

# Swaging 시 P/S 호스의 변형 특성에 대한 유한요소해석

김병탁\* · 김형제\*\* · 송한중\*\*\* · 강창기\*\*\*

## Finite Element Analysis for the Deformation Characteristics of a P/S Hose in the Swaging Process

Byung-Tak Kim, Hyung-Je Kim, Han-Jong Song and Chang-Gee Kang

**Key Words :** Swaging(스웨이징), Power Steering Hose(P/S 호스), Finite Element Method(유한요소법), Contact Condition(접촉조건), Deformation Characteristics(변형특성)

### Abstract

It is necessary to analyze the mechanical behaviors of the power steering hose, which must play a proper role under severe operating conditions, in order to prepare a preventive measure for contrary effects expected in unfavorable circumstances. In this paper, the stress and deformation characteristics of the hose components such as rubber, sleeve, nipple and reinforced braids during the swaging process, are analyzed using the finite element method. Contact conditions identical to the manufacturing process are taken into account, and the material properties based on experimental data are used in the analysis. Investigations into the mutual relations between the manufacturing conditions and the hose performances are done with respect to the jaw stroke on the basis of the stress and strain values of the hose components after swaging process.

### 1. 서 론

P/S 용 고압 호스<sup>(1)</sup>는 자동차 기관의 여러 운전 조건에서 다양한 형태의 기계적 하중과 열하중을 받고 있다. 뿐만 아니라 호스의 양쪽 끝은 금구를 사용하여 자동차의 엔진과 차체에 마운트되어 있는 금속 파이프와 연결되어 있으므로, 가혹한 운전 상태가 계속되는 경우에는 고압 호스와 금구의 연결부에서 누유 등으로 인하여 자동차 기관의 성능에 악영향을 미칠 수 있는 현상이 발생할 수 있다. 실제로 엔진의 운전 조건이 바뀔 때마다 고압 호스내의 하중 조건은 변하게 되고, 대기 온도 등의 외부 조건도 고압 호스의 성능<sup>(2)</sup>이나 수명<sup>(3)</sup>에 영향을 미치므로, 어떠한 운전 조건하에서도 PS 용 고압 호스가 제 기능을 다하기 위해서는 금구와 호스의 체결부위에 대한 기계적 거동 해석<sup>(4),(5)</sup>이 선행되어 예상되는 역효과에 대한 방지책을 마

련하는 것이 필요하다. 또한 관련된 설계 기술은 선진국에 계속 의존할 수는 없는 실정이므로, 국내의 독자적인 설계 기술의 확보와 지속적인 제품의 성능 향상을 위해서는 해석과 실험을 통한 금구와 고압 호스 조립부의 거동에 대한 체계적인 계산 기술의 확보와 최적인자를 선정하는 기준이 마련되어야 하는 것이 당연하다. 지금까지 고압 호스에 대한 거동 해석은 이론에 근거를 둔 계산식의 유도 및 적용<sup>(6)-(9)</sup>이 대부분을 차지하고 있으며, 호스 제작시의 과정이 호스의 성능에 큰 영향을 미침에도 불구하고 이에 대한 거동 해석은 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 스웨이징<sup>(10)</sup>시 조 행정(jaw stroke)에 따라 내·외면 고무, 편조층, 니플(nipple) 및 슬리브(sleeve)에 발생하는 응력 및 변형 특성을 유한요소법으로 해석하였다. 이를 위하여 실제 체결 방법과 동일한 과정을 접촉 문제로 모델링하고 고무 재료의 물성치를 실험치에 근거하여 입력하였으며, 스웨이징 완료 후 각 부위에 발생하는 응력과 변형율을 토대로 현재의 작업 조건과 제품 성능의 상관 관계를 검토하였다. 이와 같은 연구를 통하여 얻어진 설계 자료

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*\* ㈜화승 R&A 기술연구소

는 독자적인 설계 기술의 확보 뿐만 아니라, 추후 신제품을 개발한다던가 예기치 못한 장애 요인 발생시에 합리적인 처리 방안을 모색하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 호스 형상

Fig. 1은 P/S 호스의 단면 형상을 도시한 것으로, 내면고무, 중간고무, 외면고무로 구성되어 있으며 압력 작용시 인장력을 지탱하기 위한 두 편조층이 포함되어 있다.

