

극지 파이프라인 매설깊이 산정을 위한 빙맥의 해저면 쇄굴모델

양 태 수* · 최 경 식**

Ice Ridge Scour Model for Estimation of Arctic Pipeline Trench Depths

Tae-Soo Yang* · Kyung-Sik Choi**

Abstract

Ice ridge scour occurring in certain cold offshore regions is a serious problem endangering the integrity of seabed installations. One of the major design considerations for arctic underwater pipelines is the determination of the potential ice scour depth by ice ridge. This study describes an energy balance model for the ocean floor scouring by ice ridges. It is assumed that the ice ridge moves along the scouring curve at a uniform deceleration. It is also assumed that the driving forces caused by wind and current are large enough to advance the ice ridge and that the ice ridge is strong enough to withstand the imposed loads by all agencies involved. Using an ice ridge-seabed interaction process, ice scour depth is easily calculated. The model simulates the scouring process for various environmental parameters such as ice mass, incoming velocity, soil strength etc. This study also deals with various interacting forces during the scouring process and discusses ice loads which are transmitted to seabed.

* 한국해양대학교 해양공학과 석사과정

** 한국해양대학교 조선·해양공학부 부교수

1. 서론

북극권은 인류에게 남겨진 최후의 천연자원보고로서 대규모의 석유와 천연자원이 매장되어 있다. 그러나 이 지역은 빙해역과 영구동토대가 분포된 곳으로 저온과 해빙이라는 극지 특유의 자연환경으로 인하여 천연자원을 탐사, 시추, 생산하는 데 많은 어려움이 존재한다.

극지방 해빙에 의한 충격하중은 이미 설치된 구조물이나 선박의 운항에 커다란 위험요소가 되지만 더욱 심각한 것은 이미 설치된 극지 파이프라인에 치명적인 손상을 입히는 빙쇄굴(ice gouging)이다.

빙쇄굴이란 떠돌아다니는 빙산(iceberg)이나 빙맥(ice ridge or pressure ridge) 또는 커다란 얼음덩어리(ice masses)가 해저면에 좌초되거나 이동하면서 해저면을 긁어 나가는 현상이다. 빙쇄굴은 빙해역을 통과하는 극지 파이프라인에 직접적이고도 치명적인 손상을 초래하기 때문에 반드시 파이프라인은 빙쇄굴 깊이보다 아래쪽에 매설되어야만 한다. 그러나 얼음덩어리가 직접 극지 파이프라인에 닿지 않는다고 하더라도 얼음덩어리에 의한 거대한 압력은 해저지반으로 전달되어 파이프라인을 손상시킬 수 있다.

본 연구에서는 빙해역 극지 파이프라인에 가장 큰 위험요소인 빙쇄굴을 해석함에 있어서 기존의 직육면체 빙쇄굴 모델을 벗어나 경사면을 갖는 빙맥의 빙쇄굴 모델을 채택하였다. 그리고 빙맥 모델의 초기 운동에너지가 해저토질의 저항력과 해저면 경사에 의한 위치에너지로 모두 전환되는 에너지 평형을 적용하였다. 해저토질의 저항력은 Coulomb의 수동토압이론을 사용하였으며 위치에너지는 쇄굴곡선에 따라 움직이는 빙맥의 유효중량으로 계산을 하였다. 이에 대한 결과로서 초기 운동에너지에 대한 빙쇄굴 깊이, 그리고 해저지반에 작용하는 수직력 등을 고찰하였다. 그리고 빙모델 전면각도의 변화에 따른 빙쇄굴 깊이를 계산하였고 이 때의 해저토질의 저항을 고찰하였다.

또한 빙맥 모델이 해저면에 작용하는 압축력을 계산하여 이 압축력이 해저지반을 통하여 극지 파이프라인에 전달되는 압력을 간단한 계산법[8] 및 적분변환법[5]을 적용하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 빙쇄굴 모델의 정식화

빙맥은 비교적 작은 속도로 움직이나 거대한 크기로 인해 막대한 운동에너지를 가지게 된다. 빙맥은 해저면과 만나기 전에는 해류와 바람에 의한 평형상태를 유지하면서 일정한 속도로 움직인다. 빙맥은 일정한 속도로 움직이며 얇은 해안으로 접근을 하

면서 해저면과 접촉한다. 빙맥의 운동에너지는 해저면 경사로 인해 위치에너지로 전환되고 또한 해저토질을 쇄굴하면서 진행되는 데 사용된다. 즉, 빙맥의 초기 운동에너지는 점점 증가하는 토질 저항, 중력의 저항력을 받으면서 진행하는데 이때 빙맥 속도의 감소에 따른 유체항력을 함께 받게 된다. 이들의 힘이 평형을 유지할 때 빙맥은 정지하게 된다.

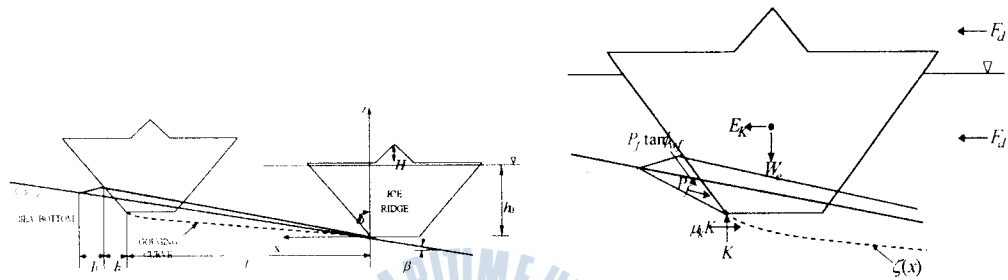


Fig.2.1 Idealized theoretical concept of ice ridge scouring

Fig.2.1의 이상적인 빙맥 모델에 대한 빙쇄굴 과정을 에너지 보존관계를 이용하여 표현하면 식 (2.1)과 같다.

$$E_K + \int F_d ds = \int P ds + E_P \quad (2.1)$$

여기서,

E_K Initial kinetic energy of iceridge.

