

배관 내 밸브 주위의 아이스슬러리의 유동현상 및 압력강하특성에 관한 연구

오 철† · 문성배* · 손용길**

(원고접수일 : 2006년 3월 23일, 심사완료일 : 2006년 5월 8일)

An experimental study on ice slurry fluid and pressure drop characteristics in along a horizontal circular tube around the valve

C. Oh† · S. B. Mun* · Y. G. Son**

Abstract : This study experimented to understand the effect of transporting ice slurry through in pipe with valve. And at this experiment it used ethylene glycol-water solution and a concentration is 30wt%. The experimental apparatus was constructed of ice slurry generation tank, turbo flow meter, manometers for differential pressure measuring, PIV system for flow pattern measuring, illumination and along a horizontal circular tube with valve as test section. The experiments were carried out under various conditions, with velocity of fluid at the entry ranging from 0.5 to 1.5 m/s and concentration of IPF is 30%. Also valve open rate is 50%, 75%, 100%.

Key words : IPF(얼음의 충전율), Ice slurry(유동빙), Mass flow-meter(질량유량계), Pressure drop(압력강하), Valve open rate(밸브 개도율)

기호설명

Subscript

IPF : 얼음의 충전율	[%]	L : 수용액
ΔP : 압력강하	[kPa]	m : 평균
U : 유속	[m/s]	s : 아이스슬러리
VOR : Valve Open Rate	[%]	i : 얼음

Greeks symbol

1. 서론

ρ : 밀도 [kg/m³] 최근 지구온난화, 계절별 전력수요의 격차 심화

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : ohcheol@mail.hhu.ac.kr , Tel : 051) 410-4268

* 한국해양대학교 항해시스템공학부

** (주)일진마리타스

등 지구환경에 대한 문제와 주야간의 전력 수요 격차가 커지는 전력수급 불안정 문제 등이 대두되면서 효과적인 환경보전과 효율적인 에너지 이용을 위한 기술개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 빙축열 시스템도 이러한 시대적인 조류의 요구에 의하여 주목 받고 있으며, 근래 우리나라에서도 중·대형 건물에 가스식·축냉식 설비 설치가 의무화되고 있기도 하다.^{[1]-[3]} 이러한 시스템을 효율적으로 사용하기 위해서 가장 큰 과제는 배관을 통한 아이스슬러리의 원활한 수송이라 할 수 있다. 그러나 아이스슬러리의 수송 중 관내에서의 압력손실, 외부에서의 각종 열적 물리적 충격 등으로 인해 수송도중에 얼음입자끼리 결합하거나 성장하여 수송이 불가능한 상태를 야기하기도 한다.

이와 같은 종래의 연구로서 川南^[4] 등은 수평 직사각형 덕트를 이용하여 상하부면의 열전달 특성에 관하여 연구를 하여 아이스슬러리의 부력에 의하여 상부 면이 하부 면보다 열전달 특성이 크다는 것을 발표하였으며, 이^[5] 등은 소구경의 직관에서, 박^[6] 등은 분기관내에서의 압력손실과 IPF의 변화에 관한 실험적 연구를 진행하여 왔다. 그러나 배관 상에 존재하는 밸브 및 유량제어기기 주변에서 발생하는 장애 요인에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이러한 아이스슬러리 시스템의 유동특성 및 압력강하 특성을 파악하여 관내밀폐현상을 감소시켜 효율적인 운전을 위한 여러 가지 연구가 필요하며 그 유동상태 파악 또한 중요한 과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 배관 내 밸브 주위의 아이스슬러리의 유동현상 및 압력강하 특성에 대한 실험을 통하여 아이스슬러리 시스템에서 효율적인 아이스슬러리의 이송을 위한 기초 자료의 확보에 연구의 목적이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 계통도 및 전경사진이다. 실험장치부는 크게 일정한 농도의 아이스슬러리를

순환시키기 위한 순환부, 아이스슬러리를 제조하기 위한 브라인 순환부, 시험부, 압력강하 특성을 측정하기 위한 측정부, 유동특성을 가시화하기 위한 가시화부로 구성되어 있다.

