

빙쇄굴 - 해저지반 상호작용 모델 비교연구

최경식* · 이종호

한국해양대학교 해양개발공학부

A Comparative Study of Ice Scour-Seabed Interaction Models

Kyungsik Choi and Jong-Ho Lee

Department of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

Abstract

The interaction of grounded ice ridges with underlying seabed is one of the major considerations in the design of Arctic pipeline systems. Previously several ice scour models were developed by researchers to describe the ice scour-seabed interaction mechanism. In view of possible improvements, a comparative study of those ice scour models is performed and their limitation in modeling is discussed. Simple laboratory tests are carried out and then the shape pattern of deposited soil around the ice model is newly defined. Unlike the rectangular idealization of an ice block, in this modified ice scour model, trapezoidal cross sections are assumed to represent the typical shape of an ice ridge based on the field observation data. With the horizontal and vertical motion of ice model, the ice scour depth and soil reacting forces on seabed are calculated with varying the keel angle of an ice ridge model.

Key Words: Arctic Offshore Pipelines, Ice Ridge, Ice Scour-Seabed Interaction Model, Comparative Study

1. 서론

일반 해저 파이프라인과는 달리 극지 파이프라인의 안전과 관련된 독특한 문제는 수심이 얇은 빙해역에서 흔히 발생하는 빙쇄굴(ice scour)현상인데 만일 해저면에 부설된 파이프라인이 두께 수십 m의 대규모 얼음덩어리에 직접 노출이 되었을 때는 엄청난 빙하중에 의해 파이프라인이 손상을 입거나 파괴되기 때문에 빙해역의 얇은 해안에서는 빙쇄굴에 노출되지 않을 정도로 파이프라인을 깊게 매설해야 한다. 그러나 파이프라인 매설깊이의 증가는 파이프라인의 부설비용을 증가시키기 때문에 이러한 빙쇄굴에 의한 해저면 침투깊이를 정확히 산정할 필요가 있다.

외해서의 얼음은 보통 바람과 조류, 열팽창에 의해 변형되거나 움직이게 되는데 관측자료에 따르면 대략 0.1-0.5

m/s의 이동속도가 일반적이다. 그러나 작은 이동속도에 반해 얼음의 규모가 대단히 크기 때문에 초기운동 상태의 얼음은 상당히 운동에너지를 갖는다. 이렇게 이동하던 얼음이 수심이 얇은 해안으로 다가서면 해저 바닥에 접촉하게 되며 빙쇄굴이 발생하는데 이때 얼음의 운동에 직접적으로 영향을 주는 힘은 조류와 바람 등에 의한 추력(driving force)과 얼음과 접촉하는 해저면의 토질저항력(soil resistance force)이다. 외해에서 일정한 속도로 움직이던 얼음은 빙쇄굴이 발생하는 순간부터 얼음의 전면과 측면에 토압과 마찰력이 작용하여 속도가 감소하다가 초기 운동에너지를 모두 잃어버리면 정지하게 되는데 빙쇄굴의 각 단계에서 고려되어야 할 상호작용의 메커니즘이 모두 다르다(1).

Fig.1은 쇄굴운동 상태에서 얼음에 작용하는 힘들을 나타낸다. 관측자료에 의하면 빙쇄굴 형상은 수백 m 거리에 걸쳐 균일하고 긴 홈을 형성하는 것이 보통이므로 대부분의 빙쇄굴 모델은 얼음의 회전이나 이동방향의 변화를 고려하지 않는다

*Corresponding author : Kyung Sik Choi,
Tel: 051-410-4324, Fax: 051-404-3538,
E-mail: kchoi@hanara.kmaritime.ac.kr

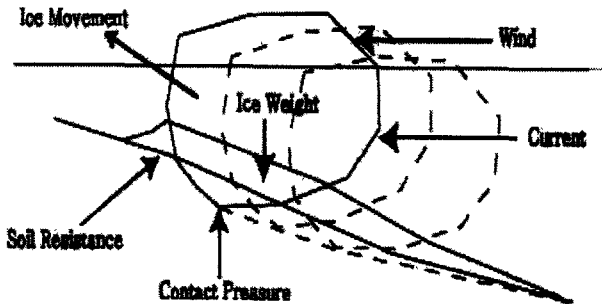


Fig.1 Forces exerted on ice mass during seabed scouring

이러한 빙쇄굴 메커니즘에 대한 해석은 관측자료에 의존하는 통계적인 방법과(2) 실험을 통한 방법(3, 4), 그리고 이론 및 수치적인 방법(5, 6, 7) 등으로 이루어져 왔다. 보통은 이론 및 수치적인 방법을 기본으로 하여 실험이나 관측자료를 통해 그 결과를 확인하려는 방법이 시도되고 있는데, 복잡한 형상을 가진 실제 얼음의 형상을 재현하는 것과 빙쇄굴 발생 해역의 환경변수들을 모두 고려하기엔 실험 모델이 너무 단순하다는 한계가 있다. 또한 실제 빙쇄굴 과정을 이론적으로 명확하게 해석할 수 있는 모델은 개발되어 있지 않은 형편이다. 그러나 이러한 빙쇄굴 모델의 해석결과를 비교하여 간접적으로 빙쇄굴 메커니즘을 이해할 수 있다.

빙쇄굴 깊이를 추정하는 데 사용하는 기존의 방법은 얼음을 직육면체의 단순화된 형태로 가정하여 빙쇄굴이 일어나기 전과 후의 에너지 보존원리를 이용하는 것이 보통이었다. 그러나 실제 극지 빙해역에서 보는 얼음의 형태는 직육면체와는 판이하게 다르기 때문에 좀더 실용적인 결과를 얻기 위해서는 실제에 가까운 빙쇄굴 모델링이 필요하다(8). 본 연구에서는 각 빙쇄굴 모델의 배경과 해석 결과를 비교하여 빙쇄굴 메커니즘에 대한 이해를 도모하였고 또한 각 빙모델들의 적용한계를 분석하여 직육면체 대신 수면하부에 경사각을 갖는 사다리꼴 형태의 새로운 빙모델을 제시하였다. 그리고 빙모델에 의한 실제 쇄굴토의 형상을 파악하기 위하여 수조와 빙모델을 제작하여 간단히 빙쇄굴 실험을 수행하였으며 이를 통하여 수면하부 경사각이 빙쇄굴에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 기존의 빙쇄굴 모델

빙쇄굴 메커니즘에 대하여 연구는 크게 다음의 4가지 빙쇄굴 모델로 구분해서 살펴볼 수 있다. 먼저 Chari(4)는 쇄굴운동 상태를 수평으로 가정하고 빙쇄굴에 대한 토질저항력을 얼음의 전면 토질의 전단파괴로 정의하였다. 한편 Kioka and Saeki(5)(이하 Kioka로 줄임)는 탄성이론인 Rankine의 수동토압이론을 적용하여 경사진 해저면에 대한 토질저항력을 계산하였으며 빙쇄굴 실험을 통해 얻어

진 포물선 형태의 쇄굴곡선을 이용하여 얼음의 수직변위를 고려하였다. 그리고 얼음 전면과 측면부에서의 마찰, 접촉압력의 개념을 도입해 얼음-토질 사이에서 발생하는 메커니즘을 정의하였다. 그러나 실험장치의 제한으로 빙모델을 일정 속도로 움직이는 것만 가능하였다.

Kioka가 사용한 이론을 바탕으로 윤과 최(6)(이하 Yoon이라 줄임)는 쇄굴곡선을 포물선이 아닌 선형으로 취급하여 실험을 통하지 않는 간편 해석을 시도하였고 얼음의 운동 역시 선형적으로 감소한다는 가정으로 에너지 평형을 이용해 빙쇄굴 현상을 해석하였다. 그후 양(7)(이하 Yang이라 부름)은 Yoon이 제안한 선형적인 얼음의 감소와 쇄굴곡선을 이용하되 Coulomb의 토압이론을 사용해 얼음과 토질과의 마찰력을 고려하였으며, 아울러 Chari, Kioka, Yoon 등이 직사각형으로 단순화시킨 빙모델을 사용했던 반면 수면하부에 경사각(keel angle)을 갖는 사다리꼴 빙모델을 사용하여 좀 더 현실적인 빙쇄굴 해석을 시도하였다.

