대 한 조 선 학 회 논 문 집
제40권 제3호 2003년 6월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 40, No. 3, pp. 1-8, June 2003

미소기포 주입에 의한 마찰저항 감소에 대한 연구

김덕수†*, 김형태*, 김우전**

충남대학교 선박해양공학과*, 목포대학교 조선해양공학과**

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

Dug-Soo Kim*, Hyoung-Tae Kim* and Wu-Joan Kim**

Dept. of NA & OE, Chungnam National University*
Dept. of NA & ME, Mokpo National University**

Abstract

For the experiment of the friction drag reduction by microbubble injection, a drag reduction water tunnel was specifically designed and made. Experimental apparatus and procedures were devised and developed for measuring the change of wall friction drag with microbubble injection. For fully-developed channel flows, the change of friction drag with important parameters of microbubble injection is investigated and the experimental data and results obtained are presented. The amount of friction drag reduction up to 25% is observed in the present study.

※Keywords: Microbubble Injection(미소기포주입), Drag Reduction(마찰저항 감소), Skin Friction Sensor(마찰력계), Fully-Developed Turbulent Channel Flow(완전히 발달된 난류 관 유동)

1. 서언

오래 전부터 저항이 작은 선박을 설계하려는 노력이 지속되어 선박의 조파 저항이나 압력 저항을 감소시키는 기술[강국진/김은찬 1989, 강국진 등 2000]은 괄목할 만큼 발전했으나, 선박의 마찰 저항을 감소시키는 기술은 제대로 개발되지 못한 실정이다. 유선형 수중 물체의 표면에 미소기포를 주입함으로써 저항을 획기적으로 감소시킬 수 있다는 사실이 실험[McCormick/Bhattacharya 1973]을 통해서 처음 알려진 이후에, 이를 규명하고 실용화하기 위한 연구가 꾸준히 지속되어 왔다[Meng 1998, Kasagi 2001, Kato 등 2000]. 특히, 최근 일본에서는 미소기포 주입에 의한 마찰저항감소 기술을 선박에 적용하기 위한 실선 실험까지 수행된 바 있으며[Kodama 등 2002], 국내에서도 선박의 마찰저항 감소에 관한 연구가 시작되고 있다[장진호/김효철 1999, 김덕수 등 2001].

접수일:2003년 3월 15일, 승인일: 2003년 6월 4일
†주저자, E-mail: cfd2000@cnu.ac.kr
Tel:1-734-764-2016

본 연구는 선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 개발하기 위한 기초연구로서, 미소기포 주입에 의한 마찰저항감소 현상을 실험을 통해 확인하고, 주입 파라미터에 대한 마찰저항감소 효과의 변화를 조사해서 얻은 기초적인 실험 결과를 기술하였다.

2. 실험 장비

2.1 마찰저항감소 실험 전용터널

본 연구에 사용된 마찰저항감소 실험 전용 터널(Drag Reduction Water Tunnel, 이후 DRWT)의 제원은 5,500×1,510×500mm이고, 관측부는 2,200×180×10mm이며, 관측부 최대 유속은 12m/s이다. Fig.1은 DRWT의 구조를 간략하게 보여주고 있다.

2.2 관측부 및 미소기포 발생 장치

미소기포에 의한 마찰저항감소를 계측하기 위해 Fig. 2와 같이 관측부를 제작하였다. 관측부 상류에는 공기를 주입하여 미소기포를 발생시키는 다공판(Array of Holes Plate, 이후 AOH)을 설치하고, 그 하류에는 마찰력 계를 설치하기 위한 구멍을 300mm 간격으로 배치하였다. Fig. 3은 AOH를 보여준다. 공기압축기로 공기를 주입하고 레귤레이터를 통과시켜 유량계에서 유량을 조절한 다음 AOH를 통하여 수조 안으로 공기가 주입되면서 미소기포가 발생하게 된다. 구멍 직경이 각각 0.5, 1, 2mm인 AOH, 다공 금속판(Porous Metal Plate) 등 총 4개를 제작하였으나, 본 실험에서는 직경이 0.5 mm인 AOH를 사용하였다.

