

우레탄 고무에 대한 물성평가 및 성형해석

우창수[†] · 박현성* · 이근안**

Material Test and Forming Analysis of Urethane Rubber

Chang-Su Woo, Hyun-Sung Park and Geun-An Lee

Key Words: Elasto-forming(탄성체 성형), Urethane rubber(우레탄 고무), Material coefficient(재료 상수), Forming analysis(성형해석)

Abstract

Elasto-forming has been dedicated to specific and limited production. Today, using enhanced pad materials, it has become an efficient and economical process alternative for low and medium volume metal-forming production. The non-linear properties 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. In order to investigate the design parameter, Finite element analysis was carried out for elasto-forming process.

1. 서 론

자동차용 파워 스티어링 모듈(power steering gear sub module)을 개발하는데 있어서 생산성과 제조원가를 줄이기 위한 방법으로 기존 랙 튜브와 랙 하우징, 펠브 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 성형기술이라 할 수 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 고 탄성체 성형(elasto-forming)기술은 고무나 우레탄과 같은 고 탄성력을 이용하여 튜브를 임의의 형상으로 성형하는 방법으로 타 공정에 비해 요구 치수 정밀도와 높은 생산성으로 인해 저 원가, 고 생산성을 필요로 하는 본 연구 대상품의 생산에 최적의 기술로 연구개발의 필요성이 절실하다 하겠다.

고 탄성체 성형기술에 이용되는 탄성체는 제품의 특성에 따라 탄성체 종류를 결정하고 충전제를 비롯한 여러 가지 첨가제를 특정한 비율로 배합한 혼합물 형태로 사용된다. 이때 각 재료를 선택하는 가장 중요한 것은 사용되는 제품의 용도와 사용조건에 따른 요구 물성과 특성을 만족할 수 있어야 한다.¹⁾ 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 구성 성분이 너무 많아 다양한 실

† 정회원, 한국기계연구원
E-mail : cswoo@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7882 FAX : (042)868-7884

* 한국기계연구원
** 한국생산기술연구원

험을 통해서만 가능하기 때문에 국내의 영세한 탄성체 제작업체가 정확한 물성과 특성을 파악하는 것은 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 고 탄성체 성형에 적합한 우레탄 고무에 대한 물성시험을 수행하여 특성을 평가하였으며 시험으로 얻어진 응력-변형률을 이용하여 비선형 재료상수를 결정하여 성형해석에 필요한 물성 데이터를 확보하여 튜브 축관을 위한 고 탄성체 성형공정에 활용하였다. 또한, 우레탄 고무의 두께 결정 및 하중을 고려한 공정설계를 위해 성형해석을 수행하였다.

2. 우레탄 고무 물성평가

2.1 고 탄성체 성형

고 탄성체 성형은 Fig. 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 반면에 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, 마모저항이 높고 고강도, 고경도와 탁월한 내마모성으로 피로수명이 좋은 우레탄 고무를 고 탄성체 성형에 사용될 소재로 선정하였다. 우레탄 고무는 제조과정에서 배합성분 및 함량조건이 다양하고 재현성을 확보하지 못하기 때문에 아직까지 표준화된 물성이 자리 잡지 못하고 있다. 소재의 물성을 구하기 위해 먼저 시험에 적절한 시편을 제작한 후 경도를 측정하여 시편간의 오차가 최소화 되도록 한 다음에 시험 온도와 시험 속도 등 시험조건을 설정하여 단축인장과 이축인장시험 및 노화시험을 통해 얻어진 데이터를 분석하여 물성을 파악하였으며 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수를 결정하여 성형해석에 활용하였다.

