

LNG 선박용 벨로우즈의 제작시 성형방법에 따른 성능 평가 I - 벨로우즈의 제작방법 및 기계적 특성 비교 -

김평수¹ · 김종도[†]

(Received April 14, 2016 ; Revised July 12, 2016 ; Accepted September 20, 2016)

Performance evaluation of the forming methods used in the production of bellows for LNG carriers I - Comparison of design methods and mechanical properties of bellows -

Pyung-Su Kim¹ · Jong-Do Kim[†]

요약: LNG 선박용 벨로우즈는 극한의 환경에서 지속적인 진동 그리고 큰 온도변화에 따른 수축과 팽창을 견뎌내야 하는 피로수명과 해수환경에서의 내식성을 가져야 한다. 이러한 특성을 갖기 위해서는 저온에서의 인성이 강하고 내부식성이 강한 재료를 사용하여 최적화된 성형조건을 유지하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 벨로우즈의 최적화된 설계 조건과 성형방법이 뒷받침되어야 한다. 본 연구에서는 기계적 강성과 신뢰성이 높은 극저온용 벨로우즈를 개발하기 위하여 유한요소 해석을 통해 벨로우즈를 설계하였다. 또한 두 가지의 성형방법을 통해 설계된 벨로우즈를 제작하여 최적화된 성형조건을 도출하고자 하였다. 기계식 성형방법과 하이드로포밍 방법을 통해 벨로우즈를 성형하고 성형방법에 따른 벨로우즈의 기계적 특성을 비교하기 위하여 성형부의 높이, 두께 및 비커스 경도 값을 측정하였다. 이를 통해 기계식 성형방법으로 제작된 벨로우즈의 경도 값이 하이드로포밍 제작 벨로우즈보다 더 높은 것을 확인하였다.

주제어: 유한요소 해석, 기계식 성형, 하이드로 성형, 기계적 특성

Abstract: Bellows for LNG carriers must be corrosion resistant in order to operate in seawater environments. They must also have long fatigue lives in order to withstand the expansion and contraction caused by large temperature changes and continuous vibration in extreme environments. In order to incorporate these properties into bellow design, it is important to use materials that are resistant to cold brittleness and corrosion, and maintain their optimized forming condition. The design conditions and forming methods used for bellows must be optimized in order to incorporate these characteristics. In this study, finite element analysis was used to develop cryogenic bellows, which have good mechanical strength and reliability. In addition, two different forming methods (mechanical and hydroforming) were used to design and produce bellows, in order to derive their forming condition. The height, thickness, and hardness of the convolutions of bellows produced by each method were measured and compared with each other. The results confirmed that the two forming methods produced bellows with different mechanical properties.

Keywords: Finite element analysis, Mechanical forming, Hydroforming, Mechanical properties

1. 서론

벨로우즈를 제작하는 업체에서는 설계도구로 벨로우즈 제작협회에서 발행하는 EJMA 간편식을 사용하여 설계한다. 이 표준은 제작협회에서 그동안 제작하면서 얻은 설계와 제작, 시험에 관한 내용을 정리하여 만든 것이다[1]. 그렇지만 벨로우즈의 사용범위는 광범위해서 사용용도에 따라 특성이 다르며 이에 따라 용도에 맞게 수정하여 사용하

기도 한다. 일반적으로 선박용 성형 벨로우즈의 경우 EJMA 간편식은 오랫동안 사용한 경험으로 적용에 문제가 없었지만 LNG 선박용 성형 벨로우즈의 경우 적용에 문제가 없는지 점검할 필요가 있다. LNG 선박용 성형 벨로우즈는 기존의 선박용 성형 벨로우즈가 변위와 압력과 온도에 대한 설계값을 입력하는데 비하여 호깅(hogging)과 새깅(sagging)을 반영해야만 한다[1]-[5].

