

수소압축기 내장 충전탱크용 벨로우즈의 형상 파라미터 변화에 따른 구조 성능 고찰

박우창¹ · 정민석² · 송창용^{2†}

¹워크온시뮬레이션(주), ²국립목포대학교 조선해양공학과

Study on Structural Performance by Shape Parameter Variation of Bellows for the Hydrogen Compressor-embedded Refueling Tank

WOO CHANG PARK¹, MIN SEOK CHEONG², CHANG YONG SONG^{2†}

¹WorkonSimulation Co., Ltd., 234 Beotkkot-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08513, Korea

²Department of Shipbuilding & Marine Engineering, Mokpo National University, 1666 Yeongsan-ro, Cheonggye-myeon, Muan 58554, Korea

†Corresponding author :
cysong@mnu.ac.kr

Received 1 December, 2023
Revised 28 December, 2023
Accepted 7 February, 2024

Abstract >> In this study, design parameter exploration based on finite element analysis was performed to find the optimal shape of bellows, the key component of compressor-embedded refueling tank for a newly developed hydrogen refueling station capable of high-pressure charging above 900 bar. In the design parametric study, the design variables took into account the bellows shapes such as contour radius and span spacing, and the response factors were set to the maximum stress and the gap in the contact direction. In the shape design of the compressor bellows for hydrogen refueling station considered in this study, it was found that adjusting the contour span is an appropriate design method to improve the compression performance and structural safety. From the selection of optimal design, the maximum stress was reduced to 49% compared to the initial design without exceeding the material yield stress.

Key words : Hydrogen compressor(수소압축기), Hydrogen refueling tank(수소충전 탱크), Bellows(벨로우즈), Design parameter(설계 파라미터), Finite element analysis(유한요소 해석)

1. 서론

최근 전기 자동차와 함께 친환경 차량으로 개발이 가속화되고 있는 수소연료전지 자동차는 연료탱크에 충전된 수소와 공기 중의 산소가 화학 반응하여 전

기를 생산하고 구동하는 차량이다. 수소연료전지 자동차는 수소와 산소가 반응하기 때문에 물 이외의 배출가스가 발생하지 않는 친환경 미래 운송 수단이다¹⁾. 탄소 원자를 포함하지 않은 수소는 물의 전기분해로 만드는 재생 가능한 에너지원이기 때문에 환경

에 미치는 영향이 거의 없고, 단위 질량당 에너지 또한 매우 큰 특성이 있어 차량용 연료로서 큰 주목을 받고 있다.

수소연료전지 차량의 저장탱크 성능은 수소충전소의 저장탱크 성능과 밀접한 관계가 있다. 수소의 낮은 부피당 에너지 밀도를 고려하면 수소연료전지 차량의 저장탱크에서 수소의 압력은 700 bar 정도의 고압으로 충전되어야 하며, 수소충전소의 충전탱크는 이보다 높은 수준인 900 bar 이상의 압력 상태로 충전되어야 차량에 수소를 충전하는 과정의 효율이 상승한다. 그러나 현재 운용 중인 대부분의 수소충전소 저장탱크는 700 bar 이하의 압력으로 충전되도록 개발되었기 때문에 충전 중 가압 과정이 필요하게 되어 충전 대기 시간이 늘어나는 원인이 되고 있다. 따라서 수소 충전 인프라의 고도화를 위해서 900 bar 이상의 고압 충전이 가능한 수소충전소기용 저장탱크의 기술 개발이 필요하고, 이를 위해 압축기를 저장탱크에 일체형으로 내장한 새로운 시스템의 설계가 요구된다.

