

빙해수조 결빙 해석

남광현((주)큐버솔루션), 이승수(충북대학교), 박찬욱(대불대학교), 김학선(충북대학교), 이춘주(한국해양연구원)

1. 서론

화석연료를 통한 산업화가 진행되면서 온실가스가 점점 증가하고 있으나 이를 정화해줄 수 있는 산림지역은 점점 줄어들고 있다. 온실가스에 의해 지구의 온도가 상승하면서 양 극지방의 얼음층이 서서히 녹고 있어 극지의 개발에 대한 경쟁이 심화되고 있다. 극지방에 대한 연구는 각각의 국가에 대한 이익뿐만이 아니라 인류의 미래를 위해서 더욱 중요하다. 북극의 대륙붕에는 석유나 천연가스 같은 엄청난 에너지 자원이 매장되어 있으며, 주변지역에 주요 수산어장이 분포하고 있어 자원의 보고로 여겨지고 있다. 선진 여러 나라에서는 10여년전부터 북극의 중요성을 인식하여 연구개발에 활발히 참여하고 있으나 우리나라의 경우 2002년부터 다산과학기지를 건설하여 북극에 대하여 연구를 하고 있다. 또한 5~10년 내로 북극항로가 열릴 것으로 전문가들이 예측하고 있다. 남극의 경우 북극보다 14년 일찍 세종과학기지를 건설하여 지하자원 및 수산자원에 관한 연구를 진행하고 있다. 남극연구에 가장 활발한 국가는 3개의 기지를 갖춘 미국으로 본토에서 쇄빙선을 끌고 남극 탐사에 수시로 나선다. 미국에는 쇄빙선을 보유한 대학이 3~4개 있다. 쇄빙선은 결빙된 항로를 개척하여 화물선 선단이 화물 수송을 가능하게 하거나 운항하던 선박이 얼음에 갇힐 경우 이를 구조하는 역할을 수행하는 등 아주 중요

한 역할을 담당한다. 그러나 우리나라의 경우 쇄빙선을 보유하고 있지 않기 때문에 최근에는 쇄빙선 및 쇄빙실험을 할 수 있는 빙해수조가 제작되고 있다. 쇄빙실험 시 생성된 얼음의 두께는 실험에서 중요한 변수로 작용하며 물의 결빙과 같은 상변화 현상은 냉각 시스템에 있어서도 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 빙해수조를 통한 결빙 실험에 앞서 선행 연구된 논문의 실험 결과를 CFD(전산유체역학)를 이용하여 검증하고 전산해석을 통해 시간에 따라 결빙되는 얼음의 두께를 해석하고자 한다.

2. CFD를 이용한 결빙 해석의 검증

CFD(전산유체역학)를 이용하여 얼음의 결빙 모사 과정을 검증하기 위하여 먼저 Habeebullah (2007)의 실험을 전산해석 결과와 비교하였다.

2.1 실험장치

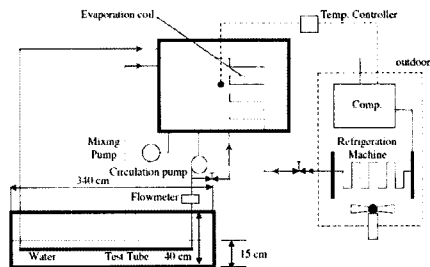


Fig. 1 실험 장치 개요

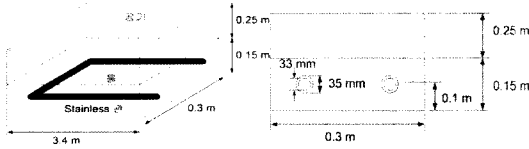


Fig. 2 수조 단면도

Fig. 1 ~ Fig. 2는 Habebullah(2007)에 의해 사용된 실험장치와 제원을 나타낸다.

