

곡선형 벨로우즈의 동적특성 분석 Study on Dynamic Characteristics of Curved Bellows

황정필 · 김진곤 · 박용국
J. P. Hwang, J. G. Kim and Y. K. Park

Key Words : Curved Bellows(곡선형 벨로우즈), Dynamic Characteristics(동적특성), ANSYS APDL(ANSYS Parametric Design Language), Rapid Prototyping Machine(쾌속조형기)

Abstract : Bellows is widely used in many industrial fields as it provides a relatively simple means of absorbing mechanical shock, vibration and thermal deformation with flexibility. In this study, the inherent dynamic characteristics of curved bellows are numerically studied according to the variation of angle, curvature and crest density, etc. For these numerical studies, a parametric finite element modelling program of curved bellows is constructed using ANSYS APDL. The validity of numerical results obtained from ANSYS software is experimentally verified using the test model made by RP machine SLA 5000.

1. 서 론

벨로우즈 형상 구조물은(Fig. 1 참조) 자체의 유연성으로 인하여 기계적 진동이나 변형들을 흡수하는 능력이 뛰어나 원자력발전소, 화학플랜트 등의 배관시스템 뿐만 아니라 수송 기계용 배기시스템 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 현대 산업설비의 혈관이라 할 수 있는 각종 수송관의 배관시스템을 설계함에 있어 설계자가 직면하는 문제로는 외기와 수송유체의 온도변화에 따른 파이프 라인의 팽창과 수축, 기관들에 의한 진동, 풍압 및 지진 등에 의한 이동 및 파손과 같은 여러 문제들로부터 파이프 라인에 가해지는 과도한 응력을 흡수하여 기기를 보호하고 사고발생을 방지하는 것이다. 이러한 경우 파이프 라인의 중간에 파이프의 신축 및 진동에 대응하는 신축관을 배관할 필요가 있으며, 이 역할을 할 수 있는 합리적인 이음쇠로 Fig. 2와 같은 벨로우즈 형태의 조인트가 각종 유체의 수송을 위한 배관에 널리 쓰이고 있다.

자동차와 같은 수송기계분야에서는, 엔진출력의 증가와 차량의 전륜구동화 추세에 따라 승용차 엔진에서 배기계로의 진동전달을 최소화하기 위해 벨

로우즈의 진동해석과 관련된 많은 연구들이 이루어져 왔다.^{1~7)}



Fig. 1 Various bellows type structures: (a) pipe system: flexible joint, (b) automotive bellows

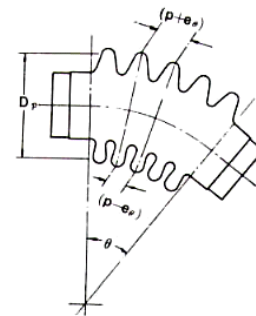


Fig. 2 Expansion bellows joint

자동차의 와이어링 하네스 시스템에도 Fig. 3과 같은 벨로우즈 형상의 튜브(corrugated tube)가 사용되고 있으며, 차량 성능 향상 및 내구성 증대를 위해 이러한 와이어링 하네스 시스템의 피로 및 동적특성을 분석할 필요성 또한 갈수록 증대되고 있

접수일 : 2008년 1월 16일, 채택확정 : 2008년 3월 26일
김진곤(책임저자) : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : kimjg1@cu.ac.kr, Tel : 051-123-3456
황정필 : 포항산업과학연구원
박용국 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

다.^{8~9)} 와이어링 하네스 시스템에서 자주 발생하는 커넥터의 단락현상에는 연결된 케이블의 동적특성이 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러므로, 형상, 지지 조건, 굴곡부의 곡률 효과 등 여러 요인들에 따라 달라지는 벨로우즈 형상 케이블의 동적특성을 명확하게 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 곡선형 벨로우즈의 동적특성분석을 위한 유한요소해석을 용이하게 하기 위해서, 먼저 형상 변수들 간의 관계식을 찾아 잘 알려진 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS¹⁰⁾의 APDL (ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 곡선 벨로우즈의 자동 유한요소모델링 프로그램을 구성하였다. 구성된 모델링 프로그램을 이용하여 벨로우즈의 굴곡부의 길이, 곡률반경, 산(crest)의 밀도 등에 따른 곡선형 벨로우즈의 동적특성을 분석하였다. 해석결과 벨로우즈 형상에 따라 독특한 벨로우즈의 진동특성을 확인할 수 있었다. 이로부터 벨로우즈를 포함하는 관련 구조물들의 동적특성에 곡선형 벨로우즈가 주요한 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 해석결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 미국 3D System사의 SLA5000 쾌속조형기를 이용하여 곡선형 벨로우즈의 실험모델을 제작하여 진동실험을 수행하여 얻은 실험결과와 해석결과를 비교 검증하였다.

