

열교환기 튜브확관을 위한 맨드렐 설계

강흥식[†] · 김동성^{*}

Design of a Mandrel for Expansion of the Tube of the Heat Exchanger

H.S. Kang, D.S Kim

Key Words : Mandrel(맨드렐), Expanded tube(확관 튜브), LS-DYNA, SHPB(홉킨슨 충격봉)

Abstract

Specifically designed mandrel is needed to expand tube of the heat exchanger with inner grooves. Configuration of the expanded tube depends upon the shape and feeding velocity of the mandrel. 3D simulation software LS-DYNA was used to obtain optimum design conditions of the mandrel. We show how configuration of the expanded tube varies with different design parameters such as the approaching angle, diameter, and the feeding velocity of the mandrel. Material property data for analysis were obtained through experiments with SHPB (Split Hopkinson Pressure Bars).

1. 서 론

열교환기 제작공정에 튜브(Tube)와 핀(Fin)의 결합을 위한 방법으로, 튜브 확관을 이용하여 튜브와 핀이 억지 끼워맞춤 형태로 결합하는 방법이 있다. 이때 튜브 확관을 위한 매체로서 맨드렐(Mandrel)이 사용되는데 이 맨드렐의 조건에 따라 튜브의 변형이 다양하게 이루어 지기 때문에 열교환기를 제작하기 위한 맨드렐의 최적 설계조건을 연구하였다.

튜브 확관시 응력(Stress)-변형률(Strain) 관계를 slab analysis 방법으로 연구한 문헌⁽¹⁾을 살펴보면 맨드렐을 단순화 시켜 해석한 것을 볼 수 있으며, 맨드렐의 확관속도를 고려하지 않았다. 하지만, 제품의 가공속도와 가공 도구의 형상은 제품의 생산성에 있어 매우 중요한 부분을 차지하기 때문에 맨드렐의 진행속도에 따른 조건을 다양화하여 최적의 조건을 만족하는 맨드렐을 설계할 필요가 있다. 그래서 유한요소해석(Finite Element

analysis) 상용프로그램 LS-DYNA explicit code 를 사용하여 맨드렐의 형태와 진행속도에 따라 튜브에 미치는 영향을 고찰하여 최적의 결과를 얻고자 하였다. 또한, 제품 가공을 위한 환경에서 보다 정확하게 해석하기 위해서는 설계 재료의 특성을 잘 알 필요가 있다. 재료의 기계적 성질이 변화되는 주요한 인자로서는 변형률속도(Strain Rate)와 온도가 있다. 이러한 온도와 변형률속도에 대한 연구 문헌⁽²⁾을 통해 재료 강도에 미치는 영향을 살펴볼 수 있으며 이러한 영향들을 고려하여 재료의 고속변형 특성을 적용한 해석을 수행 하였다.

본 논문에서는 튜브 확관가공이 이루어질 때 재료의 열 변형에 대해서는 윤활유 주입이 이루어지기 때문에 가공시 발생하는 열에 의한 영향이 없는 것으로 가정하였고, 재료의 고속변형시 힘을 통하여 동적 특성 값을 도출하여 유한요소 해석을 하였다. 해석을 통해 얻은 결과를 이용하여, 맨드렐의 최적의 형상을 설계하고, 설계된 맨드렐의 최적의 조건을 고찰하여 열교환기 생산성 향상에 기여하고자 한다.

[†] 한국기계연구원 (KIMM)

E-mail : kan21@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7821 FAX : (042)868-7844

^{*} 한국기계연구원 (KIMM)

2. 재료시험

2.1 OFHC 동 재료의 고속변형 시험

열교환기에 사용되는 OFHC 동 튜브 특성을 다음과 같이 재료특성시험을 통해 수치적인 결과 값을 얻었고, 이 결과 값을 이용하여 유한요소해석에 적용하므로써, 재료의 동적 특성을 고려한 튜브 확장 해석 결과에 대한 신뢰성 근거를 제시하였다.

