

점성변형 특성을 고려한 빙판의 충돌거동에 대한 수치해석

노 인 식* · 신 병 천*

(1993년 9월 15일 접수)

Numerical Simulation of Colliding Behaviors of Ice Sheet Considering the Viscous Material Properties

In-Sik Nho* · Byung-Chun Shin*

Key Words : Arctic engineering(극지공학), Ice load(빙하중), Visco-plastic analysis(점소성 해석), Dashpot element(대쉬팟 요소), Finite element analysis(유한요소 해석), Incremental formulation(증분형 정식화), Overlay model(적층판 모델)

Abstract

In the present paper, the overall state of the arts of ice mechanics which is the most typical research topic of the arctic engineering field was studied. And also, ice loads generated by ice-structure interaction were estimated using numerical approach. The effects of viscous property of ice sheets to the ice load were investigated.

The time dependent deformation behaviors of ice was modeled by visco-plastic problem using the finite element formalism. Constitutive model representing the material properties of ice was idealized by combined rheological model with Maxwell and Voigt models. Numerical calculations for the bending and crushing behavior of ice sheet which are the most typical interaction modes between ice sheets and structures were carried out. The time dependent viscous behaviors of ice sheets interaction forces acting on structures were analyzed and the results were studied in detail.

1. 서 언

북극 및 남극지방은 지구상 마지막 남아있는 미래의 자원보고로서, 선진제국에서는 이미 오래

전부터 극지자원을 이용하기 위한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 최근에는 북극해 연안에서 석유, 천연가스를 비롯한 다량의 지하자원 매장이 확인됨에 따라 이의 탐사와 채굴을 위한 각종 해상플랫폼과 보급/수송을 위한 쇄빙선과 내빙상

* 정회원, 한국기계연구원, 구조연구실

선의 건조가 증가하는 추세에 있다. 북극해, Baltic해, 백해, Bothnia 만 등 연안이 빙해역으로 둘러싸인 러시아, 핀란드 등지에서는 19세기 후반부터 이미 자국의 연안 해상운송 수요에 따른 필요성에 의해 쇄빙선을 건조, 취항시키고 있으며, 극지공학(arctic engineering)은 이러한 과정에서 시행착오적이며 경험적인 기술로써 태동하기 시작하였다. 1955년 러시아에서 세계 최초로 빙해수조(ice tank)가 건설된 이래 최근까지 서독, 미국, 캐나다, 일본, 핀란드 등지에서 약 10기 이상의 빙해수조가 건설되어 본격적인 모형실험이 수행됨과 아울러 극지현장에서의 각종 조사 및 실험연구가 활발하게 이루어짐으로써 점차 하나의 종합적이며 체계적인 학문으로서 면모를 일신하고 있다. 그러나 아직 국내에서는 극히 생소한 분야로 받아들여지고 있고 학계 또는 업계의 관심 또한 비교적 희박한 실정이다. 따라서 차후에 본격화될 남극개발과 극지용 해양구조물 건조시장의 확보 등 국제경쟁에 대비하여 우리나라에서도 각 요소기술에 대한 사전연구가 시작되어야 할 시점이 도래한 것으로 판단된다.

극지에서 설치, 운항되는 해상구조물 또는 선박의 설계를 위해서는 저온용재료, 저온피로 파괴, 용접, 저온용기계 등 공학전반을 거의 망라하는 포괄적인 연구가 필요하나, 무엇보다도 해빙(sea ice)에 관한 고찰이 우선되어야 함은 당연한 사실이다. 해빙은 종래 구조공학에서 다루어 왔던 일반적인 구조용 재료와는 그 기계적 성질이 너무나 상이하며 재질의 특성에 영향을 미치는 인자가 다양하고 복잡하다. 따라서, 본 연구에서는 해빙의 역학적 특성에 대한 전반적인 분석과 함께 해양구조물에 작용하는 빙하중의 작용기구를 직접적으로 시뮬레이션 할 수 있는 수치해석 기법을 다루었다.

빙하중의 본질은 빙판과 구조물의 상호작용에 의해 발생하는 빙판의 파괴현상과 직접적인 연관이 있으므로 본연구에서는 빙의 특징적인 재료특성이라고 볼 수 있는 시간의존성인 변형, 소위 점성을 고려한 빙판의 구조거동 예측에 초점을 두었다. 즉 빙의 재료적 특성을 수학적으로 모형화하여 빙판의 비선형 점성 거동을 계산할 수 있

는 유한요소해석 프로그램을 구성하고, 몇 가지 전형적인 예제에 대한 수치계산과 결과의 고찰을 통하여 이와 같은 접근방법의 유용성을 검증하는 한편 궁극적으로 극지용 해양구조물에 작용하는 빙하중 추정에 대한 적용 가능성을 검토하였다.

2. 해빙의 강도 및 파괴특성

빙하중을 수치적으로 시뮬레이션하기 위해서는 해빙의 특성에 대한 상세한 고찰이 우선되어야 한다. 여기서는 수치계산과 직접적으로 관련되는 빙의 재료특성 모형화(constitutive modeling)와 파괴강도를 중심으로 간략하게 요약한다.

2.1 해빙의 재료특성

해빙의 생성과정은 결빙시의 온도, 해류, 바람 등 불규칙적인 자연환경의 지배를 받기 때문에 인공적으로 주어진 균일한 조건하에서 제조되는 여러 가지 구조용 재료들에 비하여 표준화되지 못한 다양한 특성을 갖게 된다. 또한 결빙후에도 주위환경에 따라 민감하게 재료성질이 변화하기 때문에 일률적으로 강도 관련 특성치들을 결정하기는 거의 불가능하다. 따라서 여기서는 해빙의 강도특성에 영향을 주는 몇 가지 주된 물리적(physical) 혹은 기계적(mechanical) 인자들에 대하여 개략적인 경향을 기술한다.¹⁾⁻⁷⁾

(1) 온도

온도는 빙의 강도에 결정적인 영향을 주고 있다. 빙은 평상시 절대온도가 용융점에 거의 근접하는 범위에서 자연상태로 존재하기 때문에 역시 용융점 가까이에 있는 고온의 금속재료에서 흔히 볼 수 있는 심한 크리프 현상을 관찰할 수 있다. 따라서 온도가 낮아질수록 크리프변형은 적어지며 빙의 강도는 커지는 방향으로 변화한다. 온도 변화에 따른 강도특성의 변화를 정리하면 다음과 같다.

