

환기 초공동 실험을 위한 캐비테이션 터널 기포 포집부 연구

백부근^{1,†} · 박일룡² · 김기섭¹ · 이건철³ · 김민재³ · 김경열¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
동의대학교 조선해양공학과²
국방과학연구소³

Study on Bubble Collecting Section of Cavitation Tunnel for Ventilated Supercavitation Experiments

Bu-Geun Paik^{1,†} · Il-Ryong Park² · Ki-Sup Kim¹ · Kurnchul Lee³ · Min-Jae Kim³ · Kyoung-Youl Kim¹
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering¹
Dong-Eui University²
Agency for Defense Development³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The gas ventilated by supercavitation splits into smaller bubbles and follows the water passage of the cavitation tunnel. The bubbles quickly return to the test section by rather high speed flow, and interrupt the observation of the supercavitation. To secure clear observation in the test section, the bubble collecting section(settling chamber) of large volume is prepared to collect bubbles in the water passage ahead of the test section. The bubble collecting section should provide enough buoyancy effect to the bubbles for proper bubble collecting. However, rather high-speed oncoming flow produces non-uniform velocity distribution and deteriorates buoyancy effect in the bubble collecting section. In the present study, the bubble collecting space and three porous plates are designed and analyzed through numerical methods, and the bubble collecting function is experimentally validated by 1/10-scaled model in terms of the formation of uniformly low velocity distribution in the bubble collecting section.

Keywords : Ventilated supercavitation(환기형 초공동), Bubble collecting(기포 포집), Porous screen(타공판), Laser Doppler velocimetry(레이저 유속계), Shadowgraph technique(그림자 기법)

1. 서론

수중운동체의 초공동(supercavitation) 기술은 수중에서 마찰 저항을 획기적으로 줄이는 방법으로, 캐비테이터(cavitator)에서 발생하는 공동이 수중운동체 전체를 덮어 유체 마찰저항을 획기적으로 줄임으로써 수중에서의 초고속 주행을 가능하게 하는 기술이다. 초공동은 수중에서 고속 주행 시 캐비테이터 주위 압력이 유체의 증기압보다 낮아지면서 자연적으로 발생하는 자연형 초공동(natural supercavitation)과 캐비테이터 후방에서 인위적으로 가스를 분사하여 초공동을 발생시키거나 촉진시키는 환기형 또는 분사형 초공동(ventilated supercavitation)으로 구현할 수 있다. 수중 고속 주행을 구현하는 초공동 수중운동체 개발을

위해서는 초공동 캐비테이터 설계 기술 (Kim, et al., 2013), 고속 상태에서 초공동 운동체의 안정적인 유도 제어를 위한 운동체 유도제어기술 (Kim & Kim, 2015), 수중 고속 장거리 추진을 위한 추진 기술과 같은 요소 기술의 개발이 필요하다.

앞서 언급한 초공동 수중운동체의 성능을 실제 척도에서 검증하는 것이 쉽지 않기 때문에 초기 설계 단계에서 축소 모형에 대한 초공동 시험을 수행하여 그 성능을 확인하거나 설계 안을 개선하는 작업이 바람직하다. 국내에서는 대표적으로 충남대학교 캐비테이션 터널에서 초공동 시험을 수행하여 왔다. 이 터널에서는 자연형 초공동 뿐 만 아니라 환기형 초공동 시험을 수행하여 기초적인 캐비테이터 설계와 함께 환기형 초공동의 특성을 조사하였다 (Kim, et al., 2015). 국외에서는 대표적으로 미국 미네소타 대학교의 SAFL(Saint Anthony Falls Laboratory)이 초공동 시

험을 다년 간 수행하여 초공동 캐비테이터 설계뿐 만 아니라 초공동 운동체에 대한 유도제어기술을 개발하여 초공동 분야에 있어서 앞선 기술을 보유하고 있다 (Kawakami & Arndt, 2011; Escobar, et al., 2014). 국내에서도 모형 실험을 이용한 초공동 운동체의 캐비테이터 설계뿐 만 아니라 유도제어를 위한 기초 기술의 개발이 진행되고 있으며 수중운동체 또는 캐비테이터의 크기 변화에 따른 척도 효과에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다. 아울러 초공동 운동체의 유도제어에 대한 기초 연구를 위해서는 비교적 큰 수중운동체 모형에 대한 환기형 초공동의 형상 변화, 초공동 막힘비에 따른 효과, 초공동 형상에 대한 중력 효과 등을 자세히 조사할 필요가 있다. 그러나 국내에는 SAFL과 대등한 규모의 중형 고속 캐비테이션 터널이 없어 다양한 설계 또는 검증 실험을 수행하기 어려운 실정이다. 아울러 초공동 실험을 원활하게 수행하기 위해서는 터널의 시험부에 설치된 수중체로 고속의 유동이 유입되어야 하고 캐비테이터 후방에서 분사된 공기 기포들이 시험부로 재유입되는 영향을 최소화 하기 위하여 적절한 기포 포집부를 필수적으로 구비해야 한다.

