



# 국외 빙해수조에서의 빙시험법 소개

조성락, 이춘주(한국해양연구원 해양시스템안전연구소),  
Michael Lau, 왕정용(Institute for Ocean Technology, Canada)

## 1. 서론

빙해역에서의 여러 빙상환경을 모의적으로 재현해서 빙해용 선박의 쇄빙성능이나 해양구조물에 작용하는 빙하중 시험을 가능하게 하는 시설이 빙해수조(ice towing tank or ice model basin)이다. 이러한 빙해수조들은 대부분 극지에서의 자원 개발과 수송을 위해 건설되었기 때문에 주로 러시아, 캐나다, 핀란드, 독일 등 고위도에 위치한 대형 빙해수조에서 현재 상업용으로 시험을 수행하고 있다.

우리나라는 현재 세계 선박 건조량의 43%를 차지하고 있는 선진 조선대국으로서, 향후에도 조선분야의 선두 지위를 계속 유지하고 선진 조선기술을 개발하기 위해 현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(Maritime and Ocean Engineering Research Institute)에 국내 최초의 빙해수조를 건설하고 있다. 이러한 배경에서 본 원고에서는 ITTC(International Towing Tank Conference)를 비롯한 국외의 빙해수조에서 사용되고 있는 여러 모형시험법을 소개하고 향후 MOERI 빙해수조가 완공되어 표준화된 모형시험을 수행하기 위한 제반 사항을 검토하고자 한다.

## 2. 빙해수조용 모형빙의 종류

빙해수조에서는 실제 해빙을 모사한 모형빙(model ice)을 만들어 모형선이 모형빙을 깨고 추진 가능한

지 시험한다. 실제 선박을 모형선으로 축소하여 시험하기 때문에 모형빙 또한 실제 해빙의 여러 물리적 특성을 상사법칙에 근거하여 적절하게 생성해 주어야 한다.

### 2.1 기둥형 모형빙 (Columnar Model Ice)

#### 2.1.1 러시아

1955년 세계 최초로 AARI에 빙해수조가 건설되었다. 처음 사용한 모형빙은 3%의 염화나트륨을 용해한 염수빙이었다.  $-0.1 \sim -0.2^{\circ}\text{C}$ 의 수조수가 차가운 공기( $-10 \sim -14^{\circ}\text{C}$ )를 만나 고운 얼음 결정층을 생성하면 수조수 표면으로부터 기둥형 모형빙으로 성장하게 된다.

이러한 염수에서 생성된 모형빙의 경우 축척비가 커질 경우 ( $\lambda > 30$ ), Froude 법칙과 Cauchy 상사법칙을 동시에 만족시키기 어렵다. 염수 모형빙을 사용한 경험에 따르면 축척비가 30을 넘는 경우 Cauchy 법칙의 부적절함으로 인해  $E/\sigma$ 값이 2,000 이하로 내려가게 되므로 모형시험에서 적절한 축척 범위는 약 15-20으로 제한된다.

#### 2.1.2 독일

독일의 HSVA 역시 1971년 염수빙을 이용하면서 빙해수조 운용이 시작되었다. Schwarz(1975)는  $E/\sigma$  값을 증가시키기 위해 약 0.67%의 소금물을 이용

해 모형빙을 생성하고 일정 두께의 얼음이 얼게 되면 수조의 온도를 올려주어 모형빙의 강도를 낮추는 방법을 사용하였다. 또한 미세 공기방울을 불어주고 생성된 빙판의 하부 얼음을 긁어주어 모형빙의 밀도를 개선하였다. 빙해수조에서는 소금 대신 요소(urea) 성분 혹은 에틸렌글리콜(EG)/지방산(AD)/설탕(S) 성분을 선호하는데 그 이유는  $E/\sigma$  비율을 개선하고 부식성을 줄일 수 있기 때문이다.

### 2.1.3 캐나다

1986년 Timco는 세 가지의 다른 첨가물, 즉 EG/AD/S가 용해된 용액으로부터 생성된 새로운 형태의 모형빙을 소개했다. 실제 해빙과 EG/AD/S 모형빙 간의 기계적 성질이 잘 일치한다는 것을 보여주었으나, 얼음의 밀도와 파괴인성(fracture toughness)이 실제 해빙보다 높게 측정되었다. 모형빙은 단일층으로 고온 입자들로 구성되며 기동형으로 성장하게 된다.

