

폴리머와 미소기포 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 연구

김덕수*, 김우전**, 김형태***

Experimental Study of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow with Polymer and Microbubble Injection

D.S. Kim*, W.J. Kim**, H.T. Kim***

Key Words : Polymer, Micro-bubble, Drag Reduction, Water Tunnel

Abstract

Injection of microbubbles and/or polymer solution has been known to be a promising method for the reduction of frictional drag of water-borne vehicles. Naval Architects have been interested in friction drag reduction technology, since the friction drag of a commercial ship can be over 70% of total resistance. The reduction of friction drag is also important for autonomous underwater vehicles and naval submarines to improve their durability and survivability. In this study two sets of experiments were carried out for the friction drag reduction of 2-D channel wall and flat plate in the circulating water channels in Chungnam National University. Preliminary results from the experiments are presented and discussed.

1. 서론

조선 분야에서는 오래 전부터 저항이 작은 선박을 설계하기 위한 연구가 수행되어, 선수형상을 최적화하여 조파 저항이 작은 선형을 설계하는 기술, 유동박리를 억제하고 빌지 보텍스를 제어하여 압력 저항이 작은 선형을 설계하는 기술, 선체 부가물을 이용해서 선박의 저항을 감소시키는 기술 등을 발전시켜왔다. 그러나, 상대적으로 선박 저항의 가장 큰 부분을 차지하고 있는 마찰저항을 감소시키는 기술에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

현재 선박에 적용 가능성이 큰 대표적인 마찰저항 감소기법으로는 난류경계층 내에 폴리머나 미소기포를 주입하는 방법을 꼽을 수 있으며, 미국, 러시아, 일본 그리고 EU 국가들을 중심으로 이에 대한 연구들이 진행되어 왔다.^{[1],[2]} 특히, 미국과 러시아의 연구는 잠수함과 어뢰의 저항감소와 같은 군사적 용도로 실용화된 것으로 알려져 있고, 최근 일본에서는 미소기포에 대한 실선 실험도 수행된 바 있다.^[3]

본 연구는 선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 개발하기 위해 수행되고 있는 기초 연구로서 폴리머

와 미소기포 주입에 의한 마찰저항감소를 실험을 통해 확인하고, 주입 조건에 따른 마찰저항감소 효과의 변화를 조사하려는 목적을 가지고 있다. 본 논문의 내용은 저자들이 올해 발표한 학술대회 논문^[4]의 내용과 중복됨을 밝혀둔다.

2. 폴리머 주입에 의한 마찰저항 감소 실험

2.1 회류 수조 및 계측 기관

실험에 사용된 회류수조의 제원은 6,000×2,500×900 mm이고, 측정부는 2000×800×700 mm이며, 측정부 최대 유속은 1.5 m/s 이다. 본 실험을 위하여 이차원 난류 경계층 내에 폴리머를 주입하면서 속도와 벽 마찰력을 계측할 수 있도록 설계, 제작된 기관(Fig.1)을 회류수조 측정부에 새로 설치하였다.

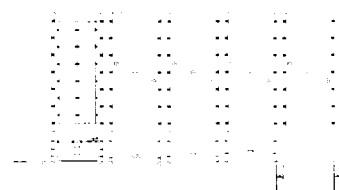


Fig. 1 Base Plate for Polymer Experiment

* 충남대학교 대학원, cfd2000@cnu.ac.kr

** KRISO, wjkim@kriso.re.kr

*** 충남대학교, h-tkim@cnu.ac.kr

2.2 실험 준비

(1) 계측 위치

Fig. 2는 기관 상의 주요 계측 위치를 나타낸다. X=0은 injection slot에서 유동방향으로 122 mm 떨어진 곳이고, Z=0은 기관 폭(700 mm)의 중앙이다. 하류(X축) 방향으로 200 mm 간격으로 계측하였고, 추후 X=-75 mm인 곳을 추가하였다.

