論 文

大 韓 造 船 學 會 誌
第25卷 第3號 1988年 9月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 25, No. 3, September 1988

# 풍동에서 열선유속계를 이용한 선미주위 점성유동의 실험적 연구

강신형*, 유정열*, 손봉룡**, 이승배***, 백세진***

# Experimental Study on Viscous Flows over Ship Sterns by Using the Hot-wire Anemometer in the Wind-tunnel

by

S.H. Kang*, J.Y. Yoo*, B.Y. Shon**, S.B. Lee*** and S.J. Baik***

## Abstract

Three-dimensional turbulent flows over ship sterns are measured by using the hot-wire anemometer and static holes in the wind tunnel. A conventional stern and a barge-type stern are adopted for the present study. Three components of mean velocities, pressures on the hull and six components of Reynolds stresses are measured.

Longitudinal velocity contours are more parallel to the hull surface and weak bilge vortices appear on the barge type stern rather than the conventional stern. Those viscous flow patterns may have close relations to improvements of the resistance and propulsion performance, which have been verified in the towing tests. Measured data files are valuable for the ensuing numerical studies.

## 1. 서 론

선형개발 특히 선미선형개발은 주로 저항성능 관점에서 이루어지고 이와 병행하여 추진성능 등이 고려된다. 선미의 형상은 설계 제한조건이 허용하는 한도 내에서는 우선 저항 추진성능이 우수하도록 하여야 한다. 소위 선미 벌브와 같이 조파저항 측면에서 그동안 여러가지 연구가 수행되었으나 선미 선형의 개발은 점성저항 측면에서 다루어져야 되리라 생각된다. 더구나 추진효율을 고려한 비대칭 선미의 연구 등 관련된 연구에서도 선미에서의 점성유동에 대한 실험 및 이론적 연구의 필요성이 더욱 요구되고 있다.

특히 최근 여러 연구에서 선미의 점성유동계산을 통한 추진기와 선형의 상호작용의 규명 등은 앞으로 관련 분야의 발전에 많은 가능성을 보여주고 있다. 이러한 선미에서의 점성유동의 이론 및 수치계산 차원의 연구를 위해서는 여러가지 형태의 선미에서의 3차원 난류 유동 실험자료가 절실히 요구되고 있다. 이러한 이유로 강신형 등[1]에서는 3공피토튜브를 이용하여 수학선형선미 주위의 경계층 유동을 계측한 바 있다. 그러나 열선유속계나 레이저유속계를 이용한 난류를 포함한 선미에서의 유동 자료는 그리 많지 않다.

본 논문에서는 강신형 등[2,3]의 열선유속계를 이용

접수일자 : 1988년 3월 18일, 재접수일자 : 1988년 6월 4일
* 정회원, 서울대학교 공과대학
** 정회원, 대한조선공사
*** 서울대학교 대학원

한 3차원 난류 유동 계측 및 선미에서의 유동계측에 관한 연구의 일부와 계속된 연구결과를 다루고자 한다. 위 연구에서는 X형 및 경사진 열선유속계를 이용하여 실험정도의 향상 및 검증에 중점을 두었다. 이 계측 방법을 이용하여 본 논문에서는 전형적으로 서로 다른 두가지 형태의 단축선 선미형상에 대하여 점성유동특성을 풍동에서 계측하였다. 연구의 첫째 목적은 두 형태의 선미유동 특성 자체를 관찰하여 저항특성과의 관련성을 고찰하기 위한 것이고, 다음 목적은 추후 수치계산에 의한 유동예측에 관한 연구의 기초 자료로써 활용하는데 있다.

## 2. 모형의 선정

본 연구에서는 대한조선공사에서 개발한 37K PROBOCON을 기본 모형으로 채택하였다. 위 모델은 SSPA에 수조실험을 의뢰해 개량되었으며, 원래의 설계에 근사한 Model 2464-B와 상당히 개량된 선형 2364-D를 택하여 본 연구에서는 각각 Model A, Model B라고 하였다[4, 5].

Model A는 흔히 볼 수 있는 선형을, Model B는 소위 barge형 선미를 가지고 있으며 자세한 body plan을 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. Model B는 Model A보다 수조 실험결과 Fig. 3에서와 같이 점성 저항계수($C_v$)에서 약 10%, 잉여 저항계수($C_r=C_t-C_v$)에서 약 35% 정도의 감소를 보이고 있다. 또한 Model A와 Model B의 형상 계수가 각각 0.37 및 0.23이므로 점성 저항의 대부분은 형상 저항의 감소로 이루어 지고 있다. 따라서 점성유동의 관점에서 수치해석 및 실험적으로 자세히 연구할 충분한 의미를 갖는다.

