碎氷船 設計에 있어 碎氷模型工學에 대한 分析

朴 命 圭* · 高 尙 龍**

Analysis about Model Ice Engineering for Design of Icebrakers

Myung-Kyu Park · Sang-Yong Koh

목 차

머리말
1. 쇄빙현상의 상사법칙
2. 쇄빙선 연구의 발전
3. 모형시험결과와 실선계측 결과의 비교 가능성
4. 쇄빙저항의 성분에 관한 기초적 연구
5. 결론
참고문헌

머리말

북극권의 석유등 제 자원의 발견과 개발은 쇄빙현상의 모형화 기술의 필요성을 가속시켰으며 기존 빙해수조(Leningrad, Helsink, Hamburg, Columbia Md)이외에 새로이 6개의 수조가 완성도중에 있거나 계획중에 있다. (Canada－2, 미국－2, 소련 및 일본－각 1)

모형빙으로서는 주로 염수빙이 사용되고 있으며 brine 농도의 조절에 의하여 실용상 임의의 강도로 scale down할 수 있다. 그러나 염수빙의 결정은 강도(Flexural Strength)를 어떤 한계값 이하로 축척비를 유지할 경우 탄성율(Young's Modulus)이 그 축척에 대응하는 값보다 훨씬 낮아진다는 점이다. 천연 해빙의 E/σ비는 2000～5000 이지만 과도하게 축척된 모형빙은 200～500정도이다. 이러한 염수빙의 단점때문에 대용빙(합성빙)의 개발이 기대되지만 대용빙 역시 마찰계수가 염수빙의 3～4배에 이르는 단점이 있다.

쇄빙 현상에 있어서 저항의 대부분이 쇄빙면 상호간의 마찰에 기인하기 때문에 대용빙은 현재 쇄빙의 모형화에는 적당치 않다고 생각된다. 그러므로 염수빙을 사용하여 기계적 성질을 보다 개선해야 할 필요가 있다.

1. 쇄빙현상의 상사법칙

무빙상태에서 실선과 모형선의 역학적 상사가 되기 위하여는 Froude수와 Reynolds수가 같아야 한다.

*정회원 , 한국해양대학 선박공학과
**울산대학교 조선 및 해양공학과

$$\frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = \frac{V_F}{\sqrt{gL_F}} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$\frac{V_M L_M}{\nu_M} = \frac{V_F L_F}{\nu_F} \quad \cdots\cdots (2)$$

(M : Model, F : Full scale, g : 중력의 가속도)

이 두가지 조건을 동시에 만족시키는 것은 실제 불가능하며 보통 Froude 법칙을 적용하여 모형시험을 행한다.

실선척도에의 환산은 반경험적으로 확립된 법칙을 적용하여 행한다. 또 모형선은 가급적 큰 것을 사용하고 Reynolds수의 틀림에 의한 척도영향에 기인하는 오차를 최소화 하도록 각별한 주의를 해야 한다.

무빙상태의 운동에 관계되는 힘의 종류는 관성력, 점성력 및 중력의 3가지이지만 모형시험을 행하여 정확한 실선 성능을 예측하는 것은 상당히 곤란하다.

빙해역에서는 상기 3가지 힘 외에 고체 마찰력이 추가되며 다시 쇄빙 Mechanism, 물과 얼음이 혼합류의 기동 등을 함께 고려하여야 한다. 이 때문에 빙해중의 모형시험은 무빙상태에서 보다 몇배 힘들다.

마찰에 관한 상사조건은 염수빙을 이용하면 쉽게 만족될 수 있다. 마찰력의 상사조건은

$$\mu_M = \mu_F \quad \cdots\cdots (4)$$

이다. 마찰에 의한 저항은 선체와 얼음뿐 아니라 빙편의 상호마찰에 의존하기 때문에 모형빙의 재료는 큰 마찰계수를 가진 대용빙을 써서 실험을 할때 선체나 off-shore 구조의 모형표면에 마찰저감제를 도포하는 등 소세공(小細工)은 비과학적인 것으로 생각되어 추정할 수 없다.

쇄빙에 필요한 힘은 주로 얼음의 두께와 얼음의 기계적 성질에 의존한다. 얼음의 강도와 탄성율의 축척은 기하학적인 축척율 $\lambda (= L_F/L_M)$에 일치하는 것이 증명되었다.

이것으로 다음식에서 정의되는 Cauchy수의 일치가 유도되었다.

$$\frac{\rho_M V_M^2}{E_M} = \frac{\rho_F V_F^2}{E_F} = Ch \quad \cdots\cdots (4)$$

또 최근 Atkins는 Ice number라는 새로운 무차원수를 도입하였다.

$$I = Ch^2 \sqrt{EL/R} \quad \cdots\cdots (5)$$

여기서 R는 파괴인성(Fracture Toughness)이며 Crack 전파에 대한 저항을 표시하는 지표이다. 모형시험에서 당연히 이 상사법칙이 만족되어야 하며 어느 것이 현실적으로 만족하는지 고찰해 보자. 먼저 중력, 관성력 및 얼음이 탄성율의 작용은 가장 기본적인 것으로 Froude 법칙 및 Cauchy 법칙을 필히 만족해야 한다. 그러나 지금까지는 Froude 법칙만을 고려한 연구를 행하였다. Cauchy 법칙을 무시하고 정확하게 얼음의 탄성율을 축척하지 않는 것이 얼마나 심각한 오류에 채워진 결론을 가지게 하는가를 상세하게 설명한다.

염수빙을 사용하여 Froude 법칙과 Cauchy 법칙을 함께 만족시키면서 실험을 하는 것은 매우 어렵다. 특히 $\lambda > 30$인 경우 얼음의 강도를 정확하게 축척하면, 탄성율이 심하게 저하하는 중대한 문제가 생긴다.

