

## 얼음의 공 인덴테이션에 관한 연구

고 상 용  
수송시스템 공학부

### <요 약>

주형 청수얼음 S2 Sample로 공indentation test를 행하였다. Splitting 또는 spalling이 7.5KN 이하의 하중에서 발생하는 것을 확인 하였으며 접촉원 중심에 수직으로 작용하는 압력  $P_0$  값은 -10°C에서 얼음이 녹는 압력 100Mpa 보다 훨씬 큰 값임을 확인 하였다. 유리 및 세라믹에서 나타나는 측면균열, 방사선균열, 미디언균열 및 반동전 균열이 발생하였으며, 균열패턴은 반동 전균열을 대칭으로 측면균열과 방사선균열이 서로 반대편에 위치 하였다.

## A Study on the Spherical Indentation of Ice

Ko Sang Ryong  
School of Transportation System Engineering

### <Abstract>

Indentation tests were carried out by a spherical indentor on the S2 ice samples. Spallings or splittings occurred at the samples under the load of 7.5KN. The normal pressure for the center of loaded circle,  $P_0$  was much greater than the approximate 100Mpa pressure required to melt ice into liquid at -10°C. The radial cracks, the median cracks, the half-penny cracks and the lateral cracks occurred to S2 ice similar to the glass and ceramics.

The lateral cracks and radial cracks were initiated at both sides of the half-penny cracks.

## 1. 서 론

강, 호수 및 연못 등에서 볼 수 있는 대표적인 기둥모양 청수얼음 (S2 columnar fresh-water ice, Fig. 1)은 추울 때 청수표면에 눈으로 씨 뿌리기 할 때 또는 파도에 의하여 동요가 있을 때 형성되며 S2 청수얼음이라 한다. 이 얼음의 C-축은 성장 방향에 수직한 수평면 상에서 무작위로 향하고 있다.(Michel 및 Ramseier [1])

Wiederhorn 등[2]이 분류한 4개의 범주 중에서 무딘 indentor 즉 구(sphere)와 정하중(blunt/static)범주로 하고 Timco [3] 가 정의한 2개의 영역 중 하나인 indentation 방법을 택하기로 한다.

Splitting 또는 spalling의 발생을 피하고 다만 균열관련 자료만을 얻기 위하여 이들이 발생하는 임계하중을 찾아야 하고, 이 임계하중 이하에서 시험을 한다. 본 논문은 구 indentation에 관한 Hertz[4]의 순수탄성 변형 및 접촉부의 형상과 Lawn 등[5]의 균열이론 및 기하학을 용용하여 자국(impression)의 크기와 하중관계, 하중 원 중심에 수직으로 작용하는 압력의 크기, 그 때 발생하는 균열의 기하학 형상을 규명하며 Hertz의 고리균열 및 원뿔균열 발생여부를 확인하는데 목적이 있다.

## 2. 문헌고찰

얼음 indentation은 많은 사람들에 의하여 널리 연구되어 왔다. 그러나 이 제목의 적절한 이해는 아직 많은 제한이 있다. 그 이유는 얼음 indentation시험을 하기에, 얼음의 유형, indentation율, 얼음속의 흡집밀도, 온도, 각종 크기효과 (scale effect) 등의 변수들이 너무 복잡하게 존재하기 때문이다.

Timco는 얼음판과 강체구조물과의 사이의 상호작용을 다음의 2개의 영역으로 정의하였다.  
① Indentation - 얼음이 항복점에 다다르거나, 파손 할 때 까지만 얼음에 하중이 걸리는 초기 접촉의 응답.

② Penetration-구조물 또는 indentor 가 얼음장을 관통 할 때 발생하는 계속적인 변형.

이들 2영역은 주로 다음 사실에 의하여 분리된다. 초기 접촉에서 얼음이 손상 받지 않는 것이고, penetration 영역에서는 indentor 앞에 있는 얼음이 indentor가 진전함에 따라서 어느 정도 변형을 가져오는 것이라고 생각 한다.

일반적으로 얼음에 상대적으로 움직이는 구조물은 이 2가지 영역에서 indentor 라고 부른다. 얼음 구조물의 상호작용의 penetration 영역 연구는 일반적으로 현장에서 수행하거나 (Sanderson,[6]) 또는 얼음 탱크를 구비한 실험실에서 떠 있는 얼음판 위에서 모의시험을 행하게 된다.

