

고압호스 스웨이징에 대한 비선형 유한요소해석 Nonlinear Finite Element Analysis for the Swaging of a High-Pressure Hose

김병탁 · 김형제
B. T. Kim and H. J. Kim

Key Words : Swaging(스웨이징), Mooney-Rivlin Model(무니-리블린 모델), Power Steering Hose (P/S 호스), Nonlinear Finite Element Method(비선형 유한요소법), Behavior Characteristics (거동특성)

Abstract : The power steering hose is a kind of high-pressure hose with reinforced braids in rubber material. It is usually manufactured through the swaging process. In this paper, the deformation characteristics of a power steering hose during the swaging process were analyzed using the nonlinear finite element method. The material properties were obtained on experiments, and the contact conditions were used in consideration of real manufacturing process. Investigations were focused on the stress and strain values of the hose and metal components at the maximum jaw stroke and at the completion of the process. Especially, the results of inner rubber component were interpreted in detail, because of its important role in the hose efficiency.

1. 서 론

P/S 호스는 일반적으로 인장력을 지탱할 수 있는 편조층을 포함한 고무재료로 구성되어 있는 고압호스¹⁾로서, 호스의 양쪽을 슬리브(sleeve)에 삽입한 후 스웨이징²⁾(swaging) 작업으로 제작되고 있다. 이 호스는 자동차의 엔진과 차체에 마운트되어 있는 금속 파이프와 연결되어 있기 때문에 내부의 높은 압력과 동시에 엔진으로부터 상당한 열하중을 받게 된다. 따라서 가혹한 운전 상태가 계속되는 경우, 호스의 재질 약화와 높은 압력으로 인하여 이음쇠(fittings) 연결부에서 누유 등의 비정상적인 현상이 발생할 수 있다. 실제로 엔진의 운전 조건이 바뀔 때마다 고압호스내의 하중 조건은 변하게 되고, 주위 온도 등의 외부 조건도 호스의 성능이나 수명에 영향을 미치므로^{3,4)}, 여러 가지 운전 조건에서 P/S용 고압 호스가 제 기능을 다하기 위해서는 이음쇠와 호스의 체결부위에 대한 기계적 거동 해석^{5,6)}이 선행되어 예상되는 역

효과에 대한 방지책을 마련하는 것이 필요하다. 또한 여러 가지 환경 변화로 인하여 호스와 관련된 설계 인자를 선진국에 의존하여 결정할 수 없는 실정이므로, 국내의 독자적인 설계 기술의 확보와 지속적인 제품의 성능 향상을 위해서는 고압 호스의 제작시 변형 특성에 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^{7~10)}이 대부분으로, 해석 조건 및 형상의 차이로 인하여 이 결과를 실제 호스에 적용하기에는 곤란한 점이 많다. 더욱이 호스 제작시의 과정이 실제 운전 상태의 호스 성능에 큰 영향을 미침에도 불구하고 이에 대한 거동 해석^{11,12)}은 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 스웨이징 시 내·외면 고무, 편조층, 니플(nipple) 및 슬리브에 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 변형률을 토대로 현재의 작업 조건과 제품 성능의 상관 관계를 검토하였다. 이와 같은 연구를 통하여 얻어진 해석 기법은 독자적인 설계 능력의 확보뿐만 아니

접수일 : 2003년 1월 15일
김병탁(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : btkim@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1538
김형제 : 부경대학교 대학원

라, 추후 신제품을 개발한다면가 비정상적인 장애 요인 발생시에 합리적인 처리 방안을 모색하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

2. 유한 요소 해석

2.1 고무의 탄성이론

고무재료의 응력 계산에는 변형률 에너지 함수 (strain energy function)가 필요하며, 이것은 일반적으로 불변량 혹은 연신비(stretch ratio)의 함수로 정의된다. 실제로 재료가 비압축성일 경우 다음과 같은 구속 방정식¹³⁾(constraint equation)이 성립한다.