2.3 계측 기기

실험에 사용된 마찰력 계는 두 종류인데, 하나는 국내 업체에서 제작한 것으로서 마찰력 계의 직경이 100mm고 최대 500gf의 마찰력 계측이 가능하고, 다른 하나는 일본의 Sankei 사 제품으로 10mm이며, 1gf의 마찰력 계측이 가능하다. 이 제품은 일본에서 수행된 미소기포에 의한 마찰저항감소에 관한 연구에 사용된 바 있다[Kodama 1998, Kato 2000]. 본 연구에서는 실험을 통하여 두 마찰력계의 성능을 비교했으며, 결과적으로 국내에서 제작한 용량이 큰 마찰력 계를 사용하였다. Fig. 4와 5는 각각 마찰력 계의 간략도와 실물 사진을 보여 준다.

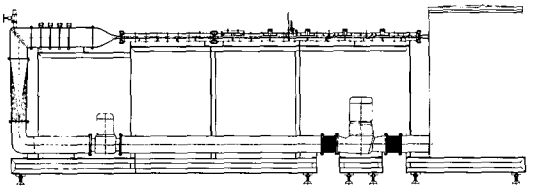


Fig. 1 Sketch of DRWT

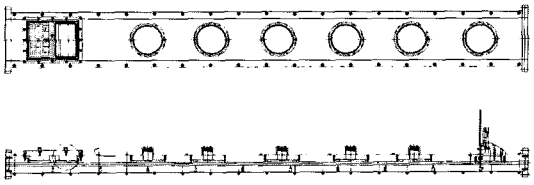


Fig. 2 Test section and its arrangement

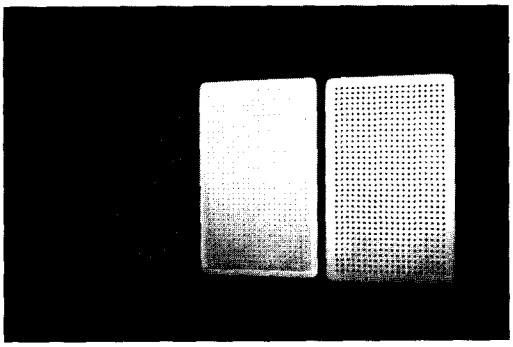
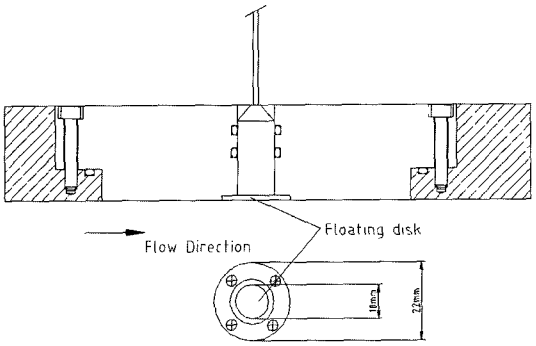
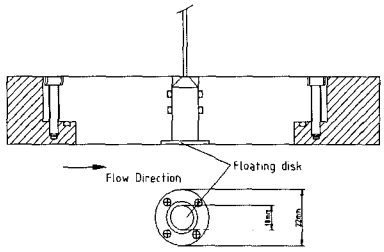


Fig. 3 Array of holes plate(AOH) and porous metal plate

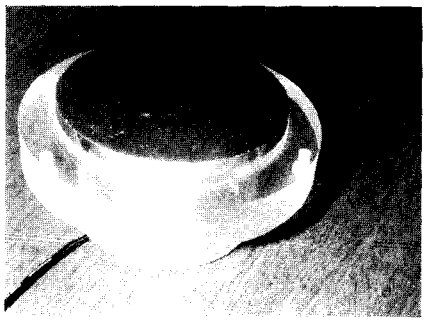


(a) Sensor A (DANA Korea, 500gf)

