

얼음의 재료 모델 적용 타당성 연구

정준모[†]·남지명·김경수
인하대학교 조선해양공학과

Comparative Study on Material Constitutive Models of Ice

Joonmo Choung[†]·Ji-Myung Nam ·Kyung Su Kim
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University

Abstract

To define ice as a solid material, mathematical and physical characteristics and their application examples are investigated for several materials' yield functions which include isotropic elastic, isotropic elastic-plastic, classical Drucker-Prager, Drucker-Prager Cap, Heinenon's elliptic, Derradji-Aouat's elliptic, and crushable foam models. Taking into account brittle failure mode of ice subject to high loading rate or extremely low temperature, isotropic elastic model can be better practicable than isotropic elastic-plastic model. If a failure criterion can be properly determined, the elastic model will provide relatively practicable impact force history from ice-hull interactions. On the other hand, it is thought that the soil models can better predict the ice spalling mechanism, since they contain both terms of shear stress-induced and hydrostatic stress-induced failures in the yield function.

Keywords : Ice(얼음), Fracture(파단), Spalling(스플링), Yield function(항복 함수), Soil model(토사 계열 모델), Von Mises equivalent Stress (등가 응력), Hydrostatic stress(정수압 응력), Triaxial stress(삼축 응력)

1. 서론

최근 지구 온난화(global warming)에 따른 북극 해역의 얼음의 하절기 해빙이 본격화되면서, 북극해 항로를 운항할 수 있는 상선의 연구가 활발히 진행 중이며, 국내 대형조선소는 최근 러시아로부터 수주 받은 쇄빙 유조선을 국내 기술로 이미 건조한바 있다. 또한 러시아 쇄빙 선단의 노후화로 가까운 장래에 쇄빙선의 발주가 있을 것으로 예측한다. 극지방에서 원유 생산이 가능한 해양플랜트에 대한 연구도 상당히 많이 요구될 전망이다.

기존의 일반 상선과 극지방에서 운영이 가능한 빙해용 상선의 구조적 관점에서 가장 큰 차이점은 쇄빙을 할 수 있는 선체와 추진기를 들 수 있으며, 의장 관점에서는 보온 장치(winterization facilities)일 것이다.

빙해 선박의 선체는 평탄빙(level ice)이 두꺼울 경우 자중으로 쇄빙하고, 비교적 얇을 경우 추진력으로 쇄빙을 하면서 전진하기 때문에 항상 빙충격에 노출되어 있으며, 선측 외판이 얼음 사이에 압착되는 경우 극심한 빙하중에 노출될 수 있다. 극지용 해양플랜트의 경우에도 유빙과의 충돌 가능성에 항상 노출되어 있으며, 자유수면 근처의 계류 장비(mooring lines), 양강기(riser and umbilical lines), 케이슨(caisson)는 결빙 하중에 취약할 수밖에 없다.

따라서 얼음과의 충격으로 인한 구조적 안전성 확보를 위하여 빙해용 구조물에 작용하는 빙하중을 정확하게 산정하는 노력이

필요하다. 이를 위해서는 얼음의 탄소성 거동 및 파괴 조건(fracture criterion)에 대한 연구가 선행되어야 하고 동시에 선체의 동적 소성 거동을 예측하기 위한 기술이 정립되어야 한다. 즉 재료로서의 얼음과 강재의 동적 탄소성 거동 특성에 대한 연구가 동시에 필요하다.

최근 빙해 선박 관련한 국내 연구를 살펴보면, Choi and Jeong (2008), Choi, et al. (2009)은 쇄빙선박에 작용하는 빙하중을 추정하기 위한 연구를 수행한 바 있으며, Rim and Lee (2007)의 경우 빙하중을 추정하여 위하여 계측데이터를 수집하여 해양 과학 조사선에 작용하는 전체 빙하중과 국부 빙하중의 크기를 제시한 바 있다. Kim and Lee (2010)은 항로와 얼음의 특성을 고려한 쇄빙선의 선형에 대한 연구를 수행한바 있다. Suh, et al. (2008)은 멤브레인형 LNG운반선과 빙하의 충돌을 상용 유한 요소 코드를 이용하여 수행하여, 구조적 안전성을 검증하고자 하였다. 그러나 재료로서 얼음의 특성을 규명하기 위한 연구는 찾아보기 어려웠다.

강재의 경우 극저온에서의 취성을 제외하면 저온에서도 연성 재료(ductile material)로 간주할 수 있고, 따라서 von Mises 항복조건이 적용이 가능하며, 통상 소성 변형률이 임계치에 도달했을 때 파괴(fracture 또는 failure)가 발생하는 것으로 간주할 수 있다(Choung, 2009). 또한 동하중에 대하여 변형률 속도 구성 방정식을 적용하면 동적 경화능을 쉽게 구현이 가능하다(Choung, et al., 2010).