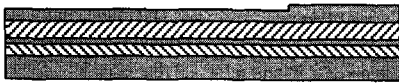


Fig. 1 Sectional geometry of the P/S hose

### 2.2 유한요소 모델

Fig. 2는 해석 시작시 유한 요소 모델을 도시한 것으로 해석 물체가 호스의 중심축에 대해 대칭인 형상을 가지고 있으므로 축대칭모형을 사용하였다.

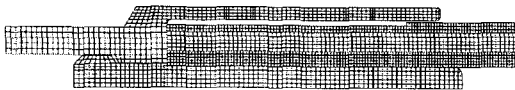


Fig. 2 Finite element model in first analysis step

해석 시작시 범용 프로그램인 MARC의 전처리기를 사용한 초기 모델은 요소의 수 2761개, 절점수 3491개로 구성되었으며, 작업이 진행됨에 따라 호스를 구성하는 내·외면 고무 요소들의 찌그러짐(distortion)이 심해져 해가 수렴되지 못하는 것을 방지하기 위하여 일정 시간 간격에서 모델의 격자(mesh)를 재구성하도록 하였다.

### 2.3 재료 물성

Fig. 3은 내면 고무의 인장시험과 압축시험을 통하여 구한 응력-변형을 관계를 나타낸 선도이다.

시험은 동일 시험편 3개로 수행되었으며, 곡선의 최우측점이 파단점을 나타낸다. 중간 고무와 외면 고무도 응력-변형을 관계를 구하기 위하여 동일한 시험을 수행하였다.

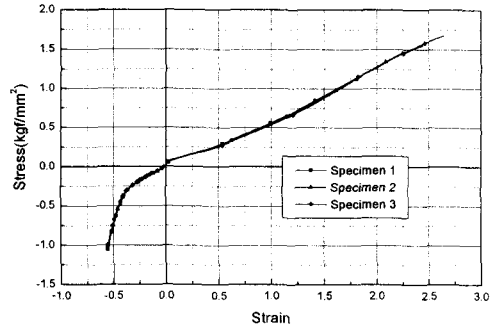


Fig. 3 Stress-strain curve of the inner rubber

고무 재료의 응력-변형을 선도로부터 데이터 값을 MARC에 입력하여 다음 식으로 표현되는 일반화된 Mooney-Rivlin의 2차 불변량 모델의 4개의 상수를 결정하였다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (1)$$

Table 1은 프로그램으로 계산된 각 고무 재료의 Mooney-Rivlin 상수를 나타낸 것이다.

Table 1 Calculated material constants of the generalized Mooney-Rivlin model (unit: kgf/mm<sup>2</sup>)

	C <sub>10</sub>	C <sub>01</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>20</sub>
Inner rubber	0.242896	-0.0803997	0.00459959	0.0515058
Outer rubber	0.135978	-0.0465278	0.0115214	0.00276171
Middle rubber	0.0976738	-0.132254	0.00601448	0.00326899

Fig. 4는 외면 고무에 대해 계산된 상수로부터 구한 응력-변형을 관계를 실험치와 함께 도시한 것으로 두 선도가 넓은 범위에서 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

다음으로 호스와 체결되는 강재의 물성치를 구하기 위하여 5개의 시험편을 가공하여 인장시험을 수행한 결과, 종탄성계수는 6575 kgf/mm<sup>2</sup>, 항복 응력은 35.5 kgf/mm<sup>2</sup>을 나타내었다. 스웨이징 작업 시 슬리브는 심한 소성변형을 하므로 소성영역에

서 거동을 해석하기 위하여 실험에서 얻은 응력-변형률 관계를 구분적 선형(piecewise linear) 방식으로 입력하였다.

