



수압파열시험 시 시료 탱크 내부 기포 제거를 위한 주입 노즐 및 내부 유속 연구

이예승 · 양현석* · 정우철* · 이동훈** · †공만식*

고등기술연구원 지능기계시스템센터, *고등기술연구원 신소재공정센터,

**한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터

(2022년 9월 21일 접수, 2022년 11월 23일 수정, 2022년 11월 24일 채택)

A Study on Injection Nozzle and Internal Flow Velocity for Removing Air Bubbles inside the Sample Tanks during Hydraulic Rupture Test

Yeseung Lee · Hyunseok Yang* · Woo-Chul Jung* · Dong Hoon Lee** · †Man-Sik
Kong*

AI & Mechanical Center, Institute for Advanced Engineering

**Center for Advanced Materials & Processing, Institute for Advanced Engineering*

***Energy Safety Empirical Research Center, Korea Gas Safety Corporation*

(Received September 21, 2022; Revised November 23, 2022; Accepted November 24, 2022)

요약

사용 압력 범위에서 고압 수소 탱크의 내구성을 검증하기 위해서는 수압 파열 시험이 수행되어야 한다. 그런데 물의 초기 주입 과정에서 물과 공기의 상호작용에 의해 생성된 기포가 탱크 내벽에 부착되어 잔류할 경우, 가압된 탱크가 파열되는 과정에서 기포의 급격한 압력 변화로 인해 큰 충격과 소음이 유발된다. 따라서 본 연구에서는 단순화된 수식을 통하여 탱크 내벽에 잔류하는 기포를 제거하기 위해 필요한 유속을 예측하였으며, 수소 버스용 수소 용기 형상을 기준으로 해당 유속을 유지하기 위한 주입 노즐의 형상을 결정하였다. 또한 입구 압력에 따른 유속 변화를 예측하기 위하여 수치 해석 모델의 개발이 수행되었고, 예측 결과의 타당성을 입증하기 위하여 모형 제작을 통한 실험이 수행되었다. 실험 결과, 탱크 벽면 근처의 유속은 해석모델 예측 값과 유사하게 나타났으며, 입구 압력이 1.5 ~ 5.5 bar 일 경우 제거 가능한 기포의 최소 크기는 약 2.2 ~ 4.6 mm로 예측되었다.

Abstract - In order to verify the durability of the high-pressure hydrogen tank in the operating pressure range, a hydraulic rupture test should be performed. However, if the bubbles generated by the initial injection process of water are attached to the inner wall of the tank and remain, a sudden pressure change of the bubbles during the rupture of the pressurized tank may cause shock and noise. Therefore, in this study, the flow velocity required to remove the bubbles remaining on the inner wall of the tank was predicted through simplified formulas, and the shape of the injection nozzle to maintain the flow velocity was determined based on the shape of the hydrogen tank for the hydrogen bus. In addition, a numerical model was developed to predict the change in flow velocity according to the inlet pressure, and an experiment was performed through a model tank to prove the validity of the prediction result. As a result of the experiment, the flow velocity near the tank wall was similar to the predicted value of the analysis model, and when the inlet pressure was 1.5 to 5.5 bar, the minimum size of the removable bubble was predicted to be about 2.2 to 4.6 mm.

Key words : hydraulic rupture test, injection nozzle, air bubbles, hydrogen tank, numerical analysis

†Corresponding author: mskong@iae.re.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

기후 변화에 의한 피해가 점차 증가함에 따라 대기 중으로의 탄소 배출을 저감하여 지구 온난화 현상을 완화하기 위한 정책적 노력과 기술 개발이 진행 중이다 [1]. 특히 운송 수단과 연관된 기술 분야에서는 전기차, 수소차 등과 같이 탄소 성분이 포함된 배기 가스를 배출하지 않는 차종들의 개발이 적극적으로 이루어지고 있다.

일반적으로 수소는 에너지 밀도가 높고 재충전이 빠르기 때문에 버스, 트럭, 열차 등과 같은 대형 교통 수단에서 배터리 기반의 전동 차량에 비하여 우위를 가진다. 단, 수소가 높은 에너지 밀도를 가지기 위해서는 수소를 약 350 ~ 700 bar의 고압으로 압축하여 저장하여야 하므로 [2] 수소 저장 탱크에는 높은 내구성이 요구되며, 수소 탱크의 개발 과정에서 이러한 내구성을 충분히 검증할 필요성이 있다.

