

Nitrile Butadiene Rubber의 비선형성에 대한 실험적 연구

유 명 호^{†, **} · 이 택 성* · 도 제 성** · 권 증 호***

** (주)에스제이테크 R&D센터,

*한국산업기술대학교 기계설계공학과, ***신흥대학 자동차학과
(2007년 6월 19일 접수, 2007년 9월 6일 수정 및 채택)

Experimental Investigation on the Non-linearity of Nitrile Butadiene Rubber

Myung-Ho Yoo^{†, **}, Taek-Sung Lee*, Je-Sung Do**, and Jong-Ho Kwon***

**Research Center of SJ Tech Co Ltd

*Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic University

***Department of Automotive Engineering, Shin Heung College

(Received June 19, 2007, Revised & Accepted September 6, 2007)

요 약 : 산업기계에서 공기압 또는 유압용 액추에이터(actuator)가 넓이 사용되는데 액추에이터의 중요 부품으로 탄성중합체로 만들어진 시일을 사용한다. 우수한 밀봉특성을 요구하는 시일의 재료로 내유성과 내마모성이 비교적 우수한 NBR(nitrile butadiene rubber) 재료가 가장 많이 사용한다. 산업기계의 액추에이터는 적용환경에 따라 낮거나 혹은 높은 온도에서 사용되는데 여러 온도에서 NBR은 그에 따른 특성이 다르게 나타난다. 본 연구에서는 새롭게 만들어지고 있는 재료 중 공기압, 유압용 시일(Seal)재료로 사용하는 Hs70, 80, 90등 3종의 NBR을 각각 -10℃, 20℃, 80℃, 100℃온도에서 소재의 비선형(nonlinear) 특성의 시험과 유한요소해석에 필요한 재료상수를 알아보고 각각의 온도에서 하중 반복조건에 따른 소성변형 경향을 살펴보았다.

ABSTRACT : Hydraulic actuators are used widely for industrial machinery. The seal made from elastomer is used as a core part of the actuator, NBR (nitrile butadiene rubber) materials with high quality of oil resistance and abrasion resistance is used widely, requiring excellent characteristic of sealing. According to applied circumstances, the actuators for industrial machinery are used under different temperature situations. In this study, three different kinds of NBR, which is Hs70, 80, 90 are determined as one of hydraulic materials. An experimental investigation is performed to confirm the non-linearity under different temperature (-10℃, 20℃, 80℃ 100℃) situation, material constants for finite element analysis and plastic deformation in accordance with Load-unload

Keywords : NBR(nitrile butadiene rubber), Seal, Non-linearity, Temperature effect, Uniaxial tension test, Biaxial tension test

[†] 대표저자(e-mail : skillman@sjseal.com)

I. 서 론

산업계 전반에 걸쳐 생산설비 및 장비의 내구성과 신뢰성을 높여 생산성 향상과 품질경쟁력을 확보하기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 큰 힘을 필요로 하는 산업설비나 건설 중장비 등에 사용되는 유압액추에이터의 성능은 압력의 전달과 밀봉의 역할을 하는 시일(seal)에 의해서 좌우된다. 유압액추에이터의 성능은 시일의 성능을 얼마나 우수하게 확보하느냐에 달려있기 때문에 시일에 대한 연구의 중요성은 계속하여 증가되고 있다.

화학적 소재기술의 발전으로 시일재료인 탄성중합체(elastomer)도 다양화 되고 그 특성도 크게 발전하고 있으며, 선진국에서는 일찍부터 소재 및 제조기술에 관한 연구가 이루어지고 있어 국내와의 기술격차가 크다고 할 수 있다. 국내에서는 최근에야 정부출연 연구소나 대학을 중심으로 연구가 진행되고 있으며, 아직은 기초적인 시험데이터의 확보나 해석 방법의 체계 확립에 주력하고 있고 최근에 김완두 등^{1,2}이 천연가황고무의 물리적 시험법 및 부품 설계나 유한요소해석에 적용할 수 있는 고무재료의 기초적인 시험데이터 추출기술 등을 제시하였다. 국외의 연구동향을 살펴보면, Nikas와 Sayles³가 극한 온도환경과 고압 상태의 사각시일(rectangular seal)에 관하여 연구하였으며, Mokhtar⁴는 회전체의 축(shaft)이 어긋난 상태에서 스프링이 없는 U자형 시일에 관하여 연구하였다.