이상과 같은 국내의 초공동 실험 환경을 고려하여 선박해양플랜트연구소에서는 기존의 중형 캐비테이션 터널과는 별도로 중형 고속터널 (Medium-sized High-speed Tunnel)을 설계하여 비교적 큰 규모의 수중체에 대한 실험을 계획하고 있다. 시험부의 제원은 $0.3^H \times 0.3^W \times 3.0^L$ m³으로 계획하였는데 시험부에서의 최고 유속은 될수록 높으면 좋으나 터널의 규모와 건설비용 관점에서 타협이 필요하여 최고 유속을 SAFL 터널과 유사한 20 m/s로 설계하였다. 초공동 실험을 위해서는 고속 유동의 실현뿐 만 아니라 기포들을 효율적으로 포집하는 것이 매우 중요하므로 기포 포집 부의 설계와 검증 작업이 필요하다. 본 연구에서는 기포 포집부의 성능을 설계/해석 또는 검증하기 위하여 수치해석과 모형실험 방법을 이용하였다. 본 논문의 2절에서 기포 포집부 설계 방법에 대하여 기술하였으며 3절과 4절에서는 수치해석방법을 이용한 유동해석, 1/10 축소 모형을 이용한 실험적 검증 방법 및 결과들을 각각 기술하였다.

2. 기포 포집부 설계

중형 고속터널의 구성은 Fig. 1과 같이 시험부(test section), 확장부(diffuser), 엘보우(elbow), 구동부, 관로, 기포 포집부(settling chamber) 등으로 구성되어 있다. 기포 포집부는 시험부 또는 확장부와 달리 큰 부피를 갖도록 설계되었는데 내부에서 저속의 유동을 발생시켜 시험부에서 유출된 후 되돌아 오는 공기 기포들이 충분한 부력을 받도록 하였다. Fig. 2에 나타난 기포 포집 부의 유입부(inlet section)와 유출부(outlet section)를 제외한 평행부(settling chamber)의 단면 형상은 4개의 모서리가 둥글게 처리된 정사각형이며 유동 방향을 따라 평행하게 놓인다. 평행부의 전방에는 ‘ㄱ’자형 엘보우(elbow)와 유입부(inlet)가 존재하는데 엘보우와 평행부 사이의 단면적 차이가 커서 유동이 부드럽게 이동할 수 있도록 유입부의 확장 형상 profile을 설계하였

다. 평행부의 후방에도 평행부와 시험부를 잇는 유출부가 존재하므로 유입부의 형상과 유사하게 노즐부의 형상 profile을 설계하였다.

기포 포집 원리는 비교적 간단하다. 기포 포집부의 평행부 용적을 크게 하여 저속의 유동을 발생시키고 이동하는 기포들에 충분한 부력을 인가하여 시험부 도달 전에 충분한 양의 기포들을 포집하는 것이다. 평행부의 용적을 크게 할수록 그 효과가 크겠으나 주어진 공간적, 비용적 제약을 고려하여 평행부의 길이를 결정하였다. 기포 포집부를 위한 설계인자는 시험부 유속, 평행부 유속, 평행부의 길이와 높이, 평행부 내 기포 진행 시간 및 평행부 내 기포 직경 등으로 구성된다. 주어진 시험부 유속에 대해 시험부 단면과 평행부 단면을 고려하면 평행부에서의 유속을 얻을 수 있다. 평행부에서의 유속과 평행부 길이를 고려하면 평행부 내 기포 진행 시간을 얻을 수 있다. 또한 구형(spherical) 기포 직경 정보를 이용하여 Stokes 법칙에 근거하여 기포의 부상(rising) 속도를 이론적으로 계산할 수 있다 (Lamb, 1994). 기포의 부상 속도와 기포 진행 시간을 이용하면 기포 포집부의 높이에 대해 설계할 수 있다.

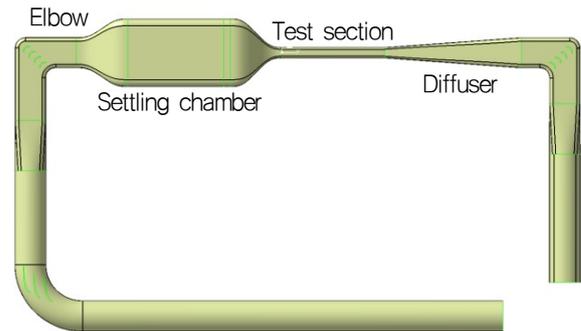


Fig. 1 Surface model of medium-sized high-speed tunnel in KRISO

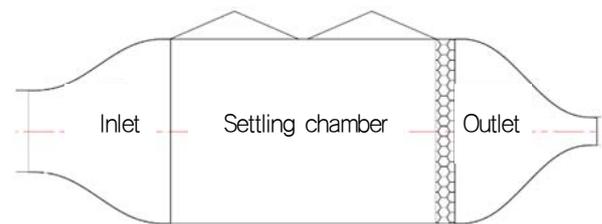


Fig. 2 Bubble collecting section

$$\text{velocity of rising bubble} = \frac{d^2 g \Delta \rho}{18 \mu} \quad (1)$$

