

## 극지대 구조물 형태에 따른 빙력고찰

조 철 희\*

(96년 1월 11일 접수)

### Level Ice Loads on Various Arctic Structures

Chul-Hei Jo\*

**Key Words** : 돌출 구조물(Wedge Structure), 다 돌출 구조물(Multi-Wedge Structure), 빙벽 (Ice Annulus)

#### Abstract

Ice loads can be determined by many factors like ice properties and dimension, velocity and type of structures. The magnitude of ice load varies with the failure mode which can be predicted by failure maps if the aspect ratio and strain rate are known. To reduce the ice force, various types of structure have been investigated and it is now known that the indenter shape plays an important role in reducing ice load on Arctic offshore structures. The conical and wedge structures are good applied examples in the Arctic region. In this study, ice forces on single wedge indentors are investigated for crushing failure mode. The ice loads on wedged indentors are compared with those on cylindrical structures. Also the concept of "ice annulus" is introduced to verify the ice loads to multi and single wedge structures.

#### 서 론

극지대 해양구조물에 작용하는 빙력을 최소화하기 위해서는 빙판의 운동 에너지를 어떻게 효과적으로 분산시키는가에 달려있다. 빙판의 운동 에너지를 분산시키기 위해 여러 가지 형태의 해양구조물이 연구되어 왔고 빙판과 접촉하는 부분(indentor) 형상에 대한 실험도 많이 진행되어 왔다.

구조물에 미치는 빙력은 구조물의 형상, 빙판의

특성 및 주의 환경에 따라 달라지고, 그 파괴 형태를 추정할 수 있으면 그 빙력 또한 예측할 수 있다. 빙력의 크기는 빙판의 파괴형태와 밀접한 관계를 갖음으로 빙력을 최소화할 수 있는 파괴형태를 찾기 위해 여러 가지 접촉 형태가 응용되었다. 구조물의 접촉 모양은 원통형, 부분 원통형, 아치형 그리고 돌출형으로 구분될 수 있고 원추형을 갖기도 한다. 원추형 구조물은 빙판을 굽힘(bending) 및 전단(shear)으로 파괴하여 빙력을 분산시

\* 정희원, 현대중공업 해양사업본부

키는 효과를 가진다.

이 논문에서는 원통 형상과 돌출 형태의 구조물에 작용하는 빙력을 조사 비교하였고 돌출 구조물일 경우 얼마나 효과적으로 빙력을 감소시킬 수 있는지 조사하였다. 물론 구조물의 형태가 파괴 모드에도 영향을 미치나, 본 연구에서는 이런 영향을 고려하지 않고 분쇄형태로 빙판이 파괴되는 경우로 한정하였고, 구조물 돌출각과 빙판 접근각이 빙력에 미치는 효과에 대해 조사하였다.

### 형태계수

빙력 계산 시 구조물 형태에 따른 효과를 보상해 주기 위해 형태계수,  $m$ 이 사용된다. 분쇄형태로 빙판이 파괴될 시 형태계수  $m$ 은 다음과 같고 식에서  $\alpha$ 는 돌출각을 나타낸다.<sup>3)</sup>

평면형:  $m = 1.0$

원통형:  $m = 0.9$

돌출형:  $m = 0.85(\sin 2\alpha)^{0.5}$ ,  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$  (1)

Michel (1978)은 분산 형태 (splitting mode)로 빙판이 파괴될 시 형태 계수값을 정의하였으나 주로 크기가 작은 유빙이나 구조물의 접촉 모양이 아

주 날카로운 경우에 적용할 수 있다.

그림 1은 돌출 구조물에 적용할 수 있는 형태계수를 그래프로 나타내었고 분산파괴 및 분쇄파괴 모드일 때 사용되는 수치를 나타내었다. 그림 1에 표시된 맨 위 선은 분쇄모드에 적용될 수 있고, 이 경우 형태계수의 최대치를 갖는다고 정의될 수 있고, 그 이유는 분쇄모드일 경우 어떤 다른 파괴 형태보다도 구조물에 작용하는 빙력이 크기 때문이다. 같은 그림에서 맨 아래 선은 분산파괴 모드일 경우 적용되는 형태계수이고 이 수치를 형태계수의 최소치라 정의할 수 있다. 그 이유는 분산 파괴시 주로 영향력을 받는 빙판 인장 (tensile)강도는 압축 강도(compressive strength)보다 훨씬 작은 값을 갖기 때문이다.