E_P Instant potential energy of iceridge.

F_d Drag force on ice ridge due to current and wind.

P Soil resistance of ice ridge.

ds Infinitesimal displacement increment along function $\zeta(x)$.

빙쇄굴에 대한 관측결과에 따르면 수백 m 혹은 수십 km에 걸쳐 균일하며 기다란 홈을 형성하는 것이 대부분이다[2]. 본 논문에서도 에너지 보존식에 쇄굴곡선 $\zeta(x)$ 을 도입할 때[4] 빙쇄굴에 대한 관측결과를 이용하였다. 또한 해저면을 쇄굴하는 동안 빙맥의 감소로 유체추진항력을 받게 되며 초기 운동에너지가 감소되는데, 빙맥의 속도는 균일하게 감소한다고 가정하였다[1]. 빙맥이 해저바닥과의 마찰로 인해 손상을 입게 되면 그 자체의 불안정으로 회전운동을 할 수 있으나 본 논문에서는 고려하지 않았다.

빙맥의 강도는 해저토질의 강도보다 상대적으로 크기 때문에 강체로 가정 할 수 있다 [1][2]. 해저토질의 저항은 빙맥 전면의 해저면에 대한 연속적인 절삭과 빙맥 양 측면, 그리고 바닥의 토질마찰력으로 표현되는데, 특히 빙맥 전면과 양 측면의 토압을 산정하기 위하여 빙맥과 토질사이의 벽마찰각을 고려한 Coulomb의 수동토압이론[8]을 적용하였다.

2.1 빙맥 전면 퇴적토의 높이

빙맥은 초기 운동에너지가 소진할 때까지 일정한 해저경사각 β 인 해저면을 쇄굴하는데 쇄굴된 해저토는 빙맥의 전면, 양 측면 그리고 전면과 측면 사이에 자연사면 (angle of the displaced soil) α 을 가지면서 쌓이게 된다. Fig.2.1에 표현된 바와 같이 쇄굴된 해저토는 체적변화가 없다는 가정하에, 빙맥 수면하부(keel)가 수평 이동거리 l 에 이를 때까지 쇄굴된 토량에 수직상승에 따라 감소된 토량을 수면하부 경사에 의해 쇄굴된 토량을 합한 것과 같다. 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} B l^2 \tan \beta - B \int_0^l \zeta(x) dx + \frac{1}{2} B d^2 c_1 \\ &= \frac{1}{2} (l_1 + l_1 k_1 c_1) l_1 k_1 B + \frac{1}{3} (l + l_1 k_1 c_1) \left\{ \frac{l_1 k_1 (l + d c_1)}{l + (l_1 k_1 + d) c_1} \right\}^2 \cot \alpha \\ & \quad + \frac{1}{3} (l_1 + l_1 k_1 c_1) l_1^2 k_1^2 \cot \alpha \quad (2.2) \end{aligned}$$

여기서,

- B Width of ice ridge ; width of scour.
- d Depth of scour at any instant of time during gouging.
- l Length of scour at any instant of time during gouging.
- l_1 Length of surcharged soil on the front face of ice ridge.
- α Angle of slope of displaced soil.
- β Angle of slope of sea bottom.
- dx Infinitesimal displacement increment in the horizontal direction of function $\zeta(x)$.
- $\zeta(x)$ Scouring curve.
- $c_1 = \tan \omega / (1 - \tan \beta \tan \omega)$

$$k_1 = \tan \alpha + \tan \beta$$

빙맥 전면 퇴적토의 높이 h 는 식 (2.3)을 사용하여 구할 수 있다.

$$h = l_1 k_1 = l_1 (\tan \alpha + \tan \beta) \quad (2.3)$$

빙쇄굴 깊이 d 는 식 (2.4)를 이용하여 비교적 간단하게 구해진다.

$$d = l \tan \beta - \zeta(l) \quad (2.4)$$

2.2 빙맥의 초기 운동에너지

빙맥이 해저면과 만나기 전까지는 해류와 바람에 의한 추진력으로 평형을 유지하며 일정한 속도 U_0 로 움직인다. 빙맥의 초기 운동에너지 E_K 는 식 (2.5)으로 표현이 된다.

$$E_K = \frac{1}{2} M U_0^2 \quad (2.5)$$

여기서,

M Mass of ice ridge.

U_0 Initial steady-state velocity
of ice ridge.

2.3 해류와 바람에 의한 유체력

빙맥에 작용하는 항력은 해류에 대해 물에 잠겨있는 투영면적과 바람에 대한 수면 밖의 투영면적에 의한 함수로 나타낼 수 있다. 해류와 바람에 의한 유체항력을 계산하는 데 있어서 까다로운 일은 항력계수 C_d 을 선택하는 일이다. 왜냐하면 빙맥이나 빙산의 자연적인 형상에 대한 항력계수의 경우 많은 연구가 되어 있지 않기 때문이다. 빙산의 항력계수로 Russel et al.(1977)은 거친 육면체에 대하여 0.35, 거친 구에 대하여 0.45를 제시하였으며, Budinger(1960)는 항력계수의 범위를 0.2~1.0으로 보았으며 그의 계산에서는 0.2를 사용하였다[1]. Kovacs et al. (1973)은 수면하부의 단면을 거친 반원형(semi-circular)과 반타원형(semi-elliptical)으로 보았는데 반원형의 항력계수

는 0.8, 반타원형의 항력계수는 0.5로 보았다[6]. DnV에서는 정사각형의 항력계수를 1.0으로 제시하였으며, 직사각형으로 변하면서 1.0~1.4의 범위에 있는 값을 사용할 것을 제시하고 있다[7].