Spencer and Timco(1990)는 공기방울을 이용하여 모형빙의 밀도를 실제 해빙의 밀도로 낮춘 EG/AD/S-CD 모형빙을 개발하여 시험에 이용하고 있다. 새 모형빙은 기존의 EG/AD/S 모형빙보다 밀도 조절이 용이하며 가시성에 개선을 가져왔으며, 높은  $E/\sigma$  값, 낮은 파괴인성 값의 장점을 가지고 있다.

### 2.1.4 미국

미국에서는 1979년 US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory(CRREL)에서 빙해수조를 건설하였고 1% 요소 모형빙을 만들어 사용하였다. 또한 공기방울을 사용하여 수조 용액의 균일성을 유지시켜 주었다. CRREL에서는 축척비 40 까지 시험 가능하며  $E/\sigma$  값은 500 ~1500 까지 가능하다. 또한 캐나다의 EG/AD/S 모형빙을 시험하여 용액 성분 중 설탕이 박테리아 문제를 야기할 수 있기 때문에 수조에 여과장치가 필요하다고 발표하였다.

### 2.1.5 일본

1981년에 IHI 조선소가 처음으로 빙해수조를 건설한 후 MHI(Nagasaki Research & Development Center), NKK(Tsu Research Laboratory), NMRI(National Maritime Research Institute) 등에서 연달아 소형의 빙해수조를 건설하였다. MHI의 경우 요소빙, IHI는 글리콜, NMRI는 프로필렌글리콜을 사용하였고 NKK의 경우 입자형의 요소빙을 사용하였다.

## 2.2 입자형 모형빙 (Granular Model Ice)

핀란드의 AARC에서는 처음에 러시아에서 사용한 모형빙과 유사한 모형빙을 사용하였으나, 1983년부터는 수조의 낮은 온도에서 물을 뿌리면서 얼음층을 적층시키는 방법으로 FG 모형빙을 빠르게 준비할 수 있었다. 또한 뿌리는 물의 염분을 조절하여 실제 해빙의 성질과 더욱 비슷한 FGX 모형빙을 사용하고 있다.

한편 핀란드의 HUT에서는 0.5% 에탄올을 사용하여 GE 모형빙이라 불리는 입자형 모형빙을 만들었으며, 그 외에 일본의 NKK 및 러시아의 KSRI 등에서도 입자형 모형빙을 사용하고 있다. 입자형 모형빙은 압축강도가 낮고 굽힘강도보다 높은 파괴인성 특성을 가지는 단점이 있다.

## 3. 빙상조건에 따른 모형시험법

빙해수조에서의 시험은 일반 수조의 모형시험법과 같이 크게 저항, 추진, 조종성능 시험으로 나누어 시험을 하고 실제 빙상환경에 따라 평탄빙(level ice), brash ice, 빙맥지대(ridge field)를 구현한다. 또한 선박의 쇄빙저항 성분을 계산하기 위해 미리 빙판이 깨어질 형태로 미리 잘라 놓은 조건인 pre-sawn ice 상태를 만들어 시험한다. 여기서는 각 빙상조건의 준비 및 모형시험법에 대해 설명한다.

### 3.1 평탄빙 (Level Ice)



평탄빙 조건은 모든 빙시험의 기본이 되는 것으로 주로 1년생빙의 상태를 모사하여 두께가 균일하게 언 경우를 말한다. 평탄빙의 경우 모형빙의 두께, 굽힘강도, 압축강도, 밀도, 탄성계수 등을 실제 해빙의 물리적 특성을 적절하게 상사하여 모형빙을 생성하는 것이 중요하다. 또한 평탄빙의 시험 전후에 두께 및 물리적 특성을 수시로 계측하여 빙시험 분석에 반영해야 한다.

