

## 수소 압축기 내장형 충전 탱크의 벨로우즈 강도 성능 향상을 위한 형상 설계 파라미터 연구

### Parametric Study of Shape Design for Strength Performance Enhancement of Bellows in Hydrogen Compressor-embedded Refueling Tank

김지형<sup>1</sup>, 송창용<sup>2\*</sup>

Ji-Hyoung Kim<sup>1</sup>, Chang-Yong Song<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

As the development of hydrogen vehicles has accelerated in recent years, it is necessary to develop a storage tank for hydrogen fueling stations capable of high-pressure charging, and for this purpose, a new system with a compressor-embedded refueling tank is required. In this study, the parametric study of shape design based on strength performance evaluation was carried out to find the optimal shape design of bellows, the core component of compressor-embedded refueling tank for a newly developed hydrogen refueling station capable of high-pressure charging above 1,000 bar. The design factors for parametric study were contour shape and radius of bellows, and the performance factors were the maximum stress and the gap distance 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 radius is an appropriate design method to improve the compression performance and structural safety.

*Keywords : Hydrogen Compressor, Hydrogen Refueling Tank, Shape Design of Bellows, Parametric Study, Strength Performance*

---

<sup>1</sup> 워크온시뮬레이션(주), 연구소장

<sup>2\*</sup> 정회원, 교신저자, 목포대학교 조선해양공학과, 교수, 공학박사

E-mail: cysong@mokpo.ac.kr

<sup>1</sup> WorkonSimulation Co., Ltd.

<sup>2\*</sup> Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National University

## 1. 서론

최근 친환경 수송 수단으로 개발이 가속화되고 있는 수소연료전지 시스템은 연료 탱크에 충전된 수소와 공기 중의 산소가 화학반응하여 전기를 생산하고 구동하는 방식이다. 수소연료전지 시스템은 친환경 자동차나 소형선박에 적용되고 있으며, 구동 중에 수소와 산소가 반응하기 때문에 물 이외의 배출가스가 발생하지 않는 친환경 운송수단이다. 탄소 원자를 포함하지 않은 수소는 물의 전기분해로 만드는 재생 가능한 에너지원이기 때문에 환경에 미치는 영향이 거의 없고, 단위 질량당 에너지가 매우 큰 특성이 있어 수소는 친환경 수송시스템 연료로서 큰 주목을 받고 있다.

수소연료전지 시스템의 저장탱크 성능은 수소충전소의 저장탱크 성능과 밀접한 관계가 있다. 수소의 낮은 부피당 에너지 밀도를 고려하면 수소연료전지 시스템의 저장탱크에서 수소의 압력은 700 bar 정도의 고압으로 충전되어야 하며, 수소충전소의 충전탱크는 이보다 높은 수준인 900 bar 이상의 압력 상태로 충전되어야 수송시스템에 수소를 충전하는 과정에서 효율이 상승한다. 그러나 현재 운용 중인 대부분의 수소충전소 저장탱크는 700 bar 이하의 압력으로 충전되도록 개발되었기 때문에 충전 중 가압 과정이 필요하게 되어 충전 대기시간이 늘어나는 원인이 되고 있다. 따라서 수소충전 인프라를 활성화 하기 위해서는 900 bar 이상의 고압충전이 가능한 수소충전소기용 저장탱크의 개발이 필요하고, 이를 위해 압축기를 저장탱크에 일체형으로 내장한 새로운 시스템의 개발이 요구된다.

최근 수소충전기의 기술개발과 관련된 다양한 연구들이 수행되어 오고 있다. Joe 등[1]은 정량적 위험성 평가 프로그램을 사용하여 대용량 멀티포트 수소충전소의 핵심 설비에 대한 피해 범위를

