

〈論 文〉

만곡수로에서의 Ice Jam과 흐름특성
(Characteristics of Ice Jam and Flow in Channel Bends)

윤 세 의*

Abstract

Presented in this paper is a brief summary of the basic theory and observation from a laboratory investigation aimed at determining flow characteristics and ice jam topography in a sinuous channel, and in a single-bend channel. The sinuous channel comprised thirteen 90° bends and was of comparatively small aspect ratio. The single-bend channel was a 180° bend, which was an order of magnitude large in width as well as aspect ratios than the sinuous channel. The simulated ices were polyethylene and polypropylene beads and blocks.

The streamwise velocities near the bottom were larger than that of surface in sinuous channel and forming ice jam in sinuous channel, this phenomena were found strongly. Jams were generally thicker along the inner bank of bends. The path of maximum-streamwise velocity was displaced towards approaches side of the inner bank of bends. Radial variation of jam thickness was to be regular by increasing size of ice fragments.

The rate of jam head progression around outer bank of the single bend was faster than that of inner bank and its velocity was roughly steady. With increasing Froude number, jam thickness became less uniformly distributed; being generally thicker along the inner bank and near the jam's toe.

Two-layer model might be adaptable for the computing the streamwise velocity in shallow river bends. Two cells of secondary flow could be expected in ice covered river bends.

국 문 요 약

만곡수로에서의 흐름, ice jam의 형성 및 분포특성을 규명하기 위하여 기본이론을 분석하고, 실험 수로로는 연속 만곡수로와 단일 만곡수로를 사용하였다.

연속 만곡수로는 13개의 중심각 90°만곡부가 연결된 수로이며 하폭에 대한 수심의 비가 2이며 단일 만곡수로는 중심각 180°이며 하폭에 대한 수심의 비가 14로 비교적 수심이 얇은 수로이다. 실험에 사용된 얼음재료는 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 구슬(bead)와 조각(block)이다.

연속 만곡수로에서는 저면유속이 표면유속보다 크며 ice jam의 형성으로 이러한 현상은 더욱 크게 나타났다. Jam의 두께는 일반적으로 내측이 외측보다 두꺼웠으며 최대 유속선은 ice jam의 발생으

로 인하여 더욱 내측으로 편이 되었다. 횡방향 jam의 두께는 하폭에 대한 얼음 조각의 길이 비가 증가함에 따라 규칙적으로 분포 되었다. 단일 만곡수로에서의 jam head는 얼음의 운송량이 일정한 경우 외측이 내측 보다 빨리 진행되었으며 그 속도는 비교적 일정하였다. Froude 수가 증가되므로 jam 두께는 횡단면에 걸쳐 불균일하게 되며, 내측과 jam 끝부분이 두껍게 된다. Two-Layer model은 수심이 얇은 만곡부에서 적용가능하며, 2차 흐름의 분포는 상하 2개의 cell이 존재함을 알 수 있었다.

1. 서론

자연 하도는 대부분 만곡성향을 나타내고 있으며 만곡구간에서 2차흐름, 교호파(cross wave), 주방향 속도 분포의 변동 등으로 흐름의 기구는 매우 복잡하며, 제방침식, 최심선의 이동 등으로 인하여 하천 관리상 많은 문제가 발생되고 있다. 더우기 만곡부에서는 얼음의 운송속도가 횡방향에 따라 다르기 때문에 ice jam이 형성되기 쉽다.