수소 탱크의 내구성을 시험하기 위한 절차에는 수압 파열 시험, 저온 고온 반복 가압 시험, 낙하 시험 등이 포함된다. 여기서 수압 파열 시험이란 수소 탱크 내의 고압의 물을 주입하여 탱크가 견딜 수 있는 압력의 범위를 측정하는 시험이다. 그런데 파열 시험의 초기 준비 과정에서 비어있는 시료 탱크에 물을 주입하게 되면 탱크 내부에 차 있던 공기와 물이 상호작용하여 기포가 생성되며, 때로는 이러한 기포가 벽면에 부착되어 잔류하는 경우가 있다고 알려져 있다. 이러한 상황에서 탱크를 가압할 경우, 수천 기압의 고압으로 가압된 탱크가 파열되는 과정에서 급격한 압력 변화로 인한 기포의 팽창에 의해 큰 충격과 소음이 발생하게 된다 [3-4]. 따라서 탱크의 파열 시험에서 작업자의 안전을 확보하려면 탱크 내부에 기포가 잔류하지 않도록 발생한 기포를 최대한 제거할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 단순화된 수식을 통하여 탱크 내벽에 부착된 기포를 제거하기 위한 유속 조건을 예측하였으며, 수소 버스용 수소 탱크의 형상을 기준으로 하여 해당 유속을 유지하기 위한 노즐의 형상을 결정하였고, 해석과 실험을 통하여 검증하였다.

II. 이론적 배경

벽면에 부착된 기포 주변에 작용하는 힘에는 다양한 종류가 있으며, 이 중에서 유동이 없더라도 기본적으로 작용하는 힘에는 Surface tension force와 Buoyancy force가 있고, 기포를 제거하기 위한 외력으로는 Quasi-steady drag force 등이 있다 [5].

기본적으로 공기는 물보다 가볍기 때문에 물과의 상호작용에 의해 생성된 기포는 부력에 의해 위로 떠

오른다. 이 때 부력을 나타내는 Buoyancy force는 식 (1)과 같다.

$$F_b = (\rho_l - \rho_v) V_b g \quad (1)$$

또한 벽면에 부착된 기포에 외력이 작용하면, 외력이 일정한 크기에 도달하기 전까지는 표면 장력에 의한 반력이 형성되어 기포가 벽면에 부착되어 있는 상태를 유지한다. 이러한 Surface tension force의 최대 크기는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$F_{sy} \approx -1.25 d_w \sigma \frac{\pi(\theta_a - \theta_r)}{\pi^2(\theta_a - \theta_r)^2} (\sin(\theta_a) + \sin(\theta_r)) \quad (2)$$

이 때 d_w 는 Contact circle diameter 라고 하며, θ_a 와 θ_r 은 Contact angle 이라고 한다. 각각의 변수에 대한 정보는 Fig. 1에 도시되어 있다.

벽면에 부착된 기포가 부력에 의해 떠오르지 않기 위해서는 반력의 최대값인 F_{sy} 가 부력인 F_b 보다 커야 한다. 그러므로 단순화된 수식을 통해 벽면에 부착되는 기포의 크기를 추정할 수 있다.

기포의 지름을 R 이라 하면, 기포가 벽면에 반구형으로 부착되어 있다고 가정할 경우 d_w 는 $2R$ 과 같다. 그리고 Contact angle은 벽면의 재질, 거칠기, 온도, 표면 장력 등 다양한 조건에 영향을 받는데, 본 연구의 대상과 관련된 참고 자료가 부족하므로 Kandlikar 등 [6]의 연구를 참고하면 상온의 구리판에서 Contact angle은 표면 거칠기에 따라 θ_a 는 $20 \sim 40^\circ$, θ_r 는 $40 \sim 100^\circ$ 로 변화한다. 이때 θ_a 와 θ_r 을 각각의 범위에서 평균값을 사용하여 계산하면 F_{sy} 가 F_b 보다 커지는 기포의 지름은 약 4.8 mm라고 추정할 수 있다. 따라서 계산 과정에서의 오차를 감안한다면 유동이 없거나 매우 느린 환경에서 약 5 mm이하의 크기를 가지는 기포

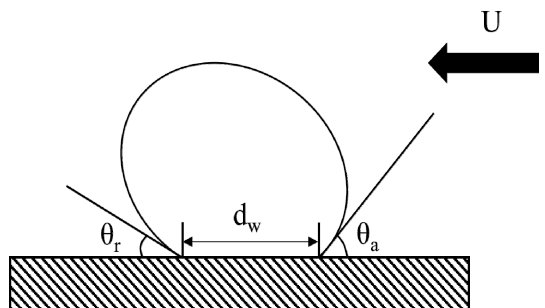


Fig. 1. Air bubble attached to the wall.

