



구조 해석을 통한 용접 bellows 피로 예측

전도윤^a, 이준영^a, 김승모^{a,*}

Fatigue Prediction for Diaphragm Bellows using Structural Simulation

Doyoon Jeon^a, Junyoung Lee^a, Seungmo Kim^{a,*}^a Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

ARTICLE INFO

Article history:

Received	27	May	2025
Revised	7	July	2025
Accepted	18	July	2025

Keywords:

Diaphragm bellows
Finite element analysis (FEA)
Fatigue life
Weld bead

ABSTRACT

Fatigue of the diaphragm bellows was predicted through finite element analysis (FEA). Bellows, which are produced by welding the outer and inner diameter of the diaphragm, are critical components in various engineering applications. They are known for their ability to absorb thermal expansion, vibration, and pressure variations. Therefore, accurate prediction of their fatigue life is essential for ensuring the reliability of these systems. The displacement applied to the bellows was simulated using ANSYS, a widely used commercial software in structural analysis. The results obtained were meticulously compared with those derived from conventional fatigue tests on bellows to validate the numerical analysis program. Furthermore, we investigated the influence of key parameters, such as bellows type, pitch, and span, on von Mises stress and fatigue. The investigation revealed that variations in pitch, span, and bellows type had minimal, if any, significant impact on von Mises stress and fatigue.

1. 서론

벨로우즈(bellows)란 평판에 주름을 형성하여 파이프의 형태로 만든 부품으로 축의 움직임이나 비틀림, 진동 등에 버틸 수 있게 생성한 구조이다. 이러한 벨로우즈는 반도체 장비나 항공 우주 산업, 방산 분야 그리고 의료 기기 산업 등 산업체 전반에서 널리 사용된다. 벨로우즈는 제조 방법에 따라 형상 등에 차이가 생기며 이를 통해 구분하기도 한다^[10].

성형 벨로우즈(foamed bellows)는 박판 용접 혹은 딥 드로잉 등을 통해 생산된 얇은 파이프에 주름을 성형하여 생산하며 각 주름이 영문 알파벳 ‘U’자 형태의 주름을 가진다. 이러한 성형 벨로우즈는 다른 형태의 벨로우즈와 달리 응력 집중이 상대적으로 적게 발생하게 되어 수명에 이점을 가지지만 부품 간 연결을 위해

flange 등을 붙이기 위해 벨로우즈의 처음과 끝의 모양이 중간 주름 부분과 달라 주름을 성형하기 전 파이프의 길이에 따라 최종 길이가 결정된다.

한편 용접 벨로우즈(welded bellows, edge-welded bellows)는 Fig. 1의 모습과 같이 파이프에 성형을 통해 생산하는 것이 아닌 CD 형태와 같이 가운데 구멍이 있는 원판에 주름을 성형한 이후 이러한 주름 원판(diaphragm)을 모아 외부 모서리와 내부 모서리끼리 플라즈마 용접, TiG 용접, 레이저 용접 등을 통해 생산하며 평판에 주름을 성형하여 생산하기 때문에 생산 공정이 복잡하지만 성형 벨로우즈 보다 더 복잡한 주름을 만들기에 용이하고 다이어그램의 수에 따라 최종 길이를 쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다.

해석의 대상이 되는 다이어그램 벨로우즈는 상대적으로 복잡한 형상의 주름을 가지며 이러한 주름을 정의하는 다양한 변수를 가

* Corresponding author. Tel.: +82-41-560-1159

E-mail address: smkim@koreatech.ac.kr (Seungmo Kim).

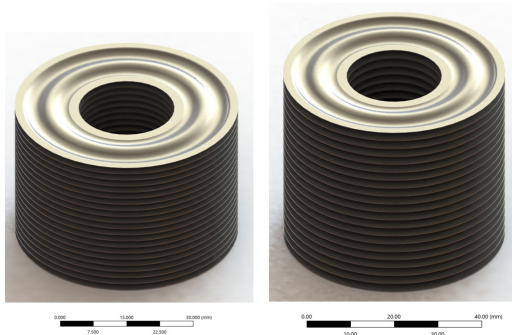


Fig. 1 Bellows modeling

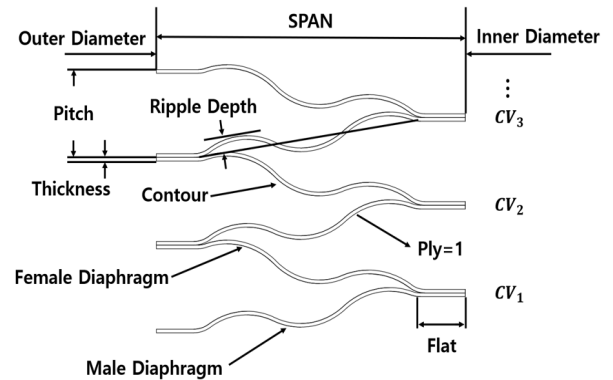


Fig. 2 Diaphragm cross-section

지게 된다. 또한 다이어프램 벨로우즈가 여러 박판의 용접을 통해 생산되기 때문에 길이에 따른 동작 조건 또한 다양하게 구성될 수 있으며 재질 및 열처리 방법, 가공 방법, 하중 조건, 신뢰 수준, 제품의 크기 등에 따라 제품의 가동 수명에 편이한 차이가 발생^[1] 하기도 한다. 이에 따라 벨로우즈를 생산하는 제조사에서는 피로 시험 등을 통해 다양한 벨로우즈의 규격, 재질, 동작 변수, 환경 변수 등에 대한 피로 수명 데이터를 구비하여야 하며 이러한 데이터를 생산하는데 많은 시간과 비용이 초래되며 부분적인 피로 수명 데이터와 어떤 변수에 따른 수명의 유리함, 불리함 등의 경험적 데이터를 통해 피로 특성을 파악하고 있다.