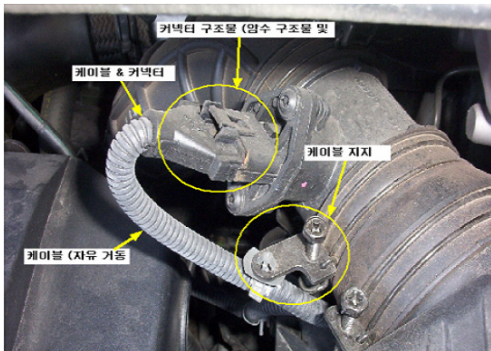


Fig. 3 Corrugated cable connected to connector of automotive wiring harness system

2. 유한 요소 해석

벨로우즈의 진동특성 분석을 위한 유한요소해석을 위해서는 정확한 형상 정보를 바탕으로 유한요소모델링 작업이 필수적이다. 하지만, 굴곡부를 가지는 벨로우즈의 유한요소모델링은 모델링 경험이 많은 전문가가 아닌 경우 상당히 많은 시간과 노력을 요구하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 굴곡부를 가지는 벨로우즈의 진동특성을 분석하기 위해 먼저 Fig. 4와 같이 굴곡부의 곡률반경, 길이, 산의 형태 등과 같은 형상 매개변수들을 선정하였다. 벨로우즈는 사용 용도에 따라 산 모양이 C형, U형, S형 등의 다양한 기하학적 구조를 갖지만, 본 연구에서는 모델링과 해석의 용이성을 위해 일단 사각형 산 모양을 가지는 벨로우즈만을 고려하였다. 매개변수들 간의 기하학적 관계식을 구한 후 ANSYS의 APDL (ANSYS Parametric Design Language)을 기반으로 자동 유한요소모델링 프로그램을 작성한 후, 벨로우즈의 형상에 따른 진동특성들을 다음과 같이 살펴보았다. 모든 해석의 경우 양단 고정 경계조건을 적용하였다.

2.1 굴곡부 길이에 따른 벨로우즈 진동특성

먼저, Fig. 4와 같이 벨로우즈에서 굴곡부의 곡률반경을 고정시키고, 각도 α 를 변화시킬 때(즉, 굴곡부의 길이를 변화시킬 경우) 곡선형 벨로우즈가 가지는 진동특성을 살펴보려고 한다.

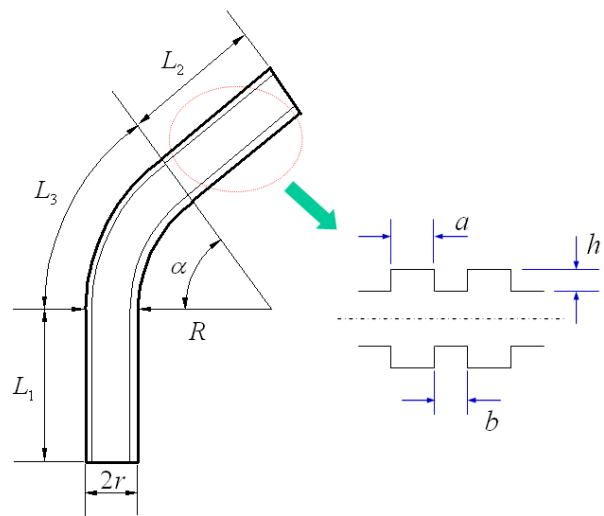


Fig. 4 Design parameters of curved bellows

해석에 사용된 치수는 양 끝단의 직선부 길이 $L_1 = L_2 = 100\text{mm}$, 굴곡부의 곡률반경 $R = 30\text{mm}$, 벨로우즈의 반경 $r = 15\text{mm}$, 직선부 산 수 10개, 산(crest)과 골의 길이 비 $a/b = 1.2$, 산의 높이 $h = 2.5\text{mm}$, 그리고 벨로우즈의 두께 $t = 0.4\text{mm}$ 를 사용하였다. 굴곡부의 각도는 Fig. 5와 같이 0도, 30도, 60도, 90도, 120도, 그리고 150도의 6가지 경우에 대해서 살펴보았다.

