

〈研究動向〉

하천에서의 결빙문제와 관리

(Ice Problem and Control in River)

윤 세 의

- 1. 서언
- 2. 결빙과정
- 3. 결빙문제
- 4. 결빙관리
- 5. 결론

1. 서 언

지구의 전체 담수량 중 얼음의 형태로 존재하는 양은 약 77%이며 얼음의 분포상태는 수문순환에 큰 영향을 미치고 있다. 북반구의 대부분 선진국에서는 얼음에 의한 피해가 크며, 한편 수자원 이용측면에서도 그에 관한 연구의 중요성은 날로 증대되어 가고 있는 실정이다.

얼음문제가 발생하는 지역에서 토목공사를 수해함에 있어서 얼음공학(ice engineering)에 관한 연구는 필수적이나 국내에서는 이에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 얼음은 바다, 호수, 산, 하천에 존재하며 각각의 생성, 강도, 구조 등의 특성은 상이하다. 여기서는 하천얼음에 관하여 그 형성과정, 결빙문제 및 결빙관리에 관하여 개략적으로 서술하려 한다.

1838년 헝가리의 Danube강의 겨울홍수로 인하여 Buda와 Pest 사이의 다리를 건설하는데 발생되었던 얼음문제를 해결한 것이 하천얼음공학의 효시였다고 보고된 바 있다. 20세기 초반에 와서 하천결빙과정에 관한 과학적 연구가 시작되었으며, 그후 얼음형성 및 소멸, 얼음두께 분포, 얼음 제거 및 파괴, 얼음의 역학적성질, 얼음에 의한

하상변화와 오염물질의 확산, 얼음의 물리적특성, 얼음해석 모델의 개발 등에 관하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

하천수면이 결빙되면 유속의 연직분포는 개수로의 그것과는 상이하다. 단순한 지수나 대수분포의 속도분포식은 그대로 흐름해석에 적용할 수 없게 되어 얼음에 의하여 영향받는 구간과 하상에 의하여 영향받는 구간으로 구분하여 해석하게 된다. 더욱이 만곡구간의 2차흐름의 분포에서는 두개의 cell이 존재하며 횡방향유속분포도 얼음 두께의 불균일로 인하여 불규칙하게 된다. 동일 깊이의 개수로 흐름에 대하여 습윤장의 증가로 인한 경심의 감소, 얼음저면의 조도, 하상에 얼음덩어리가 생성되는 경우(anchor ice)의 단면감소 등으로 인하여 흐름에 대한 총저항이 증가함으로 개수로에서의 흐름과 비교하여 유량은 약 30%까지 감소시키는 것으로 보고되었다. 하천결빙은 흐름의 혼합능력을 감소시키며, 동일한 마찰속도와 침강속도의 입자인 경우 부유사량, 총유사량 및 사련크기(ripple size)도 감소시킨다.



尹世儀 1954年 1月 3日生
 京畿道 安城郡 고삼면 생지리 117
 서울·江南區 驛三洞 개나리(아)36-707
 普城高等學校
 延成大學校 大學院 學士 碩士·博士/86
 京畿大學校 土木工學科 副教授
 論文：“만곡수로에서의 Ice Jam과의
 흐름특성”外 15篇 研究發表

2. 결빙과정

하천의 결빙과정은 기계학적, 수리학적 및 열역학적과정으로 각각 분류하여 설명하는 것이 가장 정확하겠으나 그 구분이 쉽지 않기 때문에 복합적으로 설명한다. 열의 전도, 대류 및 복사는 얼음형성과 소멸에 중요한 요소이며 정지상태에서 물이 얼 때는 하상과 물, 물과 얼음 및 얼음과 공기 사이의 열전달이 열음해석에서 매우 중요한 요소이다. 그러나 유속, 바람, 온도 등의 시공간적 변화등이 열음해석에 영향을 미친다.

