

금속 벨로우즈 Diaphragm용 CAD 프로그램 개발

조해용[†]·남기정^{*}·오병기^{*}·김영훈^{*}·이제훈^{**}·서 정^{***}

(2002년 5월 27일 접수, 2003년 1월 10일 심사완료)

A Development of CAD Program for Metal Bellows Diaphragm

Hae Yong Cho, Gi Jung Nam, Byung Ki Oh,
Young Hun Kim, Jae Hun Lee and Jung Suh

Key Words: Metal Bellows(금속 벨로우즈), Mechanical Seal(미케니컬 씰), Diaphragm Design (다이하프램 설계)

Abstract

A CAD program for metal bellows diaphragm 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 5 circles from given design parameters(initial radius, inner and outer diameter, thickness, pitch, etc.). The effects of altering some design parameters on stress distribution and fatigue life of bellows were estimated using commercial FEM code, NISAIL. As a result, the metal bellows diaphragm was successfully designed by the CAD program. It is used to model a bellows geometry in pre-processor of FEM code. The FEM result shows that stress is dependent on straight line length, bellows diameter with same span, and fatigue life is also affected by design parameters.

1. 서론

스탬핑가공하여 블랭킹과 피어싱공정을 거친 후 내외경을 연속적으로 용접하여 주름관 형태로 만든 탄성체인 금속 벨로우즈는 높은 진공, 고온, 부식성 유체 등의 악조건과 높은 피로수명을 요구하는 정밀 유압기기, 항공우주산업, 인공심장 등 많은 산업분야에서 사용된다. 따라서, 그 설계나 해석, 소재 선택, 가공, 제작 등에 고도의 기술이 요구된다.

금속 벨로우즈에 관하여 최근에는 유한요소해석과 피로실험을 통해 사용용도에 적합한 벨로우즈형상을 설계하고, 수명을 예측하는 연구들이 진행되고 있다.^(1~3) Hirata^(1,2)는 용접 벨로우

즈의 응력 진폭에 대한 S-N곡선을 유한 요소법을 이용하여 계산하였고, 벨로우즈의 단면형상에 따른 피로수명을 연구하였다. Choi⁽³⁾ 등은 BASIC 언어를 이용하여 벨로우즈 형상을 쉽게 재도하여 응력 및 피로해석과 신뢰성 평가를 하였으나 현장도면으로 출력하지 못하였다.

본 논문에서는 AutoCAD하에서 지원하는 AutoLISP 언어를 이용하여 벨로우즈 diaphragm을 자동으로 설계하는 CAD프로그램을 개발하고, 상용 유한요소 프로그램인 NISA II를 사용하여 설계된 형상의 벨로우즈에 외압과 내압이 걸리는 경우에 대하여 응력을 해석하고 피로수명을 예측함으로써 CAD프로그램을 검증하고자 하였다.

2. 다이하프램 설계 프로그램

금속 벨로우즈 diaphragm은 Fig. 1과 같은 형상으로 성형하기 위하여 금속박판을 스탬핑 가공 후 블랭킹과 피어싱을 동시에 수행하는 공정을 거친다. 따라서, 평판 및 셸 이론에 입각한 탄성론적인 이론^(4,5) 과 스탬핑에 따른 소성이론^(6,7) 등의 지식이 필요하다. Fig. 2는 벨로우즈 설계를

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : hycho@cbucc.chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-2464 FAX : (043)263-2448

