극지 구조물 형상에 대한 빙충격 하중 특성 분석

정성엽^{1,†} · 조성락¹

한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소¹

An Analysis of Ice Impact Force Characteristics for the Arctic Structure Shape

Seong-Yeob Jeong^{1,†} · Seong-Rak Cho¹

Korea Institute of Ocean Science & Technology, Maritime & Ocean Engineering Research Institute¹

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper describes the characteristic analysis of ice impact force for the Arctic structure shape. In the present study an energy method has been used to predict the impact force during the ice-structure collision. This study also employs two concepts for reference contact area and normalized stress in analysis procedure. The influences of factors, such as impact velocity, full penetration depth, structure shape and ice floe size, are investigated. Full penetration occurs, particularly at lower impact velocity when ice thickness increase. But "typical size" ice floe does not expected ever to achieve full penetration during the impact procedure. The structure shape is the dominant factor in ice impact force characteristic. The results for various ice-structure collision scenarios are analyzed.

Keywords : Ice impact force(빙충격 하중), Energy method(에너지 방법), Reference contact area(기준접촉면적), Normalized stress(표준화된 응력), Ice impact force characteristic(빙충격 하중 특성)

1. 서 론

유빙(pack ice)이 존재하는 해역에 설치되는 해양구조물은 빙판과의 충돌에 의해 빙충격 하중(ice impact force)이 발생하게 되는데, 이러한 상호작용 과정에 의해 발생하는 빙충격 하중의 정량적인 크기는 구조물의 설계 빙하중(design ice load) 산정에 있어 중요한 요소이다. 국내의 경우 쇄빙선박에 작용하는 빙하중(ice load) 추정에 관한 연구는 일부 수행된 바 있으나(e.g. Choi & Jeong, 2008; Choi, et al., 2009), 해양구조물에 작용하는 빙충격 하중 산정에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 국외의 경우 해양구조물에 작용하는 빙충격 하중을 추정하기 위한 수학적 모델의 개발에 관한 연구가 기 수행된 바 있는데, 1940년대 Korzhavin은 교각에 작용하는 빙하중 추정에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 이후 수직한 형태의 구조물에 작용하는 빙하중을 산정하기 위한 모델을 제안하였다(Korzhavin, 1971). Korzhavin 모델은 단순한 형태의 해석적 접근법이지만 모델에서 사용되는 경험적 계수의 경우 범위가 상당히 넓기 때문에 다양한 형태의 구조물에 작용하는 빙하중을 산정함에 있어 많은 제약을 가지고 있으며, 확률론적 접근법을 이용해 빙하중을 추정한 결과보다 다소 높게 추정되는 특징을 가지고 있다(Timco & Frederking 2004).

Cammaert and Tsinker (1981)는 원통형 또는 원추형 구조물과 빙산의 충돌 시 발생하는 빙하중에 관한 해석을 수행하였고 이후 Cammaert, et al. (1983)은 중력식 또는 부유식 해양구조물에 작용하는 충격하중에 관한 연구를 수행한 바 있다. Johnson and Nevel (1985)은 에너지 방법을 바탕으로 빙충격 하중을 추정하기 위해 몬테카를로 방법(Monte-Carlo method)을 이용한 수학적 모델을 개발하였고 Gershunov (1986)은 거대한 해양구조물과 빙판과의 충돌에 따른 빙충격 하중 특성에 관한 연구를 수행하였는데, 빙판의 운동에너지 계산과 관입에 따른 빙충격 하중 해석법을 제안하였다.

Daley (1999)는 에너지 방법을 이용해 다양한 기하학적 형상에 따른 빙충격 하중 추정 모델 개발에 관한 연구를 수행하였다. 에너지 방법을 이용하면 빙-구조물 충돌과정에서 발생하는 빙충격 하중을 보다 쉽게 추정할 수 있는데, 이때 발생하는 관입에너지는 관입조건에 대한 변수들과 함께 유효압력-접촉면적 관계와 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서는 빙-구조물 상호작용에 대한 개념연구와 함께 Daley (1999)가 제안한 에너지 방법을 바탕으로 빙-구조물 충돌 시 정점응력(peak stress)보다는 평균응력(mean stress)에 의해 빙판의 운동에너지가 소멸되므로 이러한 관점에서 구조물의 형상에 대해 빙판의 두께변화에 따른 관입변위와 접촉면적을 계산하였고 이를 통해 빙충돌 시 구조물 형상에 대한 충

격하중 특성을 분석하고 이때 극지 구조물에 작용하는 최대 빙충격 하중을 추정하였다.

