
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 4 號 1996年 11月
 Transactions of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 33, No. 4, November 1996

빙-구조물 상호작용의 동적거동해석

임채환*, 이종원**, 신병천*

Prediction of Dynamic Behavior of Ice-Structure Interaction Process

by

Chae Whan Rim*, Jong Won Lee** and Byung Chun Shin*

요 약

평탄빙과 수직구조물이 상호작용 하는 경우의 구조물의 동적거동과 빙하중 추정을 하였다. 구조물의 형태는 수직구조물이고 얼음의 파괴형태는 분쇄파괴로 가정하였다. 평탄빙은 구조물과 접촉하여 분쇄파괴가 일어나는 접촉부위와 탄성변형을 하는 외곽부위로 나누었으며, 구조물은 스프링-질량-감쇄로 구성된 1자유도계로 치환하였다. 강성이 큰 구조물과 작은 구조물에 대하여 제시된 모델에 의한 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 비교결과는 본 모델이 빙하중과 구조물의 거동추정을 정도있게 할 수 있다는 것을 보여주었다.

Abstract

The dynamic ice forces on a structure with vertical wall and the corresponding responses of the structure are predicted. The structure was simplified as a 1-degree-of-freedom system which consists of spring-mass-damper. Ice was divided into two parts: near field and far field. In the near field, ice crushing occurs. In the far field, ice sheet moves with constant speed. The results obtained from the numerical simulation using the model and the experiment of indentation with stiff and flexible structures are compared. The comparisons show that the model can predict the behavior of structure and ice load with accuracy.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95. 11. 9.)

접수일자 : 1996년 2월 3일, 재접수일자 : 1996년 9월 19일

* 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부

** 한국기계연구원 구조시스템연구부

1. 서 언

극지방의 해양구조물은 얼음으로 둘러싸여 있다는 독특한 작업환경으로 인하여 보통의 해양구조물과는 구분이 되며 극지방 해양구조물의 설계를 위해서는 얼음에 의하여 구조물에 작용하는 빙하중 추정이 필수적이다.

빙하중은 얼음종류, 구조물의 형태에 따라 구조물의 응답이 정적 또는 동적으로 나타나고 그 추정방법도 아주 다르다[1,2]. 따라서 빙하중 추정을 위한 실험실 실험과 현장실험이 최근까지 많이 수행되었다[3-8]. 이들의 실험은 얼음은 여러가지 형태로 파괴가 되고 파괴양식은 관입속도(indentation velocity), 얼음두께, 관입기의 폭(width of indenter), 얼음의 성질등에 따라 크게 다르다는 것을 밝혀내었다. 빙하중 추정을 위한 수치모델들도 여러가지 형태로 제안되었다. [9-14]

여러가지 형태의 빙하중과 구조물의 응답중에서 가장 위험한 것은 구조물의 고유진동수 부근에서 발생하는 빙유기진동(ice-induced vibration)이다. 극지 해양구조물의 빙유기 진동은 일찍부터 계측되어 왔다. 알래스카의 Cook Inlet에 설치된 여러 개의 석유시추 플랫폼을 대상으로 1963년 겨울부터 1968년 겨울까지 계측된 구조물의 응답에 의하면 구조물이 동적하중을 받는다는 것을 명확하게 보여주었다[11]. 빙유기 진동은 등대나 교각등 세장구조물(slender structure)에서만 나타나는 것으로 알려졌다. 그러나, 캐나다의 보퍼트해(Beaufort Sea)에 설치된 구조물 'MOLIKPAQ'에서 계측된 빙유기 진동으로 인하여 이와같은 정설이 깨어졌다[15]. 'MOLIKPAQ'는 수선면적이 89m×89m인 거대한 케이슨식 구조물이었다.

빙유기 진동의 원인에 대해서 Nordlund등[16]에 의하면 정상상태진동(steady-state vibration)은 얼음의 분쇄파괴(crushing failure)에 의하여 발생한다고 하였다. Mäattanen[17]은 정상상태 진동은 얼음의 분쇄파괴가 음의 감쇠효과(negative damping)를 일으켜 발생한다고 하였다. 아직까지 빙유기 진동에 대한 명확한 시나리오는 없으나 여러가지면에서 의견의 통일은 되어 가고 있다.

본 연구에서는 빙-구조물의 동적상호작용 해석을 위한 Kärnä [14]의 모델을 발전시킨 것이다 [18,19]. 얼음으로부터 하중을 받는 구조물은 1자유도계로 치환되었으며 얼음은 분쇄파괴(crushing)가 일어나는 접촉부위(near field)와 탄성변형을 하는 외곽부위(far field)로 나누었다. 이 모델은 평탄빙이 일정한 속도로 구조물을 밀면서 진행할 때 발생하는 빙하중과 구조물의 동적거동을 추정할 수 있다. 적용되는 구조물의 형태는 수직구조물이며 얼음의 파괴형태는 분쇄파괴이다. 개발된 모델을 이용한 수치해석과 강성이 큰 구조물(stiff structure)과 강성이 작은 구조물(flexible structure)에 대한 실험결과와 비교하였다.

