

일체형 랙 튜브 성형을 위한 고 탄성체 물성시험과 유한요소 해석

우 창 수[†] · 박 현 성 · 이 근 안*

한국기계연구원 나노기계연구본부

*한국생산기술연구원 생산기술연구본부

(2008년 7월 17일 접수, 2008년 8월 28일 수정 및 채택)

Physical Test and Finite Element Analysis of Elastomer for Steel Rack Tube Forming

C. S. Woo[†], H. S. Park, and G. A. Lee*

Nano Mechanical System Research Center, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea

*Manufacturing process Research Division, Korea Institute of Industrial technology, Inchen 994-32, Korea

(Received July 17, 2008, Revised & Accepted August 28, 2008)

요 약 : 고무나 우레탄과 같은 고 탄성력을 이용하여 튜브를 임의의 형상으로 성형하는 고 탄성체 성형방법은 타 공정에 비해 높은 치수 정밀도와 생산 공정의 단축, 에너지 절감 등을 기대할 수 있는 차세대 성형기술이라 할 수 있다. 본 연구에서는 탄성체에 대한 소재 물성시험과 특성평가를 통해 고 탄성체 성형에 적합한 소재를 선정하고 시험으로 얻어진 응력-변형률을 이용하여 비선형 재료상수를 결정하여 성형해석에 필요한 물성 데이터를 확보하였다. 또한, 랙 튜브에 대한 유한요소해석을 통해 탄성체의 두께변화에 따른 공정변수의 영향을 검토하였다.

ABSTRACT : Rubber-pad forming process for materials such as metal in which portions of the die which act upon the material is composed of a natural or synthetic rubber or elastomer material. This makes the rubber pad forming process relatively cheap and flexible, high accuracy for small product series in particular. In this study, we carried out the physical test and finite element analysis of elastomer such as natural rubber and urethane for steel rack tube forming. The non-linear property of elastomer which are described as strain energy function are important parameter to design and evaluate of elastomer component. These are determined by material tests which are uni-axial tension and bi-axial tension. This study is concerned with simulation and investigation of the significant parameters associated with this process.

Keywords : rubber-pad forming, elastomer, mechanical test, heat-aging, material coefficient, finite element analysis

I. 서 론

자동차용 파워 스티어링 모듈(power steering gear sub module)을 개발하는데 있어서 생산성과 제조원가를 줄이기 위한 방법으로 기존 랙 튜브와 랙 하

우징, 밸브 하우징을 일체화시켜 튜브를 성형하는 일체화 성형기술이 국내외에서 개발, 적용되고 있다. 일체화 성형기술은 복잡한 형상 또는 다수의 부품으로 구성된 제품을 1회의 가공이나 축약된 수의 부품을 이용하여 최종형상을 생산할 수 있는 기술로 생산 공정의 단축, 재료비 절감, 자원 및 에너지 절감 등을 기대할 수 있는 차세대 성형기

[†] 대표저자(e-mail : cswoo@kinmm.re.kr)

술이라 할 수 있다.¹²

본 연구에서 개발하고자 하는 고 탄성체 성형 (rubber-pad forming)기술은 고무나 우레탄과 같은 고 탄성력을 이용하여 튜브를 임의의 형상으로 성형하는 방법으로, 기존의 하이드로-포밍(hydro-forming)과 스웨이징(swaging) 공정에 비해 요구 치수 정밀도와 높은 생산성으로 인해 저 원가, 고생산성을 요하는 제품 생산에 최적의 기술로 연구개발의 필요성이 절실하다고 탄성체 성형기술에 이용되는 탄성체는 제품의 특성에 따라 탄성체 종류를 결정하고 충진제를 비롯한 여러 가지 첨가제를 특정한 비율로 배합한 혼합물 형태로 사용되므로, 제품의 용도와 사용조건에 따른 요구 물성과 특성을 만족할 수 있는 재료를 선택하는 것은 매우 중요하다.^{3,4} 그러나, 국내 탄성체 관련기술들은 경험과 시행착오적인 방법으로 개발·전수되어 설계 및 해석기술을 비롯하여 재료, 제조 및 시험평가의 모든 면에서 매우 취약한 상태이다. 특히, 탄성체 재료의 물성 데이터들은 요구되는 물성이 다양하고 구성성분이 너무 많아 다양한 실험을 통해서만 가능하기 때문에 국내의 영세한 탄성체 업체가 정확한 물성과 특성을 파악하는 것은 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 여러 탄성체에 대한 소재 물성시험과 특성평가를 통해 고 탄성체 성형에 적합한 소재를 선정하고, 시험으로 얻어진 응력-변형률을 이용하여 비선형 재료상수를 결정하여 성형해석에 필요한 물성 데이터를 확

보하여 튜브 축관을 위한 고 탄성체 성형 공정에 활용하였다. 또한, 우레탄의 두께 결정 및 하중을 고려한 공정설계를 위해 유한요소해석을 수행하였다.

