

자동차 파워스티어링 호스의 열내압 특성 유한요소해석

노기태* · 전도형* · 최주형* · 조진래†

Heat-Pressure Characterization of Power Steering Hose by Finite Element Analysis

Gi-Tae Roh, Do-Hyung Joen, Ju-Hyung Choi and Jin-Rae Cho

Key Words: Power Steering Hose(파워스티어링 호스), Heat and Pressure Analysis(열내압 해석), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

Abstract

Power steering hose is device that operation oil passes between steering gear box and oil pump by parts that is used to do steering system. Because this hose is receiving heat and pressure of high temperature, leakage can produce swaging from hitch of steel materials of done part. In this paper, we analyze swaging process of Power steering hose by finite element analysis, and achieved thermal and pressure analysis with this shape. We can analogize weakness part of hose through this result, and examine closely oil leakage and rubber failure mechanism and look for important design benevolence of power steering hose development.

기호설명

W : 변형률 에너지

I_1 : Cauchy-Green 변형률 1차 불변량

I_2 : Cauchy-Green 변형률 2차 불변량

$C_{10} \sim C_{30}$: Mooney-Rivlin 상수

1. 서 론

자동차에서 동력조향 장치는 운전자의 조향을 손쉽게하여 운전자의 피로를 감소시키고 안전을

증대 시켜주는 중요한 역할을 한다. 이 동력 조향장치의 주요 구성 부품으로는 유압펌프와 조향 기어박스가 있는데 파워스티어링 호스는 엔진룸 내부에서 이 두 부품을 연결하는데 사용된다.

따라서, 파워스티어링 호스는 엔진룸 내부의 고온의 열하중과 호스 내부의 오일에 의한 높은 압력과 열내압 하중을 받게 된다. 뿐만 아니라 호스의 양쪽 끝은 강재를 사용하여 자동차의 엔진과 차체에 마운트되어 있는 금속 파이프와 연결되어 있으므로, 가혹한 운전 상태가 계속되는 경우에는 고압 호스와 강재의 연결부에서 누유 등으로 인하여 자동차 기관의 성능에 악영향을 미칠 수 있는 현상이 발생할 수 있다.

그러므로 어떠한 운전 조건 하에서도 파워스티어링 호스가 제 기능을 다하기 위해서는 강재와 호스의 체결 부위에 대한 기계적 거동 해석이 선행되어 예상되는 역효과에 대한 방지책을 마련하는 것이 필요하다. 또한 관련된 설계 기술은 선진국에 계속 의존할 수는 없는 실정으므로, 국내

† 부산대학교 기계설계공학과

E-mail : jrcho@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

* 부산대학교 기계설계공학과 대학원

의 독자적인 설계 기술의 확보와 지속적인 제품의 성능 향상을 위해서는 실험 및 수치해석적 방법을 통해 강재와 고압호스 조립부의 거동에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.⁽¹⁾⁽²⁾

본 연구에서는 swagging 후의 형상에 대해서 내압해석을 수행하여 호스 내부에 저압 및 고압이 작용 할 때의 성능에 대해 알아볼 것이다. 호스 내압 해석을 통해 호스 내부에 압력 유동이 발생할 경우 호스의 취약 부분을 유추할 수 있을 것이며 더 나아가서 오일 누유 메커니즘 및 고무 파단 메커니즘 개발의 중요한 설계인자를 도출하는 과정을 기술 할 것이다.

2. 해석 모델 및 해석 조건

2.1 해석에 사용된 물성치

파워스티어링 호스는 축대칭 형상이므로 본 연구에서는 모델을 축대칭 2차원 형상으로 모델링 하였다.

Fig.1에서 호스는 3개의 고무층으로 이루어져 있고 각 층 사이에 나일론66 재질의 편조사가 층을 이루고 있다. 여기에 사용된 고무는 CSM 유형의 고무가 사용되고 있으며, 인장 압축 실험을 통해 얻어진 자료를 바탕으로 비선형 해석 프로그램인 MSC. MARC에서 Mooney-Rivlin 3차 모델인 James-Green-Simpson 모델⁽³⁾을 사용하여 계수를 구하였고⁽⁴⁾, 구해진 각 계수를 Table. 1에 나타내었다.