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2125-0426>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, 49112, Korea, E-mail: jdkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4253

1 Hanjo Co., Ltd, Engineering Center, E-mail: pskim2000@chol.com, Tel: 051-416-5266

본 연구에서는 EJMA 협회의 표준 최신판인 EJMA 9판의 간편식을 기준으로 성형 벨로우즈의 변위를 인장과 압축할 때의 스프링상수, 하중 및 응력을 유한요소해석을 통하여 계산하였으며, 얻어진 계산 결과를 EJMA 간편식과 비교하였다. 또한 설계된 벨로우즈 형상에 대하여 기계식 (mechanical) 및 하이드로포밍 방법을 통해 벨로우즈를 성형하여 최적화된 성형조건을 도출하고 성형부의 기계적 특성을 비교하였다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소 경계조건

LNG 선박용 벨로우즈의 가장 기본적인 모델은 파이프에 직접 벨로우즈를 용접하는 형태로서, 내압에 유리하게 벨로우즈가 파이프의 내경에 접하거나 파이프 외경에 용접할 경우에는 벨로우즈의 외경에 지지링을 겹쳐서 용접하였다. 벨로우즈는 파이프가 열에 의한 인장과 압축변위를 감쇄하는 역할을 하므로 큰 변위를 소화하기 위하여 길이에 비하여 두께가 매우 얇은 박판을 사용하였다. 벨로우즈의 기하학적 형상은 축대칭이고, 하중조건이 축 방향 하중이나 내압인 경우에는 축 대칭의 문제이지만, 내압, 열 하중, 축 직각방향변위 등을 받기 때문에 2차원 유한요소해석은 어려움이 있다. 본 연구에서는 유한요소 해석프로그램인 ANSYS Mechanical APDL ver. 15.0을 사용하였다.

벨로우즈 설계규격에 기초한 기하학적 모델은 **Figure 1**에 나타낸다. 벨로우즈는 0.8mm 소재를 2겹을 사용하였고, 산수는 10산을 성형하였으며, 산의 피치는 28.0mm, 높이는 29.0mm로 설계하였다. 굽힘에 대한 거동이 충분히 반영될 수 있도록 두께방향으로 4개의 요소층을 생성하였으며, 요소 1개의 크기는 한 변을 0.2 mm로 하였고, 전체 34,720개의 요소로 구성되었다. 계산에 사용된 SUS316L 재질에 대한 응력-변형률 선도는 **Figure 2**와 같다. 탄성계수는 195 GPa이고 항복응력은 300 MPa이다. 벨로우즈 산의 2층 사이는 분리되어 있으며 접촉경계가 되도록 Target169와 Contact175 요소를 사용하여 모델링하였다. 169와 175번 요소는 접촉경계를 반영하기 위해 쌍으로 사용되며 접촉요소의 절점이 타겟요소의 절점사이를 침범하는 순간 강성이 고려되어 물리적으로 각 표면이 접촉한 인접 표면을 침투하지 못하도록 한다. 다층 벨로우즈의 경우 변형이 발생할 경우 인접 층간의 접촉 상태가 변하므로 이를 반영하기 위해 해석모델이 접촉 쌍을 설정해야 한다. 유한요소 경계조건은 벨로우즈가 Y축 방향으로 트로이달(troidal) 형태의 원주형상을 하고 있기 때문에 2차원 모델링의 Y축 대칭으로 실시하였다. 그리고 벨로우즈 양단은 플랜지나 파이프에 용접되어 고정되므로 양쪽을 상하로 고정시키고, Y축으로 한쪽에서 변위를 주었다. 실제로는 양쪽에서 변위가 발생하지만 실험장비의 제약이 있어서 한쪽으로부터 0~±34.0 mm까지의 변위를 주었다[6]-[10].