1975년 Hamburg 수조(HSVA)에서 얼음의 강도, 탄성율, brine 농도 및 염분도 등의 상호관계를 규명하기 위하여 기본적인 실험을 행하였다. 그 결과를 Fig. 1에서 기준화한 탄성율과 기준화한 강도(flexural strength)의 관계로서 두종류의 온도 ($0^\circ \sim 14^\circ C$)에 관하여 보여주고 있다.

이 실험에서 Weeks와 Assur가 이론적으로 유도한 얼음의 강도, 탄성율과 brine 농도의 관계가 검증되었다. 저온의 높이 brine 농도의 염수빙의 탄성율은 강도에 비하여 상대적으로 현저히 작은 값이 된다.($E/\sigma < 500$). 한편 실험 직전에 얼음을 따뜻하게 하면 E/σ의 값이 현저히 증가하여, 다시 축척율 λ가 20이하이면 E/σ의 값은 천연해빙이 가지는 값 범위에 존재하는 것이 이해되었다. HSVA는 쇄빙 모형시험에서 이 연구결과를 이용하여 좋은 결과를 얻었다. Fig. 2에 얼음의 굽힘파괴 energy에 대한 비의 영향을 표시하였다.

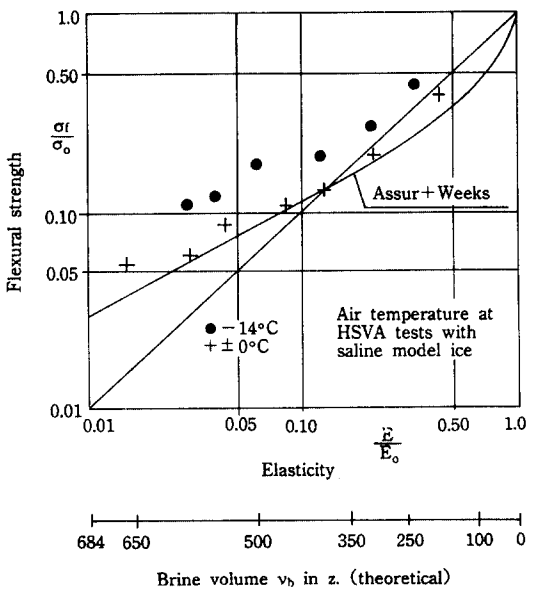


Fig. 1 Normalized strength vs. normalized elasticity of saline ice

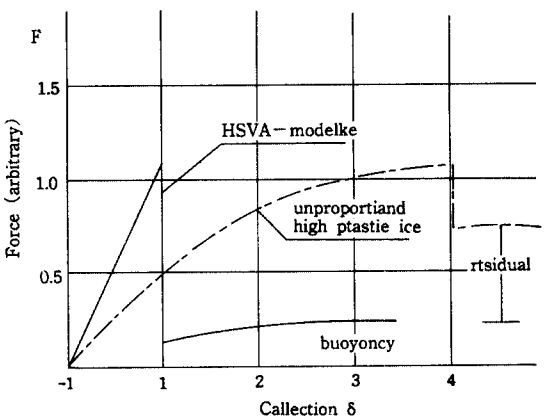


Fig. 2 Force-deflection Curves of two different types of model ice

HSVA의 모형빙과 저온의 고염분빙에 있어서 하중과 변위의 관계를 표시한 curve를 비교해보면 전자의 파괴 energy는 잔존하는 소성이 큰 고염분빙의 그것보다 훨씬 영향이 적다는 것을 알 수 있다.

Ice number가 모형시험결과에 미치는 영향에 대하여는 아직 충분한 검토가 이루어지지 않았다. 그러나 Atkins의 설명에 의하면 E/σ가 작은 염수빙의 그것이 천연해빙과 비교할 때 영향이 적다고 한다. 여하튼 현재는 파괴인성에 대한 충분한 지식을 얻을 수 없음으로 당분간 강도의 축척율 λ는 20이하인 것이 바람직하다.

얼음의 점성으로 인한 힘이 다른 종류의 힘과 비교하여 충분히 작은 경우(모형선 속력이 느린 경우)로서 λ가 20이하인 경우는 Reynolds 법칙은 무시되어도 크게 상관없다고 생각된다. 마찰력 및 얼음의 파쇄력과 함께 파쇄된 빙편의 치수에 관한 척도영향을 피하기 위하여는 모형빙의 결정치수를 올바르게 축척하지 않으면 안된다. 이것은 결빙개시할 때 냉수를 살포하여 seeding(종자 붙이기)을 함으로서 실현된다.

2. 쇄빙선 연구의 발전

1968년 Kashteljan은 반경험적인 쇄빙선의 저항 추정식을 발표하였다. 이 식에서는 쇄빙에 관계되는 전저항 성분이 다음의 3가지로 구성되어 있다.

R_0(파쇄성분)−빙판의 파쇄에 기인하는 저항

R_1(중력성분)−빙판의 침하, 선체의 수직변위에 관계되는 저항

R_2(관성성분)−선체에서 빙편으로 의 운동량 전달에 기인하는 저항

이것을 모방하여 전저항을 몇개의 다른 물리과정을 기본으로 한 성분으로 나누는 방법을 써서 많은 연구자는 최근 몇가지 종류의 추정식을 구하였다. 이들 식은 전부 모형 또는 실선시험 data를 회귀 분석하여 얻은 것이다. Table 1에 이들을 비교하였다.