- 탄성계수 : 온도가 낮아질수록 커진다.
- 항복강도 및 파괴강도 : 온도가 낮아질수록 커진다.
- 점성에 의한 크리프 : 온도가 높아질수록 현

저해진다.

(2) 염도(salinity)

해빙은 결빙과정에서 피할 수 없이 염수를 포함하게 된다. 해수에서 순빙의 결정이 석출되어 성장하면 미처 빠져나가지 못한 brine 이라고 불리는 농축된 염수 주머니가 순빙의 결정들 사이에 남게된다. 이 brine의 함유율은 온도와 연관되어 변화하면서 해빙의 강도특성을 변화시킨다. 즉 brine은 고체인 빙속의 빈공간을 의미하므로 brine 함유율이 커질수록 강도가 저하된다는 사실을 쉽게 짐작할 수 있다. brine은 시간이 경과할수록 점점 아래쪽으로 이동하여 결국 해수중으로 방출된다. 이것은 다년생 해빙이 1년생 빙보다 강도가 월등히 높아지는 원인이 되고 있다.

(3) 결정의 크기 및 방향

해빙은 해수표면에 형성된 초기의 결정입자들로부터 아랫방향으로 성장하게 되므로 일반적으로 수평방향으로는 불규칙하며 수직방향으로는 평행으로 기다란 주상체 모양의 다결정(polycrystalline)구조를 갖고 있다. 따라서, 수평방향의 기계적 성질은 대체로 등방성으로 간주할 수 있으나 이외의 방향으로는 심한 이방성을 보인다. 결정형태에 따른 강도특성의 변화는 다음과 같다.

- 결정의 길이방향 압축강도는 이의 수직방향 압축강도보다 3~4배 크다.
- 인장강도의 방향의존성은 비교적 작다.
- 결정의 크기가 커질수록 파괴강도 및 파괴인성치는 작아진다.

(4) 변형속도

이미 설명한 바와 같이 빙은 현저한 크리프 특성을 보이고 있으며, 이는 빙의 재료특성을 모형화함에 있어 변형속도에 의존하는 점성거동을 배제하기가 어렵다는 사실을 의미한다. 특히, 변형속도가 작아질수록 이러한 점성거동의 영향은 더욱 두드러진다. 변형속도 변화에 따라 빙의 강도 특성은 다음과 같이 달라진다.

- 변형속도가 커지면 탄성계수는 증가한다.
- 변형속도가 커질수록 파괴강도가 단조증가하고 있으나 파괴 모드가 연성파괴에서 취

성파괴로 바뀌는 ductile-to-brittle transition 현상이 $\dot{\epsilon}=10^{-3}/\text{sec}$ 부근에서 관찰되며 이때부터 파괴강도는 약간 감소하는 경향이 있다.

2.2 빙하중

빙판과 구조물이 충돌하면 이들간의 상호작용에 의해 빙판은 파손되며 빙판의 파괴기구에 따라 구조물에는 빙하중이 작용하게 된다. 빙판의 파괴기구는 대상구조물의 형상, 빙판의 두께, 강도 및 전진속도 등과 밀접한 관계를 가지면서 복잡 미묘하게 변화하기 때문에 일률적으로 단순화하기는 어렵다. 그러나 일반적으로 해양구조물의 설계빙하중 추정 시에는 수직면에 충돌할 때 발생하는 압축파괴와 경사면과 충돌할 때 발생하는 굽힘파괴가 가장 중요하게 고려되고 있다.^{8),9)}

(1) 빙의 압축파괴에 의한 하중

자켓형 해양구조물의 leg 또는 등대 등 폭이 좁은 수직방향의 원통형 구조물에 빙판이 충돌하는 경우 압축파괴가 발생되는데, 빙판의 전진속도에 따라 파괴양식이 상당히 달라진다. 속도가 느린 경우에는 크리프의 영향으로 인하여 접촉부 부근에서 수많은 미소균열이 발생되며 이 미세균열들이 점차 열결되어 새로운 surface를 형성함으로써 파단이 일어난다. 그러나 전진속도가 상대적으로 빠른 경우에는 구조물과의 접촉부 앞부분에서만 국부적인 파괴가 발생되어 작은 조각으로 분리된다. 이 작은 빙편들은 구조물의 양쪽으로 흘러가게 되는데 caisson과 같이 폭이 넓은 구조물에 충돌하는 경우에는 이 빙편들을 옆으로 밀어내는 clearing force의 영향이 커진다.

(2) 빙의 굽힘파괴에 의한 하중

실제 빙해역에 설치된 대형 해양구조물에서는 수직면에 수평으로 충돌하는 빙판에 의한 과도한 빙하중을 피하기 위하여 수선면 부근에 경사면을 설치하여 cone 형으로 설계하는 경우가 많다. 이 경우에는 빙판이 경사면을 따라 밀려 올라가기 때문에 직접적인 수평방향 힘을 수직방향으로 분산시키는 동시에 빙판의 자중에 의한 굽힘파괴가

일어나도록 자연스럽게 유도한다. 따라서 구조물에 작용하는 수평방향 힘은 상당히 감소된다.

