

고탄성체 성형공정을 이용한 튜브의 성형성 연구

나원기¹, 이근안¹, 이형욱¹, 최석우¹, 임성주¹, 우창수², 이기섭³

The Study on the Formability of Tube using Elasto-Forming Process

W. K. La, G.A. Lee, H.W. Lee, S. Choi and S.J. Lim

Abstract

Recently a number of parts have a tendency to be a module for saving weight, cost, process and high quality in automotive industry. The forming process to combine automotive rack tube which was consisted on many parts is various. This paper presents tube forming process using elasto-forming process. We investigated the properties of rubber and tube by Finite Element Analysis. And it was compared with the experimental results for the formability of tube. we was to suggest a forming process using moving die for elasto-forming process, and through this improvement we could get the good formability.

Key Words : Elasto-Forming, Rubber, Tube Forming, Finite Element Analysis, Moving Die

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 세계시장에서의 경쟁력을 확보하고, 다양한 소비자의 수요를 신속하게 대응하기 위하여 신차 개발기간의 대폭적인 단축이 요구되었고, 개발 기간과 개발비용의 대폭적인 절감이 필요하게 되었다. 부품의 고품질, 고 신뢰성을 갖추면서도 비용 상승 요인을 최대한 억제하거나 오히려 비용 절감이 가능하도록 하는 기술 혁신의 필요성이 증대되고, 기능적으로 관련이 있는 일련의 부품군을 통합하여 시너지 효과를 극대화하는 부품 모듈화가 필연적으로 요구되었다. 여기서는 여러 가지 자동차 부품 중 랙튜브(Rack tube)를 일체화하기 위한 성형공법을 제시한다. 그 성형공법에는 고탄성체 성형(Elasto-forming), 하이드로 포밍(Hydro-forming)[1], 스웨

이징(Swaging)이 있다. 이 중에서 고탄성체 성형 기술은 성형이 가능한 형상이 상대적으로 단순한 범위로 국한될 수 있는 단점이 있는 반면에 하이드로 포밍과 스웨이징 공정에 비교하여 초기 설비 투자비와 생산성 등이 탁월하게 우수하기 때문에 저원가 고생산성을 요하는 본 연구 대상품의 생산에 적합한 기술이다.

본 연구에서는 고탄성체 성형(Elasto-forming) 공정을 이용하여 튜브의 축관 성형에 관한 연구를 진행하고자 한다. 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard 를 이용하여 고무의 특성과 튜브의 성형성을 검토하고, 튜브의 성형 실험을 통해서 해석의 타당성을 증명하고자 하였다. 또한 성형하중과 튜브의 성형성 개선을 위한 방법으로 무빙다이(Moving die) 사용을 제안하여 요구에 맞는 성형성을 확보하고자 한다.

1. 한국생산기술연구원
2. 한국기계연구원
3. 태림산업

2. 고무와 튜브의 특성

2.1 고무의 특성

일반적인 고무재료는 탄성 대변형, 회복, 완충, 압력의 균일한 전달 등의 매우 독특한 특성을 지니고 있다. 이러한 고무 재료들의 최적화된 설계와 생산을 위해서는 재질의 기계적인 변형에 대한 이해가 필수적이다.[2] 물성 실험을 통하여 유한 요소 해석을 위해서 필요한 고무의 특성을 파악하였다. 고무의 종류는 천연고무(60 HD)와 우레탄 고무(90 HD)를 사용하였고, 단축/이축 인장시험을 통하여 인장강도, 신율과 변형률 범위에 따른 응력-변형률 선도를 확인했다. 인장 시험으로 얻어진 응력-변형률과 변형 에너지 함수로 구해진 응력-변형률의 관계식을 Curve fitting 하여 비교한 결과, 이 고무의 거동특성에 적합한 변형 에너지 함수 Ogden 3rd을 선정하여 그 계수들을 Table 1에 나타내었다. [3],[4]

Table 1 The properties of rubber

Rubber	Urethane (90 HD)	
The range of Strain	50%	
Strain energy function	Ogden 3 rd	
The coefficient of Strain energy function(Ogden 3 rd)	μ_1	1.98035
	α_1	3.50663
	μ_2	21.99
	α_2	3.25E-7
	μ_3	8.3E-7
	α_3	0.6021

2.2 튜브의 특성

유한요소 해석에 적용하기 위하여 단축 인장 시험을 통해 튜브의 특성을 파악하였다. 정확한 연신율을 측정하기 위하여 Extensometer 를 사용하였다. 측정된 값은 진응력-진변형률 선도로 나타내었으며, 항복응력은 0.2% offset 으로 표현하였다. Fig. 1 은 튜브의 진응력-진변형률 선도, Table 2 는 튜브의 물성치를 나타내었다.

