

벨로즈의 종방향 강성에 관한 연구

이 경 호* · 왕 지 석**

A study on the Axial stiffness of Bellows

K.H.Lee · J.S.Wang

Key words : bellows(파형관), shell analysis(셸해석), step by step method(단계법), local coordinates system(국소좌표계), global coordinates system(중앙좌표계), axial stiffness(종방향강성), spring constant(스프링상수), transformation matrix(변환 행렬)

Abstract

Usually bellows are designed for the purpose of absorbing axial movement. To find out axial stiffness of bellows, the axisymmetric shell theory using the finite element method is adopted in this paper. Bellows can be idealised by series of conical frustum-shaped elements, because it is axisymmetric shell structure.

The force required to deflect bellows axilly is a function of the dimensions of the bellows and the materials from which they are made. The displacements of nodal points due to small increment of force are calculated by the finite element method and the calculated nodal displacements are added to r-z cylindrical coordinates of nodal points. The new stiffness matrix of the system using the new coordinates of nodal points is adopted to calculate the another increments of nodal displacements, that is, the step by step method is used in this paper.

Spring constant is analyzed according to the changing geometric factors of U-shaped bellows. The FEM results were agreed with experiment. Using developed FORTRAN PROGRAM spring constant can be predicted by input of a few factors.

기호설명

{ δ } : 중앙좌표계에서 요소의 절점변위벡터

{ P^a } : 중앙좌표계에서 요소의 하중벡터

[K^c] : 중앙좌표계에서 요소의 강성행렬

u : 국소좌표계에서 요소의 경사면에 접선방향의 변위

w : 국소좌표계에서 요소의 경사면에 수직 방

* 정회원, 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 3월)

** 정회원, 한국해양대학교 기계자동차공학부

항의 변위

- \bar{u} : 중앙좌표계에서 축방향 요소절점 변위
- \bar{w} : 중앙좌표계에서 반경방향 요소절점 변위
- (r, z) : Cylindrical coordinates
- (r, s) : Local coordinates
- $[T]$: 중앙좌표계와 국소좌표계의 변환행렬
- N_s : 단위길이 당 자오선방향 하중
- N_θ : 단위길이 당 원주방향 하중
- M_s : 단위길이 당 자오선방향 모우멘트
- M_θ : 단위길이 당 원주방향 모우멘트
- σ_s : 자오선방향 막응력
- σ_θ : 원주방향 막응력
- σ_{bs} : 자오선방향 굽힘응력
- $\sigma_{b\theta}$: 원주방향 굽힘응력

1. 서 론

벨로즈는 배관 계통에서 직관을 연결하기 위하여 사용되고 있으며, 임의하중에 의하여 충격을 받는 곳이나 압력변화 온도변화 등에 의하여 신축하고 확장되는 곳에 많이 이용된다. 이때 축 방향의 하중이나 진동에 의한 변형량 혹은 고온 고압의 유체가 흐르면서 발생하는 축방향의 변형량을 흡수하는 설계가 이루어져야 구조물의 변형 및 파손을 방지하는 안전장치로 쓰여질 수 있다. 또한 압력을 감지하여 냉장고 등에 온도제어용으로 사용되고 있으며 대기압을 재는 기압센서로도 활용되고 있다¹⁾.

현장에서 벨로즈에 관한 설계 계산은 주로 EJMA (Expansion Joint Manufacture Association)에서 나온 지침서²⁾의 근사계산에 의존하고 있는 실정이다. 일본에서도 JIS B 8277³⁾에 설명이 있으며 EJMA와 동일한 내용을 갖고 있다. 이들 내용은 경험값의 표를 이용하여 응력과 스프링상수에 관한 근사계산식을 제시하고 있다. 벨로즈의 엄밀한 계산은 유한요소법에 의한 좌굴⁴⁾ 및 피로⁵⁾에 관한 보고가 있으나 스프링상수에 관한 집중적 분석이 없는 실정이다. 본 논문은 벨로즈가 축대칭 쉘의 형상을 가졌으므로 유한요소법을 이용하여 축대칭 쉘의 이론에 입각한 원추형 요소에 의한 해석을 하였고 벨로즈의 하중과 변위의 관계 즉 스프링상

수에 관한 해석을 시도하였다.

벨로즈 단면형상에서 벨로즈 파형의 반지름, 원형평판의 길이, 벨로즈 내경의 크기, 파형갯수 등 벨로즈 거동에 영향을 미치는 인자를 변화시켰을 때에 스프링상수의 값을 해석하였다. 수치해석은 FORTRAN77을 이용하여 유한요소법 이론 전과정을 직접 전산 개발하였다. 특히 유한요소법을 사용하여 하중을 미소량씩 증가시키고 그 미소하중에 대한 각 절점의 변위를 계산하고, 이 값을 각 절점의 좌표에다 합산하여 새로운 절점좌표를 구하고 이좌표를 가지고 새로운 강성행렬을 구하여 절점변위를 계산하는 단계법(Step by step method)를 활용하여 전산프로그램을 작성 하였다⁶⁾. 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위하여 참고문헌⁷⁾의 값을 비교하여 같은 결과를 얻었다.

시중에 일반적으로 판매하는 벨로즈를 구입하여 실험을 실시하였으며 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

2. 축대칭 쉘의 해석

벨로즈의 형상은 Fig. 1과 같은 U형 벨로즈가 일반적으로 많이 쓰인다. 벨로즈는 복잡한 형상을 갖고 있으나 축대칭 원형 단면의 형상을 가지는 물체이다. 또한 외경이나 내경에 비하여 두께가 매우 작으므로 축대칭 쉘 이론을 적용⁸⁾하여 유한요소의 정식화가 가능하다고 판단된다.

