Journal of the KIMST, Vol. 21, No. 2, pp. 195-203, 2018
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.2.195

Research Paper 열 · 유체 부문

소결 메쉬를 이용한 원통형 수중운동체 항력 감소 연구

정철민*,1) · 백부근2) · 김경열2) · 정영래1)

1) 국방과학연구소 제6기술연구본부
2) 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

A Study on Drag Reduction of Cylindrical Underwater Body Using Sintered Mesh

Chulmin Jung*,1) · Bugeun Paik2) · Kyungyoul Kim2) · Youngrae Jung1)

1) *The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*
2) *Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KIOST, Korea*

(Received 5 September 2017 / Revised 11 January 2018 / Accepted 9 February 2018)

ABSTRACT

Among the techniques of reducing the drag to increase the speed of underwater moving bodies, we studied on the drag reduction method by gas injection. Researches on gas injection method have been paid much attention to reduce the drag of vessels or pipe inner walls. In this study, we used a sintered metal mesh that can uniformly distribute fine bubbles by gas injection method, and applied it to a cylindrical underwater moving body. Using the KRISO medium-sized cavitation tunnel, we measured both the bubble size on the surface of the sintered mesh and the bubble distribution in the boundary layer. Then, drag reduction tests were performed on the cylinder type underwater moving models with cylindrical or round type tail shape. Experiments were carried out based on the presence or absence of tail jet injection. In the experiments, we changed the gas injection amount using the sintered mesh gas injector, and changed flow rate accordingly. As a result of the test, we observed increased bubbles around the body and confirmed the drag reduction as air injection flow rate increased.

Key Words : Gas Layer Reduction(공기층 저항감소), Bubble Drag Reduction(기포 저항감소), Sintered Mesh(소결 메쉬)

1. 서 론

수중에서 주행하는 수중운동체의 운용성능 향상을 위해서는 마찰항력을 줄이는 것이 필수적으로 요구된다. 마찰항력을 줄이는 기법은 추가적인 에너지 소모가 없는 수동적인 방법과 유동을 인위적으로 변화시켜 저항을 감소시키는 능동적인 방법이 있다. 수동적 마찰저항 감소 방법은 표면의 층류를 최대한 유지하는 것으로 리블렛구조, 거칠기 감소에 의한 방법 등이

* Corresponding author, E-mail: cmjung@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

있고, 능동적인 방법은 진동하는 벽의 설치, 폴리머의 분사, 가스 또는 기포의 흡입 또는 분사 등의 방법이 연구되고 있다.

기포 또는 가스 분사를 이용한 기법은 10 ~ 100 μm 크기의 미세한 공기방울이나 연속적인 공기층을 운동체의 벽면 가까이에 분사하여 운동체 경계층 주변의 난류에 의한 마찰 저항을 감소시키거나 유효점성을 감소시키는 기법으로, 선박이나 파이프라인의 저항 감소를 위해 연구되어 왔다. 이러한 저항 감소 기법은 Fig. 1과 같이 BDR(Bubble Drag Reduction)과 GLDR (Gas Layer Drag Reduction), GCDR(Gas Cavity Drag Reduction) 기법으로 구분할 수 있다. BDR 기법은 경계층 내에 미세기포를 주입하여, 산란된 기포들이 밀도의 감소와 난류 운동량 전달에 영향을 미쳐 저항을 감소시키는 기법으로, 저항감소의 주원인인 유효한 점성의 변화, 밀도 변화, 난류 변화, 운동량 전달의 변화 등에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 대부분의 연구들은 실험실 차원에서 수행되었고 실선에 대해서는 적정 기체 주입량, 최대 가능 저항 감소량, 가스 주입 지점으로부터의 유효 저항 감소 거리, 기포 크기, 해수에서의 적용성, 최적 주입 방법 등에 대해서 추가적으로 연구가 수행되어야 한다[1]. GLDR 기법은 선체와 물 사이에 연속적인 윤활공기층을 형성할 정도로 주입 가스의 양이 많은 기법으로, BDR보다 저항 감소가 크나 가스의 소모량이 많다. Ceccio[2]는 평판에 대해 가스 분사 유량과 저항 감소 효과에 대한 관계를 BDR과 GLDR에 대해 비교 실험하였다. GCDR 기법은 선체와 물 사이에 경계층의 두께보다 훨씬 두꺼운 홈을 기체로 채워 윤활층을 형성함으로써 저항을 감소시키는 기법으로, 선체 하부에 공기로 채울 홈을 형성하여야 하므로 홈의 형상 등에 대한 연구가 수행되고 있다[1].

