규제의 강화로 인해 고효율, 친환경 에너지/환경 기계 시스템에 대한 연구의 중요성이 강조되고 있으며, 에너지 효율 향상 및 절약을 위한 가장 바람직한 대안으로 고효율 열교환기 기술 개발이 요구되고 있다 [1~2]. 열교환기의 대표적인 종류 중에 하나인 이중관 열교환기(double pipe heat exchanger)는 직경이 큰 외부튜브 내부에 직경이 작은 내부 튜브가 삽입된 구조로 내부튜브의 내부공간과 내부튜브와 외부튜브 사이의 환상공간에서 상이한 온도를 갖는 유체

들이 서로 열교환하는 장치이다. 이중관 열교환기 사용 환경 조건에 따라 소재 변경이 자유로우며, 다른 열교환기에 비해 구조가 단순하여 유지보수가 쉽고 비용이 저렴하기 때문에 공기조화설비, 화학플랜트, 발전설비기계뿐만 아니라 조선, 자동차, 항공 등 다양한 산업 분야에 널리 적용되고 있다[3~4].

산업 전반에 걸쳐 많은 응용에도 불구하고 이중관 열교환기는 단순한 구조에 의한 접촉 면적 제한으로 인해 다른 종류의 열교환기들에 비해 열전달 성능이 현저히 떨어진다[5]. 이중관의 열전달 효율을 향상시키기 위한 일환으로 덤플(dimple), 휠(fin), 스파이럴(spiral) 패턴 등으로 내부튜브의 표면적을 증가시킨 주름관(corrugated tube)이 개발되었다. 주름관은 주름 패턴에서 발생하는 강력한 소용돌이(swirl)효과로 인해 층류와 난류 흐름 모두에서 평활관 형태인 기존 이중관 열교환기보다 향상된 열전달 성능을 갖는 것으로 보고되고 있다[6~7]. 내부

1. 한국재료연구원, 선임연구원
2. 전남대학교 지능형모빌리티융합학과, 교수
3. 부산대학교 기계공학부, 교수

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 30 Jangjeon dong, Geumjeonggu, Busan 46241, Republic of Korea, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr
ORCID : 0000-0001-9766-9891

주름관의 표면 패턴은 일반적으로 인발(drawing) 공정을 통해 다양한 패턴으로 성형되는데, 외부튜브와 내부튜브를 접합하기 위한 추가 공정이 필요하기 때문에 비용 증가와 단위 시간당 생산성이 저하되는 문제가 있다[8].

튜브 액압 성형 공정(tube hydroforming)은 튜브 내부에 압력을 가하여 복잡한 형상을 한번의 공정으로 효율적으로 성형할 수 있는 기술로 일체화를 통한 기밀성 유지가 가능하며 이밖에도 제품 강성 증가, 국부적 확관 가능, 부품 간소화에 의한 경량화 등의 장점을 가지고 있다. 최근에는 고기능/다기능성 관형 부품 제조를 위한 다중 튜브 액압 성형 기술들이 연구 중에 있다[9~12]. 액압 성형 기술의 이점과 최근 연구 동향을 미뤄봤을 때 다양한 단면 프로파일을 갖는 주름관을 신속하고 비용 효과적으로 제작할 수 있는 합리적인 대안이 될 수 있다.

이에 본 연구에서는 기존 이중관 열교환기 대비 향상된 열전달 효율을 갖는 이중 주름관을 한번의 공정으로 효과적으로 생산하기 위한 일환으로 내부 복합 파형 이중관 액압 성형 기술을 제안하였다. 복합 파형 패턴 이중관을 효과적으로 성형하기 위해 액압 성형 공정을 설계하였으며 관련 이중관 성형 시스템을 구축하였다. FEM 을 이용하여 성형압력, 축피딩을 예측하였으며, 하중경로 설정을 위한 맞춤형 가이드를 제시하였다. 제안된 액압 성형 공정의 당위성을 입증하기 위해 단면 긴장성을 평가하였으며, 다양한 복합 파형 패턴에도 적용될 수 있는 응용 가능성을 실험적으로 검토하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 이중관 파형 성형 시스템

내부 복합 파형을 갖는 이중관으로 원활하게 성형하기 위해 본 연구에서는 이중관 성형 시스템을 개발하였다. 금형 내부에 안착되는 Fig. 1(a)의 이중관 성형 시스템은 성형바, 바홀더, 내부튜브, 외부튜브로 구성되어 있다. 성형바는 외부튜브와 내부튜브 사이에 배열되며, 삽입 수량에 따라 내부튜브를 다양한 파형 패턴으로 성형을 유도한다. 성형바의 치수가 파형 패턴 성형에 미치는 영향을 확인하기 위해 성형바 직경을 3, 4, 5 mm 로 하여 연구를 진행하였다. 바홀더는 링 형태의 구조를 가지며 내부튜브 양측에 장착되어 복수의 성형바를 지지하며 액압