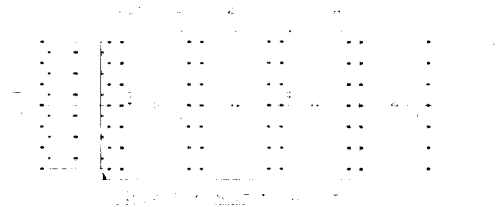


Fig. 2 Measuring Positions for Polymer Experiment

(2) 폴리머 수용액

마찰저항감소에 사용될 폴리머가 가져야 할 중요한 특성으로는 고 분자량($MW=10^6 \sim 10^7$)일 것, 선형구조를 가질 것, ppm 단위 농도에서 효과가 있을 것, 용매에 쉽게 녹을 것, 저하현상(degradation)이 적을 것 등이다.^[5]

2.3 실험결과 및 해석

(1) 기관 상의 난류 경계층

실험은 측정부 평균 유속 1 m/s 에서 수행되었다. 1/8인치 피토크를 사용하여 기관 상의 계측 위치에서 난류 경계층에 대한 평균 속도를 계측하였고, 계측된 속도 profile로부터 경계층 파라미터를 도출하였으며, 또 벽 마찰계수를 추정하였다. Fig. 3은 계측된 속도 profile을 벽좌표(wall coordinates)를 사용하여 나타낸 것이다. 경계층 내에 충분한 계측점이 분포하고, log-law를 잘 만족함을 보여준다.

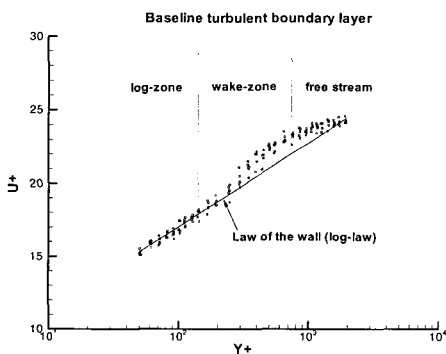


Fig. 3 Turbulent Boundary Velocity Profiles

(2) 폴리머에 의한 마찰 저항 감소

폴리머 주입에 의한 마찰저항감소 효과를 조사하기 위해 200 및 500 ppm의 PEO 수용액을 사용하여

실험을 수행하였다.

Fig. 4는 200 ppm 수용액 주입에 의한 마찰저항감소 결과를 보여주고 있다. 분당 1ℓ로 주입한 경우에는 마찰저항감소 효과가 나타나지 않았다. 주입량이 분당 2ℓ인 경우에는, 대부분 4% 이상의 저항감소를 나타냈고, X=-7.5에서는 약 7%의 저항감소가 계측되어, 주입구에 가까운 위치에서 더 큰 저항감소가 발생함을 알 수 있다. X=20 위치에서는 저항감소가 나타나지 않았는데, 이 위치에서 기관이 국부적으로 1~2 mm 정도 처지게 설치되어 주입된 폴리머 수용액이 경계층 내의 유효 영역을 벗어나 저항감소가 나타나지 않은 것으로 추정된다. 수용액을 분당 2.5ℓ로 주입하면서 수행된 실험은 최고 12%의 마찰저항감소를 나타냈다. 한편, 주입량이 분당 3ℓ인 경우는 분당 2.5ℓ와 거의 유사한 마찰저항 감소 효과를 나타냈다.