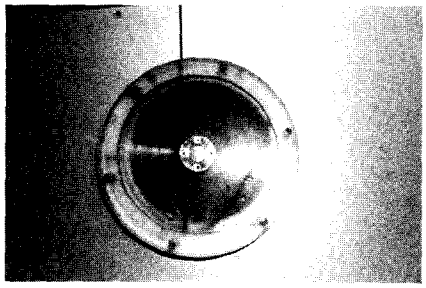


(b) Sensor B (Sankei Japan, 1gf)

Fig. 4 Sketches of two friction sensors



(a) Sensor A (DANA Korea, 500gf)



(b) Sensor B (Sankei Japan, 1gf)

Fig. 5 Photos of two friction sensors

자료 취득 장치로는 Quatech사의 Daq-book과 DBK-1를 사용하였다. 이 장치는 동시에 16개 채널의 사용이 가능하고, ±5volts 범위에서 최대 100KHz의 샘플링 속도(Sampling Rate)로 자료를 취득할 수 있다. 본 실험에서는 피토 관에 연결된 압력변환기(Pressure Transducer)와 마찰력계를 연결하는 2개 채널만을 사용하였고, 예비실험을 통해서 샘플링 속도는 20Hz로, 샘플링 시간은 10초로 결정했으며, 결과적으로 단위계측 당 200개의 데이터를 취득하여 평균한 것을 실험값으로 하였다.

2.4 피토관

본 실험에서 관측부 유동의 속도 계측에 사용한 피토관은 외경이 1.6mm(1/16인치)이다. 이 피토관은 길이가 265mm이고 머리부분 길이가 24mm이며, 정압홀(Static Hole)은 90°간격으로 4개 있고 전수두홀(Total Head Hole)의 내경은 0.35mm이다.

3. 실험 준비

3.1 계측위치

본 실험에 사용된 DRWT는 공기 주입과 폴리머 주입으로 인한 마찰저항 감소를 측정하고자 고안되었으며, Fig. 7에 나타낸 측정부 x=0 위치의 상류에 미소기포 발생을 위한 AOH를 위치시키고, 하류 방향으로 폴리머 수용액 주입을 위한 슬롯을 장착하였다. 또한 계측을 위한 좌표축은 관측부 중앙과 x=0 위치를 원점으로 잡고 하류 방향을 x축으로, 중력의 반대 방향을 y축으로 하였다. 계측 위치는 x=0에서 300mm 간격으로 정하였다. 마찰력의 계측 위치는 #1~#3로 하였고, 유속 계측은 #6에서 수행하였다.

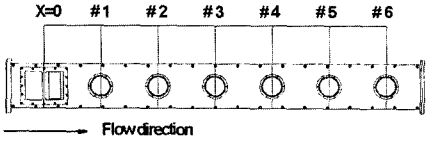


Fig. 7 Measuring positions for microbubble injection experiment

3.2 계측장비 교정 (Calibration)

본 연구에서는 1공 피토관을 사용해서 관측부 유동의 속도 분포를 계측하였다. 피토관의 정압홀과 동압홀 또는 전수두홀 사이의 압력차이를 압력변환기에 연결하여 전압 신호로 바꾸어 계측하였다. 본 연구에서 수행하려는 실험의 관측부 최대

