

# 강선의 편조각도에 따른 고압호스의 응력변화 특성 Stress Variation Characteristics of a High-Pressure Hose with Respect to Wire Braid Angle

김형제 · 김병탁 · 고성위  
H. J. Kim, B. T. Kim and S. W. Koh

**Key Words** : High Pressure Hose(고압호스), Longitudinal Force(길이방향 힘), Circumferential Force(원주방향 힘), Rebar Layer(보강층), Metal Fittings(금속 용구), Braid Angle(편조각도)

**Abstract** : A high-pressure hose includes rebar layers of the synthetic fiber such as nylon or a steel wire to control internal pressure. The hose assembly is manufactured through the swaging process to clamp the hose into the metal fittings. Usually, the hose behavior is affected by the resultant of the longitudinal and circumferential forces produced by the internal pressure. The rebar layers can appear the most ideal rebar effect when they are arranged to the same direction as the resultant force. The braid angle applied in the rebar layers is an important factor in determining ultimate burst pressure and overall hose life. Failure can occur on the contacted parts of a hose with the metal fittings under severe operating conditions such as high pressure and temperature of the inner fluid. In this paper, the mechanical behavior between the hose and the metal fittings during the swaging process and the stress variation characteristics of a high-pressure hose under a constant applied pressure are analyzed with respect to the braid angle of steel wire using the finite element method.

## 1. 서 론

스웨이징(swaging) 작업을 통하여 양단의 금속 용구(metal fittings)에 체결되어지는 고압호스는 일반적으로 내부에서 작용하는 압력을 지탱하기 위해 나일론과 같은 합성섬유나 나선형 또는 원형 강선의 등의 보강층을 포함하고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 호스는 고무관, 보강층, 그리고 고무덮개로 구성되어 있는데, 고무관은 호스의 빈 공간을 채워주는 밀봉 역할뿐만 아니라, 호스의 내부로부터 외면 보강층까지 압력을 전달하는데 사용된다.

일반적으로 호스 내부에 압력이 가해질 경우, 호스는 길이방향의 힘과 원주방향의 힘의 합력에 의해 영향을 받게 된다. 이 합력 방향과 동일한 각도로 보강층이 형성될 때 가장 이상적인 보강효과를 나타낼 수 있으며, 보강층에 적용된 각도는 최대 파

단압력과 전체 호스 수명을 결정짓는 중요한 요인이 된다<sup>2),3)</sup>. 또한 고압호스는 지속적인 운전 조건하에서 상당한 기계적 하중과 열하중을 받고 있으므로, 호스와 금속 용구 사이의 체결이 적당하지 못할 경우 응력과다 부위의 파손이나 체결력이 약한 부분에서 누유 등이 발생하여 호스의 성능에 좋지 못한 영향을 미칠 수 있다<sup>4),5)</sup>. 이와 같은 발생 가능한 장애요인을 파악하기 위해서는 호스 부품 제작시의 기계적 거동 특성뿐만 아니라 실제 운전하에서 호스에 발생하는 응력 수준을 종합적으로 검토해 볼 필요가 있다. 이 경우 호스 제작시 호스의 응력에 영향을 미치는 인자로는 스웨이징 작업시 조(jaw)의 행정거리, 재료의 종류, 금속 용구의 형상, 보강층의 배열 등을 들 수 있으며, 압력 작용하의 호스의 응력에는 편조각도가 가장 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

이 연구에서는 호스와 금속 용구의 체결 시와 제작 완료된 호스가 실제 압력 작용하에서 하중을 받고 있을 때 강선의 편조각도에 따른 호스의 응력변화 특성을 유한요소법으로 해석하였다. 해석 시의 호스와 금속 용구는 하중과 형상의 대칭성을 고려하여

접수일 : 2005년 4월 22일  
김병탁(책임저자) : 부경대학교 기계공학부  
E-mail : btkim@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1538  
김형제 : 부경대학교 정밀기계공학과 대학원  
고성위 : 부경대학교 기계공학부

축대칭 모델로 구성하였으며, 실제 제작과정과 동일한 조의 운동 및 접촉조건을 부여하였다. 특히 호스에 포함되어 있는 보강층을 모델링하기 위해서는 특성 목적용 보강 요소(rebar element)<sup>(6),(7)</sup>가 필요한데, 이 요소는 보강층의 위치, 가닥수, 편조각도(braid angle) 등의 매개변수에 해당 값을 입력하므로써 그 특성이 결정된다. 이 연구에 사용된 편조각도는 실제 호스 제작시 사용되고 있는 값을 기준으로 그 각도를 변경하여 해석을 수행하였으며, 그 해석 결과는 추후 고압호스 설계시 성능 개선을 위한 편조각도의 조정이나 실운전 상태에서 나타나는 예기치 못한 장애요인에 대한 합리적인 대처 방안을 모색하는데 유용한 자료를 제공해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 유한요소 해석

### 2.1 호스의 형상 및 편조각도

Fig. 1은 고압호스의 형상을 개략적으로 도시한 것이다. 내·외면고무, 중간고무로 구성되어 있으며, 호스 내부에 작용하는 압력을 지탱하기 위하여 내·외면 보강층을 포함하고 있다. 강선으로 구성되어 있는 보강층은 가는 8가닥으로 굵은 12줄이 2겹으로 꼬인 형태로 이루어져 있으며, 각 강선의 피치(pitch)는 44.3mm이고 가는 한 가닥 강선의 굵기는 0.06mm이다.

