

## 유한요소법을 이용한 헤어핀 형 열 교환기의 튜브 확관에 대한 연구

홍석무<sup>1</sup> · 현홍철<sup>1</sup> · 황지훈<sup>#</sup>

### Study of Tube Expansion to Produce Hair-Pin Type Heat Exchanger Tubes using the Finite Element Method

S. Hong, H. Hyun, J. Hwang

(Received January 8, 2014 / Revised March 6, 2014 / Accepted March 18, 2014)

#### Abstract

To predict the deformation and fracture during tube expansion using the finite element (FE) method, a material model is considered that incorporates the damage evolution due to the deformation. In the current study, a Rice-Tracey model was used as the damage model with inclusion of the hydrostatic stress term. Since OFHC Cu is not significantly affected by strain rate, a Hollomon flow stress model was used. The material parameters in each model were obtained by using an optimization method. The objective function was defined as the difference between the experimental measurements and FE simulation results. The parameters were determined by minimizing the objective function. To verify the validity of the FE modeling, cross-verification was conducted through a tube expansion test. The simulation results show reasonable agreement with the experiments. The design for a minimum diameter of expansion tube using the FE modeling was verified by a simplified tube expansion test and simulation results.

**Key Words:** Expanded Tube, Ductile Fracture, Damage Model, Rice-Tracey Model

## 1. 서 론

튜브 확관 공정은 튜브의 내경보다 큰 외경을 가진 편치(맨드릴)로 직경을 팽창시키는 소성가공공정으로, 서로 다른 크기를 가진 두 개의 튜브를 연결시키기 위해 튜브 끝 단을 성형하거나 확관 시 발생하는 균일한 하중과 높은 비에너지로 충돌에너지를 흡수하는데 주로 사용된다. 전자는 열 교환기 제작공정, 후자는 자동차나 철도의 충돌에너지흡수부재가 그 대표적인 예다. 열 교환기의 제작공정 중 핀(Fin)을 구성할 때, 튜브를 편에 끼워 넣고 확관하여 결합한다. 이 때 튜브의 성형성을 나타내는 팽창비는 편치의 외경과 곡률반경, 튜브의 두께 및 내경

등의 영향을 받는다. 팽창비가 지나치게 크거나 편치의 진행방향과 튜브의 축이 일치하지 않는 경우, 좌굴(buckling)이나 파단(fracture)이 발생하게 된다. 좌굴은 튜브의 두께나 길이와 같은 형상적 특성이나 초기경계조건에 의해 발생할 수 있지만, 파단은 재료의 기계적 특성과 팽창비의 영향을 크게 받는다. 열 교환기를 제작함에 있어 시행착오를 줄이고 효율적으로 설계하기 위해서는 해석적 기법이 도입되어야 하는데, 해석모델을 통해 좌굴이나 파단을 예측하기 전에 먼저 재료의 특성을 명확하게 파악해야 한다. 최근 튜브 확관은 여러 관점에서 연구가 수행되고 있다. Choi 등 (2010)은 튜브 확관이 충돌에너지 흡수부재로써 사용될 때, 성공적으로 충돌에

