

빙쇄굴 모델에 의한 극지 해저 파이프라인의 매설깊이 산정

윤 기 영* · 최 경 식**
(97년 2월 12일 접수)

Estimation of Burial Depth for Arctic Offshore Pipelines by an Ice Scour Model

Ki-Young Yoon* · Kyung-Sik Choi**

Key Words : Ice Scour Model (빙쇄굴 모델), Arctic Offshore Pipelines (극지 해저 파이프라인), Burial Depth (매설깊이), Parametric Study (매개변수 연구)

Abstract

The interaction of grounded ice features with underlying seabed is one of the major considerations in the design of Arctic pipeline systems. Regarding the development of offshore gas fields near Sakhalin Island, which is an ice-infested area, in this paper an ice scour model to determine the burial depth of Arctic offshore pipeline is studied. Using a simplified ice-seabed interaction process, ice scour depth is easily estimated. This nonlinear numerical model can simulate the scouring process for various environmental parameters such as ice mass, incoming velocity, soil strength. This study also deals with interacting forces during the scouring process in sloping seabed conditions and discusses the ice loads that are transmitted through the seabed soil.

1. 서 론

빙해역에 해저 파이프라인을 설치하는 데는 해빙(sea ice)이나 영구동토(permafrost)와 같은 독특한 극지환경 때문에 일반 해역에 비해 설계 고려사항도 많고 시공상의 특수절차나 특수장비도 필요하다. 특히 수심이 얇은 극지 빙해역에서는 겨울 동안 결빙

되었던 해빙이 녹으며 커다란 얼음덩어리가 해안가에 좌초되거나 해저면을 긁어내는 빙쇄굴(ice scour 혹은 ice gouging) 현상이 흔하게 일어난다. 이 때 빙쇄굴에 의해 해저면에 작용하는 힘은 노출된 파이프라인이 견딜 수 있는 강도보다 훨씬 크며 해저에 매설된 파이프라인에 큰 손상을 유발시킬 수 있다. 얼음과의 직접적인 접촉을 피하기 위해서는 해저 파이

* 현대중공업 해양사업본부

** 한국해양대학교 조선해양공학부

프라인을 최대 빙쇄굴 깊이보다 아래에 매설하여야 하지만, 매설깊이가 증가할수록 파이프라인의 설치비용은 엄청나게 커지게 된다. 따라서 이러한 빙쇄굴에 의한 해저면 침투깊이를 정확히 예측해야 할 필요가 있으며 이에 따라 파이프라인의 적절한 매설깊이와 부설방법 등이 결정되어야 한다. 빙쇄굴과 그에 따른 매설깊이의 산정은 극지 파이프라인 설치공사의 경제성을 좌우하는 매우 중요한 설계 고려사항이다.

본 연구에서는 빙쇄굴에 의한 극지 파이프라인의 매설깊이를 산정하는 방법에 대하여 다루고자 한다. 이를 위해서는 먼저 빙쇄굴의 발생 메커니즘을 정확히 이해해야 할 필요가 있다. 빙쇄굴 현상에 대하여 지금까지 상당한 분량의 조사 및 연구결과가 발표된 바 있는데 그 내용을 보면 크게 다음의 세 가지로 구분할 수 있다.

첫째로, 각 지역에서 관측된 빙쇄굴 데이터를 기초로 통계적으로 연구하는 방법이다.^{1)~3)} 이 방법은 연간 평균 빙쇄굴 발생빈도와 빙쇄굴 깊이의 확률분포로부터 빙쇄굴 깊이를 추정하는데 자료수집에 시간과 비용이 너무 많이 소요되며, 또한 빙쇄굴의 발생 메커니즘을 무시하는 경향이 있다. 특히 사진판독이나 음파탐측에 의한 빙쇄굴 데이터는 아주 오래 전의 빙산 활동에 의한 흔적도 포함하므로 연대를 식별하기가 어려울 뿐만 아니라, 해저 토질의 이동에 의해 다시 매꾸어질 수도 있기 때문에 관측자료가 실제의 빙쇄굴 깊이를 정확히 나타낸다고 할 수는 없다.

둘째로, 실험을 통해 빙쇄굴 메커니즘을 연구하는 방법인데 보통 얼음을 강체 (rigid indenter) 로 취급하여 경사지거나 수평한 토질층 위로 움직이게 하는 것이다.⁴⁾⁵⁾ 이 방법을 통해 빙-토질의 상호작용에 미치는 주요 변수들의 상관관계를 파악할 수 있으며 빙쇄굴 깊이와 하부 토질의 변형에 대한 추정도 가능하다. 그러나 실험에서는 빙쇄굴 모델이 실제보다 아주 단순하며 또한 특정 지역의 빙-토질 특성을 대변할 수 있는 조건을 만족시키기 어렵다는 점에서 그 한계가 있다.

셋째로, 이론 및 수치적인 해석방법을 들 수 있는데 통상 실험적인 방법과 병행하여 사용된다. 현재까지 몇 가지 빙쇄굴 모델이 소개된 바 있는데 그중 주목할 것은 Chari⁵⁾ 와 Kioka and Saeki⁶⁾ 의 빙쇄굴 모델이다. Chari 의 모델에서는 에너지 보존의 법칙을 적용하여 처음 얼음이 가지고 있던 운동에너지가 모두 토질의 소성변형 및 마찰로 흡수되어 버릴 때 빙쇄굴이 정지된다고 가정하는 것이다. 이 모델에서는 수직방향 이동이나 회전운동은 고려하지 않고 있다. Kioka and Saeki 는 얼음의 속도를 일정하게 하여 경사진 해저면을 쇄굴하는 모형 실험을 수행하였는데, 이 결과를 기초로 하여 빙쇄굴 깊이와 얼음에 작용한 환경추력을 계산하는 수치 모델을 제안하였다. Kioka and Saeki 의 모델은 얼음의 수직상승에 따른 쇄굴궤적을 고려하고 있지만 실험상의 제한으로 일정한 수평속도만 다루었다.

