

## 폴리머 수용액 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 실험 연구

김형태<sup>†\*</sup>, 김덕수\*, 김우전<sup>\*\*</sup>

충남대학교 선박해양공학과\*, 목포대학교 조선해양공학과<sup>\*\*</sup>

### Experimental Study on Frictional Drag Reduction of Turbulent Flow by Polymer Solution Injection

Hyoung-Tae Kim\*, Dug-Soo Kim\* and Wu-Joan Kim<sup>\*\*</sup>

Dept. of NA & OE, Chungnam National University\*  
Dept. of NA & ME, Mokpo National University<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

An experimental study has been carried out as a basic research for development of the friction drag reduction technology for ships by polymer injection. Experimental apparatus and procedures have been devised and prepared to measure the changes of the wall friction with injection of a polymer solution and basic experimental data on the friction drag reduction are obtained for a turbulent flat-plate boundary layer and fully-developed channel flows. Variations of the friction drag reduction with some important parameters of polymer injection, such as the concentration of polymer solution, its injection flow rate and the measuring position downstream from the injection slot, are also investigated. Important experimental data and results obtained in the present study are presented. The amount of friction drag reduction up to 50% is observed.

※Keywords: Friction Drag Reduction(마찰저항 감소), Polymer Solution Injection(폴리머 수용액 주입), Skin Friction Sensor(마찰력계), Flat-Plate Turbulent Boundary Layer(평판 난류 경계층), Fully-Developed Turbulent Channel Flow(완전히 발달된 난류 관 유동)

#### 1. 서언

조선 분야에서는 오래 전부터 저항이 작은 선박

을 설계하기 위한 연구가 수행되어, 조파저항 및 압력저항이 작은 선형을 설계하고 선체 부가물을 이용해서 저항을 감소시키는 기술[강국진/김은찬 1989, 강국진 등 2000]을 발전시켜 왔다. 그러나, 선박 저항의 큰 부분을 차지하는 마찰저항을 감소시키는 기술에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

접수일: 2003년 3월 15일, 승인일: 2003년 6월 4일

†주저자, E-mail: h-tkim@cnu.ac.kr

Tel: 1-734-763-8874

현재 선박에 적용 가능성이 큰 마찰저항감소법의 하나로 선체표면에 폴리머나 미소 기포를 주입하는 방법을 꼽을 수 있으며, 미국, 러시아, 일본, EU 국가들을 중심으로 이에 관련된 연구가 진행되어 왔다[Meng(ed.) 1998, Kasagi(ed.) 2001]. 특히, 미국과 러시아의 연구는 잠수함과 어뢰의 저항 감소와 같은 군사적 용도로 실용화된 것으로 알려져 있고, 일본에서는 미소기포 주입에 의한 저항 감소에 대한 실선 실험이 수행된 바 있다[Kodama 등 2002]. 최근에는 국내에서도 선박의 마찰저항 감소에 관한 연구가 시작되고 있다[장진호/김효철 1999, 김덕수 등 2002].

본 연구는 선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 개발하기 위한 기초 연구로서 폴리머 주입에 의한 마찰저항감소 효과를 실험을 통해서 확인하고, 주요 파라미터에 대한 마찰저항감소 효과의 변화를 조사하려는 목적을 가지고 있다.

## 2. 실험 장비 및 재료

실험은 충남대학교 선박해양공학과와 회류 수조와 본 연구를 위해 새로 제작된 마찰저항감소 실험 전용 터널을 사용하여 수행됐으며, 본 논문의 내용도 각각의 실험 장비에 대하여 나누어 기술하였다.

### 2.1 회류 수조

실험에 사용된 회류 수조(Circulating Water Channel, 이하 CWC)의 제원은 6,000×2,500×900mm이고, 관측부는 2,000×800×700 mm이며, 관측부 최대 유속은 1.5m/s이다. 본 실험을 위해 이차원 난류 경계층 내에 폴리머를 주입하면서 속도와 벽 마찰력을 측정할 수 있도록 제작된 기관(Fig.1)을 회류 수조 관측부에 설치하였다.

