

# Ω-형 벨로즈관의 성형을 위한 실험적 연구

구 현 성, 김 낙 수  
홍익대학교 기계공학과

## Experimental Analysis for Forming Ω-type Bellows

Hyunsung Koo, Naksoo Kim  
Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

### Abstract

The purpose of the study is to form Ω-type bellows without any defect by specific rollers which are designed based on the volume distribution technique. In the present paper, we proposed a forming process of existing U-type bellows to a value-added Ω-type in a progressive manner. It was developed to shape a perfect Ω-type bellows after preforming from initial U-type bellows to final U-type bellows. To examine the suggested 'processing condition design' some experiments were performed in a real scale. It was found out that the spring back effect played a major role in deviating the geometry of formed bellows from the predicted one. The problems found in the experiment can be used as important information in manufacturing equipment for forming Ω-type bellows.

### 1. 서 론

벨로즈(bellows)는 단면의 모습이 주름이 져 있어 산과 골의 형상으로 되어있다. 벨로즈관은 주로 배기, 배관계통에 흐르는 고온, 고압의 유체에 의해 발생하는 축변형량을 흡수하여 변형 및 파손을 방지하는 완충장치의 하나로 산업기계용, 수송기계용으로 사용되며, 최근에는 산업이 발전함에 따라 신축이음의 용도이외에 발전소, 화학 플랜트, 항공기, 승용차 및 디젤차량의 소음, 진동 저감을 위해 배기계에 벨로즈관이 필수적으로 장착되고 있다.

벨로즈는 단면의 형상에 따라서 U-형, S-형, Ω-형이 있다. 그 중에서, Ω-형은 고부가가치의 제품으로서 가장 성능이 우수한 반면, 형상이 복잡하고 가공공정이 어려워져서 아직 국내에서는 설계 및 생산이 되고있지 않으므로, 전량을 수입에 의존하

고 있는 실정이다.

국내외의 벨로즈에 관한 연구동향을 살펴보면, U 및 S-형의 벨로즈는 1971년에 최초로 생산되었으며, 1978년 고리 원자력발전소용 EJMA(Expansion Joint Manufactures Association)규격<sup>[1]</sup>에 따른 대형 expansion joint가 국산화 되었다. 또한, 고정도가 요구되는 방위산업용 벨로즈를 생산하기에 이르러 선진국과 비교될 만한 기술력을 가지고 있다<sup>[2,3]</sup>. 뿐만 아니라 벨로즈를 대량생산하기 위한 유압식 나선관 성형장치<sup>[4]</sup>를 개발하여 생산자동화가 된 상태이다. 또한, 승용차에 사용되는 벨로즈의 경우는 진동특성에 관한 연구<sup>[7,8]</sup>가 활발히 진행된 바 있다. 또한 U-형 벨로즈관의 피로수명에 대한 연구<sup>[10]</sup>도 최근에 발표되고 있다. 그러나 아직까지는 비교적 소성가공이 용이한 U-형 및 S-형 벨로즈<sup>[5,6]</sup>에만 편중되고 있어 실질적인 고부가가치를 얻기가 어려운 실정이다.

이러한 상황에서  $\Omega$ -형 벨로즈를 생산하기 위한 많은 시도가 있었으나  $\Omega$ 와 S-형의 중간형상만이 생산되고 있다. 따라서 이들의 문제점을 찾아낼 수 있는 지속적이고도 체계적인 연구가 필요하게 되었다.

외국의 경우 최근의 벨로즈관 성형기술<sup>[9]</sup>은 용도와 크기에 따라 다양한 가공법으로 제조를 하고 있다. 과거에는 outer-in식과 in-outer식 loller 성형법을 많이 사용하여 왔다. 대량생산이 요구되고 산의 수가 많은 경우에는 유압을 이용한 성형법을 사용하며, 산의 수가 적은 경우에는 복합소재를 이용한 가공법이 자주 사용되고 있다. 그리고 직경이 아주 커서 위에서 설명한 방법으로는 제조하기가 곤란한 경우에는 로울러(roller)를 사용하고 있다.

본 연구에서는 다음과 같은 절차에 따라서  $\Omega$ 형 금형을 설계하고,  $\Omega$ -형 벨로즈의 성형시에 생길 수 있는 문제점들을 실험을 통하여 파악하고자 한다.

가.  $\Omega$ -형 벨로즈의 효율적인 제조방안을 제안한다.(Fig. 1)

나. 제안된 제조방안을 기초로 설계변수들을 정의하고, 설계변수들에 대한 관계식을 유도한다.

다. 관계식에서  $\Omega$ 성형용 금형을 제작하고, 실험을 수행하여 성형된  $\Omega$ 형을 검토한다.

