

해상에서 선박 속도성능해석을 위한 간편법 개발에 관한 연구

권영중 · 박강훈
수송시스템 공학부

<요 약>

해상에서의 바람 및 파랑에 기인된 부가저항 산정을 위한 Townsin-Kwon의 도식적 시리즈[1]의 범위를 확장하여서 방형계수 범위가 0.55~0.85선박의 하중상태 및 경하상태에서 본 시리즈를 사용할 수 있도록 하였고, 정면과 저항으로부터 사파저항을 산정키 위한 방향 수정계수를 구하였다. 이 시리즈를 표의 형태(Table 1A~1C 및 Table 2A~2B)로 나타내어서 이용의 편리성을 높이도록 시도 하였다. 뿐만 아니라 이 표준시리즈와 Cubic Spline 삼간법을 이용해서 해상의 바람 및 파랑부가저항을 산정할 수 있는 PC용 컴퓨터 프로그램(:ARW)을 개발 하였으며, 해상에서의 선박 속도손실량 및 동력증가량 산정용 컴퓨터 프로그램(:RESICAL)도 개발하여서 데스크 탑 및 노트북에서 실행이 가능토록 하였다. 아울러 이들 프로그램의 결과를 실선자료와 원래의 곡선 결과 및 기타 다른 추정법등의 결과들과 비교해 보았다. 이러한 비교결과 본 논문에서 제안된 법의 신빙성 및 실용가능성을 확인 하였다.

A Research on the Development of a Simple Method for Ship Speed Performance at Sea

Y. J. Kwon and K.H. Park
School of Transportation System Engineering

<Abstract>

Townsin-Kwon's graphic Series [1] for the added resistances due to wind and

waves at head sea is extended to cover block coefficient from CB 0.55 to 0.85 (normal & ballast) and direction reduction factors are derived using the result of model test to determine added resistance in oblique sea. And the results of the method are put into tabular forms, Table 1A~1C and Table 2A~2B to give more easiness. Moreover a PC program(ARW) is developed to caculate the added resistances due to wind and waves at sea using the modified graphic Series and cubic spline interpolation method. And another PC program (RESICAL) is developed for estimating added resistance, speed loss and power increase at sea. Comparisons are made the results of ARW with the original curves and RESICAL's with some published full scale data and some other methods for speed loss. From the comparisons, the authors conclude that their method provides a good computation for practical purposes.

1. 서 론

해상의 바람 및 파랑에 기인된 속력손실량 내지는 동력증가량을 신빙성 있게 산출하는 것은 선박설계나 선박의 경제적인 운용을 위하여 매우 중요하다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 즉 중요한 필요성을 예로 들어보면 첫째 시운전 결과 해석법의 개선을 위하여, 둘째 써비스 동력 마진 산정법의 개선을 위하여, 셋째 연료경제성을 고려한 최적 속력 산정을 위하여, 넷째 용선 계약 및 이행의 개선을 위하여 등이다. 하지만 해상의 파랑영향(특히 파랑의 반사파 및 회절파 영향)산정법이 너무 복잡하며, 신빙성이 문제가 되어서 산업 현장에서 이용하기에 심각한 문제점이 있다는 것을 많은 학자들이 지적하여 왔다[2]. 이에 본 저자가 최근에 영국왕립조선학회지에 비교적 이용성이 있는 도식법을 제안한 바 있으며[1], 본 법[1]이 문헌[9]의 법과 함께 1996년 6월 동경에서 개최된 국제표준규격협회(ISO)의 선박 시운전결과해석용 표준화법 제정을 위한 WG2의 CD안에 채택된 바도 있다[3]. 하지만 본 법의 적용 범위가 방형계수, $CB = 0.6 \sim 0.8$ 로 제한되어있으므로 대형 유조선, B/C선 및 고속선 등에 적용하기 어려운 것으로 지적된 바 있다[1]. 이에 본 논문에서는 실선자료를 이용해서 본 법의 적용범위를 $CB = 0.55 \sim 0.85$ 로 확장하였다. 또한 본 그래프들을 표준 Table로 표현하므로써 이용의 간편성을 한층 높이도록 시도했다. 아울러 해상의 바람 및 파랑부가저항, 속력손실량 및 동력증가량 산정을 위한 PC용 전산프로그램을 개발하여서 데스크 탑 및 노트북에서 실행이 가능하도록 하였다. 또한 본 논문에서 개발한 간편법의 결과를 실선자료, Aertssen 법[4] 및 Townsin-Kwon법[5]의 결과와 비교해 봄으로써 실용성을 검증해 보았다.

2. 해상에서의 속도성능 해석을 위한 간편법

2.1 해상의 파랑 및 바람 부가저항 산정법

해상에서의 파랑 및 바람 부가저항 산정을 간편하게 할 수 있도록 제안된

Townsin-Kwon의 그림 시리즈[1]의 적용범위를 $CB=0.55\sim 0.85$ 로 확장하였다. 이를 위하여 정기 여객선과 VLCC선형을 모선으로 해서 $CB=0.55$ 와 $CB=0.85$ 경우에 아래와 같은 상태에 관한 파랑 및 바람 부가저항을 추가로 계산하였다.

$F_n = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ (하중상태),

0.1, 0.15, 0.2(경하상태)

$BN = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$

$L(m) = 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400$

여기서 F_n 은 후르드수, BN 은 Beaufort 수, L 은 배의 길이를 각각 의미한다.

아울러 이용의 간편성을 한층 높이기 위하여 확장된 Townsin-Kwon의 그림 시리즈 내용을 표로 나타내어서 Table 1A~1C에 수록했다. 본 표 작성을 위해서는 위의 두 가지 선형 이외에 Series 60이 이용되었으며, 계산법의 흐름도는 Fig. 1에 수록되었다.

Table 1A~1C에서 해상의 파랑 및 바람 저항 비를 구할 수 있으므로해서 두 저항 중 어느것 한 가지만 산정하면 Fig.1과 같은 복잡한 과정을 거치지 않고도 전체 저항을 산정할 수 있을 것이다. 일반적으로 바람 저항은 필산에 의해서도 간편히 구할 수 있다는 점을 감안하면 본 저항비 이용의 편리성을 감지 할 수 있겠다. 이를테면 van Berlekom은 선수 바람저항을 식(1)에서 구할 수 있음을 보여 준 바 있다[10].

$$10^6 \Delta R_{wind} = 0.615 C_x L^2 V_r^2 \quad (1)$$

여기서 ΔR_{wind} 는 바람 부가저항(MN), L 은 배의 길이(m), V_r 은 바람의 상대속도(m/s)이며 C_x 는 선종 및 횡단면적의 함수로 표시한 선수 바람저항계수를 각각 의미한다. 하지만 Table 1A~1C는 선수 파랑 및 바람경우의 값이므로, 사파 및 사풍경우의 값을 구하기 위해서는 문헌[1]에 제시된 방향수정계수를 본 표의 값에 곱해 주어야 한다.