식 (1)에서 d는 기포의 직경, g는 중력가속도, $\Delta \rho$ 는 물의 밀도에서 기체의 밀도를 뺀 값이다. 평행부의 단면적을 고려할 경우, 이론적으로는 시험부의 유속이 15 m/s일 때 600 μ m 이상의 직경을 갖는 기포들을 기포 포집부에서 포집할 수 있게 된다. 비

록 15 m/s의 시험부 유속에서 600 μm 이상의 기포들을 포집 가능하더라도 장시간 공기 분사 실험을 수행할 경우 600 μm 이하의 기포들이 계속적으로 늘어나 환기 초공동 실험을 어렵게 할 수 있다. 따라서 적정 시간 환기 초공동 실험을 수행한 후에는 공기 분사를 중단한 후 시험부 유속을 저속으로 운용하면서 충분히 기포들을 포집해야 한다.

기포 포집을 위해서 평행부에서의 유속 분포를 0.5 m/s 이하가 되도록 설계 하였으나 그 유동이 균일하게 형성되어야 부력 효과를 효과적으로 이용 가능하다. 그런데 기포 포집부의 유입부를 유선형으로 잘 설계하였다 할지라도 유입부의 길이가 짧고 단면적의 차이가 크기 때문에 유입부를 통과한 유동이 대용적의 평행부로 유입될 경우 유동이 불안정해 질 가능성이 높다. 본 연구에서는 기포 포집 장치 내에 저속 균일 유동을 형성시키기 위해 Fig. 3과 같이 기포 포집부의 유입부에 3개의 타공판(porous screen)을 배치하여 평행부에서 저속 유동의 균일성을 확보하고자 하였다. 각 타공판은 막음비(solidity) 또는 다공비(porosity)를 가지고 있어 적절한 막음비의 선택을 통하여 평행부 내에서 균일 유동을 구현할 수 있도록 하였다. 각 타공판의 막음비는 3절에서 소개할 수치해석 기법을 이용하여 결정하였으며 타공판이 장착된 기포 포집부의 성능은 4절에서 기술할 축소 터널에 대한 모형 실험을 통하여 실험적으로 검증하였다.

3. 기포 포집부에 대한 수치해석

본 연구에서 고속터널 내 유동은 비압축성 난류유동으로 가정하고 연속방정식(continuity equation)과 RANS방정식(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)을 유동의 지배방정식으로 선택하였다. 터널 내 유동장은 완전 발달된 난류유동으로 가정하고 이를 모델링 하기 위해 2 방정식 SST k-ω 난류모델을 사용하였다.

난류방정식을 포함한 유동의 지배방정식을 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)으로 이산화하여 그 해를 구하였으며, 여기서 범용프로그램 STAR-CCM+를 이용하였다. 본 수치해석에서 유동은 정상상태(steady state)로 가정하여 시간적분항(transient term)은 고려하지 않았으며, 공간에 대한 지배방정식의 이산화기법으로 2차 정확도의 수치 전개 방법을 사용하였다.

난류유동의 경우에서도, 벽면에서는 유동의 속도가 벽면의 이동 속도와 같아야 한다는 no-slip조건이 만족되어야 한다. 본 논문에서는 벽면에 대한 경계조건 처리법으로 STAR-CCM+에서 제공하는 방법 중에서 $y^+ \rightarrow 0$ 인 경우 low y^+ 조건으로 처리하고 격자에 의한 $y^+ > 30$ 인 경우 high y^+ 조건으로 처리하는 방법을 사용하였다.

고속터널의 기포 포집부 내 유동의 균일성을 높이기 위해 설치되는 타공판은 wire 메쉬(mesh) 형태의 스크린(Screen)으로 제작된다. 수치해석에서는 타공판에 의한 압력강하(pressure drop) 계산을 다음과 같이 수치 모델링하여 구할 수 있다. 일반적인 압력강하 ΔP 의 공식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta p = K_o \rho \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2)$$

여기서, K_o 는 손실계수(loss coefficient), \bar{V} 는 타공판을 통과하는 평균유속을 나타낸다. 손실계수 K_o 는 막음비에 근거하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$K_o = f(R_{e_d}) \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} \quad (3)$$

여기서, R_{e_d} 는 wire의 직경 d에 근거한 Reynolds 수를 나타내고, β 는 wire 스크린의 다공비를 나타낸다. 다공비는 Fig. 4와 같이 정의된 wire 메쉬에 대해 아래의 식으로 정의된다.

$$\beta = \left(1 - \frac{d}{M}\right)^2 \quad (4)$$

여기서, M 은 wire 메쉬의 크기를 나타낸다.

