

모형빙 밀도 계측 방법 개선 연구

하정석·강국진[†]·조성락·정성엽·이춘주
선박해양플랜트연구소

A Study on the Improvement of Measuring Method for Density of Model Ice

Jung-Seok Ha·Kuk-Jin Kang·Seong-Rak Cho·Seong-Yeob Jeong·Chun-Ju Lee
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering¹

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO) has an ice tank to make a test environment similar to the real ice in the polar sea in order to carry out model tests. One of the most important task of the ice tank is to generate the model ice to have similar material properties as sea ice. The primary properties of sea ice which influence the ice performance of ice breakers and ice-strengthened vessels traveling in the polar sea are ice thickness, flexural strength, density, modulus of elasticity and crystal structure etc. Among them, since the density of model ice influences the buoyance resistance of ice for the ship model, the accurate measurement of ice density should be used to obtain the accurate analysis results from the model test. In this paper, some existing methods to measure the density of model ice are reviewed and a new one is proposed to measure it accurately and easily as possible. In this study, the measuring system including an UTM and several measuring devices was established to obtain the model ice density. Polyethylene and ice specimens are used for a series of repeatable measurement tests. From the results, it was recognized that both of the displacement method and the weight/weight methods gave the stable and favorable tendency.

Keywords : Ice density(빙밀도), Sea ice(해빙), Ice model basin(빙해수조), Model ice(모형빙)

1. 서론

최근 북극해 빙하의 감소로 인한 북극항로의 개방과 극지 천연자원 개발에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 자원 개발 및 해외물동량에 대한 이점을 확보하고자 국내조선소 및 물류회사에서 관련 기술력과 경쟁력을 확보해 나아가고 있으며, 빙해역 운항이 가능한 쇠빙선박 및 해양구조물에 대한 수요가 증대되고 있다. 국내에서는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 빙해수조와 극저온 콜드룸 시설(cryogenic cold room)를 확보하여 운영하고 있으며, 극지연구소(KOPRI)에서는 쇠빙연구선 '아라온(araon)'을 보유하고 있어서 극한지 빙해선박과 해양구조물에 대한 연구를 수행할 수 있는 연구 기반이 구축되어 있다.

극지 빙해역을 운항하는 빙해선박의 빙저항이나 해양구조물에 작용하는 빙하중을 알기 위해서는 실해역에서의 시험이 필요하지만 그 이전에 극지환경 재현 시험시설인 빙해수조에서의 모형 시험을 통해 빙과 구조물의 상호작용을 정확하게 파악하고 설계 하중과 소요동력을 정도 높게 추정하는 것 또한 매우 중요하다.

빙해수조에서 모형시험을 수행하기 위해서는 실제 해빙과 상

사법칙이 만족하도록 모형빙을 만들어야 한다. 그 가운데서 모형빙의 밀도는 빙해선박에 부력저항으로 영향을 미치며, 선수에서 선저로 유입되어 선미로 흘러 나아가는 빙편의 물리적인 거동에도 중요한 요소로 작용한다. 따라서 정도 높은 모형시험 수행을 위해서는 해빙(sea ice)의 밀도(0.88~0.92kg/cm³)와 동일한 모형빙을 만들고, 그 밀도를 정확하게 계측하는 것이 또한 중요하다.

본 논문에서는 KRISO 빙해수조에서 생성하는 모형빙의 밀도를 정도 높게 계측하기 위하여 기존의 빙밀도 계측 방법에 대하여 검토를 하고, 제반 시험여건을 감안하여 계측 오차를 줄이기 위한 새로운 방법을 고안하고 그 정확도를 비교 검토하였다.

2. 빙밀도 계측법

2.1 질량/부피 계측 방법 (Mass/Volume method)

식 (1)은 모형빙의 질량과 부피를 이용하여 밀도를 계측하는 방법으로서 가장 기본적인 방법이지만 빙해수조에서 생성된 모형

빙을 재단할 때의 불규칙한 표면으로 인해서 모형빙의 부피를 정확하게 계측하기가 어려우므로 정확한 결과를 기대하기 어렵다.

$$\rho_i = \frac{M}{V} \quad (1)$$

2.2 배수량 계측 방법 (Displacement method)

얼음의 부력을 이용하는 방법 (Fig. 1)은 모형빙을 수조수에 완전히 잠기게 할 때에 작용하는 부력을 계측하고 이 때 모형빙이 잠긴 부피만큼 배출되는 수조수의 양을 측정하여 모형빙의 밀도를 산출한다(식 (2)). 이 계측법은 다른 밀도 계측법에 비해 정확하지만 모형빙을 물에 잠글 때에 균형을 잡아서 적절한 속도를 가해주어야만 정확한 계측이 가능하다.