Hair Pin 용 재료는 OFHC(Oxygen-Free High Conductivity) 동으로 등방성 재질이다. OFHC 동의 고속변형 특성⁽³⁾을 파악하기 위하여 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bars) 시험기를 이용하여 고속변형 시험을 수행하였다.⁽⁴⁾



Fig. 1 Split Hopkinson Pressure Bars system

Fig.1의 SHPB 장치를 이용한 재료의 고속변형 시험 과정을 살펴보면, Air Gun의 압축공기의 힘으로 충격봉이 입력봉을 가격하여 응력파를 발생시킨다. 이 응력파는 봉을 통해 시편을 거치면서 변형률을 갖는 투과파와 반사파로 나뉘어 입력봉과 출력봉에 전달된다. 이때 전달되는 응력파에 의하여 입력봉과 출력봉 중앙에 부착된 스트레인 게이지가 인장, 압축되면서 미세한 전기적 신호가 발생되며, 그 전기적 신호를 최대 500kHz 까지 증폭이 가능한 Fylde amplifier를 통해 증폭시키고, 초당 10M-sampling이 가능한 Nicolet multipro computer를 통해 시험 데이터를 받아들여 저장한다.

각 시편에 따른 고속변형시험 결과는 시간에 따른 전압의 변화상태로 나타낼 수 있으며, 데이터 처리를 거쳐 Fig. 2와 같이 변형률 속도(Strain Rate)에 따른 진응력-진변형률 선도(True Stress-True Strain Curve)로 나타낼 수 있다.

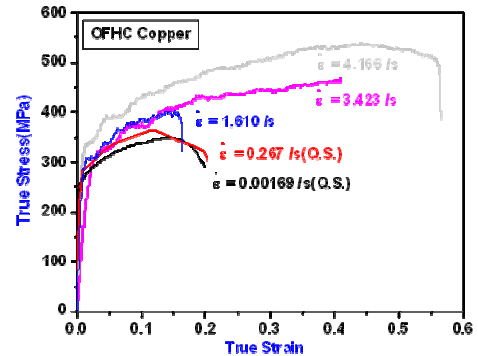


Fig. 2 True Stress-Strain curve

Cowper-Symonds 구성방정식은 변형률 속도에 민감한 재료의 단축 거동을 나타내기 위해 Cowper와 Symonds에 의하여 1957년에 간단한 구성 관계식의 형태로 제안된 다음 식(1)이다.

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_0} = 1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right]^{\frac{1}{p}} \quad \text{----- (1)}$$

Fig. 2의 동 재료 고속변형시험 결과를 이용하여 이 식을 이용하여 식(1)의 실험적 상수 값 p(2.27)와 C(7160.8)의 값을 구하였다.

3. 유한요소해석

3.1 맨드릴 형상에 대한 해석

열교환기에 사용되는 Hair Pin 튜브는 직경이 9.52 mm인 상용화된 튜브가 사용되며, 열 전달 면적을 1.5 배 증가 시키기 위해 튜브 내경에 나선형 홈(Groove)이 있다.

우선, 맨드릴 형상이 튜브에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 튜브의 특징을 완전히 고려한 해석보다는 튜브 형상을 단순화 시켜 2 차원 해석을 수행하였다. 이때 나선형 홈에 대한 해석은 고려하지 않았고, 평동관으로 단순화 시켜 해석하였다.

다만, 나선형 홈 튜브는 내경 홈의 산과 골의 중간부분에서 튜브 외경까지의 거리를 튜브 평균 두께로 설정하지만, 맨드릴은 내경 홈의 산부분과 접촉이 이루어지므로 근사한 해석결과를 얻기 위해 내경 홈의 산부분과 튜브 외경과의 거리를 튜브두께로 설정하여 튜브 변형해석을 하였고 축대칭(Axi-symmetry) 조건을 경계조건으로 설정하였다.