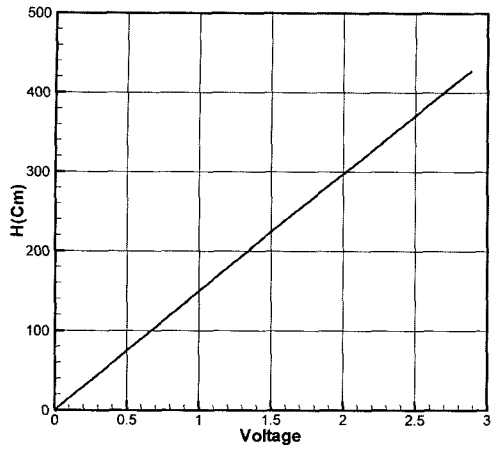


Fig. 8 Pressure transducer calibration data

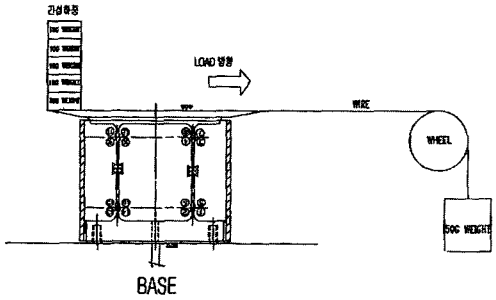


Fig. 9 Calibration of friction sensor A

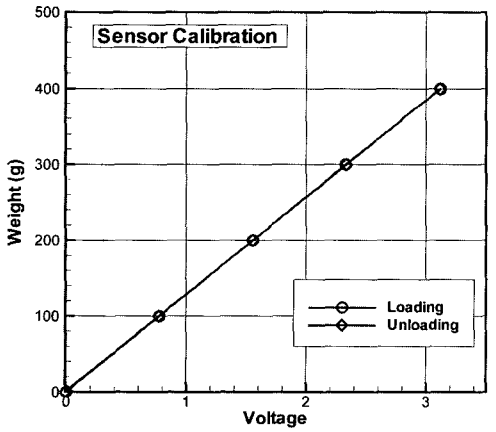


Fig. 10 Skin friction sensor calibration data

유속이 11m/s 정도이므로 압력변환기의 교정을 위해 약 6m정도의 수두차가 필요했으며, 직경 5mm의 튜브를 건물 외벽에 붙여 수직으로 내려 교정을 수행하였다. Fig. 8는 앞서 언급한 압력변환기에 대한 교정 결과를 보여 준다.

벽 마찰력 계측에 사용한 마찰력 계는 Fig. 9에 나타낸 것같이 실험시 관측부 압력구배 때문에 발생하는 수직방향 간섭하중을 고려하여 교정하였다. Fig. 10은 교정 결과로서 간섭하중과 무관하게 벽 마찰력을 정확하게 계측할 수 있음을 보여 준다.

4. 실험결과 및 해석

4.1 관측부 중앙 단면 유동의 속도 분포

Fig. 11은 #6 위치에서 피토관으로 계측한 단면 중앙의 평균 유속이다. 완전히 발달한 난류 관유동 속도 분포임을 보이기 위해서 Laufer의 실험자료에 근거해서 만든 Pai의 경험식[White 1990]과 계측된 속도를 비교하였으며, h는 관측부 단면의 1/2 깊이(5mm), U_0는 관측부 중앙의 유속이다.

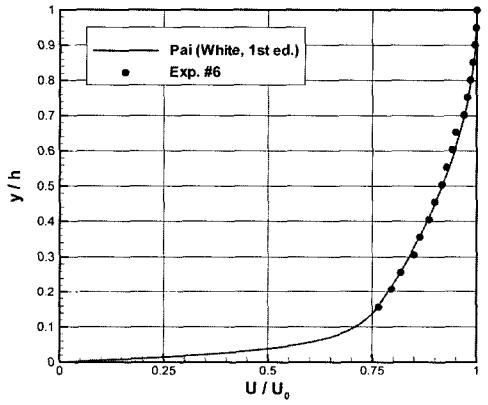


Fig. 11 Measured velocity profile

4.2 미소기포 주입시 속도변화

본 실험에 앞서 먼저 DRWT의 유동 특성 및 샘플링 속도를 판단하기 위해 예비실험을 수행하였다. 덤프탱크(Dump Tank)의 수위가 낮으면 관측부에 공기가 유입되고, 모터가 일정한 유량을 이송하지 못하는 것을 파악하여 알맞은 수위를 찾아

