

Hydraulic Experiment for Pollutant Discharge Characteristics in a Wolsong Nuclear Power Plant Port

월성원자력발전소의 항내 오염물 유출 특성에 관한 수리실험

Byung-Mo Yang¹, Byung-Il Min¹, Kihyun Park¹, Sora Kim¹, Jung Lyul Lee², and Kyung-Suk Suh^{1*}

¹ Korea Atomic Energy Research Institute, 111 Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

² Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do, Republic of Korea

양병모¹, 민병일¹, 박기현¹, 김소라¹, 이정렬², 서경석^{1*}

¹ 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

² 성균관대학교, 경기도 수원시 장안구 서부로 2066

(Received October 26, 2015 / Revised December 11, 2015 / Approved December 28, 2015)

In this study, the dispersion process of pollutant substances in a port under wave and current environments was evaluated by a hydraulic experiment. Once the contaminants washed ashore into the port of Wolsong nuclear power plant, transport processes of pollutants were investigated by tracking the tracer according to the variations of experimental condition through a hydraulic experiment. Several hydraulic experiments were performed to analyze the pollutant discharge rate of the surface coming from the different coastal environments. From the hydraulic experiment results, the tracer concentration decreased exponentially. These results suggested that, after the tracer was transported to the open sea, a different gradient was shown under different conditions. For the case of a diluted condition, the half-life of flow rate was 2.70, 10.40, and 26.39 days for 30, 20 and 10 rpm in the left-side, respectively. The decrease of the tracer concentration under conditions of 30 rpm was much faster than that under conditions of 10 rpm. For the wave condition, the half-life of flow rate was 4.59 and 15.35 days for the right and left side of the port in a hydraulic scale prototype, respectively.

Keywords: Wolsong nuclear power plant, Pollutants discharge, Hydraulic experiment, Discharge characteristics

* Corresponding Author.

Kyung-Suk Suh, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: kssuh@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-4788

ORCID

Byung-Mo Yang <http://orcid.org/0000-0003-1847-4805>

Kihyun Park <http://orcid.org/0000-0002-4201-6110>

Jung Lyul Lee <http://orcid.org/0000-0001-9410-9725>

Byung-Il Min

Sora Kim

Kyung-Suk Suh

<http://orcid.org/0000-0002-8518-6275>

<http://orcid.org/0000-0002-8971-3327>

<http://orcid.org/0000-0002-1355-119X>

본 연구에서는 항 내부에서 부하되는 오염물질이 파랑 및 흐름 조건으로 인하여 항외로 유출되는 과정을 수리실험을 통해 알아보았다. 월성원자력발전소 항내에 오염물질이 부하 되었을 시, 실험인자를 변화시켜가며 추적자를 활용한 흐름거동 조사를 수행하였다. 각 실험의 결과는 지수 함수에 따른 항내 오염물질이 감소하는 경향이 나타나며, 항외 유출에 걸리는 시간의 기울기는 각각 다른 결과를 보여주었다. 관측된 데이터로부터 회귀식을 도출한 결과, 흐름 관측의 경우 유입되는 모터의 회전 속도 30, 20, 10 rpm에서 좌측 항내의 오염물질이 50% 유출률에 도달하는 시간은 각각 2.70, 10.40, 26.39 days를 보였다. 모터의 회전속도가 30 rpm인 실험에서 유출되는 감소 추세가 가장 뚜렷하게 나타났으며, 회전속도 10 rpm인 실험에서 기울기는 완만하였다. 파랑 관측의 우측 영역의 오염물질이 50% 유출률에 도달하는 시간은 4.59 days로 나타났으며, 좌측영역의 경우 15.35 days의 결과를 보였다.

중심단어: 월성원자력발전소, 오염물 유출, 수리실험, 유출특성

1. 서론

후쿠시마 원전에서는 중대사고 이후 오염물질을 완전히 차단하지 못하여 오염수가 빗물 및 배수로를 통해 항만내로 유출되는 사고가 발생하였다. 중대사고로 인하여 항 내부에서 얼마나 많은 오염물질이 유입되어 남아있는지 파악하고, 부하되는 오염물질이 파랑 및 흐름 조건으로 인하여 항외로 유출되는 과정을 이해하는 것은 사고 관리 및 사전 환경 영향 평가에 도움이 될 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 수리실험을 통해 해안 환경의 조성, 파랑, 흐름 등 다양한 조건과 관련된 수리학적 특성을 이해하고, 시간에 따른 오염물질의 유출률을 파악하는 실험을 수행하고자 한다.

본 연구의 대상인 월성원자력발전소의 경우 파랑 조건 이외에 발전과정에서 발생한 방류수를 수중 및 연안에 방출하게 된다. 이는 주변해역에 확산, 이류 등의 과정을 거치면서 희석되며, 주변해역의 물리적 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 주변 환경에 영향을 초래한다. 수중에서 방출되는 방류수가 연안 해역의 해양환경에 미치는 영향을 파악하기 위한 이론 및 실험적 연구가 지속되어왔다. 선진국에서는 희석과 관련된 거동 특성에 영향을 미치는 기초연구를 수행하였으며, 주요한 영향 인자는 부류의 방류특성, 주변류의 특성, 그리고 확산관 및 방류구의 특성으로 분류하여 연구를 수행하였다[1]. 하지만, 흐름 수체에서 희석에 대한 연구는 매우 복잡하고 간단한 이론적인 배경만으로는 흐름의 패턴을 분석하고 평가하기에는 어려움이 많다.