가 생성될 경우 벽면에 부착되어 부상하지 않을 가능성이 있다는 것을 예측할 수 있다.

그리고 벽면에 부착된 기포가 물의 유동에 의해 받는 항력은 다음의 식과 같이 계산된다.

$$F_{qs} = (1/2)C_D\rho_l U^2 \pi R^2 \quad (3)$$

여기서 C_D 는 기포의 레이놀즈 수 Re_b 와 연관된 식으로 아래와 같이 나타낼 수 있다 [7].

$$C_D = \frac{16}{Re_b}(1+0.15Re_b^{0.5}) \quad (4)$$

따라서 벽면 근처에 유동을 형성하여 부착된 기포를 제거하기 위해서는 기포의 부력과 유동에 의한 외력의 합력이 F_{sy} 보다 커야한다는 것을 알 수 있다.

III. 주입 노즐의 형상

물의 주입 과정에서 생성된 기포는 다양한 위치에 부착될 수 있기 때문에 시료 탱크 벽면에 부착된 기포를 안정적으로 제거하기 위해서는 탱크의 벽면 전반적으로 빠른 유속이 형성되도록 내부의 유동 패턴을

유도할 필요가 있다. 그런데, 벽면 근처에서의 유속을 빠르게 만드는 대표적인 방법은 탱크 내부의 유동을 회전시키는 것이므로 탱크에 물이 주입되면서 회전할 수 있도록 주입 노즐의 위치와 파이프의 형상을 결정하였다.

Fig. 2는 결정된 주입 노즐의 배치와 탱크의 형상을 나타낸다. 본 연구에 사용된 수소 탱크는 수소 버스에 장착되기 위한 규모로 설계되어 있으며, 유체의 주입구와 유출구가 모두 탱크의 상부에 장착되어 있다. 따라서 탱크의 벽면 전반적으로 회전 유동을 형성시키기 위하여 주입 노즐이 탱크의 하부에 위치하도록 물의 주입 도관을 연장하였고, 물의 회전을 유발할 수 있도록 주입 노즐이 탱크 벽면의 접선 방향을 향하게 배치하였다. 또한 노즐을 중심선으로부터 약 14.4 mm 만큼 후퇴시킴으로써 물이 주입되자마자 벽면에 부딪히지 않도록 하여 주입된 물의 운동량 손실을 완화하였다. Fig. 2에 제시된 형상에 대한 자세한 치수 정보는 Table 1에 정리하였다.

IV. 수치 해석을 통한 분석

설계된 주입 노즐이 실제로 회전 유동을 발생시키는지 파악하고 입구 압력에 따른 벽면 근처 유속의 변화를 분석하기 위하여 수치해석을 통한 분석이 수행되었다.

4.1. 해석 모델의 형상

Fig. 3는 수치 해석을 위한 단순화의 목적으로 Fig. 2의 형상에서 유동 영역만을 추출한 뒤 격자를 작성한 것이다. 탱크의 해석 모델은 모두 사면체 격자로 구성되어 있으며, 총 격자 수는 872만 개이고 평균 Quality는 약 0.77 이다.

