

브레이크 호스 레이아웃 해석 및 재료 물성 확보 실험

Experiment on Material Properties and Brake Hose Layout Analysis

김윤규*† · 이연원**
Youn-Kyou Kim*† and Yeon-Won Lee**

(Received 7 May 2021, Revision received 30 August 2021, Accepted 30 August 2021)

Abstract : A brake system with hydraulic devices has a pipeline (brake hose) to transmit the fluid force generated by the brake. The layout design of brake hoses is one of the important factors that greatly affects the performance and life of the braking system. In this research, the material properties of each hose composed of composite materials were obtained through direct experiments, and then the layout analysis of brake hoses was carried out. During this layout analysis, an independently developed program was used to reduce the time required. It was confirmed that the shape of brake hose layout obtained followed well that of the actual experiment. In addition, the reinforcing layer (braided layer) was found to have a greater effect than the rubber layer on the formation of the brake hose layout.

Key Words : CAE, Layout analysis, Brake hose, Nonlinear analysis, Rubber property experiment

1. 서 론

자동차에는 고무 부품이 지닌 밀봉성, 신장성, 탄성 복원능력 및 진동감쇄 특성 등을 이용한 호스, 웨더스트립, 타이어, 방진용 댐퍼와 같은 다양한 고무 부품이 사용된다. 이러한 고무류 부품들도 기타의 다른 기계류 부품과 마찬가지로, 제품의 개발단계에서부터 다양한 설계 기술이 요구되고 있다.

다양한 설계 기술 중 대상 부품의 3차원적인 움직임을 제품 개발 및 양산에 앞서 선행검토를 수행하기 위해 설계된 치수를 바탕으로 3D 시뮬

레이션을 시행하여 제품의 성능 및 특성을 예측하고 평가하는 CAE(Computer Aided Engineering)를 도입하여 비용 및 시간을 절약하고 있다. 특히, 자동차에 사용되는 고무 부품들의 설계와 성능평가에 CAE를 적극적으로 사용하고 있다. 그러나 고무가 가지는 초탄성 특성에 의해 고무 제품에 대한 CAE를 통한 성능예측은 상당히 어렵다.

고무와 편조사를 사용하여 제작되는 자동차용 브레이크 고무호스의 레이아웃 설계는 대부분 지그를 이용한 레이아웃 실험을 통해 수행되고 있어 설계변경 및 제작 대응에 어려움이 많다. 이를 보완하고자 브레이크 호스의 레이아웃 설계에 대

*† 김윤규(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4180-7260>) :
과장, ㈜화승 R&A
E-mail : kyk0082@hsrna.com, Tel : 055-379-3852
**이연원(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>) :
교수, 부경대학교 기계설계공학과

*† Youn-Kyou Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4180-7260>)
: The Section Head, HWASEUNG R&A.
E-mail : kyk0082@hsrna.com, Tel : 055-379-3852
**Yeon-Won Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-3749-8119>)
: Professor, Department of Mechanical Design Engineering,
Pukyong National University.

한 시뮬레이션을 CAE를 이용하여 시간과 비용을 줄이고자 하는 연구가 진행되고 있다.

최근의 비선형 초탄성에 관련된 다양한 유한요소해석 코드의 발전과 고무의 물성을 평가하는 모델의 개발 등에 관한 연구가 많이 진척되었다. 강문원(2012)¹⁾은 브레이크 호스의 레이아웃 설계 신뢰성 확보를 위한 CAD 템플릿을 개발하여 브레이크 호스의 레이아웃 형상분석을 수행하였고, 양현모(2015)²⁾ 등은 역추적 기법 등을 활용하여 산업용 유압호스에 대한 가상물성치를 추정하는 방법을 제안하였으며, 서영석(2017)³⁾ 등은 호스 경로 시뮬레이션 소프트웨어에서 해석 물성치 값을 역추적 기법을 이용하여 최적화하는 방법을 제안하였고, Baaser H.(2007)⁵⁾는 유한요소해석으로 브레이크 호스의 최적 길이를 산출하는 방법에 관한 연구를 하였다. 그리고 김형제(2005)⁶⁾ 등은 고압호스의 편조각도에 따른 스웨이징 작업 시 호스와 금속 용구 사이의 체결부위에 대한 기계적 거동과 실제 운전 상태에서 내압 변화에 따른 변형 특성을 연구하였다.

기존 연구의 경우, 호스에 관한 다양한 연구가 진행되었지만 기초 연구에 머물러 있거나, 경향성을 파악하는 정도에 그치고 있다.