반면 얼음의 경우 온도 (temperature), 염도 (salinity), 밀도 또는 기공률 (density or porosity), 결정 크기 (crystal size), 결정 방향 (crystal orientation) 등에 따라서 거동 특성이 상당히 변동적인 것으로 알려져 있기 때문에 강재와 같이 일정한 재료 모델을 이용하기 어려운 실정이다. 이러한 이유로 많은 연구자들이 얼음에 적절한 재료 모델을 개발하기 위한 노력을 기울여 왔다.

본 논문에서는 얼음을 정의하기 위하여 기존에 사용되어온 일부 재료 모델의 수학적 및 물리적 특징을 고찰하고, 적용을 위한 타당성 검토를 수행하였다.

2. 재료 모델 적용사례 분석

2.1 등방성 탄성 모델(isotropic elastic model)

이 모델은 얼음의 거동을 선형 탄성으로 가정한 후, 파단 조건으로서 응력 또는 변형률이 임계치 이상일 때 파단이 발생하도록 정의하고 있다. 식(1)은 탄성 재료의 일반화된 구성 방정식 (Cauchy's stress tensor)을 나타내고 있으며, 얼음의 등방성을 가정한다면 재료실험으로부터 얻을 수 있는 탄성 계수와 전단 탄성 계수만을 사용하게 된다. Kwak, et al. (2009)은 ISO (2007)에서 제시한 얼음의 최대압축 강도 (8MPa)를 파단 조건 (fracture criterion)으로 사용한바 있다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}^{el} \quad (1)$$

ϵ_{kl}^{el} : 로그 탄성 변형률 텐서
(logarithmic elastic strain tensor)

σ_{ij} : 코시 응력 텐서(Cauchy stress tensor)

C_{ijkl} : 재료강성 텐서(material stiffness tensor)

등방성 탄성 모델을 적용하기 매우 편리하며 탄성 설계에 익숙한 설계 엔지니어가 별도의 지식 없이도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 얼음에 가해지는 하중 속도 (loading rate)가 커서 얼음이 부서지면서 붕괴하는 취성 스폐링 (brittle spalling)이 지배적인 경우에는 적합하지만, 매우 느린 속도의 하중 속도가 가해질 경우 연성 스폐링 (ductile spalling)이 발생하여 이러한 경우 등방성 모델은 부정확해진다. 또한 해수빙 (saline ice 또는 sea ice)과 담수빙 (fresh water ice) 모두, 얼음은 등방성으로 간주되기 어렵고, 특히 담수빙의 경우 잔잔한 해수면으로 인하여 주로 기동형 얼음 (columnar ice)의 형태를 나타내므로 등방성의 가정이 비교적 해석의 정밀도를 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다.

2.2 등방성 탄소성 모델 (isotropic elastic-plastic model)

이 모델은 얼음의 거동을 탄소성으로 가정한 후 파단 조건으로서 응력 또는 변형률이 임계치 이상일 때 파단이 발생하도록

정의하고 있다. 식(2)는 탄성을 벗어나 유동응력(flow stress)이 발생할 von Mises 항복 함수 (yield function)를 나타내고 있다. 식(2)에서 항복이 발생하면 편차 응력의 영향력이 커져서 항복 함수는 1.0보다 커지게 된다. 식(3)과 식(4)는 각각 2차 편차 응력 불변 (2^{nd} deviatoric stress invariant)과 편차 응력 텐서 (deviatoric stress tensor)를 나타낸다.

$$\Phi_v = J_2 - \frac{\sigma_y^2}{3} \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (4)$$

Φ_v : von Mises 항복함수

σ_y : 재료의 항복응력

δ_{ij} : Kronecker delta

재료가 탄성 한계를 벗어나더라도 재료의 등방성을 유지한다고 가정(등방성 경화를 가정)하면, 소성 변형 중의 항복 응력은 Hollomon, Ludwik, Swift가 제시한 식으로 표현할 수 있다(식 (5)-(7) 참조).

$$\sigma_y = K(\epsilon^{pl})^n \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + K'(\epsilon^{pl})^{n'} \quad (6)$$

$$\sigma_y = K(\epsilon_0 + \epsilon^{pl})^n \quad (7)$$

σ_0 : 재료의 초기 항복 응력

ϵ_0 : 재료의 초기 항복 응력에 상응하는 초기 항복 변형률

ϵ^{pl} : 로그 유효 소성 변형률 (logarithmic effective plastic strain)

K : Hollomon 및 Swift식에 사용되는 강도 계수 (strength coefficient)

n : Hollomon 및 Swift식에 사용되는 소성 경화 지수 (plastic hardening exponent)

K' : Ludwik 식에 사용되는 강도 계수

n' : Ludwik 식에 사용되는 소성 경화 지수

LS-Dyna (LSTC, 2009) 또는 Abaqus,Explicit (Simulia, 2009) 과 같은 상용 프로그램에서는 등방성 소성 경화를 테이블로 직접 입력하여 사용하기도 하는데, 이 경우 유효 소성 변형률의 함수로 주어진 항복 응력 값을 적용하게 된다 (식 (8) 참조). 이러한 상용 프로그램에서는 등방성 탄소성 모델을 이용할 경우 응력에 의한