2. 빙-구조물 충돌 해석

2.1 빙-구조물 상호작용

일반적으로 빙-구조물 상호작용 과정에서 빙판의 파괴양식은 얼음의 관입속도(V)와 구조물의 폭(D)의 관계인 관입률(V/D)과 구조물의 폭과 얼음의 두께(h)에 대한 형상비(D/h)에 의해 영향을 받게 되는데, 크리프(*creep*), 방사형 균열(*radial cracking*), 좌굴(*buckling*), 원주형 균열(*circumferential cracking*), 스폐링(*spalling*), 분쇄(*crushing*) 등이 발생하게 된다(Sanderson, 1988). 특히 관입률이 낮은 경우 빙판은 크리프 변형이 나타나게 되고 관입률이 높은 경우 분쇄 또는 스폐링이 발생하며, 형상비가 큰 경우에는 방사형 균열이 나타난다. 또한 빙판이 얇은 경우 탄성 좌굴이 쉽게 발생할 수 있으며, 편심하중에 의해 발생한 굽힘 모멘트가 빙판에 작용하는 경우 빙판에 원주형 균열이 발생하기도 한다(Fig. 1 참조).

Fig. 1 Ice failure mechanisms and modes (Timco, 1986)

Fig. 2에는 빙-구조물 상호작용에 따른 빙판의 파괴과정 체계가 도시되어 있는데, 구조물과 빙의 접촉 시 분쇄와 함께 전단파괴가 발생하며, 하중이 일정크기에 도달하면 빙판에서 굽힘파괴가 발생하게 되고 관입 시 이러한 과정이 반복적으로 나타나게 된다. 이처럼 빙판의 파괴양식과 형상은 여러 연구자들에 의해 정의되었는데, Timco (1986)는 빙판의 파괴양식이 빙-구조물 상호작용 시 접촉부에서의 관입률과 형상비가 지배적임을 입증한 바 있다.

Fig. 2 Nested hierarchy of ice failure events (Daley & Riska, 1995)

2.2 에너지 방법을 이용한 빙충격 하중 해석

언급한 바와 같이 빙-구조물 상호작용 해석에 관한 연구는 80~90년대에 중점적으로 수행되었으며, 에너지 방법을 이용해 보다 간단히 충격하중을 계산하는 방법도 연구되어 왔다. Daley (1999)는 에너지 방법의 경우 빙 충돌(*ice collision*) 문제를 두 가지 관점으로 구분하였는데, 이러한 개념은 선박이 빙판과 충돌하는 문제와 빙판이 구조물에 충돌하는 문제로 구분할 수 있다. 에너지 방법에서 사용된 운동에너지(KE)는 충돌 시 발생한 관입에너지(IE)와 위치에너지(PE)의 합과 동일하다는 가정 하에, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$KE = IE + PE \quad (1)$$

여기서 충돌되는 대상이 질량을 가지고 있다면, 그 대상은 운동 에너지를 가지게 되고 질량을 가지는 대상이 수직인 방향으로의 충돌 시 최대 힘이 작용하는 순간 그 대상의 운동은 멈추게 된다. 관입에너지는 식 (2)와 같이 충돌 시 수직인 방향의 관입변위(ζ_n)에 대한 수직인 방향의 관입력(F_n)의 적분을 통해 구할 수 있다.

$$IE = \int F_n d\zeta_n \quad (2)$$

그리고 위치에너지는 대상의 복원과정에서 소요되는 에너지로서 강체의 운동(*pitch / heave*) 또는 두 대상간의 탄성변형의 관계로 정의할 수 있는데, 위치에너지는 복원변위(ζ_e)에 대한 수직인 방향의 관입력을 적분함으로써 구할 수 있다.

$$PE = \int F_n d\zeta_e \quad (3)$$

다만, 고정된 구조물의 경우 관입과정에서 발생하는 위치에너지(식 (3))는 계산과정에서 제외할 수 있다. 이러한 관계를 바탕으로 식 (1)을 통해 계산에 필요한 운동학적·기하학적 값을 알 수 있다면 관입력을 구할 수 있게 된다. 이처럼 에너지 방법을 이용해 빙-구조물 충돌현상을 규명하기 위해서는 힘과 관입에 대한 관계식이 필요한데, 일반적인 압력과 면적과의 관계를 이용하면 빙압력을 힘과 관입의 관계로 표현할 수 있다. 이는 빙충격 하중이 관입에 의존한다는 가정 하에 이들 관계를 도출할 수 있으며, 최대 빙충격 하중은 관입이 최대로 발생했을 때 나타나게 된다.