II. 탄성체 물성시험 및 평가

1. 탄성체 물성시험

고 탄성체 성형은 Figure 1에서 보는 바와 같이 금속성 금형을 이용하지 않고 고 탄성 패드를 이용하여 금속을 변형시키는 성형기술로 고 하중 및 고 압력 조건 하에서 탄성체가 변형되어 금속을 변형시키는 금형 역할을 하고 있어 성형 형상이 제한되는 단점이 있는 반면, 하이드로 포밍과 스웨이징 공정에 비해서 초기 설비 투자비와 생산성 등이 우수하기 때문에 저 원가 고 생산성을 요구하는 자동차용 튜브 생산에 최적의 기술이라 할 수 있다. 고 탄성체 성형에 이용되는 탄성체에 대한 물리적 특성을 검토한 결과, 낮은 유리전이 온도를 갖는 비정질 탄성체로 찢어지지 않고 탄성변형을 하며 탄성계수가 낮은 천연고무와 마모저항이 높고 고강도, 고경도와 탁월한 내마모성으로 피로수명이 좋은 폴리우레탄을 고 탄성체 성형에 사용될 소재로 선정하여 경도, 인장강도, 신율, 동특성 등 기본 물성시험을 통하여 정적 및 동적 특성을 파악하였다.

탄성체 소재는 제조과정에서 배합성분 및 함량

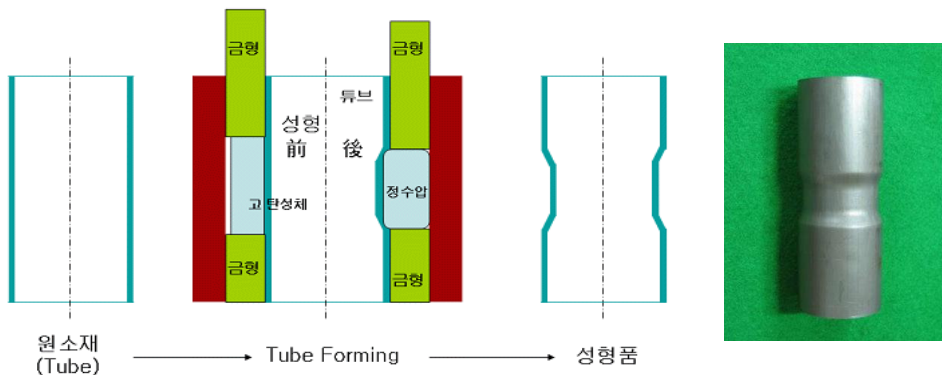


Figure 1. Schematic drawing of rubber-pad forming process.

조건이 다양하고 재현성을 확보하지 못하기 때문에 아직까지 표준화된 물성이 자리 잡지 못하고 있다. 소재의 물성을 구하기 위해 한국산업 규격 (KS M6518)의 아령형 3호 시편을 제작한 후 경도를 측정하여 시편간의 오차가 최소화 되도록 한 다음 시험 온도와 시험 속도 등 시험조건을 설정하여 단축 인장, 이축 인장시험, 노화물성시험을 통하여 소재 물성을 파악하였으며^{5,6} 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 결정하여 성형해석에 필요한 물성데이터로 활용하였다.

경도 측정은 소재 물성시험 중 가장 기본이 되는 것으로 시편을 제작한 후 반드시 경도를 확인해 시편 간 오차가 최소가 되도록 하여야 한다. 경도는 일반적으로 두 가지 종류의 측정 방법이 있는데 가장 보편화 된 쇼어 A(shore A) 경도와 국제경도 규격인 마이크로 IRHD(International Rubber Hardness Degree)가 있다. 쇼어 A 경도계는 측정 및 휴대가 편리하기 때문에 많이 사용되지만 측정자 간의 편차가 있어 정확한 경도 측정에 한계가 있고, 마이크로 IRHD 시험기는 정밀한 경도 측정이 가능하나 측정할 수 있는 형상 및 크기에 제약이 따른다. 아직까지 대부분의 소재업체에서는 쇼어 A 경도를 사용하고 있기 때문에 본 연구에서는 고무시편 및 부품의 정확한 경도를 측정하기 위해서 두 종류의 시험기를 병행해서 측정하였다. 경도 측정은 한 시편에 대해 여러 곳에 대해 측정하였으며 최대 및 최소값을 제외하고 나머지 값으로 대표 경도로 정하였다. Table 1은 국내에서 제작된

Table 1. Hardness of Elastomer

Specimen No.	NR		Urethane (Domestic)		Urethane (Japan)	
	Shore A	IRHD	Shore A	IRHD	Shore A	IRHD
1	59	58	89	91	90	92
2	59	58	88	90	90	92
3	60	59	91	93	91	93
4	61	60	92	94	90	92
5	61	60	90	92	89	91
Mean	60	59	90	92	90	92

천연고무와 우레탄 및 수입 우레탄에 대해 측정된 소재의 경도 값을 나타내었다.