빙판이 경사면을 따라 밀려 올라가게 되면 먼저 cone을 중심으로 방사선 방향으로 1차균열이 발생되어 수개의 썩기형 보로 분할되며, 빙판이 더욱 경사면쪽으로 전진하게 되면 선단에서 어느 정도 떨어진 부분에서 자중으로 인한 굽힘에 의해 원주방향으로 균열이 발생되어 완전히 파괴된다.(Fig. 11. 참조)

(3) 빙하중의 시뮬레이션

구조물에 작용하는 빙하중을 이론적/수치적인 방법을 이용하여 직접적으로 추정하기 위한 노력이 여러 방향에서 이루어지고 있다. 빙의 재료특성을 수학적으로 모형화하여 구성방정식을 도출하기 위한 연구들이 근간이 되며 이를 바탕으로 여러 가지 현상학적 모델 또는 유한요소법을 적용하는 방안들이 시도되고 있다. 이러한 이론적/수치적 시뮬레이션 방법은 실제 물리적 현상을 이해하는 데 현실적으로 상당한 도움을 주고 있으나 현재까지 실제에 응용할 수 있을 만큼 만족스러운 수준에 이르지 못한 상태이다. 실험결과에 의존하지않고도 신뢰성 있는 계산결과를 얻을 수 있을 만큼 기술개발이 이루어 지려면 앞으로 이 분야에 대한 집중적인 연구가 계속되어야 할 것이다.

3. 재료의 점성거동 해석기법

3.1 점탄성 변형모델

점성체의 가장 중요한 역학적 특성은 시간의존성이라고 말할 수 있다. 즉 통상의 응력-변형도 관계식(constitutive relation)에 시간이라는 제3의 축이 개입되어야만 비로소 재료의 역학적 특성을 표현할 수 있다. 점성체의 시간의존적인 역학적 거동을 수학적으로 모델링하기 위하여 일반적으로 Fig. 1 (a)과 같은 dash-pot 요소를 도입한다. 이 dash-not 요소는 변형도와 응력사이에 항상 선형적인 관계가 성립하도록 이상화함으로써 일정한 응력이 작용할 때 변형도와 시간에 비례하는 크리프 특성을 수학적으로 나타내기 위한 요

소이며, 탄성 스프링과 직렬, 병렬 또는 복합적으로 연결되어 점성체의 거동을 수학적으로 근사하게 나타낼 수 있다.^{9),10)}

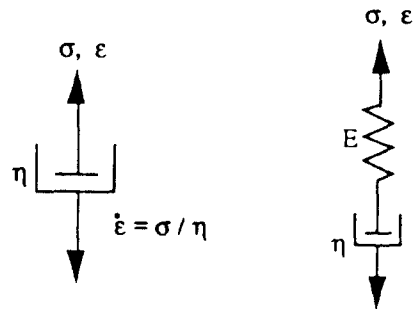
(1) Maxwell 모델

Fig. 1 (b)에서 보는바와 같이 탄성 스프링과 dash-pot을 직렬로 연결한 역학적 모델을 Maxwell 모델 이라한다. Maxwell 모델의 특성은 다음과 같다.

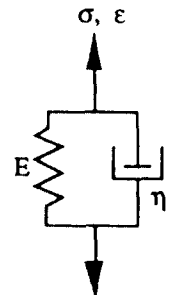
- 외력이 주어지면 즉시 변형도가 발생된다.
- 시간이 경과하면 변형도는 무한히 증가하며, 하중을 제거하면 스프링에 저장된 변형도 에너지만 복원된다.
- 주어진 변형에 대한 응력의 변화를 표시하는데 편리하다(relaxation).

(2) Voigt 모델(Kelvin 모델)

Fig. 1 (c)에 보인바와 같이 탄성 스프링과 dash-pot을 병렬로 연결한 모델을 말한다. 이 모델의 역학적 특성은 다음과 같다.



(a) Dash-pot model (b) Maxwell model



(c) Voigt model

Fig. 1 Rheological models for viscous material

- 외력이 갑자기 가해지면 즉발적인 변형은 발생되지 않는다.
- 시간이 경과되면 변형도는 스프링의 강성과 외력이 평형상태가 되는 값으로 수렴하며, 하중을 제거하면 변형은 점차 완전히 복구된다.
- 일정한 응력에 대한 변형의 변화를 표시하는데 편리하다(크리프).

(3) 다요소 일반화 모델

이와 같은 단순한 Maxwell 모델이나 Voigt 모델만으로는 실제 재료의 역학적 특성을 제대로 표현하기 어렵다. 그러나 Fig. 2 과 같이 요소의 개수를 늘려 복합모델을 구성하면 실제 재료의 역학적 거동을 비교적 근사하게 표현할 수 있다. 일반화 Maxwell 모델과 일반화 Voigt 모델은 역학적으로 상호 등가인 모델이 반드시 존재하며 따라서 모든 다요소 모델은 일반화 Maxwell 모델로 표현가능하다.¹¹⁾ 일반화 Maxwell 모델은 구성요소인 Maxwell 모델들의 단순 병렬연결이므로, 유한요소해석의 관점에서 본다면 각 Maxwell 모델의 재료특성을 가진 요소들을 중첩시킴으로써 일반화 Maxwell 모델의 재료특성을 갖는 요소는 비교적 쉽게 구현할 수 있다. 즉, 붕과 같은 1

차원 부재는 단순병렬연결로써, 2차원 평면문제에서는 Fig. 3 과 같이 적층판(overlay) 모델로써 나타낼 수 있다.¹²⁾ 따라서 단순 Maxwell 모델에 대한 정식화 결과 만으로써 쉽게 일반화 복합 모델로 확장 가능하다는 사실을 확인할 수 있다.

