

위해도 기반 해상기름회수능력 배치모델 적용 및 유효성 평가

하민재* · 문정환** · 윤중휘***†

* 전남대학교 해양경찰학과 비전임교원, ** 한국해양대학교 대학원, *** 한국해양대학교 해양경찰학과

Application and Assessment on the Effectiveness of the Hazard-Based Deployment Model for Oil Recovery Capacity on Water

Min-Jae Ha* · Jung-Hwan Moon** · Jong-Hwui Yun***†

* Dept. of Coast Guard Studies, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

** Dept. of Coast Guard Studies, Graduate School of Korea Maritime & Ocean University, Busan 606-791, Korea

*** Dept. of Coast Guard Studies, Korea Maritime & Ocean University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 연구에서는 계층분석과정(AHP)을 이용한 위해도 기반 지역별 기름회수능력 설정 방법을 모델화하여 제시하였으며, 제시된 모델을 적용하여 지역별 기름회수능력을 설정하였다. 모델을 적용하여 설정된 지역별 기름회수능력의 유효성을 확인하기 위해 최대오염사고의 발생이 가능한 지역 중 해상방제장비 동원측면에서 상대적으로 불리한 대산·태안·평택지역에 최대오염사고를 가정하여 각 지역에 배치된 해상방제장비를 동원하여 해상 기름회수작업을 수행하는 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과 사고해역에서 3일 동안 해상에서 회수 가능한 기름의 양은 15,841kℓ로 계산되었는데, 이는 해상 기름회수 목표량인 15,000kℓ를 충족시키는 결과로 본 연구에서 제시된 모델이 실행 가능한 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 해상 기름회수능력, HBD 모델, 해양환경위해도, 최대오염사고, 동원 시뮬레이션

Abstract : In this study, the Hazard-based model to decide regional oil recovery capacity by using AHP is suggested and regional oil recovery capacity is calculated by applying the model. The simulation for oil recovery capacity by mobilization of regional oil recovery equipments is carried out to verify the availability of the model. The worst oil spill accident in Daesan-Taeon-Pyeongtaek region, which is located in geographically disadvantageous position among the regions that the worst oil spill accident may occur, is supposed for the simulation. As a result of simulation, the quantity of oil that can be recovered for three days on the scene of oil spill accident is worked out as 15,841 kℓ, which can satisfy the goal of national oil recovery capacity for the worst oil spill accident, therefore the model is verified as practicable.

Key Words : On-water oil recovery capacity, Hazard-based model, Degree of marine environmental hazard, Worst oil spill accident, Simulation of mobilization

1. 서 론

우리나라는 국가 경제발전으로 인하여 경제활동에 필요한 에너지 소비가 증가하고, 이에 따른 원유와 석유제품의 해상 운송도 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 해상을 통한 유류 수송량의 증가는 대규모 해양오염사고의 확률을 높이고 있으며, 1995년 발생한 Sea Prince호 오염사고와 2007년에 발생한 Hebei Spirit호 오염사고는 대형유류오염사고에 대한 대비·대

응의 중요성을 일깨워 주었다. 이러한 대형 해양오염사고들을 계기로 국가방제능력이라는 개념을 도입하여 우선적으로 부족한 방제장비를 단기간에 확보하도록 하였고, 국가방제능력은 해상 기름회수능력이라는 용어로 바뀌면서 오일붐 소요량, 임시저장탱크 소요량이 포함된 개념으로 확대되어 지역별로 배치수량이 설정되었다(Korea Marine Environment Management Corporation, 2011).

해양오염사고가 발생하면 필연적으로 해양환경에 영향을 미치게 되므로 환경적인 요소에 대한 고려 없이 사고의 원인적인 요소만을 고려하여 설정된 현행 지역별 기름회수능

* First Author : hmj153@naver.com, 051-410-4834

† Corresponding Author : jhyun@kmou.ac.kr, 051-410-4279

력 배치기준은 환경·경제적인 요소를 반영하여 설정할 필요가 있다(Ha and Yun, 2013). 따라서 본 연구에서는 이전 연구에서 제시한 위해도 기반 지역별 해상 기름회수능력 설정을 모델화하여 제시하고, 기름회수능력 동원 시뮬레이션을 통해 설정된 모델의 유효성을 평가하고자 한다.

