

내압을 받는 벨로즈의 변형 거동에 관한 연구

이 경 호* · 왕 지 석**

A Study on the Deformation Behaviour of Bellows Subjected to Internal Pressure

K. H. Lee · J. S. Wang

Key words : bellows(파형관), conical frustum-shaped element (원추형요소), axisymmetric shell analysis(축대칭셸해석), step by step method(단계법), local coordinates system(국소좌표계), global coordinates system(중앙좌표계), spring constant(스프링상수), transformation matrix(변환 행렬)

Abstract

U-shaped bellows are usually used to piping system, pressure sensor, and controller for refrigerator. Bellows subjected to internal pressure are designed for the purpose of absorbing deformation. Internal pressure on the convolution sidewall and end collar will be applied to an axial load, tending to push the collar away from the convolutions. To find out deformation behavior of bellows subjected to internal pressure, the axisymmetric shell theory using the finite element method is adopted in this paper. U-shaped bellows can be idealized by series of conical frustum-shaped elements, because it is axisymmetric shell structure. 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.

The force required to deflect bellows axially is a function of the dimensions of the bellows and the materials from which they are made. 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 the internal pressure vs. deflection characteristics of a particular bellows can be predicted by input of a few factors.

* 정회원, 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 7월)

** 정회원, 한국해양대학교 기계냉동공학부

기호설명

- $\{\delta^e\}$: 중앙좌표계에서 요소의 절점변위벡터
- $\{F^e\}$: 중앙좌표계에서 요소의 하중벡터
- $\{K^e\}$: 중앙좌표계에서 요소의 강성행렬
- u : 국소좌표계에서 요소의 경사면에 접선 방향의 변위
- w : 국소좌표계에서 요소의 경사면에 수직 방향의 변위
- β : 국소좌표계에서 요소경사면의 각변위
- \bar{u} : 중앙좌표계에서 축방향 요소절점변위
- \bar{w} : 중앙좌표계에서 반경방향 요소절점 변위
- $\bar{\beta}$: 중앙좌표계에서 요소절점에서의 각변위
- (r, z) : Cylindrical coordinates
- (s) : Local coordinates
- F_z : 중앙좌표계에서 축방향 하중벡터요소
- F_r : 중앙좌표계에서 반경방향 하중벡터요소
- M : 요소절점에서의 모우멘트
- P_u : 요소의 경사면에 접선으로 작용하는 압력
- P_w : 요소의 경사면에 수직으로 작용하는 압력
- R : 요소의 경사면에 작용하는 굽힘모우멘트

1. 서 론

벨로즈는 배관계통에서 직관을 연결하기 위하여 사용되고 있으며 또한 꼭각부의 플렉시블호스로 많이 사용되며, 압력변화, 온도변화 등에 의하여 신축하고 확장하는 곳에 이용되고 있다¹⁾. 즉 자동차의 배기관의 이음, 흡입공기량의 계량센서, 기압센서, 냉장고의 작동 스위치 등에 이용되고 있다. 이때 벨로즈는 유체의 압력에 의하여 충격과 변위가 발생하며, 벨로즈는 충격을 흡수하는 역할을 한다. 벨로즈는 독특한 형상으로 충격흡수, 신축 등이 용이한 특성이 있으나, 형상의 복잡성으로 말미암아 배관계통의 변위와 응력을 예측하여 안전한 사용을 위한 해석에는 어려움이 있다.

현장에서 벨로즈에 관한 실례는 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 경

험값의 표를 이용하여 원주방향 자오선응력, 굽힘응력, 막응력, 스프링상수 등에 관한 근사계산식을 제시하고 있다. 본 논문에서는 내압을 받는 벨로즈의 변형거동에 관한 엄밀한 계산을 유한요소법에 의하여 수행하고자 하였다.

벨로즈는 축대칭형의 형상을 가지고 있어 유한요소법을 이용하여 축대칭형의 이론을 적용할 수 있다. 원추형요소에 의한 해석은 본 저자가 이미 선행 연구⁴⁾를 하였으므로, 본 연구에서는 강성행렬을 인용하였으며 내압 작용시의 하중벡터를 가상일의 원리⁵⁾에 의하여 해석하였다.

