

## 극지 해양구조물에서의 빙하중 산정방법

황 철 성\*

### 1. 개요

부빙의 파괴양상은 좌굴에 의한 파괴(Buckling Failure), 휨에 의한 파괴(Bending Failure) 및 파쇄파괴(Crushing Failure)로 나누어 볼 수 있는데, 앞의 두가지 파괴양상은 얼음의 두께가 20cm-30cm에서만 나타나므로, 설계를 위한 하중을 산정하는데 있어서는 별 의미가 없다. 단, 휨파괴는 경사진 해양구조물에서 발생할 수 있으며 이 경우는 Ralston에 의한 식에 의해 방하중 계산이 가능하다.

본 기사에서는 원통형 해양구조물에 작용하는 빙하중 산정방법을 소개하고자 하며 이때의 부빙은 파쇄파괴의 양상을 나타낸다.

이러한 파쇄파괴양상을 나타내는 부빙에 대한 빙하중의 산정방법은 극한응력(Limit Stress Load)에 의한 방법, 극한하중(Limit Force Load)에 의한 방법 및 에너지 평형법(Energy Balanced Method)등이 제안되어 왔다. 이 중 에너지 평형법은 압력-면적법(Pressure Area Method)과 소성 극한이론에 의한 Korzhavin식을 이용한 방법이 있는데 현재로는 후자가 타당한 방법으로 보여진다.

그러나, 이러한 방법들은 구조물과 지반의 유연도를 고려하지 못하고, 지진발생 시 구조물을 감싸고 있는 얼음에 의해 주어지는 빙하중의 크기를

계산할 수 없는 한계를 지니고 있다. 따라서, 구조물-부빙-지반의 상호작용을 고려할 수 있는 동적 모델이 필요하며 이에 대한 예로는 필자가 제안한 모델등이 있다.

### 2. 극한응력에 의한 방법

극한응력에 의한 방법은 부빙의 무한한 견인력(Driving Force)를 근간으로 하고 있다. 즉, 얼음은 무한한 외력에 의해 움직이기 때문에 구조물에 얼음이 완전히 관입된다고 가정하고, 이때의 작용력을 다음과 같이 산정한다.

$$F = 2 \cdot f_e \cdot R_s \cdot t \quad (1)$$

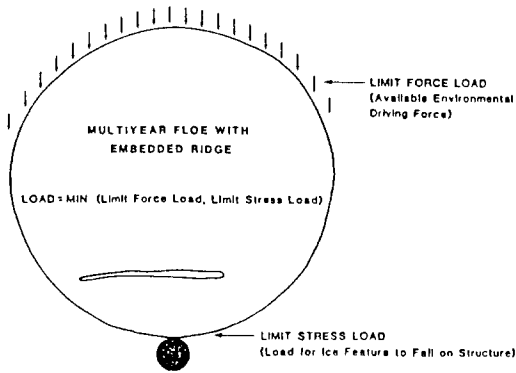
$f_e$  : 얼음의 유효 응력

$R_s$  : 구조물의 반경

$t$  : 얼음의 두께

비교적 폭이 좁은 구조물에 1년생 얼음이 충돌할 때는 극한응력을 발생시키기 충분한 Wind Drag이 존재하기 때문에 이방법이 사용가능하다. 그러나, 극지의 해양구조물은 점차 깊은 수심에 설치되고 있고 구조물의 직경과 얼음의 두께도 이에 따라 점점 두꺼워지고 있는 추세이므로 이 방법에 의한 빙하중의 크기는 너무 크게 결정되므로 부빙이 완전히 관입되는지의 여부를 먼저 조사해야 한다.

\* 정회원, 경원대학교 토목공학과 부교수



Limited driving force and limit stress load.