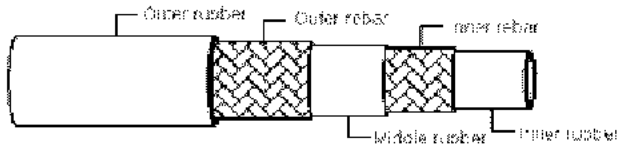


Fig. 1 Schematic analysis model of a high-pressure hose

일반적으로 호스 내부에 압력이 가해지면 고압호스는 Fig. 2와 같이 길이방향의 힘과 원주방향의 힘의 합력에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 합력방향과 동일한 각도로 보강층이 형성될 때 가장 이상적인 보강효과를 나타낼 수 있다. 여기서 합력방향인 호스 길이방향과 이루는 각을 중립각(neutral angle)이라고 하며, 다음과 같은 유도식에 의해 구할 수 있다.

Fig. 2에서 중립각  $\theta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tan \theta = \frac{F_c}{F_L} = \frac{\pi D}{L} \quad (1)$$

여기서,  $L$ 은 피치(pitch)길이를 나타내며, 길이방향의 힘( $F_L$ )과 원주방향의 힘( $F_c$ )는 다음 식으로 표현된다.

$$F_L = \frac{\pi D^2 P}{4} \quad (2)$$

$$F_c = \frac{PDL}{2} \quad (3)$$

여기서  $P$ 는 내부압력을 나타낸다.

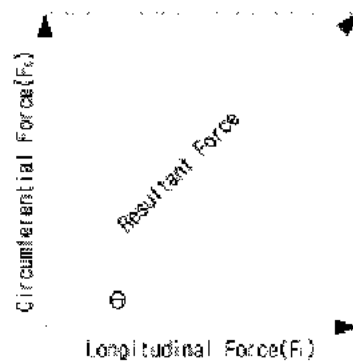


Fig. 2 Force components by internal pressure

식 (1)에서 식 (2)와 (3)을 대입하면, 중립각  $\theta$ 를 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{2} = 54.74^\circ \quad (4)$$

### 2.2 초기 유한요소모델

Fig. 3은 이 연구에서 스웨이징 작업시 호스와 금속 용구사이의 체결부위에 대한 기계적 거동해석을 위하여 사용된 초기 유한요소모델을 도시한 것이다. 모델 구성시 해석 물체가 호스의 중심축을 기준으로 대칭인 구조이기 때문에 축대칭 모델을 사용하였으며, 해석에 사용된 초기 요소의 수는 7769개, 절점의 수는 8307개이다.

고압호스는 앞서 서술한 바와 같이 3개의 고무층과 2개의 보강층으로 구성되어 있지만, 실제 호스는 완전 접합상태이기 때문에 보강층을 제외한 고무층은 하나의 물체로 정의하여 격자를 구성하였다. 보강층은 상용 프로그램인 MARC에서 축대칭 보강요소(element 166)를 사용하였으며, 이 요소는 보강층의 가닥수, 면적, 편조각도 등의 매개변수를 필요로 한다. 보강층의 위치는 인서트(insert) 기능을 사용하여 결정하였다.



Fig. 3 Initial finite element model of a hose during the swaging process

2.3 재료의 물성치

초기 유한요소모델은 크게 호스와 금속 용구로 구성되어 있다. 호스는 고무와 보강재로 구성되어 있는데, 먼저 고무에 대한 물성치는 내·외면고무와 중간고무를 인장시험과 압축시험을 실시하여 응력-변형률 선도를 구하였다. 이렇게 구한 선도를 해석 프로그램인 MARC에 입력하면 식 (5)와 같은 변형률 에너지 함수  $W$ 에 대한 여러 모델의 상수를 구할 수 있는데, 각 모델을 실험치와 비교해 본 결과, 일반화된 Mooney-Rivlin 2차 불변량 모델이 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 4에 이 모델과 실험치를 비교하여 도시하였으며, 이 모델로 구한 각 고무재료에 대한 상수는 Table 1에 나타내었다.