먼저 시험부는 밸브를 기준으로 좌우 길이 500mm, 내경 40mm, 두께 5mm의 원통형 용기로 내부 유동특성을 가시화하기에 적합한 투명 아크릴로 제작하였고, 밸브는 5K-40 게이트 밸브를 설치하였다. 아이스슬러리는 수평으로 설치된 원관 내부에 일정한 유량이 유지 되도록 전자유량계를 이용하여 조절하였다. 또한 아이스슬러리와 작동유체 경계를 명확히 하기 위하여 작동유체에 청록색과 적색의 색소를 혼합하여 사용하였다.

브라인 순환부는 냉동기를 가동하여 브라인의 온도(-25℃)를 일정하게 유지한 뒤, 작동유체 수조의 $\phi 13\text{mm}$ 동관(길이 13m)에 -25℃의 브라인이 흐르도록 하여 작동유체인 에틸렌글리콜 수용액을 냉각하였다. 냉각된 동관의 외부에 얼음이 부착되지 않도록 테프론 테이프로 처리하였으며, 남아 있는 얼음은 부드러운 솔을 이용하여 제거하였다. 제조된 아이스슬러리는 수조의 중간에 설치되어 있는 분리판 상부를 통하여 순환부로 흐르도록 하였으며, 아이스슬러리가 순환펌프에 원활히 흡입될 수 있도록 하였다. 순환되는 아이스슬러리의 IPF가 $\pm 0.5\%$ 이내가 되도록 일정하게 유지하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 배관 내에서 밸브 개폐 정도에 따른 밸브 주위의 아이스슬러리의 유동 특성 및 압력강하 특성을 검토하기 위하여 PIV 시스템에 의한 유체 유동 특성을 검토하였다. 실험조건으로 유체의 유속을 0.5m/s, 1.0m/s 및 1.5m/s로, IPF의 농도 변화를 20%와 30%, 밸브의 개도 정도를 50%, 75%, 100%로 하여 유체의 유동특성 및 압력강하특성을 비교 검토하였다. 작동유체의 유량은 압력강하와 관계없이 일정하게 유지하였으며, IPF의 농도는 $\pm 0.5\%$ 의 범위 내로 일정하게 유지 하였다. 실험조건은 표 1과 같으며, Fig. 2는 실험에 사용된 밸브의 형상 및 밸브 개도를 나타낸 사진이다.

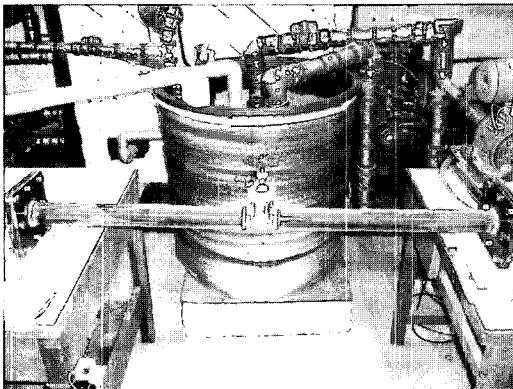
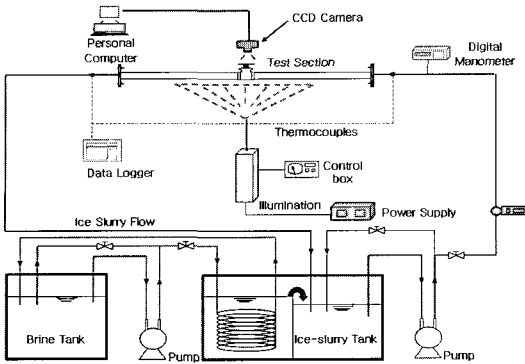


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus and photograph of test section

Table 1 An experimental condition

Condition	Range
U_{∞} (m/s)	0.5, 1.0, 1.5
IPF (%)	30
Valve open (%)	50, 75, 100

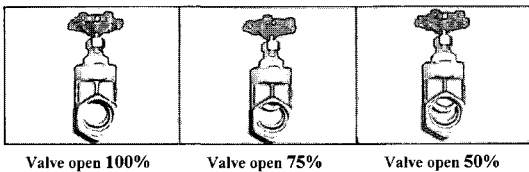


Fig. 2 Valve appearance

실험에 사용한 작동유체는 EG 수용액(20wt%)을 사용하였으며, EG 수용액 농도 측정은 브라인 농도계(BR-1E)를 이용하여 농도를 측정하였다.