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (1)$$

여기서 λ_i 는 주연신비이며, 변형률 불변량은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

비압축성 고무재료의 일반화된 무니-리블린 모델(Mooney-Rivlin model)에 대한 변형률 에너지 함수는 다음 식으로 표현된다.

$$W = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

이 식에서 $C_{00} = 0$ 이며, 고무재료의 응력과 변형률은 위의 W 와 야코비안(Jacobian) J , 코시-그린 텐서(Cauchy-Green tensor) b_{ij} 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \frac{2}{J} \frac{\partial W}{\partial b_{ik}} \partial b_{kj} \quad (4)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \ln b_{ij} \quad (5)$$

여기서 J 는 b_{ij} 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = (\det b_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

2.2 호스형상 및 유한요소모델

Fig. 1은 P/S호스의 단면 형상을 도시한 것으로, 내면고무, 중간고무, 외면고무로 구성되어 있으며 압력 작용시 인장력을 지탱하기 위한 두 편조층이 포함되어 있다. 또한 호스의 외형은 제품의 정도를 높이기 위하여 슬리브에 삽입되는 외면고무를 두께 0.45 mm로 연마하여 가공한 형태이다.

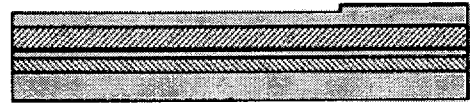


Fig. 1 Geometric shape of the P/S hose

Fig. 2는 호스 삽입 전의 초기 유한요소 모델을 도시한 것으로, 해석 물체가 호스의 중심축에 대해 대칭인 형상을 가지고 있으므로 축대칭 모델을 사용하였다. 모델 구성에는 범용 프로그램인 MARC의 전처리기를 사용하였으며 사용된 요소의 수는 4886개, 절점수 6180개였다. 그러나 스웨이징 과정을 해석할 때 요소의 심한 찌그러짐(distortion) 때문에 해석이 중단되는 오류를 방지하기 위하여 스웨이징 시작시와 일정 시간 간격에서 모델의 격자를 재구성하는 방법을 적용하였다.



Fig. 2 Initial finite element model of the hose components

2.3 호스재료의 물성치

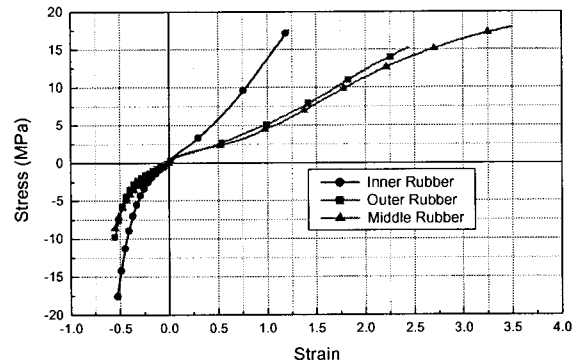


Fig. 3 Stress-strain curve of rubber materials

Fig. 3은 호스를 구성하고 있는 고무 재료의 인장시험과 압축시험을 통하여 구한 응력-변형률 관계를 나타낸 선도이다. 세 가지 고무재질 중에서 중간 고무와 외면 고무는 파단 신율을 제외하고 유사한 반면, 내면 고무는 이들보다 상당히 큰 강성을 나타낸다는 차이점이 있다. 이 실험 데이터를 MARC에 입력하고 일반화된 무니-리블린 모델에 적용하면 해당 모델의 여러 상수를 결정할 수 있다. 본 연구에서는 여러 모델 중 2차 다항식을 포함하는 모델이 가장 실험 결과와 근사한 곡선을

나타내었으므로, 다음 식과 같은 2차 불변량 모델(second order invariant model)을 선택하였다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (7)$$

Fig. 4는 대표적으로 내면 고무에 대해 계산된 무니-리블린 상수로부터 구한 응력-변형률 관계를 실험치와 함께 도시한 것으로, 두 곡선이 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