$$W = \sum_{i+j=1}^n (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (5)$$

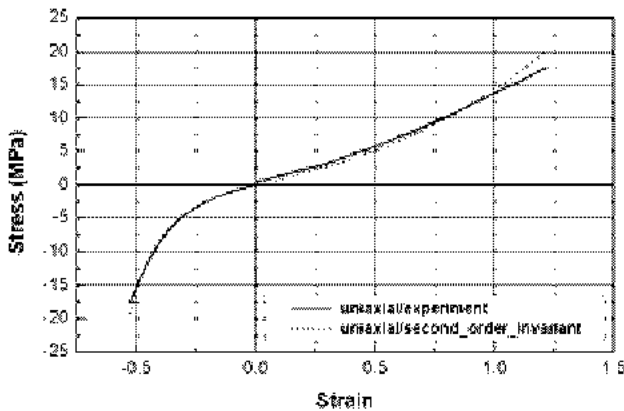


Fig. 4 Stress-strain curve of the inner rubber in 2th invariant model

Table 1 Calculated rubber material constant for the second order invariant

(unit : MPa)

	$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{11}$	$C_{20}$
Inner rubber	2.38281	-0.78872	0.04512	0.50527
Outer rubber	1.33394	-0.45644	0.11302	0.02709
Middle rubber	0.95818	-0.12974	0.059	0.03207

보강재로 사용된 경강은 강피로부터 열간압연된 와이어로프(wire rope)를 상온에서 인발하여 만드는 데, 인장강도가 우수한 재료이다. 이 해석에서는 사용된 경강의 항복강도, 인장강도, 그리고 종탄성계수 각각 333.5 MPa, 568.9 MPa, 그리고 220 GPa를 사용하였다. 금속 용구에 사용된 강재는 열처리한 SWCH10A로서 기계적 성질은 기계 구조용 탄소강 SM10C와 유사한 성질을 가지고 있으며, 표준 시험편 5개를 사용하여 인장시험을 실시하였다. 그 결과 전형적인 연강의 특성을 나타내고 있으므로, 항복강도와 인장강도는 261.9 MPa, 427.7 MPa이고 종탄성계수는 210 GPa를 사용하였다<sup>8)</sup>.

2.4 해석 방법

이 해석에서는 스웨이징 작업시 호스와 금속 용구 사이의 체결부위에 대한 기계적 거동해석과 실제 운전 상태에서 고압호스 내부에 압력을 가했을 경우 호스와 보강층에서 발생하는 응력의 변화 양상을 분리하여 해석하였다. 가압 해석시 해석모델은 금속 용구를 제외한 호스 자체만을 사용하여 해석을 수행하였으며, 호스의 한 쪽 끝은 강체운동을 방지하기 위하여 길이방향으로 고정시키고 다른 쪽은 자유단으로 하여 호스 내부에 압력을 가하였다. 또한 보강층에 적용된 편조각도는 호스의 성능이나 수명을 결정짓는 중요한 요인이기 때문에 실제 호스 제작시 사용되고 있는 편조각도 54.74°를 기준으로 ±10°로 나누어 기계적 거동해석과 가압해석을 수행하였다. 또한 대변형 조건과 갱신 라그랑지(updated Lagrangian)법을 적용하여 해석을 수행하였다.

3. 해석 결과

3.1 스웨이징 과정

3.1.1 호스의 변형률과 응력분포

Fig. 5는 편조각도 54.74°인 경우 조가 슬리브(sleeve)에서 완전히 분리되어 제작이 완료되었을 때의 변형 형상을 도시한 것으로서, 조가 최대로 전진했을 때의 변형 형상도 탄성에너지에 의한 미소 변위의 회복 현상을 제외하고는 유사한 형태로 나타났다.

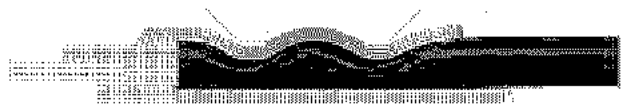
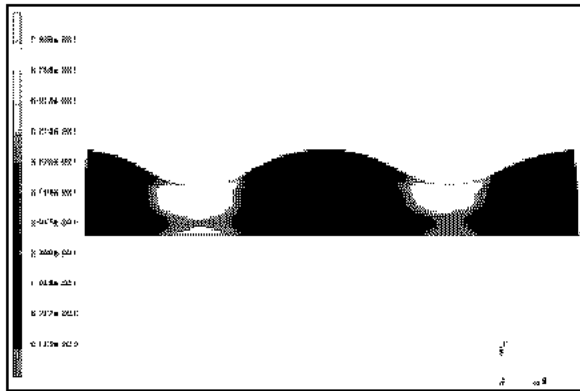
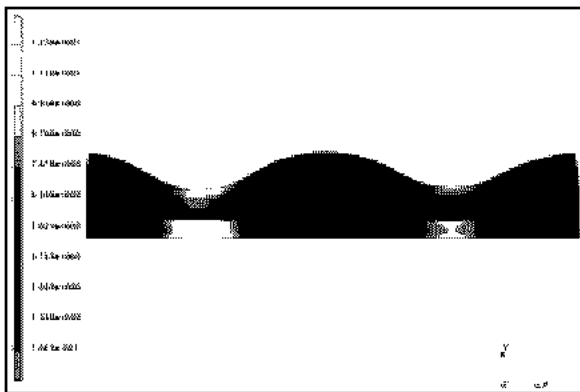