Fig. 2는 기관 상의 주요 측정 위치를 나타낸다.  $X=0$ 은 주입구(injection slot)로부터 122mm 하류를,  $Z=0$ 은 기관 폭(700mm)의 중앙을 나타낸다. 하류( $X$ 축) 방향으로 200mm 간격으로 측정하였고, 추가로  $X=-75$ mm 위치에서도 측정하였다.

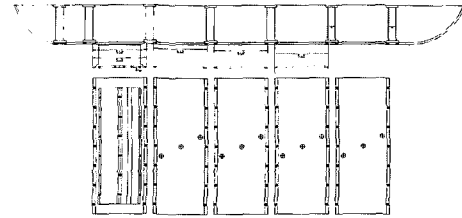


Fig. 1 Flat-plate base for polymer injection experiment in CWC

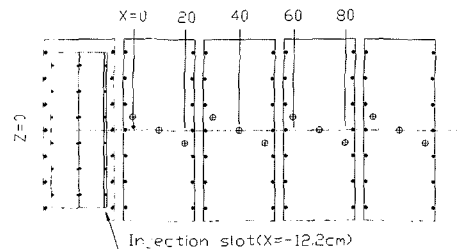


Fig. 2 Measuring positions for polymer injection experiment in CWC

### 2.2 마찰저항감소실험 전용 터널

마찰저항감소 실험을 위해 제작된 전용 터널(Drag Reduction Water Tunnel, 이하 DRWT)의 제원은 5,500×1,510×500mm이고, 관측부는 2,200×180×10mm이며, 관측부의 최대 유속은 12m/s이다. Fig.3은 전용 터널의 정면도를 간략하게 나타낸 것이다.

전용 터널은 관측부에서 완전히 발달한 난류 관유동을 형성시키고, 폴리머 수용액을 주입하면서 관 내부 표면의 마찰력 변화를 측정할 수 있도록 고안하여 제작하였다.

Fig. 4는 터널 관측부의 평면도를 보여준다. 관측부 상류에는 폴리머 수용액을 주입하기 위한 주입 구 유닛이 있고, 그 하류에는 마찰력계를 설치하기 위한 구멍들이 300mm 간격으로 배치되어 있다.

폴리머 수용액 주입장치는 폴리머 수용액 용기, 정격 모터, 유량계, 주입구 유닛 등으로 구성된다. 폴리머 수용액 용기는 300×500mm(직경×높이)의

스테인리스 실린더로서, 모터를 사용하여 피스톤을 원하는 속도로 수직 방향으로 이동시킴으로써 폴리머 수용액을 일정한 유량으로 주입할 수 있도록 하였다. 사용된 정격 모터는 Panasonic 사 제품으로 최대 80mm/min의 이송 거리를 가진다. 유량계는 Dwyer 사의 S37J 모델로 최대 3ℓ/min 까지 작동한다. 주입구 유닛은 상, 하 두 부분으로 구성되고 주입구 간격은 1mm이며 중심선은 관측부 상판의 안쪽 면과 12.5°의 각을 이룬다(Fig. 5).

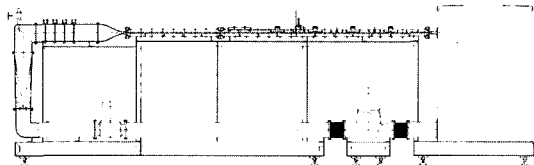


Fig. 3 Sketch of water tunnel designed for friction-drag reduction experiment (DRWT)