실험은 먼저 일정양의 아이스슬러리를 제조하여 순환 펌프로 순환시키는 시점을 실험 개시 시간으로 하였으며, PIV 측정 장비를 이용하여 정해진 밸브 개도 및 유속에 대해 먼저 밸브 전방을 그리고 동일한 조건에서 밸브 후방을 5분 간격으로 총 20분간 촬영 하고 각각의 정해진 조건에 대해 정밀 차압계로 압력을 측정하였다. 여기서 유동은 15분의 시간경과 후 정상상태에 도달하였기 때문에 실험시간을 20분으로 하였다.

순환 펌프에 의해 실험 회로에 유입된 아이스슬러리는 질량 유량계로 유입되고, 유입된 아이스슬러리의 유량과 밀도는 질량 유량계를 이용하여 실시간으로 측정하였으며, 측정된 밀도 ρ_s 를 이용하여 다음 식(1)에 의하여 IPF를 산정하였다.^[6]

$$IPF = \frac{\rho_L - \rho_s}{\rho_L - \rho_i} \quad (1)$$

여기서 ρ_L 은 20% EG 수용액의 빙점(-10°C)에서의 밀도(1,025 kg/m³), ρ_i 는 얼음의 밀도(917kg/m³)이다.

유로 내의 압력강하의 측정은 실험 회로의 끝단에 정밀 차압계를 설치하여, 동일한 조건하에서 아이스슬러리가 없는 흐름에 대해 압력을 측정한 후 아이스슬러리 유동 시와 비교하는 방법으로 측정 비교하였다. 또한 균일한 크기의 아이스슬러리를 순환시키고 시험부 입구영향을 최소화하기 위하여 다공 판을 입구부에 설치하였다. 순환 펌프를 작동시켜 아이스슬러리가 실험 회로에 유입되는 순간부터 밀도 및 유속을 확인, PIV 측정 장비를 이용하여 유체의 유동특성을 계측하였으며, PIV 시스템에 의해 측정된 결과는 CATUS 3.2로 해석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시간경과에 따른 영향

Fig. 3은 밸브개도 50%일 때 평균유속 0.5m/s에서 5분 간격으로 촬영한 사진을 나타낸다. 초기에 서서히 입구 측 배관상단부에서 부유유동이 생기는 것과, 시간이 경과함에 따라 부유유동이 확산

히 나타남을 알 수 있다. 밸브에 의해 유로가 차단된 배관 상단부에 얼음 입자가 모여 구름과 같은 하나의 괴(cluster)를 형성하면서 넓은 영역에 걸쳐 부유되어 있는 상태임을 알 수 있다. 이것은 하나의 정체영역으로 작용하고 있으며 이로 인해 이 부분에서는 유속 또한 작아지는 것을 알 수 있었으며, 상대적으로 배관 하단부에서는 수용액만이 흐르는 것을 알 수 있다. 출구 측에서는 시간이 지남에 따라 공기층이 길게 형성되며 공기층의 모양도와 와류가 발생함에 따라 점차적으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 밸브개도 75%일 때 평균유속 0.5m/s에서의 5분 간격으로 촬영한 사진을 나타낸다. 밸브개도가 50%일 때와 비교해서 배관 상단부에 괴(cluster)의 형성 범위와 양이 많이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 배관 내 장애물 작용을 하는 밸브의 개도가 증가하면서 상대적으로 넓은 면적을 통과하기 때문에 관 벽에 작용하는 마찰력이 상대적으로 감소하는 원인에 기인한다고 생각된다. 나

