

## 초고속선 점성유동

김 형 태 <충남대학교선박해양공학과 교수>

### 1. 머리말

초고속선에 관련된 점성유동은 저항성능 향상과 운항자세 제어를 위해 사용되는 다양한 선체부가물의 저항 예측과 초고속선에 많이 사용되는 물분사 추진장치 입구 형상의 설계 그리고 임펠러에 이르는 덕트 유동의 예측을 중심으로 관심을 받아왔다. 본 소고에서는 통상적인 선박의 경우와는 구별되는 초고속선 고유의 점성유동 특성에 관하여 간략히 논의하기로 하고 내용을 크게 선체-부가물 점성유동과 물분사 추진장치에 관련되어 있는 덕트유동으로 나누어 기술하였다.

### 2. 선체-부가물 점성 유동

초고속선에는 다양한 선형이 사용되기 때문에 활주선, 카타마란 및 소수선면 쌍동선(SWATH), 수중익선, 표면효과선(SES) 그리고 복합지지선에 대하여 차례로 나누어 논의하였다.

#### 2.1 활주선

활주선의 선형은 날카로운 차인(hard chine) 또는 단(step) 그리고 트랜섬(transom)을 갖는 경우가 대부분이다. 활주상태의 선체저항은 선저에 수직 방향으로 작용하는 양력에 기인하는 압력저항과 선저 압력면과 그 앞의 스프레이 면에 점선방향으로 작용하는 점성저항 성분으로 나눌 수 있으며, Fig. 1은 이러한 저항성분의 트림각에 따른 변화를 나타내고 있다[1]. 활주선에는 저항을 줄이고 안정된 자세를 유지하도록 스프레이 레일(spray rail)과 트랜섬 웨

지(transom wedge) 등의 부가물이 흔히 사용된다. 선체-부가물의 점성저항은 주로 모형시험으로 추정하고 모형시험 결과는 축척 효과를 피할 수 없기 때문에 이의 영향을 정확히 추정하는 것이 매우 중요하다. Fig. 2는 기하학적 상사모형에 대한 스프레이 패턴의 축척 효과를 보여준다[2].

#### 2.2 카타마란과 소수선면 쌍동선(SWATH)

카타마란은 쌍동선으로 각 성분동체의 선형은 V형 단면에 트랜섬 선미를 갖는 활주 선형이 주로 사용되어 왔다. 따라서 선체-부가물의 저항특성은 활주선의 경우와 큰 차이가 없으나 동일한 배수량의 단동선보다 침수 표면적이 크기 때문에 저속에서 저항성능이 나쁘고 활주속도에서 활주 성능의 저하가 나타난다.

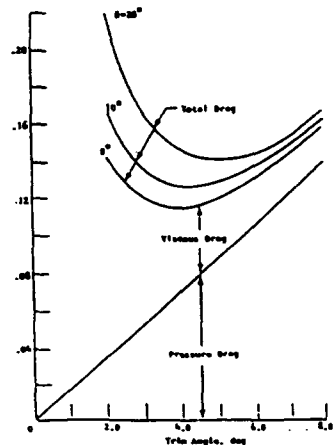


Fig. 1 Variation of drag-lift ratio for prismatic planing surfaces

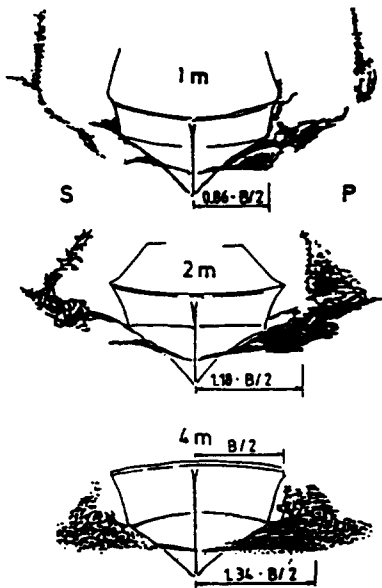


Fig. 2 Spray patterns of geosim models

SWATH 역시 쌍동선이지만 세장비가 큰 회전 타원체 형상의 두 물수동체가 한개 이상의 얇은 스트럿에 의해 물위의 상자형 갑판에 연결된 선형으로 선박의 중동요를 줄이기 위해서 통상 동체에 제어판을 붙인다. Fig. 3과 같이 동일한 배수량의 단동선보다 약 60% 큰 침수 표면적을 가지며 이에따라 마찰저항도 크게 증가한다[3].