Fig. 5 Deformed shape of the model after the jaw release (angle = 54.74°)

고압호스 제작시 불량으로 누유가 발생한다면가 응력 과다로 인한 결함이 발생한다면 그 부분은 금속 용구와 접촉하고 있는 내·외면고무일 가능성이 가장 크다고 할 수 있으므로, 편조각도가 54.74°일 때 조가 최대로 전진한 시점에서 내·외면 고무를 포함한 호스 전체의 변형률과 응력분포를 Fig. 6에 도시하였다.



(a) Equivalent total strain



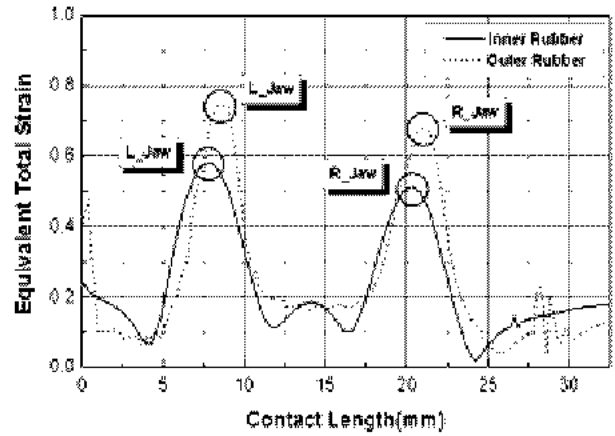
(b) Equivalent Cauchy stress

Fig. 6 Strain and stress distribution of a hose (angle = 54.74°)

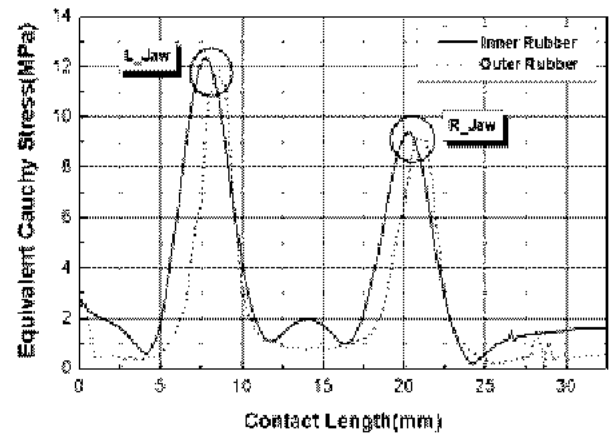
Fig. 7은 금속 용구와 접촉하고 있는 내·외면고무에 발생하는 변형률과 응력을 접촉 길이에 따라 나타낸 것이다. 중립각 54.74°를 기준으로 최대 발생 변형률과 응력은 두 조의 중앙부에서 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 우측 조보다 좌측 조에서 더 큰 값이 발생하였다. 조가 최대로 전진한 시점에서 두 조의 중앙부에 해당하는 절점이 약간 좌측으로 편위하는 경향을 관찰할 수 있었다.

두 조의 중앙부를 기준으로 내·외면고무에서 발생하는 변형률은 내면고무보다 외면고무에서 더 큰

값이 나타나고 있는 반면에 응력은 거의 유사한 값이 발생하였다.



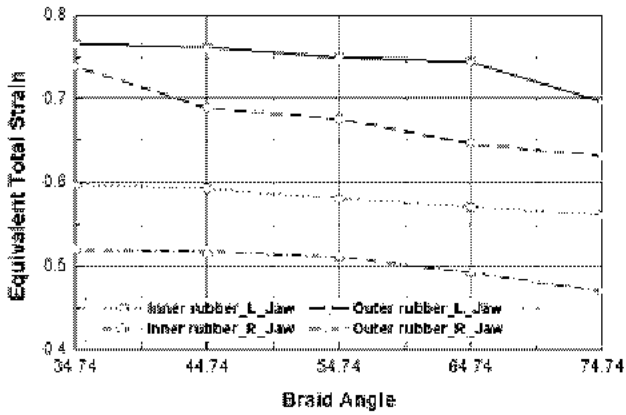
(a) Equivalent total strain



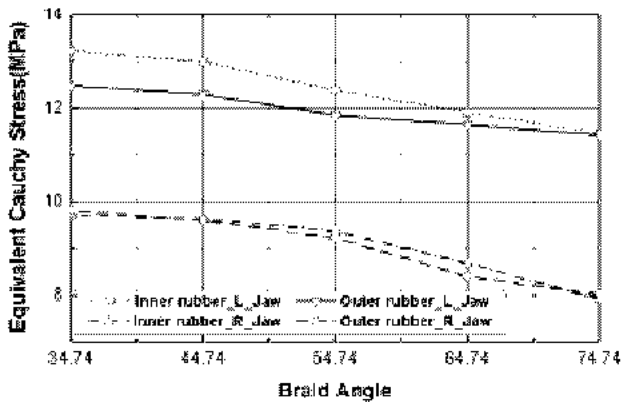
(b) Equivalent Cauchy stress

Fig. 7 Strain and stress variation with respect of the contact length(angle = 54.74°)