산출하였으며, 가상 시나리오에 대한 개인적·사회적 위험도를 예측 분석하였다. Oh and Suh[2]는 수소 충전 시스템 내 극한온도 상태에서 체크밸브 출구 압력 변화에 따른 입·출구의 압력 차이와 체크밸브 내 수소의 밀도 변화가 유동 특성과 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Seo 등[3]은 수소충전소용 초고압용기 설계를 위해 국제규정을 기반으로 돔부 및 실린더부 두께를 산정하였고, 수정 굿맨 선도를 적용하고 등가교변응력을 적용하여 피로해석을 수행하였다. Back 등[4]은 고세장비 타입의 수소저장탱크를 모뎀화하는 방법을 제안하기 위해 직렬연결방식과 메니폴더를 이용한 병렬연결방식에서의 열전달 특성에 대한 수치 해석적 연구를 수행하였다. Baek 등[5]은 수소전기차량용 수소충전노즐의 설계검증을 위해 차량 충전상태의 경계조건을 고려하여 구조해석과 유동해석을 수행하고 충전효율과 안전성을 고려한 최적설계안을 제시하였다. 기존의 연구 사례에서 살펴본 바와 같이 고압충전이 가능한 수소충전소기에 적용되는 압축기 내장형 저장탱크에 관한 연구 사례는 미비한 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 1,000 bar 이상의 고압충전이 가능하도록 개발된 수소충전소기용 압축기 내장 충전탱크의 핵심 부품인 벨로우즈의 최적형상을 도출하기 위해 유한요소해석 이용한 형상 설계 파라미터 연구를 수행하였다. 수소압축기용 벨로우즈는 동일 형상의 단위 셀을 병렬로 여러 개 연결하여 신축작동 특성을 구현하기 때문에 구조설계 안전성 평가를 위해 단위 셀 간의 접촉거동 시에 발생하는 응력과 변형 특성의 검토가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 유한요소해석 기반의 접촉 비선형을 고려한 수치해석을 통해 접촉응력과 변형특성을 검토하였다. 또한 접촉응력을 감소시키면서 동시에 압축성능을 향상시킬 수 있는 벨로우즈 단위 셀의 형상을 도출하기 위해 유한요소해

석과 연계하여 형상 설계 파라미터를 탐색하였다. 고압 수소압축기 내장 충전탱크용 벨로우즈에 대한 최적의 형상 설계 파라미터 선정을 통해 초기 설계 대비 재료 항복응력을 초과하지 않으면서 최대응력을 45% 감소시킬 수 있었다.

## 2. 구조설계 강도성능 평가

본 연구에서 고려된 수소충전기용 압축기 벨로우즈는 1,000 bar 이상의 고압충전이 가능하도록 충전탱크 내부에 일체형으로 설계되었으며, Fig. 1에 내부형상을 나타내었다.

Fig. 1에 나와 있는 것처럼 수소충전탱크 내부에는 압축기 기능을 하는 벨로우즈 (노란색 부분)와 벨로우즈 외부를 감싸고 있는 실린더 (붉은색 부분)로 구성되어 있다. 수소충전기용 압축기 벨로우즈의 작동방식은 수소연료전지 시스템에 수소충전이 진행되면 벨로우즈를 구성하는 단위 셀들이 동시에 수축되면서 압력차가 소멸되기 때문에 가압 대기시간이 필요 없게 된다. 충전이 완료되면 벨로우즈의 이동거리로 수소 잔량을 산출하여 저장탱크에 수소를 채우게 된다. 이와 같이 수소압축기 내장 충전탱크가 안전하게 목표한 기능을 수행하기 위해서는 벨로우즈 단위 셀 구조의 강도성능 확보가 중요하다.

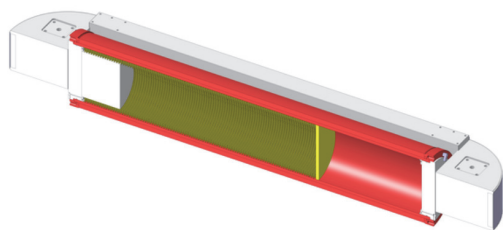


Fig. 1 Compressor bellows inside hydrogen storage tank

수소압축기용 벨로우즈를 구성하는 단위 셀의 초기 설계형상은 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 압축작동 시 단위 셀의 좌우 Contour 반경부가 Convolution pitch 방향으로 이동하게 되며, Contour의 전 길이에서 Convolution pitch 방향 사이 간격이 완전 접촉발생 전까지 최소화되어야 신축작동 성능이 높아지고, 접촉응력도 방지할 수 있다. 신축작동 성능을 높일 수 있는 최소 Convolution pitch 방향 간격은 단위 셀 두께의 1/3인 0.05 mm로 고려되었다.