내압을 받는 벨로즈의 하중과 변위의 관계, 스프링상수에 관한 해석을 중점적으로 시도하였으며, 벨로즈 거동에 영향을 미친다고 판단되는 인자인 파형의 반지름, 원형평판의 길이, 벨로즈 내경의 크기, 파형갯수, 벨로즈 내경과 파형의 높이 비 등을 변화시켰을 때에 스프링상수의 값을 해석하였다. 수치해석은 FORTRAN77을 이용하여 유한요소법 이론 전과정을 직접 전산 개발하였다. 특히 유한요소법을 사용하여 하중을 미소량씩 증가시켜 그 미소하중에 대한 각 절점의 변위를 계산하고, 이 값을 각 절점의 좌표에다 합산하여 새로운 절점좌표를 구하고 이 좌표를 가지고 새로운 강성행렬을 구하여 절점변위를 계산하는 단계법(Step by step method)을 활용하여 전산프로그램을 작성하였다⁶⁾. 프로그램의 신뢰성에 관하여는 선행 연구⁴⁾에서 확인하였다.

시중에 일반적으로 판매하는 벨로즈를 구입하여 시편을 제작한 후, 압력 실험을 실시하였으며 이론과 실험이 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

2. 유한요소 정식화

유한요소법에 의하면 고체의 응력과 변형율을 해석하는 기본적인 식은 원추형요소에 대하여 가상일의 원리를 적용하므로써 아래와 같이 구하여진다.

$$\{f^e\} = \int_{area} |B|^T \{\sigma(s)\} d(area) \tag{1}$$

|B|는 절점변위로부터 요소내의 변형율을 구하

는 행렬이다. 즉

$$\{\epsilon(s)\} = [B]\{\delta^e\} \quad (2)$$

$\{\epsilon(s)\}$ 는 변형을벡터, $\{\delta\}$ 는 절점변위벡터, $\{\alpha(s)\}$ 는 응력벡터이다. 응력과 변형율의 관계⁷⁾는 아래와 같다.

$$\{\alpha(s)\} = [C]\{\epsilon(s)\} \quad (3)$$

$$[C] = \frac{Et}{1-\nu^2} \begin{vmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{t^2}{12} & \frac{\nu t^2}{12} \\ 0 & 0 & \frac{\nu t^2}{12} & \frac{t^2}{12} \end{vmatrix} \quad (4)$$

또한 $\{f^e\}$ 는 절점하중벡터로 만약 이 요소에 표면력 $\{T\}$ 이나 물체력 $\{X\}$ 가 작용한다면 절점력벡터 $\{F^e\}$ 와 함께 이들을 절점력으로 환산하여 절점하중벡터 $\{f^e\}$ 에 포함시켜야 한다. 즉

$$\{f^e\} = \{F^e\} + \int [N]^T \{T\} dA + \int_V [N]^T \{X\} dV \quad (5)$$

본 연구에서는 내압에 의한 하중벡터만을 계산하면 우변의 1항과 3항은 소거되고 2항만 남으므로 식 (1), (2), (3), (4), (5)를 조합하면 아래와 같다.

$$\{f^e\} = \int_{area} [B]^T [C] [B] d(area) \{\delta\} \quad (6)$$

$$\{f^e\} = [K^e] \{\delta\} \quad (7)$$

$$[K^e] = 2\pi r L \int_0^1 [B]^T [C] [B] dp \quad (8)$$

$$p = \frac{S}{L}, d(area) = 2\pi r dp, r = r_1 + (r_2 - r_1)p$$

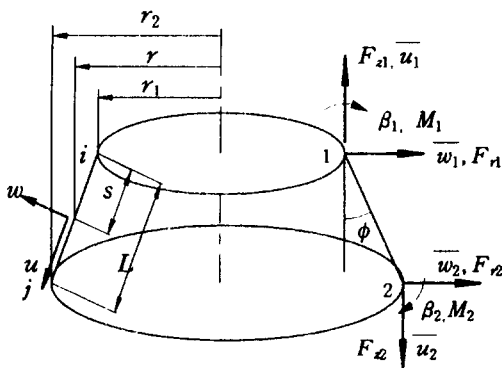


Fig. 1 Displacement of two ring nodes in local and global coordinates.

