

極地 氷河流動에 있어서 Polycrystalline Ice의 Creep 變形特性和 數值 시뮬레이션

Creep Deformation Characteristics of Polycrystalline Ice and its Numerical Simulation in the Flow of Polar Glaciers

崔 慶 植*
Kyung Sik Choi*

要 旨 : 극지방의 해양 환경은 낮은 온도와 함께 여러 가지 형태로 존재하는 얼음의 분포에 의해 큰 영향을 받는다. 빙하와 빙산, 해빙 등 빙역학의 기초적인 이해를 위하여 본 연구는 polycrystalline ice의 재료적 특성과 파괴기구 등을 파악하고 극지 방하유동시 관측되는 creep 변형을 기술하기 위한 constitutive 모델을 제시하였다. 빙변형에 관여되는 여러 가지 물리적 변화 중 microcracking에 의한 재료의 손상을 주요인으로 간주하여 파손역학의 이론을 적용한 3차원 수치모델을 개발하였으며 기발표된 실험결과와 비교하였다. 1축 균일압축을 받는 경우 실험 데이터와 수치모델은 유사한 거동을 보이고 있으며, 빙변형에 있어서 1, 2기 creep의 소성적 변형특성 뿐 아니라 microcracking에 의한 3기(tertiary) creep의 특징까지도 잘 기술해 주고 있다.

Abstract □ Various types of ice distribution under low temperature greatly influence the environment of the Arctic and Antarctic Oceans. To understand fundamentals of ice properties such as Polar glaciers, icebergs and sea ice, this study focuses on the material behaviors and failure mechanisms of polycrystalline ice. Utilizing the continuum damage theory, a three-dimensional constitutive model to describe creep deformation characteristics in the glacial flow is developed in consideration of microcracking as the major physical process of ice deformation. The numerical model is compared with the published experimental data especially in uniaxial constant stress creep tests. The model can simulate primary and secondary creeps as well as tertiary creep characteristics due to the microcrack accumulation.

1. 緒 論

남극대륙 그리고 그린랜드를 포함하는 북극해 연안은 영구빙으로 덮힌 광(대한 빙하지대를 형성하고 있다. 이들 양극지역은 오랫동안 인간의 발길을 거부한 개발 불모지로서 존재되어 왔으나, 금세기 들어 이 지역에 다량의 석유 및 천연자원의 매장이 확인된 후, 이의 개발을 위한 선진 각국의 활발한 노력이 양극지역의 독특한 환경조건을 극복하려는 극지공학의 기초를 이루어 왔다(Chung *et al.*, 1987). 최근 이들 양극지역은 지질학, 기상학, 해양학, 생물학 등의 기초 자연과학 연구의 중점 대상이 되었으며 아울러 해양 개발, 토목 건설, 군사적 측면 등 다양한 공학적 연구의 대상으로서도 중요하게 부각되었다.

극지방의 해양 환경을 특징짓는 가장 큰 요소는 낮은 온도와 함께 상존하는 광대한 얼음의 분포라 할 수 있는데(Fig. 1 참조), 육상 적설에 근원을 둔 담수빙(fresh water ice)인 빙하(예를 들면 남극 빙하의 평균 두께는 1.6 km)와 이 빙하로부터 분리 이탈된 유빙인 빙산, 그리고 매년 넓은 해역에 걸쳐 수 m 두께의 빙판을 형성하는 해빙(sea ice)의 존재는 극지방의 탐사와 자원개발을 막아온 장애요소의 하나이다. 극지 해양 개발을 위해 제일 시급한 것은 바로 얼음의 변형현상과 그 파괴특성을 이해하는 것이다.

빙하는 장구한 세월에 걸친 적설과 결빙의 반복으로부터 성장된 거대한 얼음의 덩어리로서, 중력과 자체의 압력으로 인해 막대한 질량을 가진 얼음이 경사 지형을 따라 해안으로 천천히 유동하는 현상을 말한다.

*韓國海洋大學校 海洋工學科(Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea)

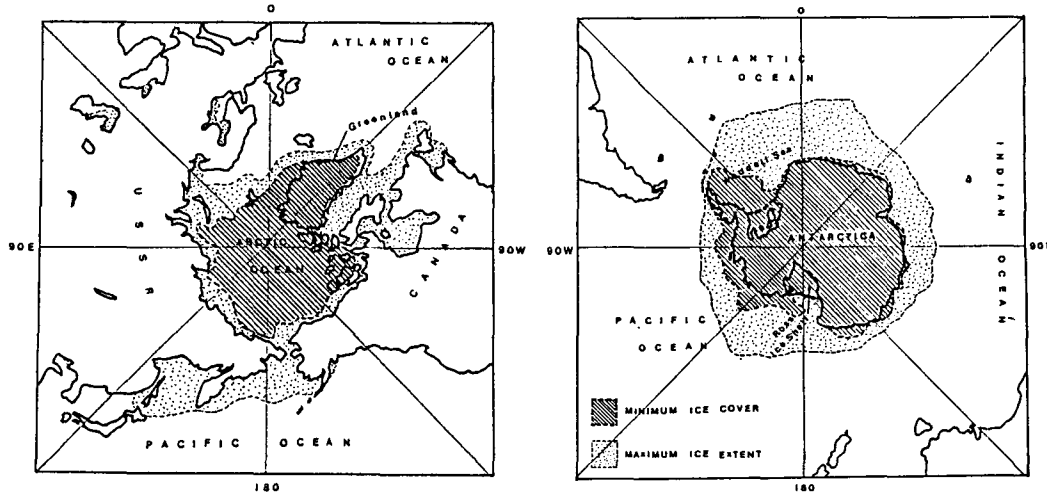


Fig. 1. Ice cover in the Arctic and Antarctic regions.