직사각형 빙모델은 그 단순한 형상 때문에 얼음과 토질의 상호작용으로 발생하는 힘의 관계를 수평, 수직방향에 대하여 명확하게 다룰 수 있다는 장점이 있다. 반면 수면하부 경사각을 갖는 빙모델은 북극해 해안에서 자주 볼 수 있는 빙맥(ice ridge)를 형상화한 것으로(8) 실제 빙쇄굴 현상에 가까운 해석을 할 수 있으며 경사각을 변화시킴으로써 다양한 형태의 얼음에 대한 빙쇄굴 현상을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

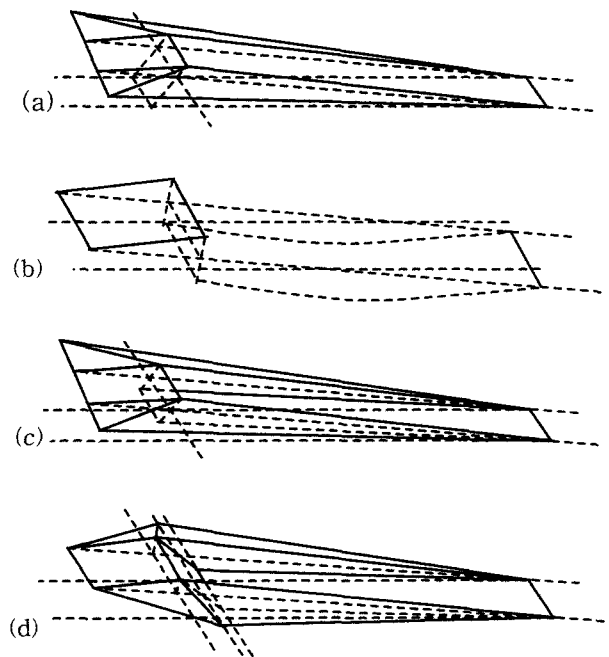


Fig.2 Disposed Soil patterns in the ice scour models

Fig.2는 Chari, Kioka, Yoon, 그리고 Yang의 빙모델에 의해 쇄굴이 일어난 형상을 보여준다. Chari의 모델은 일

정한 폭을 갖는 전면부의 삼각기둥 부분과 직삼각형 바닥을 갖는 측면의 삼각뿔 모양인 쇄굴토 형상을 제시하였으며(Fig.2a), Kioka의 모델은 얼음의 전면부에만 흙이 쌓이는 것으로 가정한 형상을 제시하였다(Fig.2b). Yoon의 모델은 Chari 모델과 같은 형상이지만 수직상승이 고려된 것이고(Fig.2c), Yang의 모델은 복잡하지만 좀더 실제에 가까운 쇄굴토 형상을 그림과 같이 제시하였다(Fig.2d).

빙쇄굴 해석에서는 먼저 초기 정보(얼음의 형상과 크기, 속도, 토질조건 등)를 토대로 빙쇄굴에 의해 파인 토질의 체적과 쌓인 토질 체적이 같다는 기하학적인 평형(토질방정식)을 이용하여 쇄굴거리를 가정하고 가정한 쇄굴길이에 대하여 초기 운동에너지가 완전 소모되는 평형조건(에너지방정식)을 만족하도록 쇄굴길이(scour length)를 결정한다. Table 1에 정리된 토질방정식의 차이를 보면 Chari와 Yoon의 모델은 쇄굴토의 쌓인 거리 l_1 에 대한 4차식으로 표현되며 Yang의 모델은 좀더 복잡한 5차식으로 표현된다. Yoon의 모델은 수평쇄굴하는 Chari의 토질방정식에다 선형으로 가정한 쇄굴곡선 $\zeta(x)$ 만큼의 수직상승을 고려하였다. 이와는 다르게 Kioka는 전면부에 쌓이는 토질의 양만 고려하였다. Yang의 모델은 수면하부 경사각의 변화를 고려하였다.

Table 2에서 에너지방정식의 차이를 살펴보면 Chari는 감속하는 얼음의 수평방향 힘만을 고려하였으며 Kioka는 등속운동을 하는 모델에 토질의 수평, 수직방향의 저항력과 얼음과 토질 사이의 마찰력을 고려하였다. 한편 Yoon과 Yang은 감속하는 얼음의 운동에 대하여 토질의 수평, 수직방향 저항력과 마찰력을 고려하였다. 혼동을 피하기 위하여 Table 1과 Table 2에 사용된 기호와 공식은 각 참고문헌에 표기된 그대로 옮겼다.

여기서는 모든 빙쇄굴 모델에 적용할 수 있는 직삼각형 빙모델을 기준으로 해석결과를 비교하였는데 Kioka의 모델은 등속운동만으로 제한되므로 비교에서 제외하였다. 먼저 Table 1에 제시된 빙쇄굴 모델의 토질방정식을 이용하여 쇄굴거리(scour length)에 대하여 얼음의 전면에 쌓이는 쇄굴토의 수평거리(disposed soil length)와 얼음 주위에 쌓이는 토질의 체적(disposed soil amount)을 Fig.3a와 Fig.3b에 비교하였다. 전면 쇄굴토의 수평거리는 쇄굴거리가 커질수록 증가하지만 쇄굴거리의 증가에 비해 전면 쇄굴토의 수평거리의 증가는 그다지 크지 않은 것을 알 수 있으며 이는 쇄굴이 진행될수록 쇄굴거리에 대하여 측면에 쌓이는 토질의 증가량이 전면 쇄굴토의 증가량보다 상대적으로 크기 때문이다. Yoon의 경우 Chari와 Yang의 모델에 비해 쌓인 토량이 상당히 큰 차이가 있는데 이것은 1차식으로 가정한 쇄굴곡선의 수직상승이 크기 때문이다. 수직상승이 없다면 Yoon의 경우와 Chari의 모델이 일치하는 것을 알 수 있다.

토질저항력은 쇄굴거리가 증가함에 따라 쇄굴이 정지될 때까지 서서히 증가한다. 수평방향의 토질저항력은 Yoon의 모델이 가장 크며 쇄굴진행 증반까지는 Chari 모델이

Yang의 것보다 더 크게 계산되는 것을 알 수 있다. Yoon 모델에서 수평방향 토질저항력이 큰 이유는 전면과 측면에 쌓이는 토질을 모두 고려하였기 때문이며 초반에 Yang의 모델이 수평방향 토질저항력이 작은 이유는 초반에 증가하는 토압이 벽체에서의 마찰력보다 작기 때문이다. 그러나 쇄굴이 진행되면서 측면부의 토질저항력과 전면에 쌓이는 토양이 크게 증가하기 때문에 쇄굴운동 후반부에는 측면 마찰력을 고려하지 않은 Chari의 모델보다 토질저항력이 크게 계산된다 (Fig.4a, Fig.4b).