인장강도시험을 위한 시험장비는 영국 테스트메트릭(testometric)사의 500 N 인장시험기로 환경 챔버와 레이저 익스텐서메타(laser extensometer)로 구성되어 있다. 인장강도시험은 100 mm/min의 속도로 시험하였으며 그립 부분에 물려있는 시편이 변형의 진행에 따라 약간씩 빠져나오는 현상을 방지하기 위해 물러 그립을 사용하여 고정하여 인장강도와 신율을 측정하여 기계적 물성을 비교, 검토하였다.

Figure 2에서 보는 바와 같이 수입 우레탄의 인장강도는 약 45 MPa로 국내 우레탄보다 3배 이상 높게 나타났고 신율에서도 2배 이상 높음을 알 수 있어 수입 우레탄 소재가 국내 소재보다 기계적 특성이 우수함을 알 수 있었다.

정현파 진동에 의한 탄성체의 동적 성질인 저장

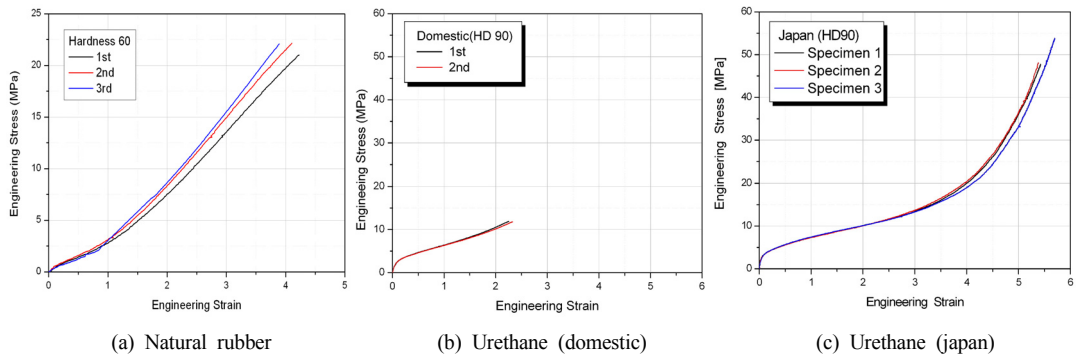


Figure 2. Results of mechanical test for elastomer.

탄성계수 및 손실계수를 파악하기 위하여 동 특성 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시험편은 10 mm x 1 mm의 사각 스트립(strip) 타입으로 천연 고무, 국내의 우레탄 소재에 대해 각각 제작하였다.

시험조건은 주파수 변화에 따른 특성을 파악하기 위해 1~100 Hz 영역에서 시험 하였으며, 변형을 변화는 정적 변형률은 5%로 하고 동적 변형률은 0.1%로 하여 노화조건에 따른 동 특성과 탄성체 소재의 전이온도를 파악하기 위해 -100℃ ~ +100℃의 온도영역에서 시험을 수행하였다.

Figures 3~4는 천연고무에 대해 노화온도 및 노화일수에 따른 저장 탄성계수 및 손실계수의 변화를 나타낸 것으로 탄성계수는 노화온도가 높고 노화일수가 길수록 증가하였으며 1~100 Hz의 주파수 영역에서는 일반적인 탄성체 소재의 주파수 특성에서와 같이 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 손실계수는 주파수가 증가할수록 증가하는 경향을 나

타내었으며 노화일수가 길수록 감소하는 경향을 나타내었다.

Figure 5는 국내의 우레탄 소재에 대한 동 특성 시험 결과를 나타낸 것으로 주파수 변화에 따른 국내 우레탄 소재의 저장 탄성계수는 25~55 MPa, 수입 우레탄 소재는 45~55 MPa로 수입 소재가 저장 탄성계수의 변화가 작았으며, 손실계수는 국내 소재는 0.25~0.45, 수입 소재는 0.1~0.2로 나타났다.

