

# 회전튜브입세팅에 의한 알루미늄 튜브 축관공정의 유한요소해석 FE analysis of the End-forming Process of Al Tube by Rotate Upsetting

\*#김영환<sup>1</sup>, 이정민<sup>2</sup>, 김동환<sup>3</sup>

\*#Y. H. Kim(ilmae@naver.com)<sup>1</sup>, J. M. Lee<sup>2</sup>, D. H. Kim<sup>3</sup>  
1, 2, 3 한국국제대학교 기계자동차공학부

Key words : Al tube, End-forming, FE analysis

## 1. 서론

튜브 축관공정(End-forming process)은 두께가 얇은 관재나 튜브의 끝단을 축관 또는 확관하는 공정이다. 일반적으로 성형공구를 회전하여 축대칭 형상만을 성형하는 스웨징이나 스피닝 공정과는 달리 끝단공정은 다이나 편치를 이용하여 끝단부 형상성형이 가능하기 때문에 자동차의 흡기구 및 배기구 뿐만 아니라 냉장고 열교환기 등 다양한 산업분야의 관재제품 성형에 활용되고 있다. 또한 공구이송 경로를 설정할 필요가 없어 스웨징이나 스피닝공정에 비해 설비비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 튜브의 회전속도, 공구형상 및 마찰조건 등 다양한 공정조건에 따라 소재의 끝단부 파단, 좌굴 등이 발생할 수 있기 때문에 제품의 형상에 따른 공정변수 평가가 요구된다. 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 축대칭 끝단공정에 대한 성형해석을 수행하여 공정변수가 제품에 미치는 영향을 평가하였다. 공정변수는 회전속도와 마찰계수이며 또한 실제 제품에 대한 다단 튜브 축관공정을 설계한 후 유한요소해석을 통해 검증하였다.

## 2. 공정변수 영향평가

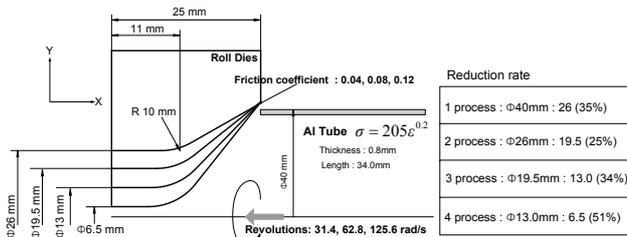


Fig. 1 Shapes of roll dies and Al tube for end-forming of tubes

Fig. 1 은 튜브 축관공정을 위한 다이형상과 알루미늄 (Al6061) 튜브형상을 나타낸 것이다. 총 4 공정을 통해 초기 직경 40 mm의 튜브는 최종적으로 직경 6.5 mm로 감소된다. 각 공정의 튜브 감소율은 Fig. 1 에 나타내었다. 튜브 축관 공정에서 다이와 알루미늄의 마찰계수와 회전속도 변화에 따른 성형하중 및 튜브의 응력상태의 평가는 Fig. 1 에 1 공정의 다이형상을 이용하여 수행하였다. 튜브의 회전속도는 각각 31.4, 62.8, 125.6 rad/s 로 설정하였으며 마찰계수는 0.04, 0.08, 0.12 로 설정하였다. 사용된 튜브 Al6061 의 기계적 특성은  $\sigma = 205\epsilon^{0.2}$  이다. 축관공정의 유한요소해석은 ABAQUS 6.3-1 를 이용하여 수행하였다.

Fig. 2 는 회전수 변화에 따른 튜브의 유효응력분포와 성형하중을 나타낸 것이다. 성형하중은 Fig. 1 에서 X 축방향의 하중을 나타낸다. 유효응력분포는 회전수에 상관없이 전체적으로 유사하였으나 최종 성형된 튜브의 원형형상은 회전수가 증가할수록 진원형상에 더 가깝게 나타났다. 또한 성형하중은 회전수가 증가할수록 약간 낮게 나타났다.

Fig. 3 은 마찰계수 변화에 따른 튜브의 유효응력분포와 성형하중을 나타낸 것이다. 마찰계수가 감소할수록 유효응력분포는 더욱 균일하게 나타났다. 최종 성형된 튜브 원형형상은 마찰계수에 상관없이 서로 유사하였다. 성형하중은 마찰계수가 증가할수록 약간 증가하였다.