대기온도가 0°C 이하로 냉각되면 얼음이 형성되기 시작하는데 얼음이 형성되기 전에는 물의 온도가 0°C 보다 약간 더 하강하는 과냉각(supercool)현상이 발생된다. 초기응결(initial nucleation)이 시작되면서 얼음입자(ice crystals)를 형성하기 시작한다. 이때, 수중에 얼음입자가 이미 존재하는 경우에는 결빙속도가 증가한다. 신속한 결빙상태를 얻기 위하여서는 얼음입자를 물에 살포하기도 한다. 그림1은 유속, 열손실비(heat loss rate) 및 조도계수가 얼음형성에 미치는 영향을 나타낸다. 속도가 작을 때는 판상얼음(sheet ice)형태가 되며 속도가 증가하면서 층을 이룬 frazil 과 slush형태의 얼음이 발생한다. frazil이란 직경 0.01-1 mm인 얼음입자가 물에 혼합되어 있거나 표면에 떠 있는 얼음입자의 집단을 뜻하며, slush는 수중의 frazil 이 응집하여 부력을 받아 표면부근으로 상승된 얼음덩어리를 말한다. 유속이 증가하면 slush는 흐름의 난류현상에 의하여 파괴되어 물과 완전히 혼합된 frazil로

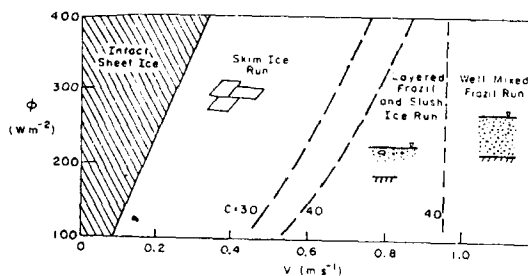


Fig 1. Regimes of initial formation of ice in rivers

존재하며 그 경제속도는 약 0.6 m/s 이다. 과냉각된 frazil(active frazil)은 0°C 이상에서 발생하는 frazil(passive frazil)보다 취수구의 폐쇄를 심하게 유발시킨다.

형성된 frazil이 특정장소에 계속 쌓이거나 서로 크게 응집하면서 얼음조각을 형성하게 되고 jam을 발생시키면서 표면결빙이 시작된다. 여기서 jam은 대기온도가 하강할때(freeze-up jam)와 상승할 때(break-up jam)로 구분된다. 현재까지 freeze-up jam의 해석에 관하여서는 많은 이론적 연구가 발표되었으나 break-up jam에 관하여서는 실측과 경험에 의한 자료에 의존하고 있다. 얼음조각의 초기축적은 제방부근, 결빙된 호수, 댐과 같은 장애물 부근에서 발생되고 있으나 직접적인 관측없이 초기축적되는 장소를 예측하지 못하고 있는 실정이다. 그림2에는 겨울철에 결빙되는 과정을 나타낸 것으로 유속이 작은 제방측부터 얼음이 형성되어 서서히 하도단면중앙부까지 완전결빙되고 있으며, aufeis는 완전결빙된 표면에 물이 다시 얼어버린 상태이다.

얼음두께를 예측하는 방법은 Static ice formation법과 dynamic ice formation법으로 구분된다. 전자는 열역학적방법으로 정확한 기상자료를 얻을 수 있는 지역에서는 그 정확도가 높으며 이와 관련하여 Ashton(1988)은 식1을 발표하였다. 후자는 운송되어 쌓이는 얼음조각에 의하여 발생하는 힘, 유체의 힘, 벽의 전단응력, 쌓인 얼음조각 밑으로 이동되는 얼음조각들의 마찰력, 얼음조각끼리의 응집력 등을 고려하여 Uzner와 Kennedy(1972)는 식2를 발표하였다.

식2를 유도함에 있어서 초기축적시 장애물이 존재해야 하며 얼음들의 접착력 결정방법에 따라 해석 결과치의 차이가 크다.

대기온도의 상승으로 얼음은 서서히 녹으면서 혹은 일부 절단되어 커다란 얼음조각이 표면으로 이동하면서 소멸되어 간다. 이러한 얼음의 생성 및 소멸시기를 예측하는 데는 장기계획을 위한 통계학적 방법과 단기계획에 적절한 열수지 해석방법이 동원되고 있다.