본 연구에서는 유압용 시일 재료 중 내유성과 기계적 성질이 우수하여 시일의 재료로 사용되고 있는 NBR(nitrile butadiene rubber)에 대하여 각기 다른 배합으로 제조한 합성고무의 경도변화와 온도변화에 따른 비선형 특성을 파악하기 위한 시험을 통해 재료상수를 결정하는 과정을 제시하였으며, 이는 시일의 거동과 응력변화에 대한 특성해석에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

II. 시험재료 및 실험절차

1. NBR의 배합

시일의 재료로 사용하는 고무는 일반적인 재료와 달리 하중과 변형의 관계에서 저 하중에서도 비선형성을 보이고 대 변형에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성 특성을 가지고 있으며, 분자 구조는 길고 유동적인 마치 실이 마구 뒤엉킨 것과 같은 형태로 구성되어 있고 이러한 상태의 분자들에 외부에서 하중가감을 반복하면 분자들의 범위만큼 형태가 변형 되었다가 다시 회복된다. 이 특성은 고무배합이라는 공정을 통해서 조절할 수 있는데, 고무에 첨가제로 보강제, 가황제, 노화방지제, 가공조제 등의 화학약품을 사용하여 가황(vulcanization), 가교(crosslinking) 등을 통한 일종의 화학적 접촉효과로 고무 고유의 특성을 갖는다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 (주)에스제이테크에서 시일 생산에 적용하는 각각 다른 배합으로 경도 Hs70, 80, 90 등 3종의 NBR을 이용하여 시험편을 제작하였다. NBR

Table 1. Recipes of nitrile butadiene rubber

(unit: phr)

Hs70		Hs80		Hs90	
NBR#207	30	NBR#35H	70	NBR #A1023	100
NBR#302	70	NBR#7150	30	S	0.3
C/B#339	35	C/B#339	35	S/A	3
C/B MT	25	C/B#FEF	40	A/O #RD	2.5
ZnO	5	ZnO	5	A/O #MB	1
S/A	1.5	S/A	1.5	CIR	3
PVI	0	PVI	1	C/B #N330	54
A/O Blu-N	1	A/O Blu-N	1	DOP	5
A/O 3C	1	A/O 3C	1	Silane #1891	1
TP95	5	Antilux#654	1	#TMTD	1.2
DCP 40	4	TP95	5	Acc' CZ	3
Perkadox 14-40	2	S	0.8	#Actor-R	1
TAIC	4	Acc' CZ	3	ZnO	5
—	—	Acc' TT	2.5	—	—
183.5 phr		196.8 phr		180 phr	

은 가공성이 좋고 비교적 우수한 기계적 강도를 갖고 있으며 내유성 합성고무의 대표적인 고무 중 하나이다. 유압유를 사용하는 액추에이터의 시일 재료로 널리 사용되고 있으며, 내한성, 내수성, 내약품성이 다소 떨어지므로 이를 고려하여 사용될 제품에 적용해야 하는 것으로 알려져 있다.⁵ Table 1의 3종 재료는 현 업체에서 생산되는 재질로 공기압 또는 유압용 실린더에 적용되고 있으며 실린더의 필요특성상 비교적 내마모성이 우수하고 압축 영구율이 30 %(100℃x 72Hr) 이하의 특성을 나타내는 소재이다.

2. 실험의 종류

시일의 유압액추에이터 내부에서의 변형 형태는 인장과 압축모드가 동시에 일어나므로 압축시험도 수행하여야 하나 현실적으로 압축시험은 시험편과 압축을 가하는 그립(grip)사이의 표면 마찰에 의해서 정확한 시험결과를 얻지 못하는 문제⁶가 있기 때문에 본 연구에서는 Figure 1과 같은 시험편에 의한 일축인장시험(uniaxial tension test)과 이축인장시험(biaxial tension test)을 실시하였다.

그리고 이축인장시험의 경우는 시험편의 변형 형태가 Figure 2와 같이 압축시의 변형 형태와 유사하므로, 압축 모드에 대한 해석 시 이축인장시험 결과를 적용할 수 있다.