본 논문에서는 앞에 언급한 Chari 의 모델과 Kioka 의 모델을 통합하여 얼음의 수평이동과 수직상승을 모두 고려하는 빙쇄굴 수치 모델을 제시하였다. 본 모델은 얼음의 질량, 속도, 토질의 강도 특성 등 여러 가지 환경변수에 대하여 파이프라인 설치 해역의 빙쇄굴 깊이와 해저면에 작용하는 빙하중을 계산한다. 또한 본 논문에서는 이를 이용하여 사할린 해역에 대한 예제 계산을 수행하였고 또한 환경변수의 변화가 빙쇄굴 깊이에 미치는 영향을 매개변수 연구를 통해 조사하였다.

2. 빙쇄굴 모델

2.1 빙쇄굴 관측자료

빙맥/빙산에 의한 빙쇄굴 현상은 전형적인 극지 환경으로서 특히 수심 30 m 이내의 해안에서 흔히 발생한다. 공개된 자료에 따르면, 캐나다 Beaufort Sea 의 경우 음파탐측과 사진판독에 의해 조사된 빙쇄굴의 흔적은 해안으로부터 수심 50 m 정도까지 분포되어 있으나 빙쇄굴이 주로 발생하는 수심은 20-35 m, 빙쇄굴 깊이는 보통 0.6-2.1 m 정도이며 최대 5 m 이하로 보고되고 있다.⁷⁾ 알래스카측 Beaufort Sea 의 경우는 빙쇄굴 깊이는 평균 0.58 m, 표준편차 0.59 m

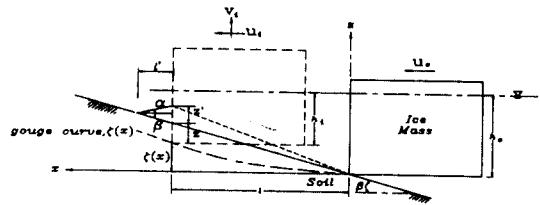
로서 수심 30-35 m 에서 최대 4 m, 수심이 6 m 보다 낮거나 58 m 이상에서는 빙쇄굴 깊이가 1 m 를 넘지 않는다.²⁾

오호츠크해 (Sea of Okhotsk) 의 사할린섬 근해에서는 일년생 혹은 다년생의 두터운 빙맥이 해안에서 좌초된 상태로 많이 발견된다. 특히 사할린섬의 북동쪽 해안은 해안의 경사가 얼음이 표류하는 이동방향으로 형성되어 있기 때문에 유빙과 빙맥들이 얇은 해안에 접근하여 좌초되기 쉽다. 이러한 좌초된 빙맥 (stamukhi) 은 두께가 30 m 이상, 길이 300 m, 폭 150 m 에 중량이 수십만 ton 이나 되는 경우도 있으며 수심 20 m 이내의 해저면에 빙쇄굴을 발생시킨다.³⁾ 1백만 ton 급의 얼음에 의해서라면 수심 20 m 의 해저면이 쇄굴되는 깊이는 5 m 까지도 들어갈 수 있으나, 대부분의 빙쇄굴은 수심 5-10 m 에서 쇄굴 깊이가 0.5-1.0 m, 폭 0.8-1.5 m 를 넘지 않는다. 사할린섬 북부에서 빙맥에 의해 파어진 해저면의 깊이는 최대 2.13 m 이었다. 러시아의 설계규정에 의하면 빙해역에서의 파이프라인 매설깊이는 최소 1 m 를 넘도록 정하고 있다.⁵⁾

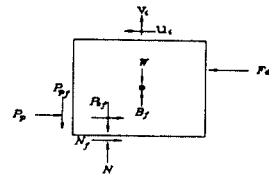
2.2 빙쇄굴 모델

빙산이나 빙맥은 바람이나 해류 등에 의해 처음에는 일정한 속도로 움직이며 해안으로 이동하다가 아주 완만한 경사의 해저면에 충돌한다. 이후 얼음은 토질의 저항력에 의해 수평 및 수직운동을 한다. 이때 토질은 얼음을 수직상승시킬 정도의 큰 강도를 가지며, 얼음에 의해 굴삭된 흙은 모두 얼음의 전면과 측면에 쌓이며 토질의 체적변화는 없다고 가정한다. 또한 토질의 저항력 변화나 추력에 의한 얼음의 회전은 무시된다. 사각형 블록으로 이상화된 얼음이 경사 해저면을 굴삭하면서 이동하는 과정이 Fig. 1에 나타나 있다. 해저면과 충돌하는 동안 여러 종류의 저항력이 얼음에 작용하고 이 힘들은 빙쇄굴 거리가 증가함에 따라 더욱 커지게 된다. 저항력의 종류는 얼음의 측면과 전면에 작용하는 토압, 바닥에 작용하는 토질 반력과 동마찰력 그리고 얼음 전체에 작용하는 중량과 부력이다.