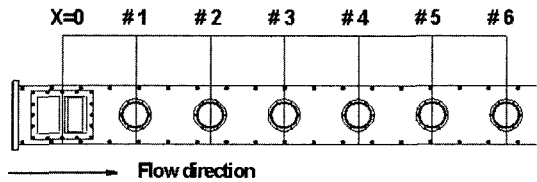


Fig. 4 Test section and sensor locations

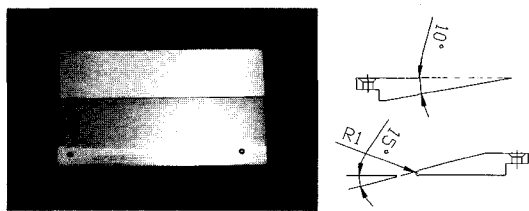


Fig. 5 Polymer injection slot unit

### 2.3 계측 기기

회류 수조에서는 외경이 3.2mm(1/8인치)인 피토 관과 외경이 1.6mm(1/16인치)인 프란틀 관을 사용하여 계측하였고, 전용 터널에서는 용량 500gf의 마찰력계를 사용해서 마찰력을 직접 계측하였다.

Fig. 6은 회류 수조에서 사용된 피토 관과 프란틀 관을, 그리고 Fig. 7은 전용 터널에서 사용된 마찰력계를 보여준다.

마찰력계는 관측부 유동의 압력 구배에 영향을 받지 않고 마찰력의 계측이 가능하게 설계하여 제작하였으며, Fig. 8과 같이 간섭 하중을 부가하면서 교정(calibration)을 수행해서 이를 확인하였다.

Fig. 9는 본 실험에 사용된 마찰력계의 전형적인 교정 결과를 보여 준다.