본 연구에서는 자동차의 제동에 필수적으로 사용되는 브레이크 호스의 레이아웃 설계를 위한 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 고무 물성을 확보하기 위해 실제 시험을 통하여 측정하고, 계수화하였으며, CAE에 적용하여 실제 레이아웃에 대한 해석을 수행하였다.

2. 브레이크 호스 물성 실험 및 재료상수의 도출

2.1 브레이크 호스의 구성

Fig. 1에는 다층의 복합물성으로 구성된 브레이크 호스의 형태를 나타내었다. 브레이크 호스는 내면 고무층, 내구성능 향상과 브레이크의 작동 압력을 버티기 위한 내면과 외면 보강층, 내외면 보강층의 마찰력 방지 및 쿠션 역할을 하는 중간 고무층, 외부 환경 변화에 대응하고 보강층의 오



Fig. 1 Brake hose layer structure

염 등에 의한 성능저하를 방지하는 외면 고무층으로 구성된다. 이러한 브레이크 호스는 브레이크 시스템의 말단인 브레이크 캘리퍼 및 드럼에 장착되어 차량의 제동압력 전달을 위한 관로로 사용된다.

2.2 브레이크 호스 장착과 레이아웃 설계

Fig. 2에는 자동차의 실제 주행 시 휠의 움직임에 따른 브레이크 호스의 레이아웃 분포를 중첩하여 나타낸 것으로, 자동차 핸들의 조향에 따른 좌, 우 방향전환을 위한 회전운동과 차량의 주행에 따라 발생하는 롤링(rolling), 요잉(yawing), 피칭(pitching), 그리고 바운싱(bouncing)과 같은 복합적인 운동시 브레이크 호스의 레이아웃을 보여준다. 브레이크 호스는 브레이크 캘리퍼와 차체의 브레

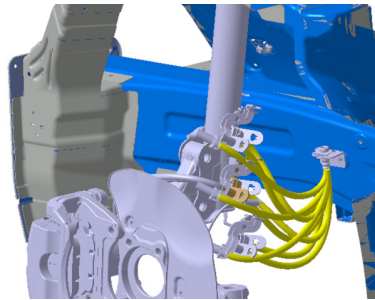


Fig. 2 Analysis coordinates

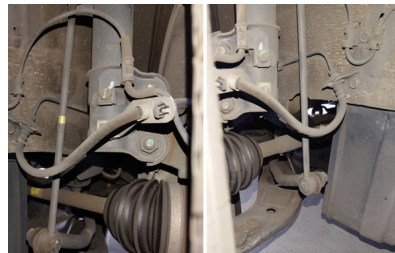


Fig. 3 Actual installation of front wheel brake hose (driver's seat side/ passenger's seat side)

이크 시스템을 연결하기 위해 휠하우스 내부의 좁은 틈에 장착되고, 주행 중 발생하는 다양한 운동으로 발생한 움직임의 영향으로 차체와 휠 등에 접촉되어서는 안 된다. 접촉될 시에는 마찰, 찌힘 등에 의하여 손상을 입게 되므로 성능과 수명에 있어 치명적인 문제가 발생할 수 있다. Fig. 3에는 이러한 브레이크의 실차 장착을 나타낸 사진으로, 주변부와 간섭 없이 설치된 것을 확인할 수 있다.

이러한 이유로 브레이크 호스는 높은 장착성을 요구받는다. 특히 장착 시 시작 부분과 끝부분인 차체와 캘리퍼 접촉부 그리고 중간 고정부를 제외한 주변부와 장착에 의한 간섭, 운동에 의한 접촉 등이 발생하지 않도록 하는 것을 레이아웃 설계(layout design)라고 한다. 이는 자동차의 설계 시 주어진 캘리퍼의 운동 반경과 차체와의 거리를 기준으로 하여 위치가 결정된다. 이러한 위치는 상대적인 것으로 차체를 고정된 것으로 보고 휠이 운동하는 것으로 가정하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 4의 포지션(position)은 브레이크 호스의 운동에 대한 데이터(data)로 레이아웃의 변화에 영향을 주는 중요한 데이터이다.