Fig. 4에는 Model A 및 B의 이중모형에 대한 선미에서 Hess and Smith의 방법에 의한 포텐셜 유동 계산 결과를 비교하였다. 계산 결과에 대한 설명은 뒤로 미룬다.

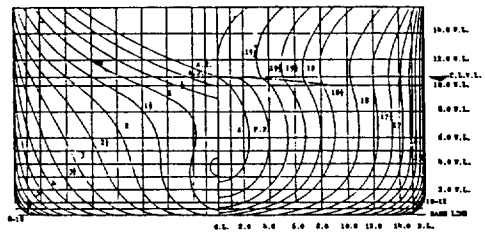

**Fig. 1** Body plan (Model A)

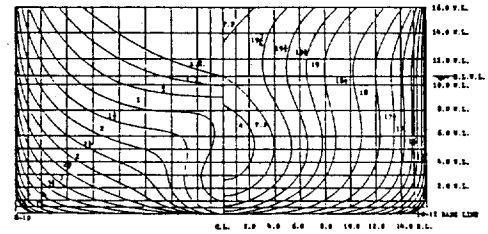

**Fig. 2** Body plan (Model B)

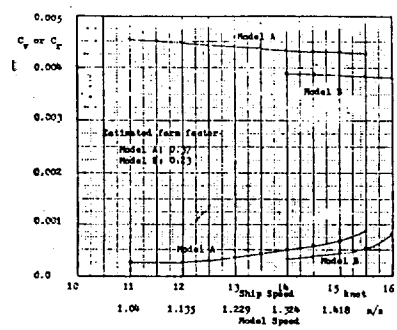


**Fig. 3** Viscous and residual resistance coefficients of Model A and B in towing tests

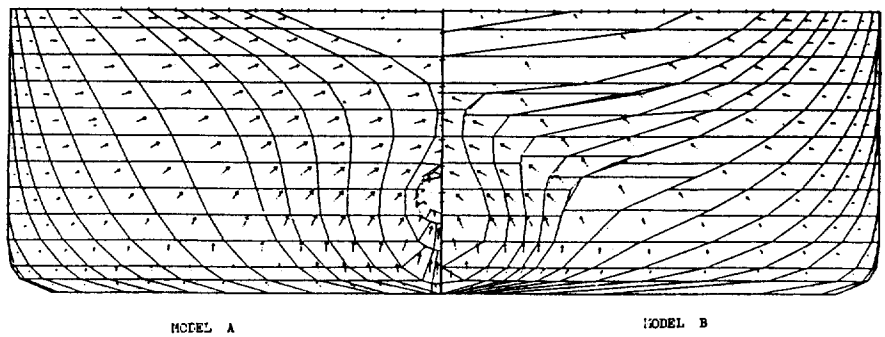


**Fig. 4** Calculated velocity vectors around sterns

## 3. 실험 장치 및 실험 방법

실험에 사용된 모형은 180m의 실선을 길이 1.2m, 폭 0.219m로 축소하여 FRP를 사용하여 제작하였다. 물에 잠기는 부분만을 위아래로 붙여 대칭성을 유지하였다. 풍동내에 설치하기 위해 모형 선수부터 선미까지 20mm의 스테인레스 축을 설치하였고, 모형 앞과 뒤의 축을 풍동내에 고정하여 모형의 회전이 가능하게 하였다.

모형속에는 scanni-valve를 설치하여 풍동밖에서 제어하도록 하였다. 모형의 station 16, 10, 4의 각 각 상하좌우 네 곳에 정압 구멍(1mm$\phi$)을 뚫어 풍동 내에서 모형 중심을 잡는데 이용하였다. 그리고 모형 선미에는 Model A의 경우 ST. 4에 4개, ST. 3에 5개, ST. 2.5에 5개 ST. 2에 5개 그리고 ST. 1.5에 3개 등 총 34개의 압력구멍을 냈으며, Model B에서는 ST. 5에 4개, ST. 4에 4개, ST. 3에 6개, ST. 2.5에 5개, ST. 2에 3개 그리고 ST. 1.5에 1개 등 모두 32개의 구멍을 뚫었다.