2.2 해상의 파랑 및 바람에 따른 방향 수정 계수

해상의 파랑에 기인된 부가저항 산정을 위한 기존의 방법들은 해석의 어려움 때문에 대부분 정면파(head sea)경우를 대상으로 하고 있다.

그러나 실제 선박의 항해시 바람과 파랑은 다양한 방향에서부터 접근해 온다. 따라서 임의의 방향에서 접근하는 파랑에 기인된 부가저항을 산정하기 위하여 다음과 같이 정의 되는 방향 수정 계수(Direction Reduction Factor)를 이용 할 수 있다.

$$\mu_i = \frac{\text{added resistance in oblique waves}}{\text{added resistance in head waves}} \quad (1)$$

이와 관련하여서 Aertssen[4], Townsin-Kwon[5], Townsin, Kwon et al.[1]등이 이 분야에 연구를 수행한 바 있다.

그러나 Aertssen이 제안한 방법은 컨테이너 선에 한하여 제한적으로 사용 할 수 있으며, 선박의 항로의 기상조건이 BN 5인 경우에 한하여 적용이 가능한 식으로서, 실제 선박의

항로의 기상조건은 90% 이상이 $BN \leq 5$ (Fig. 8)임을 감안하면 실제 문제에 적용하기에는 어려움이 있다.

Townsin-Kwon이 제안한 방법은 탱커와 컨테이션에 대하여 제안한 식으로서 다른 종류의 선박에 적용 할 경우에는 오차가 발생 될 것으로 생각 되어진다. 반면 Aertssen의 방법과는 달리 다양한 실제 선박의 항로의 기상조건을 고려 할 수 있는 장점이 있다.

또한 Townsin-Kwon et al.이 제안한 방법은 모델 실험 자료를 이용하여 컨테이션과 VLCC선에 한하여 방향 수정 계수를 제안 하였으나, 다른 종류의 선박에 적용 하기에는 역시 어려움이 있다.

현재까지 제안된 방법들은 위에서 살펴본 바와 같은 단점들이 있다.

본 연구에서는 임의 방향에서 접근하는 파랑에 기인된 부가저항을 산정하고자, Series 60 Model 실험[6]의 결과치를 이용하여 방향 수정 계수를 Table 2A~ Table 2B와 같이 구함으로써 임의의 방향에서 접근하는 파랑에 기인된 부가저항을 일반적으로 쉽게 구할 수 있도록 하였다. 이 실험의 실험조건 범위는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_n &= 0.1 \sim 0.25 \\ C_b &= 0.55 \sim 0.80 \\ L/B &= 5.5 \sim 8.5 \\ L/H &= 11.0 \sim 24.0 \\ \alpha \text{ (deg)} &= 180 \sim 0 \end{aligned}$$

2.3 속도성능 해석을 위한 PC용 전산프로그램 개발

$CB=0.55 \sim 0.85$, $F_n=0.1 \sim 0.3$ (하중상태 및 경하상태), $L=100 \sim 400m$, $BN \leq 7$ 사이에 있는 임의의 상태에 대해서 바람 및 파랑 부가저항을 구할 수 있도록 전산프로그램(ARW)을 개발하였다[11].

본 프로그램에는 Table 1A~1C 내용이 데이터로 입력되었으며, 식(2), (3), (4), (5)으로 표시되는 3차의 Cubic Spline곡선을 이용해서 내삽되도록 하였다. 즉 n개의 주어진 각점을 보간 하는 구간 별 3차 spline곡선이 식(2)과 같이 정의 될 수 있다.

$$Q_k(t) = \sum_{i=1}^4 B_{i,k} t^{i-1} \quad (t_k \leq t \leq t_{k+1}) \quad (2)$$

또한 $1 \leq k \leq n-2$ 일 때 연속적으로 분포하는 두 개의 인접하는 Cubic Spline곡선 $Q_k(t)$ 및 $Q_{k+1}(t)$ 는 식(2)와 (3)과 같이 정의된다. 여기서 P_k 는 양 끝단의 위치 벡터를 의미하며 t는 매개변수이다.

$$\begin{aligned} Q_k(t) &= P_k + P'_k \cdot t + \left[\frac{3(P_{k+1} - P_k)}{t_{k+1}^2} - \frac{2(P'_k)}{t_{k+1}} - \frac{P'_{k+1}}{t_{k+1}} \right] t^2 \\ &+ \left[\frac{2(P_k - P_{k+1})}{t_{k+1}^3} + \frac{(P'_k)}{t_{k+1}^2} + \frac{P'_{k+1}}{t_{k+1}^2} \right] t^3 \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{k+1}(t) &= P_{k+1} + P'_{k+1} \cdot t \\
 &+ \left[\frac{3(P_{k+2} - P_{k+1})}{t_{k+2}^2} - \frac{2(P'_{k+1})}{t_{k+2}} - \frac{P'_{k+2}}{t_{k+2}} \right] t^2 \\
 &+ \left[\frac{2(P_{k+1} - P_{k+2})}{t_{k+2}^3} + \frac{P'_{k+1}}{t_{k+2}^2} + \frac{P'_{k+2}}{t_{k+2}^2} \right] t^3 \quad (4)
 \end{aligned}$$

한편 식(1)과 같이 표시되는 Spline곡선의 각 끝점과 시작점의 곡률이 모두 영으로서 서로 같다고 본 natural spline 경우로 가정하여서, 식 (1)의 k번째 Spline 다항식 미지계수 $B_{i,k}$ 를 식 (4)와 같이 표시하였다.

$$\left(\begin{array}{l}
 B_{1,k} = \frac{P_{k+1} - P_k}{6t_k} \\
 B_{2,k} = \frac{P_k}{2} \\
 B_{3,k} = \frac{Q_{k+1}(t) - Q_k(t)}{t_k} - \frac{2t_k P_k + t_k P_{k+1}}{6} \\
 B_{4,k} = Q_k(t)
 \end{array} \right) \quad (5)$$

파랑 및 바람 저항비 프로그램(ARW)을 이용해서 해상의 기상 조건에 따른 전체 부가저항, 속력 손실량, 동력증가량 등을 계산 할 수 있는 전산프로그램(RESICAL)을 작성하였다. 본 프로그램에서 주어진 부가저항에 따른 추진기 효율 변화량, 기상의 방향수정계수, 일정 속도 때의 동력증가량, 일정동력에서의 속력손실량등의 계산에는 문헌[1]의 방법을 사용하였다. 프로그램RESICAL의 계산 흐름도는 Fig. 2에 수록하였다. Fig. 2에서 ΔR_{wave} 는 파랑부가저항, ΔR_{wind} 는 바람부가저항, μ_{wave} 및 μ_{wind} 는 방향수정계수, $\Delta \eta$ 는 추진기 효율 변화량, ΔP 는 동력증가량, ΔV 는 속력손실량을 각각 의미하며, 첨자 '0'는 천수(still water)에서의 값을 나타낸다. 여기서 써비스동력마진을 산정할 경우에는 해상의 파랑 및 바람 영향이외에 표면조도의 영향을 함께 고려해야 할 것이며, 이를 위해서는 Townsin-Dey[16]법이 인기가 있는 것으로 알려져 있다. 또한 선령에 따른 표면조도 추정을 위한 한가지 간편법을 본 저자도 최근에 제안한 바 있다[17].