벨로우즈의 설계형상을 토대로 구조강도 성능을 평가하기 위해 유한요소해석 모델을 생성하였으며, Fig. 3에 유한요소해석 모델 형상을 나타내었다. Fig. 3에 나타난 것처럼 벨로우즈 단위 셀을 중앙과 좌우에 각각 한 개씩 배치하여 압축작동의

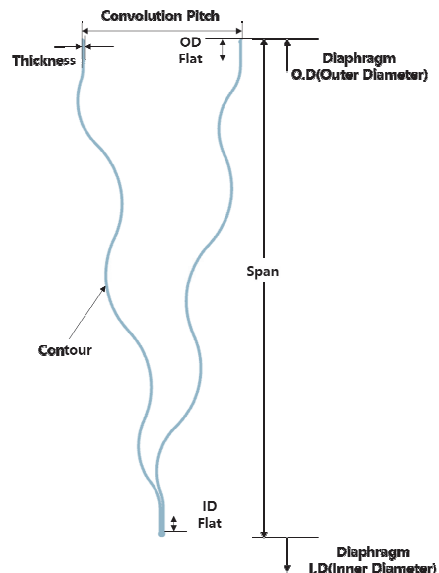


Fig. 2 Initial design configuration for unit cell of bellows

실제 거동을 모사할 수 있도록 하였다. 유한요소 모델에 사용된 요소는 4절점 축대칭 솔리드 요소 (axisymmetric solid element)인 CQUADX4 요소 이고[6], 요소의 크기는 0.05 mm로 적용하였으며, 요소수와 절점수는 각각 14,733개와 20,130 개로 구성되었다.

설계에 적용된 재료는 일본 Tokkin 사에서 개발된 고강도, 고연성 스테인리스 강재인 350 JIN이며, 주요 기계적 특성치는 Table 1에 나타내었다.

하중조건은 최대압축작동 거동을 모사하기 위해 우측 단위 셀(#1 cell) 상단부의 Out-diameter flat 부분을 전체 3개 셀의 Convolution pitch만큼의 강제변위가 부여되도록 하였다. 경계조건은 좌측 단위 셀(#3 cell) 상단부의 Out-diameter flat 부분을 완전구속하였고, 좌·우측 및 중앙 단위 셀의 Contour 내부의 모든 Edge 영역을 접촉

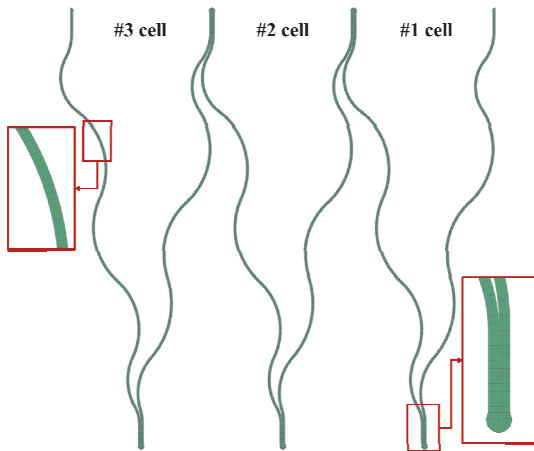


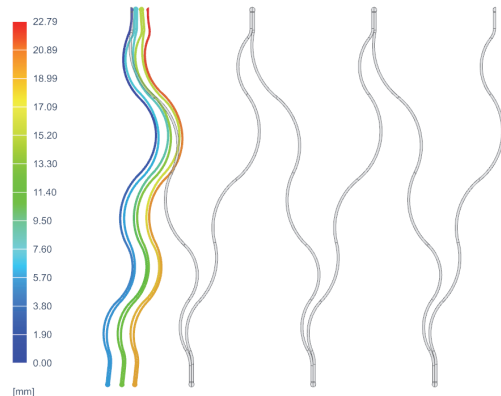
Fig. 3 Finite element modeling for strength evaluation