2. 구조물의 운동방정식

빙-구조물 상호작용 해석을 위하여 구조물을 여러가지로 모델화 할 수 있다. 그 중의 한가지 방법은 구조물을 복잡하게 모델화 하고 기존의 유한요소해석 프로그램을 이용하여 질량, 감쇠, 강성 매트릭스를 얻는 방법이 있다. 이 방법은 전체적인 구조물의 성질을 정확하게 반영할 수 있고 얼음과의 접촉부위를 잘 나타낼 수 있다. 또한 얼음도 접촉부위에서 세세한 얼음의 거동을 구현할 수 있어 얼음의 산발적파괴(nonsimultaneous failure)를 나타낼 수 있다는 장점이 있다. 반면에 유한요소해석 프로그램의 데이터구조를 알아야 하고 프로그램이 복잡해지는 단점이 있다. 구조물을 간단하게 나타내기 위해서는 구조물을 1자유도계로 나타내는 방법이 있다. 이 방법은 얼음도 1자유도계로 나타내야 하기 때문에 얼음의 산발적파괴를 나타낼 수 없는 반면, 빠르고 간단하게 빙하중을 추정할 수 있다.

본 연구에서는 구조물을 스프링-질량-감쇠기로 구성된 1자유도계로 나타내어 얼음에 의하여 구조물에 작용하는 하중과 구조물의 응답을 구하였다. 1자유도계로 나타낸 구조물의 방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

여기서 m , c , k 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강

성을 나타내고 \ddot{x}, \dot{x}, x 는 구조물의 가속도, 속도, 변위를 나타낸다. 하중 $f(t)$ 는 얼음과의 상호작용에서 나타나는 하중이기 때문에 지금으로서는 미지수이다. 또한, 하중 $f(t)$ 는 얼음과 구조물의 상대변위 $r(t)$ 와 상대속도 $\dot{r}(t)$ 의 함수이다.

$$f(t) = f(r(t), \dot{r}(t)) \quad (2)$$

따라서 식(1)은 식(2)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(r(t), \dot{r}(t)) \quad (3)$$

이 구조물의 운동방정식은 다음 절에서 구한 얼음의 운동방정식과 함께 풀어야 한다.

3. 얼음의 운동방정식

얼음과 구조물이 서로 밀면서 운동을 할때 얼음은 매우 복잡한 거동을 나타낸다. 구조물과 멀리 떨어진 부근에서는 파괴는 일어나지 않으며 강제운동과 탄성변형을 한다. 구조물과 직접 접촉하는 부위는 하중이 증가함에 따라 파괴가 일어난다.

얼음의 종류와 구조물의 형상 및 강성에 따라 얼음의 파괴의 종류는 분쇄(crushing), 좌굴(buckling), 균열(crack)등의 여러가지로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 얼음은 평탄빙(sheet ice)이고 구조물의 형상은 수직인 시스템에 대하여 수치적 모델을 제시하고 그 해를 구하였다. 구조물의 강성은 크거나(stiff) 또는 작을(flexible)수 있다. 따라서 본 모델에 의하여 해석될 수 있는 시스템은 평탄빙이 수직 구조물에 하중을 가하여 얼음이 분쇄파괴가 일어나는 경우이다.

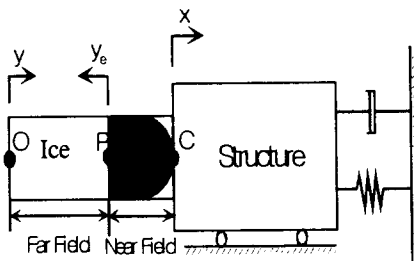


Fig. 1 Schematic figure of ice and structure

얼음의 분쇄파괴는 주로 구조물과의 접촉면에서 어느정도 떨어진 부근까지만 일어나고 많이 떨어진 곳에서는 파괴가 일어나지 않는다. 파괴가 일어나는 부근을 접촉부위(near field), 파괴가 일어나지 않는 먼 부근을 외곽부위(far field)라 부른다. [14] 외곽부위와 접촉부위의 개념을 Fig. 1에 나타내었다. 다음에서는 외곽부위와 접촉부위에서의 얼음의 지배방정식을 기술한다.

3.1 외곽부위(far field)

외곽부위는 얼음이 강제운동과 탄성변형을 하는 부분이다. 강제운동은 구조물과의 접촉지점에서 멀리 떨어져 있어 탄성변형이 없는 어느 한 점 (Fig. 1의 점 O)의 운동으로 기술된다. 탄성변형은 구조물에 의하여 얼음에 작용하는 하중으로 발생하고 외곽부위와 접촉부위의 접촉지점 P의 점 O에 대한 상대운동으로서 나타낼 수 있다.