최근 수소충전기의 기술 개발과 관련된 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Oh와 Suh¹⁾는 수소 충전 시스템 내 극한 온도 조건에서의 체크밸브 출구 압력 변화에 따른 입출구의 차압과 밸브 내 수소의 밀도 변화가 유동 특성 및 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Joe 등²⁾은 정량적 위험성 평가 프로그램을 이용하여 대용량 멀티포트 수소충전소의 주요 설비에 대한 피해 영향 범위를 산출하였으며, 가상 시나리오에 대한 개인적 위험도와 사회적 위험도를 예측 분석하였다. Seo 등³⁾은 수소충전소용 초고압용기 설계를 위해 국제 규정을 적용하여 돔부 및 실린더부 두께를 산출하고, 구조 안전성 평가를 수행하였으며, 수정된 굿맨선도를 적용한 등가교변응력을 통해 피로 해석을 수행하였다. Back 등⁴⁾은 고세장 비형 수소저장탱크의 모듈화 방법을 제안하기 위해 직렬연결 방식과 메니폴더를 이용한 병렬연결 방식에서의 열전달 거동에 대한 수치 해석적 연구를 수행하였다. Back 등⁵⁾은 수소전기차량용 수소충전노즐의 설계 검증을 위해 차량 충전 상태의 경계 조건을

적용하여 구조 해석과 유동 해석을 수행하고 충전 효율과 안전성 측면에서 최적의 설계안을 제시하였다. 그러나 기존의 연구 사례에서 살펴본 바와 같이 900 bar 이상의 고압 충전이 가능한 수소충전소기에 적용되는 압축기 일체형 저장탱크에 관한 연구의 수행 사례는 미비한 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 900 bar 이상의 고압 충전이 가능하도록 개발된 수소충전소기용 압축기 내장 저장탱크의 핵심 부품인 벨로우즈의 최적 형상을 도출하기 위해 유한요소 해석 기반의 설계 파라미터 연구를 수행하였다. 압축기용 벨로우즈는 동일 형상의 단위 셀을 여러 개 연결하여 신축 작동 특성을 구현하기 때문에 구조 설계 안전성 평가를 위해 단위 셀 간의 접촉 거동 시에 발생하는 응력과 변형 특성의 검토가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유한요소 해석 기반의 접촉 비선형을 고려한 수치 해석을 통해 접촉응력과 변형 특성을 검토하였다. 또한 접촉응력을 감소시키면서 동시에 압축 성능을 향상시킬 수 있는 단위 셀의 형상을 도출하기 위해 유한요소 해석과 연계하여 설계 파라미터를 탐색하였다. 고압 수소압축기 내장 충전탱크용 벨로우즈에 대한 최적의 설계 형상 파라미터 선정을 통해 초기 설계 대비 재료 항복응력을 초과하지 않으면서 최대응력을 49% 감소시킬 수 있었다.

2. 초기 설계 구조 안전성 평가

2.1 수소압축기용 벨로우즈 설계

본 연구에서 고려된 수소충전기용 압축기 벨로우즈는 900 bar 이상의 고압 충전이 가능하도록 충전탱크 내부에 일체형으로 설계되었으며, Fig. 1에 내부 형상과 작동 원리를 나타내었다.

Fig. 1에 나와 있는 것처럼 수소충전탱크 내부는 압축기 기능을 하는 벨로우즈(노란색 부분)와 벨로우즈 외부를 감싸고 있는 실린더(붉은색 부분)로 구성되어 있다. 수소연료전지 차량에 수소가 충전되면 벨로우즈가 동시에 수축되면서 압력의 차이가 소멸

되어 가압 대기 시간이 필요 없게 된다. 충전이 완료되면 벨로우즈의 이동거리로 수소 잔량을 산출하여 저장탱크에 수소를 채우게 된다. 이와 같이 수소압축기 내장 충전탱크가 안전하게 목표한 기능을 수행하기 위해서는 벨로우즈의 구조 성능 확보가 중요함을 알 수 있다.