해양방류수로 인한 주변해역의 영향평가는 수치모의 및

고유한 방정식과 해석 방법으로 수행하고 있으나 입력 자료나 모델의 구성 및 검증방법에 따라 결과가 상이할 수 있으며, 이는 전문적인 지식을 요구하게 된다[2, 3, 4]. 따라서 국내의 이론적 접근방법들의 대부분이 실험을 병행함으로써 이론식 및 수치모의 결과의 검증에 활용하고 있으며, 실험 자료들로부터 물리적 특성을 이해하는 정보를 얻고 있다.

본 연구에서는 월성원자력발전소의 항내에 오염물질이 부하 되었을 시 파랑 및 방류수의 실험인자를 변화시켜가며 이송 및 확산 흐름 거동을 추적자 실험을 통해 분석하고, 시간에 따른 오염물 유출률을 파악하는 실험 결과를 제공하고자 한다.

2. 수리실험시설 및 계측기기

2.1 수리실험시설 및 대상지역해양환경

본 수리실험의 실험 대상인 월성원자력발전소 부근 해역은 동한해류에 의해 북동방향으로 흐르는 해류가 강하게 나타나는 해역이며 Fig. 1(a)과 같다. Table 1에서는 한국해양연구원의 장기파랑산출 자료를 활용한 월성원자력발전소 부근(35.62°, 129.67°)의 해양환경을 조사하였다. 본 자료는 1999년에서 2003년까지의 자료를 통계 처리하여 월별 최대 유의 파고, 평균 유의 파고 및 주파향 결과를 제시하였다[5]. 최대 유의파고는 태풍 내습시기인 8 ~ 9월 사이 12.03 m로 가장 크고, 10 ~ 7월까지의 나머지 달에는 2.97 ~ 5.56 m의

Table 1. The maximum and average significant wave height data from KORDI

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Maximum significant wave height (m)	4.58	4.72	5.56	2.97	4.29	3.71	4.06	5.73	12.03	4.67	5.15	5.34
Mean significant wave height (m)	1.42	1.12	1.15	1.09	0.97	1.07	1.17	1.16	1.52	1.12	1.27	1.40
Wave direction	NNE	NNE	NE	NE	NE	SSW	SSW	NE	NE	NE	NNE	NNE

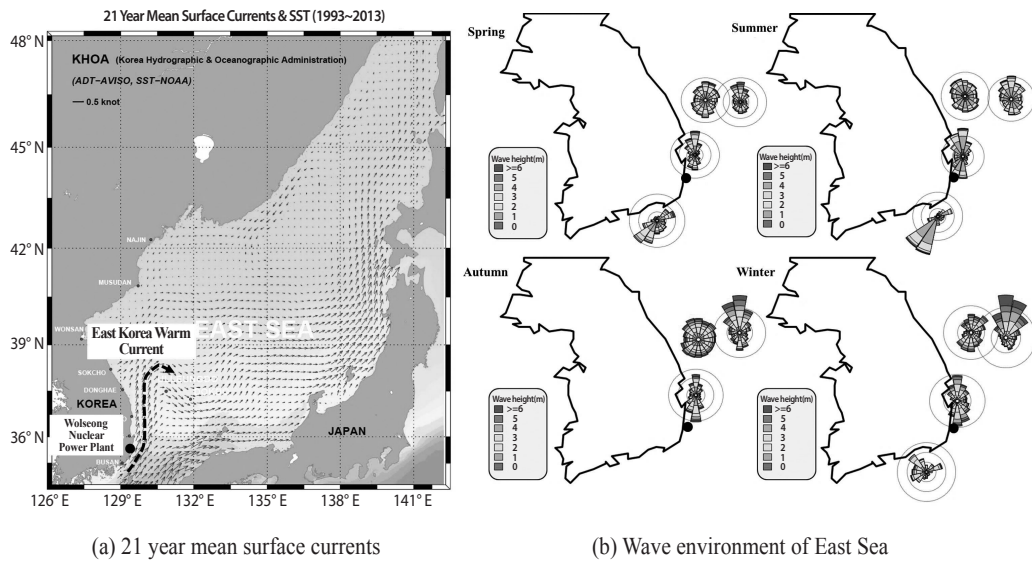


Fig. 1. 21 years mean surface current and wave environments.

분포를 보인다. 계절적인 평균 유의파고 특성은 겨울철에 북북동 방향에서 입사하는 파랑이 1.27 ~ 1.42 m 정도로 비교적 높으며, 여름철에는 남남서에서 입사하는 파랑과 북동에서 입사하는 파랑이 1.07 ~ 1.17 m의 분포를 보이고 있다.

Fig. 1(b)는 2010년에서 2012년까지 기상청의 해양기상 관측자료를 활용한 동해안 주변 해역의 유의파고 자료분석을 보여주고 있다. 유의파고의 계절변화는 지점에 따라 다소 차이는 있으나, 전반적으로는 겨울이 가장 높고, 가을, 봄, 여름 순으로 높게 나타났다. 동해해역의 계절별 평균 유의파고는 봄 1.15 ~ 1.34 m, 여름 0.79 ~ 0.95 m, 가을 1.25 ~ 1.55 m, 겨울 1.66 ~ 1.92 m의 분포를 보였다[6]. 기상청의 평균 유의파고 자료와 한국해양연구원의 장기파랑 산출자료는 유사한 수치를 보이고 있음을 알 수 있다.

월성원자력발전소가 위치한 동해안은 해안선이 대표적으로 남북으로 형성되어 있으며 동쪽으로 바다가 위치해있다.