각 식의 표현에서 상기의 3성분에 관여하는 parameter의 종류 및 그들의 역의 값이 다양하다. 마찰계수나 선형의 영향은 각 항의 계수 C_0, C_1, C_2에 포함된다. 현재로서는 쇄빙 process에 포함되는 물리현상의 해명은 충분치 못하고 모형이나 실선의 시험 data에 관하여도 그의 신뢰성이 의문이 있다. 따라서 저항추정식을 유도하기 위하여 이들 data를 가지고 무리한 회귀분석을 하는 것은

Table 1. Several Formulas for Predicting the Resistance of an Icebreaking Ship

Total Resistance of Icebreaker	Fracture Portion		Gravity Portion	Inertia Portion	Established by
R=	$C_o\sigma_f Bh$	+	$C_1\rho EgBh^2$	$C_2B^{1.65}hv$	Kashteljan
R=	$C_o\sigma_f h^2$	+	$C_1\rho EgBh^2$	$C_2\rho EBh_v^2$	Lewis and Edwards
R=	$C_o\sigma_f Bh$	+	$C_1\rho wgBh^2$	$C_2\rho WB_0\sqrt{gh^3}$	Edwards and Lewis
R=	$C_o\sigma_f Bh$	+	$C_1\rho gBh^2$	$C_2\rho ELh^{0.65}B^{0.35}v^2$	Vance
R=	$C_o\sigma_f Bh$	+	$C_1\rho gBhT$	$C_2\rho EBhv^2$	Wärrsilä

과학적이 아니다. 이 숫법을 맹종하는 한, 새로운 쇄빙선의 실험을 행할 때마다 새로운 저항추정식을 얻게 된다. 충분한 과학적 근거가 없는 추정식의 mass production은 쇄빙공학의 혼란을 초래할 뿐이다. 이 혼란한 상황은 Fig. 3에서도 나타나 있다. 이 그림에서는 USCG의 쇄빙선 Mackinaw에

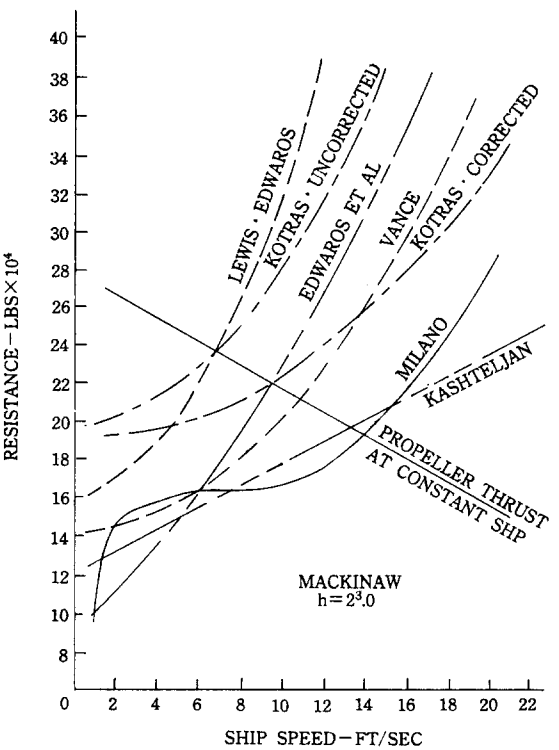


Fig. 3 Total resistance vs. ship speed for icebreaker MACKINAW in two feet thick ice as predicted by various formulations(after Milano, 1975)

대한 것으로 각종 추정식에 의한 전저항−속력의 curve로 비교하고 있다. 또 이들중의 하나인 Milano의 것은 energy이론을 도입한 것이다.

Milano는 연속쇄빙시 전소비 energy는 다음 5가지 성분에 의하여 구성되어 있다고 생각하였다.

E_1 : 수로에 떠 있는 빙편을 배제하는데 필요한 energy

E_2 : 빙판에 충돌하여 이것을 파쇄하는데 필요한 energy

E_3 : 선체가 빙판에 실리기 위한 energy

E_4 : 빙판의 파쇄후 선체가 침하하는데 필요한 energy

E_5 : 빙판의 파쇄후 빙편을 침하 배제하는데 필요한 energy

배의 속력이 증가하면 pitching이 감소하여 이에 따른 energy 손실 E_3, E_4는 감소하므로 Milano의 전저항 곡선은 전예가 없는 특이한 형상을 나타낸다. 이 예에서는 2~8놋트의 범위에서는 전저항의 증가는 완만하다. 얼음 두께가 더 증가하면 8놋트의 저항이 2놋트때 보다 감소하는 경우도 있다. Milano는 그의 추정값과 Mackinaw의 실선 data와의 상관은 양호하다고 말하고 있으나 그의 방법에도 난점이 없는 것은 아니다. 예를들면 그의 계산에는 마찰계수의 값이 작게 예측되어 있다.

HSVA는 다른 빙해수조와 달리 모형빙의 E/σ 값을 천연빙의 그것에 가깝게 하여 실험을 행한 결과 Milano의 예측법에서 유도된 특이한 저항곡선과 유사한 결과를 여러번 관측하였다.(Fig. 4 참조) 이른바 Milano hump는 E/σ값이 작은 모형빙을 사용하는 경우는 관측할 수 없다. 이와같은 얼음은 소성적 변형이 현저하고 또 선체가 빙판