Fig. 5의 브레이크 호스는 일반적인 형태의 브레이크 호스를 직선화한 것으로, 차체에 장착되기 위해 브라켓(braket)이 장착된 쪽과 캘리퍼에 장착되기 위해 아이조인트(eye joint)가 장착된 쪽이 있고, 그리고 양단 사이에 중간 고정부가 되는 부분

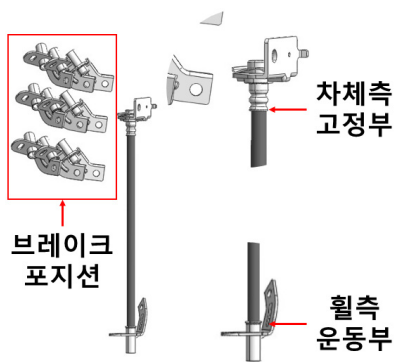


Fig. 4 Brake hose mounting positions according to wheel movement

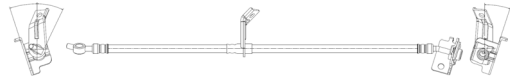


Fig. 5 Brake hose with straight line and angle design

의 피팅(fitting)부와 브라켓이 있으며, 브라켓들과 아이조인트 사이의 각도의 주어진 값에 따라 브레이크 호스의 레이아웃을 형성하는 호스의 꼬임이 만들어진다. 이러한 자동차 휠(wheel)의 운동과 장착 시 발생하는 꼬임에 의한 복잡한 운동을 통해 브레이크 호스는 레이아웃을 형성하게 된다. 이는 캘리퍼와 차체 사이의 좁은 틈에 브레이크 호스가 장착되어질 때와 운동을 할 때 주변부와의 간섭과 접촉을 피할 수 있는 레이아웃을 가진다.

따라서 이러한 레이아웃을 해석을 통해 보다 정확하게 예측하고자 한다면, 이를 위한 정확한 재료 물성의 확보가 선행되어야 한다.

2.3 재료상수 확보를 위한 실험

2.3.1 고무 물성 실험과 재료상수의 도출

고무는 사용 목적과 제조사의 차이에 의해 기계적 물성은 차이가 있으며, 하중과 변형에 대한 상관성을 예측하기 위해 변형률 에너지 함수(strain energy function) W 의 사용이 필요하다. 본 연구에서는 브레이크 호스의 변형률이 100% 이하인 것으로 보고 Mooney-Rivlin(Polynomial) 함수를 사용하여 해석에 적용되는 물성을 구하였다.⁸⁾ 식 (1)은 Mooney-Rivlin 함수에 대해 일반적인 형태를 나타낸 것이고, I_1 과 I_2 는 탄성변형률의 1차, 2차 주 변형률 불변량을 나타내는 항이고, C_{ij} 는 고무의 뒤틀림과 관계된 물질상수이고, D_1 는 체적변화와 관계된 물질 상수이며, J 는 압축율을 나타내는 값이다. 1차항만을 고려하고, 비압축성으로 가정할 경우, 식 (2)와 같이 정리된다.

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^2 \quad (1)$$

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

연구에서 브레이크 호스에 사용된 고무는 모두 EPDM(에틸렌프로필렌 고무, Ethylene Propylene rubber)을 기반으로 하고 있으며, 내면고무, 중간고무, 외면고무 모두의 물성은 각각의 사용 목적에 맞추어 제작되며 물리적 물성의 차이가 있다. 사용된 고무 Material Parameter를 계산하기 위해 각각의 고무에 대해 단축인장(uniaxial test), 이축인장(biaxial test), 그리고 순수전단(pure shear test)를 수행하였다.

고무 물성을 얻기 위한 실험은 KS M 6518 가황고무 물리 실험 방법 규격에서 정의하는 실험 방법에 따라 실험을 진행하였다. 단축인장 실험은 최대 인장하중 100 kgf, 최대 인장속도 500 mm/min으로 실험이 가능한 장비를 통해 진행되었고, 고무의 단축인장 실험뿐만 아니라, 편조사의 실험에도 실험 체결 지그를 교체하여 사용하였다. Fig. 6은 실험에 사용된 시편(KS M 6818에서 지정하는 4호 시편)과 실험결과에 대한 그래프를 나타냈다.