Ice jam의 정의는 IAHR에 의하면 “하천에서 얼음조각이 어떠한 지점에 쌓여서 흐름을 제한하는 현상”로 정의된 바 있다. Ice jam은 기온의 상승으로 ice cover가 파괴될 때와 기온의 하강으로 ice cover가 형성되는 도중에 생성되며 ice jam 저면의 조도증가로 인한 여러가지 수리학적 현상의 변화가 야기된다. 일반적으로 ice jam 저면의 Manning 조도계수는 0.10 이상인 것으로 알려져 있다. ice jam으로 인한 수면의 상승, 하천구조물의 파괴 및 하상침식 등의 피해를 나타내고 있다. 따라서 ice jam의 생성위치, 생성시기 및 생성과정에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

Ice jam 특성에 관한 연구는 Pariset과 Hausser(1966), Uzuner(1975), Kennedy(1975), Tatinclaux(1977) 및 Beltaos(1983), Lau(1985) 등이 있으며, 이들에 의하여 ice jam의 두께분포, 조도계수, 유사이동, 유속분포 및 오염물질의 확산 등이 연구된 바 있으나, 이 연구들은 모두 직선수로를 대상으로 하였다.

1980년 이후부터 만곡부에서의 ice jam 특성에 관하여 실험적인 논문이 발표되기 시작하였다. Johnson과 Kotras(1980)는 Mississippi강에서

ice jam 형성과정을 연구하기 위한 수리모형 실험에 만곡부를 설치하여 주운, 홍수 및 제방피해에 관한 연구를 한 바 있다. Beltaos(1981)는 Lower Thames강(Canada)의 만곡부에서 ice jam이 형성되는 구체적인 예를 제시하였다. Garbrecht(1984)는 Elbe강(서독)의 만곡부를 대상으로 모형 실험을 하여, 만곡부에서 ice jam이 형성됨을 증명하고 그 특성을 분석하였다. Chen(1984)도 Lanko(중국)강의 실측 자료를 통하여 하천의 형태학적 인자가 ice jam의 형성에 가장 중요하며, 만곡부에서 홍수가 자주 발생되었음을 증명하였으며, Beltaos(1987)는 만곡부에서의 ice jam 두께를 실측하였다. Gilberto(1988)는 ice jam의 형성, 2차 흐름의 분포 얼음의 내부응력 등을 수리학적 및 실험적으로 분석하였으나 만족스러운 결과는 얻지 못하였다. Yoon(1988)등은 연속 만곡부에서 ice jam의 두께분포를 실험적으로 연구하였다. 그러나 ice jam이 형성된 수심이 깊은 만곡수로에서의 속도분포, 얼음재료의 크기와 얼음 두께 분포와의 관계, Froude 수가 얼음두께 분포에 미치는 영향에 관한 연구가 미흡하므로 본 연구는 이들에 관하여 실험적으로 분석하였다. 만곡부의 ice jam을 수치적으로 분석하기에는 불명확한 계수들이 많으므로 현재까지도 큰 어려움이 있다.

국내에서는 하천 및 저수지에서의 얼음에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이나 양평, 춘천, 충주 등의 년 최저기온이 영하 20°C를 상회하고 있으므로 겨울철의 하천관리상 얼음 문제에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 만곡부 ice jam의 형성과정, 분포 및 흐름특성에 관하여 기초적 이론을 정리 분석하고, 연속 만곡수로와 단일 만곡수로에서의 ice

jam과 흐름의 특성을 분석한다. 연속 만곡부에서는 고정상, 단일 만곡부에서는 이동상에서 실험하였으며, simulated ice는 Polyethylene block 및 Polypropylene beads를 사용하였다. ice jam 두께의 분포, 수심, 유속 및 simulated ice 크기의 영향에 관하여 실측하였다.

2. 만곡수로에서의 ice jam과 흐름의 일반적 특성

하천에서 얼음조각의 운송에 방해가 되는 위치에 ice jam이 형성되기 시작하는데 일반적으로 그 위치는 ice cover의 상류부, 교각주위, 경사가 완만해 지는 부분, 만곡부, 하폭이 좁아지는 구간 등이다.

