

## 승용차 배기계 벨로우즈의 구조해석에 관한 연구

김진봉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한서대학교 항공기계학과

### A Study on Structural Analysis for the Bellows of Automotive Exhaust System

Jin-Bong Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Aeronautical & Mechanical 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. 아울러 Bellows의 변위량이 크게 발생하는 것을 고려하여 기하학적 비선형 해석을 실시하였으며 Bellows의 변형량은 끝단에서 6mm의 변위가 발생하도록 하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다. (1) Bellows의 두께가 증가하거나 Bellows Tube의 반경이 증가하면 Von-Mises 응력은 비례적으로 증가한다. (2) Bellows의 주름의 반경이 증가함에 따라 주 응력이 감소하다가 증가함으로 Bellows 설계 시 최소 응력 산출을 위한 주름 반경의 선정이 요구된다.

**Abstract** As the space for installation of automotive exhaust system is limited, the space should be optimized with relation to the endurance and shape of the system. Geometric nonlinear analysis was used and deflection of bellows was assumed 6mm. Obtained results are as follows; (1) The Von-Mises stress of bellows is increased with increase of thickness or radius of bellows linearly. (2) As the principal stress varies according to the radius of convolution, it is necessary to decide the optimal radius of convolution

**Key Words** : Bellows, Stress Analysis, Automotive Exhaust System

### 1. 서론

가로 기관과 축매 변환장치가 도입되면서 자동차 배기계에서 유연한 금속 벨로우즈는 중요한 부품이 되었다. 엔진의 톨링에 의해 다기관과 다른 배기계 사이에는 유연한 연결이 필요하다. 배기계는 상당량의 축 변형과 굽힘 변형에 견뎌야 하며, 배기계의 굽어진 형상 때문에 비틀림도 발생한다. 아울러 강한 체결 때문에 배기계에서는 상당한 진동에 의한 소음이 발생하고, 재료의 허용 응력을 초과하여 파괴도 발생하게 된다.

이와 같은 소음과 진동을 차단하기 위한 Bellows는 배기 계통에 대한 진동 중 엔진 진동을 차단시켜 배기관으로의 진동 전달을 방지하고 열팽창으로 인한 배기관의 팽창 및 수축을 흡수하여 배기관에 과도한 변형이 발생하는 것을 방지하며 아울러 배기관의 진동이 엔진에 전

달되어 미치는 영향을 방지하는 역할을 담당하고 있다. 따라서 다양한 용도에 따른 최적의 Bellows의 설계를 위한 설계 기준의 확립이 요구된다.

더욱이 배기계는 축매 변환장치가 배기 가스 기밀을 유지하면서 최적의 상태에서 작동하도록 체결되어야 한다. 특히 축매 장치 전단부가 파손되면 배기가스 배출이 원활하게 이루어지지 않게 된다. 그로 인하여 온도가 상승하고 열팽창이 됨으로서 응력이 증대하게 되기 때문에 배기계의 구성 부품들은 이와 같은 응력 조건에서도 견딜 수 있는 구조가 되어야 하며, 금속 Bellows는 이와 같은 조건들을 만족하여 왔다[1].

적절한 구조로 제작하기 위해서는 Bellows의 특성과 다른 배기계와의 상관 관계에 대한 정확한 이해가 있어야 한다. 배기계에 사용되는 재료가 단순히 강도가 크고 비싼 재료를 사용한다고 해서 사용 수명이 증가하는 것

\*교신저자 : 김진봉(jbkim@hanseo.ac.kr)

은 아니다[2].

유연한 금속 Bellows들이 여러 분야에서 사용되어 왔다. 내부 압력과 축 변형 그리고 피로 수명 예측등 여러 가지 관점에서 Bellows에 대한 연구 결과들이 발표되었다. 특히 Snedden[3]은 이러한 연구에 대하여 체계적으로 정리를 하였으며 Andersson[4,5]은 복잡한 Bellows 거동을 단순한 빔 형태로 수정할 수 있는 계수를 유도하였다. 이와 같은 접근 방식에 의해 수동으로 Bellows를 설계할 수 있는 기초를 다지게 되었다.

