

## Mechanical seal용 벨로우즈 Diaphragm 설계프로그램 개발

조해용\*(충북대학교 기계공학부), 남기정, 오병기, 김영훈(충북대학교 대학원),  
이제훈, 서정(한국기계연구원 레이저 기술그룹)

### Development of Bellows Diaphragm Design Program for Mechanical Seal

H. Y. Cho(Mech. Eng. Dept., CBNU), G. J. Nam, B. K. Oh, Y. H. Kim(Grad., CBNU),  
J. H. Lee, J. Suh(Laser Application Group, KIMM)

#### ABSTRACT

A bellows diaphragm design program for mechanical seal was developed in this study. This program was written in AutoLISP on the AutoCAD system with a personal computer. Basic design concept used in this program is composition of a convolution that is tangent to two lines and five circles from given design parameters(initial radius, inner and outer diameter, thickness, pitch, etc.). The effects of altering some design parameters on stress distribution of bellows were estimated using commercial FEM code, NISAI. As a result, the bellows diaphragm for mechanical seal was successfully designed by the program. The FEM result shows that stress is dependent on straight line length and bellows diameter with same span.

**Key Words** : Mechanical seal(기계적 씌일), Diaphragm design(다이하프램 설계), Design parameters(설계변수)

#### 1. 서론

블랭킹과 피어싱 및 스탬핑 공정을 거친 후 내외경을 연속적으로 용접하여 주름관 형태로 제작된 탄성체인 벨로우즈는 높은 진공, 고온, 부식성 유체 등의 악조건에서 사용된다. 벨로우즈를 이용한 mechanical seal은 상대 운동을 하는 두 부품사이의 기밀을 유지하여 기름 유출을 방지하는 부품으로 우주항공, 자동차, 화학 등 고온, 고압 및 고성능을 요하는 분야에서 많이 사용되고 있다. 벨로우즈에 관하여 최근에는 유한요소해석을 통해 사용용도에 적합한 벨로우즈형상을 설계하는 연구가 진행되어 Choi<sup>1)</sup> 등은 BASIC 언어를 이용하여 벨로우즈 형상을 쉽게 제도하여 응력 및 피로해석과 신뢰성 평가를 하였으나 현장도면으로 출력하지 못하였다. 따라서, 본 논문에서는 AutoCAD하에서 지원하는 AutoLISP 언어를 이용하여 벨로우즈 diaphragm을 자동으로 설계하는 설계 프로그램을 개발하고, 상용 유한요소 프로그램인 NISA II를 사용하여 설계된 형상을 해석하여 설계 프로그램을 검증하고자 한다.

#### 2. 벨로우즈 다이하프램 설계 프로그램

##### 2.1 설계규칙

금속 벨로우즈는 동심원의 주름을 형성하기 위해 압연된 얇은 판재에 블랭킹, 피어싱 및 스탬핑 가공을 동시에 수행하는 공정을 거친다. 따라서, 평판 및 헬 이론에 입각한 탄성론적인 이론<sup>2,3)</sup>과 스탬핑에 따른 소성이론<sup>4,5)</sup>등의 지식이 필요하다. Fig. 1은 벨로우즈 설계를 위한 기초 원리를 나타낸 그림이다.

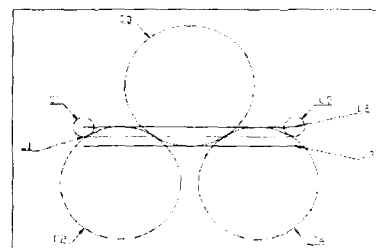


Fig. 1 Basic design principle of bellows diaphragm

벨로우즈 설계 규칙은 현장의 경험<sup>6)</sup>과 관련 참고 문헌<sup>2-5)</sup>에서 발췌하여 정리하였으며 다음과 같다.