식 (3)의 함수 $f(R_{e_d})$ 는 $R_{e_d} < 100$ 인 경우 Reynolds 수에 따라 큰 값의 변화를 보이지만, $R_{e_d} > 100$ 인 경우 0.5값에 수렴한다. Wire 스크린의 직경에 근거한 Reynolds 수가 $R_{e_d} > 100$ 인 유동을 'supercritical flow'라 부른다. 상기와 같이 결정된 압력강하는 운동량방정식의 우변에 체적력으로 다음과 같이 고려된다.

$$f_p = -P \cdot \bar{V} = -(P_v + P_i | \bar{V} |) \cdot \bar{V} \quad (5)$$

여기서, P_v 는 타공판에 의한 점성저항(viscous resistance), P_i 는 관성저항(inertial resistance)을 나타낸다. 본 연구에서는 점성저항에 의한 영향은 무시하고 P_i 값을 스크린이 적층된 두께를 T로 두었을 때 다음과 같이 고려된다.

$$P_i = \frac{\rho K_o}{2T} \quad (6)$$

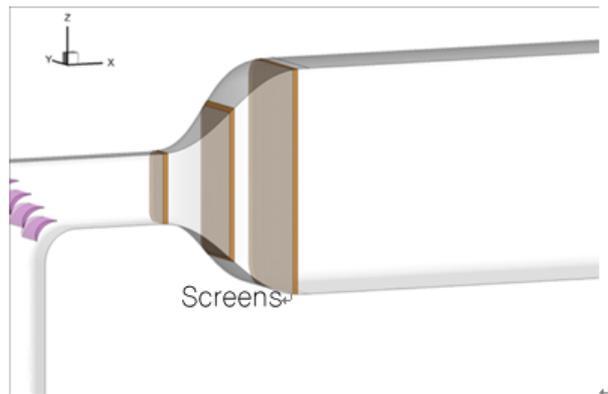


Fig. 3 Triple screen combination in bubble collecting part

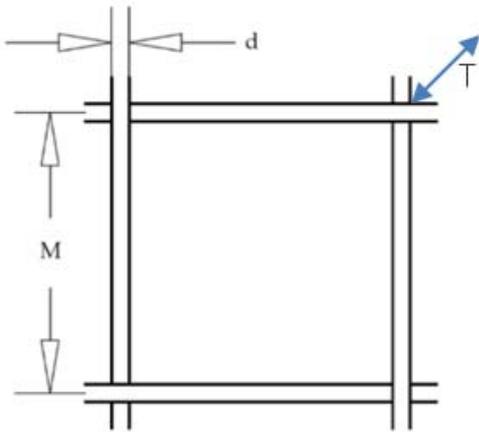


Fig. 4 Definition of wire mesh

고속터널에 대한 수치격자는 Fig. 5와 같으며, 모형시험에 사용된 형상에 대해 유동영역의 반만을 고려하였다. 다만, 수치해석에서는 임펠러의 회전운동은 고려하지 않고 회전성분이 제외된 유량 조건을 부과하였다. 또한, 수치해석에서는 임펠러의 날개는 유동영역에서 제외시켰다. 수치 격자는 Trimmer와 Prizm-layer로 불리는 비정렬격자 생성기법으로 작성하였으며, 격자수는 약 6.5 백만 개다.

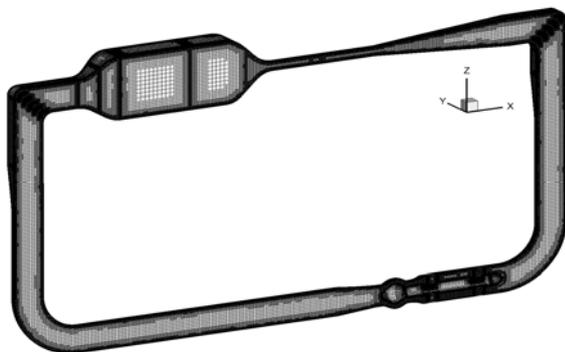
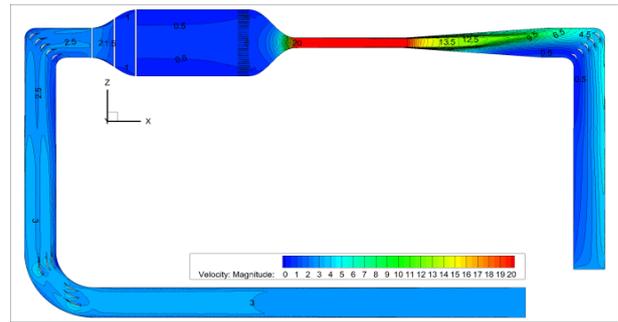