해류에 의한 유체항력은 다음 식으로 계산한다.

$$F_{dw} = \frac{1}{2} C_{dw} \rho_w A_w U_1^2 \quad (2.6)$$

여기서,

A_w Projected area of a submerged ice ridge normal to propelling current.

C_{dw} Drag coefficient of ice ridge due to current.

F_{dw} Drag force on ice ridge due to current.

U_1 Differential velocity between propelling current and a decelerating ice ridge.

ρ_w Density of sea water.

바람에 의한 유체항력은 다음 식으로 계산한다.

$$F_{da} = \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_a U_2^2 \quad (2.7)$$

여기서,

A_a Projected area of ice ridge normal to propelling wind.

C_{da} Drag coefficient of ice ridge due to wind.

F_{da} Drag force on ice ridge due to wind.

U_2 Differential velocity between propelling wind and a decelerating ice ridge.

ρ_a Density of air.

2.4 토질의 저항

빙맥에 대한 모델이 전면 수직면과 w 의 각도로 기울어져 있기 때문에 벽체와 토질 사이의 마찰을 고려하고, 실제 활동면의 형상을 직선으로 가정한 Coulomb의 수동토압 이론을 빙맥의 전면과 양 측면에 각각 적용하였다. 빙맥의 전면에 작용하는 Coulomb

의 수동토압은 다음 식으로 계산된다.

$$P_f = P_{pf} \left(1 + \frac{h_f}{d} \right) \quad (2.8)$$

여기서,

$$P_{pf} = \frac{1}{2} K_{pf} \rho_s g h_f^2 B$$

$$h_f = d + d c_1 \tan \beta = (1 + c_1 \tan \beta) \{ l \tan \beta - \zeta(l) \}$$

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

여기서,

K_{pf} Coefficient of passive earth pressure on the front face of ice ridge.

h_f Height of reposed soil in front of ice ridge.

P_f Soil resistance on the front face of ice ridge.

P_{pf} Coulomb passive earth pressure on the front face of ice ridge.

ρ_s Density of undrained soil.

φ Angle of ice keel with respect to horizontal plane.

ϕ Angle of internal friction.

ϕ_{wf} Frictional angle between ice ridge and soil.

빙맥의 양 측면에 작용하는 Coulomb의 수동토압은 다음 식으로 계산한다.

$$P_s = P_{ps} \left\{ 1 + \frac{l \tan(\beta + \phi) - l \tan \beta}{d} \right\} \quad (2.9)$$

여기서,

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

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

여기서,

K_{ps} Coefficient of the passive earth pressure on the side face of ice ridge.

P_{ps} Coulomb passive earth pressure on the side face of ice ridge.

P_s Soil resistance on the front face of ice ridge.

η Dummy variable.

ε Dummy variable.

ϕ Angle of surcharged soil with respect to sea bottom slope.

ϕ_{ws} Frictional angle between ice ridge and soil.

빙맥의 바닥과 해저면 사이에 작용하는 접촉력을 계산하기 위하여 수직방향 운동방정식을 세우면 다음 식과 같다.

$$K = W_e + P_f \tan \phi_{wf} \cos \omega + P_s \tan \phi_{ws} - (M + m) \frac{d^2 \zeta(x)}{dt^2} \quad (2.10)$$

여기서,

K Contact pressure between iceridge and soil.

m Added mass of ice ridge.

W_e Effective weight of ice ridge.

2.5 위치에너지

빙맥이 해저면과 만나기 전의 초기홀수는 h_0 이며 쇄굴곡선 $\zeta(x)$ 을 따라서 움직임에 따라 빙맥의 홀수는 점점 줄어든다. 또한 빙맥의 수직상승으로 인한 부력의 감소로 유효중량의 증가를 가져온다. 빙맥에 대한 유효중량은 식 (2.11)로 표현된다.

$$\begin{aligned} W_e = & \rho_i g V - \rho_w g V_s = \rho_i g B \{ (H - 0.1T)^2 \cot 20^\circ + (3.3H \\ & + 0.1T) B_b + T^2 \tan \omega + (3.3H + 1.1T) (3.3H - 0.9T) \tan \omega \} \\ & - \rho_w g B [B_b + \{ 3.3H - \zeta(x) \} \tan \omega] \{ 3.3H - \zeta(x) \} \end{aligned} \quad (2.11)$$

여기서,

- B_b Breadth of keel bottom.
 B_k Total ice keel breadth.
 g Gravitational acceleration.
 H Sail height of ice ridge.
 T Thickness of ice floe.
 V Volume of ice ridge.
 V_s Submerged volume of ice ridge.
 ρ_i Density of ice ridge.
 ω Keel side slope angle.