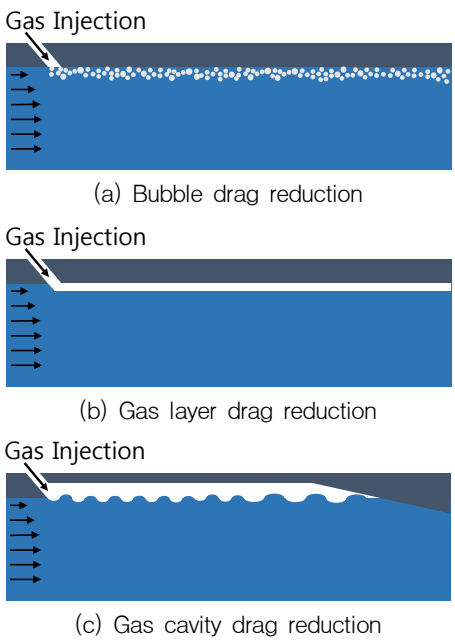


Fig. 1. Three types of frictional drag reduction using gas injection

마찰항력 감소를 위해 McCormick과 Bhattacharyya[3]는 물을 전기분해하여 마이크로 버블을 만들어서 잠겨진 선체의 저항이 줄어듬을 처음으로 보였으며, Marie 등[4]은 물속에 함유된 기체의 국부적 평균 밀도 감소가 레이놀즈 전단응력을 감소시킴을 이론적으로 주장했다. 가스에 의한 저항 감소에 대한 연구는 실험실 차원에서 1980년대와 1990년대에 Madavan 등[5], Merkle과 Deutsch[6], Kato 등[7]에 의해 많은 연구가 이루어졌다[1].

기존의 연구는 선박에 적용하기 위한 평판이나 파이프 라인의 내벽에 관한 연구가 주였으며, 본 연구는 SWATH(Small Waterplane Area Twin Hull) 형태 수상선의 수중체와 어뢰, UUV(Unmanned Underwater Vehicle)와 같은 3차원 원통형 형상의 수중체 외부에 소결메쉬를 적용하여 저항 감소를 연구한 것이다.

본 연구에서는 기포를 발생할 수 있는 소결메쉬를 이용하여 원통형 기포 발생 장치를 제작하고, 공기 공급 및 유량 조절 장치 등의 시험 장치를 구성하여, KRISO(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) 중형 캐비테이션 터널을 이용하여 공기 분사 유량에 따른 저항 감소 특성을 연구하였다.

2. 기포 발생 및 시험 장치 구성

2.1 기포 발생 소결메쉬

기포 발생을 위한 방법으로 본 연구에서는 메쉬형태의 금속판을 소결 처리한 소결메쉬(Sintered Mesh)를 사용하여 기포 발생 장치를 제작하였다. 얇은 금속사를 능첩직(Twilled Dutch Weave) 방식으로 옷감을 짜듯 직조하여 얇은 금속 메쉬판을 제작하고, 기공의 크기가 다른 여러겹의 금속 메쉬판들을 소결 공정과 열처리 공정을 통하여 일체형으로 만들었다. 메쉬의 단면 구조는 Fig. 2와 같이 중심부에 기공의 크기를 결

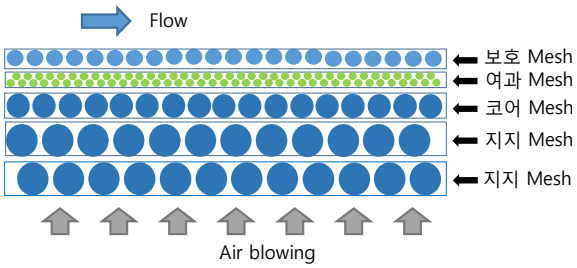


Fig. 2. Structure of sintered mesh



(a) (b)

Fig. 3. (a) Sintered mesh and (b) cylindrical micro bubble injection device

정하는 코어 메쉬가 있고, 이를 중심으로 양옆에 얇은 메쉬를 보호하기 위한 보호 메쉬와 분배 메쉬가 있고, 전체 구조를 지지하기 위한 지지 메쉬가 있다.

소결된 메쉬는 중심부에서 빠져나갈 수 있는 입자의 최소 직경이 수 μm가 되도록 제작 할 수 있고, 본 연구에서는 기공의 크기가 20 μm인 소결메쉬를 적용하였다.

2.2 기포 발생 장치

평판 형태의 소결메쉬 표면은 Fig. 3(a)와 같고, 소결메쉬를 3차원 원통형으로 제작한 기포 발생 장치 형상은 Fig. 3(b)와 같다. 기포 발생 장치는 지름이 0.1 m인 외부 원통 내부에 지름이 0.05 m인 내부 원통으로 구성된 형태로 제작되었다. 내부 원통의 안은 공기 유동을 전달하는 튜브들이 통과할 수 있도록 뚫려있고, 내부와 외부 원통 사이 공간은 공기가 충진될 수 있는 챔버가 된다. 외부에서 유입된 공기는 원통형 챔버에 모여서 소결메쉬 표면으로 분출된다. 챔버로 유입되는 공기 유입구는 90도 간격으로 4개를 설치하였다.