이와 같은 정식은 ASME code[6]와 같은 압력 용기 code에 포함되어 있다. Bellows 설계에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 것은 EJMA(Expansion Joint Manufacturers Association) [7]이고, Hanna[8]는 이 두 규격을 비교하여 두 규격이 상당 부분 일치한다고 하였다.

Ting-Xin 등[9]과 Osweiler[10]는 EJMA와 유한요소법이나 실험 결과와 비교한 결과를 발표하였고, EJMA는 기준을 검증하기 위한 연구를 실시하여 축하중을 받는 경우 응력이나 강성에 대한 EJMA 식은 대부분의 Bellows 형상에 대하여 20% 범위 내에서 정확한 것을 발견하였다.

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, 겹수 등을 복합적으로 고려하여 내구성의 향상 대책등을 강구하여야 한다.

승용차용 Bellows는 새로운 모델을 개발 시 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 데이터를 축적함으로써 신속한 모델 개발을 이룰 수 있어야 한다.

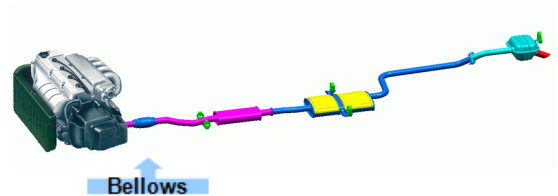
일부에서는 기존의 모델을 일부 변경하거나 예측되는 형상에 대한 시제품을 제작하여 수정 보완하는 형식의 연구 개발이 진행되어 왔으나, 신제품 개발에 소요되는 시간과 경비의 부담이 막대하여 사전 해석에 의한 방법이 필수적이다. 따라서 해석을 통한 사전 검증 후 시제품을 제작하여 개발에 따른 시간 및 경비를 절약함으로써 제품의 신뢰성 향상 및 경쟁력을 증대 시킬 뿐 아니라 관련 data를 지속적으로 축적함으로써 지속적인 독자 모델을 개발하고 있다.

이상에서 다양한 변수를 지닌 승용차용 Bellows에 대하여 독자 모델 개발을 위한 기본적인 설계 data의 축적이 요구되어 본 연구에서는 승용차용 Bellows의 판재 두

께, tube 직경 및 주름 반경에 따른 응력 해석을 실시하여 최적의 Bellows 주름 반경을 도출하였다.

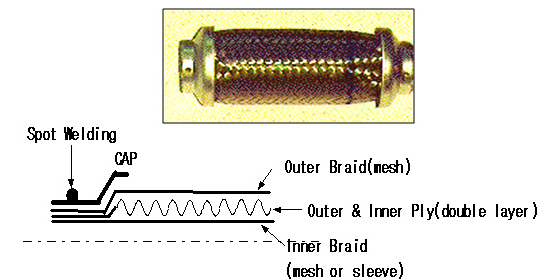
자동차 배기계는 엔진에서 나오는 배기 가스를 모아서 뒤로 전달하여 공해물질을 정화시켜 배출하는 역할을 하며 자동차 하부에 장착되어 있기 때문에 외장형 보다는 기능에 맞는 소재를 사용하여야 한다.

그림 1은 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 앞부분은 hot end 라고 한다.



[그림 1] 자동차 배기계 형상

Bellows의 형상은 그림 2와 같다. 자동차 배기계 부품 소재로 대부분 페라이트계 스테인레스강이 사용되고 있지만, 그 중에서 Bellows는 가공성과 용접성 및 우수한 고온에서의 기계적 성질이 요구되기 때문에 오스테 나이트계 스테인레스 강이 사용되고 있다. Bellows는 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 보증연한이 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. 해석 조건

본 연구에서는 산수가 19개인 Bellows를 기준으로 ANSYS를 이용하여 응력해석을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 재질은 자동차 배기계용으로 개발된 내식성이 우수한 XM15J1으로 물리적 특성 및 유한요소 모델은 표 1에서 보는 바와 같으며 유한요소 모델은 그림 3과 같다. 유한요소 모델의 전체 절점수는 산수에 따라 차이가 있지만 100,000~120,000개 정도이고 8절점 쉘 요소를 이용하였다.

