

저항 성능을 고려한 거북선 형상의 해상소각선 선형개발

이 귀 주* · 권 규 혁** · 이 건 철***
(98년 7월 24일 접수)

The Development of Hull form for Turtle Boat Type Incinerating Vessel Considering the Resistance Performance

Kwi-Joo Lee* · Kyu-Hyok Kwon** · Kon-Chol Lee***

Key Words : Incinerating Vessel(해상소각선), Resistance Performance(저항성능), Finite Source Distribution Method(유한소오스분포법), Wave-Making Resistance(조파저항), LCB(중방향부면심위치), Turtle Boat(거북선)

Abstract

In the present paper, a hull form for the turtle boat type incinerating vessel was developed based on the Finite source Distribution Method(FDM) and 1-C_P method. In order to obtain proper hull form within the limited time and budget, a computer program OCL(Optimization of C_P and LCB) was developed and used. For the confirmation of the theoretical results by OCL, these theoretical results were compared with results of model test in the circulating water channel (CWC) in Chosun University.

1. 서 론

날로 늘어가는 폐기물의 처리를 이제는 매립만으로는 해결할 수 없으며 재활용 또는 소각 처리가 필수적임이 근래에 들어 인정되어지고 있다. 게다가, 환경 보전에 대한 관심이 높아지고 매립장의 입지는 물론 중간처리 시설의 입지조차 극심해져가는 님비(NIMBY) 현상으로 인하여 확보하기가 점점 어려워져 소각의 필요성이 점차 강하게 인식

는 반면 소각의 조건은 환경 및 에너지 문제로 점점 까다로워져 가고 있다. 폐기물의 감량만을 우선적인 목적으로 삼았던 노천 소각이나 단순 소각으로부터 대기 오염 등 2차 오염을 최소화하면서 폐열을 회수하여 이용하는 저공해 소각법으로의 전환이 요구되고 있기 때문이다. 이러한 여건에 부합하는 소각법은 선진 외국에서는 상당히 많이 개발되어 있으나 국내에서는 시작 단계에 있으며 국제적 연구 및 실용화의 추세는 해상 소각 방향으로

+ 본 논문은 1998년도 재단법인 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터(RRC) 연구비 지원에 의해 연구되었음.

* 종신회원, 조선대학교 공과대학 선박해양공학과

** 조선대학교 공과대학 화학공학과

*** 정회원, 조선대학교 대학원 선박해양공학과

로 가고 있다. 폐기물 해상 소각 설비는 주거 지역과 격리 설치되며, 폐기물의 해상 및 수로 운송 등으로 도심이나 주택가를 우회함으로써 주민의 반발을 최소화할 수 있다. 또한 좁은 국토로 인한 설치 부지난의 해소에 기여할 수 있고 관련 시설들의 집중화로 효율적인 운용이 가능하며 교통체증 해소에 기여하는 등 설비 개발 및 운용상의 많은 장점을 가지고 있다. 아울러 관광이나 미려한 외관을 참작하여 거북선 형상을 고려하게 되었다.

본 연구에 이용된 저항해석 방법은 유한소오스분포법(Finite Source Distribution Method)으로써 기준선형의 운셀 자료(off-set data)를 이용하여 Lackenby의 1-C_p 선형계획법으로 개발선형의 C_p 및 LCB를 변화시키면서 그에 따른 선형을 생성하여 각각의 저항계수를 추정함으로써 이론상 조파저항 측면의 최적의 선형을 도출하는 과정으로 수행하였다.

사용된 프로그램 OCL은 기준선형의 운셀 자료(off-set data) 및 주요 치수를 입력하면 유한소오스분포법(Finite Source Distribution Method)과 1-C_p 선형계획법을 연계시켜 최소조파저항을 갖는 선형의 운셀 자료(off-set data)를 출력하도록 개발되었다.

2. 유한소오스분포법 (Finite Source Distribution Method)

1) 기본 좌표계(Coordinate system)

기본 좌표계 0-xyz는 선체 중앙단면에 원점이 있고 z방향은 중력이 작용하는 반대방향을 +로 하고 xy평면이 교란되지 않은 자유표면과 일치하도록 택한, 선체에 고정된 직교좌표계로 한다. 또한, 일정 속도 U의 균일류가 x축의 +방향으로 진행한다고 가정한다.

2) 경계 조건(Boundary condition)

유체가 비점성, 비압축성, 균일이상유체, 비회전, 무한수심을 가졌다고 가정하고 표면장력을 무시하면 속도 포텐셜(Potential)은 다음의 경계조건들을 가진다.