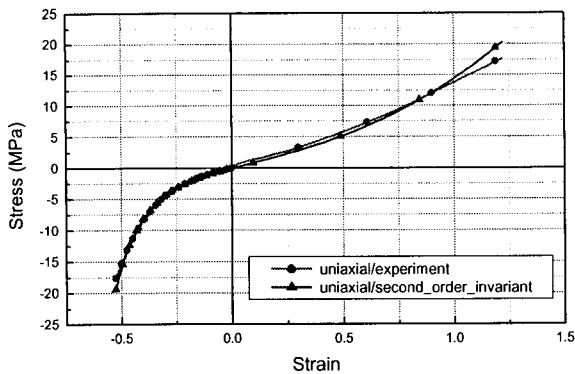


Fig. 4 Stress-strain curve of the inner rubber in second order invariant model

호스에 포함되어 있는 두 편조층의 종탄성계수는, 3개의 호스 시편을 가공하여 반경방향의 압축 시험을 수행하고 알려진 고무의 물성치를 다음 식에 대입하여 계산하였으며, 그 결과 39.44 MPa의 값을 얻을 수 있었다.

$$\epsilon = \frac{\epsilon_c t_c - (\epsilon_1 t_1 + \epsilon_3 t_3 + \epsilon_5 t_5)}{t_2 + t_4} \quad (8)$$

이 식에서 t 는 호스 구성 재료별 두께를 나타내며, 하첨자의 c 는 압축 시험편 전체, 1, 3, 5는 각각 내면고무, 중간고무, 외면고무, 2와 4는 두 편조층을 나타낸다.

마지막으로, 호스와 체결되는 강재의 물성치는 5개의 시험편을 가공하여 인장시험을 수행한 결과, 종탄성계수는 64.5 GPa, 항복응력은 348.3 MPa를 나타내었다. 스웨이징 작업시 슬리브는 심한 소성 변형을 하므로 소성영역에서 거동을 해석하기 위하여 실험에서 얻은 응력-변형률 관계를 구분적 선형(piecewise linear) 방식으로 입력하였다.

2.4 해석 방법

본 해석은 두 단계로 구성되어 있는데, 첫 번째는 작업전 호스를 삽입하는 과정이며, 두 번째는 실제로 스웨이징 작업을 하는 과정이다. 첫 번째 과정이 필요한 이유는 호스와 니플의 초기 접촉상

태가 스웨이징 작업시 호스의 변형 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문이다.

스웨이징 과정시 외면 고무의 격자 재구성과 호스의 구성 재료의 차이를 고려해 주기 위하여, 본 연구에서는 모델 구성시 호스의 각 층과 슬리브, 니플을 별도의 변형 접촉 물체로 정의하였다. 격자 재구성은 초기에 적합한 격자를 구성하여 해석을 시작한 후, 매 10번씩의 시간 증분(increment)마다 격자를 다시 구성하도록 하였으며 요소가 너무 뒤떨어지는 경우에도 격자를 재구성하도록 하였다.

조(jaw)는 반경 방향으로 2.125 mm의 거리를 75 mm/s의 속도로 운동하도록 하였으며, 해석 시간은 접촉 초기부터 조가 슬리브에서 완전히 분리되는 시점까지를 포함하여 약 0.0354초로 하였다. 해석은 호스 삽입 과정을 200, 스웨이징 과정을 200 간격(step)으로 나누어 진행되었으며, 어떤 시간 간격 내에서 해가 수렴하지 않을 경우에는 자동적으로 그 간격을 10번까지 줄여 수행할 수 있도록 하였다. 해석은 대변형 조건과 갱신 라그랑지법(updated Lagrangian)을 적용하였으며, 전 모델에 사용한 요소는 모든 구성 방정식에 적용될 수 있는 축대칭 4절점 요소를 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 호스 삽입 후의 접촉 상태

Fig. 5는 호스가 삽입되는 과정을 해석하여 스웨이징 작업 전의 접촉 상태를 도시한 것으로서, 니플 돌기부로 인하여 중간 부분의 내면 고무는 강재와 접촉하지 않고 있음을 알 수 있다.

이 초기 접촉 상태는 실제로 제품에 호스를 삽입하고 그 단면을 절단해 본 결과 동일한 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 호스가 삽입된 상태에서 돌기와 접촉하는 내면고무의 발생 응력은 약 1.38 MPa로서 파단응력 17.17 MPa의 약 8%, 변형률은 14.36%로서 파단 변형률의 약 12%에 해당되므로 초기 접촉과정의 해석 없이 스웨이징 작업을 해석할 경우 실제와는 상이한 결과가 나올 수 있을 것으로 생각된다.