Table 1. Material properties of 350 JIN

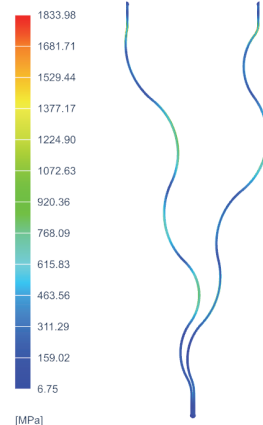
Mechanical property	Value
Elastic modulus [MPa]	192,519
Poisson's ratio	0.3
Density [N·s <sup>2</sup> /mm <sup>4</sup> ]	7.81E-9
Yield strength [MPa]	1,523

조건(edge contact)으로 고려하였다. 유한요소해석은 범용유한요소법 소프트웨어인 Simcenter-3D/SOL402 솔버[7]를 사용하여 접촉 비선형과 대변형 현상을 구현할 수 있도록 하였다.

변형과 응력에 대한 강도성능 수치해석 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에 나타난 것처럼 변형 분포도의 결과는 변형 전 형상(회색 표시 부분) 대비 3개 셀 전체의 Convolution pitch만큼의 거동이 발생하였지만, #1 cell의 Out-diameter flat 부분에서 꺾임 현상이 발생하였고 Contour 반경부에서 단위 셀 간의 부분 접촉이 발생하였다. 이러한 변형 거동은 벨로우즈의 압축작동이



(a) deformation contour



(b) von-Mises stress contour in #2 cell

Fig. 4 Strength analysis results for initial design

불균일하게 되어 압축기의 성능저하의 원인이 될 수 있고, 접촉으로 인해 과도한 충격응력을 발생시킬 수 있다. Fig. 4(b)의 응력 분포도의 결과는 최대응력이 발생한 단위 셀을 도시하였으며, 중앙부 단위 셀(#2 cell)에서 최대응력이 나타났다. #2 cell 상단부의 Out-diameter flat 부분에서 접촉으로 인한 1,834 MPa의 최대응력이 발생하였으며, 재료 항복응력을 20% 초과하기 때문에 강도 성능이 취약한 것으로 판단되었다. 따라서 압축기 성능 보장과 강도 성능을 향상시킬 수 있는 벨로우즈의 형상에 대한 설계 파라미터 검토가 필요한 것으로 판단되었다.

### 3. 설계 파라미터 연구

벨로우즈의 형상 설계 파라미터 연구를 통한 압축기 성능 보장과 강도 성능 향상을 위해 설계 인자는 Contour의 형상을 고려했으며, 성능인자는 최대응력과 최대변형 발생 시 Convolution pitch 방향의 간격으로 설정하였다. Contour 형상의 설계 파라미터 검토에서 전체 Span 길이는 고정되어야 하고, Contour를 구성하는 반경의 상하 위

치를 구성하는 Span 간격과 반경의 크기를 설계 인자로 고려할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Contour를 구성하는 Span 간격을 설계인자로 고려한 경우(Case-I)와 반경 크기를 설계인자로 고려하는 경우(Case-II)의 2가지 경우에 대해 설계 파라미터 분석을 수행하고자 하였다.

Case-I의 설계인자는 Fig. 5에 나타난 것처럼 좌우측 단위 셀의 Contour를 구성하는 반경형상의 변곡점을 기준으로 상하 방향 Span 간격에 대해 총 12개의 인자를 구성하였고, 3개의 단위 셀이 동일하게 변동되도록 하였다.

Case-II의 설계인자는 Fig. 6에 나타난 것처럼 Contour 형상 반경(Rp528~Rp541)의 14개를 인자로 구성하였고, 3개의 단위 셀이 동일하게 변동되도록 하였다.

설계 형상 파라미터 탐색을 위해 설계인자는 초기설계 형상을 기준으로  $\pm 20\%$ 의 3수준 범위에서 변동할 수 있도록 설정하였다. 성능인자인 최대응력은 최소화되고, 접촉방향 간격은 전체 Contour span 상에서의 0.05mm 이내로 최소화되는 것을 각각 선호조건으로 정의하였다.