1. 삼성전자 글로벌기술센터

# Corresponding Author : Global Production Technology Center, Samsung Electronics Co, Ltd. E-mail: jso.hwang@samsung.com

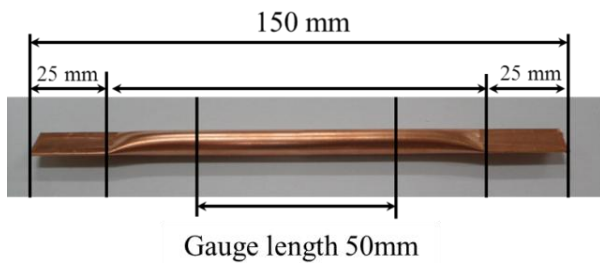


Fig. 1 Tube specimen used for the tensile test

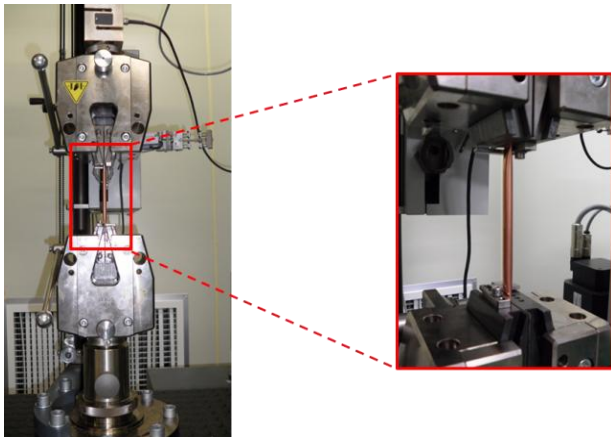


Fig. 2 Setup of the tensile test

너지를 소성변형에너지로 흡수할 수 있도록 유한요소해석으로 좌굴을 예측했다[1]. 또한 튜브두께와 기하학적 결함의 상관관계를 연구함으로써 튜브의 좌굴 형상과 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. Kang과 Kim(2004)은 열 교환기 제작공정에서 튜브 확관 시 맨드릴의 조건에 따라 튜브의 변형이 다양하게 이루어지는 것을 고려하여 맨드릴의 최적 설계 조건을 연구하였다[2]. 이 때 재료의 고속변형시험을 통해 동적 특성 값을 고려하여 유한요소해석을 수행했으며, 최적 맨드릴로 확관할 수 있는 튜브의 확관 조건을 도출했다. Almeida 등 (2006)은 연성파단모델을 적용한 해석기법과 실험적 접근을 통해 파단, 주름, 좌굴 등이 발생할 수 있는 요인들을 연구했다[3]. 유한요소해석을 통해 마찰과 소재 두께 등의 변수가 변형에 미치는 경향을 파악했다. Choi 등 (2011)도 유한요소해석 모델에 손상모델을 적용하여 실험을 통해 상수를 결정하고, 편치형상이 튜브의 파단에 미치는 영향을 해석적 기법을 통해 예측했다[4]. 이전 연구들은 이론적 접근을 통해, 재료모델을 반영한 해석기법으로 튜브 확관 시 소재의 파단과 좌굴 특성을 예측하고, 이에 미치는 요인을 파악하는

데 주력하고 있다. 따라서 해석적 결과를 실제 실험으로 교차 검증하지 않은 경우가 대부분이다. 해석기법을 통해 도출한 조건을 실제 공정에 적용하기 위해서는, 해석모델의 타당성 및 적용가능성을 검증할 수 있어야 한다.

본 연구의 주요 목표는, 열 교환기 제작 공정 자동화의 일부분으로써 알루미늄 핀에 튜브를 원활하게 삽입하기 위해 튜브의 직경을 최소화 설계하는 것이다. 소재의 기계적 특성을 파악하기 위해 현재 사용되고 있는 튜브를 인장 시험하여 유동응력을 도출하고, 확관 시험을 통해 손상함수를 결정했다. 이를 상용 유한요소해석 소프트웨어 AFDEX 2D에 적용하여 해석모델을 수립하고, 타당성 검증을 위해 교차검증을 수행했다. 또한 실제 공정 조건으로 해석을 수행하여 튜브에 좌굴 및 파단이 일어나지 않으면서 확관할 수 있는 최소 직경을 도출했다. 최소 직경 튜브를 실 공정에 적용하기 전, 검증용 확관 시험을 수행하여 해석을 통한 설계의 적용가능성을 실험적으로 입증했다.

## 2. 재료물성 및 해석모델

### 2.1 인장시험

튜브의 유동응력을 도출하기 위해 인장시험을 수행했다. 소재는 OFHC(Oxygen - Free High Conductivity) Cu로 KS B 0801:11호 규격에 의해 Fig. 1과 같이 두께 ( $t$ ) 0.33mm, 길이( $l$ ) 150mm, 내경( $D_i$ ) 6.34mm이고 표점 거리는 50mm로 설정했다. 인장시험에 사용된 실험기기는 Fig. 2의 만능재료시험기(Zwick GmbH, 250kN)이다. 유동응력의 변형률 속도 의존성을 파악하기 위해 인장속도 0.1mm/s, 10mm/s의 두 가지 조건으로 설정했고, 3회 이상의 실험으로 반복성을 확인했다. 그 결과 Fig. 3과 같이 인장속도에 따른 하중-변위 그래프 변화가 거의 없는 것으로 확인되었다.