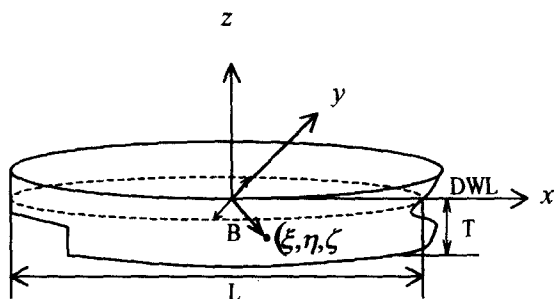


Fig. 1 Coordinate System

① 선체 표면

$$F(x, y, z) = 0 \tag{1}$$

$$\left(U + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \cdot \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

② 자유표면

$$\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + U \frac{\partial \phi}{\partial x} + gz = 0 \tag{3}$$

자유표면 방정식은

$$F(x, y, z) = \zeta(x, y) = 0 \tag{4}$$

(3)식에 (4)식을 대입하면

$$\left(U + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \tag{5}$$

여기서, 자유표면 선형경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + k_0 \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad k_0 = \frac{g}{U^2} \tag{6}$$

또한, 수저 면에서의 경계조건은

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial z} \right]_{z=-\infty} = 0 \tag{7}$$

방사조건(Radiation condition)은

$$\nabla \phi = 0 \quad \text{at } x \rightarrow \infty \quad (8)$$

3) 수치 계산

선체를 소오스(source)와 싱크(sink)의 유한분포 방식으로 대체하기 위하여 선체를 여러 개의 구획(compartment)으로 나누고 각 구획(compartment) 중앙에 단일 소오스(source)를 분포시킨다.

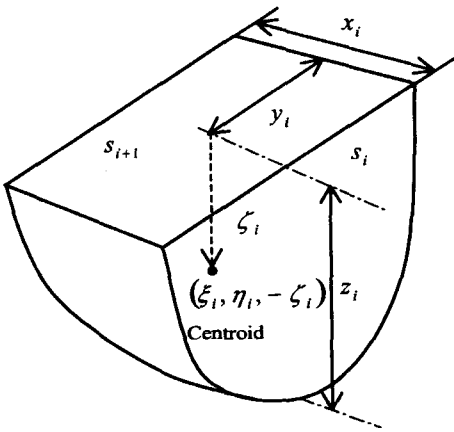


Fig. 2 Schematic Diagram of a Compartment

한 구획(compartment)에 작용하는 전(全)소오스(total source)의 크기는 다음과 같다[1][4].

$$m = \int \int \sigma d\xi d\zeta = -\frac{U}{2\pi} \int \int \frac{\partial \eta}{\partial \xi} d\xi d\zeta \approx \frac{U}{4\pi} (S_2 - S_1) \quad (9)$$

여기서, S_1 : 구획(compartment) 앞쪽 단면적
 S_2 : 구획(compartment) 뒤쪽 단면적

$\cosh u = \sec \theta$ 이므로 조파저항 R 을 계산하면 다음 (10)식과 같다[4].

$$R = 16\pi\rho k_0^2 \int_0^\pi (f^2 + f'^2) \cosh^2 u du \quad (10)$$

(10)식에서,

$$\left\{ \begin{aligned} I \\ J \end{aligned} \right. = \sum_{i=1}^n m_i \frac{\cos}{\sin} [k_0(\xi_i \cosh u + \eta_i \sinh u \cdot \cosh u)] e^{k_0 \zeta_i \cosh^2 u} \quad (11)$$

여기서, $\xi_i = (V_i - s_{pi}) / (s_{i+1} - s_i)$

$$V_i = ((s_{i+1} + s_i) / 2) \cdot x_i$$

$$\eta_i = (V_i - s_{si} y_i) / (s_x - s_{si})$$

$$\zeta_i = (V_i - s_{bi} z_i) / (s_{wi} - s_{bi})$$

3. 1-C_P 선형계획법 (Lackenby's 1-C_P Method)

1. C_P-curve의 작성

다음과 같은 방법을 이용하여 개발선형의 C_P, LCB, 기준선형의 C_P-curve를 이용하여 개발선형의 C_P-curve를 작성한다[7].

