

論 文

# 선박추진기에 의한 흐름발달과 해저면변화에 대한 연구

이지훈\* · 이종우\*\*

\*한국해양대학교 대학원, \*\*한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수

## A Study on Flow Zone Development and Bottom Change by Propeller Jets from Ships

Jihoon. Lee\* · Joongwoo. Lee\*\*

\*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Division of Civil and Environment, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약 :** 수로에서의 선박통항으로 인해 주변환경 및 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 선박의 추진기로 인한 흐름을 다루었다. 제한수로에서의 수치모델은 Shield's diagram과 추진기의 운동량 이론을 사용하여 개발하였다. 프로펠러에 의한 추진기방정식은 분사률 정의하는 가장 정확한 수단으로 분사계수와 분사유속을 기초로 하여 수립하였다. 추진기분사에 대해 접근한 방법은 적용 선박의 출력에 기초하였으며, 추진기 분사방정식의 주요함수에는 추진력, 프로펠러 직경, 그리고 선박의 속도를 도입하였다. 또한, 수로의 수심과 선박의 흘수도 초기이동한계입경의 계산에 필요하다. 추진기로부터 분사된 유속의 분포는 Gaussian 정규분포함수로 나타내었다. 저면마찰속도와 진단응력은 Sternberg 공식으로부터 유도되었으며, 아울러 선박 추진기로 인해 수로저면에서 표사이동에 현저한 영향을 미치는 경우를 사례연구를 통해서 나타내었다.

**핵심용어 :** 추진기, 추진기제트, 진단응력, 저면마찰속도, Shield's diagram, 운동량이론

**ABSTRACT :** The flow zone through propeller jets are used in evaluating the environmental and constructional effects of navigation on the waterway. It relies on the characteristics of ships and water depth. A numerical model using the momentum theory of the propeller and Shield's diagram was developed in a restricted waterway. Equations for discharge are presented based on thrust coefficients and propeller speed and are the most accurate means of defining discharge. Approximate methods for discharge are developed based on applied ship's power. Equations for discharge are as a function of applied power, propeller diameter, and ship speed. Water depth of the waterway and draft of the ship are also necessary for the calculation of the grain size of the initial motion. The velocity distribution of discharge from the propeller was simulated by the Gaussian normal distribution function. The shear velocity and shear stress were from the Sternberg's formula. Case studies to show the influence of significant factors on sediment movement induced by the ship's propeller at the channel bottom are presented.

**KEY WORDS :** Propeller, Propeller jet, Shear stress, Shear velocity, Shield's diagram, Momentum theory

### 1. 서 론

근래에 선박의 추진기로부터 강한 분사류에 의한 가항수역(可航水域) 경계의 손상을 방지하는 문제는 수로와 내수역 및 항만 시설의 유지 면에서 점차 중요성을 더해가고 있으며, 또한 수로 바닥, 호안 및 사면이나, 도크의 시운전(접이안 조종) 또는

이와 유사한 선박조종시 안벽구조물에 손상이 점차 증가해가고 있다. 이에 따라 최근에는 선박 시운전시 최대 추진력으로부터 수로 경계에 특정 난류하중을 가하여 시험을 수행하여 이에 대한 검토를 하는 경우도 있다.

본 연구에서는 추진기에 관한 이론적인 배경으로부터 출발하여 분사류의 특성과 해저면 변형에 이르는 과정을 이론적으로 접근하고 수치모델을 통해 실제 해역에 적용하여 실험을 행하였으며 기존의 수리실험 결과도 병행하여 분석하였다. 이를 통해 제트류에 대한 대책수립에 기여할 수 있는 계기를 마련하

\*통신회원, riph@hhu.ac.kr 011)410-4981

\*\*통신회원, jwlee@hanara.hhu.ac.kr 051)410-4461

고자 하였다.

2. 수치모형의 구성

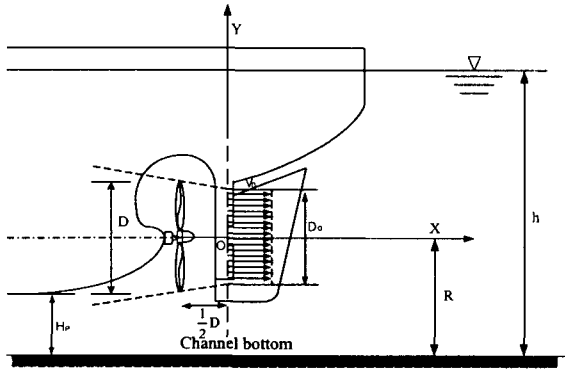


Fig. 1 Definition of a ship in a confined waterway

2.1 대형선박의 모델구성

(1) 운동량 방정식

Fig. 2는 디스크면을 통과하는 유체의 속도와 압력변화를 나타낸 그림으로써 선박의 프로펠러를 디스크로 가정하고 다음과 같이 운동량이론을 적용하여 단위시간당 통과하는 유량을 통해 추진기의 효율을 산정하게 된다.