따라서 파에 의해 야기되는 흐름인 해빈류는 북동계열에서 입사하는 파랑의 경우 북쪽에서 남쪽으로 흐르는 해빈류를 형성하고, 남동계열에서 입사하는 파랑은 주로 남쪽에서 북쪽으로 흐르는 해빈류를 형성하게 된다. 부경대학교 수산과학연구소에서는 월성원자력발전소 주변 읍천 해변의 해빈류 및 천해파랑 관측을 수행하였다. 해빈류 결과를 보면 3월과 6월은 남동계열의 바람이 형성되어 북쪽으로 흐르는 해빈류를 형성하였으며, 9월과 11월은 북동계열의 바람이 남쪽 방향으로 흐르는 해빈류를 형성하였다[7]. 천해파랑 관측지점에서 파고 0.32 m, 주기 8.5 sec 정도의 파랑(6월)이 입사할 때, 해빈류의 평균속도는 0.16 m/s이고, 파고와 주기가 0.4 m, 4.4 sec의 파랑(9월)이 입사할 때의 해빈류 평균속도는 0.18 ~ 0.20 m/s 정도이다. 그리고 파고가 1.3 ~ 1.6 m, 주기가 10 sec 정도의 파랑(11월)이 입사할 때, 평균 해빈류의 속도는 0.26 ~ 0.28 m/s로 관측되었다[7].

Table 2. Hydraulic experiments of properties based upon a Froude's similarity law

	Prototype	Scale Ratio	Conversion Parameter	Conversion Method	Model	
basic variable	length (x)	2,400 m	1/400	L_r	X_r / L_r 2,400/400=4.00	6.00 m
	width (y)	1,600 m	1/400		Y_r / L_r 1,600/400=4.00	4.00 m
	depth (h)	20 m	1/60	Z_r	h / Z_r 20/60=0.33	0.33 m
hydraulic parameter	velocity (V)	10 m/s	1/60	$Z_r^{1/2}$	$V / Z_r^{1/2}$ 10/60 ^{1/2} =1.29	1.29 m/sec
	wave height (H)	10 m	1/60	Z_r	H / Z_r 10/60=0.16	0.16 m
	period (S)	67 sec	1/400, 1/60	$X_r / Z_r^{1/2}$	$\frac{S}{(L_r / Z_r^{1/2})} = \frac{67}{(400 / 60^{1/2})}$ =1.3 sec	1.3 sec

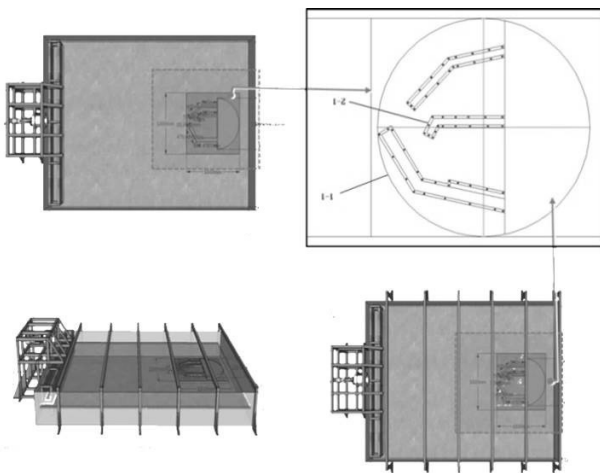


Fig. 2. A design of hydraulic experiment.

읍천 해변은 지형으로 인한 조류의 교란이 적고, 흐름방향에 있어서도 주로 남북방향의 분력이 탁월하여 유속이 발달하는 것으로 조사되었다. 해수 유동 패턴의 경우 창조시에는 북측에서 남쪽으로 흐르고 낙조시에는 이와 반대로 남측에서 북쪽으로 흐르는 흐름 분포를 보인다. 소조기시 평균유속은 계절(봄, 겨울)에 따라서 0.11 ~ 0.15 m/s 이며, 최대유속크기는 0.30 ~ 0.76 m/s, 대조기시 평균유속은 약 0.29 ~ 0.38 m/s이며, 최대유속크기는 약 0.29 ~ 0.78 m/s로 나타났다. 계절적으로 동해안에서 유황이 다소 다르게 나타나고

있는 분포를 보이며, 유동은 조석류의 영향보다는 일반적으로 알려져 있는 동해안의 해류성분에 기인한 것으로 사료된다[7].

제작된 수리모형 실험장치는 동해에 위치한 월성원자력 발전소 시설을 Froude 상사법칙을 적용하여 설계하였는데, 설계된 수리 모형장치는 실제 적용영역인 폭 1.6 km, 길이 2.4 km를 적용하여 수평축척 1/400, 수직축척 1/60의 폭 4 m, 길이 6 m, 수심 0.33 m의 왜곡도 6.6으로 Table 2과 같이 설계하였다. 실험대상 모형에는 파랑 재현 및 다채널 방식의 관류관을 통해 방출되는 흐름조건을 재현하기 위한 실험 장비를 Fig. 2와 같이 구축하였다.

수리학적 상사를 얻기 위해서는 원형과 모형 간에 기하학적 상사, 운동학적 상사, 동력학적 상사가 성립하여야 한다. 기하학적 상사는 원형과 모형의 모양이 기하학적으로 유사한 것을 뜻한다. 즉, 서로 대응하는 모든 길이의 비가 일정한 값을 갖는 것으로 X, Y, Z를 일정한 비율의 크기로 축소하는 것을 정상모형이라 하며, 연직방향 길이 비율과 횡단방향 길이 비율이 동일하지 않는 모형을 왜곡모형이라 한다. 특히, 수리 모형실험에서는 수평비와 수심비를 자연상태로 재현하는 것은 어려워 대부분 실내 수리 모형실험의 경우 연직축척과 수평축척을 달리하는 왜곡도(=수평축척/수직축척)를 도입하여 수평비와 수심비를 왜곡하게 된다[8].