Table 1 Soil equations

Chari	$\frac{1}{2} l B d = -\frac{l_1^2 k_1^2}{3l} (l + l_1)^2 \cot \alpha + \frac{l_1^2 k_1 B}{2}$
Kioka	$\frac{1}{2} Z' L \frac{1}{\cot \beta + \tan i} = L \int_0^x (\xi \tan i - \zeta(\xi)) d\xi$ $Z' = \sqrt{2(\cot \beta + \tan i) \int_0^x (\xi \tan i - \zeta(\xi)) d\xi}$
Yoon	$\frac{1}{2} l B x^2 \tan \beta - B \int_0^l \zeta(x) dx$ $= \frac{l_1 h B}{2} + \frac{h^2 (l + l_1)^2}{3l} \cot \alpha$
Yang	$\frac{1}{2} B l^2 \tan \beta - B \int_0^l \zeta(x) dx + \frac{1}{2} B d^2 c_1$ $= \frac{1}{2} (l_1 + l_1 k_1 c_1) l_1 k_1 B$ $+ \frac{1}{3} (l + l_1 k_1 c_1) \left\{ \frac{l_1 k_1 (l + d c_1)}{l + (l_1 k_1 + d) c_1} \right\}^2 \cot \alpha$ $+ \frac{1}{3} (l_1 + l_1 k_1 c_1) l_1^2 k_1^2 \cot \alpha$

Table 2 Energy equations

Chari	$E_k + \int F_d dx = \int P_h dx$
Kioka	$\int_S \mathcal{N}(X, \zeta(X)) ds = \int_S F ds - W \zeta(X)$ $F = P_{RP} + \mu K(P_s + K) + \frac{W d \zeta / dx}{\sqrt{1 + (d \zeta / dx)^2}}$
Yoon	$E_k = E_x + E_y + \int_S P_s ds - \int_S F_d ds + E_p$
Yang	$E_k + \int F_d ds = \int (P_r + \mu_k (P_s + K)) ds + E_p$

Yoon과 Yang의 모델에서는 얼음의 수직방향 운동으로 인해 발생하는 접촉부에서의 수직하중이 있으며 이 하중을 접촉면적으로 나눈 것인 접촉압력이다. Chari의 모델은 수평쇄굴 모델로서 수직방향으로 전달되는 접촉압력은 없다. 그러나 Chari 모델에서 얼음의 유효중량을 수직방향 하중으로 간주한다면 세 가지 모델에 대한 접촉압력과 그로 인해 해저지반에 전달되는 압력의 변화를 깊이에 따라 계산할 수 있다. Fig.5a와 Fig.5b에서 알 수 있듯이 해저면 지반으로 전달되는 압력의 크기는 해저면 경사가 크면 증가하고 수직상승계수가 크면 압력의 크기도 감소한다.

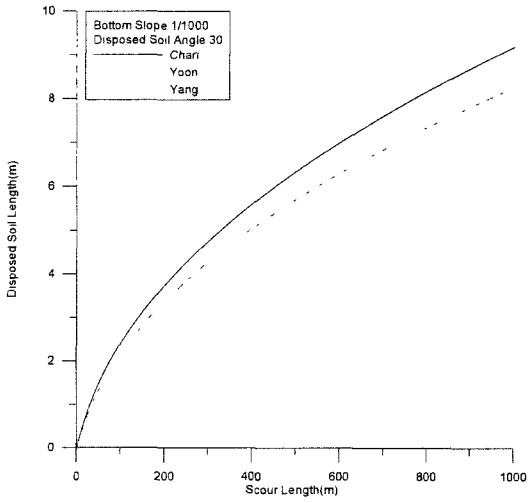


Fig.3a Disposed soil length on the front face of ice model

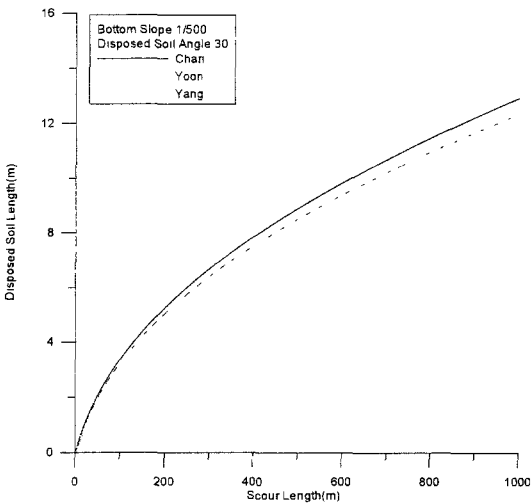


Fig.3b Disposed soil length on the front face of ice model

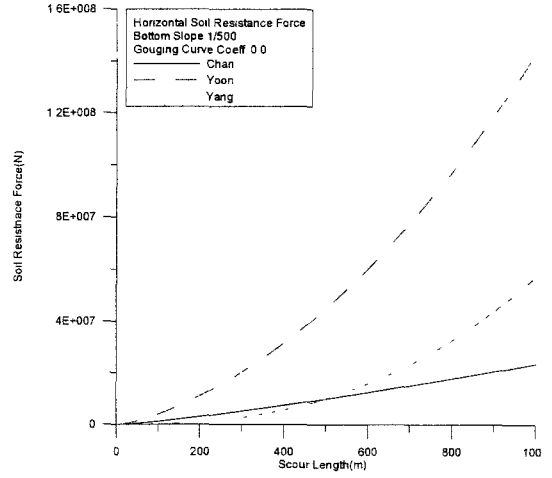


Fig.4a Horizontal soil resistance

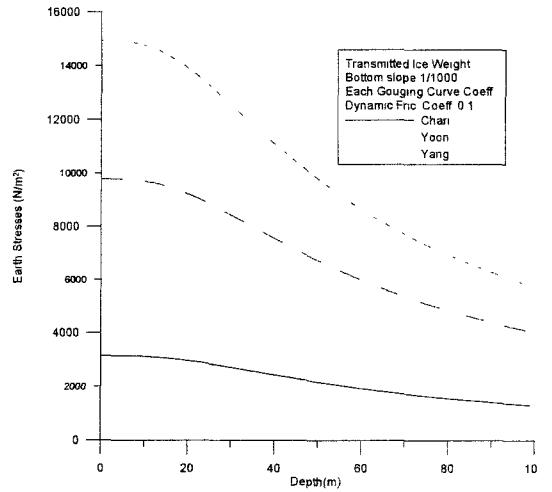


Fig.5a Earth stresses transmitted through seabed soil

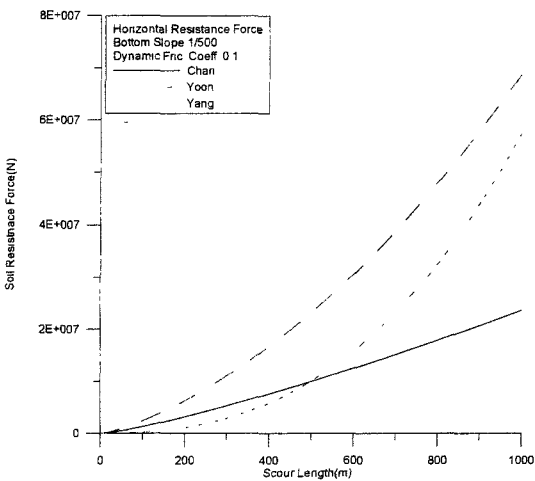


Fig.4a Horizontal soil resistance

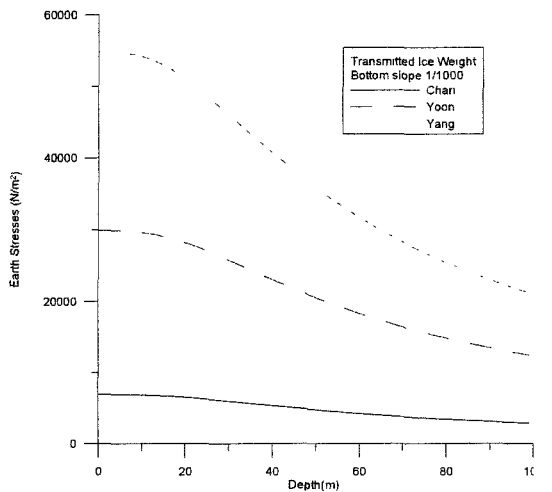


Fig.5b Earth stresses transmitted through seabed soil

빙쇄굴 모델에 대한 비교연구를 통해 기존 빙쇄굴 모델이 보완되어야 할 점을 여러 가지 지적할 수 있다. 먼저 Chari 모델의 경우 수평쇄굴만 다루고 있기에 수직방향으로 얼음과 토질 사이에 발생할 수 있는 마찰력과 접촉압력에 대한 문제가 명확하지 않다. 토질의 내부마찰각과 같은 상세 정보가 부족하고 측면에 작용하는 토압을 전면에 작용하는 토압에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다고 했는데 후속연구에 의하면 쇄굴거리가 증가하면서 발생하는 측면의 토질저항력을 결코 무시할 수 없다. Kioka 모델에서는 쇄굴곡선을 실험에 의해 구해야 한다는 어려움과 실험장치의 특성상 빙모델은 등속운동만 가능하였다.