4.2. 지배방정식 및 경계 조건

수치해석에는 ANSYS Fluent v21.2 상용 소프트웨어를 사용하였으며 연속 방정식, 운동량 방정식과 함께

Table 1. Dimension of the Hydrogen Tank

Symbol	L_T	L_{p1}	L_{p2}	L_{p3}	L_{p4}	D_t	Unit
Value	1,850	900	600	175	14.4	376	mm

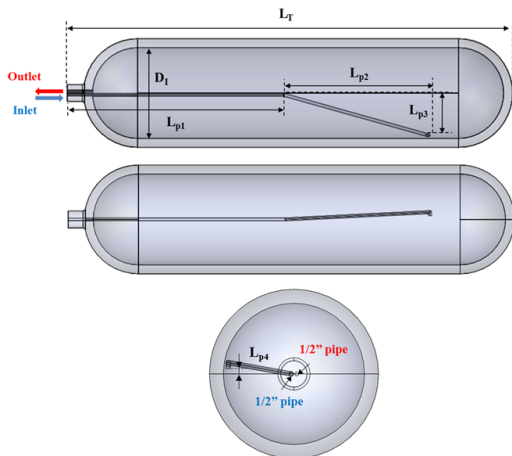


Fig. 2. Geometry of the Hydrogen Tank.

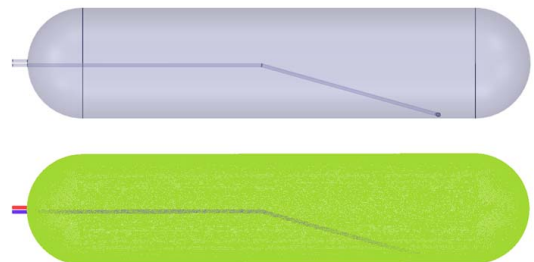


Fig. 3. Numerical Analysis Domain.

Table 2. Boundary Conditions

Boundary	Condition		Value	Unit
Inlet	Pressure Inlet	Gauge Pressure	1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5	bar
Outlet	Pressure Outlet	Gauge Pressure	0	bar
Wall	Stationary Wall	-	-	-

Table 3. Properties of Water

Properties	Value	Unit
Density	998.2	kg/m ³
Viscosity	0.001	kg/m-s

Shear Stress Transport 난류 모델을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 경계 조건은 Table 2에 제시되어 있으며, 유체의 물성은 Table 3에 기재하였고, 해석 대상 유체인 물은 비압축성으로 가정하여 밀도를 998.2 kg/m³로 고정하였다. 압력에 의한 유속 변화를 관찰하기 위하여 입구 압력 조건은 1.5 ~ 5.5 bar의 범위를 5가지 구간으로 나누었으며, 출구 조건은 대기압과 같은 0 bar로 지정하였다. bar는 대기압과 유사한 단위로 100,000 Pa에 해당한다.

4.3. 해석 결과

입구 전압 (Total Pressure) 변화에 따른 탱크 내부 유속 분포는 Fig. 4와 같다. 여기서 탱크 벽면의 유속이 중심부보다 현저하게 빠른 것을 확인할 수 있으며, 이는 실제 의도와 같이 강한 회전 유동이 형성된다는 것을 의미한다. 이러한 회전 유동의 유속은 입구 압력이 증가할수록 증가하며, 또한 입구 압력이 낮을 때는 벽면 근처에서만 회전 유동이 주로 나타나지만 입구 압력이 높아질수록 점차 중심과 가까운 부분까지도 강하게 회전하는 것을 확인할 수 있다. 노즐에 의해 탱크의 하부에서부터 형성된 회전 유동은 상부로 갈수록 마찰 등에 의하여 운동량이 소실됨에 따라 점차 느려지며, 이러한 상부와 하부의 유속 차이는 입구 압력이 증가하여도 감소하지 않는다.

탱크 벽면에서의 유속을 수치적으로 나타낼 경우 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 X축은 벽면의 높이를 나타내고, Y축은 해당 지점에서의 유속을 나타내며, 입구 압력별로 높이에 따른 유속 변화가 도시되어 있다. 그래

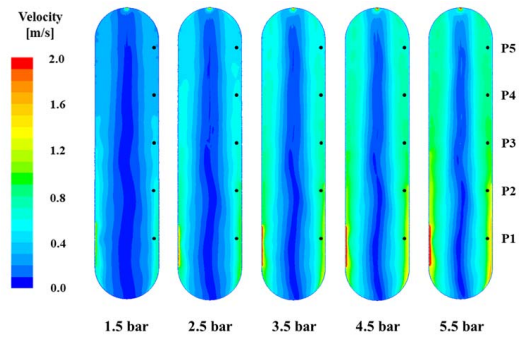


Fig. 4. Variation of flow velocity near the wall by inlet total pressure.

