

# 수로 결빙의 기술·경제적 문제 및 해결 방안

† 오상호 · 김태민\* · 조익순\*\* · 오영민\*\*\*

† \* 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부

\*\* 한국수자원공사 경인아라뱃길 운영처

\*\*\* 한국해양대학교 운항훈련원

**요 약** : 동절기 혹한으로 인해 내륙 수로가 결빙될 경우 수로 운항이 상당 기간 불가능해짐에 따라 경제적 손실이 발생하게 된다. 연안 해운이 주로 발달한 우리나라의 경우 동절기 결빙에 따른 선박 운항 장애에 관한 사례가 많지 않지만, 내륙 수로 운항의 비중이 높고 혹한기가 긴 북유럽과 미국 북부지역에서는 수로 결빙의 메카니즘 및 대처 방안에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 본 논문에서는 지금까지 밝혀진 주요한 수로 결빙 메카니즘 및 해결 방안에 대하여 소개하였다.

**핵심용어** : 수로 결빙, 내륙 운송, 운항 장애, 혹한기

## 1. 서 론

하천 및 수로에서의 결빙에 대한 연구는 20세기 초반부터 본격적으로 수행되기 시작하여, 최근까지 얼음 형성 및 소멸에 관한 연구가 많이 이루어져왔다(윤, 2009). 지금까지의 연구 결과에 의하면 호수, 운하 및 유속이 느린 수로에서 형성되는 표면빙판(surface sheet ice), 표면빙판이 바람 및 운항에 의해 깨질 때 형성되는 유빙 조각(brash ice), 수체의 난류혼합(turbulent mixing)에 의해 발생하는 frazil 결빙, 유빙이 쌓이거나 정지한 빙원을 만나 형성되는 유빙괴(pack ice) 등이 있다.

내륙 수로를 이용한 운송은 육로 수송과 비교했을 때 가격이 싸지만 동절기 수로가 얼어버릴 가능성이 있다는 점이 가장 큰 장애 요인 중 하나이다. 수로가 결빙됨에 따라 몇 일 또는 몇 주, 심각한 경우에는 몇 개월 간 운항을 할 수 없게 될 수도 있다. 다른 수송 방식은 연중 운항이 가능하므로 동절기에 내륙 수로가 이렇게 결빙됨에 따른 수송 지연은 큰 경제적 손실을 유발하게 되며, 선박과 수로가 파손될 경우 경제적 손실은 한층 더 커지게 된다. 이러한 점에서 동절기 내륙수로 운항 기술을 개발하고 결빙 상태를 보다 정확하게 예측하는 일은 매우 중요하다 할 수 있다.

PIANC의 InCom에서는 내륙 수로의 운항과 관련된 다양한 주제에 대하여 실무위원회를 구성하여 주요한 사항들을 토의 및 정리한 결과를 연구보고서 형태로 출간하고 있으며, 내륙 수로의 동결 문제에 관해서도 비교적 최근에 보고서가 출간된 바 있다(PIANC, 2004). 본 논문에서는 내륙해운이 발달한 유럽 및

북아메리카 사례를 중심으로 내륙수로의 동결 문제 및 그 주요한 해결책에 관하여 소개하였다.

## 2. 내륙수로의 동결 문제

북유럽의 동절기 운항 기간은 12월에서부터 4월까지이다. 핀란드 사이마 운하에서 얼음 두께가 가장 두꺼운 시기는 3월로 남쪽은 50~60cm이고, 북쪽은 80cm까지 이른다. 특히, 사이마 운하에서는 동절기 중 지속적인 선박운항으로 인해 더 많은 얼음이 생긴다. 선박의 통행이 없으면 얼음의 두께는 약 70cm 정도이지만 동절기 운항 기간이 끝나갈 무렵에는 유빙 조각 층의 평균 두께가 약 1.0m 더 두꺼워져서 얼음의 두께가 2.0~2.5m에 이르기도 한다.

동절기 운항에 따른 쇄빙 및 재결빙으로 인해 두꺼워진 유빙 조각은 선박의 운항 저항을 높이고 프로펠러로 물이 유입되는 것을 방해하며, 이러한 이유로 선박이 운하에 끼는 경우도 많다. 또한, 선박의 대기 영역 또는 정박지에 유빙 조각이 쌓일 경우 선박의 갑문 출입이 어려워진다. 선박의 측면과 갑문 벽 사이에서 짓눌린 유빙조각은 갑문 벽과 유도(funnel) 벽에 얼음 기둥(ice collar)을 만들어 갑문의 운항 가능 폭을 제한하게 된다. 완전히 열린 상태의 마이터 게이트(mitre gate)에 유빙 조각이 깔 경우 작동이 어려워지며, 갑문 구조물과 시설에 얼음이 어는 것도 문제를 발생시킨다.