유도된 원추형 요소의 강성행렬을 $[K^e]$, 변위와 변형을 곡률과의 관계로부터 구하는 형상함수행렬 $[B]$, 재료의 특성을 나타내는 행렬이 $[C]$ 이므로 원추형 요소의 기하학적 형태에 맞추어 국소 좌표계에서 요소의 강성행렬과 하중벡터를 구하고 중앙 좌표계로 표시된 각 절점에서의 값으로 조합하여 식 (6)의 연립방정식을 풀어 변위를 구하였다.

Fig. 1에서와 같이 요소내의 국소좌표 (s)에서 요소변위와 중앙좌표계 (r, z)에서의 변위와의 관계⁸⁾는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i \cos \phi + \bar{w}_i \sin \phi \\ w_i &= -\bar{u}_i \sin \phi + \bar{w}_i \cos \phi \end{aligned} \quad (9)$$

식(6)을 절점 1, 2에 적용하여 행렬로 쓰면 아래와 같다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ w_1 \\ (\frac{dw}{ds})_1 \\ u_2 \\ w_2 \\ (\frac{dw}{ds})_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [T] & [0] \\ [0] & [T] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{w}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{w}_2 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

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

즉 국소좌표계와 중앙좌표계의 변환행렬 $[T]$ 를 이용하여 중앙 좌표계에서의 변형량을 구할 수 있다.

3. 하중벡터

내압을 받는 벨로즈는 분포하중을 받으므로 이를 원추형 요소의 절점력으로 환산하여야 한다. 요소의 하중벡터를 $\{f^e\}$ 라 하고, 요소의 형상함수를 $[N]$ 라 하자. Fig. 1에서 절점 1, 2에서의 하중벡터는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\{f^e\}^T = \{F_{z1} \ F_{r1} \ M_1 \ F_{z2} \ F_{r2} \ M_2\} \quad (11)$$

$$\{f^e\} = \int_{area} [N]^T \begin{Bmatrix} P_u \\ P_w \end{Bmatrix} d(area) \quad (12)$$

$$\{f^e\} = 2\pi L \int_0^1 (r_1 + (r_2 - r_1)p) [N]^T \begin{Bmatrix} P_u \\ P_w \end{Bmatrix} dp \quad (13)$$

$$\text{단, } p=s/L, d(\text{area})=2\pi rdp, r=r_1+(r_2-r_1)p$$

식 (13)에서 L_{ij} 는 요소절점 i, j 간의 거리이며, r_1 은 절점 i 의 반경, r_2 는 절점 j 의 반경이고, P_u 는 요소의 경사면에 접선방향으로 작용하는 압력이고, P_w 는 요소의 경사면에 수직으로 작용하는 압력, R 은 모우멘트이다. 내압을 받는 원추형요소에서는 P_u 와 R 는 영이며 P_w 는 내압과 같은 값을 가진다. $[N]^T$ 는 아래와 같이 구하였다.

$$[N]^T = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} \\ N_{41} & N_{42} & N_{43} \\ N_{51} & N_{52} & N_{53} \\ N_{61} & N_{62} & N_{63} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} N_{11} &= (1-p)\cos\phi \\ N_{12} &= -(1-3p^2+2p^3)\sin\phi \\ N_{13} &= (6p-6p^2)\sin\phi/L \\ N_{21} &= (1-p)\sin\phi \\ N_{22} &= (1-3p^2+2p^3)\cos\phi \\ N_{23} &= -(6p-6p^2)\cos\phi/L \\ N_{31} &= 0, N_{32} = L(p-2p^2+p^3) \\ N_{33} &= (1-4p+3p^2) \\ N_{41} &= p\cos\phi \\ N_{42} &= -(3p^2-2p^3)\sin\phi \\ N_{43} &= -(6p-6p^2)\sin\phi/L \\ N_{51} &= p\sin\phi \\ N_{52} &= (3p^2-2p^3)\cos\phi \\ N_{53} &= (6p-6p^2)\cos\phi/L \\ N_{61} &= 0 \\ N_{62} &= L(-p^2+p^3) \\ N_{63} &= -2p+3p^2 \end{aligned}$$