- (1) 상판과 하판은 원호와 직선으로 구성된다.
- (2) 상판과 하판의 직선부 길이는 미소하지만 다르다.
- (3) 상판의 직선부 길이가 하판의 직선부 길이보다 작다.
- (4) 재료가 변형을 받으면, 유동응력은  $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$  으로부터 결정된다.
- (5) 재료가 변형을 받으면 체적의 변화는 없다.
- (6) 상판과 하판은 대칭성으로 간주하여 상판만 설계한다.
- (7) 벨로우즈 형상은 중립면을 기준으로 설계된다.
- (8) 각도에 편리를 도모하고자 수평 상에서 설계 후 피치만큼 회전시킨다.
- (9) 직선부위 길이부분과 초기반지름 및 기본 사양 입력값에 의해 작도되어진다.
- (10) C1과 C5의 반지름은 같다.
- (11) C1과 C5의 접선을 L1으로 하며 L2와 L3는 C1의 반지름만큼 offset한 결과이다.
- (12) L1을 3등분한 두점과 L3에 중심점인 한점을 지나는 것이 C3원이다.
- (13) 스프링상수 및 관성모멘트를 크게 하기 위해 C2는 C1과 C3와 L2를 접하는 원이고 C4는 C3와 C5와 L2에 접하도록 설계한다.
- (14) 용접부 형상은 용접 비이드 부분을 감안하여 두께의 3/2을 지름으로 하였다.

## 2.2 프로그램 구성

본 프로그램은 AutoCAD 환경하에서 구동되는 AutoLISP언어를 이용하여 개발되었고, Fig. 2와 같이 주 프로그램과 두 개의 부 프로그램으로 구성되어 있다.

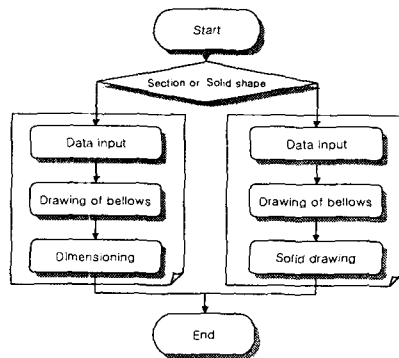


Fig. 2 Flow chart of design program for bellows

## 2.3 주 프로그램

주 프로그램은 전체 프로그램을 로드시키고, 작업환경을 관리하는 프로그램으로, Fig. 3처럼 형상을 설계하는 방법의 선택과 설계된 벨로우즈 형상의 도면작도 및 출력을 제어한다.

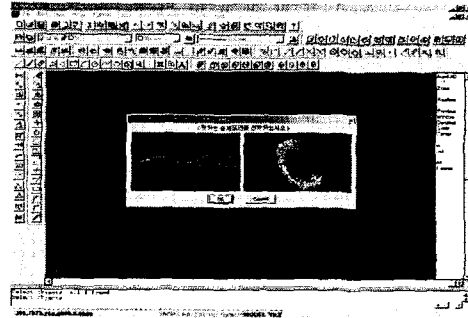


Fig. 3 Initial window of design program

## 2.4 데이터 입력

설계하고자 하는 벨로우즈의 입력변수는 외경, 내경, 피치, 두께 및 초기 반지름과 용접부분과 초기 반지름을 갖는 직선부분의 길이 등이다. 입력창은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 다이얼로그 박스를 이용하여 설계자가 설계사양에 따라 값을 변경할 수 있도록 구성되어 있다. Fig. 4는 초기반지름 C1 0.5mm이고 내경 55mm, 외경 80mm, 피치 1.3mm, 두께 0.08mm, 직선길이 1.14mm로 설계사양이 입력된 한 예이다. 그리고 입력사항의 확인 여부는 "OK", "CANCEL" 메뉴를 두어 수행되도록 하였다.

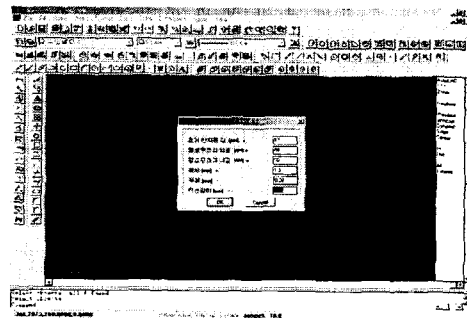


Fig. 4 Window of data input

## 2.5 도면작성

데이터 입력단계에서 벨로우즈 설계사양이 입력되면 도면작성 프로그램에서는 입력받은 값들로부터 좌표점을 잡고 수식을 연산하여 벨로우즈 형상이 설계된다. 상판과 하판의 직선부 길이는 설계규칙 3에

의해 상판의 CI과 하판의 CI부분이 최소 거리가 되도록 프로그램을 작성하여 상판의 길이보다 하판의 길이가 길게 설계되어진다. 완성된 벨로우즈 형상은 치수작업을 하고 설계도면을 플로터 및 프린터로 출력하여 현장에서 사용할 수 있도록 구성하였다. Fig. 5는 도면으로 출력하기 위해 치수를 입력하는 치수 기입창과 DXF 파일로 저장하기 위한 파일 저장창 중 선택할 수 있도록 하는 선택창을 나타낸다.