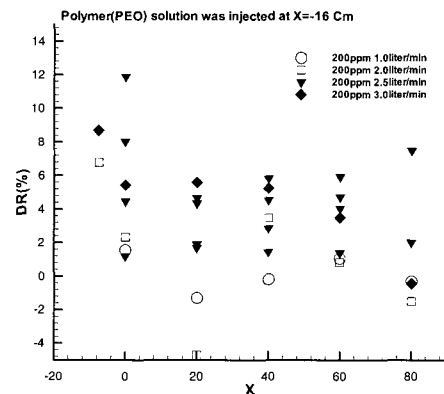


Fig. 4 Drag Reduction by 200ppm PEO Solution

Fig. 5는 500 ppm 수용액에 대한 결과를 보여주고 있다. 분당 2ℓ로 주입한 경우는, 200 ppm 수용액을 동일하게 주입한 경우보다 대체로 더 큰 저항감소를 나타내었다. X=0.0에서 가장 큰 저항감소(약 15%)가 발생하였고, 하류로 가면서 저항감소 효과가 차츰 줄어들어간다. 200 ppm 수용액에 대한 실험에서와 마찬가지로 X=20 위치에서는 저항감소가 거의 나타나지 않았다. 본 실험에서 확인된 저항감소(최대 15%)는 Tiederman 등^[6]에 보고된 저항감소(최대 25% 이상)에 비해 상당히 작다. 그러나, 각 실험에 사용된 폴리머의 종류, 농도, 주입량, 주입구 형상, 레이놀즈 수 등 실험조건이 서로 다르기 때문에 현재로서는 이런 차이에 대한 원인을 명확히 설명하기는 어렵다. 한편, 500 ppm 수용액을 분당 2ℓ에서 분당 3ℓ로 늘여 주입하면서 마찰력을 계측한 결과, 200 ppm의 경우와 마찬가지로 주입량의 증가에도 불구하고 저항감소가 오히려 작게 나타났다. 이처럼 본 실험에서는 폴리머 주입량이 어느 한도 이상이 되면 마찰저항감소 효과가 더 이상 커지지 않는 것으로 나타났지만, 이러한 결과는 다른 연구 결과에

서는 나타나지 않았기 때문에, 앞으로 실험의 불확실성을 좀더 개선하여 이를 다시 조사해 볼 계획이다.

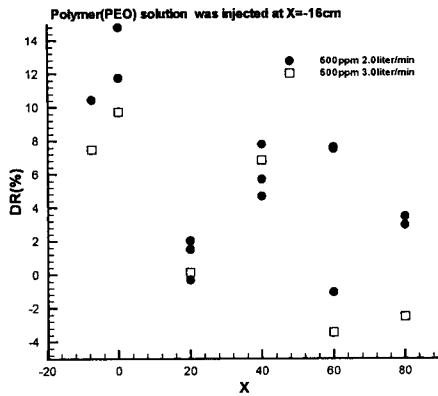


Fig. 5 Drag Reduction by 500ppm PEO Solution

3. 미소기포 주입에 의한 마찰저항 감소 실험

3.1 계측 장비

(1) Water Tunnel

미소기포 및 폴리머 수용액 주입에 의한 마찰저항감소 실험을 위해서 제작한 water tunnel의 크기는 5,500×1,510×500 mm 이고, 측정부(test section)은 2,200×180×10 mm 이며, 측정부에서 최대 유속은 10 m/s 이다.

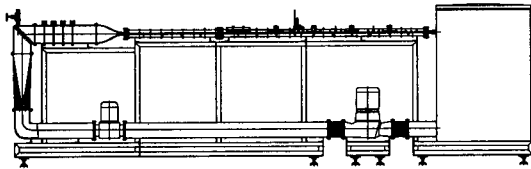


Fig. 6 Water Tunnel

Fig.6는 전체 터널을 간략하게 보여준다. 측정부에서 완전히 발달된 난류 관유동이 형성되도록 설계하였고, 미소기포를 발생시켜 주입하기 위한 다공판(array of holes plate, AOH) 및 폴리머 수용액의 주입을 위한 슬롯 유닛을 설치하였으며, 그 하류에는 마찰력계(stress meter), 피토관(Pitot tube), 열막속도계(hot film), 보이드계측관(void meter tube) 등을 상판에 설치해서 국부유동 특성을 계측할 수 있도록 계측구를 300mm 간격으로 배치하였다.