식 (13)와 식 (14)를 이용하여 대입하고 정리하면 식 (15)와 같이 요소절점 1, 2에서의 하중벡터를 구할 수 있고, 전체하중벡터는 이들 요소하중벡터를 조합하여 구하였다.

$$\begin{aligned} F_{r1} &= 2\pi P_w(z_1-z_2)\left(\frac{7}{20}r_1 + \frac{3}{20}r_2\right) \\ F_{z1} &= 2\pi P_w(r_2-r_1)\left(\frac{7}{20}r_1 + \frac{3}{20}r_2\right) \\ M_1 &= \frac{\pi}{6} L_{ij}^2 P_w \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{r2} &= 2\pi P_w(z_1-z_2)\left(\frac{3}{20}r_1 + \frac{7}{20}r_2\right) \\ F_{z2} &= -2\pi P_w(r_2-r_1)\left(\frac{3}{20}r_1 + \frac{7}{20}r_2\right) \\ M_2 &= \frac{\pi}{6} L_{ij}^2 P_w \end{aligned} \quad (15)$$

4. 실험

본 연구에 사용된 시편은 한국동양플렉시블사에서 제조된 것으로 재료는 포항제철에서 냉간압연하여 제조한 STS304이다. Table 1에서는 시편의 기계적성질 등을 표하였으며, Table 2에서는 시편의 재질, 화학조성을 표하였다. 이는 포항제철 스테인리스부 실험실에서 제공받은 검사증명서⁹⁾와 Fig. 2와 같은 응력-변형률선도에 의거하였다. STS304의 화학조성은 검사증명서에서의 조성을 그대로 제시하였다. U형 벨로즈를 Fig. 3와 같이 두께 7mm의 철판으로 TIG 용접을 하여 양면을 막고 한쪽에 구멍을 뚫고 소켓을 용접하여 압력을 가할 수 있도록 하였다. Photo 1과 같은 시편을 18개 준비하였다.

실험은 Photo. 2와 같은 공기압축기(Max 6kgf/cm²)를 이용하여 압력을 발생시키고 시편과 압축기를 플렉시블호스로 연결하고 중간에 스톱밸브를 장치하여 압력의 증가속도를 조절할 수 있도록

Table 1 Mechanical properties of STS304 for bellows

Properties	STS304
Poisson's ratio	0.3
Yielding stress	28.612 kgf/mm ²
Tensile strength	67 kgf/mm ²
Elongation	54 %
Young's modulus	14306 kgf/mm ²

Table 2 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 %

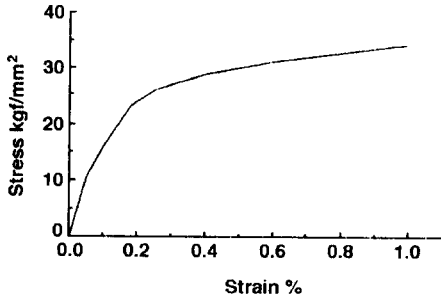


Fig. 2 Stress-strain relations for STS304 with thickness 2.683 and width 24.72

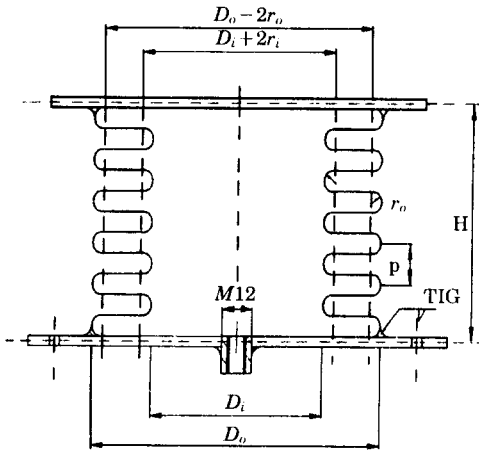


Fig. 3 Dimensions of bellows

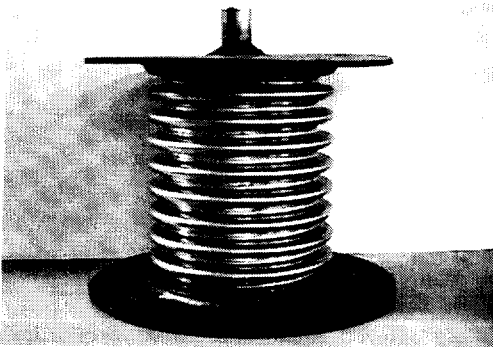


Photo 1 Specimen for internal pressure test

하였다.