실제로 한가지 형태로 빙판이 파괴되는 경우는 드물고 거의 모든 빙판은 혼합 모드로 파괴된다. 그러므로 형태계수는 분쇄파괴 모드와 분산파괴 모드 경계 안에 놓여져 있다고 정의 할 수 있다. 만약 70%의 빙판 에너지가 분쇄형태로 소산되고 30%의 빙판이 분산파괴 형태로 파괴되었다면 돌출 구조물의 형태계수는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$m (\text{형태계수}) = 0.75(\sin \alpha)^{0.65} \quad (2)$$

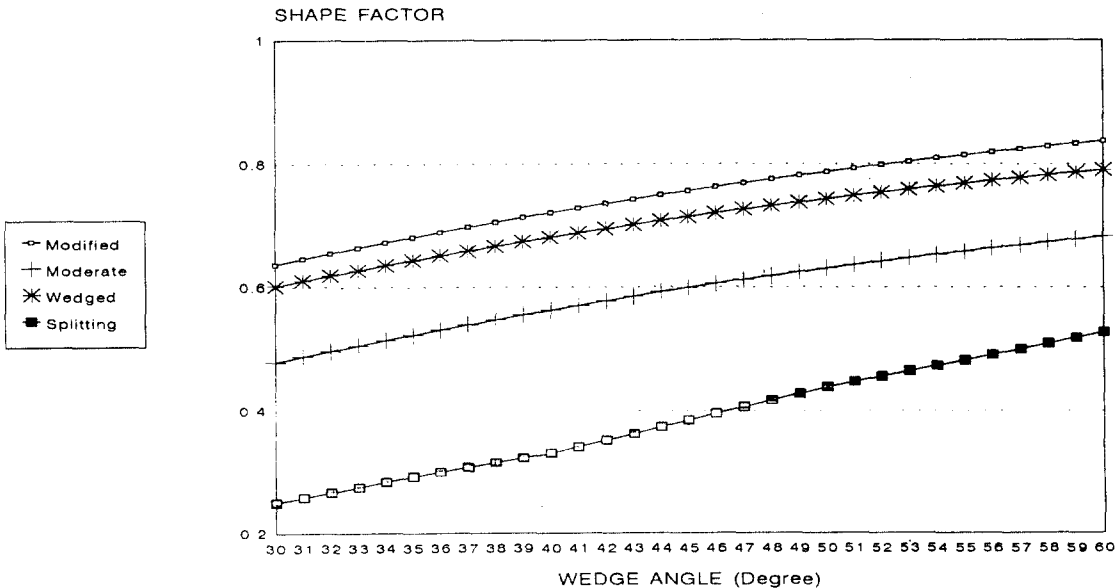


Fig. 1 Shape factor chart

물론 위 공식은 돌출각이 60도에서 120도 범위 일 경우에 해당된다.

빙판 파괴모드는 strain rate ( $V/2D$ )과 aspect ratio ( $D/h$ )관계를 알면 그림 2 및 그림 3으로부터 추정이 가능하다. 그림 2는 Timco<sup>6)</sup>가 발표한 논

문의 일부이고, 로그 스케일로 그려진 그림 3은 Blanchet et al<sup>1)</sup>에 의해 소개되었다. 빙판 파괴 형태를 정확히 추정할 수 있으면 그 형태에 따른 공식을 적용하여 빙력 예측이 가능하다.