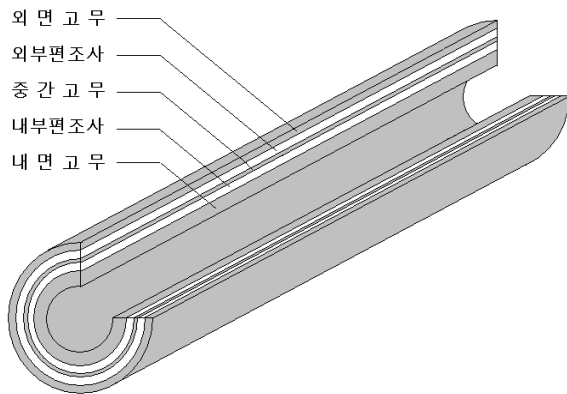


Fig.1 고무 호스의 구조

Table 1 Mooney-Rivlin 3order model coefficient

구분	외면고무	중간고무	내면고무
C10	0.0912546	0.140545	0.183349
C01	-0.0275933	-0.0253705	-0.0828816
C11	0.00206454	-0.0120723	0.0112814
C20	0.00276919	0.00921276	0.00870769
C30	-7.32276e-5	-0.000145663	-0.000406127

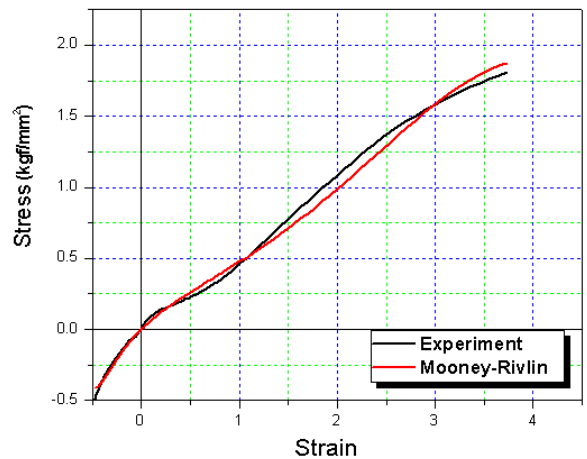


Fig.2 compare 3order Mooney-Rivlin model with experiment data of outer rubber

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

Fig.2에서 실제 실험 자료와 James-Green-Simpson 모델인 식(1)에 의해 구해진 Mooney-Rivlin 3차 모델을 비교해 보았다. 그결과 전 구간에 걸쳐 실제 거동과 매우 유사한 형태로 나타남을 볼 수 있다. 호스와 결합되는 강재는 SWRCH10A와 S15C를 사용되었고 각각 sleeve와 nipple에 사용되었다.

2.2 해석 형상 및 경계조건

파워스티어링 호스는 고무 호스와 강재로 되어 있는 sleeve와 nipple로 결합되어 있는데, swaging 과정을 통하여 jaw에 의해 결합된다. 본 연구에서는 이러한 결합을 끝낸 후 형상 자료를 바탕으로 내압해석과 열해석을 수행한다.

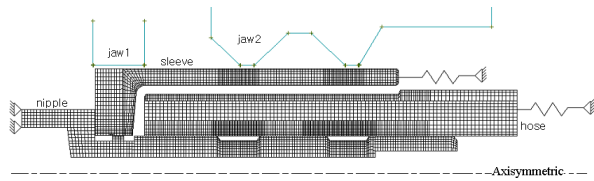


Fig. 3 Finite Element model

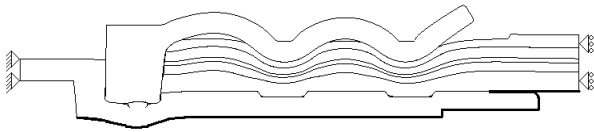


Fig.4 pressure position at hose

Fig.3에서 보는 것과 같이 경계조건은 nipple의 좌측단은 변위가 고정되어 있으며, sleeve와 nipple은 우측 끝단을 spring을 사용하여 실제 공정 과정과 유사한 변위경계조건을 부여하였다. sleeve와 nipple 그리고 고무를 결합시키는 jaw의 제어는 75mm/s의 속도로서 제어 하였다. 내압해석과 열해석 에서의 변위경계 조건은 swaging 과정과 동일하며, 내압 작용지점은 Fig.4에서와 같이 굵은 선으로 표시 된 곳에 내압을 작용시키게 되는데 각각 10bar와 140bar의 압력을 가하게 된다. 열해석의 경우 내부에 작동유가 흘러 nipple과 내면고무가 맞닿는곳에서 대류가 발생하며, 호스의 외부 또한 대기와 맞닿는 면에서 대류가 발생하게 된다.