ice jam 형성 초기에 표면응결(congestion)은 그 지점의 얼음소통 능력보다 얼음의 유입유량이 커질 때 시작된다. 이는 온도가 하강하고 있는 상태에서 자주 일어나는 현상이다. ice toe가 형성되면 상류로부터 계속 운송되는 얼음으로 인하여 상류부쪽으로 ice jam의 길이가 증가하고 두께도 증대되며, 내부전단응력이 증가되면서, 다져지기도하며(narrow channel에서 발생), 저면으로 overturning moment에 의하여 그 깊이를 증가시킨다(wide channel에서 발생), 운송얼음의 유량이 평형상태가 되면 ice jam의 두께가 일정해지는 평형상태 구간이 형성된다.

ice cover가 형성되면 전단응력이 작용하는 운반 P가 증대되며 동일한 수심을 가진 개수로의 경우보다 경심 R은 감소된다. Ashton(1986)에 의하면 ice cover된 하천은 개수로 하천보다 에너지 감소가 62% 증가되며 동일한 수심의 개수로와 비교하여 유량은 약 29% 감소 된다. Manning의 복합조도계수 n는 연속방정식을 이용하여 유도된 식(1)로 구한다. 여기에서 n_b와 n_i을 알면 n_i을 구하므로 평균유속, 평균유량을 계산할 수 있으며 식(2)로 부터 각층의 두께를 구할 수 있다(Peter(1969), (1972)).

$$\frac{n_i}{n_b} = \left[\frac{1 + (n_i/n_b)^{3/2}}{2} \right]^{2/3} \quad (1)$$

$$\frac{D_i}{D_b} = \left[\frac{n_i}{n_b} \right]^{3/2} \quad (2)$$

여기서

n_b: 하상에서의 조도계수

n_i: 얼음에서의 조도계수

D_i: 최대유속이 발생되는 지점으로부터 얼음저면까지 거리

D_b: 최대유속이 발생되는 지점으로부터 하상까지 거리

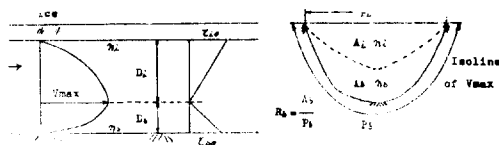


그림1. Ice-cover 하천의 유속분포

그림 1에서와 같이 수심을 얼음의 영향부분과 하상의 영향부분으로 구분하여 흐름을 분석하는 Two-layer 이론은 최대유속이 발생되는 점에서 전단 응력이 zero라는 가정이 있으나 자연하천에서는 최대유속선의 위치가 이 가정과 정확히 일치되지 않고있으나 그 오차는 매우 적은 것으로 발표되었다. (Tatinclaux, 1983)

3. 실험수로

그림 2에서와 같이 연속 만곡수로는 하폭에 대한 수심의 비 (B/D)가 2.0이며 곡률반경에 대한 하폭의 비 (Rc/B)가 3.6이므로 비교적 수심이 깊으며 급한 곡률을 가진 고정상 만곡 수로이다. Froude 수는 0.1이며 철사망을 tail gate 부근에 설치하여 얼음 조각이 새어나지 않도록 했다. 수로단면은 직사각형이며 벽면은 색칠한 나무와 유리로 되어있고 바닥은 색칠한 나무로 되어있다. 얼음을 서서히 투입한 후 4-5일 후가 되면 정상상태(steady)를 얻을 수 있었으며 이때 유속, 수심 및 ice jam의 두께를 측정하였다. 여기서의