얼음의 이동거리가 $x = l$ 인 순간에 대하여 에너지 보존법칙으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.



(a) Ice Scouring Process



(b) Free Scour Diagram

Fig. 1 Schematic diagram of ice scouring process

$$\frac{1}{2} M u_0^2 = \frac{1}{2} M u_i^2 + \frac{1}{2} M v_i^2 - \int_0^l F_d dx + \int_0^l P_h dx + \int_0^{\zeta(l)} P_v dz + \int_0^{\zeta(l)} W' dz \quad (1)$$

- 여기서 M = 얼음의 질량
- u_0 = 얼음의 초기 속도
- u_i, v_i = 임의 순간의 얼음의 수평 및 수직속도 성분
- F_d = 얼음의 수평방향 추력 (즉 해류의 항력)
- W' = 얼음의 유효 중량 (= $W - B_f$)
- W, B_f = 임의 순간의 얼음의 중량과 부력
- P_h, P_v = 토질 총저항력의 수평 및 수직방향 성분
- dx, dz = 쇄굴곡선 $\zeta(x)$ 를 따라 증가하는 수평/수직 거리의 증분
- $\zeta(l)$ = 임의 순간 ($x = l$) 에서 얼음이 상승한 수직높이
- l, z = 임의 순간 빙쇄굴 길이와 깊이

얼음에 의해 굴삭된 흙은 체적변화가 없다는 가정 하에서 전면에 쌓인 흙의 부피와 측면에 쌓인 흙의 부피를 더한 것과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} Bx^2 \tan \beta - B \int_0^l \zeta(x) dx \\ & = \frac{l' z' B}{2} + \frac{z'^2 (l+l')^2}{3l} \cot \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $B =$ 얼음의 폭

$l', z' =$ 임의 순간에 얼음의 전면 상재토의 길이와 높이

$\alpha, \beta =$ 상재토의 경사각 및 해저면의 수평면에 대한 경사각

빙쇄굴 깊이 z 와 전면 수동토압 P_p 는 (3)식과 (4)식으로 표현된다. 여기서 소성평형은 토질의 전단 파괴 이후에도 유지된다고 가정하는 Rankine 수동토압의 개념을 적용한다.

$$z = x \tan \beta - \zeta(x) \quad (3)$$

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma h_s^2 B K_p \quad (4)$$

여기서 $K_p = \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}$

$\phi =$ 토질의 내부마찰각

$$h_s = z + z'$$

측면 수동토압은 얼음과 토질의 접촉면 기하학에 따라 다음과 같이 나뉘어 표현된다.

$$P_s = \int_0^{h_s \cot \beta} \int_0^{\varepsilon \tan \beta} \gamma' \eta K_{ps} d\eta d\varepsilon$$

for $h_s \leq L \tan \beta'$

$$P_s = \int_{h_s \cot \beta' - L}^{h_s \cot \beta'} \int_0^{\varepsilon \tan \beta'} \gamma' \eta K_{ps} d\eta d\varepsilon$$

for $h_s > L \tan \beta'$ (5)

여기서 $\tan \beta' = \frac{[\zeta(x) + h_s]}{x}$

$$K_{ps} = \tan^2 \left(-\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

그리고 η 와 ε 는 dummy variable 이다 (Fig. 1 참조).

얼음 전면 및 측면의 마찰력은 다음 식으로 표현된다.

$$P_{bf} = \mu_k P_p$$

$$P_{sf} = \mu_k P_s \quad (6)$$

여기서 μ_k 는 얼음과 토질 사이의 동마찰계수이다. 수직방향의 운동방정식은 다음과 같다.

$$(M + m_a) \frac{d^2 \zeta(x)}{dt^2} = -W + N + P_{bf} + P_{sf} \quad (7)$$

여기서 $M =$ 얼음의 질량

$m_a =$ 얼음의 부가질량

$N =$ 바닥면 토질 반력

식(7)에서 P_{bf}, P_{sf} 의 부호는 얼음이 쇄굴곡선 $\zeta(x)$ 를 따라 움직일 때 $\frac{d\zeta}{dx}$ 의 부호에 따라 달라진다.

본 논문에서는 Newton-Raphson 방법에 의해 비선형 연립방정식을 풀어서 빙쇄굴 깊이와 빙하중을 계산하였다. 얼음과 해저면의 접촉 이후 얼음은 토질 속으로 움직이기 시작한다. 경사 해저면으로 인해 수평이동은 수직상승도 유발하여 빙쇄굴 깊이가 변화된다. 얼음과 토질 사이의 반력은 수직성분을 가지기 때문에 얼음은 변화되는 유효 중량과 토질의 수직반력이 평형을 이룰 때까지 상향 또는 하향으로 조금 움직인다. 얼음의 이러한 이동궤적은 얼음의 크기와 질량, 이동속도, 해저면 토질의 종류와 강도 특성과 매우 밀접한 관계가 있다. Kioka and Saeki⁽⁶⁾ 는 실험 자료를 근거로 쇄굴곡선을 아주 완만한 2차곡선으로 가정하였는데, 본 연구의 예제 계산에서도 쇄굴곡선을 2차곡선으로 하고 쇄굴깊이의 10% 정도 상승하는 것을 가정하였다.