Fig. 5 Numerical grid for high-speed tunnel

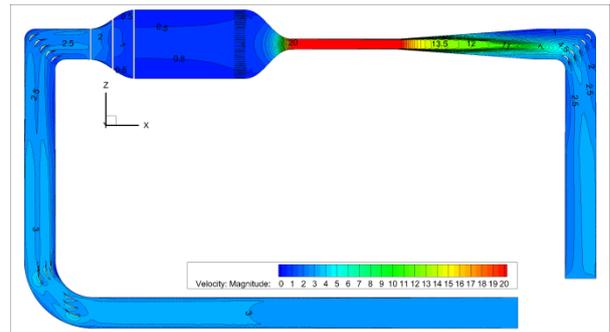
3개 타공판의 막음비를 변화시켜 유동해석을 수행한 후 그 결과를 살펴 보았을 때(Fig. 6), 각 타공판의 막음비가 50%~75%~75% 일 경우 유동의 균일도가 다소 떨어져 확장부에서 수직방향의 유동이 발생하여 유동 박리 가능성이 있고 각 타공판의 막음비를 50%~60%~70%로 변화를 주게 되면 균일도가 증가하여 확장부에서 안정적인 유동 분포가 Fig. 7과 같이 형성된다. 3개 타공판들의 막음비 조합이 50%~60%~70%일 경우 전체 터널의 양정손실(head loss)이 가장 낮게 평가 되어 최종 타공판 막음비 조합을 50%~60%~70%로 결정하였다.

4. 축소 터널 모형에 대한 실험

2절 및 3절에서 설계하고 유동 해석을 수행한 중형 고속터널



screens : 50%~75%~75%



screens : 50%~60%~70%

Fig. 6 Velocity magnitude distribution with the variation of solidity in triple screens

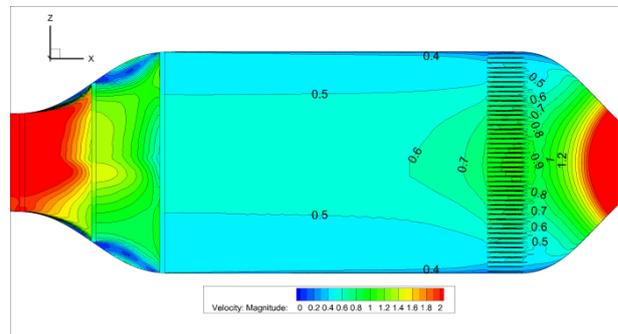


Fig. 7 Velocity magnitude distribution in the bubble collecting system (unit : m/s)

의 기포 포집 장치 성능이 실제 상황에서도 구현이 될 것인가에 대하여 실험적으로 검증하기 위하여 중형 고속터널의 제원을 1/10로 축소된 모형을 Fig. 8과 같이 제작하였다. 축소 모형의 기포 포집 장치 유입부에 타공판을 설치하여 유체 속도의 저속 균일성이 재현되는 지 살펴 보기 위하여 타공판들을 설치 및 교체할 수 있도록 준비하였다. 타공판 조합은 유동이 이동하는 순서에 따라 50%~60%~70%이었다.

축소 모형의 기포 포집부와 시험부에서 유체 속도 조건을 결정하기 위하여 Froude 수 상사(similarity)를 이용하였다. 실제 중형 고속터널에서는 시험부의 유속이 15 m/s일 때 기포 포집부의 평행부 유속이 0.5m/s 이하가 되도록 설계하였기에 Froude 수 상사를 이용한 모형 터널의 기포 포집부 평행부에서의 유속은 0.16 m/s, 시험부의 유속은 4.74 m/s이며 각각의 영역에 대한 기준속도를 U_{ref1} , U_{ref2} 라고 표시 하였다.



Fig. 8 A tenth miniature model of the medium-sized high speed tunnel

기포 포집부와 시험부에서 유속을 계측하기 위하여 단텍 다이너믹스(Dantec Dynamics)사에서 제공한 1차원 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 사용하였다. 또한 자동으로 정교하게 계측 프로브(probe)를 이송할 수 있는 3축 트래버스(traverse)를 이용하였다. 레이저 도플러 유속계는 532nm의 파장을 갖는 2개의 레이저 빔을 프로브로부터 계측지점으로 발생시키는데 이 두 빔이 유체 중 계측 위치에서 교차하여 간섭무늬(interference fringes)를 형성하게 된다. 터널의 관로를 따라 이동하는 유체 중 미세 먼지가 간섭무늬를 지나갈 때 산란광을 발생시킨다. 이 산란광의 파장(또는 주파수)에서는 유체 속도에 따라 미세하게 변화하는 도플러(doppler) 효과가 나타나며 두 개의 레이저 빔을 발생시킨 프로브에서 다시 감지된다. 이렇게 감지한 도플러 신호에 대한 주파수 분석을 통해 유체의 속도를 0.04%(기준 속도 대비)의 불확실성을 가지고 계측하게 된다. 본 연구에서는 각 공간 위치에서 초당 10000개의 도플러 신호를 샘플링(sampling)하여 평균 값을 얻었다. Fig. 9는 레이저 도플러 속도계 시스템과 실제 계측을 수행하고 있는 모습을 보여준다.