본 연구에서는 Daley (1999) 방법과 달리 빙-구조물 상호작용 과정에서 발생하는 빙하중을 산정하기 위해 접촉 시 최대하중이 발생하는 순간의 표준화된 응력 개념을 이용하였는데, 이는 현장 실측자료에 대한 통계적 분석을 통해 얻을 수 있다. Fig. 3에는 Tarsiut P-45에서 수집된 현장 실측자료가 일부 도시되어 있는데, 현장 실측자료는 1년생 빙과 다년생 빙에서 계측된 결과이다. 또한 Fig. 4에는 현장 실측자료에 대한 확률밀도함수가 도시되어 있다.

Sanderson (1988)의 연구에 따르면 구조물의 관입과정에서 발생하는 평균하중(mean load)은 대략 정점하중(peak load)의 60~70 % 정도로서 정점하중이 평균하중보다 50 % 정도 높은 편인데, 이 때 발생하는 관입에너지는 정점응력 보다는 수직한 방향에 대한 접촉면적(A_n)의 함수인 평균응력과 밀접한 관련이 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{mean} = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0/A_n} \quad (4)$$

여기서, $\lambda(=0.667)$ 는 평균하중(mean load)의 정점하중(peak load)에 대한 비(ratio)를 나타내고 A_0 는 기준접촉면적(reference contact area)을 나타내며, σ_m^* 는 기준접촉면적에 대한 표준화된 평균응력(normalized mean stress)으로서 현장 실험자료를 사용하였다(Figs. 3과 4 참조). 그러므로 수직한 방향에 작용하는 관입력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_n = \sigma_{mean} A_n = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} A_n^{0.5} \quad (5)$$

Fig. 3 Contact area vs. indentation pressure at peak load for full-scale data (Sanderson, 1988)

Fig. 4 Probability density function of normalized stress for field measurement results

본 연구에서는 구조물의 형상에 따른 평탄빙과의 충돌 시 발생하는 빙충격 하중의 특성을 분석하기 위해 Fig. 5와 같이 세 가지 구조물 형상에 대한 빙-구조물 충돌 시나리오를 고려하였다. Fig. 5 (a)에서 정사각형 구조물의 관입 시 발생하는 관입에너지의 경우 수직한 방향의 투영된 접촉면적은 빙판의 두께(H)와 정사각형 구조물 폭(W)의 관계로서 식 (6)과 같이 표현할 수 있고 정사각형 구조물이 45° 회전된 경우, 즉 뺨기부분에 빙판이 관입하는 경우 (Fig. 5 (b)), 수직한 방향의 투영된 접촉면적은 빙판의 두께와 관입변위의 관계로서 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 원통형 구조물의 관입 시(Fig. 5 (c)) 수직한 방향의 투영된 접촉면적은 빙판의 두께와 원통형 구조물의 반경(R)의 관계로서 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 그 다음 식 (6), (7), (8)을 각각 식 (5)에 대입하면 수직한 방향의 관입력을 식 (9), (10), (11)과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 5 Ice-structure collision scenarios for structure shape

$$A_n = HW \quad (6)$$

$$A_n = 2H\zeta_n \quad (7)$$

$$A_n = 2H\sqrt{2R\zeta_n} \quad (8)$$

$$F_n = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (HW)^{0.5} \quad (9)$$

$$F_n = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H)^{0.5} \zeta_n^{0.5} \quad (10)$$

$$F_n = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H\sqrt{2R})^{0.5} \zeta_n^{0.25} \quad (11)$$

여기서, 관입에너지는 수직한 방향의 관입력(식 (9), (10), (11))을 식 (2)와 같이 수직한 방향의 관입변위에 대해 적분하면 구할 수 있는데, 구조물의 형상에 따른 빙판의 관입 시 발생하는 관입 에너지는 식 (12), (13), (14)와 같다. 그리고 빙-구조물 충돌 시 발생하는 관입에너지는 운동에너지와 같으므로 빙충격 하중을 계산하기 위해 식 (15)와 식 (12), (13), (14)에 대한 관계를 통해 수직한 방향의 관입변위(식 (16), (17), (18))를 계산할 수 있다.