풍동의 단면은 90cm×90cm이고 풍속은 35.1m/s로 고정하였다. 이때 모형 길이에 대한 Reynolds수는 $2.5\times10^6$이다. 또한 풍동벽의 영향을 보기 위해 풍동내에서 모형을 0, 45, 90도로 회전시켜서 정압을 체크하였다. 이와같이 모형을 설치한 후 각 정압 구멍으로부터 scani-valve를 이용하여 차례로 압력을 받아들였으며, 그 다음 열선유속계를 이용하여 3차원 속도 분포를 계측하였다. 여기서 $\theta=0°$ 선은 keel line이 되고 $\theta=90°$ 선은 water line이 된다. 주로 X형 열선을 사용하여 실험하였으며 프로우브는 마이크로 컴퓨터에 의해 제어되는 스텝모터에 의해 회전 및 이송되었다. 즉 프로우브를 벽 가까이 특정위치에 근접시킨 후 경계층 밖으로 이송하며 측정을 하였다.

계측을 수행한 단면의 위치는 Model A의 경우 ST. 10, ST. 3, ST. 1이며 Model B는 ST. 10, ST. 4, ST. 3, ST. 2, ST. 1.5, ST. 1에서 실험을 행하였다. 축을 중심으로 고정된 원통좌표계$(r,\theta,x)$로 프로우브를 이송하였다. 즉 각 단면에서 probe를 위아래로만 이송시키고 모델을 축 중심으로 회전시켰다. 각 단면에서 속도계측을 수행한 각도 $\theta$는 ST. 10에서 0°, 90°, ST. 4에서 0°, 30°, 60°, 90° 그리고 나머지 단면에서는 10°간격으로 0°에서 부터 80°까지 9간격으로 계측을 하였다. 각 위치에서 얻은 열선유속계 출력신호를 디지탈 신호로 바꾼 후 마이크로 컴퓨터로 받아들여 마그네틱 디스켓에 저장하여 데이타를 처리하였다. 열선에 의해서는 평균 속도성분과 6개의 Reynolds 응력을 계측하였다. 본 연구에서 채택한 난류특성치의 계측에 관한 내용은 강신형 등[3]에 설명되었다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

선체표면에서 계측된 압력 분포를 포텐셜 계산 결과와 비교하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 두 모델에서 ST. 3 부근이후에 선미로 가면서 압력이 회복되어가나 모델 B에서 약간 더 천천히 회복됨을 보여준다.

선미 부분을 제외하고는 포텐셜유동 이론에 의해 계산된 압력 분포와 비교적 잘 일치하고 있으므로 실험은 합리적으로 수행되었음을 알 수 있다. A, B모델 모두 ST. 16, ST. 10에서 포텐셜 결과보다 풍동의 blockage 영향을 감안할 때 2% 정도 크게 예측하고 있다. 그리

