

ORIGINAL ARTICLE

MARPOL 73/78의 기준에 따른 선박오수 처리 장치(SBR 및 MBR 복합공정)의 사용 가능성 평가 : 영양염류 위주 (T-N 및 T-P)

정진희 · 윤영내¹⁾ · 최영익*

동아대학교 환경공학과, ¹⁾주ESSA

Feasibility Study of a Shipboard Sewage Treatment Plant (Sequencing Batch Reactor and Membrane Bioreactor) in Accordance with MARPOL 73/78, Focusing Mostly on Nutrients (T-N and T-P)

Jin-Hee Jung, Young-Nae Youn¹⁾, Young-Ik Choi*

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

¹⁾ESSA, Gyeongju

Abstract

This study aimed to evaluate changes in the TN and TP removal efficiencies, depending on whether or not a settling process is applied, in a sequencing batch reactor (SBR) process with a membrane bioreactor (MBR). Nutrient removal was considered in terms of developing an advanced water treatment system for ships in accordance with water quality standards set forth by 227(64). For these purposes, the TN and TP concentrations in the inflow and outflow water were measured to calculate the TN and TP removal efficiencies, depending on whether or not a settling process was used. Water discharged from a bathroom, which was constructed for the experiment, was used as the raw water. The experiment that included a settling process was conducted twice, and the operating conditions were: aeration for 90 min, settling for 30 min, agitation for 15 min, and settling for 15 min for one experiment; and aeration for 150 min, settling for 45 min, agitation for 15 min, and settling for 15 min in the other. Operating conditions for the experiment that did not include a settling process were: aeration for 180 min and agitation for 60 min. The concentration of the mixed liquor suspended solids (MLSS) in the reactor was 3,500 mg/L, while the aeration rate was 121 L/min and the water production rate was 1.5 L/min. For the two experiments where a settling process was applied, the average TN removal efficiencies were 44.39% and 41.05%, and the average TP removal efficiencies were 47.85% and 46.04%. For the experiment in which a settling process was not applied, the average TN removal efficiency was 65.51%, and the average TP removal efficiency was 52.51%. Although the final nutrient levels did not satisfy the water quality standards of MEPC 227(64), the TN and TP removal efficiencies were higher when a settling process was not applied.

Key words : MEPC. 227(64), Advanced sewage treatment for shipboard, SBR, MBR, Sedimentation

Received 23 June, 2016; Revised 23 July, 2016;

Accepted 2 September, 2016

*Corresponding author : Young-Ik Choi, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

Phone : +82-51-200-7675

E-mail : youngik@dau.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© 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.

1. 서론

우리나라는 지하자원이 부족하여 산업기반의 시스템은 오로지 비행기 및 선박을 통한 수출입에 의존할 수밖에 없는 실정이다. 따라서 3면이 바다로 이루어진 반도라는 이점을 살려 경제를 성장시키고자 인천, 부산 및 울산 등에 항구를 지어 규모가 큰 산업단지를 조성하였으며 이로 인하여 해상물동량이 급격히 증가하였다. 이러한 점을 바탕으로 하여 우리나라의 선박시장은 최신의 대형설비, 기술인력, 설계기술 및 건조경험을 바탕으로 조선해양산업의 선도국의 위치를 차지하고 있으며 해상물동량이 6위이고 선박의 보유량은 세계 8위의 해양강국으로 자리매김하였다.

그러나 선박에 의한 물동량의 증가로 선박에서 발생하는 오염물질로 인한 연안해역의 오염은 날로 심각해지고 있으며 피해규모 또한 해마다 증가되는 추세이다. 또한 항만의 오염과 주변해역의 오염으로 인해서 양식장이나 어장의 피해는 늘어나고 있으며, 다양한 오염물질로 인해서 생태계의 교란까지 발생하고 있는 실정이다(Kim, 2008).