1) C_P 값의 차이를 이용한 수정

기준선형의 C_P-curve를 중앙부에서 선수와 선미 두 부분으로 나누어 각각 기준선형의 C_P-curve의 각 스테이션(station)에서의 횡단면적비 A/A_M 와 동일한 횡단면적비를 갖는 개발선형의 x-좌표 위치를 찾는다.

$$dx(\text{선수}) = \frac{\Delta C_P}{1 - C_{POF}} (1 - x_0) \quad (12)$$

$$dx(\text{선미}) = \frac{\Delta C_P}{1 - C_{POA}} (1 - x_0) \quad (13)$$

여기서,

C_P, C_{PO} : 개발선형 및 기준선형의 C_P

ΔC_P : $C_P - C_{PO}$

C_{POF}, C_{POA} : 기준선형의 선수·선미 C_P

x_0 : 선체중앙으로부터 기준선형의 임의의 스테이션(station)까지의 거리를 L_{BP}로 나눈 무차원수

dx : 같은 횡단면적비를 갖는 기준

선형의 스테이션(station) 위치와 개발선형의 좌표간의 거리 구하여진 새로운 선수·미 C_P 를 C_{PNF}, C_{PNA} 라 정의한다.

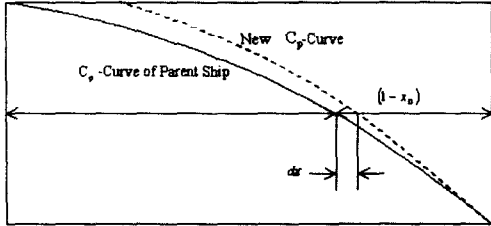


Fig. 3 C_P Curve Changed by C_P Variation

2) LCB 차이에 대한 수정

개발선형의 선수·미 C_P 를 C_{PF}, C_{PA} 라 하면

$$C_{PF} = C_P + Q \quad (14)$$

$$C_{PA} = C_P + Q \quad (15)$$

통계자료로부터

$$Q = 0.021 \cdot LCB + 0.0015 \quad (16)$$

개발선형의 LCB로부터 Q 를 구하면 C_{PF}, C_{PA} 을 계산할 수 있다. $\Delta C_P, \Delta C_{PA}$ 는

$$\Delta C_{PF} = C_{PF} - C_{PNF} \quad (17)$$

$$\Delta C_{PA} = C_{PA} - C_{PNF} \quad (18)$$

앞 절에서 C_p 를 수정하여 계산한 기준선형의 새로운 C_p -curve와 이 절에서 LCB를 수정하여 계산되어질 개발선형의 C_p -curve간의 좌표값의 차이인 dx 는

$$dx(\text{선수}) = 2 \cdot \Delta C_{PF}(A/A_M) \quad (19)$$

$$dx(\text{선미}) = 2 \cdot \Delta C_{PA}(A/A_M) \quad (20)$$

이 식에서 구한 dx 만큼 각 스테이션(station)의

위치를 이동시켜 최종적인 개발선형의 C_p -curve를 작성한다.

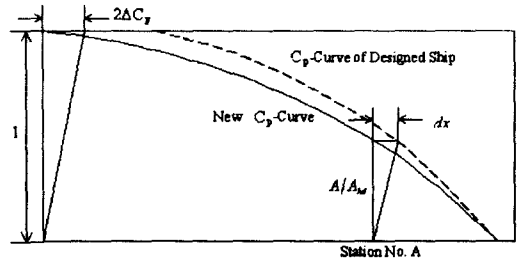


Fig. 4 C_P Curve Changed by LCB Variation

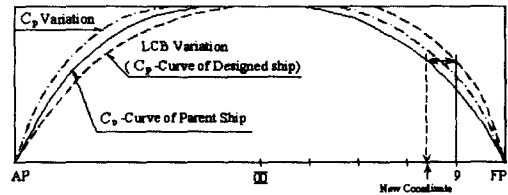


Fig. 5 Comparison of C_P Curves

2. Body Plan의 작성

개발선형의 횡단면적비와 같은 횡단면적비를 가지는 기준선형의 좌표를 구한 다음 보간법을 사용하여 기준선형의 수선(waterline)으로부터 개발선형의 각 스테이션(station)에서 반폭 Y_i 를 구한다. 필요한 수의 수선(waterline)들에 대하여 이 방법을 반복하여 구한 값들을 연결하여 기준선형의 각 스테이션(station)에서의 프레임 라인(frame line)을 얻은 후 이 프레임 라인(frame line)을 기준선형과 개발선형 간의 홀수비(d/d_M)와 반폭비(B/B_M)를 매개변수로 하여 개발선형의 프레임 라인(frame line)을 구한다.

$$Y_i = Y_{Mi} \times \left(\frac{B}{B_M} \right) \quad (21)$$

$$Z_i = Z_{Mi} \times \left(\frac{D}{D_M} \right) \quad (22)$$

여기서, Y_i : 개발선형의 각 스테이션(station)에서의 반폭

Z_i : 개발선형이 각 수선(waterline) 간의 간격

여기서 구해진 Y_i 값들을 조합하여 개발선형의 윤셀(off-set)을 구할 수 있다.