이축인장 실험은 최대 인장하중 500 kgf, 최대 인장속도 500 mm/min으로 실험이 가능한 장비를 통해 진행되었다. Fig. 7에는 이축인장 실험에 사용된 시편(직경 75 mm, 16 방향의 인장을 위한 그립부와 측정을 위한 20 mm 간격의 표점이 있음)과 2축인장 실험 결과를 나타낸 것으로, 변형 정도를 25%, 50%, 75%로 하고 변형에 대한

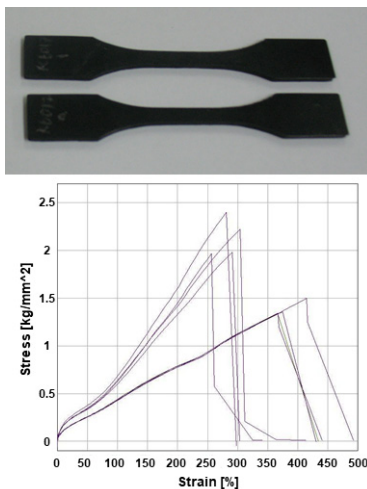


Fig. 6 Specimen and results of uniaxial Test

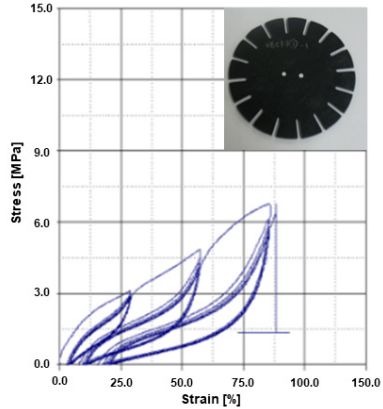


Fig. 7 Specimen and results of biaxial Test

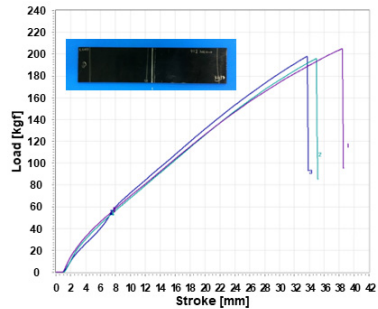


Fig. 8 Test specimen[aspect ratio 1:20] and test results of pure shear test

Strain-Stress Curve를 측정하였다. 실험 결과, 이력과 응력완화 현상으로 초기의 변형 곡선과 이후의 변형 곡선이 변형률의 변화 범위에 따라서 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 변형 정도가 커질수록 앞선 실험의 이력으로 인하여 측정점이 변화하는 것을 볼 수 있다. 측정 이후 결과 정리를 수행하고 단축 인장과 유사한 형태의 Strain-Stress 값을 추출하여 사용하였다.

단축 및 이축 인장실험과 더불어 순수 전단 실험은 최대 인장하중 2000 kgf, 최대 인장속도 500 mm/min으로 실험이 가능한 시험기를 통해 진행되었으며, Fig. 8에는 사용된 시편과 결과 그래프를 나타내었다. 사용된 시편은 1:20의 중횡비를 가지는 측정영역과 그립 부분을 가지는 직사각형 형태의 시편이며, 실험의 결과는 단축인장과 같은 형태의 그래프를 Strain-Stress Curve로 도출하였다.

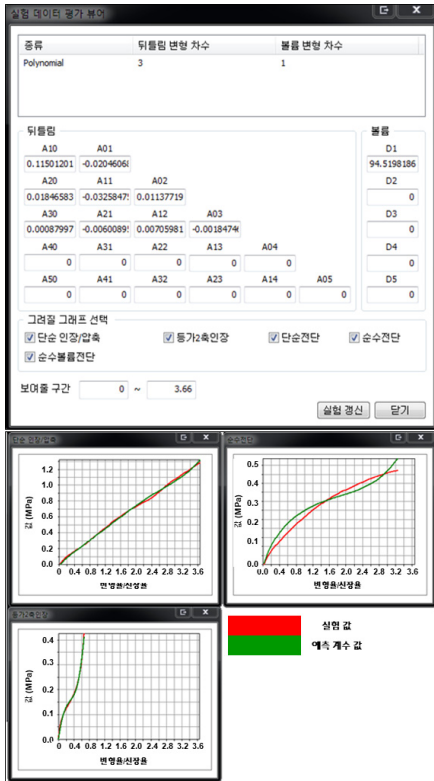


Fig. 9 Calculation of strain energy density function

단축인장 실험 외에 이축인장 실험 및 순수전단 실험을 통하여 해석에 사용된 물성을 추출한 이유는 단축인장 실험만으로 물성을 평가할 경우, 재료의 강성이 과평가되어 수치해석에 이용 시 문제가 될 수 있고, 이는 해석결과의 정확도를 낮추는 문제를 야기하기 때문이다.⁹⁾

실험결과를 바탕으로 한 변형을 에너지밀도 함수는 해석프로그램 내부의 실험결과 변환 프로그램에 이용하여 Material Parameter 값으로 변환되며, Fig. 9과 같은 형태로 적용되었다.