세계적인 차원에서 볼 때 역시 인간의 삶의 질이 향상됨에 따라 이용객의 증가로 대형여객선의 수가 급증하게 되었으며, 세계 선박시장의 수요는 꾸준히 증가하는 추세이다. 따라서 선박으로 인한 환경오염은 특정 국가만의 책임이 아니라 국제적으로 공통된 책임을 지니며 범지구적인 문제임을 인식하여 국제해사기구(IMO, international maritime organization) 해양환경보호위원회(MEPC, marine environment protection committee)는 선박에서 배출되는 오폐수의 배출기준을 규제하는 오수방지협약 MARPOL 73/78 부속서4를 2003년 9월 27일부터 국제적으로 발효하였다. 국내의 경우 이를 반영하여 2004년 협약을 발효하였다(Kim et al., 2010).

협약 발효 이후 2010년에 개최된 국제해사기구 해양환경보호위원회(MEPC) 제 60차 회의에서 발틱해를 특별해역으로 지정할 수 있도록 그 주변국(덴마크 외 8개국)이 MARPOL 73/78 부속서4의 개정을 요청하였다(K.R, 2010). 선박으로부터 배출되는 오수로 인한 심각한 부영양화 문제가 발틱해의 주변국 인근 연안에서 발생되고 있으며 이에 대한 대책을 강구하

는 것이 주요 개정내용이었다. 주요 참여국들이 개정안에 동의 하였으나 오수를 수급할 수 있는 수용시설 부족 및 기술 부족으로 인해 차기 61차 회의에 발틱해의 주변국 및 단체들의 추가 개정안을 수용하여 논의하기로 결정하였다.

2010년에 개최된 제 61차 회의에서 발틱 8개국으로부터 추가 개정안을 수용 위원회의 논의 후 MARPOL 73/78 부속서 4의 개정안을 승인하였으며, 2012년 개최된 제 64차 회의에서 채택되었다. 부영양화의 원인물질인 T-N 및 T-P에 대한 규제를 포함한 MARPOL 73/78 부속서4는 2013년 1월 1일에 발효되었으며, 2016년 1월 1일부터 신조선여객선, 2018년 1월 1일부터 현존여객선에 적용될 예정이다. 이러한 국제적 협의에 의해 우리나라의 국토해양부에서는 2015년 9월 30일 “해양오염 방지설비 형식승인을 위한 성능 시험 및 검정기준”을 개정하였다(Ministry of Land, 2015).

선박의 오수처리는 선상에서 이루어지므로, 육상에서 고려되어야 하는 요건 이외에도 선박이라는 특수한 환경에서 요구되는 요건들이 추가적으로 만족되어야 한다. 선박에는 오수처리시설 및 설비 이외에도 많은 기기들이 육상과는 달리 비교적 협소한 공간에 비치되어 있어 최우선적으로 선박 오수처리장치는 크기가 작아야 되고 전문가가 아닌 선원들에 의해 조작되므로 간단하고 운전의 자동화가 필수적이다(Kim et al., 2010). 본 연구에서는 선박이라는 협소한 공간에 설치하여 운영 가능한 Compact한 공정 개발 및 MARPOL 73/78의 방류수질기준에 부합하는 영양염류의 높은 처리효율을 동시에 도모할 수 있는 SBR 및 MBR 복합공정 장치를 제작하여 MARPOL 73/78 개정발효에 따른 선박용 고도수처리 장치의 사용가능성 평가에 그 목적이 있다.

2. 재료 및 분석방법

2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 원수는 실험을 위해 자체적으로 약 40인 내외의 인원이 사용할 수 있는 화장실을 설계 및 제작하여 설치하였으며, 화장실에서 배출되는 오수는 Pilot plant의 혐기성 조로 유입되도록 유도해

Table 1. The characteristics of the raw water and operation conditions for the experiment

Parameters	Units	Measured values			
		Min.	Max.	Ave.	
Influent flow rate	kg/day	0.91	1.01	0.96	
Temperature	℃	7.2	9.8	9.2	
pH	-	7.1	7.4	7.2	
T-N	Conc.	mg/L	223.570	374.360	302.760
	Load	kg/day	0.203	0.375	0.262
T-P	Conc.	mg/L	22.930	37.850	26.995
	Load	kg/day	0.020	0.038	0.026

장치를 제작하였다.