3. Swaging 해석

3.1 Swaging 해석 결과

swaging 과정은 Fig.3에서 나타낸 것과 같이 jaw1으로 nipple과 sleeve를 결합시키고 jaw2로 강재와 호스를 결합하게 된다. 호스의 변형률은 jaw와 직접 접촉하고 있는 sleeve의 아래 중앙 부분에서 높은 변형률이 발생하고 있다.

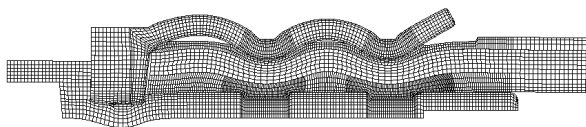


Fig.5 shape of hose after swaging

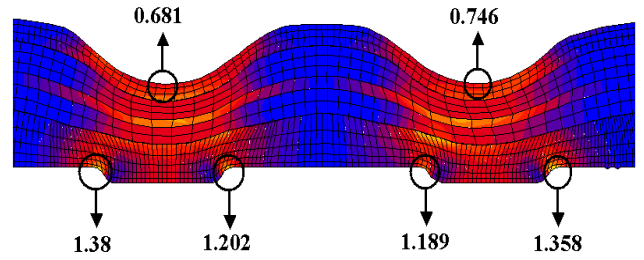


Fig.6 strain of hose after swaging

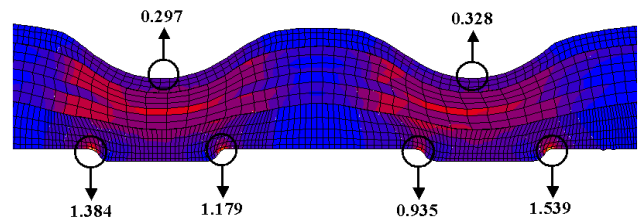


Fig.7 stress contour of power steering hose

만약 제작 불량으로 인해 호스에서 누유가 발생한다면 nipple과 내면 고무가 접촉하는 부분일 가능성이 매우 높으므로 nipple과 접촉하는 부분의 변형률을 측정하였다. Fig.6은 호스 부분만의 변형률을 나타낸 것이다. 각 부분의 수치에서 보듯이 내면고무의 최대 변형률은 1.189~1.38로서 내면 고무의 파단 변형률인 2.169보다 작음을 알 수 있다. 외면고무의 변형률도 0.681~0.746으로 파단 변형률인 1.27보다 작게 나타난다.

Fig.7은 호스 내부의 stress 분포를 나타내었다. 변형률 분포와 같이 jaw가 작용하는 sleeve의 아래부분에서 응력이 크게 발생하는데, 호스 내의 변형률 분포와 비교해 보면 편조사 층에서 더 큰 응력이 나타나고 있다. 이러한 현상은 고무로만 호스를 구성할 경우 내압과 같은 인장력에 약하기 때문에 보강사를 첨가 하였으나 swaging의 경우는 호스가 반경방향으로의 압축력을 받게 되었을 때 대부분의 응력이 편조사에서 발생하게 되어 결과적으로 각 고무층에 발생하는 응력을 줄여주는 역할을 하게 된다. 이는 편조사가 원래의 목적인 호스의 강도를 높여주는 역할 뿐 아니라 swaging 된 강재 내부에서 고무의 파손에 대한 영향을 줄여주는 역할을 한다고 할 수 있다.

4. 내압 해석

Fig.8과 같이 파워스티어링 호스는 유압 펌프로 부터 분당 35회의 최소 10bar에서 최대 140bar의 반복된 압력을 받게 된다.