소결메쉬를 이용하여 제작된 기포 발생 장치가 부착된 시험체 모형 형상과 주요 치수는 Fig. 4와 Table 1

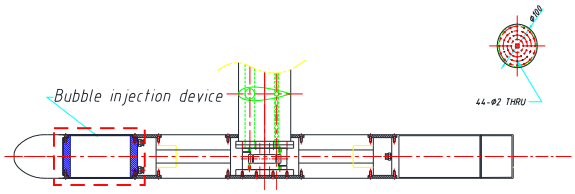


Fig. 4. Shape of the model

Table 1. Dimension of small scale model

Item		Dimension [m]
Body	Length (L)	1.245
	Diameter (d)	0.1
Strut	Shape	NACA0024
	Chord (C)	0.13
Sintered mesh	Length (L_b)	0.15
	Position (from nose)	0.135

과 같다. 선수는 타원형이고, 중앙은 실린더, 선미는 각진 실린더 형상과 라운드 형상 2가지 형상으로 제작되었다. 선미 끝부분 원형판에는 로켓 추진원을 고려하여 후부 제트를 모사할 수 있는 구멍이 뚫려있고, 캐비테이션 터널내 설치를 위해 NACA0024 단면 형상의 스트럿(strut)이 몸체에 부착되어 있다.

2.3 시험 장치 및 시험 방법

원통형 기포 발생 시험체는 스트럿으로 터널 상부에 고정되고, 유동 방향을 따라 나란하게 중형 캐비테이션 터널 시험부 중앙에 설치된다. 시험체의 X-방향(유동방향) 저항을 계측하기 위해 내부에 1방향 분력계를 설치하였다. 스트럿에 의한 영향이 항력 계측에 포함되지 않게 하고 몸체와 스트럿 사이의 간섭을 피하기 위하여 스트럿이 만나는 부위에 약 5 mm 정도의 간극을 형성하였다.

기포 발생 장치에 의한 항력 계측과 기포 거동은 Fig. 5와 같은 KRISO의 중형 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 터널의 시험부 제원은 0.6 × 0.6 × 2.6 m^3 이다. 시험부에서 최대 유속은 12 m/s이며, 시험부 정압은 10.1 kPa에서 202 kPa까지 가변 할 수 있다.

중형 캐비테이션 터널 시험부에 설치된 원통형 기포 발생 시험체와 시험장치 구성은 Fig. 6과 같다. 시험장치는 공기 저장 챔버, 튜브, 유량 조절 장치, 계측

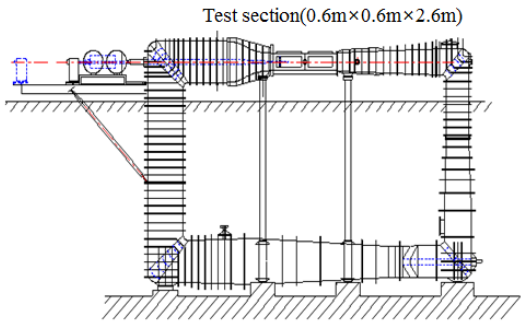


Fig. 5. KRISO's cavitation tunnel

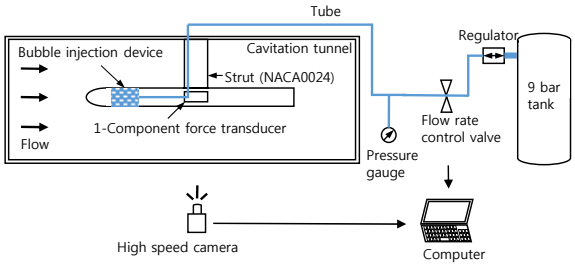


Fig. 6. Experimental setup

장치 등으로 구성된다. 분사 가스는 공기 압축기로 공기 저장 챔버에 압축되어 최대 300 L/min의 유량으로 공급된다. 공기 저장 챔버에 저장된 분사 가스는 유량 조절 밸브로 0 ~ 300 L/min까지 조절되며, 캐비테이션 터널 상부와 스트럿을 관통하는 공기 튜브를 통해 시험체 내부로 공급된다. 유량 조절 밸브 후단의 압력계를 이용하여 각 튜브를 통과하는 공기압을 계측한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정수 중 기포 발생 시험

기포 발생 장치의 기포 발생 성능을 분석하기 위해 정수 중 제작된 기포 발생 장치에 공기를 공급하며 기포를 고속 카메라로 관찰하였다. 보호층의 기공 크기가 100 μm 인 소결메쉬를 적용하였으며, 정수 중 공기 공급에 따른 기포 크기 변화와 거동 관찰 결과는 Fig. 7과 같다. 정수 상태에서 기포 발생 장치에 공기를 공급하면, 메쉬 표면에 작은 기포가 생성되며 일정한 크기의 기포가 되기까지 기포가 성장한다. 기포가 성장하여 기포의 부력이 부착력보다 크게 되면 보호층 표면으로부터 기포가 떨어져 나간다. 정수 중 공기 공급에 의해 소결메쉬 표면에서 떨어져 나가는 기포의 크기는 mm 단위였다.