본 프로그램의 source code는 FORTRAN 77로 작성되었으며, MS-FORTRAN ver 5.1 컴파일러를 이용하여 컴파일 하였다. 본 프로그램은 IBM PC 및 호환이 가능한 모든 PC의 데스크 탑 및 노트북에서 실행이 가능하도록 하였다. 또한 소스코드가 FORTRAN 77문법에 맞게 작성되었으므로 소스코드를 UNIX로 포팅하여 컴파일 할 경우는 UNIX 환경에서도 역시 사용이 가능하다.

2.4 실용 가능성 검증

본 논문에서 작성된 전산프로그램(ARW)의 정확성을 검증하기 위하여, 프로그램 ARW

의 결과와 Fig. 1에 의해서 계산된 원래의 구체적인 계산 결과 곡선과 Fig. 3에서 비교하였다. Fig. 3을 통하여 본 논문의 2.2에서 개발된 프로그램(ARW)의 결과가 원래의 구체적인 계산 곡선과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

다음으로 2.1에서 부가저항 산정을 위하여 수정된 법 및 프로그램 RESICAL의 이용가능성을 검토하기 위하여 본 법의 결과를 Aertssen 식[4], Townsin-Kwon식[5] 및 Aertssen의 실선자료[11] 결과와 함께 Fig. 4에 수록하였다.

Fig. 4에서 비교해 볼 때 본 논문에서 개발된 법의 결과가 $BN=6$ 이하에서는 비교적 다른 결과와 잘 일치하는 것으로 보이지만 $BN=6$ 이상의 거친 기상 상태경우는 본 저자법의 결과가 여타의 결과보다 비교적 높게 산정된 것으로 나타났다. 하지만 실제 항로 기상 상태의 80~90%는 $BN=4$ 이하 인 것이 일반적이라는 통계가 있을 뿐만 아니라[13], [14], [15] $BN=6$ 이상에서는 추진기 racing 현상으로 인한 VSL(Voluntary Speed Loss)가 발생하는 것으로 되어있으므로[11] ISL(Involuntary Speed Loss)가 의미를 상실하는 영역이라 하겠다. Fig. 4에 표시된 실선자료 경우도 $BN=6$ 이상에서는 같은 BN 상태의 경우에도 추진기 racing 때문에 실제 측정된 속도 손실량이 15~25%씩이나 차이가 나타났음을 알 수 있다. 이러한 점을 종합적으로 감안 해 볼 때 본 논문에서 제안한 간편법(Table 1A~1C, Table 2A~2B 및 전산프로그램)이 실용성이 있는 것으로 판단된다.

3. 결 언

Fig.1의 방법으로 해상의 바람 및 파랑저항비를 체계적으로 미리 계산하여서 정리한 Table 1A~1C의 표 및 방향수정계수 산정을 위한 표 Table 2A~2B를 이용하면은, 비교적 간단한 바람 부가저항만을 산정함으로써 해상의 파랑 및 바람에 기인된 전체 저항산정 때 간편성이 상당히 높아 질 것으로 기대한다. 또한 본 표는 1996년 6월에 국제규격협회(ISO)에서 속력시운전 산정을 위한 표준안 제정의 CD안[3]에 포함되어있는 Townsin-Kwon법[1]보다 그 적용 범위도 넓고 이용의 간편성도 높아진 것으로 판단된다. 아울러 Table 1A~1C를 데이터로 사용하고 본 논문의 2.2절에서 개발된 전산 프로그램결과는 Fig.3 및 Fig. 4를 통해서 검토해 볼 때 실용성이 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Townsin,R.L., Kwon, Y.J., Baree, M.S, and Kim, D.Y., "Estimating the Influence of Weather on Ship Performance ", Tran. RINA vol.135,1993
- [2] Seakeeping and Performance Committees, ITTC, Esp. 15th & 16th ITTC Proceedings 1978. 1981
- [3] ISO/TC8/SC9/WG2, "CD for Evaluation on Speed Trial under Wind and Waves", June. 1996(Tokyo)

- [4] Aertssen, G., "Service Performance and Trials at sea", App.V, Performance Committee, 12th ITTC, 1969
- [5] Townsin, R.L. and Kwon, Y.J., "Approximate Formulae for the Speed Loss Due to Added Resistance in Wind and Waves", Tran. RINA vol.125, 1983
- [6] Vossers, G., Swaan, W.A. & Rijken, H. : Experiments with Series 60 Models in Waves, Tran. SNAME, Vol. 68, 1960.
- [7] Meyers, W.G. , Sheridan, D.J. and Salvesen, N., "NSRDC Ship-motion and Sea-load Computer Program", NSRDC Report 3376, 1975
- [8] Mruo, H., "The Excess Resistance of a Ship in Rough Seas", ISP vol. 4, No.35, 1957
- [9] Kwon, Y.J., "The Effect of Weather, Particularly Short Sea Waves, on Ship Speed Performance ", Ph D Thesis, University of Newcastle upon Tyne, 1982.
- [10] van Berlekom, W.B., "Wind Forces on Modern Ship Forms - Effects on Performance", Tran.NECIES, vol. 97, 1981.
- [11] Aertssen, G. and van Sluys, M.F., "Service Performance and Seakeeping Trials on a Large Containership", Tran. RINA, vol. 114, 1972.
- [12] Choo, D. K., " An Approach to the Analysis of the Ship Performance", M Sc Thesis, University of Ulsan, 1996
- [13] Logan, K.P., Reid, R.E. and Williams, V.E., " Consideration in Establishing a Speed Performance Monitoring System for Merchant Ships ", Symp. of Shipboard Energy Conservation '80, SNAME, 1980.
- [14] Lidemann, K. and Robertsson, S., " An Analysis of the Weather Slow-down of a SBT-tanker in Ballast with Special Emphasis on Added Resistance ", DNV Report 80-0641 (Limited Distribution), 1980.
- [15] Townsin, R.L., Moss, B., Wynne, J.B. and Whyte, I.M., " Monitoring the Speed Performance of Ships ", Tran. NECI, Vol. 91, 1975.
- [16] Townsin, R.L. & Dey, S.K., " The Correlation of Roughness Drag with Surface Characteristics", Proc. International Workshop on Marine Roughness and Drag, RINA, 1990.
- [17] Kwon, Y.J. and Choo, D.K., " A Research on Ship Hull Roughness : Estimation Method and Effect on Ship Performance", Tran. NAK, Vol.33 No.2, 1996

Table 1A $\frac{\Delta R_{wave}}{\Delta R_{wave} + \Delta R_{wind}}$ Fn = 0.10 & 0.15 (normal condition)