$$IE = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (HW)^{0.5} \zeta_n \quad (12)$$

$$IE = \frac{1}{1.5} \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H)^{0.5} \zeta_n^{1.5} \quad (13)$$

$$IE = \frac{1}{1.25} \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H\sqrt{2R})^{0.5} \zeta_n^{1.25} \quad (14)$$

$$IE = \frac{1}{2} M_e V_n^2 \quad (15)$$

$$\zeta_n = \left(\frac{1}{2} M_e V_n^2 \right) \frac{1}{\lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (HW)^{0.5}} \quad (16)$$

$$\zeta_n = \left[\left(\frac{1}{2} M_e V_n^2 \right) \frac{1.5}{\lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H)^{0.5}} \right]^{1/1.5} \quad (17)$$

$$\zeta_n = \left[\left(\frac{1}{2} M_e V_n^2 \right) \frac{1.25}{\lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H \sqrt{2R})^{0.5}} \right]^{1/1.25} \quad (18)$$

여기서, V_n 은 수직한 방향의 충돌속도(m/s)를 나타내며, M_e 는 얼음의 유효질량(tonne)을 나타낸다. 또한 해석과정에서 수심은 해빙의 두께 보다 현저히 큰 경우로 가정함으로써 유효질량에서 부가질량의 효과는 거의 없으며, 해빙이 바람 및 해류의 항력에 의해 발생하는 힘은 빙충격 하중에 비해 현저히 작은 크기이므로 해석과정에서 고려하지 않았다.

3. 빙-구조물 충돌에 대한 빙충격 하중 특성 분석

언급한 바와 같이 에너지 방법을 이용하면 빙-구조물 상호작용 과정에서 발생하는 빙충격 하중을 보다 간단하게 추정할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 형태의 구조물과 빙의 상호작용 과정에서 발생하는 빙충격 하중 특성을 해석하기 위해 에너지 방법을 이용해 얼음의 두께변화(ice thickness, m)와 충돌속도(impact velocity, m/s), 구조물의 형상에 따른 하중특성을 분석하였다. 실제현장에서 설계 빙하중 산정 시에는 빙판의 충돌속도와 빙판의 두께 분포가 지배적인 요소인데, 빙-구조물 충돌과정에서 완전침투(full penetration)가 발생하는 빙판의 충돌속도를 선정하기 위해 각 구조물의 형상에 따른 빙판의 두께별 완전침투 깊이를 계산하고 완전침투 깊이에 도달하는 순간 빙판의 충돌속도를 분석하였다. Fig. 6~8에는 Fig. 5에서 제시한 세 가지 구조물의 형태에 대하여 빙판의 두께 변화에 따른 충돌속도별 관입변위의 특성을 도시하였고 그 결과는 Table 1에 정리되어 있다.

우선 Case (a)와 (b), (c)의 경우 완전침투 깊이는 각각 5.00 m, 7.07 m, 5.00 m로서 Case (a)의 경우 빙판의 두께가 증가함에 따라 낮은 충돌속도에서 완전침투에 도달하는 것을 알 수 있고 Case (b), (c)의 경우도 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 빙판의 크기가 증가함에 따라 보다 낮은 충돌속도에서 완전침투에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 빙판의 충돌속도는 대부분 2.0 m/s 이상일 때 완전침투가 발생하게 되는데, 보퍼트 해 여름철 평균 해빙의 이동속도인 0.2 m/s 고려하면 실제현상에서는 완전침투가 거의 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 빙판의 최대 이동속도를 1.0 m/s 로 가정하고 각 구조물의 형상에 대해 빙판의 두께 및 구조물의 크기에 따른 영향을 분석하고 이를 통해 각 구조물

의 형태에 대한 충돌 시 관입변위와 접촉면적을 이용해 구조물에 작용하는 최대 빙충격 하중의 크기를 추정하였다.