3.2 유속 변화에 따른 기포 발생 시험

기포 발생 장치를 KRISO 중형 캐비테이션 터널에 설치하고 유속을 1 m/s ~ 3 m/s로 변화시키며 기포 크기를 측정하였다. Fig. 8은 유속 1 m/s 일 때 소결메쉬 표면의 기포를 고속 카메라로 촬영한 영상이다.

유속 변화에 따라 소결메쉬 표면에 발생하는 기포의 크기는 유속이 1 m/s 일 때 800 μm, 2 m/s 일 때 500 μm, 3 m/s 일 때 200 μm로 유속이 증가함에 따라 감소하였다.

기포의 크기가 작으면 기포에 작용하는 부력이 작아지므로 원통형 수중운동체의 경계층 내에 머무는 시간이 길어질 것으로 예상된다.

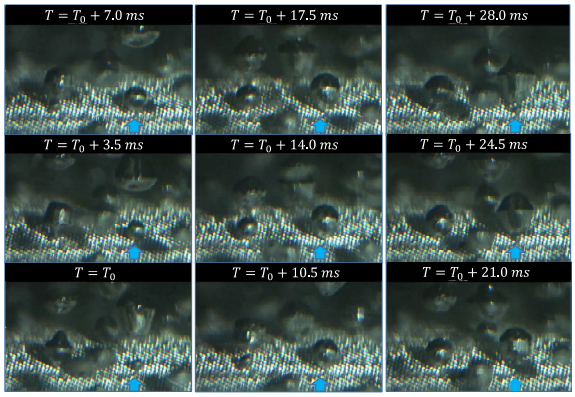


Fig. 7. Growth and separation of bubbles formed on sintered mesh surface

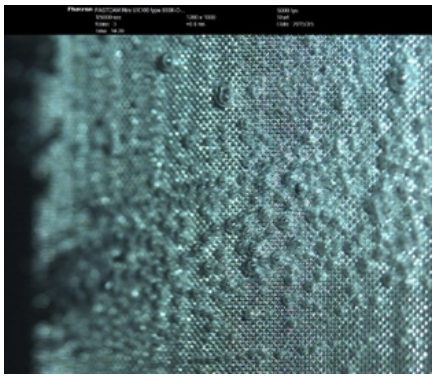


Fig. 8. Bubbles formed on the sintered mesh surface (flow velocity : 1 m/s)

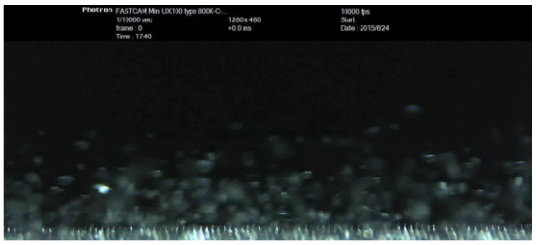


Fig. 9. Distribution of bubbles around surface of micro bubble generator(flow velocity 3 m/s, injection flow rate 30 L/min)

소결메쉬 내부는 다공성 매체로 이루어져 있기에 외부에서 소결메쉬로 공기를 유입시키면 소결메쉬 표면에서 발생되는 기포들은 공기 유량에 의한 수직방향 유동 성분을 가지고 유체 내로 유입된다. 그런데 유체는 주유동과 소결메쉬 사이에 경계층을 형성시키고 주유동 방향 유속이 증가할수록 기포가 경계층 내에 존재할 가능성이 높아진다. 기포가 경계층 내에 존재하는 비율인 공극률(void fraction)에 대해 Hasan 등[8]과 Paik 등[9]에 의하면 2차원 또는 3차원 공극률이 3 % 이상이 되어야 기포에 의한 마찰항력 효과가 나타난다. Fig. 9는 유속이 3 m/s이고 분사유량이 30 L/min일 때, 기포 발생장치 주위의 유동을 초당 1000 프레임의 고속 카메라로 촬영한 영상이다. 기포의 경계층 내 분포를 살펴보면, 유속이 3 m/s 경우 등가의 평판으로 가정하였을 때, 경계층 두께는 11 mm로 계산되고, 관찰 영상에서 기포의 분포는 경계층 내에 존재하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 경계층 내에 혼합된 기포가 마찰저항을 감소시키는 작용을 하는 것으로 기대된다[10,11].

3.3 실린더형 후부 형상 모형에 대한 시험

실린더형 후부 형상을 가진 모형을 KRISO 중형 캐비테이션 터널에 Fig. 10과 같이 설치하고 유속 8 m/s에서 기포 발생 장치에 공급되는 유량을 0 ~ 300 L/min으로 변화시키며 운동체 주위의 기포 분포 및 저항 시험을 하였다.