Fig. 6은 상기의 6가지 각도 변화의 경우 1차부터 4차까지 면내(in-plane) 고유진동수들의 변화를 전체적으로 보여주고 있다. 1차 고유진동수는 각도가 커질수록 증가하지만, 3차와 4차의 고유진동수들은 반대로 굴곡부의 각도가 커질수록(즉, 굴곡부의 길이가 커질수록) 진동수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 2차 고유진동수는 각도에 따라 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있다.

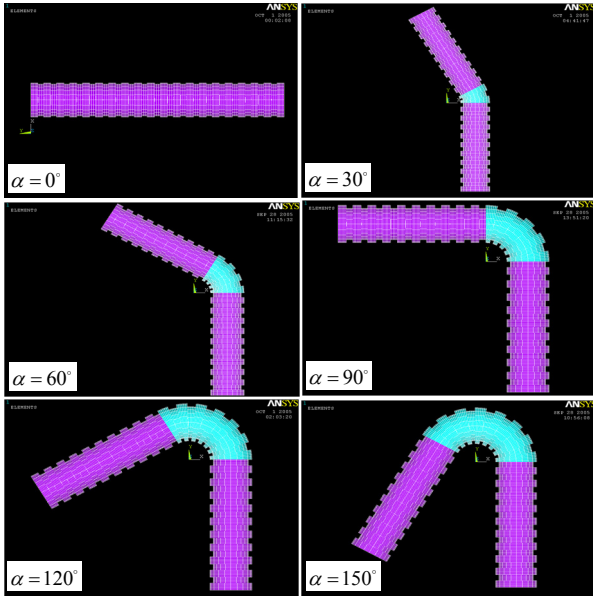


Fig. 5 Variation of angle α ($R=30\text{mm}$)

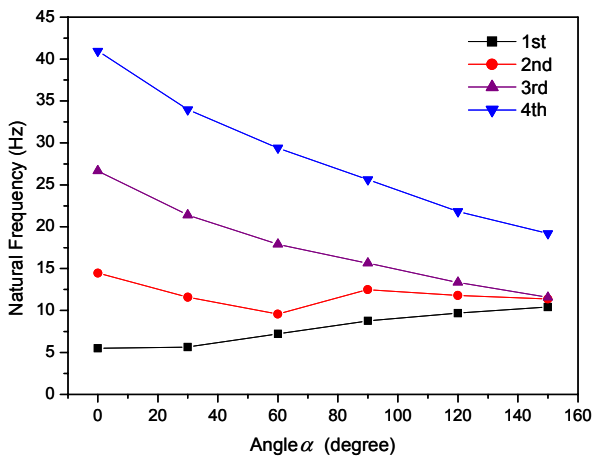


Fig. 6 Natural frequencies according to angle α

2.2 굴곡부 곡률반경에 따른 벨로우즈 진동특성

다음으로 Fig. 7과 같이 벨로우즈의 굴곡부 길이 L_3 를 100mm로 고정시키고, 곡률반경 R 을 변화시킬 때 벨로우즈가 가지는 진동특성을 살펴보았다. 나머지 조건은 앞선 해석과 동일하다. Fig. 8은 벨

로우즈의 곡률반경 변화에 따른 1차부터 4차까지 면내 고유진동수 변화를 보여주고 있다. 1차 고유진동수는 곡률반경이 작아질수록 완만하게 증가하였지만, 2차 고유진동수는 60도 이후부터는 곡률반경이 작아질 경우에도 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 또한 3차 및 4차 진동수들도 곡률반경의 변화에 따른 영향이 상대적으로 매우 적음을 알 수 있다.