Fig. 2에서와 같이 벨로즈의 파형부분을 축대칭 원형단면의 형상을 가지는 원추형요소로 분할할 수 있다. 따라서 원추형 요소의 전체직교좌표계로써 단면 반지름 방향을 r좌표로 하고 축심을 z축으

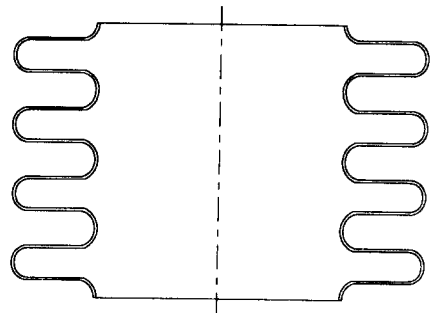


Fig. 1 U-type bellows

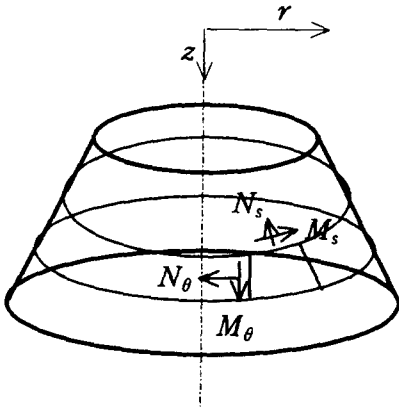


Fig. 2 Force on the shells of revolution

로 하여 원통 좌표계 (r, z) 로 설정한다. 재료는 등방성 탄성체이고 축대칭으로 변형한다고 가정하였다.

Fig. 2와 같이 축대칭 쉘은 원추형요소가 여러 개 모여진 형상을 가진다. 이러한 모양의 쉘에 외력이 작용할 때 외력은 각각의 원추형요소에서 자오선 방향의 힘 N_s , 원주방향의 수직력 N_θ , 자오선 방향의 모우멘트 M_s , 원주방향의 모우멘트 M_θ 가 된다고 할 수 있다⁹⁾.

원추형 요소에는 두 개의 링 절점이 있고, 두 개의 절점 1, 2에 작용하는 힘과 변위는 Fig. 3과 같이 표시한다. 절점 1, 2에서의 z 축에서의 변위를 각각 u_1, u_2 라하고, r 방향 으로의 변위를 각각 w_1, w_2 라하고, 각변위를 각각 β_1, β_2 로 한다. 따라서 원추형요소의 자유도는 절점 하나에 3개의 변위를 가지고 요소는 6자유도가 된다.

절점 1에서 거리 s 에 있는 임의의 점에서 접선변위를 u , 경사면에 수직변위를 w 라고 하고 절점 1, 2간의 거리를 L 이라고 한다. 요소의 형상함수를 s 로 표현하여 국소좌표계와 중앙좌표계의 관계를 유도하였다.

$$\{\delta_1\} = \begin{Bmatrix} \frac{u_1}{w_1} \\ \beta_1 \end{Bmatrix}, \{\delta_2\} = \begin{Bmatrix} \frac{u_2}{w_2} \\ \beta_2 \end{Bmatrix}$$

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \{\delta_1\} \\ \{\delta_2\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Fig. 3과 같은 중앙좌표계에서 절점 1, 2에서의 절점변위 벡터는 아래와 같이 표시한다.

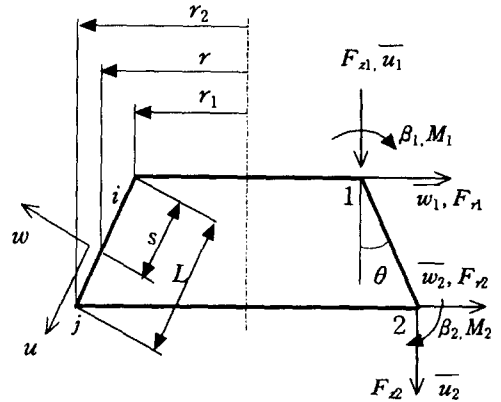


Fig. 3 Displacement at two ring nodes and in global coordinates Displacement in local coordinates

요소 절점의 절점력 벡터는 같은 방법으로 표시하면 아래와 같다.

$$\{F^v\} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{z1} \\ F_{r1} \\ M_1 \\ F_{z2} \\ F_{r2} \\ M_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Fig. 3에서 요소내의 임의 지점의 변위성분 u, w 은 요소의 자유도가 6이므로 아래와 같이 가정할 수 있다. 변위 함수 u 는 절점 1로부터 거리 s 인 지점에서 선형적으로 변화하고 w 는 s 지점에서 3차 방정식으로 변화한다.