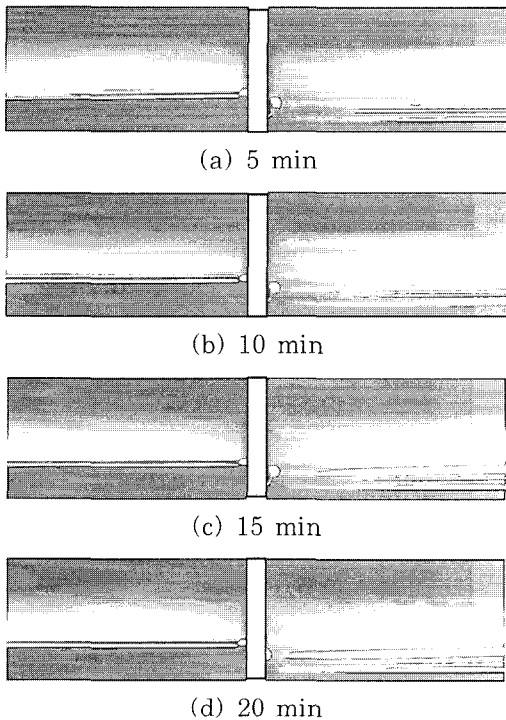


Fig. 3 Flow patterns of mean velocity 0.5m/s at valve open 50%, IPF 30%

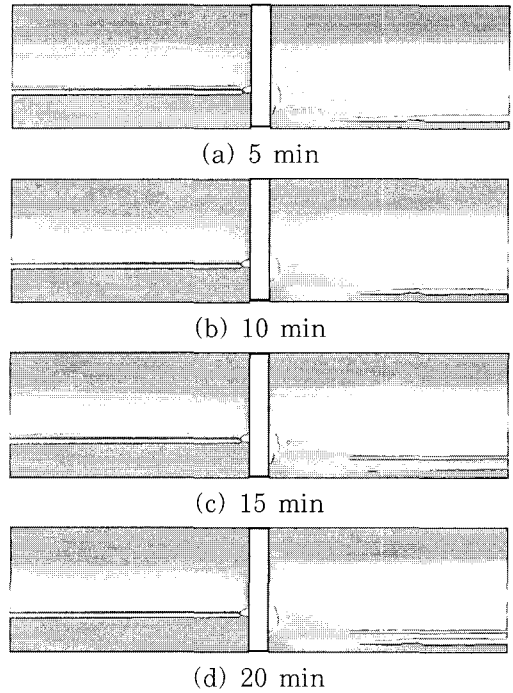


Fig. 4 Flow patterns of mean velocity 0.5m/s at valve open 75%, IPF 30%

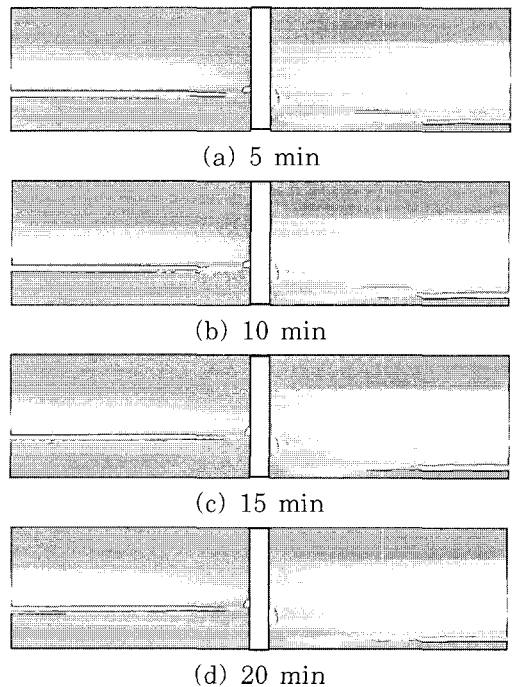


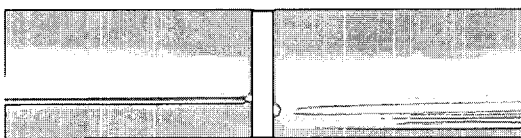
Fig. 5 Flow patterns of mean velocity 0.5m/s at valve open 100%, IPF 30%

아가 이러한 현상은 압력강하에도 많은 영향을 미치는 요인이라 할 수 있다.

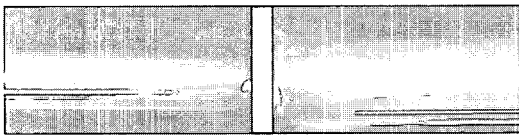
Fig. 5는 밸브개도 100%일 때 평균유속 0.5m/s 에서의 5분 간격으로 촬영한 사진을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 유속이 증가함에 따라 배관 상단부에 구름 모양의 피(cluster)가 형성이 되지 않으며 시간에 상관없이 입·출구 측에 얼음입자가 배관 전단면에 고루 분포하여 유동하는 균질 유동의 형태로 흐르는 것을 알 수 있다.

