

자동차 배기계 Bellows의 응력 해석

김진봉*

*한서대학교 항공기계학과

e-mail:jbkim@hanseo.ac.kr

The Analysis for the Stress of the Flexible Tube in an Automotive Exhaust System

Jin Bong Kim*

*Dept. of Aeronautical & Mech. Eng., Hanseo University

요 약

자동차 배기계는 제한된 설치 공간으로 인하여 내구성과 연계된 형상을 최적화하여야 한다. 본 연구에서는 자동차 배기계를 구성하고 있는 Flexible Tube(Bellows)의 형상에 따른 응력 변화를 해석하였다. 응력 해석은 유한요소법을 이용하였고, 해석에는 8절점 쉘 요소를 사용하였으며 절점수는 100,000 정도이다. 아울러 Bellows의 변위량이 크게 발생하는 것을 고려하여 기하학적 비선형 해석을 실시하였으며 Bellows의 변형량은 끝단에서 6mm의 변위가 발생하도록 하였다

1. 서론

Bellows는 배기 계통에 대한 진동 중 엔진 진동을 차단시켜 배기 pipe로의 진동 전달을 방지하고 열팽창으로 인한 Pipe의 팽창 및 수축을 흡수하여 배기 pipe에 과도한 변형이 발생하는 것을 방지하며 아울러 pipe의 진동이 엔진에 전달되어 미치는 영향을 방지하는 역할을 담당하고 있다. 따라서 다양한 용도에 따른 최적의 Bellows의 설계를 위한 설계 기준의 확립이 요구된다.

한편 Bellows는 직관으로부터 1~2 번째 산이나 골 부근에서 파괴가 되고 있어 이에 대한 원인 규명 및 내구도 향상을 위한 대책이 강구되어야 하는 실정이다. 아울러 배기계통에서의 Bellows는 설치공간이 제한되어 있기 때문에 산수, 산 높이, 전 길이, 판재 두께, 겹수등을 복합적으로 고려하여 내구성의 향상 대책 등을 강구하여야 한다.

승용차용 Bellows는 승용차 모델이 개발시 이에 적합한 신제품을 개발하여야 하기 때문에 개발의 신속성이 요구되며 이에 따라 기본 설계로부터 제품 개발에 소요되는 기간이 매우 짧게 된다. 따라서 각종 형식의 자동차에 대한 체계화된 data를 축적함으로써 신속한 모델 개발을 이룰 수 있어야 한다.

일부에서는 기존의 모델을 일부 변경하거나 예측되는 형상에 대한 시제품을 제작하여 수정 보완하는 형식의 연구 개발이 진행되어 왔으나, 신제품 개발에 소요되는 시간과 경비의 부담이 막대하여 사전 해석에 의한 방법이 필수적이다. 따라서 해석을 통한 사전 검증 후 시제품을 제작하여 개발에 따른 시간 및 경비를 절약함으로써 제품의 신뢰성 향상 및 경쟁력을 증대 시킬 뿐 아니라 관련 data를 지속적으로 축적함으로써 지속적인 독자 모델을 개발하고 있다.

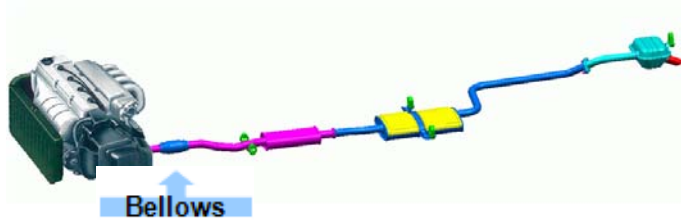
이상에서 다양한 변수를 지닌 승용차용 Bellows에 대하여 독자 모델 개발을 위한 기본적인 설계 data의 축적이 요구되어 본 연구에서는 Bellows의 각종 형상 변수에 대한 응력 해석을 실시하였다.

2. 배기계 구조 및 해석 조건

2.1. 자동차 배기계 및 Bellows 구조

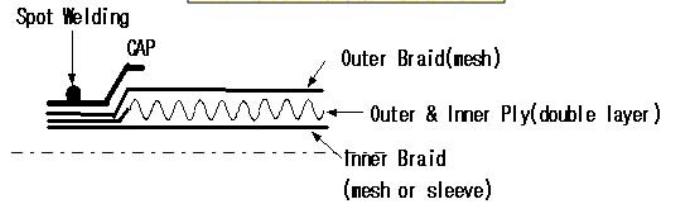
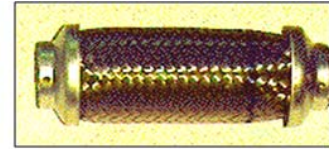
자동차 배기계는 엔진에서 나오는 배기 가스를 모아서 뒤로 전달하여 공해물질을 정화시켜 배출하는 역할을 하며 자동차 하부에 장착되어 있기 때문에 외장형 보다는 기능에 맞는 소재를 사용하여야 한다.