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 s$$

$$w = \alpha_3 + \alpha_4 s + \alpha_5 s^2 + \alpha_6 s^3 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{dw}{ds} = \alpha_4 + 2\alpha_5 s + 3\alpha_6 s^2$$

식 (3)에서 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 을 구하기 위하여 경계조건은 절점1(r_1, z_1)에서 $s=0$ 이고 절점2(r_2, z_2)에서 $s=L$ 을 (3)에 대입하여 이를 행렬식으로 전개하면 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ w_1 \\ (-\frac{dw}{ds})_1 \\ u_2 \\ w_2 \\ (-\frac{dw}{ds})_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & L^2 & L^3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2L & 3L^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

단, $L = \sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (r_2 - r_1)^2}$ 이다

식(4)의 6원 1차 연립방정식을 풀면 $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6$ 을 구할 수 있다. 이 값을 (3)에 대입하면 국소좌표계에서의 절점 1과 2에서의 변위와 각변위의 방정식을 알 수 있다. 이 식을 이용하여 요소의 강성행렬을 얻게 된다. 강성행렬을 조립하기 위하여는 국소좌표계로 표현된 임의의 지점 (r, s) 에서의 변위를 중앙좌표계에서의 양으로 환산하여 주어야 한다.

Fig. 3에서 국소좌표계에서 절점 1, 2에서의 요소변위는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\{\delta\}^T = \{u_1, w_1, \left(\frac{ds}{dw}\right)_1, u_2, w_2, \left(\frac{ds}{dw}\right)_2\} \quad (5)$$

또한 요소내의 국소좌표 (r, s) 에서 요소변위와 전체 좌표계 (r, z) 에서의 변위와의 관계는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i \cos \phi + \bar{w}_i \sin \phi \\ w_i &= \bar{u}_i \sin \phi + \bar{w}_i \cos \phi \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)을 절점 1, 2에 적용하여 행렬로 쓰면 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ w_1 \\ \left(\frac{ds}{dw}\right)_1 \\ u_2 \\ w_2 \\ \left(\frac{ds}{dw}\right)_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [T] & [0] \\ [0] & [T] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{w}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{w}_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

즉 국소좌표계와 중앙좌표계의 변환행렬 $[T]$ 를 이용하여 전체 변형량을 구할 수 있다. 요소 내의 임의의 지점에서 국소변위는 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} & g_{15} & g_{16} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} & g_{25} & g_{26} \end{bmatrix} \{\delta\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} g_{11} &= (1-p) \cos \phi, & g_{12} &= (1-p) \sin \phi \\ g_{13} &= 0, & g_{14} &= p \cos \phi, & g_{15} &= p \sin \phi, & g_{16} &= 0 \\ g_{21} &= -(1-3p^2+2p^3) \sin \phi \\ g_{22} &= (1-3p^2+2p^3) \cos \phi \end{aligned}$$

$$g_{23} = L(p - 2p^2 + p^3), \quad g_{24} = -(3p^2 - 2p^3) \sin \phi$$

$$g_{25} = (3p^2 - 2p^3) \cos \phi, \quad g_{26} = L(-p^2 + p^3)$$

$$\text{단 } p = s/L$$

요소 중립면에서 변형율성분 $\epsilon(r, s)$ 은 extension strain ϵ_s , 곡률 χ_s, χ_θ 로 다음과 같이 나타낸다⁹⁾.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_\theta \\ \chi_s \\ \chi_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{ds} & 0 \\ \frac{\sin \phi}{r} & \frac{\cos \phi}{r} \\ 0 & -\frac{d^2}{ds^2} \\ 0 & -\frac{\sin \phi}{r} & \frac{d}{ds} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$\frac{d}{ds} = \frac{1}{L} \frac{d}{dp}, -\frac{d^2}{ds^2} = -\frac{1}{L^2} \frac{d^2}{dp^2}$ 이므로 식 (9)에 식(8)을 대입하여 이를 정리하면 아래와 같다

$$\{\epsilon(r, s)\} = [B]\{\delta\} \quad (10)$$

이때 $[B]$ 는 식(9)에 식(8)을 대입하고 정리하여 구한다. 식(10)에서 변형율을 구할 수 있다. 이 변형율을 이용하여 응력과 변형율과의 관계를 구할 수 있다. 이들 관계를 구하기 위하여, Fig. 2에서 단위길이 당 membrane force를 N_s, N_θ 라 하고 단위길이 당 굽힘모우멘트를 M_s, M_θ 라 하였으므로 σ_s, σ_θ 는 아래와 같다⁸⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_s + \nu \epsilon_\theta), \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_\theta + \nu \epsilon_s) \end{aligned} \quad (11)$$

$$N_s = \sigma_s t, \quad N_\theta = \sigma_\theta t \quad (12)$$

$$\begin{aligned} M_s &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (\chi_s + \nu \chi_\theta) \\ M_\theta &= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (\chi_\theta + \nu \chi_s) \end{aligned} \quad (13)$$

단위길이당 힘(N_s, N_θ)과 모우멘트 (M_s, M_θ)를 나타내는 응력과 변형율의 관계는 아래와 같다.

$$\{\alpha(r, s)\} = \begin{Bmatrix} N_s \\ N_\theta \\ M_s \\ M_\theta \end{Bmatrix}$$

$$= \frac{Et}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{t^2}{12} & \frac{\nu t^2}{12} \\ 0 & 0 & \frac{\nu t^2}{12} & \frac{t^2}{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_s \\ \epsilon_\theta \\ \chi_s \\ \chi_\theta \end{Bmatrix} \quad (14)$$

$$\{\alpha(r, s)\} = [C]\{\epsilon(r, s)\} \quad (15)$$

E는 영률, ν 는 프와송의 비 t 는 요소의 두께이다. 식(10)을 (15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\{\alpha(r, s)\} = [C][B]\{\delta\} \quad (16)$$