2.3.2 편조사 물성 실험과 재료상수 도출

편조사 물성은 단축인장 실험을 통하여 취득하였다.

Fig. 10은 편조사 인장실험 결과 그래프이다. 브레이크 호스에 사용되는 내면과 외면 편조사에 대한 실험결과를 나타내었고, 이를 정리하여 평균값을 추출한 후 직교이방성 물성치를 계산하였다.

직교이방성 물성치의 계산이론은 Jin-Rae Cho 등⁴⁾이 연구한 결과 참조하였으며, 이를 바탕으로 해석에 사용된 프로그램인 Midas IT사의 NFX에서 사용될 수 있도록 독자적으로 개발된 서브 프로그램을 이용하여 실험물성을 바탕으로 직교이방성 물성치를 계산하여 본 해석에 사용하였다.

Fig. 11에는 직교이방성 물성치를 계산하기 위해 사용된 직교이방성 물성치 해석프로그램의 사용과 결과에 대하여 나타내었다.

브레이크 호스에 사용된 보강층은 브레이드(braid) 형태로 직조되어 있으며, 브레이크 호스 거동에 있어 큰 영향을 미친다. 하지만 보강층은 실제 의한 복잡한 형태의 구조로 각 실에 대한 정확한 구조와 형상을 복합적인 고무층과 함께 해석하는 것은 해석의 정확도를 높일 수 있으나, 비현

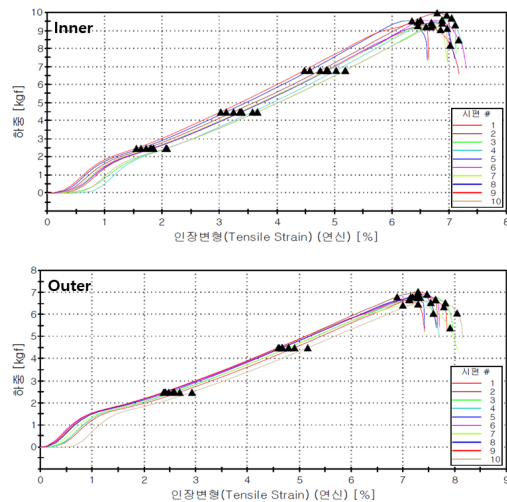


Fig. 10 Layered yarn test results



Fig. 11 Sample window in orthotropic material property analysis program

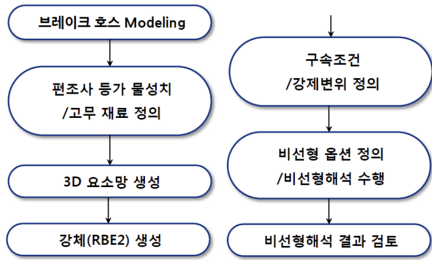


Fig. 12 Analysis flow diagram

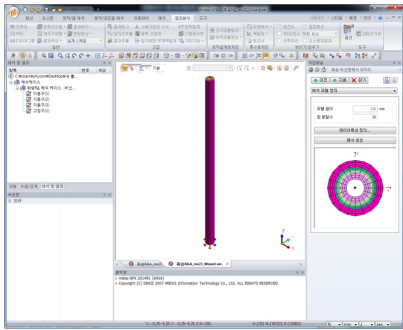


Fig. 13 Sample window

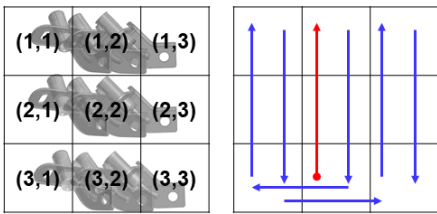


Fig. 14 Analysis coordinates

실적인 것으로 사용된 재료의 평균적인 등가물성을 반영하는 것이 현실성이 있으며, 본 연구에서는 보강층이 가지는 인장, 압축, 뒤틀림 등에 관련한 직교이방성 물성치를 등가물성으로 계산하여 적용하였다.

3. 레이아웃 해석

3.1 레이아웃 해석 절차

레이아웃 해석은 비선형정적 해석으로 해석 대상인 브레이크 호스의 대변형을 통한 관체의 변형 형상을 구현하고 분석하는 것에 의의가 있다.