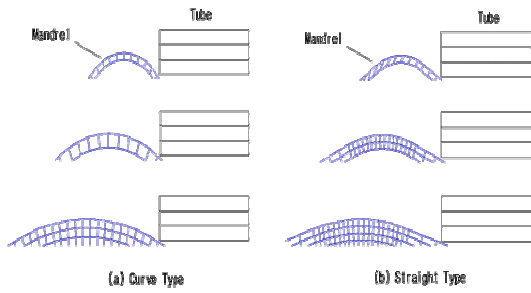


Fig. 3 Design of mandrel by shape and size

Fig. 3 은 맨드렐 단면의 형상과 맨드렐의 곡률 크기에 따라 확관률과 확관 후 튜브의 형태에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 세분화한 해석을 나타낸 것이다.

맨드렐 단면의 형상을 크게 (a)곡면형(Curve Type)과 (b)직선형(Straight Type)으로 구분하여 모델링 하였으며, 각 형태에 따른 맨드렐 곡률 크기를 변화시켜 튜브 확관에 미치는 영향을 확인하였다. 곡면형 단면 형상은 튜브가 맨드렐의 곡면에 접하면서 확관 하도록 설계된 형상으로 곡률 반지름 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm 에 대하여 각각 튜브 변형 해석을 수행하였다. 직선형 단면 형상은 튜브가 맨드렐의 직선에 접하면서 확관 하도록 설계된 형상으로 곡률 지름 1.0 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm 인 원에 접하는 직선이 되도록 설계하여 해석을 수행하였다.

튜브 확관 후의 해석결과를 맨드렐 단면의 형상에 따라 곡면형은 Fig. 4, 직선형은 Fig. 5 로 나타내었다. 단면이 곡면형 맨드렐일 경우 Fig. 4 와 같이 외경의 변위형태가 두 가지로 나타난다.

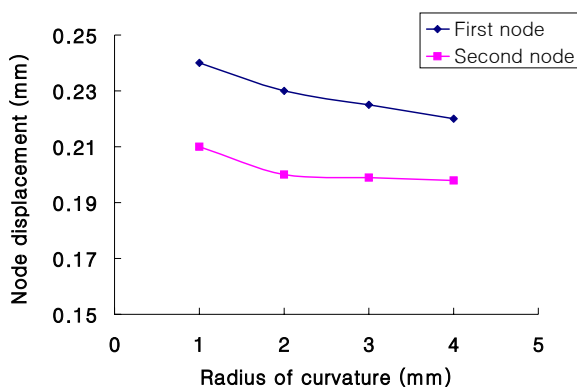


Fig. 4 Comparison of node variation by curve shape of mandrel

이것은 같은 위치에 있던 질점(Node) 값이 맨드렐 진행 후 값이 다르게 나타나는 것으로 확관 후 처음 질점과 두 번째 질점 값의 변화가 다르

므로 튜브에 주름이 발생됨을 예상할 수 있다. 또한 곡률 반지름이 커질수록 질점의 변화 값 간격이 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다.

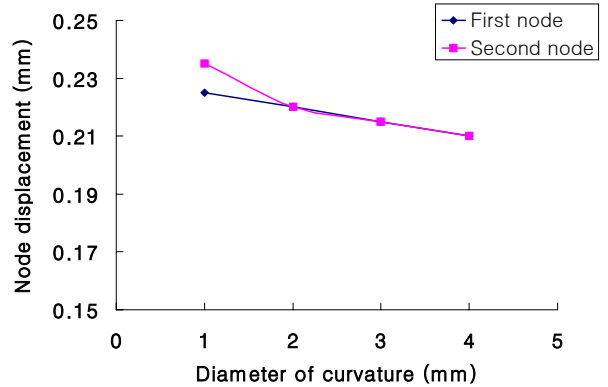


Fig. 5 Comparison of node variation by straight shape of mandrel

Fig. 5 단면의 형상이 직선형태의 맨드렐의 경우 곡률 지름이 1.0 mm 일 때 튜브 외경의 질점 변화가 각각 다르게 나타나지만, 곡률 지름이 증가할수록 질점 변화가 일정하게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 곡률 지름이 2.0 mm 이상일 경우 확관 후 튜브의 형상이 진행방향으로 주름이 발생하지 않고 확관 된다는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 5 에서 직선형 단면의 맨드렐 해석결과를 살펴보면 곡률이 증가 할수록 질점변화 값이 점점 줄어드는 것을 볼 수 있지만 매우 적은 변화만을 보이고 있다. 따라서 곡률 지름이 2.0 ~ 4.0 mm 일 때 최적의 단면 형상이라고 할 수 있다.