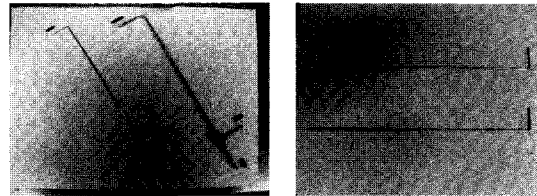


Fig. 6 Pitot tubes and Prandtl tubes

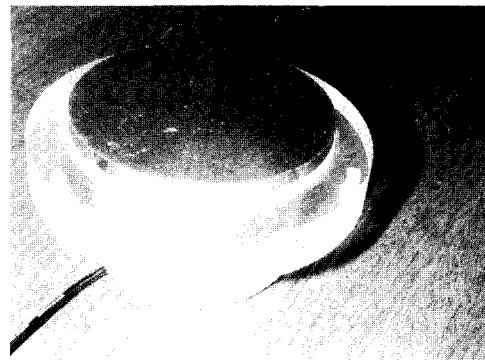


Fig. 7 Skin friction sensor

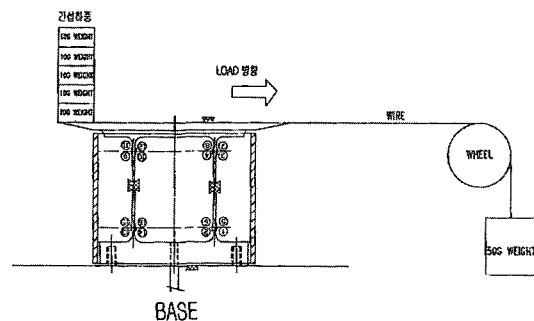


Fig. 8 Calibration of skin friction sensor

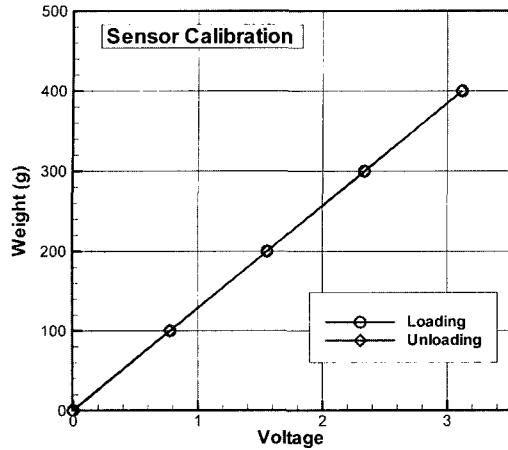


Fig. 9 Skin friction sensor calibration data

2.4 실험용 폴리머

마찰저항감소에 사용할 폴리머가 가져야 할 주요 특성은 고분자량 ( $MW=10^6 \sim 10^7$ )일 것, 선형구조일 것, ppm 단위의 저농도에서 효과가 있을 것, 용매에 잘 녹고, 저항감소효과의 저하가 적을 것 등이다[김종엽 1996]. 본 연구에는 미국과 러시아의 연구에 많이 사용된 polyethylene oxides(PEO) 분말로 폴리머 수용액을 만들어 사용하였다.

3. 실험 결과 및 해석

3.1 회류 수조 실험 결과

3.1.1 기관 상의 난류 경계층

회류 수조 실험은 관측부 평균 유속 1m/s에서 수행되었다. 먼저 1/8인치 피도관을 사용하여 기관 상의 정해진 위치에서 경계층 내부의 속도 분포(velocity profiles)를 계측하였다.

Fig. 10은 기관 상에서 계측된 속도를 벽 좌표(wall coordinates)를 사용하여 나타낸 것으로서 난류 경계층의 log-law를 만족함을 보여 준다.

Fig. 11은 계측된 속도로부터 추정된 경계층 두께와 프란틀관을 사용해서 계측한 마찰계수이다. 하류로 가면서 마찰계수는 조금씩 감소하고, 경계층 두께는 증가하며, 형상계수(shape factor)는 1.48로서 평판 난류 경계층에 비해 약간 크게 나타났다.

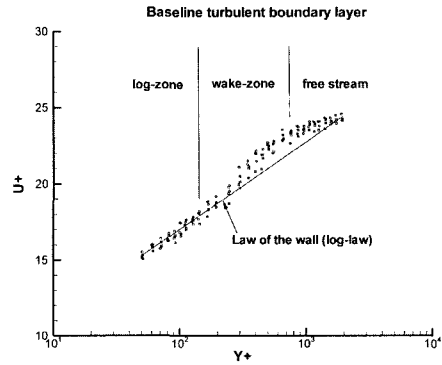


Fig. 10 Measured velocity profiles

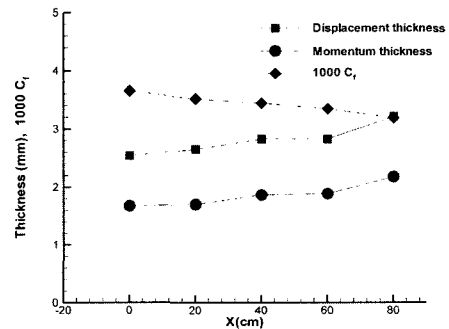


Fig. 11 Friction drag coefficient and displacement and momentum thickness

3.1.2 기관의 마찰 저항 감소

기관의 마찰 저항은 1/16인치 프란틀관을 기관 바닥에 붙여서 계측한 동압과 정압의 차이를 경험적인 방법[Patel 1965]으로 해석하여 도출하였다. 폴리머 주입에 의한 마찰저항감소 효과를 조사하기 위해 200ppm과 500ppm PEO 수용액을 사용해 실험을 수행했고, 폴리머를 주입한 경우에도 동일한 방법으로 마찰저항을 도출할 수 있다고 가정하였다.