빙하의 유동은 그 속도가 대단히 느리기는 하지만 이동 질량으로 인하여 지형 변화와 아울러 얼음 자체의 morphology 변화에도 큰 영향을 미치게 된다(Michel, 1978). 빙하의 중심까지 터널을 뚫고 관측한 바에 의하면 200 m 이상의 깊이에서 정상상태로 성장된 얼음은 비교적 미세한 결정(grain size 2-10 mm)으로서 crystallographic axis(즉 c-axis)가 모든 방향으로 불규칙(random)하게 분포되어 거의 등방성(isotropic)의 다 결정상(polycrystalline) 구조를 갖는 것으로 알려져 있다(Cammaert and Muggeridge, 1988). 이에 반해 해빙(특히 1년생 해빙)은 순수 얼음에 기포 그리고 brine이라 불리는 농축된 해수를 포함하고 있는데, 해면에 수직방향으로 자리잡은 brine pocket의 형성으로 기둥형(columnar shape) 결정구조를 이루게 된다. 이 때 결정의 c-axis는 수평면과 평행한 면에 분포하게 되어 해면에 수직인 방향과 수평인 방향의 재질이 달라지는 이방성(anisotropic) 특성을 보이게 된다(Untersteiner, 1986). 한편 다년생 해빙(multi-year sea ice)은 해를 거듭하면서 결빙과 해빙을 반복하는 동안 brine pocket은 점차 해수에 용해되어 버리고 담수빙과 유사한 등방성의 변형 특성을 보이게 되며, 1년생 해빙에 비해서 그 강도가 훨씬 높아지게 된다.

실험실에서 순수한 담수빙의 형태로 재현한 polycrystalline ice는 빙하와 빙산 그리고 다년생 해빙을 구성하는 얼음들의 변형특성과 유사하기 때문에 얼음의 강도와 파괴 기구를 측정하는 현장 실측실험의 시물

레이션용으로 흔히 사용되고 있다. 해빙은 포함된 얼음의 함량에 따라 순수한 담수빙의 변종으로 볼 수 있으므로 비교적 복잡한 결정구조와 변형특성을 가진 해빙의 연구에 앞서, 본 연구에서는 담수빙인 polycrystalline ice의 고찰을 통해 microcracking에 의해 특징지어지는 빙변형의 creep 특성을 살펴보고자 한다.

본 연구는 기존의 발표된 polycrystalline ice에 대한 실험자료의 검토를 통해 microcracking을 수반하는 빙변형의 물리적 의미를 고찰하고, 파괴에 이르기까지의 연속적인 빙변형의 과정을 파손역학(continuum damage mechanics)의 방법을 사용하여 정식화한다. 이 3차원 수치모델은 얼음을 비선형의 점탄성 재질로 가정하고 미세균열이 성장, 축적되어 손상을 받은 빙변형의 상태를 파손역학의 damage parameter 도입으로 처리한다.

2. Polycrystalline Ice의 Creep 實驗

얼음은 일반적인 구조용 재료와는 판이한 성질을 갖고 있으며, 이 재질적 특성에 영향을 미치는 인자가 아주 다양하고 복잡하다. 우선 얼음의 기계적 성질은 하중이 가해진 속도, 온도, 결정의 크기, 공기 등의 불순물 정도에 따라 민감하게 달라진다. 또한 dislocation slip이나 grain boundary sliding 등 여러 가지 물리적 변화가 변형 과정에 함께 동반된다(Ashby and Frost, 1975). 빙하유동에 있어서 얼음의 변형현상 중

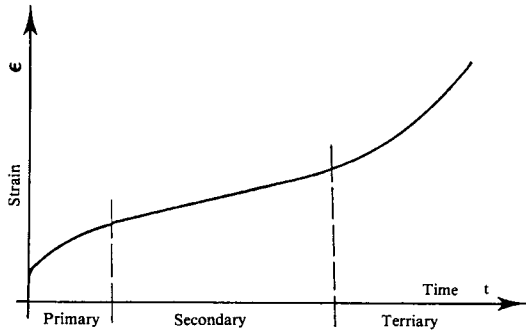


Fig. 2. Typical creep curve for ice under a constant load in compression.