2. 비선형 재료상수

일반적인 탄성재료는 하중을 가했다가 제거하면 하중과 변형이 선형적인 관계를 유지하는 범위 내에서 원래의 상태로 되돌아오는 탄성거동을 나타내지만 고무재료는 일반 탄성체와는 달리 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초 탄성 특성을 지닌다. 이러한 특성은 고무재료의 거동을 나타내는 변형률에

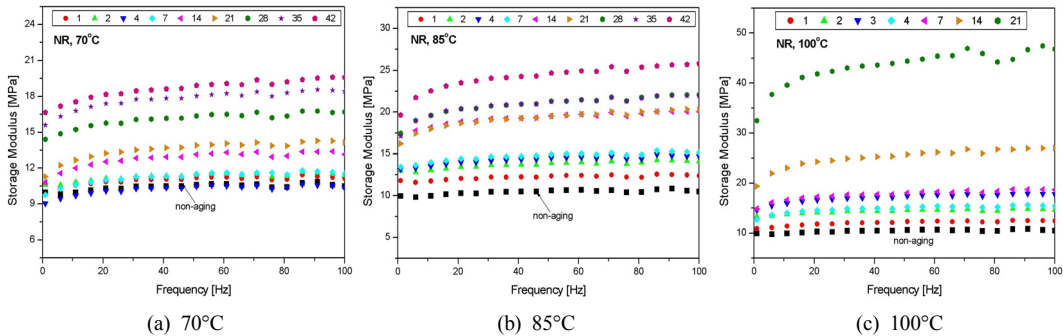


Figure 3. Storage modulus of elastomer.

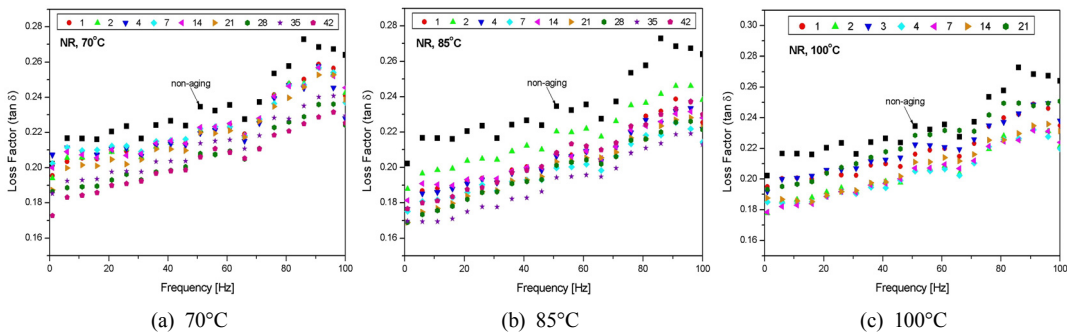
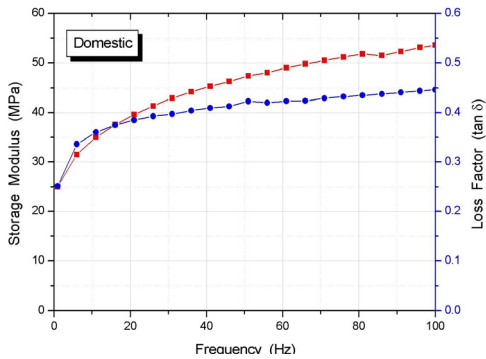
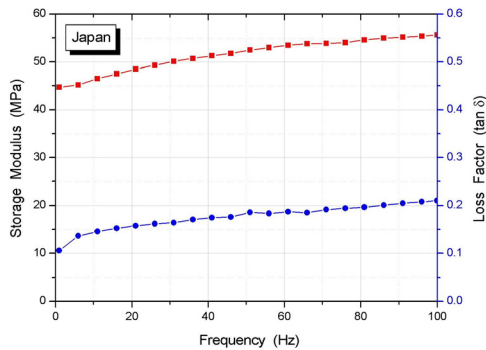


Figure 4. Loss factor of elastomer.



(a) Domestic



(b) Japan

Figure 5. Dynamic properties of urethane rubber.

너지함수(strain energy function, W)의 계수로 표현할 수 있다.^{7,8}

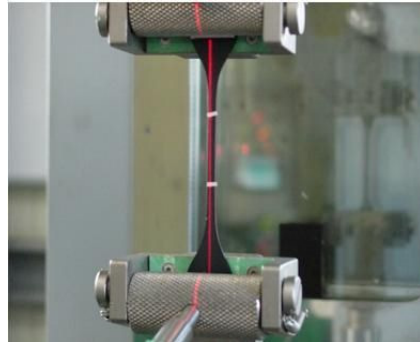
비압축성 재료의 변형해석에 널리 쓰이는 변형률에너지함수는 다음과 같이 연신률 불변량의 함수로 표시되는 무니-리블린(Mooney-Rivlin)의 다항식 형태와 주 연신률의 함수로 표시되는 오그덴(Ogden) 형태로 나타낼 수 있다.