Fig. 12는 200ppm 수용액에 대한 결과를 보여 준다. 분당 1ℓ로 주입한 경우에는 마찰저항감소 효과가 나타나지 않았다. 분당 주입량이 2ℓ인 경우에는, 대부분 4% 이상의 저항감소를 나타냈고, X=-7.5에서는 약 7%의 저항 감소가 계측되어, 주입구에 가까운 위치에서 더 큰 저항 감소가 발생함을 알 수 있다. X=20(cm) 위치에서는 저항감소

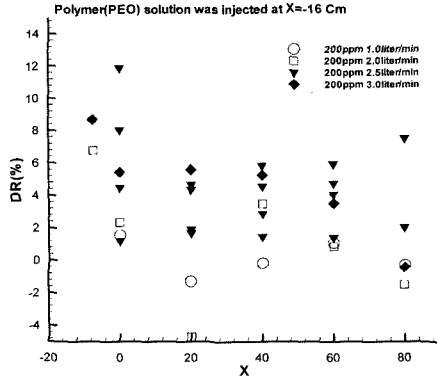


Fig. 12 Drag reduction on flat-plate boundary layer by 200ppm PEO solution

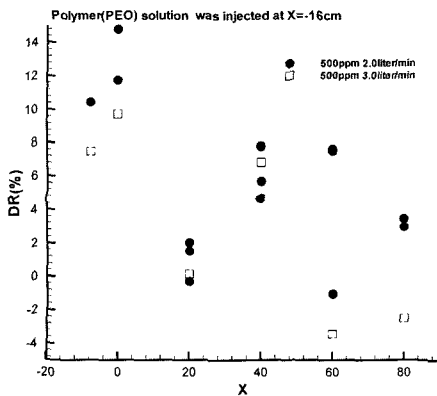


Fig. 13 Drag reduction on flat-plate boundary layer by 500ppm PEO solution

가 나타나지 않았는데, 이 위치에서 기판이 국부적으로 1~2mm 처지게 설치되어 주입된 폴리머 수용액이 경계층 내의 유효 영역을 벗어나 저항감소가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 분당 주입량이 2.5l인 경우에는 최대 12%의 마찰저항감소가 나타났으며, 주입량 3l의 경우는 2.5l와 거의 유사하다.

Fig. 13은 500ppm 수용액에 대한 결과를 보여 준다. 분당 2l로 주입한 경우는, 200ppm 수용액을 동일한 유량으로 주입한 경우보다 대체로 더 큰 저항감소를 나타냈다. X=0.0에서 최대 저항감소(약 15%)가 발생했고, 하류로 가면서 저항감소 효과가 차츰 줄어든다.

본 실험에서 계측된 마찰저항감소는 다른 연구 [Tiederman 등 1985]에 보고된 것(최대 25%) 보다 많이 작은 편이다. 분당 주입량을 3l로 늘려도 저항은 더 감소하지 않았으며, 이에 대해서는 추후 실험의 정도를 개선하여 재조사할 필요가 있다.

3.2 전용 터널 실험 결과

본 실험에서는 200, 300, 400ppm의 폴리머 수용액을 사용하여 계측을 수행하였다. 각 폴리머 수용액의 주입량을 변화시키면서 관측부 상판 안쪽 면의 마찰력을 계측하고 이를 폴리머 수용액을 주입하지 않은 경우의 마찰력과 비교함으로써 각각의 경우에 대한 마찰저항감소를 조사하였다.

3.2.1 관측부 유동의 속도 분포

관측부 유동이 완전히 발달한 난류 관유동임을 보이기 위하여 관측부 중앙 단면에서 피토토 계측한 유속을 Laufer의 실험자료에 근거해서 만든 Pai의 경험식[White 1990]의 속도분포와 비교해서 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 h는 관측부 단면의 1/2 깊이(5mm),  $U_0$ 는 관측부 중앙의 유속이다.