왜곡모형은 정상모형에 비하여 모형이 차지하는 공간과 운영비용을 줄일 수 있고 모형에서 Reynolds 수를 증가

시킬 수 있으며 유속 및 수심 측정의 정확도를 향상시킬 수 있다. 하지만 이차류의 과대 발생과 와류의 왜곡, 경사의 증가로 인한 경사진 경계면에서 흐름 분리 발생, 유속의 횡단 분포 왜곡, 수리 구조물에서의 수두-유량 관계에 대한 변화-이차류(흐름축소, 확대, 만곡 등)의 과대 발생으로 수두 손실이 과대하게 발생할 수 있다[9].

왜곡 모형은 수심과 에너지 경사를 증가시켜 모형에서 흐름을 난류 상태로 유지시켜 운동학적 상사를 보장한다. 하지만 기하학적 상사와 동역학적 상사의 정확도는 떨어지게 된다. 왜곡모형에서 축적을 위해 사용하는 Froude 상사법칙의 정의는 식(1)과 같다.

$$Fr = \frac{V_r}{\sqrt{gL_r}} \quad (1)$$

여기서 $\sqrt{gL_r}$ 은 중력을 V_r 은 관성력을 나타낸다. 즉, 원형과 수리모형에서 수리학적 상사를 이루기 위하여 중력과 관성력의 비는 동일해야 한다. 모형에서 중력비와 유체의 밀도비는 원형과 모형에서 동일하므로 상사에 Froude 상사에 의해 축적을 결정할 경우에는 유체의 물리적 성질, 모형의 제작 가능성 및 비용을 고려하여 반영해야 한다. 축적이 너무 작을 경우 크기 효과에 의해 모형의 상사관계가 성립하지 않을 수 있으므로 적절한 축적을 결정하는 것이 중요하다. 왜곡모형에서 축적을 위해 사용하는 Froude 상사법칙에 의한 변수들의 축적비 관계는 Table 3에 제시하였다. 여기서 Froude 상사법칙에 의한 X_r 은 수평축적, Z_r 은 수직축적, L_r 은 길이축적을 의미한다.

2.2 실험조건 및 분석방법

본 실험은 흐름이 안정화되는 이후에 주입지점에서 추적자 이동을 파악하는 실험을 수행하였다. 추적자의 입자간 표면 마찰력에 의한 간섭을 줄이기 위하여 수조 내 계면활성제를 주입하여 추적자가 흐름에 지배되는 환경을 구축하였다. 항외로 빠져나가는 유출물을 산출하기 위하여 초기에 투입한 추적자의 면적을 계산 후 시간에 따라 항외로 빠져나가는 추적자의 입자 면적을 산출하여 누적 유출물을 산출하는 방법으로 실험을 수행하였다. 추적자 실험 조건은 Table 4와 같이 원전 주변의 방류관 시설에서 관로로 배출되는 희석 조건에 의한 오염물질 유출물과 조파 장치를 통해 입사되는 파랑에 따른 유출물을 각각 구분하여 실험을 수행하였다.

Table 3. Scaling ratio by Froude's similarity law

Parameter	Unit	Scale ratio		
		Froude law	Distortion Model	
Geometric properties	Length	m	L_r	$X_r Z_r$
	Area	m^2	L_r^2	-
Kinematic	Velocity	m/s	$\sqrt{L_r}$	$\sqrt{Z_r}$
	Discharge	m^2/s	$L_r^{5/2}$	$Z_r^{3/2} X_r$
	Time	s	$\sqrt{L_r}$	$\frac{X_r}{\sqrt{Z_r}}$

Table 4. Summary of experimental conditions

Experimental conditions	
Wave generator(mm/s)	50
Current generator(rpm)	10-30
Aquadopp	Observed 10 cm below the surface Cell size less than 3 cm
Flowtracker	Observed 10 cm below the surface
Experiment time	Each experiment 15 mins
Water depth	Open sea: 30 cm Inside of the port: 15 cm

추적자의 이동 흐름을 평가 및 검·보정 자료를 획득하기 위하여 각 실험별 Aquadopp profiler 및 Flowtracker를 이용하여 관측 자료를 수집하였다. 실험에 사용된 파랑·유속 측정용 Aquadopp profiler(2MHz) 음파 센서 1기와 Flowtracker은 초당 파랑 값을 관측하였다. 본 실험의 추적자는 표층에서의 이송 및 확산이 지배적이므로 표층 분석 결과를 제시하였다. Fig. 3은 수리실험실 실험 조건이며, 실험실 수심은 30 cm이다. 층별 유속관측 장비는 3 cm 간격으로 총 8개층 관측을 수행하였다. 두 장비는 계류 방식으로 거치하여 표층아래 5 cm 지점부터 관측을 수행하였으며, B1은 Aquadopp profiler의 위치를 보여주며 B2는 Flowtracker의 위치 정보를 보여주고 있다.

각 픽셀의 RGB 값을 통해 프로그램 코드로 이루어진 이미지 분석 방법을 이용하여 촬영된 이미지에서 항내의 추적자를 식별, 감지 후 유출물이 계산된다. 측정된 이미지는 1초마다 획득되며, 각 픽셀에 할당되어 있는 색상정보가 RGB 값으로 추출될 수 있어, 3차원 RGB 행렬을 이루게 된다.