절점력 $\{F^i\}$ 에相当하는 내부응력 $\{\alpha(r, s)\}$ 와 절점 변위 $\{\delta\}$ 는 가상일의 원리에 의하여 아래 관계가 있으며 이로부터 요소의 강성행렬을 얻을 수 있다.

$$\{F^i\} = \int_{area} [B]^T [C][B] d(area) \{\delta\} \quad (17)$$

$$\{F^i\} = [K^i]\{\delta\} \quad (18)$$

$$[K^i] = \int_{area} [B]^T [C][B] d(area) \quad (19)$$

Fig. 3에서 임의의 지점을 r 이라 하고 1, 2점의 반경좌표를 r_1, r_2 라고 하면 $p = \frac{s}{L}$ 이므로 $d(area) = 2\pi r ds = 2\pi r L dp, s=0 \sim L, p=0 \sim 1$ 이며 식(19)를 다시 쓰면 아래와 같다.

$$[K^i] = \int_0^1 [B]^T [C][B] 2\pi r L dp \quad (20)$$

단, $r = r_1 + (r_2 - r_1)p$ 이다.

3. 프로그래밍과 해석의 신뢰성

유한요소법으로 정식화된 셸이론을 이용하여 벨로즈 해석을 FORTRAN으로 직접 프로그래밍 하였다. 벨로즈의 내경 외경 파형의 반지름 파형의 갯수 두께 등 기본적인 데이터만 주어지면 원추형 요소로 자동분할하여 각 절점의 넘버링과 원통좌표값이 자동으로 계산된다. 이어서 국소좌표계에서 요소의 강성행렬과 하중벡터를 구하여 중앙좌표계로 변환한다. 이들 요소의 강성행렬을 조립하고 경계조건을 적용하여 중앙좌표계의 변위를 구한다. 이들 변위를 이용하여 응력을 구하며, 변위가 가장 크게 되는 절점에서 스프링상수를 구한다.

자체 개발한 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같은 Hamada가 해석⁷⁾한 형상의 좌

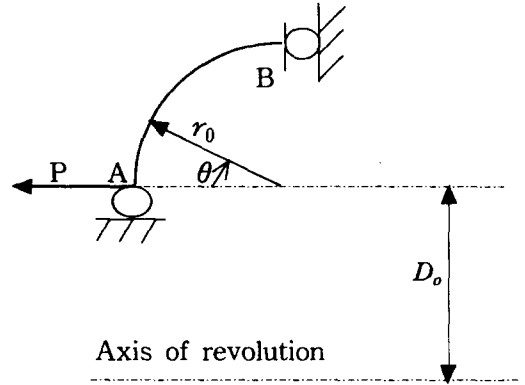


Fig. 4 Hamada's model ($w=0$ at A, $u=0 \beta=0$ at B)

Table 1 Stress (σ) distribution

θ	σ_s		σ_θ		σ_{hs}		$\sigma_{h\theta}$	
	Ha	FEM	Ha	FEM	Ha	FEM	Ha	FEM
10	0.031	0.0355	-0.02	-0.005	0.576	0.316	0.018	0.011
20	0.041	0.0449	-0.10	-0.064	1.027	0.907	0.224	0.174
30	0.049	0.0523	-0.227	-0.176	1.423	1.412	0.357	0.338
40	0.053	0.0574	-0.378	-0.325	1.780	1.823	0.475	0.479
50	0.055	0.0602	-0.538	-0.491	2.041	2.141	0.575	0.593
60	0.055	0.0613	-0.687	-0.654	2.228	2.373	0.733	0.680
70	0.053	0.0613	-0.811	-0.794	2.480	2.529	0.793	0.742
80	0.047	0.0608	-0.893	0.897	2.650	2.624	0.793	0.781
90	0.046	0.0604	-0.935	-0.951	2.710	2.669	0.812	0.800

($D_0=250, r_0=10\text{mm}, E=2.1\text{E}4\text{kgf/mm}^2 \nu=0.3, t=1\text{ mm}, P=100\text{ kgf}$)

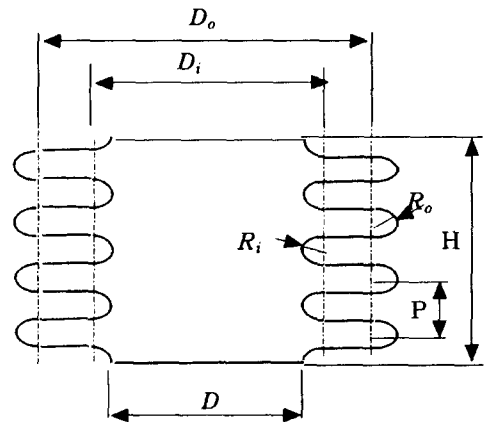


Fig. 5 Configuration of bellows

표와 경계조건을 적용하여 Table 1과 같이 비교하였다.

Table 1에 의하면 해석의 결과가 일치하는 경향

을 나타내었다. 따라서 본 이론에 따라 자체 개발한 프로그램을 신뢰할 수 있었다.

벨로즈는 어느 한 끝에서 끝까지 어느 한 마루에서 마루까지 파형이 반복되는 형상을 가졌으므로 Fig. 5와 같이 내경 D_i , 외경 D_o , 안쪽파형반지름 R_i , 바깥쪽파형반지름 R_o 와 파형부는 분할하기 원하는 각도를 주면, 자동적으로 요소가 분할됨과 동시에 요소 번호가 자동 생성되고, 벨로즈의 높이 H , 피치 P , 원형부의 길이 절점의 좌표 등이 자동 생성되도록 프로그램하였다.