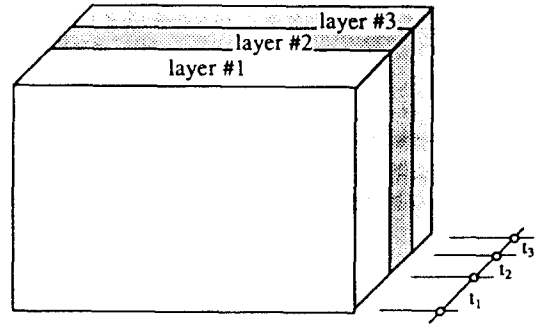


Fig. 3 The overlay model in 2-dimensional plane problems

3. 2 점소성 해석

(1) 점소성 변형이론

재료의 항복후 거동은 실제적으로 시간의존적인 특성을 갖는다. 대부분의 경우 이러한 시간의존성이 그다지 두드러지는 현상은 아니기 때문에 중요하게 고려하고 있지는 않으나 고온금속과 같이 간과할 수 없는 경우도 있다. 점소성 해석이론은 이러한 재료의 항복후 거동에 대한 시간의존적 특성을 고려하여 구조거동을 거시적 입장에서 근사적으로 표현하는 수단으로 이용된다.

재료의 점소성 거동에 대한 기본적 개념은 Fig. 4 에서 보는 바와 같은 1차원 rheological 모델로써 쉽게 설명될 수 있다. 이 모델은 Fig. 2 의 Maxwell 모델의 dash-pot에 소성변형의 trigger 역할을 하는 friction slider가 덧붙여진 형태이다. 점소성 모델의 점탄성 모델에 대한 차이점은 다음과 같은 몇 가지로 정리될 수 있다.

- 점성거동의 시발점은 항복점이 된다.
- 점성변형에서 체적변형 성분은 무시된다.
- 응력과 변형도의 관계가 비선형이다.

만일 항복응력을 $\sigma_Y=0$ 로 두면 이 점소성 모델

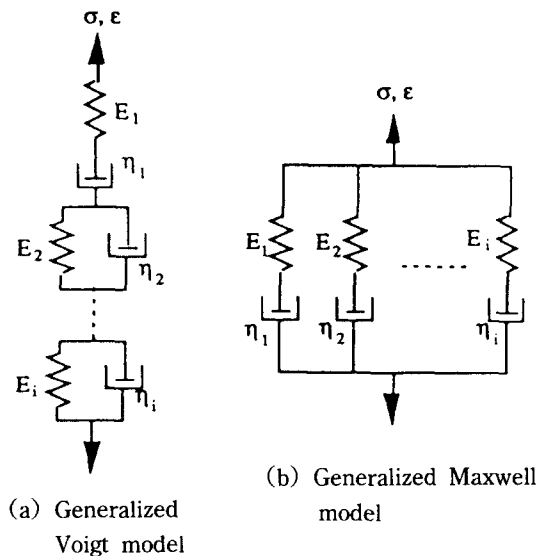


Fig. 2 Generalized Voight and Maxwell model

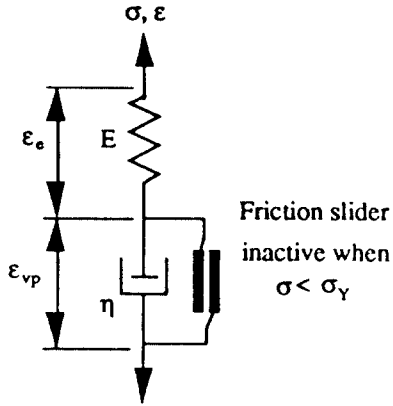


Fig. 4 Basic 1-dimensional elastic/visco plastic model

은 점탄성 Maxwell 모델과 유사한 거동을 하게 된다. 단 2, 3차원 문제에 있어서는 점소성 모델이 소성유동법칙에 따라 거동하기 때문에 체적변형 성분에 대한 고려가 무시되는 반면, 점탄성 모델에서는 점성변형에서 전단변형 성분과 체적변형 성분을 독립적으로 고려할 수 있다. 그러나 전단 변형 성분과 체적변형 성분에 대한 각각의 재료 상수들을 분리하여 도출하기는 현실적으로 어렵기 때문에 일반적으로 전단변형 성분만을 고려하고 있다.

(2) 점소성 유동법칙

전술한 바와 같이 단순 Maxwell 모델만 정식화하여 해석할 수 있다면 쉽게 일반화 복합모델로 확장 가능하기 때문에 여기서는 Fig. 4의 2요소 점소성 Maxwell 모델의 변형거동만을 살펴보기로 한다. 먼저 전변형도 ϵ 을 스프링의 탄성변형도 ϵ_e 와 dash-pot의 점소성 변형도 ϵ_{vp} 의 합으로 표시한다면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{vp} \dots\dots\dots (1)$$

이때, 응력변화율은 다음식과 같이 탄성변형률만으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\sigma} = D_e \dot{\epsilon} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, D_e 는 탄성 응력-변형도 행렬이며 점

소성 거동은 다음과 같은 항복조건이 만족되면 시작된다.

$$f(\sigma, \epsilon_{vp}) - f_0 = 0 \dots\dots\dots (3)$$

이때 점소성 변형률 $\dot{\epsilon}_{vp}$ 는 현재의 응력상태 및 변형이력에 좌우되는데 다음과 같은 점소성 유동법칙(visco-plastic flow rule)이 일반적으로 받아들여지고 있다.¹³⁾

$$\dot{\epsilon}_{vp} = g(\sigma) = \frac{1}{\eta} \Phi(f) \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, Q 는 소성포텐셜이며 관계소성(associated plasticity)의 특성을 갖는 재료에서는 항복함수 f 와 동일한 함수로 간주한다. η 는 dash-pot의 점성계수이며 Φ 는 단조증가하는 양함수이다.