### 돌출 구조물에 작용하는 빙력

돌출 구조물은 빙력을 줄이기 위한 하나의 구조물 형태로 이용될 수 있다. 비록 같은 파괴 모드를 갖는다 할지라도 돌출 구조물과 원통형 구조물에 작용하는 빙력은 동일하지 않고, 상황에 따라서는 돌출 형상이 원통형보다 빙력을 많이 줄일 수 있다. 원통 구조물에 작용하는 빙력은 빙판 접근 각에 따라 달라진다. 이 논문에서 돌출 각은  $\alpha$ , 빙판 접근 각은  $\beta$  로 나타내었고, 연구에 이용한 모델은 그림 4에 나타나 있는 것과 같다.

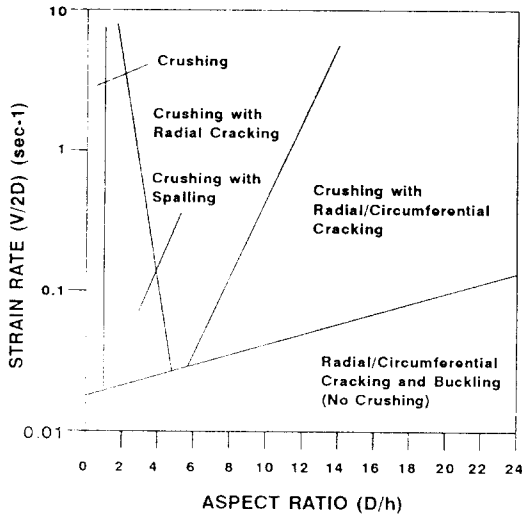


Fig. 2 ICE failure mode map(after Timco, 1986)

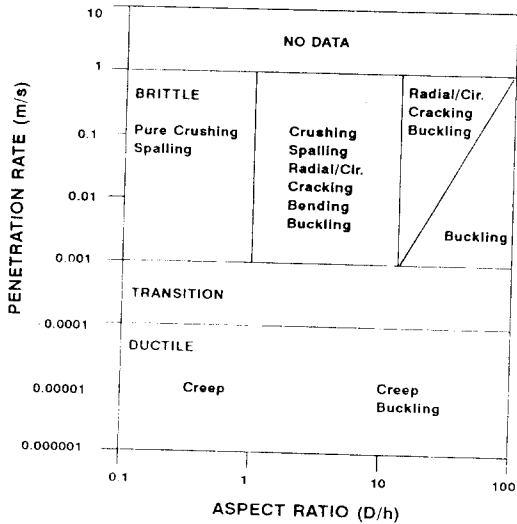


Fig. 3 ICE failure map in a log scale(after Blanchet et. al., 1988)

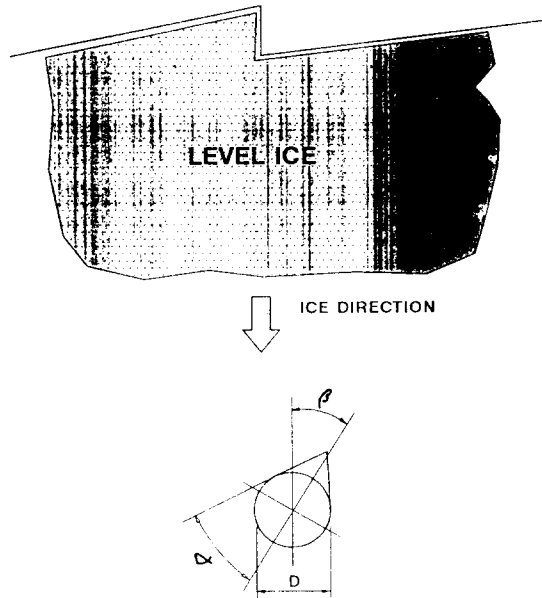


Fig. 4 schematic diagram of wedged indenter model

돌출 구조물일 경우, 빙판 접근방향이 변화함에 따라 빙력이 달라진다. 그 이유는 돌출 구조물과 빙판의 접촉 면적은 접근각에 따라 달라지고 이로 인한 형태계수도 같지 않기 때문이다. 일정한 접

근 각  $\beta$  로 빙판이 돌출 구조물에 접근할 때 돌출 각  $\alpha$ 가 적을수록 빙판 에너지를 효과적으로 분산시킨다는 것을 추정할 수 있다.