Fig. 8은 내·외면고무의 두 조의 중앙부에서 발생하는 최대 변형률과 응력을 편조각도별로 도시한 것으로서, 편조각도가 증가할수록 최대 변형률과 응력은 감소하는 경향이 나타났다. 최소 편조각도와 최대 편조각도를 비교해보면, 변형률의 감소폭은 스웨이징에 따른 변화량이 심한 외면고무에서 상대적으로 크게 발생하였으며, 최대 응력은 내·외면고무에서 거의 유사한 값으로 감소하였다. 최소 편조각도 34.74°인 경우 외면고무의 좌측 조에서 발생하는 변형률이 파단 대수 변형률(81.1%)의 약 94.5%에 해당하는 값인 76.7%가 발생하였다. 따라서 강선의 편조각도가 30°이하인 경우에는 호스 제작시 과다한 변형으로 인한 고무의 파손 가능성을 배제할 수 없다 하겠다.



(a) Equivalent total strain



(b) Equivalent Cauchy stress

Fig. 8 Strain and stress variation with respect of the braid angle

### 3.1.2 보강층에 대한 응력분포

호스 내부에 작용하는 압력을 제어할 뿐만 아니라 인장강도를 지탱하기 위해 고무층에 보강층을 포함하고 있는데, Fig. 9는 중립각 54.74°인 경우 두 보강층에서 발생하는 응력을 접촉 길이방향으로 도시한 것이다. 최대 발생응력은 내·외면 보강층 모두 조 중앙부에서 거의 동일한 값을 나타내었다.

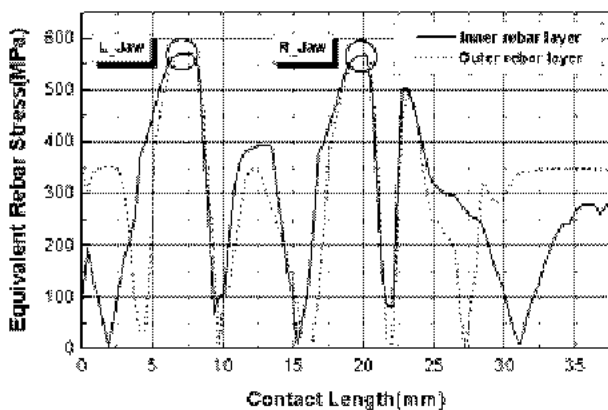


Fig. 9 Equivalent Rebar stress variation of the rebar layers (angle = 54.74°)

Fig. 10은 두 보강층의 조 중앙부에서 발생하는 최대 응력을 편조각도별로 나타낸 것으로서, 편조각도가 증가할수록 최대 발생응력은 감소하는 경향이 나타났다. 또한 중립각 54.74°을 기준으로 편조각도가 작을 경우에는 내·외면 보강층의 조 중앙부에서 발생하는 최대 응력이 거의 유사하였다. 편조각도가 커질 경우에는 내면 보강층보다는 외면 보강층에서 더 큰 응력이 발생하였으며, 최대 발생응력의 감소폭이 급격하게 증가하였다.