해석의 절차는 Fig. 12에 나타난 것과 같은 절차로 수행되며, Fig. 4에서 나타난 브레이크 호스 모델링을 바탕으로 하여 강제변위를 추출한다. 강제 변위는 직선화 모델링된 부분을 기준으로 하는 기준좌표와 휠의 운동에 의한 상대 운동좌표를 가진다. 일련의 해석 프로세스는 Fig. 13과 같은 형태로 해석에 사용된 프로그램인 NXF 상에서 자동화하여 해석 전처리 단계(pre process)를 일괄적으로 처리할 수 있도록 서브프로그램으로 개발하여 해석에 사용하였다.¹¹⁾ 개발된 프로그램을 통해 기존에 해석 전처리에 사용된 시간 대비 해석 준비에 사용된 시간을 2시간 기준으로 하였을 때 약 50% 정도 단축할 수 있었다.

3.2 레이아웃 해석결과 검토

해석의 수행에 있어 레이아웃 구현을 위한 좌표의 이동은 Fig. 14에서 같이 번호를 부여하고, (3,2)를 시작으로 하여 (3,3)에서 끝이 나도록 해석의 강제변위를 지정하였으며, 이는 앞서 Fig. 4에서 설명된 위치를 기반으로 한다.

상기의 과정을 기반으로 하여 진행한 해석의 결과를 Fig. 15에 나타내었으며, 3차원 스캐너를 통해 얻어진 실측형상을 함께 도시하였다. 레이아웃 형성을 위한 좌표이동과 회전에 대한 검증은 브라켓 모델링을 이용하였다. 브라켓 모델링의 넓은 면에 대해 2D 면 격자를 생성하고, 강체(rigid body) 설정을 이용하여 강제변위에 따라 호스 격자와 함께 이동과 회전을 하도록 하였다. 각각의 강제변위에 해당하는 브라켓 모델링 면과 이동된 2D 면 격자는 Fig. 15에서와 같이 일치하는 것을 확인하였다. 이에 대해 (2,2)를 기준으로 할 때 대각선 위치에 있는 (1,1), (1,3), (3,1), (3,3)에 대하여 결과를 나타내었고, 레이아웃 해석 시 변위를 추출하기 위한 기준이 되는 브라켓 모델의 추출면과 일치함을 확인하였다.

또한 함께 도시한 3차원 스캐너를 이용하여 얻어진 실측형상과 해석결과 간의 차이 값을 확인한 결과, 최대 10 mm 정도의 차이가 있는 것을 확인하였으며, 이는 해석을 통해 허용오차 범위 내 실측과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

그리고 호스 각각의 층별 응력의 검토를 통하여 각 층에 적용된 물성의 영향도를 확인하였다.

브레이크 호스에 사용된 고무 소재의 최대 인장 응력은 외면층 고무는 10 MPa 이상, 내면층 고무는 15 MPa 이상의 값을 가지고, 보강층에 사용된