반복 가압 시험은 최고압일 때 호스가 최대로 부풀었다가 최저압일 때 호스가 최대로 줄게 되는 과정을 반복하게 되므로 이 과정에서 호스는 파단이 예상된다. 특히 내압을 직접적으로 받게 되는 내면고무에서 파단이 예상되며 내면 고무중 변형률의 급변 지점이 파단 지점이 될 것이다. 따라서 MARC를 이용한 내압 해석에서 최고압일 때와 최저압일 때의 내면고무의 변형률 급변 위치와 차이를 통해 실제 반복 가압 시험때와 동일한 결과를 얻을 수 있다고 사료된다. 먼저 호스는 swaging 공정이 끝난 결과의 초기 형상으로 내압 해석을 실시 하였다. 내압이 10bar일 때 내면고무에서 발생하는 변형률은 nipple의 모서리 부분과 nipple 끝단부에서 가장 큰 변형률을 나타내었다. 내압이 140bar일 때 변형률은 10bar 일 때와 비교하면 현저한 차이를 나타낸다. 그 중 nipple 홈의 가장 오른쪽 부분의 모서리와 nipple 끝 단 약 1cm 지점에서 변형률이 가장 크게 변하였다. 이 결과는 Fig.4에서 내압이 nipple과 내면 고무에 작용하게 되는데 특히 내면 고무에 작용되다가 nipple로 내압 작용 부분이 바뀌는 부분에서 변형률은 급변을 나타내고 있다. 또한 내압에 의해 호스는 반경 방향으로 변형이 발생하게 되는데 이때 외면고무를 sleeve가 충분히 감싸고 있지 않기 때문에 호스는 마치 지렛대처럼 운동하게 되어, nipple 홈의 가장 오른쪽 모서리 부분에서 만나는 내면고무에서 변형률의 변화가 심하게 나타나게 된다.

Fig.10은 내압해석시 누유의 직접적 원인이 되는 내면고무의 파단을 예측하기 위하여 파워스티어링 호스의 내면을 10bar와 140bar로 가압했을 때 내면고무 최하단의 변형률을 수치적으로 나타낸 것으로, 동일 지점에서 변형률값이 갑자기 상승함을 알 수 있다. 변형률 급변지점의 변형률값은 0.00925, 0.08581이며 약 10배 정도 차이가 난다. 이를 통해 최고압과 최저압을 반복하는 반복 가압 시험에서 상기 위치에서 내면고무의 파단을 예측 할 수 있다.

변형률 급변 지점에서 고무의 파단을 막기 위하여 변형률의 급변을 완화 시킬 필요가 있으며 이를 위해 sleeve와 nipple의 형상 변경을 통해 개선 될 수 있다.

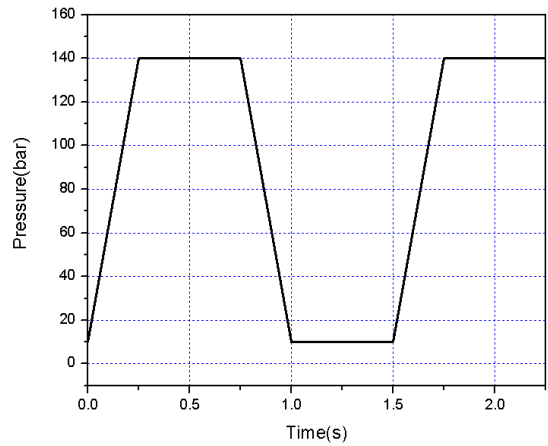


Fig.8 작동유의 가압 사이클

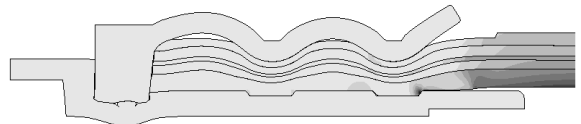
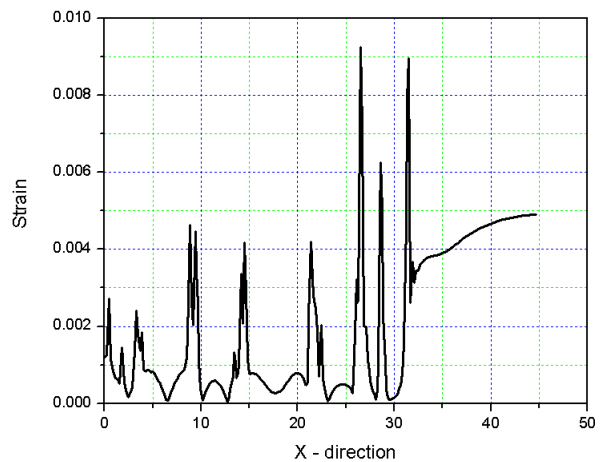
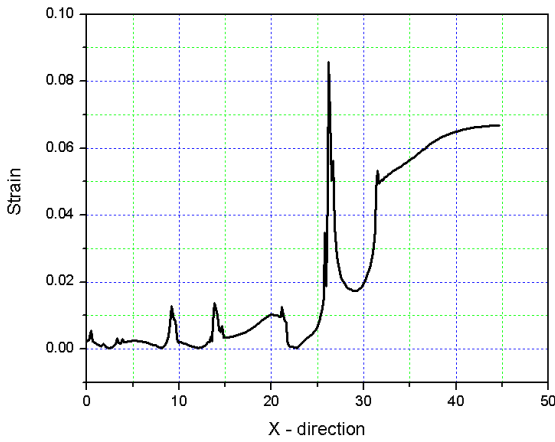