시일이 적용되는 유압액추에이터의 환경을 고려하여 온도의 영향에 따른 NBR의 특성을 파악하기 위하여 Table 2와 같은 시험조건을 설정하였다. 이

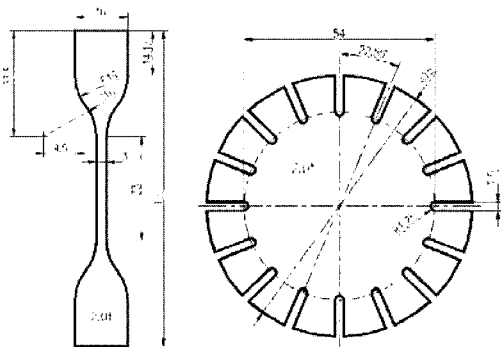


Figure 1. Uniaxial and biaxial tension specimen.

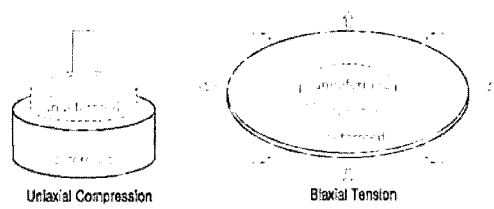


Figure 2. Deformed shape under uniaxial compression and biaxial tension.

Table 2. Testing conditions

Items	Materials	Strain	Temp.
Uniaxial Tension Test	NBR	25%	-10℃
	Hs 70, 80, 90 (Shore A)	50%	20℃
		75%	80℃
Biaxial Tension Test	NBR	25%	100℃
	Hs 70, 80, 90 (Shore A)	50%	20℃
		75%	

축인장시험은 실험장비에 온도조절 챔버(chamber)가 부착되어 있지 않아 상온에서만 실험하였다.

2. 실험 장치

Figure 3은 챔버(chamber)가 부착되어 시험편의 온도조절이 가능하고 챔버 내부 시험편의 변위를 측정하는 레이저 익스텐소메터를 가진 일축인장시험기이며, Figure 4는 16개 그립(grip)을 장착하고 상부에서 시험편의 변위를 측정하는 이축인장시험기이다.

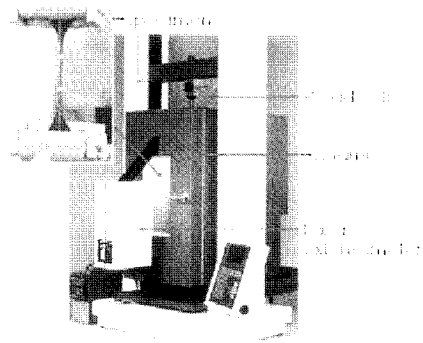


Figure 3. Uniaxial tension test equipment.

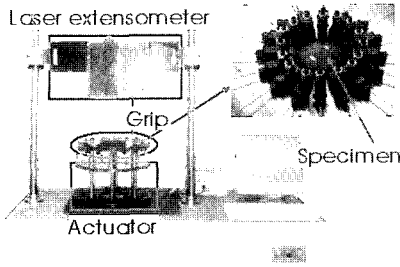


Figure 4. Biaxial tension test equipment.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 온도조건에 따른 일축인장실험

일반적으로 시일이 유압액추에이터 내에서 사용되어질 때 동절기인 경우 외기온도에 영향을 받아 온도가 낮은 상태에 있다가 유압장치의 사용시간이 증가하면서 최대 100℃ 까지 유압유의 온도가 상승된다. 따라서 온도변화에 따른 고무재료의 거동이 어떤 흐름으로 나타나는지를 살펴보기 위한 시험을 수행하였다.

온도변화에 따른 인장실험은 NBR 3종에 대하여 시편의 온도를 가감할 수 있는 Chamber가 부착된 인장 실험 기에서 실시하였으며, Figure 5. (a)는 -10℃, Figure 5.(b)는 20℃, Figure 5(c)은 80℃, Figure