임의의 순간 빙맥의 위치에너지는 다음의 식으로 계산된다.

$$E_P = \int_0^{\xi(t)} W_e dz \quad (2.12)$$

3. 파이프라인에 전달되는 빙하중

극지 파이프라인이 얼음의 직접적인 접촉범위 아래에 묻혀있다 하더라도 토질을 통해 전달되는 빙하중에 의하여 파이프라인이 손상될 우려가 있기 때문에, 직접적인 쇄굴깊이뿐만 아니라, 토질을 통해 파이프라인에 전달되는 빙하중도 고려하여 파이프라인의 안전한 굴삭깊이를 결정하여야 한다.

본 논문에서는 해저면에 가해지는 빙하중에 의해 해저지반에 전달되는 응력이 어느 정도인지를 간단한 계산법[8] 및 적분변환법[5]을 이용하여 대략적으로 추정하였다.

3.1 간단한 계산법

지중응력이 일정한 각도로 분포한다고 가정하고, 또한 임의의 깊이에서 지중응력은 이것이 분포되는 범위까지 동일하다고 가정하면 주어진 깊이에서 분포된 모든 응력의 합계는 지표면에 놓인 하중과 동일하다.

Fig.3.1에 보여진 바와 같이 폭 $2b$ 인 정사각형 분포하중은 재하영역의 끝에서부터 각도 α 를 가지며 토질 속으로 퍼지므로 지표로부터 z 인 깊이에서 하중분포면적 A_z 는 다음과 같이 계산된다.

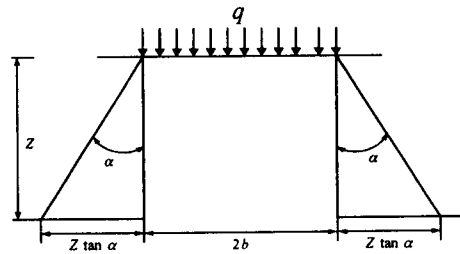


Fig.3.1 Simple method of the calculating earth stress

$$A_z = (2b + 2z \tan \alpha)^2 \quad (3.1)$$

따라서 깊이 z 에 있어서의 응력 q_z 는 다음과 같다.

$$q_z = \frac{4b^2 q}{A_z} = \frac{b^2 q}{(b + z \tan \alpha)^2} \quad (3.2)$$

3.2 적분변환법

균질하고 등방성이며 또한 탄성인 반무한 재질의 경계면에 수직 분포하중이 작용하는 경우의 응력을 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -\frac{2p_0}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2az}{x^2 + z^2 - a^2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{az(a^2 - x^2 + z^2)}{[(a+x)^2 + z^2][(a-x)^2 + z^2]} \right\} \\ \sigma_{zz} &= -\frac{2p_0}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2az}{x^2 + z^2 - a^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{az(a^2 - x^2 + z^2)}{[(a+x)^2 + z^2][(a-x)^2 + z^2]} \right\} \\ \sigma_{xz} &= -\frac{4ap_0}{\pi} \left\{ \frac{xz^2}{[(a+x)^2 + z^2][(a-x)^2 + z^2]} \right\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

위 식은 $x^2 + z^2 > a^2$ 의 범위에서 유용하지만, 만약 $x^2 + z^2 < a^2$ 의 범위에 해당 하는 응력을 구하려면 σ_{xx} 그리고 σ_{zz} 에 $-p_0$ 을 더하여 주어야 한다.

Fig.3.2에서 보는 바와 같이 빙쇄굴이 진행되는 동안 빙맥은 불균등한 수직력 K 가 해저면에 작용한다.

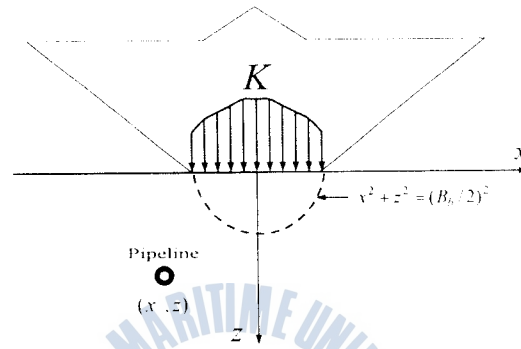


Fig.3.2 Ice load transmitted through subsoil

이러한 현상에 적분변환법을 적용하기 위해서 접촉력 K 를 빙맥의 밑면으로 나누는 $K/(B \times B_b)$ 의 값이 균등하게 수직으로 작용한다고 가정을 한다. 그러면 이 하중에 의해 해저지반에 전달되는 응력이 얼마인지를 알 수 있는데 반원인 $x^2 + z^2 = (B_b/2)^2$ 을 경계로 식 (3.3)을 이용하여 해저지반에 전달되는 응력을 구할 수 있다.

4. 계산 결과

4.1 계산 결과 및 검증

빙쇄굴 깊이와 해저면에 전달되는 빙하중을 계산하기 위하여 본 수치 모델에서는 Table 4.1에 제시된 초기 입력자료를 사용하였다. 여기서 사용된 값들은 지금까지 극지 해양환경에서 관측된 일반적인 사항들이다.

제시된 빙맥의 기하학적 형상과 초기 속도를 이용하여 초기 운동에너지를 구하였으며 해저토질의 특성을 바탕으로 Coulomb의 수동도압, 해저면의 접촉압력 그리고 전달된 빙하중을 구하였다. 극지 해양환경 조건으로부터 빙맥의 추진력인 유체항력과 수직 상승에 의한 위치에너지를 계산하였다.