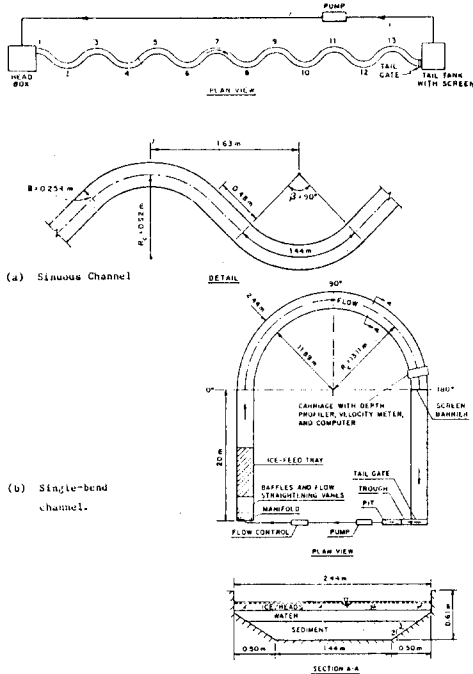


그림2. 실험수로

얼음이란 폴리프로필렌이나 폴리에틸렌을 뜻하며 실험에 사용된 물의 온도는 약 20°C이다. 실험에 사용한 얼음조각은 표1과 같이 비중이 얼음과 비슷한 0.9-0.92이다.

형태	폭(mm)	길이(mm)	두께(mm)	비중	재료
bead	5	5	5	0.9	polypropylene
block	13	13	3	0.92	polyethylene
block	35	35	9	0.92	polyethylene

단일 만곡수로는 평균입경이 0.3mm인 모래를 하상에 사용하였으며, B/D는 14이고 Rc/B는 6 이므로 비교적 완만한 곡률을 가졌으며 수심이 얇은 만곡수로이다.

Froude수는 0.1과 0.2인 상태로 실험하였다. 이 수로에서는 Bead만을 사용하였으며 이 수로에 관한 자세한 설명은 Odgaard의 논문(1983)에 설명된 바 있다. 상기 두 개의 수로를 선택함으로써 B/D와 Rc/B의 영향을 분석할 수 있었다.

4. 결과분석

4-1 연속 만곡수로

일반적으로 만곡수로 구간에는 주방향 유속의 연직분포는 대수분포 형태를 나타내고 있어서 표면부근(0.8D) 유속이 하상부근(0.2D) 유속보다 크다. 그러나 수심이 깊고 하상이 매끄러운 상태의 만곡수로에서는 그림 3에서와 같이 반대현상이 발생된다. 그림 3은 12번째 만곡부의 정점단점에서 연직 유속분포를 얼음이 없는 상태의 0.6D 지점을 기준으로 무차원화 속도로 나타내었다. H는 수위이며 Vc는 얼음이 없는 단면 중심부 H=0.6D인 곳의 유속이다. 이는 강한 벽면 영향과 회전류의 영향으로 알려져 있으며 Ahmads(1986)도 비슷한 결과를 발표한 바 있다. ice jam이 발생되므로써 표면부근 유속은 모두 감소되고 있으나 단면의 중심부와 내측벽면에서의 저면유속은 오히려 증가되고 있다. 여기서 외측은 만곡부의 곡률반경이 큰 쪽을 뜻한다. Ice jam의 형성으로 인하여 수심이 깊은 만곡수로의 경우에서 저면유속이 표면부근 유속보다 큰 현상은 더욱 크게 나타난다. 따라서 식(1)과 (2)를 유도하는데 사용된 Two-layer 유속분포 이론을 수심이 깊은 만곡수로에 적용하는데에는 어려움이 있음을 알 수 있다. 그림 4는 깊이방향 평균유속의 평면적 분포를 나타낸다. 최대유속선의 이동경로가 내측으로 편이되는 현상은 최초로 Shukry(1950)에 의하여 발견된 바 있으며, ice jam의 형성으로 인하여 만곡부 내측벽면부근의 깊이방향 평균유속은 증가하고 외측벽면 부근은

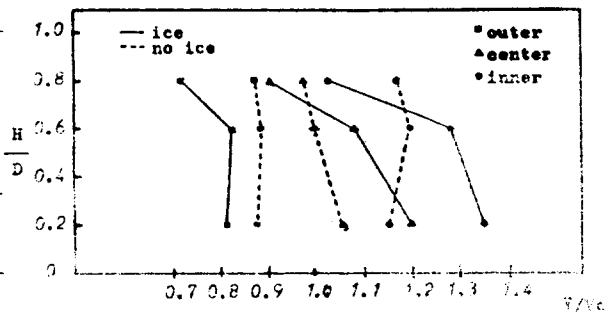


그림3. 연직 주방향 유속분포(BEN12)