벨로우즈의 피로 시험에 높은 비용이 필요되기 때문에 과거로부터 벨로우즈의 피로를 예측하고자 하였으며 이를 위해 finite element analysis(FEA)를 이용한 시도들이 있었다. 구조 해석을 통해 다이어프램을 따라 발생하는 응력을 확인하거나^[2,3] 용접 비드의 wall thickness^[8] 및 다이어프램 flat의 형상(각도)^[9] 변화에 따른 발생 응력 등의 벨로우즈 다이어프램의 발생 응력에 관한 연구가 진행되었으며 복잡한 다이어프램의 용접 특성^[4,5]이나 형상 생성을 위한 접근 방법^[6,7]에 대한 연구들이 많이 진행되었다. 그러나 본 연구의 대상이 되는 용접 비드가 있는 다이어프램의 피로 시험 간의 직접적 관계를 빠르게 파악하기에 어려움이 있으며 여러 산을 가지는 벨로우즈에 대하여 피로 해석을 진행하면 높은 해석 비용을 필요로 하기 때문에 선형 해석을 통해 변위에 따라 발생하는 등가 응력(equivalent stress, von Mises stress)을 확인하고 재질의 S-N Curve에서 일반적으로 확인할 수 있는 큰 응력이 가해지는 부품에 기대 수명이 낮아지는 현상에서 착안하여 정적 선형 해석을 통해 피로 수명을 개략적으로 파악할 수 있다고 판단하여 해당 연구를 진행하였다.

2. 벨로우즈 형상 및 모델링

2.1 벨로우즈 형상

본 연구의 대상인 다이어프램 벨로우즈는 내경(inner diameter,

Table 1 Analysis case

Pitch	C.L	Compressive displacement	E.L	Tensile displacement
1.30 mm	8 mm	-18 mm	35 mm	+9 mm
	8 mm	-18 mm	38 mm	+12 mm
	8 mm	-18 mm	43 mm	+17 mm
	7 mm	-19 mm	35 mm	+9 mm
	6 mm	-20 mm	35 mm	+9 mm
1.75 mm	8 mm	-27 mm	35 mm	0 mm
	8 mm	-27 mm	38 mm	+3 mm
	8 mm	-27 mm	43 mm	+8 mm
	7 mm	-28 mm	35 mm	0 mm
	6 mm	-29 mm	35 mm	0 mm

I.D)이 31.8 mm, 외경(outer diameter, O.D)이 50.5 mm인 형태로 서로 다른 모양의 다이어프램 상판(female diaphragm)과 하판(male diaphragm)이 합쳐져 하나의 산수(number of convolution, C.V)를 구성하며 C.V가 20인 형태이다. 벨로우즈의 내부에는 진공이 가해지며 외부에는 대기압 상태이다. 각 다이어프램의 두께(thickness, T)는 0.1 mm이며 각각 1장의 상판과 하판의 결합으로 이루어진다.

2.2 벨로우즈 모델링

다이어프램 벨로우즈에 사용되는 변수는 형상 변수, 동작 변수, 재질 등으로 나눌 수 있다. 형상 변수의 경우 Fig. 2에서 볼 수 있듯 다이어프램의 I.D, O.D, C.V, span, pitch, flat 길이, 다이어프램의 장수 등이 있으며 동작 변수의 경우 인장 시의 길이(elongated length, E.L), 압축 시의 길이(compressed length, C.L), stroke 등이 있으며 재질의 경우 내부식성 재질을 사용하며 AM350, SUS304, SUS316L, INCONEL, HAST C-22 등의 재질이 사용된다. 이번 연구에서는 AM350과 SUS316L을 사용하여 case를 구성하였으며 각 재질에 따라 pitch를 1.30 mm와 1.75 mm, 2가지로 설정하여 C.L과 E.L을 부여하여 총 10개의 case를 구성

Table 2 Mechanical properties

	SUS316L	AM350
Density	8.00 g/cc	7.81 g/cc
Poisson's ratio	0.285	0.285
Young's modulus	199 GPa	200 GPa
Yield strength	266 MPa	529 MPa
Tensile strength	593 MPa	1255 MPa

하여 Table 1로 표시하였다.

3. 정적 선형 해석 setup

3.1 해석 조건

선형 구조 해석은 상용 소프트웨어인 'ANSYS'의 'Static Structural' 모듈을 사용하여 진행하였으며 해석의 대상인 벨로우즈가 길이 방향의 축을 기준으로 축 대칭 구조이기 때문에 과도한 해석 비용의 발생을 방지하고 정규 격자를 작성하기 위해 전체 형상을 축을 기준으로 나누어 1/4 대칭 구조(90°)와 1/10 대칭 구조(36°)로 만들어 해석을 진행하였다.

해석 비용적인 측면에서는 1/4 대칭 구조보다 1/10 대칭 구조 형상이 유리하나 이후 연구될 피로 해석의 모듈 연동 시 full body 해석이 요구되며 이때 1/10 대칭 구조보다 1/4 대칭 구조가 격자 작성 및 제어 등에 유리하다고 판단하여 두 대칭 구조를 모두 해석 방법으로 채택하여 사용하였다. 해석에 사용한 재료는 AM350과 SUS316L이며 사용한 세부 물성치는 Table 2와 같이 입력하여 사용하였다.

3.2 격자 작성

격자의 품질은 해석 결과에 많은 영향을 미칠 수 있으며 정밀한 해석 결과를 위해서 물리적 형상을 잘 추종할 수 있는 충분히 조밀한 격자를 작성하여야 한다. 그러나 지나치게 작은 크기의 격자는 해석 비용을 증가하게 만들어 지양해야 하며 격자 품질 확보 및 해석 비용 감소를 위해 실제의 원형 단면의 용접 비드가 아닌 동일한 접합 길이를 가지는 사각 단면의 비드를 다이어프램에서 분리하여 구성하였다. 해석 비용이 낮은 격자를 작성하기 위해 회전 좌표계를 생성하여 sweep 방법으로 용접 비드를 제외한 다이어프램 전체에 격자 크기를 0.5 mm로 작성하였으며 용접 비드에 높은 응력 및 파단이 예상되기 때문에 비드 단면의 각 모서리에 전체 다이어프램의 격자 크기 보다 10배 작은 0.05 mm로 작성하였다.