① Mooney-Rivlin 함수 :

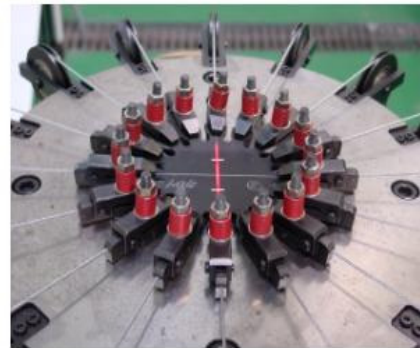
$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

② Ogden 함수 :

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (2)$$



(a) Uniaxial test



(b) Equi-biaxial test

Figure 6. Physical test of rubber material.

여기서, C_{ij} , μ_n , α_n 는 시험결과로부터 결정되는 재료상수이다.

고무는 반복 부하-제하 과정에서 최대변형률 수준에 따라 다르게 거동하므로 변형률 변화에 따른 고무물성을 파악하기 위하여 Figure 6과 같이 단축 인장시험과 원형판재로 제작된 이축 인장시험을 방사방향으로 신장시켜 이축응력과 이축변형률을 측정할 수 있는 이축인장시험을 다양한 변형률 범위에서 수행하였다.

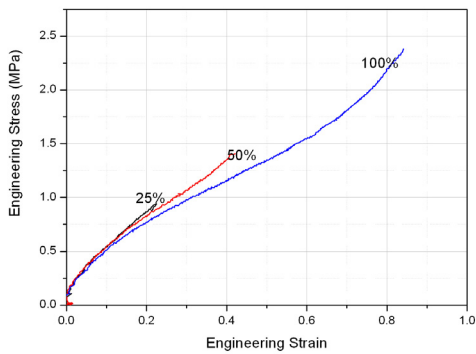
고무는 변형을 받으면 초기상태의 분자 구조가 수정 및 재배치로 인하여 강성이 낮아지고 댐핑 특성이 변하게 된다. 이러한 응력-변형률 완화 현상을 몰린스(Mullins) 효과라고 한다.⁹ 특히 경도가 높은 고무재료일수록 두드러지게 나타나는데 충전제인 카본 블랙 양의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 고무의 강성은 경로에 종속적인 관계를 보

인다. 이러한 특성으로 고무는 부하(loading)와 제하(unloading) 시의 응력-변형률 곡선이 다르며 또한, 초기의 응력-변형률 곡선을 다시 반복하지 않고 동일 변형률 구간에서 대략 3~10회 정도의 반복하중을 받아야 곡선이 안정화된다. 그리고 고무 재료가 이전에 받았던 변형률보다 더 큰 수준의 변형률을 받으면 응력-변형률 곡선은 다시 변하게 되므로 변형률 변화에 따른 물성을 파악하기 위한 시험을 수행하였다.

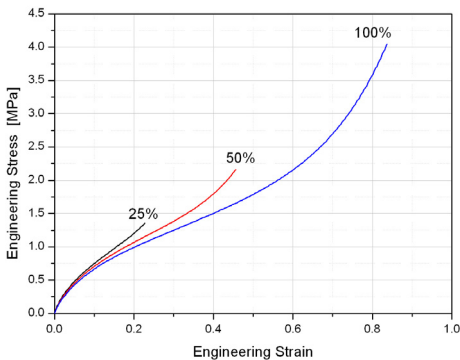
Figures 7~8은 천연고무와 우레탄 소재에 대해 변형률 범위에 따른 단축인장, 이축인장시험 결과를 나타낸 것으로 변형률 범위가 클수록 강성이 감소함을 알 수 있었다. 즉 고무는 이전의 변형률 수준보다 더 많은 변형률을 받으면 강성이 감소하는 경향이 있었다. 따라서 고무 및 탄성체 부품의 유한요소 해석에 필요한 물성을 얻기 위해서는 실

제 사용조건과 동일한 변형률 구간에서 물성시험이 이루어져야 정확한 특성을 예측할 수 있음을 알았다.

단축인장, 이축인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률의 결과와 변형률 에너지함수로부터 구해진 응력-변형률의 관계식을 이용하여 Figure 9와 같이 커브 피팅(curve fitting)하여 변형률 범위에 따른 비선형 재료상수 값을 Table 2에서와 같이 무늬-리블린 2항과 오그덴 3항의 함수로 결정하였다. Table에서 보는 바와 같이 변형률이 클수록 강성(G)이 낮아짐을 알 수 있었으며 무늬-리블린 함수와 오그덴 함수로 구한 재료상수 값들이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었으며, 물성시험을 통해 구해진 비선형 재료상수 값들은 성형해석에 필요한 물성 데이터로 활용하였다.