본 연구의 목표가 성공적으로 달성되기 위한 사전 실험에서는  $\Omega$ -형 벨로즈관을 성형할 수 있는 로울러 금형을 설계, 제작하며 아울러  $\Omega$ -형 벨로즈관이 제대로 성형되는지에 대한 타당성을 평가한다. 실험후에는 실제 가공시 벨로즈관의 변형특성에 영향을 주는 각종 변수를 파악할 수 있으므로  $\Omega$ -형 벨로즈관의 제조방법, 금형 설계에 대한 데이터를 얻을 수 있다.

## 2. 이 론

### 2.1 설계변수간의 관계식

Fig. 2에 나타나 있는  $\Omega$ -형 벨로즈관의 한 피치에 대한 기하학적 형상으로부터 다음과 같은 설계변수들간의 관계식을 얻었다.

$$H = (R+r)(1-\cos\phi) + b\sin\phi \quad (1)$$

$$\frac{P}{2} = (R+r)\sin\phi + b\cos\phi + s \quad (2)$$

$$R_c = A + r(1-\cos\phi) + b\sin\phi - R\cos\phi \quad (3)$$

여기서, H는 주름의 높이, R은 판재중심까지의 산의 곡률반경,  $\phi$ 는 산의 곡률부 각도, b는 경사면의 직선부 길이, r은 판재중심까지의 골의 곡률반경, P는 피치를 나타내며, s는 골의 직선부 길이,  $R_c$ 는 벨로즈의 중심에서 산의 중심까지의 길이, A는 벨로즈관의 중심에서 골까지의 길이를 나타낸다.

Ω-형 벨로즈관의 체적을 구하기 위해 벨로즈의 전 구간에 걸쳐 두께가 일정하다는 가정을 하고, 기하학적 형상으로부터 산의 원추대요소(conical frustum)와 경사면 부분, 골의 곡선부분과 직선부분의 4구간으로 나누었다.

첫번째 구간인 원추대요소의 미소요소에 대한 체적은

$$\Delta V_1 \cong 2\pi R t \left[ R_c + \left( r_0 + \frac{t}{2} \right) \cos\theta \right] \Delta\theta \quad (4)$$

이다. 이를 산의 곡률부각도에 따라 적분하면 다음과 같다.

$$V_1 = 2\pi R t \left[ R_c \phi + \left( R + \frac{t}{2} \right) \sin\phi \right] \quad (5)$$

두번째 구간의 체적은 경사면의 직선부분에 대한 체적으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_2 &= \int_{A+r(1-\cos\phi)}^{A+r(1-\cos\phi)+b\sin\phi} 2\pi \left( \frac{t}{\sin\phi} \right) dr \\ &= 2\pi t b \left\{ [A + r(1-\cos\phi)] \frac{b}{2} \sin\phi \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

세번째 구간의 체적은 골의 곡선부분으로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_3 &= \int_{\pi-\phi}^{\pi} \left[ (A + r)\phi + \left( r + \frac{t}{2} \right) \sin\phi \right] \\ &= 2\pi r t \left[ (A + r)\phi + \left( r + \frac{t}{2} \right) \sin\phi \right] \end{aligned} \quad (7)$$

네번째 구간의 체적은 골의 직선부분으로서 다음 식으로 주어진다.

$$V_4 = 2\pi t A s \quad (8)$$

Ω-형 벨로즈관의 한 피치에 대한 체적은 기하학적 형상을 4개 부분으로 나눈 각각의 체적의 합과 같다. 즉,

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{V}{2\pi t} = & R\left\{R_c\phi + \left(R + \frac{t}{2}\right)\sin\phi\right\} \\ & + b\left\{[A + r(1-\cos\phi)] + \frac{b}{2}\sin\phi\right\} \\ & + r\left\{(A + r)\phi + \left(r + \frac{t}{2}\right)\sin\phi\right\} \\ & + As \end{aligned} \quad (10)$$

위에서 유도된 관계식을 이용하여 벨로즈관이  $\Omega$ -형 벨로즈관으로 성형되는 과정을 U-형 벨로즈에서 각진 U-형 벨로즈관 및  $\Omega$ -형 벨로즈관의 두 단계를 거쳐서 성형된다고 제안한다.

## 2.2 U-형에서 각진 U-형으로의 변형

Fig. 3에 나타난 U-형에서 각진 U-형으로의 변형에 대한 기하학적 형상으로부터 다음과 같은 가정을 하였다.