3. 3 유한요소법의 정식화

점성거동은 시간의존적 특성 이외에도 재료의 응력-변형도 관계식이 비선형성을 갖게 되므로 초기치 문제를 풀기 위한 time stepping 알고리즘 뿐만 아니라 구조적 비선형문제를 해결하기 위한 하중증분법의 개념이 도입되어야만 비로소 수치적 해석이 가능하다. 이하 점소성 문제에 대한 증분형 유한요소해석의 정식화 과정을 간략히 설명하였다.¹¹⁾

(1) 점소성 변형도 증분

초기치문제인 점성변형거동을 수치적으로 해석하기 위해서 시간영역에 대한 유한차분법을 도입한다. 시간단계 n 에서의 점소성 변형도 증분 $\Delta \epsilon_{vp}^n$ 은 다음식과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \epsilon_{vp}^n = \Delta t_n [(1 - \Theta) \dot{\epsilon}_{vp}^n + \Theta \dot{\epsilon}_{vp}^{n+1}] \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ 이며 첨자 n 은 시간단계 n 에서의 값을 표시한다. 이때 Θ 는 시간영역 적분의 특성을 결정하는 상수로서 $\Theta = 0$ 이면 변형도 증분량이 현재시간 t_n 에서의 변형속도만으로 결정 가능한 fully explicit scheme(or forward difference method)이 되며 $\Theta = 1$ 이면 fully implicit scheme(or backward difference method)로 된다.

일반적으로는 $\Theta=0.5$ 로 두는 소위 Crank-Nicolson rule(or implicit trapezoidal rule)이 unconditionally stable 한 해를 제공하기 때문에 많이 이용되고 있다. (5)식에서 시간 t_{n+1} 에서의 점소성 변형속도 $\dot{\epsilon}_{vp}^{n+1}$ 은 (4)식으로 정의되며 다음과 같이 Taylor 급수 1차항으로 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{vp}^{n+1} &\cong \dot{\epsilon}_{vp}^n + \left(\frac{\partial \dot{\epsilon}_{vp}}{\partial \sigma}\right)^n \Delta \sigma^n \dots\dots\dots (6) \\ &= \dot{\epsilon}_{vp}^n + H^n \Delta \sigma^n \end{aligned}$$

그리고 (6)식을 (5)식에 대입하면 다음과 같이 점소성 변형도증분이 계산된다.

$$\Delta \epsilon_{vp}^n = \dot{\epsilon}_{vp}^n \Delta t_n + C^n \Delta \sigma^n \dots\dots\dots (7)$$

여기서,

$$C^n = \Theta \Delta t_n H^n \dots\dots\dots (8)$$

(2) 응력증분

(2)식을 시간 t_n 과 t_{n+1} 사이의 증분형 관계식으로 고쳐쓰면

$$\Delta \sigma^n = D \Delta \epsilon_e^n = D(\Delta \epsilon^n - \Delta \epsilon_{vp}^n) \dots\dots\dots (9)$$

이 되며, 전 변형도증분과 변위증분과의 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta \epsilon^n = B^n \Delta d^n \dots\dots\dots (10)$$

(8)(10)식을 (9)식에 대입하면

$$\Delta \sigma^n = D^n (B^n \Delta d^n - \dot{\epsilon}_{vp}^n \Delta t_n) \dots\dots\dots (11)$$

와 같이 변환되며, 이때 D^n 은 다음과 같이 유도된다.

$$D^n = (I + DC^n)^{-1} D = (D^{-1} + C^n)^{-1} \dots\dots\dots (12)$$

(3) 강성방정식

가상일의 원리에서 시간 t_n 과 t_{n+1} 사이의 응력과 변형도 증분에 의한 내적가상일과 외력증분에 의한 외적가상일이 평형을 이루어야 하므로

$$\int_V \delta \{\Delta \epsilon^n\}^T \Delta \sigma^n dV - \delta \{\Delta d^n\}^T \Delta q^n = 0 \dots\dots\dots (13)$$

이 성립하며 (10) (11)식을 (13)식에 대입하면

다음과 같은 시간 t_n 에서의 증분형 강성방정식이 유도된다.

$$K_T^n \Delta d^n = \Delta V^n \dots\dots\dots (14)$$

여기서,

$$K_T^n = \int_V [B^n]^T D^n B^n dV \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta V^n = \int_V [B^n]^T D^n \dot{\epsilon}_{vp}^n \Delta t^n dV + \Delta q^n \dots\dots\dots (16)$$

(14)식의 강성방정식을 풀어 변위증분 Δd^n 이 계산되면 (11)식에서 $\Delta \sigma^n$ 이 얻어지고 나머지 변수들의 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d^{n+1} = d^n + \Delta d^n$$

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + \Delta \sigma^n$$

$$\Delta \epsilon_{vp}^n = \Delta \epsilon^n - \Delta \epsilon_e^n = B^n \Delta d^n - D^{-1} \Delta \sigma^n$$

$$\dot{\epsilon}_{vp}^{n+1} = \dot{\epsilon}_{vp}^n + \Delta \dot{\epsilon}_{vp}^n \dots\dots\dots (17)$$

4. 수치계산 및 고찰

4.1 점소성 유한요소해석 프로그램

빙판의 점성거동을 수치적으로 계산하기 위하여 3.3절의 정식화에 따라 점소성 유한요소해석 프로그램을 구성하였다. 8절점 평면 isoparametric 요소를 이용하였으며 2차원 평면변형도/평면응력 문제를 대상으로 하였다.

4.2 단축 인장시편의 점성거동 시뮬레이션

Jelinek 등⁵⁾은 실험실에서 제조한 다결정(poly-crystalline) 빙괴(2.5×2.5×10cm)를 -15°C의 온도에서 단축인장시험기에 걸어서 2450g/cm²의 일정한 응력을 가하다가 시간 t=88sec에서 갑자기 하중을 제거하였을 때 이 빙괴의 변형이력을 측정하고 그 결과를 정리, 발표한 바 있다. 본 연구에서는 이 실험자료들을 이용하여 빙의 재료특성치들을 도출한 다음 이 재료특성치들을 이용하여 역으로 유한요소모델에 대한 수치계산을 수행함으로써 두 결과를 서로 비교하였다.