[그림 1]은 자동차 배기계의 구조를 나타내는 것으로 배기계는 사용온도에 따라 2 부분으로 구분된다. center pipe 이후 tail pipe 까지는 비교적 온도가 낮아서 cold end 라고 하며 그 앞 부분은 hot end 라고 한다.



[그림 1] 자동차 배기계 형상

Flexible tube의 형상은 [그림 2]와 같다. 자동차 배기계 부품 소재로 대부분 페라이트계 스테인레스강이 사용되고 있지만, 그 중에서 Flexible tube는 가공성과 용접성 및 우수한 고온에서의 기계적 성질이 요구되기 때문에 오스테나이트계 스테인레스 강이 사용되고 있다. Flexible tube는 주름관 모양을 하고 있으며 엔진의 진동과 배기계 전체의 열팽창을 흡수하는 부품이다. 이 부품은 겨울철에 눈이 많이 내리는 지역에서 살포되는 제설염이 표면에 부착되어 급격한 복합 부식이 발생하는 부위이다. 최근까지는 304 계열의 강이 주로 사용되어 왔지만 자동차 부품 보증 연한이 증가하면서 우수한 내 고온염 부식성을 지닌 재료들의 사용이 늘고 있다. 고온염 부식을 방지하기 위해서는 단순히 Cr만을 높이는 것만으로는 충분하지 못하기 때문에 이의 향상 효과가 큰 Si를 수% 첨가한 강종이 적용되고 있다. 이러한 강에는 XM15J1, 302B, DIN 1.4828등이 대표적이다.



[그림 2] Bellows 형상

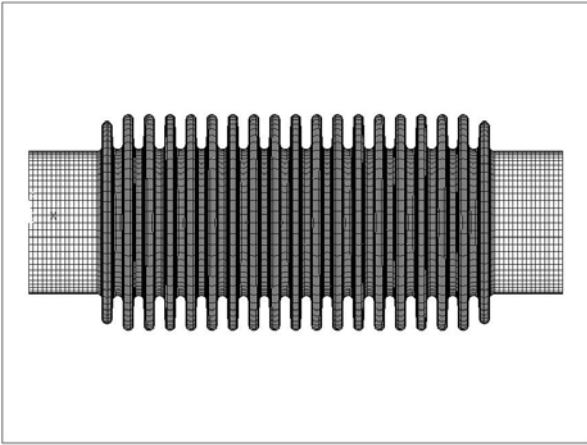
2.2. 해석 조건

본 연구에서는 산수가 19개인 Flexible tube를 기준으로 ANSYS를 이용하여 응력해석을 실시하였다. 해석에 사용된 재료의 물리적 특성 및 유한요소 모델은 [표 1]에서 보는 바와 같으며 유한요소 모델 형상은 [그림 3]과 같다. 유한요소 모델의 전체 절점수는 산수에 따라 차이가 있지만 100,000~120,000개 정도이고 8절점 쉘 요소를 이용하였다.

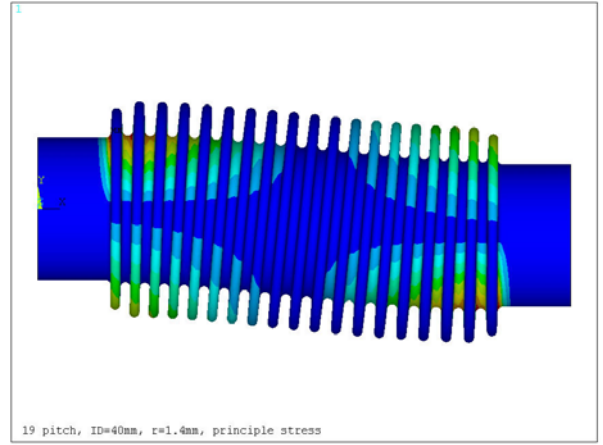
실제 차량에 장착되는 벨로우즈는 엔진이 시동될 때나 정지될 때, 차량의 급가속이나 급정지시, 범프 등의 통과 시 과도한 변위량이 발생한다. 따라서, 대부분의 자동차 제작사의 벨로우즈에 대한 시험조건은 변위량을 6mm 내외로 설정하는 것이 일반적이다. 그러므로, 이러한 변위량을 고려한다면 선형해석으로 적절한 결과를 얻기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 벨로우즈의 변위량이 크게 발생하는 것을 고려하여 대 변위해석인 기하학적 비선형해석을 수행하였으며, 벨로우즈의 변형량은 끝단에 6mm의 변위가 발생하도록 하였다.