4. 실험

4-1 재료

본 연구에 사용된 시편은 한국동양 플렉시블사에서 제조된 것으로 Photo 1과 같은 U형 벨로즈이다. 재료는 포항제철에서 냉간압연하여 제조한 STS304이다. 시편은 Fig. 6과 Fig. 7과 같은 표준 치수로 시편 D40N12, D25N12를 각각 3개씩

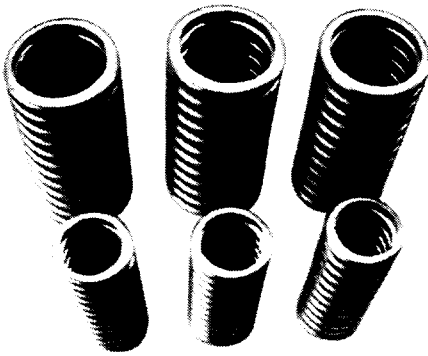


Photo 1 Photo of specimens

Photo 1과 같이 준비하여 실험하였으며 이들의 치수를 캘리퍼스 측정하여 Table 2에 나타내었다.

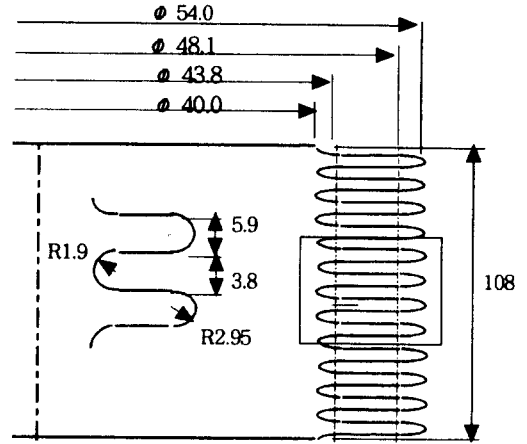


Fig. 6 Dimensions of Sample D40N12

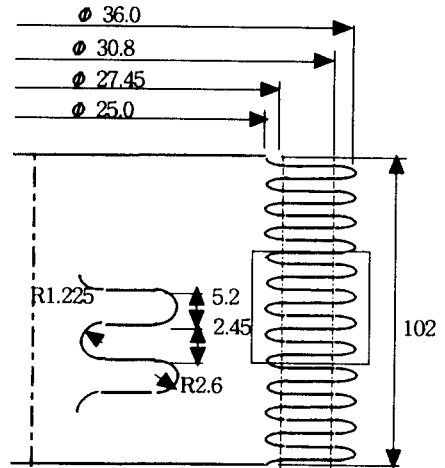


Fig. 7 Dimensions of Sample D25N12

Table 2 Dimensions of measured bellows

Specimen	Sample	Nominal diameter	Outside diameter	Inside diameter	Height	Wave diameter
D40N12	1	40	54.10	40.25	112.80	2.90
	2	40	54.25	40.00	113.05	2.85
	3	40	54.15	39.85	112.90	2.90
	FEM	40	54.00	40.0	112.60	2.95
D25N12	1	25	36.10	25.60	89.55	2.60
	2	25	36.05	25.80	89.45	2.55
	3	25	35.95	25.65	89.65	2.60
	FEM	25	36.00	25.60	89.3	2.60

Table 3 Material, chemical composition of bellows

Composition	STS304
Cr	51.65 %
Ni	23.02 %
C	13.93 %
P	6.41 %
Mn	2.95 %
Si	1.48 %
S	0.56 %

Table 4 Material, mechanical properties of bellows

Properties	STS304
Bellows thickness	0.3 mm
Yielding stress	28.612 kgf/mm ²
Tensile strength	67 kgf/mm ²
Ductility	54 %
Young's modulus	14306 kgf/mm ²

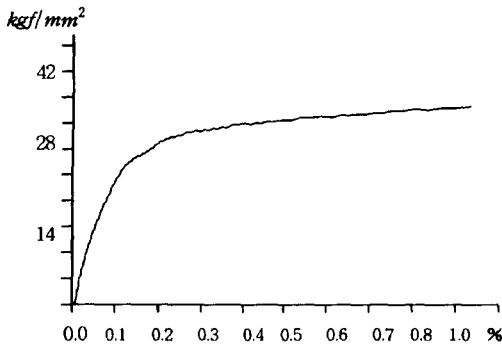


Fig. 8 Stress-strain relations for STS304 with thickness 2.83 and width 24.72

이들 치수를 바탕으로 이룬 계산식에 적용하는 치수를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

Table 3에서는 시편의 재질 화학조성을 표하였으며 Table 4에서는 두께 기계적성질 등을 표하였다. 이는 포항제철 스테인레스부 실험실에서 제공 받은 검사증명서와 Fig. 8과 같은 응력변형율선도에 의거하였다. STS304의 화학조성은 검사증명서에서의 조성을 그대로 제시하였다.