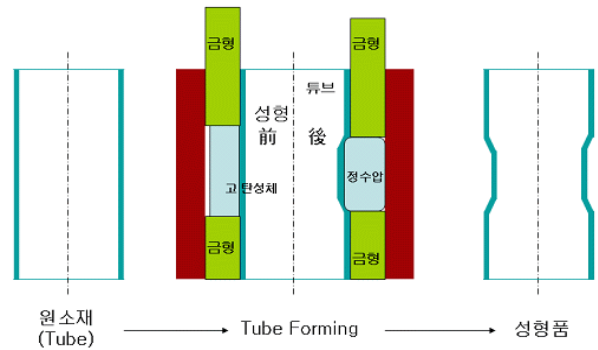


Fig. 1 Schematic of elasto-forming

2.2 우레탄 고무 물성시험

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(shore) 경도와 국제 표준 경도인 마이크로 경도(International Rubber Hardness Degree)가 있다. 쇼어 경도계는 측정 및 휴대가 편리하기 때문에 많이 사용되지만 측정자 간의 편차가 있어 정확한 경도 측정에 한계가 있고, 마이크로 경도기는 정밀한 경도 측정이 가능하나 측정할 수 있는 형상 및 크기에 제약이 따른다. 국내 대부분의 소재업체에서는 쇼어 경도를 사용하고 있기 때문에 본 연구에서는 시편 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 1에서와 같이 국내에서 제작된 우레탄 고무와 수입 우레탄에 대한 경도는 90이상의 높은 경도로 비슷하게 나타났으며 쇼어 경도와 마이크로 경도로 측정된 값은 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

물성시험은 환경 챔버와 레이저 익스텐서메타(laser extensometer)로 구성된 영국 테스트메트릭(testometric)사의 500N 인장시험기를 이용하여 100mm/min의 속도로 시험하였으며 그립 부분에 물려있는 시편이 변형의 진행에 따라 약간씩 빠져나오는 현상을 방지하기 위해 롤러 그립을 사

용하여 고정하여 인장강도와 신율을 측정하여 기계적 물성을 비교, 검토하였다.^{2,3)}

Fig. 2에서 보는 바와 같이 수입 우레탄 고무의 인장강도와 신율이 국내 우레탄보다 약 2배 이상 높게 나타나 수입 우레탄 소재가 국내 소재보다 기계적 특성이 우수함을 알 수 있었다.

탄성체 재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이고 대 변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초 탄성 특성을 보이며 하중을 가하였다가 하중을 제거하면 하중을 가할 때와는 다른 곡선을 나타내는데 이 곡선을 히스테리시스라 하며 이 면적은 소비된 일의 양, 즉 내부에 열로 축적된 일의 양에 대응하고 발열, 영구 늘음, 피로 등의 원인이 되므로 바람직하지 못한 성질이다. 또한, 시간에 따라 재료의 물성치가 변하는 점탄성 특성을 나타내는 등 매우 난해한 거동을 보인다. 이러한 성질을 나타내는 것이 저장 탄성계수와 손실계수로 표현되는 특성은 점탄성 재료의 특성을 나타내는 중요한 인자라 할 수 있다.

Table 1 Hardness of urethane rubber

No.	Domestic		Import	
	Shore	IRHD	Shore	IRHD
1	89	91	90	92
2	88	90	90	92
3	91	93	91	93
4	92	94	90	92
5	90	92	89	91
mean	90	92	90	92

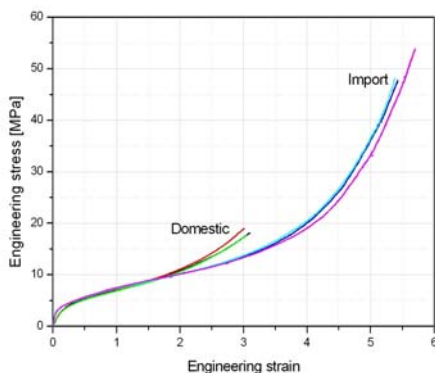
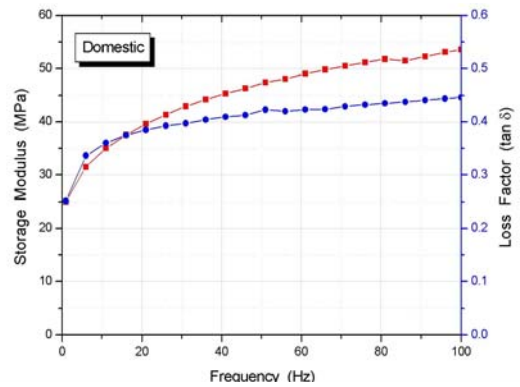