이때, 최적의 단면 형상을 튜브와 맨드렐이 접하는 접선 각으로 정의할 수 있는데, 이 최적의 접선 각은 해석결과 Fig. 6 과 같이 15 ~ 22 도로 나타났다.

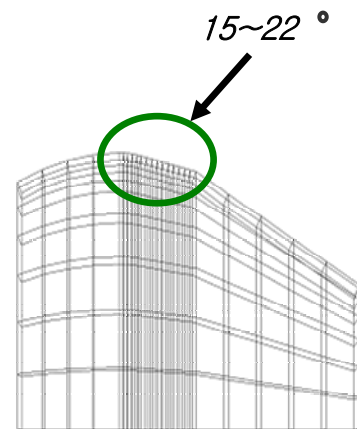


Fig. 6 Shape of optimal mandrel

맨드렐이 튜브와 접하는 형상에 대한 최적조건을 적용하여 Fig. 6 과 같은 최적의 맨드렐 형상을 3 차원으로 모델링 하였다

맨드렐의 접선각은 확관 후 튜브의 주름발생 유무에 관련이 있지만 실질적인 확관률과의 관계는 매우 적으므로 튜브 외경의 확관률은 맨드렐의 단면의 지름 변화를 통해 살펴 볼 필요가 있다. 최적의 형상인 맨드렐을 사용하여 맨드렐 지름과 확관률에 대한 상관관계는 다음 Fig. 7 과 같다.

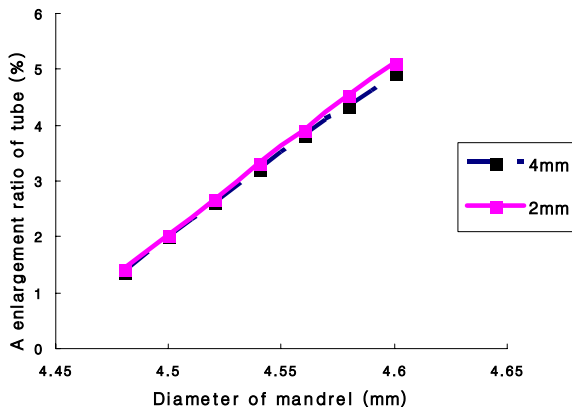


Fig. 7 Enlargement ratio of mandrel with straight shape

Fig. 7 의 선도는 최적 맨드렐 직선형 단면형상의 곡률 지름 2.0, 4.0 mm 에 대해 맨드렐 지름 변화에 따른 확관율을 나타낸 해석 결과이다.

직선형 단면 형상의 맨드렐 지름이 증가할수록 확관률이 증가하는 선형함수관계를 나타내는 결과를 볼 수 있고, 맨드렐 형상에 대한 곡률 지름이 차이에 따른 확관률 변화는 형상 변화에서와 같이 매우 적은 것을 볼 수 있다.

3.2 맨드렐 지름과 진행속도에 따른 해석

지금까지 맨드렐 단면의 형상 설계를 고려하고 나선형 홈을 가지고 튜브를 평동관으로 단순화시킨 2 차원 축 대칭 조건으로 해석한 결과를 통해 맨드렐과 튜브와의 관계를 고찰 하였다. 이때 맨드렐 단면의 형상은 튜브 외경 면의 일정한 변화에 영향을 주지만 튜브의 확관율 결과에 미치는 영향이 적고, 튜브의 확관율은 맨드렐의 지름에 연관성이 있음을 Fig. 7 에서 발견했다. 이 결과를 기초하여 튜브의 확관율에 대한 맨드렐의 영향을 자세히 살펴보기 위해 3 차원 모델링을 하였다.