얼음의 강제운동방정식은 다음과 같다.

$$M_{ice}(1 + m_a)\ddot{y} + C_d\dot{y} = f_d - f(t) \quad (4)$$

여기서 M_{ice} 는 얼음의 질량, m_a 는 얼음의 부가 질량, y 는 점 O의 변위이고 \dot{y}, \ddot{y} 는 각각 점 O에서의 속도와 가속도를 나타낸다. f_d 는 조류와 바람에 의한 얼음에 작용하는 구동력이고, $f(t)$ 는 구조물에 의한 얼음에 작용하는 얼음하중이다. C_d 는 얼음이 초기속도를 가지고 접근할 때 구동력 f_d 와 평형을 이루기위한 감쇠계수이다.

얼음의 탄성방정식은 다음과 같다.

$$K_{ice} y_e(t) = f(t) \quad (5)$$

여기서 K_{ice} 는 얼음의 탄성강성도이고 y_e 는 점 O에 대하여 점 P의 상대적인 변위를 나타낸다. $f(t)$ 는 구조물과 얼음의 상호작용에서 발생하는 빙하중이다. y_e 는 압축변위를 양으로 취하였다.

3.2 접촉부위(near field)

접촉부위는 얼음이 구조물과 접촉하여 분쇄파괴가 일어나는 부위이다. 분쇄는 얼음에 압축하중이 작용하여 발생하는 것으로 압축하중을 압축변위로서 나타내야 한다. 이곳의 압축변위 $r(t)$ 는 Fig.1

의 점 P와 점 C의 상대변위로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = y(t) - y_e(t) - x(t) \quad (6)$$

여기서 $y(t)$, $y_e(t)$, $x(t)$ 는 앞절에서 설명한 얼음의 외곽부위 변위, 얼음의 외곽부위 탄성변형, 구조물 변위를 각각 나타낸다.

구조물과 얼음이 연결되어 있지 않기 때문에 $r(t)$ 가 음인 경우 빙하중 $f(t)$ 는 0이 된다. 빙하중은 접촉부위의 점 P와 점 C와의 상대변위 $r(t)$ 와 상대속도 $\dot{r}(t)$ 의 함수이며 얼음의 비선형 거동으로 인하여 매우 비선형적이다.

접촉부위에서의 얼음의 거동을 살펴보면 하중증가(loading phase), 분쇄파괴(crushing failure), 추출(extrusion), 하중감소(unloading), 틈새(gap) 발생등의 과정으로 나눌 수 있다.(Fig. 2 참조) 하중증가과정은 얼음이 구조물과 접촉하기 시작하면서 발생한다. 이때의 하중-변위관계는 비선형적이며 하중속도(loading rate)의 영향을 받는다.(Fig. 2(a) 참조) 하중이 어느 수준에 도달하면 분쇄파괴가 일어나는데 분쇄파괴가 일어나는 하중은 일정하지 않고 편차가 크다.

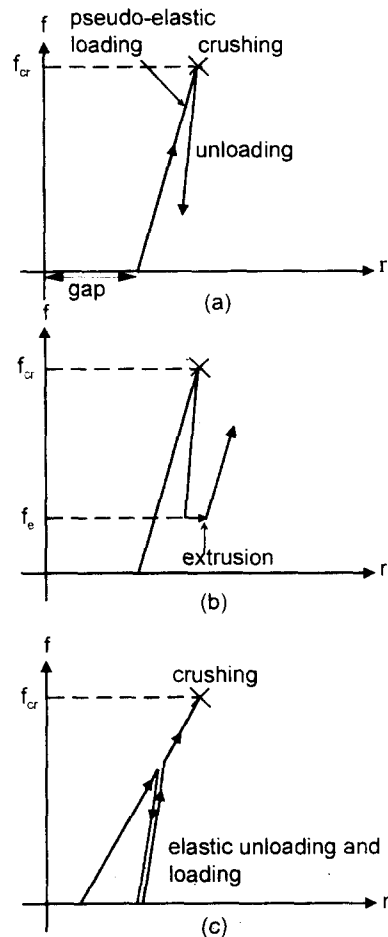
분쇄가 일어난 후 하중이 급격히 감소하면서(unloading) 부취진 얼음들이 추출(extrusion)된다.(Fig. 2(b) 참조) 추출된 얼음의 길이는 얼음파괴깊이(finite ice failure depth)라고 하며 하중감소과정의 특성으로서 나타내진다. 하중감소과정에서는 구조물의 속도가 얼음의 속도보다 빨라져 구조물과 얼음사이에 틈새가 발생할 수도 있다. 구조물과 얼음이 접촉을 다시 시작하면 하중이 증가하게 되어 하중 싸이클이 반복되게 된다.