빙-토질 상호작용에 의해 매설된 파이프라인에 전달되는 하중은 다음 절차에 따라 계산된다. 먼저 본 빙쇄굴 모델로부터 해저면에 직접 작용하는 빙쇄굴 하중 (수직력 및 수평력) 을 구한 뒤 이것이 작용하는 접촉면적을 추정하여 분포하중을 계산한다. 다음으로 토질을 통해 파이프라인 위치에 발생하는 응력을 계

산한다. 이 과정은 해저 지반을 2차원 반무한 영역의 균질, 등방성의 탄성체로 가정하여 해를 구한다. 파이프라인이 매설된 위치에서 실제로 토질은 완전 소성 또는 탄소성으로 거동할 수 있다. 그러나 토질에 비해 강성이 큰 파이프라인의 변형은 토질보다 훨씬 작을 것이며 파이프라인의 변형을 직접적으로 알기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 본 논문에서는 매설 파이프라인의 변위를 그 지점의 토질 변위와 같다고 간주하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 예제 계산

본 연구의 빙쇄굴 모델에서 빙-토질 상호작용을 해석하기 위한 입력자료는 얼음의 질량과 크기, 이동속도, 얼음의 초기 흡수, 해저 토질의 종류와 내부마찰각, 단위중량, 해저면 경사각, 굴삭토의 퇴적 경사각 등이다. 사할린 해역의 예제 계산에 사용된 입력자료가 Table 1 에 나타나 있으며 해석결과는 Table 2 에 정리되었다.

Table 1 Input data for Sakhalin Offshore

| Input Descriptions | | Sakhalin Offshore |
|---------------------|---|-------------------|
| Ice Properties | Weight (ton) | 100,000 |
| | B × L × H (m ³) | 20×200×27.8 |
| | Velocity (m/s) | 1.5 |
| | Initial Draft (m) | 24.39 |
| | Unit Weight (ton/m ³) | 0.9 |
| | Drag Coefficient | 1.0 |
| | Added Mass Coefficient | 1.0 |
| Soil Properties | Effective Unit Weight (ton/m ³) | 1.0 |
| | Shear Strength (ton/m ²) | 5.0 |
| | Internal Friction Angle (°) | 30 |
| | Dynamic Friction Coefficient | 0.1 |
| | Surcharge Soil Slope | 1/10 |
| | Seabed Slope | 1/100 1/1000 |
| Sea Water Condition | Unit Weight (ton/m ³) | 1.025 |
| | Current Velocity (m/s) | 1.5 |
| | Scour Curve | $\zeta(x) = cx^2$ |

** c = 6.250E-06

Table 2 Maximum forces and ice scour depth for Sakhalin Offshore

| Seabed Slope | Descriptions | Chari's Model | Present Model | Remarks |
|--------------|-------------------|---------------|-------------------|---|
| | | | $\zeta(x) = cx^2$ | |
| 1/100 | Scour Depth | 1.0 | 1.0 | $M = 10^5 \text{ ton}$ $u_o = 1.5 \text{ m/s}$ |
| | Horizontal Force | 243 | 187 | |
| | Vertical Force | 125 | 404 | |
| | Side Friction | - | 67 | |
| | Drag Force | 54 | 55 | |
| | Horizontal Stress | 12.1 | 3.75 | |
| | Vertical Stress | 5.7 | 0.10 | |
| 1/1000 | Scour Depth | 0.35 | - | $\gamma_s = 1.87 \text{ ton/m}^3$ $Z = 0.5\text{-}1.0\text{m}$ (max 2.13 m) |
| | Horizontal Force | 89 | - | |
| | Vertical Force | 37 | - | |
| | Side Friction | - | - | |
| | Drag Force | 57 | - | |
| | Horizontal Stress | 11.7 | - | |
| | Vertical Stress | 4.96 | - | |

Fig. 2은 얼음이 1.5 m/s 의 초기 속도로 해저 경사면을 쇄굴하기 시작하면서 정지할 때 까지의 수평속도의 변화를 나타내고 있다. Chari 모델의 속도 변화를 계산하여 본 빙쇄굴 모델의 속도와 비교하였다. 동일 지점에서의 속도 차이는 약간 있으나 전체 쇄굴 거리에는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 해저면 빙쇄굴 깊이는 Fig. 3에 나타내었는데 수직상승을 고려하지 않은 경우 1.1 m, 수직상승을 고려한 경우 1.0 m 로 사할린 해역에서 관측된 보통의 빙쇄굴 깊이 1.2 m 와 큰 차이는 없었다. Fig. 4는 빙쇄굴 과정에서 얼음에 작용한 토질의 수평력 및 수직력 변화를 나타낸 것이다. 본 수치 모델의 경우 수직상승을 고려하지 않은 경우 수평력이 208 ton, 수직력이 99 ton 으로서 Chari 의 모델보다 14-21% 작으나 수직상승을 고려한 경우 수평력이 177 ton, 수직력이 521 ton (즉 수평력에 대한 수직력의 비 = 2.9) 으로서 Chari 의 모델보다 수평력은 27% 작으나 수직력은 약 3배 더 크다. 이는 약간의 수직상승이 해저면에 작용하는 수직력에 큰 영향을 미칠 수 있다는 점을 시사하고 있으며 수평력에 대한 수직력의 비가 3 정도라는 유한요소 해석결과와 일치한다.¹⁰⁾