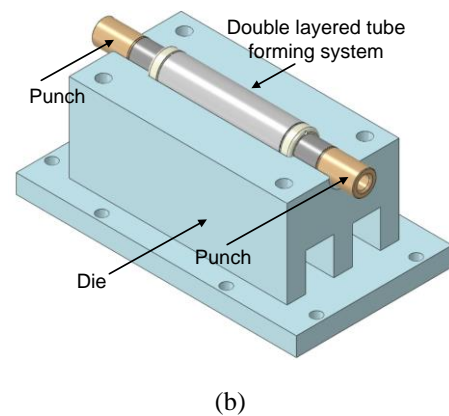
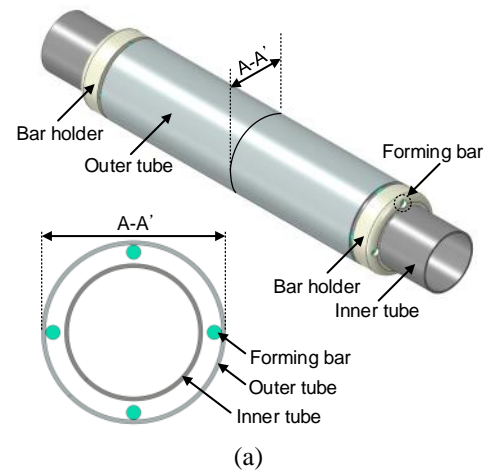


Fig. 1 (a) Components of double layered tube forming system and (b) die and punch

Table 1 Dimensions of outer and inner tubes

Tube	Outer tube	Inner tube
Outer diameter, mm	50.8	38.1
Inner diameter, mm	48.6	35.9
Thickness, mm	1.1	1.1
Length, mm	195	300

성형 공정 동안 성형바의 위치 이탈을 방지한다. 내부튜브와 외부튜브의 재질은 AISI 304 를 이용하였으며 튜브들의 세부적인 치수를 Table 1 에 정리하였다. Fig. 1(b)는 내부 복합 파형으로 성형하기 위한 전용 금형과 펀치를 보여준다. 외부튜브의 확관 및 변형을 억제하기 위해 금형 내부는 외부튜브의 외경과 동일한 치수로 설계하였다. 펀치의 경우, 유압누수로 인한 압력손실을 최소화하기 위해 내부튜브의 내경과 동일한 치수로 설계하였다.

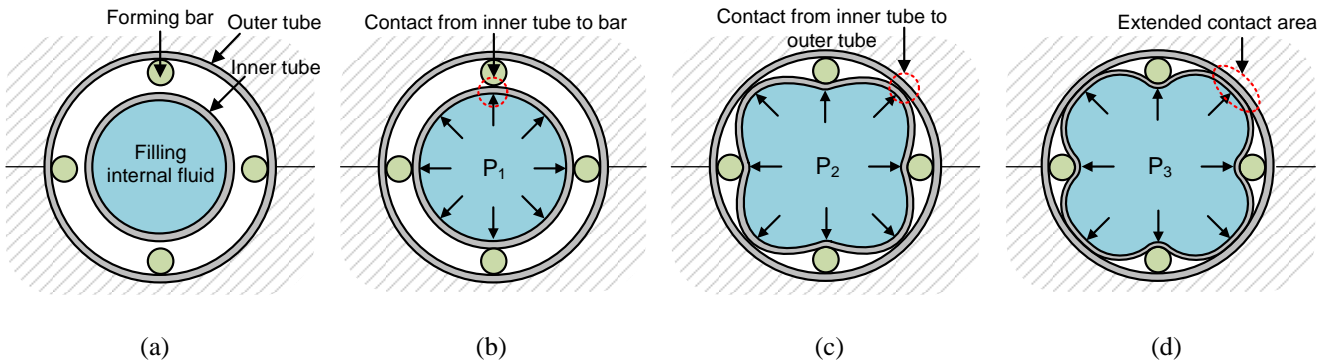


Fig. 2 Sequence of hydroforming process for double layered tube with corrugated internal pattern: (a) tube positioning, (b) stage 1 forming, (c) stage 2 forming, and (d) calibration stage