가정 1. 피치(pitch)는 일정하게 가공된다.

$$P_o = P$$

$$P_o = (R + r)\sin\phi + b\cos\phi + s = R + r + s$$

$$s = \frac{P_o}{2} - (R + r)$$

가정 2. 벨로즈의 골부분만 가공되므로 산의 반지름의 변화가 없다.

$$R_o = R$$

가정 3. 벨로즈의 골부분 가공시 산의 기하학적 형상에 대한 변화는 없다.

$$R_{c_o} = R_c$$

위의 가정으로부터  $A_o + H_o - R_o = A + H - R_o$ 임을 알 수 있고, 벨로즈의 산의 높이는 다음과 같이 유도된다.

$$H = A_o + H_o - A \quad (11)$$

U-형 벨로즈관의 체적은  $\Omega$ -형 벨로즈관에 대한 체적의 식 (10)에 위의 가정들을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{V}{2\pi t} = & R_o\left\{(A + H - R_o)\frac{\pi}{2} + \left(R_o + \frac{t}{2}\right)\right\} \\ & + (A_o + H_o - A - R_o - r)\left[(A + r) + \frac{1}{2}(A_o + H_o - A - R_o - r)\right] \\ & + r\left[(A + \frac{r}{2})\pi + \left(r + \frac{t}{2}\right)\right] + A\left[\frac{P_o}{2} - (R_o + r)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

이 된다.

각진 U-형 벨로즈관은 Fig. 3의 기하학적 형상에서 알 수 있듯이 골의 곡률반경이 줄어들게 되므로, 설계변수로 정의된 A와 H의 값이 어떻게 변하는가에 관심을 두었다.

식 (16)을 이용하면 앞에서 계산된 U-형 벨로즈관의 체적이 항상 일정하다는 조건으로부터 A와 H의 값을 계산할 수 있다. 계산된 A와 H 및 설계변수들의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 결과를 보면 골의 곡률반경이 변함에도 불구하고 A와 H의 값은 그다지 변하지 않았음을 알 수 있다. 그러므로 실험에 사용될 preforming용 금형의 산의 곡률반경은  $r = 0.3r_0, 0.6r_0, 0.9r_0$ 의 값을 정하였고, 골의 곡률반경은 변하지 않았으므로 벨로즈관의 산의 곡률반경으로 취하였다.

이렇게 계산된 결과를 기초로 하여 preforming용 금형을 제작하였고, U-형 벨로즈관이 각진 U-형 벨로즈관으로 성형되도록 하였다.(Fig. 5)

### 2.3 각진 U-형에서 Ω-형으로의 변형

각진 U-형의 벨로즈 시편을 Ω-형 벨로즈관으로 성형하기 위해서는 각진 U-형 벨로즈 시편의 산을 적절한 반경으로 구속하고, 피치를 점진적으로 줄여가면서 압하력의 영향으로 변형이 벨로즈 시편의 골에 국한되도록 해야한다. 따라서, 각진 U-형의 벨로즈 시편의 피치를 점진적으로 줄여가면서 Ω-형 벨로즈관으로 성형한다. 이때, 성형될 Ω-형의 피치는 각진 U-형 벨로즈의 피치에 0.9, 0.8, 0.7배의 피치로 성형된다고 제안하였다.

Fig. 6에 나타낸 각진 U-형과 Ω-형의 기하학적 형상으로부터 다음과 같은 가정을 하였다.

가정 1. 변형은 벨로즈의 골에서 일어나지 않고 산에서만 일어난다.

$$A = A'$$

가정 2. 변형이 되는 골의 곡률반경은 같다.

$$r = r'$$

가정 3. 변형시 골의 직선부 길이는 같다.

$$s = s'$$

한편, Ω-형 벨로즈관의 설계변수식을 다시 정리하여 보면

$$R'_c = A + H' - R \tag{13}$$

$$b' = \frac{1}{\sin\phi} [H' - (R' + r)(1 - \cos\phi)] \tag{14}$$

$$\frac{P'}{2} = (R' + r)\sin\phi + b' \cos\phi + s \tag{15}$$

임을 알 수 있다. 위 식들을 Ω-형 벨로즈관의 기하학적형상으로부터 Ω-형 벨로즈관의 체적을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{V}{2\pi t} &= R' \left( R'_c \phi + \left( R_0 + \frac{t}{2} \right) \sin\phi \right) \\ &\quad + b' \left\{ [A' + r(1 - \cos\phi)] + \frac{b'}{2} \sin\phi \right\} \\ &\quad + r \left[ (A' + r)\phi + \left( r' + \frac{t}{2} \right) \sin\phi \right] \\ &\quad + A' s \end{aligned} \tag{16}$$

Fig. 6에 나타나 있는 것처럼 각진 U-형에서  $\Omega$ -형으로의 변형에서 H'와 Rc', 그리고 R'와 b'의 값에 변화가 생김을 알 수 있다. 따라서, 식 (16)에  $\Omega$ -형 벨로즈관의 설계변수식을 대입하면  $\phi$ 가 변함에 따라 R'와  $\phi$ 의 관계 및  $\phi$ 와 H'의 관계를 계산할 수 있다.