작성된 격자의 품질은 Table 3에 기록하였으며 격자의 maximum aspect ratio는 외경 용접 비드에서 발생하였으며 13.948이고 maximum skewness는 내경 다이어프램의 곡선이 끝나는 지점에

Table 3 Nodes and elements

	Pitch = 1.30 mm, 36°	Pitch = 1.75 mm, 36°	Pitch = 1.30 mm, 90°	Pitch = 1.75 mm, 90°
Node	224265	221365	553545	542005
Element	30800	30400	77620	76000
Skewness, Maximum	0.1794	0.1794	0.1794	0.1794
Skewness, Average	0.033533	0.033986	0.033558	0.033986
Aspect ratio, Maximum	13.948	13.948	13.948	13.948
Aspect ratio, Average	6.2538	6.2583	6.2154	6.2583

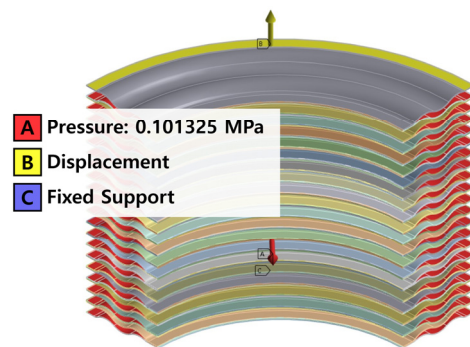


Fig. 3 Boundary conditions

서 0.1794로 격자 품질 판단 기준인 maximum aspect ratio가 20 이하, maximum skewness가 0.25 이하를 충족하였다.

3.3 경계 조건

연구에 사용된 벨로우즈는 길이 방향으로 변위가 주어지며 피로 시험이 진행된다. 이를 해석에서 반영하기 위해 Fig. 3과 같이 가장 아래의 위치한 하판 다이어프램의 외경 축 평면에 3축 방향의 병진 운동 및 회전 운동을 제한하는 'fixed support'를 부여하고 가장 위에 위치한 상판 다이어프램의 외경 축 평면에 ± y 방향의 변위를 가하는 것으로 해석을 진행하였으며 벨로우즈의 외부에 대기압을, 내부에 진공을 추가하였다.

4. 벨로우즈 선형 해석

4.1 정적 해석

해석 case 내의 모든 변위에 대하여 maximum equivalent stress(von Mises stress)가 발생한 위치는 용접 비드와 다이어프램이 만나는 지점에서 발생하였다. Fig. 4는 pitch가 1.30 mm인 1/10 대칭 형상에서 변위에 대한 응력 결과를 나타낸 그림이며 좌측의 그림이 인장(+ 17 mm) 방향의 결과, 우측의 그림이 압축(-

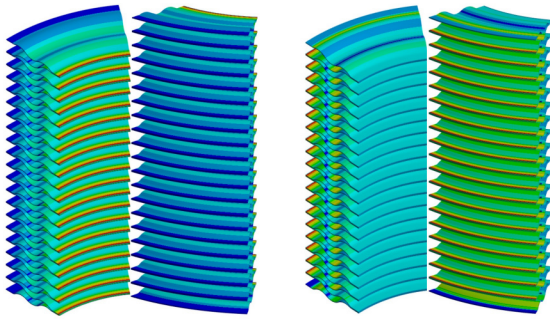


Fig. 4 Stress result contour

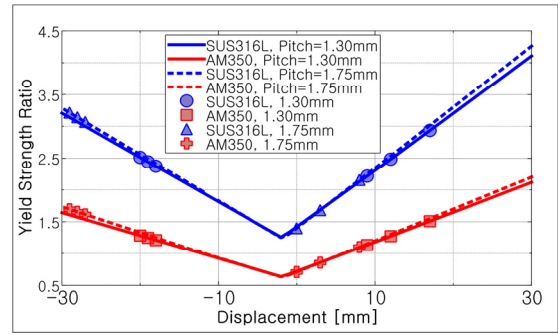


Fig. 6 Yield strength ratio

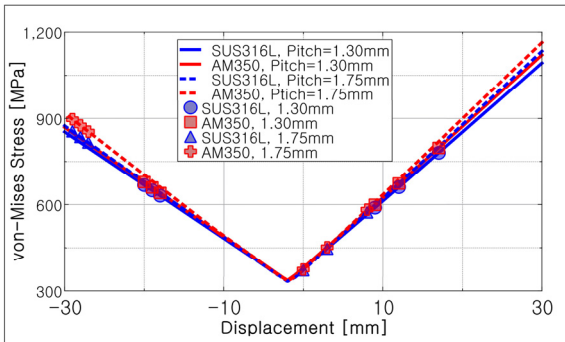


Fig. 5 Stress results

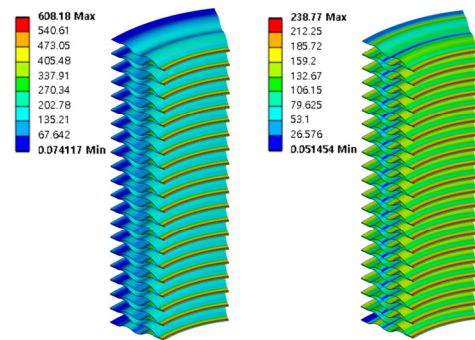


Fig. 7 Non-vacuum result

20 mm) 방향의 결과이다. 인장 방향의 변위에서 내경 측 보다 외경 측에서 높은 응력이 발생하였으며 압축 방향의 변위에서 인장 방향과 달리 외경 측 응력이 높게 발생함을 확인하였다.