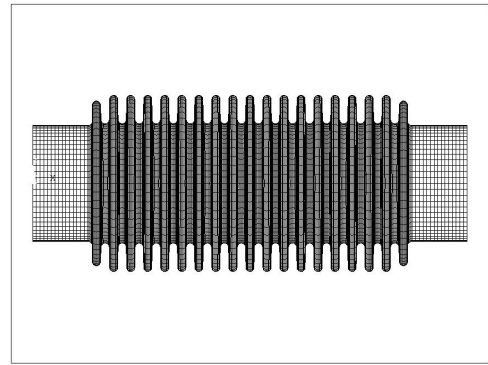
실제 차량에 장착되는 Bellows는 엔진이 시동될 때나 정지될 때, 차량의 급가속이나 급정지 시, 범프 등의 통과 시 과도한 변위량이 발생한다. 따라서 대부분의 자동차 제작사의 Bellows에 대한 시험조건은 굽힘 변위량을 6mm 내외로 설정하는 것이 일반적이다. 이러한 굽힘 변위량을 조건으로 선형해석을 하였을 경우 항복응력을 초과하는 결과가 도출되어 적절한 결과를 얻기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 Bellows의 변위량이 크게 발생하는 것을 고려하여 대변위 해석인 기하학적 비선형해석을 수행하였으며, Bellows의 굽힘 변형량은 끝단에 6mm의 변위가 발생하도록 하였다.

[표 1] 물리적 특성 및 유한요소 모델

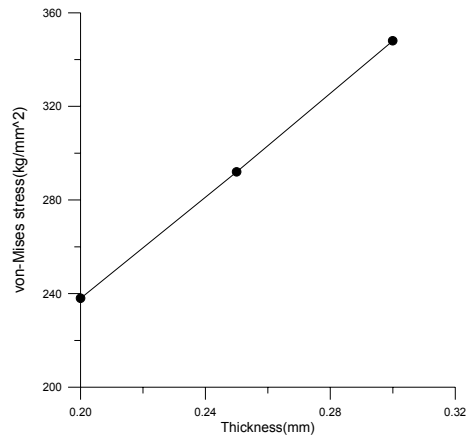
두께 (mm)	산수 (개)	항복응력 (MPa)	접선 계수 (MPa)	포아송 비( $\nu$ )	탄성 계수 (GPa)	요소 종류
0.25	9~19	224 (600°C)	2,000	0.3	188	8-절점 쉘

## 3. 결과 및 고찰

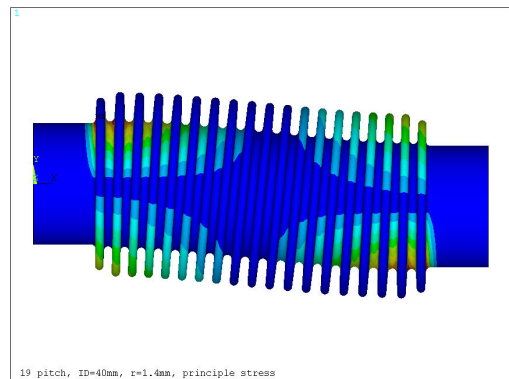
앞에서 기술하였던 모델에 대하여 대변형을 고찰할 수 있도록 기하학적 비선형성을 고려하여 ANSYS로 유한요소 해석을 수행하였고, 해석은 한쪽은 완전 구속된 상태이고 다른 한쪽은 y축에 대해서만 선형적으로 처짐이 일어나는 것으로 가정한 조건을 설정하였다. Bellows에 사용되는 재질의 두께는 0.2mm, 0.25mm, 0.3mm로, 두께에 따른 응력의 영향을 평가하기 위하여 산수가 21인 Bellows에 대하여 이들 두께에 대한 응력해석을 하였고 해석된 결과는 그림 4와 같다. 두께가 증가함에 따라 Von\_mises 응력은 선형적으로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