주목해야 할 것은 시간 의존적인 creep 현상이다. 자연에서 존재하는 얼음은 용융점(273 °K)에 비교적 가까운 상태이기 때문에(homologous temperature가 0.9 이상) 마치 고온에서의 금속과 유사하게 하중이 더 이상 커지지 않더라도 시간에 따라 변형이 증가하는 현상이 나타난다. Fig. 2에서 보듯이 polycrystalline ice가 일정한 하중을 받을 때의 creep 과정을 편의상 세 단계로 나눌 수 있는데 각각 변형율(strain-rate)이 감소하는 1기(primary creep), 변형율이 비교적 일정한 최소치를 유지하는 2기(secondary creep), 그리고 변형율이 가속되기 시작하여 파괴에 이르기까지의 3기(tertiary creep)에 해당한다. 이러한 creep 변형시 활발한 microcracking(미세균열) 현상이 있음이 많은 연구에서 관측되고 있다(Gold, 1972; Sinha, 1982). 유리나 석고와 같이 깨지기 쉬운 취성(brittle) 재료가 외력을 받을 때 보여주는 가장 특이한 변형현상이 microcracking이라 할 수 있다. 빙변형 실험시에 생기는 microcracking 현상 때문에 일반적으로 얼음은 취성 재료로 인식되고 있으나 변형속도가 비교적 느리고 온도가 빙점에 가까울 경우 취성재료의 성질과 전혀 다른 소성적인(plastic 또는 ductile) 변형현상을 나타낸다. 많은 경우에 얼음의 파괴는 이런 두 가지 성질이 공존하는 복합적인 현상을 보여준다.

언급한 바와 같이 얼음의 성질이 여러 가지 요인들에 의해 복잡하게 변화한다는 사실은 실험을 통해 명확한 강도 특성을 도출하는데 상당한 어려움을 준다. 이는 특정한 실험조건 즉 변형율이나 온도 등을 정확히 구현하기도 어려울 뿐 아니라 결정입자 크기나 불순물의 함량 등의 작은 차이에 의해서도 실험결과는 상당히 분산된 값을 주기 때문이다. 또한 극지 현장에서 행

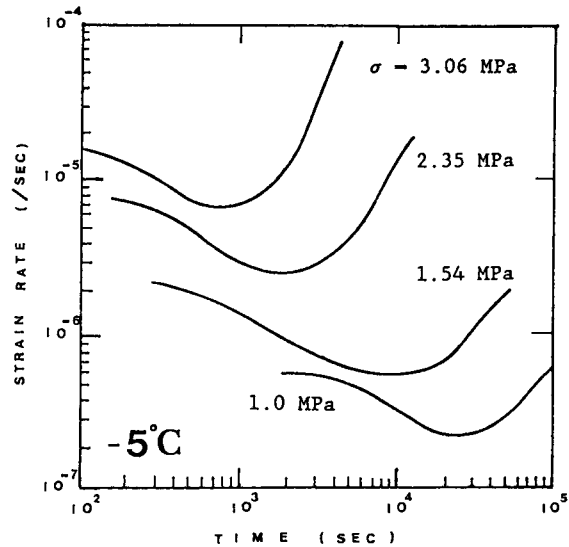


Fig. 3. Creep test data for fine-grained polycrystalline ice in uniaxial compression (Mellor and Cole, 1982).

하여지는 실험과 실험실에서 제조한 얼음에 비교적 정교하게 실시된 실험 사이에도 많은 차이를 보이기 때문에 주의가 필요하다. 1축인장 혹은 압축을 받는 polycrystalline ice의 creep 변형에 대하여 상당한 분량의 실험자료들이 보고되었는데(Hooke *et al.*, 1980; Mellor, 1983) 본 연구에서는 그 중 비교적 일관성있는 실험과정과 체계적인 데이터의 수집이 이루어진 것으로 판단되는 두 가지 실험자료(Mellor and Cole, 1982; Jacka, 1984)를 수치모델의 확인에 이용하였다.

Mellor and Cole(1982)은 실험실에서 인공적으로 제조된 polycrystalline ice를 이용하여 1축 하중을 받을 때의 creep 변형과정을 기록하였다. 미세한 얼음가루와 증류수로부터 성장시킨 담수빙인 이 얼음은 평균 결정크기가 1.2 mm로서 대부분의 실험은 -5°C ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)의 일정한 온도상태에서 직경 50.8 mm 길이 127 mm의 원통형 시편을 통해 압축응력 0.8-3.8 MPa의 수준으로 수행되었다. 그들의 결과 중 일부가 Fig. 3에 나타나 있는데 Mellor and Cole은 일련의 실험을 통해 creep 변형율이 최소가 되는 변형도가 대략 1%가 된다고 주장하였다. Jacka(1984) 역시 실험실에서 제조한 등방성의 polycrystalline ice에 대하여 creep 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 얼음은 결정의 평균 크기가 1.7 mm로서, -5°C ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$)를 비롯한 네 가지 온도에서 비교적 낮은 응력수준인 0.12-1.47 MPa로 실

험을 수행하였다. Mellor and Cole 그리고 Jacka의 실험결과를 볼 때, 실험이 수행된 온도와 응력 수준에서는 log 좌표로 표시된 creep 곡선들이 모두 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