해석 case의 변위에 ± 30 mm 범위에 대하여 1 mm 단위로 선형 구조 해석을 진행하여 해석의 등가 응력 결과를 Fig. 5와 같이 표시하였다. 재질 및 pitch에 따라 발생 응력에 근소한 차이를 보이며 인장 방향에서 AM350은 pitch = 1.30 mm, 1.75 mm에 대하여 결정 계수(R^2)가 각각 0.999953, 0.999905이며 SUS316L은 0.999957, 0.99911이었으며 압축 방향에 대하여 AM350은 1, 0.99971, SUS316L은 1, 0.999998로 변위에 대하여 강한 선형 관계임을 알 수 있다. 또한 발생 응력이 가장 낮은 위치는 0 mm가 아닌 -2 mm로 이는 벨로우즈의 내부에 진공이 가해지며 +y 방향으로 발생한 변위가 상쇄되며 발생한 현상으로 분석하였다. 또한 pitch = 1.30 mm와 pitch = 1.75 mm를 비교하면 1.30 mm가 상대적으로 낮은 응력이 발생하였으며 SUS316L 재질과 AM350 재질을 비교하면 SUS316L이 더 낮은 응력이 발생하였다.

발생 응력을 재질별 특성을 확인하기 위해 항복 강도로 나누어 'Yield strength ratio'를 정의하고 이를 Fig. 6과 같이 표시하였다. 발생 응력은 유사하였으나 재질 물성에 의해 SUS316L은 AM350과 달리 높은 yield strength ratio가 발생하였으며 빠른 파단이 예상되었다.

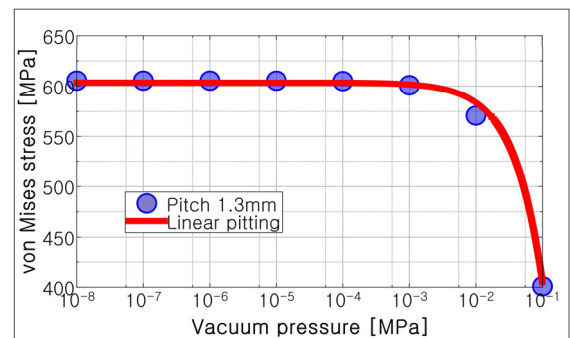


Fig. 8 Vacuum pressure results

4.2 진공에 따른 결과

벨로우즈의 피로 시험 및 환경 등을 경계 조건으로 적용하여 시험 환경에 대한 영향을 분석하기 위해 진공의 유무에 대하여 해석 (Fig. 7)을 진행하였다. 해석은 pitch = 1.30 mm의 1/10 대칭 구조에 +9 mm 변위를 적용하여 해석을 진행하였으며 Fig. 7의 좌측 (진공이 있는 case)과 우측(진공이 없는 case) 그림과 같이 인장 방향에서의 내부 용접 비드에 응력이 집중되는 현상은 동일하나 벨로우즈 내부 진공이 삭제되며 동일 변위 대비 약 370 MPa 정도 감소하였다.

또한 벨로우즈의 내부 진공 압력을 0.1 MPa에서 1/10씩 감소시키며 pitch = 1.30 mm, 1/10 대칭 구조, +9 mm 변위에서 해석 (Fig. 8)을 진행하였으며 진공 압력 0.001 MPa(≈ 7.5 torr)에서

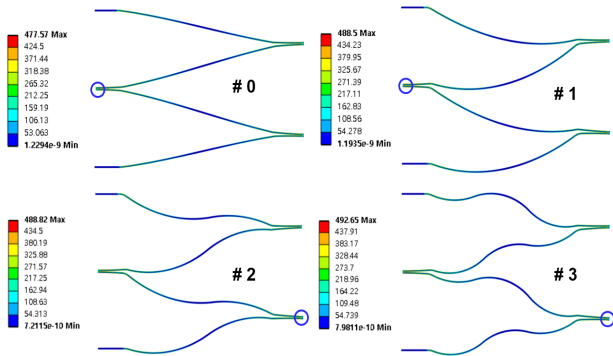


Fig. 9 Diaphragm contour results(# 0~3)

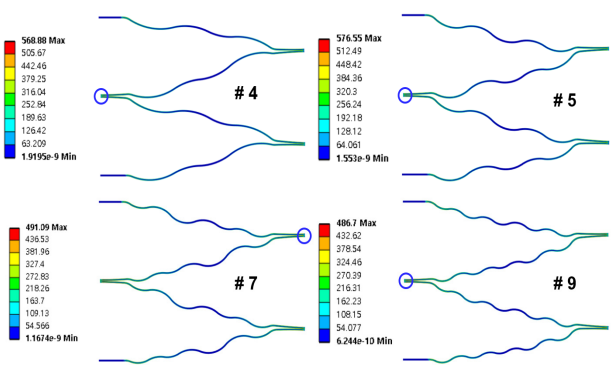


Fig. 10 Diaphragm contour results(# 4~9)

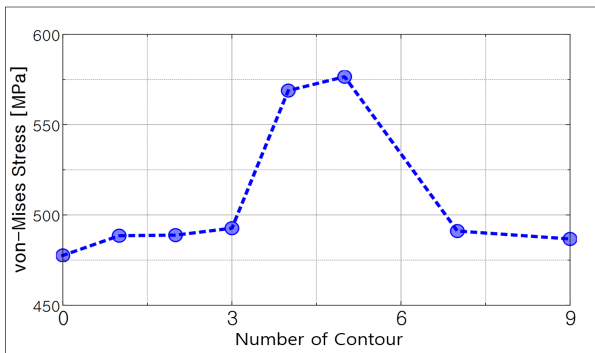


Fig. 11 Contour stress results

수렴하기 시작하였으며 0.0001 MPa부터는 발생 응력이 수렴되었다. 진공 압력이 감소하며 발생 등가 응력은 증가하며 진공 압력에 선형적인 관계임을 확인하였다.