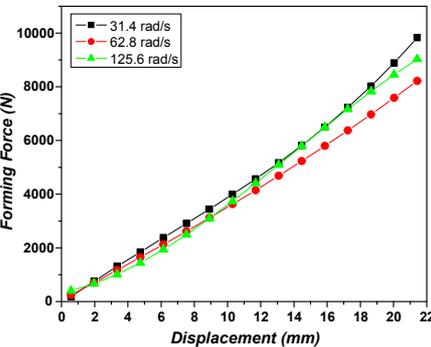
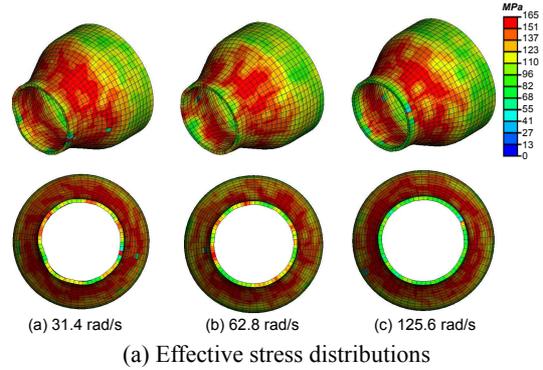


Fig. 2 Effective stress distributions of tubes and Forming force vs. displacement curves with different revolutions of roll die

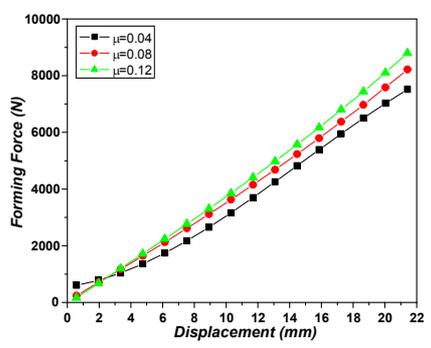
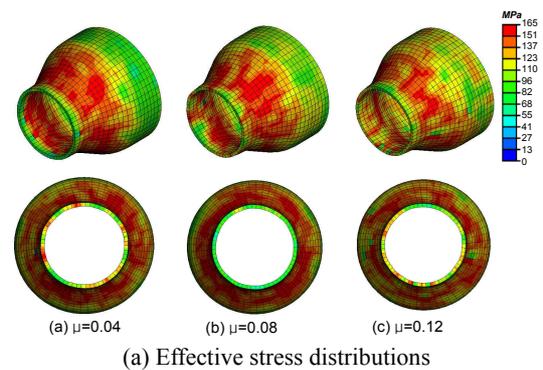


Fig. 3 Effective stress distributions of tubes and Forming force vs. displacement curves with different friction coefficients

### 3. 다단 튜브축관공정해석

Fig. 4는 Fig. 1에 나타난 다단 튜브축관공정에 대한 성형해석결과로서 튜브의 유효응력분포를 나타낸 것이다. 본 해석에서는 각각의 공정에서 발생한 가공이력은 모두 포함하여 다단공정해석을 진행하였다. 1, 2 공정은 튜브의 표면의 벤딩없이 양호한 형상을 성형하였다. 그러나 3 공정에서는 튜브표면에서 약간의 벤딩이 발생하였고 4 공정에서 이러한 현상은 더욱 두드러지게 나타났다. 특히 공정이 진행될수록 축관부분의 튜브 두께가 증가하기 때문에 축관성형은 더욱 어려워진다. 따라서 두께 증가를 억제하기 위해 드릴링(Drilling)이나 보링(Boring)작업이 추가적으로 적용되는 것이 요구된다.

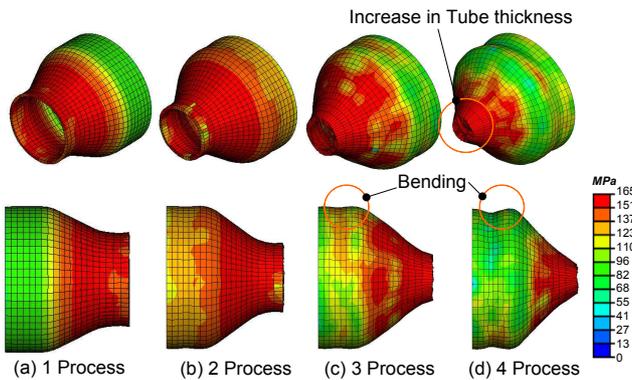


Fig. 4 Effective stress distributions of tubes with multi-processes of tube end-forming in Fig. 1