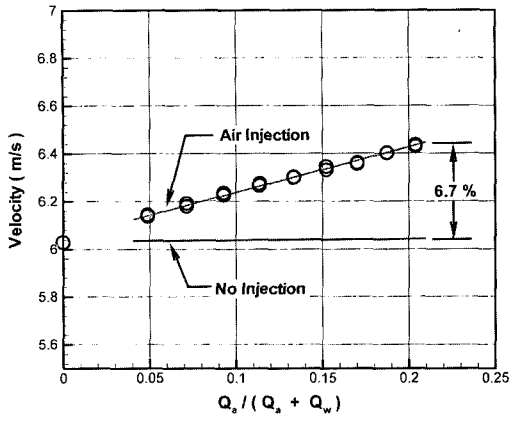


Fig. 12 Velocity change due to air injection

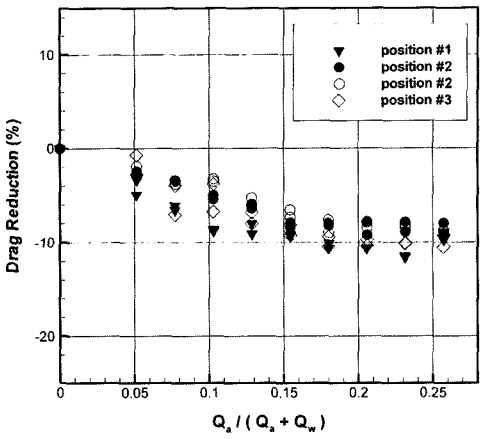


Fig. 13 Drag reduction measured by Sensor B ($U_0 = 6m/s$)

실험에서도 같은 수위를 갖도록 조절하였다. 한편, Fig. 12와 같이 공기 주입량이 증가함에 따라 관측부 유속이 증가하는 것이 확인되어 #6 위치에 피토관을 설치해서 터널 중앙에서의 유속이 일정하도록 유지하며 실험을 수행하였다. 그림의 가로축은 무차원화된 공기 주입량으로서 Q_a는 단위시간당 공기 주입량을, Q_w는 관측부 단면에서의 단위시간당 물유량을 의미한다.

일정한 유속에서 관측부에 미소기포를 주입하면 유속이 증가하게 되어 선박이나 물수체에 미소기포를 주입하는 경우와 맞지 않을 뿐 아니라, 미소기포에 의한 마찰저항 감소량을 계측하는데 필요한 정확한 기준을 정하기도 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 기포를 주입하는 경우에도 관측부 유속을 동일한 값으로 일정하게 유지하면서 실험을 수행하는 방법을 사용하였다.

4.3 미소기포에 의한 마찰저항 감소

본 계측 실험은 다음과 같은 순서로 수행하였다. 예비실험을 통해 정해진 수위로 덤프 탱크에 물을 채우고 관측부 내표면과 마찰력계의 센싱판(disk)의 높이가 같게 조절하고 마찰력 계와 압력변환기의 영점을 잡는다. 계측하고자 하는 미소기포 주입량을 일정하게 조절하고, 피토관을 사용해서 DRWT의 관측부 중앙 평균속도가 일정하도록 모터의 Hz를 조절한다. 한 위치에서의 계측이 끝나면 마찰력 계의 위치를 바꾸고 앞서 언급한 과정을 반복하여 실험 수행을 한다.

Fig. 13은 속도 6m/s에서 구멍의 직경이 0.5 mm인 AOH를 통하여 압축공기를 주입하면서 Sankei사의 마찰력 계(Sensor B)로 계측한 결과이다. 진하게 표시된 기호는 #1과 #2 위치에서 계측한 것이고, 외곽선 만으로 된 기호는 #1 위치의 마찰력 계를 #3의 위치로 이동시켜 계측한 결과를 나타낸다. 계측 결과, 공기 주입량 증가함에 따라 마찰저항감소 효과도 증가하고 있음을 알 수 있으며, 최대 12%의 마찰저항 감소가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 유사한 실험 조건에서 동일한 마찰력 계를 사용한 Kodama의 실험결과[Kodama 2000]와 대체로 잘 일치하지만, 자체 제작한 마찰력 계(Sensor A)에 비해서 계측값의 분산이 상당히 큰 것이 확인되었고 또 관측부 유속이 높아지면서 Sensor B는 계측 용량이 초과되어 사용할 수 없었기 때문에, 이후 실험에서는 Sensor A만을 사용하였다.