Fig. 11은 유속 8 m/s에서 분사 유량을 변화 시키며, 수중운동체 주위의 기포 분포 상태를 고속 카메라로 촬영한 결과이다. 유량 50 L/min 일 때 선수부 기포 분사 장치에서 분사된 기포는 상부와 하부에 분포하고 중앙부는 분포량이 적으며, 위쪽이 아래쪽에 비해 기포 분포가 많은 것을 알 수 있다. 이는 정수압에 의

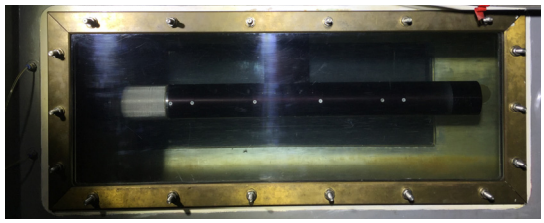
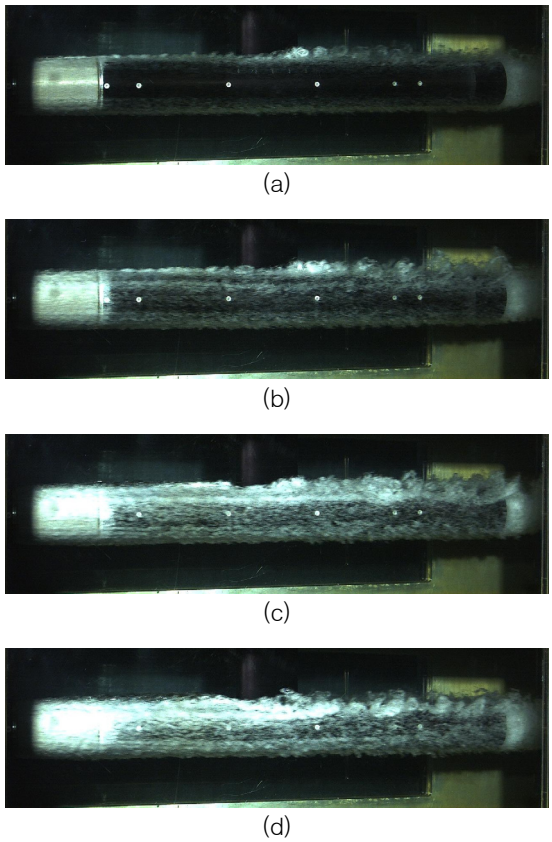


Fig. 10. Model installed in KRISO's cavitation tunnel



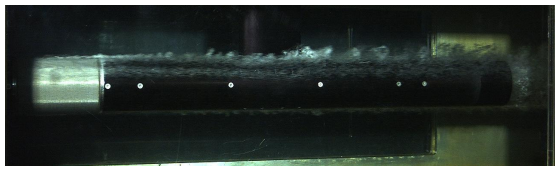
(a) (b) (c) (d)

Fig. 11. Distribution of bubbles around body surface with a cylindrical tail(flow velocity 8 m/s, injection flow rate (a) 50 L/min, (b) 100 L/min, (c) 200 L/min, (d) 300 L/min)

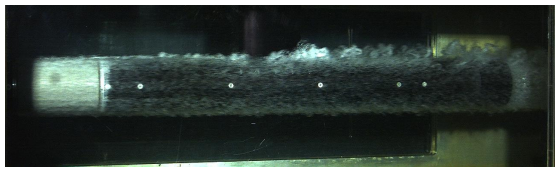
해 위쪽과 아래쪽의 압력차가 발생하여 압력이 낮은 쪽으로 기포가 조금 더 많이 분사되는 것으로 판단된다. 선수부 위쪽에서 분사된 기포는 몸체를 따라 뒤쪽으로 이동하면서 중간에 설치된 스트럿에 의해 교란이 일어난다. 스트럿 후부에서는 스트럿의 영향으로 상부에서 심한 와류가 관측된다. 유량이 100 L/min으로 증

가하면 중앙부에도 기포가 일정 부분 분포하고 200 L/min 일 때 분사된 기포가 전체적으로 골고루 분포하는 것을 알 수 있다.

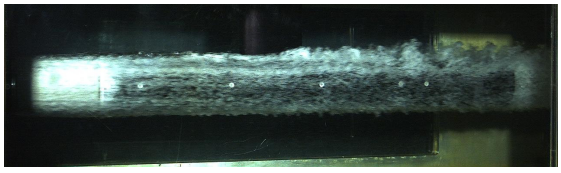
후부 제트의 영향을 알아보기 위해 후부 제트 분사 유무에 따른 시험을 수행하였다. 이는 수중 추진을 기존의 프로펠러 추진이 아닌 로켓 추진 형태의 추진을 고려하였을 때, 후부 제트 분사 상태를 모사하기 위한 것이다. 후부 제트가 유동 모사만 수행하고 분사에 의한 추력 발생이 미미함을 확인하기 위해 정수 중 후부 제트 300 L/min을 분사하여 후부 제트 분사가 몸체에 추력으로 작용하는지를 살펴보았다. 몸체에 작용하는 저항의 변화는 오차범위 이내의 작은 값으로 분사에 의해 발생하는 추력은 무시할 수 있었다.