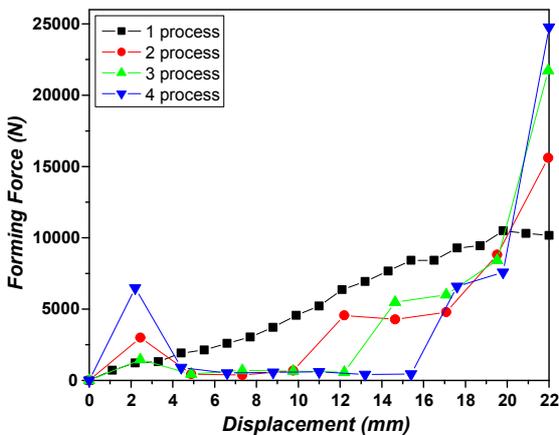
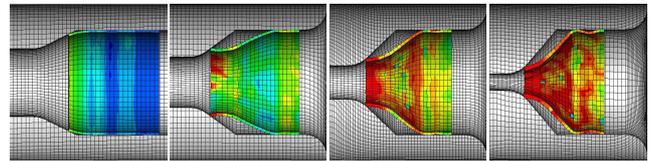


Fig. 5 Forming force vs. displacement curves with tubes with multi-processes of tube end-forming

Fig. 5는 Fig. 4의 각 공정별 성형하중을 나타낸 것이다. 최대하중점은 공정수가 증가할수록 증가하였지만 전반적인 평균하중은 감소하였다. 특히 1 공정은 변위증가와 함께 하중도 증가하였지만 2, 3, 4 공정의 경우 약 2.3 mm 변위 지점에서 하중이 급격히 증가하였다가 다시 급격히 감소하였다. 특히 다시 하중이 상승하는 지점까지의 변위는 공정수가 증가할수록 증가하였다. 이러한 현상의 원인은 1 공정을 제외한 2, 3, 4 공정에서의 예비성형체형상과 각 성형공정의 가공경화량에서 찾을 수 있다.

Fig. 6은 각 공정별 예비성형체형상을 다이와 접촉하는 순간(변위 2.3 mm)을 나타낸 것이다. 1 공정은 튜브의 직경감소가 선형적으로 발생하지만 나머지 공정에서는 요구하는 치수까지의 1 차적인 튜브직경감소가 변위 2.3 mm에서 우선적으로 발생한다. 이후 예비성형체가 다이 경사부에 도달하기 전까지 하중이 급격하게 낮아진다. 이러한 과정에서 가공경화량이 높은 4 공정에서 가장 높은 성형하중이 발생한다.



(a) 1 Process (b) 2 Process (c) 3 Process (d) 4 Process  
Fig. 6 Shapes of tube Preforms with each processes

전반적으로 Fig. 1의 다단 튜브축관공정은 3 공정에서의 튜브 벤딩의 시작과 튜브두께 증가로 인해 성형이 어려울 것으로 판단된다. 이러한 문제점을 제거하기 위해 상대적으로 1 공정과 2 공정에서 직경 감소율을 증가시키고 상대적으로 3, 4 공정의 감소율을 감소시키는 것이 바람직하다고 판단된다. 더불어 3 공정 이후 튜브 두께를 감소시키는 절삭공정과 어닐링공정을 추가하는 것도 앞선 문제점을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 튜브축관공정에서 마찰계수와 회전수 변화에 따른 튜브의 성형하중과 응력분포를 조사하였다. 또한 각 공정별 가공이력을 포함하는 다단튜브축관공정의 해석을 수행하였고 그 결과는 다음과 같다.

(1) 회전수가 증가할수록 성형하중은 감소하였고 튜브의 진원도는 향상되었다. 마찰계수가 증가할수록 성형하중은 증가하였고 튜브의 응력분포는 불균일하였다.

(2) 다단튜브축관공정에서 1 공정을 제외한 나머지 공정에서는 초기변위에서 1 차적인 축관이 먼저 발행하며 이 지점에서 튜브의 벤딩이 발생하기 시작한다. 공정이 증가할수록 성형체의 가공경화량과 두께가 증가하기 때문에 양호한 성형을 위해서는 어닐링공정이나 절삭공정의 추가가 요구된다.

### 참고문헌

1. Yao Jianguo and Murata Makoto, "An experimental study on paraxial spinning of one tube end," JMPT, **128**, 324-329, 2002.
2. Yao Jianguo and Murata Makoto, "An experimental study on spinning of taper shape on tube end," JMPT, **166**, 405-410, 2005.
3. M.L. Alves, B.P.P. Almeida, P.A.R. Rosa and P.A.F. Martins, "End forming of thin-walled tubes," JMPT, **177**, 183-187, 2006.
4. L.M. Alves and P.A.F. Martins, "Cold expansion and reduction of thin-walled PVC tubes using a die," JMPT, **209**, 4229-4236, 2009.