측정기는 독일 HBM회사(HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK) 제품으로 모델 MGC-MC55를 사용하였다. 측정기는 RS232 케이블로 컴퓨터(Pentium 300MHz, LG IBM)와

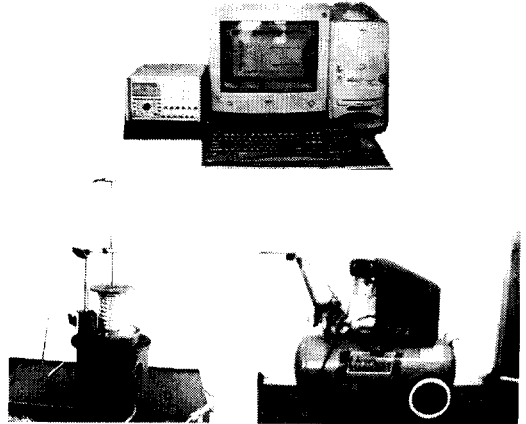


Photo 2. Apparatus for experiment

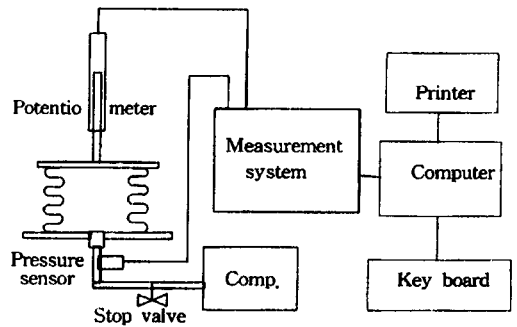


Fig. 4 Schematic diagram of experiment

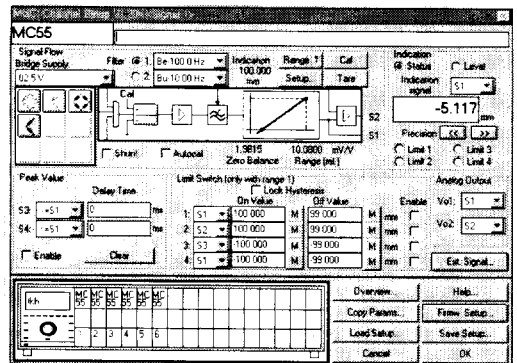


Fig. 5 Display for control MGC-MC55

연결하여 측정기를 Fig. 5와 같은 컨트롤 화면에서 컴퓨터로 제어하며, 압력센서와 변위센서로 압력과 변위를 측정함과 동시에 컴퓨터화면에 아날로그값으로 출력되며 이들 값을 워크시트에 디지털 값으로 변환시켜 파일화할 수 있다. 압력의 증

Table 3 Dimensions for calculating FEM

Sample	H	Do	Di	2r _o	2r _i	Do - 2r _o	Di - 2r _i	p
D25N10	73.7	37.5	26.5	4.4	2.7	33.1	29.2	7.7
D40n10	89.2	53.9	41.2	4.6	3.8	49.3	45	9.4
D65N10	105.6	82.8	67.10	6.6	4.0	76.2	71.1	11.0
D80N10	110.6	100.2	78.4	6.2	4.2	94.0	82.6	11.6

가속도는 분당 0.5~0.6 kgf/cm²로 하였고 측정시간간격은 1 sample/sec 정도로 압력을 가하면서 180~250회 정도 측정하였다.

시편 D25N10, D40N10, D65N10, D80N10를 각각 3개이상 Photo 1과 같은 모양으로 준비하여 이들의 치수를 캘리퍼스로 측정하였다. 이들 치수를 바탕으로 이론계산식에 적용하는 치수를 Table 3에 나타내었다. D는 공칭지름으로 벨로즈골지름이며 N은 파형마루부의 갯수를 나타내었다.