* 충북대학교 대학원

** 한국기계연구원 레이저 기술그룹

*** 회원, 한국기계연구원 레이저 기술그룹

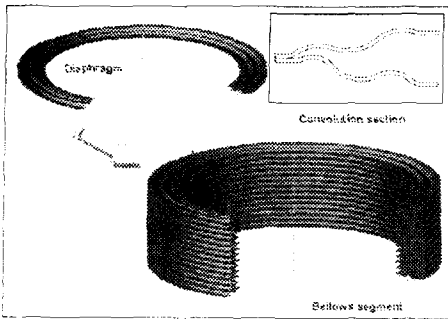


Fig. 1 Diaphragm convolution section and metal bellows segment

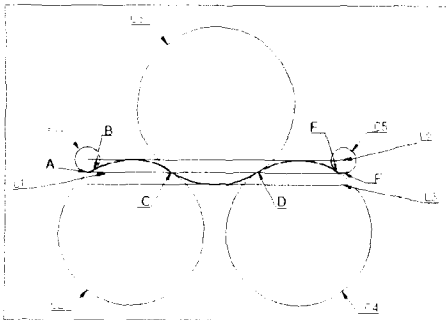


Fig. 2 Basic principles of bellows design

위한 기초 원리를 나타낸 그림으로써 5개의 원과 3개의 직선으로 구성되어있다. 원C1의 반경과 직선L1의 길이에 따라 다른변수들이 변화게된다. 실제 규칙에 따라 원C1의 반경이 커지면 직선 L1, L2, L3의 사이간격이 증가하고 원C3의 반경은 작아지며 원C2, C4는 원C3의 영향을 받아 결정된다. 따라서 Fig. 1과 같은 벨로우즈 단면의 형상은 Fig. 2에서 점 A,B,C,D,E,F 사이를 잇는 곡선 즉 5개원의 접점 사이를 잇는 곡선으로 설계되어진다.

2.1 설계 규칙

벨로우즈 설계 규칙은 현장의 경험⁽⁸⁾과 관련 참고 문헌⁽⁴⁻⁷⁾에서 발췌하여 정리하였다.

- (1) 상판과 하판은 원호와 직선으로 구성된다.
- (2) 상판과 하판이 압착시 틈새가 생기는 것을 방지하기위하여 상판과 하판의 직선부와 원호의 길이는 Offset량 만큼 차이가 있어야 한다.
- (3) 상판의 직선부 길이가 하판의 직선부 길이 보다 짧다.
- (4) 재료가 변형을 받으면, 유동응력은 $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$

- 으로부터 결정된다.
- (5) 재료는 체적일정조건을 만족해야한다.
- (6) 상판을 먼저 설계한후 offset량을 고려하여 하판을 설계한다.
- (7) 상판의 원C2, C4는 하판의 원C3와 같다.
- (8) 벨로우즈 형상은 중립면을 기준으로 형상을 설계한다.
- (9) 제도에 편리를 도모하고자 수평 상에서 설계 후 피치만큼 회전시킨다.
- (10) 직선부위 길이부분과 초기반지름 및 기본 사양 입력값에 의해 제도되어진다.
- (11) 원C1과 C5의 반지름은 같다.
- (12) 원C1과 C5의 접선을 L1으로 하며 L2와 L3는 C1의 반지름만큼 offset한 결과이다.
- (13) L1을 3등분한 두점과 L3에 중심점인 한점을 지나는 것이 원C3이다.
- (14) 스프링상수 및 관성모멘트를 크게 하기 위하여 원C2는 원C1,C3와 직선L2에 접하고 원C4는 원C3,C5와 직선L2에 접하도록 설계한다.
- (15) 용접부 형상은 용접 비이드 부분을 감안하여 두께의 3/2을 지름으로 계산 한다.
- (16) Span의 길이는 외경과 내경의 차를 의미하며 용접부 끝부분의 원의 사분점에서 측정 한 값이다.
- (17) 축대칭이므로 반쪽단면만 설계한다.

2.2 프로그램 구성

본 프로그램은 AutoCAD 환경하에서 지원되는 AutoLISP언어를 이용하여 개발되었고, Fig. 3과 같이 주 프로그램과 두 개의 부 프로그램으로 구성되어있다. 각각의 프로그램은 독립적으로 또는 서로 연관하여 작동되도록 구성되어 있다.

