

平坦氷에서의 船舶性能에 關한 考察

朴 命 圭* · 高 尚 龍**

A Consideration on Ship Performance in Level Ice

Myung-kyu, park · Sang-young, koh

目	次
1. 머리말	3.2 모형크기의 자료
2. 역사적 고찰	3.3 관설
2.1 1900년까지	3.4 모형시험의 인자적계열
2.2 1900년~1940년	3.5 마찰
2.3 1945년~1960년	3.6 준 경험식예측방법
2.4 1960년~현재까지	3.7 분석방법
3. 평탄빙 성능의 종합	4. 참고문헌
3.1 실선의 자료	

1. 머리말

1888년부터 1988년까지 발간된 평탄빙(平坦氷, Level Ice)에서의 선박성능에 관한 문헌을 고찰하였다.

본고찰은 과거의 역사적 발전을 추적하고, 많은 부문에서 결과를 종합하였다. 주된 문제는 양질의 실물자료가 태부족하였다. 여기서는 얻을 수 있는 자료와 일치한다고 주장하는 몇가지 상이한 준경험식 및 해석 방정식들을 소개한다. 3개의 인자계열의 모형시험 결과들은 약간의 모순된 결과를 보

여준다. 관설(冠雪, snow cover) 및 氷과 선체와의 마찰 영향을 논하고, 쇄빙선 설계의 최근 발달을 기술한다.

2. 역사적 고찰

2.1 1900년까지

Runeberg(1888/89)가 특별히 Baltic 해에서 기선들의 동기(冬期)항해 및 쇄빙의 시행에 관한 그의 광범위한 논문을 출판한 것은 바로 100년전 일

* 한국해양대학 선박공학과.

** 한국해양대학 대학원

이다. 그는 연속 쇄빙 및 charging의 2가지를 논하였고 선수에서의 수직압력에 관한 식을 유도하였다. 깨진 “빙후(氷厚)” 및 선수단(fore end)에서의 총높이”는 연속 쇄빙의 경우에 대하여 선박 기하학으로부터 계산하였다. 그는 그 결과 6척의 선박의 실제성능과 총체적으로 잘 일치한다고 주장하였다. 그는 저항에 관한 마찰의 중요성 및 어떠한 증명없이 선수의 선수각의 역할과 마찬가지로 마찰계수를 0.05로 취하였다.

“수적성분은 가능하면 커야하고, 수선(水線)에서의 bow very sloping을 갖게 하므로서 효과가 있었다”고 인식하였다.

비판적인 사람들은 100년동안 큰 발전을 못하였다고 의당 말할 것이다. 그것 이외에 19세기에 발표된 논문은 없었다.

2.2 1900년~1940년

Karl(1921)은 간단한 주석에서 쇄빙선의 동력, 배수량, 길이 및 흘수를 결정하는 약간의 경험 방정식을 발표하였으나 그들에 대한 유도 및 증명은 없었다. 그는 하향력(下向力)을 얻는데는 낮은 선수각이 중요하다고 인식하였다.

Simonson(1936)의 미국에서의 첫번째 기고에 나타난 것에 의하면 첫째로 빙강도(氷強度)의 중요성을 인식하고, 1895년 Illinois 대학에서 실험에 언급하였다. 온도 $[-7^{\circ}$ 에서 -5°C]에 대한 빙 인장강도는 $0.7-1.7\text{Mpa}$ [$102-256\text{psi}$]이라고 발표하고, 해수빙은 더 낮고, 청수빙은 더 높은 숫값이었다. 그는 또한 선수각이 중요하다는 것을 보여 주었고, 추력, 수직력 및 트림각의 함수로서 선수각에 대한 간단한 방정식을 유도하였다.

그는 “주기판의 정지없이, 주어진 선박으로 쇄빙할 수 있는 빙의 최대 두께는 선수에서의 제한 각도에 의한다”고 결론을 내렸다. 그리고 그는 frame section들에 빙의 쇄빙력을 경감하기 위하여는 상당한 flare를 주어야 한다고 부언하였다.

다른 세계 2차대전 이전의 논문으로는 연속 모우드 쇄빙저항을 탐구하기 위한 준 경험 방법을 적용하였던 shimansky(1939)의 것이 있었다. 그는 쇄빙선에 관한 몇가지의 인자를 개발하고 조건적 빙질표준(條件的 水質標準)이라 명하였다. 즉 방정

식의 형식은 전개하였으나 그 방정식의 어떤 계수들을 실선 자료에서 결정하지 않으면 안되었다.

2.3 1945년~1960년

2차대전후 Johnson(1946)은 USCG의 쇄빙선박에 관하여 기술하였고 Vinogtadov(1946)은 몇가지 소련의 경험을 기술하였으며 하향 쇄빙력(下向碎氷力)에 관한 방정식을 전개하였다. St. Lawrence 해협의 개업을 축하하는 SNAME 춘기 집회에서 (아마도 쇄빙선과 관련한 첫번 ‘회의’) German(1959) 및 Watson(1959) 2사람은 Canada의 경험을 재고하고 Canada 운수성을 위하여 그 당시 운항하던 쇄빙선에 관하여 기술하였다. Thiele(1959)는 마찰을 포함하는 4가지 문제를 강조하는 쇄빙선 운항의 기술적인 면을 기술하였고, Ferris(1959)는 쇄빙선의 치수비와 형을 논하였다. 특히 북구에서 연구, 발전이 틀림없이 있었으나 이것외에는 1960년 이전에 발표된 것이 없었다.

2.4 1960년~현재까지

광범위하고 주요한 문헌은 1960년이후에 발표되었다. Manhattan항해 및 유가의 급상승은 광범위한 북극 발전의 약속으로 이어졌고, 쇄빙선 설계의 중요성 및 관빙수(冠氷水, ice covered water)에서 사용하기 위한 구조물에 흥미를 제공하였다.

모험시험, 얼음 탱크 및 해석기술의 출현은 그 과제에 더욱 과학적인 접근을 하도록 하였다.

Corlett 및 Saith(1964)는 그와같은 첫번째 시험 중의 하나를 기술하였는데 그 내용은 작은 Baltic 쇄빙선 *Perkun*을 위한 것이었다. Kashteligan 등(1968)은 평탄빙 저항해석을 처음으로 세심하게 시도한 것으로 알려져 있다.

그들은 전빙저항(全氷抵抗) R_i 에 대한 방정식을 제공하였다.

$$R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots\dots\dots (1)$$

단, R_1 = 쇄빙에 의한 저항

R_2 = 무게(weight)에 관련된 힘에 의한 저항

(즉 쇄빙편의 잠수, 회전, 쇄빙선 위치 변경 및 건조(乾燥)마찰저항)

R_3 = 빙편 사이의 통과에 의한 저항

R_4 = 수저항 및 조파저항

그들이 제공한 방정식은 (R_4 없이 다음과 같다)

$$R_i = K_1 \mu_0 B \sigma h + K_2 \rho_i B \rho_i h^2 + K_3 \frac{1}{\eta_2} B^{3/4} V^{7/5} \dots \dots (2)$$

단, σ = 빙강도

B = 선폭

h = 빙후(氷厚)

ρ_i = 빙밀도

μ_0, η_2 = Shimansky의 빙절단인자(氷切斷因子)

K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 = 실험으로 결정된 계수
(0.004, 3.6, 0.25, 1.65, 1.0)

이 방정식은 모형 및 *Ermak*의 실선 시험에서 도출되었다.

Lewis 및 Edwards(1970)는 앞논문에 대한 충분한 재고찰을 통하여 다음 방정식을 유도하였다.

$$R_{im} = C_0 \sigma h^2 + C_1 \rho_i g B h^2 + C_2 \rho_i B h V^2 \dots \dots \dots (3)$$

단, R_{im} = 물의 마찰 및 조파력을 제외한 평균 저항

C_0, C_1, C_2 = 실험적으로 결정되는 무차원 계수

g = 중력의 가속도

첫항은 쇄빙 및 마찰을 나타내고, 둘째항은 빙부력(氷浮力)에 의한 전저항력을 설명하고, 셋째항은 선박 및 쇄빙편 사이의 momentum 교환에 의한 전저항력을 설명한다. 그들은 그방정식을 σh^2 으로 나누어 무차원화 하였다.

$$R' = C_0 + C_1 B' N_0 + C_2 B' N_1 \dots \dots \dots (4)$$

단, $R' = R_{im} / \sigma h^2$ · 무차원 평균빙저항

$B' = B / h$ · 무차원 폭

$N_0 = \rho_i g h / \sigma$ · 체적수

$N_1 = \rho_i V^2 / \sigma$ · 관성수

그들은 *Wind-class, Raritan, M-9* 및 *M-5*의 실선 및 모형시험에 잘 맞는 $C_0=0.146, C_1=8.840$ 및 $C_2=5.905$ 의 값을 얻었다. 그들은 계속 유사한 무차원 방법으로 *Wind* 자료를 더욱 충분히 분석하여 *Wind*의 실선자료와 (a) 모든 자료 및 (b) 모형자료만을 사용한 준 실험방적 사이에 가장 잘맞는

곡선을 보여주었다. 그러나 그들 모형은 실선 자료에서 발견되지 않았던 V^2 항을 예측하였고, 그들은 실선자료의 회귀분석에서 관설항을 포함시켰다. 그것은 *Wind* 급 쇄빙선에 대하여 약 2long ton/inch(8KN/cm)의 추가 저항이 주어졌다.

White(1969, 1970)는 선수성능을 계산할 수 있는 순수한 분석 방법을 제공하였다. 그의 주된 공헌은 (a) 개선된 연속 쇄빙 (b) 개선된 래밍 및 (c) 개선된 뽑아냄 능력(extraction ability)에 대한 바람직한 선수의 질(Quality)을 확인하는 것이다. 그는 동시에 3가지의 능력을 개선하는 것은 다음 3가지의 질에 달려 있다고 결론지었다.

즉 (a) 펼친각여각(spread angle complement)의 감소 즉 무딘선수

(b) 마찰계수의 감소

(c) 추력의 증가

그는 이들 특징과 일치하는 Fig. 1에서 보인 선수형을 제안하였으며 이형은 북극항해를 위하여 *Manhattan*에 사용되었다. Crage 등(1971)은 11척의 쇄빙선에 관한 "wax형"빙에서의 일련의 모형 시험을 기술하였다.

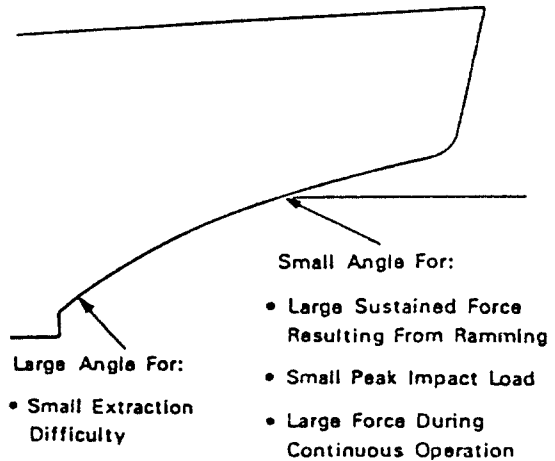


Fig. 1 White's(1969) recommended bow form for a polar icebreaker, as used in the design of the *Manhattan*.

간단히 선수기하학과 빙판에 작용하는 수직력을

고려하므로서 그들은 쇄빙후(碎氷厚)에 대한 이론 방정식을 유도하였다.

$$\frac{h\sqrt{\tau}}{\sqrt{T}} = \frac{1.53}{\sqrt{\tan(i+\beta)}} \dots\dots\dots (5)$$

단, τ = 빙의 인장강도
 T = 추력
 i = 선수각
 $\beta = \tan^{-1} f$ 여기서 f 는 마찰계수

그들은 Fig. 2와 같이 $\frac{1}{\sqrt{\tan(i+\beta)}}$ 에 대한 $\frac{h\sqrt{\tau}}{\sqrt{T}}$ 를 plot하여 모형시험의 좋은 상관관계를 얻었다. 또한 그들은 CCGS wolfe로부터 하나의 실선자료점을 얻었다.