따라서 소재의 유동응력은 변형률 속도의 영향을 고려하지 않는 식 (1)의 Hollomon 모델로 정하고 그 계수를 결정했다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ 는 유동응력,  $K$ 는 강도계수,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률,  $n$ 은 가공경화지수이다. 일반적으로 봉형태의 인장시험을 사용하여 유동응력을 계수를 구해내지만, 압출튜브의 제조과정에서 받은 물성변화와 튜브 내부 가공에 의해 기계적 물성이 변화하므로, 본 연구

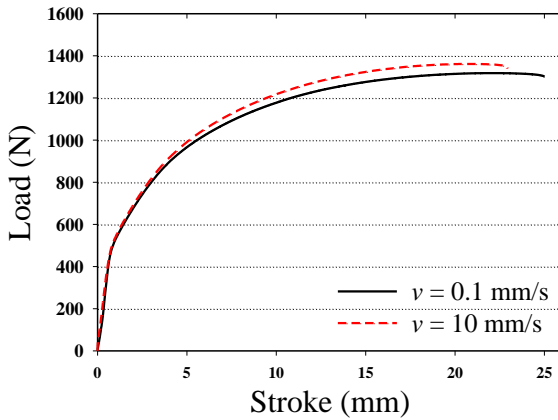


Fig. 3 Results of the tensile test

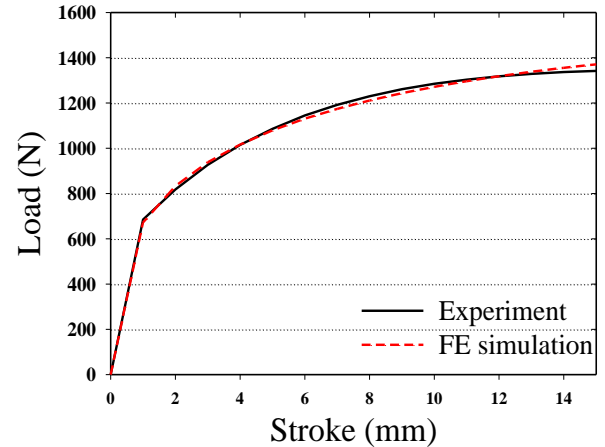


Fig. 4 Results of the confirmation simulation for determined parameters of the Hollomon model

Table 1 Determined parameters of the Hollomon model

Parameter	Value
$K$ (MPa)	421
$n$	0.309

에서는 가공된 최종 튜브를 잡아당겨 하중과 변위를 측정하고 역 공학 기법을 활용하여 하중-변위 그래프에서 진 응력-진 변형률 선도로 변환하였다. 이를 위해 유한요소 해석을 통해 튜브 인장시험을 모사하고, 하중-변위 그래프를 얻어 실험결과와의 차이를 최소화시켜 유동응력의 상수를 도출하는 최적화 기법을 활용했다. Hwang 등 (2013)은 인장이나 압축 시편을 제작할 수 없는 소재에 대해 최적화 기법을 활용하여 유동응력을 도출한 바 있다[5]. 유한요소해석은 상용 S/W 인 AFDX 2D 를 사용했고 튜브의 기하학적 형상을 고려하여 축 대칭으로 모델링했다. 해석으로 얻은 하중-변위 그래프와 실험 결과의 차이, 즉 최소화 대상 목적함수는 식 (2)와 같이 상대오차로 정의했다.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{F_{ex,i} - F_{FE,i}}{F_{ex,i}} \right| \quad (2)$$