한편, 쌍동선에서 각 성분동체의 간섭이 점성저항에 미치는 영향은 매우 작다.

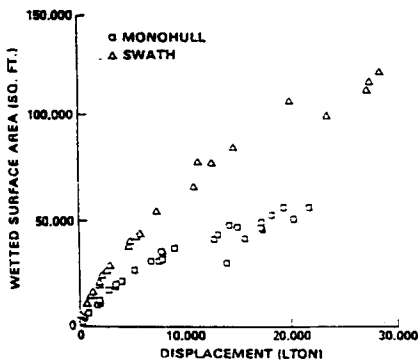


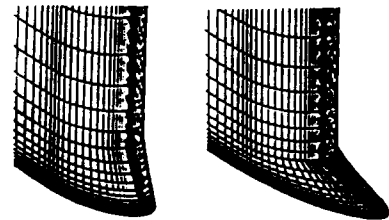
Fig. 3 Wetted surface area vs. displacement

고속에서 스트럿의 스프레이 저항이 두드러지며 중동요시에는 제어판에 큰 항력이 유기된다. 세장비가 큰 물수동체에 삼차원 유동박리가 발생할 수 있고 박리가 발생하면 점성 압력저항이 커지므로 이를 정

확히 추정할 필요가 있다. 물수동체와 스트럿의 접합부에서는 목걸이(neckless) 보오텍스가 형성되며, 그 형상과 세기는 접합부 앞쪽의 경계층 두께, 스트럿 앞날의 두께 그리고 접합부 바닥의 표면곡률 등에 영향을 받는다. 목걸이 보오텍스는 저항을 증가시키므로 이를 줄이려면 앞날 접합부에 모따기(fillet)를 잘 해야 한다. Fig. 4는 모따기 형상이 목걸이 보오텍스의 형성에주는 영향을 수치 계산한 결과를 보여준다[4].

### 2.3 수중익선

수중익선의 선체는 활주선형이 많이 사용되고 저



fillet No.1 fillet No.3

Fig. 4(a) Perspective view of fillet forms

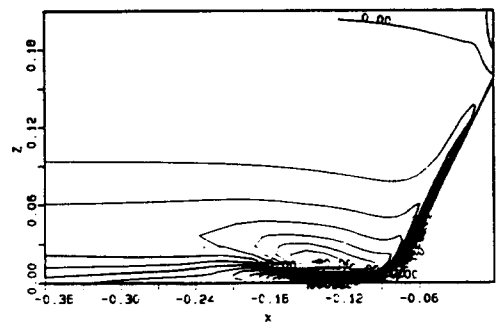


Fig. 4(b) Y-component vorticity on the plane of symmetry(upstream): Fillet No. 1

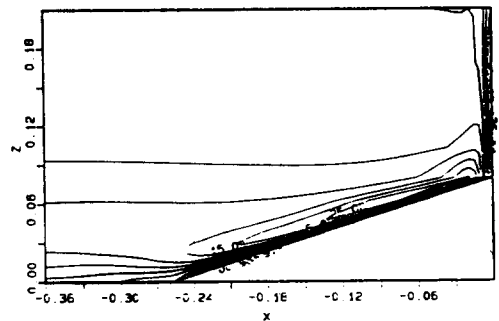


Fig. 4(c) Y-component vorticity on the plane of symmetry(upstream): Fillet No. 3

속에서는 선체가 물에 잠겨서 운항하므로 선체의 저항특성은 활주선의 경우와 큰 차이는 없으나 수중의 스트럿의 저항이 더해진다. 고속에서 선체는 물위로 완전히 뜨고 수중의 스트럿만이 물에 잠겨 운항하므로 이들과 공기막이 판 등의 부가물 저항이 전체 저항의 대부분을 차지한다. 수중익선에서 부가물의 저항은 전저항의 20%에 달하는 경우도 있다. Fig. 5는 수중익 단면의 항력과 양력에 대한 측정영향을 보여준다[5].