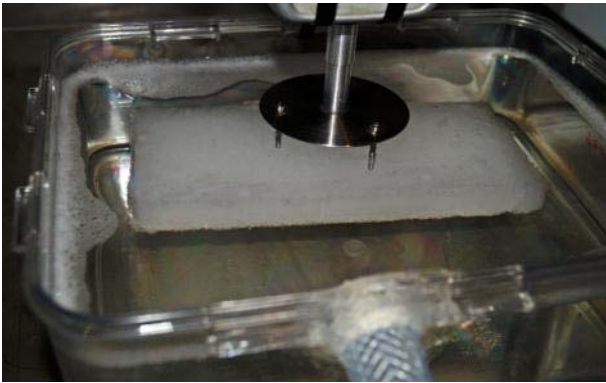


Fig. 1 Displacement method

$$\rho_i = \rho_w - \frac{F}{V} \quad (2)$$

2.3 건현과 빙 두께 계측 방법 (Freeboard method)

본 방법은 ITTC (1996)에서 제안되어 눈이 쌓인 실제의 해빙의 밀도를 계측하는 방법으로 사용되고 있으며 수식은 아래와 같다.

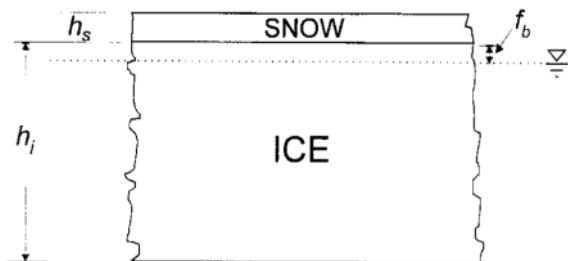


Fig. 2 Freeboard and ice thickness method

$$\rho_s h_s + \rho_i h_i = \rho_w (h_i - f_b) \quad (3)$$

이 방법은 다른 방법에 비하여 freeboard 높이만 읽으면 밀도를 구할 수가 있고, 크기에 제한을 받지 않는 장점이 있다. 하지만 밀도를 정도 높게 계측하기 위해서는 계측 지반이 수평을 이루어야 하며, freeboard의 높이를 정확하게 읽어야 한다.

이 방법을 모형빙 밀도 계측 시에 적용하려면, 마찬가지로 freeboard를 정확하게 읽기에 어려움이 있으며, 계측 정도를 높이기 위해서 가로 * 세로가 10cm * 10cm 이상의 비교적 큰 시편의 사용을 권장한다 (kim, 2011).

2.4 모형빙 무게/수조수 무게 계측 방법 (Weight/Weight method)

앞의 여러 방법을 검토한 결과, 본 연구에서는 식 (4)와 같은 방법을 고안하였다.

$$\rho_i = \frac{W_i \times \rho_w}{W_{dw}} \quad (4)$$

이 방법은 기존의 Mass/Volume 방법과 비슷하지만 모형빙의 무게에 수조수의 밀도를 곱하고 모형빙이 수조수에 잠겼을 때 배출되는 수조수의 무게로 나누어 빙밀도를 산출하는 방식이다. 이 방법은 모형빙 절취 시에 크기와 표면이 균일하지 못하더라도 모형빙의 무게와 그 크기에 해당하는 물의 무게만을 정확하게 계측함으로써 밀도를 정도 높게 계측할 수 있다. 계측 시 모형빙이 생성되었던 저온의 수조수를 그대로 사용하여 얼음이 녹음으로써 발생하는 오차를 최소화한다.