각진 U-형 벨로즈관을  $\Omega$ -형 벨로즈관으로 성형할 때,  $\phi$ 의 각도에 따라 여러 설계변수가 변화되어짐을 확인할 수 있다. 각진 U-형 벨로즈관의 피치가 점진적으로 줄어들 수 있도록 가정되어진 피치는  $P' = 0.9P_0, 0.8P_0, 0.7P_0$ 인데, 줄어든 각각의 피치에 대하여 여러 설계변수들의 변화를 계산을 통하여 예측할 수 있다. 계산된 설계변수들에서  $\phi$ 와 R'과의 관계는 Fig. 7에,  $\phi$ 와 H'의 관계는 Fig. 8에,  $\phi$ 와 b'와의 관계는 Fig. 9에 각각 나타내었다. 아울러  $\phi - Rc'$ ,  $\phi - Rc'+R'$ ,  $Rc'+R'-R'$ 과의 관계는 Fig. 10, 11, 12에 나타내었다. 이러한 계산된 결과를 기초로  $\Omega$ 성형용 톨을 설계하여 실험을 수행하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험용 금형 및 실험장치

계산되어진 설계변수들의 값들은 줄어든 각 피치에서 얻어진 결과를 기초로 하여  $\Omega$ -성형용 금형을 제작하였다. postforming용 금형의 형상은 Fig. 13에 나타내었다.

실험에 사용된 실험장치의 모습을 Fig. 14에 나타내었다. 그림 14에 나타난 실험장치의 대략적인 구조를 살펴보면, 크게 2개의 동력전달을 가지는 구동롤(main roll) 부분과 압력롤(pressure roll)의 부분으로 나눌 수 있다. 이것은 벨로즈관을 성형할 때, 구동롤의 회전수와 압력롤의 이송율(feed rate)에 대한 공정변수를 폭 넓게 선택할 수 있어서 공정중에 최적의 성형조건을 갖도록 하였다. 그래서 두 부분을 각기 다른 동력전달 방식을 갖도록 하였다.

구동롤 부분은 모터의 회전수 조절이 용이하고 부하가 많이 걸려도 일정한 회전수를 유지할 수 있도록 1마력의 DC모터를 장착하였다. 모터에서 나온 동력은 체인기어와 감속기로 전달된다. 감속기에서 나온 동력을 베벨기어를 통하여 축의 끝에 위치하고 있는 로울러에 전달하도록 하였다.

압력롤은 구동롤의 회전수와 상관없이 상하이송이 가능하도록 제작하였다. 이때, 상하이송의 이송속도를 적절하게 조절할 수 있도록 0.5마력의 DC모터를 장착하였다. 이 모터에서 나온 동력은 체인기어를 통하여 감속기로 전달되며 체인기어에 의해 동력을 전달하도록 하였다. 전달된 동력은 이송나사를 통해 전달되며, 이송나사는 압력롤을 지지하고 있는 지지대를 상하 직선운동 시킨다.

실험장치의 구동롤의 회전수는 공급되는 전류량에 따라 조절되며, 그 범위는 0 - 14rpm 정도이다. 압력롤의 이송속도 역시 공급되는 전류량에 따라 조절이 가능하다. 또한, 모터의 전극을 바꾸는 조작으로 역회전이 가능하다.

#### 3.2 실험방법

설계된 두개의 로울러를 이용하여  $\Omega$ -형 벨로즈관으로 성형할 수 있도록 하기 위

하여 두 단계의 과정을 거쳐 실험을 한다.

첫번째 단계는 Fig. 15과 같이 U-형 벨로즈관의 골의 모양을 로울러를 이용하여 편평하게 변화시키는 실험이다. 이 실험에서는 벨로즈관이 preforming용 금형의 첫번째 골과 두번째 골 사이를 순차적으로 진행하게 된다. 이때, 금형은 일정한 속도로 회전을 하게되며, 압력롤(pressure roll)은 위쪽으로 수직이동을 하게된다. 벨로즈관은 금형과의 마찰에 의해 회전을 하게되고, 변형은 벨로즈관의 골에 국한되며 편평하게 된다. 결국 각진 U-형 벨로즈관이 성형되도록 한다.

이 과정을 거치고 난 시편을 두번째 단계로서 Fig. 16과 같은 postforming용 성형 로울러를 이용하여 Ω-형 벨로즈관이 제조될 수 있도록 한다. 이때, 편평해진 벨로즈관은 금형의 각 4단계별로 진행하게 된다. 벨로즈관이 금형의 변형영역에 들어가게 되면 피치가 점진적으로 줄어들도록 설계되어 있다.

결국 변형은 각진 U-형 벨로즈관의 골에서 피치가 줄어들게 되며, 동시에 산의 높이가 줄어든 Ω-형 벨로즈관이 제조된다.

### 3.3 실험결과

U-형의 벨로즈관을 각진 U-형 벨로즈관으로 성형할 때, 벨로즈관의 기하학적 형상으로부터 정해진 여러 공정변수중에서 A와 r의 관계식을 유도하였고, 각 공정변수들의 변화를 계산하였다.

사용되어진 preforming용 금형은 아주 적절하게 설계되어 벨로즈관이 원하는 각진 U-형 벨로즈관으로 성형할 수 있었다. 실험 후에 얻어진 벨로즈관에 대한 단면형상을 Fig. 17에 나타내었다.