실험에서는 $3.4 \times 0.3 \times 0.4$ (m)크기의 밀폐된 stainless 수조에 15cm 높이로 10°C 물이 채워져 있고, 수면 5cm 아래로 두께 $t = 1\text{mm}$, 외경 $D = 35\text{mm}$ 의 원형 stainless 관이 'ㄷ'형태로 위치하며, 관 내부로 $-3 \sim -5^{\circ}\text{C}$ 의 ethylene glycol이 $45(0.00075\text{m}^3/\text{s})$ 로 흐르며 수조 내부를 냉각시키고 있다. 수조는 밀폐되어 있으며 수조 외부는 7cm 두께의 스티로폼으로 둘러싸여 있다. 원형관 내로 유입되는 ethylene glycol의 온도는 Fig. 3과 같다. 초기 10분까지 10°C 에서 -3.5°C 로 낮아지며 1시간까지 -3.5°C 로 유지되고 4시간 후 -4.5°C 가 될 때까지 서서히 낮아진다. 시간에 따라 생성되는 얼음의 두께는 수조로 유입되는 원형관 입구로부터 10 cm, 50 cm, 120 cm, 220 cm, 295 cm, 365 cm, 440 cm, 540 cm길이 위치에서 생성된 얼음의 직경을 측정하여 원형관의 직경을 뺀 후 반으로 나누어 나타내었다.

2.2 실험 결과

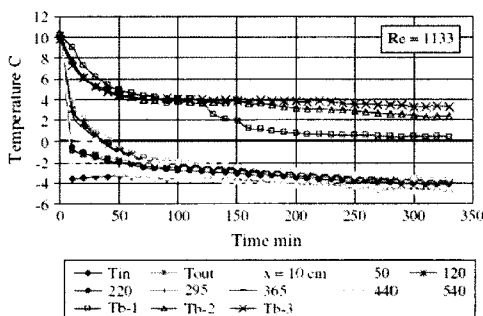


Fig. 3 유입 온도

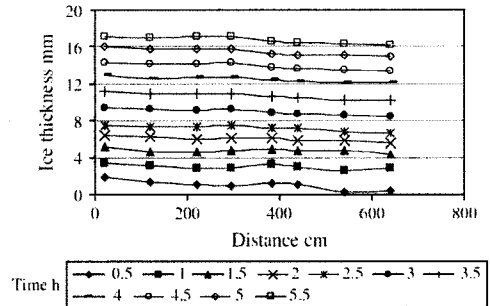


Fig. 4 실험 결과

측정된 얼음의 두께는 Fig. 4와 같다.

원형관 주위로 한시간에 약 3.5mm 정도 두께로 얼음이 생성되며, 원형관의 입구부에서 출구부까지 유사한 두께의 얼음이 생성된다.

2.3 전산 모델링

원형관을 통과하는 ethylene glycol에 의해 물이 결빙되는 과정을 모사하기 위하여 상용코드를 이용하여 시간에 따라 생성된 얼음의 두께를 측정하였다. 실험 치구와 data를 바탕으로 다음 Fig. 5와 같이 전산 모델링을 수행하였다.

원형관내 유입되는 ethylene glycol의 속도는 $0.887\text{m/s}(45)$ 이고, 온도는 -3.5°C 로 하였다. 또한 물과 ethylene glycol의 밀도와 열전달계수, 비열, 잠열을 사용하였다. 결빙된 얼음의 두께는 단면의 4방향에서 측정하여 평균값을 사용하였다.

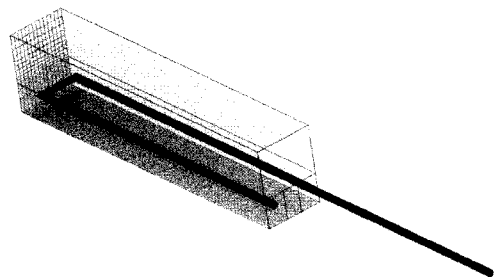


Fig. 5 전산 모델링 및 격자생성

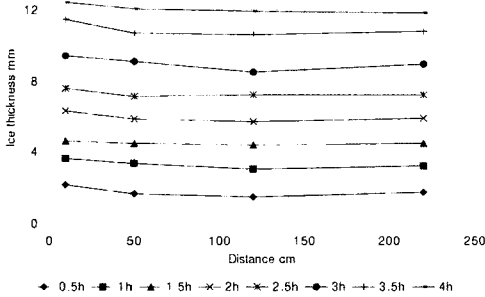


Fig. 6 전산해석 결과

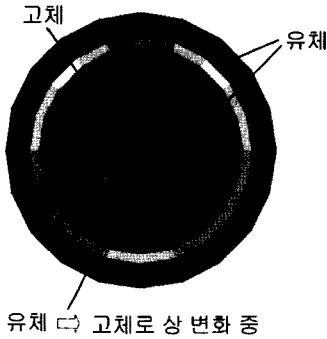


Fig. 7 물의 상변화 상태

2.4 전산해석 결과

Fig. 6은 전산해석 결과를 나타낸다. 30분이 경과하였을 때 1.6mm정도 두께의 얼음이 원형관 주위에 발생하였으며, 1시간이 경과하였을 때에는 약 3.3mm정도의 얼음이 발생하였다. 1.5시간 후에는 약 4.5mm, 2시간 후에는 약 5.8mm, 2.5시간 후에는 약 7.2mm, 3시간 후에는 약 9mm, 3.5시간 후에는 약 10.6mm, 4시간 후에는 약 12mm정도 두께의 얼음이 발생하였다.