Fig. 5 Inserted geometry of the P/S hose

Fig. 6은 호스가 삽입된 상태에서 내면고무의 니플 접촉면의 응력을 호스 길이 방향으로 도시한 것으로, 스웨이징 작업전 돌기 접촉부의 초기 응력은 양쪽 돌기에서 비슷하고, 중간 돌기에서 약간 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 호스가 삽입되면 내면 고무가 굽힘을 받게 되는데, 이 굽힘에 대한 곡률이 양쪽 돌기에서 동일하게 중간 돌기보다 크게 나타나기 때문으로 파악된다.

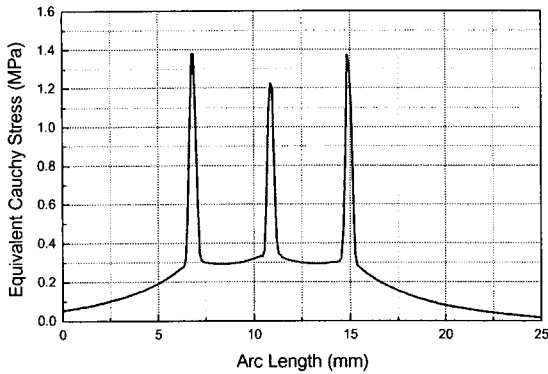


Fig. 6 Initial stress distribution of the inner rubber before swaging process

3.2 강재의 변형 특성

Fig. 7은 조가 슬리브에서 분리되어 제품이 완성된 후의 호스 조립부의 변형 형상을 도시한 것이다. 조가 행정거리를 최대로 전진했을 때의 형상도 이와 유사하였으며, 조가 이탈한 후에는 일부 변형이 복원되는 것을 관찰할 수 있었다.



Fig. 7 Deformed shape of the hose components

조와 슬리브의 접촉 중앙부에 해당하는 두 절점의 시간에 따른 변형 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 8에 이들에 대한 반경방향의 변위를 도시하였다. 절점 528번은 좌측 조 중앙부와 접촉하는 점이며, 절점 556번은 우측 조의 해당 접촉점이다. 두 조의 반지름이 0.1 mm 정도 차이가 있으므로, 최대 전진 시점까지 두 절점의 변위는 거의 일정한 차이를 가지고 평행하게 나타남을 알 수 있다. 조가 후퇴하면 복원 현상으로 인하여 변위는 줄어들게 되는데, 두 절점에서 복원된 변위는 기하학적 강성의 차이로 좌측 부분이 약간 작지만 그 값은 거의 동일하게 약 0.065 mm를 나타냈다.

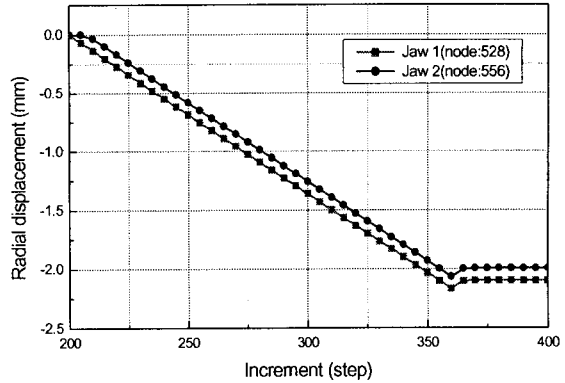


Fig. 8 Radial displacements of two nodes in the center region of the jaws

3.3 호스의 응력 분포 특성

Fig. 9는 조가 최대로 전진한 시점에서 호스 전체에 발생하는 응력 분포를 도시한 것으로, 예상대로 조의 중앙부 아래 부분의 응력이 크게 나타남을 알 수 있다.