벨로우즈를 구성하는 단위 셀의 초기 상세 설계 형상은 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 span은 25 mm, convolution pitch는 8 mm, out-diameter flat은 2 mm, inner-diameter flat은 1 mm, thickness는 0.15 mm, 그리고 contour를 구성하는 반경은 2-4 mm로 설계되었다. 벨로우즈의 압축 작동 시 단위 셀의 좌우 contour 반경부가 접촉 방향으로 이동하게 되며, contour의 전 길이에서 접촉 방향 사이 간격이 완전 접촉 발생 전까지 최소화되어야 신축 작동 성능이 높아지고, 접촉응력도 최소화할 수 있다. 신축 작동 성능을 높일 수 있는 최소 접촉 방향 간격은 단위 셀 두께의 1/3인 0.05 mm로 고려되었다.

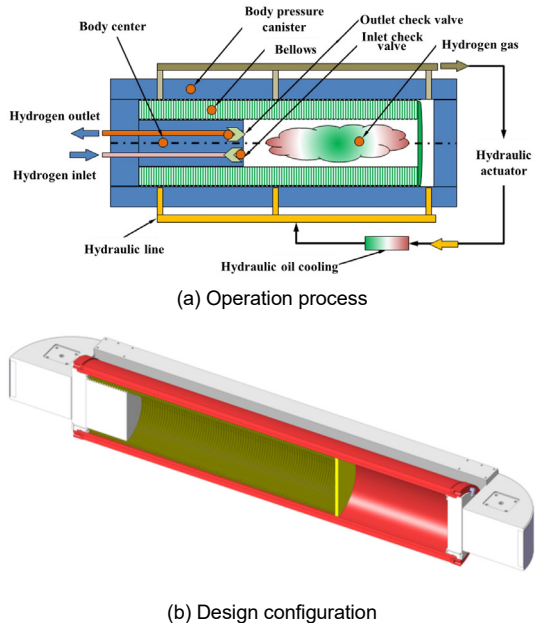


Fig. 1. Compressor bellows inside hydrogen storage tank

2.2 벨로우즈 단위 셀 구조 해석

유한요소 해석을 이용하여 초기 설계 상태의 벨로우즈 단위 셀에 대한 구조 성능을 평가하기 위해 Fig. 3과 같이 유한요소 모델을 생성하였다.

Fig. 3과 같이 벨로우즈 단위 셀의 유한요소 모델은 4절점 축대칭 솔리드 요소(axisymmetric solid element)인 CQUADX4 요소⁶⁾가 적용되었으며, 요소의 크기는 0.05 mm로 적용하였고, 요소수와 절점수는 각각 4,911개와 6,710개로 구성되었다. 재료는 고강도 고연성 스테인리스 강재인 350 JIN (Tokkin, Tokyo, Japan)이며, 재료의 주요 기계적 특성치는 Table 1에

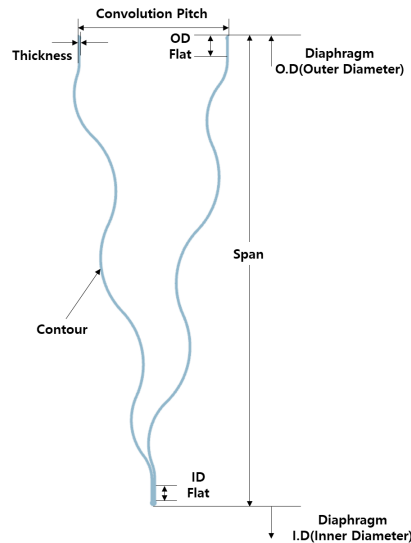


Fig. 2. Initial design configuration for unit cell of bellows

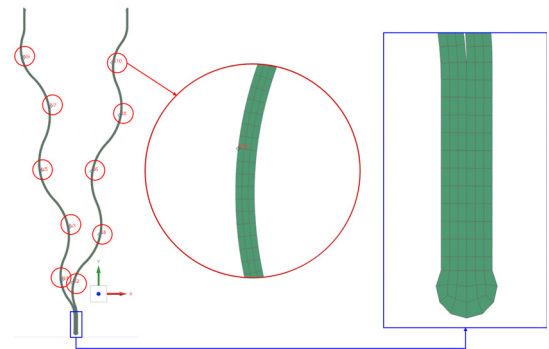


Fig. 3. Finite element modeling for unit cell of bellows

나타내었다.