Ω-형 벨로즈관으로 성형하고난 후에 제대로 성형이 되어졌는가를 단면을 통해 검토하였으나 벨로즈관 자체가 가지고 있는 spring back에 의해 피치가 기대한 만큼 줄어들지 못했기 때문에 완전한 Ω-형 벨로즈관을 얻지 못하였다.(Fig. 17, 18)

## 4. 성형평가

기대하였던 Ω형상과 실험을 통해 성형된 Ω형상을 기대하였던 Ω형상과 비교할 수 있도록 Fig. 19 나타내었다. 또한, Ω-형 벨로즈관의 각 설계변수별로 이들 두가지 형상에 대해 비교할 수 있도록 표 1에 나타내었다.

표 1에 나타난 결과를 설계변수별로 종합하여 보기로 하겠다.

산의 곡률부. 반경은 로울러 금형의 영향으로 적절하게 성형되어졌다. 아울러 산의 높이 또한 적절하게 성형되어졌다. 두드러진 차이를 보이는 곳은 전체적인 pitch와 뿌리부분의 곡률반경으로서 상대적으로 커다란 차이를 나타남을 알 수 있다. 참고로 각진 U-형 벨로즈관의 pitch가 11.6mm임을 고려하면 성형된 후의 Ω-형 벨로즈관의 골 사이의 거리가 0.46배이다.

이것은 벨로즈관이 로울러 금형의 변형영역 안에서 충분한 성형이 이루어졌으나, 벨로즈관 자체의 spring back현상으로 인한 pitch의 증가로 설명될 수 있다.

먼저 spring back의 현상으로 인한 pitch의 증가에 대해 살펴보면, 예상하였던

pitch보다 약 1.8mm증가되어 22.4%정도의 탄성복원이 있음을 알 수 있다. 또한, 뿌리부분의 곡률반경은 약 1.22mm로서 기대하였던 0.64mm보다 상당히 크게 나타나 있다. 아울러 경사면의 직선부 길이는 약 2.81mm로서 예상치에 훨씬 못미치는 결과를 나타냈다. 하지만 산의 높이나 산의 곡률반경 및 뿌리부분의 직선부 길이는 양호한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과들을 종합해보면 전체적으로는 기대하였던 형상에 다소 차이가 있음을 알 수 있지만, 로울러를 이용한 성형방법에는 문제가 별로 나타나지 않았음을 알 수 있다. 또한, 위에서 제시한 정량적인 차이를 보이게된 근본적인 이유들을 정리해보면 탄성복원임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

1피치  $\Omega$ -형 벨로즈관을 제조하기 위하여 실험을 실시하였다. 이 실험은  $\Omega$ -형 벨로즈관을 성형할 때, 시행착오를 줄이기 위하여

- (1) 개념설계를 통해  $\Omega$ -형 벨로즈의 성형모델과 몇가지의 기본적인 가정을 제시하였다.
- (2) 제시된 성형모델을 바탕으로 여러 공정변수들을 벨로즈의 기하학적형상으로 부터 관계식을 유도하였다.
- (3) U-형 벨로즈관에서 각진 U-형 벨로즈관으로 성형할 때, 산 밑부분의 반경이 줄어들어도 불구하고 A값의 변화는 거의 없다.
- (4) 각진 U-형 벨로즈관에서  $\Omega$ -형 벨로즈관으로 성형할 때, 피치를 점진적으로 줄이면서 압하력에 의해  $\Omega$ -형 벨로즈를 성형하였다.

후기 : 본 연구의 일부는 1994년도 홍익대학교 교내연구비의 지원으로 이루어졌습니다.

## 7. 참고문헌

1. Standard of the Expansion Joint Manufactures Association, Inc., 6th Edition, 1993.
2. 금속관의 주름부 성형장치, 출원번호 1991년 실용신안 등록출원 제 335호. 기계장치 특허 93년 933347호.
3. 금속관의 주름부 성형장치, 출원번호 1992년 실용신안 등록출원 제 28576호.
4. 나선관 성형장치, 출원번호 1993년 특허출원 제 14178호.
5. 이 완익, 김태완, "내압을 받는 U형 Bellows의 응력해석", 한양대학교 연구보고, Vol. 28, pp. 255-261, 1989.
6. 이 완익, 김 태완, "벨로우즈 문제 해석을 위한 수정 에너지론", 자동차공학회지, Vol. 11, No. 2, pp. 55-65, 1989.
7. 김 민수, 이 귀영, "부분구조 합성법을 이용한 배기계의 진동해석" 대한기계학회논문



- 문집, Vol. 17, pp. 1833-1840, 1993.
8. 이 승섭, 이 장명, “배기계 Hanger 위치결정 및 Bellows 효과에 관한 연구”, I-DEAS User’s Conference, October, 1993.
  9. 浮田日出夫, “베로즈およびフレキブル管の製造技術”, 塑性と加工(日本塑性加工學會誌), 第32巻 第366號, 1991.
  10. G.Subramanian and Char Raghunandan, “On improving the fatigue life of U-form bellows”, Journal of Materials Processing Technology, 41 (1994) PP. 105-114, Elsevier.