Fig. 15는 관측부 유속 11m/s일 때, 폴리머 수용액을 주입하지 않은 상태에서 마찰력 계를 사용해 관측부 상판의 마찰저항을 계측한 결과이다. 완전히 발달된 난류 관유동의 벽마찰 계수는 일정해야하지만 계측된 마찰계수는 약간 증가하는 경

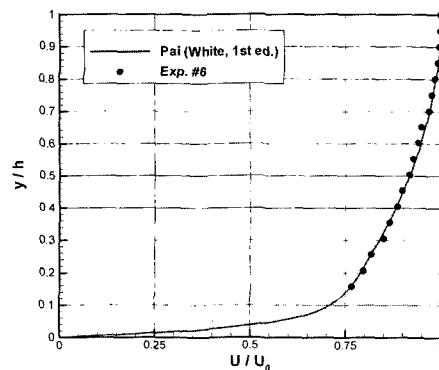


Fig. 14 Measured velocity profiles

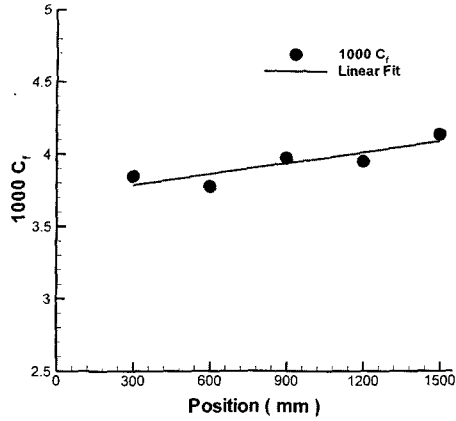


Fig. 15 Measured friction drag coefficient along fully-developed channel wall

향을 나타냈으며, 이는 마찰력 계를 설치하는 측정부 상판 구멍의 미세한 차이 때문으로 추정하고 있다. 그러나, 본 실험의 주된 목적이 폴리머를 주입한 경우와 주입하지 않은 경우와의 마찰력 차이를 계측하는 것이기 때문에 기준 마찰력 값의 작은 차이는 크게 문제가 되지 않는 것으로 판단하였다.