Fig. 14는 앞의 경우(Fig. 13)와 동일한 실험조건에서 자체 제작한 마찰력 계(sensor A)를 #1 ~ #3 위치에 설치하고 마찰저항의 변화를 계측한 결과이다. 무차원 공기 주입량이 0.18일 때까지는 주입량이 증가함에 따라 마찰저항의 감소량도 증가하지만, 그 이상에서는 주입량이 증가함에 따라

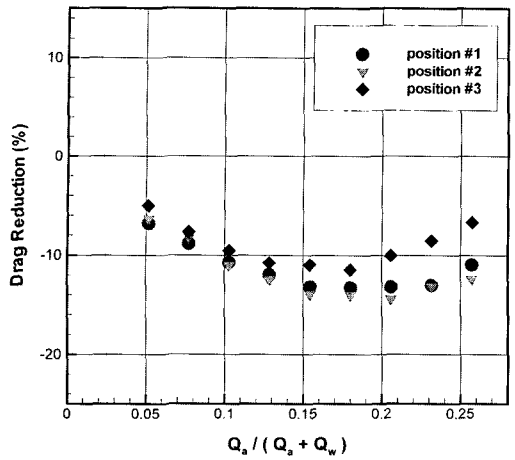


Fig. 14 Drag reduction measured by Sensor A ($U_0 = 6m/s$)

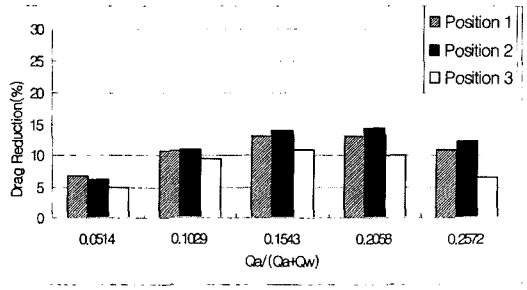


Fig. 15 Histogram of drag reductions at three positions (Sensor A, $U_0 = 6m/s$)

서 마찰저항 감소량이 오히려 감소하였다. 한편, 무차원 공기 주입량이 0.206일 때, #2 위치에서 최대 14%의 마찰저항감소가 계측되었다.

Fig. 13과 Fig. 14의 결과를 비교하면, 계측값의 차이는 좀 있으나 대체로 유사한 저항감소 효과를 나타내고 있으며, 두 마찰력계가 모두 공기 주입량이 어느 정도 이상 되면 저항감소 효과가 더 이상 증가하지 않고 오히려 감소하는 경향을 보여주고 있다. 두 마찰력계를 사용하여 반복해서 계측한 결과, Sensor A의 계측값의 분산이 작고 반복성이 좋아서 Sensor B 보다 더 신뢰할 수 있는 결과를 얻게 되었는데, 이는 Sensor A의 계측면적이 Sensor B의 100배라는 사실로부터 이미 예상되었던 결과이며, 또한 Sensor A의 센싱 원판(disk) 면적을 크게 설계한 이유이기도 하다.

Fig. 15는 각 공기 주입량에 대하여 위치에 따른 저항감소를 비교한 것이다. 무차원 공기 주입량이 0.2 보다 커지면서 특히 #3 위치에서 저항감소 효과가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 속도가 일정한 상태에서 공기 주입량이 증가하면 미소기포의 크기가 증가하고, 또 본 실험의 경우에는 관측부의 압력이 하류로 가면서 선형적으로 감소하여 #3 위치의 압력이 상류 위치보다 낮아 기포가 커져서 저항감소효과가 줄어든 것으로 판단된다. 그러나, 미소기포의 크기를 직접 계측해서 이를 확인하지는 못하였다.