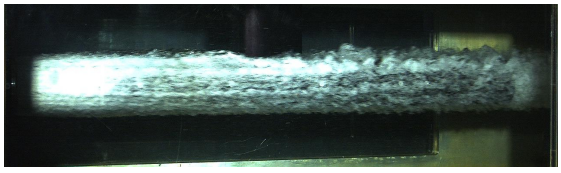
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 12. Distribution of bubbles around the body surface with cylindrical tail and tail bubble jet flow(flow velocity 8 m/s, body bubble jet flow rate (a) 50 L/min, (b) 100 L/min, (c) 200 L/min, (d) 300 L/min)

반면, 유속을 증가시켜 8 m/s인 상태에서 후부 제트를 300 L/min으로 분사하였을 때 몸체에 작용하는 저항을 측정하여 보면, 후부 제트를 분사하지 않았을 때와 비교하여 전체 저항비(DR)가 0.75가 되었다. 이는 후부 제트가 후부 단면에서의 압력 저항 감소 효과를 발생 시킨 것으로 수중 로켓 추진을 이용한다면, 로켓 추진에 의해 형상저항 감소 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

유속을 8 m/s로 고정하고 후부 제트 분사 상태에서 선수부 분사에 따른 저항 감소 영향을 살펴보았다. 후부 제트 분사 상태에서 기포 분사 장치의 분사량에 따른 저항 감소 영향을 알아보기 위한 것이다. 분사 유량에 따른 관측 결과는 Fig. 12와 같다. 전체적으로 후부 제트 분사가 없는 경우와 유사한 결과가 관측되었으며, 낮은 유량에서는 상부에 기포 분포가 치우쳤지만 200 L/min의 분사 유량일 때 전체적으로 골고루 분포하였다.

실린더형 후부 형상에 대해 분사 유량에 따른 저항 감소를 계측하여 분사 유량 계수(C_q)와 전체 저항비(DR)로 나타낸 결과는 Fig. 13과 같다. 분사 유량 계수(C_q)와 전체 저항비(DR)는 아래식에 의해 무차원화 되었다.

$$DR(Drag\ ratio) = \frac{D}{D_0}$$

여기서, D : 공기 분사시 몸체 저항
D_0 : 공기 분사 없을 때 몸체 저항

$$C_q = \frac{Q}{UdL_b}$$

여기서, C_q : 유량 계수, Q : 분사유량 m^3/s,
d : 몸체 직경 m,
L_b : 기포 발생 장치 길이 m

후부 제트 분사가 없을 때 기포 발생 장치에서 분사되는 분사량이 증가함에 따라 전체 저항비(DR)는 분사 유량 계수(C_q)가 0.0416 일 때(현 실험조건에서 유속이 8 m/s 일 때 분사유량이 300 L/min 경우)까지 감소한다. 300 L/min 이상은 현 장비의 한계로 더 이상 공기 분사를 하지 못하였다. 분사 유량 계수가 0.0416 일 때 전체 저항비(DR)는 0.9로 계측 된다. 즉,

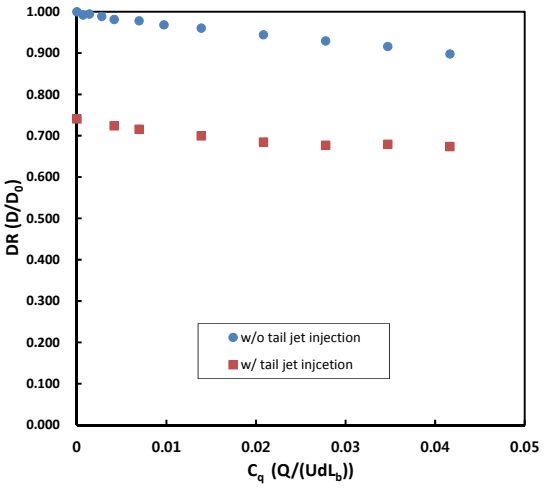


Fig. 13. Relationship between change of injection flow coefficient and total resistance ratio for a cylindrical tailed body

분사하지 않았을 때 대비 약 10 %의 저항 감소를 보인다. 8 m/s의 유속에서 분사량이 30 L/min 이하일 때, 선수부의 유체 흐름에 의한 압력 강하로 메쉬 표면과 대기압 사이의 압력차가 발생한다. 현재 시스템에서 압축공기 탱크를 제거하고 공기 흡입 튜브를 대기 중에 노출하면, 자연 대류에 의해 대기가 튜브를 통해 메쉬로 분사되며, 이는 30 L/min을 강제 분사한 것과 같은 결과를 보인다. 따라서, 외부의 에너지 공급 없이 유속에 의한 자연적인 공기 흡입에 의한 저항 감소를 기대할 수 있다. 후부 제트 분사가 있을 때도 전체 저항비는 분사 유량 계수(C_q)가 증가함에 따라 감소하고, 분사 유량 계수가 0.0347에서는 전체 저항비의 감소율이 줄어든다. 항력 계측 시 발생한 불확실성(Uncertainty)은 ± 6 % 이고, 유속 계측 시 나타난 불확실성은 ± 0.54 % 이었다.