하중 조건은 최대 압축 작동 거동을 모사하기 위해 우측 단위 셀 상단부의 out-diameter flat 부분에 convolution pitch 만큼의 강제 변위를 적용하였다. 경계 조건은 좌측 단위 셀 상단부의 out-diameter flat 부분을 완전 구속하였고, 좌우측 단위 셀의 contour 내부의 모든 edge 영역을 접촉 조건으로 고려하였다. 유한요소 해석에는 범용 유한요소법 소프트웨어인 Simcenter-3D/SOL402 솔버(Siemens Digital Industries Software, Plano, Texas, USA)⁷⁾를 사용하여 접촉 비선형을 구현할 수 있도록 하였다. 변형, 접촉 압력, 그리고 응력에 대한 수치 해석 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

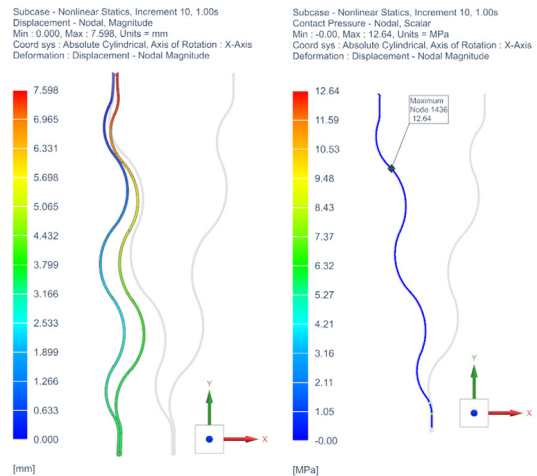
Fig. 4(a)에 나타난 것처럼 변형(좌측) 분포도의 결과는 convolution pitch 만큼의 거동이 발생하였지만 contour 내부 영역에서 균일한 접촉 방향의 거동이 나타나지 않았고, 접촉 압력(우측) 분포도의 결과에서 상단 반경부에서 부분 접촉이 발생하였다. 이러한 변형 거동은 벨로우즈의 압축 작동이 불균일하여 압축기의 성능 저하를 야기할 수 있고, 접촉으로 인해 과도한 충격응력을 발생시킬 수 있다. Fig. 4(b)에 나타난 것처럼 응력(우측) 분포도의 결과는 우측 단위 셀 상단부의 out-diameter flat 부분에서 접촉으로 인한 1,969 MPa의 최대응력이 발생하였으며, 재료 항복응력을 29% 초과하기 때문에 구조 안전성을 보장할 수 없다. 이러한 최대응력은 상단부의 부분 접촉 거동과 우측 단위 셀 상단부의 out-diameter flat 부분의 강제 변위가 연동되어 발생한 것으로 볼 수 있다. 따라서 압축기 성능 보장과 구조 안전성을 확보할 수 있는 벨로우즈의 형상에 대한 설계 파라미터 연

구가 필요한 것으로 판단되었다.

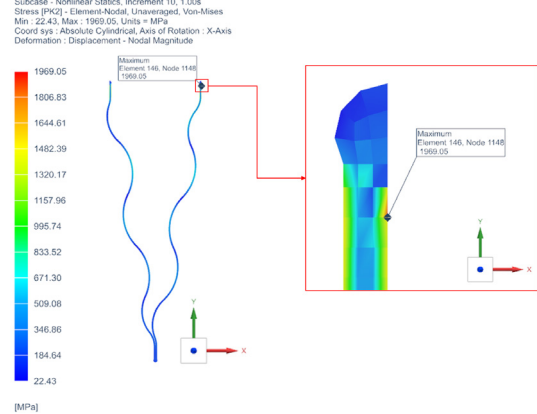
3. 설계 형상 파라미터 탐색

3.1 설계 파라미터 분석 설정

벨로우즈의 형상에 대한 설계 파라미터 분석을 통한 압축기 성능 보장과 구조 안전성 향상을 위해 변동인자는 contour의 형상을 고려했으며, 응답인자는 최대응력과 접촉 방향 간격으로 설정하였다. contour의 형상에서 convolution pitch와 전체 span 길이는 고정되어야 하고, contour를 구성하는 반경과 반경의 상하 위치를 구성하는 span 간격을 변동인자로 고려