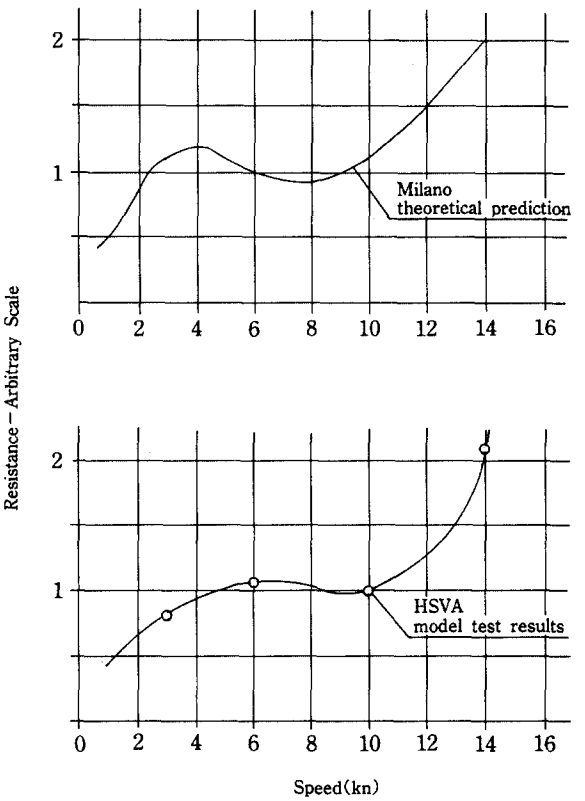


Fig. 4 Icebreaker resistance vs. speed curves as theorctically predicted by Milano and as obtained by HSVA model tests.

에 실릴 때는 E가 작기 때문에 빙판은 쉽게 휘이고 그 결과 pitching 운동은 실선에 비하여 상대적으로 훨씬 작아진다. 따라서 저항은 선체의 상하운동에 필요한 energy만큼 작게 계측된다. 이것은 특히 저속에서 일어나기 쉽다.

E/σ값이 작은 모형빙을 이용한 모형시험의 결과에 대하여는 또 하나의 중대한 의문점이 있다. 그것은 전저항중에 포함되는 파쇄성분의 비율이 중력성분과 관성성분에 비하여 극히 작다는 점이다. 이 결과 파쇄성분의 비율은 5~10%이라는 견해가 넓게 지지를 받고 있으며, Mäkinen and Ross(1973)에 이르러서 그들의 저항추정식에서 이 항목을 완전히 생략하였다. 그러나 실제로는 실선시험 결과에서 알 수 있듯이 파쇄성분의 기여가 훨씬 크고 속력이나 배의 크기에 의한 것이 전저항의 약 30~70%에 달하여 명료하게 확인되는 것이다. 그의 예로서 Vance(1975)는 3척의 쇄빙선의 data로 부터 구한 파쇄성분의 비율을 모형과 실선을 대조하여 table 2에 표시한다. 이 표에 의하면 올바른 상사법칙을 사용하지 않은 모형시험은 틀린 결론을 초래하는 결과를 가져온다는 것을 알 수 있다.

위에서 생각한 방식들의 정확함을 입증하기 위하여 HSVA는 얼음의 강도를 140→50KN/m²의 범위에서 단계적으로 감소시키는 모형시험을 행하였다. Fig. 5에는 Effective strength R/h²(R : 전

Table 2. Resistance Distribution in Model and Full Scale of Three Different Icebreakers(after Vance, 1975)

Velocity	Resistance PORTION	MACKINAW		MOSKVA		FINNCARRIEI	
		mod.	f.s.	mod.	f.s.	mod.	f.s.
1ft/sec	Fracture	43	71	6	68	32	53
	Gravity	57	29	94	32	68	47
	Inertia	00	00	00	00	00	00
7ft/sec	Fracture	34	44	5	57	24	43
	Gravity	46	23	77	27	53	39
	Inertia	20	22	18	16	23	48
21ft/sec	Fracture	13	20	2	25	8	17
	Gravity	18	9	31	12	19	16
	Inertia	69	71	67	63	73	67

Ice thickness – 2ft, mod. model, f.s. full scale.

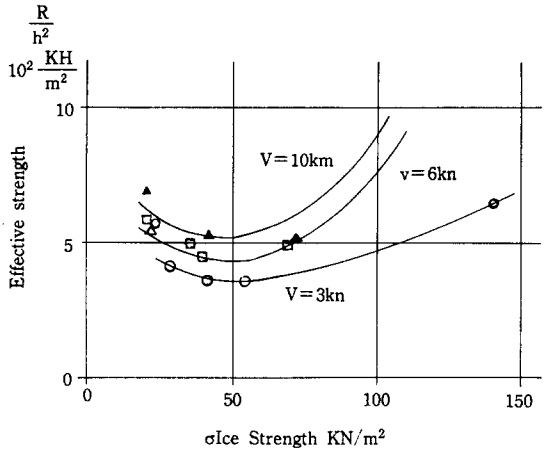


Fig. 5 Effective strength R/h^2 vs. flexural strength of model ice with different salinities

저항, h : 얼음두께)와 Flexual strength σ_f(cantilever test에 의함)의 관계를 plot하였으며 본도에서 이하의 사실을 알 수 있다.

σ_f가 140→50KN/m² 감소함과 동시에 R/h^2도 감소하며, σ_f가 50KN/m²보다 작아지면 R/h^2은 반대로 증가한다.

이 현상은 고염분빙에 특유한 잔존소성의 증대 및 척도로 부터 벗어난 탄성율의 저하가 쇄빙에 필요한 energy를 증대시키는 결과로 해석될 수 있다. 혹시 이와같은 모형빙에서의 실험결과를 사용하여 table 1에 표시한 것과 같은 추정식의 미정계수 C_0, C_1, C_2를 회귀분석에 의하여 결정하면, σ_f의 전저항에 미치는 영향을 겉보기상 매우 작게된다.($C_0 \ll C_1 + C_2$)

Fig. 5의 결과는 별써 Fig. 1에 표시한 얼음의 강도, 탄성율 및 brine농도의 상호관계와도 모순이 없이 일치한다.