본 연구는 동절기(1월 및 2월)에 실시해 원수의 평균 수온은 9.2℃로 나타났으며, T-N 및 T-P의 평균유입농도는 각각 302.76 mg/L 및 26.995 mg/L로 나타났다. Table 1에 원수의 세부성상을 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 방법

2.2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 장치의 경우 처리용량 1 ton/day, 규격 W 1,322 × L 1,022 × H 1,200 mm로 제작되었으며, 전체공정은 저류·헺기성조, 생물반응조

및 막분리조 총 3단계로 구성하여 실험을 진행하였다. Fig. 1에 본 연구개발장치의 모식도를 나타내었으며, Fig. 2에 실험을 위해 자체 제작한 화장실 및 Pilot plant를 사진으로 나타내었다.

2.2.2. 실험방법

실험은 총 3가지 조건으로 구성해 운전하였으며, Table 2에 세부 운전조건을 제시하였다. 영양염류의 제거를 위해 Condition 1,2 및 3에서 발생된 문제점을 점진적으로 개선 및 보완시키면서 본 연구를 진행하였다.

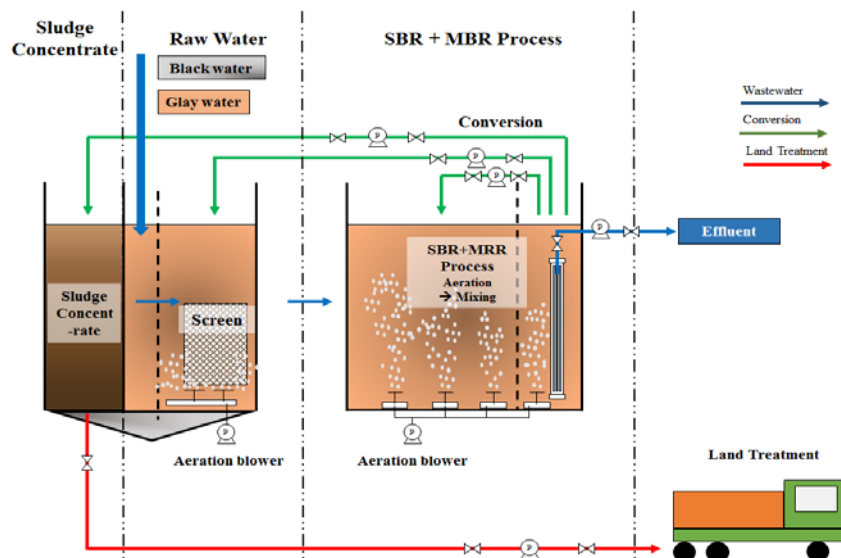


Fig. 1. Schematic diagram of the advanced shipboard sewage treatment plant.



(a) Photograph of toilet

(b) A front view of pilot plant

Fig. 2. Photograph of toilet for experiment(a) and front view of pilot-plant(b).**Table 2.** Operating conditions of the advanced shipboard sewage treatment plant

Parameters		Unit	Condition 1	Condition 2	Condition 3
Anaerobic tank	Drain flow	L/min	Auto	Auto	Auto
	Anaerobic phase		Facultative phase	Facultative phase	Facultative phase
	MLSS	mg/L	3,500	3,500	3,500
	Aeration	min	90	150	180
SBR reactor	Air flow	L/min		40	
	Sedimentation	min	30	45	None
	Mixing	min	15	15	60
	Sedimentation	min	15	15	X
	Media			Exist	Exist
MBR (only aeration period)	Drain flow	L/min	1.5	1.5	1.5
	Drain (On/Off)	L/min	7/3	7/3	7/3
	Air flow	L/min		121	
HRT		min	150	225	240
Flow		m ³ /day	0.91	1.01	1.01

2.2.3. 분석방법
수질오염공정시험법, pH meter, 및 Hach사의 수질

분석 kit를 이용하여 분석하였으며 세부 방법은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Analysis of the water samples for experiment

Parameters	Methods	Note
Temperature	Portable pH meter, Direct Measuring Method	YSI 55
pH	Portable pH meter, Direct Measuring Method	YSI 55
T-N	Hach DR 2800, Method 10072	TNT HR TOTAL NITROGEN
T-P	Hach DR 2800, Method 10127	TNT KIT TOTAL PHOSPHATE HR