식(2)에서 실험결과를  $F_{ex}$ , 해석결과를  $F_{FE}$ , 데이터 개수를  $N$ 이라 할 때,  $E$ 는 특정 변위에 대한 실험과 해석의 하중 차이를 모두 누적해 더한 후 평균한 값을 의미한다. 목적함수 최소화는 상용 최적화 소프트웨어인 PIANO에서 제공하는 PQSRM (Progressive Quadratic Response Surface Modeling) 기법을 사용했다. PQSRM은 주어진 변수범위 안에서 순차적으로 실험 계획법(D.O.E.)를 수행하고, full quadratic 형태의 반응

표면을 생성해 Hessian matrix를 업데이트 하는 방법이다. 초기에 설정한 변수 범위에서 일차적으로 최소화하고, 그 결과를 기준으로 trust region 알고리즘을 적용해 범위를 좁혀 반복계산하기 때문에 다른 최소화 기법에 비해 국소 최소로 수렴할 가능성이 낮으며 더 정확하고 안정적으로 전역 최소를 찾을 수 있다[6]. 각 변수의 초기값은 기준에 알려진 OFHC Cu의 유동응력 곡선에 근사하도록 인위적으로 결정했다. 도출한 변수는 Table. 1과 같고, 이를 대입해 확인해석을 수행한 결과는 Fig. 4와 같다. 실험과 해석의 오차가 1.2% 이하로 매우 작으며, 거의 일치하는 경향을 보인다. 따라서 Holloman 모델 및 도출한 상수는 OFHC Cu의 유동응력으로 사용할 수 있다.

## 2.2 튜브 확관 시험

튜브 확관 실험기는 Fig. 5와 같이 튜브를 고정할 수 있는 하부 지그, 맨드릴을 고정해 수직 운동할 수 있는 상부 지그로 구성되어 있다. 맨드릴과 튜브의 축이 맞지 않는 경우 불규칙한 좌굴(buckling)이 일어날 수 있으므로 축을 일치시키기 위해 가이드 핀을 설치했다. 하중 부가 및 변위 측정은 만능 재료시험기(Zwick GmbH 250kN)를 사용했다. 튜브 시편의 직경은 7mm, 두께는 0.33mm이고 길이는 20mm로 결정했다. 펀치의 속도는 5mm/min으로 설정하고, 확관 시 파단까지 일어나도록 3mm이상 변위를 충분히 주었다. 또한 맨드릴의 각도에 따른 하중-변위 그래프의 경향을 얻기 위해 맨드릴은 20°, 30°로 제

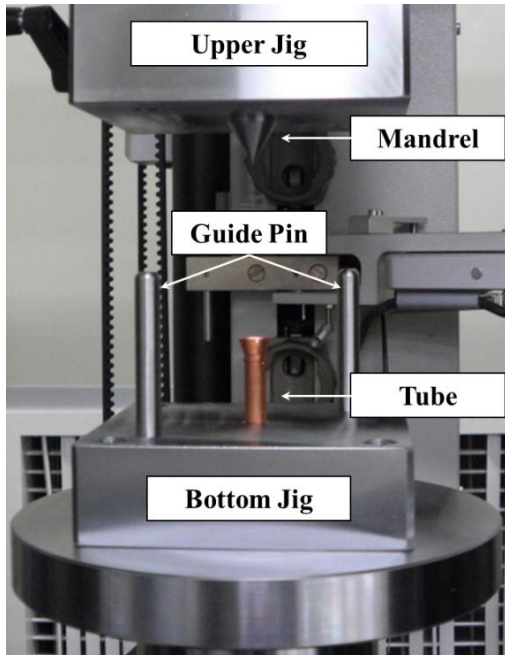


Fig. 5 Equipment used for the tube expansion test

작하여 실험했다. 반복성 확보를 위해 3회 이상 시험 후 평균하여 실험값으로 사용했다.