### 3.2 Brash Ice

Brash ice의 경우는 각 수조마다 불리는 이름은 다르지만, 쇠빙선이 깨고 간 빙수로를 내빙선박이 지나는 경우를 모사해 만든 빙상조건이다. 다른 이름으로는 broken channel, rubble field, wide or narrow channel 등으로 불리며, FSICR(Finnish/Swedish Ice Class Rule)에 따라 1A, 1B, 1C 등급으로 나누어져 빙편을 헤치고 항해가 가능해야 한다. 규정된 얼음 두께는 아래와 같다.

$$H_{av} = H_M + 14.0 \times 10^3 \times B$$

단,  $H_M = 1\text{m}$  (1A),  $0.8\text{m}$  (1B),  $0.6\text{m}$  (1C) 이며

$B_{max} = 30\text{m}$  이다.

일반적으로 빙수로는 모형 폭의 2배로 준비하여 시험하고, 좁은 빙수로의 경우 모형 폭의 1.2배인 상태에서 시험한다.

### 3.3 Ridge Field

빙맥의 경우 1년생빙이 조류를 따라 이동하면서 압축되거나 전단되면서 매우 큰 두께로 빙편이 엉켜 응결된 상태를 말한다. 이런 빙맥이 해빙 결빙을 반복하면서 점점 두께가 커지면 다년생빙으로 성장하게 된다. 재응결 되지 않은 빙맥의 경우, 쇠빙저항보다는 적은 추력으로 추진이 가능하기 때문에 필요시 빙맥군의 빙상환경을 모사해 시험한다. 실험에서의 빙맥은 Fig. 1과 같이 수면 위의 삼

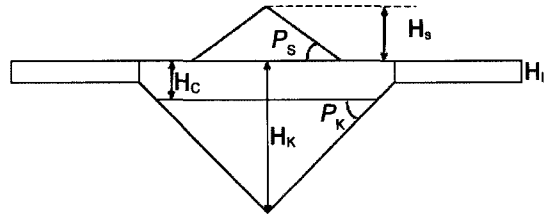


Fig. 1 빙맥의 단면 형상 및 6가지 특성치

각형 모양의 얼음덩이(sail)와 수면 아래의 더 큰 삼각형 모양의 부분(keel)으로 나뉘어져 있다고 간략하게 생각할 수 있다. 빙맥의 특성은 그림과 같이 6개의 주요한 특성치로 나타낼 수 있으며, 일반적으로 sail과 keel의 각도는  $25^\circ$ 로 취급한다.

### 3.4 Pre-sawn Ice

Pre-sawn ice는 쇠빙선박이 얼음을 깨고 추진할 때, 순수한 쇠빙저항 성분을 구하고자 얼음을 깨어지는 형태로 미리 잘라놓은 상태를 말한다. 평탄빙에서의 전체 저항에서 pre-sawn ice 상태에서의 저항을 빼게 되면 쇠빙선이 얼음을 깨는 순수한 쇠빙저항이 계산된다.

$$R_{BR} = R_T - R_{PS}$$

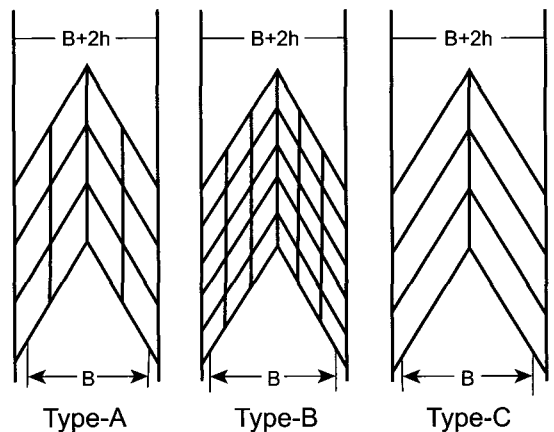


Fig. 2 Pre-sawn ice의 여러 형태

Pre-sawn ice를 준비하는 형상은 일반적으로 Fig. 2와 같이 평탄빙을 톱으로 미리 잘라 놓는다. Pre-sawn ice의 채널 폭은 그림에서와 같이 모형선의 폭 B와 모형빙의 두께 h에 의해 계산되며, 각 수조마다  $n(=2\sim 4)$ 의 크기를 조절하여 사용한다.

$$B_{ch} = B + n \times h$$

#### 4. 모형시험에서의 상사법칙

모형빙에서의 선박과 해양구조물 시험에서 모형빙의 축척과 상호작용 과정들은 현장에서의 실제 거동을 해석하는 데 중요한 역할을 한다. 빙 모형시험의 상사법칙에 대해 White and Vance(1967), Atkins and Caddell(1974), Michel(1978) 등이 발표하였고, 1984년 Timco는 빙 모형시험에서 물리적 모델을 크게 굽힘파괴와 압축파괴 2개로 구분하여 상사법칙의 해석적인 근거를 발표하였다.