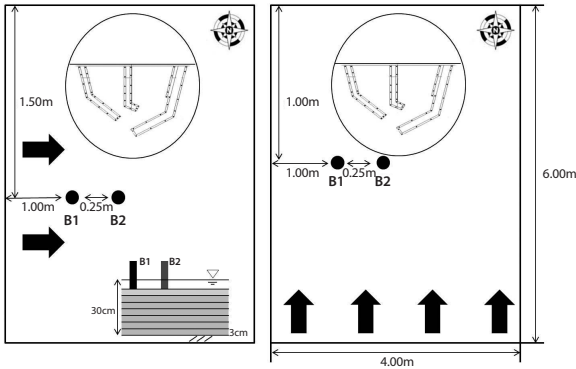


Fig. 3. The layout of the experimental component and equipment.

촬영된 이미지 중 전체 입자가 유의미하지는 않으므로 항외로 빠져나가는 입자는 제외하고 항내에 존재하는 입자만 경계 처리하여 색상 정보를 획득하였다. 그 결과 촬영된 이미지는 항외로 유출되는 입자의 정보를 추출할 수 있으며, Fig. 4는 각 실험별 시간에 따른 유출률을 산출하는 과정이다. 본 실험의 초기에는 다양한 입자 농도에 따른 항내의 유출률 실험을 수행하여, 흐름 및 파랑에 지배적인 환경에 적합한 농도 분포 실험을 수행하였다. 이후 동일한 실험 조건 하에서 흐름 조건 및 파랑조건 실험을 수행하여 데이터 결과의 편차가 최소인 실험 데이터를 분석하여 시간에 따른 유출률을 제시하였다.

3. 실험결과 분석

3.1 흐름조건 이송 확산 실험

본 실험에서는 수조 저면 흐름관에서 방류되어 확산, 이류 등의 과정을 거치면서 희석되는 조건으로 이는 원전 주변의 방류관 시설에서 배출되는 수리 실험조건이라 말할 수 있다. 흐름에 기인하여 항내 오염물의 유출 경향을 구체적으로 보기 위하여 좌측영역과 우측영역의 시간에 따른 유출 결과를 살펴보았다.

본 실험을 통해 입자의 유출 및 이동은 좌측항 내부에서 반시계 방향으로 순환 후 외부로 유출되었다. 하지만 우측항의 경우 좌측 영역에서의 추적자가 우측항으로 유입되어 표면의 유출률을 평가하는 분석에 한계가 존재했다. 파랑 실험의

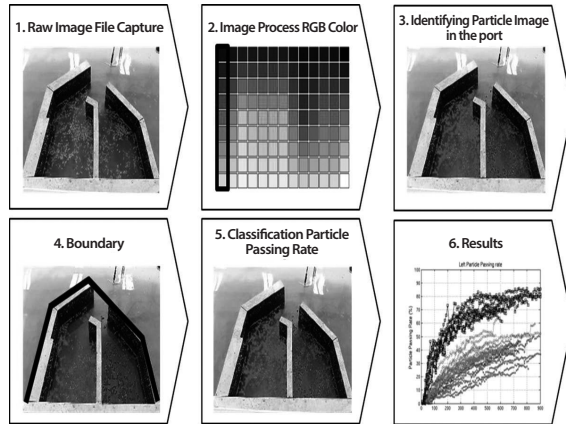


Fig. 4. Counting particles and flow rate using image processing.

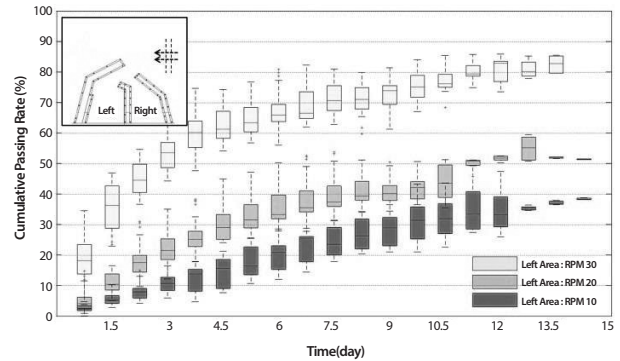


Fig. 5. Outflow rate of pollutants in the port for dilute conditions.

경우 수직으로 입사되는 파랑에 대해 항내 일부가 열려 있어 우측항의 해수교환이 비교적 크게 발생할 수 있지만, 희석 실험의 경우 수평으로 입사되는 흐름에 의해 우측영역이 정체되는 현상이 발생하였다. 따라서 Fig. 5는 유출의 좌측 영역만 고려하여 항내 오염물 유출률을 시계열로 제시하였다.

좌측 영역에서의 유출률은 모터의 회전속도는 30, 20, 10 rpm에 따라 기울기가 증가하는 결과를 나타내며, 지수적인 함수를 보이게 된다. 30 rpm의 유출률의 경우 유출부 근처에서 추적자가 재유입 또는 유출되는 영향으로 실험 결과에 따라서 10과 20 rpm에 비하여 상대적으로 데이터의 편차가 큰 결과를 보여주고 있다.

Fig. 6은 수직 층별 유속 및 표층 흐름 결과를 36개의 방위로 나누어 도시하였으며, 구조물을 기준이 정북방향으로 보정하여 관측하였다. 평균 유속은 방류관에서 분출되어 유입되는 펌프의 에너지로 인하여 B1 평균 유속의 크기는