4.3 다이어프램 형상에 따른 결과

다이어프램의 contour 형상 및 개수 변화에 따른 결과를 확인하기 위해 contour의 개수를 변경해가며 geometry를 구성하였으며 각 geometry의 다이어프램의 내경 측 큰 직선 부분의 길이(ID flat 길이)와 다이어프램의 외경 측 끝 직선 부분의 길이(OD flat 길이)를 동일하였다. Contour의 개수(#)는 0개, 1개, 2개, 3개, 4개, 5개, 7개, 9개로 총 8개의 case가 있으며 부하는 인장 방향으로 2

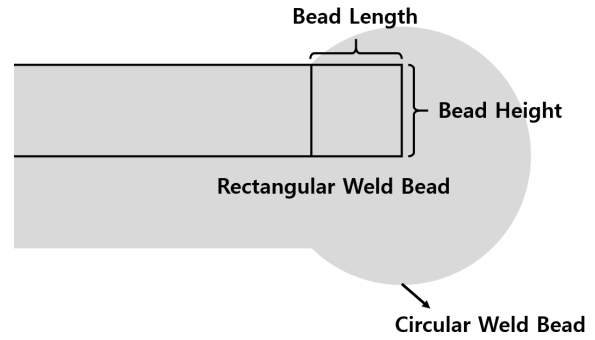


Fig. 12 Weld bead geometry

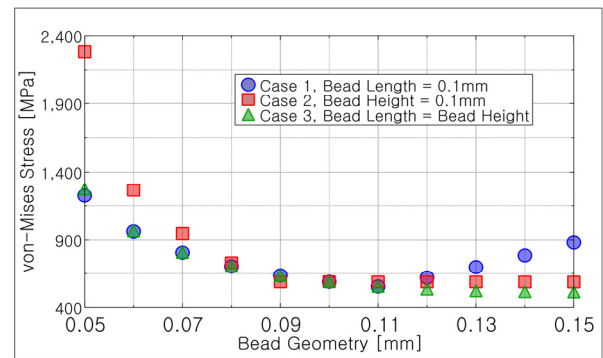


Fig. 13 Weld bead effect results

mm/CV의 부하를 입력하였다. Fig. 9에서는 #0~3까지의 결과를 표시하였으며 Fig. 10에서는 #4~9까지의 결과를 표시하였다. 각 세부 case마다 최대 응력이 발생하는 위치(Fig. 9, Fig. 10에서 파란 원에 해당하는 위치)가 달랐으며 # 0, # 1, # 4, # 5, # 9에서는 외경 측 비드에서 최대 응력이, # 2, # 3, # 7에서는 내경 측 비드에서 최대 응력이 발생하였다. 각 contour 개수에 따른 최대 응력을 Fig. 11에서 기록하였으며 최소는 # 0에서 발생하였고 최대는 # 5에서 발생하였다. # 4와 # 5에서 높은 응력이 발생하였으며 나머지의 경우 상대적으로 낮고 유사한 응력이 발생하였다.

4.4 비드 형상에 따른 결과

용접으로 인해 생긴 비드에 높은 응력이 발생하고 해당 위치에서 파단이 발생하기 때문에 피로 수명에 영향을 주는 주요 인자로 용접 비드의 특성이 있을 것으로 예상하였다. 비드로 인한 피로 수명을 분석하기 위해 비드의 높이(Fig. 12에서 확인할 수 있으며 다이어프램의 두께와 같다. Fig. 14, 15, 16에서 a로 표시)와 비드의 길이(Fig. 12에서 확인할 수 있으며 용접 비드의 접합 길이와 같다. Fig. 14, 15, 16에서 b로 표시)를 변수로 설정하였으며 Fig. 13의 case 1은 비드의 길이를 0.1 mm로 고정하고 비드의 높이를 변경하였으며 case 2는 비드의 높이를 0.1 mm로 고정하고 비드의 길이를 변경하였고 case 3은 비드의 길이와 높이를 1:1 비율로 증가시키며 해석한 것이다. 각 case는 0.01 mm 단위로 0.05 mm에