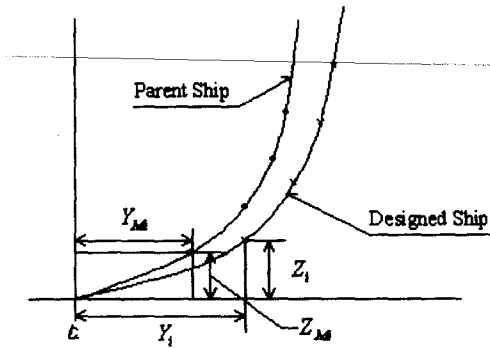


Fig. 6 New Frame Lines

4. 선형개발 프로그램 OCL

새로운 선형을 개발하기 위해 유한소오스분포법 (Finite source Distribution Method)을 응용한 이론저항추정법과 Lackenby의 $1-C_p$ 선형계획법을 조합하여 선형개발 프로그램 OCL (Optimization

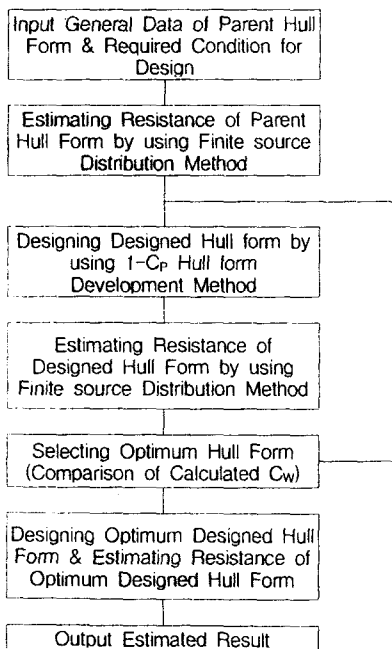


Fig. 7 Procedure of Calculation

of C_p and LCB)을 제작하였다. 이것은 기준선형의 주요치수와 윤셀(off-set)을 기본자료로 하여 개발선형의 C_p 와 LCB를 변환시키며 선형을 설계하고 조파저항 이론을 이용하여 조파저항을 추정하여 최종적으로 최소의 조파저항계수 (C_w)를 가지는 개발선형을 설계하도록 구성되었다.

5. 선형 개발

개발 대상 거북선의 기준선형에 대한 선형 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Characteristics of Turtle Ship

LOA (m)	34.242
LWL (m)	25.480
B _{MAX} (m)	10.303
B _T (m)	3.840
D (m)	6.364
T (m)	1.500
LWL/B _T	6.641
B _T /T	2.560
W.S.A (m ²)	261.860
∇ (m ³)	237.980
C _B	0.641
C _M	0.761
C _w	0.828
LCB (m)	1.470
KB (m)	0.820

2)의 결론 부분에 언급한 내용에 의하면 기본 거북선 형상은 선속 8 노트 이상 항주시 박리 및 와류 현상이 발견되어 저항이 급격히 증가하는 문제가 제시되었으므로 현실적 운항예상속도인 12 ~ 15 노트 범위에서 발생하여 저항이 급격히 증가하지 않도록 1 차적으로 개발된 프로그램 OCL을 사용하여 선형수정을 실시하였다.

프로그램 OCL 계산의 결과로 도출된 선도는 Fig. 8에 점선으로 기준선형과 비교 도시하였다.

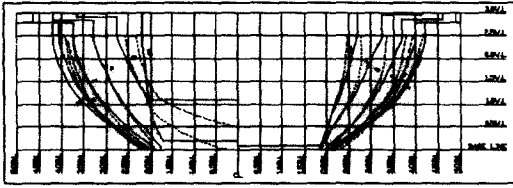


Fig. 8 Comparison of Body Plan

또한 기준선형과 개발선형의 조파저항계수를 모형시험을 통하여 계측하였으며 Table 2에서 이 조파저항계수들을 수치적인 방법(OCL)에 의해 계산된 결과들과 비교하였다.