현장실측에는 무인비행기, 원격탐사 등의 방법

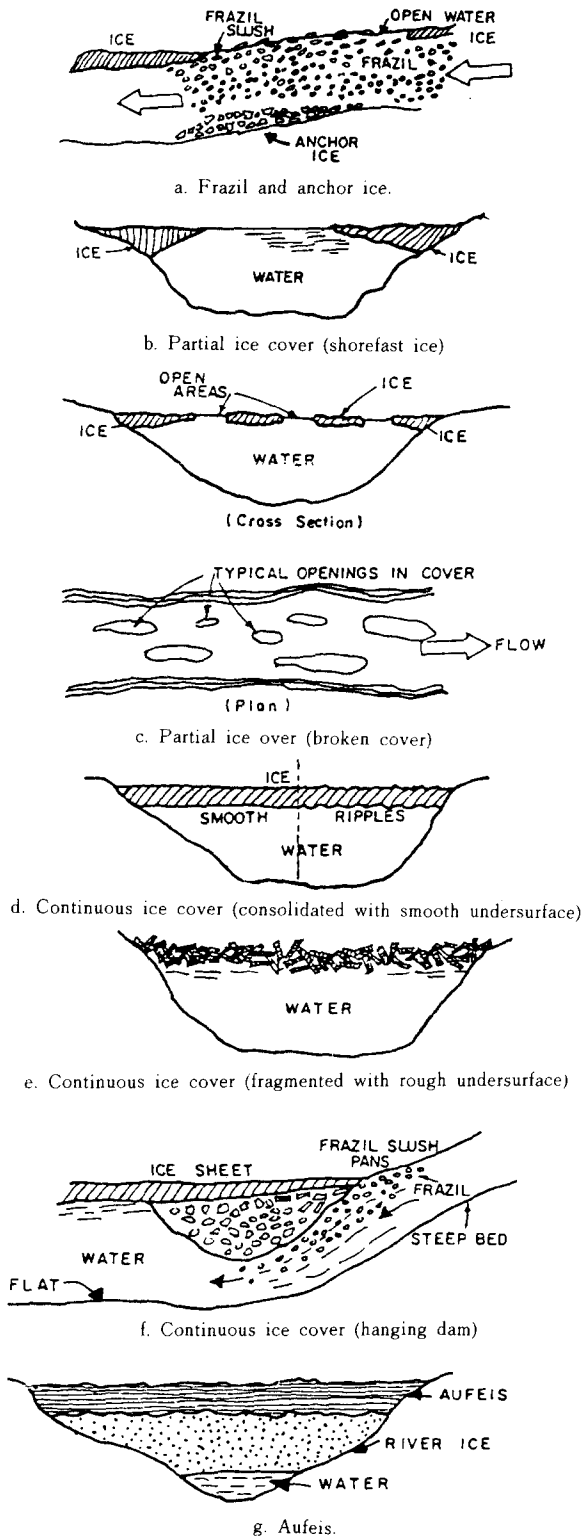


Fig 2. Forms of river ice coners

이 사용되고 있다. 실험실에서는 실제얼음을 만들어 그 특성을 연구하여 jam의 형성과정과 분포를 연구하기 위하여 비중이 얼음과 같은 재료를 사용하기도 한다.

$$h = \left[-\frac{2K_i}{\rho_i \lambda} (T_m - T_a)t + \left(\frac{K_i}{H_{ia}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{K_i}{H_{ia}} \quad (1)$$

$$\frac{V_u}{[gh(1 - \frac{\rho_i}{\rho_w})]^{\frac{1}{2}}} = K\sqrt{2} \quad (2)$$

여기서

- h : 얼음두께
- ρ_i, ρ_w : 얼음과 물의 밀도
- K_i : 얼음의 열전도계수
- T_a : 대기온도
- T_m : 얼음의 융해온도
- λ : 얼음의 융해열
- t : 시간
- H_{ia} : 얼음에서 공기로의 일전달계수
- V_u : 얼음조각 저면의 평균유속
- g : 중력가속도
- K : 비례상수

3. 결빙문제

하천에서의 ice jam, frazil ice, 얼음에 의하여 발생하는 힘(ice force)등은 환경학 및 생태학적 변화, 주운, 수력발전 등에 문제를 야기시킨다.