2.3 주 프로그램

주 프로그램은 전체 프로그램을 로드시키고, 작업환경을 관리하는 프로그램으로, Fig. 4처럼 형상을 설계하는 방법의 선택과 설계된 벨로우즈 형상의 도면제도 및 출력을 제어한다.

2.4 데이터 입력

설계하고자 하는 벨로우즈의 입력변수는 외경,

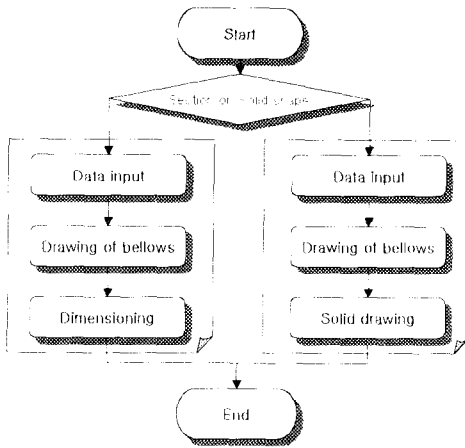


Fig. 3 Flow chart of the CAD program for bellows

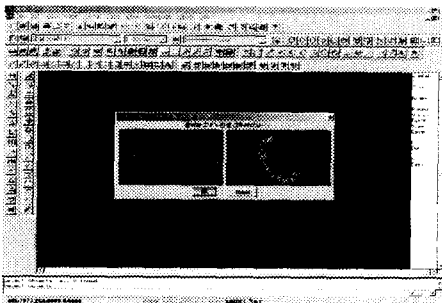


Fig. 4 Initial screen

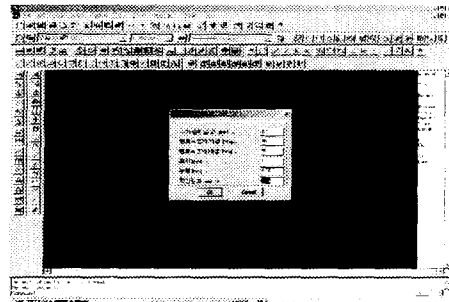


Fig. 5 Data input window

형상이 설계된다. 상판과 하판의 직선부 길이는 설계규칙 3에 의해 상판의 원C1과 하판의 원C1 부분이 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.

3. 응력해석

용접된 금속 벨로우즈는 복잡한 형상의 구조로 되어 있어 해석적 방법으로 변형 및 응력분포를 예측하기는 매우 어렵다. 따라서, CAD프로그램에 의해 설계된 벨로우즈에 작용하는 하중상태에 따른 응력분포 및 피로수명을 상용 유한요소 프로그램 NISA II를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 금속 벨로우즈 diaphragm을 설계하기 위하여 설계 규칙을 확립하고 이를 AutoCAD 하에서 지원되는 AutoLISP 언어를 사용하여 CAD 프로그램을 개발하였다. 개발된 CAD 프로그램에 의한 벨로우즈 형상과 응력해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

4.1 CAD 프로그램 실행 결과

Fig. 4~7은 CAD 프로그램의 실행 결과이다. Fig. 4는 AutoCAD를 실행시킨 후 Command 명령창에서 "bellows"를 입력하면 나타나는 초기화면으로서 벨로우즈의 단면형상과 3차원 형상 중 선

내경, 피치, 두께와 초기 반지름과 용접부분과 조기 반지름을 잇는 직선부분의 길이 등이다. 입력창은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 다이얼로그 박스를 이용하여 설계자가 설계사양에 따라 값을 변경할 수 있도록 구성되어있다. Fig. 5는 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.