3. Constitutive 모델

환경외력으로서 氷河重을 이론적으로 추정하거나 외력에 대응하는 얼음의 강도를 예측하기 위해서는 이론적 氷河重-變形關係가 실제의 거동을 적절하게 묘사할 수 있어야 한다. 이론의 단순함과 기존의 계산기법을 이용하려는 경향 때문에 얼음의 재료 특성을 간단히 탄소성(elasto-plastic) 모델 혹은 점탄성(visco-elastic) 모델로써 이상화시키는 예(Ralston, 1980; Nadreau and Michel, 1986)를 흔히 접하게 된다. 일반적으로 얼음의 constitutive 모델에 관한 연구는 급속이나 토양 등에 적용되었던 이론들을 기본으로 하고 있다. 탄소성 모델 연구에서는 얼음을 선형탄성-완전소성 재료로 가정하며 항복 이후의 거동은 소성유도의 법칙에 따르는 것으로 가정한다. 이러한 가정은 빙하 유동에 있어서의 소성적 변형특성을 무리없이 처리해 주기는 하지만 빙변형의 또 다른 특성인 microcracking에 의한 재료의 손상현상은 설명할 수 없다. 얼음의 다양한 파괴양식 때문에 현재까지 개발된 여러 빙변형의 수치 모델들은 실제의 빙변형의 거동을 폭넓게 기술하기에는 많은 제한이 있다.

시간에 따른 creep 변형 역시 제한된 가정아래 점탄성 모델로서 시뮬레이션이 시도되고 있으나 대부분 1, 2기 creep의 해석에 그치고 있다(McTigue *et al.*, 1985). 1축 균일압축 하중을 받는 얼음의 creep 변형을 기술하기 위하여 Sinha(1979)는 (1)식과 같이 지수(exponential) 함수와 급수(power-law)로 표현되는 비선형 점탄성 모델을 고안하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon^e + \epsilon^d + \epsilon^v \\ &= \frac{\sigma}{E} + \frac{c_1 d_1}{d} \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n [1 - \exp\{- (a_\tau t)^b\}] + K_n \sigma^n t \end{aligned} \quad (1)$$

전변형도는 시간변화에 무관한 성분인 탄성변형과 시간에 의존하는 변형인 점성변형의 합으로 이루어지는데 후자는 다시, 하중이 제거되면 원상복귀가 가능한 성분과 영구변형 성분으로 나뉘어진다. 세 가지 변형도

성분은 각각 instantaneous elastic strain, (ϵ^e), delayed elastic strain, (ϵ^d), 그리고 viscous strain, (ϵ^v)로 부르기로 한다. Sinha는 온도변화와 결정입자의 크기 등을 고려하여 creep 실험을 통해 계수들($c_1, d_1, s, a_\tau, b, K_n, n, E$)의 값을 추정하였다.

Sinha의 creep 모델은 낮은 응력수준에서는 실험치와 비교적 정확히 일치하는 것으로 알려졌다. 그러나 이 모델은 creep 변형의 초기단계 즉 1, 2기 creep의 시뮬레이션에 한정되었고 시간에 따라 변하는 하중이나 다축 하중에 대한 적용은 불가능한 단점을 가지고 있다. 특히 상대적으로 높은 응력수준의 creep 실험에서 뚜렷이 나타나는 microcracking 현상에 기인한 3기 creep의 불안정한 가속단계를 설명할 수 없다.

본 연구는 1축 creep 모델의 단점을 극복하기 위하여 기존의 비선형 점탄성 모델과 파손역학 이론과의 결합을 시도한다. 파손역학(damage mechanics) 이론의 가장 근저에 놓인 개념은, 재료 내부의 복잡하고 미시적인 현상을 미세균열 축적도(즉 damage parameter)와 같은 이른 바 상태함수(internal state variables)의 도입으로써 재료의 현재 변형상태를 완전하게 정의할 수 있다는 점이다(Kachanov, 1986). 임의의 방향으로 존재 가능한 원형의 2차원 균열이 재료의 내부에 균일하게 분포되어 있다고 가정할 때 어떤 특정 방향에 있어서 재료의 손상 정도는 damage parameter의 그 방향의 향한 평면의 단위면적당 정의된 값으로써 나타낼 수 있다. 이러한 damage의 정의는 Krajcinovic(1985)에 의해 도입된 것으로서 본 연구에서는 3차원 creep 문제를 위해 (2)식과 같은 텐서로써 정의된다.

$$D_{k_1} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \omega(\theta, \phi) N_{k_1} \sin\phi d\theta d\phi \quad (2)$$

여기서 N_{k_1} 은 미세균열이 배열된 방향을 나타내는 벡터 N_k 와 damage parameter의 값을 정의할 평면의 방향을 나타내는 벡터 N_l 의 tensor product를 나타낸다.

$$N_{k_1} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta \sin^2\phi & \cos\theta \sin\theta \sin^2\phi & \cos\theta \sin\phi \cos\phi \\ \text{sym} & \sin^2\theta \sin^2\phi & \sin\theta \sin\phi \cos\phi \\ & & \cos^2\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

θ 와 ϕ 는 Fig. 4에서 정의된 바와 같이 구좌표상에서 향하고 있는 방향을 나타내며 $\omega(\theta, \phi)$ 는 누적된 균열의 정도를 나타내는 변수로서 각도 θ 와 ϕ 를 통해 방향에

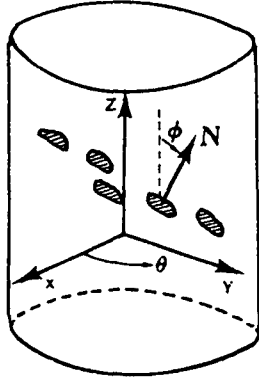


Fig. 4. Definition sketch for microcrack fields.