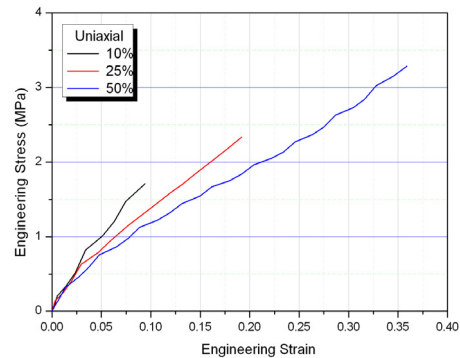


(a) Uniaxial test

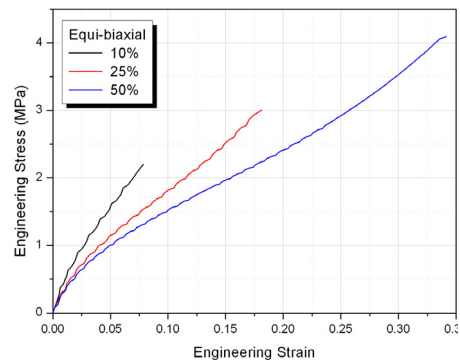


(b) Equi-biaxial test

Figure 7. Stress-strain curve of natural rubber.



(a) Uniaxial test

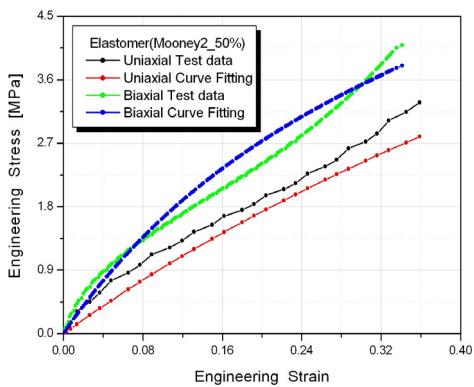


(b) Equi-biaxial test

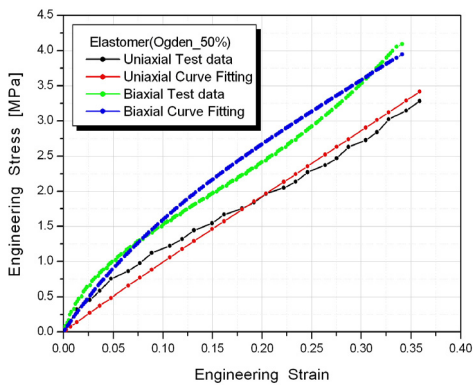
Figure 8. Stress-strain curve of urethane.

Table 2. Material Coefficient of Elastomer

Materials	Strain (%)	Mooney-Rivlin			Ogden						
		C10	C01	G	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	G
NR (60HD)	25	0.868	0	1.736	1.421	3.66e-6	1.471	2.11e-5	1.377	2.514	1.731
	50	0.743	0	1.486	4.86e-5	0.869	1.662	1.811	0.607	3.04e-5	1.505
	100	0.615	0.052	1.334	0.078	4.543	6.874	0.083	1.410	1.234	1.334
Urethane (90HD)	10	3.343	0	6.686	1.84e-5	1.066	1.976	7.067	1.40e-4	2.694	6.982
	25	2.139	0	4.278	12.39	1.91e-6	15.06	2.81e-7	1.788	4.989	4.462
	50	1.712	0	3.424	1.980	3.506	21.99	3.25e-7	8.30e-7	0.602	3.472



(a) Mooney-Rivlin



(b) Ogden

Figure 9. Curve fitting by using Mooney-Rivlin and Ogden function.

Ⅲ. 탄소성 유한요소 해석

1. 유한요소 해석

고 탄성체를 이용한 튜브의 축관 성형은 Figure 10(a)에서와 같이 금형과 펀치(punch) 그리고 만드렐(mandrel)의 금형시스템과 고 탄성체를 이용하여 성형하게 된다. 성형과정은 압력 링과 실린더형 금형 그리고 만드렐 사이에 고 탄성체를 넣고 그 사이에 성형용 튜브를 위치시킨 후, 펀치를 이용하여 튜브의 축관 성형이 이루어지게 된다. 튜브 축관 성형을 위해 고 탄성체에 100톤 이상의 큰 하중이 작용하므로 본 연구에서는 강도가 낮은 천연고무보다 고강도 우레탄을 선정하여 유한요소 해석을 수행하였다.

튜브 축관을 위한 탄소성 해석모델은 Figure 10(b)에서와 같이 축대칭을 이용하였으며 튜브는 탄성체, 우레탄은 물성시험을 통해 얻어진 재료상수 값을 이용한 초탄성체로 하였으며 금형과 펀치, 만드렐은 강체로 가정하였고 접촉부위는 만드렐과 소재, 펀치와 소재, 금형과 소재, 고 탄성체와 펀치, 고 탄성체와 금형, 고 탄성체와 만드렐은 강체와 소재사이에 있어서 x, y, z방향의 변형이 가능한 면 접촉(surface-surface) 처리 하였다. 초기 튜브는 외경 44.5 mm, 내경 41.2 mm, 두께 2.5 mm를 가지고 있으며, 성형하중과 우레탄의 변형량을 고려하여 두께 결정을 위한 공정설계를 위해 해석을 수행하였다.