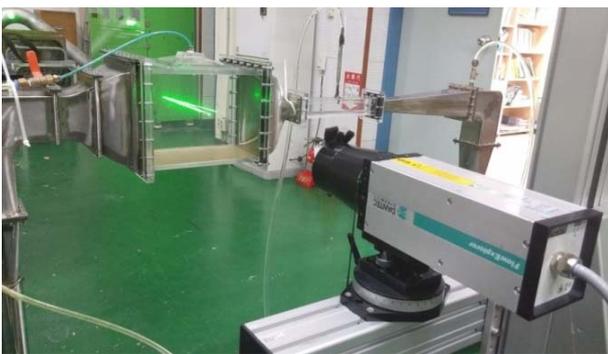
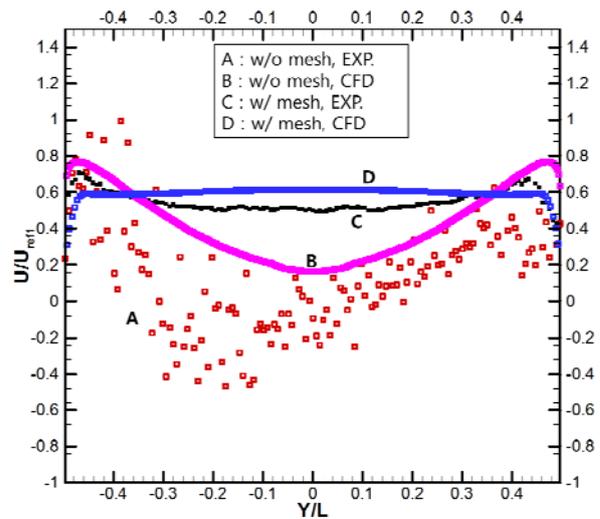


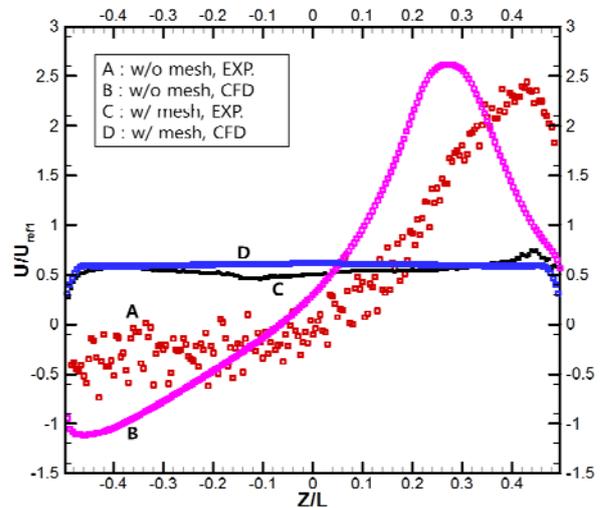
Fig. 9 Velocity measurements by 1-D LDV system

타공판 조합이 있을 경우와 없을 경우, 기포 포집부의 중앙 단면의 중심에서 계측한 주유동 방향 유속 분포 U 를 기포 포집부 중심에서의 주유동 방향 기준속도 U_{ref1} 로 무차원하여 나타낼 수 있다. 사용된 타공판 조합에 대해서 Y-방향(시험부 폭방향)을 따라 U 분포가 기준속도 U_{ref1} 의 50~70% 사이에 존재하여 타공판 조합을 이용한 저속 유동이 잘 형성되었음을 Fig. 10(a)를 통해 알 수 있다. 해당 그림에서 L 은 기포 포집부의 폭을 의미한다.

Z-방향(시험부 높이 방향)을 따라 U 분포를 살펴 보면 타공판 조합이 없을 경우 터널의 관로를 따라 이동하는 유체유동이 원심력을 받아 양의 Z 방향 높이에서 과도한 유속이 발생하고 음의 Z 방향 높이에서는 음의 속도를 갖는 유동이 발생함을 볼 수 있다. 그러나 타공판 조합을 설치할 경우 전 높이 구간에서 기준속도 U_{ref1} 의 50~70% 정도의 균일한 저속 유동이 잘 형성되었음을 알 수 있다. 폭 또는 높이 방향 유속 계측 결과는 수치해석 결과와 그 경향이 유사하게 나타나 각 타공판의 배치에 따른 균일 저속 유동 형성이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.



