

極地 海洋 構造物과 얼음의 動的 모델화 Dynamic Interaction Modelling between Arctic Offshore Structures and Ice Floe

황철성*·김상준*

Chul Sung Hwang* and Sang Joon Kim*

要 旨 : 극지에서의 충돌 빙하중의 크기를 구하기 위해 지반, 구조 및 구조물을 일체로 하는 동적 모델을 제시하였다. 지반은 감쇠 효과를 고려한 비선형 스프링으로 이상화하였으며, 부빙과 구조물의 상호작용은 얼음의 특성을 고려한 비선형 스프링으로 이상화하였다. 이 모델에 의한 여름과 겨울의 부빙의 질량과 속도에 따른 영향을 모래지반과 시일트지반에 대해 각각 해석하여 에너지 평형 방법과 비교하였다. 해석 결과 모래지반의 경우는 대체적으로 에너지 평형 방법에 의한 값이 동적 모델에 의한 값보다 작게 나타났으며, 시일트지반의 경우는 그 반대로 나타났다.

Abstract □ In this study, the nonlinear dynamic model of the systems which include the offshore structure, the surrounding sea water in terms of the added mass, the foundation in terms of frequency independent springs, dashpots, and the floating ice feature with its hydrodynamic added mass, are proposed for the problem of the large ice floes impact.

Dynamic Analysis is performed on two site conditions, sand site and silt site, and on two seasons, winter and summer, for various ice floe velocities. As a result of study, Ice floes from energy balanced method is lower than that from dynamic modelling on sand site, and higher than that on silt site.

1. 서 론

일반적으로 사용되는 빙하중 산출법인 에너지 평형 방법은 대형 얼음이 빠른 속도로 충돌했을 경우의 지반에 의한 영향을 고려할 수 없다. 따라서, 이 경우는 구조물과 토질 및 얼음에 대한 동적 모델의 형성과 해석을 필요로 한다.

구조물에 대한 얼음의 충돌은 계절에 따라 상이한 특성을 나타낸다. 여름의 경우는 비교적 반경이 작은 얼음이 조류 등에 의해 빠른속도로 구조물에 부딪치는 반면, 겨울에는 큰 반경의 얼음이 느린속도로 충돌하게 된다. 또한, 온도에 따라 얼음의 재료 성질이 달라지므로 각 경우에 대한 동적해석을 통해 구조물의 내구성이 평가되어야 한다. 본 논문에서는 여름기간 중 반경이 300m 인 얼음이 0.5~1.0 m/sec 로 충돌할 경우에 대해 해석하였으며, 겨울기간은 반경 150m 인 얼음에 대해 0.1~0.5 m/sec 의 충돌속도에 따라 각각 해석하였다.

지반에 대한 모델화는 지반을 Elastic Half Space 로 가정하여, 구조물의 질량과 하부 구조의 반경에 의해 결정하였다. 이러한 토질의 동적 모델에 의해 구조물의 미끄러짐과 로킹의 크기를 구할 수 있다(Fig. 1 참조).

2. 얼음의 충돌시의 동적 모델 형성

2.1 얼음의 성질

2.1.1 얼음의 질량과 부가 질량 $\langle M_i \rangle$

이상화한 얼음의 질량은 기하학적 형상에 얼음의 밀도를 고려하여 구할 수 있다. 유체 동력학적 부가 질량은 다음의 부가 질량 계수의 값으로부터 구할 수 있다(Croasdale and Marcellus, 1981).

$$C = 1 + [0.9t / (2W_a - 0.9t)] \\ M_i = M_{in} + M_{ia} = C\pi R_i^2 t \rho_i \quad (1)$$

C : 부가 질량 계수

* 暎園大學校 土木工學科 (Department of Civil Eng., Kyung Won University, Songnam, 461-200, Korea)