따라 다른 값을 가질 수 있음을 의미한다.

한편 전변형도를 표시하는 ϵ_{ij} 는 Sinha의 (1)식을 다음과 같이 3차원으로 일반화시킬 수 있으며, 미소 변형이라는 가정하에서 각각의 변형도 성분은 microcracking의 영향을 포함하도록 수정된다.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^d + \epsilon_{ij}^v \quad (4)$$

Davison and Stevens(1973) 그리고 Krajcinovic (1985)에 의해 유도된 결과에 의하면 탄성변형에 대한 응력-변형도 관계식은 (5)식으로 주어지며 재료의 강성을 나타내는 4차의 텐서는 (6)식과 같이 Lamé의 상수인 λ , μ 와 damage 텐서, D_{ij} 의 조합된 형태로 표시된다.

$$\sigma_{ij} = K_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (5)$$

$$K_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{kj}) + C_1 (\delta_{ij} D_{kl} + \delta_{kl} D_{ij}) + C_2 (\delta_{jk} D_{il} + \delta_{il} D_{jk}) \quad (6)$$

C_1 , C_2 는 실험에 의해 결정되어질 상수로서 얼음의 강성에 영향을 미칠 damage의 크기를 결정한다.

(4)식의 두번째 항인 delayed elastic strain은 지수함수 대신 시간에 따른 하중의 변화를 고려하여 변형율에 대한 미분방정식의 형태로 수정한다. 미분방정식의 사용은 1기 creep 부분의 정도를 약간 떨어뜨리기는 하지만 그 지속시간이 2,3기 creep의 지속시간에 비해 상대적으로 짧기 때문에 전체적으로 수치 모델링의 정도에 큰 영향을 주진 않는다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^d = A \left[\frac{3}{2} K S_{ij} - \epsilon_{ij}^d \right]$$

여기서 S_{ij} 는 deviatoric stress를 표시한다. 즉,

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$$

영구변형 성분인 viscous strain은 종종 Norton-Bailey power-law 형식으로 표시되는데, 3차원 응력상태를 다루기 위해 일반화시키면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^v = \frac{3}{2} K_n \left(\frac{3}{2} S_{kl} S_{kl} \right)^{(n-1)/2} S_{ij} \quad (8)$$

Microcracking에 의한 재료의 손상 정도가 이들 두 변형도 성분에 미치는 영향은 증가의 유효응력(effective stress)의 개념을 사용하여 표현할 수 있다. 파손 역학의 이론에서 흔히 사용되는 유효응력이란, 실제로 미세균열이 분포되어 있는 시편에서 주어진 하중에 의해 발생하는 변형도와 동일한 크기의 변형을 전혀 손상되지 않은 시편에서 유발시키도록 가해 주어야 할 가상의 외부하중을 의미한다. 증가의 유효응력은 (9) 식으로 정의된다 (Sjölin, 1987).

$$\{\bar{\sigma}\} = \frac{1}{2} \{ [K^e] [K]^{-1} + [K]^{-1} [K^e] \} \{\sigma\} \quad (9)$$

여기서 $[K]$ 는 (6)식에서 사용된 텐서의 행렬식 표현을 나타내고 $[K^e]$ 는 그 중 damage의 항이 포함되지 않은 부분만을 표시한다.

따라서 유효응력의 표현을 delayed elastic strain과 viscous strain에 도입하면 damage의 영향이 포함된 형태의 두 식 (10)과 (11)을 얻는다. 식 (4)와 함께 식 (5), (10), (11)은 본 연구에서 제시하는 constitutive 모델의 기본을 이룬다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^d = A \left[\frac{3}{2} K \bar{S}_{ij} - \epsilon_{ij}^d \right] \quad (10)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^v = \frac{3}{2} K_n \left(\frac{3}{2} \bar{S}_{kl} \bar{S}_{kl} \right)^{(n-1)/2} \bar{S}_{ij} \quad (11)$$

여기서 \bar{S}_{ij} 는 effective deviatoric stress를 표시한다. 이들 식은 각각 두 개의 재료상수를 포함하는데 이 상수들은 재료의 소성적 정도를 나타내는 것으로서, microcracking의 영향이 가능한 무시되어 재료가 순수히 소성변형을 하고 있다고 간주할 수 있는 상태인 낮은 응력수준의 creep 결과(Mellor and Cole, 1982)에 일치하도록 선택하였다(Table 1 참조).

파손역학에 의한 수치 모델링 과정을 통하여 핵심을 이루는 것은 바로 현재의 재료상태를 설명해주는 변수인 damage parameter의 시간에 따른 변화를 기술하는 일이다. 재료 내부의 여러 가지 물리적 변화가

Table 1. Model material parameters

Young's Modulus	E = 9500 MPa
Poisson's Ratio	$\nu = 0.35$
A = $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	$K_n = 1.71 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-n} \text{ s}^{-1}$
K = $1.2 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$	n = 3.11
C ₁ = 1370 MPa	$\epsilon_{cr} = 1.0 \times 10^{-5}$
C ₂ = -3430 MPa	

빙변형 과정 중에 동반되기 때문에 주요한 변형 mechanism이 damage parameter의 변화를 통해 외연적으로 적절하게 드러나야 한다.