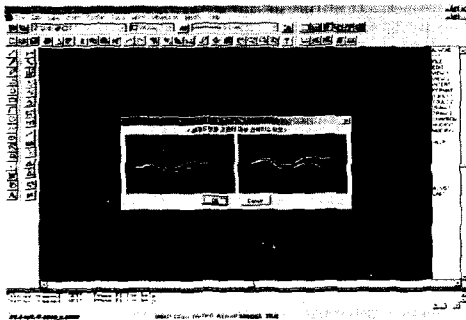


Fig. 5 Window of dimension input or DXF file output

## 2.6 프로그램 실행결과

AutoCAD를 실행시킨 후 Command 명령창에서 "bellows"를 입력하면 Fig. 3과 같이 벨로우즈 단면형상과 3차원 형상 중 선택하여 도면화 할 수 있는 선택창이 나오고, 이 중 원하는 창을 선택하고 Fig. 4에서 설계에 필요한 기본사항 입력과 Fig. 5에서 도면을 선택하면 Fig. 6처럼 벨로우즈 형상과 치수가 자동으로 기입된 도면을 출력할 수 있다. 도면화된 벨로우즈 형상은 5개의 원과 3개의 직선을 이용하여 정확하게 구현할 수 있었다. 또한, 프로그램이 대화식으로 구성되어 있어 비숙련자라도 기본적인 값만 입력하면 벨로우즈 형상과 치수가 기입된 도면을 프린터나 플로터를 이용하여 쉽게 출력할 수 있다.

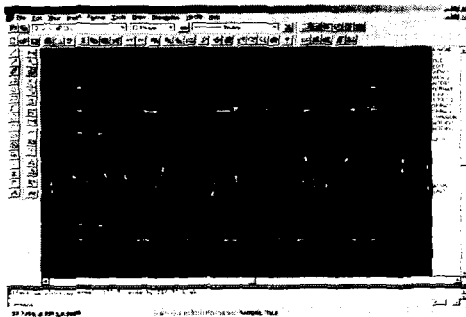


Fig. 6 Drawings of bellows

## 3. 해석

### 3.1 모델링

Fig. 6의 벨로우즈 축대칭 단면을 Fig. 5의 선택창에서 DXF파일로 저장하고 유한요소 프로그램인 NISAII의 pre processor에서 불러들여 유한요소 모델링을 하였다. 벨로우즈는 형상과 하중이 축대칭이므로 4-node axisymmetric element를 사용하였고, 경계조건과 해석에 영향을 미치는 부분을 감안하여 4개의 콘볼루션만 모델링하여 해석을 수행하였다. 또한 해석할 때 벨로우즈 판끼리의 접촉을 고려하여 x, y 축 평행이동의 2자유도와 z축 회전의 3개의 자유도를 가지고 있는 contact surface element<sup>7)</sup>를 접촉이 일어날 것으로 생각되는 부위에 사용하였다.

### 3.2 응력해석

기존 기계적 씨일의 한 규격을 기준으로 초기 반지름, 내외경, 두께 및 직선부 길이의 설계변수를 변경하여, 설계변수 변경에 따라 벨로우즈가 외압을 받는 경우의 콘볼루션의 응력을 상용 유한요소 프로그램인 NISAII를 이용하여 해석하였다.

Fig. 7은 0.9806N/mm<sup>2</sup> (0.1kg/mm<sup>2</sup>)로 외압을 주었을 경우 나타난 변형 및 응력분포이다. 최대 von-Mises 응력은 외측 하단부의 5번째 곡물 부분에서 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8에서 직경 변화에 따른 응력변화를 관찰하면 벨로우즈 외경이 커짐에 따라 응력이 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 길이가 길어짐에 따라 변위가 더 커지게 되므로 응력이 상승된다.

Fig. 9에서 초기 반지름을 변화시켰을 때의 응력변화를 확인하면 초기 반지름이 커짐에 따라 응력값이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 초기 반지름이 커지면 설계규칙에 의하여 두 번째 곡물이 작아지게 되어 강성을 더 높이는 결과를 초래하므로 감소하게 된다.