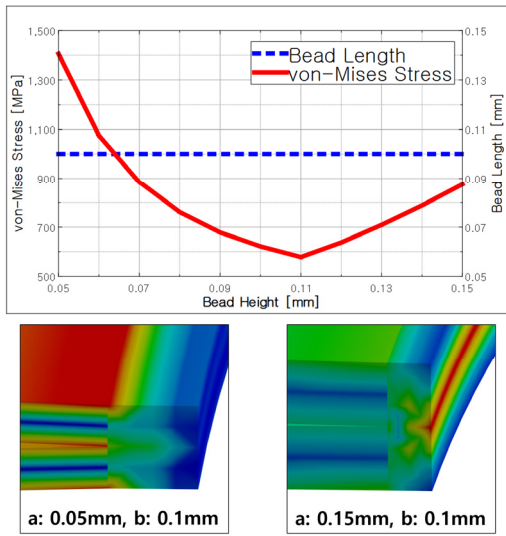


Fig. 14 Weld bead effect: case 1

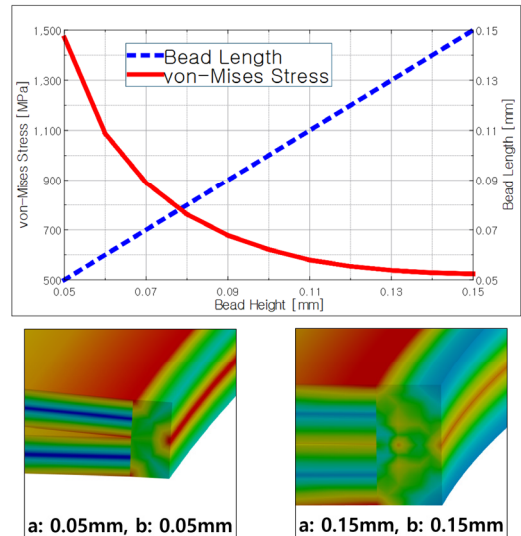


Fig. 16 Weld bead effect: case 3

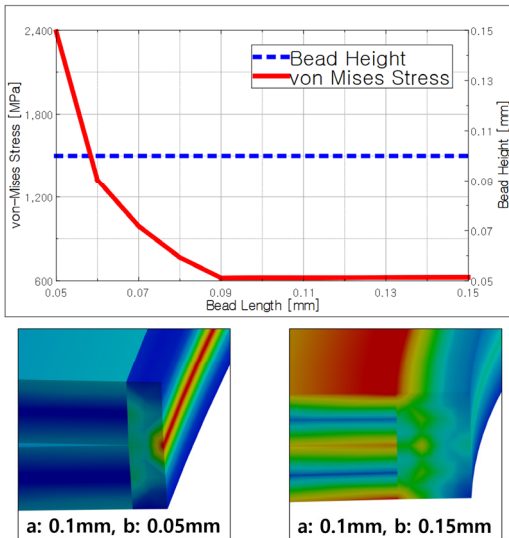


Fig. 15 Weld bead effect: case 2

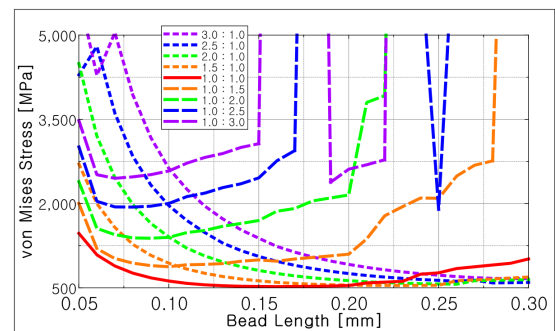


Fig. 17 Various ratio: fixed bead length

서 0.15 mm까지 해석을 진행하였다.

Fig. 14에서는 Fig. 13의 case 1에 대하여 표시하였으며 비드의 높이가 증가함에 따라 발생한 von-Mises 응력이 감소하다 다시 증가하는 경향을 보였으며 최소 응력이 발생한 위치는 기존에 사용하는 0.1 mm가 아닌 0.11 mm에서 발생하였다. 비드의 높이가 0.15 mm인 경우 내경 측 비드의 중앙부에서 최대 응력이 발생하였으며 비드의 높이가 0.05mm인 경우 비드와 다이어프램이 만나는 위치에서 최대 응력이 발생하였다. Fig. 15(case 2)와 Fig. 16 (case 3)에서는 길이(bead geometry)가 증가하며 점차 수렴하는 모습을 보였다. 또한 case 2에서 비드 길이가 0.05 mm인 경우 내경 측 비드의 중앙부에서 높은 응력이 발생하였으며 0.15 mm에서는 비드와 다이어프램이 만나는 위치에서 최대 응력이 발생하였다. Case 3(Fig. 16)에서는 비드와 다이어프램이 만나는 위치, 내경

측 비드의 중앙부에서 높은 응력이 발생하였다.

비드 형상에 대한 영향을 분석하기 위해 각 축에 대한 영향을 파악하여야 하며 분석을 위해 더 많은 데이터가 필요하다 판단하였다. 따라서 기존의 비드의 길이와 비드의 높이를 1:1로 한 결과와 더불어 다양한 비드 형상 비율에 대하여 해석을 진행하였다. 이를 위해 bead geometry를 0.05 mm에서 0.3 mm까지 변화하였으며 이때 bead geometry가 0.15 mm가 아닌 0.3 mm인 이유는 고정 길이와 변동 길이의 위치가 서로 변경되었을 때, bead geometry가 커지는 방향으로 shift가 되는 경향이 있으며 이를 표현하기 위함이다. 그래프의 X축과 Y축을 고정하였으며 X축은 0.05 mm~0.3 mm, Y축은 500~5,000 MPa까지 표현하였다.

Fig. 17은 비드의 길이를 고정하고 비드의 높이를 각 비율에 해당하는 값으로 해석을 진행하였다. 예를 들어 비드의 길이가 0.12 mm이고 비율이 1:2.5라면 비드의 높이는 0.3 mm이며 반대로 비율이 2.5:1이라면 비드의 높이는 0.048 mm이다. 비율을 A:B로 표현하였을 때, A는 Fig. 17과 18에서의 그래프에서 X축에 해당하는 고정 길이이며 B는 비율에 의해 계산한 변동 길이이다. 고정 비드 길이와 고정 비드 높이에 대하여 공통적으로 비율이 감소할