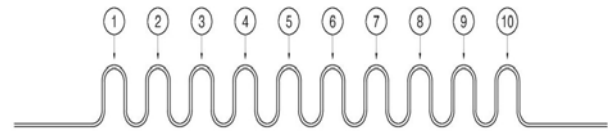


Figure 1: Geometric model of LNG bellows

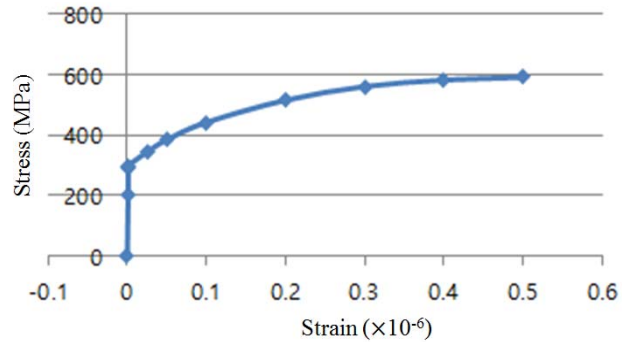


Figure 2: S-S curve for SUS316L

2.2 유한요소 해석결과

LNG 선박용 벨로우즈의 탄성범위 16.0~22.0 mm 압축변위에 대한 하중, 스프링상수, 벨로우즈 산에 걸리는 응력을 유한요소 해석결과와 EJMA 간편식 계산결과를 비교하여 **Figure 3~Figure 7**에 나타내었다. **Figure 3**와 **Figure 4** 및 **Figure 6**에서 EJMA는 간편식 계산결과를 나타내고, Compression은 FEM 해석결과를 나타낸다. 그리고 **Figure 5**와 **Figure 7**은 FEM 해석결과를 나타낸다.

변위에 따른 하중값은 **Figure 3**에 나타난 것처럼 0~21 mm 탄성범위에서는 상당히 일치하였다. 변위에 따른 하중은 변위가 22 mm까지 선형으로 증가하다가 전체영역에서 항복이 발생한 후 기울기가 감소하였다. **Figure 4**의 변위에 대한 스프링상수는 22 mm까지 일정한 값이지만 항복이 발생한 후 스프링 강성이 감소하였다. 변위 16.0 mm에서의 초기탄성 스프링상수는 EJMA 간편식에서는 512.7 N/mm이고, 유한요소해석에서 계산한 값은 564.4 N/mm로 약 10%의 차이가 발생하였다.

Figure 5에서 유한요소 해석에 의한 벨로우즈의 산 별로 응력을 나타내었으며, #1, #10번 산의 응력이 가장 낮았고, 중간 산들이 동일하게 높은 값을 나타내었다. 압축변위 31.0 mm에서 응력은 EJMA 간편식으로 계산값은 596.3 MPa이었으나, 유한요소 해석값은 평균응력이 397.0 MPa을 나타내었다. 그리고 #1-#10산에 대한 응력해석 평균값과 EJMA 간편식 계산값을 **Figure 6**에 비교하여 나타내었다. 벨로우즈 응력의 FEM 해석 결과 압축 변위가 22 mm에서 부위별 응력분포를 **Figure 7**에 나타내었고, 그 결과 산의 상단과 끝부분에서 가장 큰 응력이 가해졌다. 압축변위 31.0 mm에서 유한요소 해석 평균응력과 EJMA 간편식 응력의 비율은 66.7%로 약 33%의 설계여유를 나타내었으며, 따라서 EJMA 간편식은 LNG 선박용 성형 벨로우즈의 설계에 적용이 가능하였다.