이를 증명하기 위해 수치 모델링을 수행하여 돌출 각 및 빙판 접근각을 변화시키며 빙력을 비교하였다. 이 모델을 통하여 가장 효과적인 구조물의 돌출각과 그 최대각을 추정할 수 있었다. 컴퓨터 모델에 사용된 strain rate는  $10^{-1}$  (sec<sup>-1</sup>), aspect ratio는 1.8을 적용하였다. 형태계수는 돌출 각이 90도가 될 때 원통형 구조물 형태계수인 0.9를 적용하여 다음과 같은 공식을 도출하였다.

$$m \text{ (형태계수)} = 0.9(\sin \alpha)^{0.5} \quad (3)$$

컴퓨터 수치 모델에 사용된 관입 (Indentation) 계수는 Croasdale et al.<sup>2)</sup>이 발표한 여러 공식 중에 거친 접촉 (rough contact)일 경우를 적용하였다. 아래 공식에서 D는 구조물과 빙판의 접촉거리, h는 빙판두께이다.

$$I = 1.45 + \frac{0.35}{\left(\frac{D}{h}\right)} \quad (4)$$

빙판의 파괴 강도는 Nadreau & Michel<sup>3)</sup>이 소개한 “해수 빙판 파괴 강도 도표”(sea ice crushing strength curve)를 사용하였고 strain rate은  $10^{-1}$  (sec<sup>-1</sup>)를 적용하였다. 접촉계수, k,는 분쇄 모드의 최대치라 간주되는 0.45를 적용하였다.

수치 모델에서 돌출각을 일정하게 유지한 후 빙판 접근방향을 변화시키며 빙력을 계산하였다. 빙력에 직접적으로 영향을 미치는 요소는 접촉면적이고, 비록 돌출 구조물이 형상에 기인한 특성으로 작은 형태계수를 갖는다 하더라도 접촉면적이 늘어나면서 그 장점을 상실한다. 그러므로 어느 접근각 이상에 도달할 경우 원통형보다도 더 큰 빙력이 작용한다는 것을 알 수 있었다. 이런 현상은 구조물의 크기에 관계없이 공통적으로 발생한다. 원통형 구조물에 작용하는 빙력은 다음 식을 이용하였다.

$$F = I k m D h \sigma_c \quad (5)$$

위식에서  $\sigma_c$ 는 빙판의 압축강도이다.

### 수치 모델 (Numerical Model) 결과

수치 모델에 사용된 원통 구조물은 지름이 2 meter, 5 meter 그리고 10 meter로 3가지 종류였다. 돌출구조물일 경우 돌출 각은 30도에서 60까지 변화시켰다. 모델에 의해 산출된 빙력은 그림 5, 6, 7에 잘 나타나 있듯이 돌출 구조물에 작용하는 빙력은 원통형 구조물보다 대체로 작은 값을 가지며, 특정 빙판 접근각 이상에 도달하면 그 값이 같거나 더 커짐을 보여준다.

돌출 구조물의 옆면이 빙판 접근각과 직각을 이룰 경우 약 반 이상의 면적이 평면에 해당하므로 원통형 구조물보다 더 큰 빙력이 작용하는 것을 알 수 있고 이 때는 돌출형이 원통형보다 장점이 없다. 표 1은 돌출각에 따른 최대 빙판 접근각을 요약 정리하였다.

Table. 1. maximum ice attack angle( $\beta$ ) for wedged indenter

	D=2m	D=5m	D=10m
Wedge Angle( $2\alpha$ ) (Degree)	h=1.11(m) V=4.0(m/s)	h=2.78(m) V=1.0(m/s)	h=5.56(m) V=2.0(m/s)
60	32	32	32
70	36	36	36
80	40	40	40
90	42	44	42
100	36	38	38
110	34	32	32
120	28	28	28