5. 해석 및 고찰

벨로즈를 해석하기 위하여 Table 3의 치수를 전산프로그램에 적용하여, 골과 마루부는 10도 간격으로 나누고 평판부는 4등분하여, 요소를 모두 422개로 나누었으며, 벨로즈하부의 z변위를 모두 0으로 하고 중심점에서는 반경방향도 고정하였다.

하중을 일시에 가하는 것이 아니라 하중증분량을 가하여 변위량을 계산하고, 변위량을 적용한 새로운 좌표에 증분하중을 작용시키는 방법으로 수치해석하였다. 하중과 변위의 계산값과 공칭지름별로 3개이상의 벨로즈 샘플을 실험하여 측정된 값을 비교하여 아래의 선도를 그리고 이를 분석하였다.

Fig. 6는 벨로즈 D80에 내압 2 kgf/cm²가 작용할 때의 변형을 수치해석 후 도시화하였다. 그림을 통하여 축방향의 변위를 가시적으로 확인할 수 있다.

Fig. 7~10은 내부에 압력이 증가하는 벨로즈의 신장량을 공칭지름별로 나타낸 것이다. 실험결과와 유한요소법에 의한 수치해석값이 전 구간에 걸쳐서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. D25와 D40은 전 구간에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있고, D65와 D80은 압력이 약 1.6kgf/cm²이상에서 비선형성을 보인다. 이는 항복점과 비교하여 볼 때 D25, D40은 탄성구간이며 D65, D80은 일부요소