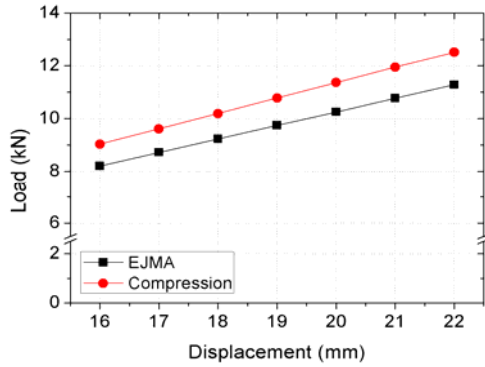


Figure 3: Comparison of load by calculated EJMA and the result of FEM



Figure 7: Contour of convolutions stress at displacement 22.0 mm

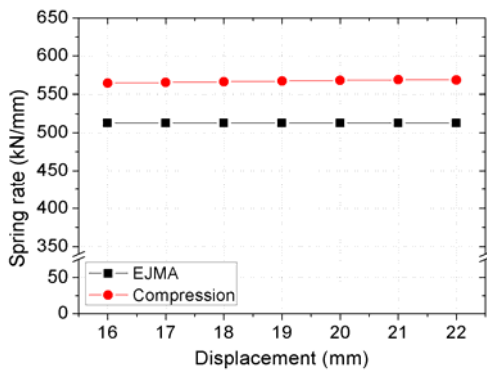


Figure 4: Comparison of spring rate by calculated EJMA and the result of FEM

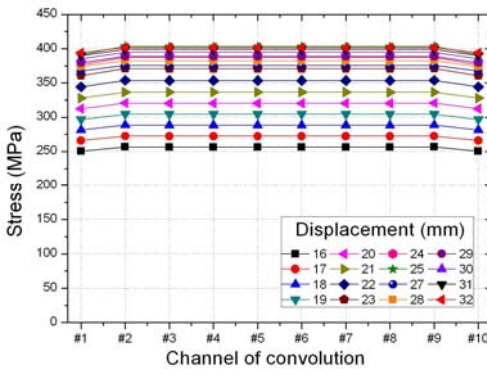


Figure 5: Calculated convolutions stress vs convolutions

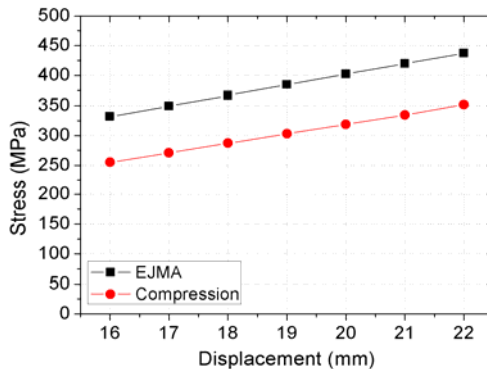


Figure 6: Comparison of convolution stress by calculated EJMA and the result of FEM

3. 성형방법에 따른 특성 비교

3.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재료는 0.8 mm 두께의 오스테나이트계 스테인리스강인 STS 316L과 고Ni기 합금강인 INCOLOY 825 소재이다. 그 화학적 조성을 Table 1에 나타낸다. 오스테나이트계 스테인리스강은 다른 종류의 스테인리스강에 비하여 매우 우수한 용접성을 가지며 대부분의 열원으로 용접이 가능하다. 또한 INCOLOY 825는 Ni-Fe-Cr 합금으로 극저온 및 고온에서 우수한 기계적 성질을 가지며, 환원 및 산화성 분위기에 상관없이 전면부식, 기공부식, 틈 부식, 입계부식 및 응력부식균열에 강한 특징을 가지고 있어 해수 환경에 노출되어있는 LNG 선박용 벨로우즈의 재료로써 적합하다.

Table 1: Compositions of STS316L & INCOLOY825(wt.%)

Element(wt%)	C	Si	Cu	Mn	Ti	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Materials											
STS316L	0.02	0.46	0.31	1.67	-	0.02	0.003	10.0	16.6	2.11	68.9
INCOLOY825	0.008	0.50	1.80	0.40	0.82	0.017	0.001	40.68	22.96	3.25	29.25

3.2 성형 방법

기계식 성형방법은 튜브를 성형기계에 올려놓고, 회전하면서 성형 롤에 의해서 가해지는 압력으로 각각의 산을 하나씩 성형한다. 성형 롤은 튜브의 안과 밖으로 위치하여 외부에 두 개의 롤과 내부에 한 개의 롤이 있어서 내부의 롤이 상하로 움직이면서 외부의 고정된 롤과 회전하면서 산을 성형한다. 시제품은 산의 높이가 상당히 높기 때문에 성형을 한 번에 7~10 mm씩 세 번에 나누어 성형을 실시하였다. 유압식 성형방법은 튜브를 유압프레스 또는 성형기계에 놓고 완성된 산의 전개길이와 같은 길이의 길이방향 간격으로 원형금형을 튜브의 바깥쪽에 배치한 후 튜브 안에 물과 같은 매체를 채우고 원주방향의 항복이 일어날 때까지 압력을 가하여 제품을 성형하는 방법이다. 이 성형과정에서 원주방향의 항복이 일어남과 동시에 적당한 모양의 형태가 얻어질 때까지 튜브의 길이방향으로 압축을 시킨