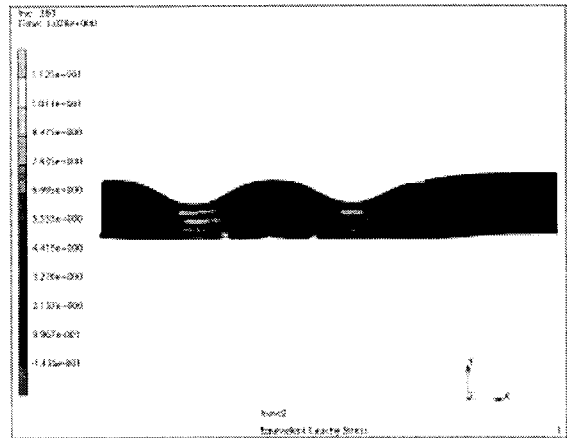


Fig. 9 Cauchy stress distribution of the hose

호스에 발생하는 최대응력은 과단응력의 65%에 해당하는 11.25 MPa으로서 좌측 돌기와 접촉하는 내면고무에서 발생하였으며, 이 부분은 제품의 불량 가능성이 가장 높은 곳이라는 사실과 일치하고 있다.

Fig. 10은 응력이 가장 크게 나타나는 내면고무의 니플 접촉 절점에 대한 상당 코시(Cauchy) 응력을 최대 조 행정 시점에서 길이 방향으로 나타낸 것이다. 좌우측의 두 봉우리는 두 조의 중앙 아래 부분에 해당되는 절점으로서, 그 응력은 각각 5.83 MPa, 5.49 MPa을 나타냈다. 세 개의 피크는 니플 돌기와 접촉하는 점에 해당하는 값으로서 좌

측의 응력이 현저하게 큰 것을 알 수 있다. 이는 두 조의 중심이 중앙 돌기를 통과하지 않고 우측으로 편위되어 있기 때문에 좌측 돌기가 왼쪽 조에 가장 가깝게 위치하기 때문으로 생각된다.

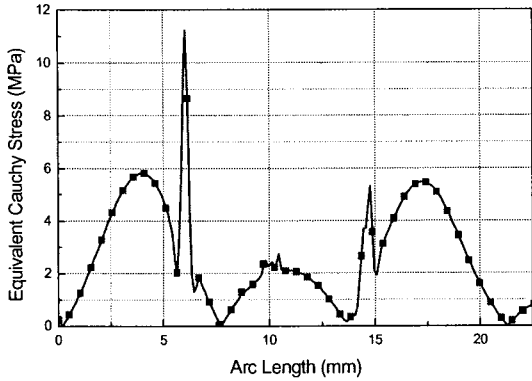


Fig. 10 Cauchy stress variation of the contacted nodes with the nipple

Fig. 11은 스웨이징 작업이 진행됨에 따라 두 조의 중앙 아래 부분에 위치한 니플 접촉 점점의 응력변화를 나타낸 것이다.

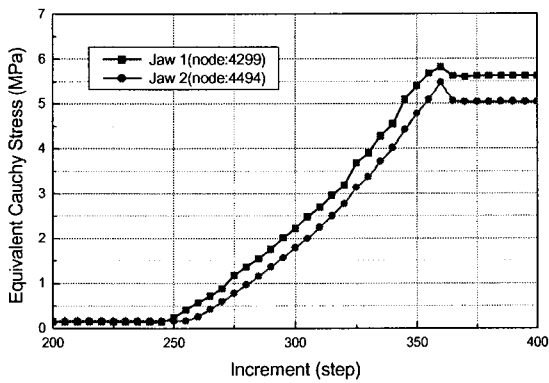


Fig. 11 Stress variations of the contacted node with the nipple during swaging process

두 점점의 응력은 조의 초기 위치의 상이로 인하여 일정한 차이를 나타내고 있으며, 스웨이징이 완료되면 스프링백 효과에 의하여 응력이 감소함을 관찰할 수 있다. 좌측 조의 해당 점점(4299번)의 응력 감소량은 0.20 MPa, 우측 해당 점점(4494번)은 0.43 MPa으로서 좌측에서 응력 복원량이 작게 나타나는데, 그 이유는 좌측 조가 반경방향으로 더 많이 진행하여 슬리브의 소성 변형을 더 증가시킬 뿐만 아니라 슬리브의 좌측의 강성이 다른 부분보다 커서 스프링백 효과가 감소하기 때문으로 파악된다.