한편 수동토압이론에서 해저면 경사가 아주 작은 경우라면 전면의 수동토압의 수직방향 성분을 무시할 수 있지만 경사가 증가할 경우 전면 수동토압은 해저면 경사와 같은 크기만큼 기울어진 수직방향의 힘이 존재하게 된다. 그러나 Yoon의 모델에서는 해저면 경사에 따른 수직방향의 전면부 수동토압에 대한 언급이 없으며 Yang의 경우 빙쇄굴을 일으키는 얼음에 대한 벽마찰각(wall friction angle)의 영향이 고려되어 있지 않다. 특히 Yang의 모델에서 보다 현실적으로 쇄굴토 형상을 가정했으나 측면부에 쌓이는 쇄굴토의 부피가 계산에서 빠져 있었다. 쇄굴이 발생하면서 해저지반에 전달되는 하중을 Yoon과 Yang의 경우 얼음의 운동으로 인해 발생하는 바닥의 접촉압력이라 가정하였는데 Yoon의 경우 직사각형 모델이므로 수직방향으로의 힘이 그대로 접촉압력이 되지만 Yang의 모델에서는 얼음의 수면하부 경사각(keel angle) 만큼 기울어진 수직방향의 토질저항력이 작용하게 된다. 따라서 해저지반으로 전달되는 하중은 전면과 측면에 작용하는 수직방향의 토질저항력과 얼음의 운동으로 인해 발생하는 접촉압력이 조합되어 전달된다고 보는 것이 타당하다.

3. 빙쇄굴 실험

빙쇄굴 해석결과에 영향을 미치는 요소는 해저면 경사와 각종 운동계수(수직상승계수, 항력계수, 동마찰계수), 토질특성치(내부마찰각, 벽마찰각) 등인데 특히 해저면 경사나 수직상승계수의 영향이 매우 크다. 이는 토질저항력이 쇄굴거리에 따라 쌓이는 쇄굴토의 토량 변화와 밀접한 관계를 갖기 때문이다. 또한 쇄굴거리가 길어짐에 따라 측면에 쌓이는 토량이 증가하면서 측면의 토질저항력도 크게 증가하는 것을 알 수 있으며 이러한 영향은 수평, 수직방향의 토질저항력에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 쌓이는 쇄굴토의 형상이 빙쇄굴 해석에서 매우 중요하다는 사실에 따라 수면하부 경사각을 갖는 빙모델을 사용하여 간단한 실험을 통해 빙모델의 주면에 쌓이는 쇄굴토의 형상을 파악하고 수면하부 경사각의 변화에 따른 쇄굴특성을 파악하였다.

실험을 위하여 길이, 높이, 폭이 각각 4 m × 0.8 m × 0.6 m 인 수조를 제작하였으며 수조의 한쪽 측면은 관측

을 용이하게 하기 위해 투명아크릴을 사용하였다. 빙모델에 수평하중을 가하기 위해서 수조 전면에 도르래와 추를 설치하였고 마찰을 최소화 할 수 있도록 설계하였다. 실험 중 발생할 수 있는 빙모델의 회전을 방지하기 위해 수조의 한 쪽에 가이드를 설치하였다. 한편 수면하부 경사각을 갖는 얼음을 대체하기 위하여 높이와 부피가 동일하고 수면하부 경사각만 다른 4가지 (0°, 30°, 45°, 60°) 빙모델을 제작하였다. 빙모델 표면은 마찰을 최대한 줄이고 방수를 위해 전면 에폭시 코팅 처리를 하였으며 빙모델 안쪽으로 모래를 담아 빙모델의 초기 홀수를 맞추었다. 경사진 해저지반을 재현하기 위해서는 5 cm의 차이로 경사를 조절할 수 있는 경사대를 제작하여 각각 1/10, 1/20, 1/30 경사에서 실험을 수행하였으며 입자의 크기가 다른 두 종류의 모래를 사용하였다.

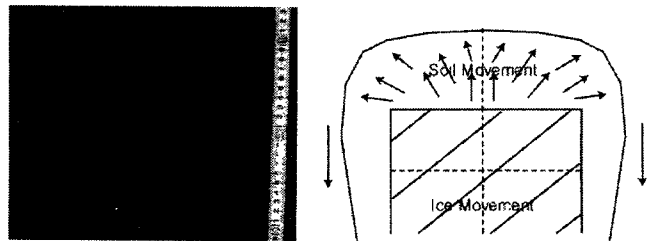


Fig.6 Disposed soil shape by experiment

Fig.6에서 보듯이 쇄굴토의 형상은 전면부에 약간 등그렇게 쌓이며, 측면부에는 삼각형 단면으로 긴 독을 형성하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 형상은 수면하부 경사각을 갖는 빙모델에 대해서도 마찬가지로인데 전면부 경사각에 따라 쇄굴토가 비스듬히 쌓이는 것을 제외하면 빙모델의 주위에 쌓이는 토양의 형상이 비슷하다. 쇄굴토의 형태를 전면부의 삼각기둥, 측면의 삼각뿔 형태로 단순화시켜서 나타낸 형상이 Fig.7에 나타나 있다. 빙쇄굴 실험을 통해 파악할 수 있는 사실은 Yang의 제안에 따른 쇄굴토의 형태가 타당하다는 점이다.

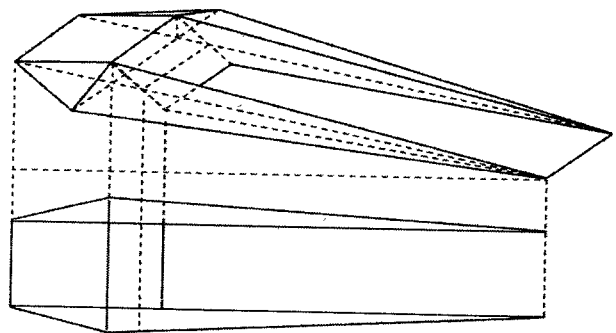


Fig.7 Disposed soil pattern in the proposed scour model

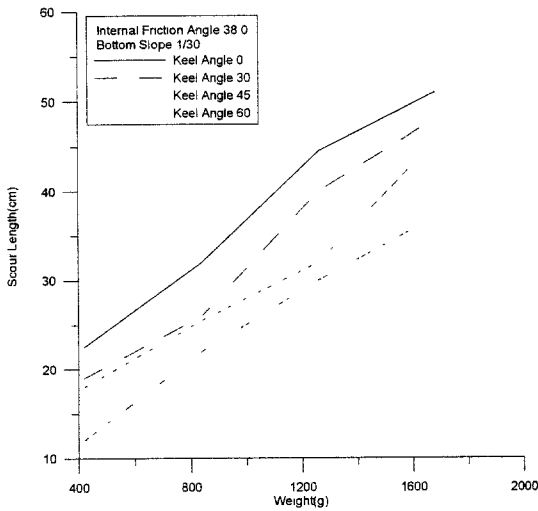


Fig.8a Result of experiment

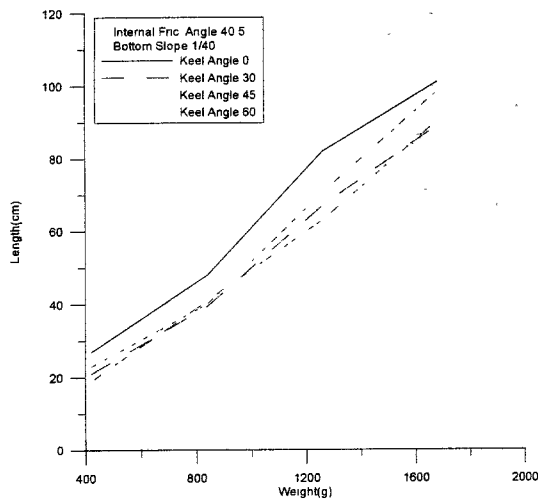


Fig.8b Result of experiment

전면과 측면에 쌓이는 토질의 경사각에 대하여 살펴보면 Table 3을 통해 알 수 있듯이 바닥의 경사와는 상관없이 토질의 내부마찰각이 큰 경우 경사각이 높게 나타나는 일정한 형태를 관찰할 수 있었다. 전면과 측면의 경사각에 대해서는 전면에 쌓이는 토양의 경사가 측면에 쌓이는 토양의 경사각보다 약간 작게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 쇄굴거리가 증가하면서 전면에 쌓이는 토양의 수평거리가 증가하는 것도 확인할 수 있었다.