IRN	FN	0.10										0.15									
		C/B	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.85	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85				
3	100		0.091	0.095	0.110	0.145	0.200	0.235	0.250	0.085	0.090	0.125	0.195	0.250	0.300	0.335					
	150		0.035	0.035	0.031	0.040	0.050	0.057	0.057	0.035	0.040	0.055	0.500	0.060	0.070	0.105					
	200		0.012	0.005	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.014					
	250		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000					
	300		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000					
4	100		0.360	0.380	0.400	0.365	0.385	0.550	0.515	0.556	0.385	0.370	0.345	0.465	0.560	0.595					
	150		0.150	0.160	0.190	0.155	0.195	0.335	0.425	0.160	0.200	0.210	0.200	0.270	0.355	0.420					
	200		0.055	0.075	0.080	0.080	0.080	0.110	0.200	0.070	0.095	0.110	0.110	0.160	0.205	0.260					
	250		0.025	0.030	0.035	0.030	0.060	0.095	0.135	0.019	0.035	0.050	0.065	0.090	0.110	0.140					
	300		0.010	0.010	0.010	0.025	0.030	0.030	0.050	0.000	0.010	0.020	0.035	0.045	0.050	0.060					
5	100		0.040	0.000	0.000	0.005	0.010	0.010	0.010	0.060	0.005	0.010	0.010	0.015	0.020	0.026					
	150		0.040	0.000	0.000	0.005	0.010	0.010	0.010	0.060	0.005	0.010	0.010	0.015	0.020	0.026					
	200		0.535	0.560	0.610	0.630	0.410	0.600	0.665	0.451	0.470	0.490	0.510	0.555	0.685	0.760					
	250		0.311	0.330	0.350	0.375	0.410	0.305	0.600	0.261	0.305	0.350	0.400	0.455	0.570	0.625					
	300		0.135	0.160	0.190	0.230	0.295	0.370	0.455	0.143	0.185	0.225	0.300	0.360	0.445	0.500					
6	100		0.062	0.078	0.110	0.140	0.200	0.250	0.300	0.090	0.110	0.120	0.200	0.270	0.320	0.400					
	150		0.095	0.095	0.080	0.085	0.080	0.120	0.135	0.065	0.070	0.070	0.115	0.185	0.210	0.256					
	200		0.970	0.980	0.965	0.970	0.935	0.940	0.955	0.900	0.900	0.900	0.920	0.930	0.925	0.941					
	250		0.780	0.785	0.775	0.790	0.875	0.885	0.895	0.820	0.820	0.820	0.850	0.780	0.880	0.900					
	300		0.600	0.610	0.600	0.635	0.680	0.710	0.725	0.535	0.545	0.575	0.635	0.685	0.745	0.785					
7	100		0.454	0.460	0.465	0.500	0.565	0.605	0.640	0.405	0.420	0.455	0.530	0.600	0.670	0.725					
	150		0.990	0.990	0.990	0.990	0.985	0.985	0.985	0.945	0.950	0.965	0.960	0.970	0.960	0.960					
	200		0.978	0.980	0.980	0.975	0.970	0.970	0.970	0.916	0.920	0.925	0.930	0.945	0.940	0.945					
	250		0.950	0.950	0.950	0.940	0.945	0.945	0.895	0.880	0.880	0.880	0.890	0.910	0.915	0.925					
	300		0.900	0.900	0.900	0.895	0.895	0.895	0.895	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870	0.870	0.890					
400		0.835	0.840	0.835	0.830	0.840	0.840	0.835	0.730	0.740	0.750	0.790	0.825	0.845	0.850						
400		0.755	0.765	0.745	0.750	0.750	0.765	0.770	0.640	0.645	0.650	0.710	0.770	0.780	0.790						

Table 1B $\frac{\Delta R_{wave}}{\Delta R_{wave} + \Delta R_{total}}$, Fn = 0.20 & 0.25 (normal condition)

FN	0.20										0.25										
	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	
3	100	0.080	0.090	0.115	0.215	0.295	0.365	0.390	0.075	0.095	0.140	0.220	0.310	0.380	0.075	0.095	0.140	0.220	0.310	0.380	
	150	0.020	0.020	0.030	0.030	0.070	0.100	0.120	0.020	0.030	0.045	0.060	0.075	0.090	0.020	0.030	0.045	0.060	0.075	0.090	
	200	0.005	0.005	0.005	0.010	0.010	0.015	0.020	0.005	0.005	0.000	0.005	0.005	0.015	0.005	0.005	0.000	0.005	0.005	0.015	
	250	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	350	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	100	0.550	0.600	0.715	0.740	0.790	0.805	0.830	0.840	0.360	0.485	0.600	0.695	0.775	0.840	0.360	0.485	0.600	0.695	0.775	0.840
	150	0.310	0.360	0.420	0.405	0.485	0.635	0.685	0.705	0.390	0.370	0.370	0.360	0.390	0.390	0.390	0.370	0.370	0.360	0.390	0.390
	200	0.160	0.185	0.200	0.205	0.315	0.460	0.525	0.525	0.121	0.170	0.205	0.230	0.320	0.355	0.121	0.170	0.205	0.230	0.320	0.355
250	0.080	0.090	0.100	0.130	0.205	0.305	0.370	0.370	0.069	0.095	0.110	0.140	0.205	0.230	0.069	0.095	0.110	0.140	0.205	0.230	
300	0.030	0.040	0.040	0.085	0.125	0.185	0.230	0.230	0.030	0.045	0.050	0.080	0.130	0.200	0.030	0.045	0.050	0.080	0.130	0.200	
350	0.005	0.010	0.015	0.045	0.065	0.085	0.105	0.105	0.010	0.015	0.015	0.040	0.070	0.090	0.010	0.015	0.015	0.040	0.070	0.090	
400	0.000	0.005	0.010	0.005	0.015	0.020	0.025	0.025	0.000	0.005	0.010	0.015	0.015	0.025	0.000	0.005	0.010	0.015	0.015	0.025	
100	0.850	0.880	0.880	0.890	0.905	0.950	0.920	0.920	0.670	0.700	0.780	0.810	0.875	0.930	0.670	0.700	0.780	0.810	0.875	0.930	
150	0.580	0.610	0.665	0.685	0.735	0.830	0.800	0.800	0.490	0.520	0.580	0.610	0.710	0.855	0.490	0.520	0.580	0.610	0.710	0.855	
200	0.390	0.430	0.480	0.540	0.615	0.750	0.815	0.815	0.350	0.385	0.440	0.490	0.615	0.775	0.350	0.385	0.440	0.490	0.615	0.775	
250	0.260	0.290	0.330	0.430	0.535	0.655	0.725	0.725	0.245	0.270	0.320	0.410	0.520	0.670	0.245	0.270	0.320	0.410	0.520	0.670	
300	0.180	0.190	0.215	0.335	0.450	0.550	0.600	0.600	0.160	0.185	0.225	0.340	0.450	0.560	0.160	0.185	0.225	0.340	0.450	0.560	
350	0.105	0.120	0.135	0.235	0.340	0.420	0.450	0.450	0.090	0.110	0.150	0.265	0.360	0.435	0.090	0.110	0.150	0.265	0.360	0.435	
400	0.060	0.065	0.090	0.140	0.195	0.260	0.300	0.300	0.020	0.050	0.090	0.170	0.240	0.295	0.020	0.050	0.090	0.170	0.240	0.295	
100	0.940	0.940	0.940	0.955	0.960	0.965	0.960	0.960	0.820	0.840	0.865	0.905	0.930	0.930	0.820	0.840	0.865	0.905	0.930	0.930	
150	0.860	0.865	0.880	0.895	0.905	0.930	0.935	0.935	0.705	0.720	0.775	0.850	0.880	0.935	0.705	0.720	0.775	0.850	0.880	0.935	
200	0.755	0.775	0.800	0.815	0.840	0.880	0.900	0.900	0.570	0.610	0.690	0.785	0.880	0.905	0.570	0.610	0.690	0.785	0.880	0.905	
250	0.635	0.660	0.680	0.725	0.760	0.815	0.835	0.835	0.445	0.515	0.610	0.715	0.775	0.860	0.445	0.515	0.610	0.715	0.775	0.860	
300	0.500	0.525	0.545	0.630	0.680	0.750	0.805	0.805	0.350	0.425	0.530	0.645	0.715	0.805	0.350	0.425	0.530	0.645	0.715	0.805	
350	0.370	0.395	0.440	0.540	0.620	0.690	0.755	0.755	0.270	0.350	0.450	0.570	0.660	0.750	0.270	0.350	0.450	0.570	0.660	0.750	
400	0.265	0.300	0.340	0.475	0.590	0.645	0.700	0.700	0.215	0.280	0.380	0.495	0.610	0.700	0.215	0.280	0.380	0.495	0.610	0.700	
100	0.950	0.955	0.965	0.970	0.980	0.985	0.985	0.985	0.860	0.865	0.896	0.930	0.955	0.960	0.860	0.865	0.896	0.930	0.955	0.960	
150	0.925	0.930	0.950	0.950	0.965	0.975	0.975	0.975	0.770	0.785	0.815	0.850	0.895	0.930	0.770	0.785	0.815	0.850	0.895	0.930	
200	0.890	0.890	0.910	0.920	0.935	0.950	0.950	0.950	0.690	0.705	0.735	0.810	0.865	0.915	0.690	0.705	0.735	0.810	0.865	0.915	
250	0.835	0.835	0.855	0.865	0.890	0.915	0.920	0.920	0.585	0.615	0.685	0.770	0.830	0.890	0.585	0.615	0.685	0.770	0.830	0.890	
300	0.765	0.765	0.790	0.810	0.845	0.880	0.895	0.895	0.485	0.540	0.625	0.730	0.830	0.890	0.485	0.540	0.625	0.730	0.830	0.890	
350	0.695	0.695	0.710	0.755	0.805	0.855	0.875	0.875	0.480	0.540	0.625	0.730	0.830	0.890	0.480	0.540	0.625	0.730	0.830	0.890	
400	0.620	0.620	0.635	0.700	0.770	0.845	0.860	0.860	0.400	0.480	0.575	0.700	0.750	0.840	0.400	0.480	0.575	0.700	0.750	0.840	