3. 유한 요소 해석 및 실험

3.1 유한 요소 해석

유한 요소 해석을 통해 튜브의 고탄성체 성형공정을 설계하고자 한다. 보다 간단한 유한 요소

해석을 위해 축대칭으로 모델을 구성하고, 금형-튜브 사이의 마찰 계수는 0.1, 튜브-고무 사이의 마찰 계수는 0.3 으로 가정하였다. 고무의 두께는 20mm 그리고 튜브의 외경 44.5mm, 내경 41.2mm, 두께 1.65mm, Fillet R 0.5mm 로 정한다. 유한 요소 해석 프로그램은 상용 유한 요소 프로그램인 ABAQUS/Standard 를 사용하였다. 앞에서의 실험을 통해 얻은 고무와 튜브의 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다.

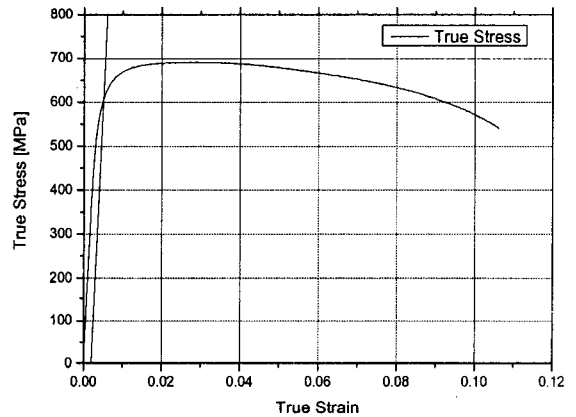


Fig. 1 True stress-strain curve

Table 2 The properties of tube

Young's Modulus	201 GPa
Yield Strength	608 MPa
Ultimate Strength	691 MPa

3.2 실험

유한 요소 해석을 통해 얻어진 설계안을 토대로 고탄성체 성형 실험을 수행하였다. 경도와 성형 하중 조건을 다르게 하여 총 6 회의 실험을 진행하였다. Fig. 2 는 성형하중 40, 80, 120 ton 일 때의 튜브의 성형 형상이고, Fig. 3 은 성형부의 도면을 나타낸 것이다. 성형부의 성형성을 파악하기 위하여 성형거리, 내경부와 외경부의 성형각도를 측정하였다(Table 3 참조). 성형하중이 증가하면 성형거리와 성형각도가 증가한다. 튜브의 성형부 안쪽 모서리에서 소성변형과 고무의 변형에 의해 성형거리가 길어지고, 성형각도가 커진다.

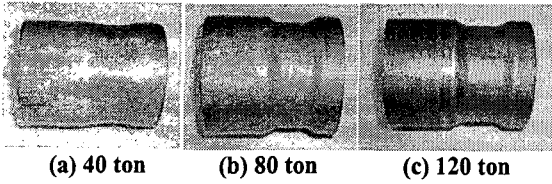


Fig. 2 Deformed shape of tube for experiment

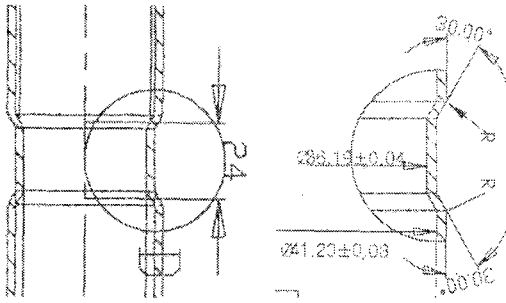


Fig. 3 Drawing of the forming part

Table 3 Experimental results

			40ton	80ton	120ton
ID ($\phi 36.19\text{mm}$)			36.198 (100%)	36.230 (100.1%)	36.2 (100.03%)
GL (24mm)			21.422 (89.3%)	24.1665 (100.7%)	24.582 (102.40%)
An (30°)	In	Up	17.6 (58.7%)	24.2 (80.7%)	26.1 (87.0%)
		Down	17.2 (57.3%)	24.1 (80.3%)	25.2 (84.0%)
	Out	Up	17.2 (57.3%)	23.3 (77.7%)	26.1 (81.0%)
		Down	16.9 (56.3%)	22.6 (75.3%)	25.0 (87.0%)

* ID : Inner diameter, GL : Gage line to gage line, An : Angle, In : the Inner part of Tube, Out : the Outer part of Tube

3.3 유한 요소 해석과 실험 비교

Fig. 4 는 유한요소해석과 실험을 통해 얻은 성형 하중을 편치 변위에 따라 나타낸 그래프이다. 두 성형 하중 곡선 모두 A, B 구간에서 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. A 구간에서는 성형부의 외부 모서리에서부터 하중이 걸리는 것을 나타내고, B 구간에서는 성형부의 안쪽 모서리 부분을 채우기 위해 성형하중이 올라가는 것을 나타낸다. 각 변위에 따른 성형 하중에서는 차이가 있지만 성형 하중의 경향성은 같았다.