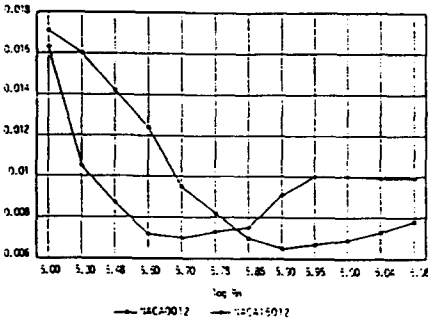


Fig. 5(a) Reynolds number effect on drag coefficient

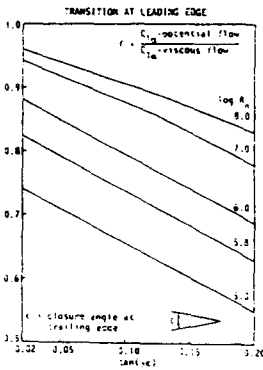


Fig. 5(b) Reynolds number effect on lift curve slope ratio  $f$ .

수중날개의 끝에서는 팁(tip) 보오텍스(Fig. 6 참조[6])가 형성되며 이는 날개에 유기되는 항력과 팁 보오텍스 캐비테이션에 직접적인 영향을 준다. 한편, 날개와 날개끝의 형상은 팁 보오텍스의 형성에 큰 영향을 미친다.

#### 2.4 표면효과선(SES)

표면효과선은 카타마란형 선형의 선수미를 장막(seal)으로 막고 그 안에 에어 쿠션을 형성시켜 선체를 부양함으로써 저항과 선체운동을 줄이도록 설계

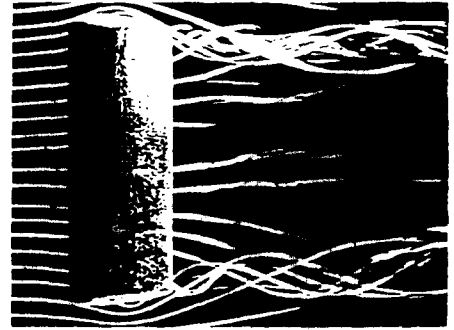


Fig. 6 Trailing vortex from the tip of a rectangular wing

된 것이다. 표면효과선의 전저항은 선체를 부양하는 쿠션 에어를 선속으로 가속하는데 필요한 운동량 저항과 수면위 선체구조물의 형상저항 등의 공기저항과 쿠션 에어에 의한 조파저항, 양측 선체와 장막 혹은 스킨트(skirt) 그리고 부가물의 마찰 및 잉여저항을 모두 합친 수동력학적 저항으로 나눌 수 있다. 또한, 물제트 추진장치를 사용하는 경우에는 물제트 입구 저항이 포함된다. 표면효과선 "Agnes 200"의 실선 시운전은 선속 40 knots에서 공기 저항이 전저항의 16%에 달할 수 있음을 보인 바 있다. Fig. 7은 이와같은 표면효과선의 전형적인 저항성분들을 길이-폭비가 다른 두 선형에 대해 보여준다[7].

#### 2.5 복합지지선

복합지지선은 한가지 이상의 양력발생 방식에 의해 선체를 지지하는 선박으로서 이 분야에 대한 연구개발의 대표적 사례로는 일본의 TSL-F를 들 수 있는데, 수중익을 장착한 회전 물수체와 이를 수면을 관통하는 스트럿으로 단동선체에 연결시킨 선형을 채택하고 있다. 이 선형은 SWATH의 물수동체, 수중익선의 스트럿 그리고 물수체에 장착된 수중익의 저항 특성이 복합되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이 밖에도 공기부양 방식을 이용하는 다양한 선형개념이 연구되고 있으며 이와같은 복합지지선의 저항 및 점성유동 특성은 앞서 언급된 초고속선 선형들의 일부분이 복합된 것으로 이해할 수 있다.