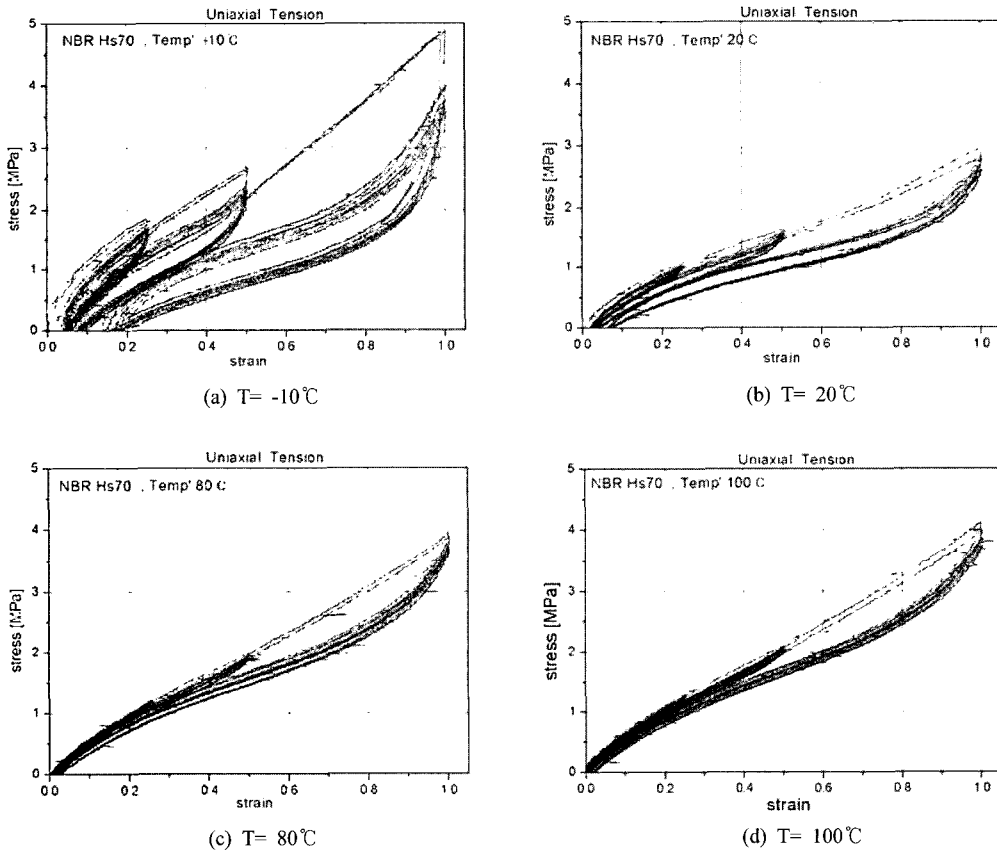


Figure 5. Stress-strain curves according to temperature (uniaxial tension).

5.(d)는 100℃에서 NBR Hs70의 일축인장실험 결과를 나타내고 있다. 실험 결과 그래프에서 확인할 수 있는 바와 같이 응력변화는 상온상태인 20℃을 기준으로 하여 -10℃에서는 응력이 크게 증가하고 하중 반복후의 소성 변형량도 크게 나타나고 있다. 온도가 20℃에서 80℃, 100℃로 높아질수록 상온 상태보다 응력 값도 점점 높아지면서 영구소성 변형량은 오히려 감소하는 특성을 보이고 있다.

이 결과는 고무재료의 화학적인 열 노화 특성을 배제하고 물리적인 특성만을 살펴볼 때, 유압액추에이터의 사용온도 조건은 낮은 온도나 상온보다는 일반적으로 50℃~100℃ 범위에 있기 때문에 오히려 이런 물리적인 현상은 열에 대한 시일의 장점으로 작용될 수도 있을 것으로 생각된다.

2. 이축인장 시험

고무재료는 일정한 변형률 범위 내에서 반복하중을 받았을 때 응력과 변형률이 점차로 낮아지면서 안정화 되는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 Mullins Effect⁵는, Figure 6과 같이 반복하중을 가할 때 1회와 2회시의 응력과 변형의 완화 폭이 가장 크게 나타나고 반복횟수가 늘어날수록 그 차이는 점점 줄면서 고무재료가 안정화 상태로 변화되는 응력완화현상을 나타낸다. Figure 7은 변형률 범위를 25%, 50%, 75%로 달리하여 시험한 결과이며, 변형률 한도를 적게 할수록 강성이 큼을 볼 수 있다.

Figure 8은 변형률 25%, 50%, 75%에서 반복하중

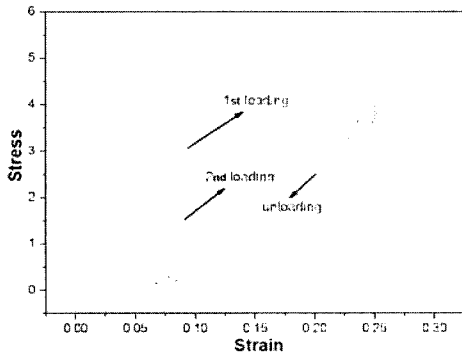


Figure 6. Mullins effect according to loading and unloading.