4.2 실험장치 및 실험

실험에 사용한 벨브스프링 시험기는 부산 신평동에 위치한 대동스프링 주식회사가 보유하고있

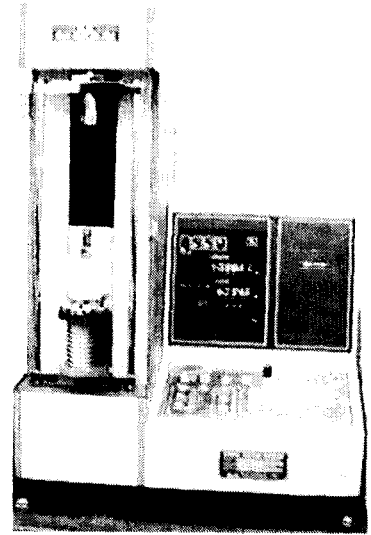


Photo 2 General view of experimental apparatus

는 Photo 2와 같은 모델 MFG-A 200D(최대하중 250kg, 최소하중 4 kg, 최대변위 250mm, 펄스당 최소변위 0.01 mm)를 이용하였다. 시험기는 마이크로 컴퓨터 제어에 의하여 제어되며 높이의 설정 입력에 의하여 하중 측정을 한다. 본 연구에서 압축하중이 작용할 때 변위를 구하는 실험을 하였는데, 변위는 펄스 모터를 구동시켜 변환시킨다. 이 변위의 값은 입력부(키보드, 디지털 스위치)에서 인가한다. 실험은 자동조작을 반복하였으며 자동조작의 속도는 약 1000mm/min의 시험속도로 시험을 하였다.

5. 해석 및 고찰

Fig. 6과 Fig. 7의 치수를 전산프로그램에 적용하여 하중과 변위의 계산값을 구하고, Table 2에 보인 벨로즈 샘플을 실험하여 측정된 값과 비교하여 아래의 선도를 그리고 이를 분석하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 샘플에 대하여 가로축을 변위로 세로축을 압축하중으로 잡고서 벨로즈의 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 하중을 일시에 가하는 것이 아니라 하중증분량을 가하여 변위량을 계산하고, 변위량을 적용한 새로운 좌표에 증분하중을 작용시키는 방법으로 이론해석하였고 실험 또한 같은

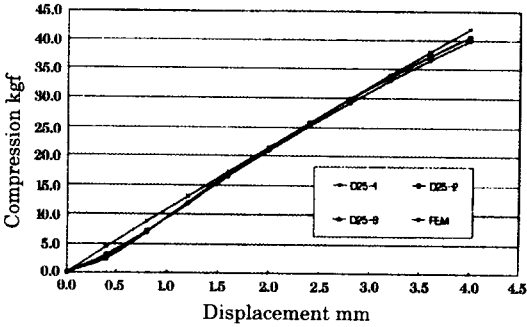


Fig. 9 Relationships between compression and displacement for samples D25N12

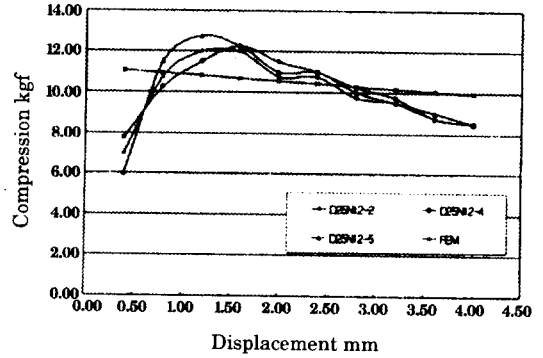


Fig. 11 Relationships between spring constant and displacement for samples D25N12

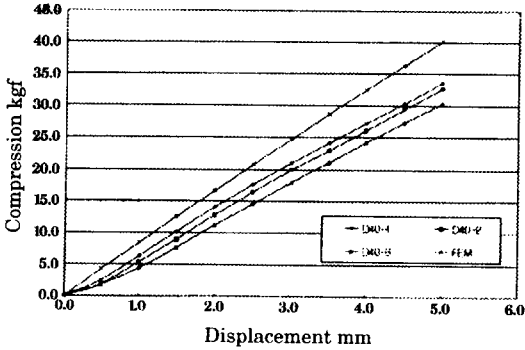


Fig. 10 Relationships between compression and displacement for samples D40N12

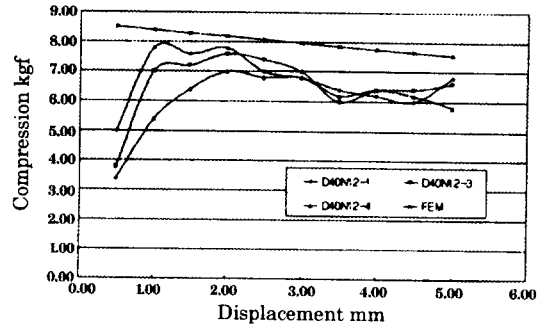


Fig. 12 Relationships between spring constant and displacement for samples D40N12

방법으로 하였다.

Fig.9와 Fig.10의 그림에서 실험결과와 유한 요소법에 의한 해석프로그램을 이용하여 계산한 값이 전구간에 걸쳐서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 벨로즈 지름이 작은 D25가 D40보다 더욱 잘 일치함을 알 수 있는데, 이는 벨로즈 상면과 하면의 평행도가 시편 D40의 것들이 시편 D25의 것보다 불량하여 적은 하중에서도 큰 변위가 발생한 것이 가장 큰 이유이다.

일반적으로 스프링은 하중이 커짐에 따라 변위량이 적은 것이 일반적이나 벨로즈는 압축하중 증분량이 일정할 때 변위 증분량이 커짐을 알 수 있다. 이는 벨로즈 형상의 특이성에 기인한 것이다.