상사법칙을 만족시키기 위해서는 기하학적, 운동학적 및 동역학적 상사법칙을 모두 만족시켜야 한다. 그러나 대부분의 유체역학에서, Froude수와 Reynolds수는 동시에 만족시킬 수 없다. 대부분의 빙 모형시험 즉, 저항시험에서는 굽힘파괴가 주된 파괴형상이며 중력과 관성력의 적절한 축척이 중요하게 된다. Froude수는 중력과 관성력의 비로서 다음과 같이 표시된다.

$$F_h = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

실제적으로 모형빙은 Froude 및 Cauchy 법칙에 따라 축척비가 결정된다. Cauchy 법칙은 얼음의 변형 즉, 빙판의 굽힘강도 및 특성길이 등 모형빙의 탄성 거동을 고려할 때 필요하다. Cauchy수는 관성력과 탄성력의 비로서, 아래와 같이 표현된다.

$$C_n = \frac{\rho V^2}{E}$$

파괴인성에 관해서 Atkins(1975)는 Ice number( $I_n$ )

를 소개하였는데 이는 얼음의 전단하중과 관성력의 비로 구성되며 얼음의 상사법칙이 만족시켜야 할 요소라고 발표하였다. Ice number는 Cauchy수와 파괴인성의 함수로 표시되어진다.

$$I_n = C_n^2 \left[ \frac{EL}{R} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Table 1 Froude 및 Cauchy 상사법칙에 의한 축척비

Variable	Scaling
ice thickness	$[h]_p = \lambda[h]_M$
ice compressive strength	$[\sigma_c]_p = \lambda[\sigma_c]_M$
ice flexural strength	$[\sigma_f]_p = \lambda[\sigma_f]_M$
ice shear strength	$[\sigma_s]_p = \lambda[\sigma_s]_M$
ice elastic modulus	$[E]_p = \lambda[E]_M$
velocity	$[V]_p = \lambda^{1/2}[V]_M$
time	$[T]_p = \lambda^{1/2}[T]_M$
force	$[F]_p = \lambda^3[F]_M$
mass	$[M]_p = \lambda^3[M]_M$
ice critical stress intensity factor	$[K_{Ic}]_p = \lambda^{3/2}[K_{Ic}]_M$
acceleration	$[a]_p = [a]_M$
ratio of elastic modulus and flexural strength	$[E/\sigma_f]_p = [E/\sigma_f]_M$
friction coefficient	$[\mu]_p = [\mu]_M$
ice density	$[\rho]_p = [\rho]_M$
Poisson ratio	$[\nu]_p = [\nu]_M$

파괴인성의 상사는 몇몇 종류의 시험에서는 중요할 수도 있지만 파괴인성의 축척에 관해서 여러 문제가 제기될 수 있는데, 그것은 실측에서의 파괴인성치가 없다는 점이며 모형시험에서의 파괴인성치 계측에 관해 표준화된 시험법 역시 구축되어 있지 않기 때문에 상사법칙에 적용하기 어렵다. 일반적으로 만약 모형빙의 파괴인성치가 너무 높으면 Froude 법칙에 따른 모형시험보다 그 속도가 다소 높다는 것이 알려져 있다. Table 1에는 Froude 법



칙과 Cauchy 상사법칙에 따른 빙 모형 시험의 축척비에 관하여 정리하였다.

## 5. 빙 모형시험 결과의 해석

빙 모형시험의 주요 평가항목으로는 빙저항, 빙진, 빙 조종성능 시험이 있는데 여기서는 각 시험법과 그 결과의 분석에 대하여 설명한다.