- ρ_i : 모형빙의 밀도 [g/cm^3]
- V : 측정된 재료의 부피 [cm^3]
- M : 재료의 질량 [g]
- ρ_w : 수조수의 밀도 [g/cm^3]
- F : 모형빙의 부력 [N]
- ρ_s : 눈의 평균 밀도 [g/cm^3]
- h_s : 눈의 두께 [cm]
- h_i : 모형빙의 두께 [cm]
- f_b : 수면위로 드러난 모형빙의 높이 [cm]
- W_i : 모형빙의 무게 [g]
- W_{dw} : 배출된 수조수의 무게 [g]

3. 빙밀도 계측 정도 향상

3.1 Push-Pull gauge 선정 및 검교정

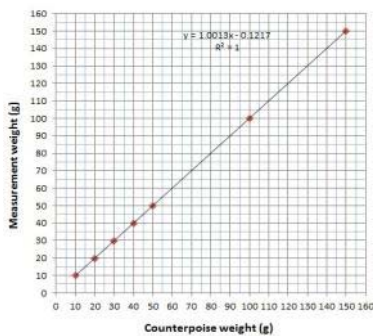
배수량 계측 방법에 사용되는 부력은 push-pull gauge(푸쉬풀 게이지)에 의해 계측된다. 따라서 계측에 적합한 용량의 푸

쉬풀 게이지를 사용하는 것과 검교정을 통하여 계기의 계측 정확도를 확인하는 것이 매우 중요하다. 그래서 검증된 무게별 분동을 통해 각각의 푸쉬풀 게이지마다 검교정을 수행하고 오차율을 계산해 보았다. 10 Newton(N) 과 50 N의 푸쉬풀 게이지는 측정단위가 0.01 g이지만 2 N 푸쉬풀 게이지는 0.001 g 으로서, 밀도 값 0.88g/cm³를 목표로 하여 생성된 모형빙의 부력이 보통 1 N 이하이기 때문에 모형빙의 부력을 측정하는데 있어서 가장 적절하다고 판단되어 이하의 계측에 사용하였다.

Table 1은 검교정 분동을 사용하여 2 N의 푸쉬풀 게이지를 검교정한 결과를 보인다.

Table 1 2N Push-pull gauge calibration result

2 N Push-pull gauge – IMADA			
Counterpoise Weight (g)	Measured Weight		
	N	g	Error (%)
9.999	0.097	9.891	1.08
19.998	0.195	19.885	0.57
29.996	0.294	29.98	0.05
39.995	0.391	39.87	0.31
49.995	0.490	49.97	0.05
100.00	0.980	99.932	0.07
149.995	1.472	150.102	-0.07



3.2 만능재료시험기의 최적 재하 속도 검토

Universal Testing Machine(만능재료시험기)의 가속도에 의한 충격력 영향을 줄이기 위하여 최적 재하 속도를 검토하고자 하였으며, 이를 위하여 Polyethylene(PE) 시편에 만능재료시험기의 재하속도를 8 가지로 바꾸면서 5 회에 걸친 반복실험을 통해 최대하중을 계측하여 Table 2 에 나타내고 Fig. 3 은 각 속도에 대한 평균 하중을 그래프로 나타내어 만능재료시험기의 속도변화에 따른 하중변화를 보인다.

Table 2와 Fig. 3을 보면 재하속도가 높을수록 하중이 크게 나타났는데, 이는 삼각발과 시편이 접촉할 때의 충격력이 속도가 빠름에 따라 크게 나타나는 것으로 보인다. 그리고 속도 60 mm/min에서 하중이 거의 수렴하는 모양을 보이고 있으므로, 이 속도가 최적 속도인 것으로 판단되어 이하의 계측에 적용하기로 한다. 아래 Fig. 4는 일정한 속도로 푸쉬풀 게이지를 통해 시편

을 물 속으로 밀어넣으면서 부력과 배출되는 수조수의 무게를 계측하고 있는 장면이다.