다. 이 방법에 의하여 개개의 산이 동시에 성형된다. Figure 8은 기계식 방법과 하이드로포밍 방법의 성형과정 모식도를 나타낸다.

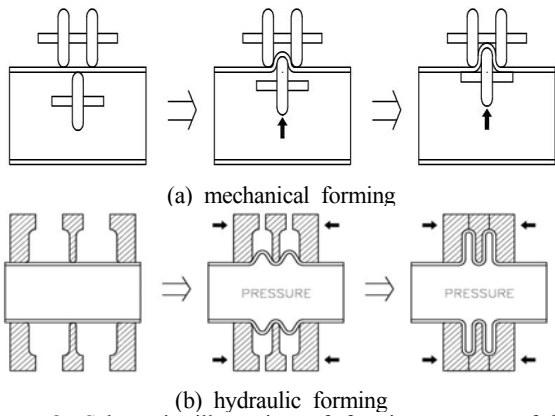


Figure 8: Schematic illustration of forming process of bellows

3.3 성형특성 비교

기계식 성형방법으로 제작된 벨로우즈의 특성을 파악하기 위하여 우선적으로 벨로우즈의 산 높기와 두께를 분석하였다. 산의 높이를 설계값 29.0 mm으로 하였으나 산의 높이 산포가 상당히 존재하였다. 이러한 원인은 기계식 성형방법에 따른 것으로, 산의 형성을 한 산씩 제작하는 공법이기 때문에 각각의 산 높이에 차이가 발생한 것이다. 치수정밀도에서 벨로우즈 산의 높기와 피치는 하이드로포밍 방법이 금형의 틀에서 동시에 성형하므로 기계식 성형방법보다 우수하다고 볼 수 있다. 산의 높이를 평균값으로 비교하였을 때 최소 26.89 mm에서 최대 29.58 mm까지 2.69 mm의 차이가 발생하였다. 기계식 성형 벨로우즈의 산 두께를 측정할 결과, Table 2에서 알 수 있듯이 “U”자의 중간부분인 ①, ⑤, ⑨, ⑬의 위치에서의 두께는 1.6 mm와 비슷한 값을 보이고, “U”자의 상부인 ②, ③, ④, ⑩, ⑪, ⑫에서는 두께가 최소 1.2 mm에서

1.445 mm 까지 최대 25%정도 감소하였고, “U”자의 하부인 ⑥, ⑦, ⑧에서는 두께가 감소가 미미하였다. 이는 제작하는 방법에서 찾을 수 있으며 금형을 상부로 밀어서 성형하는 방법 때문이다. 0.8 mm 두께의 재료를 두 장 겹쳐서 제작하였으므로 전체 두께는 이론적으로 1.6 mm 이므로 성형에 의한 두께의 감소는 굉장히 심한 것을 알 수 있다.

한편 하이드로포밍 방법으로 제작된 벨로우즈의 산 높기와 두께를 측정할 결과, 하이드로포밍 방법의 경우에는 평균 최소 29.31 mm, 최대 31.25 mm로 기계식 성형방법과 다르게 높이 산포가 적었다. 또한 벨로우즈의 두께 역시 Table 3에 보이는 바와 같이 1번 시험편의 경우 최소값이 1.576 mm, 최대값 1.756 mm를 나타내었으며, 2번 시험편의 경우 최소값 1.622 mm, 최대값 1.734 mm를 각각 나타내어 두께의 차이도 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한바와 같이 하이드로포밍 방법의 경우 모든 산이 동시에 성형되기 때문인 것으로 생각된다.