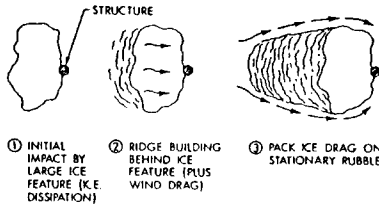


그림 1. Stages of limit force interaction (Croasdale, 1981)

### 3. 극한하중에 의한 방법

겨울에는 여름보다 얼음의 속도가 느리기 때문에 구조물 주위에 관입하다가 정지한 부빙에 견인력이 가해짐으로써 이 힘이 구조물에 전달되는 경우가 많다. 이때의 빙하중의 크기는 다음과 같이 표현된다.

$$F = F_w + F_c + F_i \quad (2)$$

$F_w$  : 바람에 의한 견인력 (Wind Drag Force)

$F_c$  : 조류에 의한 견인력 (Current Drag Force)

$F_i$  : 부빙군에 의한 하중 (Pack Ice Force)

$$F_w = C_{10} \cdot \rho_a \cdot V_w^2 \cdot A_f$$

$$F_c = 0.5 \cdot C_c \cdot \rho_w \cdot V_c^2 \cdot A_f$$

$$F_i = W \cdot D$$

$C_{10}$  : Wind-Ice Surface Drag Coefficient

$C_c$  : Wind-Ice Drag Coefficient

$V_w$  : 바람의 속도

$V_c$  : 조류의 속도

$\rho_a$  : 공기의 밀도

$\rho_w$  : 물의 밀도

$A_f$  : 부빙의 표면적

$W$  : 부빙의 단위 폭당  $F_i$

$D$  : 부빙의 작용 폭

위식에서 가장 불확실한 항은 구조물에 고착된 부빙 폭의 영향을 받는  $F_i$ 이다.  $F_i$ 값에 대한 연구 결과는 표 1에 정리되어 있다.

표 1. 부빙군에 의한 하중

Models	Values (N/m)
Large Scale Ice	$10^4 - 10^5$
Cover Models	$(0.4 - 1.0) \times 10^5$
Free Floating	$0.4 \times 10^5$
Ridge Building	$0.4 \times 10^5$
Models	$\langle w / \text{Friction} \rangle$
Grounded Pile-Ups and Rubble Field	$(1.5 - 7.0) \times 10^5$
Models	$\langle 2\text{m thick} \rangle$

### 4. 에너지 평형법

폭이 큰 구조물에 두꺼운 얼음이 충돌하는 경우에는 얼음이 완전히 관입되기 전에 부빙의 운동에너지(또는 운동량)는 전부 소멸되어 버릴 것이다. 이러한 상태에서의 최대 빙하중은 부빙의 접촉면적에 비례한다. 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$\int_0^{X_m} F_x dx = \frac{1}{2} MV^2 + \int_0^{X_m} P_e dx \quad (3)$$

$F_x$  : 관입깊이가  $x$ 일 때의 빙하중의 크기

$P_e$  : 관입 중에 부빙에 작용하는 외부하중

$V$  : 부빙의 속도

$X_m$  : 부빙의 최대 관입깊이

윗식의 적용방법으로 압력-면적법 (Pressure Area Method)과 소성극한이론에 의한 Korzhavin식을 이용하는 방법이 있다.

#### 4.1 압력-면적법

식(3)에서 관입 중 부빙에 작용하는 외력이 없다고 가정하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{C}{2} MV^2 = \int_0^{x_m} F_x dx \quad (4)$$

$$F_x = f_e \cdot A_x$$

$f_e$  : 접촉면에서의 유효압력

$A_x$  : 관입깊이(x)에 따른 구조물과 부빙의 접촉면적

이때,  $A_x$ 는 구조물과 부빙의 기하학적 형상에 따라 구할 수 있고,  $f_e$ 는 실험적 결과 (그림 2)로부터 얻을 수 있다. 또, C는 가상질량계수(Virtual Mass Coefficient)로서 충돌시에 부빙과 함께 감소되는 물의 영향을 고려한 계수이며, 다음과 같이 제안된다.

$$C = 1 + [(0.9t) / (2W_d - 0.9t)] \quad (5)$$

$W_d$  : 수심

식(4)를 구분구적법으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{C}{2} MV^2 = \sum F_x \Delta x \quad (6)$$