### 5.1 빙저항 시험

얼음 속에서의 선박의 이동은 쇄빙저항, 압침저항, 빙제거 저항, 개수로 저항 등 물리적으로 다른 프로세스로 구분할 수 있다. 선박에 걸리는 전체 저항 또한 위에서 가정한 것과 같이 여러 성분으로 표현할 수 있으며 각각의 성분은 빙판의 파괴에 대한 이론이나 실험 데이터를 통해 유도할 수 있다. 예를 들어, 빙판의 강도는 쇄빙 시 가장 중요한 얼음의 특성이지만, 얼음의 밀도와 마찰은 압침저항과 빙제거 현상에 연관된 특성이다. 이러한 관점에서 Kashteljan(1968)은 빙저항을 4개의 성분으로 나누어 나타내었다.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

여기서  $R$ 은 전체 저항,  $R_1$ 은 쇄빙저항,  $R_2$ 는 빙편의 부력과 마찰에 의한 저항,  $R_3$ 는 깨어진 얼음 상태를 통과하면서 빙편을 밀어내는 저항,  $R_4$ 는 개수로 저항을 뜻하고, 각 요소들은 아래와 같다.

$$\begin{pmatrix} R_1 = k_1 B \sigma_p h \mu_0 \\ R_2 = k_2 \gamma_\lambda B h^2 \mu_0 \\ R_3 = k_3 B^x h v^y \frac{1}{\eta_2} \end{pmatrix}$$

여기서  $B$ 는 쇄빙선박의 폭,  $\sigma_p$ 는 굽힘 강도,  $h$ 는 빙두께,  $\mu_0$ 는 효율 요소 (1+수평강도 vs. 수직강도의 비),  $\gamma_\lambda$ 는 얼음의 비중,  $\eta_2$ 는 빙절단계수 (전체 횡단면의 힘 vs. 종단면 힘의 비),  $v$ 는 선박의 속도이며  $x, y, k_1, k_2, k_3$ 는 시험에 의한 계수이다.

Lewis와 Edwards(1970)도 빙저항을 다음과 같이 나타내었다.

$$R_m = C_0 \sigma h^2 + C_1 \rho g h^2 + C_2 \rho B h v^2$$

여기서  $R_m$ 은 개수로 저항이 없을 때의 총 저항,  $\sigma$ 는 빙 굽힘강도,  $h$ 는 빙두께,  $\rho$ 는 빙밀도,  $B$ 는 선박의 폭,  $g$ 는 중력가속도,  $C_0, C_1, C_2$ 는 시험계수이다.

Enkvist(1972)는 연속쇄빙이 가능한 비슷한 빙저항식으로 다음과 같이 발표하였다.

$$R_i = R_\sigma + R_s + R_v$$

여기서  $R_i$ 는 총 빙저항,  $R_\sigma$ 는 쇄빙저항,  $R_s$ 는 빙편의 압침에 의한 저항,  $R_v$ 는 속도에 의한 영향을 받는 저항이며, 아래와 같이 관련된 빙저항 성분을 표시하였다.

$$\begin{pmatrix} R_\sigma = C_c B h \sigma \\ R_s = C_s B h T \rho_d g \\ R_v = C_v B h \rho_i V^2 \end{pmatrix}$$

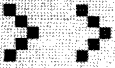
여기서  $\rho_d$ 는 물과 얼음의 밀도차,  $C_c, C_s, C_v$ 는 시험계수이다.

Poznjak과 Ionov(1981)는 쇄빙저항, 압침저항, 속도저항의 3가지 성분에 마찰력을 고려한 새로운 빙저항식을 발표하였다.

$$R_T = R_\sigma + R_{\sigma'} + R_s + R_f + R_v + R_\mu$$

이는 다른 쇄빙 프로세스에서 서로 다른 마찰 요소를 사용한다는 점에서 유용하다.

Colbourne and Lever(1992)는 각 저항 성분의 분석법을 발표하였는데, 평탄빙 시험, pre-sawn ice 시험, 개수로 시험을 통한 각 성분들을 구분하였다. 이러한 해석법은 다른 여러 수조에도 사용되고 있다. 전체 저항은 쇄빙저항, 빙제거 저항, 점성저항으로



나누고, 각 성분의 무차원 계수는 아래와 같다.

$$\left( \begin{array}{l} C_B = \frac{R_B}{\rho_i B h V^2} = \Phi_B(S_N) \\ C_C = \frac{F_C}{\rho_i B h V^2} = \Phi_C(F_r) \\ C_V = \frac{R_V}{0.5 \rho_w S V^2} = \Phi_V(Re) \end{array} \right)$$

여기서  $S_N$ 은 strength number로  $\left( \frac{V}{\sqrt{\sigma/\rho_i}} \right)$  이며,  $F_r$ 은 Froude수,  $Re$ 는 Reynolds수이다.