실험실 연구에서 indentor 크기는 떠있는 얼음판의 크기가 무한대 크기의 판이라 생각할 때 그 모의시험(simulate)하기에 충분한 크기에 맞추어 정하여지며 경계문제는 충분히 멀리 떨어져 있다고 가정한다.

크기의 강제조건들은 얼음 두께에 따른 의의 온도경사도 (the significant temperature gradient)의 결정을 어렵게 하고 있으며, 온도 문제는 아직 탱크 내에서 수행되는 실험에 하나의 변수로 연구하고 있는 것 같다.

지금까지 얼음 탱크에서 수행된 연구 를 가운데 적절하게 적용 가능한 것 들은 Michel 및 Toussaint [7], 그리고 Timco등이 있으며 이들은 얼음판 두께에 따른 indentor 폭과의 다양한 비를 가진 파손 모우드를 서술 하고 있다.

Hirayama 등[8], Sodhi 및 Nakazawa[9], Sodh 및 Morris[10] 그리고 Sodhi[11] 등은 얼음판의 penetration 과 구조물의 동적여기(dynamic excitation)에 관한 갑진 결과를 보고 하였고 그 뒤 최근까지 Indentation 이라는 단어를 이용한 실제 penetration에 관한 많은 논문이 발표되고 있다. 한편 유리 및 세라믹에서 Hertz 는 두 곡면이 접촉 할 때 탄성변형과 접촉부의 기하학을 예측하였으며 이 용력장은 Huber[12]가 처음으로 분석 하였다.

Lawn 및 Wilshaw는 취성고체의 Hertz indentation 의 과정을 합리적으로 훌륭히 이해 하였다.

Lawn 및 Fuller[13], Swain 및 Hagan[14] 들은 탄성/소성 indentation 특성에 관한 분석을 상세하게 비교 설명하고 있다. 세라믹 파단 의 고유 특성에 관한 indentation 균열 현상은 현재 잘 알려져 있다.

본 제목에 관한 현재의 지식과 역사적 배경에 관하여는 K. L. Johnson [15] 의 "Contact Mechanics" 와 B. R. Lawn[16] 의 "Fracture of Brittle Solid"에 잘 쓰여져 있다.

Wiederhorn 등 은 유리 및 세라믹 균열현상 연구에서 indentor의 기하학과 하중 방법에 의하여 다음 4가지로 분류 하고 있다.

- ① 무딘 indentor (구 등)-정적하중 (blunt/static)
- ② 뾰족한 indentor (피라미드 또는 원뿔 등)-정적하중(sharp/static)
- ③ 무딘 indentor -충돌하중 (blunt/impact)
- ④ 뾰족한 indentor-충돌하중 (sharp/impact)
- ⑤ 항은 아직 고려 대상으로 남겨져 있다.

R.E. Gagnon[17]은 얼음에서 crushing을, Ian J. Jordaan[18] 등은 얼음에서 구 indentation에 의한 crushing 및 clearance를 언급하고 있다.

직사각 봉 indentor 의 S2얼음 indentation에 관한 문헌은 Smith 및 Schulson[19] 그리고 Grape 및 Schulson[20]에 의하여 발표되고 있다.

### 3. 공식화

Indentor에 의한 S2 주형 청수얼음과의 최초의 점 접촉에서 하중이 증가함에 따라 그 점은 하중원이 되고 일정 한계까지 그 하중원은 커진다. 균열 크기와 하중원과의 관계는 하중원 중심에 작용하는 압력을  $P_0$ , 그 반지름을  $\alpha$  라하면 Hertz식에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

즉, 원형 탄성접촉 반지름을  $\alpha$  라 하면

$$\alpha = (3PR/4E^*)^{1/3} \quad (1)$$

여기서 P= 수직하중 , R=indentor 반지름 및  $E^*$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$$

$E_1, E_2$  및  $\nu_1, \nu_2$  는 sample과 indentor의 탄성을 및 poisson ratio이다.