$$V_0 = 1.6nD\sqrt{K_T} \text{ (초기 유속)}$$

$$Q = V_A(1+a)A_0$$

$$T = \int_0^t F dt = \rho Q V_A b = \rho A_0 (V_A)^2 (1+a) b$$

$$\eta_1 = \frac{2}{1+(C_T+1)^{1/2}}$$

여기서,  $K_T = \frac{3600 T}{\rho n^2 D^4}$

$$J_T = \frac{101.33 V_A}{nD} \text{ (comstock, 1967)}$$

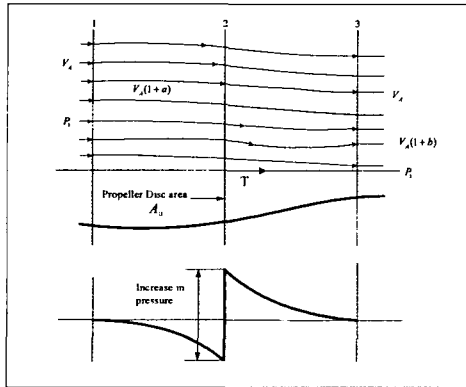


Fig. 2 Velocity and pressure changes at the propeller plane by momentum theory

(2) 추진기의 속도분포

추진기의 하류부분에서 속도분포를 시뮬레이션하기 위하여 가우스 정규확률함수를 사용하였고, 이는 일반적으로 제트류가 가우스 정규확률함수의 경향을 따르는 것으로 가정 한 것이다(Albertson et al., 1950).

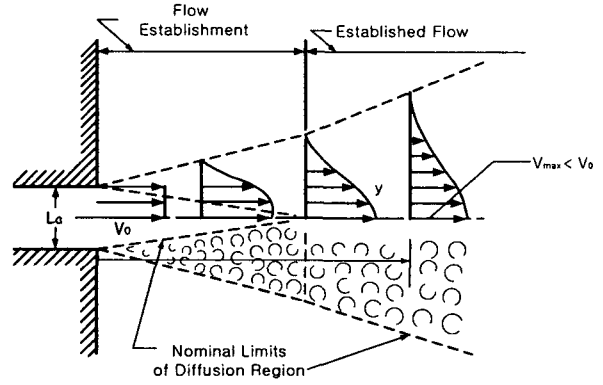


Fig. 3 Flow zones and jet mixing region

속도분포의 초기영역

$$r > \frac{D_0}{2} - C_{2x}, \therefore V = V_0 \exp \left[ -\frac{\left( r + C_{2x} - \frac{1}{2} D_0 \right)^2}{2C_{2x}^2 x^2} \right] \quad (4)$$

$$\log_{10} \frac{V}{V_0} = -33 \left( 0.081 + \frac{r - \frac{1}{2} D_0}{x} \right)^2 \quad (5)$$

속도분포의 흐름발달영역

$$V = V_0 - \frac{1}{2C_2} \frac{D_0}{x} \exp \left[ -\frac{1}{2C_2^2} \frac{r^2}{x^2} \right] \quad (6)$$

$$\log_{10} \frac{V}{V_0} \frac{x}{D_0} = 0.79 - 33 \frac{r^2}{x^2} \quad (7)$$

(3) 저면퇴적물 이동의 결정

운동량이론에 의해 얻어진 속도분포를 바탕으로 아래의 Sternberg(1972)의 공식을 이용하여 저면전단응력과 저면마찰속도를 구하고 이를 통해 저면에서 이동하게 되는 퇴적물질의 입자크기를 예측하기 위해 가장 널리 사용되는 Shields 도면(Fig. 3)을 이용하였다.

$$\tau_o = 3 \times 10^{-3} \rho \bar{U}_{100}^2 \quad (8)$$

$$U^* = 5.47 \times 10^{-2} \bar{U}_{100} \quad (9)$$

$$R = \frac{U^* d}{\nu} > 30 \text{의 경우}$$

$$\left( \frac{\tau_o}{r_s - r} \right) \frac{1}{d} = 0.02 \left( \frac{U^* d}{\nu} \right) 0.183 \quad (10)$$

$$R^* = \frac{U_* d}{\nu} \geq 400 \text{의 경우}$$

$$\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)} = 0.06 \quad (11)$$

Table 1 Stone size in relation with bed velocity(after Prosser, 1986)

Velocity(m/sec)	Stone size	
	Mean size(d <sub>50</sub> )	Mean weight(W <sub>50</sub> )
1	44mm	0.12kg
2	175mm	7.4kg
3	390mm	84.0kg
4	700mm	473.0kg
5	1.1m	1.8tonnes
6	1.6m	5.4tonnes