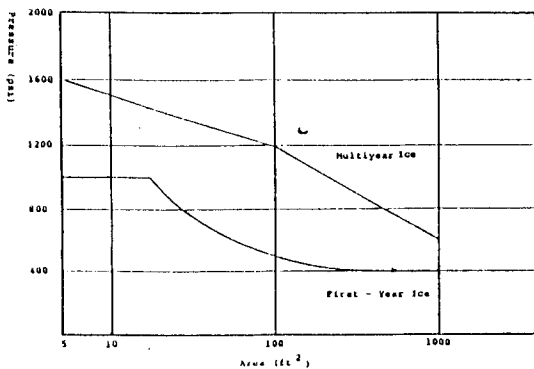


그림 2. Pressure-contact area curve(Bruen et al., 1982)

빙하중을 구하는 과정은 식(6)에서  $\Delta x$ 만큼 증가시키면서 이에 따른  $A_x$ 를 구하고, 이때의 유효압력을 압력-면적 곡선(그림 2)로부터 구하여 각 단계에서 감소되는 에너지량을 계산한다. 이렇게 구한 에너지량의 합이 식(6)의 좌변의 초기 운동 에너지 값과 같을 때 부빙은 정지하고, 이때 각 단계에서의 유효압력과 접촉면적을 곱한 값의 최대 값이 구조물에 작용하는 최대하중의 크기가 된다. 그런데, 그림 2는 실험적으로 구한 값이므로 일정 규모이상의 큰 구조물을 해석하는 데는 어려움이 있다.

#### 4.2 소성극한이론에 의한 방법

이 방법은 식(6)에  $F_x$ 를 구할 때 실험에 의한 값을 이용하지 않고, 소성극한이론에 의한 극한응력으로 정하는 방법이다. 이때,  $F_x$ 를 결정하는 식은 Korzhavin의 식을 이용하며, 이식의 계수 중 관입계수(Indentation Factor)를 소성이론에 의해 산출한다.

일정형의 얼음조각이 구조물의 수직면에 부딪쳐 파쇄파괴가 일어나는 경우 적용할 수 있는 전형적인 식이 Korzhavin이 제안한 다음의 식이다.

$$F = f_e \cdot D \cdot t$$

$$f_e = C_1 \cdot m \cdot k \cdot f_c$$

$C_1$  = 관입계수(Indentation Factor)

$m$  : 형상계수(Shape Factor)

$k$  : 접촉계수(Contact Factor)

$f_c$  : 얼음의 일축압축강도 (Unconfined Compressive Strength)

여기서, D는 관입깊이에 따라 연속적으로 변하는 값이고,  $C_1$ 는 구조물 전면 얼음의 다축응력 상태를 고려하는 계수이다. m은 구조물의 형상에 따른 영향을 고려하는 계수이며, k는 얼음과 구조물이 완전접촉이 이루어지지 않음으로써 발생하는 하중의 감소량을 고려하는 계수이다.

얼음의 일축압축강도는 변형률 속도(Strain Rate)에 따라 큰 차이를 나타내며 대표적인 실험 결과가 그림 3이다.

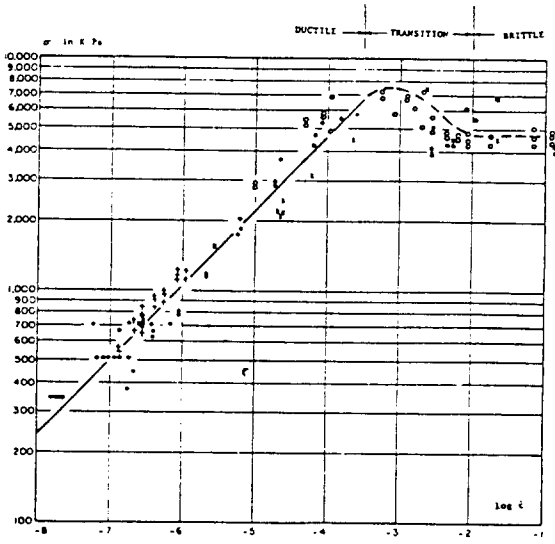


그림 3. Compressive strength of S2 freshwater ice at -10°C

이용하는 항복조건식과 파괴이론에 따라  $C_1$ 의 값이 다양하게 주장되고 있고, 변형률 속도도 여러가지로 정의되고 있다. 이들 값 중 현재 가장 보편 타당하다고 판단되는 값들만을 정리하면 다음과 같다.