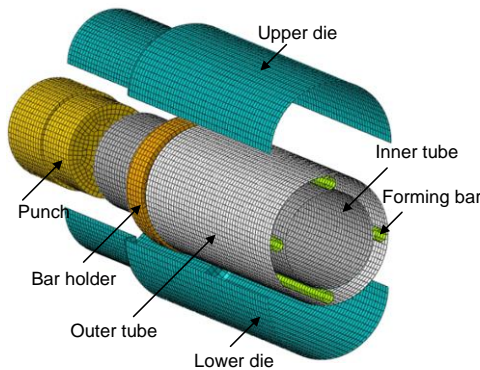


Fig. 3 Mesh model of double layered tube for hydroforming process simulation

2.1 액압 성형 공정 설계

Fig. 2 는 복합 과형 이중관 액압성형 공정의 개략도를 나타낸 것으로, 연속적으로 진행되는 액압 성형 공정을 내부튜브의 변형 특성에 따라 1 단계 성형(stage 1 forming), 2 단계 성형(stage 2 forming), 보정 단계(calibration stage)로 세분화 하였다. Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 먼저 조립된 이중관 성형 시스템을 금형 내부에 안착시킨 후 내부 튜브 안에 유체를 채운다. 액압 성형 공정이 시작되면 내부튜브는 안쪽 벽면에 작용하는 압력에 의해 점차적으로 팽창하게 된다. Fig. 2(b)와 같이 내부압력이 P_1 에 도달하면 확관 중인 내부튜브가 성형바에 접하게 되는데 이를 1 단계 성형이라 정의하였다. 1 단계 성형 후, Fig. 2(c)와 같이 내부 압력이 P_2 에 도달하면 성형바 사이로 확관중인 내부튜브가 외부튜브에 접하게 되는데 이를 2 단계 성형이라 정의하였다. 2 단계 성형 후 Fig. 2(d)와 같이 P_3 까지 내부 압력을 증가시켜

Table 2 Material properties of outer and inner tubes

Tube	Outer tube	Inner tube
Yield stress, MPa	333	371
Tensile strength, MPa	1127	1289
Elongation, %	44.6	49.9
Young's modulus, GPa	193	193
Poisson's ratio	0.29	0.29
Density, kg/m ³	8,000	8,000
Friction coefficient	0.05	0.05

외부튜브와 내부튜브 사이의 접촉 계면을 강화하기 위한 보정단계가 적용된다. 최종적으로 액압 성형된 이중관 성형 시스템으로부터 성형바와 바홀더를 분리하게 되면 내부 복합 과형을 갖는 이중관을 얻을 수 있다.

2.3. 유한 요소 해석

본 연구에서는 상용 유한 해석 요소 코드인 ABAQUS™/Explicit 를 이용하여 복합 내부 과형으로 성형을 위한 맞춤형 하중경로 설계 및 성형 특성을 분석하였다. Fig. 3 은 액압 성형 공정의 FEM 모델을 나타낸 것으로 상부 금형과 하부 금형, 펀치, 복수의 성형바, 바 홀더를 R3D4(four-node bilinear rigid quadrilateral elements)를 이용하여 강체(rigid body)로 모델링하였다. 외부튜브와 내부튜브는 S4R(four-node doubly curved thin shell elements)을 이용하여 변형체(deformable body)로 모델링하였다. 또한, x-축 방향으로 대칭성을 고려하여 3D 절반 모델로 설계하여 해석 시간을 단축하였다. 튜브들의 요소 크기를 2×2 mm 로 하였으며, 튜브들의 변형거동을 등방성으로

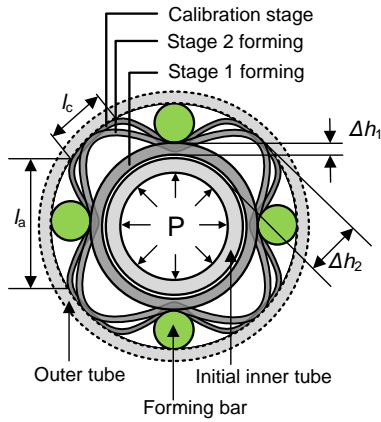


Fig. 4 Geometric model for determination of forming pressure at each stage

가정하였다. 단축 인장 시험을 통해 얻은 기계적 물성들을 FEM 에 적용하였으며, 세부적인 FEM 조건을 Table 2 에 제시하였다.

