

워터제트 추진 모형시험에 대한 연구

최 군 일*

A Study on the Waterjet Propulsion in Model Scale

G. I. CHOI*

Key words : waterjet(워터제트), self propulsion test(자항시험), thrust(추력), inlet(흡입구), catamaran(쌍동선), efficiency(효율)

Abstract

Waterjet propulsion generally refers to propulsion of ships by internally mounted pumps with proper ducting. This arrangement of the actuator component of the system leads to the fundamental differences with respects to screw propeller system. In this paper, the basic hydrodynamic characteristics of waterjet propulsion was outlined to clarify the application consideration and proposal for carrying out model self-propulsion tests with waterjet propelled models was presented. The results of model self-propulsion tests carried out in the Hyundai Maritime Research Institute towing tank with catamaran ship were presented.

Symbols

A : cross sectional area

b : inlet breadth

H : head

h : pump center line height above waterline

 : thickness of stream tube

g : gravitational acceleration

m : mass flow rate

ΔP : pressure difference

P_a : atmospheric pressure

P_D : delivered horse power

P_v : vapour pressure

$P_{out} = P_{nozzle} - P_{inlet}$: out put power

$$P_{nozzle} = \frac{1}{2} \rho \dot{m} V_{jet}^2$$

$$P_{inlet} = \frac{1}{2} \rho \dot{m} V_1^2$$

Q : volume flow rate

T : thrust

V_1 : inlet velocity

V_{jet} : exit velocity

V_S : ship speed

Greek letters

ρ : water density

γ : specific gravity

η_D : propulsive efficiency

* 현대중공업(주) 현대선박해양연구소 (원고접수일 : 96년 10월)

- η_H : hull efficiency
- η_i : inlet efficiency
- η_{jet} : jet efficiency
- η_n : exit efficiency
- η_p : pump efficiency

Subscript

- G : gross
- I : inlet
- Jet : exit
- M : model
- S : ship

1. 서론

최근 해상교통의 발달과 더불어 연안 여객선이나 정기 운항선에 있어서 워터제트 추진방식의 채용이 점점 확대되어 가고 있다¹⁾. 이는 펌프 제작사의 펌프 성능개선 노력과 대용량 펌프의 개발에 힘입은 바 크다. 일반적으로 워터제트를 장착한 선박의 추진효율이 프로펠러를 장착한 선박의 추진효율보다 떨어지는 것으로 알려져 있는데 이는 전자의 경우 작동유체가 선체내부를 통과함으로써 생기는 덕트 내부 마찰 및 흡입구에서의 손실 등에 의한 것이다. 그러나 고속운항 및 천수지역의 운항, 레저용, 군사용과 같이 특수한 목적에 사용되는 선박의 경우에는 워터제트 추진방식의 사용이 브라켓 등과 같은 수중 부가물의 제거 및 수중소음/진동의 관점에서는 유리한 점이 있다^{2,3)}.

워터제트를 긴 튜브 내에 로터가 놓여 있는 특수한 형태의 박용 프로펠러의 경우로 생각할 수 있으나 펌프로 끌어들이는 유체를 고속으로 분출시킴에 따라 생기는 모멘텀 변화에 의해 추력을 얻기 때문에 프로펠러 추진에 의한 방식과는 다르다. 이는 기존의 저항시험만에 의한 선박의 성능추정은 위험성을 내포함을 의미한다. 최근에 일부 선진 연구기관을 중심으로 워터제트 자항추진에 의한 선박의 성능추정에 대하여 연구가 수행되어 왔으나 일부 결과들만 보고되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 워터제트 추진에 필요한 기본원리와 이와 관련된 사항에 대하여 논의하고 펌프의 선정 및 설계에

대하여 간략히 기술하였으며, 예인수조 시험만으로도 가능한 자항추진 성능해석법을 제시하였다. 이와 더불어 예인수조에서 행해진 워터제트 자항추진 모형시험 결과를 소개한다.