#### 변형률 속도

$$\dot{\epsilon} = V/2D$$

#### 일축압축강도

$$f_c = f_0 (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{0.32} \quad : \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_0$$

$$f_0 (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)^{-S} \quad : \dot{\epsilon}_0 \leq \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_b$$

$$f_b \quad : \dot{\epsilon}_b \leq \dot{\epsilon}$$

$f_0$  :  $\dot{\epsilon}_0$  (Transition)에서의 일축압축강도

$f_b$  :  $\dot{\epsilon}_b$  (Brittle)에서의 일축압축강도

<일반적으로 0.6 $f_0$ 를 사용함>

$$s : \log(f_b/f_0) / \log(\dot{\epsilon}_b / \dot{\epsilon}_0)$$

#### 관입계수

$$C_1 = 3.0 + 0.80 / (D/t) : \leq 4.5 \text{ (연성영역)}$$

$$C_1 = 1.2 + 0.32 / (D/t) : \leq 3.0 \text{ (변이영역, 취성영역)}$$

#### 형상계수

$$m = 1.0 \text{ (평면 구조물)}$$

$$m = 0.9 \text{ (원형 구조물)}$$

#### 접촉계수

$$k = 1.0 \text{ (좁은 구조물)}$$

$$k = 0.6 \text{ (넓은 구조물)}$$

#### 연속 파쇄의 경우

연속적으로 파쇄가 진행되는 경우는 최대하중의 크기에 다음을 곱하여 사용한다.

$$r = 1.0 \text{ (변이영역, 취성영역)}$$

$$r = 1.0 - 0.6 [(\log \dot{\epsilon} + 6) / (\log \dot{\epsilon}_0 + 6)] \leq 1.0$$

(연성영역)

### 5. 결론

이제까지 열거한 빙하중의 산정 방법을 비교해 볼 때, 구조물의 규모가 크고 다년생 얼음이 설계 하중으로 작용하는 경우 에너지 평형 방법 중 소성 극한이론을 근거로 한 Korzhavin식을 이용하는 것이 가장 타당하리라 판단된다.

극한 응력에 의한 방법은 구조물의 직경이 작은 경우에 완전 관입이 되는 것을 가정하기 때문에 직경이 큰 구조물에서는 빙하중의 크기가 과대 평가될 가능성이 크며, 극한 하중에 의한 방법은 Ridge Building Force의 부정확성 때문에 쉽게 적용하기 곤란하여 이에 대한 통계적 자료가 크게 요구된다.

지반과 구조물의 유연성을 고려한 동적 모델에 의한 방법은 참고문헌을 소개하는 것으로 대신한다.

#### 4. 참고 문헌

1. Croasdale, K.R., "Ice forces on large marine structures", IAHR Ice Symposium, Quebec, Canada, 1981.
2. Schwarz, J. and W.S. Weeks, "Engineering properties of sea ice", Journal of Glaciology, Vol. 19, No. 81, 1977.
3. Korzhavin, K.N., "Action of ice on engineering structures", U.S. Army CRREL, CRREL Translation TL 260, 1962.
4. Ralston, T.D., "An analysis of ice sheet indentation", Proceedings, IAHR International symposium on Ice Problems Lulea, Sweden, 1978.
5. Iyer, S.H., "Existing ice codes and suggest criteria", Proceedings, IAHR International Symposium on Ice Problems, Lulea, Sweden, Part I, 1978.
6. Cammaert, A.B. and G.B. Tsinker, "Impact of large ice floes and icebergs on marine structures", Proceedings, POAC, Quebec, Canada, 1981.
7. Hwang, C.S. and S.P. Chang, "Dynamic analysis of arctic offshore structures : Impact ice load and seismic load", Proceedings, International seminar on the construction technology for cold region, Seoul, Korea, 1990.