Fig. 1에서는 σ_f가 50KN/m² 이하의 영역에서는 E의 값이 바른 축척율에 대응하는 값보다 작은 쪽으로 현저히 치우치는 것을 알 수 있다. 임의 알려져 있는 다수의 쇄빙저항추정식은 $\sigma_f < 30$KN/m²의 모형빙을 사용한 모형실험에서 유도되었으며 E의 축척이 바르지 않기 때문에

(1) 실선저항의 과대추정
(2) 파쇄성분의 과소평가
(3) 틀린 저항추정식의 도출

등의 결과로 끝이 났다. HSVA에서는 위의 결과를 감안하여 원칙적으로 $\sigma_f > 50$KN/m²의 모형빙을 사용하였다. 부득이 작은 모형($20 < \lambda$)을 사용할 경우는 $\sigma_f = 50$KN/m²의 얼음을 사용하여 실험을 행하고, 그 결과에서 쇄빙성분만을 분리하여 이것에 [목적하는 σ_f/실험에 쓰인 σ_f]의 값을 곱하여 쇄빙성분을 수정하는 것으로 하고 있다.

(파쇄성분을 추출하기 위하여는 얼음의 강도를 두종류이상 바꾸어 시험을 행할 필요가 있다.)

3. 모형시험결과와 실선계측결과의 비교 가능성

몇가지 종류의 쇄빙저항추정식이 임의 발표되어 있고 각각의 식의 제창자는 자기가 유도한 식에 의한 추정값이 실선계측결과와 잘 일치한다고 주장하고 있다. Fig. 3에 그들의 예측값을 비교하여 표시하고 있으며 그들 사이에는 매우 큰 차이가 있는 것은 참으로 놀라운 일이다. 이와같은 솔직한 이의를 제기하지만 어느 연구자도 스스로 틀렸다고 인정하지 않고 있다. 그 이유는 실선 data가 오차가 매우 크기 때문에 한눈에 모순이라고 생각되는 몇개의 식에서도 결국 꼭 들어맞게 할 수 있기 때문이다.

실선 data가 (상이하게 되는) 오차가 생기는 이유는 몇가지로 생각된다.

먼저 첫째로 얼음두께, 강도 및 배의 속력을 고정도(高精度)로 측정하는 것이 매우 어렵다. 일반으로 얼음 두께든가 적설량들이 자연조건은 장소마다 다르기 때문에 연속기록만이 신뢰할 만한 정보를 제공한다.

쇄빙저항에서 정하는 파쇄성분의 비율은 결코 무시할 수 있는 것이 아니고, 현실에는 50%까지 달한다는 것을 생각하면 얼음의 강도에 관한 신뢰성 높은 정보를 얻어야 하는데 어떻게 하면 가능할까.

얼음의 기계적 성질은 측정방법에 따라 다른값을 얻게 되는 것은 잘 알려져 있다. 그래서 국제수력학회(IAHR) 및 국제수조회의(ITTC)는 얼음의 시험 및 쇄빙선의 실선계측에 관한 통일적인

방법에 관한 시안을 작성하기 위하여 작업부회(作業部會)를 발족시켰다.

한편 쇄빙선의 설계자들은 USCG의 신예쇄빙함 Polar Star호의 시운전에 기대를 걸고 있다.

본 함은 최신의 각종 장비를 갖추고 있고 그 중에도 Impulse Radar 장치는 얼음 두께를 연속적으로 측정할 수 있다. 그러나 처음의 빙해항행(1977 여름)에서 추진축계에 손상을 받았기 때문에 쇄빙시험 data를 얻을 수 없었던 것으로 참으로 애석하다. 실선 data의 오차가 생기는 두번째 이유는 실선시험에서 얻은 추진요소(propeller 회전수, torque, thrust 등)을 반류계수나 추력감소계수를 고려하지 않고 직접 저항값으로 변환하는 것이다.

propeller 주위에는 빙편이 존재하고 있기 때문에 추진요소의 정확한 측정은 매우 어렵고, 특히 thrust의 계측값은 크게 오차가 생긴다.

4. 쇄빙저항의 성분에 관한 기초적 연구

선박의 쇄빙저항에 관하여는 여러가지 모순된 시험결과, 해석 및 저항 추정식이 제창되어 있어 이와같은 혼란한 상황을 타개하기 위하여 HSVA는 쇄빙저항 성분을 해명할 이하와 같은 기초연구를 행하였다. 선박의 모형은 쇄빙현상의 해석적 및 물리적인 모형화를 행하는데 너무나 형상이 복잡하기 때문에 그것 대신에 단순한 형상인 경사진 평판을 사용하였다.

이와같은 단순화에 의하여 쇄빙저항의 성분을 실험적으로나 이론적으로나 분리하는 것이 용이하게 되었다.

쇄빙성분을 직접구하기 위하여 첫번째 주행에서는 평판의 하단을 얼음이 막 깨질 정도로 그러나 깨진 빙편을 수평방향으로 배제하지 않을 정도로 낮추어 달리게 한다. 두번째의 주행에서는 평판의 흘수를 깊게 하여 행하면, 빙편은 침하되고, 평판의 횡절단면의 밖으로 배제된다. 고찰한 parameter는 얼음두께 h, 속력 v, 평판의 경사각 α, 평판의 폭 b, 평판과 얼음의 마찰계수 μ 및 평판의 흘수 t이다. 실험결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 파쇄저항 R_0은 얼음 두께 h의 2승에 비례한다.(Fig. 6)

(2) 파쇄저항은 속력이나 평판의 폭에는 거의 무관하다.(Fig. 7, 8)

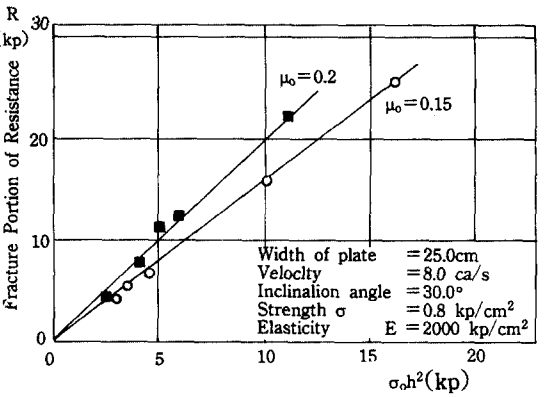


Fig. 6 Fracture portion of resistance vs. for two different friction coefficients