Table 1. Ω형상의 비교

설 계 변 수	기대되는 Ω형상	실험후 Ω형상
피치	8.02	9.82
산의 높이	8.38	8.34
산의 반경	3.86	3.38
직선부 길이	0.44	2.81
뿌리부 곡률반경	0.64	1.22

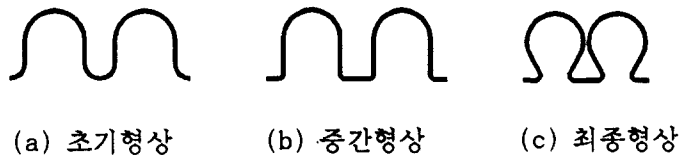


Fig. 1 Ω-형 벨로즈관을 성형하기 위한 개념설계

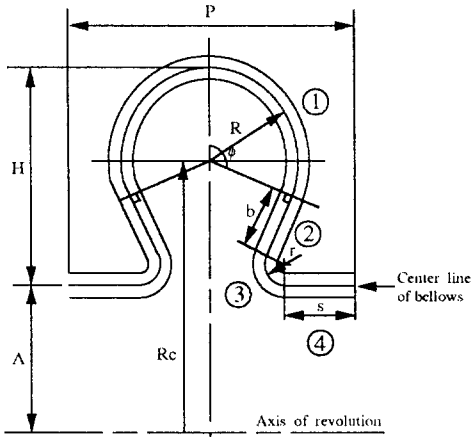


Fig. 2 Ω-형 벨로즈관의 기하학적 형상

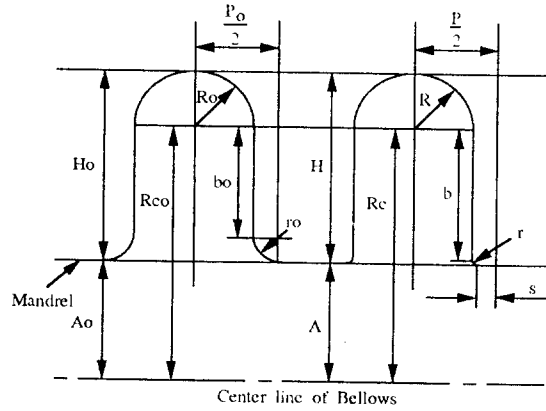


Fig. 3 U-형 및 각진 U-형 벨로즈관의 기하학적 형상

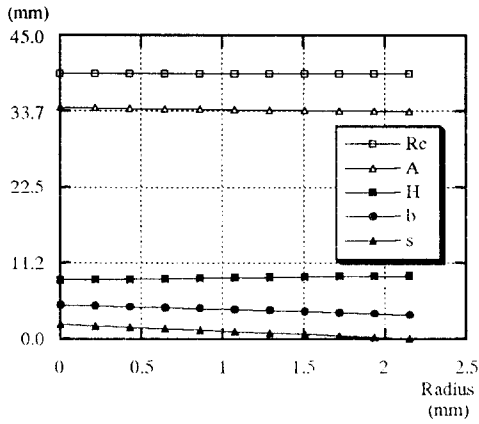


Fig. 4 각진 U-형의 설계변수에 대한 계산된 결과

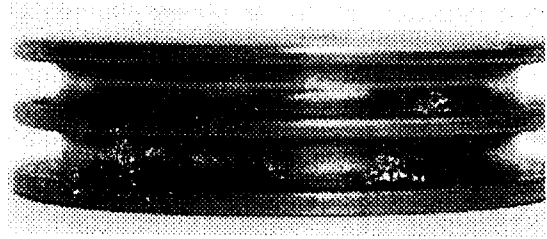


Fig. 5 Pre-forming용 금형의 가공된 형상