Fig. 6 Calculated indentation displacement vs. impact velocity for various ice thicknesses in Case (a)

Fig. 7 Calculated indentation displacement vs. impact velocity for various ice thicknesses in Case (b)

Fig. 8 Calculated indentation displacement vs. impact velocity for various ice thicknesses in Case (c)

Table 1 Calculated indentation displacement and impact velocity at full penetration condition for various cases

Ice Thickness (m)	Full Penetration Depth (m)			Calculated Indentation Displacement (m)			Impact Velocity at Full Penetration Depth (m/s)		
	Case (a)	Case (b)	Case (c)	Case (a)	Case (b)	Case (c)	Case (a)	Case (b)	Case (c)
1	5.00	7.07	5.00	5.07	7.34	5.07	4.6	3.7	4.1
3	5.00	7.07	5.00	5.09	7.28	5.02	3.5	2.8	3.1
5	5.00	7.07	5.00	5.15	7.49	5.29	3.1	2.5	2.8

Here, ice floe size was 0.1 km width and length, respectively. Arctic structure width or diameter was 10.0 m. The normalized stress was 0.92 MPa, when reference contact area is 100 m².

Table 2 The calculated ice impact force for various structure shapes and widths or diameters

Case	Width or Diameter of Structure (m)			Width or Diameter of Structure (m)			Width or Diameter of Structure (m)		
	10	50	100	10	50	100	10	50	100
	F_n at 1.0 m thick (MPa)			F_n at 3.0 m thick (MPa)			F_n at 5.0 m thick (MPa)		
(a)	19.40	43.37	61.33	33.59	75.12	106.23	43.37	96.98	137.15
(b)	19.05	19.05	19.05	43.43	43.43	43.43	63.71	63.71	63.71
(c)	19.80	26.77	30.48	39.34	53.19	60.57	54.13	73.20	83.36

Here, ice floe size was 0.3 km width and length, respectively. Impact velocity was 1.0 m/s and normalized stress was 0.92 MPa, when reference contact area is 100 m².

Figs. 9~11에는 Table 2와 같이 각 구조물의 형태와 직경에 따른 빙두께 별 충격하중 특성이 도시되어 있는데, 모두 구조물의 폭 또는 직경이 빙판의 두께보다 크며, 빙판의 충돌속도는 1.0 m/s 정도이다. Fig. 9에서 보면 구조물의 폭 또는 직경이 10 m 인 경우에는 빙판의 두께가 두꺼워 질수록 Case (a)의 형상이 극지해역 설치 시 적합한 형태인 것을 알 수 있으나, 전반적으로 구조물의 형상에 따른 영향은 그렇게 크지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 10의 경우 구조물의 폭 또는 직경이 50 m 로 증가함에 따라 Case (a)에 작용하는 빙충격 하중은 상당히 증가하는 것을 알 수 있으며, Fig. 11에서처럼 구조물의 폭 또는 직경이 100 m 인 경우에는 Case (b)의 형상이 극지해역에 설치 시 좀 더 효율적임을 알 수 있고 Case (a)의 경우에는 빙판의 두께가 증가함에 따라 빙충격 하중도 급격히 증가하기 때문에 실험해역 설치 시 Case (b) 보다 높은 구조적 강성을 확보해야 함을 알 수 있다. 특히 빙두께가 5.0 m 이고 구조물 폭 또는 직경이 100 m 인 경우 Case (a)에서는 빙충격 하중은 137.15 MN 정도가 발생하지만, Case (b)에서는 63.71 MN, Case (c)에서는 83.36 MN 이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, Case (b)의 경우 빙충돌 과정에서 썬치부분의 형상이 빙판을 효과적으로 관입함으로서 보다 낮은 빙충격 하중이 발생함을 알 수 있다. 또한 Case (b)에서 구

조물의 폭 또는 직경의 변화에 따른 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 또한 Case (c)의 경우 발생하는 빙충격 하중은 Case (a)의 60.8 % 정도 수준이지만 Case (b)의 130.8 % 정도 수준으로서 다소 큰 충격하중이 발생함을 확인할 수 있다(Table 2 참조). 그러므로 극지해역에 설치되는 구조물의 경우 구조적 형상은 빙-구조물 충돌과정에서 발생하는 빙충격 하중 특성에 직접적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