2. 기본원리

추력

워터제트 추진의 원리(Fig. 1 참조)는 선저에서 펌프로 물을 끌어들이고 고속으로 후방으로 분출시켜 그때 얻어지는 추력에 의해 선박을 추진시키는 것이다. 따라서 전체 추력 T_G 는 노즐 출구에서 토출되는 질량 \dot{m} 또는 유량 Q 에 의해 추진기에 가해지는 힘으로서 노즐 속도 V_{jet} 가 균일하다고 가정하면 아래와 같이 나타낼 수 있다³⁾. 즉,

$$T_G = \dot{m} V_{jet} \tag{1}$$

실제로 선박을 전진시키는데 소비하는 추력 T 는 노즐 입구와 출구 사이의 모멘텀 차이로서 나타낼 수 있는데 매질이 같다고 가정하면 노즐 입구와 출구에서의 속도 차로써 표시되게 된다. 즉,

$$T = \dot{m}V_{jet} - \dot{m}V_i \\ = \rho Q (V_{jet} - V_i) \tag{2}$$

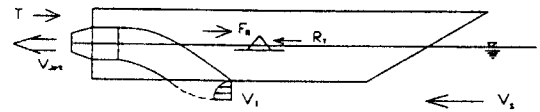


Fig. 1 Propulsion model test set - up

추진효율

워터제트 추진의 경우 추진효율은 프로펠러 대신에 흡입구 및 출구, 펌프가 있기 때문에 다음과 같이 쓸 수 있다⁴⁾.

$$\eta_D = \eta_p \times \eta_{jet} \times \eta_H \tag{3}$$

여기에서 η_{jet} 에 대하여 살펴보면

$$\eta_{jet} = \frac{TV_i}{P_{out}} = \frac{TV_i}{P_{nozzle} - P_{inlet}} = \frac{TV_i}{\gamma QH}$$

$$= \frac{2(V_{jet} - V_1)V_1}{\frac{1}{\eta_n} V_{jet}^2 - \eta_n V_1^2 + 2gh} \quad (4)$$

노즐 입출구의 손실을 무시하고 h=0 일 때

$$\eta_{jet} = \frac{2 V_1}{V_{jet} + V_1} \quad (5)$$

단 $H = \frac{V_{jet}^2}{2g} \frac{1}{\eta_n} - \eta_n \frac{V_1^2}{2g} + h$

흡입비 속도(Suction Specific Speed (N_{SS}))⁹⁾

흡입비 속도(N_{SS})는 임펠러에서 캐비테이션 정도를 나타내는 무차원 계수로서 다음과 같이 나타낸다.

$$N_{ss} = \frac{n \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{NPSH^{\frac{3}{4}}} \quad (6)$$

단 $NPSH = \frac{P_a - P_v}{\rho g} + \eta_n \frac{V_1^2}{2g} - h$

N_{SS}의 값에 따른 캐비테이션 종류는 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Design criteria for cavitation

Nss Range	Cavitation
250	operation with heavy cavitation
200	operation with less cavitation
150	standard design
100	cavitation free operation
50	no cavitation

3. 임펠러 및 흡입구 설계 일반

반배수량선(semi-displacement ship), 활주형선(planning type vessel) 그리고 자유표면효과선(surface effect ship)등의 워터제트로서 사용되고 있는 펌프는 주로 축류 또는 사류형이 쓰이며 이러한 고속선박의 추진장치로써 워터제트 펌프에서 일반적으로 요구되고 있는 사항은 아래와 같다.