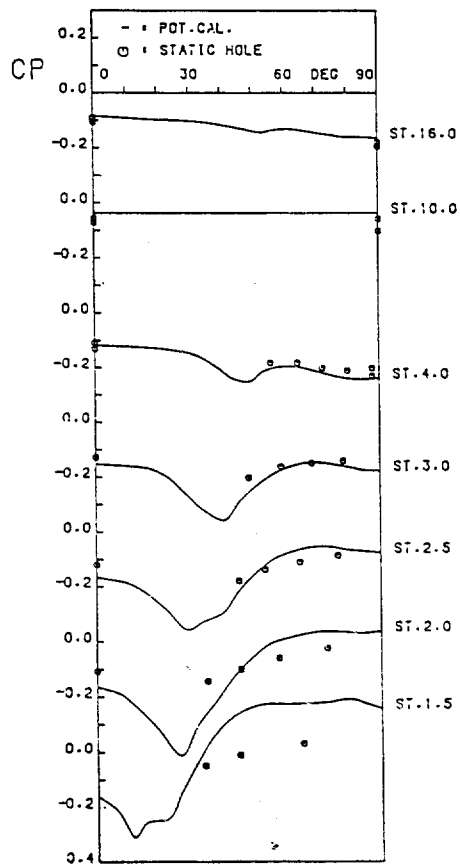


**Fig. 5** Measured and calculated pressure distributions on the model A

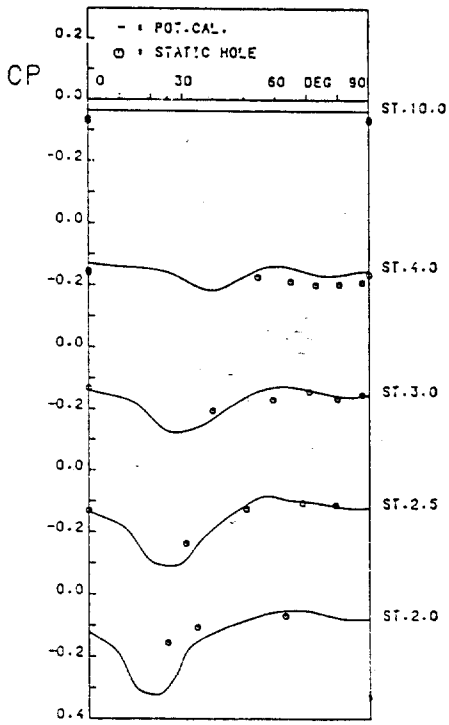


**Fig. 6** Measured and calculated pressure distributions on the model B

고 A모델의 경우 ST. 2.5까지, B모델은 ST. 2까지 포텐셜계산 결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 7에서 Fig. 13까지는 $x$방향의 등속도선과 단면에서의 속도벡터를 나타내었다. 그리고 평균유동속도는 자유유동속도 $U_0$로 무차원화 하였다.

계측된 평균속도 $U$와 난류량들을 살펴보면 선미로 갈수록 두 모델 모두 $\theta=50°$, 60°, 70° 부근에서 일반적인 두꺼운 난류경계층을 형성하고 있음을 알 수 있다. 사용된 X형 및 경사열선은 일반적인 유동계측용 프로우브인데다 프로우브를 회전시켜야 하므로 벽 가까이 계측하는 것이 용이하지 않았다. 그러나 본 실험의 목적이 정확한 경계층내의 유동계측이 아니고 선미에서의 경계층 분포를 계측하려 했으므로 큰 지장이 없다고 판단된다. 경계층이 매우 얇은 위치에서는 자유유동 속도의 80% 정도까지 그리고 경계층이 매우 두꺼워져 수 센티미터에 이르는 경우에는 자유유동속도의 50% 이하까지도 계측할 수 있었다.

먼저 평균유동속도의 분포를 살펴보면 $x$방향의 등속도선으로 보아 keel line을 따라 경계층이 얇게 형성되고 중앙부에 경계층이 급격히 증가함을 볼 수가 있다.

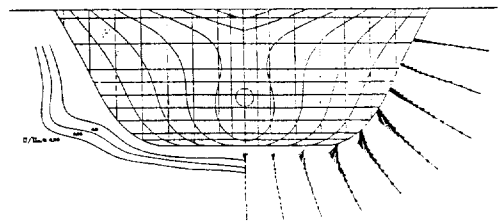

**Fig. 7** Measured main stream contours and cross flows at the station 3 of the mode A

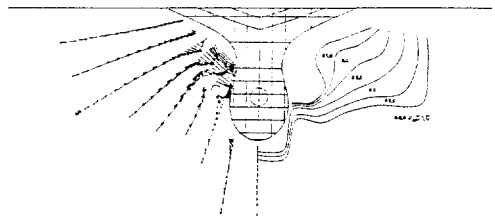

**Fig. 8** Measured main stream contours and cross flows at the station 1 of the model A

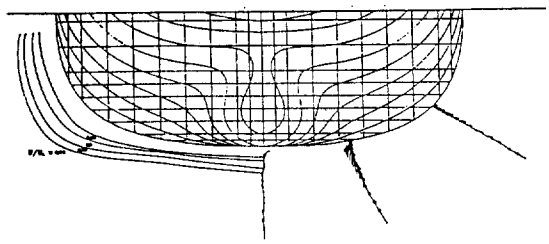

**Fig. 9** Measured main stream contours and cross flows at the station 4 of the model B

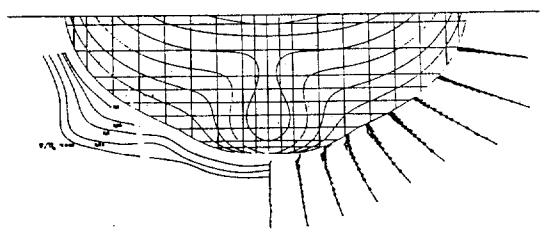

**Fig. 10** Measured main stream contours and cross flows at the station 3 of the model B

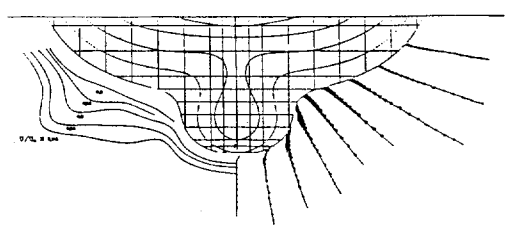

**Fig. 11** Measured main stream contours and cross flows at the station 2 of the model B

이는 선체의 심한 곡률 변화 등으로 일반 선미에서 보편적으로 나타나는 현상이다. Fig. 7과 Fig. 10을 살펴보면 ST. 3에서 유동 분포가 거의 비슷함을 알 수가 있다. 즉 $\theta=60°$을 다르는 선에서 경계층이 두꺼워지고 cross flow가 거의 없이 유동이 완만함을 알 수 있다.