2. HBD Model을 이용한 지역별 해상 기름회수능력 설정

2.1 기름회수능력 설정 모델링

지역별 해상 기름회수능력 모델은 이전 연구(Ha and Yun, 2013)에서 제안된 설정 과정을 본 연구에서 모델화하여 제시함으로써 특정 구역내의 지역의 배치량 산정에 이용될 수 있도록 하였다. 이 모델은 위해도 기반 배치 모델(Hazard-Based Deployment Model)이므로 첫글자를 따서 “HBD Model”로 명명하였다(Ha, 2014). HBD Modeling 과정을 종합적으로 설명하면 Fig. 1과 같다.

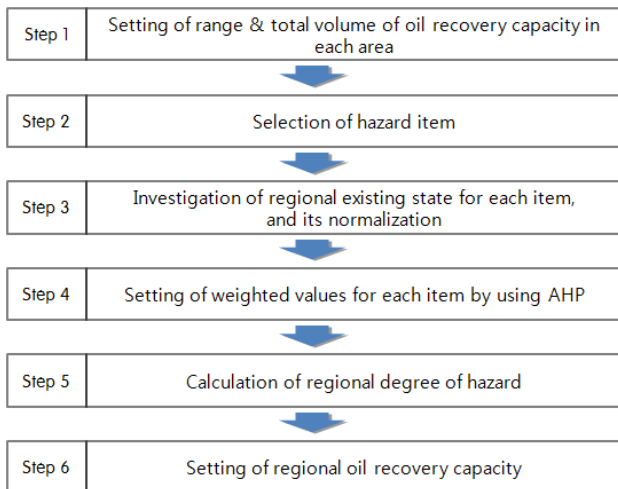


Fig. 1. Flowchart of HBD Model.

HBD Model에서 변수는 총 4개로, 특정 구역(area)내 배치할 해상 기름회수능력 총량, 위해도 항목(item)의 종류 및 개수, 지역의 위해도 항목별 현황, 위해도 항목별 가중치가 해당된다(Ha and Yun, 2013).

Step 1에서는 먼저 HBD Model의 적용을 위해 특정 구역에 배치시킬 해상방제장비에 의한 해상 기름회수 총량을 설정한다. Step 2에서는 HBD Model 적용에 필요한 위해도 항목을 설정하는데, 위해도 항목의 종류와 개수는 시대의 변화에 따른 중요도 변화에 근거하여 설정한다. Step 3에서는 Step 2에서 설정된 각 위해도 항목의 지역별 현황을 조사하여 정구

화한다. Step 4에서는 계층분석과정(Analysis Hierarchy Process; AHP)을 이용하기 위한 전문가 대상 설문조사를 실시하고, 이를 바탕으로 위해도 항목별 가중치를 도출한다. Step 5에서는 Step 3과 Step 4에서 도출된 결과들을 단일값으로 제시하여 이 값을 구역내 특정 지역의 해양환경위해도로 간주한다. Step 6에서는 Step 5에서 도출된 구역내 지역별 해양환경위해도 값과 구역내 배치할 해상 기름회수능력 총량을 곱하여 최종적인 지역 기름회수능력을 설정한다. 이와 같은 단계를 통하여 지역별 기름회수능력 설정량을 구하는 식을 정리하면 아래 식(1)과 같다.

$$H_j = \left[\sum_{i=1}^7 \left(\frac{n_{ij}}{\sum_{a=1}^m n_{ia}} \times A_i \right) \right] \times Q \quad (1)$$

단, H : 지역 기름회수능력 설정량

n : 위해도 항목에 대한 지역의 점수치

i : 위해도 항목 번호(i=1,2,3,...)

a : 구역(area)내 지역(region)의 번호(a=1,2,3,...m)

m : 구역(area)내 지역(region)의 수

j : 1,2,3,...m

A_i : 위해도 항목의 가중치

Q : 구역의 기름회수능력 총량

2.2 HBD Model을 적용한 지역별 기름회수능력 설정

1) Step 1 - 권역 설정(범위&기름회수능력 총량)

현행 지역별 기름회수능력은 전국을 3개의 권역으로 나누어 각 권역에 배치된 기름회수능력을 동원하여 예상 가능한 최대오염사고의 유출량인 15,000kl의 기름을 회수할 수 있도록 설정되어 있다. 최대오염사고시 동원시스템에 따라 각 권역에서 순차적으로 방제장비를 동원하여 방제작업을 수행하므로 각 권역에서는 해상방제량의 50%에 해당하는 7,500kl의 기름회수용량을 확보하는 것으로 하고 있다(Korea Marine Environment Management Corporation, 2011). 이와 같이 권역별 7,500kl의 기름회수능력 설정은 장비의 확보 측면에서 경제적이며 효율적이기 때문에 HBD Model 적용시 권역에 설정되어야 하는 기름회수능력 7,500kl를 지역별 위해도에 따라 지역별로 분산·배치하도록 설정하였다. 지역의 구분은 현행 기준을 동일하게 적용하여 3개의 광역권, 즉, 대산, 여수, 울산권역으로 구분하고, 각 권역 중심지역과 그 주변지역을 묶어 하나의 권역으로 편성하였다(Korea Marine Environment Management Corporation, 2011; Yun et al., 2010).