재료특성은 4요소 일반화 Voigt 모델로 이상화

하였고 dash-pot 요소의 항복응력을 $\sigma_v=0$ 로 간주함으로써 점탄성 변형특성만을 고려하였다. 실험 결과⁵⁾로부터 4요소 Voigt 모델의 각 성분요소에 대한 특성치를 도출하는 과정을 Fig. 5.에 보였으며 적층판모델로 취급하기 위한 등가 Maxwell 모델로의 변환결과를 Fig. 6에 보였다. Fig. 7에 빙시편의 변형이력에 대한 계측결과와 본 연구의 계산결과를 함께 나타내었다. 실험 및 계산결과가 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있으며 따라서, 4요소 모델의 도입에 대한 타당성, 계산프로그램

의 정도 등을 함께 확인할 수 있었다. 그리고 $\dot{\epsilon}=2 \times 10^{-4}$ 의 일정한 변형도 하에서 계산된 시편의 응력완화 현상을 Fig. 8에 보였다. 시간 0~50분 구간에서 급격한 응력완화(relaxation)를 관찰할 수 있으며 빙의 상당히 큰 점성거동을 쉽게 확인할 수 있다.

4.3 해양구조물에 작용하는 빙판의 거동

2장에서 살펴본 바와 같이 해양구조물과 빙판의 상호작용에 의해 발생하는 빙판의 파괴거동과

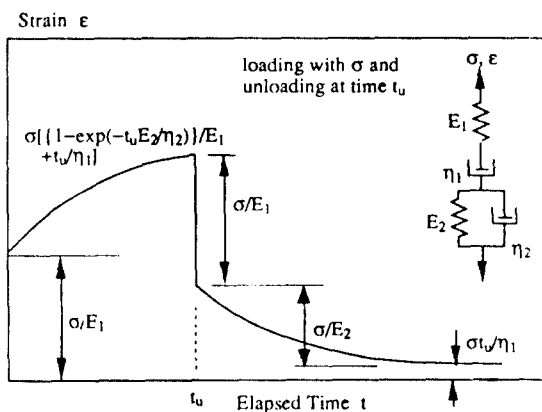


Fig. 5 Loading and unloading behavior of 4-component rheological model

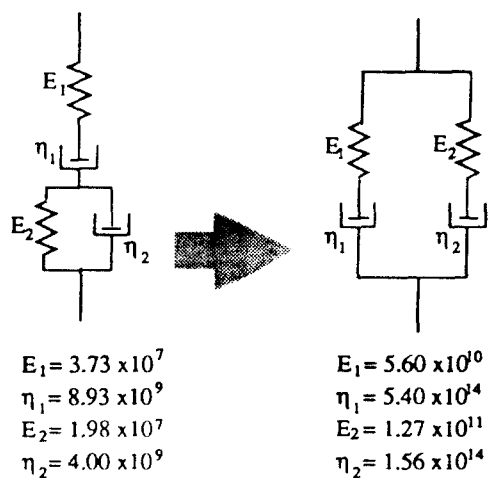


Fig. 6 Equivalence between 4-component Maxwell and Voigt model

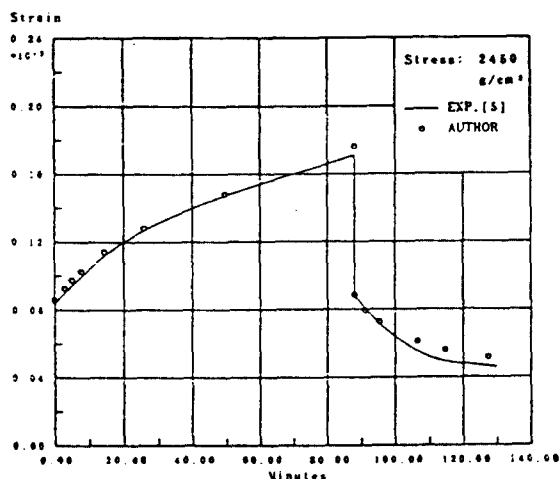


Fig. 7 Deformation-recovery time history of ice specimen

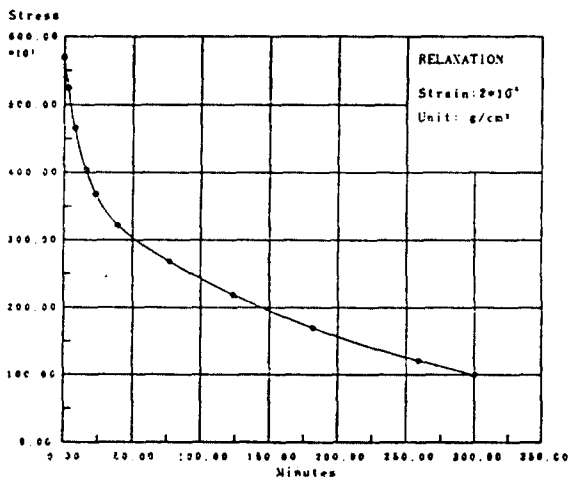


Fig. 8 Stress relaxation of ice specimen

빙하중의 작용기구는 상황에 따라 여러 가지로 달라질 수 있다. 본 연구에서는 여러 가지 복잡한 빙하중의 작용기구중에서도 가장 대표적인 2가지 즉, 수직면과의 충돌에서 발생되기 쉬운 빙판의 압축거동과 경사면과의 충돌시 발생하는 굽힘거동을 2차원 평면문제로서 해석한 다음 그 결과들을 고찰하였다.