Table 4.1 Initial input data

| Properties | Descriptions | Initial Value |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Ice Ridge Properties | Sail Height : H | 8m |
| | Ice Thickness : T | 3m |
| | Breadth : B_b | 24m |
| | Keel Slope : ω | 60° |
| | Width : B | 35m |
| | Ice Density : ρ_i | 917kg/m ³ |
| Soil Properties | Soil Density : ρ_s | 1500kg/m ³ |
| | Internal Frictional Angle : ϕ | 37.5° |
| | Front Frictional Angle : ϕ_{wf} | 25.4° |
| | Side Frictional Angle : ϕ_{ws} | 24° |
| | Displaced Soil Angle : α | 33.02° |
| Environmental Properties | Sea Bottom Slope : β | 1 : 500 |
| | Scouring Curve : $\zeta(x)$ | 0.0002x |
| | Current Velocity | 1.3m/sec |
| | Wind Velocity | 19m/sec |
| | Water Density : ρ_w | 1028kg/m ³ |
| | Air Density : ρ_a | 1.3kg/m ³ |
| | Drag Coefficient : C_d | 0.3 |
| | Added Mass Coefficient : C_m | 0.5 |
| | Dynamic Friction Coeff. : μ_k | 0.04 |

4.1.1 Chari의 결과와 비교

본 빙쇄굴 모델의 검증을 위해서 연구결과가 비교적 많은 Chari[1][2][3]의 결과와 비교를 하였다. 본 수치모델에서 빙모델 측면과 바닥의 마찰력을 무시하고, 위치에너지를 고려치 않는 수평운동만 가정하였으며 빙모델의 형상을 직육면체로 바꾸었다. 또한 토질의 저항을 Mohr-Coulomb 포락선을 이용하여 전단강도를 내부마찰각으로 전환하였다.

본 연구에서는 항력계수 0.5이고 흙의 전단강도가 50kPa인 경우에 대해서 Fig.4.1에서 살펴보았다. 그리고 해저경사각을 1:100, 1:250, 1:500, 1:750, 1:1000으로 변화를 주면서 쇄굴깊이를 비교하였다(Fig.4.2).

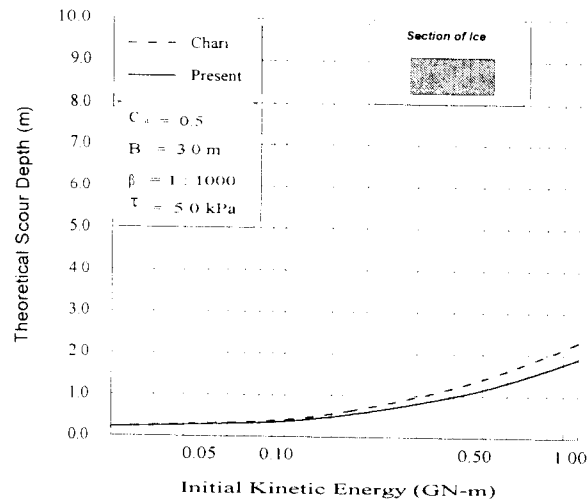


Fig.4.1 Comparison of the computed scour depth($C_d = 0.5$, $\tau = 50\text{kPa}$)

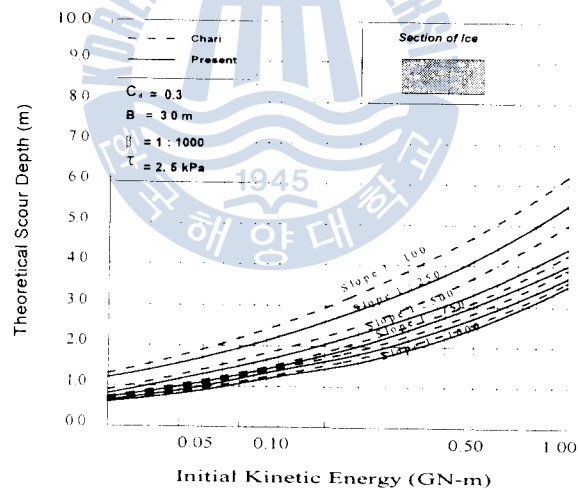


Fig.4.2 Comparison of the scour depth due to differential sea bottom slopes

전체적으로 Chari의 결과와 비교를 할 때 초기 운동에너지가 $0.1\text{GN}\cdot\text{m}$ 이하일 때는 쇄굴깊이가 매우 일치할 하였지만 $0.1\text{GN}\cdot\text{m}$ 에서 $1\text{GN}\cdot\text{m}$ 의 범위에서는 차이가 있다. 이는 Chari의 모델은 토질의 전단강도로 토질저항력을 계산하였지만 본 수치모델은 토질의 중량을 바탕으로 한 내부마찰각과 벽마찰각을 고려한 Coulomb의 수동토압을 이용하면서 그 원인을 찾을 수 있다.

4.1.2 빙맥의 빙쇄굴 깊이와 토질저항력

새로운 빙쇄굴 모델을 사용하여 빙쇄굴 깊이와 토질저항력을 계산하기 위하여 본 연구에서는 항력계수 C_d 을 0.3으로 빙모델의 폭을 35m로 하였으며 해저경사각 β 는 1:1000으로 하고, $\zeta(x)$ 는 2:10000으로 하였으며 해저토의 포화단위밀도 ρ_s 를 1500kg/m^3 으로 하였다. 이 값들을 각각 변화시키면서 초기 운동에너지에 대한 쇄굴깊이(Fig.4.3~4.6)를 계산하였다.