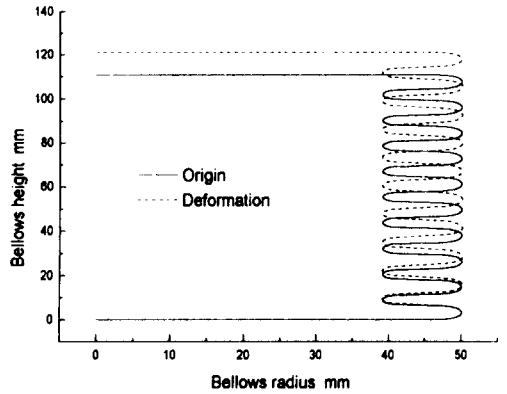


Fig. 6 Bellows subjected to internal pressure 2 kgf/cm² are deformed

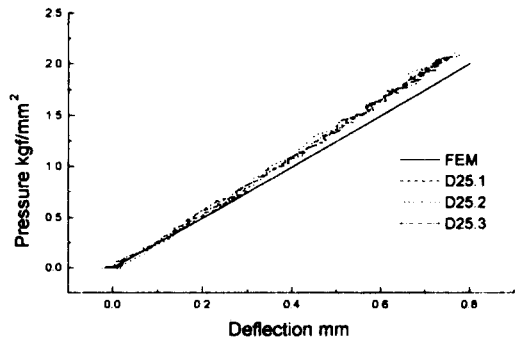


Fig. 7 Relationship between pressure and deflection for samples D25

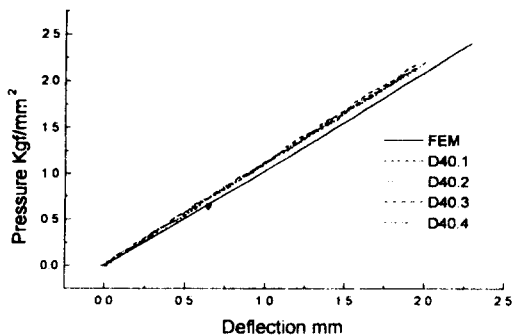


Fig. 8 Relationship between pressure and deflection for samples D40

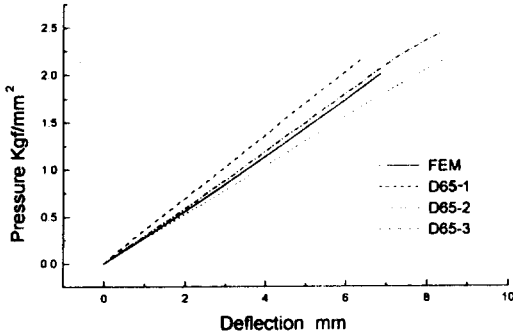


Fig. 9 Relationship between pressure and deflection for samples D65

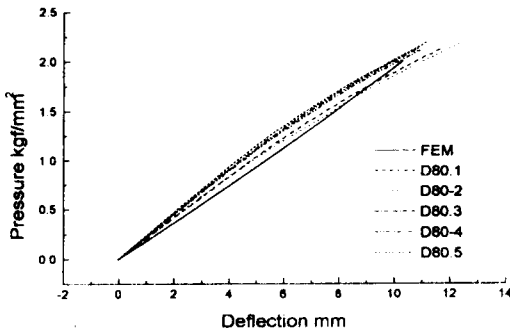


Fig. 10 Relationship between pressure and deflection for samples D80

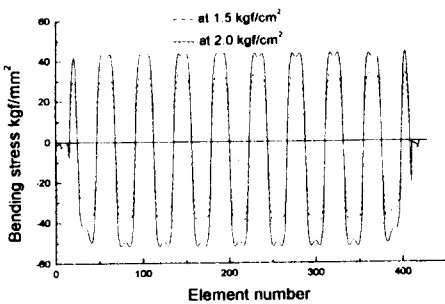


Fig. 11 Bending stress for D80

가 소성영역에 진입한 것으로 생각된다. 소성영역이 나타나는 요소를 확인하기 위하여 압력이 2.0kgf/cm^2 일 때와 1.5kgf/cm^2 일 때의 굽힘응력을 Fig. 11, Fig. 12에 도시하였다. 굽힘응력이 0인 기준선 위부분이 벨로즈 마루부의 응력값이고 아래 부분은 골부분의 응력값이다.

Fig. 10, Fig. 11의 그래프 상에서 볼 때 압력이 1.5kgf/cm^2 일 때 골부분의 최대응력값이 D80은

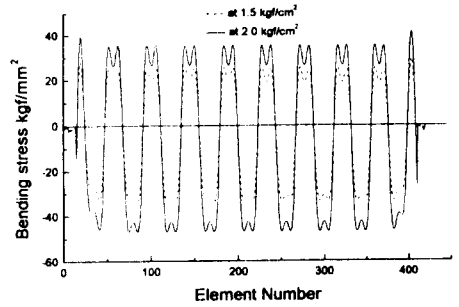


Fig. 12 Bending stress for D65

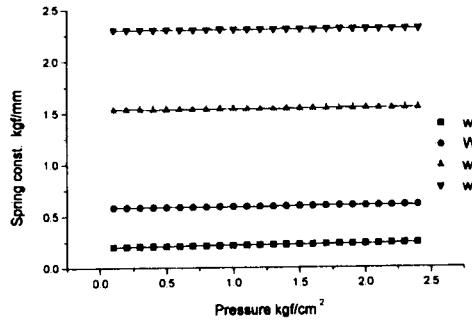


Fig. 13 Effect of circular plate width

약 40kgf/mm^2 으로 이 값을 Table 2의 항복점과 재료인장강도와 비교하여 볼 때, D65은 1.5kgf/cm^2 근처에서 D80은 이 값보다 작은 압력에서 항복점보다 큰 부분이 나타남을 알 수있으며, 그래프에서 항복점보다 큰값이 골부분에서 가장 먼저 나타나며, 전산해석 수치값을 조사하여보니 골부분 약 60도 지점에서 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 실제 실험에서도 소성변형량이 발생하여 실험후에 벨로즈의 종방향 길이변형이 발생하였다. 본 연구에서는 소성변형값을 데이터화 하지는 않았으나 소성역의 해석에 관하여는 앞으로 더욱 연구가 있어야 할 것이다.

Fig.13은 벨로즈 골과 마루부 반지름의 합과 파형부 높이와의 비를 w 라고 할 때, w 값을 변화시켰을 때의 스프링상수선도이다. 즉 반지름은 그대로 두고 원형평판부의 폭만 변화시켜 스프링상수값을 도시하였다. 인의의 압력값에서 w 가 0.3에서 0.4의 스프링상수 증가량이 0.4에서 0.5의 증가량보다 크다. 이는 벨로즈 제작시에 평판부의 제작오차에 따른 스프링상수 오차가 다른범위에 비하여 상대적으로 커질 수 있음을 나타낸다.