한편 모형자료가 그들 방정식에 잘 맞는데 대하여 하나의 실선점과 비교하여 주어진 추력에 대한 쇄빙후를 과잉 예측하였다. 그러나 Fig. 2과 같이 “신 모형빙”에서의 한 모형시험이 실선크기의 점과 잘 일치 한다고 지적하였다. 아마도 Kashteljan 등(1968)과 같이 빙편들의 침하등과 같은 다른 항은 무시하고 다만 그들 방정식에서 단순히 파괴항만을 고려하였기 때문에 실선 크기의 자료점과 잘 일치 않았어도 놀라지 않은 것 같다. 또한 건조하고 껌질이 단단하게 된 관설위에서의 건조하고 도장(塗裝)도 얇은 강판으로 된 toboggan 썰매의 마찰을 측정하였다. 정적마찰(f_s) 및 운동마찰(f_k)의 평균값을 다음과 같이 얻었다.

$$\left. \begin{aligned} f_s &= 0.30 \rightarrow 0.35 \\ f_k &= 0.07 \rightarrow 0.23 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

Enkvist(1972)는 평탄빙에서의 선박 성능 문헌에 하나의 주요한 것을 추가하였다. 그는 Moskva급, Finncarrier 및 Jelppari의 3선박에 대한 모형시험을 지도하였고, 그 3척의 실선자료와 자기의 결과를 비교할 수 있었다. 그는 분석작업, 차원해석 및 몇 가지 가정을 조합하므로서 3개의 항으로 된 빙저항에 대한 준 경험방정식을 도출하였다.

$$R_{tot} = C_1 B h \sigma + C_2 B h T \rho_{\Delta g} + C_3 B h \rho_i V^2 \dots\dots\dots (7)$$

(탄성력 (중력 또는 (질량력 또는
 또는 잠수) 속도의 존항)
 파괴항)

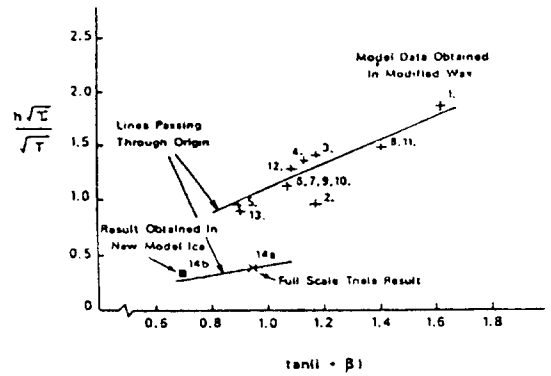


Fig. 2 showing the relationship by crago et al. (1971) between their model data, one full-scale point, and one “new model ice” result and their equation for thrust.

단, ρ_w = 물의 밀도, $\rho_{\Delta} = \rho_w - \rho_i$

이 식은 더 수정되어 무차원화 되었다. 즉

$$\frac{R_{tot}}{BhT\rho_{\Delta g}} = [1 + C_f(f)] \left\{ C_{\sigma} \left(\frac{\sigma}{T\rho_{\Delta g}}, \frac{T}{n} \right) + C_s + C_v \left(\frac{V}{\sqrt{gT}}, \frac{T}{n} \right) \dots\dots\dots (8) \right.$$

단, C_f = 상수와 마찰계수의 곱과 같다고 가정한 기계적 마찰의 영향함수

즉 $C_f = k \cdot f$

정상속도와 함께 저속($v \approx 0$)에서의 모형시험을 하므로서 속도 의존항을 분리시킬 수 있고, 저속에서의 사전에 톱으로 짜른 빙($\sigma \approx 0$)으로 시험하므로서 잠수항을 분리시킬 수 있었다. 그리하여 자기의 방정식에서 3개의 항사이의 관련성을 규정할 수 있었다. 그는 모형시험에서 실선자료와 잘 맞는 예측을 하기 위하여 $C_f = 0$ 로 가정하고, 처음으로 가장 잘 맞는 C_{σ} , C_s , C_v 의 값을 결정하였다. 그는 또한 3개의 다른 마찰계수로 모형시험을 하여 가정한 관계 $C_f = k \cdot f$ 에서 k 를 유도하였다. 그는 C_{σ} 를 $(\sigma_s E_m / \sigma_m E_s)$ 에 곱하였다. 모형빙이 실제빙에 비하여 $(\frac{E}{\sigma})$ 값이 너무 작기 때문에 모형빙에서 파괴항이 너무 높아서 $(\frac{E}{\sigma})$ 값을 감소시켜야 했다.

선박에 대한 f 값을 가정하고 모형결과와 실선크

기에 대한 R_{tot} 을 계산하기 위하여 방정식(8)에서 C_s , C_v , C_r 를 사용하였다. 실선에서 f 를 0.3정도로 가정하면 실선의 자료와 자기 예측과의 사이에 합리적으로 일치하는 것을 발견하였다.

Enkvist(1972)역시 자기의 모형빙의 강도에 관하여 상세히 시험하고 자연빙(自然氷)에 관한 강도 계산을 하였다. 그는 썰매를 사용하여 자기의 모형빙과 자연빙에 관하여 많은 마찰시험을 하였다. 상기의 파괴항 C_o 의 '수정'은 만일 $(\frac{E_s}{\sigma_s}) = 5,000$ 및 $(\frac{E_m}{\sigma_m}) = 1,000$ 이 비합리적인 값이 아니라 가정하면 $(\frac{\sigma_s E_m}{\sigma_m E_s})$ 는 0.2의 차수이기 때문에 이항의 중요성을 상당히 감소시키는 효과를 가진다.

그뒤의 연구에서 Enkvist(1983)는 자기의 사전톱으로 짜른 빙과 creeping 속력에서 하는 모형시험 기술을 16척의 실선에 적용하였다. 실선의 파괴항은 소형선에 적용하는 보다 큰 숫값으로 전체 영속력저항의 40-80% 사이라고 추정하였으나 더 큰 값을 갖는 결과를 얻었다. 이것은 아마도 아직까지 실제 크기에서의 파괴항의 중요성이 인정되는 가장 신뢰할 수 있는 출간된 추정이 될 것이다.

Poznak 및 Ionov(1981)는 모형으로 "중형 쇄빙선"을 위한 파괴항은 전빙저항의 약 40% 마찰항은 약 30%인 것을 보여주었다.

Johansson 및 Makinen(1973)은 Enkvist의 분석 방법을 9척의 bulk carrier 모형의 일련의 인자의 모형시험에 응용하였다. 실제크기의 예측 형식으로 제공한 그들의 결과는 Fig.3과 같으며 다음과 같이 결론지었다.

1. 선수각을 82°에서 20°로 감소하므로써 약 60%의 빙저항을 감소하였다.
2. 길이의 38%증가는 약 30%의 빙저항을 증가시켰으며 길이의 38% 감소는 약 10%의 빙저항을 감소시켰다.
3. 선폭의 38% 증가는 약 40%의 빙저항을 증가시켰고, 선폭의 27% 감소는 약 35%의 빙저항을 감소시켰다.

그들은 뒤에(Virtanen 등 1975) 그들 시험의 오차범위내에서 홀수의 효과를 연구하였으나 저항의 영향은 아무것도 발견못하였다.

Edwards 등(1972)는 1척의 Great Lakes 쇄빙선

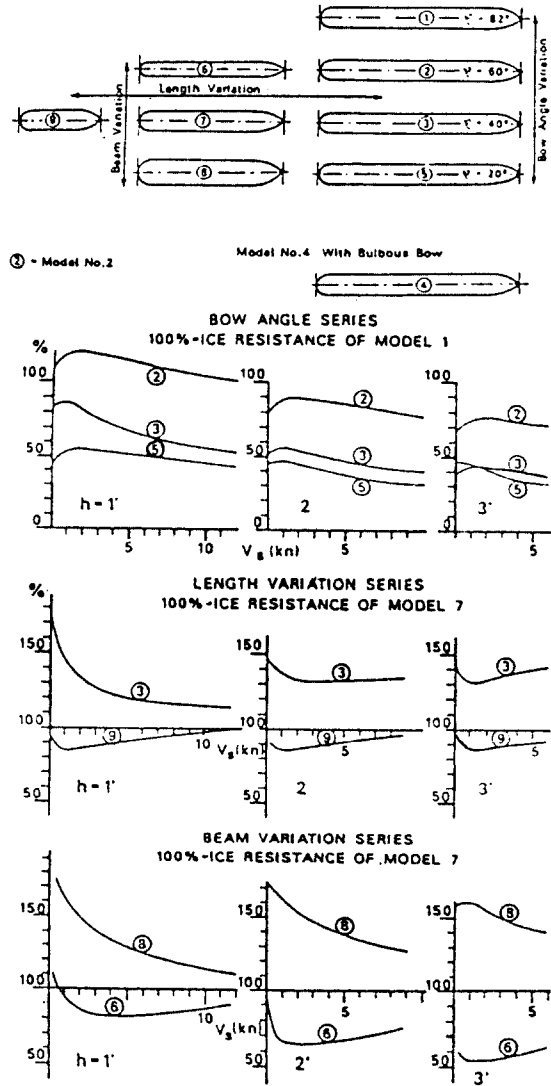


Fig.3 The results of Johansson & Mäkinen(1973) parametric series of tests showing variations in length, beam and bow angle.

USCGC Mackinaw에 관한 일련의 광범위한 실제 크기 및 모형시험을 하였다. 그러나 실선 '저항'은 3개의 추진축(선미 2개, 선수 1개) 각각의 추정 추력을 합하므로써 간접으로 결정하였다. 이때 추정 추력에는 전류, 전압, 및 rpm의 전기적 계측이 전혀 없었다.

이 측정에서 토크는 계산하고 개방수면(開放水面, open water) 추진시험에서 추력을 결정하였다. 그 결과에서 가장 잘 맞는 회귀 방정식을 결정하였다.

$$R = 5.9 + 3.6hv + 135sc - 0.66sc \cdot CF \dots (9)$$

단, 숫자 상수는 반올림하였다.

SC = 관설빙후(冠雪氷厚)

= 빙의 휘임강도(청수빙은 약 900 kpa)

CF = 연결인자(coupling factor)

= $\frac{\text{bow shp}}{\text{total shp}}$ (Mackinaw는 하나의 선수 프로펠러를 가진다)

Shp = shaft horsepower

이 방정식은 부수적으로 자료가 분산할 경우에는 회귀분석의 위험을 잘 설명하고 있다. 이는 빙강도가 증가하면 저항은 감소함을 예언하기 때문이며 분명히 웃음거리이다. 그러나 그들의 결과는 Fig. 4와 같이 (a) 그들 평균값에서 일정한(h, v)를 제외한 모든 변수 및 (b) $sc = 0.416\text{ft}(127\text{mm})$ 및 $\sigma = 116(800\text{kpa})$ 으로 상기 방정식에서 구한값이 직선으로 plot되었다. 이 결과에서 그들은 관설에서 자기들의 이전논문(Lewis 및 Edwards, 1970)과 잘 일치하는 2.3ton/in의 설치항이 증가하는 것을 추론하였으며 빙강도 및 연결인자는 빙후, 선속 및 관설심(冠雪深)과 비교할 때 다만 2차원의 효과가 있다고 추론하였다.

그들은 또한 무차원 방정식을 만들었다. 이번은 앞서(Lewis 및 Edwards, 1970) 사용하였던 σh^2 대신에 $(\rho_w g B h^3)$ 으로 나누었다.

단, 상수들은 낮은 $(\frac{\sigma}{\rho_w g h})$ 의 범위에서 (그 평균값에서 일정한 $\frac{SC}{h}$ 로서) 실선의 자료에 가장 잘 맞았다. 비록 실제 설명은 없었지만 높은 $(\frac{\sigma}{\rho_w g h})$ 에 대하여는 이 방정식은 잘 맞지 않았다.

이 방정식은 일찍이(Lewis 및 Edward, 1970) 얻었던 Wind급 Staten Island 자료와 Mackinaw의 자료를 비교하는데 사용되었다.