#### 3. 덕트 유동

최근들어 초고속선의 추진기로 물분사 추진장치가 많이 사용되고 있다. 물분사 추진장치는 입구면, 덕트, 펌프, 노즐, 엔진 및 동력장치로 구성되는데, 펌프(원심펌프, 사류펌프, 축류펌프, 인듀서 펌프)와

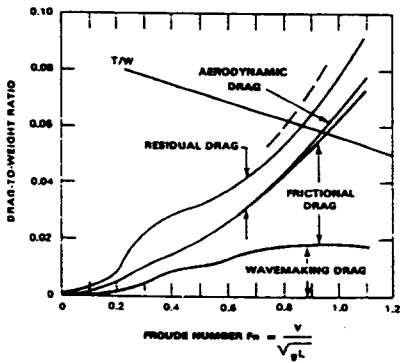
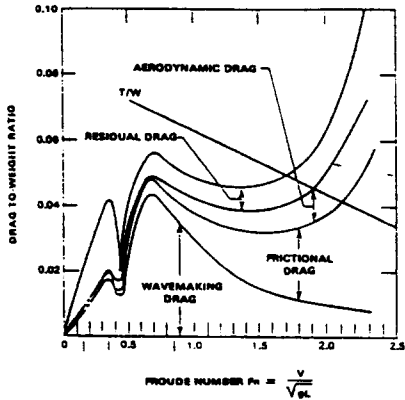


Fig. 7(b) Drag components of an SES of length-to-beam  $L/B=6.0$

물체트 입구의 유형에 따라 분류되며 초고속선 선형 및 운항 특성에 맞추어 사용된다. 본 소고에서는 물분사 추진장치의 점성유동 특성을 덕트와 입구 유동을 중심으로 논의하였다.

### 3.1 기본 특성

덕트 유동은 대표적인 내부 유동으로 Fig. 8에 나타난 바와 같이 네개의 기본적인 유동 영역으로 나누어 생각할 수 있다[8]. 영역 I은 입구로부터의 거리가 덕트의 횡방향 치수  $L_2$  보다 훨씬 작은 영역으로 벽 경계층이 매우 얇고 내부의 비점성 코어(core) 유동에 영향을 주지 않는다. 영역 II는 배제 상호작용(displacement interaction) 영역이라고 하며 경계층이 두꺼워짐에 따라 유로를 막는 효과가 발생해서 비점성 코어의 유속에 영향을 준다. 실제 유동에서 덕트내 평균유속과  $L_2$ 로 정의되는 벌크(bulk) 레이놀드 수는  $10^4$ 에서  $10^6$  정도되고 영역 II는 입구로부터 1에서 10  $L_2$ 의 거리에 있으며, 벽 경계층의 배제

두께가 약  $L_2/10$  정도까지도 될 수 있다. 이러한 배제 상호작용의 영향 때문에, 비점성 유동과 비교했을 때, 입구에서 영역 II 끝까지 평균 동압의 0.1에서 1 배 정도의 정압차가 발생한다.

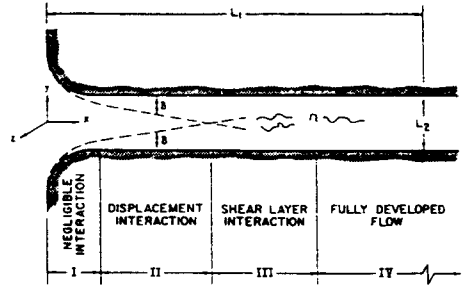


Fig. 8 Zones of interaction in duct flow

될수록 더 복잡한 상호작용이 전단층 상호작용(shear layer interaction) 영역 III 부터 발생한다. 벽 경계층이 서로 겹치고 영향을 주어, 비점성 유동 영역은 정의할 수 없고 시간평균 총압력이 일정한 유선도 존재하지 않으며, 속도와 총압(total pressure) 그리고 전단응력의 변화가 일어난다. Fig. 9는 층류와 난류에 대한 덕트 중심선에서 속도 분포를 보여주며, 난류의 경우에는 전단층 상호작용의 영향으로 덕트 중심선에서의 속도 뿐 아니라 응력과 총압 역시 오버슈트(over shoot)를 나타낸다[8].

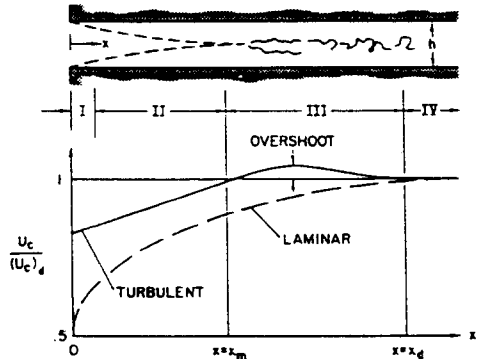


Fig. 9 Core region (centerline) flow speed distributions for inlet regions of a constant area duct