2.5 도면 작성

데이터 입력단계에서 벨로우즈 설계사양이 입력되면 도면작성 프로그램에서는 입력받은 값들로부터 좌표점을 잡고 수식을 연산하여 벨로우즈

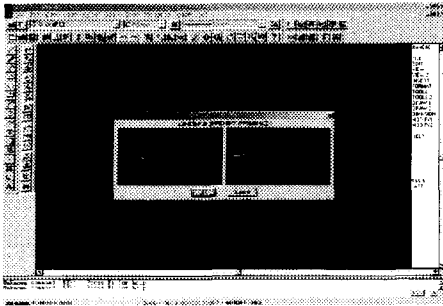


Fig. 6 Dimension input or DXF file output window

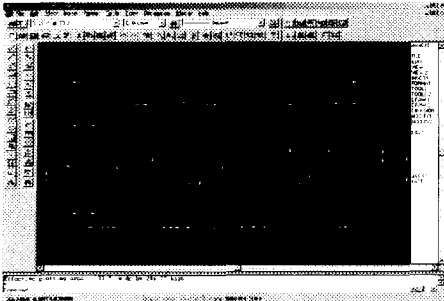


Fig. 7 Drawing of bellows dimensioned

택하여 도면화 할 수 있게 해준다.

Fig. 5는 벨로우즈 설계에 필요한 기본사양을 입력하는 창으로써 요구되는 벨로우즈 사양의 치수들이 다이얼로그 박스 안에 입력된 그림이다.

Fig. 6은 도면으로 출력하기 위해 치수를 입력하는 치수 기입창과 DXF 파일로 저장하기 위한 파일 저장창, 두 개의 선택창을 나타낸다. 치수 기입창은 설계된 벨로우즈 형상에 치수를 기입할 수 있도록 하는 것으로, 이를 선택하고 "OK" 버튼을 누르면 자동으로 치수기입이 완성되고 도면으로 출력할 수 있다. 파일 저장창은 설계된 벨로우즈 형상을 DXF 파일형식으로 저장할 수 있어 NISAII에서 이 파일을 불러들여 응력해석을 수행할 수 있도록 해준다.

Fig. 7은 자동으로 치수가 기입되어 출력된 완성 도면이다. 완성된 벨로우즈 형상은 5개의 원과 3개의 직선을 이용하여 정확하게 구현할 수 있었다. 또한 CAD 프로그램은 대화식으로 구성되어 있어 다이얼로그박스를 이용하여 기본적인

Table 1 Parameters used in analyses of bellows

Model	Initial radius	Diameter(mm)		Thickness (mm)	Pitch (mm)	Line length(mm)
		Inner	Outer			
M01	0.20	20.6375	33.3375	0.127	1.778	0.65
M02	0.25	20.6375	33.3375	0.127	1.778	0.65
M03	0.30	20.6375	33.3375	0.127	1.778	0.65
M04	0.25	20.6375	33.3375	0.127	1.778	0.60
M05	0.25	20.6375	33.3375	0.127	1.778	0.70
M06	0.25	23.8125	36.5125	0.127	1.778	0.65
M07	0.25	26.9875	39.6875	0.127	1.778	0.65
M08	0.25	30.1625	42.8625	0.127	1.778	0.65
M09	0.25	33.3375	46.0375	0.127	1.778	0.65
M10	0.25	20.6375	33.3375	0.093	1.778	0.65
M11	0.25	20.6375	33.3375	0.11	1.778	0.65

값만 입력하면 벨로우즈 형상과 치수가 기입되고 AutoCAD도면으로 프린터나 플로터로 출력하여 비속편자라도 쉽게 사용할 수 있다.

4.2 응력해석

기존 기계적 씨일의 한 규격인 M02를 기준으로 Table 1과 같이 초기반지름, 내·외경, 두께 및 직선부길이의 설계변수를 변경하여, 설계변수 변경에 따른 벨로우즈의 인장 또는 압축하중 시의 스프링 상수, 내·외압을 받는 경우의 콘볼루션의 변형, 응력 및 피로수명의 변화를 상용 유한요소 프로그램인 NISA II를 이용하여 해석하였다.