- 워터제트 펌프는 경량이며 단순한 구조일 것.
- 추진성능이 좋아야 할 것

- 가감속 능력이 좋아야 할 것
- 캐비테이션 성능이 우수할 것

위에 열거한 항목들을 만족시키기 위해서는 워터제트 펌프의 초기설계부터 제작에 이르기까지 세심한 주의가 필요하며 펌프는 구조가 복잡하기 때문에 초기설계에서는 흡입구, 임펠러, 안내깃 그리고 케이싱 부분으로 나누어서 생각하는 것이 편리하다. 이들중 추진과 캐비테이션 성능에 관련된 흡입구 설계와 임펠러 설계에 대해서만 간단히 설명한다

임펠러 설계

임펠러 설계는 축류 또는 사류 등으로 분류되지만 본고에서는 축류형 임펠러 설계에 대하여 한정하기로 한다. 펌프의 설계조건으로 초기에 추력(T)과 선속(V_s)이 주어지면 이로부터 유량(Q)과 펌프 수두(H) 등을 계산하여야 한다. 따라서 설계에서 우선적으로 결정해야 할 것은 JVR(jet velocity ratio = V_{jet} / V_s)과 IVR(inlet velocity ratio = V₁ / V_s)이다. 이 계수가 결정되면 노즐 입출구의 속도 V_{jet}와 V₁가 정해져 펌프 수두(H)와 유량(Q)은 물론 Fig. 2에서와 같이 η_{jet}도 예측 할 수 있기 때문에 설계에서는 JVR과 IVR의 선정이 가장 중요하다고 말할 수 있다.

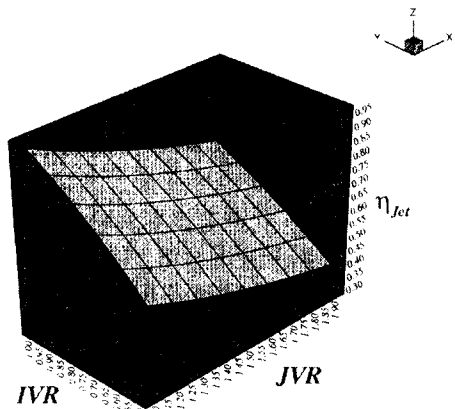


Fig. 2 Ideal jet efficiency curve

임펠러 설계의 요체는 주어진 수두에 맞는 임펠러 회전수를 확정하고 이에 따른 임펠러 허브, 날개

간격 및 날개 설치 각도(pitch angle) 등을 결정하는 것이다. 임펠러의 날개수는 선박의 운전조건, 선박의 고유 진동수 등을 고려하여 진동측면에서 결정해야 한다. 임펠러 후류의 안내기는 임펠러에서 유도되는 유체를 축류로 모두 바꾸어 줄 수 있도록 설계하면 된다. 임펠러 설계의 원리는 임펠러가 임의의 반지름에서 유체를 그 반지름의 원통면에 따라서 선회운동을 하면서 흐르게 하고 반지름 방향의 유동을 일으키지 않게 하는데 있다. 이와 같은 조건을 만족시키기 위해서는 임의의 반지름에서 전개되는 수두를 일정하게 해야 한다. 이것은 간단한 형태의 설계로서 펌프성능 및 임펠러 캐비테이션 성능 등은 모형시험을 통하여 확인해야 한다.

프로펠러 설계에 익숙한 설계자는 프로펠러 설계 경험이나 설계이론을 이용하면 생각보다 훨씬 쉽게 임펠러 설계를 끝낼 수 있다. 펌프의 임펠러와 선박의 프로펠러가 서로 다른 점은 프로펠러는 작동구간에서 추력을 많이 내어 선박을 전진시키는 것이고 펌프의 임펠러는 펌프내부의 유체를 임펠러 후방으로 뿜 수 있는 한 많이 밀어주어서 펌프에서 빠져나가는 유체의 운동량변화에 따른 추력으로 선박을 전진시킨다. 프로펠러는 추력을 크게 낼 수 있도록 하고 토크를 작게 하여 프로펠러의 단독효율을 높이는 것이 주목적이 되지만 임펠러는 작동 전구간에서 임펠러의 추력은 작게 하고 회전 토크가 많이 걸리도록 하여 주면 된다. 이때 펌프내부의 유체에 박리 현상 없이 후방으로 잘 흐르도록 해야 한다. 따라서 펌프내부의 임펠러에서는 관내의 유체를 압축하여 후방으로 이동시켜야 하기 때문에 허브쪽보다는 날개 끝단에서의 날개 면적을 넓게 해주는 것이 캐비테이션 성능면에서 유리하다.