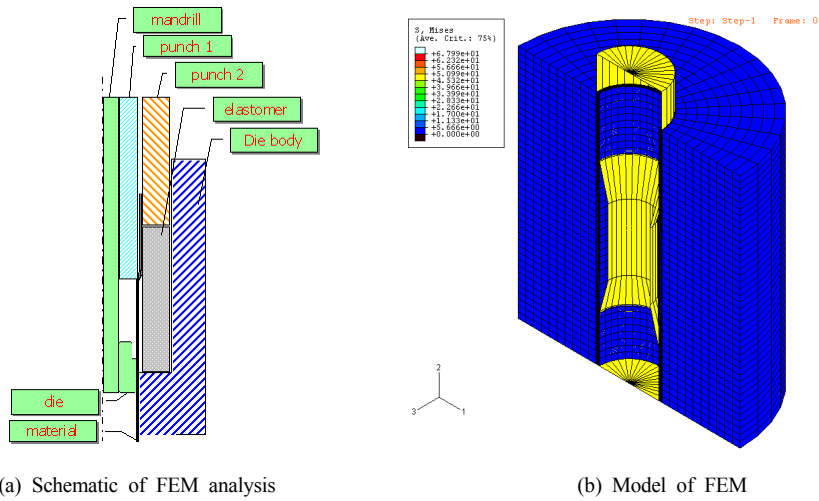


Figure 10. Modeling of finite element analysis.

Table 3. Punch Stroke for Elastomer Thickness

Thickness	Required stroke (mm)	Analyzed stroke (mm)
20mm	1.823	1.84
55mm	0.440	0.402
60mm	0.385	0.343

2. 공정변수의 영향

튜브 축관 성형 시 고려해야 할 첫 번째는 우레탄의 두께에 따른 성형성을 검토하는 것이다. 우레탄의 두께에 따라 펀치가 움직이는 거리가 결정되는데 이는 우레탄의 수명과 연관이 있다. 수습에서 수만 번 성형이 진행되는 동안 우레탄이 지속적인 탄성체로서 기능을 가지는 것은 매우 중요하다. Table 3에 우레탄의 두께변화에 따른 요구되는 펀치거리와 해석 후 펀치거리를 비교 한 것으로 해석과 이론 결과가 거의 일치하여 해석에 대한 검증을 하였다.

Figures 11~12는 우레탄 두께변화에 따른 하중변화와 변형분포를 나타낸 것으로 변형이 튜브가 축관되는 부분에서 집중적으로 나타나고 있음을 알 수 있었으며 두께가 두꺼울수록 하중이 증가하였다. 초기에는 튜브가 평면 상태에서 변형을 일으키

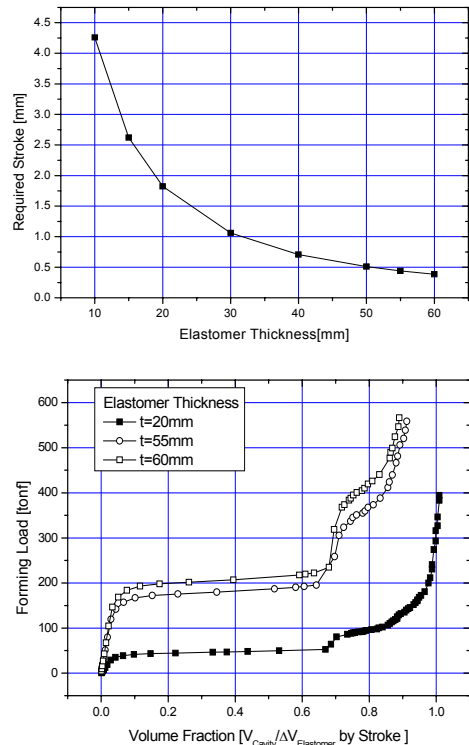


Figure 11. Stroke and load for various thicknesses.