Milano(1973)는 빙중에서의 선박성능의 순수한

이론적 예측에서 중요한 전진을 하였다. 선박이 평탄빙을 통과하기 위하여 필요한 에너지는 어느 정도 빙후에 의하여 변한다고 생각하였다. 보기를 들면 매우 두꺼운 빙에 대하여 선박이 빙으로 가득차 있는 수로를 통과할 때 연속쇄빙시의 전소비 에너지는 다음 5종의 성분에 의하여 구성된다고 생각하였다.

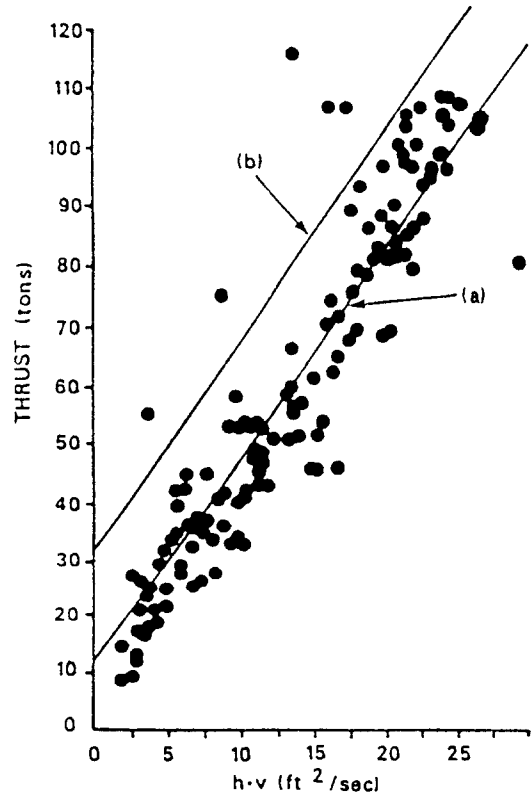


Fig. 4 Edwards et al. (1972) Analysis of full-scale thrust of the Mackinaw showing strong linear dependence on h.v. Line (a) is from equation 9 (see text) with all variables held constant except h.v. and line (b) is equation 9 with $\sigma = 116\text{lb}/\text{in}^2$ and $SC = 0.416\text{ft}$.

E_1 = 수로에 떠 있는 빙편을 배제하기 위한 에너지

E_2 = 빙편에 충돌하여 이것을 파쇄하기 위한 에너지

E_3 =빙판위에 선체를 실리게 하기 위한 에너지

E_4 =빙판의 파괴후 선체가 침하할 때 잃는 에너지

E_5 =빙판의 파괴후 빙판을 침하 배제시키기 위한 에너지

즉 $E_T = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \dots \dots \dots (11)$

그는 이들 각항에 대하여 명쾌한 분석적인 식을 유도하였고 위에서 논한 Mackinaw에서 얻은 자료의 예측과(Edwards 등, 1972) Wind급 선박 Staten Island 및 Raritan의 것과 비교하였다.

비록 이 상관관계는 빙의 휘임 강도 및 마찰계수에 의존하지만 Fig. 5(a) 및 5(b)와 같이 훌륭한 상관관계를 얻었다. 그는 Lewis 및 Edwards의 뒤를이여 무차원 접근을 시도하였고, 모든 일반적인 쇄빙선 및 특히 대형 극지형(極地型, polartype) 쇄빙선을 위한 전저항 예측용 '설계도표'를 개발하였다. 그후에 논문(Milano 1975)에서 여러가지 선박 또는 빙의 인자를 변화시키는 분석적 모형에 관한 영향을 상세히 검토하였다. 적어도 두꺼운 빙속에서 그가 제안한 속력의존은 복잡성(Fig. 6) 때문에 흥미가 있고 소위 "Milano hump"로 알려진 현상을 보여주고 있다.

이 hump에 관한 그의 설명은 에너지 방정식에 내포되는 상이한 기술(technics)과 관계있다. 간단

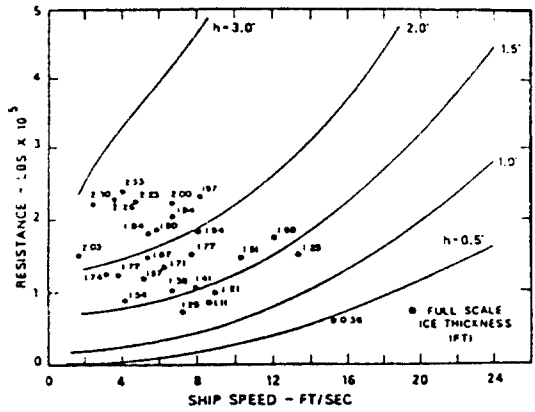


Fig. 5(b) Plot of ship resistance versus ship speed for USCG Staten Island as a function of ice thickness, showing correlation with full-scale test data [Milano, 1973].

히, 저속에서 저항의 초기 급상승은 파괴로 인한 ice cusp failing에 의한 것과 모든 가능한 선박의 충격 에너지를 흡수한 결과 때문이다. 속력이 증가함에 따라 측면 빙쇄기들은 모든 가능한 선박 충격 에너지를 흡수하기전에 파괴되기 시작하며 하나의 결과로서 충격 때문에 잃는 에너지의 상당한 감소는 저항-선속곡선에서 첫번째 예리한 꺾임을 설명하고 있다. 이 에너지의 손실은 선박의 양측 및 선수의 모든 빙쇄기들이 모든 가능한 선박의 충격 에너지를 흡수 되기전에 꼭에 의하여 파괴되는 점, 약 1.8m/sec (6ft/sec)를 넘으면서 수정된다. 선박의 전저항은 다른 변이가 일어나는 약 2.7m/sec(9ft/sec)의 속력까지 속력의 함수로서 계속 증가한다. 이 속력이하에서, 선박은 빙원(永原 ice field)에 충격을 주고, 빙상에 실리며 빙이 파괴 될때까지 흡수 및 트림이 변한다. 빙이 파괴됨으로서 파괴되지 않은 빙판에 재차 충격을 가하기 전에 선박은 처음 흡수 및 트림 상태로 돌아간다. 그러나 선박이 2.7m/sec의 속력을 넘어서 처음의 흡수 및 트림상태로 떨어지기전에 비쇄빙판에 충돌한다.

이와같은 결과로 선박은 다음 파괴의 일어나기 전에는 더이상 떨어지지 않고 다시 올라가지도 않는다. 결과는 Fig. 6에서와 같이 "hump"까지 올라가며 선박의 전저항에 감소가 있다. 보다 높은

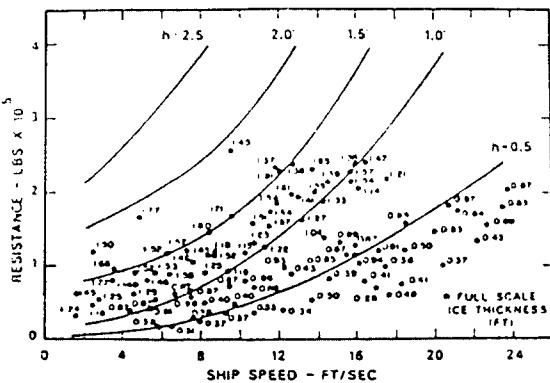


Fig. 5(a) Plot a ship resistance versus ship speed for USCG Mackinaw as a function of ice thickness, showing correlation with full-scale tests data [milano, 1973].

속력에서는 관성효과가 작용하고 전저항은 속력의 함수로서 예민하게 증가한다.

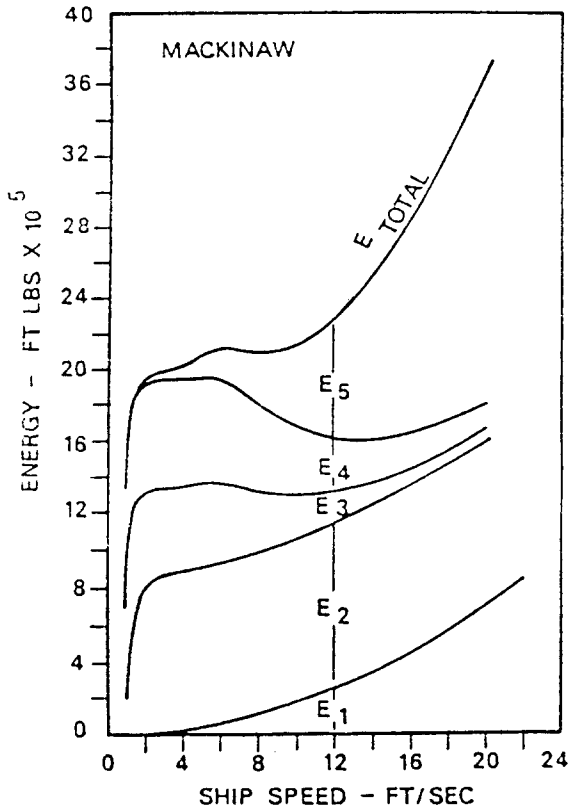


Fig. 6 Milano's (1975) plot of total energy lost versus ship speed showing component energy terms for *Mackinaw* in ice two feet thick, and showing the development of a "hump".

그와 같은 hump에 대한 몇가지 실험적 증거가 Tatinclaux(1984), Schwarg(1977) 및 Narita, Yamaguchi(1981)에 의하여 발견되었다. 그리하여 Milano(1975)는 수많은 선박과 빙인자들을 변화시켜서, 이것이 자기의 계산된 저항에 어떻게 영향을 끼치는 가를 보여주었다.

그의 Plot는 선박의 인자 즉 선폭, C_v , C_w 길이등의 변화로 기대되는 저항의 trend를 보여주며 또한 만일 빙의 성질 즉 마찰, 인장강도 및 압축강도를 변경 시킬 때 무엇이 일어나는 가를 보여주었다. 그의 1980년 논문(Milano, 1980)은 자기의

먼저번 이론에 기초로한 재분석과 *Katmai Bay* (Vance 1980) 및 *Polar Star*에 관한 모형 및 실제선 결과와 같은 수준으로 일치함을 보일 수 있었다.

Carter(1983) 역시 빙속에서의 선박저항에 해석적인 접근을 시도하였다. 그는 선박운동의 외대저항인 R_t 를 위한 비교적 간단한 방정식을 유도하였다.

$$R_t = R_{ts} \left\{ 1 + \frac{0.4 V^2 l^2}{\sigma h^2} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{\sigma + \sigma_0}{\sigma} \right\} + \sigma_0 h$$

$$(2L - L^*)f + 900h_s + R_{ow} \dots \dots \dots (12)$$

단, $R_{ts} = R_1 + R_2$

$$R_1 = 0.5483 \left\{ \frac{\pi}{2} - \theta \right\} \left\{ \frac{\sin\theta \sin\beta + f\cos\beta}{\sin\theta \sin\beta - f\sin\beta} \right\} \sigma h^2$$

$$R_2 = 0.75 \sigma h^2 \frac{B}{l} \cdot \frac{1 + 2\cos\beta}{(\sin\theta + \cos\theta)(1 + 2\sin\beta)} \left\{ \tan\beta + f \left(\frac{L^*}{B_2} \frac{2}{1 + 2\cos\beta} + 1.732 \tan\beta \right) \right\}$$

단, R_1 = 선수에 의한 저항
 R_2 = 양측에 의한 저항
 $\left(\frac{\sigma + \sigma_0}{\sigma} \right) + \sigma_0 h(2L - L^*)f$ = 내평면(in-plane)빙압에 의한 추가저항
 $900h_s$ = 관설에 의한 저항, 관설후 h_s 가 meter라면 저항은 KN으로 표시됨.

- R_{ow} = 개방수면 저항
- $\frac{L^*}{2}$ = 선수에서 최대폭까지의 선수단면의 길이
- l = 빙판의 특성 길이
- β = 수평과의 선수각
- γ = 최대폭에서의 flare각
- θ = bow opening angle
- f = 마찰계수
- σ_0 = 추가 내평면 압력
- h_s 및 기타 부호는 그들의 평상시의 뜻을 가진다.