하중증가과정에서 분쇄파괴가 일어날 때까지 하중이 계속 증가하지 않고 분쇄파괴 이전에 하중이 감소하는 경우가 있다. 이러한 경우 근접부위의 얼음이 탄성거동을 하고 이때의 얼음의 강성은 비선형 거동때보다 크다. 탄성거동으로 하중감소과정(elastic unloading)을 하다가 하중증가 탄성거동(elastic loading)을 하는데, 하중감소 탄성거동을 시작한 하중까지는 탄성거동을 하며 그 이후는 비선형 거동을 한다(Fig. 2(c) 참조).

본 연구에서는 하중증가과정에서 나타나는 비선형의 하중-변위관계를 준선형(pseudo-elastic)으로 가정하였다. 이때의 하중-변위관계식은(Fig. 2(a) 참조)

$$f(t) = k_p r(t) \quad (7)$$

여기서 k_p 는 준선형으로 가정한 얼음의 강성이고, r 은 얼음의 압축변위이다. 실험으로 증명된 것은 압축과정에서 얼음의 일부에 영구변형이 생긴다는 것이다. 이것을 고려하기 위하여 탄성변형의 일부를 영구변형으로 대체시켰다.



(a) Pseudo-elastic loading and unloading
(b) Extrusion
(c) Elastic unloading and loading

Fig. 2 Loading phases

$$r_p = (1 - \alpha_p)r \quad (8)$$

여기서 α_p 는 실험에서 구한 탄성변형의 비율을 나타낸다. 하중이 증가하면서 분쇄하중에 도달하면 얼음의 분쇄가 일어난다. 분쇄하중 f_{cr} 은

$$f_{cr} = p_{cr} hB \quad (9)$$

여기서 p_{cr} 은 얼음의 분쇄압력, h 는 얼음의 두께, B 는 관입기의 폭이다.

분쇄압력은 하중속도(loading rate)에 따라 크게 달라진다. 하중속도가 느릴 때는 얼음이 연성거동을 하고 하중속도가 클 때는 취성거동을 한다. 따라서 분쇄압력을 하중속도에 따라 다음과 같이 나누었다[20,21].

$$p_{cr} = p_{cr1} \quad 0 \leq \dot{r} \leq \dot{r}_0 \quad (10)$$

$$= p_{cr2} \quad \dot{r} > \dot{r}_0$$

여기서 $p_{cr1} > p_{cr2}$ 이다. 분쇄압력과 하중속도와의 관계를 Fig. 3에 보였다.

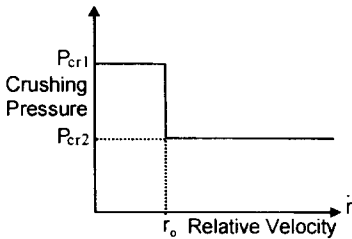


Fig. 3 Crushing pressure and relative velocity

하중감소과정은 얼음의 분쇄가 일어난 후 발생하는데, 본 보고서에서는 하중이 0.01-0.05sec 사이에서 하중이 최대치(f_c)에서 최소치(f_e)로 떨어지도록 하였다.(Fig. 2(b) 참조) 이것은 하중이 순간적으로 떨어진다는 가정을 채택하기 보다는 실험에 나타난 현상을 정확하게 나타내기 위해서이다. 최소하중 f_e 가 0이 아닌이유는 하중감소후 얼음의 추출이 일어나더라도 틈새가 생기지 않아 구조물과 얼음이 접촉해 있을 경우 부쉬진 얼음을 통하여 구조물에 하중이 작용하기 때문이다.

하중감소과정에서는 부쉬진 얼음의 추출이 발생하는데 이것은 얼음의 길이가 짧아지는 효과를 나

타낸다. 이러한 효과를 나타내기 위하여 파괴길이 (crushing length) d_c 를 수직구조물에 대한 파괴 길이를 사용하여 다음과 같이 나타내었다[22].

$$d_c = 0.01 p_{cr} h \quad (11)$$

여기서 p_{cr} 은 얼음의 파괴압력, h 는 얼음의 두께이다.

영구변형 r_p 와 파괴길이 d_c 를 고려하면 식(6)의 압축변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = y(t) - y_e(t) - x(t) - r_p(t) - d_c \quad (12)$$

이상은 본 연구에서 개발된 빙-구조물 상호작용 모델을 설명하였으며 이 모델을 도식적으로 나타낸것이 Fig. 4이다.

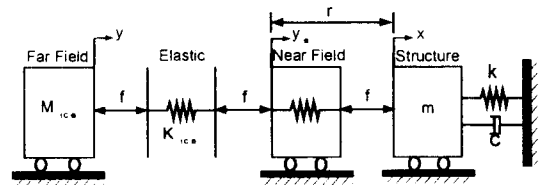


Fig. 4 Schematic diagram of ice-structure interaction

4. 해석 프로그램

2-3절에 기술한 구조물과 얼음의 운동방정식을 종합하면 다음과 같다.