변위  $\delta$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = a^2/R \quad (2)$$

하중원 중심에 작용하는 압력  $P_0$ 는 다음과 같다.

$$P_0 = 3P/2\pi a^2 \quad (3)$$

균열크기 C와 하중원 반지름  $a$ 와의 상관관계를 나타내는 Lawn등의 식은 다음과 같다.

$$\left( \frac{K_{IC}}{Ha^{1/2}} \right) \left( \frac{H}{E} \right)^{1/2} \propto \left( \frac{c}{a} \right)^{-3/2} \quad (4)$$

여기서  $K_{IC}$ =fracture toughness,  $H$ =indentation hardness 및  $E$ =sample의 탄성을.

식(4)에서  $P_0 = H$ 라 놓아 다음과 같다.

$$\left( \frac{P_0 E}{K_{IC}^2} \right) \propto \frac{c^3}{a^4} \quad (5)$$

(5)식의 왼쪽항, 취성인자 상수를 B라 놓으면 다음 식을 얻는다.

$$c \propto Ba^{4/3} \quad (6)$$

여기서  $c$ = crack length,  $a$  = radius of impression

(6)식을 다음과 같이 변환하면

$$c = \text{function}(a) \quad (7)$$

이다.

## 4. 실험방법

### 4-1. 얼음 Sample

본 실험에서 사용된 얼음은 다음과 같이 제작 하였다.

먼저 얼음의 크기 2-4mm지름의 씨를 만들고, insulation tank에 Hanover 수돗물을 채우고, 냉각시킨다. tank내부의 표면온도가 0°C 되면 앞에서 준비한 씨를 뿐린다. 한 방향으로의 동결을 위하여 물 표면에 heat sink를 사용한다. 이 과정을 통하여 1m지름의 약 깊이 200mm의 기포 없는 주형얼음을 얻게 된다.

이 덩어리를 "puck" 라 하며, 이 puck의 깊이 방향으로 기둥들(columns)의 장축이 지난다.

이 puck로부터 일변 152mm 정육면체를 만들고 한면은 기둥들의 장축이 다른 면에 직각으로 지나가도록 한다.

표면은 milling 가공 하고 실험직전 알코올로 표면을 깨끗이 닦는다. sample의 평균grain크기는  $6 \pm 1$ mm 이다.

#### 4 - 2 . Indentor 의 선정

Sample 의 grain 크기와 비교하여 indentor 의 지름이 작은 것으로 사료되나 "size effect"는 금번 시험에서 무시하기로 하고 실험의 용이함을 생각하여 25.4mm  $\phi$  의 합금강(#5200)으로 택하였다. 그의 탄성계수,  $E=205\text{Gpa}$  이고, Poisson ratio,  $\nu=0.295$ 이다.

#### 4 - 3 . 장비 및 실험방법

실험은 Thayer School of Engineering에 있는 얼음연구소의 냉각실에서  $-10^{\circ}\text{C}$  에서 행한다.

indentation 시험은 실험실에 설치된 uniaxial testing machine으로 하고 단조증가하중 시험에서 displacement rate는 0.038 mm/s로 하였으며, 맥박시험(pulsed test)에서 균열패턴을 관찰 할 수 있도록 1KN, 2KN .. 등으로 1KN 의 하중을 가한후 그 하중을 제거하고, 2KN의 하중을 가한후 그 하중을 제거하면서 반복적으로 하중을 가했다 제거했다 하면서 임계하중 직전까지 되풀이 한다.

### 5 . 실험결과 분석 및 토론

구 indentation시 발생하는 형태학적 관측을 다음과 같이 하였으며 균열의 생성, 성장에 관하여는 Lawn등이 상세히 언급하고 있다.

#### 5 - 1 . 하중과 그 변위

단조증가하중 시험에서 indentor의 하중-변위곡선을 Fig.2 에서 나타내고 있다. indentor가 얼음에 하중을 가하는 동안 그에 대응하는 변위를 가진다. 항복점을 지나 서서히 하중이 감소한 뒤 다시 상승하여 두번째 정점 즉 최대하중에 이르면서 급격한 하중 감소가 목격된다.

Table 1 은 실험결과를 이용하여 하중원 중심에 작용하는 압력 및 자국의 반지름 값을 얻은 것이다.