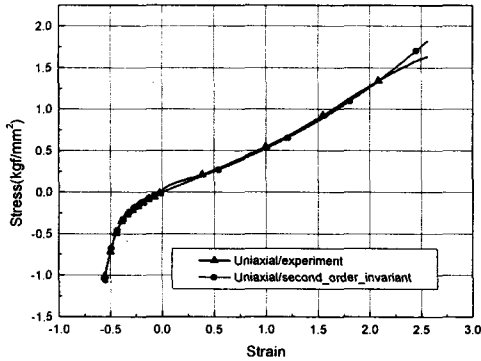


Fig. 4 Stress-strain curve of the outer rubber in second order invariant model

편조층의 종탄성계수는 3 개의 호스 시편을 가공하여 반경방향의 압축시험을 수행하고, 호스가 탄성영역에서 거동할 때 각 구성 요소의 물성치를 사용하여 다음 식으로 추정하였다.

$$E = \frac{l_2 + l_4}{\frac{A\delta}{P} - \left(\frac{l_1}{E_1} + \frac{l_3}{E_3} + \frac{l_5}{E_5}\right)} = \frac{l_2 + l_4}{\frac{A}{k} - \left(\frac{l_1}{E_1} + \frac{l_3}{E_3} + \frac{l_5}{E_5}\right)} \quad (2)$$

이 식에 각 부분의 치수를 대입하여 계산해 본 결과, 편조층의 종탄성계수의 평균값은 1.053 kgf/mm<sup>2</sup> 으로서 압축력에 대한 보강사의 저항력은 미미한 것으로 나타났다.

#### 2.4 해석 파라미터의 선정

스웨이징 과정에서 고무의 대변형이 발생하므로 해석 중간에 모델을 수정하여 격자를 재구성해 줄 필요가 있기 때문에 본 해석에서는 호스의 각 층과 슬리브, 니플을 별도의 변형 접촉 물체로 정의하였다. 실제로 호스의 각 층은 완전 접합 상태이므로 내면고무와 안쪽 편조층, 안쪽 편조층과 중간고무 등은 접촉조건 중에서 접착(glue) 옵션을 사용하였다. 격자 재구성은 변형이 심한 강제 접촉 외면고무와 내면고무에 대해서는 해석 초기에 적합한 격자를 구성한 후 해석을 시작하도록 하였다. 또한 매 5 번씩의 시간 증분(increment)마다 격자를 다시 구성하고 요소가 너무 뒤틀어져 있는

경우에도 격자를 재구성하도록 하였다. 격자는 4 각형 요소를 사용하도록 하였으며, 재구성시 요소 변의 크기는 0.3 mm 로 하였다. 호스 중간부의 나머지 물체는 요소의 변형이 심하지 않으므로, 시간 증분에 의한 조건은 사용하지 않고 뒤틀림이 심한 경우에만 격자를 재구성하도록 하였다.

조는 2.125 mm 의 행정거리를 기준하여 2.0 mm, 2.25 mm, 2.375 mm, 2.5 mm 로 변화시키면서 행정 변화에 따른 호스의 거동 특성을 파악하였다. 조의 운동은 각 행정 거리를 75 mm/s 의 속도로 운동하도록 하였으며, 경계조건을 적용하기 위하여 가상 강체를 대칭(symmetry) 조건으로 정의하였다. 스웨이징 과정에서 조는 전진하였다가 후퇴하므로, 해석시간은 접촉초기부터 조가 슬리브에서 완전히 분리되는 시점까지를 포함하여 250 간격(step)으로 나누었으며, 어떤 시간 간격 내에서 해가 수렴하지 않을 경우에는 자동적으로 그 간격을 10 번까지 줄여 수행할 수 있도록 하였다. 해석은 대변형 조건과 updated Lagrangian 법을 적용하였으며, 전 모델에 사용한 요소는 모든 구성 방정식에 적용될 수 있는 축대칭 4 절점 요소(MARC element 10)를 사용하였다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 변형 형상

Fig. 5 는 조가 행정거리 2.125 mm 를 전진했을 때의 변형형상을 나타낸 것이며, 조가 슬리브에서 분리된 뒤에는 스프링백 현상에 의한 변형의 일부 회복을 제외하고 전체적인 변형형상은 동일하였다.