을 5회씩을 실시하고 가장 안정화된 마지막의 5회째 곡선을 비교한 그래프이다. Figure 9는 고무의 경도(shore A)에 따른 특성을 보여주고 있는데,

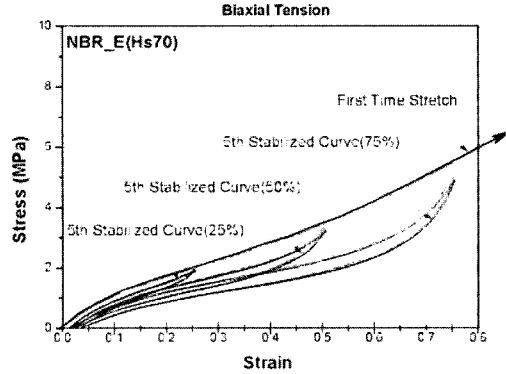


Figure 7. 5 Curves per each strain range.

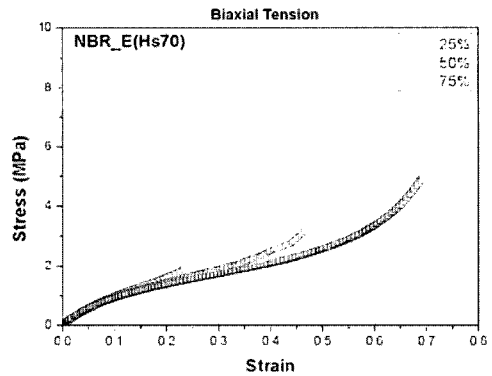


Figure 8. 5th stabilized curves.

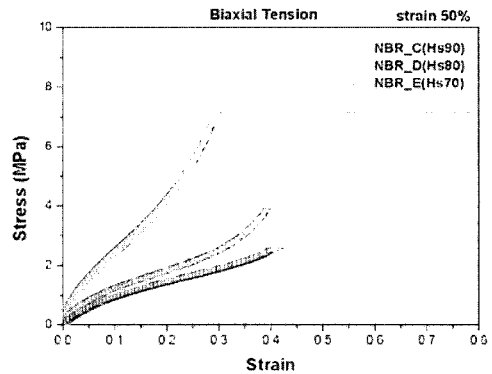
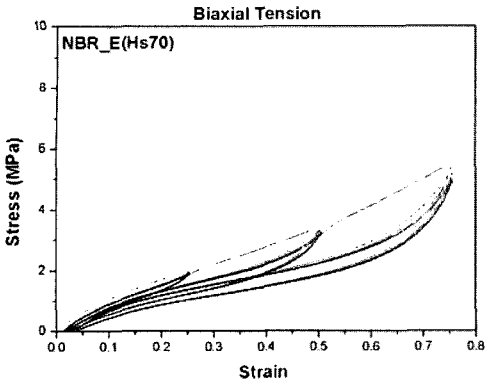
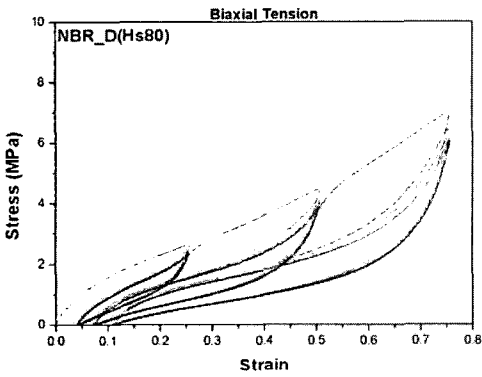


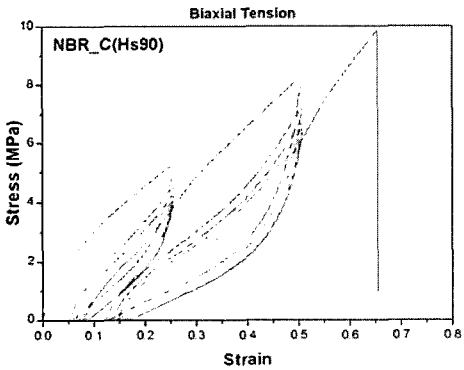
Figure 9. Stress-strain curves according to strain range (biaxial tension, T=20℃).