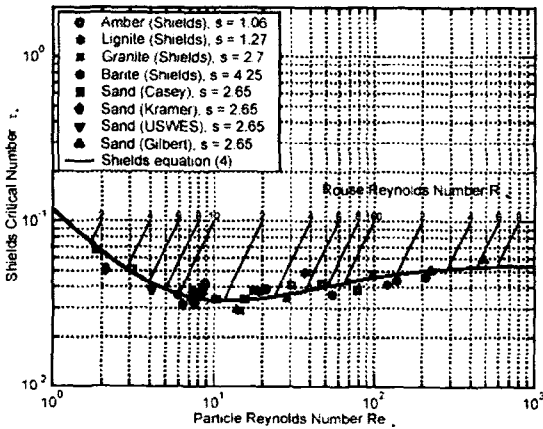


Fig. 4 Shields diagram for sediment incipient motion

2.2 예인선의 모델구성

예인선에 대한 모형은 최근의 수리실험의 결과를 통한 경험식을 바탕으로 두 개의 추진기가 장착된 예인선이 바지선을 예인하는 경우의 속도분포와 저면전단응력을 알아보고자 하였다.

(1) 예인선 추진기의 속도분포

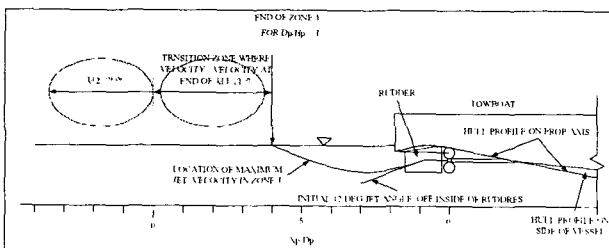


Fig. 5 Zone locations for tunnel stern configuration and velocity distribution

예인선의 추진기는 강한 추진력을 위해서 두 개의 추진기를 장착하는 경우가 대부분이므로 실험에서도 쌍추진기를 장착한 선박에 대해서 모의를 하였으며 초기유속은 다음 식을 이용하였다(Fuehrer, Romisch, Engelke, 1981).

$$V_2 = \frac{1.13}{D_0} \sqrt{\frac{Thrust}{\rho}} \quad (12)$$

여기서, V<sub>2</sub>는 초기유속이고, Thrust는 각각 추진기 형태에 따라 각각 다음의 식을 적용하였다(Toutant, 1982).

Open Wheel Type :  $EP_0 = 23.57HP^{0.974} - 2.3(S)^2(HP)^{0.5}$

Kort Nozzle Type :  $EP_K = 31.82HP^{0.974} - 5.4(S)^2(HP)^{0.5}$

초기유속이 구해지면, 추진기 분사류의 속도분포의 제1 영역과 제2 영역에 각각 다음의 식13과 14가 적용되었으며, 추진기 후방의 최종 합성유속은 식15로 나타낸다.

$$V_{x,r} = V(xp) \max \exp\left(-\frac{r^2}{2C_{f2}^2 xp^2}\right) \quad (13)$$

$$V_{x,r} = V(xp) \max \exp\left(-\frac{r^2}{2C_{f2}^2 xp^2}\right) \quad (14)$$

$$V_{res,g} = E\left(\frac{D_p}{H_p}\right) V_2 f_n\left(-\frac{V_a - V_g}{V_2}, \frac{D_p}{H_p}\right) + V_{wake,g}(x) \quad (15)$$

(2) 예인선 저면의 전단응력 분포

예인선 추진기하의 주변의 흐름이 없을 경우의 전단응력분포는 다음의 식15로 나타내고 주변흐름이 있을 경우에는 식16으로 나타낸다.

$$\tau = 1/2 C_{fr} \rho U_r^2 \quad (16)$$

$$\tau = 1/2 \rho C_{fc} \left( U_c + \sqrt{\frac{C_{fr}}{C_{fc}}} U_r \right)^2 \quad (17)$$

여기서,  $C_{fr} = \left( 2.87 + 1.58 \log \frac{xb_l}{K_s} \right)^{-2.5}$

xb<sub>l</sub> = 경계층 발달의 시작점에서의 거리

K<sub>s</sub> = 3D<sub>50</sub>과 같은 모래 1그라인의 조도

$$C_{fc} = 0.06 \left( \log \frac{12h}{K_s} \right)^{-2}$$

τ = 저면전단응력

U<sub>r</sub> = Return velocity

U<sub>c</sub> = 평균수심에서의 유속

3. 수치실험 및 분석

대형선에 대하여 광양만 수로와 광양만 컨테이너 터미널에 실제 운항 중인 11척의 선박의 세원을 입력조건으로 하여 추진기 후방의 유속분포와 추진기에 의한 저면유속과 전단속도,

전단응력, 이동한계입경의 크기를 계산하였고, 예인선이 대하여 수리실험에 이용된 예인선의 제원과 국내에서 운용중인 예인선, 바지선의 제원을 입력하여 유속분포와 저면전단응력 분포를 계산하였다. 그 결과 추진기 후방의 유속분포를 벡터로 나타낸 Fig. 5와 Fig. 6에서는 컨테이너선과 탱커선의 경우 유속분포의 초기영역에서 추진기 흐름의 강한 흐름이 추진기 부근에 집중되고 제 2영역(흐름발달영역)에서는 전체적으로 배수류의 유속이 감소하고 폭넓게 분포하였으며, 강한 유속의 영역이 프로펠러의 축을 중심으로 상하 약 10m에 달한다는 것을 볼 수 있으며, 균함의 경우에는 추진기의 직경이 1.5m로 상대적으로 작고 추진기의 회전수는 많은 경우로 추진기 부근에서의 유속은 상당히 강하나 그 범위가 약 2미터 이내로 좁은 분포를 보여 수로 저면에 추진기 배수류의 영향이 거의 닿지 않을 것으로 사료되었다.