3.4 기계적 특성 비교

성능평가 등을 통하여 성형방법에 따라서 그 특성에 차이가 발생한다는 것을 확인하였으며, 기계적 특성인 경도 측정을 통하여 성형방법에 따라서 발생하는 성형부의 특성 차이를 비교하였다. 성형부의 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 벨로우즈의 중앙부를 기준으로 직선부분은 3.0 mm, 곡선부분은 1.0 mm의 간격을 두었다. 모든 시험편의 부하하중과 유지시간은 980.7 mN, 10초로 설정하였다.

기계식 성형방법으로 제작된 벨로우즈의 경도분포를 Figure 9에 나타낸다. 위치별로 경도를 측정할 결과, 성형이 이루어지면서 굴곡이 발생하여 산을 이루는 부분은 경도가 높은 반면, 직선 부분은 경도가 상대적으로 낮은 분포를 나타내고 있다. 또한 산과 산 사이의 굴곡 부분도 산의 경도값과 마찬가지로 높은 값을 보이고 있다. 전체적인 벨로우즈의 경도분포를 보면 최소값은 약 230 Hv, 최대값은 약 330 Hv로 100 Hv의 차이를 나타내었다.

Table 2: Measurement position and measured values for thickness of convolution formed by mechanical forming(mm)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Specimen													
	No. 1	1.6	1.4	1.378	1.445	1.578	1.533	1.556	1.511	1.622	1.4	1.422	1.445	1.6
No. 2	1.533	1.378	1.355	1.2	1.578	1.555	1.489	1.489	1.556	1.356	1.289	1.266	1.578	

Table 3: Measurement position and measured values for thickness of convolution formed by hydroforming(mm)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Specimen													
	No. 1	1.666	1.576	1.644	1.666	1.666	1.756	1.734	1.644	1.644	1.6	1.688	1.644	1.666
No. 2	1.666	1.622	1.689	1.644	1.733	1.734	1.711	1.688	1.711	1.688	1.733	1.644	1.688	

한편 하이드로포밍 방법으로 제작된 벨로우즈의 경도분포를 Figure 10에 나타낸다. 하이드로포밍 방법으로 제작된 시험편의 경도분포를 살펴보면 기계식 성형방법으로 제작된 시험편의 경도분포와 비교하여 상대적으로 분포 차이가 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 또한 경도값은 성형된 산의 부분에서만 상승하였을 뿐 산과 산 사이, 그리고 직선 부분은 낮은 상태를 유지하고 있다. 경도값의 차이는 최소 175 Hv에서 최대 280 Hv값을 나타내고 있지만 전체적으로는 기계식 성형의 경도분포보다 낮은 경도값을 보이고 있다. 이는 기계식 성형방법의 경우 성형시 재료의 가공경화로 인해 조직이 미세화되어 산의 상부와 하부의 경도값이 상승하였다고 추측된다. Figure 11을 보면 기계식 성형방법의 상부조직이 Figure 12 상부조직에 비하여 치밀해졌음을 알 수 있다.

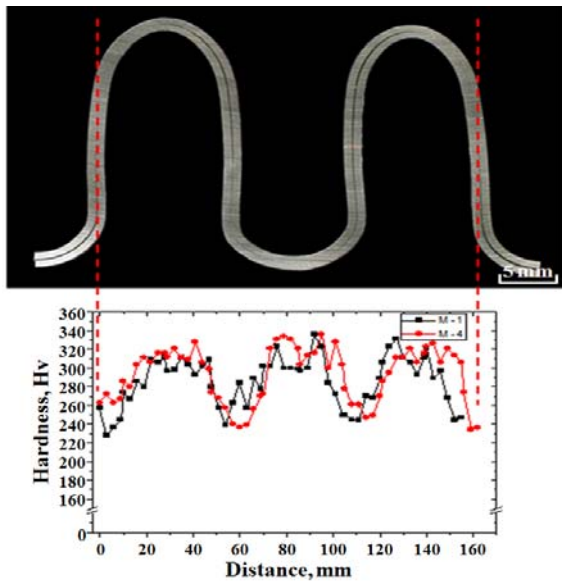


Figure 9: Micro vickers hardness distribution of formed bellows by mechanical forming