Case-I과 Case-II의 설계인자의 변동에 따라

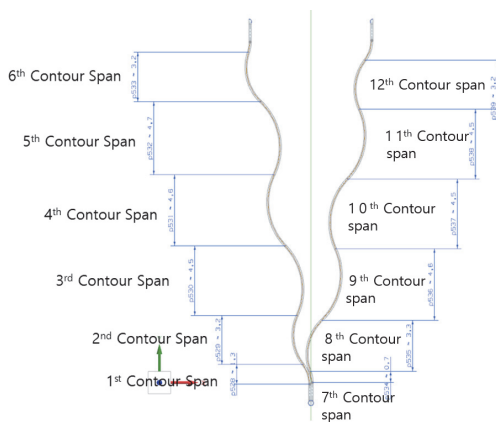


Fig. 5 Design factors for contour span (Case-I)

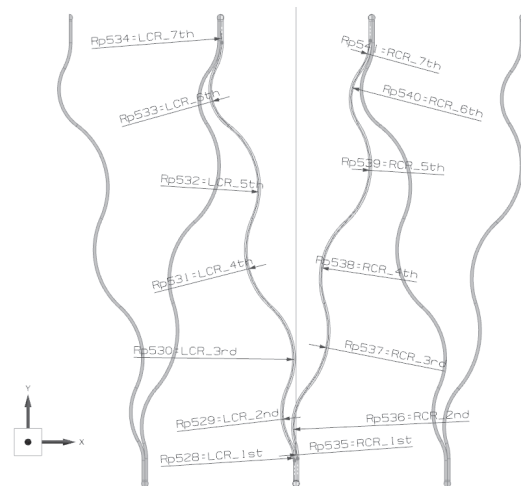


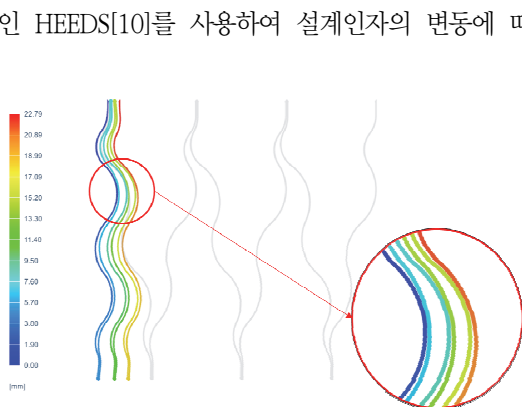
Fig. 6 Design factors for contour radius (Case-II)

성능인자의 결과를 분석하기 위해 라틴방격(Latin hypercube) 실험계획법[8, 9]을 사용하였다. 라틴방격법은 실험행렬의 모든 열에 인자가 하나씩만 배치되도록 확률적으로 랜덤하게 나열하여 중첩방향에서 사각형이 되도록 한 방격(hypercube or square)을 이용하는 방법이다. 일반적으로 라틴방격법은 3수준 설계인자의 실험에 적용되며, 비선형 설계공간 탐색에 적합하다. 본 연구에서 고려한 벨로우즈 형상의 설계 파라미터 분석은 설계인자를 3수준으로 적용하였고, 접촉 비선형의 현상의 수치해석을 연동하기 때문에 라틴방격법이 적합한 것으로 볼 수 있다. 라틴방격 실험의 횟수는 Case-I과 Case-II에서 각각 1,000번 수행되도록 설정하였고, 범용 설계 자동화/최적화 소프트웨어인 HEEDS[10]를 사용하여 설계인자의 변동에 따