그리고 빙판의 길이와 폭이 각각 0.5 km (일반적인 규모의 빙판) 이고 구조물의 폭 또는 직경이 100 m 인 경우 빙판의 충돌속도에 따른 빙충격 하중 특성을 Figs. 12~14에 도시하였다. 우선 Fig. 12에서 Case (a)의 경우 빙판의 충돌속도에 따른 영향은 없으며, 빙판의 두께가 증가함에 따라 빙충격 하중 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 13에서 Case (b)의 경우 빙판의 충돌속도와 두께가 증가함에 따라 빙충격 하중도 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 충돌속도가 1.0 m/s 인 경우 1.0 m 빙두께에서는 전반적으로 Case (a)의 51.8 % 정도 수준의 빙충격 하중이 발생하는데, 빙두께가 증가함에 따라(3.0 m, 5.0 m) 각각 68.1 %, 77.4 % 수준으로 증가함을 알 수 있다. Case (c)의 경우 발생하는 빙충격 하중은 Case (a) 보다는 낮은 수준이지만 Case (b) 보다는 큰 충격하중이 발생하는 것을 알 수 있다(Fig. 14 참조).

Fig. 9 Calculated ice impact force vs. ice thickness for structure shapes (width or diameter = 10 m) with constant ice impact velocity (= 1.0 m/s)

Fig. 12 Calculated ice impact force vs. impact velocity for various ice thicknesses at typical size ice floe in Case (a)

Fig. 10 Calculated ice impact force vs. ice thickness for structure shapes (width or diameter = 50 m) with constant ice impact velocity (= 1.0 m/s)

Fig. 13 Calculated ice impact force vs. impact velocity for various ice thicknesses at typical size ice floe in Case (b)

Fig. 11 Calculated ice impact force vs. ice thickness for structure shapes (width or diameter = 100 m) with constant ice impact velocity (= 1.0 m/s)

Fig. 14 Calculated ice impact force vs. impact velocity for various ice thicknesses at typical size ice floe in Case (c)

Fig. 15 Calculated ice impact force vs. impact velocity for various ice thicknesses at large size ice floe in Case (a)

Fig. 16 Calculated ice impact force vs. impact velocity for various ice thicknesses at large size ice floe in Case (b)

Fig. 17 Calculated ice impact force vs. impact velocity for various ice thicknesses at large size ice floe in Case (c)

또한 빙판의 길이와 폭이 5.0 km (거대규모의 빙판) 이고 구조물의 폭 또는 직경이 100 m 인 경우 빙판의 충돌속도에 따른 빙

충격 하중 특성을 Figs. 15~17에 도시하였다. 이 경우 앞선 결과와 달리 Case (b)에서 거대빙판과의 충돌 시 매우 큰 충격하중이 발생하는 것을 알 수 있으며, 충돌속도가 0.2 m/s 이하에서는 Case (c)가 낮지만 그 이상의 충돌속도 구간에서는 Case (a)에서 가장 낮은 빙충격 하중이 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 거대빙판의 경우 실질적인 이동속도는 0.2 m/s 이하로 보는 것이 보다 적합하며, 구조물의 형상과 함께 빙판의 두께 및 크기, 이동속도, 즉 충돌속도가 빙충격 하중 추정에 있어 상당히 중요한 정보임을 알 수 있다.

아울러, 앞선 방법에 대한 추가적인 계산사례로서 Fig. 18과 같이 쇄기의 각도가 90°이며, 8개의 쇄기를 가지고 있는 구조물 형상에 대해 빙판의 관입변위에 따른 빙충격 하중과 접촉면적의 특성을 분석하였다.

Fig. 18 Ice-structure collision scenario for wedged shape structure

우선, Case (d)의 경우 접촉면적은 관입변위에 따라 식 (19), (20), (21)과 같이 표현되며, 수직인 방향의 관입력은 식 (22), (23), (24)와 같이 표현할 수 있다. 또한 빙판의 관입 시 발생하는 관입에너지는 식(25), (26), (27)과 같으며, 수직인 방향의 관입변위는 식 (28), (29), (30)과 같다.

$0 < \zeta_1 < z_1$ 일 때,

$$A_1 = 2H\zeta_1 \quad (19)$$

$z_1 < \zeta_2 < z_1 \times z_2$ 일 때,

$$A_2 = A_1 + HW \quad (20)$$

$z_1 \times z_2 < \zeta_3 < z_1 \times z_3$ 일 때,

$$A_3 = A_2 + 2H\zeta_3 + HW \quad (21)$$

여기서, $z_1 = (100/\sqrt{2} - 50)$, $z_2 = (1 + \sqrt{2})$,

$z_3 = (2 + \sqrt{2})$, $W = 100$ 이다.