(3) 미소기포 주입장치

미소기포 주입장치는 컴프레서, 유량계, AOH 등으로 구성되어 있다. 컴프레서에서 공급된 공기는 유량계에서 일정한 유량으로 조절하여 호스를 통해 AOH 유닛으로 주입된다. AOH를 통해 물이 흐르고 있는 터널 안으로 공기가 주입되면서 미소기포가 발생된다. 발생한 미소기포의 크기가 어느 한도 이상 되면 오히려 마찰저항이 증가하는 것이 알려져 있기

때문에 작은 미소기포를 발생시키는 것이 유리하다. 본 실험을 위해 다공판 구멍의 직경이 각각 0.5, 1, 2mm인 AOH(Array of Holes)와, porous metal을 사용하여 제작한 plate 등 총 4개를 제작했으나, 본 연구에서는 직경이 0.5 mm인 AOH를 사용해 실험하였다. 한편, 기포의 크기는 주입 구멍의 크기와 무관하고, 공기 주입량과 측정부 물유량의 단위시간당 체적비의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다. 발생한 미소기포의 크기와 유동 내 분포는 마찰저항 감소에 있어 매우 중요한 인자이지만 본 실험에서는 이를 확인하지 못하였다.

(4) Stress meter와 Strain Amplifier

벽 마찰력을 계측하기 위한 마찰력계(Fig. 7)는 일본 Sankei 사 제품으로 지름이 10mm이고, 마찰력은 1gf까지 계측이 가능하며 최대 허용치는 1.5gf이다. 이 제품은 일본에서 수행된 연구^[7]와 최근 미국의 연구^[8]에도 사용된 바 있다. 마찰력을 정확하게 계측하기 위하여 마찰력계 면을 계측평면과 일치되게 설치하였으며, Strain amplifier는 일본의 Kyowa 사의 DPM-611A 모델을 사용하였다.

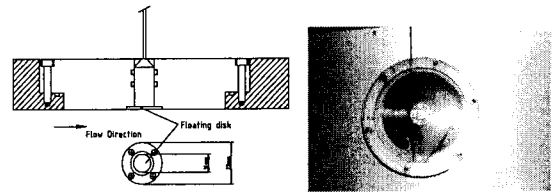


Fig. 7 Skin Friction Sensor

3.2 실험준비

(1) 계측위치

Fig. 8은 위에서 본 측정부 그림으로 계측위치를 나타낸다. 공기와 폴리머 주입 유닛의 중앙을 원점으로 잡고 하류방향을 x축으로, 중력의 반대 방향을 y축으로 하였다. 계측위치는 x=0에서 300mm 간격으로 정하였다. 마찰력의 계측위치는 #1~#3로 하였고, 유속계측은 #6에서 수행했다. 마찰력계를 2개만 사용했기 때문에 #3 위치에서 계측하기 위해서 #1을 계측한 후 sensor을 #3로 옮겨서 계측하였다.

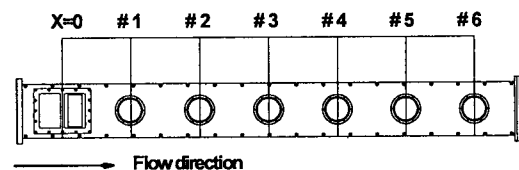


Fig. 8 Measuring Positions for Micro-bubble Experiment

3.3 실험결과 및 해석

(1) 측정부 중앙 단면의 속도 분포

Fig. 9는 피토크를 이용하여 #6 위치에서 측정한 단면 중앙의 평균유속이 완전히 발달한 난류(Fully developed turbulent flow) 관유동 속도 분포임을 확인하기 위해서, Laufer의 실험자료에 근거해서 만든 Pai의 경험식^[9]으로 계산된 속도 분포와 비교한 결과를 보여준다.