Fig. 7은 색깔에 따른 물의 상태로 파란색은 고체(얼음), 빨간색은 유체(물)를 나타내며 파란색과 빨간색을 제외한 다른 색은 액체에서 고체로 상이 변화하는 부분을 나타낸다.

Fig. 8은 50cm 지점에서 시간에 따라 생성되는 얼음의 형태를 보여준다.

3.2 결과 비교

Fig. 9에 실험값과 전산해석 결과를 비교하였다. 0.5시간이 경과하였을 때 10cm 지점에서는 실험값과 해석값이 거의 유사한 형태를 보였으나 다른 지점에서는 해석값이 0.5mm정도 높은 값을 보였다. 1시간이 경과하였을 경우에도 해석값이 0.3mm정도 높은 값을 유지하였으나 1.5시간 경과 후부터 실

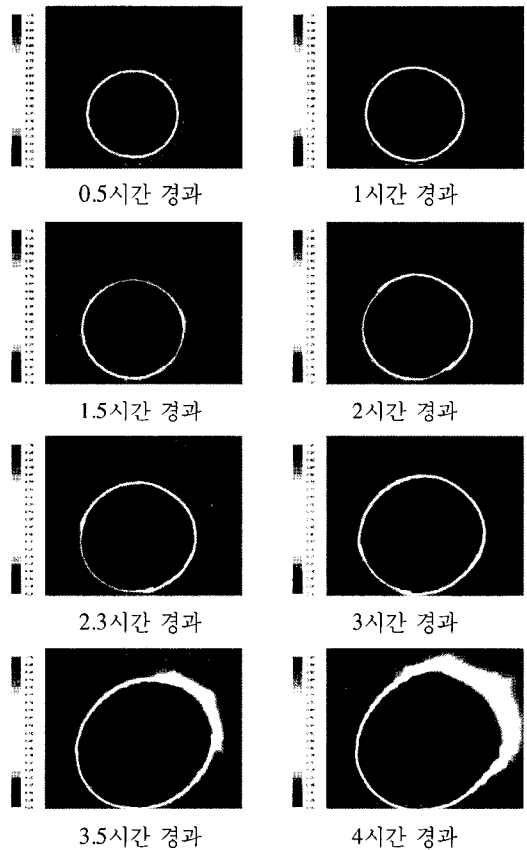


Fig. 8 50cm 지점에서의 상변화 형태

험값이 0.3~0.8mm정도 높은 값을 유지하였다. 이것은 ethylene glycol의 온도조건과 전산해석 시 얼음의 두께 측정 위치에 따른 오차라고 판단된다. 실험논문의 경우 초기 10분까지 10°C에서 -3.5°C로 낮아지며 1시간까지 -3.5°C로 유지되고 4시간 후 -4.5

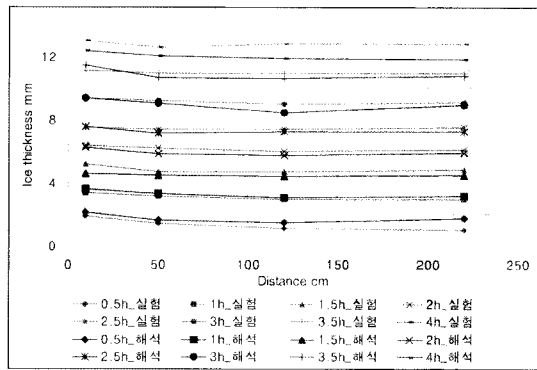


Fig. 9 결과 비교

°C가 될 때까지 서서히 낮아지지만, 전산해석의 경우 -3.5°C로 일정하기 때문이다.