4.2.1 유한요소모델

금속 벨로우즈는 축대칭 해석 요소로서 4-node Axisymmetric element(Axisymmetric Solid, NKTP = 3, NISAII element)를 사용하였다. 요소를 구성하는 절점은 x, y방향의 2개의 자유도(degree of freedom)를 가지고 있다. 또한, 콘볼루션을 해석할 때 벨로우즈 판끼리의 접촉을 고려하여 x, y축 평행 이동의 2자유도와 z축 회전 of 3개의 자유도를 가지고 있는 Contact surface element를 사용하였다.⁽⁹⁾

재질은 AM350으로 포아송 비는 0.3, 영률은 193.1GPa로 하였으며, 경계조건은 외압과 내압의 압력조건에 따라 고려하였다.

4.2.2 응력 및 변형 해석

벨로우즈가 내압을 받을 때에는 내접촉점에만 접촉이 생기고 외접촉점은 벌어지게 될 것이다. 따라서, 우측 상하단을 x와 y방향을 동시에 구속하면 충분하다. 외압을 받을 때에는 내접촉점은 접촉이 생기지 않고 외접촉점에만 접촉이 생긴다. 구속조건과 압력은 내압과 동일하게 주었다. Model 2는 Table 1에 나타난 바와 같이 초기 반지름 값이 0.25mm이고 내경 20.6375mm, 외경

33.3375mm, 두께 0.127mm, 피치 1.778mm, 직선부 길이 0.65mm로 설계된 형상이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 압축하중을 받을 경우의 변형과 응력분포를 나타낸 그림이고, Fig. 10와 Fig. 11은 인장하중을 받을 경우의 변형과 응력분포를 나타낸 그림이다. Fig. 9와 Fig. 11을 비교하면 압축 시에는 첫 번째 곡률에서 최대응력 279.9N/mm²이고 인장시에는 용접부와 직선부가 만나는 부근에서 251.4N/mm²로 인장 하였을 때 보다 압축하였

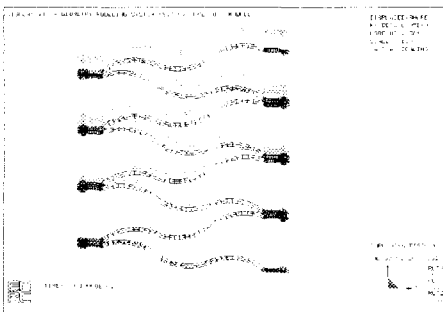


Fig. 8 Deformation of M2 by compression

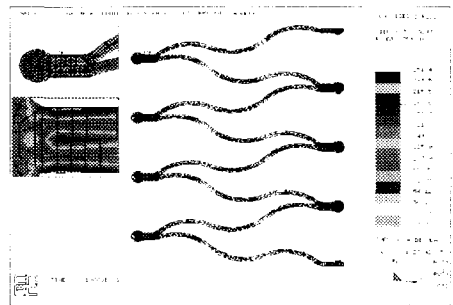


Fig. 11 von-Mises stress of M2 by tension

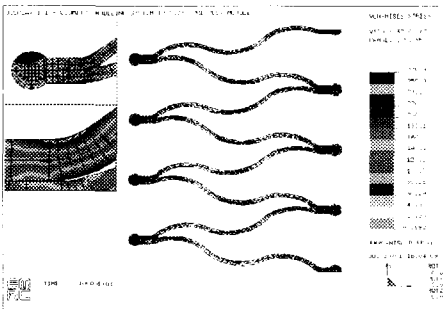


Fig. 9 von-Mises stress of M2 by compression

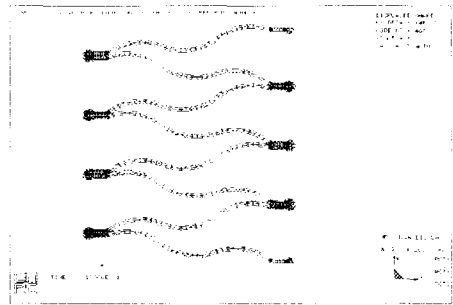


Fig. 12 Deformation of M2 by internal pressure(0.9806N/mm²)