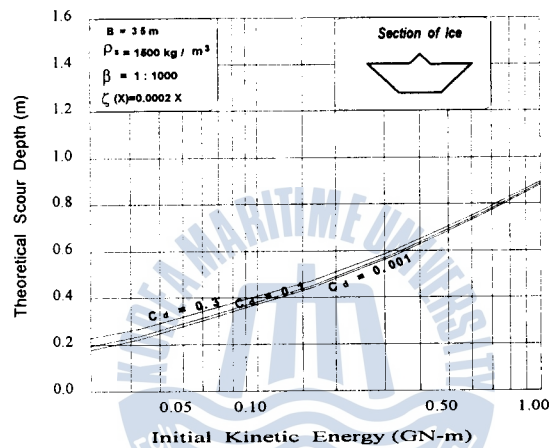


Fig.4.3 Calculated scour depth due to different drag coefficients

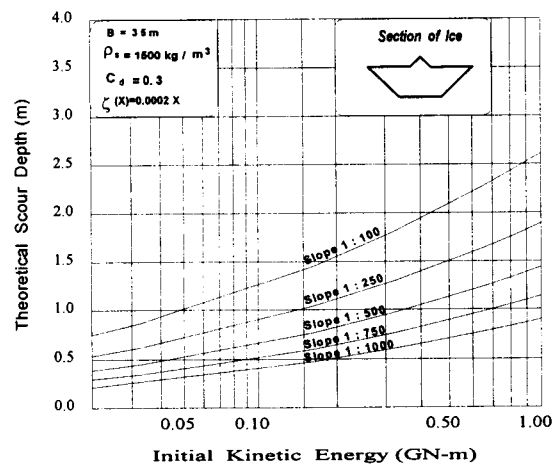


Fig.4.4 Calculated scour depth due to different sea bottom slopes

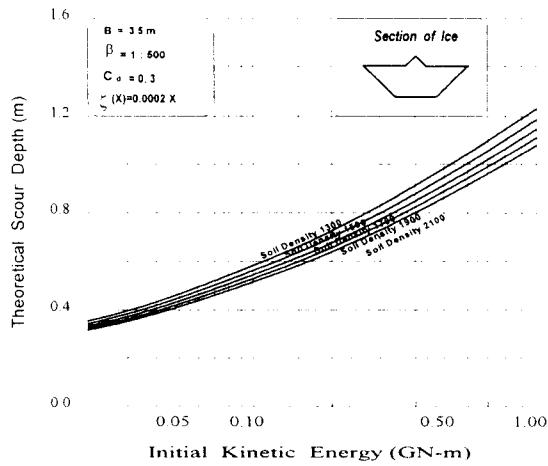


Fig.4.5 Calculated scour depth due to different soil densities

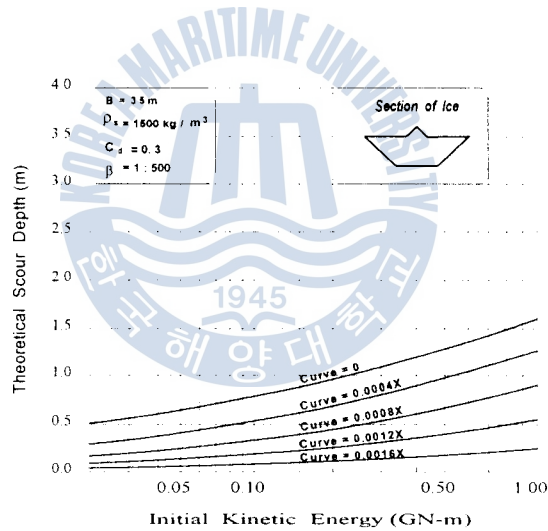


Fig.4.6 Calculated scour depth due to different scouring curves

항력계수가 작아지면 쇄굴깊이는 작아지지만 큰 차이가 없으며 해저경사각이 커지면 쇄굴깊이는 커진다. 또한 해저경사각의 차이에 의해 쇄굴깊이는 크게 변한다. 그리고 토질의 포화단위밀도가 작으면 쇄굴깊이는 커지지만 포화단위밀도의 변화에 커다란 영향은 없으며 쇄굴곡선의 기울기가 커짐에 따라 쇄굴깊이는 작아진다.

다음으로 해저면에 전달되는 빙하충을 산정하기 위해서 쇄굴거리에 대한 빙모델 전면, 양 측면 그리고 바닥에 작용하는 접촉하중에 대해서 고찰하였다. 여기에서도 마찬가지로 항력계수, 해저경사각, 포화단위밀도 그리고 쇄굴곡선의 기울기를 각각 변화시

키면서 해저토질의 저항력(Fig.4.7~4.10)을 계산하였다.