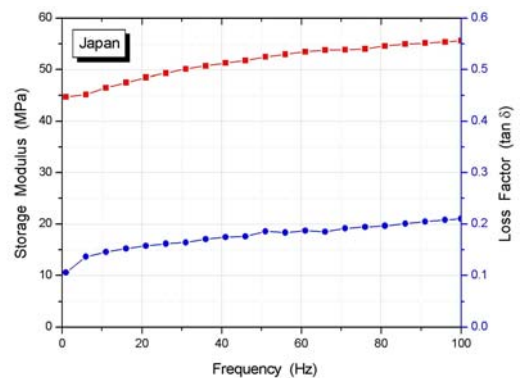
Fig. 2 Mechanical properties of urethane rubber

정현과 진동에 의한 탄성체의 동적 성질인 저장 탄성계수 및 손실계수를 파악하기 위하여 동 특성시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시험편은 10mm x 1mm의 사각시험편(strip)으로 제작하였다. 시험조건은 주파수 변화에 따른 특성을 파악하기 위해 1~100 Hz 영역에서 시험을 하였으며, 변형률 변화는 정적 변형률은 5%로 하고 동적 변형률은 0.1%로 하여 노화 조건에 따른 동 특성을 파악하였으며 탄성체 소재의 전이온도를 파악하기 위해 -100°C~+100°C의 온도영역에서 시험을 수행하였다.

Fig. 3은 우레탄 고무에 대한 동 특성시험 결과를 나타낸 것으로 주파수 변화에 따른 국내 소재의 저장 탄성계수는 25~55 MPa, 수입 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 특성이 우수함을 알 수 있었다.



(a) Domestic



(b) Import

Fig. 3 Dynamic properties of urethane rubber

2.3 비선형 재료상수

탄성체는 변형을 받으면 초기 상태의 분자 구조가 수정 및 재배치로 인하여 강성이 낮아지고 댐핑 특성이 변하게 된다. 이러한 응력-변형률 완화 현상을 Mullins 효과라고 한다.⁴⁾

특히 경도가 높은 재료일수록 두드러지게 나타나는데 충전제인 카본 블랙 양의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 강성은 경로에 종속적인 관계를 보인다. 이러한 특성으로 탄성체는 부하 (loading)와 제하(unloading) 시의 응력-변형률 곡선이 다르며, 초기의 응력-변형률 곡선을 다시 반복하지 않고 동일 변형률 구간에서 대략 3~10 회 정도의 반복하중을 받아야 곡선이 안정화된다. 그리고 재료가 이전에 받았던 변형률 보다 더 큰 수준의 변형률을 받으면 응력-변형률 곡선은 다시 변하게 되므로 변형률 변화에 따른 물성을 파악하기 위한 시험을 수행하였다.

Fig. 4는 국내 우레탄 고무에 대해 변형률 범위에 따른 단축인장, 이축인장시험 결과를 나타낸 것으로 변형률 범위가 클수록 강성이 감소함을 알 수 있었다. 즉 이전의 변형률 수준보다 더 많은 변형률을 받으면 강성이 감소하는 경향이 있었다. 따라서 탄성체 부품의 유한요소 해석에 필요한 물성을 얻기 위해서는 실제 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 Table 2와 3에서와 같이 변형률 범위에 따른 비선형 재료상수 값을 무니-리블린(Mooney-Rivlin)과 오그덴(Ogden) 3항의 함수로 결정하였다.⁵⁾

Table에서 보는 바와 같이 변형률이 클수록 강성(G)이 낮아졌으며 무니-리블린 함수와 오그덴 함수로 구한 재료상수 값들이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

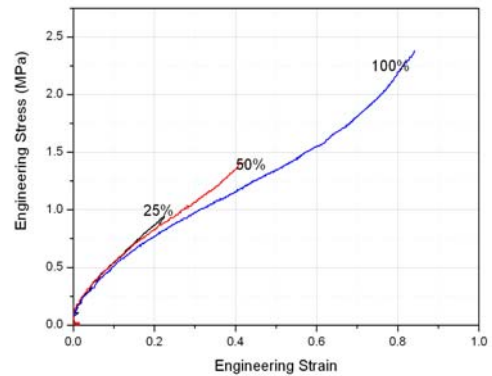
물성시험을 통해 구해진 비선형 재료상수 값들은 성형해석에 필요한 물성 데이터로 활용하였다.