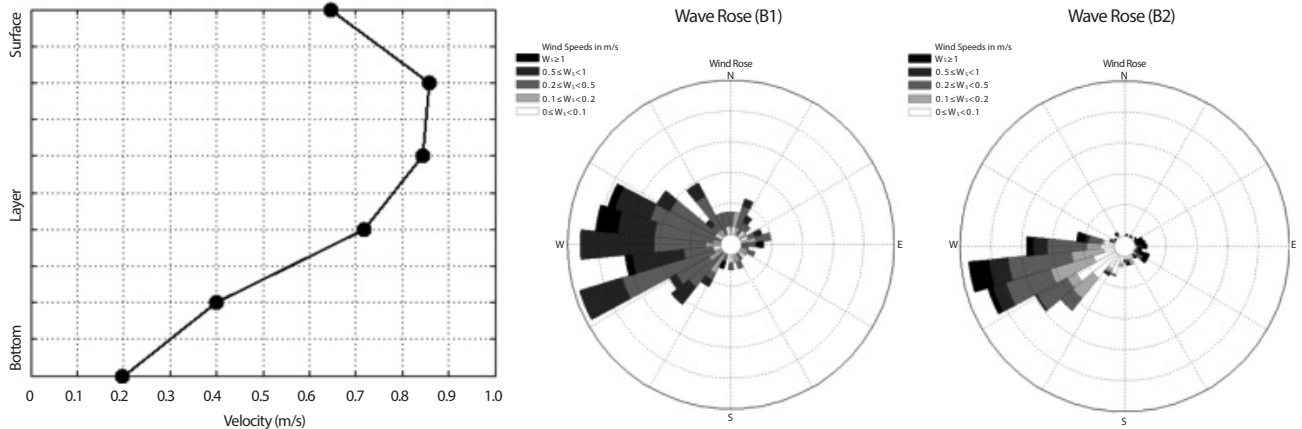


Fig. 6. Current rose and profiles of average velocity for the dilute conditions.

상대적으로 크게 나타나며, 방류관에서 멀어진 B2 지점에서는 상대적으로 평균 유속은 작게 나타났다. 회전속도가 30 rpm인 B1 지점과 B2의 표층에서의 유속(Froude 유속비)은 각각 0.43과 0.34 m/s로 관측되었다. 대표적인 흐름의 경우 구조물에 평행하게 흐르며, 이는 항내 유입되었던 해수의 질량이 항내를 순환하여 항외로 빠져나가는 흐름 패턴을 보여주는 결과를 나타내게 된다.

3.2 파랑조건 이송 확산 실험

월성원자력발전소는 주변의 파향별 발생 빈도는 북동계열에서 입사하는 파향이 19.42%, 남남서계열에서 입사하는 파향이 18.72% 그리고 북북동에서 입사하는 파향이 16.59%의 발생 높은 빈도를 보이나, 본 실험조건에서는 외해에서 관측된 주파향 방향보다는 실험 대상해역이 축소되었기 때문에, 유입되는 파향이 항 내부까지 파랑이 전달되는 남동계열에서 입사하는 파랑 조건으로 실험을 수행하였다. 본 실험을 통해 입자의 유출 및 이동은 항 내부에서 반시계 방향으로 순환 후 외부로 유출되는 추적자의 이동이 나타나며, 항 하단부에는 흐름의 영향이 미치지 않는 정체되는 영역이 나타났다.

Fig. 7은 입사되는 파랑에 의한 좌측과 우측 영역의 항내 오염물 유출률을 시계열로 제시하였다. 유출부 근처에서 항내로 추적자가 재유입 되거나 유출되는 영향으로 실험 결과에 따라서 데이터의 분산도가 크게 나타나고 있다. 입사되는 파고는 단파의 일정한 규칙적이지만 유입된 파가 상호 중첩되어 특정 주기에서는 추적자가 대량으로 유입 또는 유출되어

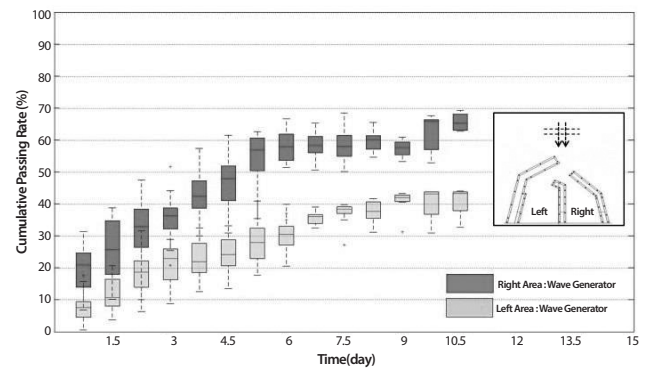


Fig. 7. Outflow rate of pollutants in the port for wave conditions.

변동폭이 큰 결과를 나타내는 것으로 추정된다.

Fig. 8은 수직 층별 유속 및 표층 흐름 결과를 총 36개의 방위로 나누어 도시하였다. 관측 지점에서의 대표적인 흐름의 경우 구조물에 직각이 되는 방향에서 입사되며, 항내 유입되었던 해수의 질량이 항내를 순환하여 항외로 빠져나가는 흐름 패턴을 보여주게 된다. B1 지점과 B2의 표층에서의 유속(Froude 유속비)은 각각 0.26 m/s, 0.13 m/s로 관측되었다. B2 관측 위치는 항내 유출입 부근으로 직립체가 파랑의 에너지를 반사시켜 유속 및 파향의 흐름 변화가 다소 크게 나타났다.