3.4. 호스의 변형을 분포 특성

Fig. 12는 조가 분리된 후 내면고무에 발생하는 등가 전변형률 분포 형상을 나타낸 것이며, Fig. 13은 니플과 접촉하는 내면고무의 해당점점의 변형률 변화를 접촉길이에 대해 도시한 것이다.

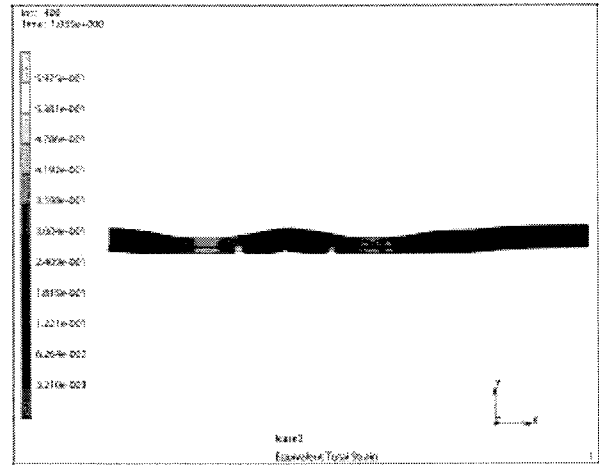


Fig. 12 Total strain distribution of the inner rubber after release of the jaw

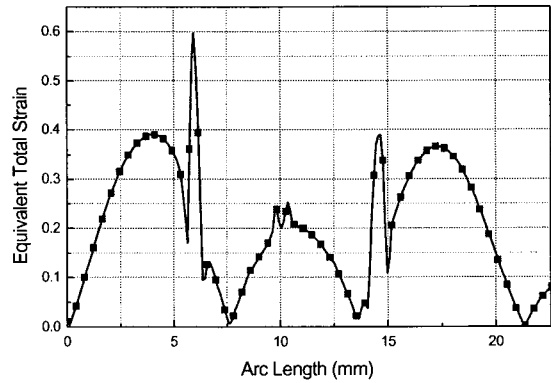


Fig. 13 Strain variations of the contacted node with the nipple during swaging process

변형률이 가장 크게 발생하는 장소는 응력과 마찬가지로 니플의 왼쪽 돌기와 접촉하는 지점이었으며, 최대 변형률은 약 60%로서 다른 접촉부분과 비교해 볼 때 현저하게 큰 값을 나타냈다. 반면에 중간 돌기와 접촉하는 지점의 변형률은 약 25%에 불과하였으며, 우측 돌기 부분에서는 약 36.6%을 나타내므로 호스 제작시 가장 문제시되는 지점은 좌측 돌기 접촉부라는 판단을 내릴 수 있다. 한편 조의 두 중심부 아래부분의 변형률은 좌측 해당점점에서 39%, 우측에서 36.6%를 나타내므로 최대 피크가 나타나는 지점을 제외하고는 가장 큰

변형률을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 스웨이징 작업이 진행됨에 따라 2개의 조 중심부 아래에 있는 내면고무의 니플 접촉점의 변형률 변화를 시간에 따라 도시한 것이다. 해당 절점의 응력 변화와 마찬가지로 조의 반경방향 초기 위치의 차이로 인하여 왼쪽 조의 해당 절점의 변형률이 과정 내내 크게 나타나며, 그 차이 또한 거의 일정함을 관찰할 수 있다. 조가 최대로 전진했을 때 두 절점의 변형률은 각각 39.8%와 38.5%로서 그 차이는 감소하였으며, 그 이후에는 응력과 마찬가지로 일부 복원 현상으로 인해 변형률이 감소하는 현상이 나타남을 알 수 있다. 이 변형률 감소량은 좌측 조의 해당 절점이 1%미만으로 매우 작게 나타났으며, 우측 조의 해당절점은 외부에서 조여진 슬리브의 강성이 약한 관계로 좌측보다 큰 약 2%의 변형률 감소가 발생하였다.