Fig. 11, 12는 전반적으로 변위가 커짐에 따라 스프링상수의 값이 감소하는 경향을 보인다. 변위가 1mm 이하에서는 스프링상수의 값이 매우 큰 차이를 보이고 있는데 이는 Table 2에서 보듯이 상면부의 높이 차이가 있기 때문이다. 즉 벨로즈 상

면과 하면의 평행도 불량으로 하중이 원주상에 고르게 작용하지 못함으로 작은 하중에서도 큰 변위가 일어났기 때문이다.

변위와 스프링상수의 값이 약 3mm 이상에서는 형상을 고려한 유한요소법 계산값과 실험에 의한 값의 차이가 비교적 크게 일어난 것은 Fig. 13와 Fig. 14는 압축하중 30kgf일 때의 굽힘응력선도이다. 굽힘응력선도에서 나타난 것과 같이 일부 요소에서 항복점 이상의 소성변화가 발생한 것으로 보이며, 하중 30kgf 이상일 때에는 더욱 많은 요소가 소성역으로 진행될 것이며, 소성역으로 진행된 요소는 탄성계수의 기울기가 작아짐으로 실험에서는 변위가 작게 나타난다. 전산 프로그램을 이용한 계산에서는 탄성지역과 같은 크기로 적용하였기 때문에 변위가 크게 나타나진 것으로 생각된다.

앞으로 소성역으로 진입한 요소의 해석문제는 응력변형률 선도에서 구간을 나누어 응력값에 따라 영율을 구하여 이를 해석에 적용하는 연구가 필

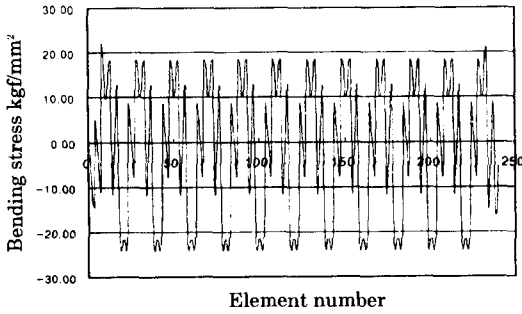


Fig. 13 Bending stress for D40N12

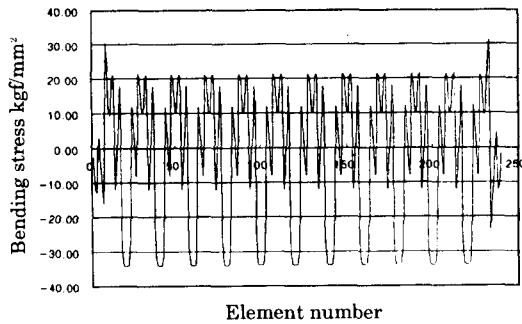


Fig. 14 Bending stress for D25N12

요하다고 생각된다.

Fig 13, Fig. 14는 유한요소해석에 의하여 압축 하중 30kgf일 때 샘플 D45N12 D25N12의 굽힘응력을 계산한 값이다. 일부지점의 요소가 항복점 이상을 보임을 알 수 있고, 응력이 최대값을 가지는 위치는 안쪽파형의 60° 지점이다.

Fig 15부터 Fig. 18는 인장하중을 작용시켰을 때, 벨로즈 지름의 크기, 파형반지름의 크기, 원형 평판의 길이, 파형 갯수 등의 인자를 변화시킴으로 벨로즈 강성에 어떠한 영향을 미치는가 또한 이들이 상관관계가 스프링상수에 미치는 영향을 개발한 전산프로그램으로 분석 하였다.

Fig. 15에서 인장하중을 작용시켰을 때 하중이 증가함에 따라 스프링 상수의 값이 커짐을 알 수 있다. Fig 11, Fig. 12에서 압축하중의 경우는 작아짐을 알 수 있었다.

Fig 16은 파형 반지름을 일정하게 두고, 벨로즈 내경을 점점 크게하여 압축하중을 증가시키면 스프링 상수 감소량은 하중 커짐에 따라 더욱 커지게 된다.