$0 < \zeta_1 < z_1$ 일 때,

$$F_1 = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H)^{0.5} \zeta_1^{0.5} \quad (22)$$

$z_1 < \zeta_2 < z_1 \times z_2$ 일 때,

$$F_2 = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (A_1 + HW)^{0.5} \quad (23)$$

$$z_1 \times z_2 < \zeta_3 < z_1 \times z_3 \text{ 일 때,} \\ F_3 = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (A_2 + 2H\zeta_3 + HW)^{0.5} \quad (24)$$

$$0 < \zeta_1 < z_1 \text{ 일 때,} \\ IE_1 = \frac{1}{1.5} \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H)^{0.5} \zeta_1^{1.5} \quad (25)$$

$$z_1 < \zeta_2 < z_1 \times z_2 \text{ 일 때,} \\ IE_2 = \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (A_1 + HW)^{0.5} \zeta_2 \quad (26)$$

$$z_1 \times z_2 < \zeta_3 < z_1 \times z_3 \text{ 일 때,} \\ IE_3 = \frac{1}{3H} \lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (A_2 + 2H\zeta_3 + HW)^{1.5} \quad (27)$$

$$0 < \zeta_1 < z_1 \text{ 일 때,}$$

$$\zeta_1 = \left[\left(\frac{1}{2} M_e V_n^2 \right) \frac{1.5}{\lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (2H)^{0.5}} \right]^{1/1.5} \quad (28)$$

$$z_1 < \zeta_2 < z_1 \times z_2 \text{ 일 때,} \\ \zeta_2 = \left(\frac{1}{2} M_e V_n^2 \right) \frac{1}{\lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} (A_1 + HW)^{0.5}} \quad (29)$$

$$z_1 \times z_2 < \zeta_3 < z_1 \times z_3 \text{ 일 때,} \quad (30) \\ \zeta_3 = \left[\left(\frac{1}{2} M_e V_n^2 \right) \left(\frac{3H}{\lambda \sigma_m^* \sqrt{A_0} \left(\frac{A_2}{\zeta_3} + 2H + \frac{HW}{\zeta_3} \right)^{1.5} \zeta_3^{0.5}} \right) \right]$$

Fig. 19에는 Case (d)에 대해 거대빙판(5 km (W) x 5 km (L) x 5 m (T))의 충돌속도가 0.2 m/s 인 조건에서 관입거리에 따른 빙충격 하중과 접촉면적의 특성이 도시되어 있다.

Fig. 19 The relation between ice impact force and contact area for indentation displacement in Case (d). Normalized stress 0.92 MPa, reference contact area 100 m², λ 0.667

Case (d)의 경우 빙-구조물 충돌과정에서 완전침투 깊이는 약 70.7 m 정도로서 이 때 발생하는 충격하중의 크기는 대략 267.3 MN 정도이지만, 실제현상에서는 완전침투에 거의 도달하지 못하기 때문에 관입과정에서 발생하는 빙충격 하중은 이보다 작은 값이 발생하게 된다. 특히 구조물의 형상에 의해 관입과정에서 발생하는 충격하중과 접촉면적은 단계적으로 증가하는 경향을 나타내는데, Fig. 19의 (a) 구간

에서 보면 빙판의 초기관입 시 켜기형상에 의해 관입변위가 증가함에 따라 충격하중과 접촉면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 (b) 구간에서는 Case (a)와 유사한 형태의 관입조건이므로 빙충격 하중과 접촉면적 모두 일정한 경향을 나타내게 되고 (c) 구간에서는 양 끝단에 의한 켜기형상에 의해 관입변위가 증가함에 따라 다시 충격하중과 접촉면적 모두 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

일반적으로 빙-구조물 상호작용 과정에서 발생하는 빙충격 하중을 추정하기 위한 다양한 형태의 해석법이 존재하는데, 본 연구에서는 에너지 방법을 이용해 보다 간단히 구조물과 빙 충돌 시 작용하는 빙충격 하중에 대한 분석을 수행하였다. 특히 빙-구조물 충돌 시 빙판의 두께가 커지는 경우 접촉면적이 증가하기 때문에 구조물의 관입깊이가 감소된다는 관점에서 다음과 같이 충돌속도와 빙판의 두께 변화 및 구조물의 형상에 따른 빙충격 하중의 특성을 도출하였다.