실제로 점성저항은 ITTC 방법이나 개수로 시험을 통해 계산될 수 있으며, 다른 2개의 항목은 평탄빙 시험과 pre-sawn ice 시험을 통해 결정될 수 있다.

Riska et al.(1994)는 Lewis and Edwards 및 Enkvist 방법과 비슷한 저항시험 데이터 분석법을 발표하였다.

$$R = R_B + R_S + R_V + R_{rw}$$

여기서  $R_B$ 는 쇄빙저항,  $R_S$ 는 압침저항,  $R_V$ 는 속도와 관련된 저항,  $R_{rw}$ 는 빙 중에서 유체역학적인 저항성분을 뜻한다.

빙시험 도중 얼음의 재료특성 변화로 인해 시험 결과를 보정하기 위해 아래와 같이 빙두께와 강도에 대해 수정할 수 있다.

$$R_I = \left( R_B \left( \frac{\sigma_f(Target)}{\sigma_f(Measured)} \right) + R_S + R_V \right) \left( \frac{h_I(Target)}{h_I(Measured)} \right)^x$$

여기서  $x$ 는 선형에 따른 계수로 대략 1.5 ~ 2 이며, 실선에서의 총 빙저항은  $R_{IP} = \lambda^3 R_{IM}$  또는  $R_{IP} = C_I \lambda^3 R_{IM}$ 에서 구할 수 있다.

### 5.1.1 ITTC 표준 시험법

ITTC에서는 1996년 표준 빙시험법을 발표하였다. 이 시험법은 Riska가 제안한 내용과 거의 비슷했지만 ITTC에서는 압침저항을 포함하지 않아 쇄빙저항과 속도에 관련된 저항만으로 나누어 분석되었다. 쇄빙저항은 pre-sawn ice 시험으로 구분할 수 있으며 pre-sawn ice의 시험 채널 폭을 규정하였다. 평탄빙은 적어도 모형선 길이의 2배 이상은 준비되어야 하며 두께와 빙강도를 보정한 식은 아래와 같다.

$$R_I = \left( R_{V,meas} + R_{B,meas} \frac{\sigma_f}{\sigma_{f,meas}} \right) \left( \frac{H_I}{H_{I,meas}} \right)^x$$

두께 보정을 위한 간단한 방법도 제시되었다.

$$R_I \approx H_I^{1.5}$$

그리고 두께와 강도를 위한 간단한 식도 제안되었다.

$$R_I = a(v)\sigma_f H_I^2 + b(v)\rho H_I$$

### 5.1.2 IOT 시험법

Spencer and Jones(2001)는 많은 시험을 바탕으로 빙저항에 대한 새로운 해석법을 제시하였는데 그 식은 아래와 같다.

$$R_T = R_{BR} + R_C + R_B + R_{OW}$$

쇄빙저항은 평탄빙 시험과 pre-sawn ice 시험을 통해 얻을 수 있다. 또한 pre-sawn ice 시험에는 개수로 저항 시험에서 했던 유체역학적인 힘을 포함하고 있기 때문에 아래와 같이 표현이 가능하다.

$$R_C = R_B + R_{PS} - R_{OW}$$

부력에 의한 저항은 pre-sawn ice에서 아주 낮은 속도(0.02m/s)로 시험을 하면 계산이 가능하다. 즉, 얼음의 회전, 순환, 가속과 같은 속도에 관련된 부분을 제거하여 얻을 수 있다. 각각 저항 성분들에 대한 무차원 계수는 아래와 같다.



$$C_{BR} = \frac{R_{BR}}{\rho_i B h V_m}$$

$$C_C = \frac{R_C}{\rho_i B h V_m}$$

$$C_B = \frac{R_B}{\rho_i g B h T_m}$$

또한 추가적으로 2개의 무차원수를 정의하였다.

$$S_N = \frac{V_M}{\sqrt{\frac{\sigma_f h_i}{\rho_i B}}}$$

$$F_h = \frac{V_M}{\sqrt{g h_i}}$$

쇄빙저항과 빙제거 저항은 각각  $S_N$ 과  $F_h$ 에 연관되어 있다.