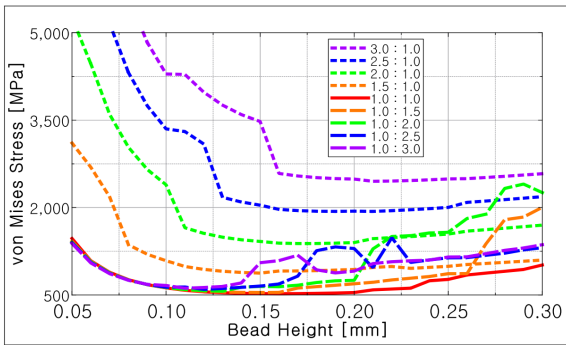


Fig. 18 Various ratio: fixed bead height

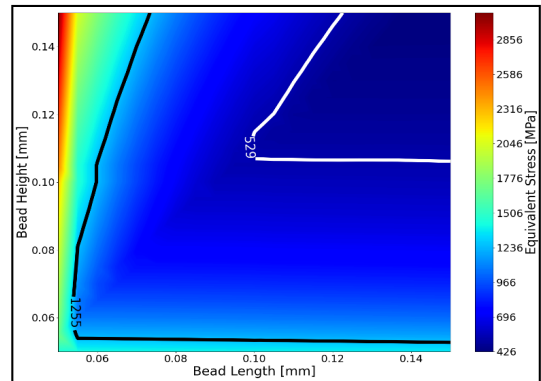


Fig. 20 0.333 mm/CV contour plot

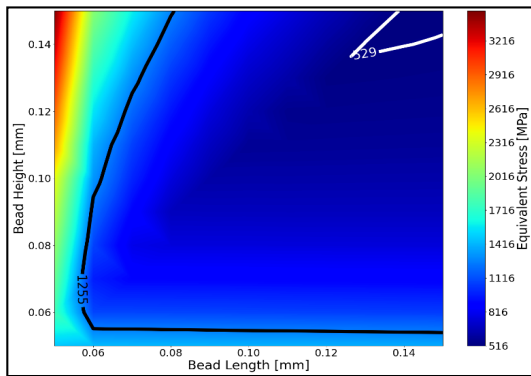


Fig. 19 0.45 mm/CV contour plot

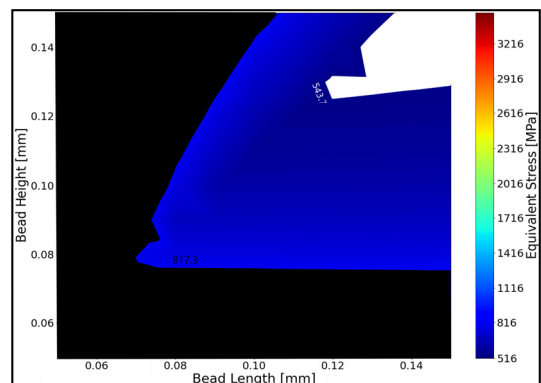


Fig. 21 0.45 mm/CV fatigue life prediction

수축 발생 응력이 감소하는 경향이 있으며 동시에 그래프의 X축 방향으로 shift가 발생하는 경향이 있다. 비드의 길이가 고정인 경우, 비드 길이가 비드 높이보다 큰 경우에는 비드 길이가 증가하며 발생 응력이 수렴하는 양상을 보였으며 반대로 비드 길이가 비드 높이보다 작은 경우 비드 길이가 커지며 발생 응력이 진동하는 양상을 보였다. 반대로 비드의 높이가 고정일 때 비드 길이가 비드 높이보다 큰 경우 상대적으로 응력 폭이 낮으며 진동하는 경향을 가지며 비율이 높은 경우(1:3)보다 낮은 경우(1:2, 1:1.5 등)에서 더 높은 응력이 발생하였다. 비드 길이가 비드 높이보다 작으면 비드 높이가 커지며 응력이 수렴하는 경향을 가졌다.

Fig. 17과 Fig. 18을 좀 더 직관적으로 파악하기 위해 특정 비율에 대한 표현을 확장하여 0.05 mm~0.15 mm 영역에 대하여 표현하였으며 비드의 높이와 길이를 기준으로 세부 case를 구성하였다. Fig. 18~21에서 X축은 비드의 길이를, Y축은 비드의 높이를 의미하며 contour color bar는 발생 von-Mises 응력을 의미한다. Fig. 19와 Fig. 21은 CV 당 변위를 0.45 mm로 하여 해석한 그림이며 Fig. 20과 Fig. 22는 CV 당 변위를 0.333 mm로 하여 해석하였다.

두 case 모두 좌측 상단(비드의 길이가 작으며 높이는 큰 경우)에서 높은 응력이 발생하였으며 반대의 경우(비드의 길이는 크며 높이는 작은 경우)에서도 상대적으로 높은 응력이 발생하였다. 변

위가 0.45 mm/CV인 경우(Fig. 19)에서 최대 응력과 최소 응력은 3476.4 MPa, 520.47 MPa로 3060.14 MPa, 426.06 MPa인 0.333 mm/CV인 경우(Fig. 20)보다 높은 최대, 최소 응력을 가지며 이는 범위가 증가하였기 때문에 분석하였다. Fig. 18과 19에서 흰색 선은 재료의 항복 강도(AM350, 529 MPa)를 의미하며 직선의 형태를 보이며 이를 비드의 길이와 높이의 비(bead length / bead height, L/H)로 표현할 수 있다. 변위가 0.45 mm/CV에서 약 0.9253인 선과 약 1.0062인 선으로, 변위가 0.333 mm/CV에서는 L/H가 약 0.8452인 선과 비드 높이가 약 0.10655 mm인 선으로 표현 가능하며 이러한 특정 응력을 2개의 선 형태로 표현할 수 있는 특징을 이용해 개략적인 피로 수명을 추정할 수 있다.

응력 기반 피로 수명 예측 방법에서는 재료의 피로 물성(S-N curve)의 범위 초과하여 예측할 수 없으며 이를 이용해 피로 수명 예측이 가능한 구간을 파악할 수 있다. Fig. 21과 Fig. 22는 각각 Fig. 19와 Fig. 20을 수정한 그림이며 543.7 MPa보다 적은 응력을 가지는 경우 하얀색, 817.3 MPa보다 큰 응력을 가지는 경우 검은색으로 표시하였다. 이때 817.3 MPa와 543.7 MPa는 각각 재료의 피로 물성에서의 최대 수명에 해당하는 응력과 최소 수명에 해당하는 응력이다. 비드에 발생한 응력이 817.3 MPa보다 큰 경우(검은 영역) 부품의 최소 수명은 '0'이며 이와 유사하게 발생

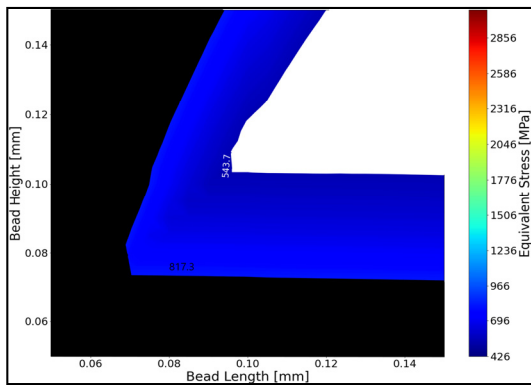


Fig. 22 0.333 mm/CV fatigue life prediction

응력이 543.7 MPa보다 작은 경우(하얀 영역) 부품의 최소 수명은 물성의 최대 수명(영구 수명)이 된다. 두 구간에 해당하지 않는 경우($543.7 \leq \text{응력} \leq 817.3$)에는 피로 해석을 통해 구조물에 발생하는 응력에 해당하는 피로 수명을 예측할 수 있다.