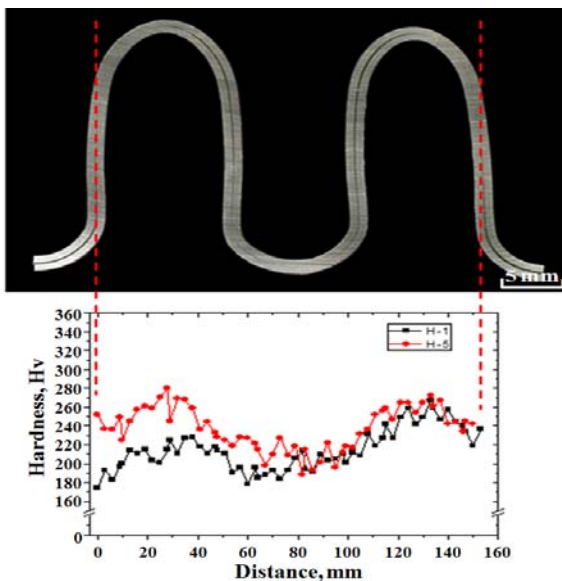


Figure 10: Micro vickers hardness distribution of formed bellows by hydroforming

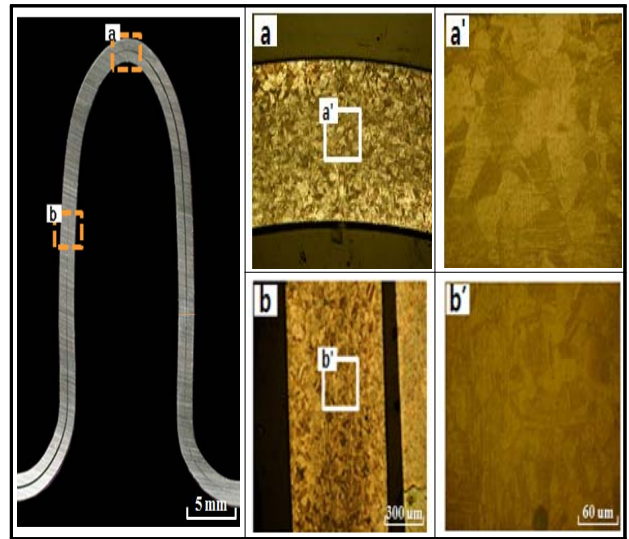


Figure 11: Microstructure of formed bellows by mechanical forming

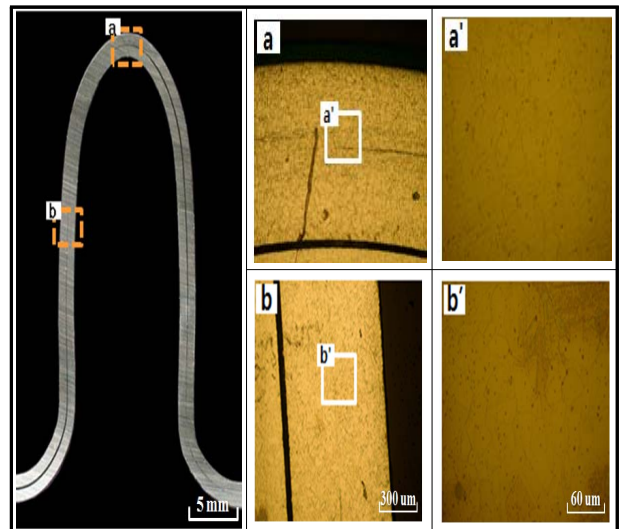


Figure 12: Microstructure of formed bellows by hydroforming

각각의 성형방법에 따른 시험편의 경도분포를 비교해본 결과, 벨로우즈를 성형하는 방법에 따라서 성형되는 부분의 기계적인 특성에 차이가 발생한다는 것을 확인하였으며, 이로 인해 각 산에 집중되는 응력의 차이도 발생할 수 있다고 추정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 최적화된 LNG 선박용 벨로우즈를 제작하고자 STS316L과 INCOLOY825의 0.8 mm 판재를 사용하여 유한요소 해석을 통해 벨로우즈의 설계 조건을 제시하고 성형방법에 따른 기계적 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) LNG 선박용 벨로우즈의 설계에 대한 유한요소 해석값을 EJMA 계산값과 비교한 결과 스프링상수는 약 10%