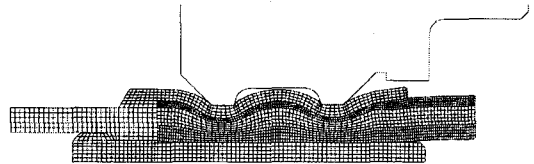


Fig. 5 Deformed Shape of the Model

조 중앙부와 접촉하는 슬리브의 시간에 따른 변형 특성을 살펴보기 위하여, 행정거리가 2.125 mm 일 때 두 절점의 반경방향 변위를 Fig. 6 에 도시하였다. 절점 528 번은 좌측 조 중앙부와 접촉하는 점이며, 절점 556 번은 우측 조의 해당 접촉점이다. 두 조의 반지름이 0.1 mm 정도 차이가 있으

므로, 최대 전진 시점(200 step)까지 두 절점의 변위는 거의 일정한 차이를 가지고 평행하게 나타남을 알 수 있다. 조가 후퇴하면 스프링백 현상이 발생하여 변위는 줄어들게 되는데 두 절점에서의 복원된 변위는 동일하게 0.071 mm 를 나타냈다.

각 행정거리에 대한 슬리브의 복원 변위를 살펴 본 결과, 조의 전진 거리가 증가함에 따라 굽힘에 의한 슬리브 좌측단의 소성변형이 증가하기 때문에 복원변위는 미소하게 감소하여 2.5 mm 의 경우 0.066 mm 를 나타냈다.

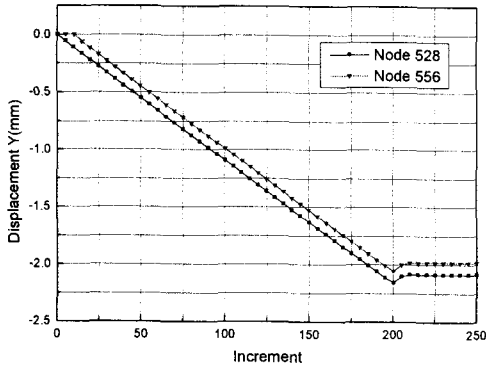


Fig. 6 Radial displacements of two nodes in the center region of the jaws

### 3.2 강재의 발생 응력

Fig. 7 은 제작이 완료된 후에 슬리브와 니플에 발생하는 응력을 도시한 것으로, 조의 최대 전진 시점에서는 슬리브가 전체적으로 항복응력을 초과하는 응력이 발생하였으나, 조의 후퇴 후에는 변형의 일부 복원되어 응력이 감소함을 알 수 있었다. 그 반면에 니플은 스웨이징 과정 내내 4 kgf/mm<sup>2</sup> 이내의 비교적 작은 응력이 발생하여 스웨이징 과정이 이 구성품의 변형 등에 별 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

### 3.3 호스의 발생 변형률

Fig. 8 은 해석 모델 전체의 등가 전 변형률(equivalent total strain)을 도시한 것으로 강재에 비해 호스의 변형률이 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다. 호스 전체적인 변형률은 예상대로 조와 직접 접촉하는 슬리브 아랫부분에 크게 발생하며, 압축력에 대한 보강사의 저항력이 미미하기 때문에 편조층의 변형률이 상대적으로 크게 나타남을 볼 수 있다.

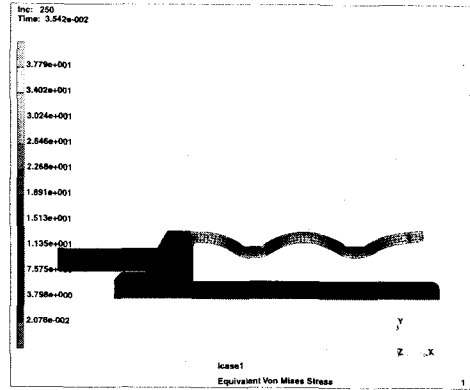


Fig. 7 Stress distribution of the steel components after release (jaw stroke : 2.125 mm)