Table IC $\frac{\Delta R_{wave}}{\Delta R_{wave} + \Delta R_{initial}}$ Fn = 0.30(normal) & Fn = 0.10~0.25(ballast)

EN	0.30							0.10		0.15		0.20		0.25	
	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.80	0.85	0.80	0.85	0.80	0.85	0.80	0.85
3	100	0.085	0.130	0.225	0.320	0.270	0.300	0.220	0.250	0.200	0.215	0.165			
	150	0.020	0.030	0.040	0.050	0.090	0.100	0.070	0.080	0.050	0.080	0.040			
	200	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.015	0.020	0.010	0.020	0.005	0.010			
	250	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
	300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
	350	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
	400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
	100	0.350	0.470	0.570	0.660	0.730	0.720	0.710	0.630	0.670	0.630	0.650	0.615		
	150	0.215	0.290	0.370	0.400	0.415	0.570	0.650	0.475	0.510	0.485	0.540	0.455		
	200	0.125	0.160	0.210	0.255	0.270	0.435	0.340	0.300	0.330	0.200	0.235	0.300		
4	250	0.065	0.085	0.100	0.165	0.185	0.190	0.035	0.060	0.065	0.085	0.055			
	300	0.030	0.035	0.050	0.100	0.120	0.150	0.080	0.020	0.015	0.035	0.010			
	350	0.010	0.015	0.020	0.050	0.075	0.075	0.000	0.000	0.015	0.015	0.010			
	400	0.005	0.005	0.010	0.010	0.030	0.040	0.020	0.000	0.000	0.010	0.020			
	100	0.655	0.670	0.710	0.760	0.800	0.830	0.780	0.690	0.720	0.700	0.625			
	150	0.460	0.515	0.560	0.605	0.640	0.750	0.700	0.560	0.620	0.555	0.605			
	200	0.320	0.365	0.410	0.480	0.530	0.655	0.705	0.560	0.620	0.520	0.475			
	250	0.225	0.265	0.320	0.380	0.470	0.555	0.620	0.440	0.490	0.420	0.475			
	300	0.160	0.180	0.235	0.305	0.410	0.450	0.525	0.335	0.380	0.295	0.355			
	350	0.095	0.110	0.160	0.235	0.325	0.345	0.420	0.230	0.270	0.200	0.240			
5	400	0.045	0.060	0.090	0.140	0.190	0.240	0.315	0.150	0.155	0.140	0.100			
	100	0.815	0.825	0.860	0.890	0.900	0.940	0.950	0.865	0.880	0.800	0.805			
	150	0.670	0.700	0.770	0.815	0.840	0.880	0.880	0.800	0.825	0.780	0.745			
	200	0.550	0.600	0.685	0.750	0.785	0.810	0.810	0.725	0.730	0.715	0.670			
	250	0.450	0.500	0.600	0.685	0.740	0.735	0.740	0.635	0.670	0.645	0.600			
	300	0.355	0.415	0.520	0.620	0.695	0.665	0.670	0.555	0.590	0.570	0.520			
	350	0.280	0.345	0.450	0.560	0.645	0.610	0.610	0.480	0.510	0.500	0.450			
	400	0.230	0.280	0.380	0.505	0.575	0.580	0.580	0.445	0.445	0.425	0.410			
	100	0.865	0.875	0.910	0.915	0.945	0.980	0.975	0.940	0.950	0.905	0.925			
	6	150	0.820	0.835	0.870	0.880	0.895	0.940	0.950	0.880	0.905	0.925	0.900		
200		0.755	0.770	0.810	0.840	0.850	0.890	0.905	0.880	0.880	0.810	0.780			
250		0.660	0.690	0.740	0.795	0.810	0.830	0.845	0.830	0.845	0.855	0.765			
300		0.560	0.595	0.675	0.750	0.775	0.775	0.790	0.770	0.780	0.710	0.720			
350		0.470	0.520	0.615	0.710	0.750	0.730	0.745	0.705	0.715	0.665	0.680			
400		0.420	0.475	0.575	0.685	0.759	0.700	0.720	0.640	0.655	0.630	0.645			