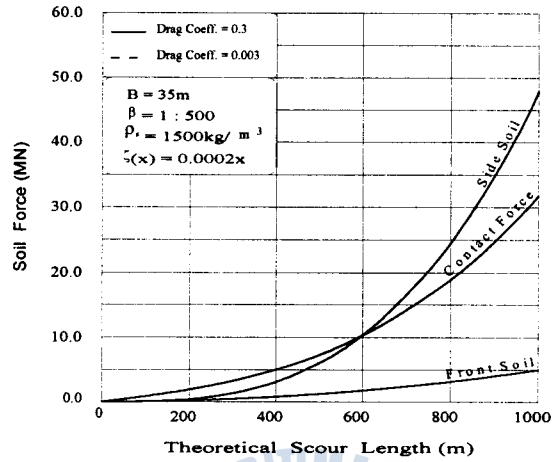


Fig.4.7 Calculated soil force due to different drag coefficients

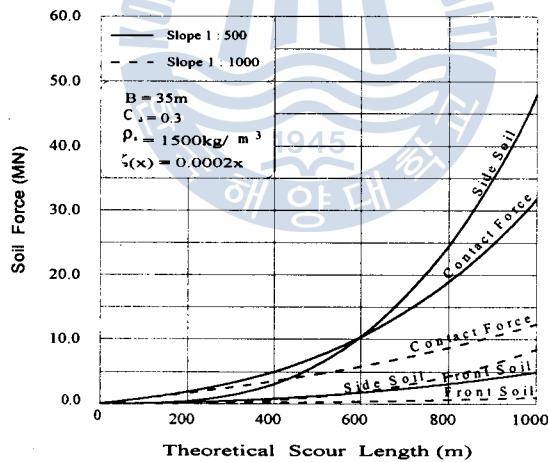


Fig.4.8 Calculated soil force due to different sea bottom slope

항력계수의 변화에 따라 쇄굴거리에 대한 각각의 해저토질 저항력의 변화량은 거의 차이가 없다. 해저경사각의 기울기가 커짐에 따라 쇄굴거리 600m 지점을 기준으로 빙 모델 측면에 작용하는 압력이 빙 모델 바닥에 작용하는 접촉력을 초과하게 된다. 그리고 빙 모델 바닥에 작용하는 접촉력은 쇄굴거리가 커짐에 따라서 많이 증가한다.

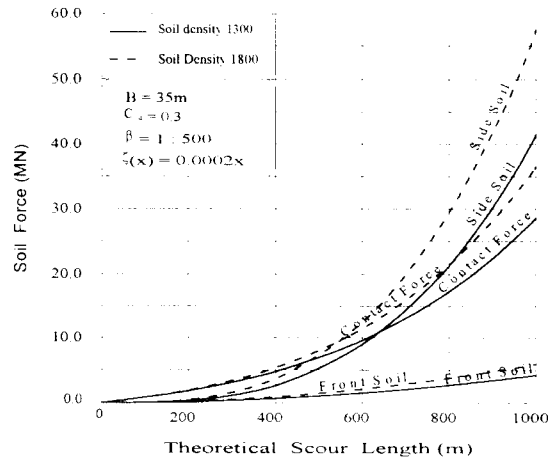


Fig.4.9 Calculated soil force due to different soil densities

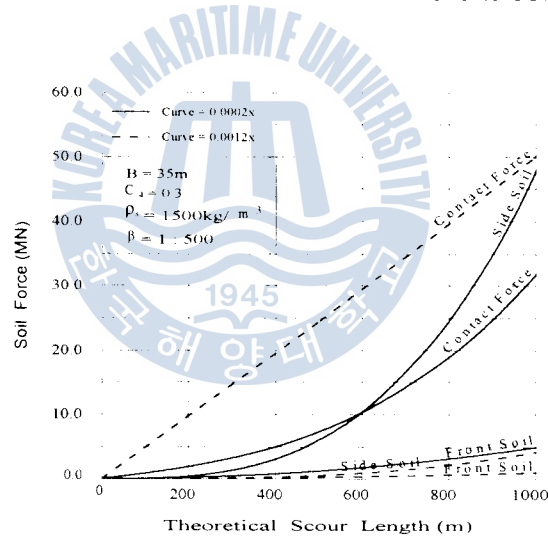


Fig.4.10 Calculated soil force due to different scouring curves

해저토의 포화단위밀도가 커짐에 따라 빙모델 양 측면에 작용하는 힘은 커지고 있음을 알 수 있다. 그리고 빙모델 바닥에 작용하는 접촉력도 해저토질의 포화단위밀도가 커짐에 따라서 증가함을 알 수 있다. 그러나 포화단위밀도에 의한 힘의 변화는 항력계수의 변화, 해저 경사각의 변화 그리고 쇄굴곡선의 변화와 비교할 때 변화량이 작은 편이다. 쇄굴곡선의 기울기가 커짐에 따라서 빙모델 전면에 작용하는 힘과 그 변화량이 가장 작으며 또한 그 크기가 줄어든다. 또한 빙모델의 양 측면과 바닥에 작용하는 접촉력은 급격하게 그 값이 작아진다.

4.1.3 해저토질로 전달되는 빙하중

본 연구에서는 빙모델의 바닥에 작용하는 접촉력을 빙모델 바닥의 면적으로 나눈 접촉압력이 균등하게 작용하는 것으로 가정하였다. 접촉력은 빙모델이 최종의 위치에 왔을 때의 힘으로서 접촉압력을 간단한 계산법과 적분변환법을 사용하여 빙모델의 중앙 위치에서 해저지반 깊이에 따른 빙하중을 계산해 보았다.

대표적으로 빙모델 전면각도 ω 가 60° , 24° 인 경우에 대해서 항력계수 C_d 를 0.3, 해저경사각 β 을 1:500으로 한 다음, 초기 운동에너지가 0.1GN-m, 1GN-m, 2GN-m에 대한 해저지반 깊이에 따른 접촉압력의 분포를 간단한 계산법(Fig.4.11a)과 적분변환법(Fig.4.11b)에 나타내었다.