3.3 유출률 Fitting Curve

특정한 수치가 반복적인 실험 결과에서 유출되는 비율을 일수값으로 부여하여 각 실험에 대한 누적 추적자 유출률에

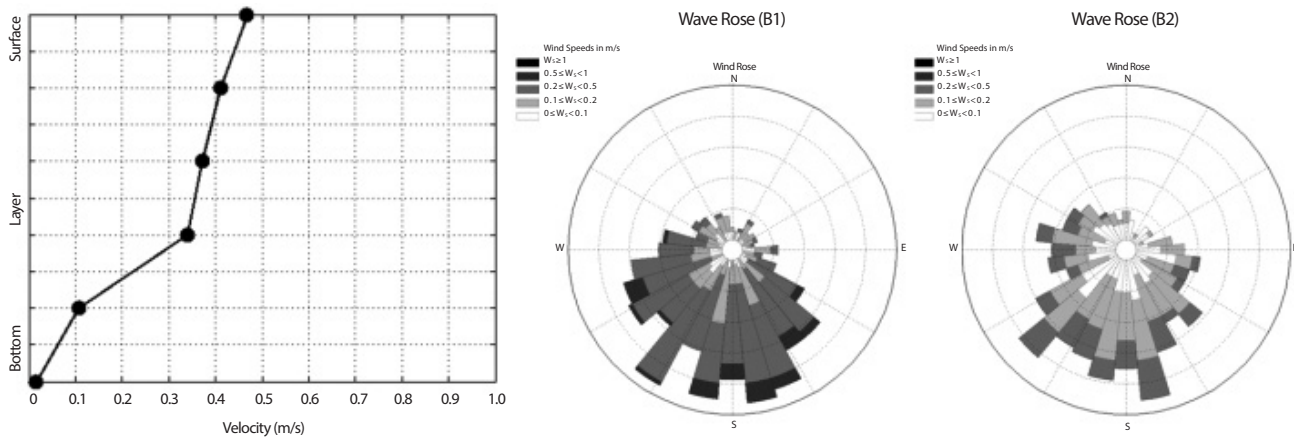


Fig. 8. Wave rose and profiles of average velocity for the wave conditions.

Table 5. Fitting-curve parameters in the experimental conditions

	Wave Condition Left Area (30 rpm)	Wave Condition Left Area (20 rpm)	Wave Condition Left Area (10 rpm)	Wave Condition Left Area	Wave Condition Right Area	
Parameter	t		1~15000			
	d	330	1750	4000	2000	800
	m			4		
	r	1/2	1	2	1.5	1/2
R2	0.8787	0.8427	0.8223	0.7062	0.7124	

대한 수식을 제안하고자한다. 본 식에서는 변수 시간(t)가 그에 대응하는 항내 유출률(Y_i)을 계산하기 위한 함수인 식(2)를 제시하였다.

$$Y_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t/r}{d/r}\right)^m\right] \quad (2)$$

식 (2)에서의 시간 계수는 실험조건하에서의 시간을 의미한다. 나머지 성분 r, d, m은 실험 정도 (R2)가 70% 이상으로 높은 수준을 만족하도록 파라메터 값을 찾을 때까지 반복적인 fitting을 한 결과를 Table 5에 제시하였다.

월성원자력발전소의 항내에 오염물질이 부하 되었을시 실험인자를 변화시켜가며 이송 및 확산 흐름 거동에 의한 좌측 영역의 유출률 및 fitting curve를 Fig. 9에 보여주고 있다. 흐름 관측의 경우 유입되는 모터의 회전 속도 30, 20, 10 rpm에서

좌측 항내 오염물이 50% 유출률에 도달하는 시간은 $Y_i = 2.70, 10.4, 26.39$ days를 보였다. 모터의 회전속도가 30인 실험에서 유출되는 감소 추세가 가장 뚜렷하게 나타났으며, 회전속도 10인 실험에서 기울기는 완만하였다. 그리고 각 실험의 유출률 기울기는 지수적인 함수분포를 나타내며, 오염물이 95% 유출률에 도달하는 시간은 회전속도 30, 20, 10 rpm에서 각각 $Y_i = 36.87, 180.30, 448.40$ days로 배출되는 결과를 보였다.

파랑 실험 조건의 경우 항내 부하된 오염물질의 좌측과 우측 영역의 유출률 및 fitting curve를 Fig. 10에 보여주고 있다. 파랑의 우측영역의 오염물이 50% 유출률에 도달하는 시간은 $Y_i = 4.59$ days로 나타났으며, 좌측영역의 오염물이 50% 유출률에 도달하는 시간은 $Y_i = 15.35$ days의 결과가 나타났다. 오염물질이 항내로 부하되어 오염물이 95% 유출률에

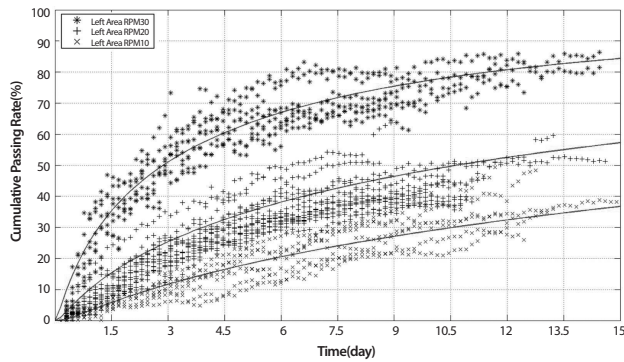


Fig. 9. Fitting-curve of exponential function for dilute conditions.

도달하는 시간은 우측과 좌측 각각 80.62, 301.5 days의 결과를 보여주었다. 향후 연구에서는 본 실험 결과가 지수 함수를 나타내는 기울기 양상으로 예측됨에 따라 파랑조건을 변화시켜 파고에 따른 항내 입자의 자유확산에 대한 평가가 필요하다고 사료된다.

이는 입사되는 파고가 작을 때는 이송에 대한 영향보다 확산에 대한 영향이 크며, 파고가 증가함에 따라 확산에 대한 영향 보다는 이송에 지배적이므로 항내의 입자의 유출이 지배적인 것으로 사료된다. 자유확산을 고려시에는 연안류 및 쇄파되는 파랑에 따라서 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문에 다양한 파랑 조건하에서 실험을 평가하는 것이 중요하다고 판단된다.