그는 빙편이 회전하고 침수하는 것이 너무 적고, 무시할 수 있기 때문에 타력 및 부력을 완전히 무시하였다. 순수 총 에너지 손실을 그의 이론에서 확정 한것이 꼭, 좌굴 또는 파괴로 인한 쇠빙에서 흡수되는 것과 동일하다. 그러나 Enkvist(1972) 및 기타 사람들이 한 모형시험들은 이 가정을 지지하

지 않는다. 이럼에도 불구하고 Carter(1983)는 Fig. 7에서의 *Radisson*과 같이 6척의 쇄빙선을 위한 그의 이론과 자료사이의 합리적인 일치를 얻었다.

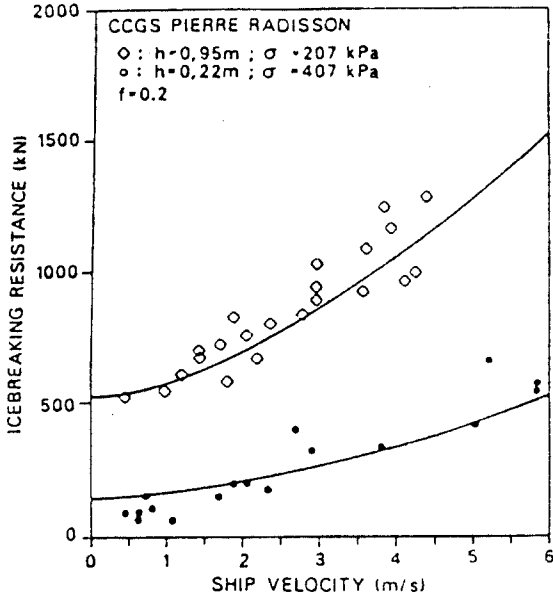


Fig. 7 Carter's(1983) predicted icebreaking resistance for CCGS *Pierre Radisson* as compared to measured values in deteriorated one year sea ice (top curve) and in solid fresh and saline ice(bottom curve).

Scarton(1975)은 쇄빙에서 마찰의 역할을 탐구하고 특별히 마찰력의 방향을 이론적으로 연구하였다. 그는 선수각과 선박이 빙속에 삽입되지 않는 그러한 마찰계수 사이의 관계를 유도하였다.

Runeberg(1988/89)이래 빙속에서의 선박저항에 관한 마찰의 중요성은 인식되어 왔다. Markinen 등(1975)은 가장 직접적인 방법에서 마찰의 중요성을 분명히 보여주었다.

Jelppari는 선박의 약반의 마찰계수를 갖는 스테인판을 취부하였더니 저속에서 특히 의미 심장하게 저항이 떨어졌다. 모형효과를 관찰한 것과 꼭 같이, 2척의 실선의 상이한 표면 처리와 비교하였다. 모두 감소된 마찰계수를 가지고 저항이 의미 심장하게 떨어졌다. 그는 *Murtaja*를 이용하여 여

러가지 도장하여 본 결과 INERTA 160이 가장 좋은 것을 알았다. Vance(1975)는 5 set의 모형과 실선자료, Mackinaw(Edwards 등 1972년이 사용한 것과 꼭 같은 자료), *Moskva*, *Finn carrich*, *Staten Island* 및 *Ermak*으로 부터 "최적 회귀 방정식"을 얻었다. 그의 방정식은

$$R_{(ice)} = C_s \rho_w g B h^2 + C_B \sigma B h + C_v \rho_w^2 L h^{0.65} B^{0.35} \dots (13)$$

(파괴저항) (침수 및 뒤집기)
(저항에 의한 저항)

단, $R_{(ice)}$ = 빙에 의한 저항

L = 선박의 길이

C_s, C_B, C_v = 경험으로 결정된 상수

그의 방정식에 맞는 보기를 Fig. 8에서 보여주고 있다. Fig. 8에서 Mackinaw 실선자료(FS)가 상기 방정식(FSR)과 일치하는 것을 보여준다. 그리고 그의 방정식(MSR)의 모형화기선도 역시 보여주고 있다. 모형과 실선 크기 사이의 좋은 일치를 보여준다. 그는 그의 방정식이 Mackinaw 자료에 대한 Lewis/Edwards 및 Milano 보다 훌륭하다고 주장하였다. Fig 5(a)의 보기를 보면 Milano의 순수 해석적 접근 및 Lewis/Edwards의 Vance 소견을 기억하여야 한다. Vance(1975)의 논문에서 항이 빠져 있기 때문에 부정확하게 보인다. 그는 또한 속력의 함수로 자기 방정식에서 3개의 각각의 중요성을 분석하였다. Edwards 등(1976)은 무차원방정식을 사용하여 래밍형 시험을 분석하므로서 좋은 *Louis. S. St. Laurent*에 대한 실선크기 자료를 제공하였다.

$$\frac{R}{\rho_w g B h^2} = 4.24 + 0.05 \frac{\sigma}{\rho_w g h} + 8.9 \frac{V}{\sqrt{gh}} \dots (14)$$

속력은 1차이다. Fig. 9에서 이들의 결과를 보여주며, 'course'에 적합한 및 h의 값을 사용하여 상기 방정식으로 부터 5개의 직선이 얻어졌다. 그들은 이들 결과를 2개의 염빙(鹽氷, saline ice) 모형자료와 비교하였으며 하나는 1 : 36, 또 하나는 1 : 48의 축적이었다.

그들은 0.08에서 0.48까지 변하는 상이한 선체/빙 마찰계수를 이용하였으며 이들은 어떻게 얻었

는지 설명이 없다. Fig. 10에서 그들의 결과를 보여 주고 있고, 상기 실선 크기의 회귀 방정식이 “예측 방정식(predictor equation)”과 동시에 plot되어 있다.

$$\frac{R}{\rho_w g B h^2} = C_s + C_{bv} \left(\frac{\sigma}{\rho_w g h} \frac{v}{\sqrt{gh}} \right) + C_v \left(\frac{v}{\sqrt{gh}} \right)^2 \dots\dots\dots (15)$$

항 C_s , C_{bv} , C_v 는 마찰계수 f 의 자신들의 함수 즉 $C_s = C_o + C_{if} + C_{if}^2$

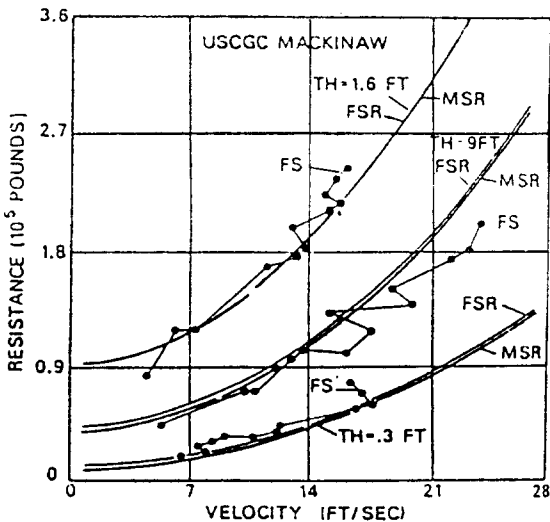


Fig. 8 Vance(1975) analysis of *Mackinaw* data. MSR is the model-scale regression curve (i. e. obtained from model tests) and FSR is the full-scale regression curve (i.e. obtained from full-scale tests). FS is the actual full-scale data. All for three different ice thicknesses, 0.3, 0.9 and 1.6 feet.

상당한 분산이 뚜렷한데, 부분적으로 상이한 마찰계수로 인한 것이 원인이었다. 그들은 또한 9개의 상이한 모형에 관한 일련의 인자 시험을 하였다. 그들은 평탄빙의 저항은

- (a) 직접 쪽에 비례한다.
- (b) 길이와의 무관하다.
- (c) C_o 와 비례한다.

(d) 홀수와 비례한다.

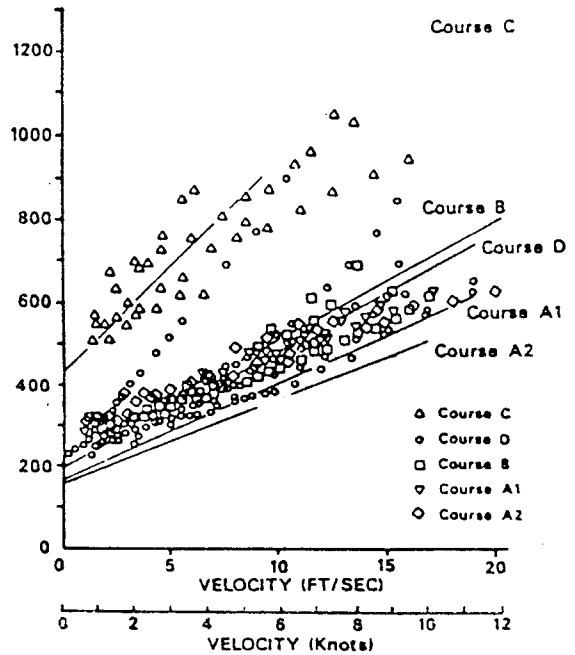


Fig. 9 Edwards et al(1976) regression of full-scale data from the *Louis S. St. Laurent* using values of σ and h appropriate to the 'course'.

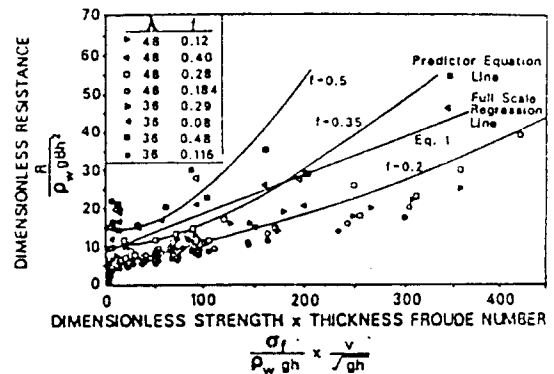


Fig. 10 Edwards et al(1976) model-scale data, two different scales 1 : 36 and 1 : 48, of *Louis S. St. Laurent* in saline ice. The full-scale regression line equation, is shown as well as their “predictor equation” line, equation, for three different friction coefficients.

와 같다고 결론내렸다. 이들 결과는 어느정도 놀랍고, Johanson, Makinen(1973)의 오기 작업과는 상이하다. 특히 놀라운 것은 길이의 함수라고 여겼던 마찰항의 중요성을 일찍이 보여주었던 Edwards 등(1976)이래 길이와는 무관(독립관계)하다는 것이다. 그들은 또한 조종성시험을 하였다. 일련의 관련시험에서, Kitagawa 등(1982 : 1983 : 1986)은 1척의 북극용 탱커모형에 관하여 중앙평행부 길이, 폭에 관한 효과를 탐구하였다. 그들은 3개의 모형의 길이 3.75m, 5.0m 및 6.4m를 사용하여 길이가 길면 분명히 저항도 증가하는 것을 보여주었다. 그들은 모형 축적과 360m 길이, 280900m³의 배수량을 가진 배의 속력에 대한 단위 배수량당 저항으로 자료를 plot하였다. 이것은 3개의 모형에 대하여 상이한 축척인자를 포함하고 있기 때문에 모형 빙강도에서의 차이는 무시하였다. 상이한 축척인자의 효과는 아마도 중요하지 않았다(Kloppeburg, 1975). Fig. 11에서 모형 및 실선크기 모두에서 최적의 평행부 길이를 보기로서 표시되었고, 그자료는 360m 길이의 선박까지 scale up하였다.

$\frac{\text{평행부길이}}{\text{모형길이}} = 0.4$ 를 가지며, 3개의 모형중 중간 길이인 5.0m 모형, B-003이 단위 배수량당 저항이 가장 적었다. 모형빙 강도에 관한 수정은 B-004에서 저항이 증가하고, B-005에서 약간 감소하는 효과를 가져왔다. 이와같은 특이한 선형에는 평행부 길이의 최대는 0.4Lpp라고 결론을 지었다. 또 이와 관련한 일련의 저항시험에서 지나친 프로펠러와 빙과의 상호간섭을 피하기 위하여 최소 0.25Lpp 평행부 길이는 필요하다고 결론지었다.