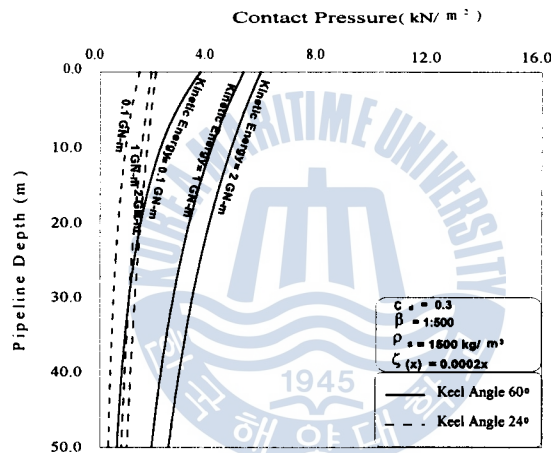


Fig.4.11a Calculated earth stresses due to different keel slopes

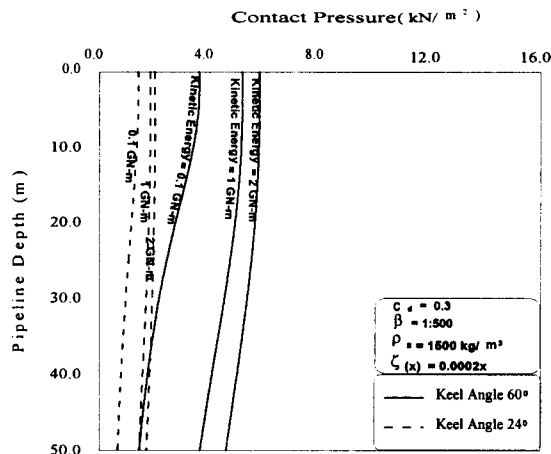


Fig.4.11b Calculated earth stresses due to different keel slopes

빙모델의 형상을 3차원적으로 축소 및 확대하면서 빙모델 전면각도 ω 를 $0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시켜 초기 운동에너지를 0.2GN-m, 1GN-m, 2GN-m로 바꾸면서 빙쇄굴 깊이를 Fig.4.12에 나타내었다. 위의 결과에서 빙모델 전면각도 30° 근방에서 제일 작은 빙쇄굴 깊이가 계산되었다. 이는 기존의 관측결과와 같음을 보여주고 있다. 이것은 전면각도가 30° 일 때 빙모델 전면, 양 측면, 바닥면에서 최대의 토질 저항력이 작용하기 때문이다.

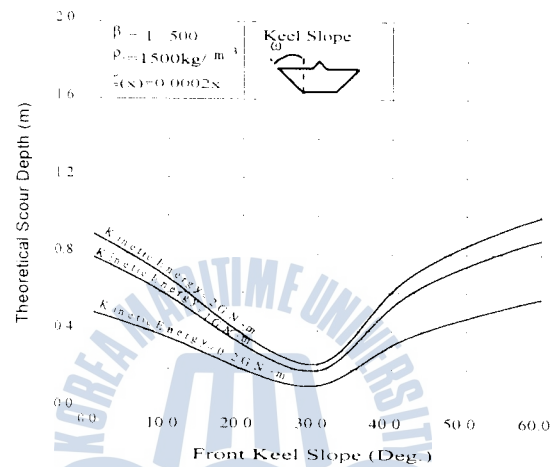


Fig.4.12 Calculated scour depth due to different keel slopes

5. 결론

본 연구에서는 빙해역 극지 파이프라인에 가장 큰 위험요소인 빙쇄굴을 해석함에 있어서 기존의 직육면체 빙쇄굴 모델을 벗어나 경사면을 갖는 빙백의 빙쇄굴 모델을 채택하였다. 이에 대한 결과로서 초기 운동에너지에 대한 빙쇄굴 깊이, 그리고 해저지반에 작용하는 수직력 등을 고찰하였다. 그리고 빙모델 전면각도의 변화에 따른 빙쇄굴 깊이를 계산하였고 이 때의 해저토질의 저항을 고찰하였다. 또한 빙백 모델이 해저면에 작용하는 접촉력을 계산하여 이 압축력이 해저지반을 통하여 극지 파이프라인에 전달되는 압력을 간단한 계산법 및 적분변환법을 적용하여 그 결과를 고찰하였다.

본 모델을 개발함에 있어서 빙모델이 쇄굴곡선 $\zeta(x)$ 을 따라서 움직인다고 가정하였으며 빙모델이 해저면과 만나는 동안 선형으로 감속한다고 보았다. 이를 가정하지 않고 토질과 빙모델의 상호작용으로 인한 운동방정식을 유도하여 보다 명확한 빙쇄굴 메커니즘을 밝혀야 할 것이다. 또한 본 모델의 검증은 받기 위해 많은 현장실험이 뒷받침되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Chari, T. R. and Muthukrishnaiah, K., 1978, "Iceberg Threat to Ocean Structures", Proceeding, Symposium on ice Problems, International Association for Hydraulic Research, Lulea, Sweden, pp.421~435.
- [2] Chari, T. R., 1979, "Geotechnical Aspects of Iceberg Scours on Ocean Floors", Canadian Geotechnical Journal, Vol.16, pp. 379~390.
- [3] Chari, T. R., 1980, "A Model Study of Iceberg Scouring in the North Atlantic", Journal of Petroleum Technology, Vol.32, pp.2247~2252.
- [4] Shinji Kioka and Hiroshi Saeki, 1995, "Mechanisms of Ice Gouging", Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, The Hague, The Netherlands, Vol. II, pp.398~402.
- [5] Ajit K. Mal and Sarva Jit Singh, 1991, *Deformation of Elastic Solids*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [6] Lawrence Blum Karp, 1980, *Concept Development of a Concrete Structure Founded in the Ice-Stressed Chukchi Sea-A Case of Ice/Structure Interaction in an Offshore Arctic Region*, Department of Civil Engineering, Construction Engineering and Management, University of California, Technical Report No.8.
- [7] Mihoo H Patel, 1989, *Dynamics of Offshore Structures*, Butterworths.
- [8] 金 翔圭, 1995, *土質力學(理論과 應用)*, 清文閣