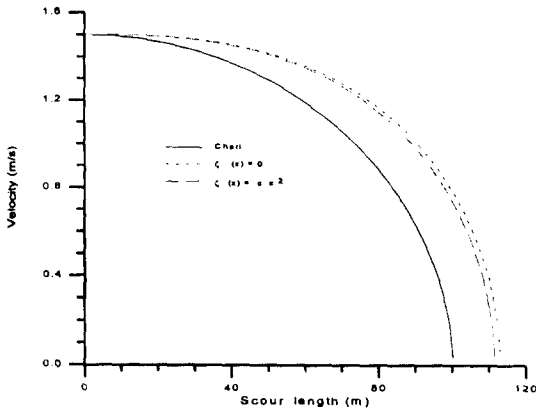


Fig. 2 Ice model velocity during ice scour

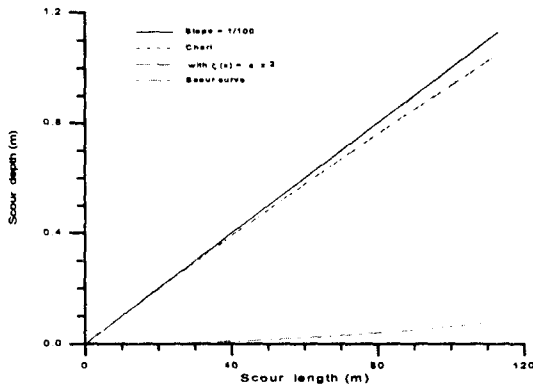


Fig. 3 Ice scour depth versus scour length

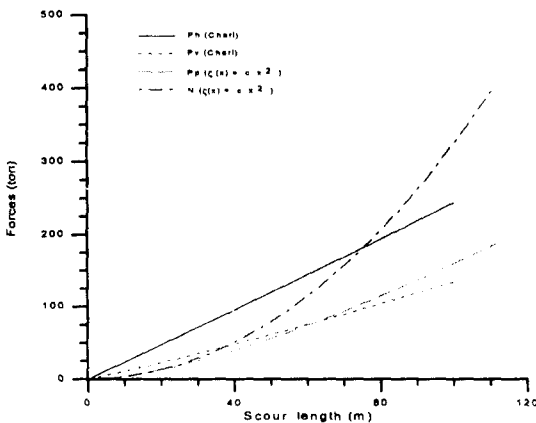


Fig. 4 Changes of applied forces and resistances

Fig. 5은 빙쇄굴면에서의 단위폭당 수직응력 q_0 에 의해 토질을 통해 전달된 수직 및 수평응력을 깊이 에 따라 나타낸 것이다. 이 때 수직응력 q_0 은 최대 수직력을 얼음의 폭으로 나눈 것으로서 현재 관측자료가 존재하지 않기 때문에 접촉길이는 단위 길이로 가정하였다. 그 결과를 보면 해저면하 깊이 2 m 에서 거의 70% 정도의 하중이 감소된 것을 알 수 있다. 실제 관측자료로부터 정확한 접촉면적을 측정할 수 있다면 좀 더 현실적인 수치를 얻을 수 있으리라 판단된다.

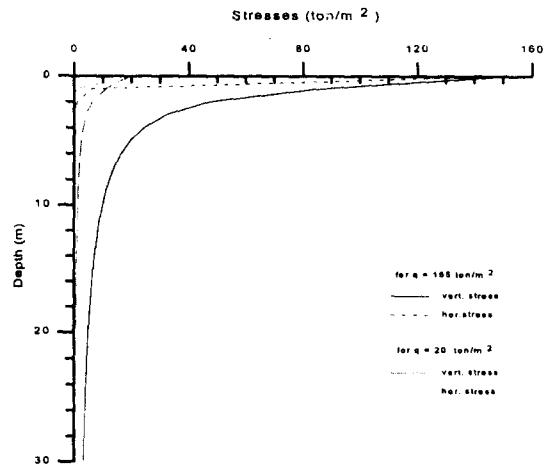


Fig. 5 Stresses transmitted through soil depth due to ice-soil interaction

3.2 매개변수 연구

빙쇄굴 과정에 영향을 미치는 주요 환경변수는 얼음의 특성 (얼음의 질량과 크기, 이동속도, 초기 홀수), 해저면 경사와 토질의 특성 (토질의 단위 중량, 내부마찰각) 해양 특성 (해류의 속도와 해수 밀도, 수심) 이 있다. 빙쇄굴 깊이와 빙하중을 산정하는 데는 이러한 여러 변수들의 실측자료가 충분히 축적되어야만 한다. 본 연구에서는 이러한 주요 환경변수들이 빙쇄굴 깊이와 매설된 파이프라인에 작용하는 빙하중에 미치는 영향을 조사하기 위하여 매개변수 연구를 수행하였다.

매개변수 연구에서는 얼음의 질량이 일정할 때 수직상승의 정도 (빙쇄굴 곡선), 해저면 경사각, 쇄굴폭, 토질의 내부마찰각과 단위중량, 토질의 동마찰계수를

변화시켜 가면서 이것들이 빙쇄굴 과정에 미치는 정도를 살펴보았다. 매개변수 연구를 위한 입력자료는 Table 3 에, 최대 빙쇄굴 깊이와 작용 하중에 대한 계산결과는 Table 4 에 수록되어 있다. Table 3 에서 Case 11, 12, 13 은 얼음의 폭과 길이 및 높이의 비가 1:2:0.8 인 형상을 사용하였고 Case 14, 15, 16 은 1:5:0.8 인 약간 긴 형상을 사용한 것이다. 얼음의 수직상승을 $\zeta(x) = cx^2$ 으로 가정한 경우에 대하여 빙쇄굴 속도, 이동거리에 대한 빙쇄굴 깊이, 토질의 수직 및 수평 저항력의 변화를 Fig. 6에서 Fig. 8에 나