흡입구설계

워터제트 추진에 있어서 덕트에서의 손실은 최소로 해야 하며 관내 및 흡입구에서의 캐비테이션은 가능한 한 피해야 하는 것이 원칙이다. 일반적으로 저속시에는 관내손실을 고속시에는 외부저항에 주의하여야 하며 특히 캐비테이션수가 상대적으로 적어지는 고속선박에서는 캐비테이션 발생

이 심히 우려되기 때문에 흡입구 형상 설계가 중요한 과제로 되어 있다. IVR이 크게 되면 흡입구에서 정압이 상대적으로 낮게 되어 캐비테이션 발생이 쉽게 되기 때문에 IVR의 선택이 매우 중요하다고 할 수 있다⁶⁾. 이와 같이 흡입구에서의 외부저항과 유동현상은 설계상 극히 중요하나 현재까지 설계에 사용할 수 있는 정도의 자료는 찾아보기 힘들다. 관내 효율, 관내 및 외부 캐비테이션 등은 모형시험 등에 의해 확인하여 설계에 반영해야 한다. 이제까지 알려진 바에 의하면 배수량형 선박과 같이 선저가 수중에 있는 경우 흡입구 내부 및 외부에 가장 영향을 미치는 것은 덕트에서 흡입구 하부의 경사도이다. 이러한 캐비테이션 문제를 고려하여 볼 때 워터제트 추진선박의 제한속도도 예측할 수 있다고 하겠다.

4. 모형시험

워터제트에 대한 모형시험은 제 18차 ITTC(international towing tank conference) high speed marine vehicle committee⁷⁾에서 처음 잠정적으로 Thrust method가 제시된 이후 고속선 시험에 관심이 있는 수조^{8,9,10)}에서 각자 나름대로의 경험을 살려 점진적으로 수정/발전해 오고 있는 실정이다. 최근 제 21차 ITTC waterjets group¹¹⁾에서 thrust method와 원리는 같고 이를 일부 수정한 momentum flux method를 제안하고 있다. 일부에서는 이의 대안으로 direct thrust measurement method¹⁰⁾도 제안하고 있다.

워터제트 추진에 의한 모형시험에서는 추력의 계측이 중요하며 추력계측에 대한 방법은 직접계측과 간접계측으로 구분 할 수 있다. 추력의 직접계측은 계측 및 결과 해석에 어려움이 있는 것으로 알려져 있기 때문에 주로 간접계측에 대부분 의존하고 있다. 모형시험 기법 개발을 위하여 본 연구에서는 쌍동선을 대상선으로 정하고 전술한대로 설계조건에 맞게 워터제트 펌프와 흡입구를 설계/제작하였다. 성능해석에 필요한 자항추진 시험시의 주요 계측 항목은 다음과 같이 하였다.(Fig. 3 참조)

- 노즐 출구에서의 압력 차이 계측
- 노즐 출구에서 피토 튜브로 출구 속도 계측
- 동력계로 임펠러 회전 속도 및 추력 계측
- 예인전차 속도 계측 등

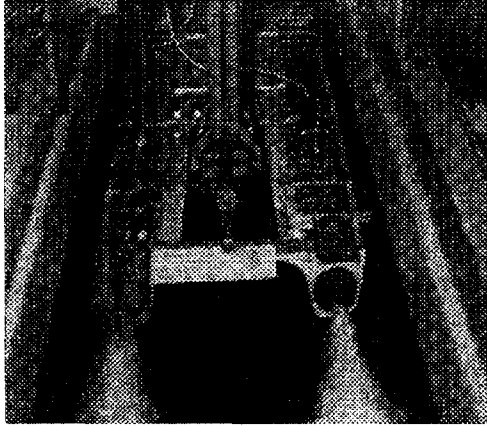


Fig. 3 Waterjet model test in towing tank

Table 2 Principal particulars of model

Model Ship	Catamaran
length	5.333 m
breadth	1.3867 m
depth	0.42 m
draft	0.138 m
displacement volume	0.3 m ³
scale ratio(γ)	15