극지대 구조물 형태에 따른 빙력고찰

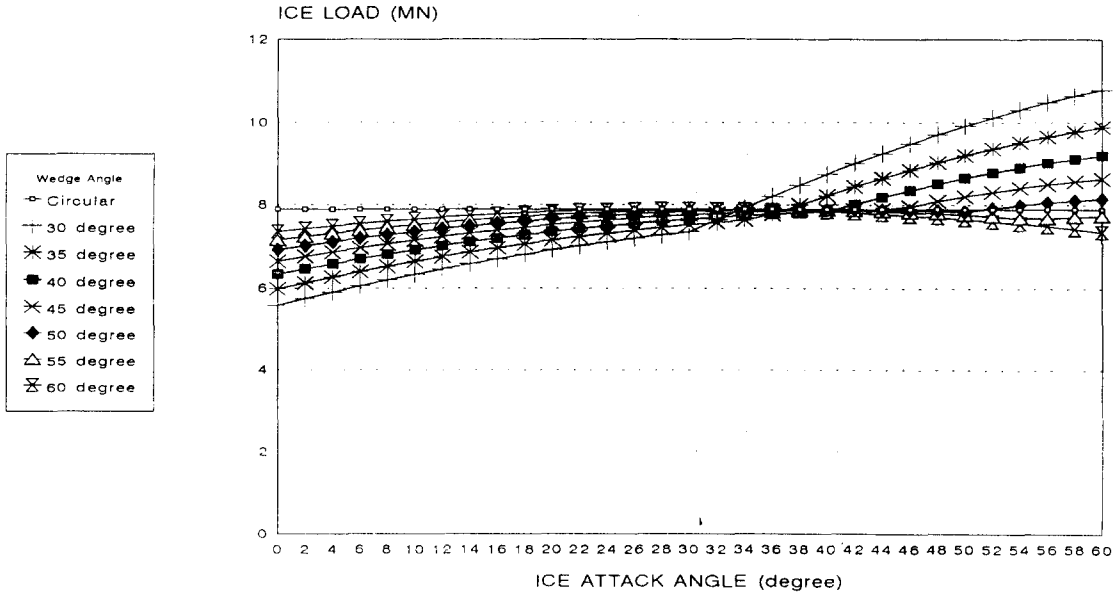


Fig. 5 ICE force vs. ICE attack angle AS D=2 meter

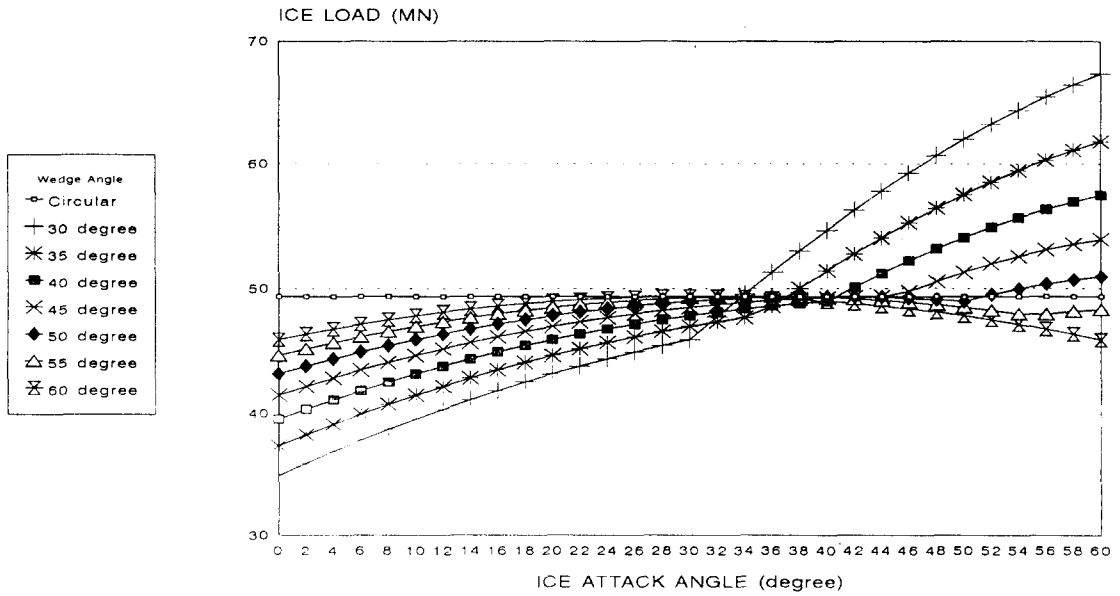


Fig. 6 ICE force vs. ICE attack angle AS D=5 meter

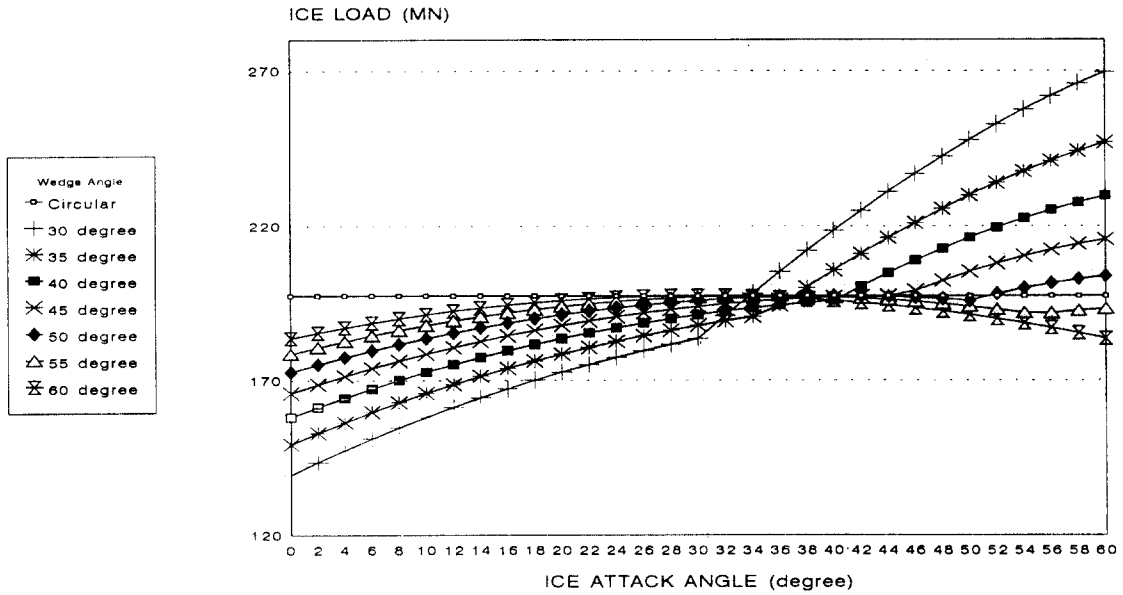


Fig. 7 ICE force vs. ICE attack angle AS D=10 meter

모델결과에서 알 수 있듯이 크러싱 모드로 빙판이 파괴될 시 돌출 구조물에 작용하는 빙력은 원통형 구조물에 작용하는 빙력보다 작고, 더군다나 구조적 특성상 빙판에 많은 균열을 발생시킴으로 분산 모드 (splitting mode)가 형성되어 빙판 에너지를 더욱 효과적으로 분산시킬 수 있다. 물론 이 현상으로 인해 빙력 감소 효과가 있음을 알 수 있다.

### 다 돌출 구조물

빙력을 최소화하기 위해 여러 가지 형태의 구조물이 소개되었고 그 중 하나가 돌출 형상을 갖는 구조물이다. 다 돌출 (multi-wedged) 구조물은 돌출부분이 한 개 이상인 경우라 정의하고 그림 8은 다 돌출구조물을 나타낸다. 아치 (Arch) 구조물은 여러 곡면으로 이루어진 표면을 갖고 있는 구조물을 의미한다. 이런 형상은 빙판이 구조물과 충격시 파괴를 촉진시키고 빙판과 접촉면적을 줄임으로 빙력을 줄일 수 있다.