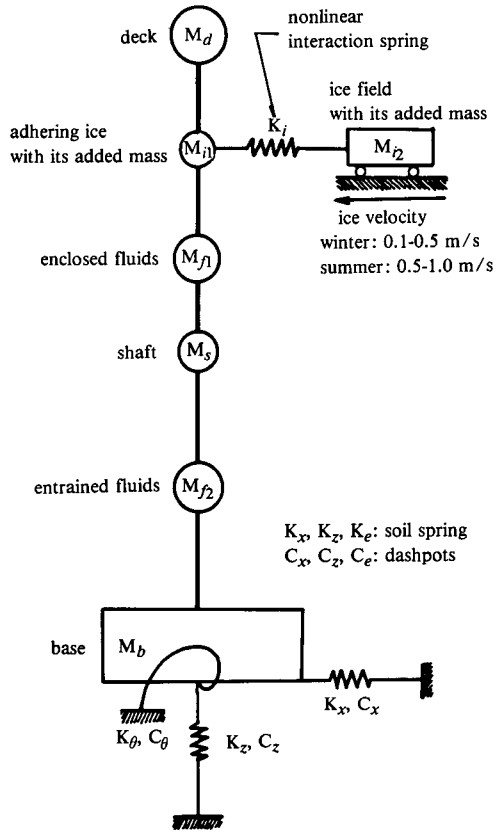


Fig. 1. Schematic model of the system including the foundation, the structure and the ice feature.

- t : 얼음의 두께
- W_d : 해수의 깊이
- R_f : 얼음의 반경
- ρ_i : 얼음의 밀도

2.1.2 얼음의 강도 f_c

얼음의 강도는 여름과 겨울의 해수의 온도를 각각 -3°C 와 -10°C 로 가정하여, 여름 얼음의 경우 4.5 MPa , 겨울 얼음의 경우 1.8 MPa 를 얻었다 (Michel and Toussaint, 1977).

2.1.3 빙하 중과 관입 깊이의 관계 K_i

1) 구간 ①-②-③

압축력을 받는 구간 ①-②-③에서 빙하중과 관입 깊이의 관계식은 Korzhavin(1962)의 식을 이용한다.

$$F = f_e D t \tag{2}$$

$$f_e = C_i m k f_c \tag{3}$$

- F : 빙하 중의 크기
- D : 구조물과 얼음의 접촉폭
- f_e : 얼음의 유효 압축 강도
- C_i : 관입계수
- m : 형상계수
- k : 접촉계수
- f_c : 얼음의 일축 압축 강도

이 때, 대상 구조물과 얼음의 형상이 각각 원형이면서, 폭이 넓기 때문에 형상계수는 0.9, 접촉계수는 0.6을 대입하고, 관입계수는 형상비 (D/t)에 따라 $1.2 + 0.32/(D/t) \leq 3.0$ 을 대입하면 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$F = 0.648 f_c D t + 0.1728 f_c t^2; (D/t) \geq 0.178 \tag{4}$$

$$F = 1.62 f_c D t; (D/t) < 0.178 \tag{5}$$

f_c 와 t는 정해진 값이므로 F는 D의 함수로 표시된다. 또한, D는 기하학적 형상에 따라 구조물의 반경 (R_s)와 부빙의 반경 (R_f) 및 관입 깊이 (x)의 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$D = 2 \left[R_s \left(\frac{2R_f x - x^2}{R_s + R_f - x} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{2R_f x - x^2}{R_s + R_f - x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

윗 식을 $R_f \gg R_s$ 임을 감안하여 좀 더 간략히 표시하면 다음과 같다.

$$D = 2(2R_s x - x^2)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

이를 식 (2)에 대입하면 관입 깊이와 빙하중의 관계식을 얻을 수 있다. 이는 Fig. 2에 점선으로 나타나 있으며 실선은 수치해석을 위해 이상화한 값이다.

2) 구간 ④

압축력이 점차적으로 제거되는 구간을 뜻하며, 이 경우는 공극확산이론을 근거로 지압강도를 유도한 방법을 이용하여 Vivatrat(1982)가 제안한 값을 사용한다.

$$F = \frac{2E_d}{(1+\nu)} t \cdot x$$

E_d : 얼음의 동 탄성계수

3) 구간 ⑤

얼음과 구조물이 완전히 분리되는 구간이며, 이 경우는 구조물에는 빙하중이 전혀 작용을 하지 못한

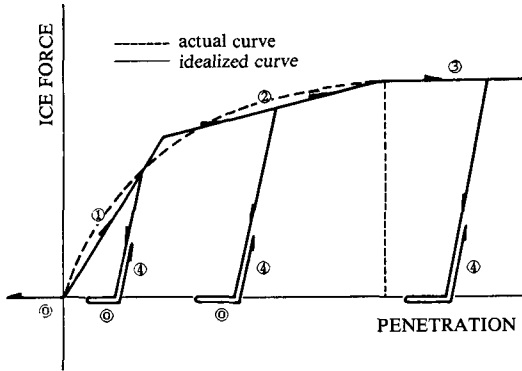


Fig. 2. Force-penetration relationship for proposed ice element (Impact problem).