쇄굴특성에 대한 수면하부 경사각의 영향을 Fig.8a와 Fig.8b에서 볼 수 있는데 경사각이 증가하면 쇄굴거리가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 내부마찰각이 서로 다른 두 종류의 사질토에 대해서 내부마찰각이 작은 경우 쇄굴거리가 감소하는 것도 확인하였다. 입자가 가늘고 촘촘한 토질의 경우 내부마찰각이 증가하게 되는데 벽마찰각은 내부마찰각이 증가할수록 커지는 것이 보통이다. 실제 현장에서의 해저면 경사는 아주 작으며 토질은 얼음에 비해 아주 연약하고 쇄굴을 일으키는 얼음의 표면은 매끈하지

도 않기 때문에 향후 실험은 아주 작은 경사를 재현하고 빙모델에 비해 입자의 크기가 극단적으로 작고 성질이 다른 여러 종류의 토질을 사용할 수 있어야 하며 얼음과 토질 사이의 벽마찰각이 정의된 상태에서 정량적인 측정이 수행되어야 할 것이다.

Table 3 Disposed soil angle

(internal friction angle $\phi=40.5$, bottom slope 1/30)

Keel Angle	Disposed Soil Length (front)	Disposed Soil Height (front)	Disposed Soil Length (side)	Disposed Soil Height (side)	Disposed Soil Angle (front)	Disposed Soil Angle (side)
0°	11 cm	5.8 cm	4 cm	2.8 cm	27.8°	34.9°
30°	10.5 cm	4.5 cm	2.5 cm	1.7 cm	23.2°	34.2°
45°	9.5 cm	4.3 cm	2 cm	1.5 cm	24.4°	36.9°
60°	6.3 cm	3.5 cm	2.5 cm	1.8 cm	29.1°	35.8°

4. 수면하부 경사각을 갖는 빙쇄굴 모델

여기서는 앞서 언급한 것과 같이 기존의 빙쇄굴 모델이 가지는 제한점을 보완하고 수면하부 경사각(keel angle)을 가지는 빙모델에 대하여 빙쇄굴 해석을 시도하였다.

4.1 빙모델의 형상

Fig.9는 북극해에서 발견되는 다년생 빙맥의 이상화된 형상이다(8). 빙모델에서 수면상부의 높이(sail height)는 수면하부 깊이(keel depth)와의 통계적인 비율을 이용하여 추정한다. 그림에서 빙맥의 단면적은

$$A = H^2 \cot 20^\circ + 0.5 \times (B_b + l_i) \times h_i \quad (1)$$

여기서 H : Sail height

h_i : Height of ice ridge

B_b : Breadth of keel bottom

l_i : Breadth of ice ridge at waterline

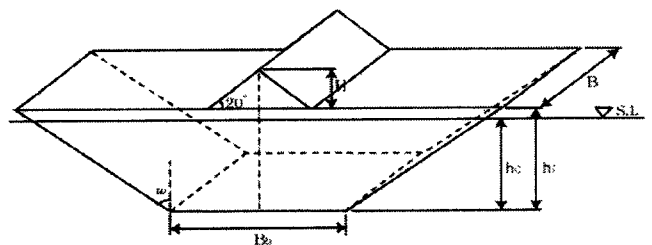


Fig.9 Idealized ice ridge model with a trapezoidal cross section

4.2 토질방정식

토질방정식은 파여진 토량과 주변에 쌓인 토량이 서로 같다는 조건을 이용하여 쇄굴거리 L , 쇄굴깊이 d , 전면에 쌓이는 토양의 높이 h , 쇄굴곡선 $\zeta(x)$ 에 대하여 전면에 쌓이는 토양의 수평길이 L_1 에 대한 3차식으로 표현할 수 있다. 쇄굴토의 형상은 앞서 빙쇄굴 실험을 통해 결정된 형상으로 가정한다 (Fig.10).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} B L^2 \tan \beta - B \int_0^L \zeta(x) dx + \frac{1}{2} B d^2 C_1 \\ &= \frac{1}{2} B L_1^2 k_1 (1 + k_1 C_1) \\ & \quad + \frac{1}{3} (L_1 + L_1 k_1 C_1 + d C_1 + L) (L_1 k_1)^2 \cot \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

이 식의 양변 분모를 없앤 후 L_1 에 대한 내림차순으로 정리하면

$$\begin{aligned} & 2[(1 + k_1 C_1) k_1^2] L_1^3 + k_1 [2(d C_1 + L) k_1 + 3B \tan \alpha (1 + k_1 C_1)] L_1^2 \\ & - 3B \tan \alpha (L^2 \tan \beta - 2 \int_0^L \zeta(x) dx + d^2 C_1) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\tan \alpha + \tan \beta = k_1$
 $C_1 = \frac{\tan w}{1 - \tan w \tan \beta}$
 $d = L \tan \beta - \zeta(L)$

4.3 에너지방정식

빙맥의 초기 운동에너지와 쇄굴거리 L 에 대하여 조류와 바람에 의한 일, 그리고 토질의 x, y 방향의 모든 저항력에 의해 소산된 일을 에너지 보존법칙에 의해 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_k = \int_0^L P_{sx} dx + \int_0^{\zeta(L)} P_{sy} dy - \int_0^L F_d dx + E_p \quad (4)$$

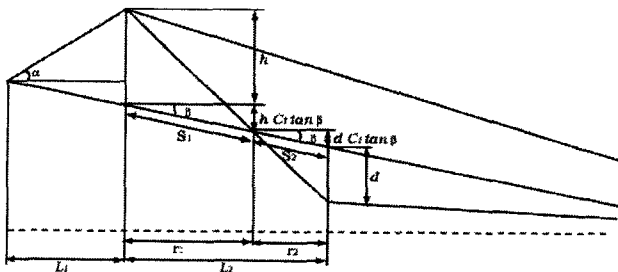


Fig.10 Side profile of the disposed soil around an ice ridge

여기서 E_k : Kinetic energy of ice ridge
 P_{sx} : Soil resistance force in the x-direction
 P_{sy} : Soil resistance force in the y-direction
 F_d : Drag force
 E_p : Potential energy

$$\text{운동에너지: } E_k = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (5)$$

여기서 $m = \rho_i A B$
 ρ_i : Ice mass density
 A : Total cross section area of ice ridge
 B : Width of ice ridge
 m : Mass of ice ridge
 V_0 : Initial velocity of ice ridge

$$\text{항력: } F_d = F_{da} + F_{dw} \quad (6)$$

여기서, $F_{da} = \frac{1}{2} C_{da} A_a V_a^2$: Drag force by wind
 $F_{dw} = \frac{1}{2} C_{dw} A_w V_w^2$: Drag force by current
 C_{da}, C_{dw} : Coefficients of drag force
 V_a, V_w : Relative velocities of drag force
 A_a, A_w : Projection areas

토질저항력: 토질저항력은 Coulomb의 수동토압이론을 사용하고 전면과 측면에 작용하는 벽체의 마찰각 (ϕ_{wf} , ϕ_{ws})을 모두 고려한다. 빙모델의 전면에 작용하는 수동토압은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$P_f = \frac{1}{2} K_{pf} \rho_s g h_f^2 B \quad (7)$$