Table 2 The results of resistance test at CWC

Method Vs (Knots)	$C_w \times 10^3$			
	OCL		Model Tests	
	C_{wM}	C_{wD}	C_{wM}	C_{wD}
12.0	1.394	1.273	1.228	0.808
12.5	1.378	1.281	1.369	0.946
13.0	1.632	1.497	1.512	1.176
13.5	1.791	1.634	1.715	1.501
14.0	1.736	1.569	2.028	1.858
14.5	1.784	1.652	2.413	2.264
15.0	1.893	1.761	2.937	2.839

* 위 Table 2에서,

C_{wM} : 기준선형의 C_w

C_{wD} : 개발선형의 C_w

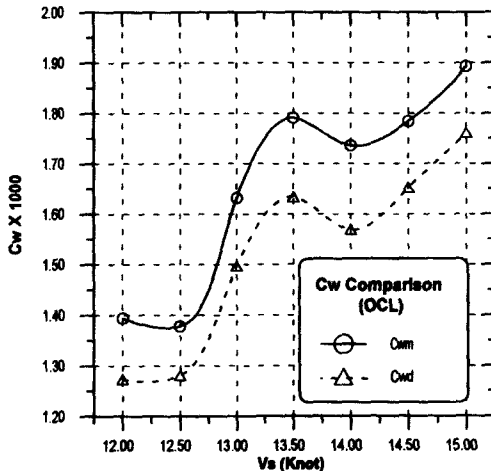


Fig. 9 Cw Comparison(OCL)

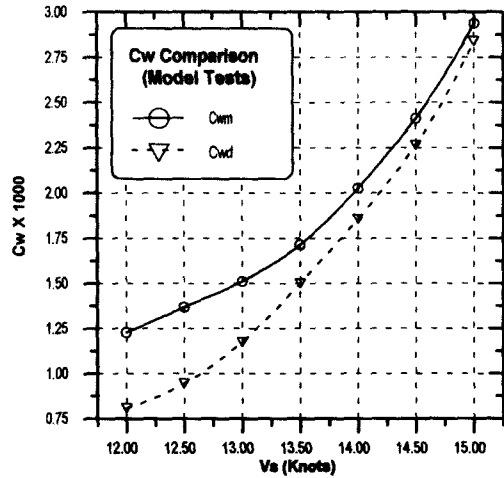


Fig. 10 Cw Comparison(Model Tests)

Table 2에 나타난 OCL에 의해 이론적으로 계산된 결과들과 모형시험에 의한 결과들을 다음 Fig. 11과 Fig. 12에서 그래프를 이용하여 비교하였다. Fig. 11에서는 기준선형의 조파저항계수 C_{wM} 을, Fig. 12에서는 개발선형의 조파저항계수 C_{wD} 을 상호 비교하였다.

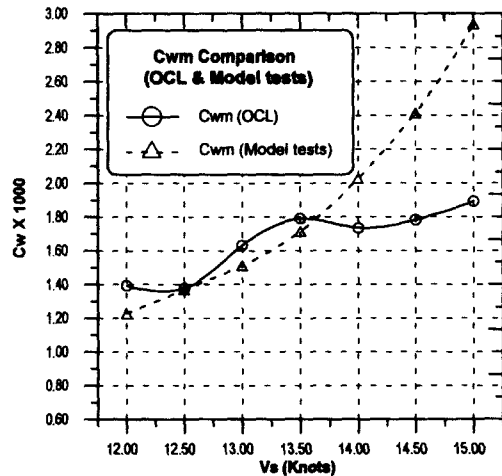


Fig. 11 C_{wM} Comparison(OCL & Model tests)

기준선형과 개발선형의 조파저항계수를 비교하기 위하여 다음 (23)식을 이용 C_{WR} 을 계산하여 Table 3에 수치적인 방법에 의한 결과를 모형시험에 의한 결과와 함께 나타내었다.

6. 결 론

기존 거북선 선형은 8 노트 정도에 항주가 적합하도록 설계된 것으로 추정되나 본 연구에서는 최근 추세에 맞추어 12~15 노트 범위 항주에 적합하도록 Body plan 개발을 수행하였다.

유한소오스분포법(Finite source Distribution)과 1-C_p 선형계획법을 응용한 OCL의 계산에 의하면 개발선형(LCB를 선미 쪽으로 11% 이동시킨 선형)에 대한 계산결과는 기준선형에 대한 계산결과에 비하여 조파저항이

- 12 노트에서는 약 8.6%
- 15 노트에서는 약 6.9%

감소될 것으로 추정되었으나 되었으나 모형시험(Model Tests)을 통한 결과에서는 개발선형의 조파저항이 기준선형의 조파저항에 비하여

- 12 노트에서 약 34.3%
- 15 노트에서 약 3.4%

감소하였다.