L/B=8 및 6의 값을 사용하여 하나의 고정된 흘수에서 모형의 폭이 증가하면 저항이 증가하는 것을 발견하였다. 그러나 광폭의 선박에서는 단위 배수량당 저항은 매우 작았다. 중앙평행부에 8° side flare의 효과를 탐구하였다. 이것은 평탄빙에서의 저항을 어느정도 증가시키지만 몇가지 잇점을 가졌다. 즉 개방수면의 수로의 폭이 약간 넓어지고, 비대칭 로울링의 관측도 되지 않았다.(수직 편측 모형에서와 같이)

평행부에서의 5° 선저구배는 쇄빙면이 프로펠러에 닿기전에 표면에 떠오르도록 하는데 의미가 있

고 유익한 효과를 가졌다. 1981년 Ottawa 에서 열렸던 STAR Symposium에서 몇가지의 모형 및 실선크기 자료를 발표하였다.

Narita 및 Yamaguchi(1981)는 Shirase를 건조하기 앞서 매우 상세한 모형시험결과를 발표하였다. 첫째로 3개의 모형 선수를 시험하여 22.5°의 낮은 선수각을 가진 원통형 선수가 다른 2개모형보다 저항이 적은것을 보았다. 왜냐하면 선수에서 파괴를 피하였기 때문이다. 또한 3축선 저항 및 저항시험을 하였고, 모형에서 마찰계수가 0.1에서 0.2로 2배가 되듯이 저항도 2배가 되는 것을 보여주었다.

Schwarz 등(1981)은 Polarstern의 모형시험을 발표하고, Juurmaa 및 Segercrantz(1981)는 빙중에서의 추진효율의 중요성을 저항보다 강조하였다. 상이한 모형들이 같은 저항을 가지는 동안 빙/프로펠러 상호간섭에 의한 매우 상이한 효과를 가질 수 있다고 지적하였다. 만일 빙으로 blocking되면 노즐을 가진 프로펠러는 매우 낮은 효율을 보여주었다. Canada의 'R'급 쇄빙선에 관한 실선크기의 자료(Edwards 등 1981 : Michailidis 및 Murdy, 1981)와 parent(Noble 및 Bulat 1981)로서 'R'급 기초한 상이한 선수형상을 연구한 인자 변화 모형 시험의 1set가 이회의에서 제시되었다. 오직 저항 시험을 하여, 쇄빙에서 낮은 선수각을 가진 동근

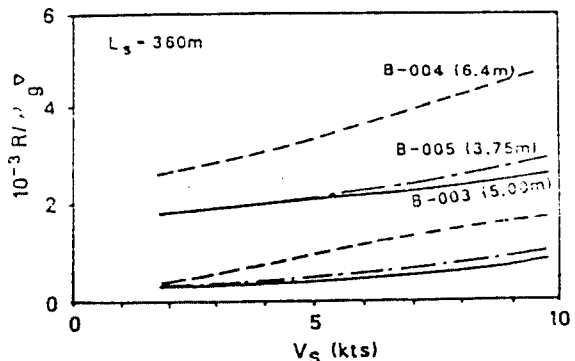


Fig. 11 Resistance per unit displacement for 3 Arctic tanker models, scaled-up to a ship of length 360m the length of the otherwise identical models is shown(Kitagawa, 1982)

선수의 우월성을 보여주었을 뿐, 저항시험을 못하였기 때문에 상이한 선박들의 총체적인 성능판정은 불가하다.

Vance(1980) 및 Vance 등(1981)은 *Katmai Bay* (Great Lakes의 쇄빙선)의 실선 크기 140ft(43m)의 시험을 하였다. 그는 타인과 약간 상이하게 속력에 대한 추진계수(PC)를 plotting하여 자기의 결과를 분석하였다.

$$PC = EHP / SHP \dots\dots\dots (16)$$

$$EHP = \text{저항} \times \frac{\text{속도}}{550} \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{저항 } R = T - (1 - t) \dots\dots\dots (18)$$

T는 축에서 측정한 추력, t=0.2(추력감소계수).

$$SHP = \text{측정한 토크} \times RPM \dots\dots\dots (19)$$

평탄빙에서의 PC는 Fig. 12와 같이 clearwater(0.565)에서 보다 언제나 낮다(0.12-0.45)는 것을 발견하였다. 그리고 몇가지 능율이 저하되는 이유를 제시하였다. 즉

1. t의 증가
2. 보다 낮은 EHP를 주는 w(ice-free wake factor)의 감소
3. 빙편에 의한 flow pattern의 방해에 의한 상대적 회전 능율의 감소
4. 그의 논문에서 논한 기타 이유에 의한 프로펠러 효율의 감소

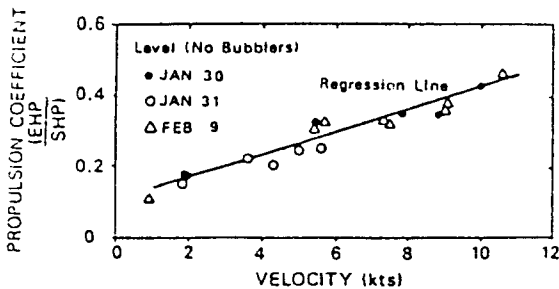


Fig. 12 PC vs velocity for *Katmai Bay* in level plate ice with no bubblers operating. Clearwater value, not shown, was 0.565. (Vance, 1980)

그는 유빙편에서는 PC가 어느정도 높은 0.3-0.6인 것과 보다 작은 빙이 프로펠러에 걸린다는 것을 보여주었다. 공기분사방식은 빙편속에서 매우 유효하였고 모든 속력에 대한 ice-free water 값에서 PC가 증가하였다. 공기분사는 프로펠러의 Slipstream으로 부터 빙편들을 제거하였다.

평탄빙시험에서는 효과가 관찰되지 않았는데 아마도 빙편이 너무 커서 공기분사로 제거할 수 없었기 때문일 것이다. 그는 공기분사를 하지 않을 때, 저항자료의 회귀분석을 하여 방정식을 얻었다.

$$R = 55.8\rho_{\Delta}gBh^2 + 0.019\sigma v g^{-0.5}h^{0.15}\beta \dots\dots\dots (20)$$

($r^2 = 0.91$)

상이한 계수를 가지고 공기분사를 할때 유사한 방정식을 얻었다.

Tatinclaux(1984)는 평탄빙 및 유빙편에서 *Katmai Bay*의 2개의 모형 1:10 및 1:24 축척에 관한 저항시험을 하여 평탄빙에서의 무차원 빙저항은 2개의 모형에서 근본적으로 동일하였고 축척효과는 없다는 것을 발견하였다. Newbury 및 William (1986)은 'R'급 쇄빙성의 1:40 및 1:20 축척 모형시험에서 축척효과를 발견하였고 그 이유는 그들 모형사이의 마찰계수가 상이하기 때문이라 하였다. Tatinclaux의 평탄한 파빙속에서의 시험은 빙저항을 잠수-타력 성분과 쇄빙성분으로 나누었다. 기대한대로 쇄빙성분은 Cauchy Number ($\frac{\sigma}{\rho_w} h$)에 비례 하는 것과 Froude Number ($\frac{v}{\sqrt{gh}}$)에 영향을 받는 것을 발견하였다.

Fig. 13에서와 같이 Froude Number 0.4-0.5에서 특별히 쇄빙저항에 급한 변화가 있음을 발견하였다.

이 거동은 모형의 핏칭 및 허빙의 진폭에서의 관측되는 변화와 동등한 것이고 앞서 언급한 'Milano hump'와 동등할 지도 모른다.

실선크기의 자료(Vance, 1980)와의 비교는 모형 저항이 축척을 키울때 실선크기의 자료보다 특히 더 크다는 것을 지적하고 몇가지 가능한 이유를 제시하였다.

Tatinclaux(1985)는 한층 앞선 일련의 저항시험으로 실선크기와 합리적으로 일치하는 것을 보여

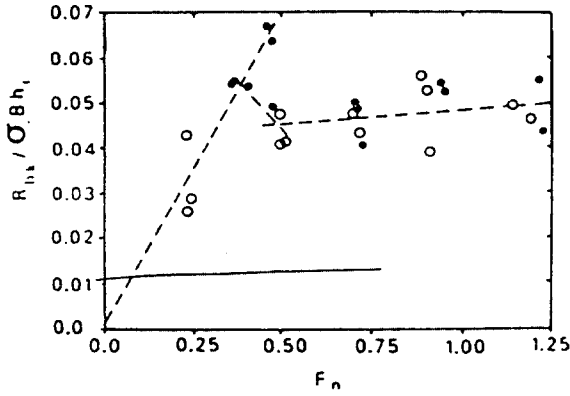


Fig. 13 Plot of $R_{bk} / \sigma B h_i$ as a function of F_n (dimensionless quantities) for *Katmai Bay* model tests. (Tatinclaux, 1984).

주었고 여기서 몇가지 오류의 근원이 확인되었다. 즉 Froude Number는 모형 및 실선 크기의 시험과 똑같지는 않았다. 또 보유하고 있는 프로펠러(별로 유효하지 못한)의 사용과 모형마찰 계수가 실선크기의 값보다 더 높았다.

Bulat(1982)는 평탄빙 저항에 관한 관찰효과를 탐구하였다. 그는 [*Radisson, Franklin, Staten Island, Mackinaw, Wolfe*]의 5척의 발표된 실선크기의 자료를 사용하여 Fig. 14와 같이 무차원 관찰에 관한 마찰증가를 %로 plot하였다. 이것은 관찰 및 비관찰에서의 실선크기의 자료점을 비교하여 행하여졌고, 빙상대는 유사하였다. 그는 적어도 그가 시험한 선체항상 범위에서는 적설때문에 선박성능에 영향을 끼치는 증거는 없다는 것과 그리고 속력이 감소하고, 관찰이 증가하며 빙후가 감소하면 상대적 저항은 증가한다는 결론을 내렸다.

Lewis 등(1982)은 상이한 방법으로 일찍이 가졌던 자료를 재분석하였다. 여기서 주된 개선은 실선크기의 측정에 추력 감소계수를 포함시켰다. 또한 쇄빙평탄빙을 개방수면시험과 비슷하다고 가정하였다.

$$T_{bi} = R_w + \Delta R_w \dots\dots\dots (21)$$

- 단, T_{bi} = 축추력(behind in water)
- R_w = 빙 및 수중에서의 선체저항(towed)
- ΔR_w = 프로펠러, 선체-빙 상호간섭에 의한 선체저항의 증가분

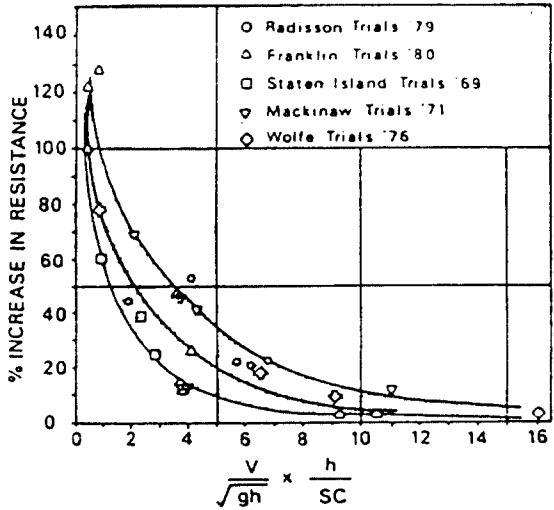


Fig. 14 Plot of actual data points from full scale trials on the influence of snow cover on ice resistance(Bulat, 1982).

그리고

$$\Delta R_w = t_i + T_{bi} \dots\dots\dots (22)$$

이라고 가정하면

$$t_i = \frac{T_{bi} - R_{iw}}{T_{bi}} \dots\dots\dots (23)$$

을 얻는다. 단, t_i 은 빙속에서의 추력감소계수이고, 개방수면 시험중에 추력감소 인자를 $t_i = t_p$ 라고 가정하여 쇄빙 시험중 측정한 추력을 모형저항 측정과 비교할 수 있는 저항으로 변환하는데 사용하였다. *Mackinaw, Katmai Bay* 및 *Radisson*에 관하여 실선크기 저항에 대한 모형저항을 plot하고 *Radisson*에 대한 Fig. 15와 같이 합리적으로 일치하는 것을 발견하였다.