(a) Deformation (left) and contact pressure (right) contours



(b) Von-mises stress contour

Fig. 4. Structural analysis results for initial design

Table 1. Material properties of bellows

Contents	Value
Elastic modulus [MPa]	192,519
Poisson's ratio	0.3
Density [N·s ² /mm ⁴]	7.81E-9
Yield strength [MPa]	1,523
Elongation	20%

할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 contour를 구성하는 반경을 변동인자로 고려한 경우(case 1)와 span 간격을 변동인자로 고려한 경우(case 2)의 2가지 경우에 대해 설계 파라미터 분석을 수행하고자 하였다. Case 1의 변동인자는 Fig. 5에 나타낸 것처럼 contour의 형상을 구현하기 위해 적용된 좌우측 단위 셀의 14개의 반경(Rp500-Rp513)을 변동인자로 구성하였다.

Case 2의 변동인자는 Fig. 6에 나타나 있는 것처럼 좌우측 단위 셀의 contour를 구성하는 반경 형상의 변곡점을 기준으로 상하 방향 span 간격에 대해 총 12개의 변동인자를 구성하였다. 설계 형상 파라미터

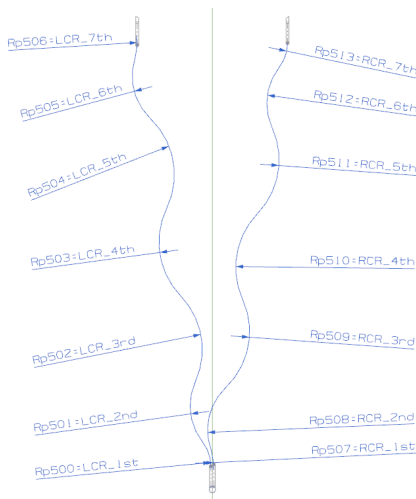


Fig. 5. Variable factors for contour radius (case 1)

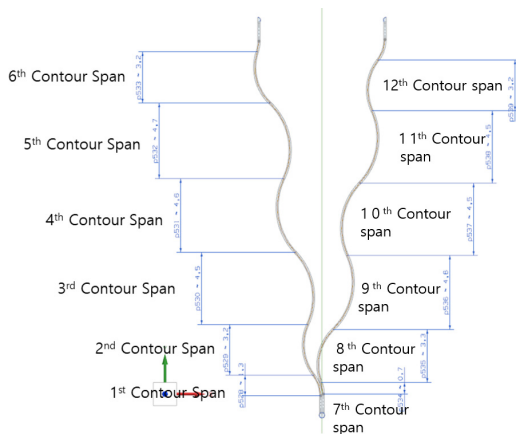


Fig. 6. Variable factors for contour span (case 2)

탐색을 위해 변동인자는 초기 설계 형상을 기준으로 $\pm 20\%$ 의 3수준 범위에서 변동할 수 있도록 설정하였다. 응답인자인 최대응력은 최소화되고, 접촉 방향 간격은 전체 contour span 상에서의 0.05 mm 이내로 최소화되는 것을 각각 선호 조건으로 설정하였다.

Case 1과 Case 2의 설계 형상 파라미터의 내용과 범위는 Table 2에 정리하였다.