마지막으로 영역 IV는 완전히 발달된 유동(fully developed flow) 영역으로 상류조건에 무관한 특성을 나타내며 벌크 레이놀드 수가 충분히 커서 입구 부근에서 난류 경계층이 형성되는 경우, 입구에서 40  $L_2$  이상 떨어진 곳에서 완전히 발달된 유동을 얻

게 된다. 물분사 추진장치의 경우에는 덕트가 그다지 길지 않기 때문에 영역 II 또는 영역 III의 유동 이후의 조건을 만족시키기 어렵다. 덕트 입구에서 날카롭게 꺾여진 관로 수축에 의해 커다란 유동박리 영역이 발생하면 벽 경계층이 입구 가까운 곳에서 합쳐질 수도 있다. 굽은 덕트(curved duct) 안으로 전단 유동이 돌아 흐르게 되면 보오텍스-속도구배 상호 작용에 의한 보오텍스 성분 간의 교환을 통하여 유동 방향 보오텍스 성분이 생겨 2차 흐름이 나타나며 이를 제 1종 2차 흐름이라 한다. Fig. 10은 원형단면의 곡관 유동에 대한 실험 및 계산 결과를 보여주고 있다[8].

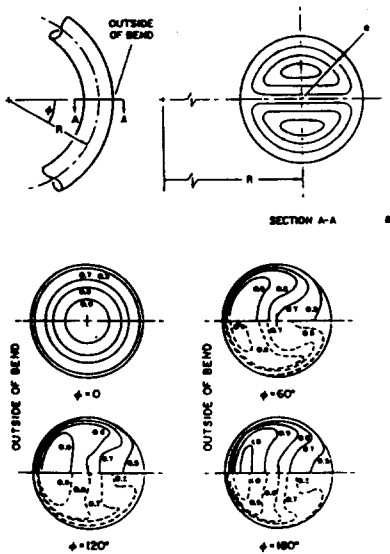


Fig. 10(a) Geometry and secondary flow streamlines, (b) contours of mean velocity head

한편, 레이놀드 응력의 구배에 의해 유기되는 제 2종 2차 흐름은 사각형 단면의 곧은 덕트(straight duct) 구석의 벽 경계층이 만나서 상호작용하는 영역에서 발생하며 Fig. 11은 이를 간략히 나타내고 있다[8]. 제 2종 2차 흐름은 제 1종 2차 흐름에 비해 매우 작기 때문에 대부분의 실제 유동에서는 덕트의 측면 곡률이 구석 유동의 형상을 지배한다.

### 3.2 입구 유동

물체트 입구는 크게 포드(pod)형과 플러시(flush)형으로 나눌 수 있다. 전자는 선저로부터 돌출된 스트럿에 불룩하게 튀어나온 포드를 설치하여 그 선단에 흐름에 수직인 유입구를 마련하는 방식으

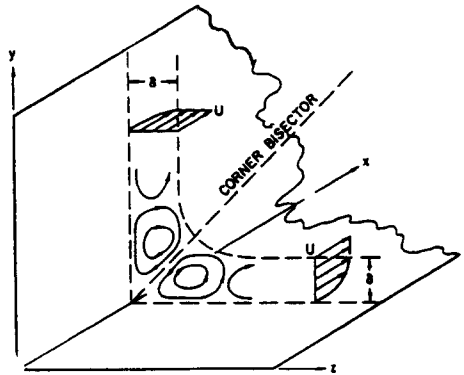


Fig. 11 Geometry of secondary flow streamlines in a 90° straight streamwise corner

로 유입하는 물의 동압을 이용하므로 추진효율이 높으나 고속에서 스트럿과 포드의 저항이 커지는 단점이 있으며 주로 수중익선에 사용된다. 후자는 선저에 직접 유입구를 내어 물을 끌어들이는 형식으로 물의 동압을 이용할 수 없으나 입구의 저항이 작으며 단동선, 활주선, 카타마란 그리고 표면 효과선 등과 같이 다양한 선박에 사용된다. 한편, 플러시형 입구의 립(lip)을 선저로 내려 물의 유입을 용이하게 만든 입구를 따로 스쿠프(scoop)형으로 분류하기도 한다. 입구 형상은 설계 속도와 해당 동력에서 필요한 유량에 맞추어 정해진 입구 면적에 대하여 저항과 캐비테이션을 최소화 하고 최적의 입구 속도비와 압력회복을 갖도록 설계해야 한다. 입구 저항과 내부 압력 손실은 선체 저항의 증가와 추진효율의 저하를 초래하므로 모형시험과 CFD 방법을 사용해서 이들을 최소화 하는 최적 입구 형상을 설계하려는 노력이 활발하게 시도되고 있다. Fig. 12는 저항 및 자항시험에 사용된 입구모형과 입구저항 계수[9]를, Fig. 13은 플러시형 입구에 대한 실험 및 CFD 계산 결과[10]를 보여준다.