(a) along Y-direction



(b) along Z-direction

Fig. 10 X-directional velocity measurements by 1-D LDV system

마지막으로 살펴 볼 문제는 기포 포집부가 기포 포집 기능을 잘 발휘하는 지 조사하는 것이다. 모형 실험에서 타공판 조합을 통해 목적하는 균일한 저속의 유동 분포가 기포 포집부 내에 형성되었음을 확인하였기 때문에 기포 포집 성능에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 예상하였다. 기포 포집 실험을 위해서는 먼저, 시험부에서 유입시킬 공기의 양을 적절하게 결정해야 한다.

본 연구에서는 Kim, et al. (2015) 등이 실험하였던 최대 공기 분사계수(entrainment coefficient) ($C_q = Q/(Ud_c^2)$, Q는 공기유량, U는 자유흐름속도, d_c 는 캐비테이터 직경) 0.14 값을 토대로 중형 고속터널의 모형 실험 시 사용할 공기유량을 결정하였다. 실물 고속터널에서 $C_q = 0.14$ 이고 캐비테이터의 직경 $d_c = 35\text{mm}$ 일 경우 약 154 l/min의 공기유량을 캐비테이터 주위에서 분사시켜야 한다. 이 때 분사할 공기 유량은 시험부의 횡단면 면적과 관련이 있으므로 실물 터널 시험부 단면적의 1/100인 축소 모형에서는 시험부에서 약 1.54 l/min의 공기유량을 고려하는 것이 적절하다. 그러나 본 연구에서는 1.54 l/min의 공기유량을 조절하는 것이 쉽지 않아 2 l/min의 공기유량을 사용하였다. Fig. 11은 축소모형의 시험부에서 결정된 공기유량을 분사하는 모습을 보여준다.

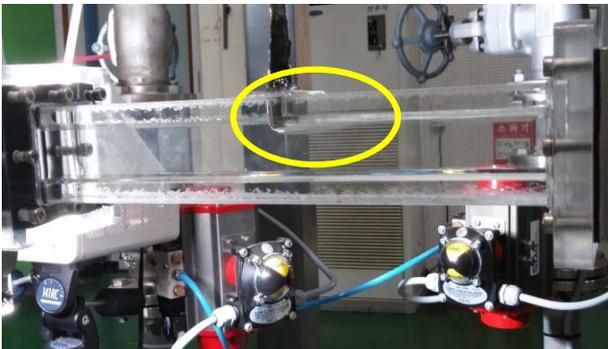


Fig. 11 Ventilation of air flow at the test section

기포 포집 장치 및 시험부에서의 기포에 의한 공극률(void fraction) α 의 정의는 아래의 식과 같다.

$$a = A_{GAS} / A_{LIQUID} \times 100 (\%) \quad (6)$$

A_{GAS} 및 A_{LIQUID} 는 기포가 차지한 면적과 기포가 없을 경우 액체가 차지한 면적을 의미한다. 기포 크기의 분포와 공극률을 측정하기 위하여 Fig. 12와 같은 그림자 기법 장치를 구성하였다. 광원으로는 백색광 메탈램프, 고속카메라(MINI UX100, Photron), MACRO 180 mm (SIGMA) 렌즈를 사용하였다.

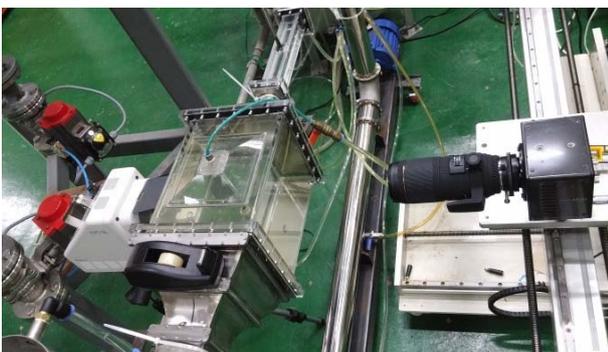


Fig. 12 Shadowgraph set-up for void fraction measurements

이 때 관측면은 기포 포집부의 중앙 횡단면의 중심에 위치시켰고 관측면의 크기는 $12.5 \times 10.0 \text{ mm}^2$ 로 정하였다. 고속카메라의 공간해상도는 $1280 \times 1024 \text{ pixels}$, FPS(frame per second)는 500이었다. 또한 시험부에서의 공극률 및 미세 기포 크기의 분포를 추가로 살펴 보기 위하여 시험부에서도 그림자 기법을 이용하여 미세 기포들을 계측하였다. 그런데 Fig. 11에서 보는 바와 같이 시험부의 중앙에는 공기 유입을 위한 노즐이 돌출되어 있어 그림자 기법을 적용하는 것이 용이하지 않아 상류쪽으로 이동하여 미세 기포들을 계측하였다. 관측면을 시험부의 중앙에서 상류쪽으로 0.25Lt (Lt = 시험부 길이)만큼 이동하였고 관측면의 크기는 $12.5 \times 2.4 \text{ mm}^2$, 카메라의 공간해상도는 $1280 \times 248 \text{ pixels}$, FPS는 20000로 결정하였다. Fig. 13은 기포 포집부와 시험부에서 각각 촬영한 미세 기포 영상에서 배경 노이즈들을 제거한 후의 영상을 보인다.