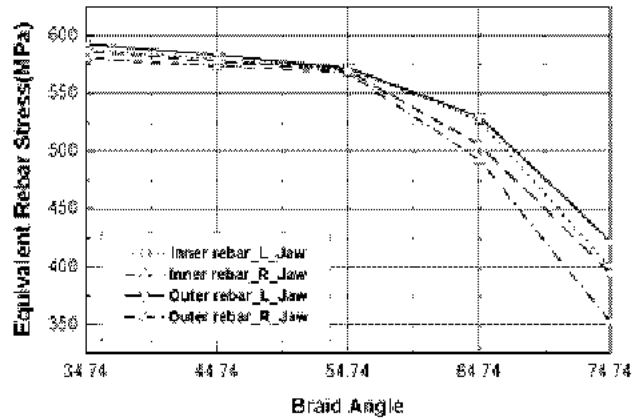


Fig. 10 Equivalent Rebar stress variation with respect of the braid angle

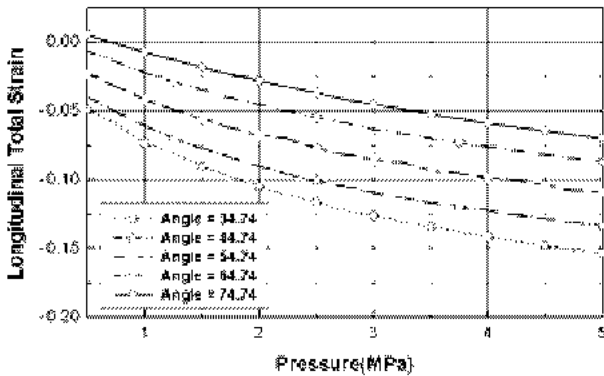
따라서 스웨이징 작업시 중립각보다 낮은 각도에서 발생하는 높은 변형률과 응력은 체결력을 상승시켜 누유 등과 같은 호스의 성능을 저하하는 요인들을 방지하는데 효과적일 수 있지만, 두 보강층에서 발생하는 응력이 너무 높기 때문에 호스 제작과정에서 결함이 발생할 가능성은 높아진다고 볼 수 있다.

### 3.2 가압 과정

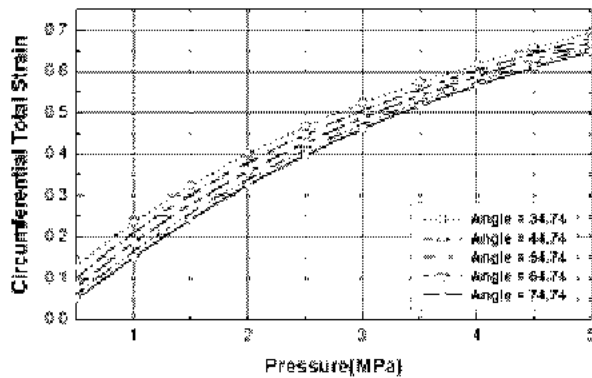
Fig. 11은 동력 조향장치용 펌프와 기어 박스 (box)를 연결시켜 주는 고압호스 내부에 압력 5.0 MPa을 가했을 때 길이방향과 원주방향으로 발생하는 변형률을 그래프로 도시한 것이다. 내부압력이 증가할수록 길이방향의 변형률은 감소하고 원주방향의 변형률은 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 12는 내부압력 5.0 MPa일 때 길이방향과 원주방향의 변형률을 편조각도별로 도시한 것이다. 편조각도가 증가할수록 원주방향의 변형률은 감소하고 길이방향의 변형률은 증가하고 있는데, 이는 편조각도가 감소할수록 보강층이 길이방향과 평행을

이루고 있기 때문이다. 편조각도에 따른 변형률의 변화폭은 길이방향이 원주방향보다 크기 때문에 길이방향이 편조각도의 변화에 따른 영향은 원주방향보다 좀더 많이 받고 있음을 알 수 있지만, 편조각도별로 변형률은 원주방향이 상대적으로 길이방향보다 더 큰 값을 나타내고 있기 때문에 원주방향으로 더 심한 변형이 발생함을 알 수 있다.



(a) Longitudinal total strain



(b) Circumferential total strain

Fig. 11 Strain variation of the inner rubber with respect to the pressure

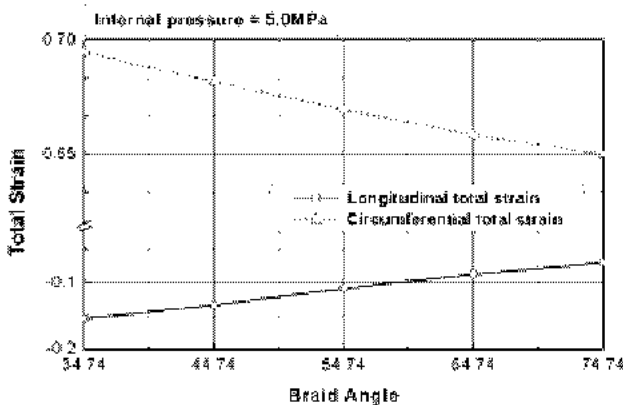
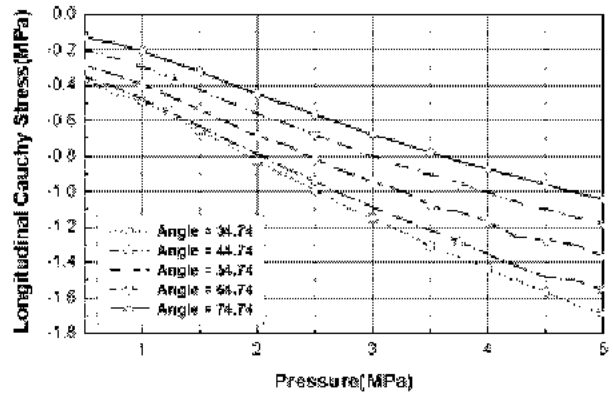
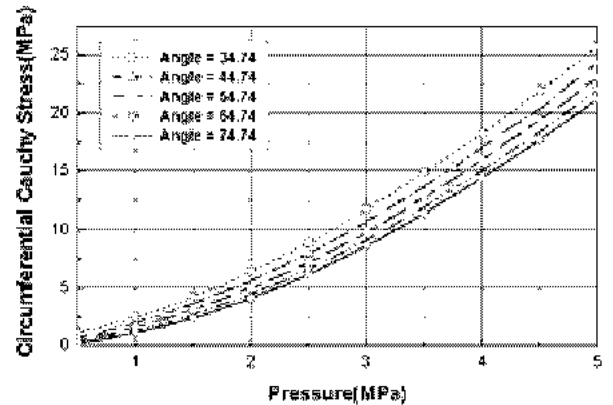