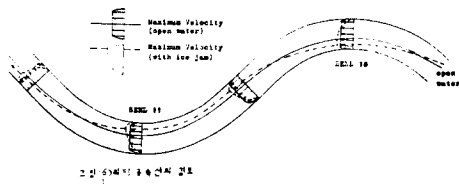


그림4. 최대 유속선의 이동경로

감소되는 현상을 발견하였다. 즉, 최대유속선이 내측벽면 부근으로 편이되는 현상은 동일하나 편이되는 강도는 ice jam의 형성으로 인하여 증가되고 있음을 알 수 있으며, 이는 ice jam의 형성으로 흐름방향 속도의 재분포가 빨리 진행되고 있음을 알 수 있다.

그림 5에는 표 1에서의 얼음조각 크기에 따라서 형성된 ice jam의 형태를 나타내고 있다. 그림들에서 부터 jam의 형태는 매우 불규칙하고 또한 얼음조각의 크기에 따라 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 세 그림을 비교하면 얼음두께의 분포는 하류에 대한 얼음조각 길이의 비 (B/L)가 클수록 비교적 규칙적인 형태를 나타낸다.

Bead(B/L = 50)는 가장 규칙적인 ice jam의 분포를 나타낸다. 즉, 내측에서는 얼음의 두께가 두껍게 형성되며 외측에서는 비교적 얼음의

두께가 얇다. 따라서 B/L이 클수록 얼음조각에 미치는 2차 흐름이 영향이 적음을 알 수 있으며, lodgement와 gorging 현상에 의하여 얼음의 운송이 방해되는 것을 알 수 있었다.

Lodgement는 얼음조각이 얇은 한개의 층으로 ice jam을 형성하는 현상이고 gorging은 모우멘트나 전단력에 의하여 얼음조각이 쓸려내려가거나 침식되면서 ice jam을 형성하는 현상이다. 이들은 벽의 전단응력, 흐름방향 유체의 힘 및 운송되어 쌓인 얼음조각의 흐름방향 중량성분들의 평형으로 이루어진다. lodgement는 B/L이 10-15 이하일때 생성되는 현상으로 알려져 있다. (Gilberto, 1988) 따라서 그림 5에서와 같이 B/L 값이 클수록 내측벽면에서는 얼음의 두께가 두껍고 외측에는 얇다. 만곡수로에서는 직선수로에서와 같이 ice jam의 평형구간을 설정하기가 매우 어렵다.

4-2 단일 만곡수로

bead를 만곡부에 투입하면 그림2(b)에서의 입구 직선부에서는 표면에 균등하게 분포하여 운송되다가 약 15°단면하류에서 부터 외측의 최대유속선을 따라서 하류로 이동하여 철사망에 도달한다. jam head가 형성되면서 jam head는 상류