4. 빙해수조 결빙 해석

실제 빙해수조를 모델링하여 냉각시간에 따라 표면이 결빙되는 현상의 전산해석을 수행하였다. 빙해수조의 전산 모델링은 Fig. 10과 같다. 전산해석은 2가지로 Case A는 빙해 수조 건물 내 공기와 물의 온도를 0°C 설정하고 냉각기에서 유출되는 온도를 -30°C로 설정하여 해석을 하였으며 Case B는 물의 온도만 0°C로 설정하고 공기의 온도와 냉각기에서 유출되는 온도를 -30°C로 설정하였다.

Fig. 11은 시간에 따른 수조 표면의 결빙상태를 나타내고 있으며 Fig. 7을 이용하여 상구분을 확인할 수 있다. 해석시간 30분이 경과한 후에도 두 경우 모두 결빙은 발생하지 않았다. Case A의 경우 수조 내부 온도가 0°C에서 낮아지고 있기 때문에

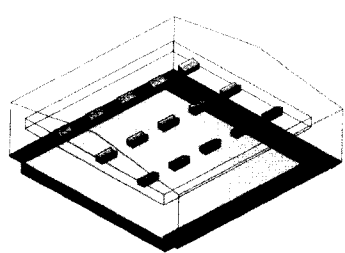


Fig. 10 빙해 수조 전산 모델링

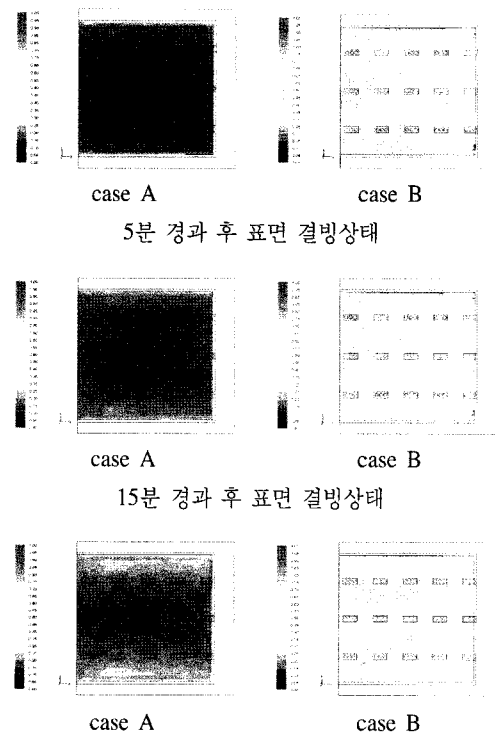


Fig. 11 수조 내부 결빙상태

Case B에 비하여 결빙 현상이 늦게 나타나고 있으며, 냉각기의 형상과 배치 형태로 인하여 수조 중앙 부분에서의 결빙현상이 양쪽 벽면 부분에 비하여 늦게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 빙해수조의 결빙해석은 현재 계속 진행 중에 있다.

5. 결론

본 연구에서는 냉각 시스템에 의한 빙해수조의 결빙실험에 앞서 선행 연구된 논문의 실험결과를 CFD(전산유체역학)을 이용하여 시간에 따라 결빙되는 얼음의 두께를 해석하였다. 전산해석을 통하여 물이 얼음으로 상태 변화하는 것과 실험과 유사한 두께의 얼음이 발생하는 것을 확인할 수 있었으므로 빙해수조의 전산 모델링을 통한 해석을 수행하였다. 현재 전산해석은 진행 중에 있으며 실험은




문의 검증을 통해 시간에 따른 결빙상태를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 2001, "Introduction to Heat Transfer".
2. Badr A. Habeebullah, 2007, "An experimental study on ice formation around horizontal long tubes", International Journal of Refrigeration, Vol.30, pp.789-797.
3. <http://www.kopri.re.kr> 

남 광 현 | (주)큐버솔루션



- 충북대학교 구조시스템공학과 공학석사
- 연락처 : 043-274-3348
- E-mail : khnam@cuber.co.kr

이 승 수 | 충북대학교



- 미국 Colorado State University 토목공학 공학박사
- 연락처 : 043-261-3344
- E-mail : joshua@cbnu.ac.kr

박 찬 욱 | 대불대학교



- 미국 Texa A&M University 기계공학 공학박사
- 연락처 : 016-429-2433
- E-mail : cwpark@daeul.ac.kr

김 학 선 | 충북대학교



- 충북대학교 구조시스템공학과 박사과정
- 연락처 : 043-276-3341
- E-mail : haksun@cbnu.ac.kr

이 춘 주 | 한국해양연구원



- 충남대학교 공학박사
- 연락처 : 042-868-7248
- E-mail : reslcj@moeri.re.kr