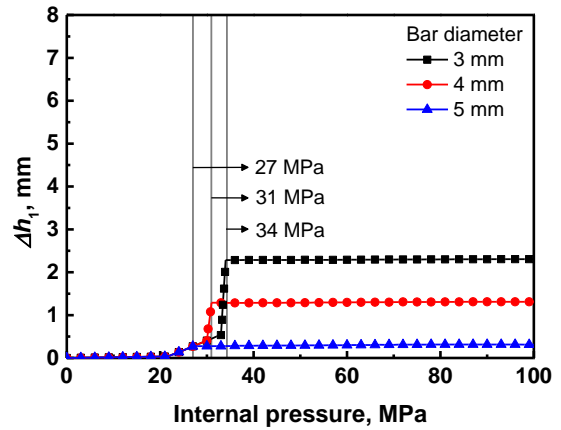
3. 결과 및 고찰

3.1 맞춤형 하중 경로 설계

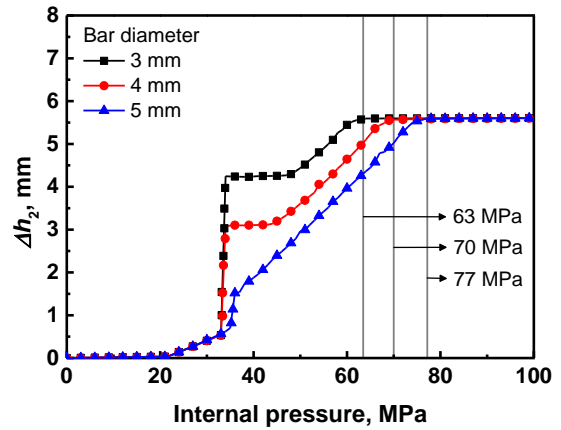
3.1.1 성형 압력 결정

액압 성형 공정 중에서 흔히 발생하는 불완전한 성형, 주름, 균열 등은 부적절한 하중경로에 의해 야기되는 대표적인 결함들로써, 결함 예방 및 성공적인 목표 형상으로의 성형을 위해서는 최적화된 공정인자들을 고려한 적절한 하중경로가 설립되어야 한다. 1단계 성형, 2단계 성형, 보정 단계에서의 성형 압력들을 예측하기 위해 Fig. 4의 기하학적 모델을 바탕으로 성형 압력들을 예측하였다. 여기서, Δh_1 은 1단계 성형에서 내부튜브의 확장높이의 변화, Δh_2 는 2단계 성형에서 내부튜브의 확장높이의 변화, l_c 와 l_a 는 각각 보정단계에서의 외부튜브와 외부튜브 접촉 계면의 길이와 환상공간의 길이를 의미한다.

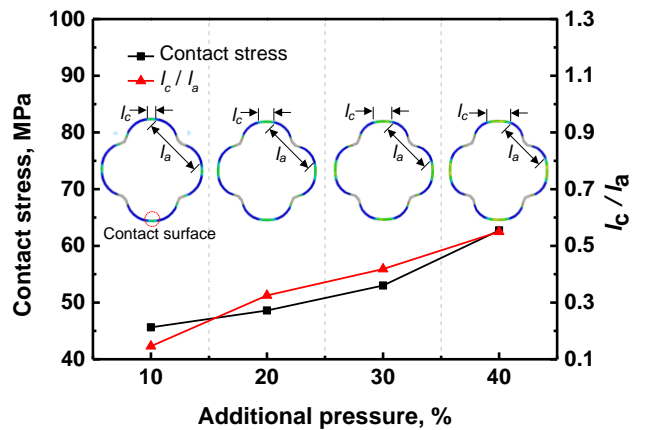
Fig. 5는 성형바 직경에 따라 각 단계별 성형 압력들을 추정할 수 있는 분석 결과들을 제시하였다. Fig. 5(a)의 1단계 성형의 경우, Δh_1 는 바 직경이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 바 직경이 감소할수록 내부튜브와 성형바 사이의 공간이 넓어지기 때문에 최대 Δh_1 까지 도달을 위해서는 더 높은 성형압력이 요구된다. 특정 내부 압력 시점에 도달하게 되면 Δh_1 은 내부압력이 계속적으로 증가할지라도 일정한 높이로 수렴하게 되는데, Δh_1 의 수렴은



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Determination of forming pressure at each stage: (a) stage 1 forming, (b) stage 2 forming, and (c) calibration stage

1 단계 성형의 완료를 뜻하며, 팽창 중이던 내부튜브가 성형바에 접촉되었기 때문에 더 이상 충전시켜야 하는 잔여 공간이 없다는 것을 의미한다. 따라서, Δh_1 가 수렴되기 시작하는 지점에서의 내부압력 값을 1 단계 성형압력으로 간주하였으며, 3, 4, 5 mm 바 직경에 대한 성형압력은 각각 34, 31, 27 MPa 이었다.