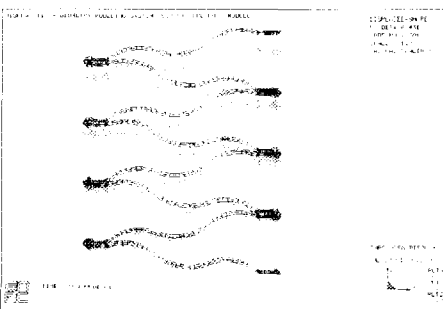


Fig. 10 Deformation of M2 by tension

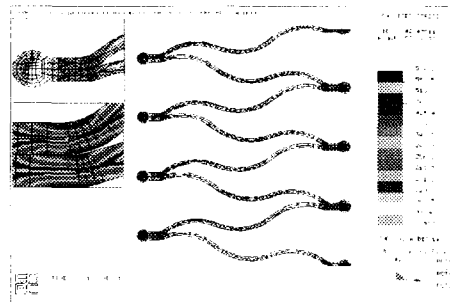


Fig. 13 Stress distribution of M2 by internal pressure (0.9806N/mm²)

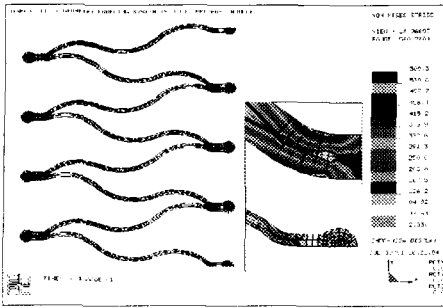


Fig. 14 Stress distribution of M2 by external pressure (0.9806N/mm²)

을 때 더 크게 나타난다. 이것은 직선부 부분이 인장하였을 때는 외팔보로 작용하는 반면 압축시에는 구조상 외팔보 역할을 하지 못하기 때문으로 생각된다.

Fig. 12, 13은 0.9806N/mm²(0.1kg/mm²)으로 내압을 주었을 경우 나타난 변형 및 응력분포이다. 최대 von-Mises 응력은 각 압력크기에 관계 없이 동일하게 내측부 상판의 첫 번째 곡물 부분에서 나타난다. 이는 첫 번째 곡물의 반경이 작아 내압에 의한 다른 곡물의 변형시 굽힘모멘트가 가장 크게 작용하기 때문으로 생각된다.

Fig. 14는 0.9806N/mm² (0.1kg/mm²)으로 외압을 주었을 경우 나타난 변형 및 응력분포이다. 최대 von-Mises 응력은 외측 하단부의 5번째 곡물 부분에서 나타남을 알 수 있다.

Fig. 15에서 직경 변화에 따른 응력변화를 관찰하면 벨로우즈 외경이 커짐에 따라 응력이 상승하는 것을 볼 수 있다. 길이가 길어짐에 따라 변위가 더 커지게 되므로 응력이 상승된다. 따라서 내·외측반경의 차 즉, 스펠이 같은 상태로 벨로우즈의 직경을 증가시키기 위해서는 두께(t)를 증가시켜 응력을 완화시키는 방법이 가장 적절한 방법이라고 판단된다.

Fig. 16에서 초기 반지름을 변화시켰을 때의 응력변화를 확인하면 초기 반지름이 커짐에 따라 응력값이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 초기 반지름이 커지면 규칙에 의하여 두 번째 곡선이 작아지게 된다. 따라서 강성을 더 높이는 결과를 초래하므로 감소하게 된다.