구조물의 운동방정식 :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (13)$$

얼음의 운동방정식 :

$$M_{ice}(1 + m_a)\ddot{y} + C_d\dot{y} = f_d - f(t) \quad (14)$$

$$r(t) = y(t) - y_e(t) - x(t) - r_p(t) - d_c \quad (15)$$

$$f(t) = f(r(t), \dot{r}(t)) \quad (16)$$

위의 방정식을 이용하여 각 시간증분마다 각 변수들이 수렴할때까지 반복적으로 해를 구하였다. 개발된 프로그램의 핵심이라 할 수 있는 하중 싸이클에 대한 프로그램의 흐름도를 Fig. 5에 나타내었다.

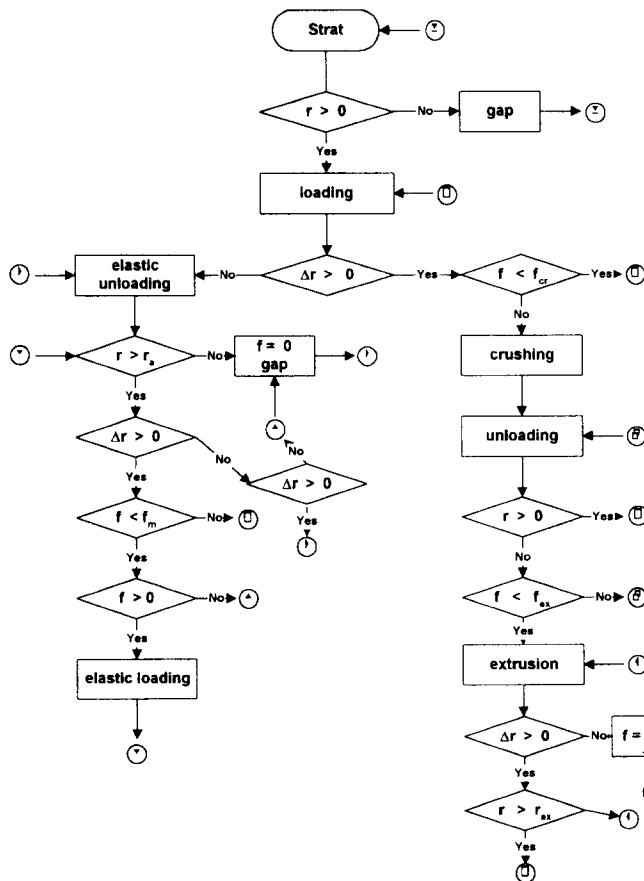


Fig. 5 Flow chart for loading

5. 해석에

본 절에서는 앞절에서 개발된 프로그램을 이용한 해석결과와, 강성이 큰 구조물(stiff structure)과 강성이 작은 구조물(flexible structure)에 대한 관입실험 결과와 비교하였다.

관입실험은 Technical Research Center of Finland(VTT)에서 수행한 것이다. 실험장치의 개략적인 그림을 Fig. 6에 보였다. 얼음은 수직형입자 S2형 청빙(columnar grained S2 freshwater ice)이고 두께는 100mm내외이다. 얼음을 밀기위한 기구는 관입기(indentor)와 관입기뒤에 설치된 구조물로 구성되어 있다. 구조물은 스프링이 달려있어 구조물의 강성을 바꿀 수 있다.

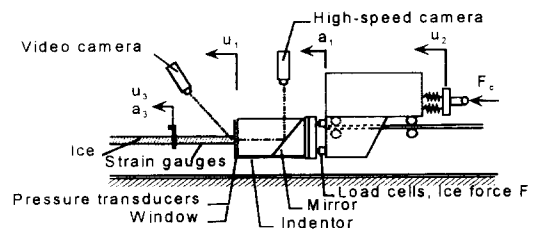


Fig. 6 Experiment set-up of indentation test

유압하중장치가 일정한 관입속도(indentation velocity)(du/dt)로 구조물을 밀어 얼음이 일정속도로 구조물을 통과하는 현상을 구현하였다. 관입기의 변위(u_i)와 속도(du_i/dt), 구조물에 작용하는 하중, 구조물의 가속도(a_i)를 계측하였다.

5.1 강성이 큰 구조물(stiff structure)

구조물의 강성은 65kN/mm, 질량은 2,000kg 고 유진동수는 27Hz이다. 얼음의 두께는 115mm, 관입속도는 300mm/sec, 관입기 폭은 300mm이다. 계측된 빙하중, 구조물속도와 가속도를 Fig. 7에 나타내었다. 하중증가과정에서 약간의 굴곡이 있으나 전체적으로 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. peak 하중은 약 90kN부근에서 변화하고 있다.