(1) 면내압축 거동

빙판이 기둥과 유사한 형태의 수직면에 충돌하는 경우에는 연쇄적인 압축파괴가 발생된다. 본 연구에서는 이러한 빙판의 연쇄적 파괴과정중 한 순간을 Fig. 9과 같이 2차원 문제로 이상화하여 해석하였다. 빙판의 크기와 driving force의 크기는 무한대로 볼 수 있고 해양구조물에 미치는 빙하중은 접촉충돌부 전면에서 발생하는 빙판의 파괴양상과 관련되는 것으로 생각할 수 있다. 실제 계산에 있어서는 빙판 자체는 공간상에 고정된 것으로 간주하고 원통형 구조물과의 원형 접촉부에서 빙판의 전진거리 만큼의 강제변형이 연속적으로 발생하는 것으로 해석하였다. 이때 대기에 접하고 있는 빙판의 상부표면과 수면하 부분은 빙결정 구조의 차이가 크며 상당한 온도차가 있기 때문에 균일한 재료상수를 적용하기 어려운

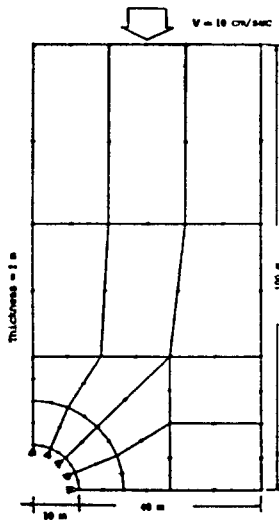


Fig. 9 Structural modeling of ice sheet in crushing mode

점이 있다. 그러나 본 연구에서는 균일한 재료로 간주하여 Fig. 6의 재료상수들을 일괄적으로 적용하였다.

최대응력 발생지점인 원통형 구조물과의 직접 접촉면 중앙부에서의 응력변화를 Fig. 10에 나타내었다. 점성의 영향이 거의없이 응력이 시간에 따라 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

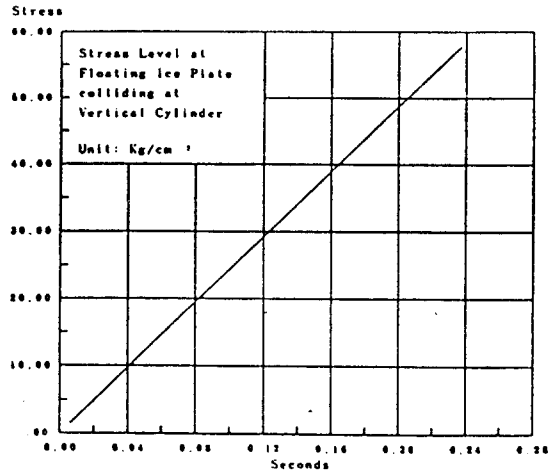


Fig. 10 Time history of stress level in crushing ice sheet

(2) 굽힘 거동

빙판이 원뿔형 해양구조물의 경사면과 충돌하게 되면 Fig. 11에서 보는 바와 같이 1차, 2차균열이 차례로 발생하는 굽힘파괴가 발생하게 된다. 일단 충돌점을 중심으로 방사선 모양의 1차균열이 발생하고나면 빙판은 여러개의 부채꼴 모양의 띠로 분할되며 이 각각은 썸기보(wedge beam)로 이상화하여 해석할 수 있게된다. 본 연구에서는 이러한 썸기보를 Fig. 12와 같이 2차원 평면응력 문제로 변환하여 해석하였다. 빙판이 물위에 떠 있을 때는 자체중력과 부력이 평형상태를 이루고 있으나 빙판이 경사면을 타고 미끄러져 올라오에 따라 부력이 점차 감소하게 된다. 본 해석에서는 수직방향 변위의 증가에 따른 부력감소량을 스프링요로소 치환하여 빙판의 하면에 배치하였으며 빙판과 구조물의 마찰력은 고려하지 않았다. 압

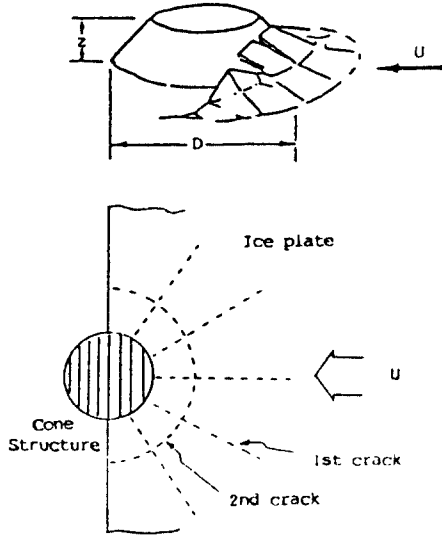


Fig. 11 Failure model of ice sheet colliding at cone shaped structures

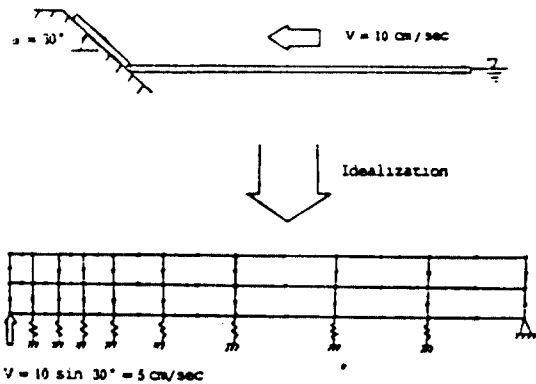


Fig. 12 Two-dimensional idealization for analysis of bending ice sheet

축거동의 경우와 마찬가지로 빙판의 크기와 driving force를 무한대로 보고 시간변화에 따른 빙판의 속도를 '균일한 것으로 간주하여 빙판 끝부분의 수직방향 변위를 시간에 따라 균일하게 증가하는 강제변위로 입력하여 계산을 수행하였다.