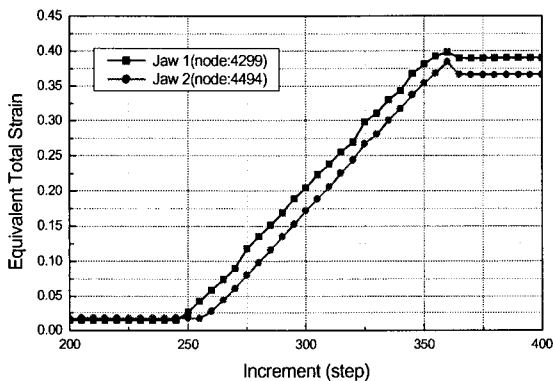


Fig. 14 Strain variations of the contacted node with the nipple during swaging process

4. 결 론

본 연구에서는 스웨이징 시 P/S호스에 발생하는 응력 및 변형률을 유한요소법으로 해석하였다. 재료의 물성치는 실험값을 사용하였고, 실제 작업과정과 동일한 접촉조건을 적용하여 시뮬레이션하였다. 해석은 호스 삽입 과정과 스웨이징 과정을 분리하여 동시에 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 호스 삽입 완료 후 내면고무는 니플 돌기부로 인하여 중간 부분이 강재와 접촉하지 않을 뿐 아니라, 응력 및 변형률이 다소 발생하고 있으므로 스웨이징 과정 해석시 이 삽입과정 대한 해석이 반드시 필요할 것으로 생각된다.
2. 조가 후퇴하여 발생하는 강재 슬리브의 스프링

백에 의한 복원변위는 기하학적 강성의 차이로 좌측 부분이 약간 작지만 그 값은 거의 동일하게 약 0.065 mm를 나타냈다.

3. 내면고무에 발생하는 최대응력과 변형률은 각각 11.25 MPa, 60%로서 니플의 좌측 돌기와 접촉하는 지점에서 발생하였으며, 실제로 이 부분이 불량 가능성이 가장 높다는 사실과 일치함을 알 수 있었다.
4. 조의 중심 아래 부분의 니플 접촉면에서 발생하는 응력과 변형률은 조의 초기 위치의 상이로 인해 좌측 지점에서 항상 크게 나타나므로, 조의 과다 행정거리로 인하여 내면고무에 스크래치(scratch)가 발생할 가능성은 좌측 부분이 더 크다고 판단된다.

후 기

본 연구는 (주)화승R&A 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Hydraulic Hose and Hose Fittings Subcommittee, 1977, "Wire Braid Angle Response Characteristics in Hydraulic Hose", SAE Transaction 972706, Vol.22, pp. 107~126.
2. 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.
3. M. E. Nichols and R. A. Pett, 1995, "Predicting the Life of Automotive Power Steering Hose Materials", Rubber World, Vol. 211, No. 6, pp. 27~31.
4. R. A. Goettler, R. I. Leib and A. J. Lambright, 1979, "Short Fiber Reinforced Hose-A New Concept in Production and Performance", Rubber Chemistry and Technology, Vol. 52, No. 4, pp. 838~863.
5. R. H. Finney, 1987, "Application of Finite Element Analysis", Elastmerics, Vol. 119, No. 1, pp. 18~23.
6. W. F. Breig, 1991, "Finite Element Analysis of Spiral Hose Utilizing Laminate Theory", SAE Transaction 911869, Vol.100, pp. 968~986.

7. 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.
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. S. Nair and A. Dollar, 1997, "Stresses and Strains in High-Pressure Composite Hoses", *J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 119, pp. 351~355.
10. M. Kuipers, M. van der Veen, 1989, "On Stresses in Reinforced High-Pressure Hoses", *Acta Mechanica*, Vol. 80, No. 3, pp. 313~322.
11. 김병탁, 김형제, 2001, "고압호스 제작시 거동 특성에 대한 비선형 유한요소해석", *한국동력기계공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 176~182.
12. 김병탁, 김형제, 2002, "조행정에 따른 섬유보강 호스의 기계적 변형특성에 관한 유한요소해석", *한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 173~178.
13. R. W. Ogden, 1984, "Non-Linear Elastic Deformation", *Ellis Horwood Ltd, & Sons*, pp. 204~222.