하중증가과정에서는 속도가 0 부근에서 거의 변화하지 않고 있다가 분쇄가 일어나는 부근에서 속도가 크게 증가하였다. 하중감소과정에서 속도가

다시 0 부근으로 떨어진다. 가속도도 이와 비슷한 경향을 보인다. 구조물 속도는 음의 방향으로 overshoot가 되지 않은 것이 특징이다.

계산된 빙하중, 구조물의 속도와 가속도를 Fig. 8에 나타내었다. 계산된 빙하중은 계측된 하중보다는 굴곡이 덜하지만 전체적인 경향이 비슷하다. 구조물의 속도에서는 overshoot 현상이 나타나고 있지만 전체적인 경향이 실험결과와 같다고 할 수 있다. 가속도도 실험결과와 같은 경향을 보이고 있다. 이상의 결과로 볼 때 개발된 프로그램은 거의 정확하게 빙하중과 구조물의 거동을 나타내고 있다고 할 수 있다.

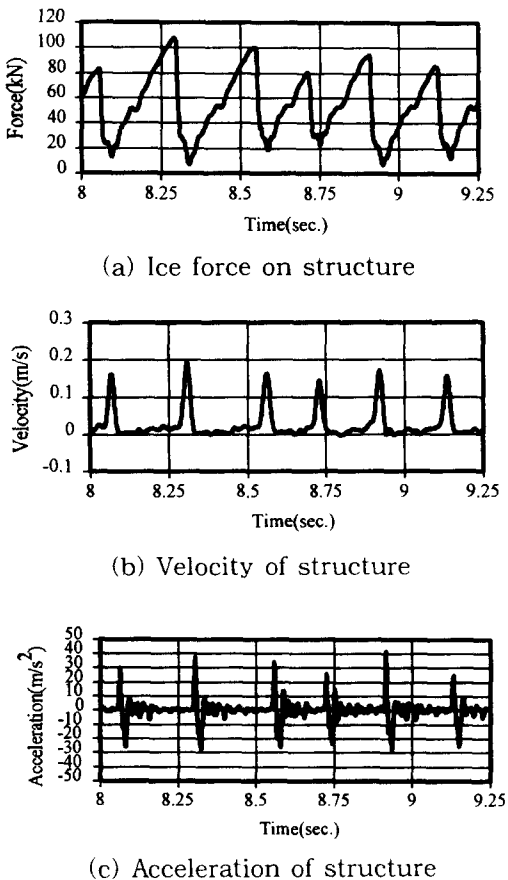


Fig. 7 Experimental results of stiff structure

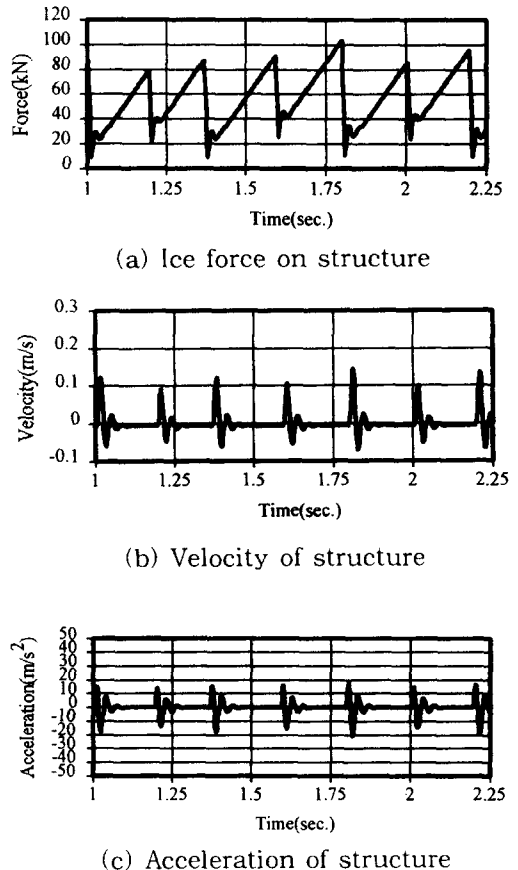


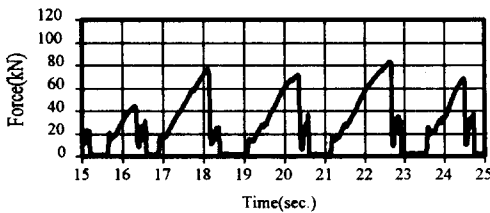
Fig. 8 Simulation results of stiff structure

5.2 강성이 작은 구조물(flexible structure)