본 연구에서는 재료 내부의 미세균열 축적도를 나타내는 변수인 ω 에 대한 evolution law로서 다음과 같은 미분식(rate-type equation)을 가정한다. 즉 microcracking의 증가율은 현재 축적된 미세균열의 정도와 균열에 수직인 방향의 국부응력과 국부변형률의 크기에 좌우된다고 가정하고 가장 간단한 형태로 (12)식과 같이 1차의 미분방정식으로 표시하였다. 초기 상태에는 어떤 임계변형도에 이르기까지는 재료의 손상이 생기지 않는다고 가정한다.

$$\frac{d\omega}{d\epsilon_{nm}} = f(\omega, \sigma_{nm}, \dot{\epsilon}_{nm})$$

$$= \beta(\alpha - \omega) \quad (12)$$

초기조건 : $\omega = 0$ for $\epsilon_{nm} \leq \epsilon_{cr}$

α 와 β 는 각기 응력과 변형률에 따라 변하는 변수이지만 얼음의 creep 실험을 수행하는 응력과 변형률의 범위 내에서는 상수로 보아도 별 차이를 보이지 않는다. 그 값은 Mellor and Cole(1982)의 실험치에 최적의 시뮬레이션이 가능하도록 시행착오(trial and error)의

과정을 통해 $\alpha = 1$, $\beta = 30$ 으로 결정하였다.

4. 考 察

다음은 본 연구에서 제시된 constitutive 모델을 사용하여 1축 균일 압축에 의한 creep 변형과정을 모사하고 그 결과를 Mellor and Cole(1982)의 실험결과와 비교하였다. Table 1에 주어진 값을 이용하여 서로 다른 압축 응력에 대해 계산을 수행, Fig. 5(a), (b)의 결과를 얻었다. Creep 실험의 결과를 도시하는데 흔히 사용되는 변형도-시간의 관계나 log 좌표로 나타내는 변형률-시간의 관계에서 알 수 있듯이 본 수치모델은 polycrystalline ice의 대부분의 실험응력 범위에 걸쳐 1, 2, 3기 creep 특징을 잘 기술하고 있다. 다만 creep 응력수준이 높을 때 실험에서는 변형율이 가속되는 3기 creep의 후기에 점차 변형율이 안정되는 것을 보이는데 비해 모델의 결과는 변형율이 계속 증가하는 것으로 나타난다. 이러한 차이는 실제 높은 응력수준하에서 변형이 상당히 커지면 발생하는 microcracking 이외의 물리적 변화인 재결정(recrystallization) 과정이나 상변화(phase change)까지는 본 모델의 정식화 과정에 포함시키지 않은 때문이라 볼 수 있다.

본 연구의 흥미있는 결과 중 하나는 Jacka(1984)의 실험결과와 모델의 결과를 비교하는데 있다. Ashby and Duval(1985)은 Jacka의 실험결과를 해석하면서, Jacka의 실험 데이터를 시간, 변형도, 변형률에 대한 무차원 계수로 대체했는데, 실험의 응력수준이나 온도변화 등의 변수에 무관하게 모든 실험결과를 하나의 creep 곡선으로 나타낼 수 있다고 주장하였다(Fig. 6 참조). 그들의 데이터 해석과 동일한 절차를 통해 앞

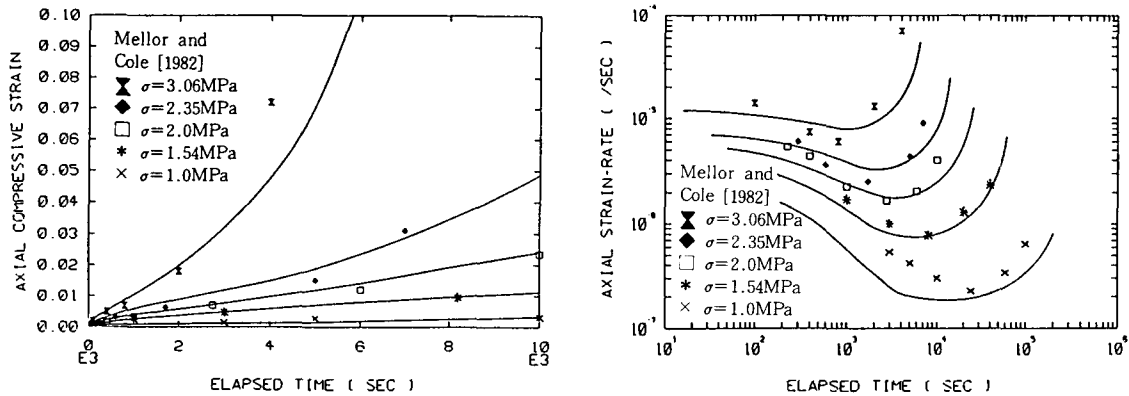


Fig. 5. (a) Model predictions for creep strain vs. elapsed time. (b) Model predictions for axial strain-rate vs. elapsed time.