### 3.3 천이덕트 유동

사각형 단면의 물체트 입구로 유입된 유동은 단면이 점차로 원형으로 변하면서 굽은 천이덕트를 통과하며, 플러시형 입구의 경우에는 선저를 따라 발달한 난류 경계층이 유입되기 때문에 앞서 언급한 원형단면의 곡관보다 훨씬 더 복잡한 유동이 나타나게 된다. 이와 관련해서 Fig. 14는 원형단면에서 사각형 단면으로 변하는 천이덕트의 유동에 대한 수치계산 결과를 보여준다[11].



Fig. 12(a) Inlet Models

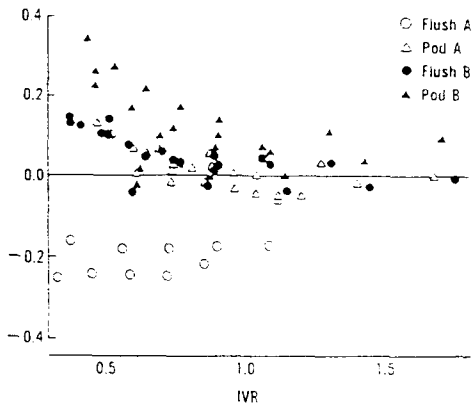


Fig. 12(b) Inlet drag coefficient vs. IVR

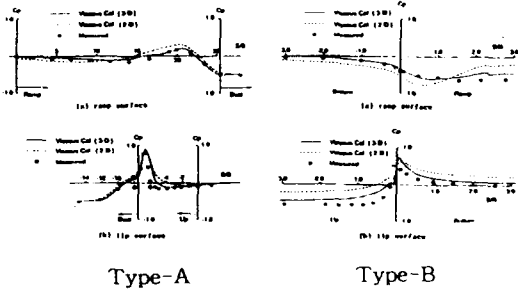


Fig. 13(a) Measured and computed pressure distribution at center plane

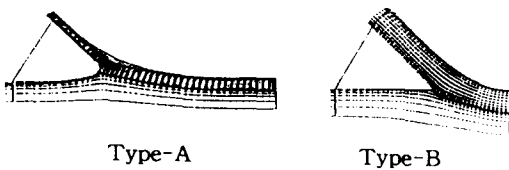


Fig. 13(b) Computed velocity vector at center plane

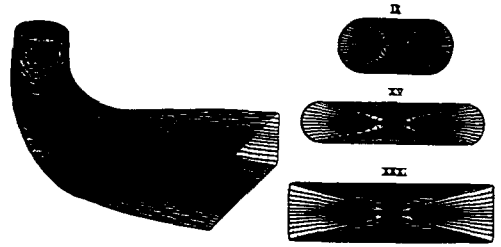


Fig. 14(a) Computational grid for a draft tube geometry

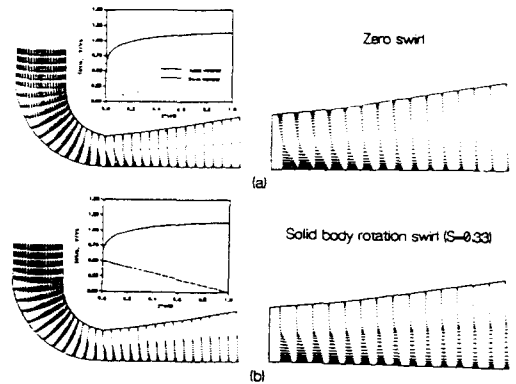


Fig. 14(b) Velocity field on the plane of symmetry

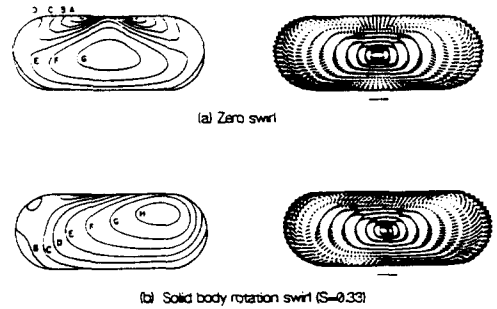


Fig. 14(c) Streamwise velocity contours and cross-flow vectors at section IX

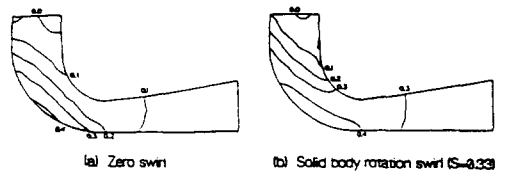


Fig. 14(d) Contours of constant static pressure on the plane of symmetry.

최근들어 CFD 방법을 사용해서 물분사 추진장치의 입구와 천이덕트 유동을 정확하게 수치계산하려는 노력이 활발히 이루어 지고 있다. 가까운 장래에 CFD 방법을 통해서 물분사 추진장치의 입구저항과 캐비테이션의 예측 및 억제 그리고 보오텍스 및 유동박리 등을 포함한 입구와 덕트 유동의 해석이 가능하고 이를 입구와 덕트의 최적 형상을 설계하는데 사용하게 될 것이다. 더 나아가서 펌프 임펠러의 내부유동과 성능의 해석 그리고 설계에도 CFD 방법이 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

#### 4. 맺음말

각국의 우수 연구소와 조선소들이 초고속선의 개발에 관련하여 다양한 복합지지 선형 및 물분사 추진시스템에 대한 연구를 수행하고 있다. 우리나라에서도 대형 조선소와 관련 연구소 그리고 대학의 연구인력들에 의해서 초고속선의 설계기술을 확보하기 위한 연구와 기술개발이 진행되고 있다. 그러나 초고속선에 관련된 점성유동에 대한 국내의 연구는 이론, 실험 그리고 수치계산의 분야에 걸쳐 아직 빈약한 실정으로 이 분야에 대한 좀더 많은 관심과 연구 노력이 요청된다.