Fig.9 strain of hose by inner pressure



(a) 10bar



(b) 140bar

Fig.10 strain graph of inner rubber

5. 열 해석

swaging 된 형상의 호스에 내압이 작용하지 않고 순수하게 열을 받게 되는 호스의 변형률과 형상변화에 대해 유한요소 해석을 수행하였다.

이 해석은 열전달 해석이 우선적으로 선행되어야 하며, 호스 내의 열 분포를 바탕으로 하여 해열응력과 변형률을 구할 수 있다.

열 해석을 수행하기 위해 호스는 수평으로 놓인 긴 원관으로 가정하였으며, 호스의 외부는 분위기 온도 135C인 자연대류로 가정하였다. 호스의 내부는 150C의 작동유가 흐르고 있으며, 온도경계층이 완전 발달한 상태로 가정하였다. 변위경계조건은 swaging과정과 같다

대류 열전달 계수를 산출 하기 위해 호스의 외부의 막온도를 구하였고, 이 온도를 기준으로 하여 대기의 물성치를 결정하였다. 대류 열전달 계수를 구하기 위해서 Nu(Nusselt)수를 구해야 한다. 이 경우 Churchill과 Chu에 의해 제시된 상관식⁽⁵⁾으로부터 대류열전달 계수를 산정할 수 있다.

호스 내부는 내부 강제 대류 중 완전 발달된 수평 원관으로 가정하였으므로 Shah와 London이 제시⁽⁶⁾한 방법을 사용하였다. 이는 단면 형상이 특정 형상을 갖고 있을 때 Nu수는 Reynolds수와 Pr에 관계없이 일정하게 나타난다는 것이다. 호스의 경우 Nu수는 3.657이며, 열전달 계수는 원관의 직경 D의 함수로서 나타나게된다. 이상으로 구해진 대류 열전달 계수와 열팽창 계수, 비열등을 사용하여 열해석을 하게 되고, 열해석을 바탕

으로 변형률 분포를 나타내게 된다. 앞에서 언급하였듯이 호스의 파손은 내면 고무에서 주로 발생하기 때문에 변형률을 호스의 내면고무, 즉 nipple과 맞닿는 지점에서의 변형률을 절점 값을 이용해 내면을 따라서 도시 하였다. Fig.5에서 나타난 변형률은 nipple의 각 모서리 부분에서 큰 값이 나타나고 있다. 각각의 값들은 고무의 파단 변형률 크기에는 미치지 못하지만 내압 해석시와 동일 지점에서 큰 값을 발생하고 있다는 것에 주목 하여야 한다. 즉 내압 해석때와 열 해석때 같은 부분에서 국부적으로 높은 변형률이 나타나고 있고 이 부분은 열과 내압이 같이 작용할 경우 상당히 높은 값을 나타낼 것을 예상할 수 있다. 한편 nipple끝단 부근에서 변형률의 변화는 크게 나타나지 않고 있다. 이것은 nipple끝단에서의 파손은 온도에 의한 영향 보다 내압에 의한 영향이 크다는 것을 유추 할 수 있다.

한편 실제 반복 가압 실험에서 호스의 팽창 정도를 측정하였는데 최대 압력인 140bar에서 호스 지름의 3~6%의 변화가 나타났다. 유한요소 해석을 통해서 는 내압이 10bar일 때 0.0155mm, 140bar로 가압시 0.174mm의 변화가 발생 하였고, 열 해석을 통해 나타난 반경변화는 약 0.244mm를 나타내었다.