다. 즉, 관입해 들어가던 얼음이-구조물의 상대 운동에 의해 분리되어 서로 독립적으로 움직이며, 얼음과 구조물이 다시 접촉하기까지는 빙하중이 전혀 발생하지 않는다. 이 때, 구간 ④에서 ①으로 바뀌어지는 점의 관입 깊이가 얼음의 파괴 깊이가 되며, 구간 ①에서 구간 ④로 다시 바뀔 때까지 구조물과 얼음사이에 하중이 발생하지 않는다.

2.2 구조물의 성질

극지에 건설되는 구조물은 크기가 매우 대형이고, 얼음과의 접촉면에서 국부 하중을 견딜 수 있도록 설계되므로 전체적으로 강도가 매우 크다. 따라서, 구조물의 안정성에 대한 해석을 위해서는 구조물을 강체로 가정하여도 무방하다.

구조물의 질량은 구조물 자체의 질량, 구조물 내부에 포함된 해수의 질량 및 구조물의 움직임에 따른 유체 동력학적 부가 질량을 포함한다. 앞의 두 값은 기하학적 형상에 의해 쉽게 계산이 가능하고, 부가 질량은 Potential Flow Theory에 의해, 유체속의 구조물의 형상에 따라 결정된다(Hallam *et al.*, 1977; Sarpkaya and Issacson, 1981). 로킹에 대한 부가 질량은 무시하였다.

2.3 지반의 성질

지반은 Elastic Half Space 방법(Newmark and Rosenbluth, 1971)과 지반이 견딜 수 있는 항복강도를 이용한 비선형 등가 스프링으로 이상화하였다. 수평방향의 항복강도는 지반의 전단응력에 의한 지지력 산정법(A. P. I., 1982)에 의해 구할

수 있고, 회전방향의 등가 스프링의 항복강도는 구조물의 유효 지지면적에 토질의 지압강도와 편심량을 곱함으로써 얻을 수 있다. 항복점을 지난 이후의 지반의 거동은 완전 소성체로 가정하여, 지반을 완전 탄소성체로 보았다.

3. 동역학 기본방정식 및 해석

구조물과 주위의 유체, 지반 및 얼음을 포함한 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$(M+M_r+M_s+M_t)\ddot{U} + (C+C_s+C_t)\dot{U} + (K+K_s+K_t)U = P_e$$

M, C 및 K는 각각 구조물의 질량 매트릭스, 감쇠계수 매트릭스 및 강도 매트릭스를 뜻하며, 이는 일상적인 유한요소 기법에 의한 직접 강도법에 의해 구할 수 있다.

해석법은 비선형 해석 중 가장 널리 사용되는 Newmark에 의한 방법(Newmark, 1959)을 사용하였다.

4. 해석예 및 결과

해석을 위한 구조물의 제원 및 모델링의 결과를 Table 4에 제시하였다.

지반의 로킹에 대한 강도 값은 수평강도에 해저면으로부터 빙하중의 작용점까지의 높이를 곱한 값으로, 지반의 지압강도에 의한 저항력(< >속)에 표시된 값)보다 작게 나타난다. 대개의 경우 토질이 수평 변위를 일으키면, 토질의 교란에 의해 지압강도를 유지하기 곤란하므로 전자의 값을 취하는 것이 타당하다.

본 연구에서는 모래층과 실트층의 각 경우에 대해 여름과 겨울 동안 얼음의 속도가 각각 0.5-1.0m/sec, 0.1-0.5m/sec의 변화에 대한 빙하중의 크기와 구조물 및 토질의 동적거동에 대해 해석하였다.

Table 5는 각 경우의 최대 빙하중의 크기를 에너지 평형 방법과 비교한 표이며 Fig. 3은 빙하중의 크기를 시간에 따라 나타낸 그림이다.