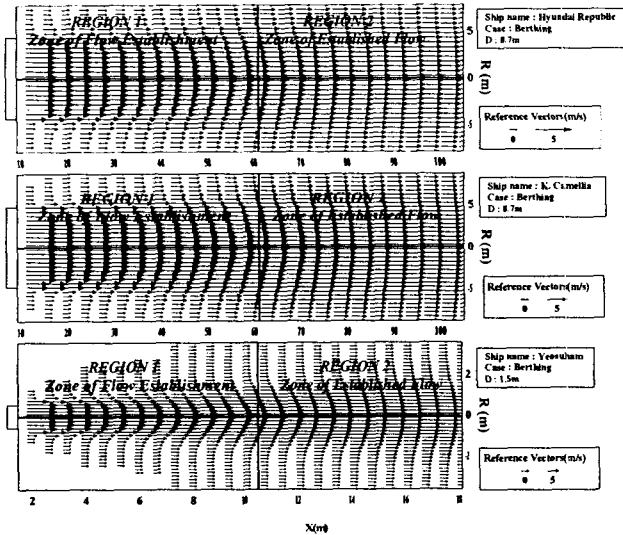


Fig. 6 Velocity distributions sternward of the propellers in berth

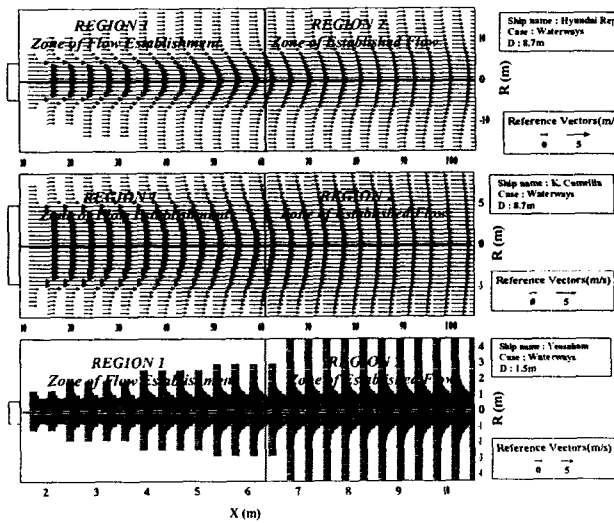


Fig. 7 Velocity distributions sternward of the propellers in waterways

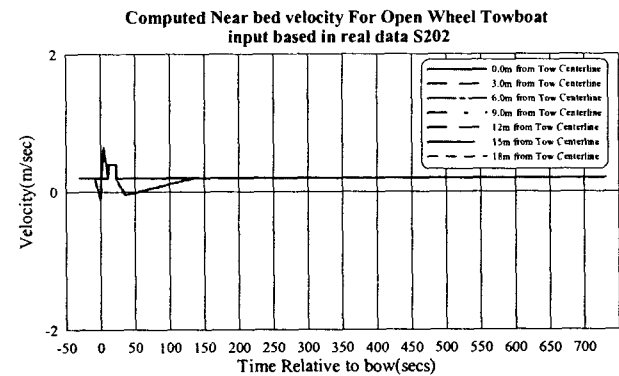
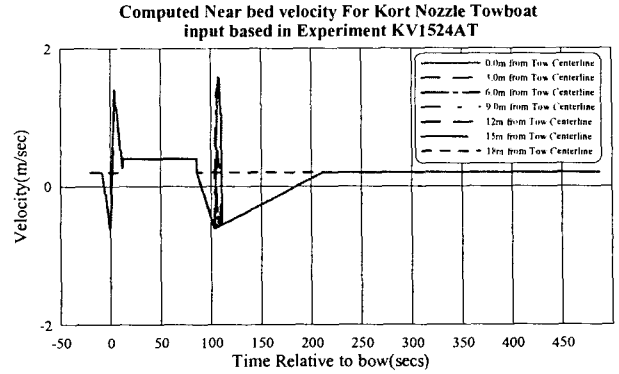