파단 기준 보다는 유효 소성 변형률을 파단 기준으로 적용하는 것이 통상적이다(일부 상용 프로그램의 경우 응력 기준으로 파단을 정의할 수도 있음). 따라서 많은 연구자들이 유효 소성 변형률이 파단 변형률(fracture strain 또는 failure strain)에 도달할 때 얼음이 파단한다고 가정하여 수치 해석을 수행한바 있다. Lee, et al. (2009)은 얼음의 일축 압축 실험을 수치 해석하여 0.7%의 파단 변형률을 적용한 바 있다.

$$\sigma_y = \sigma_0 + f_h(\epsilon^{pl}) \quad (8)$$

f_h : 테이블로 정의된 항복 응력

등방성 탄소성 모델의 장점은 탄성 모델과 마찬가지로 적용하기 편리하다는 점이다. 또한 얼음에 가해지는 하중 속도 (loading rate)가 비교적 준정적이어서 얼음이 소성 변형하면서 붕괴하는 연성 스프링이 지배적인 경우에는 적합하지만, 비교적 빠른 속도의 하중 속도가 가해지거나 매우 저온의 얼음일 경우, 취성 스프링이 발생하여 얼음의 재료 모델로서 적절하지 않다. 얼음과 선박의 쇄빙, 유빙과 플랫폼의 충돌과 같은 상황은 대부분 빠른 하중 속도를 유발하기 때문에 과도한 소성역의 설정은 해석 시간을 증가시키고, 정확도를 저하시킬 수 있다. 또한 이러한 쇄빙 및 충돌 상황에서 얼음의 응력 상태가 일축상태가 아닌 다축 상태이므로 등방성의 가정도 해석에 큰 영향을 미칠 수 있다.

2.3 토사 탄소성 모델 (elastic-plastic model for soil)

(1) Drucker-Prager 선형 모델

통상 토사나 암반에 적용되는 탄소성 모델은 Drucker-Prager 항복 함수 또는 Mohr-Coulomb 항복 함수며, 얼음의 경우 Drucker-Prager 항복 함수를 적용사례가 많기 때문에 본 논문에서는 Mohr-Coulomb 항복 함수는 소개하지 않는다.

Drucker-Prager 항복 함수는 재료 내부적인 마찰 또는 점도가 있는 토사, 암반, 얼음과 같은 재료에 적절한 것으로 알려져 있다. 재료가 압력(압축)을 경험하면 점점 강해지는 특성 (pressure-dependent yield)을 가지며, 인장 항복이 압축 항복에 비하여 큰 재료에 적당하다.

Drucker-Prager의 선형 항복 함수는 식(9)와 같이 표현할 수 있다. 식(9)에서 p 는 식(4)의 우측 2번째항에 해당하는 정수압 응력을 p 로 표현하였으며, 식(10)에 나타내었다. 또한 q 는 von Mises 등가 응력을 의미하며 식(11)에 나타내었다.

통상 삼축 압축 실험 (triaxial compression test 또는 confined compression test)을 통하여 q 축과의 절편(d)과 직선의 기울기 (β)를 결정할 수 있다. Drucker-Prager 선형 모델에서 절편의 이동은 소성 경화를 의미한다. 일축 압축 실험 (uniaxial compression test)을 증분형으로 실시하여 압축 소성 변형률의 증가에 따른 압축 응력의 변화를 관찰하므로서 재료 상수의 정확성을 검증할 수 있다.

$$\Phi_{DP} = q - p \tan \beta - d \quad (9)$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (10)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (11)$$

Φ_{DP} : Drucker-Prager 선형항복 함수

d : 재료 상수(내부 점도(cohesion))

β : 재료 상수(p - q 평면 경사각)

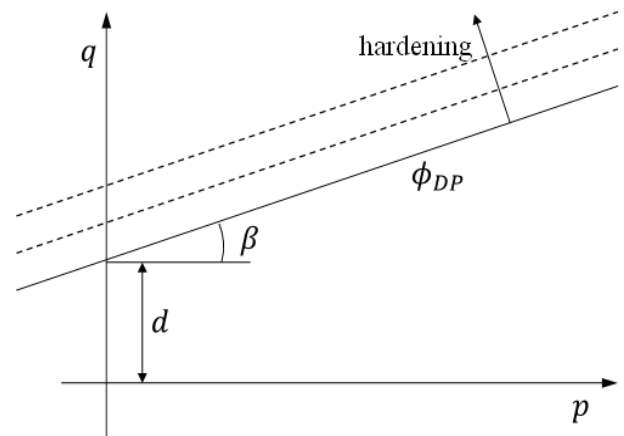


Fig. 1 Yield surface and hardening direction of Drucker-Prager linear model

(2) Drucker-Prager Cap 모델

Drucker-Prager 선형 모델을 적용할 경우, 외력에 의한 정수압 응력이 지배적일 때 파손이 발생하지 않는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Drucker-Prager 선형 항복 함수에 마개형 항복 함수 (cap yield function)를 부가하여 사용하기도 한다. 이러한 이중 모델을 Drucker-Prager Cap 모델 또는 단순히 Cap 모델이라고 한다. 얼음의 경우 정수압 응력만으로도 붕괴 (compaction failure)가 가능하므로 Drucker-Prager 모델은 얼음의 재료 모델로서 적절하지 않다.