Table 6은 데크의 최대 가속도를 구한 값을 정리한 표이다.

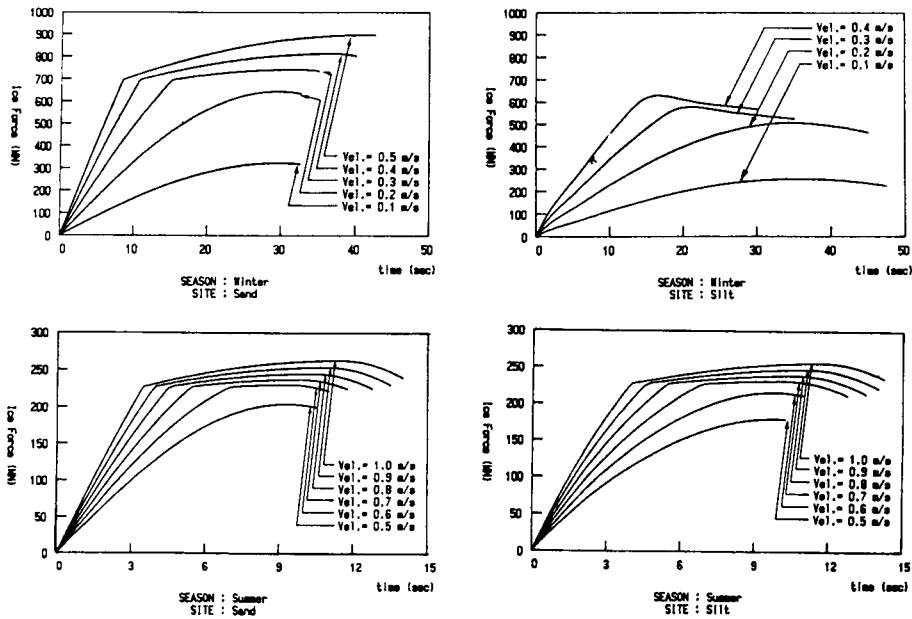


Fig. 3. Ice forces for impact problem.

Table 1. Ice floe data and ice parameters for impact problem

	여름	겨울
얼음의두께 (m)	9	9
반경 (m)	300	1500
질량 (Kt)	2290	57300
증가질량계수	0.057	0.057
증가질량 (Kt)	130	3300
총질량 (Kt)	2420	60600
얼음의속도 (m/sec)	Variables (0.5m/sec- 1.0m/sec)	Variables (0.1m/sec- 0.5m/sec)
얼음의강도 (Mpa)	1.8	4.5

빙하중과 관입깊이와의 관계

단위 : MN/m)	여름	겨울
구간 0	0	0
구간 1 (0-4m)	69.3	173.8
구간 2 (4-20m)	10.5	26.2
구간 3 (20m -)	0	0
구간 4	129000	129000
항복강도 1-2	277.2 (MN)	695 (MN)
2-3	445.2 (MN)	1114.4 (MN)

Table 2. Structural data and parameters for impact problem

	Mass (Kt)	Mass Moment of Inertia (Kt-M)
Deck (about water level)	36.3	8182
Shaft (about water level)		
Structure	10.9	6903
Enclosed Fluids	50.3	31857
Entrained Fluids	17.6	
(Added Mass Coeff. =0.35)		
Total	78.8	38760
Base (about center of base mat)		
Structure	189.9	565800
Enclosed Fluids	950.3	3114200
Entrained Fluids	190.1	-
(Added Mass Coeff. =0.2)		
Total	1330.3	3680000

Table 3. Soil data and parameters for impact problem (Sand Site)

Cohesion (KPa)	—	
Undrained Shear Strength (KPa)	—	
Internal Friction Angle (deg.)	35	
Shear Modulus (MPa)	80	
Poisson's Ratio	0.33	
Mass Density (t/m)	1.1	
Max. Bearing Capacity (KPa)	478	
	Horizontal	Rocking
Stiffness	43270 (MN/m)	4.238×10^8 (MN-m/rad)
Damping	10150 (Kt/s)	4.929×10^7 (Kt-m/sec)
Coefficient		
Strength	1627 (MN)	1.22×10^5 (MN-m) < 3.78×10^5 (MN-m)>