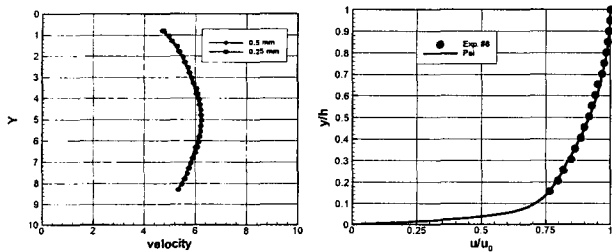


Fig. 9 Velocity profiles & Non-dimensional Velocity profiles

(2) 미소기포에 의한 마찰저항 감소

Fig. 10은 속도 6m/s에서 구멍 직경이 0.5mm인 AOH를 통하여 공기를 주입하며 측정한 결과를 보여준다. Fig. 10에서 진하게 표시된 기호는 #1과 #2 위치에서 측정한 것이고, 외곽선 만으로 된 기호는 #1 위치의 sensor를 #3의 위치로 이동시켜 측정한 결과이다. Sensor의 위치를 이동하려면 tunnel의 물을 일부 빼고 센서를 새로 설치한 후 물을 다시 채워 실험을 수행해야하기 때문에 실험 조건의 작은 차이가 발생하며, 이로 인한 실험 결과의 변화를 보여주기 위해 두 개의 그림으로 나누어 도시하였다. 측정 결과 900NL/H의 공기를 주입시 최대 12%의 마찰저항 감소가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 공기 주입량 증가함에 따라 마찰저항감소 효과도 증가하고 있음을 알 수 있다.

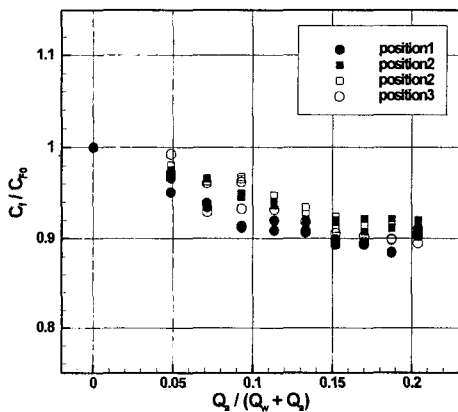


Fig. 10 Drag Reduction by Micro-bubble

5. 결론

선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 개발하기 위하여 폴리머와 미소기포의 주입에 의한 마찰저항 감소에 대한 기초적인 실험을 수행하였다. 평판 난류 경계층과 이차원 난류 관유동을 대상으로 폴리머 수용액과 미소기포를 주입하면서 마찰저항을 측정하여 저항감소를 정량적으로 확인하고, 주입조건에 따른 마찰저항감소 효과의 변화도 조사하였다. 앞으로 좀더 다양한 조건에서 실험을 수행해서 폴리머와 미소기포 주입에 의한 마찰저항 감소에 관한 자료를 확보할 계획이다. 또한, 마찰저항감소 메커니즘의 본질적인 규명을 위하여 폴리머나 미소기포가 포함된 난류특성, 특히 벽에 매우 가까운 영역에서의 속도와 난류응력 그리고 폴리머 및 미소기포의 분포에 대한 측정 및 가시화도 수행할 예정이다.

참고문헌

[1] Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction, Newport, Rhode Island, 1998.
 [2] Proceedings of the 3rd Symposium on Smart Control of Tyrbulence, 2002 and also proceedings of the 1st and the 2nd Symposia, 1999 and 2001.
 [3] Y. Kodama, A. Kakugawa, T. Takahashi, S. Nagaya, K. Sugiyama, "Microbubbles : Drag Reduction Mechanism and Applicability to Ships", 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, 2002.
 [4] 김종엽, "고분자 첨가제의 저하현상에 관한 연구", 충남대학교, 4-29, 1996.
 [5] 김덕수, 김우전, 김형태 "폴리머와 미소기포 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 연구" 대한조선학회 학술대회 논문집, pp. 136-139, 2002.
 [6] W.G. Tiederman, T.S. Luchik and D.G. Bogard, "Wall-layer Structure and Drag Reduction", JFM, Vol. 156, pp. 419-437, 1985.
 [7] T. Takahashi, A. Kakugawa, S. Nagaya, T. Yanagihara, Y. Kodama, "Mechanism and Scale Effects of Skin Friction Reduction by Microbubbles", Proc. of the 2rd Symposium on Smart Control of Turbulence, 2001.
 [8] W. Sanders, D.R. Dowling, M. Perlin, S.L. Ceccio, "The University of Michigan HIPLATE Experiment", Proc. of the 3rd Symposium on Smart Control of Turbulence, 2002.
 [9] Frank M. White, "Viscous Fluid Flow", Mc. Graw-Hill