개발선형으로 모형시험을 수행한 결과는 OCL 계산결과와 함께 Table 2에서 비교하였으며 계산된 C_{WR}은 Table 3에 나타내었다.

본 연구에서 개발된 유한소오스분포법과 1-C_p 선형계획법을 사용한 이론저항계산법은 선박의 초기설계단계에서 최소조파저항선형 설계를 위한 정성적인 방법으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

NOMENCLATURES

- C_p : Prismatic coefficient
- C_w : wave making resistance coefficient
- F_n : Froude number (= U/√gL)
- g : gravity acceleration
- R_T : total resistance
- R_w : wave making resistance
- S : wetted surface
- U : speed of ship

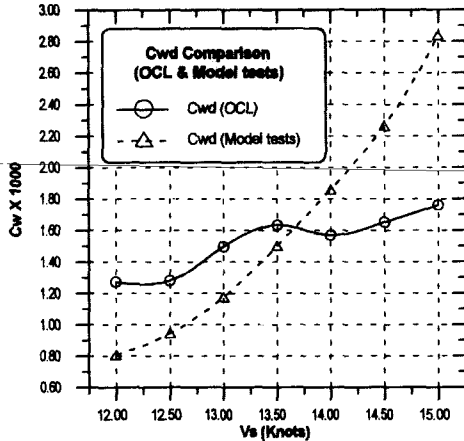


Fig. 12 Cwd Comparison(OCL & Model tests)

$$C_{WR} = \frac{C_{WD}}{C_{WR}} \quad (23)$$

여기서, C_{WD} : 개발선형의 C_w
C_{WR} : 기준선형의 C_w

Table 3 C_{WR} Comparison

Vs (Knots)	C _{WR} = (C _{WD} / C _{WR})	
	OCL	Model Tests
12.0	0.913	0.657
12.5	0.930	0.691
13.0	0.920	0.778
13.5	0.890	0.875
14.0	0.904	0.916
14.5	0.926	0.938
15.0	0.930	0.966

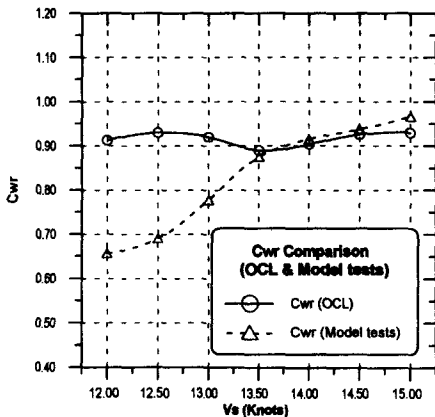


Fig. 13 Cwr Comparison(OCL & Model tests)

x, y, z : pair of field and loading points
 ξ, η, ζ : field point coordinates
 (x, y, z) : field point coordinates
 (ξ, η, ζ) : source point coordinates
 Δ : displacement of ship
 ρ : water density
 k_0 : wave number ($= g/ U^2$)
 Φ : total velocity potential per unit source
 ϕ : velocity potential due to the steadily moving body

참고문헌

- 1) Lunde, J. K., "On the linearized theory of wave resistance for displacement ships in steady and accelerated motion.", Presented at summer meeting of the Society of Naval Architectures and Marine Engineering in Washington D.C., September 6~7, 1951
- 2) 이귀주, 최영빈, "거북선 형상의 해상소각선 실용화 가능성에 관한 연구", 한국해양공학회지 제 11권 제 3호, pp.95~99, 1997. 8
- 3) Bai, K. J., J. H. McCarthy, "Proceedings of The Workshop on Ship Wave- Resistance Computations", David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, pp.1~65
- 4) Lee, Kwi-Joo, "Application of the Finite Source Distribution Method to Selection of Least Wave-making Resistance Hull Form", Master's Thesis, Stevens Institute of Technology, 1984
- 5) 단상호, "조파저항이론에 의한 선형개발에 관한 연구", 인하대학교 대학원 선박공학과 석사학위 논문, 1986. 2
- 6) 선박교재연구회 편, "선형설계를 위한 조파이론의 응용", 인하대학교 출판부, pp.5~117, 1994. 8
- 7) 이건철, "1-C_P법과 유한소오스분포법을 응용한 최소조파저항선형 설계법에 관한 연구", 조선대학교 대학원 선박해양공학과 석사학위 논문, 1999. 2