### 2.3 손상모델

인장시험으로 얻은 유효응력을 적용하여 튜브 확관 해석을 수행할 경우, 네킹이나 파단을 고려할 수 없다. 따라서 연성과단이론을 도입해 해석모델을 구성하도록 한다. 일반적으로 연성과단모델은 금속판재 성형에서 전단 및 파단 거동 모델링에 주로 사용되는데, 이는 소성 변형 에너지에 근거한 이론에서 시작된다. Cockcroft와 Latham (1968)은 연성과단 한계를 제안했다[7]. 연성과단 한계는 소성 변형일이 어떤 한계점에 도달할 때 시작되는데, 이는 최대 주응력이 소성변형경로 내에서 적분되어 계산된다. Oh 등 (1979)은 Cockcroft와 Latham의 이론을 식 (3)과 같이 유효응력으로 나누어 일반화했으며, 이를 Normalized Cockcroft-Latham criterion이라 한다[8].

$$C_{NCL} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma^*$ 는 최대 주응력,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}_f$ 는 파단 유효변형률,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률 그리고  $C_{NCL}$ 는 임계 손상치(critical damage value)이다. 이 조건은 연성 파단이 최대 주응력에 의존적임을 의미하며, 주로 단조 공정의 파단 예측을 위해 발전되었다. 만약 소재가 임계 손상치를 초과하게 되면, 파단이 시작된다.

Table 2 Determined parameters of the Rice-Tracey ductile fracture model

Parameter	Value
$\alpha$	1.086
$C_{RT}$	0.31

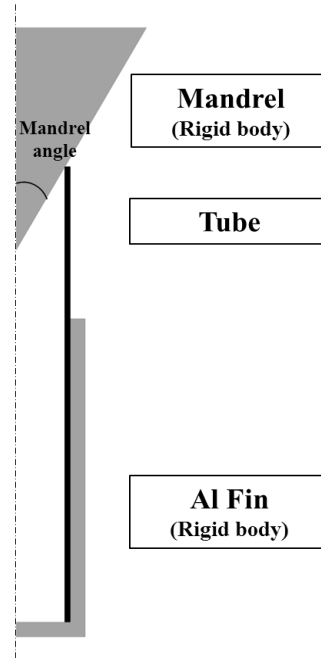
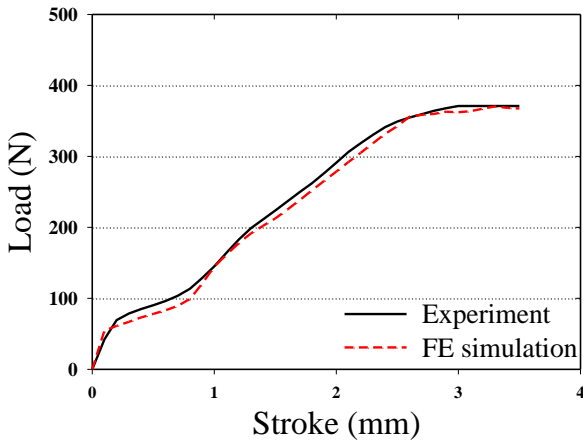


Fig. 6 Finite element modeling for the tube expansion test

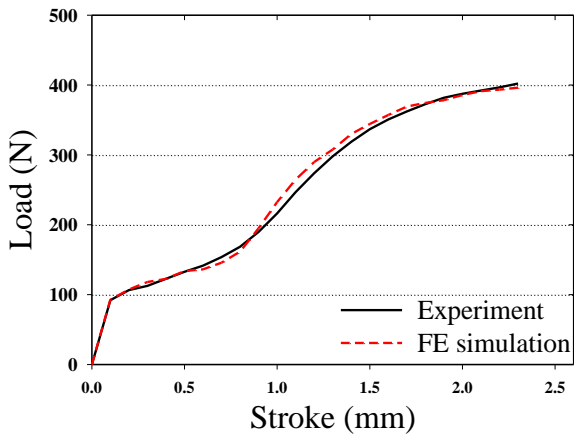
Rice-Tracey 모델은 다양한 응력 상태에 관한 공극 성장을 표현할 수 있도록 삼축 응력항이 포함되어 있으며 구성식은 식 (4)와 같다.