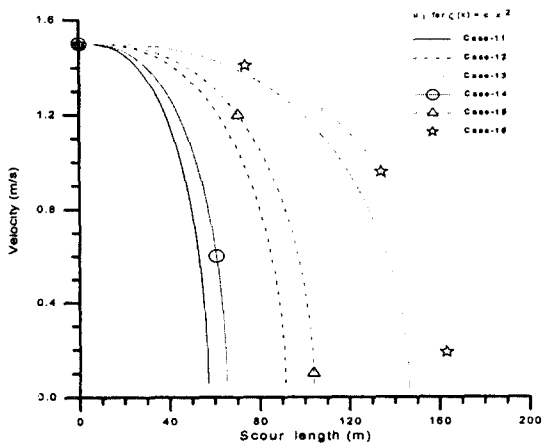


Fig. 6 Ice velocity versus scour length for $\zeta(x) = cx^2$

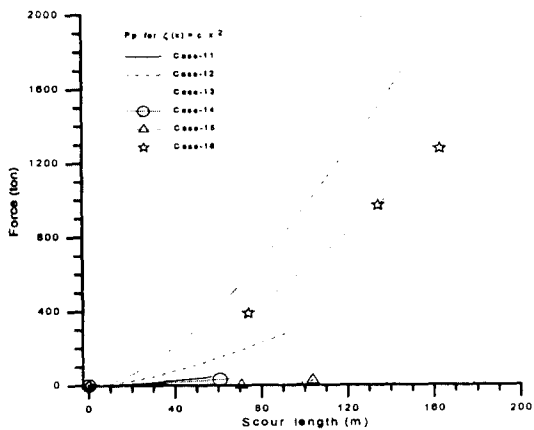


Fig. 7 Frontal Passive pressure versus scour length for $\zeta(x) = cx^2$

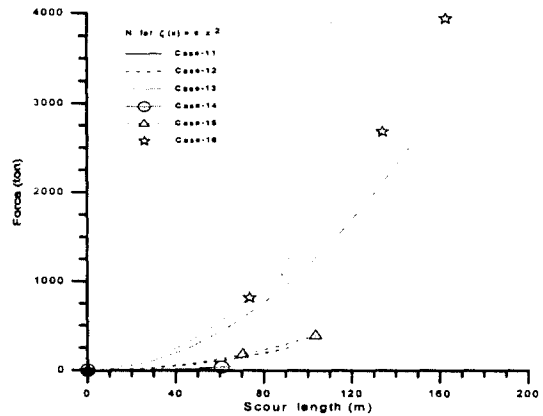


Fig. 8 Vertical reaction force versus scour length for $\zeta(x) = cx^2$

타내었다. 또한 기준치로부터 각 변수들의 변화가 빙쇄굴 깊이와 빙하중에 미치는 영향의 정도를 Fig. 9 와 Fig. 10 에 나타내었다. 여기서 기준치는 얼음의 중량 100,000 ton, 얼음의 폭은 $B = 20$ m, 해저면 경사각 $\tan \beta = 1/100$, 퇴적토 경사각 $\alpha = 15^\circ$, 토질의 단위중량 $\gamma_d = 1.75 \text{ ton/m}^3$, 토질의 내부마찰각 $\varphi = 10^\circ$, 동마찰계수 $\mu = 0.1$ 를 각각 사용하였다.

Table 3 Input data for parametric study

| Case No. | Case-11 | Case-12 | Case-13 | Case-14 | Case-15 | Case-16 |
|-------------------------|------------------------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
| Ice Weight | 10,000 | 100,000 | 1,000,000 | 100,00 | 100,000 | 1,000,000 |
| Ice Breadth | 19.08 | 41.10 | 88.55 | 14.06 | 30.29 | 65.25 |
| Ice Length | 38.16 | 82.21 | 177.11 | 70.29 | 151.43 | 326.24 |
| Ice Height | 15.26 | 32.88 | 70.84 | 11.25 | 24.23 | 52.20 |
| Initial Draft | 13.40 | 28.87 | 62.20 | 9.87 | 52.20 | 45.83 |
| Initial Velocity | 1.5 m/s | | | | | |
| Unit Weight | 0.9 ton/m^3 | | | | | |
| Soil Unit Weight | 1.75 ton/m^3 | | | | | |
| Internal Friction Angle | 10° | | | | | |
| Kinetic Friction Angle | 0.1 or 0 | | | | | |
| Surcharge Soil Angle | 15° | | | | | |
| Water Unit Weight | 1.025 ton/m^3 | | | | | |
| Seabed Slope | 1/100 | | | | | |
| Current Velocity | 1.5 m/s | | | | | |
| Scour Curve | $\zeta(x) = cx^2$ | | | | | |