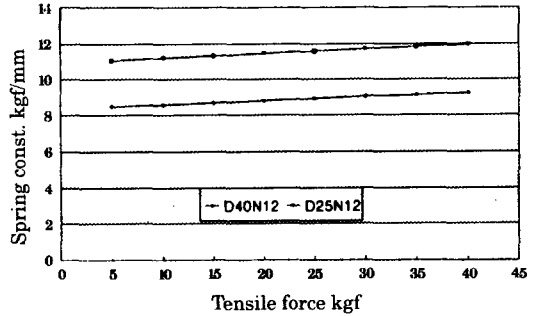


Fig. 15 Effect of incremental tensile force on spring constant

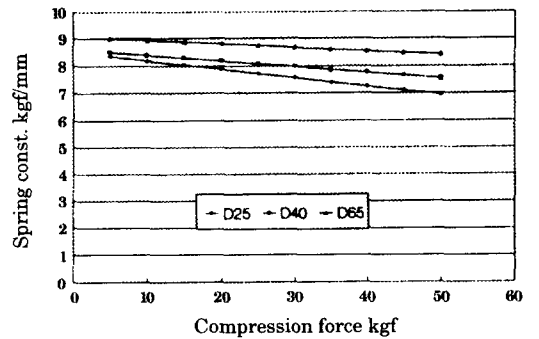


Fig. 16 Effect of Diameter on spring constant

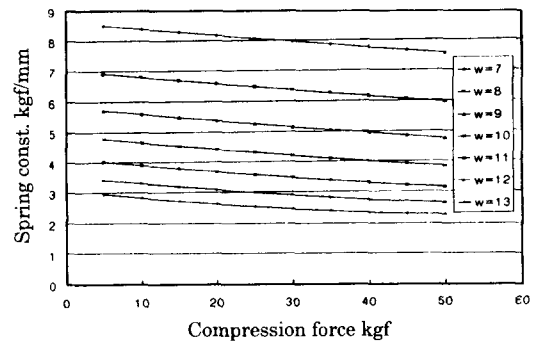


Fig. 17 Effect of circular plate on spring constant for D40N12

Fig. 17은 w는 안쪽 파형반지름과 평판부와 바깥쪽 파형반지름을 합한 길이이다. 이를 파형높이라고 하자. EJMA에 의하면 상용되는 벨로즈는 파형피치와 파형높이의 두배값의 비가 0.5를 기준으로 하고 있다. D40N12의 경우 파형높이가 7mm일 때 0.5이다. 따라서 아래 선도는 벨로즈의 파형 반지름을 일정하게 하고 파형부높이를 7mm부터

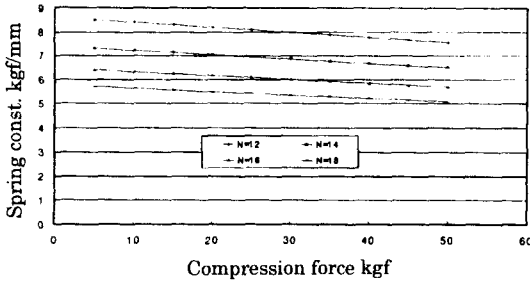


Fig. 18 Effect of number of wave on spring constant for D40N12

1mm씩 증가시켜 계산한 선도이다. 하중이 증가함에 따라 스프링상수의 감소폭이 처음에는 크다가, 어느 정도 커지면 스프링상수의 변화폭도 적어짐을 알 수 있다. 즉 스프링상수 값은 원형 평판의 길이 에 따라 그 변화 폭이 가장 큼을 알 수 있다.

Fig. 18은 파형의 갯수를 변화시켰을 때 스프링상수 하중선도이다. 스프링 상수는 파형의 갯수가 많아짐에 따라 감소하며, 갯수가 증가함에 따른 스프링상수의 감소량은 점차 적어짐을 알 수 있다.

6. 결 론

이상과 같은 해석에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 제시한 축대칭 쉘의 유한요소 해석과 벨로즈의 실험은 벨로즈 형상이 정밀제작할 수록 일치함을 알 수 있었으므로 본 연구에서 개발한 유한요소법에 의한 전산 프로그램을 이용하면 벨로즈의 설계에서 스프링상수와 응력값을 예측할 수 있다.

2. 벨로즈는 형상의 특이성으로 압축하중시에는 스프링상수값이 감소하고 인장하중시에는 스프링상수값이 증가함을 알 수 있다.

3. U형 벨로즈에서 벨로즈 내경의 변화보다 원형평판의 길이를 증가 감소함에 따라 원하는 스프링상수 값을 효율적으로 얻을 수 있으며 이는 벨로즈 수요자가 변위량을 제시하는 설계시에 매우 유용한 값으로 활용할 수 있다.

4. 벨로즈는 일반적으로 박판으로 성형되므로 하중을 증가하였을 때 부분적으로 소성역으로 되어지는 요소가 있으므로 이는 재료의 응력 변형을

선도의 영율의 값을 변형을 증분량 따라 영율을 계산하여 소성이론에 적용하면 더욱 실험결과 일치하지 않을까 예상되며 이에 대한 앞으로의 연구가 있어야 될 줄로 생각된다.

참고문헌

- 1) S.Y.Woo, K.J.Kim, H.J.Lee, K.W.Chung "Development of Atmospheric Pressure Sensor Using Bellows and LDVT", Korean Applied Phics Vol. 2, Number 2, pp174~177, May 1989.
- 2) EJMA, "Standards of The Expansion Joint Manufacturers Association, Inc.", Sixth Edition, 1993.
- 3) 日本工業規格 JIS, "Expansion Joint for Pressure vessels B8277", 1993.
- 4) Watanabe, Ohtsubo, "Stress Analysis and Torsional Buckling Analysis of U-shaped Bellows", 日本機械學會論文集(A편), 52권 475호, pp765~772, 1986
- 5) M. Hamada, N. Tanaka, Design of U-shaped Bellows Considering Low-Cycle Fatigue", Transactions of the ASME, Vol. 100, PP382~388, 1978
- 6) S.J.Lee, J.S.Wang, A study on the non-linearity of wave washer spring", 韓國船舶機關學會誌, 제 21권 3호, pp246~255, 1997.
- 7) M. Hamada, "On the Strength of Toroidal Shells", 日本機械學會論文集 29卷 197, pp142, 1963
- 8) S. P. Timoshenko, "Theory of Plates and Shells", Mc-Graw Hill, pp 38~39, 1959.
- 9) K.C.Rockey, "The Finite Element Method", Granada Publishing, pp131~143, 1975

저 자 소 개



이경호(李京浩)

1955년 4월생. 1979년 부산대학교 기계설계학과 졸업. 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 석사. 1999년 동대학원 기계공학과 박사과정수로 현재 섬지공과 자동차과. 당학회 종신회원.



왕지석(王之錫)

1946년 11월생. 1975년 한국해양대학 기관학과 대학원 박용기관학과 졸업 석사. 1979년 남쓰대학교 박사. 현재 한국해양대학교 기계공학부 교수 1급 기관사