$$C_{RT} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \exp\left(\frac{\alpha \sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_m$ 은 정수압응력,  $\alpha$ 는 응력비 그리고  $C_{RT}$ 는 임계 손상치이다. 본 연구에서는 삼축응력항과 그 비례상수까지 포함하고 있어 Normalized Cockcroft-Latham 모델에 비해 실제 현상을 좀 더 유연하게 모사할 수 있는 Rice-Tracey 모델을 선택했다. Rakin (2001)도 Rice-Tracey model을 이용해 인장시험 시 발생하는 파단을 수치적으로 모사해 실험과 거의 일치하는 결과를 얻었다[9]. 본 연구에서는 연성과단 모델을 AFDEX 2D에 적용하여 해석결과가 맨드릴 각도 별 실험과 일치하도록 상수  $\alpha$ 와  $C_{RT}$ 를 결정했다. 모든 해석조건은 실험조건과 동일하고, Fig. 6과 같이 축 대칭으로 모델링했으며 마찰은 고려하지 않았다. Rice-Tracey모델의 상수 결정은 2.1절과 마찬가지로



(a)



(b)

Fig. 7 Results of the confirmation simulation for determined parameters of the ductile fracture model: (a) 20° mandrel, (b) 30° mandrel

가지로 상용 최적화 소프트웨어인 PIA<sub>n</sub>O를 사용했다. 상수의 도출 결과는 Table 2와 같으며, Fig. 7에서 확인할 수 있는 바와 같이 해석 결과가 실험을 잘 따르는 경향을 보인다.

### 3. 해석모델 검증 및 소재 최소화 설계

인장시험을 통해 도출한 유동응력과 튜브 확관 시험으로 구한 Rice-Tracey 모델의 타당성 검증을 위해 맨드릴 각도를 20~30°사이에서 임의로 선정하여, 25°맨드릴로 추가 시험을 수행했다. 실험 결과와 결정된 유동응력과 연성파단 모델을 적용한 해석 결과가 잘 맞는다면, 20~30°사이의 맨드릴을 사용한 확

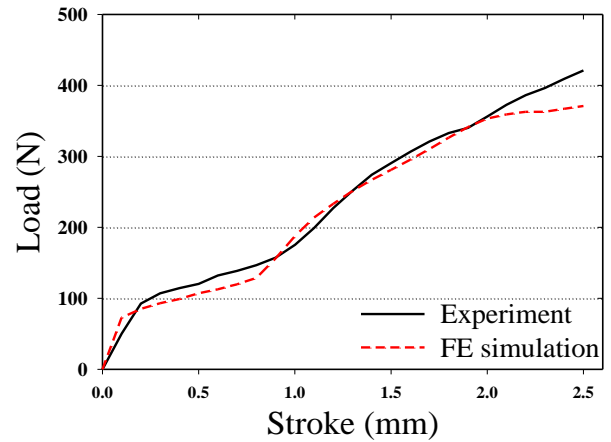


Fig. 8 Result of the confirmation simulation using 25° mandrel

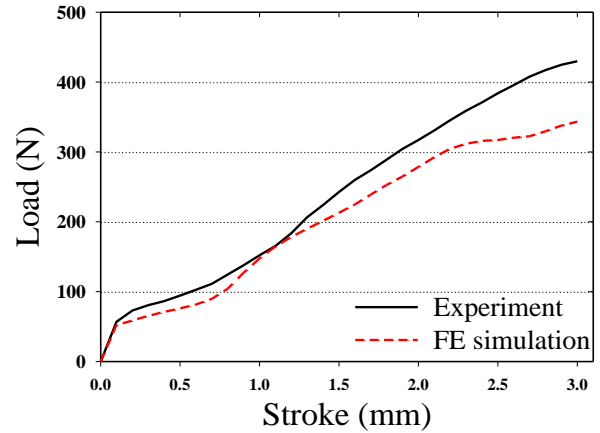


Fig. 9 Verification of used FE simulation model (diameter 6.35mm)

관 시험 결과는 해석만으로 결과를 예측할 수 있게 된다. 실험장비 및 조건은 기존시험과 동일하며, 결과는 Fig. 8과 같다. 약 6.5% 정도의 차이를 보이며 해석이 실험의 경향을 따르는 것을 확인할 수 있다.