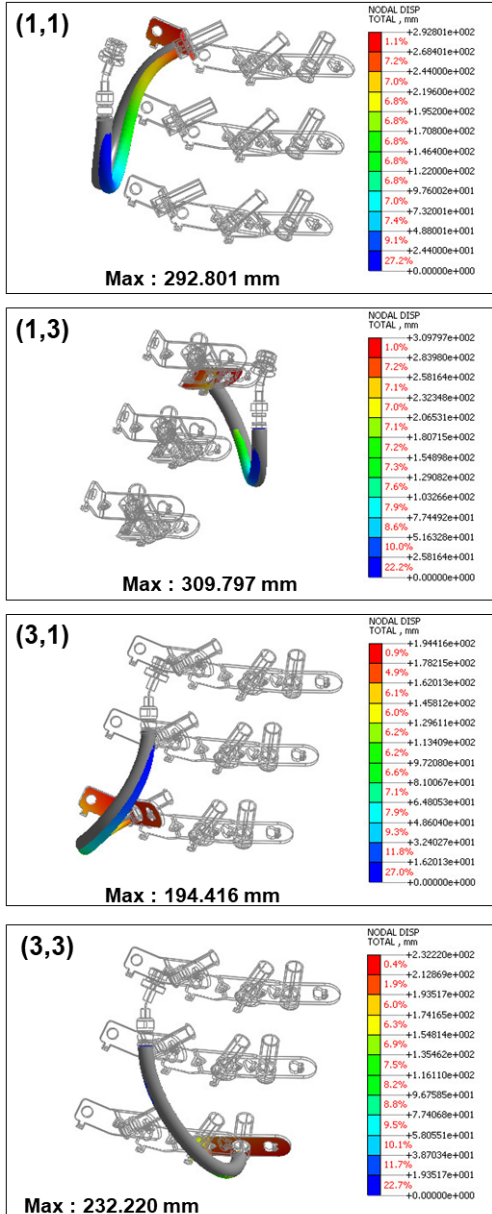


Fig. 15 Layout comparison between analysis and experiment

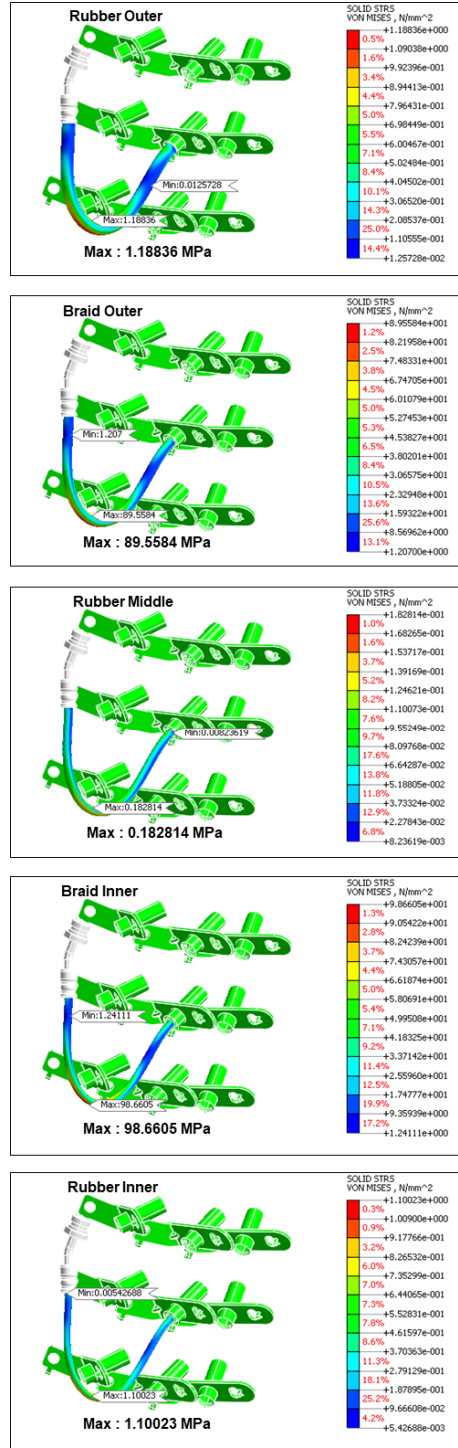


Fig. 16 Layer stress distribution at (2,2)

편조사의 최대 인장응력은 약 800 MPa 이상이다.

Fig. 16에는 해석결과 중에 (2,2)에서의 층별로 발생한 값을 Von-Mises 응력으로 나타내었으며, 해석결과를 층별로 나누어 각각에 대하여 도시하고, 확인한 결과, 고무층에서 응력은 외면에서 가장 높은 1.19 MPa의 값이 발생하였고, 평균적으로는 0.771 MPa가 발생하였으며, 편조사에서는 내면의 보강층에서 98.66 Mpa로 최대 응력이 발생하였고, 평균적으로 86.782 MPa가 발생하였다. 이를 통해 레이아웃 형성 시 발생하는 응력과 소재의 최대인장 응력을 비교해 보았을 때, 레이아웃의 형성 시 발생한 응력에 의한 호스 자체의 손상은 없는 것으로 판단된다. 아울러 레이아웃에 의해 변형된 호스에서 발생한 고무와 편조사 간의 응력 차이는 편조사의 응력을 기준으로 하였을 때 고무가 받은 응력은 약 1% 정도로, 호스의 레이아웃 형성에 있어 편조사의 역할이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 내면 편조와 외면 편조의 응력 값을 비교하면, 평균적으로 내면 편조의 응력이 약 10% 정도 높게 나오는 것을 확인하였고, 응력이 발생하는 위치는 호스의 길이 방향을 기준으로 하였을 때 유사한 지점에서 발생한 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 브레이크 호스의 레이아웃을 해석적으로 구현하기 위해 재료 물성을 실제 측정하고, 재료상수를 구하였으며, 이를 적용한 해석의 수행 절차를 검토하고 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고무층과 보강층에 사용된 물성의 최대인장 응력값과 레이아웃 해석결과로 얻어진 층별 응력값의 평균치를 비교하여 볼 때, 고무층의 경우, 최대 인장응력(내면 고무층 15 MPa, 외면 고무층 10 MPa) 대비 약 1%, 보강층의 경우, 최대 인장응력 800 MPa 대비 약 12%의 응력이 발생하는 것을 확인하였고, 이를 통하여 레이아웃 형성 시 과도한 응력에 의한 호스의 손상은 없는 것으로 판단된다.