Fig. 2는 Drucker-Prager Cap 모델을 나타내는데, 정수압 응력이 대략 p_b 보다 작다면 식(9)의 Drucker-Prager 항복 함수를, 크다면 식(12)의 Cap 항복 함수를 적용한다. Heinonen (2004)에 의하면, 식 (13)에서 p_b 의 확장 및 축소는 캡의 경화와 연화를 의미하며, 체적 소성 변형률(ϵ_{vol}^{pl})의 함수로 나타낼 수 있다 (Fig. 3참조).

$$\Phi_c = \sqrt{(p - q_a)^2 + (Rq)^2} - R(d + p_a \tan \beta) \quad (12)$$

$$p_a = \frac{p_b - Rd}{1 + R \tan \beta} \quad (13)$$

Φ_c : Cap 항복 함수

R : Cap 형상을 나타내는 재료 상수

p_a : 항복 함수의 분기점을 나타내는 정수압 응력

p_b : Cap의 교점을 나타내는 정수압 응력

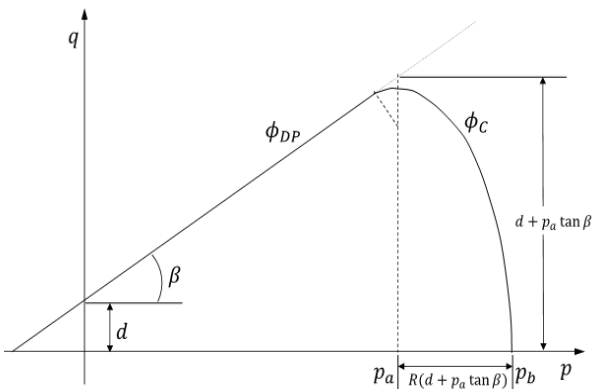


Fig. 2 Yield surface of Drucker-Prager Cap model

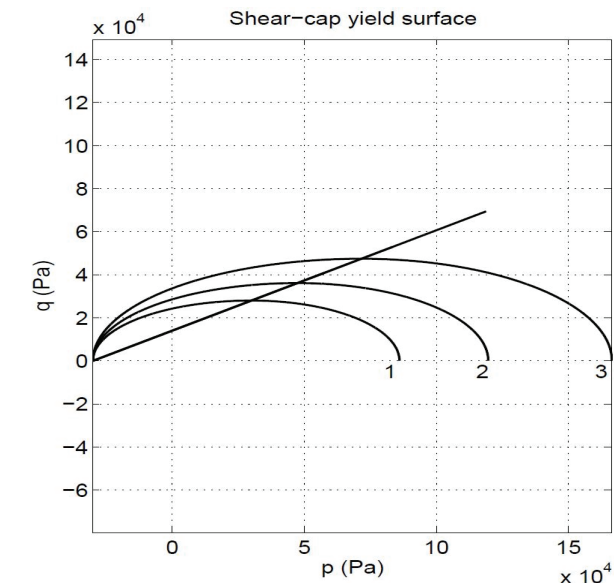
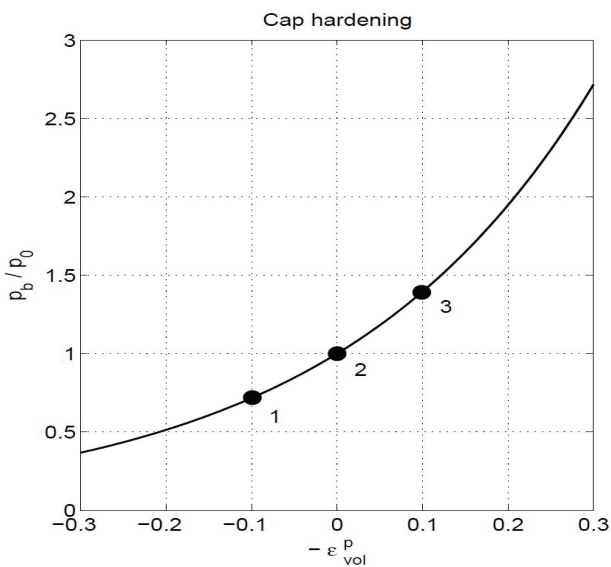


Fig. 3 Cap hardening curves described by hydrostatic pressure and volumetric plastic strain (Heinonen, 2004)

(3) Shear-Cap 모델

Heinonen (2004)은 Fig. 4에 보인 바와 같은 일년생 러블 얼음 (one-year rubble ice)을 대상으로 전단 파단 실험과 수치 해석을 수행한바 있다. 그는 수치 해석을 수행하기 위하여 전단-캡 모델로 불리는 새로운 재료 모델을 개발한바 있으며, 항복면은 Fig. 5와 같다. 이 모델은 Drucker-Prager 선형 항복 함수를 적용하지 않고, 식 (14)와 같은 타원형 항복조건을 적용하였다.