Fig. 5(b)의 2 단계 성형의 경우, 바 직경 특성에 관계없이 내부 튜브가 확관될 수 있는 최대 Δh_2 가 동일하기 때문에 약 5.6 mm 에서 수렴하게 된다. 하지만, Δh_2 가 수렴되기 시작하는 지점의 내부압력은 1 단계 성형과 반대되는 경향을 보였다. 이는 1 단계 성형에서는 바 직경이 증가할수록 내부튜브와 성형바 사이의 공간 Δh_1 가 감소하지만, 2 단계 성형에서의 Δh_2 는 바 직경에 의해 결정되기 때문에 바 직경이 증가할수록 넓어진 공간을 충전시키기 위해 더 높은 내부 압력이 요구된다. 결과적으로, 3, 4, 5 mm 바 직경에 대한 2 단계 성형압력 값은 각각 63, 70, 77 MPa 이었다.

2 단계 성형을 통해 목표 형상에 도달하였기 때문에 보정단계에서의 성형압력은 2 단계 성형을 기준으로 하여 추가 압력량(%)에 따라 분석을 진행하였다. Fig. 5(c)는 추가압력에 따른 접촉력(contact stress)과 l_c / l_a 변화를 나타낸 것으로, 추가압력이 증가할수록 접촉력과 l_c / l_a 는 증가하는 경향을 보였다. 이 결과는 추가압력이 증가할수록 내부튜브와 외부튜브 사이의 접촉면이 증가하여 강화된 접촉력을 보장하게 되지만, 내부튜브와 외부튜브 사이의 환상공간의 면적은 감소하는 것을 의미한다. 이에 본 연구에서는 복합 과형 이중관의 견고성과 허용 가능한 환상공간의 면적을 얻기 위해 30 %의 추가압력을 보정 단계를 위한 성형 압력으로 간주하였다.

3.1.2 축피딩 결정

그림 6 은 1 단계 성형과 2 단계 성형의 변형 거동 특성을 비교한 것으로, 1 단계 성형의 변형 거동은 기존의 확관 프로파일과 마찬가지로 원형을 유지한 채로 점차적으로 환관되기 때문에 변형 거동이 단순하다. 또한, 1 단계 성형이 초입 단계 성형이라는 것을 감안할 때 축피딩에 대한 민감도는 적다고 할 수 있다. 반면 2 단계 성형의 변형 거동은 내부압력의 증가에 따라 복잡한 단면 프로파일로 변형되며, 확관 메커니즘이 매우 복잡하기 때문에 축피딩의

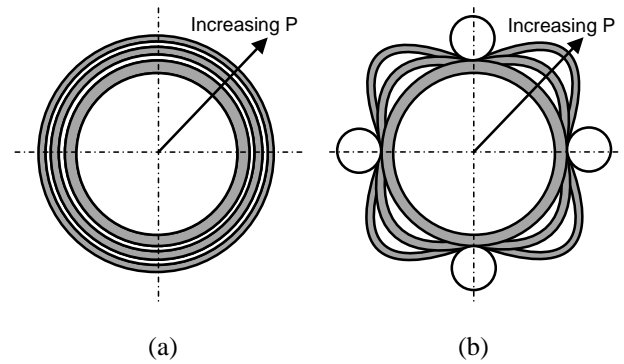


Fig. 6 Difference in cross-sectional profile with increasing internal pressure: (a) stage 1 forming and (b) stage 2 forming

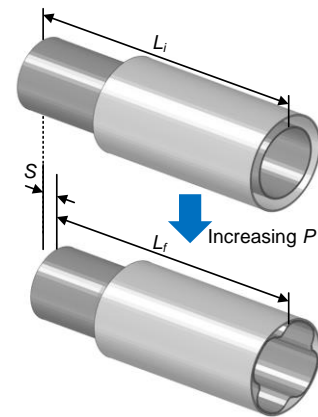


Fig. 7 Contracting stroke variation after reaching stage 2 forming

Table 3 Results of contracting stroke according to bar diameter

Bar diameter, mm	Contracting stroke, mm
3	8.7
4	8.0
5	6.9

영향도에 상당히 민감하다고 볼 수 있다. 축피딩은 튜브 양끝단에 가압되는 양에 따라 유압누수 및 주름으로 이어질 수 있는 매우 민감한 공정인자이기 때문에 본 연구에서는 적절한 축피딩량을 선정하기 위해 2 단계 성형 이후 내부튜브 끝단부의 수축 스트로크 S 변화를 분석하였다.

Fig. 7 에 나와 있듯이 S 는 다음의 식으로 얻을 수 있다.

$$S = L_i - L_f \quad (1)$$

여기서, L_i 는 액압 성형 전 초기 튜브의 길이, L_f 는 2 단계 성형 후 튜브의 길이를 의미한다. 만약 축피딩량이 S 보다 작으면 펀치와 튜브 끝단부 사이에 발생하는 미려한 간극으로 인해 기밀성이 저하되어 유압 누수로 이어져 압력 강하가 발생한다. 압력 강하는 목표 성형 압력의 도달을 방해하는 요인으로 작용하기 때문에 결과적으로 축피딩량은 S 와 동등 혹은 S 보다 커야 한다. Table 3은 바 직경별로 분석된 S 의 결과를 나타낸 것으로, 축피딩을 결정하기 위한 척도로 사용하였다.