(a) Hs 70



(b) Hs 80



(c) Hs 90

Figure 10. Stress-strain curves according to hardness and strain range (biaxial tension, $T=20^{\circ}\text{C}$).

Figure 10에 나타난 것과 같이 고무의 경도가 낮을 수록 응력과 영구 소성변형이 작아지고 경도가 높

아질수록 응력과 영구 소성변형이 증가하였다.

3. 재료상수 결정

Figure 11은 25% 변형률 범위 내에서 각각 5회 의 반복하중을 주어 구한 응력-변형률 곡선을 나타 내며, 첫 번째 곡선에 비해 두 번째 곡선이 가장 크게 응력이 감소하고 반복 횟수에 따라 응력-변형 률 곡선은 낮아지면서 반복 횟수가 늘어날수록 곡 선은 점차 안정됨을 볼 수 있다. 안정화된 데이 터를 고무재료의 최종적인 물성 값으로 사용하기 위 하여 Figure 11의 시험결과에서 마지막 5번째 횟수 의 응력-변형률 곡선을 선택하면 Figure 12의 5th stabilized raw data와 같고, 이러한 곡선을 소성변형 으로서 인한 단면적의 변화를 고려하지 않고 원점으 로 단순 이동시키면 simple shift의 곡선과 같은 응

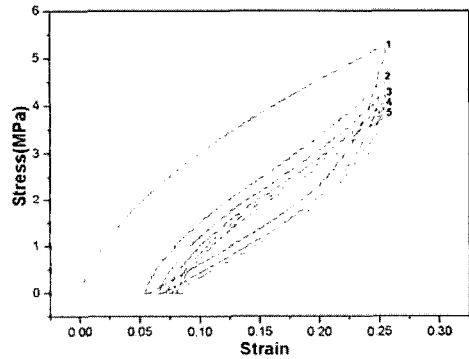


Figure 11. Stress-strain curve, raw data.

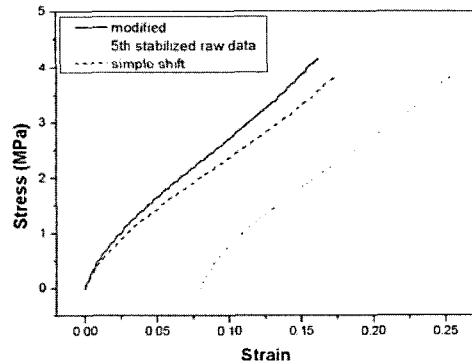


Figure 12. Modified tension curve.

력-변형을 곡선이 된다. modified curve는 영구변형으로 인한 단면적을 고려하여 구한 응력-변형을 곡선이다.

재료상수는 Figure 12의 응력-변형률 데이터를 이용하여 최소자승법(least square method)으로 구할 수 있으며, 본 연구에서는 MARC mentat를 이용하

여 일축인장시험과 이축인장시험에 대하여 각각 Table 2와 Table 3과 같이 결정하였다.⁶

Figure 13과 Figure 14는 Table 2의 일축인장시험에서 추출한 상수를 이용한 응력-변형률 선도를 실험데이터와 비교한 것으로 Ogden과 Mooney-Rivlin 근사곡선 모두 높은 일치성을 보여주고 있으며,

Table 2. Material constants (uniaxial tension, NBR90, 25%, 20°C)

Ogden			Mooney-Rivlin	
terms	μ (MPa)	α	MPa	
1	-40.3626	1.1544	C10	-34.4365
2	-4.0231	-12.8917	C01	39.9274
3	41.1158	0.4185	C11	24.5566

Table 3. Material constants (biaxial tension, NBR90, 25%, 20°C)

Ogden			Mooney-Rivlin	
terms	μ (MPa)	α	MPa	
1	-1.6013	-5.5601	C10	27.3624
2	0.8690	-25.3532	C01	-22.3222
3	0.8567	50.7911	C11	9.5926

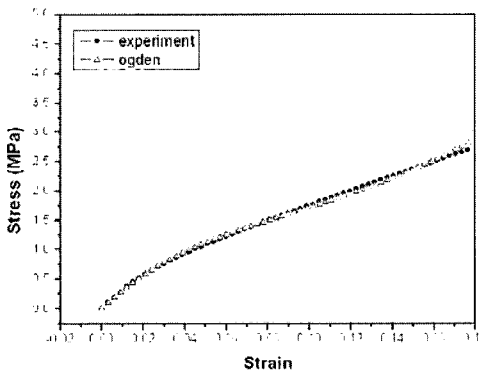


Figure 13. Comparison: Experiment curve and ogden curve (uniaxial tension, T=20°C).