튜브의 재원을 자세히 살펴보면, 직경 9.52mm 인 튜브의 기저두께는 0.3mm 이고 튜브 내부의

나선형 홈의 높이는 0.2mm 이다. 여기서 홈의 높이를 무시할 수 없으므로 Fig. 8 과 같이 3 차원으로 모델링하여 유한요소 해석을 수행하였다

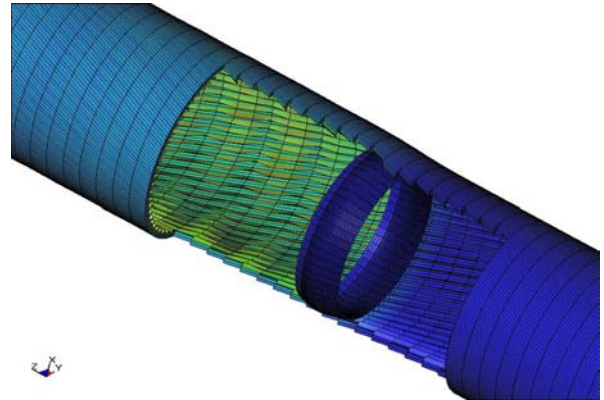


Fig. 8 Finite element analysis of three-dimensional

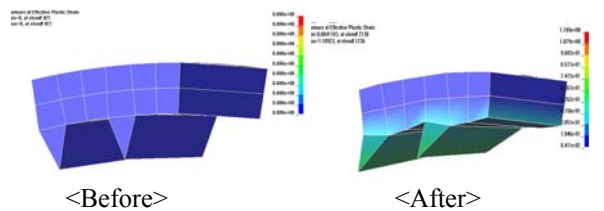


Fig. 9 Transformation of hair pin of tube

Fig. 9 는 나선형 홈 튜브의 Hair pin 이 확관 후 맨드렐에 의해 변형이 발생하는 것을 보여 주고 있다..

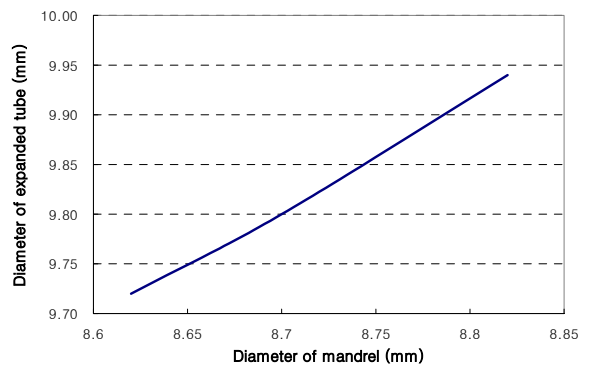


Fig. 10 Diameter variation of tube

맨드렐 지름이 증가할수록 확관 된 튜브지름이 선형적으로 증가하는 것을 Fig. 10 에서 볼 수 있다. 이것은 Fig. 7 의 2 차원 해석을 참고해 볼 때 튜브 확관율은 맨드렐의 직경변화에 가장 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

각 맨드렐 지름 8.6, 8.7, 8.8 mm 에 따라 각각

105, 130, 150, 200mm/s 의 속도로 해석하였다.

Fig. 11 은 직경 9.52 mm 의 튜브가 각각의 맨드렐 지름과 맨드렐 진행 속도에 따라 확관된 평균 지름을 보여 주고 있다.

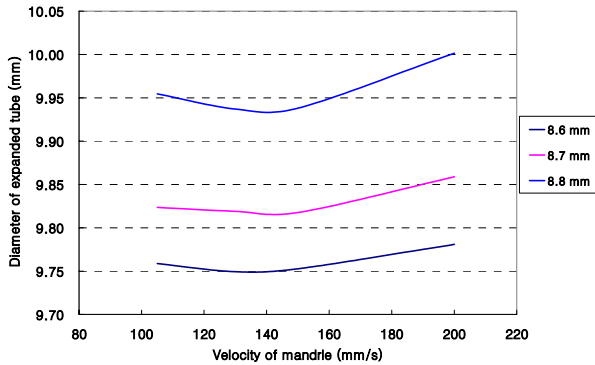


Fig. 11 Relation between velocity and size of mandrel

Fig. 11 에서 맨드렐 지름 8.6, 8.7, 8.8 mm 일 때 맨드렐 진행속도가 130~150 mm/s 인 부분에서 확관된 평균 튜브 지름이 낮아졌다가 속도가 증가하면서 점차 증가하는 것을 볼 수 있다.