Table 2A Direction reduction factor in irregular waves, M_i
 < 180° : head sea, 0° : following sea>

FN	0.10							0.15						
	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7		
0.55	1.0	1.0	0.6	0.5	0.5	0.7	1.0	1.0	0.6	0.5	0.5	0.6		
	1.0	1.0	0.5	0.4	0.3	0.5	1.0	1.0	0.5	0.3	0.3	0.4		
	1.0	1.0	1.0	0.9	0.4	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.2		
0.60	1.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.2	1.0	1.0	0.7	0.8	0.3	0.2		
	1.0	1.0	0.6	0.6	0.5	0.7	1.0	1.0	0.7	0.5	0.5	0.7		
	1.0	1.0	0.5	0.3	0.3	0.4	1.0	1.0	0.4	0.3	0.4	0.4		
0.65	1.0	1.0	0.7	0.9	0.4	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.4	0.3		
	1.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.1		
	1.0	1.0	0.7	0.7	0.5	0.7	1.0	1.0	0.7	0.5	0.6	0.7		
0.70	1.0	1.0	0.4	0.3	0.3	0.4	1.0	1.0	0.4	0.4	0.3	0.4		
	1.0	1.0	0.4	0.9	0.3	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.4	0.3		
	1.0	1.0	1.0	0.9	0.1	0.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.2		
0.75	1.0	1.0	0.6	0.5	0.5	0.7	1.0	1.0	0.7	0.5	0.6	0.7		
	1.0	1.0	0.4	0.5	0.3	0.3	1.0	1.0	0.4	0.5	0.3	0.4		
	1.0	1.0	0.5	0.9	0.3	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.4	0.3		
0.80	1.0	1.0	0.9	0.9	0.2	0.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.2		
	1.0	1.0	0.6	0.5	0.2	0.7	1.0	1.0	0.7	0.6	0.6	0.7		
	1.0	1.0	0.4	0.4	0.3	0.3	1.0	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4		
0.85	1.0	1.0	0.5	0.9	0.3	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.3		
	1.0	1.0	1.0	0.9	0.5	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.2		
	1.0	1.0	0.5	0.4	0.6	0.7	1.0	1.0	0.9	0.6	0.4	0.7		
0.90	1.0	1.0	0.4	0.3	0.3	0.4	1.0	1.0	0.4	0.4	0.3	0.4		
	1.0	1.0	0.4	0.9	0.3	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.3		
	1.0	1.0	1.0	0.9	0.2	0.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.2		

Table 2B Direction reduction factor in irregular waves, μ_i
< 180° : head sea, 0° : following sea >

FN	0.20							0.25						
	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7		
0.55	130°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.7	0.7	1.0	1.0	0.7	0.8	0.7		
	90°	1.0	1.0	0.3	0.6	0.5	0.3	1.0	1.0	0.4	0.7	0.6		
	50°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.4	0.2	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6		
	0°	1.0	1.0	0.9	0.8	0.4	0.3	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5		
0.60	130°	1.0	1.0	1.0	0.8	0.7	0.7	1.0	1.0	0.7	0.8	0.8		
	90°	1.0	1.0	0.4	0.6	0.5	0.3	1.0	1.0	0.4	0.7	0.6		
	50°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5	0.2	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6		
	0°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.4	0.2	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5		
0.65	130°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.7	0.8	1.0	1.0	0.6	0.8	0.8		
	90°	1.0	1.0	0.5	0.7	0.5	0.3	1.0	1.0	0.5	0.7	0.6		
	50°	1.0	1.0	0.9	0.8	0.6	0.3	1.0	1.0	1.0	0.8	0.6		
	0°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.4	0.0	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5		
0.70	130°	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0	1.0	0.6	0.8	0.7		
	90°	1.0	1.0	0.5	0.7	0.7	0.3	1.0	1.0	0.5	0.8	0.7		
	50°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.2	1.0	1.0	0.9	0.8	0.6		
	0°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5	0.0	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5		
0.75	130°	1.0	1.0	0.7	0.7	0.8	0.7	1.0	1.0	0.6	0.8	0.7		
	90°	1.0	1.0	0.5	0.7	0.5	0.3	1.0	1.0	0.5	0.8	0.7		
	50°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.2	1.0	1.0	0.9	0.8	0.6		
	0°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.1	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6		
0.80	130°	1.0	1.0	0.7	0.8	0.7	0.6	1.0	1.0	0.5	0.8	0.8		
	90°	1.0	1.0	0.5	0.7	0.7	0.3	1.0	1.0	0.4	0.7	0.7		
	50°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.3	1.0	1.0	0.9	0.8	0.6		
	0°	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5	0.2	1.0	1.0	0.9	0.7	0.5		