Table 4 Maximum forces and ice scour depth for parametric study

| | Case-11 | Case-12 | Case-13 | Case-14 | Case-15 | Case-16 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Scour Depth, Z | 0.55 | 0.86 | 1.33 | 0.62 | 0.97 | 1.47 |
| Scour Length, X | 56.8 | 91.3 | 146.3 | 65.0 | 103.8 | 163.8 |
| Drag Force, F_d | 11.1 | 53.2 | 249.6 | 6.0 | 29.1 | 136.7 |
| Frontal Soil Resistance, P_p | 44.7 | 280.0 | 1710.7 | 34.1 | 213.9 | 1288.7 |
| Side Friction, P_f | 8.5 | 40.9 | 184.3 | 10.4 | 48.0 | 210.0 |
| Bottom Friction, N_f | 2.8 | 24.9 | 250.2 | 4.0 | 38.6 | 399.4 |
| $P_p - P_f - N_f$ | 56.0 | 345.8 | 2145.2 | 48.5 | 300.5 | 1898.1 |
| Effective Weight, W' | 15.1 | 180.4 | 2149.6 | 26.7 | 316.8 | 3558.5 |
| Bottom Reaction, N | 28.0 | 249.0 | 2502.0 | 40.0 | 386.0 | 3994.0 |
| Frontal Vertical Friction, P_{fV} | 4.5 | 28.0 | 171.1 | 3.4 | 21.4 | 128.9 |
| Side Vertical Friction, P_{fV} | 8.5 | 40.9 | 184.3 | 10.4 | 48.0 | 210.0 |
| $N - P_{fV} - P_{fH}$ | 15.0 | 180.1 | 2146.6 | 26.2 | 316.6 | 3555.1 |
| $A_{Fd} = B \times h$ | 255.3 | 1184.6 | 5496.7 | 138.4 | 642.2 | 2979.5 |
| $A_{Pp} = B \times H$ | 40.7 | 149.5 | 542.4 | 30.5 | 112.2 | 404.1 |
| $A_{P_{fV}}$ | 53.8 | 162.5 | 438.4 | 69.7 | 188.8 | 493.9 |

해저면 경사각의 영향은 경사각이 1/400 에서 1/50 까지 변화할 때 빙쇄굴 깊이는 0.27 에서 1.27 m 까지 변한다 (Fig. 9 와 Fig. 10 에는 %로 나타낸 상대 변화량만을 나타내고 있다). 경사가 급할수록 쇄굴거리가 짧고 쇄굴깊이는 커지며 해저면 경사각에 의한 영향이 다른 변수들 보다 큰 것을 알 수 있다 (Fig. 9). 또한 얼음 전면에 작용하는 토질 저항력은 89.4-401.1 ton 으로서 경사가 커질수록 토질 저항력은 매우 큰 변화를 보이고 있다 (Fig. 10). 다음으로 얼음의 질량에 의한 영향은 무게가 25,000 ton 에서 200,000 ton 까지 변화할 때 빙쇄굴 깊이는 0.49 m 에서 최대 1.09 m 로, 예상대로 질량이 클수록 쇄굴깊이가 증가함을 알 수 있다. 얼음 전면에 작용하는 토질 저항력은 114.2-399.1 ton 으로 질량이 클수록 토질 저항력이 증가함을 알 수 있다. 이는 얼음의 크기가 커지면 그에 따라 토질과 접촉하는 면적이 늘어나기 때문이다. 그리고 퇴적토 경사각이 3.75°에서 30°까지 변화할 때 빙쇄굴 깊이는 1.17 m 에서 0.66 m 로 경사각이 증가할수록 쇄굴깊이는 작아진다. 그리고 토질 저항력은 165.3-354.2 ton 으로 변화하고 있다.

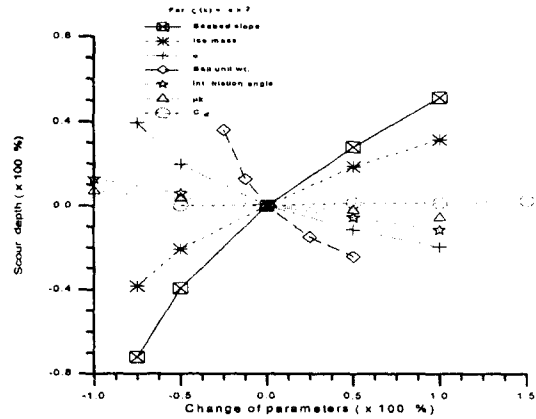


Fig. 9 Effect of parameters on ice scour depth

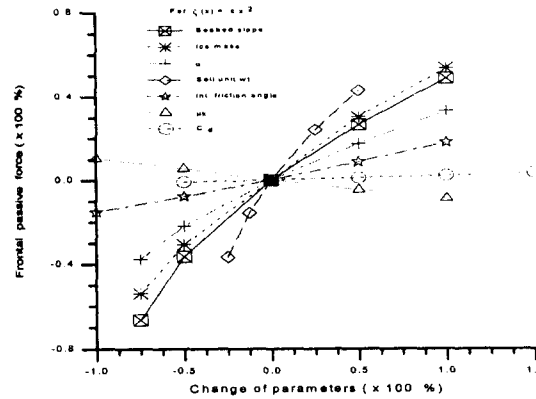


Fig. 10 Effect of parameters on the frontal resistance of soil

토질의 단위중량의 영향을 보면 단위중량이 1.31 ton/m³ 에서 2.63 ton/m³ 까지 변화할 때 빙쇄굴 깊이는 1.14 m 에서 0.63 m 로, 토질의 단위중량이 증가할수록 쇄굴깊이는 감소함을 알 수 있다. 또한 토질 저항력은 167.3-380.4 ton 으로, 토질의 단위중량이 증가할수록 토질 저항력은 크게 감소함을 알 수 있다. 토질의 내부마찰각이 0°에서 20°까지 변화할 때 빙쇄굴 깊이는 0.94 m 에서 0.73 m 로 경사각이 증가할수록 쇄굴깊이는 작아진다는 것을 알 수 있다. 토질 저항력은 224.0-313.2 ton 로 토질의 내부마찰각이 증가할수록 감소한다. 또한 얼음과 토질 사이의 동마찰계수가 증가할수록 쇄굴깊이는 감소하지만 그 변화량은

아주 작고 얼음 전면에 작용하는 토질 저항력은 동마찰계수가 증가할수록 감소한다.