Table 4. Soil data and parameters for impact problem (Silt Site)

Cohesion (KPa)	10	
Undrained Shear Strength (KPa)	20	
Internal Friction Angle (deg.)	20	
Shear Modulus (MPa)	1.5	
Poisson's Ratio	0.5	
Mass Density (t/m)	0.7	
Max. Bearing Capacity (KPa)	107	
	Horizontal	Rocking
Stiffness	880 (MN/m)	1.0658×10^7 (MN-m/Rad)
Damping	1202 (Kt/s)	7.153×10^6 (Kt-m/sec)
Coefficient		
Strength	498.7 (MN)	3.74×10^4 (MN-m) < 8.46×10^4 (MN-m)>

5. 결 론

빙하중의 크기는 겨울기간 중에는 실트지반의 경우가 모래지반의 경우의 약 75-80% 정도로 작게 나타났다. 그러나, 여름기간 중의 지반조건에 따른 빙하중의 크기는 88-97.5%값을 나타내고 있어 큰 차이를 나타내지 않는다. 모래지반의 경우 에너지 평형 방법에 의한 값에 비해 빙하중의 크기가 대체적으로 크게 나타났으며, 실트지반의 경우는 겨울기간

Table 5. Maximum ice forces for impact problem

CASE 얼음속도 (m/sec)	겨 울			여 름		
	Energy Balanced	Sand	Silt	Energy Balanced	Sand	Silt
0.1	350.17	322.37	254.51			
0.2	513.50	644.75	507.53			
0.3	647.83	742.72	578.41			
0.4	771.00	813.63	630.16			
0.5	876.33	896.60	676.07	176.83	204.18	179.85
0.6				196.33	229.97	215.81
0.7				213.50	236.97	231.52
0.8				231.95	244.79	239.02
0.9				248.67	253.38	247.33
1.0				264.00	262.63	256.31

Table 6. Maximum deck accelerations for impact problem m/sec²

지반조건 얼음속도 (m/sec)	겨 울		여 름	
	Sand	Silt	Sand	Silt
0.1	0.0047	0.0244		
0.2	0.0094	0.0488		
0.3	0.0141	0.0738		
0.4	0.0189	0.0977		
0.5	0.0236	0.1327	0.0094	0.0510
0.6			0.0113	0.0613
0.7			0.0132	0.0815
0.8			0.0151	0.0917
0.9			0.0169	0.0919
1.0			0.0188	0.1021

중은 작게, 여름기간 중은 크게 나타났다. 또한 겨울기간 중의, 비교적 느리고 반경이 큰 얼음이 여름기간 중의 빠르고 직경이 작은 얼음보다, 구조물에 훨씬 큰 충격을 줌을 알 수 있다.

그러나, 데크의 가속도의 크기는 여름기간 중의 값과 겨울기간의 값이 큰 차이를 나타내지 않는다. 따라서, 데크상의 장비에 대한 설계시에는 여름기간 중의 하중조건에 대한 검토가 따라야 한다.

참고문헌

- A.P.I., 1982. A.P.I. Recommended practice for planning designing and constructing fixed offshore platforms, A.P.I., API RP2A, Dallas, Texas.
- Croasdale, K. and Marcellus, R., 1981. Ice forces on large marine structures, IAHR Ice Symposium, Quebec, Canada.
- Hallam, M., Heaf, N.J. and Wootton, L.R., 1977. Dynamics of marine structures, CIRIA Underwater Engineering Group, Report UR8.
- Korzavin, K.N., 1962. Action of ice on engineering structures, U.S. Army CRREL, CRREL Translation TL260.
- Michel, B. and Toussaint, N., 1977. Mechanisms and theory of indentation of ice plates, *Journal of Glaciology*, **19**(81): 285-300.
- Newmark, N.M. and Rosenblueth, E., 1971. Fundamentals of earthquake engineering, Prentice-Hall: 161-174.
- Newmark, N.M., 1959. A method of computation for structural dynamics, *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE* **85**(3): 69-94.
- Sarpkaya, T. and Issacson, M., 1981. Mechanics of wave forces on offshore structures, Van Nostrand Reinhold: 114-122.
- Vivatrat, V., 1982. Strains and strain rates in sea ice indentation, OTC, Paper No. 4311.