Table 2 Material coefficient(Mooney-Rivlin)

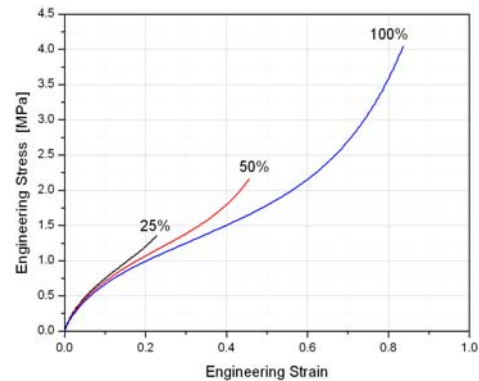
Material	strain(%)	C ₁₀	C ₀₁	G
Domestic	25	3.343	0	6.686
	50	2.139	0	4.278
	100	1.712	0	3.424

Table 3 Material coefficient(Ogden)

Strain (%)	μ ₁	α ₁	μ ₂	α ₂	μ ₃	α ₃	G
25	1.8e-5	1.066	1.976	7.067	1.4e-4	2.694	6.982
50	12.39	1.9e-6	15.06	2.8e-7	1.788	4.989	4.462
10	1.980	3.506	21.99	3.2e-7	8.3e-7	0.602	3.472



(a) Uniaxial tension test



(b) Equi-biaxial tension test

Fig. 4 Stress-strain curve of urethane rubber

3. 탄소성 유한요소 해석

3.1 유한요소 모형

고 탄성체를 이용한 튜브의 축관 성형은 Fig. 5에서와 같이 금형과 펀치 그리고 맨드렐의 금형 시스템과 고 탄성체인 우레탄을 이용하여 성형하게 된다. 튜브 축관을 위한 탄소성 유한요소 모델은 축대칭을 이용하였으며 튜브는 탄성체, 우레탄 고무는 물성시험을 통해 얻어진 재료상수 값을 이용한 초탄성체 그리고 금형과 펀치, 만드렐은 강체로 가정하였고 접촉부위는 만드렐과 소재, 펀치와 소재, 금형과 소재, 고 탄성체와 펀치, 고 탄성체와 금형, 고 탄성체와 맨드렐은 강체와 소재사이에 있어서 접촉 처리를 하였으며 고 탄성체와 소재는 변형이 가능한 매체간의 접촉 처리하였다.

초기 튜브는 외경 44.5mm, 내경 41.2mm, 두께 2.5mm를 가지고 있으며 우레탄 고무의 두께 결정 및 하중을 고려한 공정설계를 위해 해석을 수행하였다.

3.2 유한요소 해석

튜브축관 성형 시 고려해야 할 첫 번째는 우레탄 고무의 두께에 따른 성형성을 검토하는 것이다. 우레탄 고무의 두께에 따라 펀치가 움직이는 거리가 결정되는데 이는 우레탄 고무의 수명과 연관이 있다. 수집에서 수만 번 성형이 진행되는 동안 우레탄 고무가 지속적인 탄성체로서 기능을 가지는 것은 매우 중요하다.

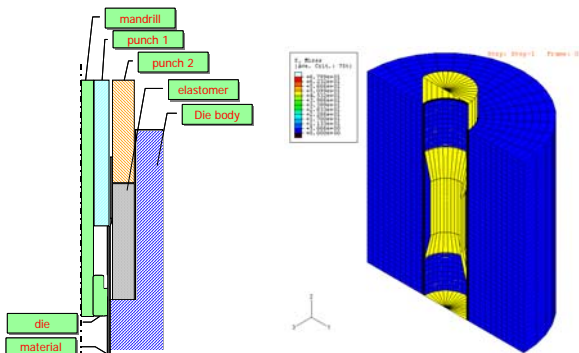


Fig. 5 Modeling of finite element analysis

Table 4에 우레탄 고무 두께변화에 따른 요구되는 펀치거리와 해석 후 펀치거리를 비교 한 것으로 해석과 이론 결과가 거의 일치하여 해석에 대한 검증을 하였다.