Table 1. Monotonic load tests results

Test peak	Test 1		Test 2	
	1 <sup>st</sup> Peak	2 <sup>nd</sup> Peak	1 <sup>st</sup> Peak	2 <sup>nd</sup> Peak
p(KN)	5.5	7.05	2.74	5.2
a(mm)	2.20	3.32	2.28	4.47
P <sub>0</sub> (Mpa)	544	305	251	124
$\delta$ (mm)	0.38	0.87	0.41	1.57

Fig. 3 의 phase diagram에서 보는 바와 같이 얼음이 물로 변화는 조건이  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서

100Mpa 이다. 여기서 실험결과 얻은  $P_0$ 의 값은  $-10^{\circ}\text{C}$  127Mpa~492Mpa 이므로 분명히 그 indentation시 자국 내에 수분이 존재하리라 사료 된다.

이 phase diagram 은 Whalley (1969) 가 제안 한 것으로 Hobbs 의 "Ice Physics" 에서 발췌된 것 이다. Fig. 4은 맥박하중시험에서 하중-변위 곡선을 보여준다. 보는바와 같이 이력현상루프(hysteresis loop)가 생긴다.

단조증가하중 시험과 같이 임계하중  $P_c=7.5\text{KN}$  이하에서 모두가 splitting 또는 spalling 현상이 일어난다. Fig.5 는 탄성이론과 실제 실험 결과에 의한 하중과 하중원 크기(반지름=a)와를 비교 한 것이다. 이론값은 하중 9KN 에서  $a=2.5\text{mm}$  정도이며 그 이상 하중이 증가 하여도  $a$ 의 값은 크게 변하지 않으나 실험 결과  $a=5.5\text{mm}$  까지도 커지는 것을 알 수 있다.

## 5 - 2 . 균열패턴

1KN하중에서 가루부분, 소성변형부위, sample 표면 및 표면하에 방사선 균열이 발생한다. 2KN-3KN사이에서 자국(impression)의 중심에서 밖으로 약10개정도 방사선 균열이 생기며 3-4 개만 표면 위에 나타나고 나머지는 표면 밑에서 다른 균열과 합쳐져 없어진다.

3.25KN-3.75KN 사이에서 반동전균열과 미디언균열이 점점 성장하며 반동전균열은 2개의 방사선균열이 자국을 중심으로  $150^{\circ} - 170^{\circ}$  의 각을 형성하면서 옆과 밑으로 성장한다. 방사선 균열의 일종인 미디언균열은 자국하부 미디언 평면 내에서 밑으로 성장한다.

Fig. 6는 4KN하중 시  $X_1$ ,  $X_2$  방향에서 찍은 것으로 사진 왼쪽에 측면균열(lateral crack), 오른쪽에 방사선균열(radial cracks) 들이 보인다.

Fig. 7는 4.5KN하중 시  $X_1$ ,  $X_2$  방향에서 찍은 사진으로 4KN하중시보다 더 성장하고 있다. Fig. 8은 5KN하중 시  $X_3$ ,  $X_1$  방향에서 찍은 것으로 반동 전 균열현상을 보여준다. Fig. 9은 거냥도를 나타내며 비교난에 sample좌표계는 Schulson[21] 이 처음 사용한 것 이다.

본 실험결과 유리 및 세라믹의 뾰족한 indentor 정적하중 indentation 때와 유사한 균열형상 즉 측면균열, 반동전균열 등이 발생함을 알 수 있었다.

## 5 - 3 . 균열크기와 자국

실험결과 지수의 값이 제일 적은 값과 큰 값을 가지는 경우는 Fig. 10, Fig. 11와 같다. 그 평균 값은 취성인자를 상수화 하였을 때 S2 주형얼음 에서도 하중과 균열 치수 사이에 일정한 상관 관계가 있음을 알 수 있으며, 이들 값은 (6)식의 지수값에 근접하고 있음을 알 수 있다.

## 6 . 결 론

종합하면 다음과 같은 결론에 이르게 된다.

1. 단조증가하중 및 맥박 시험 결과 7.5KN이하의 하중에서 splitting 및 spalling 현상이 발생 하며 구 indentation 에서 발생 한다는 Hertz 의 고리균열 및 원뿔균열은 관찰 할 수 없었다.