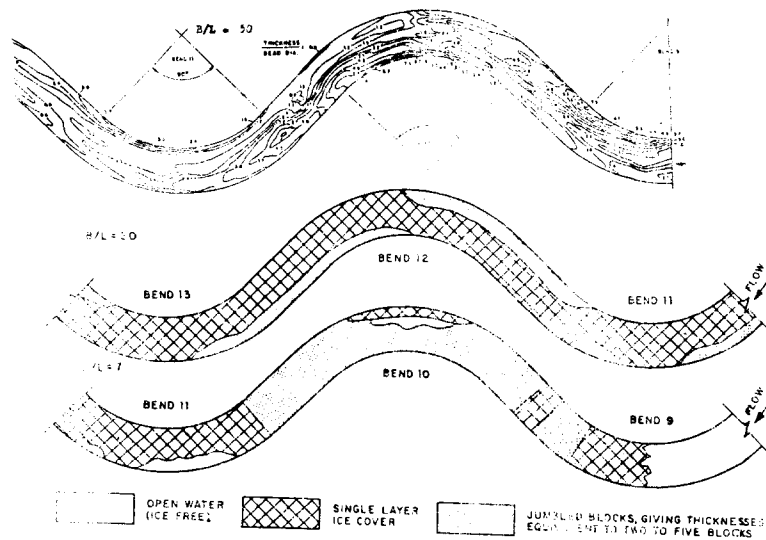


그림5. 연속 만곡수로에서의 Ice-Jam 두께분포

로 전달 된다. jam head의 전달 되는 속도는 그림 6과 같이 외측이 내측보다 빠르게 진행된다.

그림 6에서 α 는 얼음조각이 2차흐름에 의하여 내측으로 이동되는 방향과 내측부근 와류에 의해 외측으로 전달되는 방향과의 사이각으로 α 는 $30^\circ - 35^\circ$ 정도이며, 흐름방향의 압축력, jam을 저면으로 이동시키려는 moment, 2차 흐름에 의

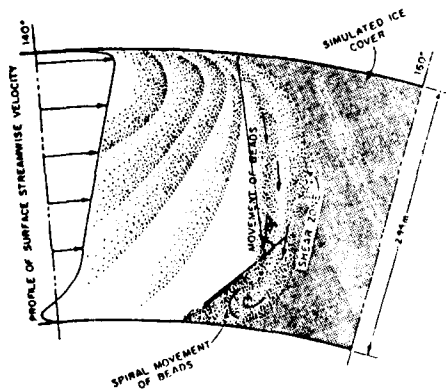


그림 6. Jam Head

한 bead의 이동 및 벽면과의 전단력 등 매우 복잡한 현상을 나타 낸다. 이러한 기구는 운송되는 얼음량과 Froude수에 영향을 받는것으로 알려져 있다. 그림 7는 ice jam이 형성된 만곡부의 $\theta = 150^\circ$ 단면에서 흐름 방향의 연속분포이다. 연속된 만곡수로의 경우 그림 3과 비교하면 Two-layer 모델을 사용할 수 있다고 판단된다. 또한 그림 8에서와 같이 두개의 2차흐름 cell이 존재하

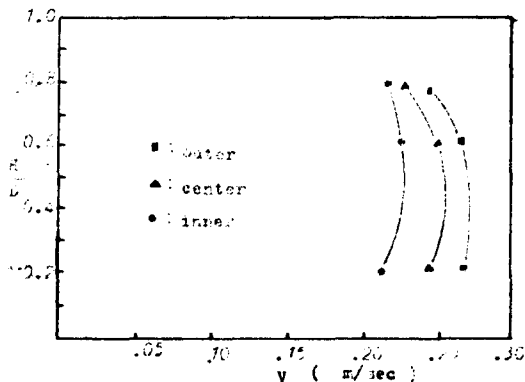


그림 7. 단면 $\theta = 150^\circ$ 에서의 주방향 유속분포

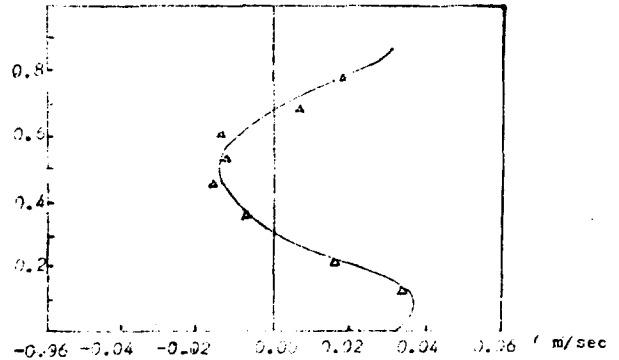


그림 8. $\theta = 150^\circ$ 단면에서의 중심부 횡방향 흐름의 속도 분포

며 이는 duct의 흐름과 매우 유사하다. 그러나 상기 유속 분포도 역시 얼음의 운송량과 Froude수에 영향을 받으므로 인하여 크게 변화되며, 그 특성은 계속 연구되어야 한다고 판단된다.