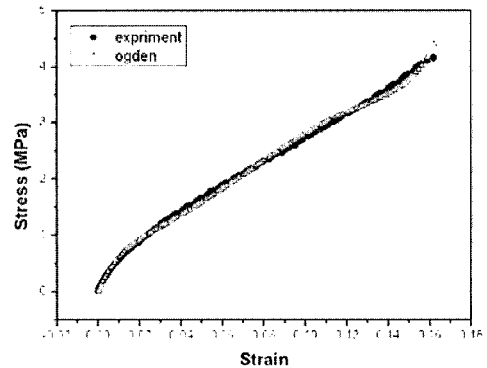


Figure 15. Comparison: Experiment curve and ogden curve (biaxial tension, T=20°C).

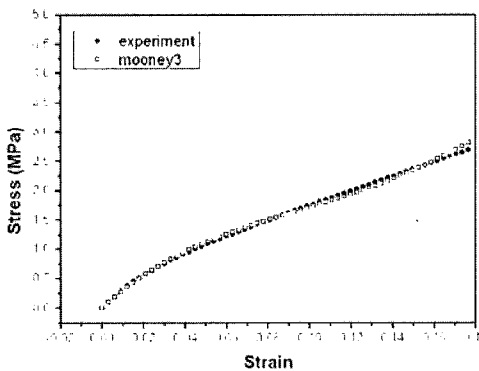


Figure 14. Comparison: Experiment curve and mooney3 curve (uniaxial tension, T=20°C).

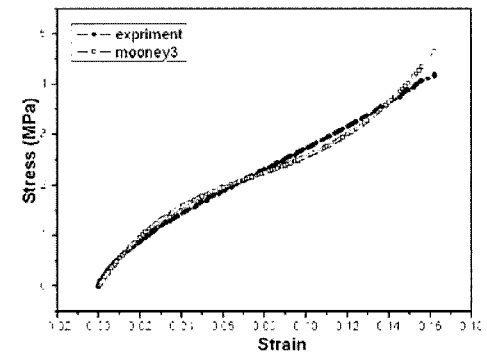


Figure 16. Comparison: Experiment curve and mooney3 curve (biaxial tension, T=20°C).

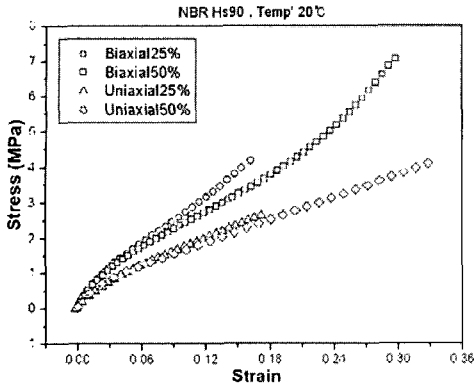


Figure 17. Modified tension curve (T=20°C).

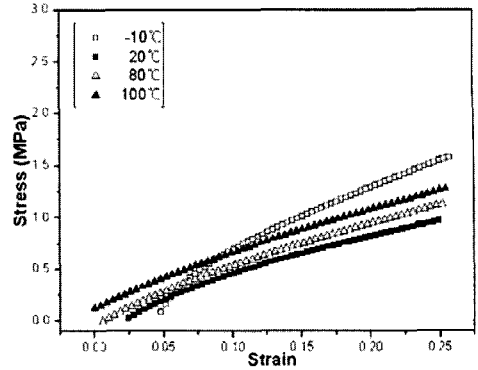
Figure 15와과 Figure 16은 Table 3의 이축인장시험에서 구한 상수를 이용한 결과를 실험데이터와 비교한 것으로 Ogden 근사곡선이 Mooney-Rivlin 근사곡선보다 높은 일치성을 보였다.

Figure 17은 이축과 일축인장시험의 25%, 50% 변형시의 5회차 곡선으로 시험편의 소성변형에 따른 단면적 변화를 고려하여 표시한 그래프이다. 동일한 경도의 소재임에도 불구하고 변형량 범위와 시험방법에 따라 서로 다른 값을 나타내고 있기 때문에 고무제품 적용의 정확한 예측이 필요한 경우 일축과 이축의 변형모드와 변형량을 충분히 고려하여야 함을 알 수 있다.