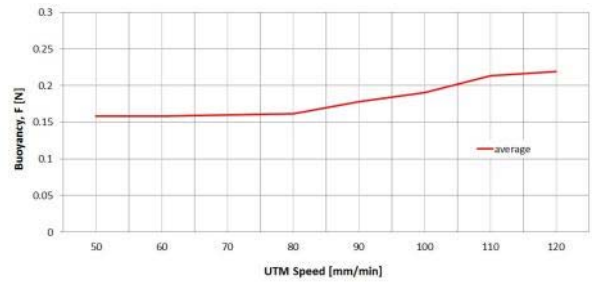


Fig. 3 Measured loads according to the UTM load speeds

Table 2 Measured load values according to various moving speeds

Speed NO.	50	60	70	80
	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min
1	0.159 N	0.156 N	0.163 N	0.161 N
2	0.152 N	0.155 N	0.158 N	0.163 N
3	0.166 N	0.163 N	0.161 N	0.157 N
4	0.153 N	0.160 N	0.160 N	0.159 N
5	0.162 N	0.155 N	0.159 N	0.166 N
AVE.	0.158 N	0.158 N	0.160 N	0.161 N
Speed NO.	90	100	110	120
	mm/min	mm/min	mm/min	mm/min
1	0.174 N	0.194 N	0.200 N	0.212 N
2	0.182 N	0.182 N	0.192 N	0.225 N
3	0.174 N	0.190 N	0.227 N	0.238 N
4	0.181 N	0.196 N	0.229 N	0.204 N
5	0.178 N	0.187 N	0.217 N	0.214 N
AVE.	0.178 N	0.190 N	0.213 N	0.219 N

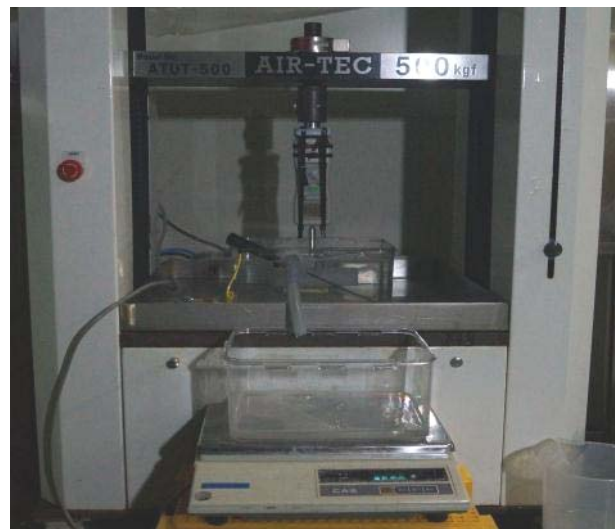


Fig. 4 Using the universal testing machine

3.3 기준 시편을 통한 밀도 계측 방법 및 장비의 검증

모형빙의 밀도 계측에 실제로 사용이 가능한 2.2절의 배수량 측정 방법과 2.4절의 모형빙 무게/수조수 무게 계측 방법에 대한 정확도 비교시험을 수행하였다.

Fig. 5는 시편을 수조수에 눌러서 넣을 때 편심방지를 위해 사용한 삼각발 jig를 보여주고 있다.



Fig. 5 A tripod jig pushing an ice down in the water

밀도 계측에 사용된 PE 시편의 크기는 길이 148.29mm, 폭 60.64mm, 두께 31.63mm 이며 무게는 272.5g 이다.

아래 Table 3과 Fig. 6에는 빙밀도 계측 정도 향상을 위해 고안한 계측방법들과 제작된 계측장비들을 사용하여 계측 정도를 검증하기 위하여 부피와 무게를 정확하게 알 수 있는 PE 시편을 이용하여 밀도를 반복적으로 계측한 결과를 보인다.

질량/부피 방법으로 구한 PE의 밀도는 0.958g/cm³이었다. 배수량 측정 방법과 모형빙 무게/수조수 무게 방법으로 각각 10회의 반복실험을 수행하였으며, 그 결과 배수량 측정 방법은 편차가 매우 작았으며, 모형빙 무게/수조수 무게 방법은 최대 편차가 0.023g/cm³으로서 상대적으로 다소 큰 경향을 보이고 있다. 그러나 이 두 가지 방법의 평균값을 사용하면 질량/부피 계측 방법으로 구한 값과 거의 동일한 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