3.4 라운드형 후부 형상 모형에 대한 시험

후부 형상을 Fig. 14와 같이 라운드형으로 변화시킨 후 유속과 분사량에 따른 저항 감소 시험을 수행하였다. Fig. 15는 분사유량이 100 L/min 일 때 유속에 따른 분사 상태를 촬영한 결과이다. 유량 조절 밸브에 계측된 유량은 동일하지만, 유속에 따라 몸체 측면에 관측되는 기포의 양이 증가함을 관측할 수 있다.

이러한 영향이 유속에 따른 저항 감소 변화에 영향을 미친 것으로 판단된다. Fig. 16은 유속 8 m/s에서

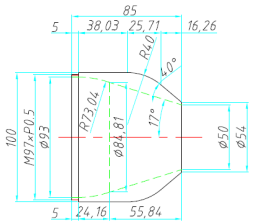


Fig. 14. Round type tail shape

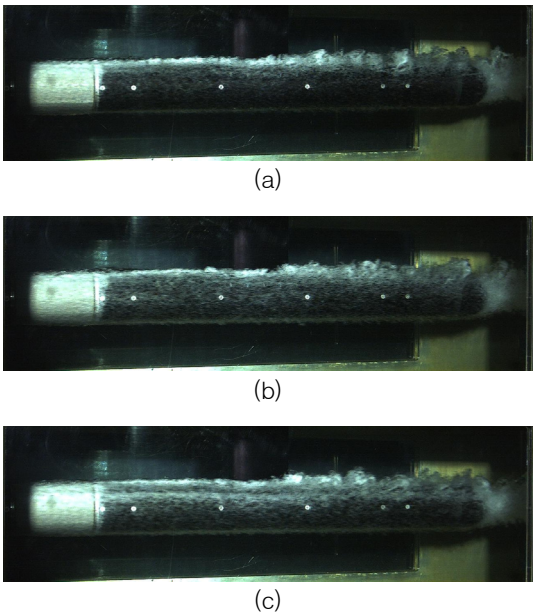
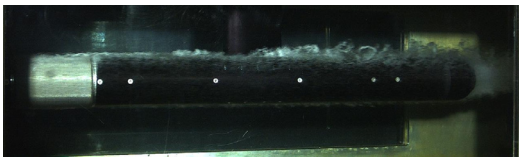


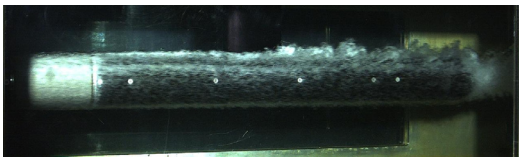
Fig. 15. Distribution of bubbles around body surface with a round tail at injection flow rate 100 L/min(flow velocity (a) 6 m/s, (b) 7 m/s, (c) 8 m/s)

분사유량에 따른 실험 관측 결과로, 전체적으로 실린더형 후부 형상에 대한 관측 결과와 유사하나, 선미부에서 몸체를 따라오는 기포가 라운드 영향으로 안쪽으로 모이는 것을 관찰할 수 있다.

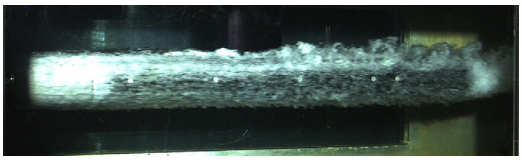
Fig. 17은 유속별 분사 유량 계수에 따른 전체 저항비를 나타낸 그래프이다. 실린더형 후부 형상과 마찬가지로 유량이 증가할수록 전체 저항비(DR)가 감소한다. 유속 6 m/s에서의 분사 유량 계수(Cq)에 따른 전체 저항비(DR)는 유속 7 m/s, 8 m/s에 비해 전반적으로 크다. 이는 Fig. 15에서 관측된 바와 같이 같은 유량을 분사하여도 유속에 따라 몸체 표면에 분포하는 기포량이 달라져서 발생하는 현상으로 판단된다. 실린



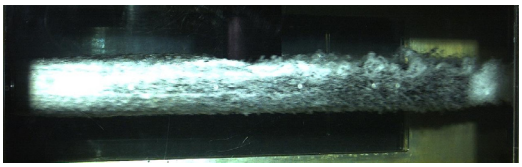
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 16. Distribution of bubbles around body surface with a round tail(flow velocity 8 m/s, injection flow rate (a) 50 L/min, (b) 100 L/min, (c) 200 L/min, (d) 300 L/min)