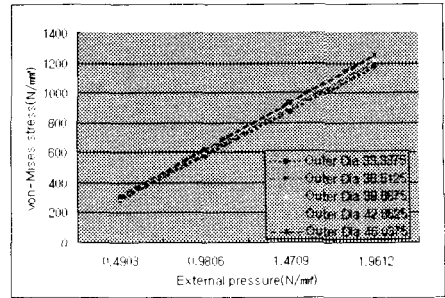


Fig. 15 Von-Mises stress according to diameter

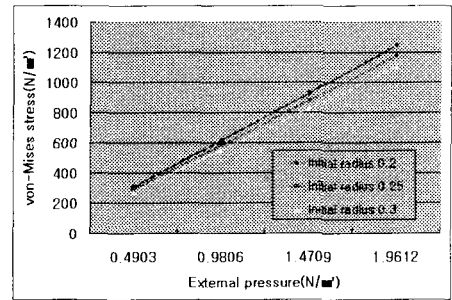


Fig. 16 Von-Mises stress according to initial radius

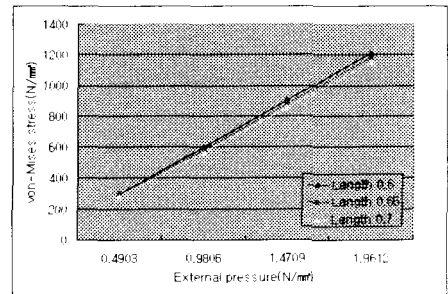


Fig. 17 von-Mises stress according to length

Fig. 17에서 직선부 길이를 변화시킴에 따라 형성되는 응력을 관찰하면 직선부 길이가 길어질수록 응력이 감소하는데 직선부 길이가 버팀 역할을 함으로 강성이 강해지고 응력이 감소하게 되므로 직선부 길이를 가능하면 길게 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 18에서 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.

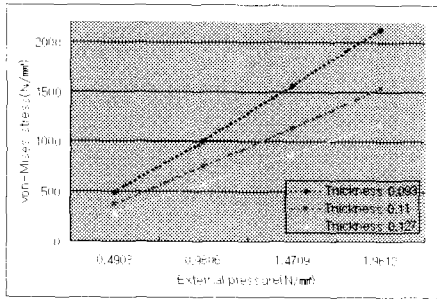


Fig. 18 von-Mises stress according to thickness

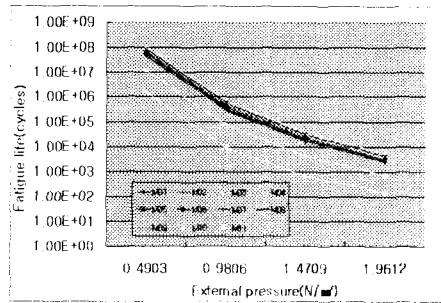


Fig. 19 Fatigue life according to models

Table 2 Mechanical properties for fatigue analysis

Material	Fatigue ductility factor (EF)	Fatigue ductility exponent (C)	Fatigue strength factor (SF)	Fatigue strength exponent (B)	Young's modulus (E) N/mm ²
AM350	0.33	-0.84	2800.20	-0.14	193116.7

4.3 피로 수명

기계구조물 및 부품의 높은 안전성을 위해서는 피로해석이 매우 중요하다. NISAI의 한 모듈인 ENDURE는 구조물의 피로해석을 하기 위한 상용 유한요소 프로그램으로 크랙 발생 및 크랙 진전, 응력수명(S-N)과 변형수명(ε-N)과의 상관 관계 등을 구할 수 있다.⁽³⁾

변형-수명곡선은 피로수명을 예측함에 있어서 low-cycle과 high-cycle 영역 모두 만족할만한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c$$

여기서, Δε/2는 전체 변형진폭, ε_f'는 피로연성 계수, c는 피로연성 지수, E는 영률이다.

최대응력은 내압과 외압인 경우 각각 내경부근과 외경부근에서 발생하였으며, 각 model에서 최대 응력이 나타나는 부분을 선택하여 응력과 피로수명과의 관계를 알아보았다. ENDURE 모듈의 구동에 필요한 물성치는 Table 2에서 나타내었다.