Fig. 8 Velocity distributions sternward of the towboats

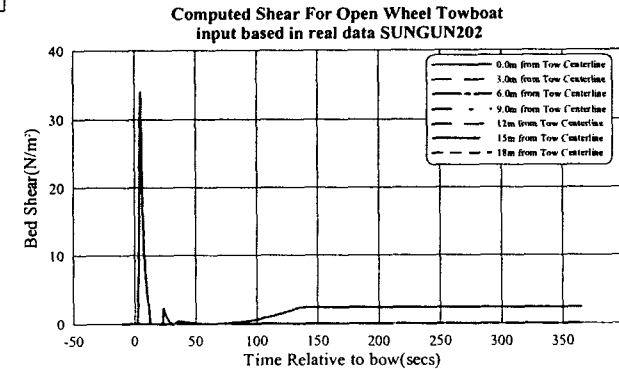
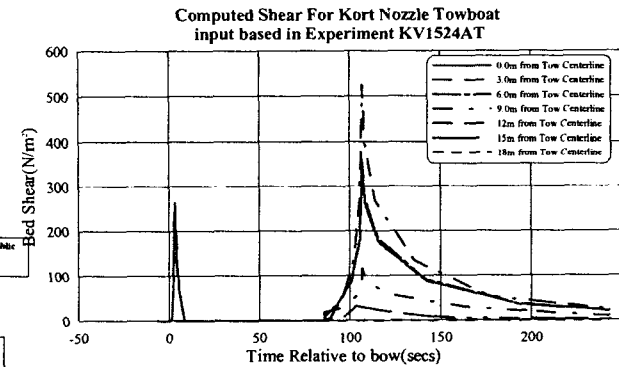


Fig. 9 Shear stress distributions sternward of the towboats

추진기의 유속분포에 의한 저면속도와 전단응력, 전단속도, 이동한계입경의 위치는 거의 일관적으로 추진기에 대한 상대거리  $X/D=12$ 의 지점에 최대의 분포를 보였으나, Fig. 9의 수로 상의 모의에서 Global Express와 Team Jupiter의 경우 추진기 주변에서 최대유속과 최대 전단응력, 최대이동한계입경의 위치가 나타났으며 이는 수로의 수심과 선박의 흘수가 거의 비슷한 경우로 추진기가 해저면에 거의 근접해 있음으로 인해 추진기 부근에서의 강한 유속의 흐름이 저면에 직접 반영된 결과이다.

또한 Fig. 10와 11의 그래프를 분석해보면 선박과 수로의 상대거리가 짧을 때는 추진기에 가까운 곳에서 강한 유속이 분포하게 되나 상대수심이 추진기직경의 1/2이되는 시점에서부터 최대 유속의 위치 패턴이 바뀌면서 추진기 직경의 10-12배 지점부근에서 최대의 유속값을 갖게된다.

대형 예인선과 바지선의 경우 두번의 강한 유속이 저면에 발생하는 것을 알 수 있는데 예인선의 프로펠러 면이 특정지역의 저면을 통과하면서 추진기의 영향에 의해 강한 유속이 발생하였으며 바지선의 선수부가 통과하면서 다시 한번 강한 유속이 발생한 뒤 점차 속도분포가 안정적으로 변화있다.

소형예인선의 경우에도 마찬가지로 특정지역의 저면을 통과하면서 예인선의 프로펠러면에서 강한 유속을 보이고, 바지선 선수부가 통과하는 시점에서는 미미한 유속의 상승을 보였고 예인선 후방의 전단응력분포 또한 마찬가지로 최대 유속의 지점에서 강한 전단응력이 발생하는 양상을 나타내었다.

이렇게 11척의 실제선박을 대상으로 추진기에 의한 전단적인 해저면의 세굴양상에 대해서 저면과의 간격, 추진기의 회전속도, 추진기 날개의 직경, 적용수심, 선박의 흘

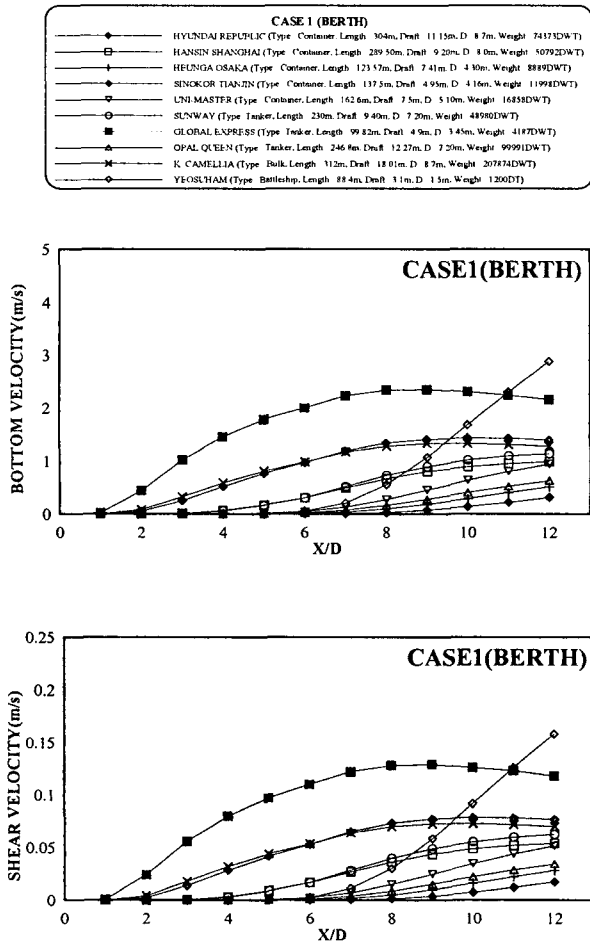


Fig 10 Bottom velocity, shear velocity, shear stress and critical grain size(Berth)