3.2 설계 파라미터 분석 결과 및 고찰

Case 1과 case 2의 변동인자의 변화에 따라 응답인자의 결과를 분석하기 위해 라틴방격(Latin hypercube) 실험 계획법^{8,9)}을 사용하였다. 라틴방격법은 실험행렬의 어느 열에도 인자가 하나씩만 존재하도록 확률적으로 무작위(random)하게 나열하여 종횡 방향에서 사각형이 되도록 한 방격(hypercube or square)을 이용하는 방법이다. 일반적으로 라틴방격법은 3수준 이상의 변동인자 실험에 사용되며, 비선형 설계 공간 탐색 문제에 적합하다. 본 연구에서 고려한 벨로우즈의 형상에 대한 설계 파라미터 분석은 변동인자를 3수준으로 적용하였고, 접촉 비선형의 거동을

Table 2. Parameter and variation range

No.	Case 1 (contour radius)	Case 2 (contour span)	Variation range
1	Rp500	#1 span	$-20\% \leq \text{initial dimension} \leq +20\%$
2	Rp501	#2 span	
3	Rp502	#3 span	
4	Rp503	#4 span	
5	Rp504	#5 span	
6	Rp505	#6 span	
7	Rp506	#7 span	
8	Rp507	#8 span	
9	Rp508	#9 span	
10	Rp509	#10 span	
11	Rp510	#11 span	
12	Rp511	#12 span	
13	Rp512	-	
14	Rp513	-	

분석하기 때문에 라틴방격법이 적합하다고 판단하였다. 실험의 횟수는 case 1과 case 2에서 1,000회를 각각 수행하도록 라틴방격법을 설정하였고, 범용 설계 탐색 자동화/최적화 소프트웨어인 HEEDS (Siemens Digital Industries Software)¹⁰를 사용하여 변동인자의 변화에 따라 유한요소 해석을 자동으로 수행하고 응답인자의 결과를 저장하도록 하였고, case 1과 case 2에 대해서 설정된 실험 횟수의 응답인자 결과 중 접촉 방향 간격이 0.05 mm 이내로 최소화되면서 최대 응력이 가장 낮은 변동인자 조합을 탐색하였다. Case 1과 case 2의 최적의 변동인자 조합으로부터 산출된 변형과 응력분포도의 결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다.

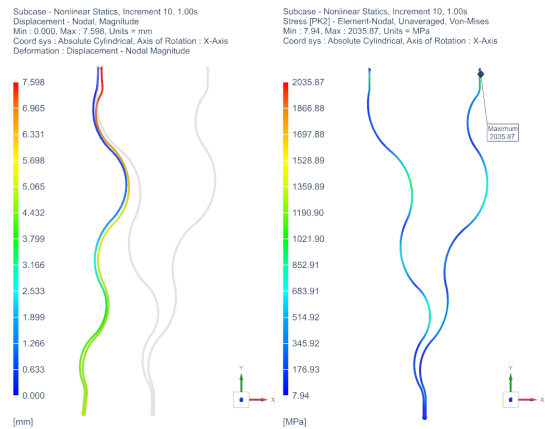


Fig. 7. Contour results for deformation (left) and von-mises stress (right) - case 1

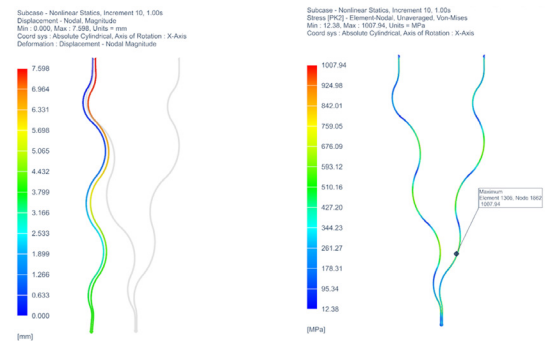


Fig. 8. Contour results for deformation (left) and von-mises stress (right) - case 2

Case 1의 변형 분포도 결과는 Fig. 7의 왼쪽에 나타난 것처럼 contour 내부 영역에서 균일한 접촉 방향의 거동이 나타났지만 상단 반경부에서 접촉이 발생하였고, out-diameter flat 부분에서 국부적인 꺾임 변형이 발생하였다. 이러한 변형 특성으로 인해 case 1의 응력분포도 결과는 Fig. 7의 오른쪽에 나타난 것처럼 우측 단위 셀 상단부의 out-diameter flat 부분에서 2,036 MPa의 최대응력이 발생하였으며, 재료 항복응력을 34% 초과하기 때문에 구조 안전성을 보장할 수 없는 것으로 판단되었다.