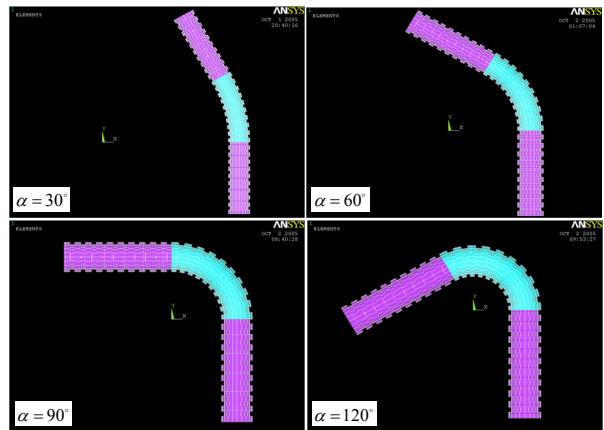


Fig. 7 Variation of curvature radius $R(L_3=100\text{mm})$

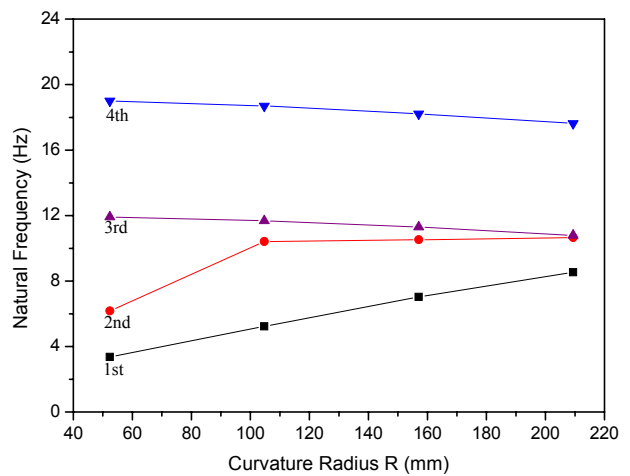


Fig. 8 Natural frequencies according to curvature radius R

2.3 산의 밀도에 따른 벨로우즈 진동특성

마지막으로, Fig. 9과 같이 벨로우즈 산의 밀도를 변화시키는 경우 벨로우즈의 진동특성을 살펴보았다. 굴곡부의 곡률반경 $R = 30\text{mm}$, 각도 $\alpha = 60^\circ$ 이며 나머지는 앞서와 동일한 조건들을 사용하였다. Fig. 10는 벨로우즈 산의 밀도를 변화시킬 때 1차부터 4차까지의 고유진동수들의 변화를 보여주고 있다. 1차부터 4차 고유진동수 모두 산의 밀도가 높아질수록 감소하는 경향을 보여주고 있다.

이러한 결과들로부터, 벨로우즈의 형상에 따라 벨로우즈의 진동특성이 흥미롭게 변화함을 알 수 있다. 또한, 이러한 독특한 진동특성이 벨로우즈가 장착된 전체 시스템의 특성에도 상당한 영향을 미칠 수도 있을 것이다.