3.2.2 관측부 상판 마찰 저항 감소

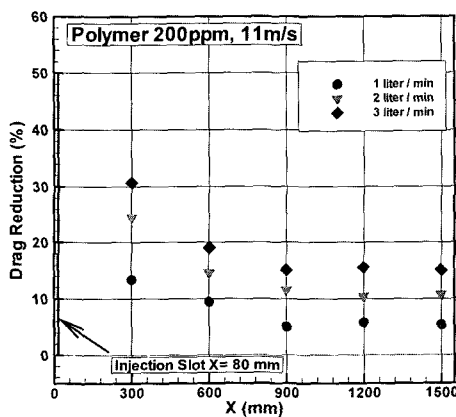


Fig. 16 Drag reduction on fully-developed channel flow by 200ppm PEO solution

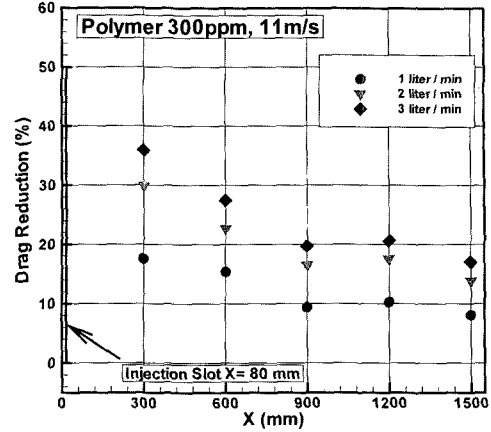


Fig. 17 Drag reduction on fully-developed channel flow by 300ppm PEO solution

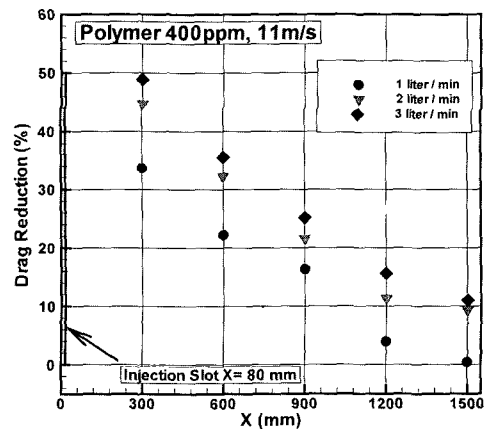


Fig. 18 Drag reduction on fully-developed channel flow by 400ppm PEO solution

Fig. 16은 관측부 유속 11m/s일 때, 200ppm의 폴리머 수용액을 분당 1~3ℓ까지 주입하면서 관측부 상판의 마찰저항 변화를 계측한 결과이다. 최대 31%의 마찰저항감소가 나타났으며, 주입 유량을 늘리면 마찰저항감소 효과가 증가하고, 주입구에서 멀어질수록 마찰저항감소 효과가 감소한다.

Fig. 17은 300ppm 수용액에 대한 결과이다. 계측 결과는 200ppm의 경우와 유사한 경향을 나타내고 감소량은 대체로 5%정도 좀더 증가하였다.

Fig. 18은 400ppm 수용액에 대한 결과로서, 폴리머 수용액의 농도가 높으면 마찰저항감소 효과도 커진다는 것을 보여주며, 주입 유량이 분당 3ℓ 인 경우, 주입구로부터 300mm 떨어진 하류에서 마찰저항이 최대 48%까지 감소하였다.

#### 4. 결론

선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 개발하기 위한 기초 연구로서 폴리머 주입에 의한 마찰저항 감소에 대한 실험을 수행하였다. 평판 난류 경계층과 완전히 발달한 난류 관유동을 대상으로 폴리머 수용액의 주입에 따른 벽 마찰력의 감소를 계측함으로써 폴리머 수용액의 주입에 의한 마찰저항감소 효과를 확인하였고, 폴리머 수용액의 농도, 주입량 그리고 주입구로부터의 거리와 같은 주요 파라미터에 대한 마찰저항감소 효과의 변화를 조사하였다.

본 연구 결과, 폴리머 주입에 의해서 최대 50%에 가까운 마찰저항감소가 계측되었으며, 이 기술을 선박에, 특히 순간적인 최대 속도 증가가 중요한 의미를 갖는 잠수함과 어뢰 등에 실용화한다면, 이들 운반체의 저항을 크게 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 앞으로 좀더 다양한 조건에서 실험을 수행하여 자료를 확보하고, 폴리머 주입에 의한 마찰저항감소 메커니즘을 규명하는 연구가 필요하다.

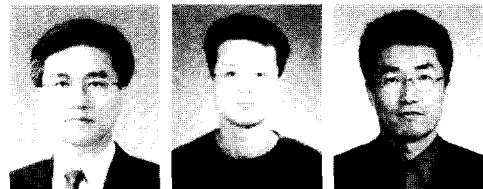
#### 후 기

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 26권, 제 2호, pp. 1-12, 1989.
- 장진호, 김효철, "선저에 부착된 공기 공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 2호, pp. 1-8, 1999.
- 김덕수, 김우전, 김형태, "폴리머와 미소기포 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 연구", 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 136-139, 2002.
- 김종업, "고분자 첨가제의 저하현상에 관한 연구", 충남대학교 보고서, pp. 4-29, 1996.
- James C.S. Meng(Symposium Chairperson), *Proceedings of the International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Newport, Rhode Island, 1998.
- N. Kasagi(Chair of Organizing Committee), *Proceedings of the 2nd Symposium on Smart Control of Turbulence*, Tokyo, Japan, 2001.
- 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.
- W.G. Tiederman, T.S. Luchik and D.G. Bogard, "Wall-layer Structure and Drag Reduction", *JFM*, Vol. 156, pp. 419-437, 1985.
- V.C. Patel, "Calibration of the Preston tube and limitations on its use in pressure gradient," *JFM*, Vol. 23, pp. 185-208, 1965.
- F.M. White, *Viscous Fluid Flow*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1990.



< 김 형 태 > < 김 덕 수 > < 김 우 전 >