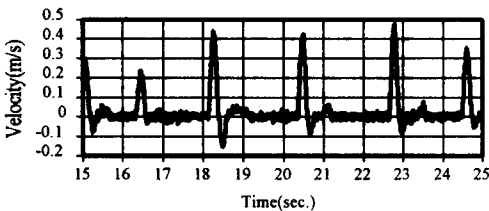
구조물의 강성은 2.4kN/mm, 질량은 15,000kg, 고유진동수는 2.0Hz이다. 얼음의 두께는 100mm, 관입속도는 30mm/sec, 관입기 폭은 100mm이다. 계측된 빙하중, 구조물 속도와 가속도를 Fig. 9에 각각 나타내었다. Fig. 9(a)에 나타낸바와 같이 하중이력이 강성이 큰 구조물의 것과는 크게 다르다. 하중증가 과정은 강구조물의 경우보다 좀더 직선적이고, 하중감소 과정후에는 바로 하중증가 과정이 시작되지 않는다. 하중감소과정 이후 탄성하중증가와 감소가 반복되고 그 이후 swing back 현상이 나타나 하중이 거의 0이 된다. 구조물 속도는 하중감소과정, 탄성하중증가와 감소과정, swing back 과정 초기에서 크게 변동한다. 그 이외의 구간에서는 속도가 거의 0이다. 가속도도 속도에 따

라 크게 변화한다.

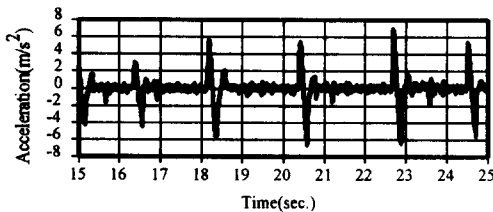
유연구조물에 대하여 계산된 빙하중, 구조물 속도와 가속도를 Fig. 10에 각각 나타내었다. 빙하중의 하중증가과정에서 탄성하중증가와 감소과정이 되풀이되다가 준탄성 하중증가(pseudo elastic loading) 과정이 나타났다. 이러한 탄성하중증가와 감소는 실험에서는 크게 나타나지 않았다. 하중감소과정후에는 실험에 나타난 것과 같은 주기가 매우 짧은 탄성하중증가와 감소과정이 나타났고 그 이후 실험결과와 보다는 짧기는 하지만 swing back 과정이 나타났다. 전체적인 경향을 살펴볼 때 실험결과와 계산결과가 비슷하다. 구조물의 속도와 가속도도 고주파 성분을 제거하면 실험결과와 계산결과가 유사하다.



(a) Ice force on structure

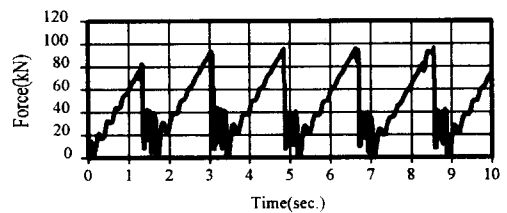


(b) Velocity of structure

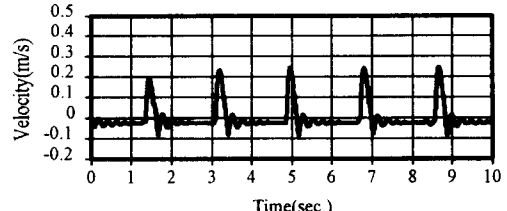


(c) Acceleration of structure

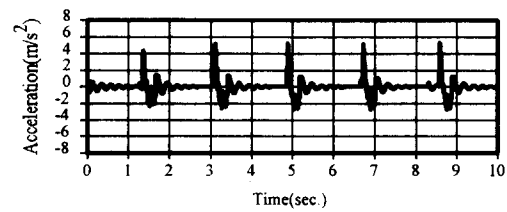
Fig. 9 Experimental results of flexible structure



(a) Ice force on structure



(b) Velocity of structure



(c) Acceleration of structure

Fig. 10 Simulation results of flexible structure

6. 결 언

본 연구에서 빙-구조물 상호작용의 빙하중과 구조물의 응답을 추정할 수 있는 모델을 개발하였다. 얼음은 분쇄파괴가 일어나는 접촉부위(near field)와 강제운동이 일어나는 외곽부위(far field)로 나누었다. 구조물은 1자유도의 스프링-질량-감쇠계로 치환되었다. 개발된 모델에 의한 계산결과와 강성이 큰 구조물(stiff structure)과 강성이 작은 구조물(flexible structure)에 대한 관입실험과 비교하였다. 두 결과는 잘 일치하고 있으며 개발된 모델이 구조물의 동적응답과 빙하중 추정에 유용하게 쓰일 수 있다는 것을 보여주었다.