## 5.2 빙 추진시험

빙 추진시험은 소요 추진마력, 추진효율, 부가물 및 추진기와 얼음과의 상호작용, 최적 선미형상을 알기 위해 필요하다. 추진시험은 자유 항주 추진시험 또는 예인 추진시험으로 수행될 수 있다. 자유 항주 추진시험의 경우 프로펠러의 속도를 고정하고 모형선의 속도를 측정하게 된다. 예인 추진시험의 경우 예인전차의 일정 속도에서 2-3개의 다른 프로펠러 속도를 사용하여 저항점을 찾게 된다.

추진성능은 저항과 추진시험 분석을 통해 파악할 수 있다. 일반적으로 저항시험은 프로펠러와 얼음 사이의 물리적 상호작용으로 인해 큰 변화를 보인다. 만약 프로펠러와 얼음 사이의 상호작용이 있다면 측정된 힘과 토크를 변경해야 하며, 특정한 빙상 상태에서 웨이크 분포와 일정한 힘 분포를 찾아내야 한다.

22차 ITTC에서는 빙 추진시험에 대해 추가적인 보완이 필요하다고 발표하였고 여기서는 IOT의 빙

추진시험에 대해서만 기술한다.

### 5.2.1 IOT 추진시험

Molyneux(1989)는 빙 추진시험을 위해 과부하 시험기술을 소개하였다. 이 방법은 개수로에서 과부하를 이용하여 빙 중에서의 유체역학적인 토크를 추정하게 된다. 프로펠러와 얼음 상호간의 작용에 의해 증가되는 토크를 규정하기 위해서도 필요하다. 추진성능에 얼음이 미치는 영향은  $h/D$ 가 작기 때문에 무시되었다 ( $h$  = 빙두께,  $D$  = 프로펠러 직경). 유체역학과 빙하중이 개별적으로 고려되었기 때문에 추진성능은 개수로 시험으로부터 구할 수 있으며 빙하중 시험에서 계산된다. 또한 프로펠러가 쉽게 탈부착 된다면 빙저항 시험 중에 수행될 수 있다. 프로펠러와 얼음과의 상호작용이 없을 시에는 아래와 같이 소요마력을 결정할 수 있다.

- 주어진 속도에서 예인력과 토크를 맞추기 위해 개수로에서 과부하 시험을 수행한다.
- a 조건과 주어진 빙 두께, 빙 강도, 속도 등으로부터 빙저항을 구한다.
- a의 결과와 b의 저항 값에서 rps 값을 구한다.
- 토크를 측정한다.
- 소요마력을 계산한다 ( $P_o = 2\pi nQ$ ).

단  $n$  = rps,  $Q$  = 개수로에서의 토크 값이다.

만약 프로펠러와 얼음과의 간섭이 발생한다면 다음의 단계를 더해 수행한다.

- 주어진 속도와 빙 중에서의 토크( $Q$ )와 개수로에서의 토크( $Q$ )의 비를  $e$  에서 구한  $P_o$ 에 곱한다. 빙 중에서의 추진력( $T$ )와 개수로에서의 추진력( $T$ )의 비 역시 개수로의 값과 비교하기 위해 계산되어야 한다.

## 5.3 빙 조종성능 시험



빙 조종성능 시험은 선형과 조종장치(타, 추진기) 등의 선회능력을 평가하기 위해 수행된다. 일반적으로 빙 조종성능 시험은 turning circle, star maneuvers, breaking channel 시험을 말한다. ITTC에서는 PMM(Planar Motion Mechanism)시험은 포함하지 않았으며 22차 ITTC에서는 수정이 필요하다는 의견을 제시하였다. 따라서 여기서는 두 가지 조종성능 시험에 대해 소개한다.

빙 조건에서 선박의 조종성능을 평가하기 위해서는 자유항주 시험과 계류 모델 시험이 있다. 개수로에서 두 시험은 거의 비슷하나, 빙 중에서는 얼음의 성질과 얼음의 깨지는 다양한 변화로 인해 수행하기가 어렵다. Shi(2002)는 빙수조에서 조종성능 시험을 위한 분석법을 정리한 바 있다.