따라서 해석에 사용한 모델과 도출한 모델의 상수들은 타당하다. 이는 확관 해석기법 정립을 통해 실제 확관 공정을 모사함으로써 시행착오 및 재료 손실을 줄일 수 있음을 의미한다. 본 연구의 궁극적인 목적은 실제 확관 공정에서 사용되는 튜브의 직경을 최소화 설계하여 공정 자동화에 기여함과 동시에, 원자재의 사용을 줄이는 것이다. 확관 해석기법을 적용하여 실제 확관 공정 해석을 통해 직경 최소화 설계 가능 여부를 확인하기 위해, 직경이 다른 튜브로 확관 시험 및 해석을 수행했다.



이미 맨드릴의 각도에 따른 실험은 해석으로 대체할 수 있음을 입증했으므로, 직경이 다른 튜브의 확관 시험과 해석 결과가 일치하면 실제 공정에 적용해 확관 시 찢어지지 않는 최소 직경을 도출할 수 있다. 소재의 두께는 0.33mm로 기존 튜브와 동일하지만, 내경이 6.34mm에서 5.69mm로 감소한 직경 6.35mm짜리 튜브를 사용했다. 기존 확관 시험과 실험장비 및 조건은 모두 동일하며 20° 맨드릴을 사용했고, 실험과 해석 결과는 Fig. 9과 같다. 실험에 비해 해석결과가 다소 일찍 파단이 일어나고 하중의 수준이 낮은 하지만, 하중의 증가나 변곡점 등 대체적으로 경향은 비슷하다. 따라서 해석기법을 실제 공정에 적용해 확관 시 소재가 찢어지거나 좌굴이 일어나지 않는 최소 직경 설계가 가능하다고 판단된다. 실제 확관 공정 시 맨드릴의 구조는 Fig. 10과 같다. 튜브의 두께는 고정하고, 내경을 감소시켰을 때 파단을 예측하기 위해 일정간격으로 내경을 감소시켜가면서 해석을 수행했다. 3차 확관 이후 최종 목표직경은 8.3mm이므로 해석 후 손상치가 임계 손상치인 0.31을 넘지 않으면 찢어지지 않는다고 판단할 수 있다. 해석결과 직경이 6.8mm 이하가 되면 8.3mm까지 확관 했을 때 손상치가 0.31을 초과하므로 튜브의 최소 직경은 6.8mm이다. 이 때 소재는 기존대비 9.75% 적게 사용된다. 실제 확관 공정에 적용 가능여부를 입증하기 위해 Fig. 11과 같은 검증용 실험장치를 구성하고, 최소직경 튜브를 제작해 실제와 동일한 맨드릴로 확관했다. 실험결과 튜브가 찢어지지 않고 안정적으로 확관됨을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

(1) 튜브 확관 시험 및 인장 시험을 통해 OFHC Cu의 물성을 도출했다. 단일 인장시험이 보장되지 않는 튜브 특성상 역공학(Reverse Engineering)기법을 도입하여, 실험을 통해 얻은 하중-변위 곡선과 Hollomon 모델을 적용한 유한 요소해석 결과의 차이가 최소가 되도록 유동응력의 상수를 결정했다.

(2) 튜브 확관 공정 시 파단을 예측할 수 있는 해석기법 정립하기 위해 Rice-Tracey model을 도입했다. 맨드릴 각도의 변화에 따른 확관 실험으로 얻은 하중-변위 곡선과 유한 요소 해석의 결과를 비교해, 차이가 최소화 되도록 모델의 상수를 도출했다.