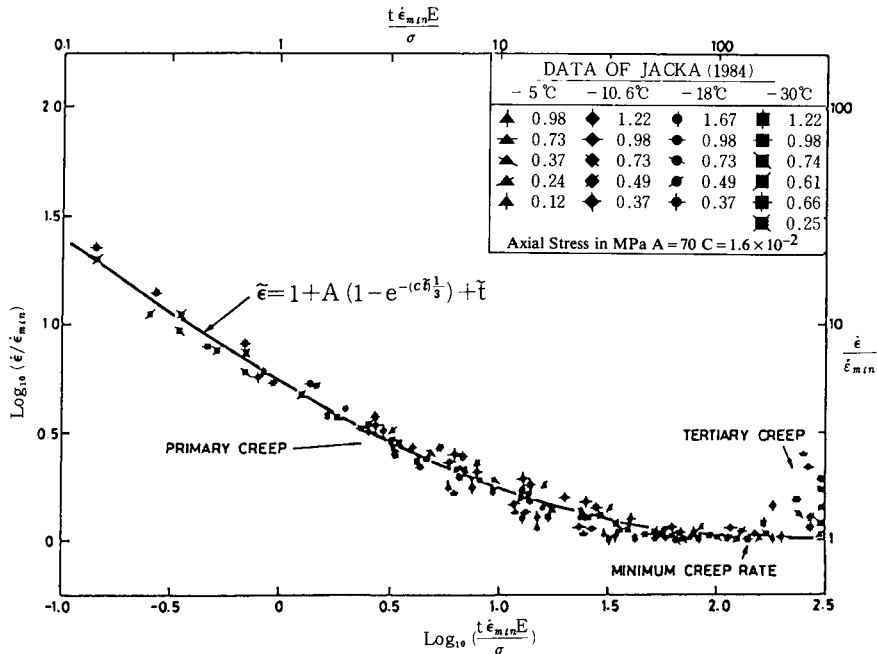


Fig. 6. Strain-rate plots against time using nondimensional parameters (Ashby and Duval, 1985).

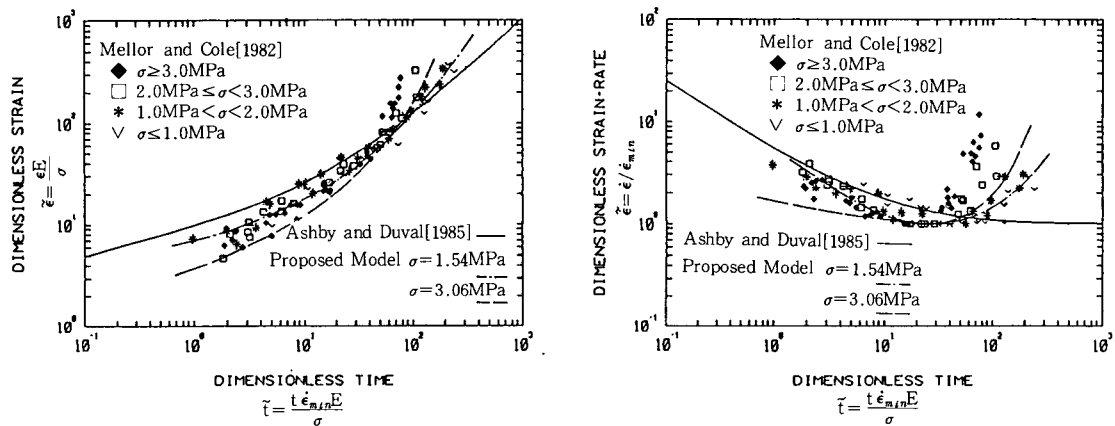


Fig. 7. (a) Model predictions for creep stain vs. elapsed time in nondimensional parameters. (b) Model predictions for axial strain-rate vs. elapsed time in nondimensional parameters.

서의 Mellor and Cole의 실험 데이터를 무차원 계수로 대체한 결과 Fig.7(a), (b)의 결과를 얻었다. Jacka의 실험에 있어서 creep 응력의 수준은 0.12-1.47 MPa로서 Mellor and Cole의 실험 응력수준(0.8-3.7 MPa)에서 판단할 때, 상당히 낮은 수준인 것을 알 수 있는데, 따라서 Ashby and Duval이 주장하는 단일 creep 곡선이라는 것도 오직 낮은 응력하에서만 적용된다고 말할 수 있다. 다시 말해 단일 creep 곡선이란 microcracking 현상이 거의 무시할 정도인 낮은 응력상태에

서만 적용되는 곡선이라 할 수 있으며 Fig.7을 통해서 그 사실을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 수치 모델의 시뮬레이션 결과가 그림에 함께 도시되었는데 응력수준의 증가에 따라 microcracking의 영향이 얼음의 creep 병형에 미치는 변화를 잘 설명하고 있다.

5. 結 論

극지공학이 극지에 관한 종합적인 기술과 환경지식

을 요구하는 분야임에 비해 현재 우리나라에서는 이 분야에 대한 연구가 초보적인 관심의 단계에 머무르고 있는 상태라 할 수 있다(KIMM, 1987). 극지공학의 여러 분야 중 가장 특징적인 것이 빙역학(Ice Mechanics)이라 볼 수 있는데, 극지 해양 환경을 이해하기 위한 작업으로서 얼음의 재료적 특성과 파괴 기구 등을 파악하고 나아가 극지 빙해역의 구조물에 작용하는 빙하중의 추정을 가능하게 하기위한 작업으로서 빙변형의 수학적 모델링에 관한 연구는 중요한 의미가 있다.