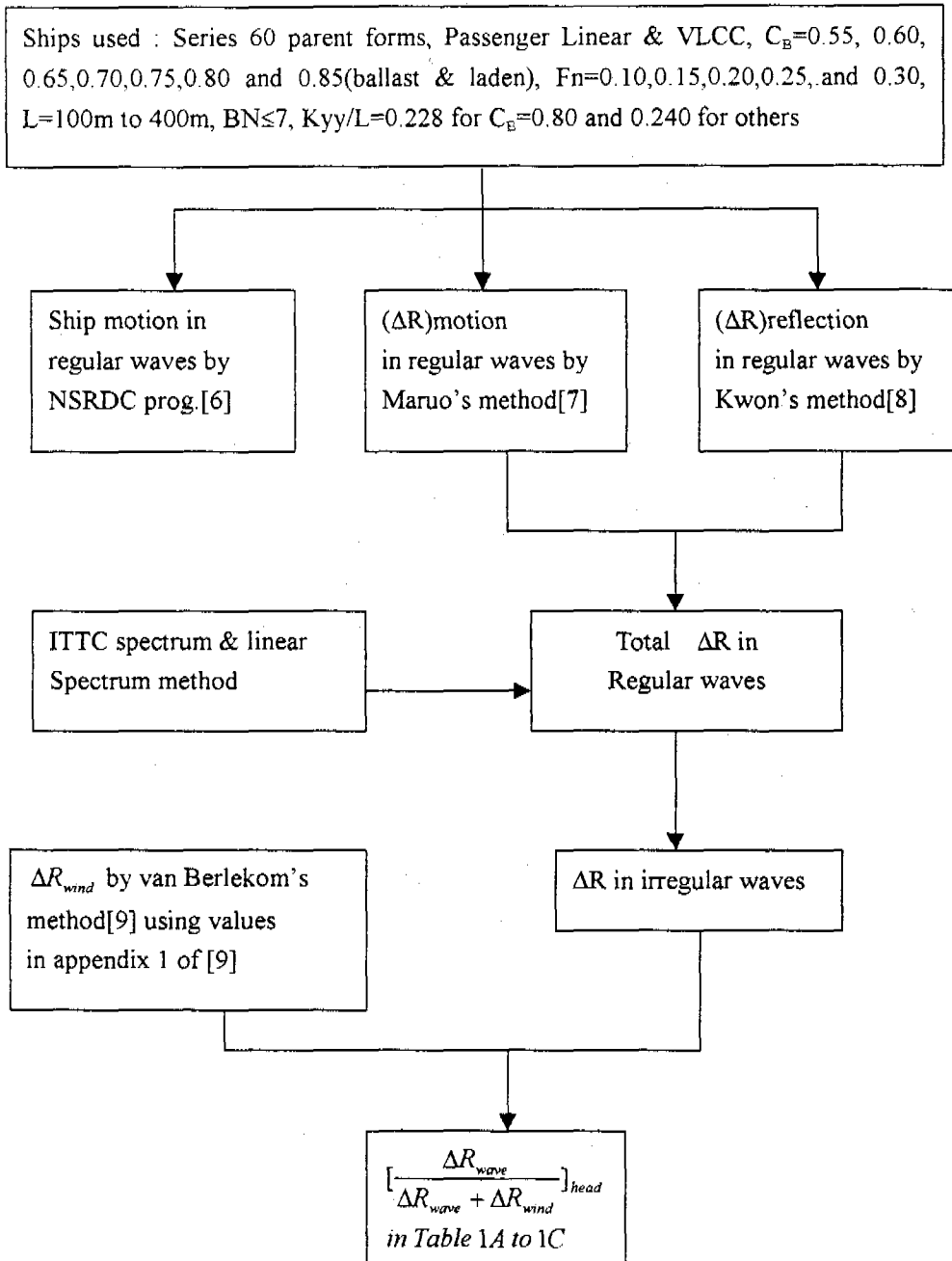


Fig. 1. Calculation method for Table 1A~ Table 1C

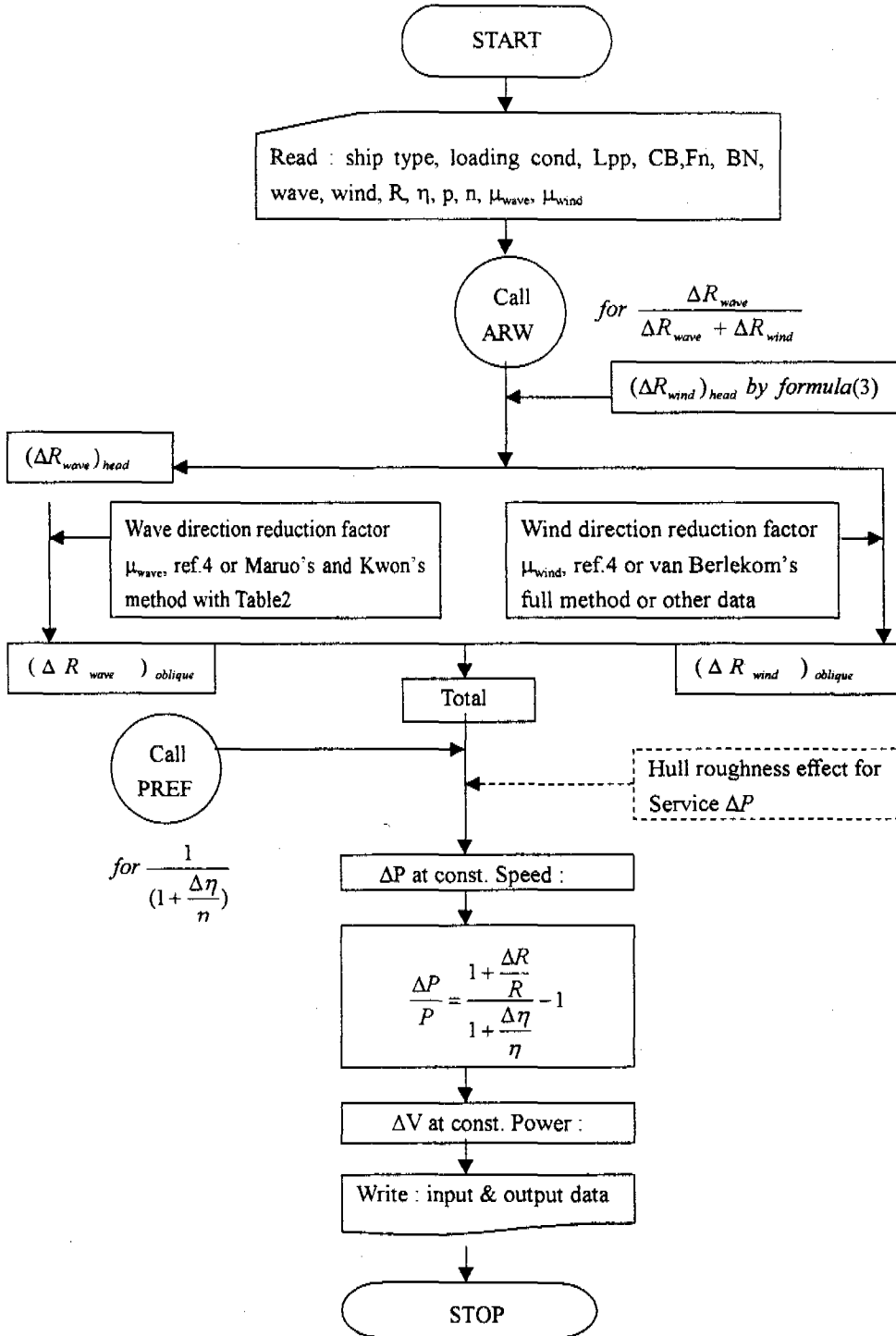
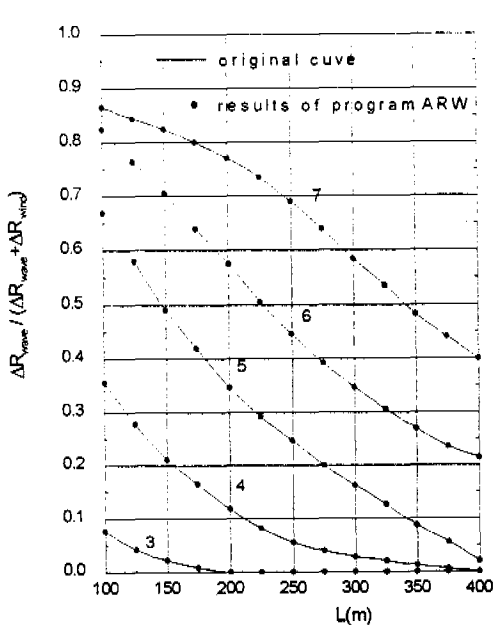
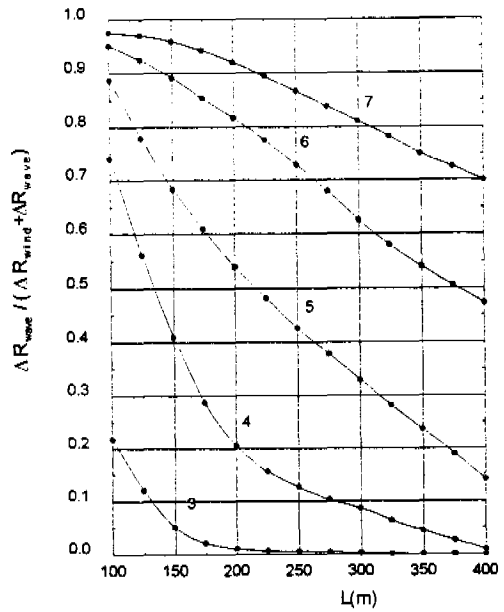