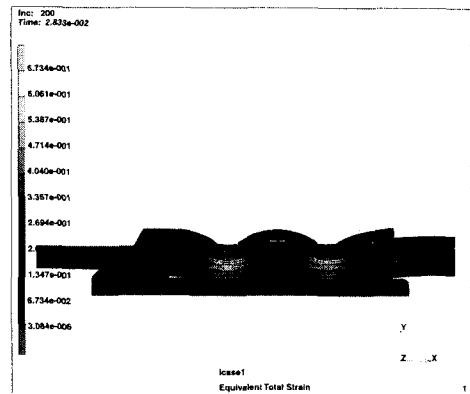


Fig. 8 Equivalent total strain of the full model

Fig. 9 는 P/S 호스의 성능에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 내면 고무의 등가 전 변형률을 조의 최대 행정(2.125 mm) 시점에서 나타낸 것이다. 조가 후퇴하여 슬리브와 분리된 후의 변형률 분포 양상도 이 그림과 유사하게 나타났으며, 고무에 발생하는 변형률의 크기 또한 별로 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 강재의 소성변형이 완전히 이루어진 뒤에는 조가 후퇴하여 일부 변형의 회복이 발생한다 하더라도 강재와 고무의 큰 강성의 차이로 인하여 고무의 변형률은 거의 변화하지 않는다고 볼 수 있다.

P/S 호스의 제작 불량으로 누유가 발생한다면 그 위치는 내면고무의 니플 접촉부위가 될 가능성이 매우 높으므로 Fig. 10 에 이들 접촉점에 발생하는 변형률을 그래프로 표시하였다. 이 두 그림에서 두개의 봉우리는 가장 큰 압축력을 받는 조

중양부의 절점에 해당되며 각각 40.6%와 37.3%로서 좌측 조에서 약 3.3% 정도 더 큰 변형율이 발생하였다. 조가 방출(release)된 후 두 피크의 변형율은 각각 38.9%와 35.5%로서 변위 복원으로 최대 행정시보다 약 1.7~1.8% 정도 감소하였으나, 두 변형율의 차이는 3.4%로서 거의 동일한 값을 나타냈다.

조의 각 행정에 따른 내면고무의 발생 변형율을 살펴보기 위하여 Fig. 11 에 두 봉우리의 피크치를 나타내었다. 두 절점의 변형율의 차이는 행정 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향을 보이고 있으며, 조의 행정이 2.5 mm 인 경우 호스 내면의 최대 변형율은 45.5%를 나타냈다.

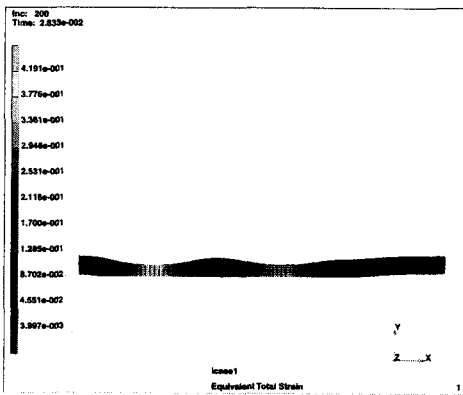


Fig. 9 Equivalent total strain of the inner rubber

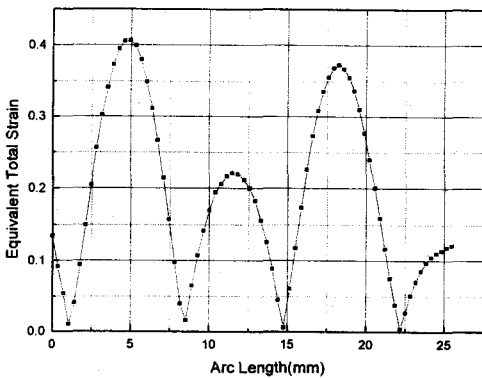


Fig. 10 Total strain variation of the contacted nodes with the nipple

### 3.4 고무의 발생 응력

Fig. 12 는 조의 최대 전진시의 내면 고무의 발생 응력을 도시한 것으로, 최대응력은 약 0.764

kgf/mm<sup>2</sup> 에 불과하며, 조 중양부라고 할지라도 비교적 낮은 응력값을 보여주고 있다. 스웨이징 완료 후 내면고무 전체에 잔류하는 Cauchy 응력의 분포 양상은 조의 최대 전진 시점과 유사하였으며, 이 때의 최대 응력은 0.697 kgf/mm<sup>2</sup> 의 값을 나타냈다