본 연구에서는 파손역학의 이론을 사용하여 빙하유동시 관측되는 creep 변형을 기술하기 위한 constitutive 모델을 제시하였다. Polycrystalline ice의 creep 변형에 관여되는 여러 가지 물리적 변화 중 microcracking에 의한 재료의 손상을 주 요인으로 간주하여 3차원 수치모델을 개발하였으며 모델의 적용 가능성을 검사하기 위해 기발표된 실험 결과와 비교하였다. 1축 균일압축을 받는 경우 실험 데이터와 수치모델의 비교는 상당히 유사한 거동을 보이고 있다. 또한 본 모델은 시뮬레이션을 통해 빙변형에 있어 1, 2기 creep의 소성적 변형특성 뿐 아니라 미세균열의 축적에 따른 3기 tertiary creep의 특징까지도 잘 기술해 주고 있다.

본 연구의 가장 주요한 공헌은, 재료 내부의 복잡한 microcracking 현상을 시편전체에 걸친 평균적인 의미로 치환하여 damage evolution law를 가시적 변수인 변형도와 응력의 함수로 나타낸데 있다. 현재 1축 압축상태에서, creep 조건(일정하중 시험)의 검사에 그친 본 연구의 응용으로 2차원 평면 하중과 축대칭의 균일수압을 받는 다축 하중문제를 다룰 수 있으며(Choi, 1989), 아울러 인장 또는 압축을 받는 일정변형을 시험조건에 대해서도 모델의 적용이 검토되고 있다.

참고문헌

- 한국기계연구소(KIMM), 1987. 빙의 파괴강도에 관한 연구 (1). 과학기술처 연구보고서 UDC551. 46.
- Ashby, M.F. and Duval, P., 1985. The creep of Polycrystalline Ice, *Cold Regions Sci. Tech.*, **11**: 285-300.
- Ashby, M.F. and Frost, H.J., 1975. The kinetics of inelastic deformation above 0°K, In: *Constitutive Equations in Plasticity* (A.S. Argon, ed.), M.I.T. Press, Cambridge, 117-147.
- Cammaert, A.B. and Muggeridge, D.B., 1988. *Ice interaction with offshore structures*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Choi, K., 1989. A damage mechanics approach to the three-dimensional constitutive modelling of ice deformation, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Chung, J.S. et al., 1987. Advances in ice mechanics-1987, *Proc. 6th Offshore Mech. Arctic Eng. Symp.*
- Davison, L. and Stevens, A.L., 1973. Thermomechanical constitution of spalling elastic bodies, *J. Applied Phys.*, **44**: 668-674.
- Gold, L.W., 1972. The failure process in columnar-grained ice, National Research Council, Canada, Tech. Paper No. 369.
- Hooke, R.L., et al., 1980. Mechanical properties of Polycrystalline Ice: An assessment of current knowledge and priorities for research, *Cold Regions Sci. Tech.*, **3**: 263-275.
- Jacka, T.H., 1984. The time and strain required for development of minimum strain rates in ice, *Cold Regions Sci. Tech.*, **8**: 261-268.
- Kachanov, L.M., 1986. *Introduction to Continuum Damage Mechanics*, Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Krajcinovic, D., 1985. Continuous damage mechanics revisited: Basic concepts and definitions, *J. Applied Mech.*, **52**: 829-834.
- McTigue, D.F., Passman, S.L. and Jones, S.J., 1985. Normal stress effects in the creep of ice, *J. Glaciology*, **31**: 120-126.
- Mellor, M., 1983. Mechanical behavior of sea ice, Cold Regions Research and Engineering Laboratories Monograph 83-1, Hanover, New Hampshire.
- Mellor, M. and Cole, D.M., 1982. Deformation and failure of ice under constant stress or constant strain-rate, *Cold Regions Sci. Tech.*, **5**: 201-219.
- Michel, B., 1978. *Ice mechanics*, Les Presses De L'universite Laval, Quebec.
- Nadreau, J.P. and Michel, B., 1986. Yield and failure envelope for ice under multiaxial compressive stresses, *Cold Regions Sci. Tech.*, **13**: 75-82.
- Ralston, T.D., 1980. Yield plastic deformation in ice crushing failure, In: *Sea Ice Processes and Models, Proc. AIDJEX/ICSI Symp.*, University of Washington Press.
- Sinha, N.K., 1979. Grain boundary sliding in polycrystalline materials, *Philosophical Magazine*, Ser. A., **40**: 825-842.
- Sinha, N.K., 1982. Acoustic emission and microcracking in ice, *Proc. SESA. Japan Soc. Mech. Eng.*, 767-772.
- Sjolind, S.G., 1987. A. Constitutive model for ice as a damaging visco-elastic material, *Cold Regions Sci. Tech.*, **41**: 247-262.
- Untersteiner, N., 1986. *Glaciology-A Primer on Ice, Oceanus*, **29**: 18-23.