4. 결론

본 실험은 원자력 발전소 항내에 오염물질이 부하시 다양한 해양환경에 따른 항내 유출실험을 수행하였다. 항내추적자 각 수리 환경에 따라 유출률의 기울기는 다르게 관측되었으며, 방류 유속이 빨라지거나 파랑의 에너지가 높아지면 유출률의 기울기는 높아지게 된다. 각 실험의 결과를 회귀 분석을 통해 나타난 fitting curve는 지수함수를 보이게 된다. 시간에 따른 오염물 유출률 각 실험 결과는 아래와 같다.

흐름 관측의 경우 유입되는 모터의 회전 속도 30, 20, 10 rpm에서 좌측 항내 오염물이 50% 유출률에 도달하는 시간은 $Y_i=2.70, 10.4, 26.39$ days를 보였다. 모터의 회전속도가 30 rpm인 실험에서 유출되는 감소 추세가 가장 뚜렷하게 나타났으며, 회전속도 10 rpm인 실험에서 기울기는 완만하였다.

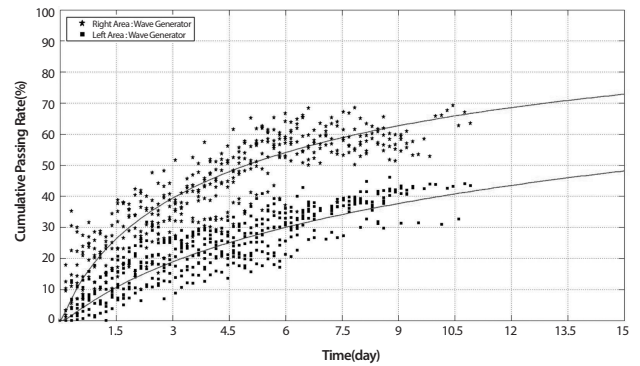


Fig. 10. Fitting-curve of exponential function for wave condition.

파랑 관측의 우측영역의 오염물이 50% 유출률에 도달하는 시간은 $Y_i=4.59$ days로 나타났으며, 좌측영역의 경우 $Y_i=15.35$ days의 결과가 나타났다. 수리실험 결과로부터 실제 월성원자력발전소 항내 오염물 부하시 좌측영역(발전소에서 바다방향 기준)보다는 우측영역에서 흐름이 원활하지 못해 오염물이 항내 우측영역에 정체할 가능성이 큰 것으로 파악되었다.

본 실험의 결과가 항내의 유출률의 복합적인 양상을 확인하기 위한 모형실험의 축척의 문제, 측정장비의 신뢰성 문제 등 많은 어려움을 내포하고 있는것이 사실이다. 현재의 실험은 많은 제한이 따를 수밖에 없으나 향후 확장된 수리 실험 설계를 통하여 현상을 가장 정확하게 재현할 수 있는 항내의 오염물 이동 특성에 대한 규명이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : NRF-2012M2A8A4025912, NRF-2015M2A2B2034282)

REFERENCES

- [1] H. B. Fischer, E. J. List, R. C. Y. Koh, J. Imberger, and N. H. Brooks, *Mixing in Inland and Coastal Water*, 30-102, Academic Press, New York (1979).
- [2] I.W. Seo, H.S. Kim, and D.G. Kim, "Experimental In-

- investigation of Mixing of Heated Water Discharged by Submerged Multiport Diffuser”, *J. of the Korean Soc. Civil Eng.*, 17(II-4), 335-346 (1997).
- [3] H.S. Kim, Feb. 1997. “Mixing Characteristics of Heated Water Discharged by Submerged Multiport Diffuser.” Seoul National University Library. Accessed Dec. 15 2015. Available from: <http://dcollection.snu.ac.kr:80/jsp/common/DcLoOrgPer.jsp?sltemId=000000078866>.
- [4] M.W. Kim, G.W. Jo, J.H. Maeng, T.S. Kang, and J.K. Kim, “Improvement Plan of Ocean Physics Assessment Technique for Power Plant Thermal Effluent”, *Korean Soc. Ocean Eng.*, 28(3), 245-253 (2014).
- [5] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT). Dec. 17 2010. “A Study on Reasonable Adjustment Plan on Ship Navigation Areas.” Accessed Jan. 5 2011. Available from: http://www.prism.go.kr/homepage/researchCommon/retrieveResearchDetailPopup.do;jsessionid=1E16878F791C190EA227B8D0AA5FB BB4.node02?research_id=1611000-201100065.
- [6] Y.H. Kang, H.B. Seuk, J.H. Bang, and Y.K. Kim, “Seasonal Characteristics of Sea Surface Winds and Significant Wave Heights Observed Marine Meteorological Buoys and Lighthouse AWSs near the Korean Peninsula”, *J. of the Env. Sci. Inter.*, 24(3), 291-302 (2015).
- [7] H.J. Seok, Aug. 30 2007. “A Study on the Erosion and Deposition in Eupcheon Beach.” Pukyong National University Library. Accessed Dec. 15 2015. Available from: <http://pknu.dcollection.net/jsp/common/DcLoOrgPer.jsp?sltemId=000001953834>.
- [8] S. Baranya and J. Jozsa, “Numerical and Laboratory Investigation of the Hydrodynamic Complexity of a River Confluence”, *Civil Eng.*, 51(1), 3-8 (2007).
- [9] I.Y. Cheon, K.C. Kim, J.L. Lee, and K.S. Suh, “Design and Construction of the Hydraulic Scale Model for Field Experiments”, *Korean Soc. Rad. Ind.*, 2(3), 97-103 (2008).