Case 2의 변형 분포도 결과는 Fig. 8의 왼쪽에 나타난 것처럼 contour 내부 영역에서 균일한 접촉 방향의 거동이 나타났고, 전체 contour 형상에서 접촉도 발생하지 않았다. Case 2의 응력 분포도 결과는 Fig. 8의 오른쪽에 나타난 것처럼 우측 단위 셀 하단부의 반경 부분에서 1,008 MPa의 최대응력이 발생하였으며, 재료 항복응력의 66% 수준이기 때문에 구조 안전성을 보장할 수 있는 것으로 판단되었다.

최종 설계 변동인자의 결과는 초기 설계 대비 변화율로 산정하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3에 나타난 것처럼 case 1에서는 8번(Rp507)

Table 3. Variation ratio of final parameter results

No.	Case 1 (contour radius)	Case 2 (contour span)
1	0.0%	-19.9%
2	0.0%	-10.9%
3	-9.8%	-4.9%
4	0.0%	1.9%
5	0.0%	4.2%
6	-11.3%	-4.4%
7	17.8%	12.1%
8	18.7%	-11.4%
9	0.0%	-2.3%
10	14.4%	-5.1%
11	0.0%	15.9%
12	0.0%	-13.2%
13	-12.9%	-
14	18.7%	-

과 14번(Rp513) 변동인자의 변화율이 가장 높게 나타났고, case 2에서는 #1 span 변동인자의 변화율이 가장 높게 나타났다. 이러한 변동인자 변화율의 정량적 크기는 응답인자에 대한 영향도의 정도와 비례적 관계가 있음을 의미한다.

초기 설계와 case 1과 case 2의 비교 결과는 Table 4에 정리하였다.

Table 4에 나타난 것처럼 초기 설계와 case 1의 경우 contour 상단 반경부에서 접촉이 발생하였기 때문에 접촉 방향 최소 간격이 0.00 mm로 나타난 반면, case 2의 경우 접촉 방향 최소 간격이 0.03 mm로 산출되어 접촉이 발생하지 않으면서 벨로우즈 압축 성능이 향상된 것으로 나타났다. 또한 최대응력은 초기 설계 기준으로 case 1은 오히려 3% 증가하여 구조 성능이 저하된 반면, case 2는 49% 감소하여 구조 안전성이 개선된 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 본 연구에서 고려한 수소충전기용 압축기 벨로우즈의 형상 설계에서 압축 성능과 구조 안전성을 향상시키기 위해서는 contour span 간격을 조정하는 것이 적절한 설계 방법임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 900 bar 이상의 고압 충전이 가능하도록 새롭게 개발된 수소충전기용 압축기 내장 충전탱크의 핵심 부품인 벨로우즈의 최적 형상을 도출하기 위해 유한요소 해석 기반의 설계 파라미터 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 초기 설계 상태에 대한 유한요소 해석을 수행한 결과, contour 상단 반경부에서 부분 접촉이 발생하였고 contour 내부 영역에서 균일한 접촉 방향의 거동이 나타나지 않았다. 또한 우측 단위 셀 상단부의 out-diameter flat 부분에서 재료 항복응력을 29% 초과하는 최대응력이 발생하여 구조 안전성을 보장할 수 없는 것으로 나타났다. 초기 설계 상태는 압축기 성능 보장과 구조 안전성을 확보하기 어렵기 때문에 벨로우즈의 형상에 대한 설계 파라미터 분석을 수행하였다.