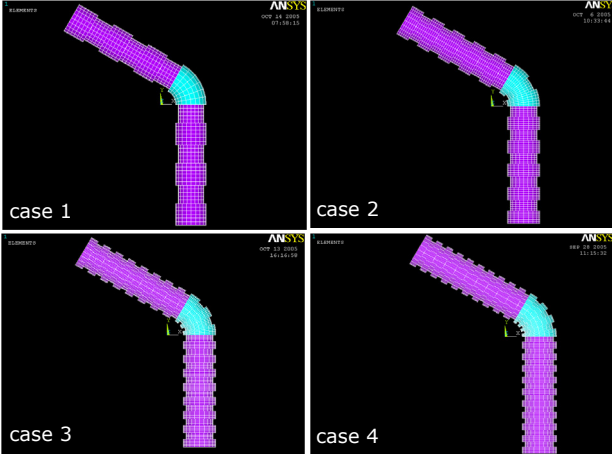


Fig. 9 Variation of crest density

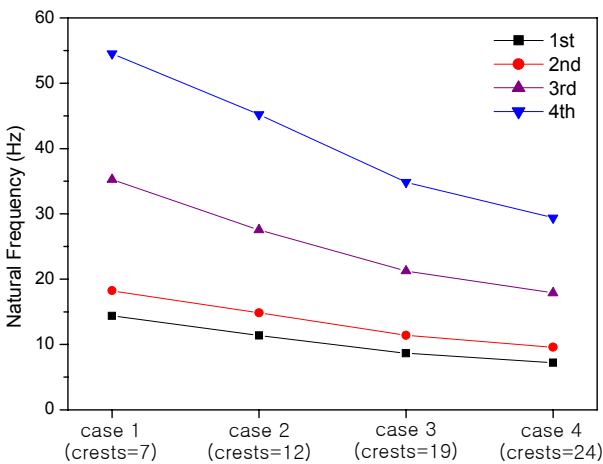


Fig. 10 Natural frequencies according to crest density

3. 실험적 검증

본 절에서는, 곡선형 벨로우즈의 진동특성 분석을 유한요소해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해서 미국 3D System사의 캐속조형기 SLA5000을 이용하여 Fig. 11과 같은 시험용 모델을 제작하여 진동실험(modal test)을 수행하였다. 실험에 사용된 벨로우즈의 재료는 WaterShed 11120이며, 재료물성치는 탄성계수 $E=2.7\text{GPa}$, 밀도 $\rho=1.147\text{g/mm}^3$ 이다. 실험용 모델의 기하학적인 치수는 양 끝단의 직선부 길이 $L_1=L_2=170\text{mm}$, 굴곡부의

곡률반경 $R=135\text{mm}$, 굴곡부 각도 $\alpha=90^\circ$, 벨로우즈 반경 $r=25\text{mm}$, 산과 골의 길이비 $a/b=1.11$, 산의 높이 $h=7\text{mm}$, 그리고 벨로우즈의 두께 $t=2\text{mm}$ 이다.

진동실험에는 B&K사의 Pulse3560c, type8202 임팩트 해머(impact hammer) 그리고 type4508 가속도계(accelerometer)를 사용하였다. 벨로우즈 산에 표시된 15군데의 측정점에 가속도계를 부착한 후 4회 반복하여 측정된 결과들의 평균값을 사용하였다. Fig. 12는 자유경계조건으로 진동실험을 수행하여 구한 주파수응답함수이며, Table 1에서 실험용 벨로우즈 모델의 고유진동수에 대한 실험 및 유한요소해석결과들을 비교하였다. 이로부터, 실험결과와 유한요소해석결과 상당히 정확하게 일치함을 알 수 있다. 유한요소해석결과가 전체적으로 실험결과보다 약간 작게 나오는 이유는 사용된 재료의 물성치가 실제와 다소 차이가 나는데 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 각각 실험과 유한요소해석으로부터 구한 1차부터 3차까지 면내 진동모드형상들을 보여주고 있다. 그림으로부터, 유한요소해석으로부터 구한 구조물의 1차부터 3차 진동모드 형상들도 실험결과들과 매우 유사함을 확인할 수 있었다.



Fig. 11 Rapid prototyping model and experiment equipments

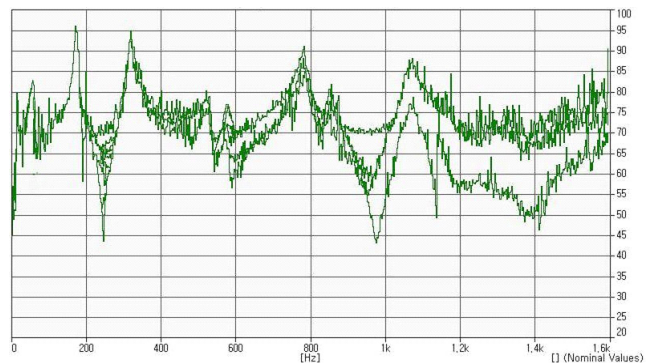


Fig. 12 FRF curve obtained from modal test

Table 1 Natural frequencies of the curved bellows shown in Fig. 6 obtained from modal test and finite element analysis (unit: Hz)