Fig. 12 Strain variation with respect to the braid angle

Fig. 13은 내부압력의 증가에 따라 호스에서 발생하는 응력을 길이방향과 원주방향으로 도시한 것이다. 내부압력이 증가할수록 길이방향의 응력은 감소하고 원주방향의 응력은 증가하는 경향을 나타내었다.



(a) Longitudinal Cauchy stress



(b) Circumferential Cauchy stress

Fig. 13 Stress variation of the inner rubber with respect to the pressure

Fig. 14는 내부압력 5.0 MPa일 때 길이방향과 원주방향의 응력을 편조각도별로 나타낸 것으로서, 편조각도가 증가할수록 길이방향의 응력은 증가하고 있으며 편조각도별로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 원주방향의 응력은 편조각도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 변형률과 마찬가지로 원주방향의 응력이 길이방향보다 더 큰 값이 발생하고 있지만, 편조각도에 따른 응력의 변화폭은 변형률과 반대로 원주방향이 길이방향보다 더 많은 영향을 받고 있음을 관찰할 수 있다.

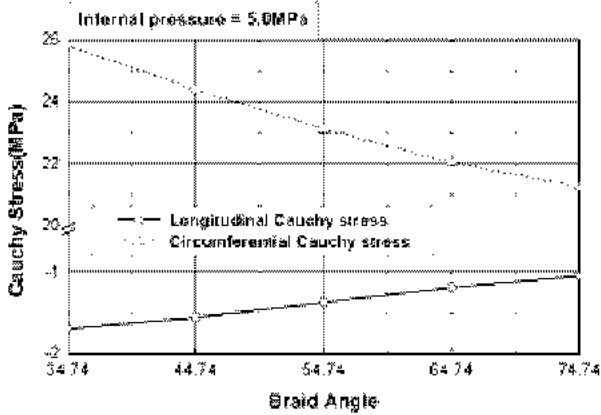
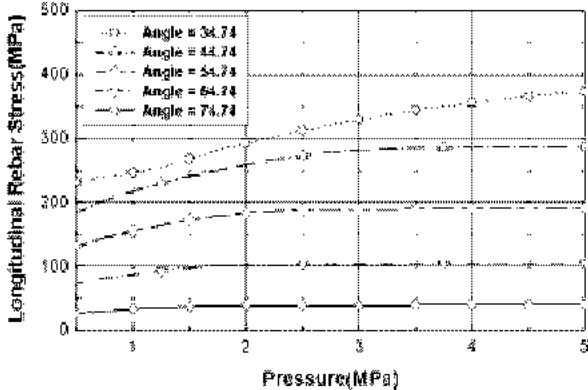
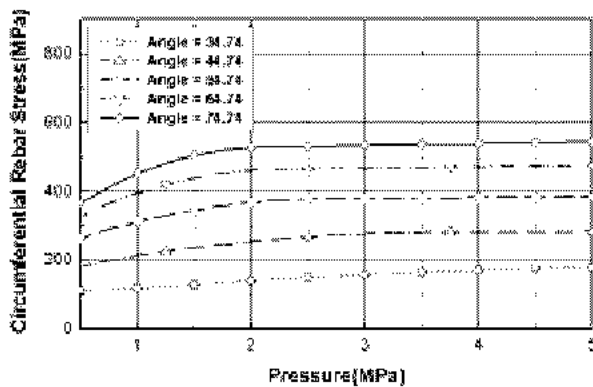


Fig. 14 Stress variation with respect to the braid angle

Fig. 15는 중간고무에 포함되어 있는 내·외면 보강층 중에서 내면 보강층에서 발생하는 응력을 압력 증가에 따라 길이방향과 원주방향으로 도시한 것으로서, 외면 보강층 또한 유사한 형태의 그래프가 나타났다. 압력이 증가함에 따라서 길이방향과 원주방향 모두 응력이 증가하였으며, 길이방향에서 중립각보다 낮은 각도를 제외하고 압력이 어느 정도에 도달하였을 때 증가하는 값이 거의 유사함을 관찰할 수 있었다.