프에 도시된 유속은 회전 유동의 세기를 알기 위하여 벽면의 접선 방향 속도 성분을 나타낸 것이지만, 벽면 근처의 유동은 강한 회전을 하고 있으므로 접선 방향 속도 성분과 전체적인 속도의 크기 차이가 0.01 m/s 내외로 거의 차이가 없다. 유속의 측정 위치는 높이의 경우 탱크의 중심과 가까운 0.95 m를 기준으로 위아래로 각각 0.28 m 씩의 간격을 두어 5개의 지점을 정하였으며, 수평으로는 5개의 지점 모두가 탱크의 벽면으로부터 약 30 mm 떨어진 곳에 위치하도록 하였다. 이러한 유속 측정 위치는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 낮은 높이의 측정 위치부터 차례대로 P1 ~ P5라 명명하였다.

Fig. 5의 그래프에 따르면 주입 노즐의 위치와 가까운 P1과 P2 사이에서는 유속의 변화가 크게 나타나지 않으며, 특히 입구 압력이 높을수록 유속의 변화량이 더 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 P3부터는 모든 입구 압력 조건에서 유속이 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 입구 압력이 낮을수록 유속이 선형에 가깝게 감소하는 경향을 보이고, 입구 압력이 높을수록 P2와 P3 사이에서 더 큰 기울기의 유속 변화가 관찰된다. 그리고 P1 지점과 P5 지점에서의 유속은 입구 압력이 높아질수록 그 차이가 더 증가한다.

이처럼 탱크의 상부와 하부간의 유속차가 입구 압력의 크기를 불문하고 존재하기 때문에 유속이 가장 낮은 탱크 상부 P5 지점에서의 유속을 기준으로 기포의 제거능력을 평가하여야 한다. Fig. 6은 P5 지점에서의 유속을 입구 압력별로 나타낸 것이다. 구체적으로 입구 압력이 1.5 bar 일 경우 유속은 0.52 m/s 이며, 5.5 bar 일 경우 유속은 1.12 m/s 이다.

앞서 살펴본 바와 같이 탱크 내부 유동이 회전할 경우 벽면 근처에서는 탱크 상부 방향의 속도 성분에 비해 접선 방향의 속도 성분이 지배적이다. 따라서 벽면에 부착된 기포가 받는 힘은 크게 탱크의 상부 방향으

로 작용하는 부력과, 접선 방향으로 작용하는 외력과, 회전 유동의 중심부와 외곽의 압력차에 의해 반경 방향으로 작용하는 구심력 등으로 나눌 수 있다. 이 때 기포의 크기가 유동의 압력 구배에 비해 매우 작으므로 구심력을 무시한다면 접선 방향의 외력과 상부 방향의 부력의 합력이 표면 장력보다 클 경우 기포가 제거된다고 추정할 수 있다.

따라서 상기의 유동 해석 결과를 바탕으로 제거 가능한 기포의 최소 크기를 추산하여 보면 입구 압력이 1.5 bar 일 경우 약 4.6 mm 이며, 5.5 bar 일 경우 약 2.2 mm 로 계산되었다. 이 때 탱크의 내압 변화로 인한 기포의 크기 변화는 무시하였다.

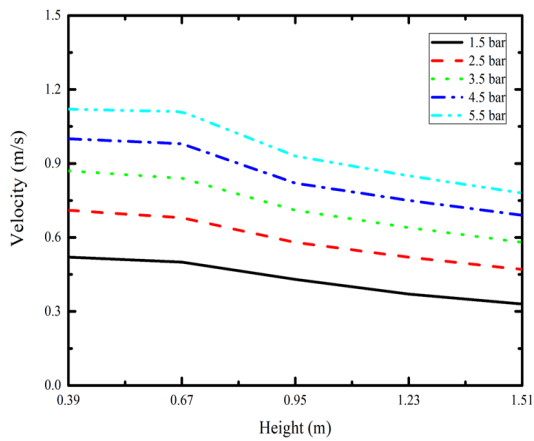


Fig. 5. Variation of flow velocity near the wall by inlet total pressure.