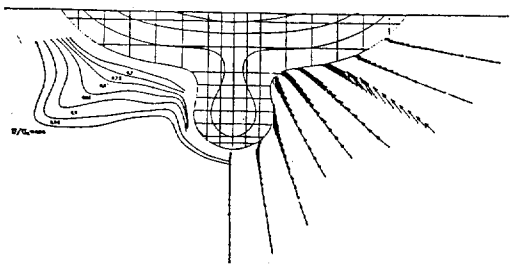

**Fig. 12** Measured main stream contours and cross flows at the station 1.5 of the model B

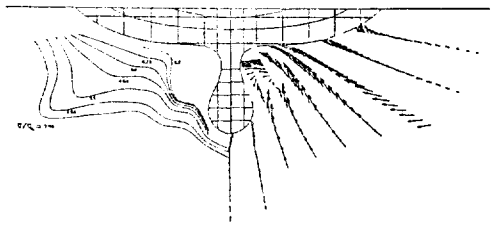

**Fig. 13** Measured main stream contours and cross flows at the station 1 of the model B

그러나 Fig. 8과 Fig. 13에서 볼 수 있드시 선미에서 두 모델 간의 유동 분포는 상당한 차이를 보이고 있다. 역압력구배로 생긴 유동박리로 인한 보오텍스 인지 혹은 빌지보오텍스 인지는 정확한 판단이 어렵지만, 커다란 보어텍스가 모델 A에서 나타나고 있음을 볼 수가 있다. 모델 B에서는 이러한 종류의 와류가 매우 약하게 나타나고 있으며 유동이 매우 완만하게 이루어지고 있다고 생각된다. 이러한 점성유동의 형태는 Fig. 4의 포텐셜유동 계산결과에서 볼 때 모델 B의 경우 대부분의 유동이 선미의 선저로 완만하게 흐르기 때문에 와류의 강도가 작아지는 것이라고 생각된다. 그러나 이러한 점성유동이 모형스케일이 아니고 실선의 경우 어떻게 되리라고는 쉽게 짐작하기가 어렵다. 수조실험의 경우 Reynolds수는 $8.5\times10^6$이고 본 풍동실험에서는 $2.5\times10^6$임을 볼때 수조실험에서의 유동과 크게 다르리라고는 생각되지 않는다. 추후 선미 후류계측과 전체 저항계수의 측정이 이루어진다면 보다 직접적인 비교가 가능하리라고 생각된다.