Table 3 Specification of waterjet pumps

Type	Axial Flow
max. power	3.5 kW
nozzle exit dia.	60 mm
impeller dia.	118 mm
no. of blade	3
material of pump	reinforced plastic
material of impeller	stainless steel

쌍동모형선의 좌우에 각각 워터제트를 설치하였고 이에 따른 흡입구도 우레탄으로 제작 모형선의 선저를 오려내고 그곳에 취부하였다. 모형선과 워터제트에 대한 주요제원은 Table 2 과 Table 3 에 각각 나타내었다. 워터제트 자항추진 시험에 앞

서 자항점을 추정하기 위하여 저항시험을 실시하였는데 저항시험은 워터제트 흡입구에 물이 침투하지 못하도록 완전히 밀폐하고 펌프내부의 유체 중량을 고려 저항시험시와 같게 선수미의 흡수를 일치시킨 후 수행하였다.

추력은 다음식을 사용하여 계산하였다.

$$T_M = \rho_M Q_M (V_{jetM} - V_{IM}) \quad (7)$$

연속방정식과 베르누이 방정식으로부터 모형선의 노즐 출구에서의 유량은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_M = \sqrt{\frac{\Delta P}{\frac{\rho_M}{2} \left(\left(\frac{1}{A_1} \right)^2 - \left(\frac{1}{A_2} \right)^2 \right)}} \quad (8)$$

단, ΔP 는 P_1 및 P_2 에서의 압력차

여기에서 A_1 과 A_2 는 P_1 및 P_2 에서의 노즐의 단면적이고 M 은 model을 나타낸다(Fig. 4 참조).

노즐 출구에서의 속도는 식(9)와 같이 된다.

$$V_{jetM} = \frac{Q_M}{A_1} \quad (9)$$

흡입구에서의 평균 유입속도(V_{IM})를 단순한 2차원 난류 경계층의 계산으로부터 추정하면 흡입구에서의 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{IM} = 1.3b h V_{IM} \quad (10)$$

여기에서 b 는 흡입구의 폭, h 는 가상 stream tube의 두께를 나타낸다.

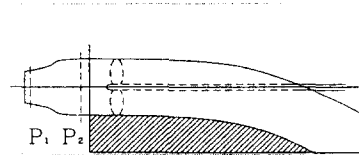


Fig. 4 Pressure measurement

자항시험전에 정지상태에서 워터제트의 작동시험을 먼저 수행하였는데 60rps까지 좌우현 모두 정상적으로 작동하였다. Fig. 5 및 Fig. 6에서는 정지상태에서 계측한 노즐 출구 속도와 추력을 나타

내고 있다. Fig. 5에서 계측치는 노즐 출구에서 피토 튜브로 측정된 것이고 계산치는 식(9)에 의해 계산 한 것이다. Fig. 6 에 나타낸 추력중 임펠러 추력은 동력계로 계측한 값이다. 노즐에서 토출되는 유량과 식(8)에 의해 계산되는 유량의 관계식을 구하기 위하여 정지시에 3톤용량의 물통에 토출되는 물을 받아가면서 캘리브레이션 시험도 실시하였다.