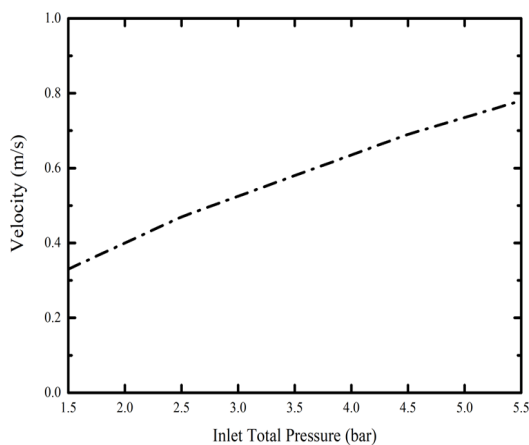


Fig. 6. Variation of flow velocity at P5 by inlet total pressure.

V. 실험을 통한 검증

5.1. 실험 방법 및 절차

수치 해석을 통한 내부 유속 예측 결과를 검증하기 위해 Fig. 7과 같이 아크릴 재질의 검증용 탱크 모형을 제작하였으며, 해석 모델의 P1 ~ P5 위치에 따라 유속 센서를 장착하기 위한 소켓을 가공하였다. Fig. 7은 제작에 사용된 탱크의 도면과 제작이 완료된 아크릴 탱크를 나타낸다. 물의 주입구 도관은 1/2인치 직경의 STS 316L 소재를 사용하였으며, 탱크 하부에 위치한 노즐은 탱크 벽면의 접선 방향을 향하게 배치하였다. 출구 도관은 주입구 도관과 동일한 직경의 소재를 사용하였다. 해석 모델의 검증은 물 입구 압력이 5.5 bar 일 경우의 측정값을 사용하여 비교하였으며, 탱크 내부의 유속은 Hontzsch GmbH의 flowtherm NT,2 풍차형(Vane wheel) 유속 센서를 이용하여 측정하였다. 사용된 유속센서는 유속의 흐름이 발생할 때 풍차의 회전속도가 전기적 신호로 변환되어 측정되며, $\pm 0.3\%$ 의 측정 오차율을 가지고 있다. 탱크 내 물의 회전 유속을 측정할 수 있도록 센서가 벽면의 접선방향을 향하도록 수직으로 삽입되었으며, 출구 도관에서 물이 배출되기 시작한 지 3분이 지난 시점을 기준으로 1분간 유지하면서 60개의 유속 데이터를 평균값으로 나타내었다. 이때 유속 센서 본체에 저장된 계측 데이터는 제조사가 제공한 소프트웨어를 활용하여 확인하였다.

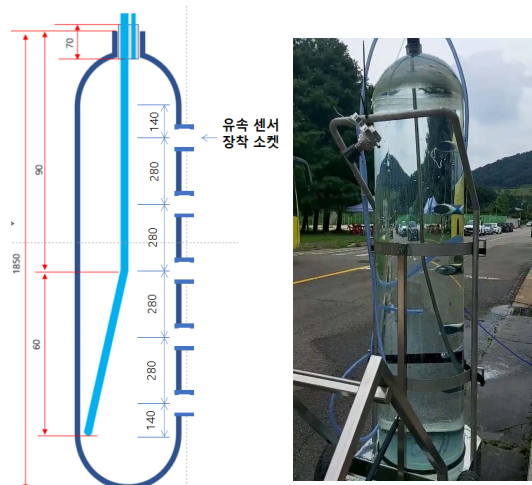


Fig. 7. Schematic diagram and experimental image of hydrogen tank analysis and verification

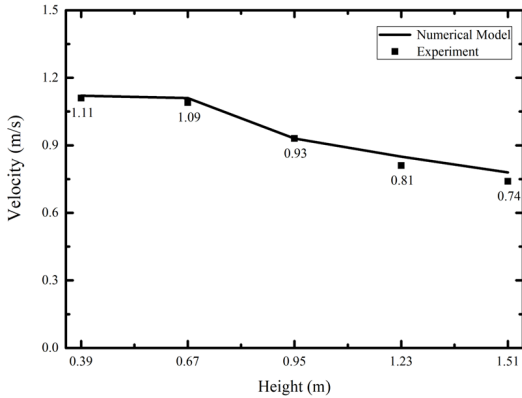


Fig. 8. Variation of flow velocity at P5 by inlet total pressure.