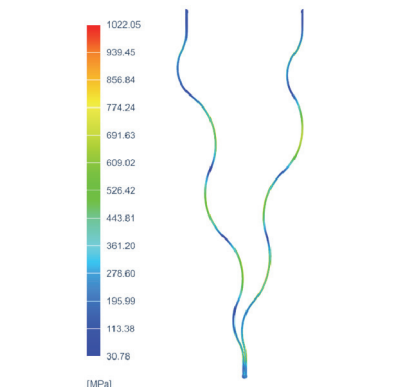
라 유한요소해석을 자동으로 수행하고 성능인자의 결과를 저장하도록 하였다. Case-I과 Case-II에 대해서 설정된 실험 횟수의 성능인자 결과 중 접촉방향 간격이 0.05mm 이내로 최소화되면서 최대응력이 가장 낮은 설계인자 조합을 탐색하였다. Case-I과 Case-II에서 최적의 설계인자 조합으로부터 산출된 변형과 응력 분포도의 결과는 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다.

Case-I의 변형분포도 결과는 Fig. 7(a)에 나타난 것처럼 Contour 내부 영역에서 균일한 접촉방향의 거동이 나타났지만, 상단 반경부(붉은색 원상세 표시부)에서 접촉이 발생하였다.

이러한 변형특성으로 인해 Case-I의 응력분포

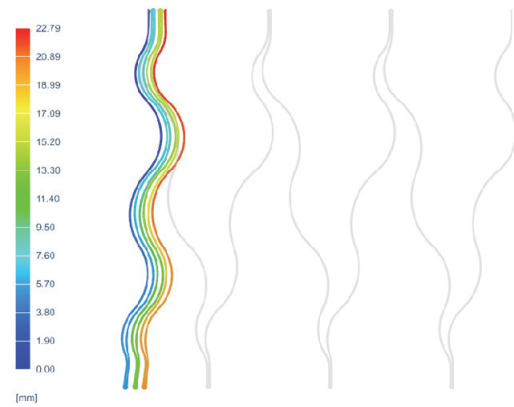


(a) deformation contour

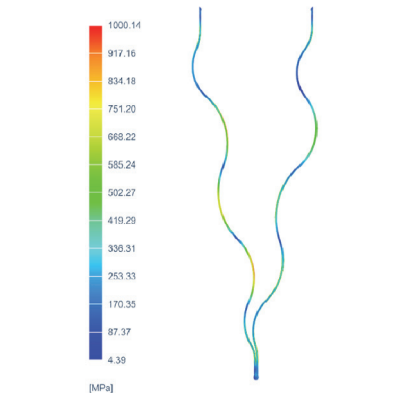


(b) von-Mises stress contour in #2 cell

Fig. 7 Strength analysis results for Case-I



(a) deformation contour



(b) von-Mises stress contour in #2 cell

Fig. 8 Strength analysis results for Case-II

도 결과는 Fig. 7(b)에 나타난 것처럼 접촉부에서 1,022 MPa의 최대응력이 발생하였지만, 재료 항복응력을 만족하는 것으로 나타났다. Case-II의 변형분포도 결과는 Fig. 8(b)에 나타난 것처럼 Contour 내부 영역에서 균일한 접촉방향의 거동이 나타났고, 전체 Contour 형상에서 접촉도 발생하지 않았다. Case-II의 응력분포도 결과는 Fig. 8(b)에 나타난 것처럼 우측 단위 셀 하단부의 반경 부분에서 1,000 MPa의 최대응력이 발생하였으며, 재료 항복응력의 76% 수준 이내로 나타났다. 초기설계와 Case-I과 Case-II의 성능변화 비교 결과는 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 2에 나타난 것처럼 초기설계와 Case-I의 경우 Contour 반경부에서 접촉이 발생하였기 때문에 접촉방향 최소간격이 0.00 mm로 나타난 반면, Case-II의 경우 접촉방향 최소간격이 0.03 mm로 산출되어 접촉이 발생하지 않으면서 벨로우즈 압축성능이 향상된 것으로 나타났다. 또한 최대응력은 초기설계 기준으로 Case-I은 44% 감소하였고, Case-II는 45% 감소하여 응력치는 모두 초기설계보다 개선된 것으로 나타났다. 재료의 허용응력 기준으로 Case-I과 Case-II의 안전율은 1.49와 1.52로 각각 산정되었다. Case-I의 응력치가 개선된 것으로 나타났지만, 접촉발생이 벨로우즈의 불균일한 압축작동을 유발하게 되어 압축기의 성능저하의 원인이 될 수 있다. 이와같이 본 연구에서 고려한 수소충전기용 압축기 벨로우즈의