Mode	1st	2nd	3rd
Experiment	57.9	171.8	319.5
FEM	55.9	169.1	315.7

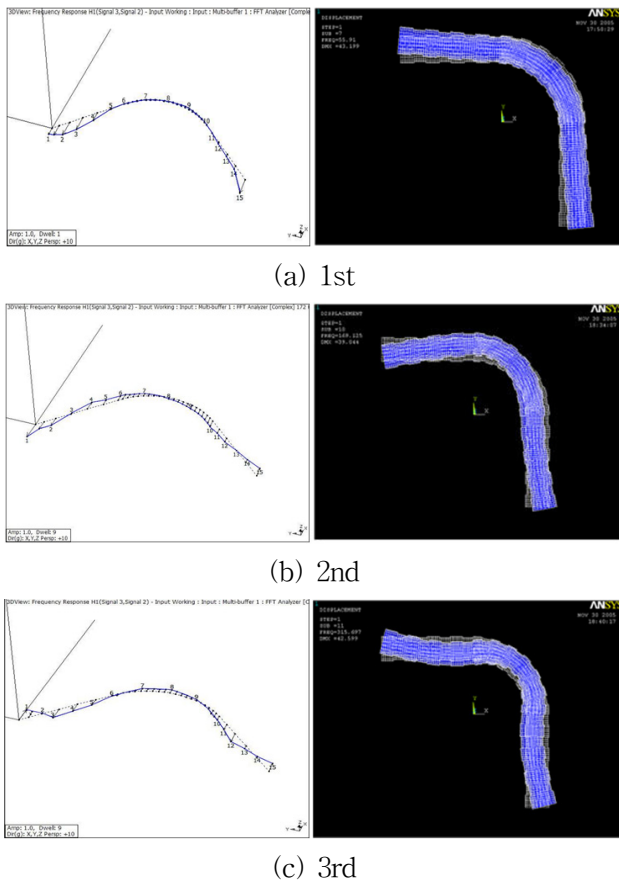


Fig. 13 Mode shapes obtained from modal test and finite element analysis

4. 결 론

벨로우즈 형상 구조물은 자체의 유연성으로 인하여 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있지만, 이에 대한 진동특성 연구는 자동차 배기시스템에 사용되는 벨로우즈를 제외하고는 거의 전무한 상황이다. 본 연구에서 곡선형 벨로우즈의 형상에 따른 진동특성을 분석하기 위해 수행한 연구결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 곡선형 벨로우즈의 유한요소모델링은 전문가가 아니면 상당히 어려운 작업이다. 따라서, 효율적인 해석을 위하여 굴곡부를 가지는 벨로우즈의 형

상 매개변수들간의 기하학적인 관계들을 구한 후 ANSYS APDL을 이용하여 자동 유한요소모델링 프로그램을 구성하였다.

2. 유한요소해석결과 벨로우즈 굴곡부의 길이, 곡률반경 및 벨로우즈 산의 밀도 등에 따라 저차와 고차 진동모드들에서 벨로우즈가 가지는 흥미로운 진동특성들을 확인할 수 있었다.

3. 유한요소해석결과와 신뢰성을 검증하기 위해서, SLA5000 쾌속조형기를 이용하여 실험용 모델을 제작하여 진동실험을 수행하였다. 실험결과와의 비교를 통하여 본 연구에서 수행한 유한요소해석결과와 신뢰성을 검증할 수 있었다.

참고 문헌

1. K. H. Kim, G. H. Han and H. K. Kim, 2001, "Vibration Characteristics of Steering Columns with Bellows", IMechE Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 215, pp. 171~178.
2. C. L. Lu, T. X. Wu, J. G. Yu and Q. T. Ye, 2004, "On Torsional Stiffness and Natural Frequency of Bellows", IMechE Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 218, pp. 263~271.
3. T. L. Englund, J. E. Wall, K. A. Ahlin and G. I. Broman, 2004, "Dynamic Characteristics of a Combined Bellows and Linear Flexible Joint", IMechE Part D: J. Automobile Engineering, Vol. 218, pp. 485~493.
4. M. Radhakrishna and C. K. Rao, 2004, "Axial Vibrations of U-shaped Bellows with Elastically Restrained End Conditions", Thin-Walled Structures, Vol. 42, pp. 415~426.
5. 이완익, 오재웅, 김태완, 1998, "벨로우즈의 동특성에 대한 연구", 대한기계학회논문집, 제12권, 제6호, pp. 1273~1281.
6. 임재문, 김민수, 이귀영, 1993, "부분구조 합성법을 이용한 배기계의 진동해석", 대한기계학회논문집, 제17권, 제7호, pp. 1833~1840.
7. 고병갑, 이완익, 박경진, 1994, "벨로우즈의 장착에 따른 자동차 배기계의 동특성 개선 및 벨로우즈의 최적위치 평가", 한국자동차공학회논문집, 제2권, 제3호, pp. 21~32.
8. T. Inoue, Y. H. Kawakita, Y. Kohtake, M.

- Furusyo, K. Ohuchi and M. Kaji, 2000, "The Development of a Method to Estimate the Bending Reliability of Wiring Harness", SAE World Congress, 2000-0100457, Detroit.
9. H. Nozaki, Y. Kawakita, T. Inoue, D. Wang and M. Kaji, 2003, "Predicting the Bending Life of Wire Harness by CAE Analysis", SAE World Congress, 2003-01-1094, Detroit.
10. ANSYS Analysis Guide, Release 8.0, ANSYS Inc.