3.1.3 하중경로

Fig. 8은 성형압력과 축피딩 결과를 바탕으로 설립된 내부 복합 파형을 갖는 이중관의 액압 성형을 위한 맞춤형 하중경로를 보여준다. 1 단계 성형에서는 바 직경 3, 4, 5 mm에 대한 성형 압력을 각각 34, 31, 27 MPa로 설정하였으며, 2 단계 성형에서는 바 직경 3, 4, 5 mm에 대한 성형 압력을 각각 63, 70, 77 MPa로 설정하였다. 바 직경별 하중경로들은 수축 스트로크 S 를 기반으로 축피딩을 결정하였다. 기밀성과 견고성이 보장된 내부 복합 파형 이중관을 얻기 위해 30%의 보정 압력을 적용하였다. 설립된 하중경로는 연속적으로 진행되는 액압 성형 공정을 위한 맞춤형 가이드를 제공한다.

3.2 실험적 검증

Fig. 9는 맞춤형 하중경로에 의해 액압 성형된 이중관의 원주방향 단면 프로파일을 제시하였다. 단면을 통해 알 수 있듯이, 4-파형 패턴을 갖는 이중관이 제안된 액압 성형 공정을 통해 성공적으로 성형되었다. 바 직경 3, 4, 5 mm에서 액압 성형된 4-파형 패턴 이중관의 내부 표면적은 기존 이중관식 열교환기로 간주할 수 있는 초기 이중관의 내부 표면적보다 상당히 증가된 것을 단면에서 확인할 수 있다. 또한, 내부튜브와 외부튜브 사이의 환상공간은 바 직경에 의해 결정되기 때문에 바 직경이 증가함에 따라 넓어지는 경향을 관찰할 수 있다.

Fig. 10은 원주각도($0^\circ \sim 90^\circ$)에 따라 측정된 파형 프로파일의 높이 변화를 나타낸 것으로 FEM과 실험 결과는 상당히 잘 일치하였다. 모든 바 직경에서 외부튜브와 내부튜브의 접촉면의 각도는 약 25° 로

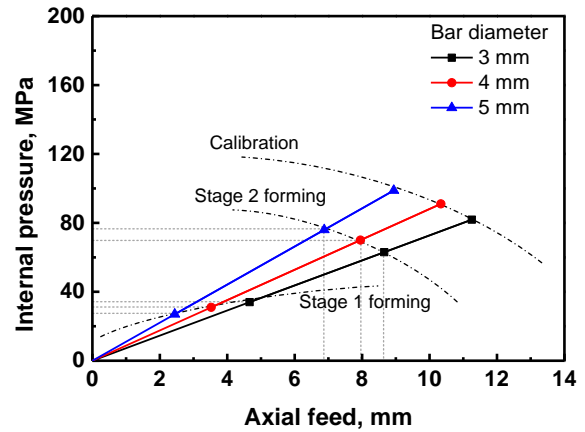


Fig. 8 Loading paths for manufacturing of double layered tube with corrugated pattern

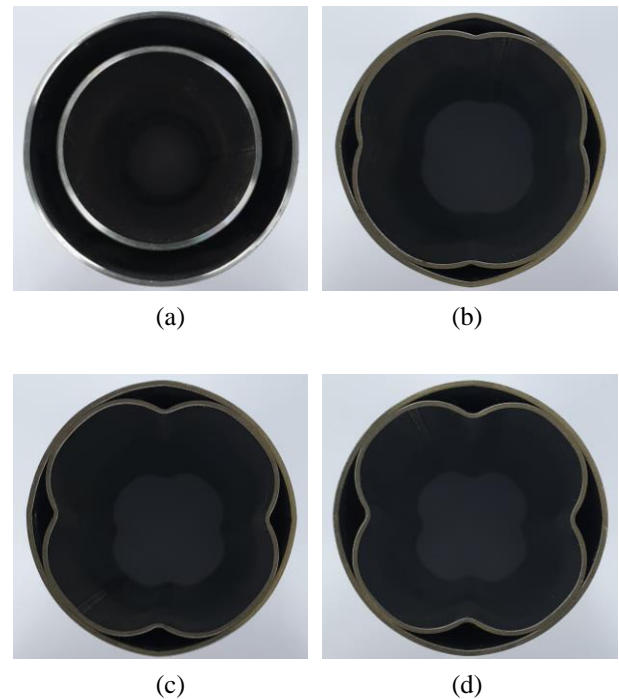


Fig. 9 cross-sectional profiles: (a) initial double-layered tube, (b) bar diameter of 3 mm, (c) 4 mm, and (d) 5 mm

분석되었다. 이러한 결과는 30% 증가된 보정 압력을 통해 외부튜브와 내부튜브 사이의 접촉력이 상당히 강화되었다는 것을 의미하며, 실제로 액압 성형을 통해 제작된 내부 복합 파형 이중관 역시 매우 견고하였다.