Fig. 13에 시간에 따른 빙판의 응력이력을 보였으며 Fig. 14에서는 쉐기보의 단부 근처에 대한 응력분포를 보였다. 단부로 부터 18m 정도 떨어

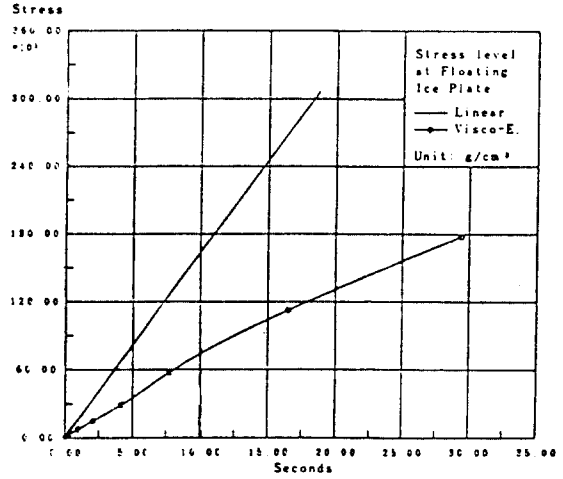


Fig. 13 Time history of stress level in bending ice sheet

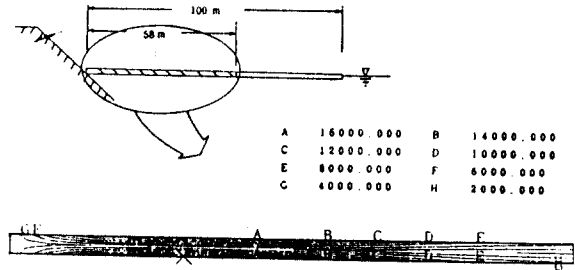


Fig. 14 Stress Contours in bending ice sheet

진 빙판의 하부에서 최대응력이 발생되고 있으므로 2차균열은 이 지점에서 발생되는 것으로 예측할 수 있다. 선형탄성해석 결과와 비교해 볼 때 점성에 의한 응력완화 현상이 시간이 경과할수록 눈에 띄게 커지는 것을 확인할 수 있다. 압축변형의 경우에는 빙판의 수평방향 움직임이 직접적으로 빙판자체의 변형도에 연관되기 때문에 변형속도가 굽힘변형에 비하여 현저히 빠르고 따라서 빙의 점성효과는 거의 작용하지 않는 반면, 굽힘변형시에는 빙판의 수평방향 이동이 경사면을 따라 진행됨으로서 수직방향 변위로 변환되고 이 수직방향 변위와 자중에 의해 빙판의 굽힘이 유도된다. 이러한 굽힘거동에 의하여 간접적으로

발생되는 변형률은 압축변형시의 직접적인 변형률에 비하여 상당히 작기 때문에 점성효과가 상대적으로 두드러진다. 결국 이러한 점성거동은 해양구조물에 작용하는 빙하중이력에도 상당한 영향을 끼칠 것이라는 사실을 쉽게 유추할 수 있다.

5. 결 언

본 연구에서는 해빙의 재료적 특성에 대한 전반적인 분석을 바탕으로 하여 실제 빙하중의 이론적 시뮬레이션 방법을 검토하였다. 빙의 시간의존적인 비선형 점성 재료특성은 스프링과 dash-pot 요소가 결합된 복합 rheological 모델로 이상화하였으며 구조물에 충돌하는 빙판의 거동을 해석하기 위하여 시간영역 직접적분법과 중분형 유한요소해석 기법을 도입하였다. 실제수치계산에서는 빙판의 가장 전형적인 파괴양식이라고 판단되는 압축파괴와 굽힘파괴를 대상으로 하여 빙판의 구조거동을 계산하였으며 그 결과들을 고찰함으로써 다음과 같이 몇 가지 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 빙의 점성거동은 4요소 복합 Maxwell 모델로써 근사하게 이상화할 수 있다.
- 2) 수선면 부근이 경사진 구조물에 빙판이 충돌하는 경우, 빙판은 굽힘거동에 의한 파괴가 발생한다. 이때 빙판은 수직방향으로 들어 올려짐에 따라 발생하는 간접적인 굽힘변형에 의해 파괴되므로 변형속도가 상대적으로 느리고, 따라서 점성변형의 비중이 커지기 때문에 상당한 응력완화 현상이 관찰된다.
- 3) 빙판의 수직방향의 원통에 충돌하는 경우에는 빙판에 면내응력이 직접적으로 작용하며 변형속도가 상당히 크다. 따라서 이 경우에는 점성의 영향을 거의 무시할 수 있으며 탄성해석만으로도 좋은 결과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Choi, K., *Damage mechanics approach to the three dimensional constitutive modelling of ice*

deformation, Ph.D. Thesis, M.I.T., 1989.

- [2] Nadreau, J.P. and Michael, B., "Yield envelope for confined ice," *Ice Technology, Proceedings of 1st International Conference*, Springer-Verlage, pp. 75-82, 1986.
- [3] Vinogradov, A.M., "Constitutive modelling of ice," *Proceedings of the 6th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*, Vol. IV, pp. 181-188, 1987.
- [4] Wang, Y.S., "A rate-dependent stress-strain relationship for sea ice," *Proceedings of the 1st International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*, Vol. II, pp. 243, 248, 1982.
- [5] Jellinek, H.H.G. and Brill, R., "Viscoelastic Properties of Ice," *Journal of Applied Physics*, Vol. 27, No. 10, pp. 1198-1209, 1956.
- [6] 天田重庚, "氷의 強度에 대하여," *日本造船學會誌* 第60號, pp. 567-679, 1979.
- [7] 노인식, "빙의 파괴강도에 관한 연구(I)," 한국기계연구소 연구보고서, UCE326-1064, D, 1987. 12.
- [8] Nevel, D., "Design ice forces for offshore structures," *9th ISSC*, Genova, 1985.
- [9] Daoud, N. and Lee, F.C., "Ice-induced dynamic loads on offshore structures," *Proceedings of the Offshore and Arctic Engineerings Seminar in Korea*, KIMM, 1989.
- [10] 山田嘉昭, 塑性·粘彈性, 컴퓨터에 의한 構造工學講座 II-2-A, 培風館, 1970.
- [11] 노인식, "빙의 파괴강도에 관한 연구(II)," 한국기계연구소 연구보고서, UCE410-1300, D, 1989. 4.
- [12] Owen, D.J. and Hinton, E., *Finite elements in Plasticity*, Pineridge Press Limited, U.K., 1980.
- [13] Zienkiewicz, O.C. and Corneau, I.C., "Visco-plasticity and creep in elastic solid-A unified numerical solution approach," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 8, pp. 821-845, 1974.