2) 설계 파라미터 분석을 위한 변동인자는 contour의 형상을 고려했으며, 응답인자는 최대응력과 접촉 방향 간격으로 설정하였다. Contour의 형상에 대한 변동인자는 contour를 구성하는 반경을 변동인자로 고려한 경우(case 1)와 span 간격을 변동인자로 고려하는 경우(case 2)의 두 가지로 고려하였다. 응답인자인 최대응력은 최소화되고, 접촉 방향 간격은 전체 contour span 상에서의 좌우측 간격이 0.05 mm 이내로 최소화되는 것을 각각 선호 조건으로 설정하였다.

3) Case 1은 응답인자인 최대응력과 접촉 방향 간격의 허용치를 모두 만족하지 못한 반면, case 2는 응답인자 허용치를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 또한 case 2의 설계 변동인자를 적용할 경우 초기 설계 대비 재료 항복응력을 만족하면서 최대응력이 49% 감소되었다.

4) 본 연구에서 고려한 수소충전기용 압축기 벨로우즈의 형상 설계에서 압축 성능과 구조 안전성을 향상시키기 위해서는 contour span 간격을 조정하는 것이 적절한 설계 방법으로 나타났다.

추후 연구에서는 실제 작동 상태에 좀 더 가깝게 반영하기 위해 벨로우즈 단위 셀 기반의 수치 해석을 멀티 셀 모델로 확장하고, 극저온 조건에 대한 고려도 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행

Table 4. Comparison of results

Design case	Min. distance ¹ [mm]	Max. stress ² [MPa]	Status
Initial design	0.00	1,969	Fail
Case 1	0.00	2,036	Fail
Case 2	0.03	1,008	OK

¹ Allowable range: 0.0 mm < Min. distance ≤ 0.05 mm

² Allowable stress: Max. stress < 1,523 MPa

한 연구(No. 20223030040180, 차세대 고압(1,000기압) 수소 압축기 개발), 해양수산부의 재원으로 한국 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 1525013494/PMS5390, 친환경 선박용 전기 추진 시스템 시험평가 및 무탄소연료 선박적용성 실증 기술개발) 그리고 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(No. P0017006, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)의 결과입니다.

References

1. S. H. Oh and H. K. Suh, "Analysis of flow performance factors according to extreme temperature conditions of hydrogen inflow of FCEV charging system check valve", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 514-525, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.514>.
2. C. Joe, S. Kang, B. Kim, and K. Lee, "Risk assessment for high capacity multiport hydrogen refueling station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 5, 2023, pp. 505-513, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.5.505>.
3. Y. B. Seo, G. Park, and C. Kim, "Structural design and fatigue life prediction of an ultra-high-pressure vessel (type I) to be used in a hydrogen gas station", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 47, No. 3, 2023, pp. 255-261, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2023.47.3.255>.
4. J. Back, J. Mun, J. Min, K. Park, K. Ki, and S. Joo, "A numerical analysis study on charging conditions of type IV high aspect ratio modular hydrogen storage vessel", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 1, 2023, pp. 26-31, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2023.34.1.26>.
5. J. U. Baek, G. M. Gwak, N. Y. Kim, Y. M. Cho, and S. K. Lyu, "Study on the optimal design of the nozzle shape of the 700 bar hydrogen refueling nozzle for hydrogen electric vehicles", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 21, No. 7, 2022, pp. 28-33, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmp.2022.21.07.028>.
6. Siemens, "Element library reference", Siemens, 2014. Retrieved from https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/element.pdf.
7. Siemens, "Multi-step nonlinear user's guide", Siemens, 2014. Retrieved from https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/multi_step_nonlinear.pdf.
8. S. H. Park, "Design of experiments", Minyoung Publishing, Korea, 2012.
9. D. J. Lee, C. Y. Song, and K. Lee, "Surrogate model based approximate optimization of passive type deck support frame for offshore plant float-over installation", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 35, No. 2, 2021, pp. 131-140, doi: <https://doi.org/10.26748/KSOE.2021.002>.
10. Siemens, "HEEDS user's guide", Siemens, 2019.