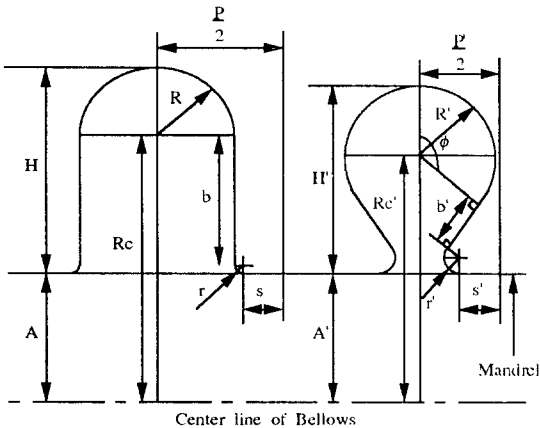


Fig. 6 각진 U-형 및 Ω-형 벨로즈관의 기하학적 형상

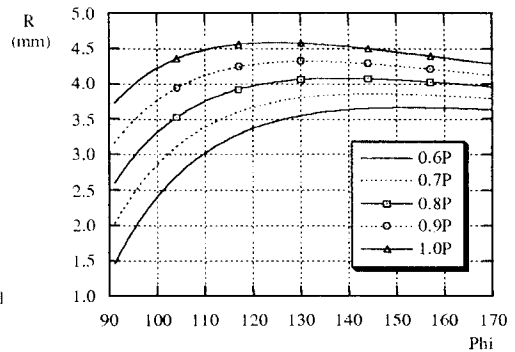


Fig. 7 φ - R'의 관계

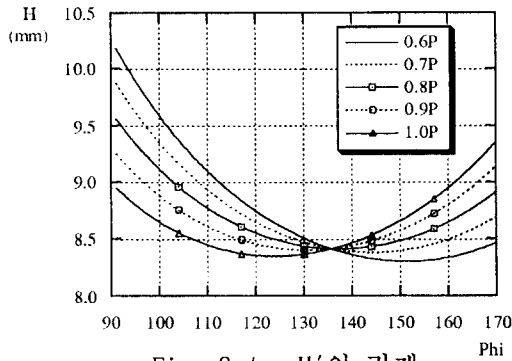


Fig. 8  $\phi - H'$ 의 관계

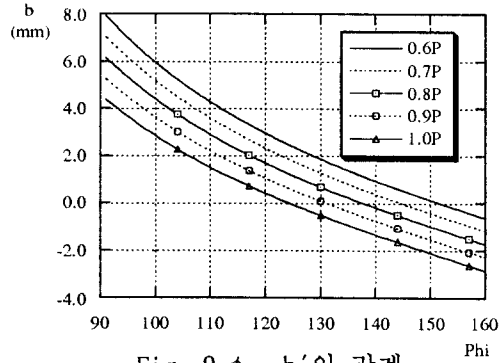


Fig. 9  $\phi - b'$ 의 관계

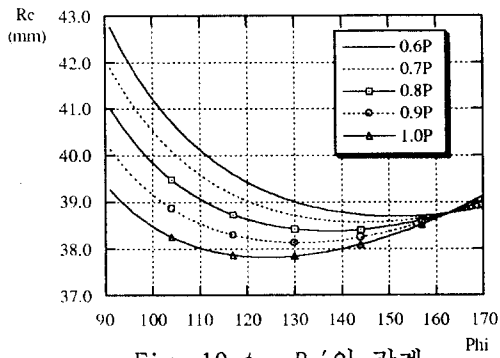


Fig. 10  $\phi - R_c'$ 의 관계

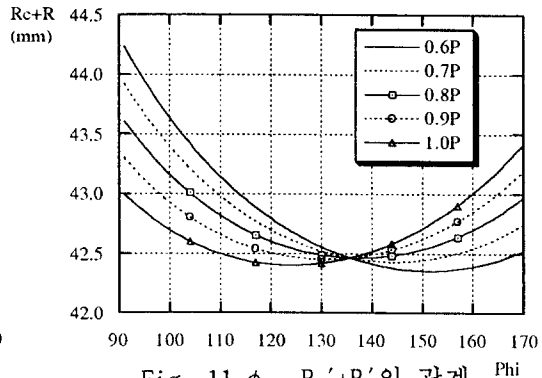


Fig. 11  $\phi - R_c'+R'$ 의 관계

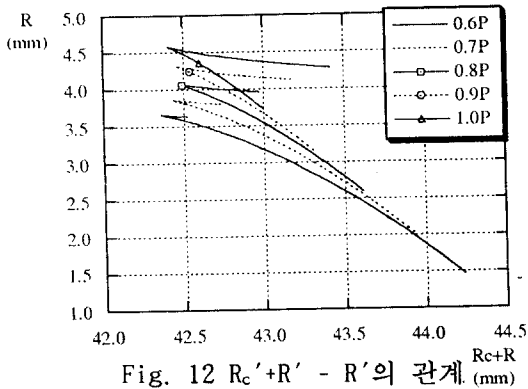


Fig. 12  $R_c'+R' - R'$ 의 관계