그림 9, 10은 각각 $F=0.1$ 일때와 $F=0.2$ 일때의 jam 두께의 분포이다. Froude=0.1일때는 횡단면을 통하여 상당히 균등하게 분포하며, $F=0.2$ 일때는 내측이 비교적 두껍게 분포되고 있음을 알 수 있다. 따라서 Froude수의 증가에 따라 만곡부의 내측 두께가 외측보다 두꺼워지는 현상은 증가 된다.

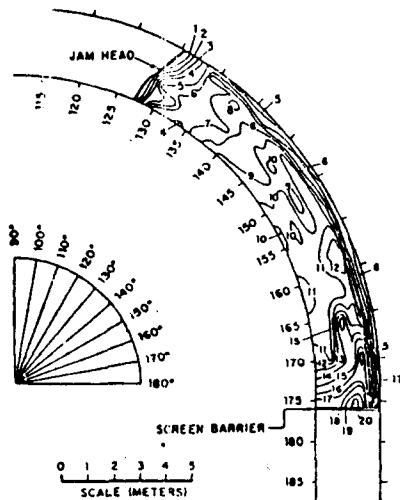


그림 9. Ice Jam의 두께분포($F=0.1$)

〈감사의 글〉

본 논문은 1987년도 후반기 문교부 해외 파견 연구비의 지원으로 The University of Iowa에서 연구한 것으로 문교부 당국에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Ahmeds, A. H and Kenneth V.H.S, "Flow and Bed Deviation Angle in Curved Open Channels," *J. of Hydraulic Research*, vol. 24, no. 2, 1986, pp. 93-108.
2. Ashton, G.D. "River and Lake Ice Engineering", Water Resources Publications, 1986.
3. Beltaos, S., River Ice Jam, : "Theory, Case Studies, and Applications", *J. of Hydraulic Division, ASCE*, vol 109, no.10, 1983, pp.1338-1359.
4. Beltaos, S., "Ice Freeze-up and Break-up in the Lower Thames River", Environmental Water Research Institute, Canada Center for Inland Water, Ottawa, Canada, 1981.
5. Beltaos, S., "Ice Jsms", *IAHS Work Shop on River Ice, Vancouver, August 12, 1987*.
6. Chen Zanting, Sun Zhaochu and Wang Wencai, "Analysis of Causes for Floods during Ice Run on the Lower Reaches of the Yellow River", IAHR Ice symposium, Hamburg, 1984, pp. 379-388.
7. Garbretch, G. and W. Mertens, "Simulations of the Formation of Ice Jam in Alluvial Rivers", IAHR Symposium on scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, Esslinger am Neckar, Germany, 1984.
8. Gilberto Eugenio Urrot Aguirre, "Studies on Ice Jam in River Bends," Ph. D Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Iowa, 1988.
9. Johnson, R.P. and T.V. Kotras, "Physical Hydraulic Model Study of an Ice Cover River", *Proceedings ASCE Hydraulics Division Conference*,

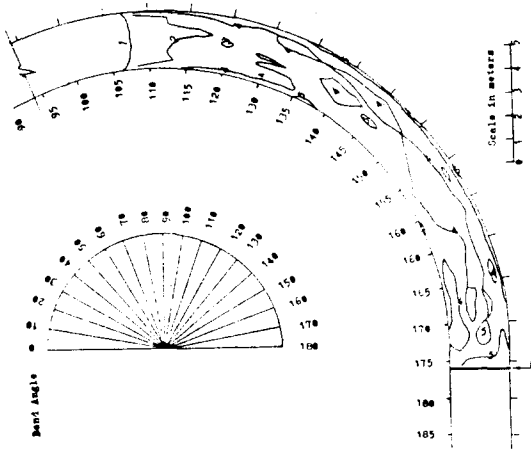


그림10. Ice Jam의 두께분포(F=0.2)