의 차이가 발생하였으며, 평균응력은 약 30%의 설계여유가 발생하여 EJMA 간편식의 설계 적용이 가능하였다. 응력 분포는 산의 상단과 끝부분에서 응력이 집중되었다.

- 2) 기계식 성형방법으로 제작된 벨로우즈 각각의 산 높이 차이는 2.69 mm까지 발생했으며, 하이드로포밍 방법의 경우에는 1.94 mm의 산 높이 차이를 나타내었다.
- 3) 벨로우즈 산의 두께는 기계식 성형방법의 경우 “U”자 상부에서 가장 얇아져 모재에 비하여 최대 25%까지 감소하였으며, 하이드로포밍 방법의 경우에는 모든 부분에서 모재와 거의 비슷하였다.
- 4) 기계식 성형방법으로 제작된 벨로우즈의 경도분포는 산의 상부와 하부의 중간부분에서 230 Hv인 최소값을 보였고, 최대값은 약 330 Hv로였으며, 하이드로포밍 제작 벨로우즈는 최소 175 Hv와 최대 280 Hv의 경도분포를 나타내어 전체적으로 기계식 성형 경도분포보다 낮은 값을 보였다.
- 5) 결론적으로 기계식 성형방법으로 제작된 벨로우즈는 가공 경화로 인해 응력이 집중되는 산의 상부와 하부의 경도가 상승하였다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] Expansion Joint Manufacturers Association Inc., Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association, Ninth Edition, 2009.
- [2] M. Nosaka, K. Kenjiro, M. Suzuki, M. Kikuchi, and Y. Miyakawa, “Sealing characteristics of high speed, face-contract metal bellows mechanical seals for liquid hydrogen,” Proceedings of the JSLE International Tribology Conference, vol. 3, pp. 823-828, 1985.
- [3] S. G. Park, A Study on the Factors that Influence the Bellows Behavior, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea, 1988 (in Korean).
- [4] J. T. Kim, Stress Analysis of the Bellows Joint Subjected to Highly-Elongated Deformation Axially, M.S. Thesis, Department of Mechanical Design & Production Engineering, Hanyang University, Korea, 1987 (in Korean).
- [5] W. I. Lee, J. E. Oh, and T. W. Kim, “A study on the dynamic characteristics of bellows,” Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 12, no. 6, pp. 1273-1281, 1995.
- [6] J. M. Lim, A Study on Natural Frequency of Bellows Using Finite Element Analysis, M.S. Thesis, Department of Mechanical Design & Production Engineering, Hanyang University, Korea, 1988 (in Korean).
- [7] K. G. Koh, Y. J. Suh, and G. J. Park, “A finite element analysis and shape optimal design with specified stiffness for U-type bellows,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 3, no. 6, pp.9 6-111, 1995.
- [8] B. K. Koh and G. J. Park, “Development of finite element analysis program and simplified formulas of bellows and shape optimization,” Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 21, no. 8, pp. 1195-1208, 1997.
- [9] F. Berner, H. Oesch, H. Steinhauser, and O. Joeri, Testing of Metal Bellows and Springs in Support of the Development of a Vapor Compressor for Space Flight Application, Report No. ESTEC-3446/77-NL-PP(SC)-R-1, NASA Foreign Exchange Program Technical Report, 1979.
- [10] N. Pathank, S. D. Gomale, and P. Jeboyedoff, “Fatigue life testing of metallic bellows for absolute leak tightness in solar energy application,” Mechanical Engineering Bulletin, vol. 15, no. 2, pp. 38-43, 1984.