3. 결과 및 고찰

3.1. Condition 1의 성능평가

Condition 1의 경우 최초 단계의 운전조건이며, 저류 및 혐기성조에서는 별도의 혐기화를 고려하지 않고 스크린을 통해서 생물반응조로 유입시켰다. 생물반응조의 경우 초기 미생물 농도를 MLSS 3,500 mg/L로 유지한 후 폭기 → 침전 → 교반 → 침전 순으로 폭기 90 mins, 침전 30 mins, 교반 15 mins 및 침전 15 mins의 주기로 SBR 공정을 진행하였다.

Condition 1에 따른 운전결과 T-N 및 T-P의 평균 제거효율은 각각 44.39%와 47.85%로 나타났다. 이는 MEPC. 227(64) 기준인 T-N 농도 20 mg/L 이하 또는 70%이상 제거효율 및 T-P 농도 1.0 mg/L 이하 또는 80%의 기준을 충족시키지 못하였다. Fig. 3 및 Fig. 4에 Condition 1의 영양염류 제거효율을 그래프로 나타내었으며, Table 4에 실험결과를 나타내었다.

3.2. Condition 2의 성능평가

SBR 반응조에서 호기 및 무산소조의 전환이 제대로 이루어지지 않다고 판단되어 Condition 1의 공정

조건을 변경하여 Condition 2에서 실험을 진행하였다. 선행된 연구에 따르면 질산화에 영향을 미치는 아질산균 및 질산화균의 활성도는 반응조의 폭기시간을 늘릴수록 높아진다고 보고하고 있다(Hwang et al., 2009; Hong, 2004).

따라서 본 연구에서는 Condition 1의 폭기시간 90 mins를 Condition 2에서는 폭기시간 150 mins으로 변경하여 운전을 실시하였으며, 무산소조 조건의 반응시간을 늘리기 위해 초기 침전시간을 30분에서 45분으로 증가시켜 폭기 150 mins, 침전 45 mins, 교반 15 mins 및 침전 15 mins의 주기로 Pilot-plant를 운전하였다.

Condition 2에 따른 운전결과 T-N 및 T-P의 평균 제거효율은 각각 41.05% 및 46.04%로 나타났으며, Condition 1에서 개선된 폭기시간 및 침전시간 증가에도 MEPC. 227(64)의 기준을 충족시키지 못하였다. Fig. 5 및 Fig. 6에 Condition 2의 제거효율을 그래프로 나타내었으며, Table 5에 실험결과를 나타내었다.

3.3. Condition 3의 성능평가

Condition 3에서는 질소 제거율을 향상시키기 위해

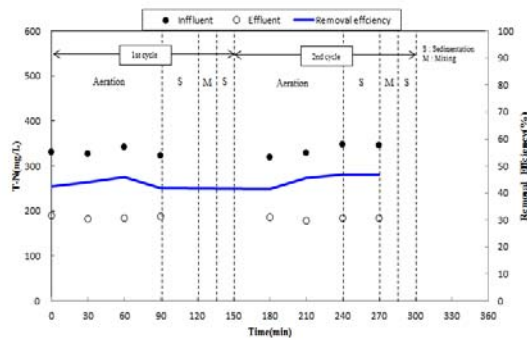


Fig. 3. T-N concentration changes during operation time at Condition 1.

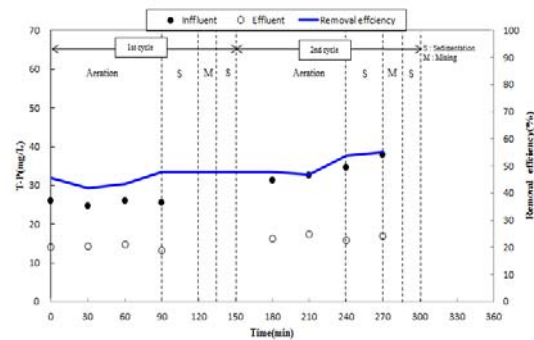


Fig. 4. T-P concentration changes during operation time at Condition 1.