[표 1] 물리적 특성 및 유한요소 모델

두께 (mm)	산수(개)	항복응력 (MPa)	접선계수 (MPa)	탄성계수 (GPa)	요소 종류
0.25	9~19	224(500℃)	2,000	188	8-절점 쉘



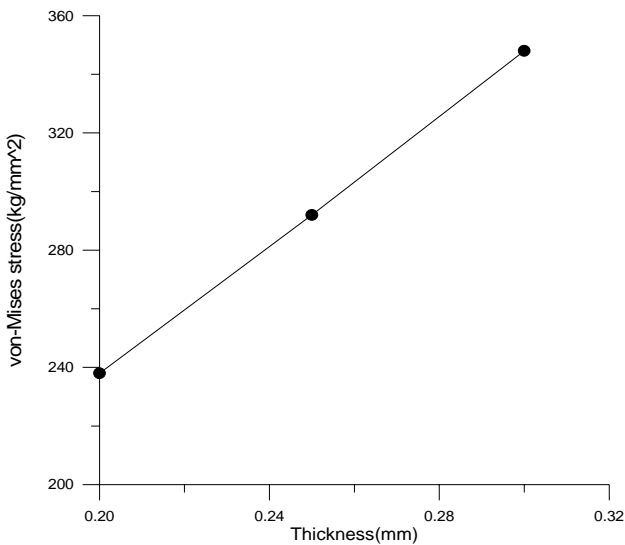
[그림 3] 요소분할 형태



[그림 5] 응력 해석 결과

2. 결과 및 고찰

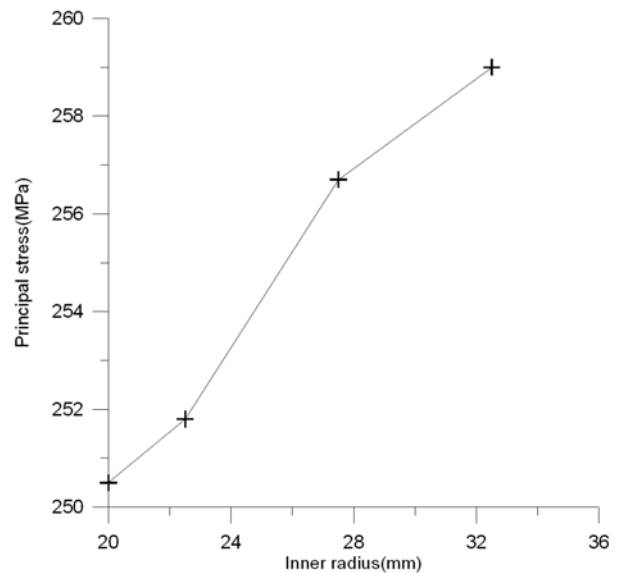
앞에서 기술하였던 모델에 대하여 대변형을 고찰할 수 있도록 기하학적 비선형성을 고려하여 ANSYS로 유한요소 해석을 수행하였고, 해석은 한쪽은 완전 구속된 상태이고 다른 한쪽은 y축에 대해서만 선형적으로 처짐이 일어나는 것으로 가정한 조건을 설정하였다. Bellows에 사용되는 재료의 두께는 0.2mm, 0.25mm, 0.3mm로, 두께에 따른 응력의 영향을 평가하기 위하여 산수가 21인 Bellows에 대하여 이들 두께에 대한 응력해석을 하였고 해석된 결과는 [그림 4]와 같다. 두께가 증가함에 따라 항복 응력은 선형적으로 증가함을 알 수 있다.