5.2. 실험 결과

Fig. 8은 입구 압력이 5.5 bar 일 경우에 대하여 실험을 통해 측정된 높이별 유속과 수치 해석을 통해 계산된 높이별 유속을 비교한 것이다. 해당 그래프를 통하여 해석 모델이 실제 유속을 잘 예측한다는 것을 확인할 수 있으며, 특히 P1 ~ P3 에 해당하는 높이에서 더 유사한 결과를 보인다.

또한 수동 레플레이터를 사용하여 입구 압력을 감소시키며 관찰한 결과, 약 1 ~ 2 bar에 해당하는 낮은 압력에서도 탱크 내부에 일정한 회전유동이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 설계된 노즐이 탱크 내벽 근처에서 빠른 유속을 갖는 회전 유동을 형성할 수 있음을 실험을 통하여서도 검증하였다.

VI. 결론

탱크의 파열 시험 과정에서 소음 및 충격을 유발하는 기포의 제거를 위하여 주입되는 물을 벽면 근처에서 회전시키기 위한 주입 노즐의 설계가 진행되었으며, 입구 압력에 따른 유속을 파악하고 제거 가능한 기포의 크기를 예측하기 위하여 수치 해석 모델의 개발이 수행되었다. 또한 실제 물의 회전이 발생하는지 검증하고 해석 모델을 통한 예측 결과의 타당성을 입증하기 위하여 모형 제작을 통한 실험이 수행되었다. 실험 결과 노즐은 설계 의도대로 탱크의 벽면 전체적으로 회전 유동을 형성하였으며, 벽면 유속이 해석 모델에서 예측되었던 값과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 수치 해석 결과에 따르면 1.5 bar ~ 5.5 bar 까지 입구 압력을 변화 시킬 경우 가장 유속이 낮은 상부의 벽면 유속이 0.52 ~ 1.12 m/s로 나타났으며, 이는 각각 4.6 mm ~ 2.2 mm의 크기의 크기를 가지

는 기포를 제거할 수 있을 것으로 예측된다. 또한 본 연구에서 실험을 통하여 수치 모델의 예측 결과가 검증되었으므로 향후 수치 해석을 통해 더 다양한 입구 압력 조건에서의 유속을 예측하여 기포 제거 능력을 평가하는 것이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 22HBST-C158 067-03)

사용기호

- C_D : Drag Coefficient
- d_w : Contact Circle Diameter [m]
- F_b : Buoyancy Force [N]
- F_{sy} : Surface Tension Force [N]
- g : Gravitational Acceleration [m/s^2]
- R : Radius of Bubble [m]
- Re_b : Bubble Reynolds Number
- U : Flow Velocity [m/s]
- V_b : Volume of Bubble [m^3]

그리스 문자

- θ_a : Advancing Contact Angle
- θ_r : Receding Contact Angle
- ρ_l : Liquid Density [kg/m^3]
- ρ_v : Gas Density [kg/m^3]
- σ : Surface Tension [N/m]

REFERENCES

- [1] Desantes, J. M., Molina, S., Novella, R., and Lopez-Juarez, M., "Comparative global warming impact and NOX emissions of conventional and hydrogen automotive propulsion systems". *Energy Conversion and Management*, 221(113137), 1-9, (2020)
- [2] de Miguel, N., Acosta, B., Baraldi, D., Melideo, R., Cebolla, R. O., and Moretto, P., "The role of initial tank temperature on refuelling of on-board hydrogen tanks". *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(20), 8606-8615, (2016).
- [3] Ohl SW, Klaseboer E, Khoo BC. "Bubbles with shock waves and ultrasound: a review". *Interface*

Focus. 5(5) :20150019, (2015)

- [4] Xiaobin Y., Cheng L., Decheng W., and Changhong H., “ Numerical study of the shock wave and pressure induced by single bubble collapse near planar solid wall” *Physics of Fluids.*, 33, 073311, (2021)
- [5] Chen, D., Pan, L. M., and Ren, S., “Prediction of bubble detachment diameter in flow boiling based on force analysis”, *Nuclear engineering and design*, 243, 263-271, (2012)
- [6] Kandlikar, S. G., and Steinke, M. E., “Contact angles and interface behavior during rapid evaporation of liquid on a heated surface”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(18), 3771-3780, (2002)
- [7] Moore, D. W., “The boundary layer on a spherical gas bubble”. *Journal of Fluid Mechanics*, 16(2), 161-176, (1963)