Fig. 19는 외압이 1초에 한번씩 가해질 때의 각 model의 피로수명 결과로서, M02 기준 모델은 작용압력이 1.47N/mm²일 때 외압작용시 피로수명은 2.4676 × 10⁴cycles이었다. 각 모델은 압력이 증가함에 따라 피로수명이 급격히 감소함을 알 수 있으며, 또한 모델별 피로수명의 차이는 기준모델에서 초기반지름, 직선부 길이, 두께의 변경에

따른 응력의 변화가 피로수명에 영향을 미쳐서 초기반지름, 직선부 길이 및 두께가 가장 큰 M03 모델의 응력이 가장 작고 피로수명은 가장 크며, 여기서 초기 반지름과 직선부 길이가 작아지면 응력이 증가하고 피로수명은 감소하게 된다. 두께가 가장 얇은 M11모델의 피로수명이 가장 작게 나타났다.

5. 결론

벨로우즈 다이어프램 설계 규칙을 확립하고 정식화하여 벨로우즈를 자동 설계하는 CAD 프로그램을 개발하고, 개발된 프로그램에 의해 설계된 벨로우즈 형상에 대해 유한요소해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 현장경험과 참고분헌을 참고하여 5개의 원과 3개의 직선을 이용하여 벨로우즈 형상을 구현할 수 있는 설계규칙을 확립하였다.
- (2) 설계규칙을 이용하여 대화식 다이얼로그 박스를 통해 기본적인 사양만 입력하면 설계 비속련자라도 쉽게 접근할 수 있으며 설계된 벨로우즈 형상은 AutoCAD 도면으로 프린터나 플로터로 쉽게 출력 가능하며, 유한요소 해석 프로그램으로 연계할 수 있으므로 매우 유용하다.
- (3) 벨로우즈의 직선부 길이가 길어질수록 응력이 감소하였고, 스웨이 같은 경우 직경이 증가함에 따라 응력이 증가하였다. 또한, 피로 수명은 설계 형상에 따라 크게 좌우 되므로 요구사양에 맞는 형상 설계가 매우 중요하다.

참고문헌

- (1) Osamu HIRATA, Akira NAKAJIMA, Ken OKADA, Shinji SASAKI and Yoshihiro OGAWA, 1995, "Fatigue Life of Welded Bellows (Effect of Configuration of Corrugated Plate)," *Journal of the Japan Society for Engineering*, Vol. 61, No. 587, pp. 3143~3149.
- (2) Osamu HIRATA, Akira NAKAJIMA, Ken OKADA, Shinji SASAKI and Yoshihiro OGAWA, 1995, "Fatigue Life of Welded Bellows (Effect of Test Speed)," *Journal of the Japan Society for Engineering*, Vol. 61, No. 589, pp. 3755~3761.
- (3) Cho, H. I., Kim, W. D. and Woo, C. S., 1991, "Analysis of Welded Metal Bellows," *KIAM*, Vol. 21, pp. 51~61.
- (4) Troitsky, M. S., 1976, "Stiffened Plates Bending, Stability and Vibrations," Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 62~90.
- (5) Ugural, A. C., 1981, "Stresses in plates and shells," McGraw-Hill, pp. 1~25.
- (6) Hosford, W. F., 1983, "Metal Forming Mechanics and Metallurgy." Prentice-Hall, pp. 294~310.
- (7) Choi, J. C., Kim, B. M., Kim, C. and Kim, J. H., 1996, "An Automated Process Planning System for Blanking of Stator and Rotor Parts and Irregularly-Shaped Sheet Metal Products." *KSPE*, Vol. 13, No. 9, pp. 46~53.
- (8) "Welded Metal Bellows," Product Bulletin., Morpho Corp.
- (9) "NISA II/DISPLAY III user's manual." 1996, Engineering Mechanics Research Corporation.
- (10) Bannantine, Jule A., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice-Hall, pp. 1~70.