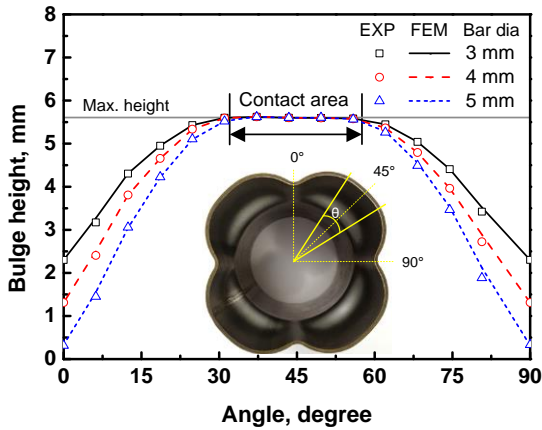
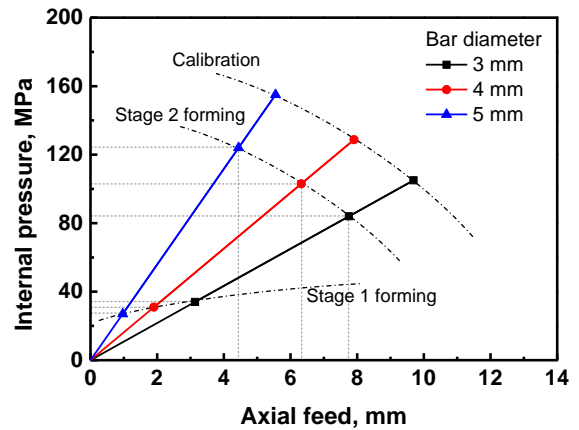
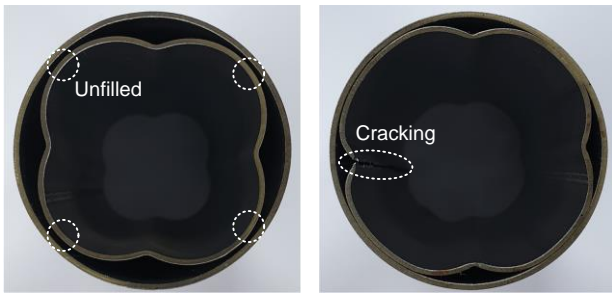


Fig. 10 Comparison of FEM and experimentally obtained pattern profiles



(a)



(a)

(b)

Fig. 11 Defects generated from unguaranteed loading paths: (a) unfilled and (b) cracking

Fig. 11 은 부적절한 하중경로에서 액압 성형되었을 때 발생하는 대표적인 결함 유형을 제시하였다. 제안된 하중경로의 기울기보다 높을 경우, 부족한 축피딩으로 인해 2 단계 성형이 완료되기 전에 유압 누수가 발생하여 내부튜브의 과형 패턴이 충분히 성형되지 않았다. 반면, 제안된 하중경로의 기울기보다 낮을 경우, 보정단계까지 도달할지라도 과도한 축피딩으로 인해 성형바와 접촉하는 지점에서 국부적 변형 집중에 의한 균열이 관찰되었다.

3.3 액압 성형 공정 응용

본 연구는 4-과형 패턴 이중관에 집중하여 연구를 수행하였다. 하지만, 제안된 액압 성형 공정을 이용하면 4-과형 이상의 다양한 복합 과형 패턴을 갖는 이중관 제작에도 충분히 적용 가능하다. Fig. 12(a)는



(b)

Fig. 12 Application to double layered tube with six-internal pattern: (a) loading path and (b) cross-sectional profile

FEM 기반 하중 경로 설계 기법을 바탕으로 설계된 6-과형 패턴 성형을 위한 하중경로를 나타내었다. Fig. 8의 4-과형 패턴을 위한 하중경로와 비교해봤을 때, 6-과형 패턴 하중경로는 증가된 내부압력과 감소된 축피딩량을 기반으로 설계되어야 한다. Fig. 12(b)는 6-과형 패턴으로 액압 성형된 원주방향 이중관 단면 프로파일로 나타낸 것으로, 6-과형 패턴 이중관의 건전한 단면 결과는 다양한 복합 과형 패턴에도 충분히 응용될 수 있는 가능성을 확인시켜 준다.