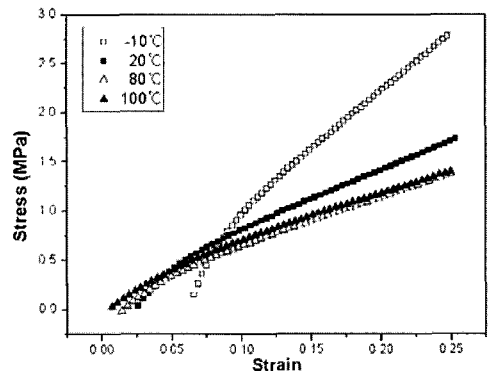
4. 온도와 경도의 영향

Figure 18은 일축인장시험의 결과에 따른 온도와 경도의 변화에 대한 응력-변형률 선도의 차이를 보여주고 있다.

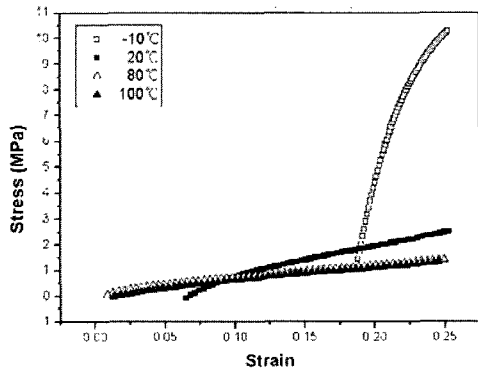
Figure 18은 고무경도별 각각의 온도에서 25% 변위의 반복하중을 가하여 안정화된 마지막 5회의 응력-변형률 곡선을 나타내며, 같은 온도 조건에서는 경도가 클수록 응력이 증가하며 온도가 낮아질수록 급격한 응력 상승이 나타나고 있다. 상온을 기준으로 높은 온도에서는 Figure 18의 Hs70 경도에서만 응력이 크게 나타나고 이보다 높은 경도인 Hs80과 Hs90은 그와 반대로 상온보다 낮은 응력을 나타내고 있다. 또한 온도가 낮고 경도가 클수록 응력은 급격히 상승하고 소성 변형량도 크게 증가하는 특성을 보이고 있다. 이러한 현상으로 볼 때



(a) Hs 70



(b) Hs 80



(c) Hs 90

Figure 18. 5th stabilized stress-strain raw data curves (uniaxial tension).

낮은 온도에서 사용되는 시일인 경우 소성 변형량이 적고 변위에 따른 회복 특성이 우수한 낮은 경

도(Hs70)의 재료가 높은 경도(Hs80, 90)의 재료보다 좀 더 시일에 적합함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 유압액추에이터용 시일 재료인 NBR에 대한 일축 및 이축인장시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. NBR은 재료에 가하는 최대변형률 25%, 50%, 75%에서 각각 하중-변형곡선이 크게 달라진다.
2. 온도가 낮고(-10℃) 경도가(Hs90) 높을수록 응력은 상승하고 영구소성 변형량도 증가한다.(Figure 18)
3. 상온 이상의 고온에서는 이와 반대로 영구소성 변형량이 적어져서 탄성회복 특성이 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Kim, W. D., Kim, W. S., Woo, C. S., and Lee, H.

- J., "Experimental Testing of Rubber Material for Finite Element Analysis," Proceedings of KSME Spring Conference, Vol. 1, No. 1, 2001.
2. Kim, W. D., Kim, W. S., and Kim, C. H., "Determination of Rubber Material Model and the Deformation Behaviors of Rubber Component Considering Mullins Effect," KIMM Research Report-UCN236-712.M, 1999.
3. Nikas, G. K. and Sayles, R. S., "Nonlinear Elasticity of Rectangular Elastomeric Seals and Its Effect on Elastomer Hydrodynamic Numerical Analysis", *Tribology Int.*, **37**, pp.651-660 (2004).
4. Mokhtar, M. O. A., Mohamed, M. A. A., El-Giddawy, M. E., and Yassaen, S. A. Y., "On the Effect of Misalignment on the Performance of U-type Lip Seal", *Wear*, **223**, pp.139-142 (1998).
5. Alan N. Gent, "Engineering with Rubber" Oxford University Press, New York, 1992.
6. MSC. Marc, "Experimental Elastomer Analysis" MSC. Software Corporation, 2003.