4. 결 론

본 연구에서는 극지 파이프라인의 설계에 있어 가장 중요한 고려사항인 빙쇄굴 메커니즘을 이해하고 빙해역 해저 파이프라인의 안전 매설깊이를 산정하기 위해 빙쇄굴 수치 모델을 개발하였다. 본 모델에 의해 빙-토질 상호작용을 해석한 결과는 다음과 같다.

사할린 해역의 경우 본 모델로 계산된 최대 빙쇄굴 깊이는 관측자료와 일치하며 Chari 모델의 해석결과와 거의 비슷한 결과를 준다. 작용 하중은 수직상승을 고려하지 않은 경우 본 모델이 Chari의 모델보다 약간 작은 값을 주지만, 얼음이 빙쇄굴 깊이의 10%만큼 수직상승시 하중은 Chari 모델보다 약 3배 더 크게 계산된다. 본 모델은 Chari 모델보다는 빙쇄굴 깊이가 작게 계산되지만 비교적 큰 수직하중을 해저 지반에 작용시킨다. 이러한 결과는 수직상승의 정도에 따라 빙하중에 많은 차이가 날 수 있음을 뜻하며 따라서 빙쇄굴 곡선은 해당 해역의 해저면 관측자료로부터 검증받을 필요가 있다.

한편 본 빙쇄굴 모델은 빙해역에 출현하는 얼음의 크기로부터 파이프라인의 매설깊이를 추정할 수 있으며, 반대로 빙쇄굴 관측자료로부터 특정 해역에 나타나는 얼음의 규모나 속도 등에 대한 역추정도 가능하다. 매개변수 연구를 통해 빙-토질 상호작용에서 환경변수들이 빙쇄굴 깊이와 빙하중에 미치는 영향을 분석하였는데, 토질의 단위중량, 해저면 경사각 그리고 얼음의 질량이 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 얼음을 사각형 블록으로 이상화한 것은 그다지 현실적이지는 않지만 빙쇄굴 과정을 단순화하고 관련되는 인자들을 명확히 할 수 있다는 점에서 시도하였다. 빙쇄굴에 대한 추후의 연구과제로 직육면체가 아닌 형상, 즉 빙산(iceberg) 혹은 빙맥(ice ridge) 등의 실제 형상을 고려한 빙쇄굴 모델을 만드는 것이다. 여기에는 얼음의 손상과 토질의 파괴도 함께 고려할 것이다. 다음으로 얼음의 크기와 속도, 토질 특성에 따른 실험실 또는 현장 실험에 의한 빙쇄굴 곡선의 검증이 필요하다.

후 기

본 논문은 현대중공업(주)에서 지원한 산학협동연구비에 의해 수행된 연구결과물의 일부이며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) Lanan, G.A., Niedoroda, A.W. and Weeks, W.F., "Ice Gouge Hazard Analysis", Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-5298, pp.57-66, 1986
- 2) Machemehl, J.L. and Jo, C.H., "Ice Gouge Study in the Alaskan Beaufort Sea", 한국해양공학회지, 제3권 2호, pp.545-550, 1989
- 3) Pilkington, G.R. and Marcellus, R.W., "Methods of Determining Pipeline Trench Depths in the Canadian Beaufort Sea", Proceedings of the 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Quebec, Canada, Vol.II, pp.674-687, 1981
- 4) Clark, J.I. et al., "Development of a Design Methodology for Pipelines in Ice Scoured Seabeds", ASME Proceedings of the 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, USA, Vol.V, pp.107-125, 1994
- 5) Chari, T.R., "A Model Study of Iceberg Scouring in the Northern Atlantic", Journal of Petroleum Technology, Vol.32, pp.2247-2252, 1980
- 6) Kioka, S. and Saeki, H., "Mechanisms of Ice Gouging", Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, The Hague, The Netherlands, Vol.II, pp.398-402, 1995
- 7) Palmer, A.C., Konuk, I., Love, J., Been, K. and Comfort, G., "Ice Scour Mechanisms", Proceedings of the 10th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Lulea, Sweden, Vol.I,

- pp.123-132, 1989
- 8) Gulati, K.C., "Design Concepts for Sakhalin Offshore Production Platforms", Proceedings of the 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Hamburg, Germany, Vol.2, pp.487-496, 1993
 - 9) Astafiev, V.N., Polomoshnov, A.M. and Truskov, P.A., "Stamukhi on the Northern Sakhalin Offshore", Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference, Edinburgh, The United Kingdom, Vol.II, pp.462-466, 1991
 - 10) Yang, Q.S. et al., "Analysis of Subscour Deformation by Finite Element Method", Proceedings of the Fourth Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, St. John's, Newfoundland, Canada, pp.739-754, 1993
 - 11) Been, K., Kosar, K., Hachey, J., Rogers, B.T. and Palmer, A.C., "Ice Scour Models", Proceedings of the 9th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.5, pp.179-188, 1990
 - 12) Green, H.P., Reddy, A.S. and Chari, T.R., "Iceberg Scouring and Pipeline Burial Depths", Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Helsinki, Finland, Vol.I, pp.280-288, 1983