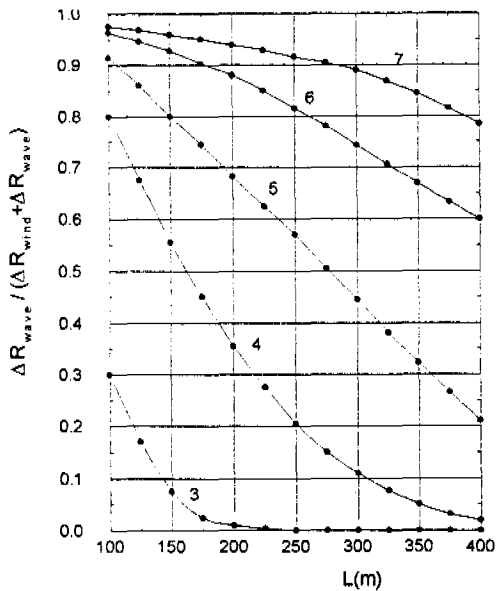
Fig. 2. Flow chart of RESICAL for ΔR , ΔP , ΔV



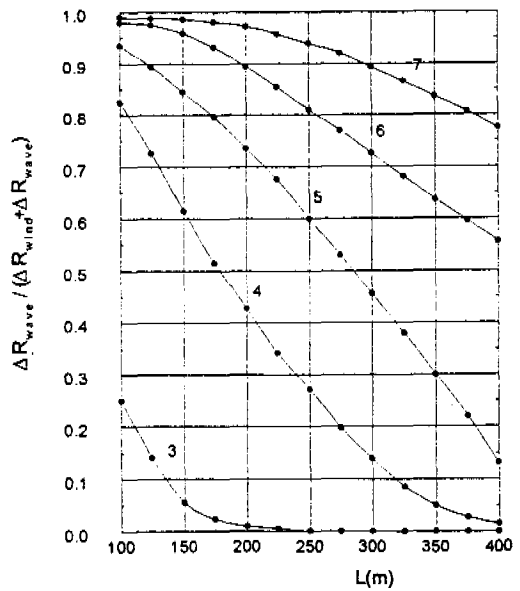
$C_B = 0.55$ (Fn = 0.25, normal)



$C_B = 0.70$ (Fn=0.20, normal)



$C_B = 0.80$ (Fn=0.15, laden)



$C_B = 0.85$ (Fn=0.10, laden)

Fig. 3. Comparison of Results of Authors' Program with the Original Curve

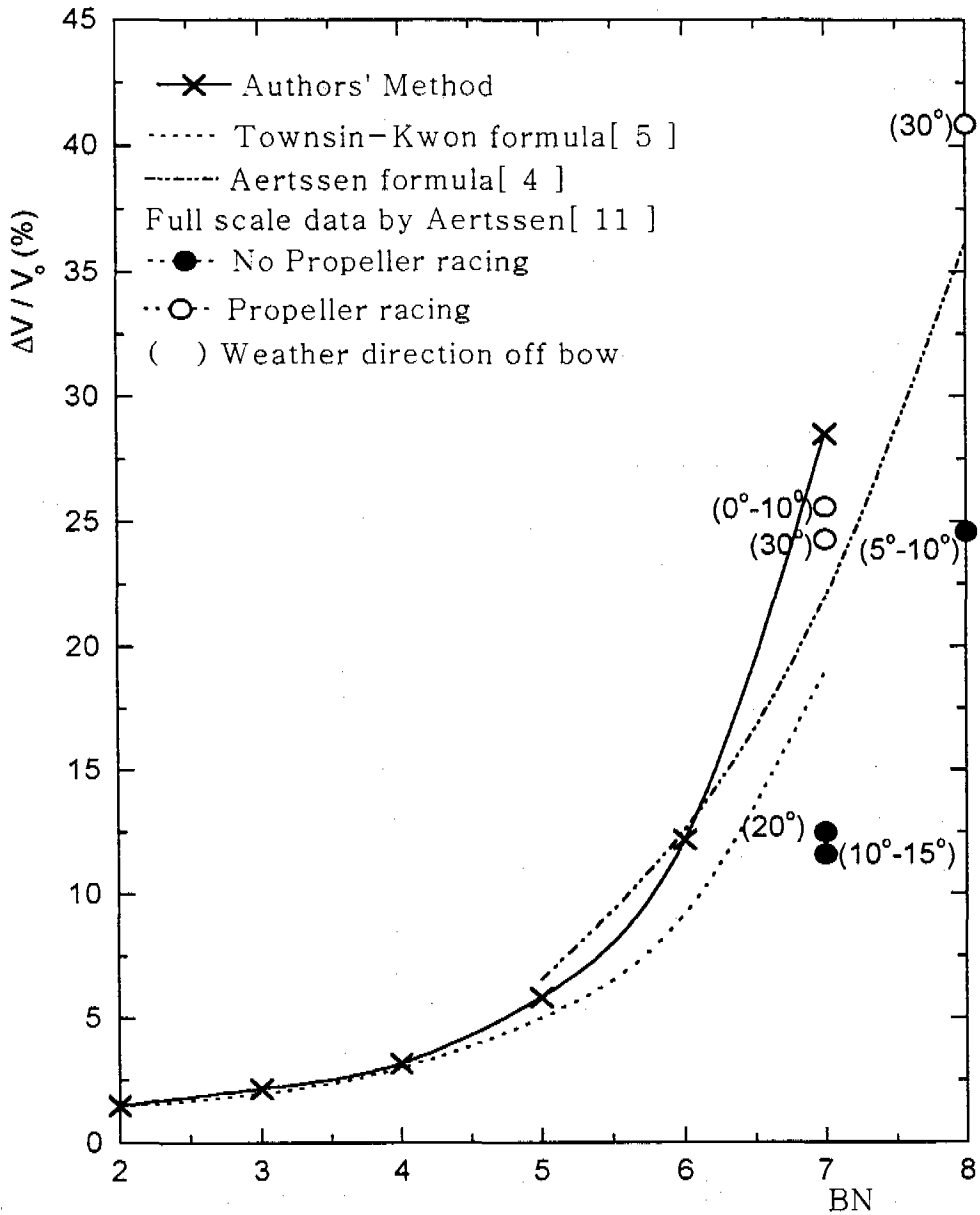


Fig. 4. Comparison of Authors' Method with Aertssen Formula, Full Scale Data (DART EUROPE, $C_b=0.59$) and Townsin-Kwon Formula for Containership