Fig. 16는 관측부 유속 11m/s에서 자체 제작한 마찰력계(Sensor B)를 사용해서 마찰 저항 감소를 계측한 결과이다. 실험된 공기 주입량의 전 범위에서 공기 주입량이 증가함에 따라서 마찰저항 감소량도 증가하였다. 그러나, 본 실험에 사용된 공기주입장치의 한계 때문에 유속 6m/s의 경우와 같이 마찰저항감소 효과가 더 이상 증가하지 않는 영역이 나타나는 것을 확인하지는 못하였다. 이 그림에서 무차원 공기 주입량의 범위가 줄어든 것은 실험에서 주입 가능한 공기의 최대량은 동일하지만, 관측부 유속이 커져서 물유량이 증가했기 때문이다. 무차원 공기 주입량이 0.07 이하인 영역에서는 유속이 6m/s인 경우와 그다지 큰 차이

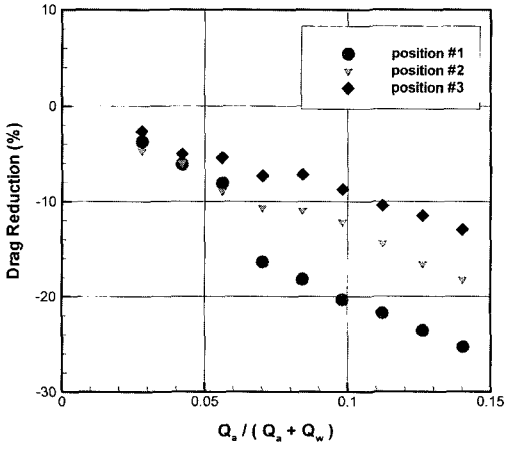


Fig. 16 Drag reduction measured by Sensor A ($U_0 = 11m/s$)

를 보이지 않았으나 공기 주입량이 그보다 증가하면서 계측 위치에 따른 저항감소량의 차이가 현격하게 나타났다. 각 계측 위치에서 마찰저항 감소량이 무차원 공기 주입량에 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 잘 보여주며, 0.14일 때 공기 주입구에 가장 가까운 #1 위치에서 최대 25%의 마찰저항감소 효과가 나타났다.

Fig. 17은 각 공기 주입량에 대하여 위치에 따른 마찰저항감소를 비교한 것이다. 무차원 공기주입량이 0.08 보다 커지면서 주입구에 가까울수록 저항감소 효과가 큰 것을 명확하게 볼 수 있는데, 본 실험의 경우에 기포의 확산은 대류에 비해서 매우 작아서 무시할 수 있고, 또한 부력의 영향 때문에 하류로 가면서 기포가 관측부 내부 상면의 계측면에 유지되는 것을 고려할 때, 이는 주로 관측부의 압력이 하류로 가면서 선형적으로 감소하고 이에 따라서 미소기포의 크기가 증가해서 마찰저항감소 효과가 줄어든 것으로 판단된다.

두 유속에서 나타난 마찰저항감소 효과를 비교함에 있어서 유의할 점은 무차원 공기주입량이 동일한 경우, 실제 공기 주입량은 유속에 거의 비례하므로 서로 다르다는 사실이다. 한편, 미소기포의 직경이 공기 주입량의 평방근에 비례하고 유속의 평방근에 반비례한다는 것을 전제할 때, 무차원 공기주입량이 동일하면 미소기포의 크기가 대체로 유사하다고 볼 수 있다. 결과적으로, 유속 11m/s 일 때 동일한 무차원 공기주입량에서 유속 6m/s 보다 대체로 더 큰 저항감소가 위치에 따라 마찰저항감소가 다른 경향을 나타난 것과 계측

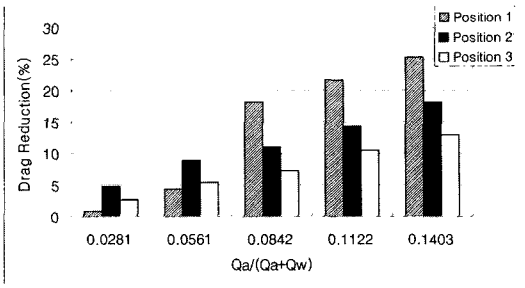


Fig. 17 Histogram of drag reductions at three positions (Sensor A, $U_0 = 11m/s$)

낸 원인을 규명하기 위해서는 좀더 다양한 유속과 공기주입량 조건에서 실험을 수행하고, 미소기포에 의한 마찰저항감소 효과를 좀더 일관되게 나타낼 수 있는 무차원 파라미터를 찾아내야 하며, 더 나아가서 미소기포가 난류에 미치는 영향을 파악해야 할 것이다.