그림3에서와 같이 교각같은 장애물이 있을 때 jam이 발생하므로 하천의 소통능력을 감소시키게 된다. freeze-up jam은 우리나라에서와 같이 기온이 매우 춥지 않은 경우에 발생되며, 이때 중요한 사항은 얼음형성과 축적현상이다. break-up jam에서는 얼음조각의 운송과 축적현상이 중요하다. jam이 발생하는 하천에서는 홍수추적이 개수로의 경우보다 어려우며 수위-유량 곡

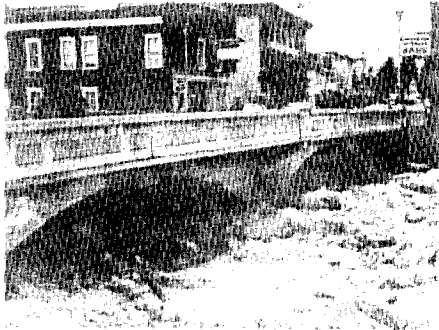


Fig 3. Ice Jammed at Highway Bridge, Lancaster, N.H., 1967

선의 작성시도 개수로의 경우와 다르다.

개수로 구역의 평균유속이 0.4-0.6 m/s일 때는 frazil ice가 발생되며 이는 freeze-up jam 발생에 중요한 역할을 한다. frazil ice로 인하여 취수구가 폐쇄되고 많은 량의 frazil ice가 생성되면 하천의 전체흐름을 방해한다. 특히, 유동하는 얼음조각은 하천 구조물에 힘을 가하게 되며 구조물이 얼음에 의하여 받은 힘의 크기는 구조물의 기하학적 형태, 유속, 얼음 두께 및 얼음의 기계역학적 특성에 의하여 결정된다. 지하수의 동결에 의한 팽창 및 수축의 힘과 하천수위 변화로 인하여 결빙수로내 설치된 말뚝에는 연직방향의 힘도 받게 된다. 교각에 작용하는 얼음조각의 힘은 수위변화가 교각의 형태보다 더욱 중요하다. 결빙된 하천에서는 환경학적 및 생태계에도 영향을 미치고 있다. 특히 조류의 이동에 영향을 주게되고, jam으로 인하여 하상이 변화하게 되어 생태계를 변화시킨다. 예를 들면 1978년 Ohio River에 50년간 존재하던 Big Bone이란 섬이 jam으로 인하여 없어진 경우도 있다. 하천으로 화물을 수송하는 경우 겨울철 하천 결빙으로 인하여 수송에 곤란을 겪거나 완전 폐쇄되기도 한다. 또한 수력발전과 상수도의 취수구 폐쇄등이 하천의 결빙문제로 알려져 있다.

4. 결빙 관리

결빙 관리방법은 수리학적 방법, 열처리 방법

및 기계학적 방법등으로 크게 구분된다. 수리학적 방법은 얼음을 이동시키는 방법이며 열처리 방법은 얼음두께의 증가를 억제 혹은 방지하는 방법이, 기계학적 방법은 얼음을 파괴하거나 제거하는 방법을 말하며 여기서는 각각의 방법을 간략하게 소개한다.

(1) 수리학적 방법

물에 떠있는 얼음조각을 계획된 장소로 이동시키기 위하여서는 대량의 공기를 일정한 수심에서 뿜어 올리는 air bubbler curtain 방법을 사용하거나 수중펌프 및 선박의 프로펠러를 이용하여 얼음을 이동시키기도 한다. 또한 얼음의 양을 감소시키기 위하여 수문(ice slucing)을 만들어 표면의 얼음을 다른 하천으로 분산시키기도 한다.

그림4에는 얼음이동 억제용 boom을 설치하여 얼음을 축적하므로써 ice boom 하류에서의 주운에 큰 도움을 주기도 한다.

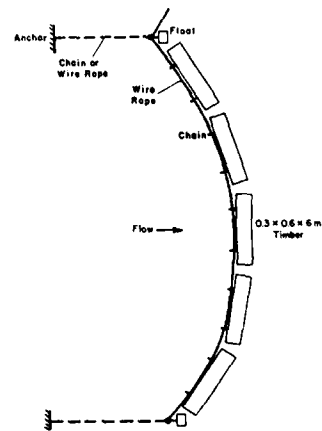


Fig 4. Schematic of an ice boom

(2) 열처리 방법

결빙표면에 단파복사열을 흡사시키기 위하여 결빙표면에 모래, 진흙, 석탄가루나 혹은 직경 1-2.5 mm의 물질을 뿌리는 방법(dusting)이 있으나 이 방법은 대기온도가 0°C 이상이어야 효과