Table 4. Result of water qualities of influent water and effluent water at Condition 1

Parameters	Unit	1 Cycle		2 Cycle		Avg. Remove efficiency
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	
T-N	mg/L	330.45	186.29	335.36	183.32	44.39%
T-P	mg/L	25.55	14.10	34.07	16.65	47.85%

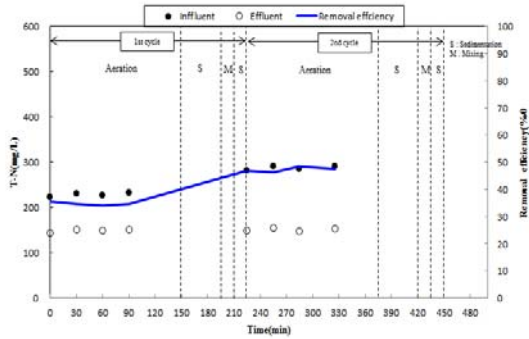


Fig. 5. T-N concentration changes during operation time at Condition 2.

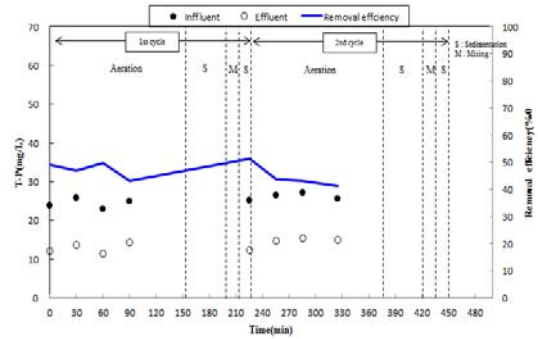


Fig. 6. T-P concentration changes during operation time at Condition 2.

Table 5. Result of water qualities of influent water and effluent water at Condition 2

Parameters	Unit	1 Cycle		2 Cycle		Avg. Remove efficiency
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	
T-N	mg/L	228.44	149.05	287.39	151.35	41.05%
T-P	mg/L	24.36	12.88	26.07	14.38	46.04%

반응조에 MBR 공정이 구성 되어 있기에 기존 Condition 1과 2에서 포함되어있던 침전 공정을 제외 시키고 폭기 및 교반 공정만으로 Pilot plant를 운전하였다.

Condition 3에 따른 운전결과 T-N 및 T-P의 평균 제거효율은 각각 65.51% 및 44.45%로 나타나 앞선 조건에 비해 월등히 개선된 것으로 나타났으나 MEPC.

227(64) 수질기준에는 미치지 못하였다. 이는 침전 공정을 제외하고 폭기 및 교반 공정의 시간을 증가시킴으로써 질산화, 탈질 및 인 흡수 박테리아들과 영양염류의 접촉이 앞에서 수행된 Condition 1 및 2에 비교하여 좀 더 활발히 일어나 제거효율이 향상된 것으로 판단된다. Fig. 7 및 Fig. 8에 Condition 3의 제거효율을 그래프로 나타내었으며, Table 6에 실험결과를

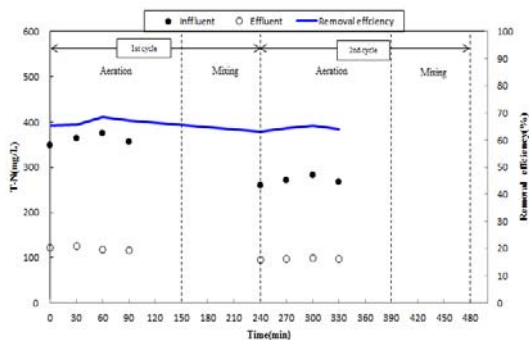


Fig. 7. T-N concentration changes during operation time at Condition 3.

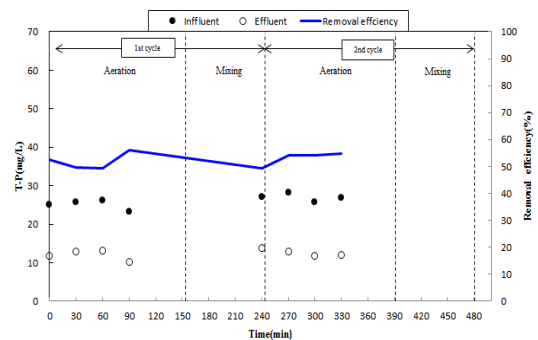


Fig. 8. T-P concentration changes during operation time at Condition 3.