### 5.3.1 자유항주 시험

이 방법으로 실선 오차를 가시적으로 확인할 수 있으며, 정확하게 유체의 영향과 필요한 힘을 계산할 수 있다. 이 방법은 얼음과 모형선 사이의 간섭으로 인해 계류시험보다 더 힘들 수도 있다. 때로는 계산된 특정 속도에서 자항점이 충분하지 않을 수도 있다. IOT에서는 Molyneux(1998)가 R-class와 M/V class 2가지 쇄빙선 모형을 가지고 자유항주 시험을 수행하였고 시험 절차는 아래와 같다.

- a. 프로펠러 회전수를 맞춘다.
- b. 모형선을 정속까지 가속한다.
- c. 원하는 각도로 타 각도를 바꾼다.
- d. 프로펠러 회전수, 타 각도, yaw rate, 프로펠러의 추진력과 토크, 모델의 속도와 위치를 측정한다.

### 5.3.2 계류 모델 시험

대부분의 빙해수조는 장수조이고 폭이 자유항주 시험을 하기에 충분하지 않기 때문에 PMM이나 회전 암을 이용하여 계류 모델 시험을 많이 수행하고

있다. 이 시험으로 대부분의 운동방정식 계수들을 결정할 수 있으며 모형선이 예인될 때 사인파의 yawing과 swaying을 주게 된다.

약 1:20 축척과 1.2 m/s의 속도에서는 수조의 크기가 제한적이기 때문에, full turning 대신 full steady state arc 시험을 수행한다. 선회궤적(arc)은 정적 상태이며 arc의 길이는 모형선의 최소 2배 이상이다. 가장자리의 영향을 피하기 위해 연속적인 arc 사이의 길이를 특성길이의 3배 정도로 정해야 한다. 이 시험으로 constant radius arc, pure sway and yaw 등을 얻을 수 있다.

## 6. 결론

이상 국외의 주요 빙해수조에서 사용하고 있는 모형빙 생성기술, ITTC에서 권장하고 있는 빙시험법 및 해석법에 기초한 빙시험 절차에 대해 살펴보았다. 정확한 상사법칙에 의한 완벽한 모형빙을 생성할 수는 없지만, 실제 해빙의 상태에 가능한 가까운 모형빙을 만들 수 있는 기술에 대해 지속적인 연구가 필요하다. 그리고 북극 및 남극 지역의 각 해역의 독특한 환경에서의 빙 특성이 고려되어야 한다.

또한, 아직까지 빙저항 시험 분야에 치중되었던 해석법 연구도 추진기와 얼음과의 간섭 문제, 조종성능 문제, 타와 같은 여러 부가물의 영향 등에 대해서도 많은 연구가 필요하다.

조만간 MOERI에 국내 유일의 빙해수조가 완공될 예정이다. 최첨단 빙해수조에 대한 시설 확보 뿐 아니라, 모형빙 생성 기술과 빙수조 시험법 및 시험결과와 해석 등을 체계적으로 정립하고, 조기에 국외 다른 수조와의 기술경쟁력을 확보하기 위해 국내의 산학연이 함께 노력해야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Atkins, A. (1975), "Icebreaking Modeling", Journal of Ship Research, Vol.19, pp.40-43.
2. Enkvist, E. and Makinen, S. (1984), "A Fine-grain Model-ice", Proc. of the IAHR Ice Symposium, Hamburg, Germany.





3. ITTC, (1999), The Specialist Committee on Ice: Final Report and Recommendations to the 22<sup>nd</sup> ITTC. Proc. of the 22nd International Towing Tank Conference", Seoul and Shanghai, Korea and China.
4. Lau, M., Wang, J. and Lee, C.J. (2007), "Review of Ice Modeling Methodology", Proc. of POAC Conference, Dalian, China.
5. Riska, K., Jalonen, R., Veitch, B., Nortala -Hoikkanen and A., Wilkman, G. (1994), "Assessment of Ice Model Testing Techniques", Proc. of ICETECH '94, Calgary, Canada.
6. Spencer, D.S. and Timco, G.W. (1990), "CD Model Ice: A Process to Produce Correct Density(CD) Model Ice", Proc. of 10th IAHR Symposium on Ice, Vol.2, pp.744-755.
7. Timco, G. (1979), "The Mechanical and Morphological Properties of Doped Ice", Proc. of the 5th POAC Conference, Trondheim, Norway. ↴