위에서 언급하였듯이 본 모델을 구조물의 거동과 빙하중 추정 등의 구조물 해석에 쓰일 수 있지만, 본 모델을 설계하중 추정에 쓰이기에는 아직 미흡하다. 설계빙하중 추정을 위하여는 다음과 같은 몇가지 연구가 선행되어야 할 것이다. 먼저, 얼음의 성질시험에서 계측된 얼음의 성질과 본 모델에서 쓰이는 준탄성강도(pseudo-elastic stiffness), 탄성강도(elastic stiffness), 외곽부위강도(far field stiffness)등의 추정을 위한 데이터베이스를 축적하여야 한다. 또한 얼음의 성질시험에서 계측되지 않는 파괴길이(failure length)에 대한 추정방법이나 데이터베이스 구축이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 국제공동연구사업으로 수행된 연구결과의 일부이다. 본 연구를 위해 조언을 해주고 실험데이터를 제공해 준 Technical Research Center of Finland(VTT)의 Dr. T. Kärnä 에게 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] Cammaert, A.B. and Muggeridge, D.B., *Ice Interaction with Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1988
- [2] Sanderson, T.J.O., *Ice Mechanics, Risk to Offshore Structures*, Graham & Trotman, 1988
- [3] Määtänen, M., "Laboratory Tests for Dynamic Ice-Structure Interaction," *Eng. Struct.*, No. 3, pp. 111-116, 1981
- [4] Sodhi, D.S., "Ice-Structure Interaction during Indentation Tests," *Proceedings of IUTAM-IAHR Symp.*, Springer-Verlag, pp. 619-640, 1991
- [5] Muhonen, A., Kärnä, T., Eranti, E., Riska, K., Järvinen, E. and Lehmus, E., *Laboratory Indentation Tests with Thick Freshwater Ice*, Vol I, VTT Research Notes 1370, 1992
- [6] Timco, G. and Frederking, R., "Confined Compression Test," *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 13-28, 1986
- [7] Fransson, L., Olosson, T. and Sandkvist, J., "Observations of the Failure Process in Ice Blocks Crushed by a Flat Indentor," *Proceedings of POAC*, Vol I, pp. 501-514, 1992
- [8] Christensen, F.T., Timco, G.W. and Nwogu, O.G., "Compliant Model Tests with the Great Belt West Bridge Piers in Ice. Part II : Analysis of Results.," 1994
- [9] Matlock, H., Dawkins, W.P. and Panak, J.J., "A Model for the Prediction of Ice-Structure Interaction," *Proceedings of OTC*, OTC1066, Vol. I, pp. 687-694, 1969
- [10] Matlock, H., Dawkins, W.P. and Panak, J.J., "Analytical Model for Ice-Structure Interaction," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, EM4, pp. 1083-1092, 1971
- [11] Blenkarn, K.A., "Measurement and Analysis of Ice Forces on Cook Inlet Structures," *Proceedings of OTC*, OTC 1261, Vol. II, pp. 365-378, 1970
- [12] Toyama, Y., Sensu, T., Minami, M. and Yashima, N., "Model Tests on Ice-Induced Self-Excited Vibration of Cylindrical Structures," *Proceedings of POAC*, Vol. II, pp. 834-844, 1983
- [13] Tsuchiya, M., Kanie, S., Ikejiri, K., Yoshida, A. and Saeki, H., "An Experimental Study on Ice-structure Interaction," *Proceedings of*

- OTC, OTC 5055, pp. 321-327, 1985
- [14] Kärnä T., "A Procedure for Dynamic Soil-Structure-Ice Interaction," *Proceedings ISOPE Conf.* Vol. 2, pp. 764-771, 1992
- [15] Jefferies, M.G. and Wriqth, W.H., "Dynamic Response of 'MOLIKPAQ' to Ice-Structure Interaction", *Proceedings of OMAE*, Vol. 4, pp. 201-220, 1988
- [16] Nordlund, O.P., Kärnä T. and Järvinen E., "Measurements of Ice-Induced Vibrations of Channel Markers," *Proceedings of IAHR Ice Symp.* Vol 2, pp. 537-548, 1988
- [17] Määttänen, M., "Ice Forces on Fixed, Flexible Structures," *IAHR State-of-the-art Report by the Working Group on Ice Forces on Structures*(T. Carstens, Ed.), U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Special Report 80-26, pp. 107-130, 1980
- [18] 신 병천외 , 극지용 해양구조물의 설계기술 개발(I), 한국기계연구원 연구보고서 UCN022-165, M, 1994
- [19] 신 병천외, 극지용 해양구조물의 설계기술개발 (II), 한국기계연구원 연구보고서 UCN068 -276, M, 1995
- [20] Timco, G., Irani, M.B., Tseng, J., Liu, L.K and Zheng, C.B., "Model Tests of Dynamic Ice Loading on the Chinese JZ-20-2 Jacket Platform," *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 19, pp. 819 -832, 1992
- [21] Sodhi, D.S., "Effective Pressure Measured during Indentation Tests in Freshwater Ice," *Proceedings of Cold Regions Engineering Conference*, Feb., pp. 619-627, 1991
- [22] Eranti, E., *Dynamic Ice Structure Interaction - Theory and Applications*, Publication No. 90, Technical Research Center of Finland, 1992