Fig. 10에서 직선부 길이를 변화시킴에 따라 발생하는 응력을 관찰하면 직선부 길이가 길어질수록 응력이 감소하는데 이는 직선부 길이가 버팀 역할을 하여 강성이 커져서 응력이 감소하게 되는 것으로 직선부 길이를 가능하면 길게 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 11에서 두께가 증가함에 따라 응력이 현격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서, 여러 가지 응력에 관련된 인자 중에 두께가 차지하는 비중이 가장 큰 것을 알 수 있다.

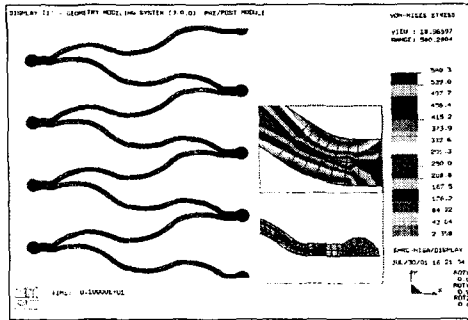


Fig. 7 Stress distributions by external pressure

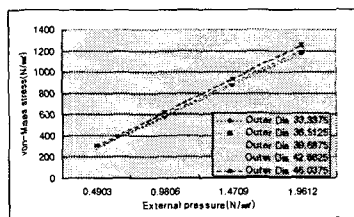


Fig. 8 von-Mises stress according to diameter of bellows

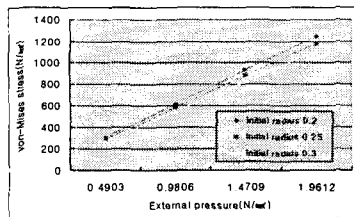


Fig. 9 von-Mises stress according to initial radius C1 of diaphragm

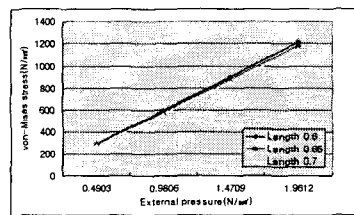


Fig. 10 von-Mises stress according to land length of diaphragm

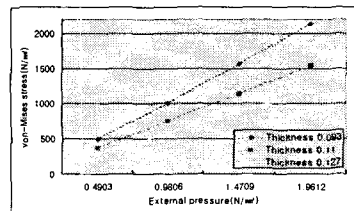


Fig. 11 von-Mises stress according to thickness of diaphragm

#### 4. 결론

Mechanical seal용 벨로우즈 다이어프램 설계규칙을 확립하고 정식화하여 벨로우즈를 자동 설계하는 프로그램을 개발하고, 개발된 프로그램에 의해 설계된 벨로우즈 형상에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현장경험과 참고문헌을 참고하여 5개의 원과 3개의 직선을 이용하여 벨로우즈 형상을 구현할 수 있는 설계규칙을 확립하였다.

2. 설계프로그램은 설계규칙을 이용하여 대화식 다이어로그박스를 통해 기본적인 사양만 입력하면 설계 비숙련자라도 쉽게 사용할 수 있도록 구성되었고, 설계된 벨로우즈 형상은 프린터나 플로터로 쉽게 출력가능하며, 유한요소 해석 프로그램으로 연계할 수 있으므로 매우 유용하다.

3. 벨로우즈의 직선부 길이가 길어질수록 응력이 감소하였고, 스펠이 같은 경우 직경이 증가함에 따라 응력이 증가하였다.

4. 두께가 증가함에 따라 응력이 현격하게 감소하므로 응력에 관련된 인자 중에 두께가 차지하는 비중이 가장 큰 것을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 최병익외 3명, "Analysis of Welded Metal Bellows", 韓國機械研究所 所報, 第21輯, pp. 51~61, 1991
2. Troitsky, M. S., "Stiffened Plates Bending, Stability and Vibrations", Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 62~90, 1976
3. Ugral, A. C., "Stresses in plates and shells", McGraw-Hill, pp. 1~25, 1981
4. 平修二, 現代塑性力學, オーム社, pp. 97~118, 1976
5. 최재찬외 3명, "스테이터와 로터 및 볼 규칙한 박판제품의 블랭킹에 관한 공정설계 시스템", 한국정밀공학회지, 제13권, 제9호, pp. 46~53, 1996
6. "레이저 정밀 응용 시스템 및 용접형 벨로우즈 생산업체 (주)몰포코리아", 프레스 & 型技術, pp. 4~5, 1999
7. "NISA II/DISPLAY III user's manual", Engineering Mechanics Research Corporation, 1996