Fig. 13 Typical bubble image captured at each measurement plane

Fig. 14를 보면 시험부에서 공기유량 2 l/min으로 공기를 터널 내로 유입시켰을 경우 잘게 쪼개진 기포들은 하부 관로를 지나 기포 포집부로 유입되며 대응적에 의한 부력 효과를 받아 $600 \mu\text{m}$ 이상의 큰 기포들이 제거된 후 시험부로 이동하였음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 시험부 유속 15 m/s에서 $600 \mu\text{m}$ 이상의 큰 기포들을 기포 포집 장치에서 제거하고자 한 설계 목표와 일치함을 알 수 있다. 또한 기포 포집 장치 중앙에서 샘플링한 공극률 $0.96 \pm 0.08 \%$ 이 중앙부에 균일하게 분포한다고 가정할 때 시험부에서 샘플링한 공극률은 $0.46 \pm 0.03 \%$ 가 되어 공극률이 절반 정도로 감소됨을 확인할 수 있다.

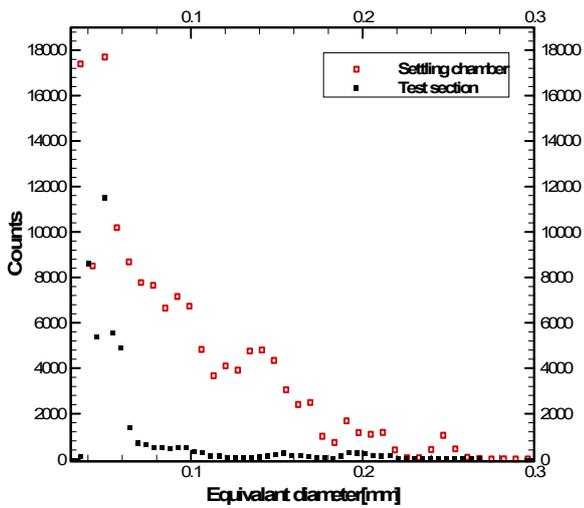


Fig. 14 Equivalent diameter distribution of 1000 images captured at each measurement plane ($Q = 2 \text{ l/min}$)

5. 결론

본 연구에서는 환기형(분사형) 초공동 실험을 위한 중형 고속 터널의 기포 포집부를 설계하였고 터널의 시험부에서 초공동 현상을 관찰할 수 있는 기포 포집 성능을 수치해석적, 실험적으로 검증 하였다. 수치해석 기법을 이용하여 기포 포집부의 유입부에 설치할 타공판 조합의 막음비를 결정하였고 저속의 균일 유동이 기포 포집부에 형성되도록 하였다. 1/10 축소 모형에 대한 실험을 통해 wire 메쉬를 이용한 타공판 조합이 기포 포집부 내에서 저속 유동을 잘 형성시킴을 확인하였다. 기포 포집부에서 직경이 $600 \mu\text{m}$ 이상인 기포들이 잘 제거됨을 그림자 기법을 이용하여 확인하였으며 시험부에서 기포에 의한 공극률이 기포 포집부에 비해 50% 이상 감소됨을 검증하였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 및 방위사업청의 민군기술협력사업 NRF-2014M3C1A9060859 (PNS2600), UM14113RD1 (PNS2670) 및 PES2110 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

References

Escobar, E. Balas, G. & Arndt, R.E.A., 2014. Planing avoidance control for supercavitating vehicles. *American Control Conference*, Portland, OR, USA, 4-6 June.

Kawakami, E. & Arndt, R.E.A., 2011. Investigation of the Behavior of Ventilated Supercavities. *Journal of Fluids Engineering*, 133(9), pp.091305.

Kim, B.J. Choi, J.G. & Kim, H.T., 2015. An Experimental Study on Ventilated Supercavitation of the Disk Cavitator. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(3), pp.236-247.

Kim, J.H. Jang, H.G. Ahn, B.K. & Lee, C.S., 2013. A Numerical Analysis of the Supercavitating Flow around Three-Dimensional Axisymmetric Cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.160-166.

Kim, S.H. & Kim, N.W., 2015. Studies on Ventilation Control for a Ventilated Supercavitating Vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(3), pp.206-221.

Lamb, H., 1994. *Hydrodynamics*. 6th ed. Cambridge University Press: Cambridge.