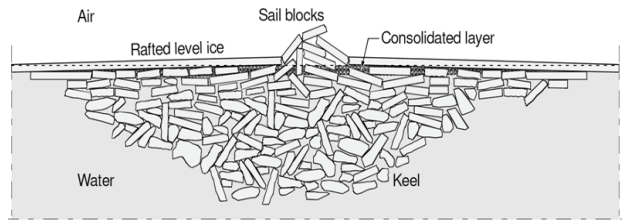


Fig. 4 Cross section sketch of an ice ridge (Jensen, et al., 2001)

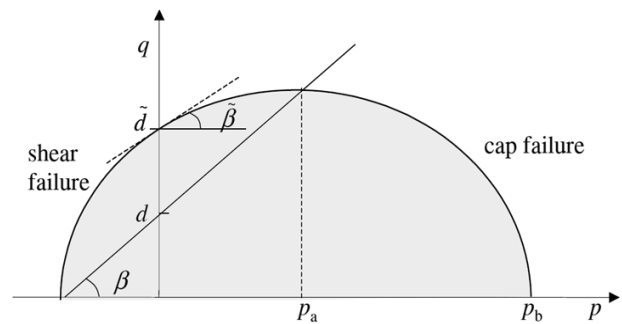


Fig. 5 Shear-Cap yield function (Heinonen, 2004)

$$\Phi_{sc} = \sqrt{(p - p_a) \tan^2 \beta + q^2} - R(d + p_a \tan \beta) \quad (14)$$

Φ_{sc} : 전단-캡 항복 함수

(4) 타원 모델 (elliptic model)

Derradji-Aouat (2003)은 Heinonen (2004)의 항복 함수와 유사하지만, 한 개의 수식으로 표현이 가능한 타원형 항복 함수를 제안한바 있다 (식 (15) 참조). 그는 또한 최대 등가 응력을 예측하기 위한 간이식을 식(16)-(17)과같이 제안하였다.

$$\Phi_E = \left(\frac{q}{q_b}\right)^2 + \left(\frac{p - p_a}{p_b}\right)^2 - 1 \quad (15)$$

$$q_b = \left(\frac{\varepsilon}{\xi}\right)^{0.25} \quad (16)$$

$$\xi = 5 \times 10^{-6} \times \exp\left\{-10.5 \times 10^2 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{273}\right)\right\} \quad (17)$$

q_b : p_a 에 상응하는 최대 von Mises 등가 응력

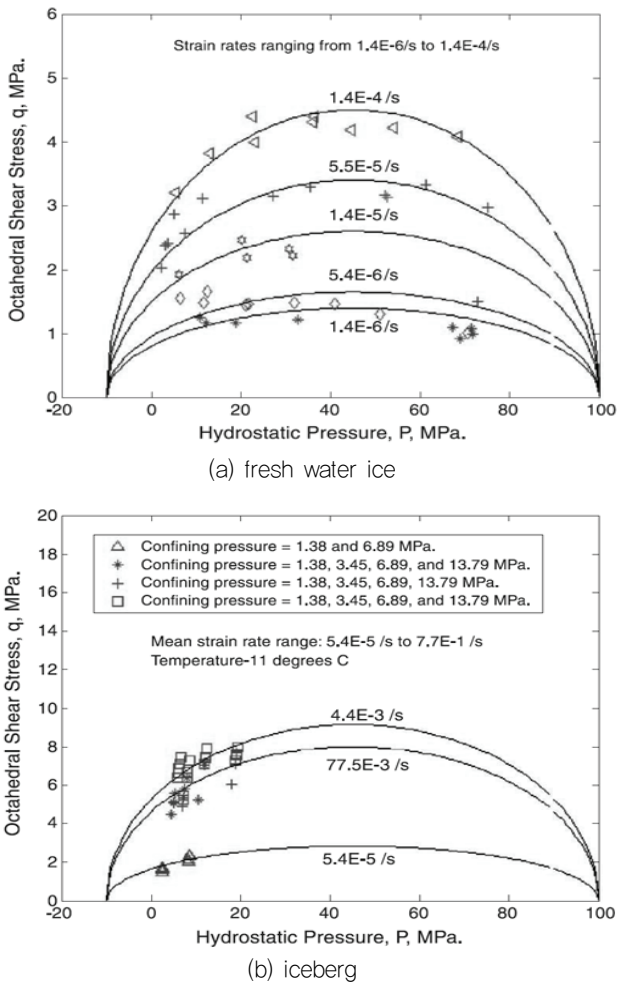


Fig. 6 Comparison of yield function vs. test data (Derradji-Aouat, 2003)

식 (16)을 살펴보면 최대 등가 응력을 하중 속도의 함수로 표현했음을 관찰할 수 있다. 즉 항복 함수는 하중 속도 (통상 변형률 속도로 표현하지만, 얼음 자체의 변형률 속도가 아닌 실험을 수행한 하중 속도를 의미하므로 하중 속도로 표현하는 것이 적절함)의 증가에 따라 종축 (등가 응력축)에서 확장하는 형상을 보인다.