3.2 평균유속에 따른 영향

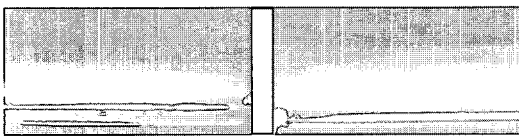
Fig. 6은 IPF 30%, 밸브 개도가 50%일 때 평균유속에 따른 유동 특성을 나타내고 있다. 평균유속이 작을수록 밸브 전방에서 아이스슬러리의 정체영역이 넓게 분포하는 것을 알 수 있고, 그 정체영역은 배관 상부에 부유하여 하부의 수류 측과 확실하게 분리되어 이동함으로써 고액 이상류의 한 유동형태인 부유유동형태를 보여주고 있다. 밸브 출구 쪽에서는 유속이 느릴수록 배관 상부에 공기층이 길게 형성되는 것을 알 수 있다. 이것은 유속이 증가할수록 아이스 슬러리의 부력에 의한 영향보다 평균유속의 증가에 따라 부력에 의하여 상부에 존재하려는 아이스 슬러리가 중심부의 아이스 슬러리와 합쳐져서 하류방향으로 이동되기 때문이다.



(a) 0.5 m/s



(b) 1.0 m/s



(c) 1.5 m/s

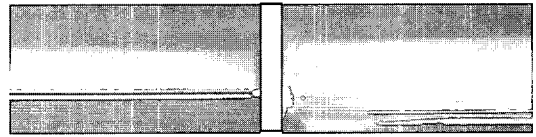
Fig. 6 Flow patterns of valve open 50% at IPF 30%

3.3 밸브개도에 따른 영향

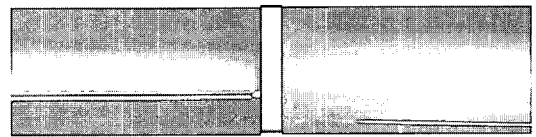
Fig. 7은 IPF 30%, 평균유속이 0.5m/s 일 때의 밸브개도에 따른 유동특성을 나타내고 있다. 밸브개도가 50%일 때는 유속이 느릴수록 입구 측 밸브 전방에서 아이스슬러리의 정체영역이 넓게 분포되던 것이 밸브개도가 증가함에 따라 부유유동 형태가 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 밸브 입구 측 배관 상부에 와류에 의해 강하게 형성되었던 아이스슬러리 및 유동층에서 분리된 공기층이 밸브개도가 증가함에 따라 유로가 확장되어 밸브에 의한 와류영역이 감소되어 균질유동의 형태가 되기 때문이다.



(a) valve open 50%



(b) valve open 75%



(c) valve open 100%

Fig. 7 Flow patterns of mean velocity 0.5m/s

3.4 압력강하 특성

Fig. 8은 IPF 30%일 때 평균유속의 변화에 따른 압력강하특성을 나타낸 것이다. 유속이 증가할수록 압력강하가 크게 증가하는 것을 알 수 있고, 밸브개도 50%에서 압력강하가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이는 밸브후방에서의 유속의 증가에 따른 재순환영역의 증가가 슬러리 아이스의 정체영역을 증가시킴에 따라 입구부에서의 압력손실이 증가하기 때문이라 생각된다. 또한 아이스슬러리가 관내에 존재하지 않는 경우(IPF가 0%)와 비교하

여 아이스슬러리가 존재하는 경우가 압력강하가 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 밸브 후 측의 와류영역에 아이스슬러리가 괴를 형성하여 유로를 더욱 작게 하기 때문이다.

Fig. 9는 IPF 30% 일 경우 밸브개도의 변화에 따른 압력강하특성을 나타낸 것이다. 밸브개도가 작을수록, 유속이 증가할수록 증가하며, Fig.8의 아이스슬러리가 존재하지 않을 경우와 비교하여 대단히 크게 증가함을 알 수 있다. 이것은 밸브 개도가 감소할수록 슬러리 아이스가 입구부분에 정체됨에 따라 아이스슬러리 상호간에 응집에 의한 괴가 형성되어 유로가 더욱 작아지기 때문에 압력강하가 증가된다고 생각된다.