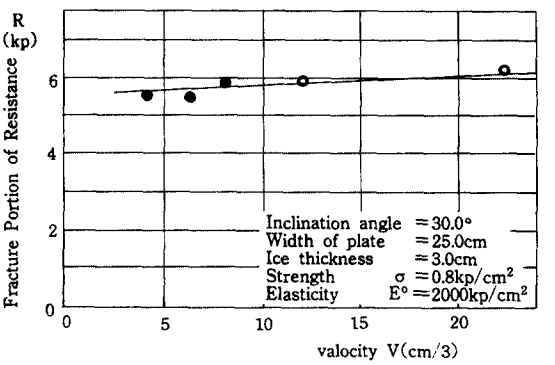


Fig. 7 Fracture porrion of resistance vs. velocity

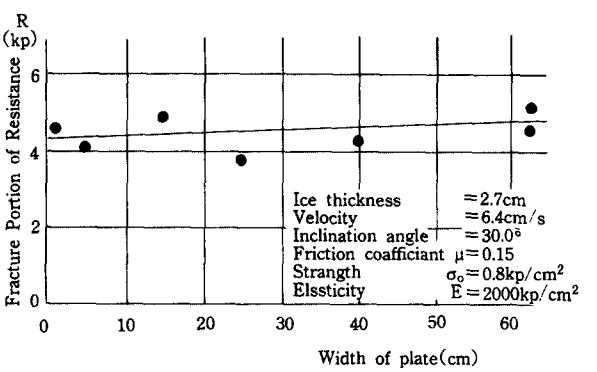


Fig. 8 Fracture portion of resistance vs. width of plate

이것은 얼음의 파괴가 주로 평판의 양측단에서 전단에 기인하다는 것을 나타낸다.

(3) 파쇄저항은 평판의 경사각 α와 마찰각(Arc-tan μ)과의 합의 tangent와 일차관계가 있다. μ의 값을 변화시켰을 때의 결과는 하나의 직선위에 있지 않고, 마찰의 영향은 매우 복잡하다. 금후에도 계속 연구해야 할 항목중의 하나이다.

(4) 깨진 빙편을 평판의 횡절단면 밖으로 배제하므로서 생기는 저항성분 R_{1+2}(중력성분-관성성분)은 평판의 홀수 t를 사용한 Froude수의 2승에 비례한다.(Fig. 10) 평판

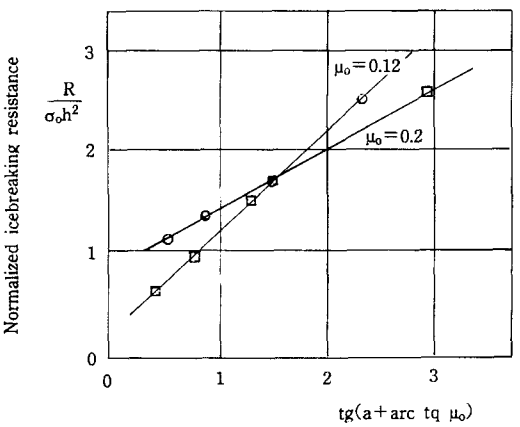


Fig. 9 Normalized icebreaking portion of resistance vs. tangent of angle of inclination + roughness for two friction coefficients

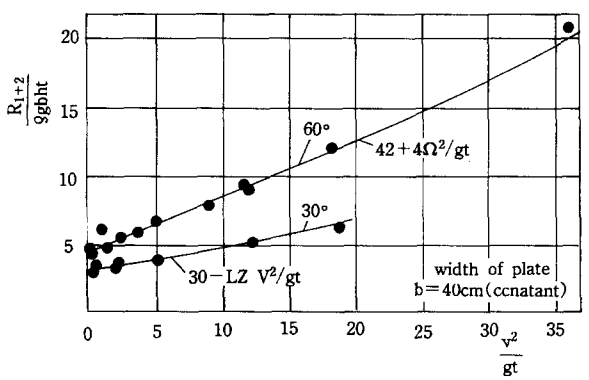


Fig. 10 Normalized resistance for submerging and accelerating the broken ice vs. square of Froude number

의 경사각 α가 60°인 때의 저항은 30°인 때의 약 2배가 된다.

쇄빙 Model을 쇄빙선의 선수에서 경사평판으로 단순화하므로서 이 문제를 이론적으로 취급하는 것도 가능하게 된다.

파쇄저항에 관하여는 탄성이론을 사용하여 탄성지지된 반무한 평판(半無限平板)에 2개의 선상하중(線狀荷重)을 작용시킨 경우를 계산하면 구할 수 있다. 이 이론적 해법에서는 선상하중간(線狀荷重間)의 거리 및 빙판의 자유단에 작용하는 수평하중에 관하여도 고찰하였다. 이 고찰에서 얻어진 가장 중요한 결론은 파쇄성분이 $h^{7/4}$에 비례하는 것이며, 실험에서 얻어진 h^2에 매우 가깝다. 3차원적인 파괴기준에 기본을 둔 energy적 취급을 하면 이론적 해법은 더욱 개량되는 것은 확실하다고 생각되지만 아직까지 그와같은 파괴기준은 확인되어 있지 않다.

이 연구결과 쇄빙체가 받는 저항은 몇개의 기본적인 물리적 parameter에 의존하고 있는 것이 확실해졌다.