Fig. 6 (a)에 Jones (1982)가 실시하였던 담수 얼음의 실험 데이터를 근거로 항복 함수와 비교하였다. 항복 함수와 실험 데이터가 상당히 잘 일치하는 결과를 볼 수 있다. 이때 얼음은 입자형 얼음 (granular ice)이었으며, 하중 속도는 $1.4 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-4}$ 범위, 입자의 크기와 실험 온도는 0.8mm 내외, 실험 온도 -10°C 인 것으로 조사되었다. Fig. 6 (b)에 Gagnon and Gammon (1995)이 실시하였던 실험 결과에 항복 함수를 비교하여 나타내었다. 정수압 응력의 크기가 작은 영역에서의 실험 결과만 존재하지만 전반적으로 추정치와 실험치가 잘 일치함을 볼 수 있다. 이때 얼음은 입자형 얼음이었으며, 하중 속도는 $5.4 \times 10^{-5} \sim 4.4 \times 10^{-3}$ 범위였으며, 입자의 크기와 실험 온도는 15mm 내외, -10°C 인 것으로 조사되었다.

(5) 압축 폼 모델 (crushable foam model)

Gagnon and Derradji-Aouat (2006)은 작은 유빙 (bergy-bit) 과 쇄빙선의 실선 충돌 실험을 실시하고 구조-유체 연성 해석 기법 (FSI technique)을 적용하여 충돌 시뮬레이션을 실시하였다 (Fig. 7 참조). 이때 얼음의 재료 모델로서 압축 폼 모델을 적용하였다. 얼음이 인장을 받을 때 항복 함수의 확장없이 얼음이 압축을 받을 때 체적 변형률 (volumetric strain)의 증가로 인한 재료의 경화 효과(volumetric compact effect, 일종의 이동성 경화 (kinematic hardening)으로 간주될 수 있음)를 구현할 수 있는 장점이 있다.

식 (18)은 압축 폼 모델의 항복 함수를 나타내며, 일축 압축에 대한 항복 응력 ($\sigma_{0,c}$)과 삼축 압축에 대한 항복 응력 ($p_{0,c}$)을 기준값으로 하여 항복 함수를 확장할 수 있다 (Fig. 8 참조).

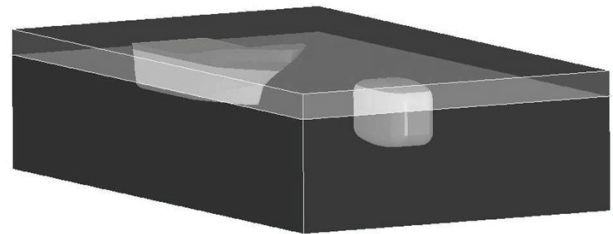


Fig. 7 Meshed region for the ship / bergy bit collision simulations (Gagnon & Derradji-Aouat, 2006)

$$\Phi_{cf} = \sqrt{q^2 + \alpha^2 (p - p_a)^2} - B \tag{18}$$

$$p_a = \frac{p_c + p_t}{2} \tag{19}$$

$$\alpha = \frac{3\gamma}{\sqrt{(3\gamma_t + \gamma)(3 - \gamma)}} \tag{20}$$

$$\gamma = \frac{\sigma_{0,c}}{p_{0,c}} \tag{21}$$

$$\gamma_t = \frac{p_t}{p_{0,c}} \tag{22}$$

- Φ_{cf} : 압축 폼 항복 함수
- $\sigma_{0,c}$: 일축 폼 항복 함수
- $p_{0,c}$: 삼축 압축 항복 응력

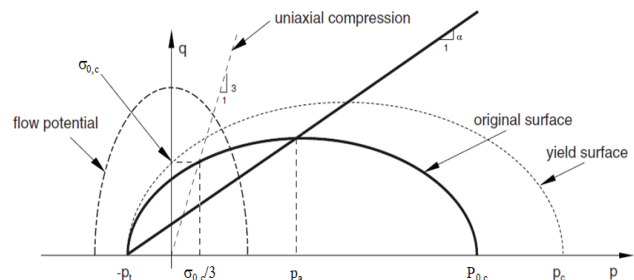


Fig. 8 Crushable foam yield function

2.4 연속체 손상 역학 모델 (continuum damage mechanics model)

Xiao and Jordaan (1996), Zou, et al. (1996) 그리고 Karr and Choi (1989)는 연속체 손상 역학을 응용한 얼음의 파괴에 대한 연구를 수행한바 있으나, 최근에는 주로 토사 계열의 항복 함수를 이용한 얼음의 변형과 파단에 대한 연구가 주류를 이루는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 이에 대한 별도의 소개를 생략한다.