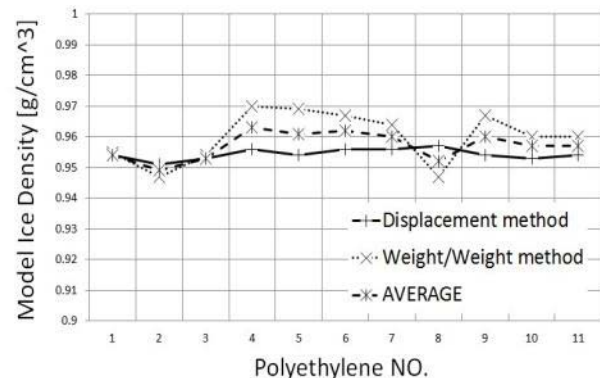


Fig. 6 Repeatability test result of the density measurement for the PE specimen

Table 3 Results of measuring the density of PE specimen

NO.	Buoyancy, F [N]	Drain water weight, W_{dw} [g]
1	0.137	286
2	0.146	288.5
3	0.138	286.5
4	0.128	281.5
5	0.134	282
6	0.127	282.5
7	0.130	283.5
8	0.127	288.5
9	0.135	282.5
10	0.138	284.5
AVE.	0.134	284.6
Displacement method [g/cm ³]	Weight/Weight method [g/cm ³]	AVERAGE method [g/cm ³]
0.954	0.955	0.954
0.951	0.947	0.949
0.953	0.954	0.953
0.956	0.970	0.963
0.954	0.969	0.961
0.956	0.967	0.962
0.956	0.964	0.960
0.957	0.947	0.952
0.954	0.967	0.960
0.953	0.960	0.957
0.954	0.960	0.957

4. KRISO 빙해수조 모형빙 밀도 계측

본 연구를 통해서 개선된 밀도 측정 방법을 이용하여 KRISO 빙해수조에서 생성된 EG/AD-CD 모형빙의 밀도를 계측하였다.

KRISO 빙수조에서 사용되고 있는 수조수는 EG(Ethylene Glycol)가 0.39%, A/D(Aliphatic Detergent)가 0.036%씩 각각 섞였으며 밀도는 1.0025g/cm³이다.

KRISO 빙해수조에서 94차 빙수조시험 시 1시간의 승온 과정을 거친 빙판에 대해 초기 빙밀도 계측을 수행하였다. 94차 모형빙의 목표 두께는 30mm이고 강도는 30kPa로 10 시간 결빙에 8 시간동안 micro bubble을 분사하였고 13 시간 승온하였다. 계측 위치는 Table 4 에 표시된 것처럼 15m부터 10m씩 떨어지게 하여 빙판의 중앙부분인 3, 4 번 channel에서 각각 계측하였다. 각

지점에서 채취된 모형빙의 평균 크기는 길이 151.46mm, 폭 59.49mm, 두께 27.02mm이며 무게는 215.6g 으로 식 (1)을 사용하여 밀도를 계산하면 0.884g/cm³이다. 각 지점에서 채취된 모형빙의 평균 크기와 무게, 질량/부피 계측법으로 계산된 평균 밀도값은 Table 5에 나타나 있다.

Table 4 Measuring position on ice sheet

Melting Tank					
CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5	CH 6
					35m
					30m
					25m
					20m
					15m
					10m
Trimming Tank					

Table 5 Results of using the Mass/Volume method

CH	L[mm]	B[mm]	H[mm]	W[g]	D[g/cm ³]
3-15 m	26.84	58.14	148.82	202.5	0.872
4.5-15 m	25.92	54.82	134.57	161.9	0.847
3.5-25 m	26.29	61.5	156.88	222.9	0.879
3-35 m	30.00	57.57	150.96	238.6	0.915
4.5-35 m	26.04	65.43	166.07	251.2	0.888
AVE.	27.02	59.49	151.46	215.4	0.880

Table 6과 Fig. 7의 94 차 모형빙의 밀도 계측 결과를 살펴보면 평균적으로 배수량 계측 방법이 안정적인 빙밀도 값을 보여주고 있으며, 모형빙 무게/수조수 무게 방법은 편차가 다소 있지만 평균적으로 거의 비슷한 결과를 보이며, 빙밀도 값이 모두 0.883 g/cm³ 정도로 잘 일치하는 것으로 판단된다.