돌출 구조물과 다 돌출 구조물중 어떤 형태가

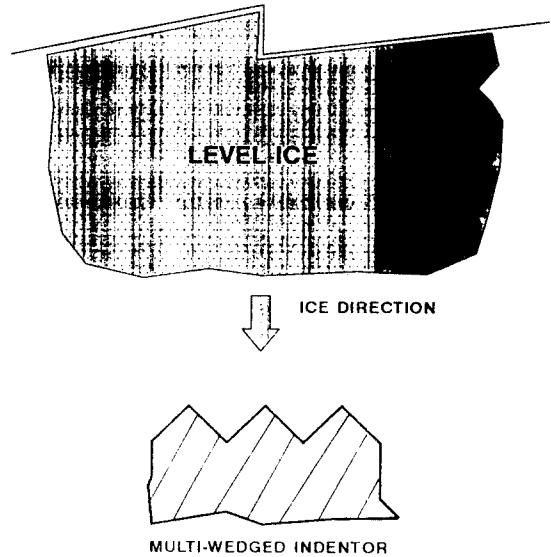


Fig. 8 schematic diagram of multi-wedged structure

더 효과적으로 빙력을 줄일 수 있을까 조사하기 위해 빙벽 (ice annulus)라는 개념을 도입하였다. 이

개념은 빙판이 구조물 접촉면에서 파괴된 후 그 조각들이 빙판과 구조물사이에서 형성되는 층이라 정의할 수 있다. 만약 부서진 조각 크기가 비교적 작다면 스펀지한 표면을 갖는 빙벽이 형성되고 구조물과 접촉면적은 증가할 것이다. 같은 논리로 만약 부서진 조각이 비교적 크다면 빙벽의 형태가 거칠 것이고 이로 인해 구조물과 빙판사이의 접촉면적은 비교적 작아질 것이다. 물론 접촉면적은 빙력에 직접적인 영향을 미치는 요소이기 때문에 주요한 의미를 갖는다.

빙판의 부서진 조각들은 구조물 앞에 정제되고 이때 빙벽이 형성된다. 돌출 구조물은 특성상 부서진 조각들이 돌출부 측면을 따라 미끄러지지만 돌출 구조물 일 경우 부서진 조각들이 돌출부 사이에 갇힘으로 큰 빙벽이 형성된다. 부서지지 않은 빙판은 구조물과 접촉하는 대신, 빙벽과 접촉되므로 이 빙벽이 마치 새로운 구조물과 같은 역할을 하게 된다.

파괴된 빙판에 의해 형성되는 빙벽의 크기는 여러 요소에 의해 결정된다. 물론 이미 언급하였듯

이 같은 환경 조건에서 빙벽의 크기는 다 돌출 구조물일 경우 더 크다고 할 수 있다. 빙벽의 크기가 커지면 접촉면적이 증가함으로 빙력이 커짐을 예측할 수 있다. 그림 9는 돌출 구조물 및 다 돌출 구조물에 작용하는 빙력을 비교한 것이고, Wishahy<sup>7)</sup>에 의해 발표된 논문을 재 고찰한 것이다. 그림 9에 나타나 있듯이 다 돌출 구조물에 더 큰 빙력이 작용하는 것을 알 수 있고, 이 현상은 이미 언급한 빙벽개념을 도입하면 잘 설명될 수 있다.

### 결론

빙하 및 빙판 영향권 지역에 설치되는 단순 구조물일 경우, 돌출구조물을 사용하면 원통형 구조물보다 빙력을 줄일 수 있고, 특히 이런 종류의 구조물은 빙판 접근 각이 크게 변하지 않는 지역에서 더욱 효과적으로 사용될 수 있다. 또한 극지대에 설치되는 등대, 피어 (pier), 교량 (bridge)의 접촉면이 돌출 형태일 경우 더욱 효과적일 것이다. 이 연구를 통해 고찰해본 결과 돌출 구조물은 원통형 구조물보다 30%이상의 빙력을 줄일 수 있다는 것