3. 결론

(1) 얼음의 이방성

해수빙의 경우 통상적으로 기동형으로 알려져 있으며, 기동형 얼음의 경우 기동의 직교 평면에는 등방성 (cross isotropic)이지만 기동의 평행 평면에는 이방성 (transverse anisotropic)으로 알려져 있다. 쇄빙 또는 빙하 충돌로 인한 얼음의 스펙링을 구현하면서 간이적인 해석을 원할 경우, 모든 방향에 대하여 등방성으로 간주하는 등방성 탄성 모델 및 등방성 탄소성 모델을 적용하는 것도 비교적 바람직한 설계의 방향이 될 수 있다. 토사 계열의 재료 모델을 사용하는 경우에도 이방성에 대한 문제를 근본적으로 해결할 수는 없는 것으로 판단된다. 특정해역에서 운항 또는 운영 될 빙해 선박 또는 극지용 해양플랜트의 설계를 위해서, 강한 축 얼음 특성을 사용하는 것이 설계 안전도를 향상시킬 것이지만, 실제 하중을 과대 평가할 수 있음에 주의해야 한다.

(2) 얼음의 소성 경화 및 하중 속도 경화

선박 및 해양플랜트용 강재의 경우 변형률 속도가 빠르다고 해서 취성 거동을 보이지 않기 때문에 소성으로 인한 소성 변형률 경화와 소성 변형률 속도 경화를 별도로 취급한다. 즉 별도의 구성 방정식을 사용하여 각각을 정의한다.

얼음에 작용하는 하중 속도가 느릴 경우 즉 준정적 하중일 때 얼음의 압축 응력-압축 변형률 곡선은 확실히 소성 경화 (일종의 plastic compaction)를 보이지만, 하중 속도가 빨라질 경우 즉 동적 하중일 때 얼음의 압축 응력-압축 변형률 곡선은 취성 파괴 모드를 보여준다. Kermani, et al. (2007)은 얼음의 변형 또는 파단은 하중 속도에 따라서 Table 1과 같이 분류가 가능하다고 한 바 있다. 수치 해석을 수행할 때 하중속도에 따른 재료 모델의 변동성 또는 재료 모델에 사용되는 파라미터의 변동성에 대한 연구도 같이 병행되어야 할 것이다.

Table. 1 Three domains of ice deformation

	Ductile (S^{-1})	Transition (S^{-1})	Brittle (S^{-1})
Tension	$\geq 1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$	$\leq 1 \times 10^{-2}$
Comp.	$\geq 1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$	$\leq 1 \times 10^{-6}$

극지용 해양플랜트 자유 수면 주변의 결빙과 해빙으로 인한 하중은 준정적 하중으로 간주될 수 있으나, 얼음의 파단, 변형, 스펙링과 같은 현상은 대부분 준정적 하중보다는 동적 하중 즉 충격/충돌과 같은 하중을 의미할 수밖에 없다. 따라서 대부분의 얼음의 파괴 양상은 취성 파괴에 가까울 것이고 등방성 탄소성 모델보다는 등방성 탄성 모델이 적용성도 용이하고, 좀더 현실적인 해를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 등방성 탄성이던 등방성 탄소성이던 얼음이 다축 응력 상태 하에 있을 때 정수압 응력의 증가에 따른 파단을 정확히 예측하는 것은 현실적으로 불가능하다. 반면 토사 계열의 항복 함수는 정수압 응력의 효과를 고려할 수 있으므로 비교적 정량적인 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 참고로 LS-Dyna (LSTC, 2009) 또는 Abaqus.Explicit (Simulia, 2009)과 같은 사용 유한 요소 프로그램은 모든 토사 계열의 항복 함수에 대하여 변형률 속도의 증가로 인한 경화를 고려할 수 있다.

(3) 온도 의존성

Fig. 9 (Jones, 2007)로부터 얼음의 온도와 압축 강도 사이에는 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다. 얼음의 온도가 낮아질수록 일축 압축 강도는 높아지는 경향이 뚜렷하다.

삼축 응력 상태에서도 온도와와의 관계식은 필요하다고 판단되며 온도강하에 따른 항복 함수의 확장이 필요할 것이다. 그러나 온도 의존성에 대한 많은 연구가 수행되지는 않은 것으로 조사되었으며, 이에 대한 많은 연구가 필요하리라 예측한다. 현재 대부분의 사용 유한 요소 프로그램에서는 온도에 따른 토사 계열 재료 물성치를 정의할 수 있으므로 온도에 따른 실험적 연구가 우선적으로 수행될 필요가 있다.