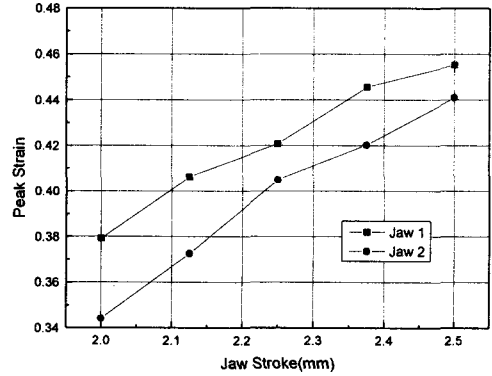


Fig. 11 Two peak strain variations with respect to strokes

Fig. 13 은 니플과 접촉하는 내면고무의 절점에서 발생하는 응력을 도시한 것으로 가장 압축이 심한 조의 중양부 두 절점에서의 해당응력은 각각 0.613 kgf/mm<sup>2</sup> 과 0.529 kgf/mm<sup>2</sup> 의 값을 나타냈다. 조가 방출되어 스웨이징이 완료된 시점에서 두 절점의 응력은 각각 0.570 kgf/mm<sup>2</sup>, 0.487 kgf/mm<sup>2</sup> 으로서 최대 행정시보다 0.042~0.043 kgf/mm<sup>2</sup> 정도 감소하였으나, 두 지점의 응력차는 거의 동일하였다. Fig. 14 는 조의 행정에 따른 두 절점의 최대 Cauchy 응력을 도시한 것으로 변형율과 유사한 변화양상을 보이고 있으며, 행정이 2.5 mm 인 경우 스웨이징 완료 후 0.713 kgf/mm<sup>2</sup> 을 값을 나타냈다.