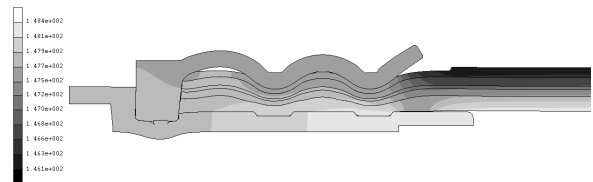


Fig.11 temperature contour by heat analysis

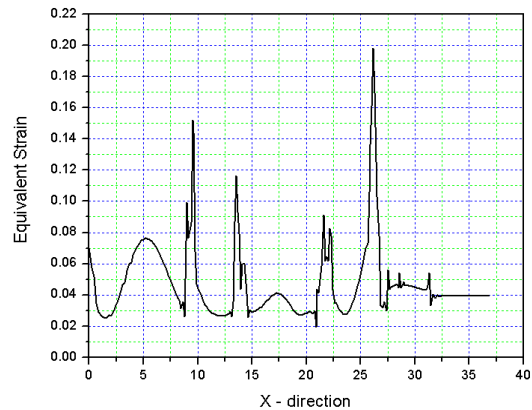


Fig.12 strain graph of inner rubber

반경 변화가 열에 의해 더크게 발생하는 이유는 호스가 내압을 받게 될 경우 내압에 따른 변형을 호스 내부에 있는 편조사 층에서 고무층보다 더 큰 응력이 발생하게 되고 따라서 고무의 변화를 억제시켜주고 있다.⁽⁷⁾ 그러나 열에 의한 변형은 고무와 편조사의 열팽창률이 장재에 비해 크게 나타나기 때문에 편조사층은 열에 의한 변형을 효과적으로 막아주지 못하게 된다. 결국 내압에 의한 호스의 지름 변화보다 열에 의해 팽창된 호스의 지름이 더 크게 나타나는 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 파워스티어링 호스에 대한 swaging 과정과 호스의 제작 후 실제 시험에서 사용되는 내압 시험 그리고 작동유와 대기로부터 유입되는 각각의 열이 호스에 미치는 영향을 알기 위해 열해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) swaging에 의해 발생한 고무의 변형률은 내면고무에서 발생하였으며, 그 크기는 고무의 파단 변형률에 미치지 못한다.
- 2) 내압 해석을 통해 내면 고무에서 nipple 끝단 부분의 고무와 nipple의 돌기 부분에서 큰 변형률의 변화를 보이고 있어 호스의 파손이 예상되는 부분을 예상할 수 있다.
- 3) 열응력 해석결과 호스의 변형률 발생 증가에는 큰 영향을 미치지만 일정 시간이 지난 후 온도 분포가 정상상태를 이루면서 변형률의 변화를 나타내지 않기 때문에 호스 파손의 직접적인 원인이 되지 않는다.

이상의 결론에서 swaging 공정에 의한 호스의 파손보다 내압과 열이 파손에 더 큰 영향을 준다. 내압과 열에 의한 호스의 파손을 방지하기 위해서는 nipple의 길이와 형상과 swaging 후의 sleeve의 형상 변경을 통해 내압이 발생하더라도 변형률 변화가 크게 발생하지 않도록 설계 형상 변화가 필요하며, 열에 의한 변형률이 크게 발생하지 않게 하기 위해서 작동유의 냉각 또한 중요한 인자가 된다.

후 기

본 연구는 (주)화승 R&A 지원으로 수행되었으며

이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gi-Tae Roh, Young-Ju Lee and Jin-Rae Cho, 2002, Finite Element Analysis on Mechanical Behavior of Swaged Power Steering Hose, Proceedings of the KSME 2002 Autumn Annual Meeting, pp. 81~86
- (2) Young-Ju Lee, Gi-Tae Roh and Jin-Rae Cho, 2002, Finite Element Analysis on Mechanical Behavior of Swaged Power Steering Hose, Proceedings of the KSME 2002 Autumn Annual Meeting, pp. 99~104
- (3) A.G. James, A Green and G.M. Simpson, 1975, Strain energy functions of rubber I, J. Appl. Polymer Sci. Vol.19, pp. 2033-2058.
- (4) MARC Users Manual Vol. A Theory and User Information
- (5) Churchill, S. W., and H. H. S. Chu. 1975. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder. Int. J. Heat Mass Transfer 18: 1049-1053
- (6) Shah, R. K., and A. L. London, 1978. Laminar Flow Forced Convection in Ducts. New York : Academic Press.
- (7) Dieter Lietze, 1997 Journal of Hazardous Materials 54, 227-240 Requirements in the strength of rubber hose assemblies for high pressure acetylene