물체형상 및 마찰계수의 부변수(副變數)라 생각하고 그의 영향은 실험에서 정해진 계수의 값에 포함하여 생각하여야 한다. 또 배의 길이, 얼음의 측압 및 적설량 등의 부가적인 parameter의 영향은 저항추정식에서 새로운 부가항을 가지고 표시하여야 하고, 무차원항에 포함되는 주변수(主變數)의 멱을 조작하여 무리하게 식에 끼워 맞추는 일을 하여서는 안된다. 경사평판을 사용한 실험은 빙판의 파괴가 두단계로 일어나는 것을 분명히 하였다. 즉 먼저 평판의 양쪽에 따라 전단파괴가 발생하고, 그 결과 얼음의 cantilever beam이 형성되고 다음에 이 보가 평판에 의하여 밑으로 눌리어져 굽힘파괴를 일으킨다. 저항의 대부분은 전단파괴에 기인한다. 그리고 얼음의 여러가지 강도중에서 전단강도는 최소(굽힘 강도의 약 1/2)이므로 위의 결과에서 전단으로 쇄빙하는 신형식의 쇄빙선의 착상이 생겼다.

German and Milne의 설계인 Canadian Coast Guard의 신쇄빙함 Plar-7은 HSVA에서 개발된 이 신쇄빙법의 착상을 채용하고 있다.

새로운 착상에서 생긴 쇄빙선-WAAS Icebrea-

ker－은 pontoon형의 선수를 가지고, 선수밑면은 경사한 평면을 이루고 있고, 양쪽에 썰매와 같은 활주면을 가지고 있다.(부록1참조) (한국항해학회지 제13권3호 : 쇄빙선설계의 경험적고찰 2-1-7 참조)

선수부의 폭은 선체중앙보다 조금 크고 선측에서 마찰저항을 경감하는 효과를 가진다. 중앙부 선저는 V자형이고, 선저로 유입된 빙편의 선저를 따라 떠올라 선체 양쪽의 빙판 밑으로 미끄러져 들어가도록 하였다.

이와같은 빙편의 운동은 중앙부 선저에 정비된 횡방향의 water jet에 의하여 한층 더 촉진된다. 이 특이한 선형 때문에 선체후반부 및 선후수로(船后水路)는 빙편으로 부터 해방된다. 그러므로 propeller가 빙편에 접촉하여 손상을 받는 확율도 눈에 띄게 감소한다. 모형시험 결과에 의하면 WAAS형 쇄빙선의 저항은 재래선보다 작다. 또 본선은 선미에 재래식 추진기외에 선수의 활주면에 piston식의 일종의 기계적 추진장치(stempel－antrieb)을 갖추고 있고, 이것으로 빙면(氷面)을 받아들이면서 전진하는데 이것은 매우 효과적이다. 특히 빙중에서의 조선성능(操船性能)은 본장치의 한쪽만을 구동하므로서 한단계 향상된다. 현재 이 새로운 쇄빙법은 다시 개량되고 있고, pilot study도 계획되고 있다.

5. 결 론

쇄빙모형공학은 근년 현저한 발전을 하여왔으나 완성역에는 아직 요원하다. HSVA의 시험법은 이론적인 접근과 합치하는 가장 이론적인 결론이 주어졌다 생각하지만, 신뢰할만한 실선 data 및 완전한 이론적 해명이 아직 얻어지지 못한 현시점에서는 쇄빙현상에 관하여 여러가지 상이한 견해가 공존할 수 있다.

빙공학 전체를 보다 건전한 기반위에 구축하기 위하여는 실척도에서의 시험계측을 가능한 주의깊게 행하는 것이 절실하다. 동시에 이론적인 계산법을 확립하는 것도 꼭 필요하다.

쇄빙선의 저항에 관하여는 Milano방법, offshore 구조물에 관하여는 Reinicke and Ralston 방법을 모방한 approach가 가장 유망하다고 생각한다.

이와같은 이론적 해명에 관련하여 얼음의 기계적 성질 및 마찰 효과에 관한 한층 너 높은 기초적 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

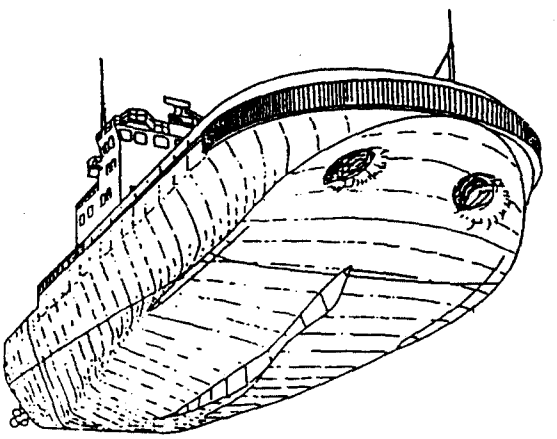
1. Abkowitz, M.A. (1964)－"Lectures on Ship Hydrodynamics－steering and Maneuverability" Report No. Hy－5, Hydro and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark.
2. Buzuev, A., Ryblin, A. (1961)－"Calculation of the resistance encountered by an icebreaker moving through ice cakes and brash" Morskoi Flot. Vol. 21, No. 8, p. 136～138.
3. Chu Fen－Dow(1974)－"Ship resistance in homogeneous ice fields" Thesis for the degree of Doctor of Technology, Helsinki University of Technology, 125p.
4. Edwards, R.Y. Jr, German, J.G., Lawrence, R. G.A.(1973)
"Comparative Model Tests of the Icebreaker Performance of Two Canadian Coast Guard Icebreakers" Second International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions (POAC), Reykavik, Iceland.
5. Edwards, R.Y., Lewis, J.W., Wheaton, J.W., Colhurn, J.(1972)
"Full Scale and Model Tests of a Great Lakes Icebreaker" Trans. SNAME, Vol. 80.
6. Edwards, R.Y., Major, R.A., Kirn, J.K., German, J.G., Lewis, J.W., Miller, D.R. (1976)－"Influence of major characteristics of icebreaker hulls on their powerering requirements and maneuverability in ice" Trans. Society of Naval Architects and Marine Engineers, N.Y. Sept. 11～13, 39p.
7. Enkvist, E. (1973)－"On the Ice Resistance

Encountered by Ships Operating in the Continuous Mode of icebreaking" Swedish Academy of Engineering Sciences in Finland, Report No. 24.