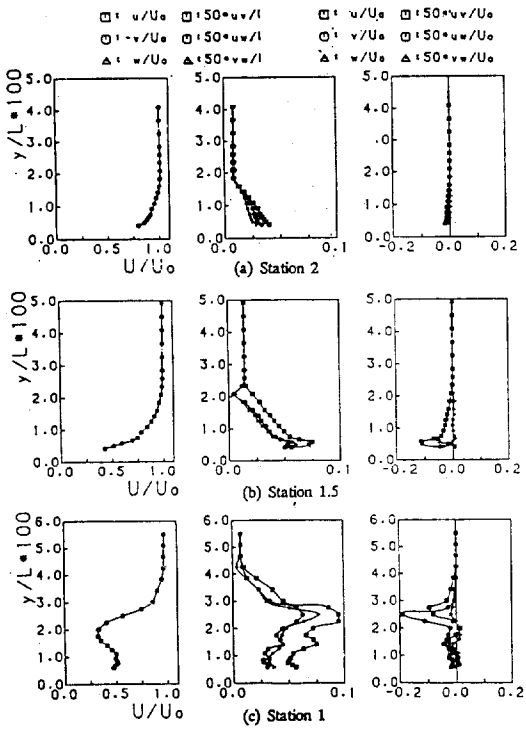


**Fig. 14** Measured Reynolds stresses on the model A; $\theta=30°$

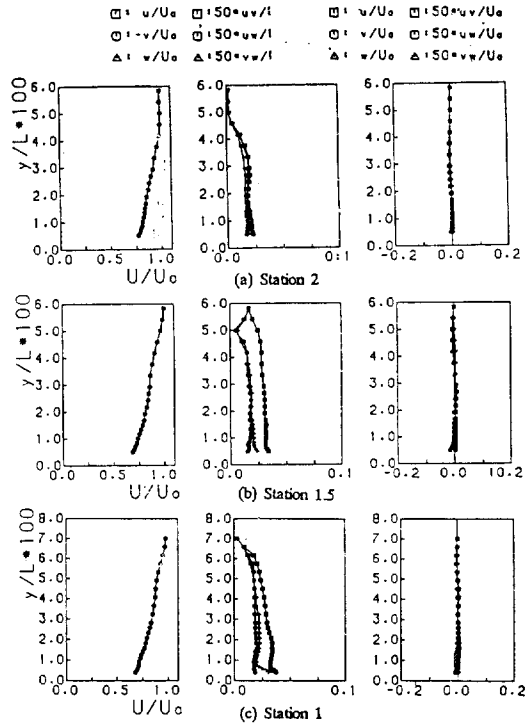


**Fig. 15** Measured Reynolds stresses on the model B; $\theta=60°$

계측된 국부유동 중 모형 B에서 $\theta=30°$와 $\theta=60°$인 경우, 선미에서의 유동 상태를 각각 Fig. 14와 Fig. 15에 대표적으로 나타내었다. $\theta=30°$은 본 실험의 경우 유동의 3차원성이 비교적 크고 선미에서는 보오텍스가 형성되는 각도이다. 점성유동층이 전반적으로 심하게 두껍지는 않기 때문에 일반적인 경계층내의 난류특성을 보여주고 있다. $\theta=60°$의 경우에는 3차원성보다도 점성유동층의 두께가 하류에서 급격히 증가되는 위치이다. Fig. 15에서 나타난 바와 같이 경계층의 두께에 따라 난류강도는 상당히 균일한 분포를 보여줌이 특징이라고 할 수 있다. 모형 A 및 B 주위의 계측된 실험데이타는 이승배[5]의 논문에 자세히 수록되어 있다. 이러한 유동실험데이타는 앞으로 수치해석에 의한 유동시뮤레이션의 결과를 검증하고 관련된 이론의 개발을 위하여 긴요히 활용되리라 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 열선유속계를 이용하여 풍동에서 선미주위의 3차원 난류유동을 계측하였다. 모형은 전형적으로 서로 상이한 두가지 선미형상이 채택되었다. 두가지 모형 선미에서의 축방향 평균속도는 상당히 상이하였다. 소위 barge형 선미의 경우 유동이 선체바닥을 따라 완만히 흐르고 bilge vortex의 크기가 감소하였다. 이러한 점성유동의 차이점이 두 모형의 점성저항의 차이에 크게 영향을 주리라 생각된다. 특히 평균속도 분포는 프로펠라 평면에서 추진기와의 상호작용에도 많은 영향을 미치리라고 유추된다. 본 연구를 통해 확보된 실험데이타는 앞으로 수치해석에 의한 유동계산방법의 검증 및 발전에 활용될 수 있으리라 생각된다.

## 후 기

본 연구는 대한조선공사와 서울대학교의 공동연구로 수행되었다. 이에 김근배 상무, 최병문 과장, 어민우씨 및 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

[1] 강신형, 이택식, 이근형, "수학선형 선미에서 두꺼운 난류경계층의 해석 및 실험(Ⅰ. 유동계측)", 대한기계학회 논문집, 9(3), pp.269-273, 1985.

[2] 강신형, 유정열, 백세진, 이승배, "선체주위의 점성유동 계측에 관한 연구", 서울대학교 공과대학 부속 생산기술연구소 연구보고서, 1986.

[3] 강신형, 유정열, 백세진, 이승배, "열선유속계를 이용한 3차원 유동의 계측방법", 대한기계학회 논문집, 11(5), pp.746-754, 1987.

[4] 이승배, "열선유속계에 의한 선미에서의 3차원 난류유동의 계측", 서울대학교 대학원, 석사학위 청구논문, 1987.

[5] 강신형, 오건세, 이승배, "점성유동 예측에 의한 선미선형 설계에 관한 연구", 서울대학교 공과대학 부속 생산기술연구소 연구보고서 RIIS87-92, 1987.