여기서 K_{pf} : Coefficient of passive earth pressure on the front fac of ice ridge
 ρ_s : Density of saturated soil
 g : Gravitational acceleration

그리고

$$h_f = (h + d)(1 + C_1 \tan \beta) \quad (8)$$

$$K_{pf} = \left[\frac{\sin(\varphi + \phi) \csc \varphi}{\sqrt{\sin(\varphi - \phi_{wf})} - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \phi_{wf}) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\varphi - \beta)}}} \right]^2 \quad (9)$$

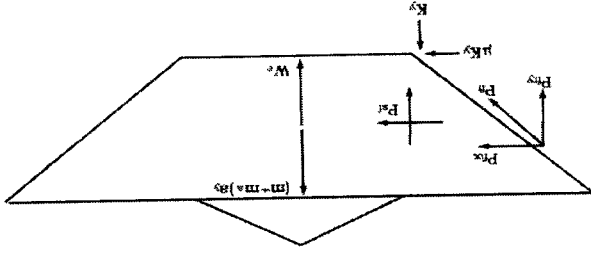


Fig.11 Various interaction forces acting on ice ridge model

$$P_f = \frac{1}{2} K_{pf} \rho_s g B [(h + x \tan \beta - \zeta(x))(1 + C_1 \tan \beta)]^2$$

$$= \frac{1}{2} K_{pf} \rho_s g B (1 + C_1 \tan \beta)^2 [(h + x \tan \beta - \zeta(x))]^2 \quad (10)$$

한편 빙모델의 측면에 작용하는 수동토압은 다음과 같이 표현된다.

$$P_s = \int_0^d \int_0^{\cot \beta} \int_0^{\varepsilon \tan \beta} \rho_s g K_{ps} \eta d\eta d\varepsilon \quad (11)$$

$$P_s = \rho_s g K_{ps} \int_0^d \int_0^{\cot \beta} \int_0^{\varepsilon \tan \beta} \eta d\eta d\varepsilon$$

$$= \frac{1}{6} \rho_s g K_{ps} \cot \beta (x \tan \beta - \zeta(x))^3 \quad (12)$$

여기서

$$K_{ps} = \left[\frac{\sin(\varphi + \phi) \csc \phi}{\sqrt{\sin(\varphi - \phi_{us})} - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \phi_{us}) \sin \phi}{\sin \varphi}}} \right]^2 \quad (13)$$

전면에 작용하는 수동토압은 쌓이는 토양의 높이까지 고려하고 측면에 작용하는 수동토압은 원지반 만을 고려한다. 이것은 측면에 작용하는 토질저항력은 마찰의 개념이 강하고 전면에서 밀려난 토양이 쌓이는 것으로 간주하기 때문이다.

마찰력: 수평방향으로 작용하는 K_x 는 Fig.11과 같이 얼음의 운동으로 인해 발생하는 전면, 측면, 그리고 바닥에서의 x 방향의 모든 마찰력을 조합하여 나타낼 수 있다.

$$K_x = P_{fx} + P_{sf} + \mu K_y \quad (14)$$

또한 y 방향으로 접촉압력 K_y 에 대하여 정리하면

$$(m + m_a) a_y = P_{fy} + P_{sf} + W_e - K_y$$

$$K_y = P_{fy} + P_{sf} + W_e - (m + m_a) a_y \quad (15)$$

$$P_{fx} = P_f \sin w$$

$$= \mu P_f \cos \phi_{uf} \sin w \quad (16)$$

또한

$$P_{fy} = P_f \cos w$$

$$= \mu P_f \cos \phi_{uf} \cos w \quad (17)$$

마찬가지로 빙모델의 운동으로 인한 측면부의 마찰력은 $P_{sf} = \mu P_s \cos \phi_{us}$ 로 정의할 수 있다. 빙맥의 유효중량은

$$W_e = g B [\rho_i A_s - \rho_w (B_b + (h_0 - \zeta(x)) \tan w) (h_0 - \zeta(x))] \quad (18)$$

이상을 정리하면 빙맥의 수직방향 운동방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(m + m_a) a_y = [\rho_i V_s + \rho_w C_m B [B_b + (h_0 - \zeta(x)) \tan w] (h_0 - \zeta(x))] \frac{d}{dx} \left(-\frac{d\zeta(x)}{dx} V_0 (1 - x/L)^2 \right) \quad (19)$$

- 여기서 m_a : Added mass of ice ridge
- a_y : Acceleration of ice ridge in the y-direction
- P_{sf} : Frictional force on the side face of ice ridge
- P_{fx} : Frictional force on the front face of ice ridge
- W_e : Effective weight of ice ridge
- V_s : Submerged volume of the ice ridge
- A_s : Submerged projection area of ice ridge

위치에너지: 빙모델의 위치에너지는 유효중량에 대한 수직방향의 변위를 적분함으로써 구할 수 있다. 즉 위치에너지의 개념은 쇄굴 시 빙맥의 유효중량을 수직방향 변위만큼 이동시키는 데 사용된 에너지로 정의할 수 있다.

$$E_p = \int_0^{\zeta(x)} W_e dy \quad (20)$$

5. 수치해석 결과

Table 4는 수면하부 경사각에 따른 쇄굴운동의 특성을 파악하기 위해 사용된 변수들의 값이다. 수치해석 모델은 질량이 같고 높이가 동일한 것을 선택하였다. 수치해석 결과에 영향을 미치는 각 변수들 - 바닥경사(bottom slope), 항력계수(drag coefficient), 수직상승계수(gouging curve coefficient), 동마찰계수(dynamic frictional coefficient) - 은 앞서 기존의 직사각형 빙모델을 이용한 빙쇄굴 해석을 통해 그 경향을 이미 확인하였기 때문에 수면하부 경사각을 가진 경우에도 동일하게 적용하였다.

Table 4 Data for sample calculation

Properties	Symbols	Initial Value
Ice	H	7.9 m
	Bb	Each Value
	w	0-60°
	B	35 m
	ρ_i	917 kg/m ³
Soil	ρ_s	1500 kg/m ³
	ϕ	30°
	ϕ_{wf}	2 - 25.4°
	ϕ_{us}	2 - 25.4°
	α	33.02°
Environme nts	β	1/500, 1/1000
	v_0	1.3 m/s
	v_a	19 m/s
	ρ_w	1024 kg/m ³
	ρ_a	1.0-3.0 kg/m ³
	C_d	0.1, 0.2, 0.3
	C_m	0.5
	μ_k	0.1

Fig.12a, 12b는 동일한 초기 운동에너지 상태에서 쇄굴 깊이가 가장 작게 발생하는 모델이 수면하부 경사각과 벽마찰각의 합이 60°인 경우임을 나타내며 이것은 Fig.13a, 13b에서 보듯이 수평, 수직방향의 토질저항력이 가장 크게 발생하기 때문임을 보여준다. 여기서 수면하부 경사각과 벽마찰각의 합은 얼음의 전면에서 발생하는 토질저항력의 작용방향이다. 따라서 동일한 초기 운동에너지와 수직상승 계수, 동일한 벽마찰각으로 쇄굴을 일으킬 때 수면하부 경사각과 벽마찰각의 합이 60°인 경우 가장 큰 토질저항이 발생하면서 가장 작은 쇄굴깊이에 도달하게 된다. 수면하부 경사각이 60°인 경우 벽마찰각과 상관없이 수직방향으로의 저항력이 비교적 크게 나타나는데 이것은 수평면과 완만한 경사를 갖는 모델이 가장 큰 수직하중을 전달하는 모델 실험과 일치하는 결과이다.