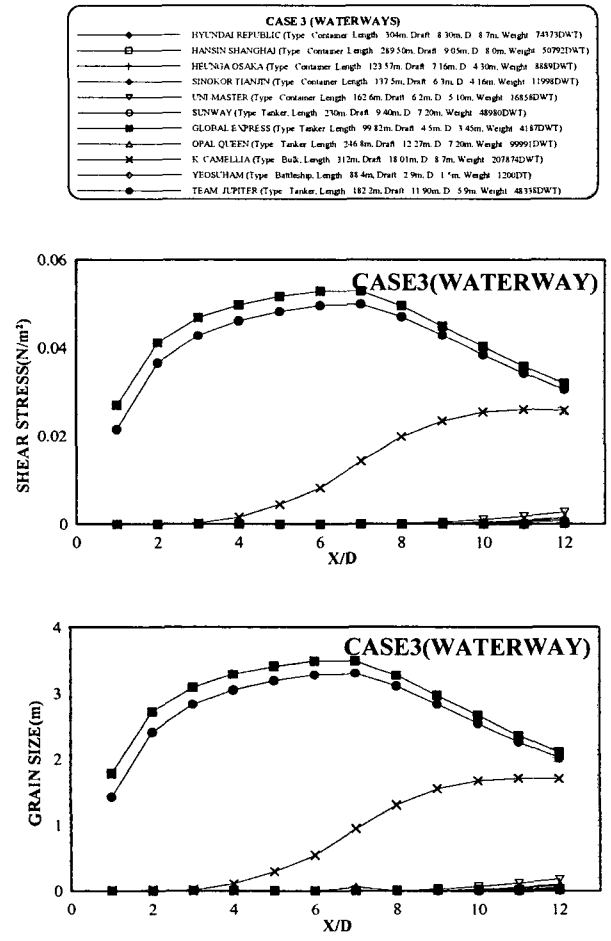


Fig 11 Bottom velocity, shear velocity, shear stress and critical grain size(Waterways)

수, 저질의 입경 등 다양한 조건에 따른 수치모델 결과 및 수리모델 실험결과를 정리, 분석한 결과 대부분의 퇴적물 입자는 선박추진기에 의한 난류에 의해 거동하는 것으로 나타났고, 추진기 하단에서의 유속분포는 추진기의 위치에 따라 달라진다는 것을 알 수 있었으며, 심흡수선에 대해서 초기 이동을 하는 퇴적물의 한계 입자 크기는 추진기로부터 어느 정도의 거리가 떨어진 지점보다는 추진기 부근에서 현저해지는 현상이 나타났다. 또한, 제한 수로 및 부두 전면에서 선박의 흘수는 상당히 큰 인자라서 선저와 저면의 간격이 짧은 경우에는 추진기 배수류의 주류와 유사한 광범위한 유속 분포를 보였고 저면과 선저의 간격이 어느 정도의 거리가 있는 경우(추진기로부터 상대거리 R/D=0.5

이상)에는 추진기 배수류의 초기영역과 흐름의 발달영역이 확실히 구분되어 흐름발달영역에서는 정규 분포한다는 것을 알 수 있었다. 같은 맥락에서 흘수와 관련하여 해저면과 선체저면의 간격이 또한 선박추진기에 의해 야기되는 퇴적물 이동 입경에도 가장 크게 영향을 미치는 인자로 나타났다. 예인선의 경우에는 대형예인선이 대형바지선을 예인하는 경우 추진기의 주변과 바지선의 선수부근에서 최대 유속과 최대 전단응력이 발생하였으며 소형예인선이 소형 바지선을 예인하는 경우 두 개의 추진기면에서 발생하는 유속과 저면과의 영향이 크고 바지선에 의한 영향은 미소한 것으로 판단되었다. 또한, 추진기의 특성과 저면간격에 따른 세굴의 양상을 파악하기 위하여 수리실험의 결