빙판의 충돌속도와 두께 분포는 설계 빙하중 산정에 있어 매우 중요한 사항이다. 본 연구에서 빙-구조물 충돌 시 완전침투는 대부분 2.0 m/s 이상의 충돌속도에서 발생하게 되는데, 보퍼트 해 여름철 평균 해빙의 이동속도인 0.2 m/s 고려하면 실제현상에서는 완전침투가 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 완전침투는 빙판의 두께가 증가함에 따라 보다 낮은 충돌속도에서 완전침투에 도달하는 경향을 나타낸다. 빙판의 두께 및 크기, 이동속도, 즉 충돌속도와 함께 구조물의 형상은 빙충격 하중 특성에 지배적인 영향을 미치며, 충격하중 추정에 있어 매우 중요한 정보이다. 특히 빙-구조물 충돌과정에서 구조물의 형상 및 빙판의 크기(일반적인 규모의 빙판 또는 거대빙판)에 따라 추정된 충격하중도 큰 차이를 나타낸다. 일반적인 규모의 빙판과 충돌 시에는 구조물의 폭 또는 직경이 작은 경우 구조물의 형상에 따른 영향이 낮은 편이지만, 구조물의 폭 또는 직경이 증가함에 따라 구조물의 형상에 따른 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 아울러, 거대빙판과의 충돌 시에도 구조물의 형상에 따른 영향이 큰 편이며, 충격하중 특성 또한 구조물의 형상과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 하지만 빙판의 폭과 길이가 동일한 경우 두께가 커지면서 얼음의 전체 질량도 커지고 따라서 충돌속도가 같더라도 운동에너지가 커지면서 결과적으로 관입깊이가 커질 수밖에 없으므로 이에 대한 고찰이 필요할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 계절별 실패역 해빙의 크기와 두께, 이동속도에 대한 자료 및 관입압력과 접촉면적에 대한 현장 실측자료들의 통계적 분석을 수행하고 보다 다양한 빙-구조물 충돌 시나리오에 대한 해석을 수행한다면 극지 해양구조물에 작용하는 설계 빙하중 산정을 위한 기초 기술을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 과제인 “해양 극한환경 극복기술 (PES149D)” 과제와 “극한지 해양구조물 지지부의 형상에 따른 빙하중 특성 연구 (PES148A)” 과제의 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- Cammaert, A.B. & Tsinker, G.P., 1981. Impact of large ice floes and icebergs on marine structures. *Proceedings of the 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 2, pp.653-662.
- Cammaert, A.B. Wong, T.T. & Curtis, D.D., 1983. Impact of icebergs on offshore gravity and floating platforms. *Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 4, pp.519-536.
- Choi, K.S. & Jeong, S.Y., 2008. Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(2), pp.175-185.
- Choi, K.S. Jeong, S.Y. & Nam, J.H., 2009. Prediction of Design Ice Load on Icebreaking Vessels under Normal Operating Conditions. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.603-610.
- Daley, C.G. & Riska, K.J., 1995. *Conceptual Framework for an Ice Load Model*, PERD-PRDE Report.
- Daley, C.G., 1999. Energy based ice collision forces. *Proceedings of the 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 2, pp.674-686.
- Gershunov, E.M., 1986. Collision of large floating ice feature with massive offshore structure. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 112(3), pp.390-401.
- Johnson, R.C. & Nevel, D.E., 1985. Ice impact structural design loads. *Proceedings of the 8th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 2, pp.569-578.
- Korzhavin, K.N., 1971. *Action of Ice on Engineering Structures*. US Army CRREL Translation TL260, Hanover, N.H., USA.
- Sanderson, T.J.O., 1988. *Ice Mechanics - Risks to Offshore Structures*. Publ. Graham and Trotman, London.
- Timco, G.W., 1986. Indentation and Penetration of Edge-Loaded Freshwater Ice Sheets in the Brittle Range. *Proceedings of the 5th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, 4, pp.444-452.
- Timco, G.W. & Frederking, R., 2004. Probabilistic analysis of seasonal ice loads in the Molikpaq. *Proceedings of the 17th International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR)*, 2, pp.68-76.

정성엽

조성락