2. 하중원 중심에 작용하는 압력  $P_0$ 의 값은  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 얼음을 녹이는데 필요한 압력보다 큼으로 그 indentor 하부에 수분이 있을 것으로 사료 된다.
3. 백박하중 시험에서 유리 및 세라믹의 뾰족한 indentor-정적하중(sharp/static) indentation 실험 시 나타나는 방사선 균열, 반동전균열 및 측면균열을 관찰할 수 있었으며 반동전 균열을 대칭면으로 하여 한쪽에는 측면균열이 다른 한 쪽에는 방사선 균열이 발생하였다.
4. Lawn 및 Quinn[22]식을 변형시켜 본 실험에서 계측한 균열의 크기와 자국에 관한 상관관계를 검토한 결과 유리 및 세라믹에서의 값에 매우 근접함을 확인 함으로서 균열의 크기와 자국과의 일정한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

앞으로 빙 역학(ice mechanics)에서 이 분야에 뜻을 가진 분들이 이를 균열 패턴과 균열의 크기에 영향을 주는 인자를 더 상세히 규명 할 수 있을 것으로 기대한다.

### 참 고 문 헌

1. B. Michel and R. O. Ramseier, "Classification of River and Lake Ice" J. Can. Geo. 83(1971) pp.36-50.
2. S. M. Wiederhorn et al., "Strength Degradation of Glass Impacted with Sharp Particles; I, Anealed surfaces." J. Amer. Cera. Soci. 62 (1979) pp.66-70.3.
3. G. W. Timco. "Indentation and Penetration of Edge-Loaded Freshwater Ice Sheets in the Brittle Range" Proc. OMAE 4 (1986) pp.444-52.
4. H. Hertz, "On the Contact of Elastic Solids" (in Ger.) Zeirschrift fur die Reine und Angewandte Mathematic, 92 (1881) pp.146-62.
5. B. R. Lawn and T. R. Wilshaw, "Indentation Fracture: Principles and Applications," J. Mater. Sci. 10,(1975) pp.1049-81.
6. T.J.O. Sanderson. "Ice Mechanics;Risks to Offshore Structures".(1986) Graham & Trotman, Loando7. B. Michel and D. Blanchet. "Indentation of an S2 Floating Ice Sheet in the Brittle Range" Annals of Glaciology. 4(1983) pp.180-7.
8. K. Hirayama et al.: "An Investigation of Ice Forces on Verticeal Structures" IIHR Report 158(1974).
9. D.S Sodhi et al. "Results from Indentation Tests on Freshwater Ice". Proc. IAHR Ice Symposium (1988) pp.341-50.
10. D.S. Sodhi et al. "Characteristic Frequency of Force Variations in Continuous Crushing of Sheet Ice against Rigid Cylindrical Structures". Cold Regions Science and Technolgy, 12 (1986) pp.1-12.
11. D. S. Sodhi. "Ics-Structure Interaction with Segmented Indentor." IAHR Ice Symposium.
12. M. T. Huber, "On the Theory of Contacting Solid Elastic Bodies" (in Ger.), Ann. Phys., 14 (1904), pp.153-63.
13. B. R. Lawn and E. R. Fuller, "Equilibrium Penny-Like Cracks in Indentation

- Fracture." J. Mater. Sci, 10(1975), pp.2016-.
- 14. M. V. Swain and J. T. Hagan, "Indentation Plasticity and the Ensuing Fracture of Glass", J. Phys. D: Appl. Phys., 9 (1976). pp.2201-14.
  - 15. K. L. Johnson, "Contact Mechanics." Cambridge Univ. Press.
  - 16. B. R. Lawn, "Fracture of Brittle Solids."
  - 17. R. E. Gagnon "Generation of Melt during Crushing Experiments on Fresh-water Ice" CRS and T 22(1994) pp.385-98.
  - 18. Ian J. Jordaan et al "The Crushing and Clearing of Ice in Fast Spherical Indentation Tests" Proc. the Seventh Internat. Confer. Offshore Mecha. and Arctic Eng. 4(1988) pp.111-116.
  - 19. T.R. Smith and E.M. Schulson. "Brittle Failure and Damage Development of Fresh-Water Columnar Ice under Bi-Axial Compressive Loading." Acta Met et Mater.(1992)
  - 20. J.A. Grape et al. "The Effect of Confinement on the Brittle Indentation Failure of Ice." The 15th Annual Advisory Board Meeting of the Ice Research Program (1997) pp.50-5921.
  - 21. E. M. Schulson, "The Brittle Compressive Fracture of Ice" Acta Metal Mater, 38.10(1990) pp.1963-1973.
  - 22. J. B. Quinn and G. D. Quinn, "Indentation Brittleness of Ceramics: A Fresh Approach" J. Mater. Sci. 32(1997) pp.4331-4v6.