#### 참 고 문 헌

[1] Savitsky, D.(Ed.), "Chapter IV: Planing Craft", Naval Engineers J. Vol. 97, No. 2, 1985.  
 [2] Ueda, T., Tsukada, Y. and Sugai, N., "Some Consideration on Tank Test and Power Estimation of Semi-Displacement Type Mono-Hull Ship", Papers of SRI, Vol. 29, No. 2, 1992.

[3] Gore, J.L.(Ed.), "Chapter III: SWATH Ships", Naval Engineers J. Vol. 97, No. 2, 1985.  
 [4] 김선영, 이창민, "Fillet 형상이 Junction Flow 에 미치는 영향에 관한 연구", 한국기계연구원선박해양공학 연구센터 연구보고서 UCE550 - 1808.D, 1994.  
 [5] van Walree, F. and Yamaguchi, K., "Hydrofoil Research: Model Tests and Computations", Proc. FAST'93, Vol. 1, 1993.  
 [6] van Dyke, M., An Album of Fluid Motion, the Parabolic Press, 1982.  
 [7] Lewis, E.V.(Ed.), Principles of Naval Architecture, 2nd Revision, Vol. II, SNAME, 1988.  
 [8] Johnston, J.P., "Internal Flows", Chapter 3, Turbulence Ed. by P. Bradshaw, Springer-Verlag, 1978.  
 [9] Kusaka, Y., Wada, Y., Takashina, J., Ishikawa, S., Matsui, R. and Matsuda, K., "Research on Hydrodynamic Performance of TSL-A", Proc. FAST'93, Vol. 1, 1993.  
 [10] Masuko, A., "Numerical Simulation of Viscous 3-Dimensional Flow Passing through Waterjet Inlets", Proc. Workshop on Wave Resistance and Viscous Flow, 1994.  
 [11] Sotiropoulos, F. and Patel, V.C., "Flow in Curved Ducts of Varying Cross-Section", IIHR Report No. 358, IIHR, the Univ. of Iowa, 1992.