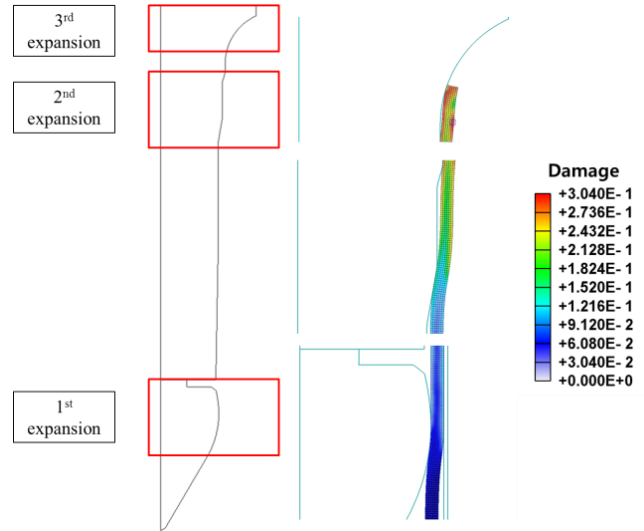


Fig.10 Schematic structure of the mandrel for the tube expansion process

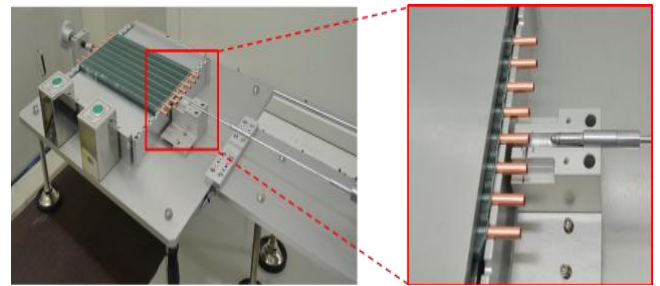


Fig.11 Simplified equipment used for the tube expansion process test

(3) 임의 맨드릴 각도와 소재 두께에 대한 실험 및 해석결과를 비교함으로써 유동응력과 파단모델을 적용한 해석기법을 검증했다. 해석이 실험의 경향을 작은 오차범위로 잘 따르기 때문에 실제 공정에 적용 가능한 것으로 판단된다.

(4) 해석기법을 활용하여 파단되지 않는 범위에서 소재 직경 최소화 설계가 가능함을 보였다. 이를 활용해 제조원가를 절감하는 동시에 공정 자동화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

위의 해석기법을 통해 소재의 물성을 정확하게 파악하고, 확관 시 소재의 파단 예측으로 성형 가능한 튜브의 형상을 효율적으로 설계할 수 있을 것이다. 아울러, 본 연구에서는 맨드릴의 형상이나 마찰 등 실제 튜브 확관 공정의 변수를 모두 고려하지 않았기 때문에 향후 확관에 미치는 다른 인자들을 파악해 최적 공정 설계에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## REFERENCES

- [1] W. Choi, T. Kwon, H. Jung, 2010, Study on Buckling Instability of Expansion Tube using Finite Element Method, Kor. Soc. for Railway, Vol. 13, No. 2, pp. 147~151.
- [2] H. S. Kang, D. S. Kim, 2004, Proc. of the KSME, Fall Conference, Trans. of the KSME, Korea, pp. 430~434.
- [3] B. P. P. Almeida, M. L. Alves, P. A. R. Rosa, A. G. Brito, P. A. F. Martins, 2006, Expansion and Reduction of Thin-walled Tubes using a Die: Experimental and Theoretical Investigation, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 46, No. 12, pp. 1643~1652.
- [4] W. Choi, T. Kwon, H. Jung, J. Kim, 2011, Effect of Punch Shapes on Failure Instability of Expansion Tube, Trans. of KSAE, Vol. 19, No. 2, pp. 125~132.
- [5] J. Hwang, S. Choi, S. Hong, N. Kim, 2013, Determination of the Flow Stress and Thermal Properties of Ceramic Powder Feedstock in Ceramic Injection Molding, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 27, No. 6, pp. 1815~1824.
- [6] PIAO user's manual, Version 3.3, Framax Inc., KOREA.
- [7] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and the Workability of Metals, J. of the Inst. of Metals, Vol. 96, p. 33.
- [8] S. I. Oh, C. C. Chen, S. Kobayashi, 1979, Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Wire Drawing: Part 2-Workability in Extrusion and Drawing, ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 101, No. 1, p. 23.
- [9] M. Rakin, 2001, Numerical Modeling of Ductile Fracture Initiation in Structural Steel, Mech. Eng., Vol. 1, No. 8, pp. 939~946.