Table 6 Results of measuring the density of model ice

(g/cm ³)	Displacement method	Weight/Weight method	AVE.
CH 3-15 m	0.865	0.896	0.881
CH 4.5-15 m	0.889	0.830	0.859
CH 3.5-25 m	0.889	0.893	0.891
CH 3-35 m	0.883	0.932	0.908
CH 4.5-35 m	0.873	0.883	0.878
AVE.	0.880	0.887	0.883

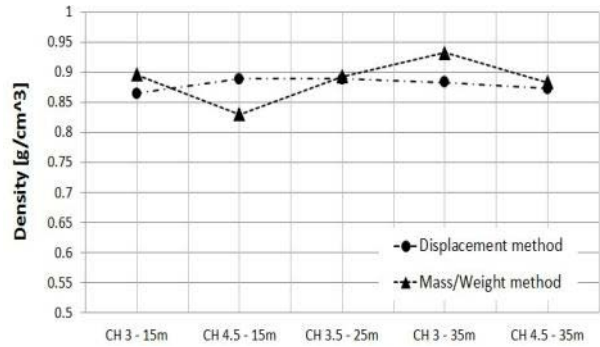


Fig. 7 Measured density of EG/AD-CD model ice

5. 결론

본 연구에서는 모형빙 생성 시에 빙밀도를 계측하기 위한 안정적인 정도가 높은 방법을 찾기 위해 수행되었다. 캐나다의 NRC-OCRE(National Research Council-Ocean, Coastal and River Engineering)와 독일의 HSVA(Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt) ice tank 에서 수행하고 있는 빙밀도 계측방법 및 자체적으로 고안한 계측방법을 포함한 총 4가지의 계측방법을 검토하고, Polyethylene(PE)와 KRISO의 EG/AD-CD 모형빙으로 만든 시편으로 반복실험을 통해 빙밀도 계측 방법을 분석한 결과 실제로 적용이 용이하고 계측 정도가 높은 방법 두 가지를 선정하였다.

배수량 계측 방법(displacement method)의 부력계측에 사용되는 장비들은 다수의 반복실험을 통해 그 정확성을 검증하였다. 부력을 계측하는 푸쉬풀 게이지의 적정 용량을 2N 으로 선택하여 비하여 계측 정밀도를 향상시켰으며, 모형빙을 물에 눌러 넣을 때 편심을 방지하기 위하여 삼각발 지그를 사용하였다. 만능재료 시험기를 이용한 재하속도의 최적속도는 입수 충격력을 최소화하고 안정적인 하중을 보이는 60mm/min 임을 알 수 있었다.

모형빙 무게/수조수 무게 계측 방법(weight/weight method)은 시편의 무게와 시편의 잠김으로 인해 배출되는 물의 무게 비율을 사용하므로 불규칙한 크기의 모형빙의 부피를 측정하는 것보다 계측 오차를 크게 줄일 수 있다. 빙밀도 계측 값들의 편차는 배수량 계측 방법보다 다소 크지만 평균적으로 기준 값에 근사한 결과를 주고 있다.

따라서 안정적인 밀도 분포를 보여주는 배수량 계측 방법과 모형빙 무게/수조수 무게 방법을 병행하여 사용하는 것이 KRISO의 모형빙의 밀도 계측에 가장 적합한 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 해양수산부 해양안전 및 해양교통시설기술개발사업인 “북극항로 운항선박용 항해안전지원시스템 개발(PMS3050)” 과 KRISO 주요사업 중 “극지 오일생산용 부유체의 설계와 안전운용을 위한 빙성능 시험평가 기초연구(PES188A)” 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과입니다.

References

- ITTC, 1996. *Report form Panel on Performance in Ice-Covered Waters Committee. The 21th ITTC Conference*, Trondheim, Norway, 1, pp.211-270.
- ITTC, 2002. *Testing and Extrapolation Methods - Ice Testing General Guidelines. ITTC Recommended Procedures, Ice Specialist Committee of 23rd ITTC*. ITTC.
- Kim, J.H., 2011. *A Study on the Material Properties of Compound Model Ice for Utilization in the Ice Model Basin*. Doctoral Dissertation. Korea Maritime and Ocean University.



하정석



강국진



조성락



정성엽



이춘주