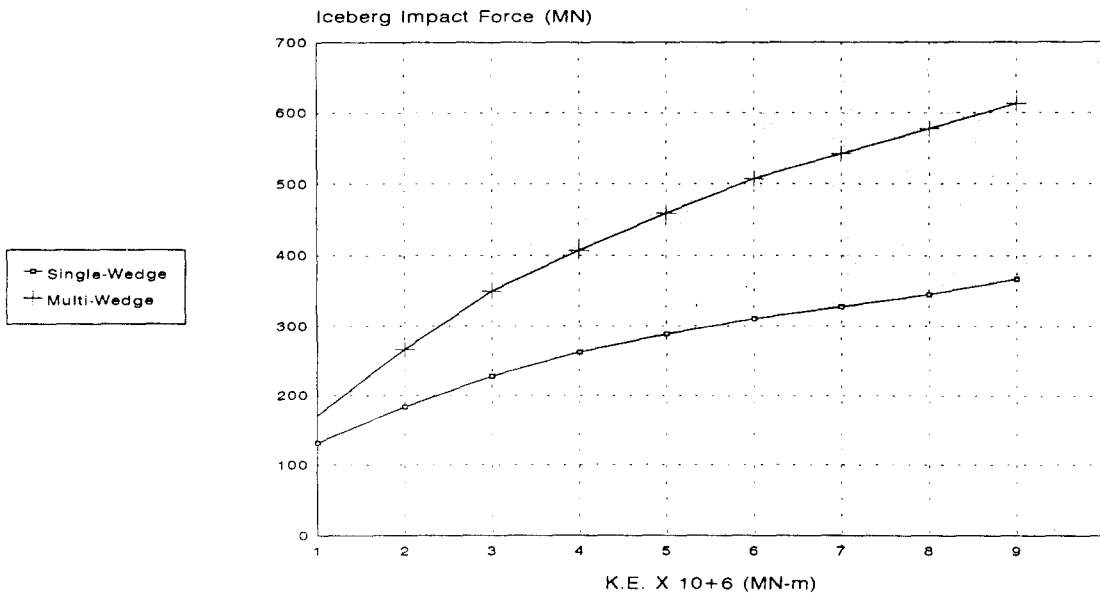


Fig. 9 ICE forces on wedged structures(after wishahy, 1987)

이 입증되었다. 물론 돌출 형태가 갖는 특성을 고려하여 분산 (splitting) 및 혼합 파괴 모드가 촉진된다는 사실을 감안하면 그 이상의 효과도 가질 수 있으리라 판단된다.

다돌출 구조물은 빙판과 초기 접촉 시 빙판 에너지를 분산시키는데 도움이 될 수는 있으나 빙판이 계속적으로 접근할 시 부서진 조각들이 돌출부 사이에 갇혀 빙벽이 형성되 돌출형 또는 원통형 구조물보다도 더 큰 빙력이 작용될 수 있으므로 이 점을 유의하여 설계 및 응용되어야 한다.

### 참 고 문 헌

- 1) Blanchet, D., Churcher, A., Fitzpatrick, J. and Badra P., "An Analysis of Observed Failure Mechanisms for Laboratory, First-Year and Multi-Year Ice", Proc. IAHR Ice Symp., Sapporo, 1988
- 2) Croasdale, K.R., Morgenstern, N.R. and Nuttall, J.B., "Indentation Tests to Investigate Ice Pressures on Vertical Piers", Journal of Glaciology 19(81), 1977
- 3) Korzhavin, K.N., "Action of Ice on Engineering Structures", USSR Acad. Sci. Siberian Branch, CRREL Draft Translation No. 260, Hanover, 1971
- 4) Michel, B., Ice Mechanics, Les Presses de l'universite Laval, Quebec, 1978
- 5) Nadreau, J.P. and Michel, B., "Ice Properties in Relation to Ice Forces", Proc. Second State of the Art IAHR Working Group on Ice Forces, Vol. 4, Hamburg, 1984
- 6) Timco, G.W., "Indentation and Penetration of Edge-Loaded Freshwater Ice Sheets in the Brittle Range", Proc. Int. OMAE Symp., Vol. 4, Tokyo, 1986
- 7) Wishahy, M.A., "Methods for Minimizing Iceberg Impact Loads on Gravity Base Structures Iceberg Bumpers; Conceptual Design", Proc. Int. OMAE Symp., Vol. IV, Houston, 1987