Kotra 등(1983)은 Naegle의 논문(미출판)에 기초한 논문에서 또다른 준경험적 접근을 묘사하고 총빙저항을 다음과 같이 제시하였다.

$$R_{ice} = R_B + R_{Bf} + R_T + R_{Ti} + R_S + R_{sf} \dots\dots (24)$$

- 단, R_{ice} = 총 선박의 빙저항
- R_B, R_{Bf} = 평탄빙의 쇄빙으로 인한 정상 및 마찰저항

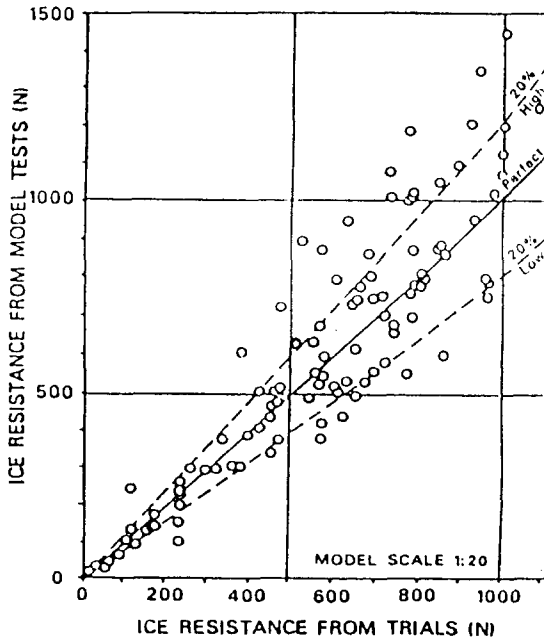


Fig. 15 Model/full scale correlation - Pierr Radisson (Lewis et al, 1982).

R_T, R_{T1} = 파부빙(破浮氷)을 회전시키므로
생기는 정상 및 마찰저항
 R_s, R_{s1} = 파부빙을 잠수시키므로 생기는 정
상 및 마찰계수

결과, 방정식(Resulting equation)은 4개의 경험 계수를 포함하여 이들 계수들은 Katmai Bay, Mackinaw, Radisson, Staten Island 및 Manhattan의 자료중에서 몇개에 잘 맞는다.

계수를 최적화하기 위하여 사용하였던 자료의 나머지는 Fig. 16에서 Radisson 보기를 보여준 것처럼 그들의 방정식으로부터 예측한 빙저항에 대한 “측정빙저항”을 plot하였다.

Lewis 등(1982)이 사용한 추력감소 인자를 적용하여 “계측빙저항”을 실선크기로 측정하였다. “perfect correlation”선의 $\pm 25\%$ 사이에 자료의 72%가 포함되어 있어서, Fig. 15와 같이 그들은 Lewis 등(1982)의 방정식을 가지있는 것으로 개선하였다고 주장하였다. Baker 및 Nishizaki(1986)는 북극용 tanker에 대한 새로운 선수형상을 제안하여 다른 몇개의 시험실에서 행한 모형시험 결과를 비

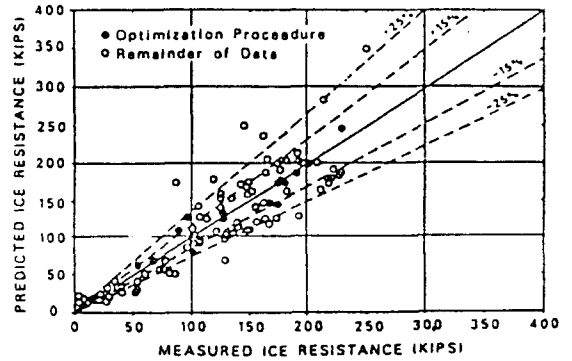


Fig. 16 Kotras et al.(1983) analysis of Radisson data showing their claimed, improved correlation over previous methods.

교하였다. Fig. 17과 같이 3개의 시험실에서 얻은 실선크기의 예측을 보면, 널리 분산되어 있어서 어느정도 실망시킨다.

그 이유는 저자들의 빙모양 및 분석방법의 차이와 마찰 및 추력감소 효과에 대한 이해 부족이라 생각한다. Fig. 18에서 R_급 쇄빙선의 모형에 관한 ITTC가 행한 유사비교 작업에서도 잘 일치하지

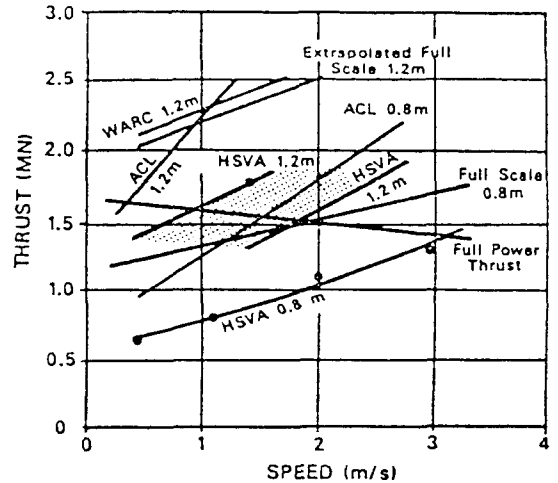


Fig. 17 Comparison of full-scale thrust predictions from ACL, HSVA and WARC for the old bow of the MV Arctic. Ice strength - 500 kpa. Considerable differences in predicted thrust are apparent. (Baker & Nishizaki, 1986)

않는 것을 알 수 있다. 그러나 그해 출판된(Takekuma 및 Kayo, 1988) 논문에서 2개의 빙 Tank에서 결과는 잘 일치하고 있다.

1 : 48의 모형으로 polar급 쇄빙선의 연속 모우드 쇄빙을 동역학적으로 연구한 결과 Ettema, et al., (1987)는 자유선체(핏치, 히브 및 로울에서 자유로운)가 고정선체보다 평균저항값이 더 큰 것을 경험하였다.

1980년대에는 비전통적인 선수형상의 쇄빙선의 설계 및 구조를 보여준다. 대부분이 약 20°의 낮은 선수각을 가지며 형상도 전통적인 썰기형 선수와는 다르다.

Canmar Kigoriak, Robert Lemeur의 “술가락 모양 선수 및 기타 유사한 설계와 수정한 Max Waldeck 및 Mudyunq의 Thyssen-Waas 선수 등이 있다.

선박의 일반적인 설계 및 조종성에 관한 논문은 발표되었으나(Churcher 등 1981, Ghoheim 등 1984, Freitas 및 Nishizaki, 1981 : Schwarz 1986 [2] : German, 1983 : Tronin 등 1984 : Johansson 및 Revill 1986) 실선크기 시험 또는 상세한 모형 시험 방법은 거의 없다.

Hellman (1982)은 Max Waldeck를 Thyssen-Waas 선수형으로 개조하기 전후의 모형 및 실선 시험을 하였으며 추진시험에서 같은 마력일때 저항이 모형시험에서 약 25% 떨어지고, 속력은 100% 증가함을 보여주었다. 실선크기 자료도 만족할 만큼 일치하였다.

Enkvist 및 Mustamaki(1981)는 원호 및 직각 선수형 시험에서 도출하였던 선수의 모형 및 실선 크기 시험결과를 발표하였다. 그들은 먼저 2척의 소형선의 선수에서의 쇄빙은 전체 저속저항의 20-40%라는 것을 보여주었다. 선수앞의 빙에서 slot로 찢르고 얼음을 제거하므로써 그 저항은 이량만큼 감소하였다. 분명히 이것은 썰기모양 선수가 아니고 낮은 선수각의 주요한 장점이다. 원호 선수, 직각형 선수 및 원 Mudyug 선수를 모형시험으로 비교하였던바 원호선수가 가장 작은 저항을 가진다는 것을 보여주었다. 그들은 그리하여 더 시험 및 분석을 하기 위하여 “시험선수”를 선택하였고, 모형시험뒤에 Protector에 실물의 선수를 만들어 취부하였다. 그들의 실험결과는 원래의 Protector가 특별히 효율적인 것이 못된다고 인정을 하였지만 평탄빙에서의 Protector 성능에서(Fig. 19) 상당한 개선을 보여주었다. 또한 첫해의 분수선에서의 그의 성능은 전통적인 선수와 똑같은 크기였다고 결론지었다. 그들은 Protector 선수상에 2개의 panel을 설치하여 실험크기 마찰을 계속하고 아래와 같은 어느정도 분산된 결과를 얻었다.

저압 panel, $f=0.16-0.26$

고압 panel, $f=0.05-0.13$

유사한 panel을 Polarstern에 설치하고(Schwarz 등 1986), 결과(Schwarz 1986 [b] Holfman 1985)는 Fig. 20에서 보여준다.

또한 정상적인 힘의 증가는 마찰계수가 감소한다는 것을 보여준다. 새로운 Protector 선수의 성능의 모형자료의 훌륭한 상관관계는 위에서 보여주는 것과 같이 측정된 실선 값으로 0.05의 모형 마찰계수로 얻었다.

그 선수의 주된 단점은 보다 높은 Slamming 압력이었다. 비슷한 단점이 Thyssen/Waas 선수의 ice급 bulk carrier 모형시험을 하였던 Freitas 및 Nishizaki (1980)에 의하여 note 되었다. 한편으로

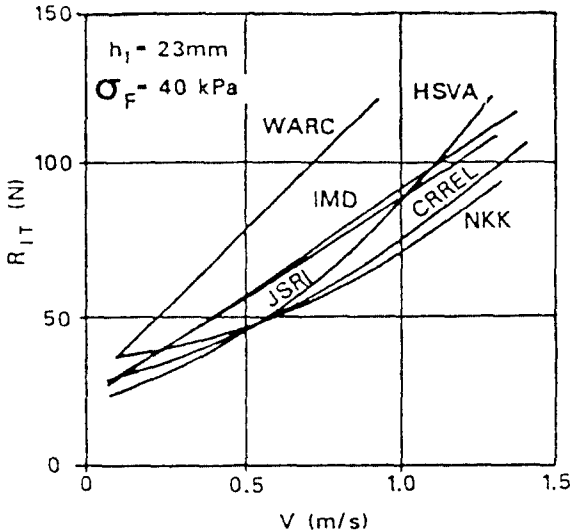


Fig. 18 Comparison of resistance tests conducted by different ice tanks on a model of the “R-class” icebreaker.(18th. ITTC Proceedings).

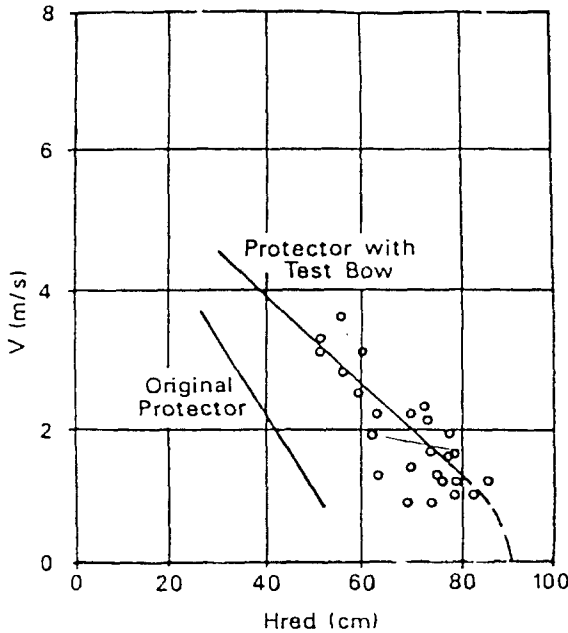


Fig. 19 Ice thickness versus speed curve for Protector with and without test bow, showing improved icebreaking performance of the test bow(Enkvist & Mustamaki, 1986).