2) 다층의 소재에 대한 응력을 비교하였을 때 고무층의 발생 응력의 평균값은 보강층의 발생 응력을 기준으로 할 때 약 1% 정도로서 보강층에서 발생한 응력이 높은 것이 확인되었으며, 발생 응력을 통하여 보강층의 편조사가 레이아웃 형성에 있어 주요한 인자인 것으로 판단된다.

3) 3차원 스캐너를 통해 얻은 실측형상과 해석 결과의 정합성을 검토한 결과, 최대 10 mm 정도의 차이가 있는 것을 확인하였고, 이를 통해 해석을 통한 레이아웃 검토의 유효성을 확인하였다.

4) 레이아웃 해석 프로세스 작성과 개발된 서버 프로그램의 활용을 통해 해석수행의 전처리 시간을 기존 대비 절반 정도로 감소시킬 수 있었다.

브레이크 호스의 레이아웃을 해석적으로 검토하기 위한 재료 물성의 확보와 해석기법을 확립하여 그 유용성을 확인하였다. 물성 데이터베이스를 구축하고 개발된 해석 프로세스를 활용하면 브레이크 호스 외의 다양한 관체에 대한 레이아웃의 사전검토가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 화승알앤에이에서 진행된 레이아웃 해석기술 개발을 토대로 작성되었으며, 연구를 위한 기반 마련과 수행에 함께 노력해주신 관계자 여러분께 많은 감사를 드립니다.

Author contributions

Y. K. Kim; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Resources, Software, Validation, Visualization and Writing-original draft, Y. W. Lee; Writing-review & editing and Supervision.

References

1. M. W. Kang, 2012, "A Study on Prediction of the Brake Hose Deformation Associated with a Vehicle Motion", SAE Technical Paper

- 2012-01-0224.
(<https://doi.org/10.4271/2012-01-0224>)
2. H. M. Yang, B. Y. Koo, M. H. Choi, T. H. Kim and J. J. Kim, 2015, "Computing of virtual material properties for hydraulic hoses using a backward tracing scheme", Proceedings of the Society of Computational Design and Engineering Conference, pp. 128-137.
 3. Y. S. Seo, M. H. Choi, M. H. Lim and J. J. Kim, 2017, "Computing Optimal Bending Stiffness of Hydraulic Hoses for Various Patterns to Increase the Accuracy of Hose Routing Using Analytic Methods", Society for Computational Design and Engineering, Korean Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 445-454.
 4. J. R. Cho, D. H. Jeon and G. T. Roh, 2004, "Finite Element Analysis of Power Steering Hose Subject to Internal Pressure", KSME, Junal of KSME A, Vol. 28, No. 1, pp. 181-188.
(<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2004.28.2.181>)
 5. H. Baaser, 2007, "Global optimization of length and macro-micro transition of fabric-reinforced elastomers with application to a brake hose", Computational Materials Science, Vol. 39, No. 1, pp. 113-116.
(<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2006.02.023>)
 6. H. J. Kim, S. W. Koh and B. T. Kim, 2005, "Stress Variation Characteristics of a High-Pressure Hose with Respect to Wire Braid Angle", The Korean Society For Power System Engineering, Journal of Power System Engineering, Vol. 9. No. 3, pp. 71-78.
 7. Y. S. Seo, B. Y. Koo, H. B. Jeon, M. H. Choi, T. J. Kim, D. H. Sung and J. J. Kim, 2016, "Measure of virtual material properties for hydraulic hoses using a backward tracing scheme and simulation software", Proceedings of the Society of Computational Design and Engineering Conference, pp. 83-89.
 8. W. D. Kim, W. S. Kim, D. J. Kim, C. S. Woo and H. J. Lee, 2004, "Mechanical Testing and Nonlinear Material Properties for finite Element Analysis of Rubber Components", Computational Materials Science, KSME, Junal of KSME A, Vol. 28, No. 6, pp. 848-859.
(<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2004.28.6.848>)
 9. H. B. Yim, M. H. Choi and J. J. Kim, 2013, "Routing Path Design of Hydraulic Hose Considering Static Deflection", Proceedings of the Society of Computational Design and Engineering Conference, pp. 80-83.
 10. https://en.wikipedia.org/wiki/Mooney-Rivlin_solid
 11. MIDAS IT, midas NFX Analysis Manual