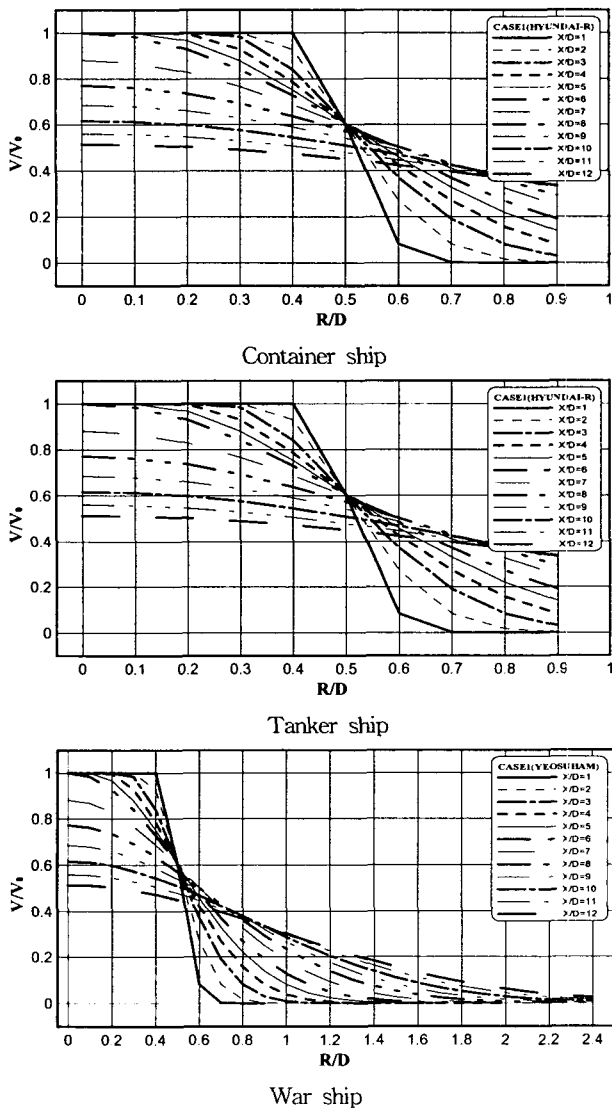


Fig 12 Relative velocities versus distances from propeller(Berth)

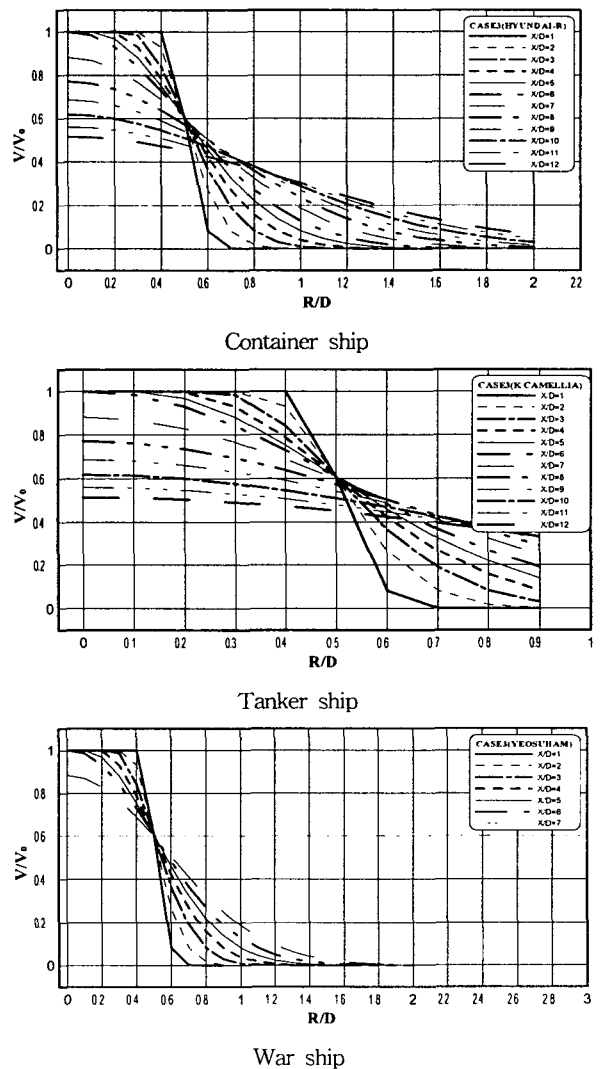


Fig 13 Relative velocities versus distances from propeller(Waterways)