맨드렐의 진행 속도는 제품의 생산 속도와 밀접한 연관성을 가지고 있기 때문에 맨드렐 진행 속도 변화에 따른 튜브 변화를 자세히 분석해 보기 위해 맨드렐 지름이 8.7 mm 일 때 속도에 따른 튜브의 변형 결과를 다음 Fig. 12 에서 보여준다. 측정 위치는 동일한 튜브 외경의 임의의 점들이며, 맨드렐이 진행하는 순서대로 값을 측정하여 나타낸 것이다.

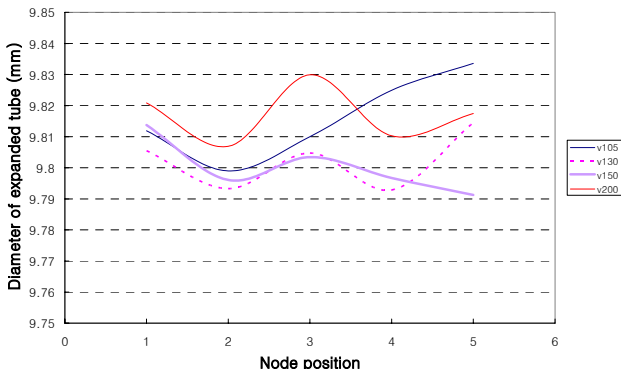


Fig. 12 Comparison of tube variation by velocity

Fig. 12 에서 맨드렐 진행속도가 130, 150 mm/s 일 때는 튜브의 직경변화의 폭이 작지만, 105, 200 mm/s 일 때는 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 확관 후 튜브의 외경 표면이 울퉁불퉁한 주름이 생긴다는 것을 예측할 수 있다.

4. 결론

열교환기 제작의 튜브확관에 사용되는 최적의 맨드렐을 설계하고 그 맨드렐을 사용하여 직경 9.52mm 의 튜브를 확관 할 때 최적의 확관조건을 도출하였다.

(1) 유한요소해석을 위해 OFHC 동 재료의 동적 특성인 실험적 상수 값을 SHPB 시험장치를 통해 얻었다.

(2) 튜브형상을 단순화시킨 해석 결과를 통해 맨드렐과 튜브와의 접하는 접선 각이 15~20 도 일 때 최적의 단면 형상임을 알았다.

(3) 나선형 홈 튜브형상을 맨드렐 지름에 따른 속도를 변화시켜 해석하여, 맨드렐의 지름변화는 튜브 확관율에 큰 영향을 미치며, 맨드렐 지름이 일정할 때 최적의 확관을 위한 맨드렐 진행 속도는 130~150 mm/s 이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 중기거점 사업인 "열교환기 고속 통합 생산 자동화 시스템 개발" (주관기관: 재건정밀) 사업의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Richard Brezina, Jaroslav Palowski, 1994, Relation between stress and strain during expanding of tube, Metallurgy and foundry engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 351~355.
- (2) S. Hur, D.S. Kim, J.S. Koo, H.S. Kang, S.I. Hong and D.T. Chung, 2001, Dynamic Behavior Characteristic Test of Structural Aluminum Alloy Materials using SHPB, KSME paper No. 01-S-061.
- (3) A.B. Tanner, 1998, "Modeling Temperature and Strain Rate History Effects in OFHC Cu", PH Thesis, Georgia Institute of Technology.
- (4) Krafft, J.M., Sullivan, A.M. and Tipper, C.F., 1954, "The effect of static and dynamic loading and temperature on the yield stress of iron and mild steel in compression" Proc. R. Soc. Lond. A 221, pp. 114-127.