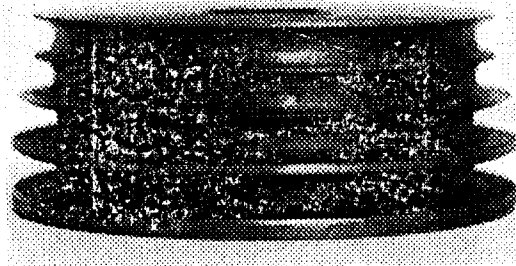


Fig. 13 Post-forming용 금형의  
가공된 형상

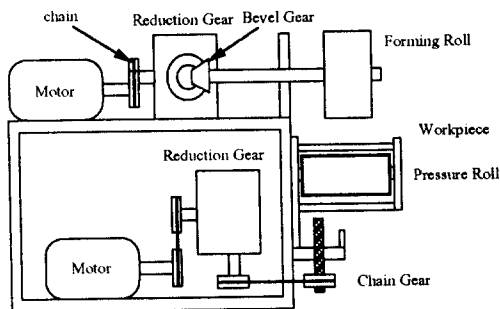


Fig. 14 실험장치의 대략적인 구조

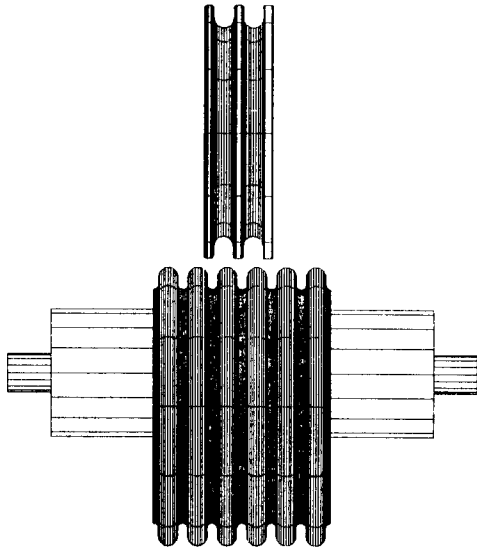


Fig. 15 각진 U-형 벨로즈관의  
성형방법

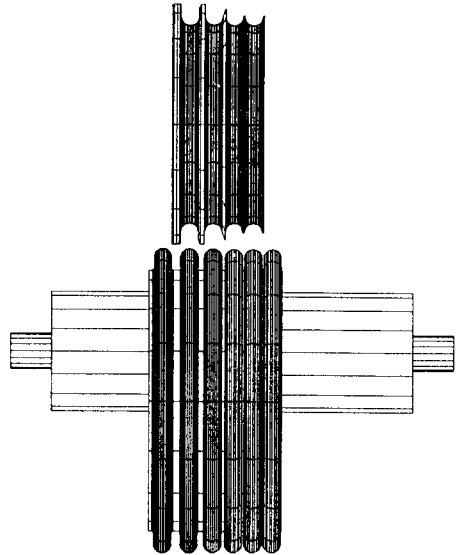


Fig. 16 Ω-형 벨로즈관의  
성형방법

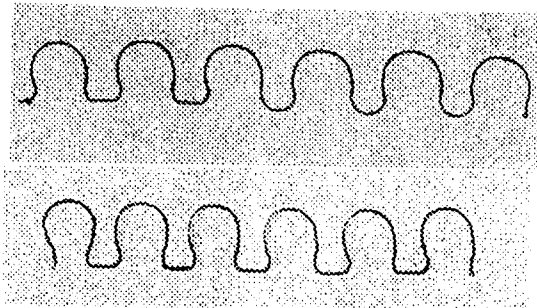


Fig. 17 실험후 U및 Ω-형  
벨로즈관의 단면

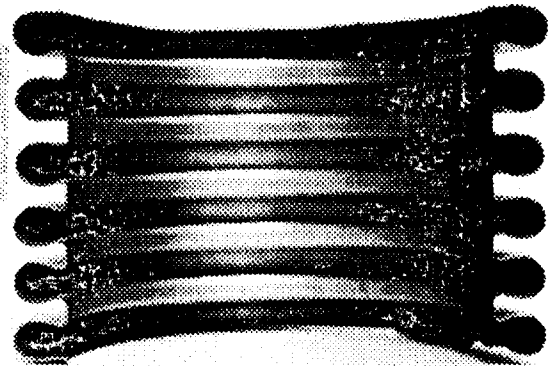


Fig. 18 실험후 Ω형 벨로즈관

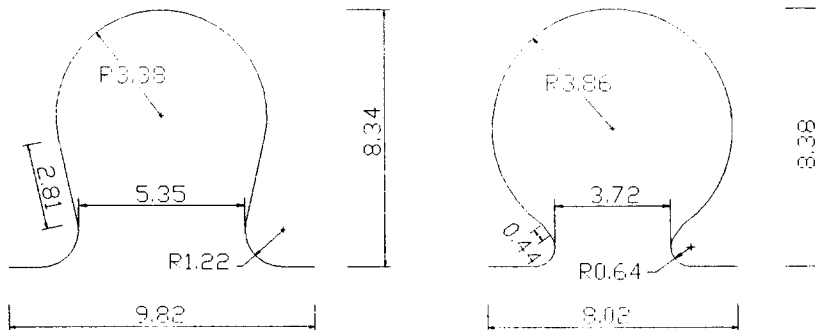


Fig. 19 기대되는 Ω형상과 실험후 Ω형상의 비교