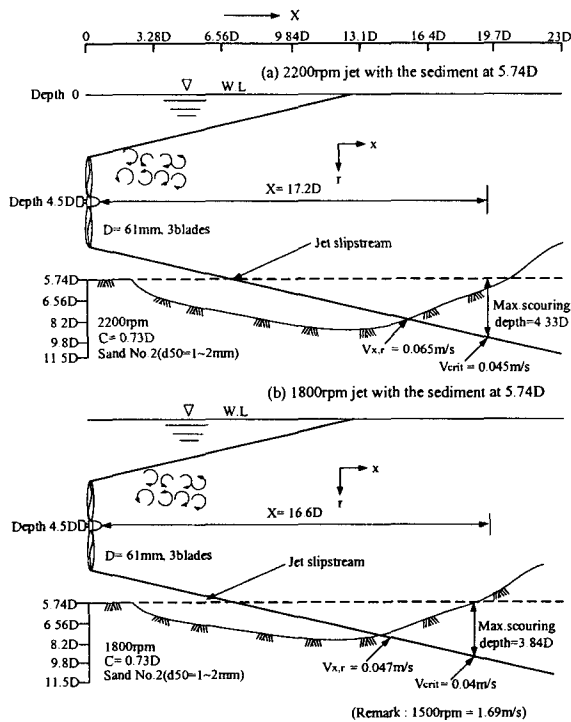


Fig 14 Relative scouring depth of bottom by propeller jets

과를 취합하고 무차원화하여 재구성한 결과 각각 Fig. 14 과 15의 세굴의 형태가 나타났으며 이는 추진기의 직경과 회전수, 저면과의 거리가 다양하고 세굴의 심도는 다르다고 하더라도 추진기의 제트에 의해 저면이 패여지는 세굴의 패턴은 상당히 유사하게 나타난다는 발견할 수 있었다.

#### 4. 결론

추진기 분사류가 추진기면을 통과한 이후의 유속분포와 저면에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수치실험을 한 결과, 내수로나 항내에서 대부분의 해저 퇴적물입자는 선박 추진기 제트가 유발하는 난류에 의해 이동한다는 사실을 확인할 수 있었고, 저면퇴적물의 한계이동입경에 영향을 미치는 가장 두드러진 인자는 저면과 추진기 축과의 거리이며, 다양한 조건에서 발생하는 세굴의 초기기하학적 형태는 거의 동일하다는 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구는 추진기 후방의 유속 분포의 양상을 고찰하고, 선박의 추진기가 저면입자에 미치는 영향을 알아본 연구의 한 사례가 될 것으로 사료되며, 향후에는 보다 다양한 수치실험을 기반으로 선박 주변의 유속분포와 퇴적물 이동에 대해 실제 현장의 계측이 추가되어야 하고, 선박의 후진회선의 영향과 추진기 주변의 난류거동의 분석이 더불어 행해져야 할 필요성을 느꼈다.

또한 추진기 제트에 의한 저면 피해를 방지하기 위하여 정기적인 수중 모니터링이 필요하고, 선박추진기에 의한 안벽의

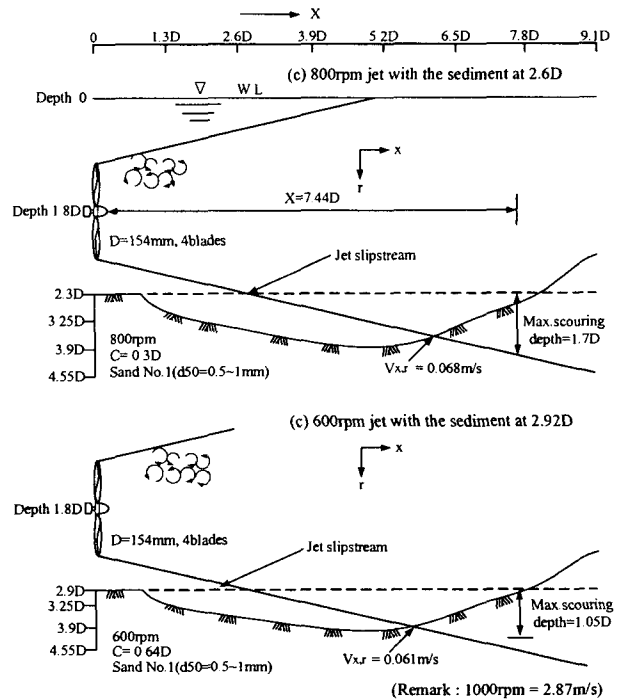


Fig 15 Relative scouring depth of bottom by propeller jets

저면안정에 대한 국내의 기준 설치가 시급하다고 판단되어지며, 경제성이 허용하는 한도내에서 보다 깊은 안벽을 건설하여 저면피해를 최소화 할 수 있으리라 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A., and Rouse, H.(1950), "Diffusion of Submerged Jets", Trans., ASCE, Vol.115, pp.639-697.
- [2] Fuehrer, M., Romisch, K. and Engelke, G.(1981), "Criteria for Dimensioning the Bottom and Slope Protections and for Applying the New Methods of Protecting Navigation Canals",
- [3] Prosser, M.J. (1986), "Propeller induced scour", BHRA for the British Ports Association.
- [4] Robakiewicz, W.(1966b), "Theories and the Hydraulic Investigations applied to the analysis of the Jet behind the screw." Rozprawy Hydrotechniczne. 19(in Polish).
- [5] Sternberg, R.W. (1972), "Predicting Initial Motion and Bedload Transport of Sediment particles in the Shallow Marine Environment",
- [6] Toutant, W. T. (1982). Mathematical performance models for river tows, Winter meeting, Great Lakes and Great Rivers Section, Society of Naval Architects and Marine Engineers,Clarksville, IN.