더형 후부 형상과 비교하면 라운드형이 전체 저항비(DR)가 큰 데, 후부 형상에 따라 전체 저항비(DR)의 차이가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원통형 수중운동체에 소결메쉬를 적용한 기포 발생 장치와 실험 장치를 설계하고 KRISO 중형 캐비테이션 터널에서 모형시험을 수행하였다. 먼저, 유속이 없을 때 소결 메쉬 표면의 기포 상태와 유속이 있는 상태의 경계층 내 기포 분포 상태를 관측하였다. 다음으로, 실린더형 후부 형상을 가진 원통형 수중운동체에 소결메쉬를 적용하고 운동체 후부에 제트 분사하는 경우와 분사하지 않는 경우에 대해 소결

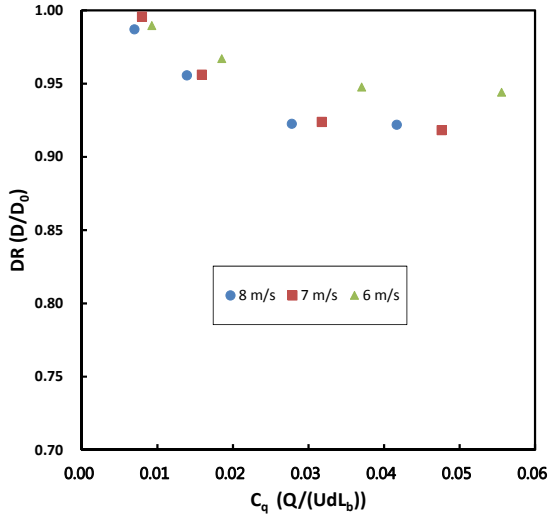


Fig. 17. Relationship between change of injection flow coefficient and total resistance ratio for a round tail body

메쉬 표면에서 공기 분사량 변화에 따른 영향을 관찰하였다. 라운드형 후부를 가진 수중운동체 모형은 유속과 분사량을 변화시키며 영향을 관찰하였다. 시험결과 분사에 따른 몸체 주위의 기포는 분사 유량이 증가함에 따라 분포 면적이 증가하고, 전체 저항비(DR)는 분사량이 증가함에 따라 감소한다. 후부 형상이 실린더 형상인 경우와 라운드 형상인 경우 분사량에 따라 감소한 전체 저항비는 차이가 있으며, 분사량을 직경과 길이 분사량으로 무차원화한 분사 유량 계수(C_q)에 대한 전체 저항비(DR)로 나타내었을 때, 분사 유량 계수(C_q)가 증가함에 따라 전체 저항비(DR)가 감소함을 확인 할 수 있다.

후 기

본 연구는 민군기술협력사업(UM14113RD1)의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Yuichi Murai, “Frictional Drag Reduction by Bubble Injection,” Exp Fluids 55:1773, 2014.

[2] Ceccio S. L., “Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection,” Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, pp. 183-203. 2010.

[3] McCormick M, Bhattacharyya R, “Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis,” Nav Eng J 85:11-16, 1975.

[4] Marie JL “A Simple Analytical Formulation for Microbubble Drag Reduction,” J Physico Chem Hydrodyn 13:213-220, 1987.

[5] Madavan NK, Deutsch S, Merkle CL, “Measurements of Local Skin Friction in Microbubble-Modified Turbulent Boundary Layer,” J Fluid Mech 156:237-256, 1985.

[6] Merkle CL, Deutsch S, “Microbubble Drag Reduction in Liquid Turbulent Boundary Layers,” ASME Appl Mech Rev 45:103-127, 1992.

[7] Kato H, Iwashina T, Miyanaga M, Yamaguchi H, “Effect of Microbubbles on the Structure of Turbulence in a Turbulent Boundary Layer,” J Mar Sci Technol 4:115-162, 1999.

[8] Hassan Y. A. & Gutierrez-Torres C. C., “Investigation of Drag Reduction Mechanism by Microbubble Injection within a Channel Boundary Layer Using Particle Tracking Velocimetry,” Nuclear Engineering and Technology, Vol. 38, pp. 763-778, 2006.

[9] Paik, B. G., Yim, G. T., Kim, K. Y. & Kim, K. S., “The Effects of Microbubbles on Skin Friction in a Turbulent Boundary Layer Flow,” International Journal of Multipahase Flow, 80, pp. 164-175, 2016.

[10] Paik, B. G., Jung, C. M., Kim, S. B. & Kwon, L. U., “The Primary Report on Water Channel Tests of a Device Using Multi-Phase Flow,” ADDR-413-160497, 2016.

[11] Frank M. White, “Fluid Mechanics,” McGraw-Hill, 5th Edition, 2003.