Fig. 6과 7은 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 일으키기 위하여 하중이 상승하다가 펀치의 변위가 약 20% 정도에서 변형된 튜브를 성형하면서 완만히 하중이 증가한다. 그리고 펀치의 변위가 약 90% 정도에 이르렀을 때 튜브의 코너부를 성형과정에서 하중이 급격히 상승하여 두께가 25mm일 경우 약 400톤 정도의 하중이 필요함을 알 수 있었다. 이는 튜브의 코너부위를 완전히 채우지 않았을 때의 하중으로 코너부를 고려하였을 경우 하중은 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.

Table 4 Punch stroke for urethane thickness

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

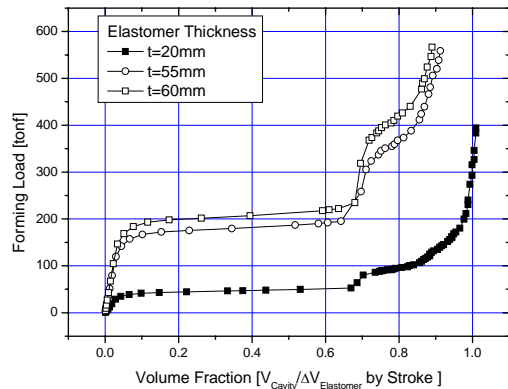


Fig. 6 Forming load for various thickness

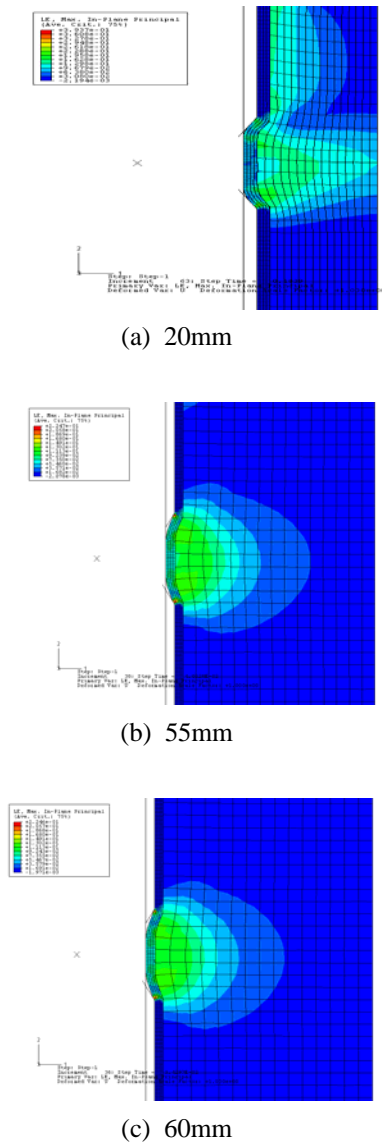


Fig. 7 Deformed shape for various thickness

4. 결론

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

(1) 고 탄성체 성형에 사용될 우레탄 고무의 경도는 90이상으로 높게 측정되었으며, 수입 우레탄 고무의 인장강도와 신율이 국내 우레탄보다 약 2배 이상 높게 나타나 기계적 특성이 우수함을 알 수 있었다.

- (2) 우레탄 고무에 대한 동특성시험 결과, 국내 소재의 저장 탄성계수는 25~55 MPa, 수입 소재는 45~55 MPa로 저장 탄성계수의 변화가 작았으며, 손실계수는 국내 소재는 0.25~0.45, 수입 소재는 0.1~0.2로 수입 우레탄 소재의 동적 특성이 우수함을 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 성형해석의 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 지역산업기술개발사업 결과의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Treloar, L. R. G, 1975, "The Physics of Rubber Elasticity," Clarendon press, Oxford 3th Edition.
- (2) Brown, R. P., 1996, "Physical Testing of Rubber," Chapman & Hall 3th Edition.
- (3) Kim, W. D., Woo, C. S., 2003, "A Study on the Equi-biaxial Tension Test of Rubber Material", Trans. of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp. 95-104.
- (4) Mullins, L., 1969, "Softening of Rubber by Deformation," *Rubber Chem. & Tech.*, Vol. 42, pp. 339-362.
- (5) Ogden, R. W., 1972, "Large Deformation of Isotropic Elasticity: on the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubber like Solids," *Proc. of the Royal Society(A)*, Vol. 326, pp. 565-584.