[그림 4] 두께에 따른 항복 응력 변화

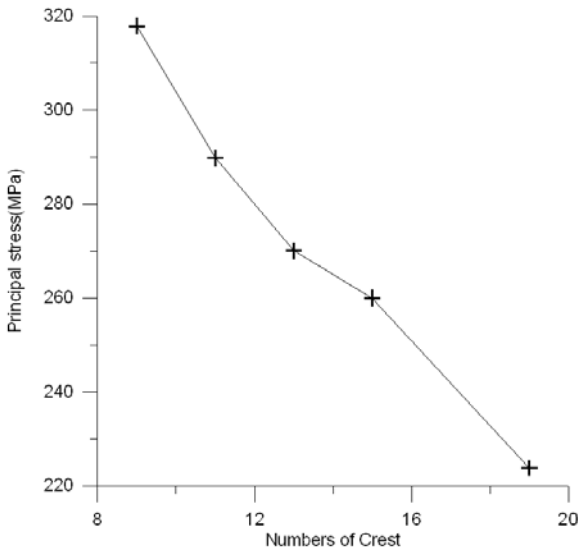
Bellows에 대한 해석 결과를 보면 [그림 5]에서 보는 바와 같이 직선 tube로부터 2번째 골에서 응력이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 한편 Bellows의 주름 직경, 내경 그리고 산수에 따른 해석 결과는 [그림 6] - [그림 8]에 나타내었다. [그림 6]에서 Bellows의 tube 반경이 20mm에서 32.5mm로 증가함에 따라 주응력은 250.5MPa에서 259MPa로 선형적으로 증가하였다.

[그림 7]에서 Bellows의 산수를 9산에서 19산까지 증가시키는 동안 주응력은 317.9MPa에서 223.9MPa로 감소하였다. 한편 [그림 8]에서 Bellows 주름 반경을 1.4mm에서 2.2mm까지 증가시켜 보면

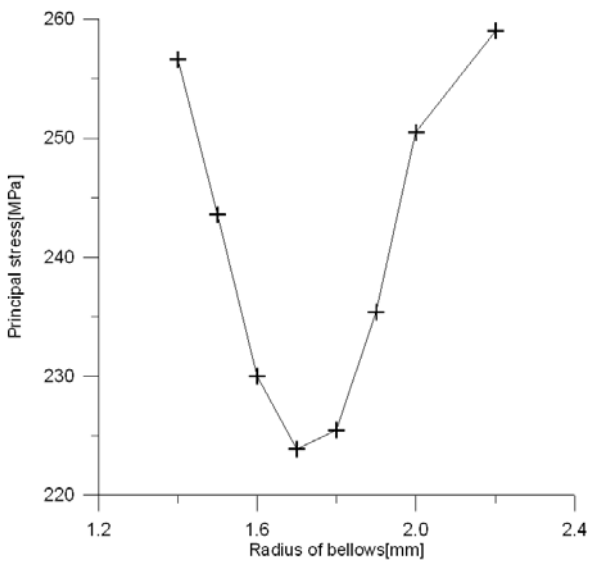


[그림 6] Bellows tube 반경 변화에 따른 주응력 변화(산수 : 19산, 주름 반경 : 2mm)

1.7mm까지는 주응력이 감소하다가 다시 증가하여 주름의 반경이 1.7mm일 때 응력이 가장 적게 발생한 것을 알 수 있다.



[그림 7] 산수에 따른 주 응력 변화 (Tube 반지름:20mm, 주름 반지름 : 1.7mm, pitch : 5.88mm)



[그림 8] 주름 반경에 따른 주 응력 변화 (Tube 내부 반지름 : 20mm, 산수 : 19산)

3. 결론

본 연구에서는 XM15J1을 이용한 Flexible Tube 개발품에 대한 응력 및 내구 한도 해석을 600°C의 조건에 대하여 실시하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 두께가 증가함에 따라 항복응력은 선형적으로 증가한다.

(2) Tube의 반경이 증가하면 항복 응력은 tube 반경에 비례적으로 증가한다

(3) 해석에 적용된 모델 중 주름의 반경이 1.7mm일 때 응력이 가장 적게 발생하여 피로 수명이 가장 긴 것을 예측할 수 있다.

참고문헌

- [1] J.W. Kwon, Y. Y. Lee and Y. D. Lee, "Recent Development of Stainless Steels for Automotive", Materials at High Temp. 17(2), pp. 319-326, 2000.
- [2] 김정훈, 고석훈, 김경훈, 김대열, "자유도 저감법을 이용한 자동차 배기 시스템 벨로우즈의 진동 해석", 한국 자동차 공학회 2006년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 2183-2188, 2006.
- [3] Y.Z. Zhu, H.F. Wang, Z.F. Sang, "The Effect of environmental medium on fatigue life for u-shaped bellows expansion joints", International Journal of Fatigue, Vol. 28. pp. 28-32, 2006.
- [4] Tianxiang Li, "Effect of the elliptic degree of Ω -shaped bellows toroid on its stresses", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp.951-954, 1998.