서유럽 내륙수로의 경우 매년 얼음이 어는 것은 아니다. 독일과 네덜란드, 벨기에와 북프랑스에서 동절기에 운하가 결빙될

† 교신저자, 선임연구원, ohsangho@kordi.re.kr 031)400-7802

\* 책임위원, tmkim@kwater.or.kr 032)550-0233

\*\* 조교수, ischo@hhu.ac.kr 051)410-5072

\*\*\* 책임연구원, ymoh@kordi.re.kr 031)400-6312

확률은 10~30%이다. 강 하구에서는 염분이 얼음 형성을 어렵게 하며, 발전소 근처에서는 온배수가 운하 결빙을 막아준다. 그렇지만 그 이외 지역에 위치한 운하 구역에서는 빠르게 얼음이 어는 조건이 갖추어진다. 다만, 하천과 같은 자연 수로에서는 물이 흐르면서 얼음 형성을 지연시키는 효과가 있다. 12월 말에 들어서면서 얼음이 얼기 시작하여 2월~3월까지 얼음이 계속 언다. 얼음의 최고 두께는 독일이 30~50 cm이고 다른 서유럽 지역은 20~30 cm이다. 서유럽 지역에서는 이러한 혹한기가 찾아올 경우 운하를 폐쇄한다. 1995~96년 겨울에 미테란트 운하와 엘베 사이드 운하를 51일간 폐쇄하였으며, 1996~97년 겨울에는 35일간 폐쇄하였다. 네덜란드에는 대략 3~5년 주기로 운하에 문제가 생길 정도로 얼음이 어는 혹한이 찾아오며, 벨기에에서는 1962~63년, 1984~85년, 1985~86년, 1986~87년, 1996~97년 겨울에 내륙수로 동결 문제가 보고되었다.

북아메리카의 경우 5대호 주변에서는 12월 초에서 4월 말까지 수로 결빙 문제가 발생하며, 미시시피 강 주변 수로의 경우에는 미시시피 강 상류 및 미주리 강과 오하이오 강, 일리노이 수로에서 12월 중순부터 3월까지 얼음으로 인해 운하가 어려워진 문제가 발생한다.

### 3. 쇄빙 기술 및 그 밖의 방안

수로 내 결빙을 제거하기 위하여 가장 흔하게 사용하는 장비는 쇄빙선이다. 원래 쇄빙선은 쇄빙 목적으로만 건조되었으며, 따라서 쇄빙선의 선체 형태는 큰 물결이 이는 개방구역에는 대체로 적합하지 않다. 쇄빙용 선박의 선체와 뱃머리는 매우 둥글어 선박이 좌우로 쉽게 흔들리므로 항해 적합성을 제한한다. 또 다른 방법은 일반 예인선에 쇄빙용 특수 뱃머리를 달아서 쇄빙 작업에 활용하는 방법이 있으며, 매우 효과적이다. 한편, 핀란드에서는 1980년대에 다목적 쇄빙선을 건조하여 동절기에는 쇄빙에 활용하고, 하절기에는 북해 유전 근해에서 사용할 수 있도록 항해 적합성을 개선한 선박이 제작된 바 있다.

한편, 동절기에 갑문 시설이 얼지 않도록 가열 시스템을 설치하는 것이 필요하다. 핀란드의 경험에 의한 가장 좋은 방법은 저전압(40~50 V)의 고강도 전류를 구조물에 직접 흘려보내는 것이다. 이에 따라 갑문에서 발생하는 열량은 약 0.4~0.5 kW/m<sup>2</sup>로 이 정도면 구조물이 동결되지 않도록 하기에 충분하다. 수로 결빙을 막기 위해 공기 방울 시스템도 이용된 적이 있으나, 대체로 효과가 제한적인 것으로 알려져 있다. 그 외에도 갑문 벽에 결빙 방지막을 코팅하는 방법이나 굴착기 등을 사용하는 기계적 방법 등도 시험적으로 적용된 바 있으나 효율이 낮거나 갑문 시설의 파손 위험성이 있어 범용적으로 적용하기는 어려운 것으로 나타났다.

### 4. 동절기 운항에 따른 경제적 검토

동절기 수로 관리를 위해 추가적으로 투입되는 비용은 다음과 같다.

- 쇄빙 작업 비용
- 추가 갑문 설비 비용
- 추가 인력 비용
- 구조물 파손 시 수리 비용

한편, 부분적으로 결빙된 수로를 운항할 경우 수로 이용자가 다음과 같은 추가 비용을 부담하게 된다.

- 연료비 상승 (연료 소비량 100%-200% 상승)
- 이동 시간 연장 비용 (이동 시간이 40%-100% 증가)
- 예인선 크기 축소로 생기는 비용 (25% 감소)
- 보험료 증가분
- 선박 파손 발생 시 수리 비용

위 사항을 고려하여 동절기 운항의 경제성을 검토해 보면, 서유럽과 중앙유럽 내륙수로는 수송량이 상당히 많고 핀란드보다 기후도 온난하여 연중 운항이 경제적으로 이익이 되는 것으로 알려져 있다. 한편, 미국의 세인트 로렌스 해로와 미시시피 북쪽의 기후는 핀란드 쪽과 좀 더 유사하여 서유럽과 중앙유럽에 비해 연중 운항 가능성이 더 낮다. 현실적으로는 폐열이나 다른 값싼 열 에너지를 운하와 갑문으로 전달하여 얼음 문제를 쉽게 해결할 수 있는지가 동절기 운항을 결정하는 가장 중요한 요소인 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 동절기 내륙 수로 운항 경험이 많은 유럽과 북아메리카 지역을 중심으로 수로 결빙의 원인, 쇄빙 기술 및 경제적 타당성에 대하여 간략하게 소개하였다. 연안해운이 발달한 우리나라의 경우 동절기 수로 결빙에 따른 문제점 및 해결책이 큰 관심 사항은 아닐 수 있으나, 향후 내륙 운송의 계획을 수립할 경우 등 참고사항으로 활용할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 윤세의 (2009), 하천에서의 결빙문제와 관리, 한국수문학회지, 22권 1호, pp. 21-25.
- [2] PIANC (2004), Technical and Economic Problems of Channel Icing.