5. 결론

만곡수로에서의 흐름특성과 ice jam의 형성 및 두께 분포의 특성을 규명하기 위하여 기본 이론을 정리 분석하고 실험수로로는 연속 만곡수로와 단일 만곡수로를 사용하였다. 수심이 깊은 만곡수로에서는 표면 유속보다 저면유속이 크게 나타나므로 Two-layer model을 사용하기 부적합하며, ice jam이 발생되면 최대유속선은 내측으로 더욱 편이 된다. ice jam의 두께분포는 하폭에 대한 얼음 조각의 길이의 비와 관계있는 것을 알 수 있었으며 이 비가 증가할 수록 내측은 두껍고 외측은 얇게 ice jam이 분포한다.

단일 만곡부에서의 jam head는 최대유속선의 영향으로 외측의 진행속도가 내측보다 빠르며, Froude수가 작을 경우(Fr=0.1) 횡방향 단면의 ice jam 두께분포는 거의 일정하며, Froude수가 증가함에 따라 내측이 외측보다 두꺼운 분포를 나타낸다. 2차흐름은 그 분포가 매우 복잡하며, 그 분포는 duct 흐름과 유사하여 두개의 cell이 상하에 존재함을 알 수 있었다.

- Chicago, Illinois, 1980.
10. Kennedy, J.F. "Ice-Jam Mechanics", *Proceeding 3th International Symposium on Ice Problems, Hanover, New Hsmphire*, 1975, pp. 143-164.
 11. Lau, Y.L. "Mixing coefficient for Ice-Covered and Free-Surface Flows", *Can. J. Civ. Eng. vol. 12*, 1985, pp.521-526.
 12. Lau, Y.L. and B.G. Krishnappan, "Sediment Transport Under Ice Cover", *J. Hydr. Div. ASCE, vol. 111*, no. 6, 1985, pp. 934-951.
 13. Marco Falcon Ascanio and Kennedy, J.F., "Flow in Alluvial-River Curves" *J. of Fluid Mech., vol. 133*, 1983, pp. 1-16.
 14. Odgaard, A.J, "Flow and Bed Topography in Alluvial Channel Bends" *J. Hydr. Div., ASCE, vol. 109*, No.8, 1983, pp. 1161-1173
 15. Pariset, E., R. Hausser and A. Gagnon, "Formation of Ice Covers and Ice Jams in Rivers", *J. of Hydraulics Div. ASCE, vol. 92*, No. HY6, 1966, pp. 1-24.
 16. Peter Larsen, "Hydraulic Roughness of Ice cover", *J. Hydr. div, ASCE, vol. 99*, no. 1, 1972, pp. 111-119.
 17. Peter Larsen, "Head Losses Caused by an Ice cover on Open Channels", *J. of the Boston Society of Civil Engineers, vol. 56*, no. 1, 1969, pp. 45-67
 18. Shukry, A, "Flow around Bends in an Open Channel Flumes", *Trans., ASCE, Paper No. 2411*, 1950, pp. 751-788.
 19. Tatinclaux J.C. Lee, C.L. Wang, T.P. T. Nakato nd J.F Kennedy, "A Laboratory Investigation of the Mechanics and Hydraulics of River Ice Jams, CRREL Report 77-9, Hanover, New Hampshire, 1977.
 20. Tatinclaux J.C. and M Gogus, "Asymmetric Plane Flow with Application to Ice Jams", *J. Hydr. div., ASCE, vol. 83*, no. 11. 1983, pp. 1540-1554.
 21. Uzuner, M.S., "The composite Roughness of Ice Covered Stream", *J. Hydr. Res. vol. 13*, no. 1, 1975, pp. 79-101.
 22. Yoon, S.E., R. Ettema, and C. Lucie, "Laboratory Investigation of Ice Jam Topography in a Sinuous Channel", *IAHR Ice Symposium, Sapporo, Japan*, 1988.