Fig.14a, 14b는 토질저항력의 작용 방향이 60°인 경우 수직방향의 저항력이 가장 크게 작용하며 이로 인해 해저지반으로 전달되는 빙하중 또한 증가하는 것을 보여준다. Fig.15a, 15b는 최대 빙쇄굴 깊이에서 지반에 전달되는 토질응력의 분포를 보여준다. 여기서 수면하부 경사각이 60°인 경우 빙모델과의 접촉면 아래 20 m 까지 매우 큰 값을 나타내는데 이것은 수면하부 경사각의 변화에 의해 빙모델의 바닥면적이 상대적으로 작기 때문이다.

Fig.16은 기존의 빙쇄굴 모델들과 비교했을 때의 본 모델의 특성을 보여준다. 벽체의 마찰이 비교적 큰 경우 해석결과는 Yoon의 모델과 비슷한 경향을 보이는 데 이것은 전면과 측면의 토질저항에 대한 고려조건이 비슷하기 때문이다.

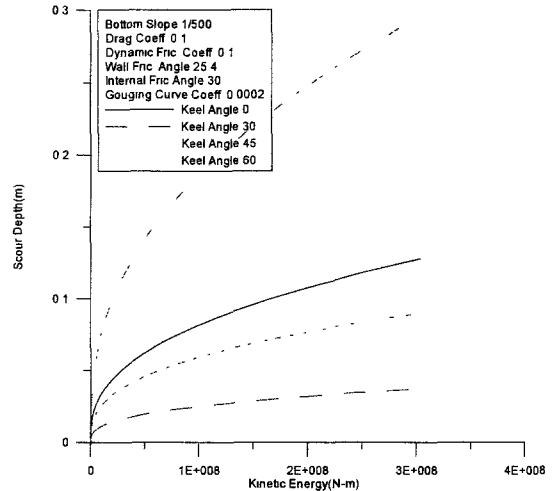


Fig.12a Scour depth changes with keel angle variation

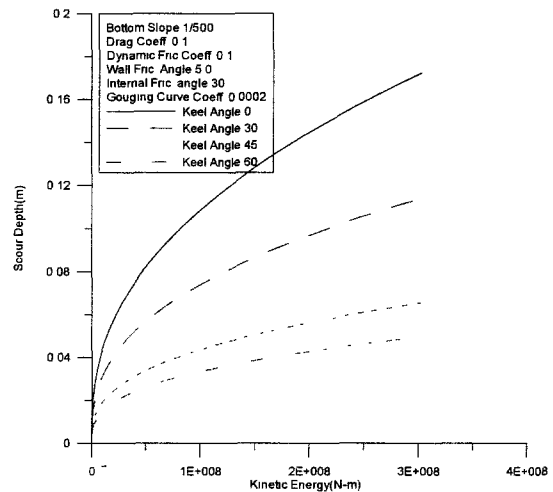


Fig.12b Scour depth changes with keel angle variation

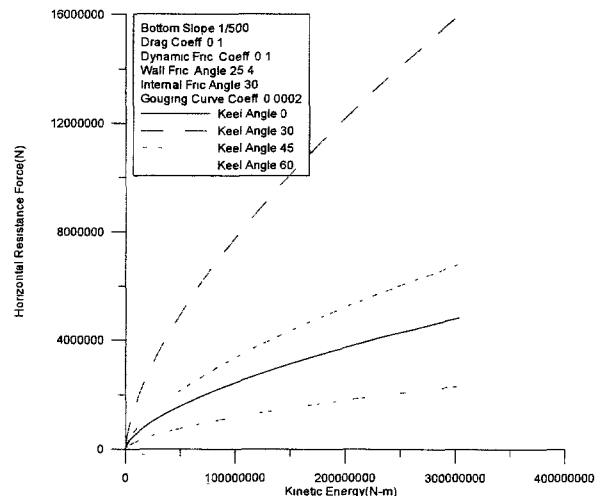


Fig.13a Horizontal soil resistance force with keel angle variation

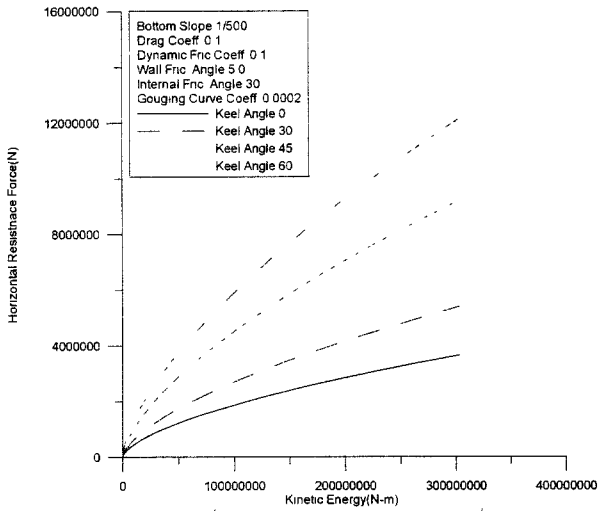


Fig.13b Horizontal soil resistance force with keel angle variation

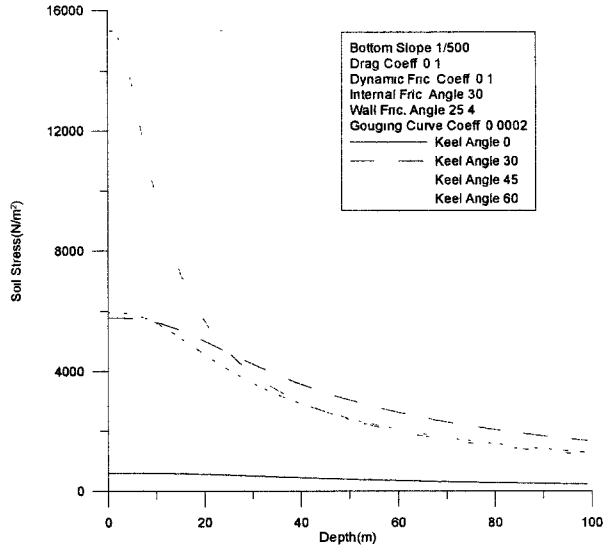


Fig.15a Earth stresses transmitted through seabed soil

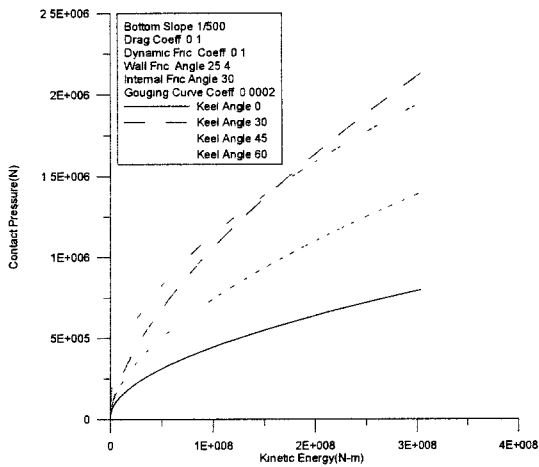


Fig.14a Contact pressure changes with keel angle variation

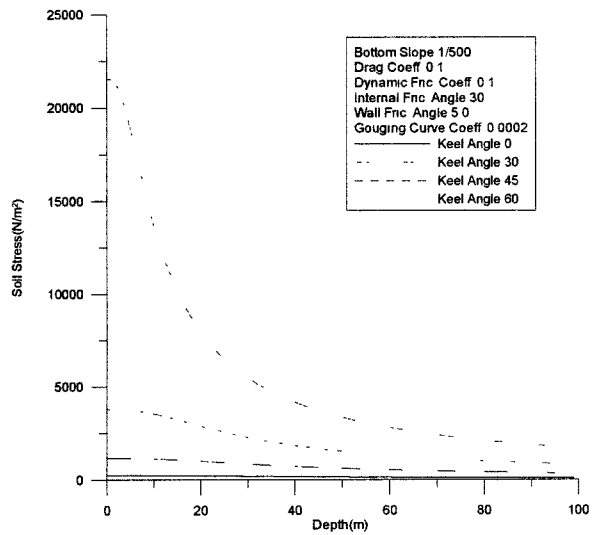


Fig.15b Earth stresses transmitted through seabed soil

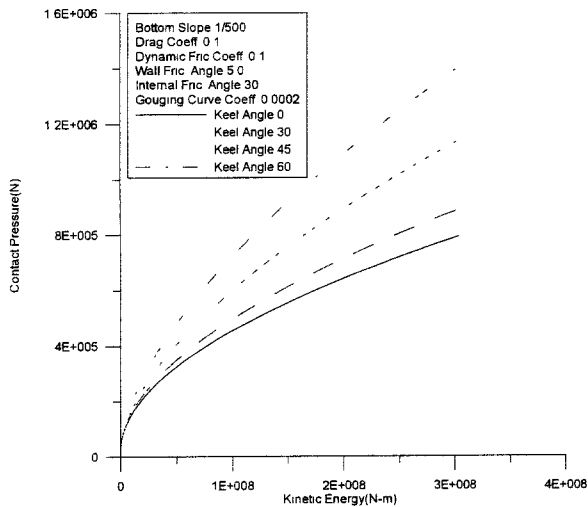


Fig.14b Contact pressure changes with keel angle variation

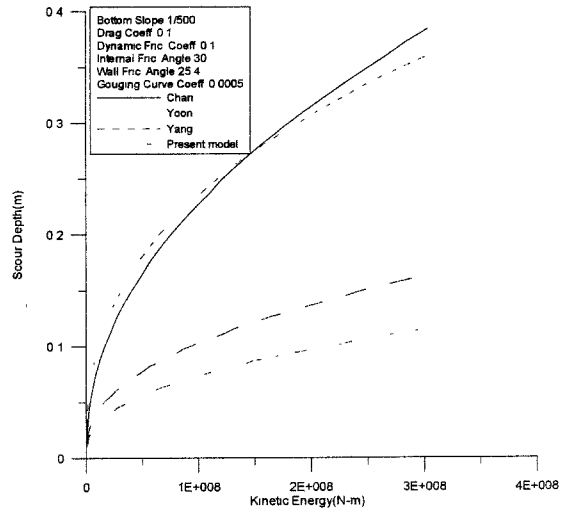


Fig.16 Comparison of scour depth calculated by three models

Table 5는 Sakhalin섬 근해와 Beaufort해에서의 빙쇄굴 관측자료와 본 모델의 수치해석 결과를 비교한 것이다. 내부마찰각은 (Sakhalin 근해 = 30°, Beaufort Sea = 0°)로 선정하였으며 수직상승계수는 두 해역이 연약한 지반인 점을 판단하여 0.0002 로 비교적 작은 값으로 고려하였으며 빙모델은 가장 일반적인 형태의 수면하부 경사각을 갖는 형상으로 채택하였다. 벽마찰각의 경우 실제 해역에서의 얼음의 표면이 매끈하지 않다는 점을 감안하여 크게 잡았다.

두 경우 모두 본 모델에 의한 수치해석 결과가 관측자료와 비교적 일치하는 것을 알 수 있다. Yoon의 모델결과는 본 모델의 해석결과에 비해서 쇄굴깊이가 크게 계산되는데 이는 앞서 기존의 모델들과의 비교연구에서도 알 수 있듯이 Yoon의 모델이 수평, 수직방향의 저항력이 작게 계산되는 모델이기 때문이다.

6. 결론

본 연구는 기존의 빙쇄굴 모델에 대한 비교 연구를 통해 빙쇄굴 발생 메커니즘에 대한 기본적인 개념과 모델링의 한계를 살펴보고 이를 보완해 수면하부 경사각을 갖는 빙모델에 대한 해석을 수행하였다. 빙쇄굴 모델의 비교 연구를 통해 쇄굴된 토양의 쌓이는 형상이 매우 중요한 요소임을 주지하여 실험을 통해 이를 확인하고 수면하부 경사를 갖는 빙모델에 대한 쇄굴특성을 살펴봄으로써 실제 현상에 근접한 모델을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어지는 결론은 다음과 같이 정리된다.

수면하부 경사각을 갖는 모델에 대한 이론 및 수치해석을 통해서 수면하부 경사각과 벽마찰각의 합으로 정의되는 토질저항력의 작용 방향이 60°근처인 경우 가장 작은 쇄굴깊이와 쇄굴깊이에 도달하게 되는데 이는 수평, 수직 방향의 토질저항력이 가장 크게 작용하기 때문이다. 또한 힘의 작용방향이 60°보다 작은 경우 벽마찰각이 증가하면 쇄굴거리와 쇄굴깊이가 감소하고 60°보다 큰 경우엔 증가하게 되는데 전자의 경우 수평방향의 저항력이 증가하기 때문이고 후자의 경우 수직방향의 저항력이 증가하기 때문인데 이는 쇄굴운동이 수평방향의 저항력에 크게 영향을 받는다는 것을 나타낸다.