[그림 3] 요소분할 형태



[그림 4] 두께에 따른 Von-Mises 응력 변화

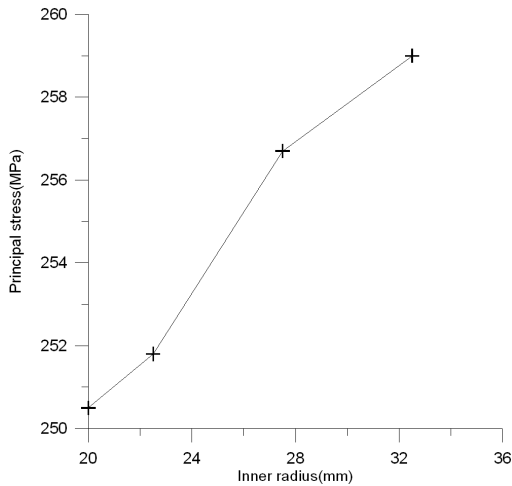


[그림 5] 응력 해석 결과

Bellows에 대한 해석 결과를 보면 그림 5에서 보는 바와 같이 직선 tube로부터 2번째 골에서 최대 굽힘모멘트가 작용하여 주 응력이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 일

반적으로 첫 번째 산의 높이가 다른 산의 높이와 같은 경우에는 첫 번째 골에서 주 응력이 최대가 되지만 본 연구에서 적용한 Bellows는 첫 번째 산의 높이가 다른 산의 높이보다 작기 때문에 두 번째 골에 주 응력이 최대가 되었다.

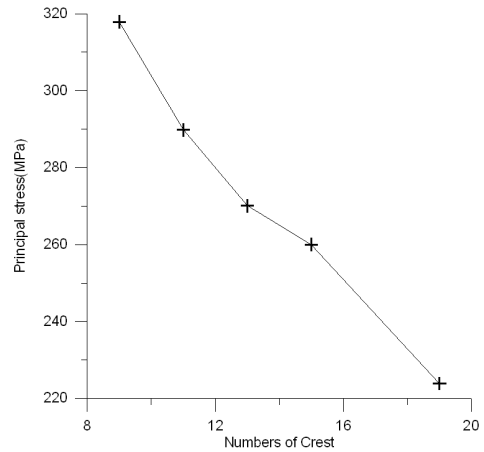
한편 Bellows의 주름 직경, 내경 그리고 산수에 따른 해석 결과는 그림 6 - 그림 8에 나타내었다. 그림 6에서 일정한 굽힘 처짐량 조건에 대하여 Bellows의 tube 반경이 20mm에서 32.5mm로 증가함에 따라 단면 계수가 증가하기 때문에 주응력은 250.5MPa에서 259MPa로 증가하였다. 이와 같이 튜브 반경 증가에 따라서 주응력이 증가하는 이유는 일정한 굽힘 처짐량 조건에 대하여 튜브 반경이 증가하여 단면 계수가 증대에 따른 굽힘모멘트의 증가에 기인한 것으로 판단된다.



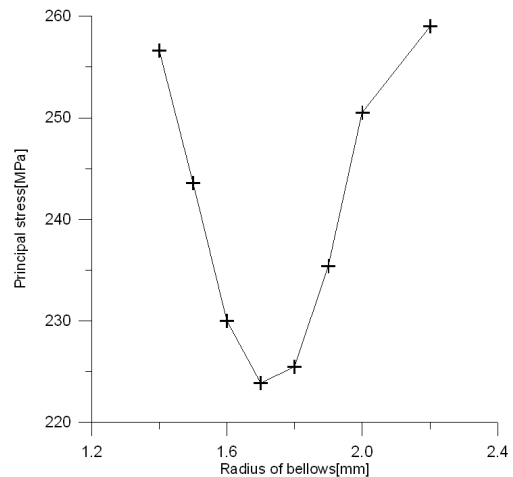
[그림 6] Bellows tube 반경 변화에 따른 주응력 변화 (산수 : 19산, 주름 반경 : 2mm)