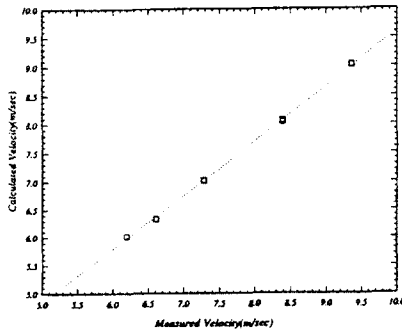


Fig. 5 Correlation of nozzle exit velocity

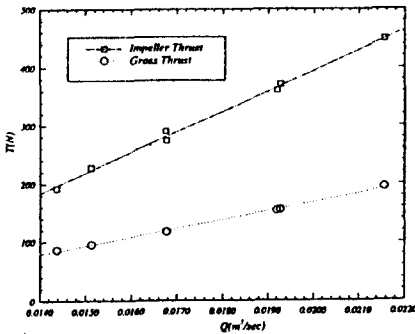


Fig. 6 Thrust values at static condition

고속구간에서 필요한 예인전차의 가속거리를 조사하였으나 Fig. 7에 보여주고 있듯이 짧은 시간 내에 충분히 가속됨을 알 수 있었다. 자항점은 실선과 모형선사이 마찰저항의 차 (F_D)를 고려하여 예인력을 결정하였다. 자항시험시에는 각 선속별로 자항점 근처에서 임펠러의 회전수를 변경 3회의 계측을 수행하였다. 보통 각 선속별로 자항점 근처에서 ± 1 rps간격으로 계측하였다. 선속이 증가할수록 펌프에서 토출되는 유량이 많고 노즐 분사속도가 빨라서 수조수의 교란으로 인한 시험 대기시간이 길어지는 현상이 나타났다. 펌프에서 토

출되는 유량은 예인전차에 의해 증가되는 속도증가 즉 톱트내 유체 유입속도 증가보다 임펠러회전수의 증가에 지배되는 것으로 나타나 시험시 펌프의 임펠러 회전수 조정 및 계측에 더욱 신중을 기하였다. Fig. 8은 선속에 대한 모형에서의 추력곡선을 보여 주고 있다.

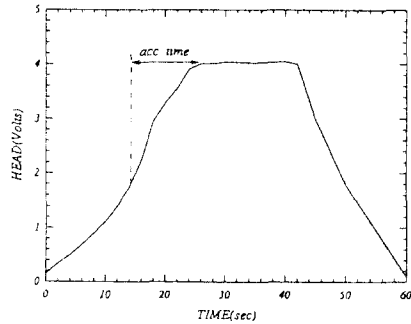


Fig. 7 Acceleration time at 6.11 m/sec

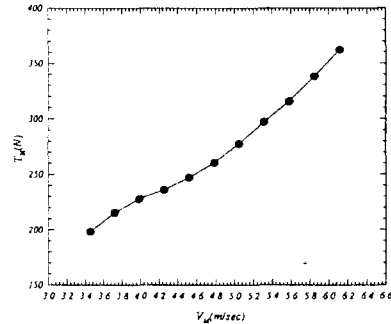


Fig. 8 Thrust for model ship

실선에서의 추력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T_S = \rho_S Q_S (V_{JetS} - V_{IS}) \quad (11)$$

실선에서의 유량과 노즐속도는 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_S = Q_M \lambda^{2.5} \quad (12)$$

$$V_{JetS} = V_{JetM} \lambda^{0.5} \quad (13)$$

실선에서의 흡입구 속도는 모형과 같이 경계층 계산에 의하여 추정한다.

상기의 식에 의해 추정된 실선에서의 추력을 선속변화에 대하여 Fig. 9에 보여주고 있다. 추력이 30노트이하의 저속구간을 제외하고는 모형에서의

결과와 동일하게 점진적으로 증가됨을 나타내고 있어 모형시험 및 결과 해석이 적절함을 보여주고 있다. 저속구간에서는 임펠러의 저속회전에 의해 토출되는 유량의 감소로 압력계측에 다소의 오차 요인이 발생한 것으로 추정된다.