가 크다. 국소부분의 얼음을 제거하기 위하여서는 열등(heat lamp)을 사용한다. 열의 대류를 이용하여 그림5와 같이 공기를 하천바닥에 주입함으로써 결빙저면의 온도를 증가시키는 방법이있으며 이와 비슷한 방법으로서 수중 펌프로 수로바닥의 약4℃의 물을 표면으로 공급하여 얼음두께를 감소시키거나 제거하는 방법등이 있다. 그 밖에 steam이나 온수파이프의 설치하기도 하며, frazil에 의하여 취수가 막히는 것을 방지하기 위하여서는 trash rack에 전기를 이용하여 가열시키는 방법이 있으며 지하수를 이용하거나, 폐수를 이용하여 얼음형성을 방지하기 한다.

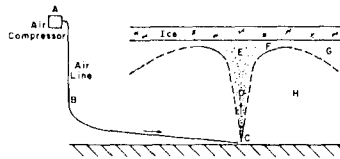


Fig 5. Schematic of a bubbler system

(3) 기계적 방법

가장 오래된 방법으로서 얼음이 쌓이는 지점에 폭발물을 설치하여 폭발시키는 방법이 있다. 폭발수심, 장약의 무게 및 파괴예상 적경의 크기 등을 고려하여야 하며 최심선을 따라서 장약을 설치하여야 한다. 압축공기를 이용하여 운하벽(lock wall)에 붙은 얼음을 제거하기도 하며, 불도저나 백호 등을 이용하여 수심이 얕은 소규모 하천에서는 얼음을 제거할 수도 있다. 최근에 CRREL (Cold Regions Research and engineering Laboratory)에서 개발한 얼음방지 액을 이용하기도 한다. 얼음을 완전히 방지하지는 못하지만 얼음의 부착력을 감소시켜 얼음제거시 효과적인 것으로 알려졌으며 이를 copolymer coating 이라 한다.

5. 결론

하천의 결빙과정, 결빙문제 및 관리에 관하여

개략적으로 서술하였으며 하천얼음의 해석에 있어서는 아직까지 알려지지 않은 부분이 많이 있으므로 경험적, 실험적인 방법이 널리 사용되고 있다. 얼음의 형성, 발달, 소멸과정은 지역에 따라 그 차이가 있으므로 지속적인 자료의 수집이 요구된다.

국내에서는 하천결빙으로 인한 피해가 크지 않은 것으로 알고 있으나 서울천의 온도가 하강하는 일부 북부 지역에서는 수자원의 효율적 관리를 위하여, 또한 추운 지역에 진출하여 도목 공사를 수행함에 있어서는 얼음공학에 관한 연구가 진요하며 국방토목에 있어서는 그 중요성이 크다고 생각된다.

참고문헌

Ashton G. D., *River and Lake Ice Engineering*, Water Resources Publications, 1986.
 Ashton G. D., *"Intake Design for Ice conditions"*, Developments in Hydraulic Engineering, Elsevier Applied Science, London 1988.
 Ashton G. D., *"River Ice Problems, "Where Are We?, A Review"*, U. S. CRREL, Hanover, NH, 1987.
 Beltaos S., *"River Ice Jam: Theory, Case, Studies, and Applications"*, ASCE, J. of the Hydr. Div., Vol. 109, No.10, pp.1338-1359, 1983.
 Carey K. I., *"Ice Blockage of Water Intakes"*, U. S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, NH, 1979.
 Engmann J. E. O. and Rolf Kellerhals, *"Transverse Mixing in an Ice-Covered River"*, W. R. R., Vol. 10, No. 4, pp. 775-784, 1974.
 Foulds D. M., *"Ice Problems at Water Intakes"*, Can. J. Civ. Eng., vol. 1, pp.137-140, 1974.
 Kennedy J. F., *"Ice-jam Mechanics"*, Proceeding 3th International Symposium on Ice Problems, Hanover, New Hampshire, pp.143-164, 1975.
 Krishnappan B. G., *"Suspended Sediment Profile for Ice Covered Flows"*, ASCE, J. of Hydr. Div., vol. 109, No. 3, pp. 385-397, 1983.