5. 결론

벨로우즈의 피로 수명을 파악하기 위해 재료의 피로 물성에서 확인할 수 있는 높은 응력이 발생하면 피로 수명이 감소하는 현상에서 착안하여 선형 구조 해석을 진행하였다. 벨로우즈의 형상은 용접 비드를 모사하기 위해 다이어그램의 끝에서 구성하여 모사하였으며 선형 구조 해석은 변위에 대하여 응력이 선형적인 경향을 보였다. 인장 방향의 경우 내경 측 비드에서, 압축 방향의 경우 외경 측 비드에서 최대 응력이 발생하였으며 이에 따른 피로 판단 또한 하중의 방향에 따라 발생 위치가 이동할 것으로 예상하였다. 재료의 영향을 분석하기 위해 von-Mises 응력을 재료의 항복 응력으로 나누어 'yield strength ratio'를 정의하였으며 재료에 따른 발생 응력은 유사하였으나 AM350보다 SUS316L에서 이른 판단이 발생할 것으로 예상하였다. 진공에 의한 영향을 분석하였을 때, 진공의 추가로 인해 발생 응력이 증가하였으나 최대 응력이 발생하는 위치는 동일하였다. 또한 진공 압력의 변화에 대하여 해석을 수행하였으며 내부 압력이 감소하며 발생 응력이 상승하다 수렴하는 경향을 보였으며 피로 시험 시 동일한 조건을 부여하기 위해 최소 7.5torr의 압력을 적용해야 하는 것으로 분석하였다. 용접 비드가 발생 응력 및 피로 수명에 영향을 미치는 요인으로 예측하였으며 이를 분석하기 위해 비드의 길이와 높이를 변수로 해석을 진행하였다. Case 2와 3에서 발생하는 응력은 수렴하였으며 case 1은 발생 응력이 감소하다 증가하는 경향을 보였다. 구조에 발생하는 응력이 커 발생 응력을 감소시켜야 하는 경우, 비드의 길이를 증가하는 것은 응력 감소 효과를 기대하기 어려운 것으로 파악하

였다. 비드에 발생하는 응력 집중의 형태는 비드의 형상에 의해 결정되며 최대 응력의 발생 위치는 비드의 길이보다 높이가 큰 경우 비드의 중앙부에서, 비드의 길이가 높이보다 크거나 같은 경우 비드와 다이어그램이 만나는 위치에서 발생하는 것을 확인하였다. 비드 길이와 높이 축에 대한 다른 비율에서의 영향을 분석하기 위해 다양한 비율에 대하여 해석을 진행하였으며 고정 길이와 변동 길이의 비율이 감소할수록 발생 응력이 감소하는 경향과 그래프의 X축 방향으로 shift가 발생하는 경향이 있음을 확인하였다. 비드 길이 및 높이에 따른 응력 결과를 contour plot 형태로 표시하였을 때, 특정 응력에 대하여 2개의 선으로 근사할 수 있으며 이러한 특성을 이용해 재료의 피로 물성을 기반으로 피로 수명 예측이 가능한 구간을 파악할 수 있으며 이와 더불어 피로 수명이 영구 수명인 구간과 '0'인 구간도 파악할 수 있다.




후기

본 연구는 한국산업기술기획평가원의 연구비지원(20021828)과 한국기술교육대학교 2024년도 연구학기제의 연구비 지원으로 연구되었음.

References

- [1] ASME, 1985, Design of Transmission Shafting, ASME B106.1M, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [2] Hirata, O., Nakajima, A., Okada, K., Sasaki, S., Ogawa, Y., 1995, Fatigue Life of Welded Bellows (Effect of Configuration of Corrugated Plate), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 61:587-3143-3149, <https://doi.org/10.1299/kikaic.61.3143>
- [3] Hirata, O., Nakajima, A., Okada, K., Sasaki, S., Ogawa, Y., 1995, Fatigue Life of Welded Bellows (Effect of Test Speed), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 61:589-3755-3761, <https://doi.org/10.1299/kikaic.61.3755>
- [4] Kim, Y., Park, K. Y., 2012, Micro TIG Welding Characteristics of Stainless Steel Bellows, Journal of Welding and Joining, 30:2-11-15, <https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.2.115>.
- [5] Kim, J. O., Lee, J. H., Suh, J., Lee, S. W., 2012, Welding Characteristics of Metal Bellows Using a Pulsed Nd: YAG Laser, Laser Solutions, 15:1-10-14, <https://koreascience.kr/article/JAKO201232642190677.page>.
- [6] Cho, H. Y., Nam, G. J., Oh, B. K., Kim, Y. H., Lee, J. H., Suh,

- J., 2003, A Development of CAD Program for Metal Bellows Diaphragm, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 27:3 401-408, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2003.27.3.401>.
- [7] Cho, H. Y., Kim, J. O., Fang, J. Z., Kim, K. W., Lee, J. H., 2012, A Development of Shape Design in CAD Program for Metal Bellows Diaphragm, Proc. Korean Soc. Precision Eng. Autumn Conf., 1081-1082.
- [8] Hirata, O., Nakajima, A., Okada, K., Yanagisawa, T., 1994, Study on Durability of Welded Bellows-Fatigue Life on Bellows with Crack in Welded Bead-, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 60:11 1621-1625, <https://doi.org/10.2493/jjspe.60.1621>.
- [9] Nagamachi, T., Mishiba, T., Katuki, K., 2008, Deformation and Fatigue Characteristics of Large Welded Bellows with Inclined External Edge, Materials Transactions, 49:6 1249-1255, <https://doi.org/10.2320/matertrans.P-MRA2008809>.
- [10] Wankhede, S. D., Gawande, S. H., 2023, Design and Analysis Aspect of Metal Expansion Bellows: A Review, Forces in Mechanics, 13 100244, <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2023.100244>.

	<p>Doyoon Jeon M. S. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests are CAE & Process Optimization. E-mail: jeondoyun@koreatech.ac.kr</p>
	<p>Junyoung Lee M. S. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests are CAE & Process Optimization. E-mail: 2017120095@koreatech.ac.kr</p>
	<p>Seungmo Kim Professor in the Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests are CAE & Process Optimization. E-mail: smkim@koreatech.ac.kr</p>