5. 결 론

선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 실용화하기 위한 기초 연구로서 국부유동 및 벽 마찰력을 계측을 통하여 마찰저항감소 현상을 연구하였다. 미소기포 주입에 의한 마찰저항감소를 실험을 위한 전용 터널(DRWT)을 설계·제작하였고, 마찰저항감소량을 직접 계측할 수 있는 마찰력 계를 개발하였다. 완전 발달한 난류 채널유동을 대상으로 속도 분포와 벽 마찰력을 계측함으로써 미소기포 주입에 따른 마찰저항감소 효과를 확인하고 계측된 자료를 해석하여 기초적인 실험 결과를 확보하였다.

앞으로 미소기포의 크기가 마찰저항 감소에 미치는 영향, 폴리머와 미소기포 동시 주입에 의한 시너지 효과 그리고 미소기포에 의한 마찰저항 감소 메커니즘의 규명을 위한 연구를 수행할 필요가 있다.

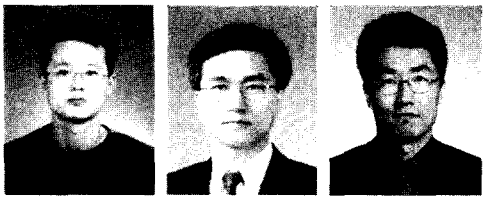
후 기

본 연구는 해양연구원 해양안전시스템연구소(KRISO)의 기관 고유 사업인 '선박 점성저항감소 핵심기술 개발'의 위탁 과제로 수행된 연구 내용을 바탕으로 한 것이며, 본 연구를 지원해주신 관계자 여러분께 진심으로 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 강국진, 강승우, 김인표, "선미 Wedge와 Flap의 저항 추진 성능에 대한 연구", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 176-179, 2000.
- 강국진, 김은찬, "쇄파 현상을 고려한 선수 형상법에 관한 연구" 대한조선학회 논문집, 제 26

권, 2호, pp. 1-12, 1989.
- 김덕수, 김우전, 김형태, "폴리머와 미소기포 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 연구", 대한조선학회 학술대회 논문집, pp. 136-139, 2002.
- 장진호, 김효철, "선저에 부착된 공기 공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 2호, pp. 1-8, 1999.
- N. Kasagi(Chair of Organizing Committee), Proceedings of the 2nd Symposium on Smart Control of Turbulence, Tokyo, Japan, 2001.
- H. Kato, T. Iwashina, M. Miyanaga and H. Yamaguchi, "Effect of Microbubbles on the Structure of Turbulence in a Turbulent Boundary Layer", J. of Marine Science and Technology, pp. 1-8, 2000.
- Kodama, Y. et al., "Experimental study on microbubles and their applicability to ships for skin friction reduction," Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol.21, 2000.
- M.E. McCormick and R. Bhattacharya, "Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis," Naval Engineers Journal, Vol. 85, pp.11-15, 1973.
- James C.S. Meng(Chairperson), Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction, Newport, Rhode Island, 1998.
- Y. Kodama, A. Kakugawa, T. Takahashi, S. Nagaya and K. Sugiyama, "Microbubbles: Drag Reduction Mechanism and Applicability to Ships", 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, 2002.
- F.M. White, *Viscous Fluid Flow*, 1st Ed., pp. 461, McGraw-Hill, 1990.



< 김 덕 수 > < 김 형 태 > < 김 우 전 >