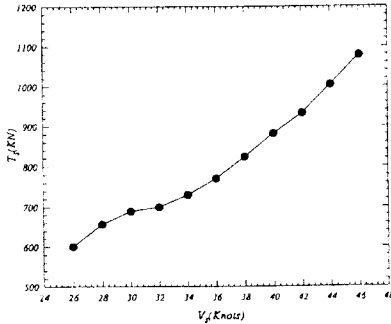


Fig. 9 Estimated full scale thrust

흡입구에서의 속도계측은 모형선에서는 LDV 등을 사용하여 계측이 가능할지 몰라도 실선에서는 계측이 어려운 것이 현실이다. 따라서 현실적인 방법으로는 간략한 경계층이론에 의해 추정하거나 CFD(computational fluid dynamics)에 의한 계산결과를 기대해 볼 수밖에 없다. 또한 실제로 실선에서 요구되는 마력을 추정하기 위해서는 실제선박에 설치될 워터제트의 효율을 알아내야 하는 문제점 있는데 이는 워터제트 제작사와 긴밀한 협조 하에 가능하다.

프로펠러 추진에 의한 선박의 일반 자항추진 모형시험은 통상적으로 선체는 물론 프로펠러의 기하학적 상사에 정확히 대응하는 모형을 제작하여 수행하거나 이에 대응되는 재고 프로펠러를 사용하여 수행하는 것이 원칙으로 인식되고 있으나 워터제트 추진의 경우 모형제작의 어려움 등으로 인하여 정확한 상사모형으로 모형시험을 수행하기는 어려운 것으로 예상된다.

5. 결 론

워터제트에 관한 전반적인 사항중 기본적인 사항 즉 효율, 추력, 캐비테이션 및 임펠러 설계에 대하여 간략하게 논의하였고 성능예측에 필요한 모

형시험에 대하여 조선공학적 측면에서 설명하였다. 그리고 예인수조에서 수행한 대형 고속 쌍동 모형선에 대한 워터제트 추진 모형시험 및 이의 결과해석에 대하여 논의하였다. 이상과 같은 고찰로부터 워터제트 추진은 프로펠러 추진과는 다르게 취급해야 함을 밝혔고 워터제트 입구에서의 속도 추정이 모형시험 해석에 중요함을 알아냈다. 또한 고속쌍동선의 워터제트 모형시험 및 결과해석을 통해 워터제트 모형시험의 가능성을 증명하였다. 다른 한편으로는 워터제트의 초기계획에 있어 IVR 과 JVR의 적절한 선택이 중요함을 밝혔다.

참고문헌

- 1) Svensson, R., "Experience from Operation of Large Waterjet Units", Second International Conference on Fast Sea Transportation, Yokohama, Japan, Dec. 1993.
- 2) Min, K. S., "Design and Construction of the Long Range High Speed Foil - Catamaran Passenger Ship", Nineteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, 1992.
- 3) Allison, J., "Marine Waterjet Propulsion", SNAME Transactions, vol. 101, 1993, pp275-335.
- 4) Kawakami, T., et al. "Water - Jet Propulsion Unit For High Speed Hydrofoil Catamaran", Second International Conference on Fast Sea Transportation, Yokohama, Japan, Dec. 1993
- 5) Saxena, S. V., "Physical and Empirical Basis for the Calculation of the NPSH - values and Cavitation Safety Factor", International Symposium on Cavitation, CAV' 95, May 1995, Deauville, France
- 6) 정인규. 이정목., "물분사 추진 흡수구 형상에 관한 연구", 대한조선학회 1997 춘계 학술 대회 논문집, p298 - 301, 1997.4.
- 7) 18th ITTC., "Waterjet Test Procedures", Proceed. of the 18th ITTC, 1987.
- 8) Hoshino, T. and Baba, E., "Self - propulsion Test of a Semi Displacement Craft Model with Waterjet Propulsor", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1984.
- 9) Trewisga, T. V., "A Theoretical Model for the

- Powering Characteristics of Waterjet hull systems", Second International Conference on Fast Sea Transportation, Yokohama, Japan, Dec. 1993.
- 10) Lannone, L., "An Alternative Procedure for Calculation and Analysis of Flush - Inlet Water Jet Crafts Performance", International Conference on Hydrodynamics, Nov. 1994, Wuxi, China.
- 11) 21st ITTC., "Waterjets group", Proceed. of the 21st ITTC, 1996.