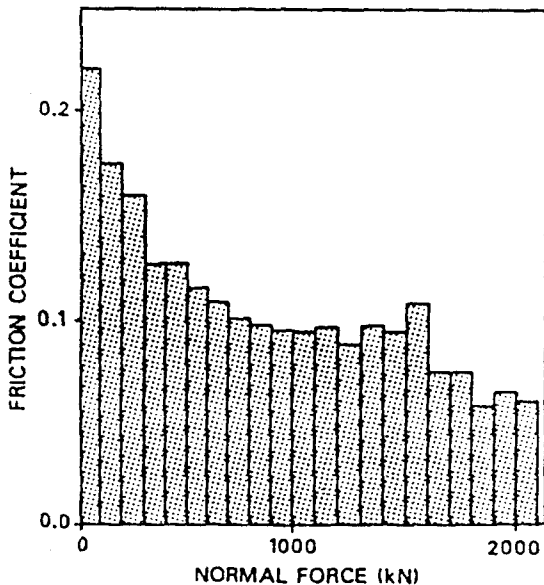


Fig. 20 Friction coefficient at full-scale measured by load cells on the hull of the *Polarstern* (Schwarz, 1986).

는 쇠빙능력에서 상당한 개선을 보여주었다.

근래 이 선수형상은 *Mudyug*에 취부되었고 그 결과 “*Jastrana hull 운할 plant*”(Varges 1987)의 도움없이 눈없는 얼음에서 선체속력이 50에서 100%까지 증가하였다. 선회권 및 파빙수로에서의 청빙 개선이 모형시험과 일치한다고 보고하였다.

Arctic 전개에 관한 더 상세한 것이 발표되었다. (Varges 1988) 근래 불만한 발전은 일양한 평탄빙 (Zahn 등 1987)에서의 *Mobil Bay*의 실선크기 예인 저항시험이었다.

원칙적으로 이것은 *Greyhound* 및 *Lucy Ashton*의 개방수면 시험과 대응한다. 한편 그와같은 시험은 분명히 수행하기 어렵지만, 이론적으로 실선크기 저항의 직접적인 측정을 마련하고 있다. 그들은 또한 저항시험을 한 결과 다음 방정식(그들이 분석하였던 15개의 방정식 가운데 하나)이 그들의 예인 저항결과와 가장 잘 맞는 것을 발견하였다.

$$\frac{R_i}{\rho_w g B h^2} = C_0 + C_1 \left(\frac{V^2}{gB} \right) \left(\frac{L}{h} \right)^3 \quad (25)$$

단, $C_0 = 4.25$

$C_1 = 3.96 \times 10^{-5}$

단 h^2 종속과 같이 속력에 관한 저항 종적 V^2 을 합축한다.

그들의 추진자료에서 빙후의 함수로 추력감소를 결정하였으나 빙후(및 강도)의 범위가 너무 소폭이고, 추력 및 토크 계측과 관련한 정상적이 오차가 매우 커서 그와같은 관계를 정당화하기 곤란하다.

3. 평탄빙 성능의 종합

3.1 실선의 자료

발전에 커다란 방해물은 신뢰할 수 있는 출판된 실선크기에 대한 자료부족이다. 자료수집에 비용이 많이 필요하고 최선의 노력을 하여도 측정에서 큰 오류를 범하기 쉽다.

현존하는 전통적인 설계로 된 선박에서는 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

$$R_{ice} = Vh^n$$

여기서 주어진 시험에서 변수 v 및 h의 범위가 작다하여도 n=2이다.

언제나 실선크기에서 예측되는 것은 추력감소에 관한 몇가지 가정을 필요로 하는 저항을 결정하기 위하여 추력과 토크크라는 점을 기억해야 하나 반드시 언제나 이렇게 하지는 않았다.

3.2 모형크기의 자료

모형시험은 일반적으로 광범위한 선형의 평탄빙저항에 대하여 하나의 유사한 v 및 h² 종속을 보여 준다. 아직 모형시험에서 발표된 것은 없으나, 광범위하게 v, h 및 를 변화시킬 수 있어야 하고, 확정된 결과를 얻을 수 있어야 한다. 여기서 모형의 종속은 불완전한 모형빙성분때문에 실선크기의 종속과 일치하지 않는 것은 있을 수 있다. 상관관계도 더욱 복잡하다.

Milano(1973)에 의한 보기와 몇가지 모형시험은 이것을 확인하였다. 초기에는 “저항”에 집중적인 연구가 있었으나 이는 문제의 일부에 지나지 않고, 빙에서의 성능을 완전하게 결정하기 위하여는 추진연구를 해야한다는 것이 현재 널리 인식되고 있다.

3.3 관설(冠雪, snow cover)

분명히 관설은 저항에 매우 중요한 영향을 끼치고 있고 문헌에는 거의 자료가 전부하다.

상세한 모형시험은 불가능하나, 근래의 논문(Narita 및 Kishi, 1988)은 몇가지 모형결과를 제공하고 있다. Lewis 및 Edwards(1970) 및 Edwards 등(1972)은 실선크기의 추정을 하였다. 실제로 실선크기의 시험은 매우 드물다. Fig. 14에서 보여주는 Bulat(1982)의 분석은 가장 훌륭하고 상세한 발표물이다.

3.4 모형시험의 인자적 계열

발표된 3건의 자료(Edward 등 1976 : Johnsson, 1973 : Kitagawa 등 1982)는 서로 상충하는 결과를 제공하고 있는데, 다음 표를 보면 상이한 parent ship을 기초로 하였기 때문이어서 서로 충분한 타

당성을 가지고 있다.

Table 1. Effect on ice Resistance of Various Parameters

	Edwards et al. (1976)	Johannson & Makinen (1973)	Kitagawa et al. (1982)
Length	No Effect	Significant Effect	Significant Effect
Beam	Linear Function	Significant, possibly linear, effect	Significant Effect
Draft	Linear Function	No effect observed	---
Block Coefficient	Non-Linear Function	---	---

3.5 마찰

Runberg(1888/89)이래 마찰은 중요한 것으로 인식되어 왔다. 용접이하에서 여러가지 물질에 관한 순수한 빙마찰에 대한 자료는 부족하지 않다.

Tatinclaux, Murdey(1985) 및 Forland, Tatinclaux(1984, 1985)은 근래에 해빙 및 모형빙의 마찰계수에 관한 자료를 발표하였다. 가장 직접적인 선박성능에 관한 효과를 직접 측정된 것은 Makinen 등 (1975)의 것이었다. 많은 모형시험은 그 문제에 주의를 환기시켜왔다.(Enkvist, 1972) 이론적으로 마찰계수는 실선크기와 마찬가지로 모형에서도 똑같아야 한다. 그러나 많은 작업자들은 실선 및 모형사이의 일치는 오직 모형마찰계수가 실제 크기보다 매우 작을때만 얻을 수 있다는 것을 발견하였다. 그러나 마찰의 감소는 선박성능을 개선한다는 것은 틀림없다. 실선크기에서 마찰을 측정하기 위하여 Load cell of 사용하였던 근래의 결과는(즉 Fig. 20) 선박으로 인하여 보여준 마찰계수는 단순한 상수가 아니라는 것을 보여주었다.

3.6 준 경험적 예측방법

상당히 많은 상이한 방정식들이 현재 실선크기 및 모형자료와 합리적으로 일치한다는 사실은 더

많고 더 높은 양질의 자료가 필요하다는 것을 보여준다. 모든 현존하는 준경험 방정식들은 주어진 set의 자료에 대한 최적의 3개 또는 4개의 “인자”를 가진다. 그러나 항상 자료 set에서 자료 set로 변화였다. 3개의 그와같은 조정할 수 있는 인자들을 가진 어떠한 방정식은 유용한 자료만 있으면 아마도 합리적으로 일치할 것이다.

그들은 단순히 특수한 자료에 한하여 잘 맞다고 인식하여야 한다.

3.7 분석방법

오직 발표된 것은 2개의 그와같은 방법이고 하나는 매우 복잡하며(Milano 1973, 1982) 다른 하나는 매우 간단하다.(Carter, 1983) 그러나 모두 자료와 일치한다고 주장하고 있다. Carter의 쇄빙항을 제외한 모든 항의 제거를 지지할만한 증거는 없으나 가능한 자료로서 일치할 수 있었다. 그의 방정식에서 마찰계수, 빙강도 또는 다른항에서의 작은 변화, 사실상 분산되어 있는 자료는 “조정”할 수 있기 때문에 예측이 가능하다. Milano의 것이나 또는 어떤 미래의 분석적 예측에도 똑 같을 것이다. 이리함에도 불구하고 그와같은 분석적 접근은 오늘날 쇄빙선 저항의 초기 추정을 할 수 있게 하고 신뢰할만한 예측기술의 미래의 사용은 하나의 장기적인 목표로 남아있을 것이다.

참고문헌

- 1) Baker, D., and Nishizaki, R., 1986. The MV Arctic-New Bow Form and Model Testing. *Transaction SNAME*, Vol. 94, p.
- 2) Bulat, V., 1982. The effect of snow cover on ice resistance. *The Naval Architect*, Nov. 1982, p.E. 253.
- 3) Carter, D., 1983. Ship Resistance to Continuous Motion in Level Ice. *Transportation Development Centre, Transport Canada, Montreal, Canada*, Report Number TP 3679E.
- 4) Churcher, A., Kolomojcev, A., and Hubbard, G., 1984. Design of the Icebreaking Supply

- Ship Robert Lemeur. *Marine Technology*, Vol. 21, No. 2, p. 134-146.
- 5) Corlett, E.C.B. and Snaith, G.R., 1964. Some Aspects of Icebreaker Design. *Transactions RINA*, Vol. 106, No. 4, p. 389-413.
- 6) Crago, W.A., Dix, P.J., and German, J.G., 1971. Model Icebreaking Experiments and Their Correlation with Full-Scale Data. *Transactions RINA*, Vol. 113, p. 83-108.
- 7) Edwards, R.Y., Jr. et al., 1972. Full-Scale and Model Tests of a Great Lakes Icebreaker. *Transactions SNAME*, Vol. 80, p. 170-207.
- 8) Edwards, R.Y., Jr. et al., 1976. Influence of Major Characteristics of Icebreaker Hulls on Their Powering Requirements and Maneuverability in Ice. *Transactions SNAME*, Vol. 84, p. 364-407.
- 9) Edwards, R.Y., Jr., Dunne, M.A. and Johnson, B., 1981. Results of Full Scale Trials in Ice of CCGS Pierre Radisson. *Proc. 6th. STAR Symposium*, Ottawa, 17-19 June 1981, SNAME, New York, p. 291-310.
- 10) Enkvist, E. 1972. On the Ice Resistance Encountered by Ships Operating in the Continuous Mode of Icebreaking. *The Swedish Academy of Engineering Sciences in Finland*, Helsinki, Report No. 24., 181 pp.
- 11) Enkvist, E., 1983. A Survey of Experimental Indications of the Relation Between the Submersion and Breaking components of Level Ice Resistance to Ships. *Proceedings POAC 83*, p. 484-93.
- 12) Enkvist, E. and Mustamaki, E., 1986. Model and Full-Scale Tests with an Innovative Icebreaker Bow. *Transactions SNAME*, Vol. 94, p. 325-351.
- 13) Ettema, R., Stern, F. and Lazaro, J., 1987. Dynamics of Continuous-Mode Icebreaking by a Polar-Class Icebreaker Hull. Iowa Institute of Hydraulic Research, Report No. 314, University of Iowa, Iowa.