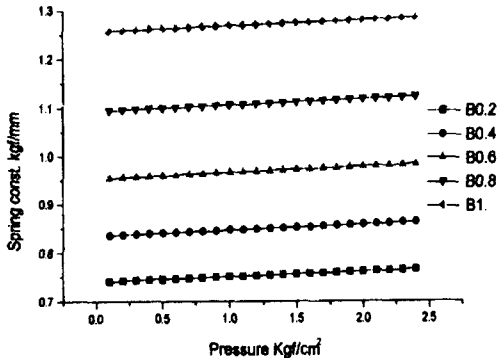


Fig. 14 Effect of circular plate angle

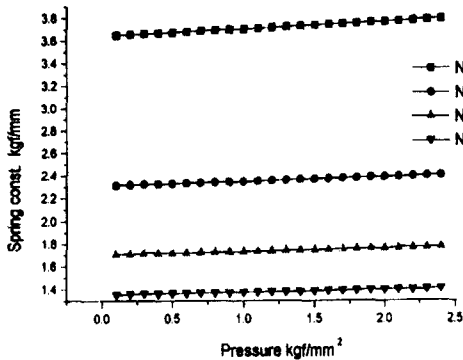


Fig. 15 Effect of number convolution

Fig.14에서 w 는 0.3일 때로 고정하고 마루부와 골부 사이의 경사정도를 점점 크게 하였을 때, 즉 평판부 높이를 0.2~1mm 까지 증가하였을 때 스프링상수 변화량이 커짐을 알 수 있다. 즉 임의 압력에서 벨로즈 평판부의 경사정도가 큰 영향을 보이는 인자임을 알 수 있다. 이는 기본치수의 변화 없이 제작시 평판부의 경사도를 조정함으로써 임의 스프링상수값을 얻을 수 있다. Fig.15는 파형부의 갯수를 변화하였을 때의 스프링상수 값인데 파형갯수에 따라 스프링상수가 크게 나타났다. 이는 파형수에 따른 높이 차이에 의한 값이다.

6. 결 론

이상과 같은 해석에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 제시한 축대칭 쉘에 내압이 작용할 때의 유한요소해석과 벨로즈의 내압실험은 벨로즈 형상을 정밀제작할수록 일치함을 알 수 있었으므로 본 연구에서 개발한 유한요소법에 의한 전산 프로그램을 이용하면 벨로즈의 설계에서 스프링상수 뿐만 아니라 응력값을 예측할 수 있다

2. 같은 치수의 U형 벨로즈에서 원형평판의 경사도를 증감함에 따라 원하는 스프링상수 값을 효율적으로 얻을 수 있으며 이는 벨로즈의 정밀설계를 위하여 매우 중요한 값임을 알 수 있었다.

3. U형 벨로즈에서 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. 벨로즈의 최대급힘응력은 파형의 골부 60도 지점에서 일어남을 알 수 있었다.

5. 벨로즈는 일반적으로 박판으로 성형되므로 하중을 증가하였을 때 부분적으로 소성역으로 되어지는 요소가 있음으로 이는 재료의 응력 변형률 신도의 응력과 변형률 증분량에 따라 탄성계수를 계산하여 소성이론에 적용하면 더욱 실험값과 일치하지 않을까 예상되며 앞으로 이에 대한 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) K.H. Lee, J.S.Wang "A Study on the Axial Stiffness of Bellows ", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 25, No.2, pp.86-95, July 1999
- 5) 任尙銓 郭柄晚 李柱成 "有限要素法入門" 東明社, p153-157, 1985
- 6) S.J.Lee, J.S.Wang, A study on the non linearity

of wave washer spring", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 21 No. 3, pp246-255, 1997.

- 7) S. P. Timoshenko, "Theory of Plates and Shells", Mc-Graw Hill, pp 38-39, 1959.
- 8) K.C.Rockey, "The Finite Element Method", Granada Publishing, pp131-143, 1975
- 9) Pohang Iron & Steel Co., "Stainless Inspection Certificate", Certificate No. 970716-SNE-017-001, July 16, 1997.

저 자 소 개



이경호(李京浩)

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



왕지석(王之錫)

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