실험을 통해서 쇄굴된 토양의 쌓이는 형상을 확인하고 전면의 경사가 각각 0, 30, 45, 60°인 빙모델에 대하여 동일한 하중 조건에서 보여지는 쇄굴특성을 살펴보았는데 실험결과는 벽마찰각이 매우 작은 경우에 대한 수치해석 결과와 대체로 일치하는 결과를 보였다. 이와 같은 실험결과를 근거로 수면하부 경사각을 갖는 빙모델에 대한 심도 있는 연구와 향후 빙쇄굴의 3차원 해석모델 개발과 정량적인 실험을 수행해야 할 필요가 있다.

Table 6 Comparison of calculated scour depth to field data

	Ice Size (m)	Bottom Slope	Scour Depth - Observation	Scour Depth - Present Model	Scour Depth - Yoon's Model
Sakhalin Offshore	200×20×30 (L×B×H)	1/100	V ₀ = 1.5 m/s d = 0.5 - 1.0 m max = 2.13 m	0.78 m	1.0 m
		1/1000		0.21 m	0.29 m
Beaufort Sea	2000×20×30 (L×B×H)	1/100	V ₀ = 0.5 m/s d = 0.6 - 2.1 m max = 4.6 m	0.45 m	0.68 m
		1/1000		0.15 m	0.21 m
Properties	Drag coeff. 1.0 Internal friction angle 0, 30° Water density 1024 kg/m ³ Soil density 1500 kg/m ³ Gouging curve coeff. 0.0002 Keel angle 60° Wall friction angle 25.4°				

참고문헌

1. Truskov, P.A., and Surkov, G.A., 1991, "Scour Depth Distribution on the Northern Sakhalin Offshore", Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference, Edinburgh, The United Kingdom, Vol. II, pp.467-470.
2. Surkov, G.A., Truskov, P.A., 1992, "Probability Estimation of Moving Pressure Ridge Contacts with Pipelines", Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, USA, Vol. II, pp.797-800.
3. Clark, J.L., Paulin, M.J. and Poorooshab, F., 1990, "Pipeline Stability in an Ice-Scoured Seabed", Proceedings of the First European Offshore Mechanics Symposium, Trondheim, Norway, pp.533-549.
4. Chari, T.R., 1979, "Some Geotechnical Aspects of Iceberg Scours on Ocean Floors", Canadian Geotechnical Journal, Vol.16, pp.379-390.
5. Kioka, S. and Saeki, H., 1995, "Mechanisms of Ice Gouging", Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, The Hague, The Netherlands, Vol. II, pp.398-402.
6. 윤기영, 최경식, 1997, "빙쇄굴 모델에 의한 극지 해저 파이프라인의 매설깊이 산정," 한국해양공학회지 제11권 2호, pp.1-10.
7. 양태수, 1999, "극지 파이프라인 매설깊이 산정을 위한 빙맥의 해저면 쇄굴모델", 한국해양대학교 석사학위논문

문.

8. Wright, B., Hnatiuk, J. and Kovacs, A., 1981, "Multi-year Pressure Ridges in the Canadian Beaufort Sea", Coastal Engineering, Vol.5, pp.125-145, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.