- 14) Ferris, L.W., 1959. The Proportions and Forms of Icebreakers. *Transactions SNAME*, Vol. 67, p. 6-25.
- 15) Forland, K.A. and Tatinclaux, J.C., 1984. Laboratory Investigations of the Kinetic Friction of Ice. *Proceedings, IAHR Ice Symposium Hamburg*, Vol. 1, p. 19-28.
- 16) Forland, K.A. and Tatinclaux, J.C., 1985. Kinetic Friction Coefficient of Ice. *U.S. Army CRREL Report*, 85-6, 40 pp.
- 17) Freitas, A. and Nishizaki, R.S., 1986. Model Test of an Ice Class Bulk Carrier with The Thyssen/Waas Bow Form. *Transactions ASME*, Vol. 108, p. 168-172.
- 18) German, J.G., 1959. Design and Construction of Icebreakers. *Transactions SNAME*, Vol. 67, p. 26-69.
- 19) German, J.G., 1983. Hullform of Icebreaker Ships—Background and Progress. *proceedings Annual Technical Conference, CSSRA, Montreal* p. 49-69.
- 20) Ghonheim, G.A.M. et al., 1984. Global Ship Ice Impact Forces Determined From Full-Scale Tests and Analytical Modelling of the Icebreakers Canmar Kigoriak and Robert Lemeur. *Transactions SNAME*, Vol. 92, p. 253-82.
- 21) Hellmann, J-H., 1982. Model and full-scale tests in ice with the icebreaker *max Waldeck*. *Proceedings Intermaritec '82, Hamburg*, p. 373-384.
- 22) Hobbs, P.V. 1974. *Ice Physics*. Oxford, Clarendon Press.
- 23) Hoffmann, L., 1985. Impact forces and friction coefficient on the forebody of the German polar research vessel *Polarstern*. *Proceedings of POAC '85*, Vol. 3, p. 1189-1202.
- 24) I.T.T.C. 1987. *Proceedings of 18th. I.T.T.C.*, Kobe, Japan, 18-24 October 1987, Society of Naval Architects of Japan, Tokyo, Vol. 1, p. 527-566.
- 25) Johansson, B.M. and Makinen, E., 1973. Icebreaking Model Tests : Systematic Variation of Bow Lines and Main Dimensions of Hull Forms Suitable for the Great Lakes. *marine Technology*, Vol. 10, No. 3, p. 236-43.
- 26) Johansson, B.M. and Revill, C.R., 1986. Future Icebreaker Design *Proceedings of International Polar Transportation Conference(IPTC) Vancouver*, 4-8 May 1986. D.F. Dickins Associates Ltd. Vol. 1, p. 169-200.
- 27) Juurmaa, K. and Segercrantz, H., 1981. On Propulsion and its Efficiency in Ice. *Proc. 6th. STAR Symposium*, Ottawa, 17-19. June 1981, SNAME, New York, p. 229-237.
- 28) Kari, A., 1921. The Design of Icebreakers. *Shipbuilding and Shipping Record*, No. 18, p. 802-04 [Dec. 22, 1921].
- 29) Kashteljan, V.I., Poznyak, I.I. and Ryvlin, A. Ya., 1968. Ice Resistance to Motion of a Ship. *Sudostroyeniye*, Leningrad.
- 30) Kitagawa, H. et al., 1982. Vessel Performance in Ice(Report No. 1) *Abstract Note of 40th. General Meeting of S.R.I*, December 1982, p. 14-24.
- 31) Kitagawa, H. et al., 1983. Vessel Performance in Ice(Report No. 2) *Abstract Note of 42th. General Meeting S.R.I*, December 1983, p. 25-32.
- 32) Kitagawa, H. et al., 1986. A Study of Ship Performance in Ice-covered Waters(1st. Report) -Effect of Parallel Body. *N.R.C.C. Institute for Marine Dynamics*, Report No. LM-AVR-14. (Translated and revised version of Kitagawa, H. et al, (1982) above).
- 33) Kitagawa, H. and Jones, S.J., 1988. Ships in Ice. 4th IAHR State-of-the-Art Report on Ice Forces, U.S. Army CRREL Special Report(in press).
- 34) Kloppenburg, M., 1975. Ice Resistance of a Cargo Vessel in the Continuous Mode of Icebreaking. Tests of Three Geosim Models in Ice. *Proceedings of Ice Tech '75*, SNAME, New York Paper L, 12 pp.

- 35) Kotras, T.V., Baird, A.V. and Naegle, J.W., 1983. Predicting Ship Performance in Level Ice. *Transactions SNAME*, Vol. 91, p. 329–49.
- 36) Lewis, J.W. and Edward, R.Y., Jr., 1970. Methods for Predicting Icebreaking and Ice Resistance Characteristics of Icebreakers. *Transactions SNAME*, Vol. 78, p. 213–249.
- 37) Lewis, J.W., Debord, F.W. and Bulat, V.A., 1982. Resistance and Propulsion of Ice-Worthy Ships. *Transactions SNAME*, Vol. 90, p. 249–76.
- 38) Mäkinen, E., Lahti, A. and Rimpp, M., 1975. Influence of Friction on Ice Resistance—Search for Low Friction Surfaces. *Proceedings Ice Tech '75*, SNAME, New York, Paper G, 11 pp.
- 39) Michailidis, M. and Murdey, D.C., 1981. Performance of CGS Franklin in Lake Melville 1980. *Proc. 6th. STAR Symposium*, Ottawa, 17–19 June 1981, SNAME, New York, p. 311–322.
- 40) Milano, V.R., 1973. Ship Resistance to Continuous Motion in Ice. *Transactions SNAME*, Vol. 81, p. 274–306.
- 41) Milano, V.R., 1975. Variation of Ship/Ice Parameters on Ship Resistance to Continuous Motion in Ice. *Proceedings of SNAME Ice Tech. Symposium*, Montreal, Paper B, 30 pp.
- 42) Milano, V.R., 1980. A Reanalysis of Ship Resistance When in Continuous Motion Through Solid Ice. *Proceedings Intermaritec Symposium*, Hamburg, p. 456–475.
- 43) Milano, V.R., 1982. Correlation of Analytical Prediction of Ship Resistance in Ice with Model and Full-Scale Test Results. *Proceedings Intermaritec Symposium*, Hamburg, p. 350–72.
- 44) Naegle, J.N., Unpublished. Ice-Resistance Predictions and Motion Simulation for Ships Operating in the Continuous Mode of Icebreaking. Ph.D. thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 1980.
- 45) Narita, S. and Kishi, S., 1988. Model Tests of an Icebreaker in Snow-Covered Ice. *Proceedings of Ninth IAHR Ice Symposium*, Sapporo, Japan, 23–27, August 1988, Vol. 1, p. 216–226.
- 46) Narita, S. and Yamaguchi, M., 1981. Some Experimental Study on Hull Forms for the New Japanese Antarctic Research Ship. *Proceedings 6th. STAR Symposium*, Ottawa, SNAME, New York, p. 253–271.
- 47) Newbury, G.S., and Williams, F.M., 1986. “R-class icebreaker model experiment results”, *Ice Technology*, Computational Mechanics, Springer-Verlag, Berlin, p. 333–348.
- 48) Noble, p. and Bulat, V., 1981. Icebreaker Bow Forms—A Parametric Variation. *Proc. 6th. STAR Symposium*, Ottawa, 17–19 June 1981, SNAME, New York, p. 273–287.
- 49) Poznyak, I.I., and Ionov, B.P., 1981. The Division of Icebreaker Resistance into Components. *Proc. 6th. STAR Symposium*, Ottawa, SNAME, New York, p. 249–252.
- 50) Runeberg, R., 1888/89. On Steamers for Winter Navigation and Ice-breaking. *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, Vol. 97, Pt III, p. 277–301.
- 51) Scarton, H.A., 1975. On the Role of bow Friction in Icebreaking. *J. Ship Research*, Vol. 19, No. 1, p. 34–39.
- 52) Schwarz, J., 1977. New Developments in Modeling Ice Problems. *Proceedings POAC 77*, St. John's, Newfoundland, p. 45–61.
- 53) Schwarz, J., Jochmann, p. and Hoffman, L., 1981. Prediction. of the Icebreaking Performance of the German Polar Research Vessel. *Proc. 6th. STAR Symposium*, Ottawa, 17–19 June 1981, SNAME, New York, p. 239–248.
- 54) Schwarz, J., 1986 [a]. Some Latest Developments in Icebreaker Technology. *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 108, p. 161–167.
- 55) Schwarz, J., 1986 [b]. Advances in Icebreaker

- Technology in west Germany *Proceedings of International Polar Transportation Conference (IPTC)* Vancouver 4-8 May 1986, D.F. Dickens Associates, Vol. 1, p. 201-219.
- 56) Schwarz, J., et. al., 1986. "Erste Eisbrechtechnische Expedition mit F.S. Polarstern", *Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH*.
- 57) Shimansky, J.A., 1939. Conditional Standards of Ice Qualities of a Ship. *Transactions, Arctic Institute of the Chief Administrator of the Northern Sea Route*, Vol. 130, Leningrad.
- 58) Simonson, D.R., 1936. bow Characteristics for Icebreaking. *Journal American Society of Naval Engineers*, Vol. 48, No. 2, p. 249-54.
- 59) Takekuma, K. and Kayo, Y., 1988. Comparative Resistance Tests in Ice on Offshore Structure Models and a Ship Model Between Two Ice Model Basins. *Proceedings of Ninth IAHR Symposium on Ice*, Sapporo, Japan, 23-27 August 1988, Vol. 1, p. 570-579.
- 60) Tatinclaux, J.C., 1984. Model Tests on Two Models of WTGB 140-ft Icebreaker. *U.S. Army CRREL Report*, 84-3, 17 pp.
- 61) Tatinclaux, J.C., 1985. Propulsion Tests on Level Ice on a Model of a 140-ft WTGB Icebreaker. *U.S. Army CRREL Report*, No. 85-4, 13 pp.
- 62) Tatinclaux, J.C. and Murdey, D., 1985. Field Tests of the Kinetic Friction Coefficient of Sea Ice. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 85-17.
- 63) Thiele, E.H., 1959. Technical Aspects of Icebreaker Operation. *Transactions SNAME*, Vol. 67, p. 162-184.
- 64) Tronin, V.A., Malinovsky, V.A. and Sandakov, Yu, A., 1984. Problems of River Shipping in Ice-Bound Conditions. *Proceedings 7th IAHR Symposium of Ice* Vol. 2, p. 255-266.
- 65) Vance, G.P., 1975. A Scaling System for Vessels Modelled in Ice. *Proceedings, SNAME Ice Tech. Symposium*, Montreal, paper H.
- 66) Vance, G.P., 1980. Analysis of the Performance of a 140-ft Great Lakes Icebreaker : USCGC Katmai Bay. *U.S. Army CRREL Report* 80=8, 28 pp.
- 67) Varges, G., 1987. Advances in Icebreaker Design-The Conversion of the Soviet Polar Icebreaker "Mudyug" into a Thyssen/Waas Ship. *Schiff und Hafen*, Kommandobrücke, Ht. 12, p. 20-30.
- 68) Varges, G., 1988. Revolution in Polar Shipping-Thyssen/Waas in Arctic Ice. *Proceedings of Ninth IAHR Symposium on Ice*, Sapporo, Japan, 23-27 Aug. 1988, Vol. 1, p. 719-734.
- 69) Vinogradov, I.V., (1946). Vessels for Arctic navigation(Icebreakers) Library of Congress No.(VM) 451. Vs. Paraphrased in Ferris(1959).
- 70) Virtanen et al., 1975. Great Lakes Ore Carrier Series Ice Resistance Model Tests-Draft Variation. *Wärtsilä Icebreaking Model Basin, Test Report No. A-34* to U.S. Dept. of Commerce, Maritime Administration.
- 71) Watson, A., 1959(a). Operation of Department of Transport Icebreakers in Canada. *Transactions SNAME*, Vol. 67., p. 140-161.
- 72) Watson, A., 1959(b). The Design and Building of Icebreakers. *London Transactions of Institute of Marine Engineers*, Vol. 71, No. 2, p. 37-65.
- 73) White, R.M., 1969. Prediction of Icebreaker Capability. *Shipping World and Shipbuilder*, Vol. 162, p. 1437-40.
- 74) White, R.M., 1970. Prediction of Icebreaker Capability. *Transactions RINA*, Vol. 112, No. 2, p. 225-51.
- 75) Zahn, P.B., Humphreys, D. and Phillips, L., 1987. Full-Scale Towed Resistance Trials of the USCGC Mobile Bay in Uniform Level Ice. *Transactions SNAME*, Vol. 95, p. 45-77.
- 76) 朴命圭의 1인 "쇄빙선설계의 경험적 고찰(An

Empirical Study on the Design of Icebrakers)
한국해양학회지 제13권 3호, 1989. 12. 30, p. 67
-87.

77) 朴命圭 외 1인 “碎氷船設計에 있어 碎氷模型工

學에 대한 分析”(Analysis about Model Ice
Engineering for Design of Icebrakers) 한국항
해학회지 제14권 1호, 1990. 3, p. 57-67.