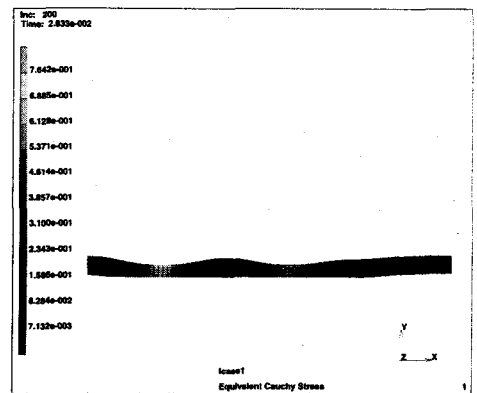


Fig. 12 Cauchy Stress Distribution of the Inner Hose

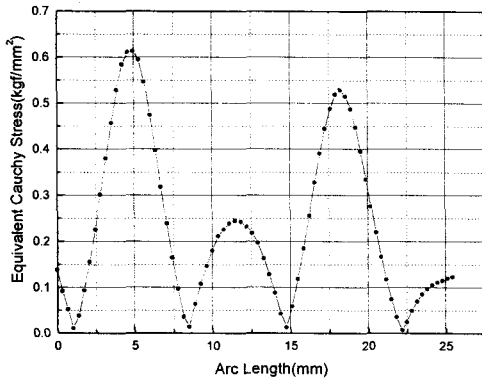


Fig. 13 Cauchy Stress Variation of the Contacted Nodes with the Nipple

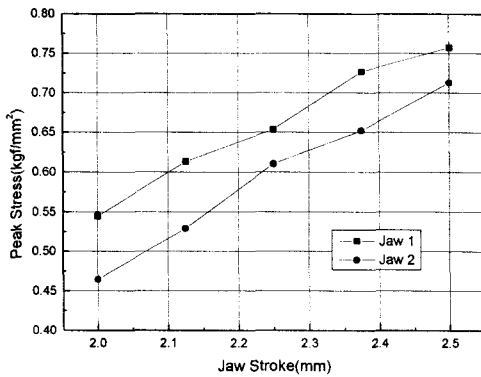


Fig. 14 Two peak stress variations with respect to strokes

#### 4. 결론

본 연구에서는 스웨이징 시 P/S 호스의 내·외면 고무, 편조층, 니플 및 슬리브에 발생하는 응력 및 변형 특성을 유한요소법으로 해석하였다. 재료의 물성치는 실험값을 사용하였고, 실제 작업과정과 동일한 접촉조건을 적용하여 여러 조 행정에 대해 시뮬레이션하였다.

본 해석의 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

(1) 조가 반경방향으로 2.125mm 전진 후 스웨이징이 완료되면, 스프링백에 의한 복원 변위는 두 지점에서 동일하게 0.071 mm 를 나타냈다. 또한 내면고무의 조 중앙부 응력은 약 0.042~0.043 kgf/mm<sup>2</sup>, 변형율은 약 1.7~1.8% 정도 감소함을 알 수 있었다.

(2) 조의 최대 전진시 조 중앙 내면고무의 니플 접촉부의 최대 변형율은 각각 40.6%와 37.3%로서

좌측 조에서 약 3.3% 정도 더 큰 값을 나타냈으며, 조 행정에 따른 두 절점의 변형율 차이는 행정이 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향을 나타내었다.

(3) 조의 중앙부 내면고무의 두 피크치 응력은 각각 0.613 kgf/mm<sup>2</sup> 과 0.529 kgf/mm<sup>2</sup> 의 값을 나타냈으며, 조의 행정에 따른 두 절점의 응력 피크치는 변형율과 유사한 변화 양상을 나타내었다.

#### 후 기

본 연구는 ㈜화승 R&A 기술연구소의 지원으로 수행된 연구의 일부분이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Hydraulic Hose and Hose Fitting Subcommittee, 1997, "Wire Braid Angle Response Characteristics in Hydraulic Hose", SAE Transaction 972706, Vol.22, pp. 107~126.
- (2) R. A. Goettler, R. I. Leib and A. J. Lambricht, 1979, "Short Fiber Reinforced Hose-A New Concept in Production and Performance", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 52, No. 4, pp. 838~863.
- (3) M. E. Nicols and R. A. Pett, 1995, "Predicting the Life of Automotive Power Steering Hose Materials", Rubber World, Vol. 211, No. 6, pp. 27~31.
- (4) W. F. Breig, 1991, "Finite Element Analysis of Spiral Hose Utilizing Laminate Theory", SAE Transaction 911869, Vol.100, pp. 968~986.
- (5) R. H. Finey, 1987, "Application of Finite Element Analysis", Elastmerics, Vol. 119, No. 1, pp. 18~23.
- (6) V. G. Tsyss and M. L. Pinovskii, 1996, "Rigidity Characteristics of Rubber-Cord Hose Elements", International Polymer Science and Technology, Vol. 23, No. 5, pp. T/98~T/100.
- (7) S. Nair and A. Dollar, 1997, "Stresses and Strains in High-Pressure Composite Hoses", J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 119, pp. 351~355.
- (8) P. C. Bregman, M. Kuipers, H. L. J. Teerling and W. A. van der Veen, 1993, "Strength and Stiffness of a Flexible High-Pressure Spiral Hose", Acta Mechanica, Vol. 97, No. 3, pp. 185~204.
- (9) M. Kuipers, M. van der Veen, 1989, "On Stresses in Reinforced High-Pressure Hoses", Acta Mechanica, Vol. 80, No. 3, pp. 313~322.
- (10) A. Piela, 1997, "Analysis of the Metal Flow in Swaging - Numerical Modelling and Experimental Verification", Int. J. Mech. Sci., Vol. 39, No. 2, pp. 221~231.