4. 결론

(1) 내부복합과형을 갖는 이중관을 제작하기 위해 고안된 이중관 액압성형시스템을 이용하여 성형바

의 배열 특성에 따라 다양한 파형을 갖는 복합파형 튜브를 성공적으로 제작하였다.

(2) 본 연구에서 제안된 맞춤형 하중경로는 성형 바의 직경과 배열 수가 증가할수록 내부압력은 상승하고 축피딩량은 감소하는 양상을 보였으며, 성형 결함의 발생없이 이중관을 효율적으로 성형하였다.

(3) 액압 성형된 파형 프로파일의 접촉각도는 25°로 분석되었으며 이는 허용 가능한 기준치에 부합하는 수치로서 외부튜브와 내부튜브 사이의 강화된 접촉면을 통해 이중관의 기밀성과 견고성을 보장한다.

(4) 4-파형과 6-파형 패턴의 결과는 다양한 내부 복합 패턴에 충분히 적용될 수 있는 가능성을 보였으며, 고효율 열교환기 제조를 위한 유용한 가이드로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] J. Jabbour, S. Russeil, M. Mobtil, D. Bougeard, M. F. Lacrampe, P. Krawczak, 2019, High Performance Finned-Tube Heat Exchangers Based on Filled Polymer, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 155, pp. 620~630. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.036>
- [2] D. Y. Kim, S. H. Park, 2022, Characteristics of Functionalized Carbon Nanotube Composites to Reinforce Hydrogen Storage Applications, *Korean J. Met. Mater.*, Vol. 60, No. 3, pp. 237~243. <https://doi.org/10.3365/KJMM.2022.60.3.237>
- [3] M. Omid, M. Farhadi, M. Jafari, 2017, A Comprehensive Review on Double Pipe Heat Exchangers, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 110, pp. 1075~1090. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.027>
- [4] M. S. Hong, I. J. Park, J. G. Kim, 2017, Alloying Effect of Copper Concentration on the Localized Corrosion of Aluminum Alloy for Heat Exchanger Tube, *Met. Mater. Int.*, Vol. 23, No. 14, pp. 708~714. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6589-9>
- [5] S. Ghani, S. M. A. Gamaledin, M. M. Rashwan, M. A. Atieh, 2018, Experimental Investigation of Double-Pipe Heat Exchangers in Air Conditioning Applications, *Energy Build.* Vol. 158, pp. 801~811. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.051>
- [6] T. W. Park., W. I. Park, 2021, Formation of Surface-Wrinkled Metal Nanosheets via Thermally Assisted Nanotransfer Printing, *Korean J. Met. Mater.*, Vol. 59, No. 12, pp. 880~885. <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2021.59.12.880>
- [7] H. Z. Han, B. X. Li, H. Wu, W. Shao, 2015, Multi-Objective Shape Optimization of Double Pipe Heat Exchanger with Inner Corrugated Tube using RSM Method, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 90, pp. 173~186. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.12.010>
- [8] T. Shakouchi, R. Ozawa, K. Tsujimoto, T. Ando, 2016, Flow and Heat Transfer of Petal-Shaped Double Tube (Water and Air-Water Bubbly Flow), *Mech. Eng. J.*, Vol. 3, No. 6, pp. 16~00138. <https://doi.org/10.1299/mej.16-00138>
- [9] S. Han, Y. Woo, T. Hwang, I. Oh, Y. H. Moon, 2019, Tailor Layered Tube Hydroforming for Fabricating Tubular Parts with Dissimilar Thickness, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 138, pp. 51~65. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.11.005>
- [10] S. O. Rogachev, V. A. Andreev, V. S. Yusupov, S. A. Bondareva, V. M. Khatkevich, E. V. Nikolaev, 2022, Effect of Rotary Forging on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Aluminum Alloy/Copper Bimetallic Material, *Met. Mater. Int.*, Vol. 28, No. 4, pp. 1038~1046. <https://doi.org/10.1007/s12540-02000964-7>
- [11] M. Mohammadi, J. S. Karami, S. J. Hashemi, 2017, Forming Limit Diagram of Aluminum/Copper Bi-Layered Tubes by Bulge Test, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 92 No. 5~8, pp. 1539~1549. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0225-1>
- [12] J. Liu, H. Li, Y. Liu, L. Li, C. Sun, 2018, "Size Effect" Related Hydroforming Characteristics of Thin-Walled 316-L Bellow Considering Pressure Change, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 98, No. 1, pp. 505~522. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2280-7>