기 위하여 하중이 상승하다가 펀치의 변위가 약 20% 정도에서 변형된 튜브를 성형하면서 완만히

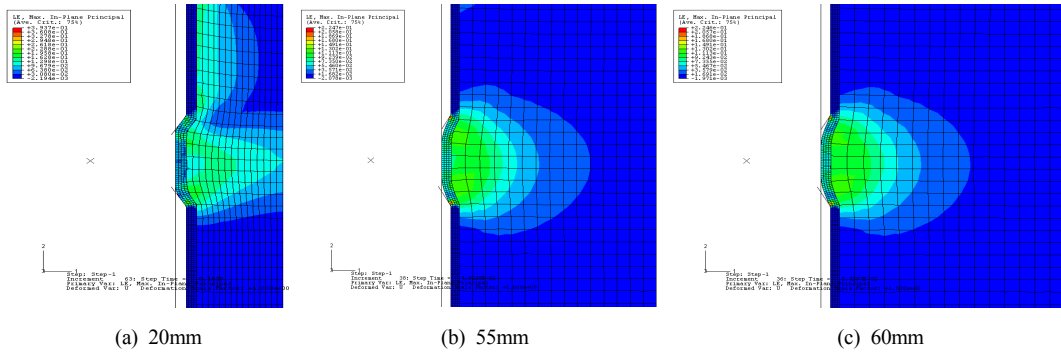


Figure 12. Deformed shape for various thicknesss.

하중이 증가한다. 그리고 펀치의 변위가 약 90% 정도에 이르렀을 때 튜브의 코너부를 성형과정에서 하중이 급격히 상승하여 두께가 25 mm일 경우 약 400톤 정도의 하중이 필요함을 알 수 있었다. 이는 튜브의 코너부위를 완전히 채우지 않았을 때의 하중으로, 코너부를 고려하였을 경우에는 하중이 급격히 상승할 것으로 예측된다. 결국 튜브의 성형을 위해서는 우레탄 고무만으로 성형하기에는 매우 큰 하중이 걸리게 되기 때문에 이동판(moving die)의 사용으로 코너부를 성형할 필요가 있음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

일체형 랙 튜브를 성형하기 위한 고 탄성체에 대한 물성시험과 특성해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탄성체 소재 물성시험을 통해 인장강도는 천연고무보다 우레탄이 월등히 우수함을 알 수 있었으며, 수입 소재의 인장강도는 약 45 MPa로 국내산 우레탄보다 2배 이상 높게 나타났고 신율에서도 2배 이상 높음을 알 수 있어 수입 우레탄 소재가 국내 소재보다 기계적 특성이 우수함을 알 수 있었다. 따라서, 일체형 랙 튜브 성형을 위한 탄성체는 천연고무보다 기계적 물성이 우수한 우레탄이 적합함을 알 수 있었다.

(2) 탄성체 소재에 대한 동특성시험 결과 국내 우레탄 소재의 저장 탄성계수는 25~55 MPa, 수입

우레탄 소재는 45~55 MPa로 수입 소재가 저장 탄성계수의 변화가 작았으며, 손실계수는 국내 소재는 0.25~0.45, 수입 소재는 0.1~0.2로 수입 우레탄 소재의 동적 특성변화가 작음을 알 수 있었다.

(3) 단축인장, 이축인장시험을 통해 얻어진 응력-변형률의 결과를 이용하여 변형률 범위에 따른 비선형 재료상수 값을 Mooney-Rivlin 2항과 Ogden 3항의 함수로 결정하여 성형해석에 물성 데이터로 활용하였다.

(4) 우레탄 고무의 두께변화에 따른 요구되는 펀치거리와 해석 후 펀치거리를 비교 한 결과, 해석과 이론 결과가 거의 일치하여 해석에 대한 검증을 하였으며 우레탄 고무만으로 성형하기에는 매우 큰 하중이 걸리게 되기 때문에 이동판의 사용으로 코너부를 성형할 필요가 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 산업자원부 지역산업기술개발사업의 연구결과와 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. B. Daniel, L. Steven, Metalworking : Sheet Forming, *ASM handbook*, **14B** (2002).
2. M. H. Dirikolu, E. Akdemir, "Computer aided modelling of flexible forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, **148**(3), 376 (2004).
3. L. R. G. Treloar "The Physics of Rubber Elasticity",

- Clarendon press, Oxford 3th Edition, (1975).
4. P. K. Freakley, A.R. Payne, "Theory and Practice of Engineering with Rubber", Applied Science Publishers LTD., (1978).
 5. R. P. Brown "Physical Testing of Rubber", Chapman & Hall 3th Edition, (1996).
 6. R. P. Brown, T. Burtler, "Natural ageing of rubber-Changes in physical properties over 40years", *RAPRA Technology*, (2000).
 7. L. Mullins, "Softening of Rubber by Deformation", *Rubber Chem. Tech.*, **42**, 339 (1969).
 8. R. W. Ogden, "Large Deformation of Isotropic Elasticity: on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids", *Proc. of the Royal Society(A)*, **326**, 565 (1972).
 9. L. Mullins, "Softening of rubber by deformation", *Rubber Chem. Technol.*, **42**, 339 (1969).