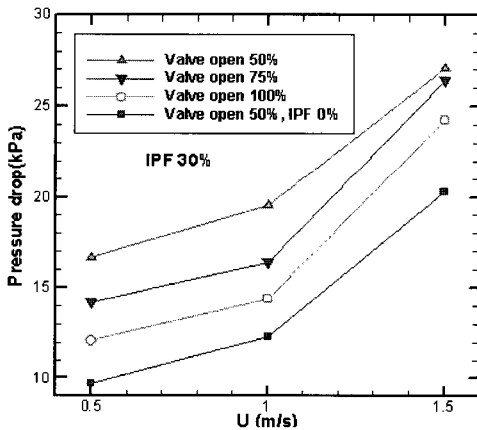


Fig. 8 Effect of mean velocity on pressure drop at IPF 30%

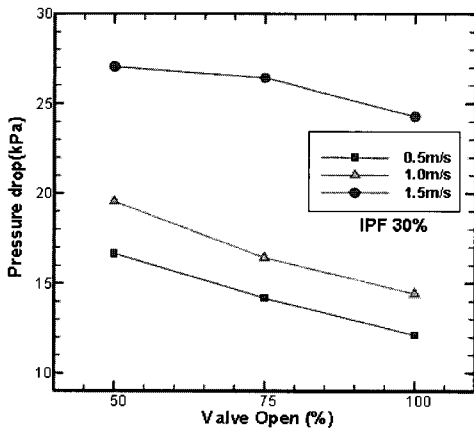


Fig. 9 Effect of valve open(%) on pressure drop at IPF 30%

4. 결 론

직관 내에서 밸브주위의 아이스슬러리의 이송에 관한 연구에서 본 실험 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 밸브 개도가 감소할수록 유속이 감소할수록 밸브 전방에서 슬러리 아이스의 정체 현상이 가장 크게 발생하여 얼음입자가 배관 상단 부에 모여 유동하는 부유유동이 확인 되었다 .
2. 유속이 증가할수록 밸브 개도가 증가할수록 아이스슬러리가 배관 전단면에 고르게 분포하는 균질 유동 형태임이 알 수 있다.
3. 유속이 증가할수록, 밸브 개도가 감소할수록 밸브 근방의 정체영역이 확대됨에 따라 압력강하가 크게 발생한다.
4. 본 실험의 범위 내에서는 정체영역에서의 아이스슬러리의 괴에 의한 정체영역은 발생하지 않았다.

참고문헌

- [1] Lee, D. W., "Cold heat transportation using ice slurry", The Magazine of the SAREK, Vol. 30, No. 12, pp. 8-14, 2001.
- [2] Park, K. W., "Current status of research and new development on ice heat storage system technology", Magazine Korean Refrig. Air Cond. Tech. Associa., Vol. 15, No. 4, pp. 119-131, 1998.
- [3] Yanagihara, R., "Evaluation of ice storage system", Japan Association of Refrig., Vol. 73, No. 884, pp. 58-63, 1998.
- [4] 川南 剛의 2인, "水平矩形流路内を流れるスラッシュアイス의 採冷熱特性", 35회 일본전열심포지움, Vol. 1, pp. 227-228, 1998
- [5] 이동원, 윤찬일, 윤웅상, "소구경 배관 내 아이스슬러리의 유동현상 및 압력강하 특성에 관한

실험적 연구(2)", 대한설비공학회 논문집 제14권 제5호, pp. 391-397, 2002.

- [6] 박기원 외 3인, "아이스슬러리의 분기관내 압력손실과 IPF 변화에 관한 연구", 한국박용기관학회지 제27권, 제2호, pp.272-279, 2003.



문성배 (文聲培)

1968년생, 1991년 한국해양대학교 항해학과 졸업, 1998년 한국해양대학교 대학원 해사수송과학과 졸업(공학석사), 2002년 한국해양대학교 대학원 해사수송과학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 항해시스템공학부 교수

저 자 소 개



오 철 (吳 喆)

1958년생, 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사), 1998년 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수



손용길 (孫龍吉)

1977년생, 2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2006년 한국해양대학교 대학원 기관시스템학과 수료, 현재 (주)일진마리타스 근무