형상설계에서 압축성능과 구조안전성을 향상시키기 위해서는 Contour 반경 크기를 조정하는 것이 적절한 설계방법임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 1,000 bar 이상의 고압충전이 가능하도록 새롭게 개발된 수소충전소기용 압축기 내장 충전탱크의 핵심 부품인 벨로우즈의 최적형상을 도출하기 위해 유한요소해석 기반의 설계 파라미터 연구를 수행하였으며 다음과 같은 주요 결과를 도출하였다.

- 1) 초기설계 상태에 대한 유한요소해석을 수행한 결과, 일부분에서 꺾임 현상 및 부분 접촉이 발생하였으며, 중앙부 단위 셀 상단부에서 재료 항복응력을 20% 초과하는 최대응력이 발생하여 구조 안전성을 보장할 수 없는 것으로 나타났다.
- 2) 초기설계 상태의 개선을 위해 벨로우즈의 형상에 대한 설계 파라미터 분석을 수행하였다. 설계 파라미터 분석을 위한 설계인자는 Contour의 형상을 고려했으며, 성능인자는 최대응력과 접촉방향 간격으로 설정하였다. Contour의 형상에 대한 설계인자는 Contour를 구성하는 Span 간격을 설계인자로 고려한 경우(Case-I)와 반경 크기를 설계인자로 고려하는 경우(Case-II)의 2가지로 고려하였다.
- 3) Case-I과 Case-II의 최대응력은 모두 허용치를 만족하였지만, Case-I에서 Contour 반경부에서 접촉이 발생한 반면, Case-II는 접촉이 발생하지 않으면서 벨로우즈 압축성능이 향상된 것으로 나타났다.
- 4) Case-II의 설계인자를 적용할 경우 초기 설계 대비 재료 항복응력을 만족하면서 최대

Table 2. Comparison of strength performance

Design case	Min. distance <sup>1)</sup> [mm]	Max. stress <sup>2)</sup> [MPa]	Remark
Initial design	0.00	1,834	NG
Case-I	0.00	1,022	NG
Case-II	0.03	1,000	OK

1) allowable range: 0.0 mm < Min. distance ≤ 0.05 mm

2) allowable stress: Max. stress < 1,523 MPa

응력이 45% 감소되었다.

- 5) 본 연구에서 고려한 수소충전기용 압축기 벨로우즈의 형상설계에서 압축성능과 구조안정성을 향상시키기 위해서는 Contour 반경 크기를 조정하는 것이 적절한 설계방법으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제[차세대 고압(1,000기압) 수소압축기 개발, No. 20223030040180], 해양수산부의 재원으로 한국해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제(친환경 선박용 전기추진 시스템 시험평가 및 무탄소연료 선박적용성 실증 기술개발, No. 1525013494/PMS5390), 그리고 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(과제관리번호: 2021RIS-002)의 결과입니다.

## 참고문헌

- [1] C. H. Joe, S. K. Kang, B. S. Kim, and K. S. Lee, "Risk assessment for high capacity multiport hydrogen refueling station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 505-513, (2023).
- [2] 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, pp. 514-525, (2023).
- [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, pp. 255-261, (2023).
- [4] J. T. Back, J. H. Mun, J. H. Min, K. B. Park, K. T. Ki, and S. W. 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, pp. 26-31, (2023).
- [5] J. U. Baek, G. M. Gwak, N. Y. Kim, Y. M. Cho, and S. Ki 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, pp. 28-33, (2022).
- [6] Siemens, "Element Library Reference", Siemens Product Lifecycle Management Software, USA, (2019).
- [7] Siemens, "Multi-step Nonlinear User's Guide", Siemens Product Lifecycle Management Software, USA, (2019).
- [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, pp. 131-140, (2021).
- [10] Siemens, "HEEDS User's Guide", Siemens Product Lifecycle Management Software, USA, (2019).