그림 7에서 Bellows의 산수를 9산에서 19산까지 증가하여 Bellows의 길이가 증가하고, Bellows 말단부에 동일한 량으로 처짐 조건을 주었을 경우에 Bellows에 작용하는 굽힘 모멘트가 감소하여 주응력은 317.9MPa에서 223.9MPa로 감소한 것으로 판단된다. 한편 그림 8에서 Bellows 주름 반경을 1.4mm에서 2.2mm까지 증가시켜 보면 1.7mm까지는 주 응력이 감소하다가 다시 증가하여 주름의 반경이 1.7mm일 때 응력이 가장 적게 발생한 것을 알 수 있다. 이와 같이 Bellows의 주름 반경 증가에 따라 주 응력이 감소하다가 증가한 이유로는 주름 반경이 증가하면서 응력 집중 효과가 점차로 감소하다가 주름 반경 증가에 따른 Bellows의 단면 직경이 증가함에 따라서 굽힘 모멘트가 증가하고 이에 따라 굽힘 응력이 증가

하는 것으로 판단되며 이들의 상관 관계에 대한 추가적인 검토가 필요하다.



[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)

#### 4. 결론

본 연구에서는 XM15J1을 이용하는 Bellows에 대한 응력 해석을 600℃의 조건에 대하여 실시하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 두께가 증가함에 따라 Von-Mises 응력은 선형적으로 증가한다.

- (2) Tube의 반경이 증가하면 주 응력은 tube 반경에 비례적으로 증가한다.
- (3) Bellows의 주름의 반경이 증가함에 따라 주 응력이 감소하다가 증가함으로 Bellows 설계 시 최소 응력 이 발생하는 주름 반경의 선정이 요구된다.

### 참고문헌

- [1] Korane KJ, "Cutting emmissions with metal bellows", Machine Design 24, 1995.
- [2] Althini K, Folesson P. AP Automotive Systems, Inc., Torsas, Sweden, 1999.
- [3] Snedden NW, "The strength and stability of corrugated bellows expansion joints", PhD thesis, D43087/82, Churchill College, University of Cambridge, Cambridge, UK, 1981.
- [4] Anderson WF, "Analysis of stress in bellows - Part 1 design criteria and test results", Atomic International, NAA-SR-4527, United States Atomic Energy Commission, 1964.
- [5] Anderson WF, "Analysis of stress in bellows - Part 2 mathematica", Atomic International, NAA-SR-4527, United States Atomic Energy Commission, 1965.
- [6] ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code-Section VIII, Division 1, Appendix BB, New York, 1986.
- [7] EJMA, "Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association", seventh edition, 1998.
- [8] Hanna JW. "A comparison of the ASME appendix BB to the EJMA standards". Metallic bellows and expansion joints-1989, The 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, JSME Co-sponsorship, Honolulu, Hawaii, 23-27. July pp. 79-85. 1989.
- [9] Ting-XinL, Bing-Liang G, Tian-Xiang K, Qing-Chen W. "Stresses and fatigue failure of U-shaped bellows", Metallic bellows and expansion joints-1989, The 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference. JSME Co-sponsorship, Honolulu, Hawaii, 23-27 July pp.13-9, 1989.
- [10] Osweiler F. "Design of an expansion joint by a finite element program - comparison with the EJMA standards", Metallic bellows and expansion joints-1989, The 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, JSME Co-sponsorship, Honolulu, Hawaii, 23-27 July 1989. p. 87-94.

김진봉(Kim-Jin Bong)

[정회원]



- 1985년 8월 : 부산대학교 대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1998년 2월 : 한국전기연구소 선임연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공기계학과 교수

<관심분야>  
구조해석, 피로파괴