(a) Longitudinal rebar stress



(b) Circumferential rebar stress

Fig. 15 Stress variation of the inner rebar layers

Fig. 16은 작용 압력이 5.0 MPa일 때 내·외면 보강층에서 발생하는 최대 응력을 편조각도별로 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 편조각도가 증가할수록 길이방향의 응력은 감소하고 원주방향의 응력은 증가함을 알 수 있다. 또한 내·외면 보강층에서 발생하는 응력은 편조각도 34.74°를 제외하고는 거의 유사한 값이 나타났으며, 편조각도 44.74°일 때 두 보강층의 길이방향과 원주방향에서 발생하는 응력이 거의 동일한 값을 나타내므로 강도 면에서 가장 양호한 결과를 나타낼 수 있었다. 한편 경강의 항복강도와 인장강도를 고려해 볼 때, 편조각도를 75°이상으로 크게 할 경우 강선의 응력이 과도하게 발생할 수 있으므로, 추후 강선의 편조각도 설계시에는 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

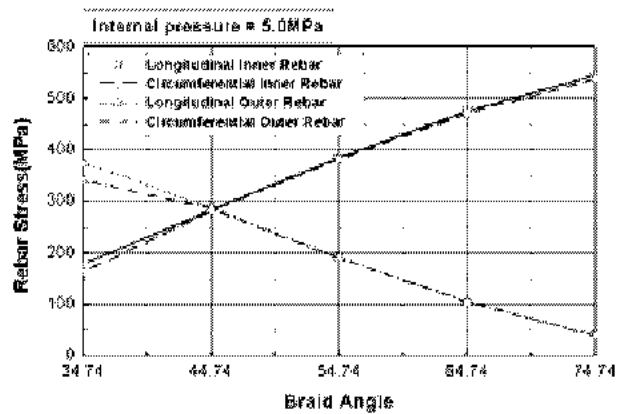


Fig. 16 Stress variation with respect to the braid angle

#### 4. 결 론

이 연구에서는 스웨이징 작업시 호스와 금속 용구사이의 체결부위에 대한 기계적 거동해석과 실제 운전 상태에서 호스 내부에 압력을 가했을 경우 호스의 변형 특성을 유한요소법으로 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 호스 부품 제작시 호스에 발생하는 최대 응력과 최대 변형률은 조의 중앙부에서 발생하였으며, 편조각도가 증가할수록 그 값은 감소하는 경향을 나타내었다.
2. 스웨이징 과정에서 보강층에 발생하는 응력은 편조각도가 증가할수록 감소하였으며, 그 감소폭은 중립각 이상에서 현저하게 크게 나타났다.
3. 압력이 증가함에 따라 내면고무에 발생하는 응력

과 변형률을 살펴본 결과, 길이방향의 값들은 감소하는 반면, 원주방향의 값들은 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 편조각도가 증가함에 따라 길이방향의 응력과 변형률은 증가하였으나 원주방향의 값들은 감소하였으며, 길이방향보다는 원주방향에서 상대적으로 더 큰 응력과 변형률의 값이 발생하였다.

4. 가압과정에서 두 보강층에 발생하는 응력은 서로 유사하게 나타났으며, 편조각도가 증가함에 따라 길이방향의 응력은 선형적으로 감소하는 반면 원주방향의 응력은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.
5. 보강층의 강선에 발생하는 응력을 기준으로 판단해 볼 때, 호스 내부의 압력이 5.0 MPa인 경우에는 여러 편조각도 중에서 44.74°가 호스의 성능면에서 가장 양호한 것으로 나타났다.

#### 참고 문헌

1. W. F. Breig, 1991, "Finite Element Analysis of Spiral Hose Utilizing Laminate Theory", SAM Transaction 911869, Vol. 100, pp. 968~986.
2. S. Nair, A. Dollar, 1997, "Stresses and Strains in High-Pressure Composite Hoses", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 119, pp. 351~355.
3. P. C. Bregman, M. Kuipers, H. L. J. Teerling and W. A. van der Veen, 1992, "Strength and Stiffness of a Flexible High-Pressure Spiral Hose", Acta Mechanica, Vol. 97, pp. 185~204.
4. M. E. Nicols, R. A. Pett, 1995, "Predicting the Life of Automotive Power Steering Hose Materials", Rubber World, Vol. 211, No. 6, pp. 27~31.
5. 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.
6. Hydraulic Hose and Hose Fittings Subcommittee, 1977, "Wire Braid Angle Response Characteristics in Hydraulic Hose", SAM Transaction 972706, Vol. 22, pp. 107~126.
7. M. Kuipers, M. van der Veen, 1989, "On Stresses in Reinforced High-Pressure Hoses", Acta Mechanica, Vol. 80, No. 3, pp. 313~322.
8. 김형제, 김병탁, 김광희, 윤문철, 2004, "동력 조향 장치용 호스와 금속 용구사이의 접촉력에 관한 연구", 한국동력기계공학회, 추계학술대회 논문집, pp. 140~146.