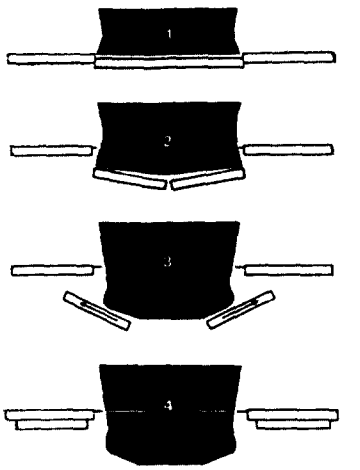
8. German, J.G., Dadachanyi, N.(1975)－"Hullforms for arctic bulk cargo transportation" Presented to 'The Society Naval Architects and Marine Engineers' May 14～17, 1975, p. 53～64.
9. German, J.G., Lawrence, R.G.A.(1975)－"Full scale testing in ice of three icebreakers" Trans. Society of naval Architects and Marine Eng. Montreal, April 1975, 67p.
10. Jansson, J.E.(1956)－"Icebreakers and their design" European Ship Building, Vol. 5.
11. Kathtelyan, V.I., Poznjak, I.I., Ryblin, A. Ya(1968)－"Ice Resistance to Motion of a Ship" (translation) Sudostroenie, Leningrad.
12. Kashtelyan, V.I., Ryblin, A.Y., Faddeyev, O.V., Yagodkin, V.Y.(1972)－"Icebreakers" Ledokoly, Leningrad, 287p. Trans－lation CRREL Draft Transl. 418.
13. Levine, G., Voelker, R.P., Mentz, P.B.(1974)－"Advances in the development of commercial ice transiting ships" Trans. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nov. 14～16, 1974, 25p.
14. Lewis, Jack W., Edwards, R.Y. Jr.(1970)－"Methods for predicting Icebreaking and ice Resistance Characteristics of Icebreakers" Trans. SNAME Vol. 78.
15. Michel, B.(1970)－"Ice pressure on engineering structures" Cold Region
16. Michel, B., Lafleur, P.(1971)－"Ice management at marine terminal, Hershel Island" Report to Department of Public Works, Canada.
17. Milano, V.R.(1961)－"Notes on the Preliminary Design of Icebreakers" MS thesis, Webb Institute of Naval Architecture.
18. Milano, V.R.(1973)－"Ship Resistance to Continuous Motion in Ice" Trans. SNAME, Vol. 81.
19. Mookhoek, A.D., Bielstein, W.T.(1971)－"Problems associated with the design of an arctic marine transportation system" Offshore technology Conference ; Houston, Texas.
20. Nevel, D.E.(1961)－"The Narrow Infinite Wedge on an Elastic Foundation" Research Report Number 79, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, July 1961.
21. Runeberg, R.(1900)－"Steamers for Winter Navigation and Icebreaking" Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. CSL, Session 1899～1900, Part II.
22. Shimansky, J.A.(1938)－"Conditional Standards of Ice Qualities of a Ship" (translation) Arctic Institute of the Chief Administrator of the Northern Sea Route, Vol. 130, Leningrad.
23. Vinogradov, I.V.(1946)－"A Scaling System for Vessels in Ice" SNAME Ice Tech. Symposium, Montreal, April 9～11, 1975, 26p.
24. Vance, G.P.(1975)－"A Scaling System for Vessels in Ice" SNAME Ice Tech. Symposium, Montreal, April 9～11, 1975, 26p.
25. Watson, A.(1959)－"The design and building of icebreakers" Trans. of the Institute of Marine Engineers, Vol. 71, No. 2, p. 37～65.
26. White, R.M.(1965)－"Dynamically Developed Forces at the Bow of an Icebreaker" Ph.D. Dissertation, M.I.T.

부록1

이 선형은 Waas씨와 Thyssen Nordseewerke 조선소가 공동으로 개발한 새로운 Thyssen/Waas 쇄빙선이다. 이 선형의 개념적인 특성은 그림 A에서 보는 바와 같이 아주 새로운 모양의 선도이다. 이는 소련 쇄빙선이 Mudyug"호를 개조한 것으로 이 배의 제일 넓은 양 선측외판부위를 선체 중심선과 나란히 각이진 칼날과 같은 모서리를 가지고 있다. 이 양쪽 모서리로 이 배의 최대폭 너비와 같은 크기로 얼음판에 수로를 만들며 항진하는데 이는 전단 응력이 낮은 얼음의 물리적 특성을 이용한 것으로서, 잘려진 얼음 팬널은 선수부에서 밑으로 눌려 들어가면서 배의 압력에 의하여 꺽여 잘라진다. 이 큰 부빙(浮氷)은 선수로부터 밑쪽으로 더 빠져 들어가 선저의 중앙부날에 의하여 양분된 후 유체 동력학적 힘을 받아 수로 양측 깨어지지 않은 얼음판 밑으로 밀려난다. 그림 B는 그 쇄빙 과정과 원리를 나타내 주고 있다.



그림A. 소련 쇄빙선 "Mudyug"호를 개조한 선체의 모양



그림B. Thyssen/Wass의 쇄빙과정과 그 원리