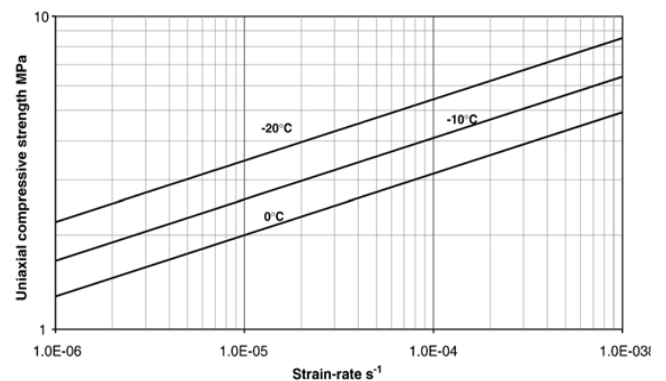


Fig. 9 Uniaxial strength variation according to the temperature changes (Jones, 2007)

후 기

본 논문은 인하대학교 연구비 지원 과제의 일부로 수행되었으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Choi, K. & Jeong, S.Y., 2008. Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessels. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(2), pp.175–185.
- Choi, K. 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.
- Choung, J., 2009. Comparative Studies of Fracture Models for Marine Structural Steels. *Ocean Engineering*, 36, pp.1164–1174.
- Choung, J. Cho, S.R. & Kim, K.S., 2010. Impact Test Simulations of Stiffened Plates Using the Micromechanical Porous Plasticity Model. *Ocean Engineering*, 37, pp.749–756.
- Derradji–Aouat, A., 2003. Multi–Surface Failure Criterion for Saline Ice in the Brittle Regime. *Cold Regions Science and Technology*, 36, pp.47– 70.
- Gagnon, R.E. & Derradji–Aouat, A., 2006. First Results of Numerical Simulations of Bergy Bit Collisions with the CCGS Terry Fox Icebreaker. *Proc. of the 18th IAHR International Symposium on Ice*, 28 Aug.–1 Sep. 2006, Sapporo Japan, pp.09–16.
- Gagnon, R.E. & Gammon, P.H., 1995. Triaxial Experiments on Iceberg and Glaciers Ice. *Journal of Glaciology*, 41(139), pp.528– 540.
- Heinonen, J., 2004. *Constitutive Modeling of Ice Rubble in First–Year Ridge Keel*. Ph.D. Dissertation, Helsinki University of Technology, Finland.
- International Organization for Standardization (ISO), 2007. *ISO/DIS 19906: Arctic Offshore Structures Standard*. ISO.
- Jensen, A. et al., 2001. Physical Modelling of First–Year Ice Ridges – Part II: Mechanical Properties. *Proc. of 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 12–17 Aug. 2001, Ottawa Canada, pp.1493–1502.
- Jones, S.J., 1982. The Confined Compressive Strength of Polycrystalline Ice. *Journal of Glaciology*, 28(98), pp.171– 177.
- Jones, S.J., 2007. A Review of the Strength of Iceberg and Other Freshwater Ice and the Effect of Temperature. *Cold Regions Science and Technology*, 47, pp.256–262.
- Karr, D.G. & Choi, K., 1989. A Three–Dimensional Constitutive Damage Model for Polycrystalline Ice. *Mechanics of Materials*, 8, pp.55–66.
- Kermani, M., Farzaneh, M. & Gagnon, R., 2007. Compressive Strength of Atmospheric Ice. *Cold Regions Science and Technology*, 49, pp.195–205.
- Kim, H.S. & Lee, C.J., 2010. A Study on the Bow Shape of Ice Breaking Vessel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.469–475.
- Kwak, M.J. Choi, J.H. Park, J.H. & Woo, J.H., 2009. Strength Assessment for Bow Structures of Arctic Tanker(107K) under Ship–Ice Interaction. *International Conference on Ship and Offshore Technology : Ice Class Vessels*, 28–29 Sep. 2009, Busan Korea, pp.103–110.
- Lee, S.G. et al., 2009. Structural Safety Assessment in Membrane–Type CCS in LNGC under Iceberg Collisions. *International Conference on Ship and Offshore Technology : Ice Class Vessels*, 28–29 Sep. 2009, Busan Korea, pp.69–81.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2009. *LS–Dyna User Manual Version 971*. LSTC.
- Rim, C.W. & Lee, T.K., 2007. Estimation of Ice Load on Bow of a Icebreaking Research Vessel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(5), pp.509–516.
- Simulia, 2009. *Abaqus User Manual Version 6.8*. Simulia.
- Suh, Y. et al., 2008. Ice Collision Analyses for Membrane Tank Type LNG Carrier. *Journal of Ship and Ocean Technology (SOTECH)*, 12(1), pp.35–44.
- Xiao, J. & Jordaan, I.J., 1996. Application of Damage Mechanics to Ice Failure in Compression. *Cold Regions Science and Technology*, 24, pp.305–322.
- Zou, B. Xiao, J. & Jordaan, I.J., 1996. Ice Fracture and Spalling in Ice–Structure Interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 24, pp.213–220.