Table 6. Result of water qualities of influent water and effluent water at Condition 3

Parameters	Unit	1 Cycle		2 Cycle		Avg. Remove efficiency
		Influent	Effluent	Influent	Effluent	
T-N	mg/L	360.65	119.91	270.17	96.42	65.51%
T-P	mg/L	25.02	12.06	26.91	12.62	52.51%

나타내었다.

4. 결론

MARPOL 73/78의 기준에 따른 선박오수 처리장치(SBR 및 MBR 복합 공정)의 사용 가능성 평가: 영양염류 위주(T-N 및 T-P)를 평가하기 위한 방안으로 3가지 Conditions에 따른 처리수의 수질을 측정하고 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Condition 1의 운전조건으로 연구를 진행한 결과 평균적으로 T-N 평균 제거효율 44.39%, T-P 평균 제거효율 47.85%로 나타나 MEPC. 227(64)의 기준(T-N 제거효율 70%, T-P 제거효율 80%)을 충족시키지 못하였으며, SBR 반응조에서 호기 및 무산소조 전환이 제대로 이뤄지지 않았다고 판단됨에 따라, 폭기, 침전 및 교반의 시간을 늘린 Condition 2를 적용한 결과 평균적으로 T-N 평균제거효율 41.05%, T-P 평균 제거효율 46.04%로 나타나 Condition 2 또한 MEPC. 227(64)의 기준을 충족하지 못하였다.

Condition 2에서는 Condition 1과 마찬가지로 SBR 반응조에서 호기 및 무산소조 전환이 제대로 이뤄지지 않았다고 판단되어, Condition 3에서는 침전공정을 제외시킨 조건으로 실험을 실시한 결과 평균적으로, T-N 평균 제거효율 65.51%, T-P 평균 제거효율 52.51%로 나타나 Condition 3의 경우 반응조 내의 호기-혐기조 전환이 비교적 제대로 이루어졌다고 판단된다(Jang, 2002). 그러나 좀 더 명확한 전환 및 탈질을 이끌어 내기 위해서는 폭기 및 교반 시간을 증가시킨 운전 및 Data 확보의 필요성이 추가되어야 할 것으로 판단되며, 향후 추가운전(폭기 및 교반시간 조절)을 통해 T-N 제거효율 70% 및 T-P 제거효율 80%를 만족할 수 있을 것으로 판단되며, 해양오염방지에 긍정적인 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박오수처리를 위한 친환경 복합 고도수처리장치 개발).

REFERENCES

- Kim, I. S., 2008, A Study on marine environmental preservation : Defining the Concept and Establishing the Boundaries of Marine Environment, Sarek, 37(5), 35-44.
- K.R, 2010, Marine Environment Protection Committee, 60th Session Result Report, 67-5, Busan, Korea.
- Ministry of Land, 2015, License standard and efficiency test for marine pollution prevention equipment, No. 2013-201, Seoul, Korea.
- Kim, I. S., Oh, Y. J., Lee, Y. S., 2010, Shipboard sewage treatment using membrane sequence batch reactor, Journal of Navigation and Port Research, 34(5), 383-388.
- Hwang, E. J., Cheon, H. C., 2009, High-rate phosphorous removal by PAC (poly aluminum chloride) coagulation of A2O effluent, Korean Society of Environmental Engineers, 31(8), 673-678.
- Kim, I. S., Lee, E. S., Oh, Y. J., Kim, E. J., 2010, Shipboard sewage treatment using Membrane sequence batch reactor, Journal of Navigation and Port Research, 34(5), 383-388.
- Hong, J. S., 2004, Study on the simultaneous removal of organics and nutrients using SM-SBR process, Ph. M, Daegu University, Daegu, Korea.
- Jang, S. C., 2002, A Study on the nutrient removal using a SBR process, Ph. M, Ho-seo University, Chungnam Asan, Korea.