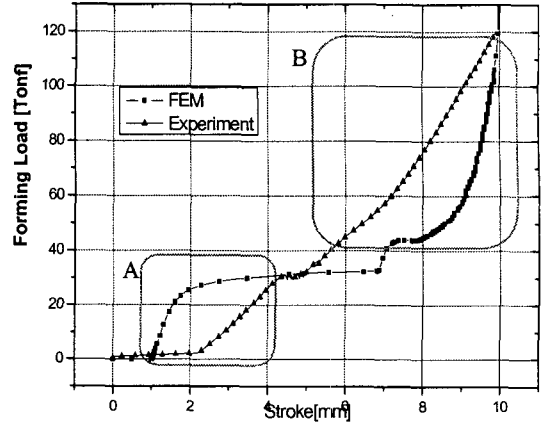


Fig. 4 Comparison of the forming load for FEM and experiment

Table 4 는 성형 하중이 120 ton 일 때, 성형부의 튜브내경, 성형거리, 성형각도를 측정하였다. 유한 요소 해석을 통해 얻은 설계안이 적합하다는 것을 나타내고 있다. 다만, 실험에서 금형-튜브, 튜브-고무 간의 마찰계수를 정확히 측정할 수 없고, 해석에서 노드점을 이용하여 수치를 측정하였기 때문에 다소의 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

Table 4 Comparison of the formability for FEA and experiment (Forming load = 120ton)

			FEA	Experiment
Inner Diameter ($\phi 36.19\text{mm}$)			36.2 (100.03%)	36.19 (100%)
Gage line to gage line (24mm)			24.582 (102.40%)	24.572 (102.38%)
Angle	Inner (30°)	Up	26.1 (87.0%)	27.1 (90.3%)
		Down	25.2 (84.0%)	26.3 (87.7%)
	Outer (30°)	Up	24.3 (81.0%)	24.1 (80.3%)
		Down	26.1 (87.0%)	25.0 (83.3%)

4. 고찰

고탄성체 성형 공정에서 가장 중요한 요소는

성형하중이었다. 성형하중이 증가하면 튜브의 성형성도 증가하였다. 하지만 성형하중을 증가시키는 것에는 한계가 있었다. 약간의 성형성 증가를 위해서 매우 큰 성형하중을 필요로 하기 때문이다. 이런 문제점을 개선하기 위해서 무빙다이(Moving die)를 이용한 성형 공정 방법을 연구하였다. Fig. 5 는 튜브의 축관이 코너부를 완전히 채워지지 않는 상태로 고탄성체를 이용하여 1 차 성형을 한 후 무빙 다이로 튜브의 축관시 코너부를 성형하기 위해 2 차 성형하는 과정을 나타낸다.

유한 요소 프로그램 ABAQUS/Standard[5]을 이용하여 외경 49.5mm, 내경 44.5mm, 두께 2.5mm 인 튜브를 해석하였다. 최대하중과 접촉 길이를 비교함으로써 무빙 다이를 이용한 성형 공정의 성형결과를 Table 5 에 나타냈다. 무빙 다이를 이용한 성형 공정 방법이 고무만을 사용한 방법보다 성형하중이 적게 필요했고, 성형부 안쪽에 닿는 접촉길이가 길었다. 이런 개선안을 적용하여 향후 추진할 계획이다.

Table 5 Formability in case of using moving die

	Maximum load(Tonf)	Contact length (19.67mm)
Moving Die ○	314.4	17.535 (89.1%)
Moving Die ×	394.3	16.605 (84.4%)

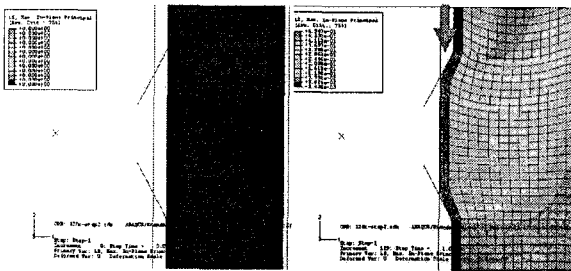


Fig. 5 The forming process with moving die

5. 결론

(1) 고무와 튜브의 기계적 특성을 파악하고, 유한 요소 해석을 통해 고탄성체 성형 공정을 이용한 튜브의 성형 공정을 확인하였다. 또한, 실험을 통하여 이 설계안이 적합하다는 것을 확인하였다.

(2) 성형하중을 줄이고, 성형성을 확보하기 위하여 무빙다이(Moving die)를 이용한 성형 공정 방법을 연구하였다.

참고 문헌

- [1] 박세승, 손현성, 이영선, 이우식, 김영석, 2002, "Hydroformed 튜브 소재의 압축특성에 관한 연구(II)", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 17~20.
- [2] 신수정, 1998, "3 차원 유한요소 기법을 이용한 고무-금속 복합문제의 해석", 서울대학교 대학원 공학박사학위논문.
- [3] Giuseppe Sala, 2001, "A numerical and approach to optimize sheet stamping technologies: part II-aluminium alloys rubber-forming", Material & Design
- [4] Valanis, K. C., Landel, R. F., 1967, "The strain-energy function of a hyperelastic material in terms of the extension ratios", J. of Applied Physics, Vol 38, pp. 2997- 3003
- [5] ABAQUS theory and user manual, 1994, Hibbitt Karles son & Sorensen Inc..