2) Step 2 - 위해도 항목 선정

기름회수능력 설정을 위한 위해도 항목은 크게 사고 개연성 요소와 사후 민감도 요소로 분류하였다. 사고 개연성 요소에는 기름물동량, 산업시설(저유소) 분포, 선박 입출항, 과거 해양오염사고가 해당된다. 사후 민감도 요소에는 양식어업 분포, 환경관리해역, 위탁시설(해수욕장)이 해당된다.

3) Step 3 - 지역별, 항목별 현황 조사

사고 개연성 항목의 지역별 현황의 경우, 기름물동량은 2012년 기준, 기름저장시설 현황은 2013년 기준, 입출항 선박척수는 2012년 기준, 과거 해양오염사고 현황은 2006~2011년 기준으로 하였다. 사후 민감도 항목의 현황의 경우, 양식어업 분포 현황은 2010년 기준, 환경관리해역 현황은 2013년 기준, 해수욕장 이용현황은 2010년 기준으로 하였다.

다음으로 계층분석과정 기법에서 대안들의 상대적 중요도는 그 합이 1이 되어야 하므로, 각 항목별 해당 권역내 지역들의 값의 합으로 나누어 정규화한다. 정규화된 값은 각 지역들의 항목별 위험도 점수를 의미한다.

4) Step 4 - 위해도 항목별 가중치 산정

계층분석과정(Analysis Hierarchy Process; AHP)은 문제를 계층구조로 만들어 각 계층의 쌍대비교를 통해 가중치를 설정하여 최하위 계층의 우선순위를 정하는 의사결정방법 중 하나이다(Park and Seol, 2010). 본 연구에서는 위해도 항목별 가중치를 산정하기 위해 계층분석과정을 이용하였다.

각 항목별 가중치를 도출하기 위해 계층구조를 구축하고, 해양오염방제 분야에 전문성을 지닌 정부, 공기업, 연구기관, 민간방제업체 종사하는 전문가 17명을 대상으로 조사를 실시하였다. 조사 결과 일관성 지수를 충족하는 10명의 쌍대비교결과를 바탕으로 하위 수준에서부터 단계별로 가중치를 구하였다.

5) Step 5 & 6 - 지역별 위해도 산정 및 기름회수능력 설정

위에 언급한 통계적인 지표값을 이용하여 계산한 각 항목의 지역별 위험도 점수와 계층분석과정 기법을 이용하여 얻은 각 항목에 대한 가중치를 종합한 단일 값으로 제시함으로써 각 지역에 대한 최종 위해도도를 도출한다. 도출된 최종 위해도 값에 따라 지역별 해상 기름회수능력을 Table 1과 같이 설정하였다.

HBD Model 적용을 통한 지역별 기름회수능력 설정은 현행 기름회수능력과 다소 차이를 보이는데, 이는 사고후 환경적 영향에 민감한 지역들의 기름회수능력이 현행 기준보다 높게 반영되었기 때문이며, 또한 일부 과도하게 설정된 지역의 기름회수능력이 사고후 환경적 영향에 민감한 지역과 권역의 중심지역으로 분산·집중되기 때문이다.

Table 1. Final degree of hazard and regional oil recovery capacity (Ha and Yun, 2013)

Area	Region	Final Weight (①)	Oil Recovery Capacity (①×7,500)	Current Standard	Difference
Daesan	Incheon	0.32	2,400	2,833	(-)433
	Daesan·Taean·Pyeongtaek	0.65	4,875	3,400	1,475
	Gunsan	0.03	225	1,267	(-)1,042
	Sum	1	7,500	7,500	0
Yeosu	Mokpo	0.08	600	2833	(-)2,233
	Wando	0.18	1,350	200	1,150
	Yeosu	0.61	4,575	4,200	375
	Jeju·Seogwipo	0.13	975	267	708
	Sum	1	7,500	7,500	0
Ulsan	Tongyeong·Masan	0.20	1500	533	967
	Busan	0.21	1,575	3,333	(-)1,758
	Ulsan	0.49	3,675	3,200	475
	Pohang	0.07	525	267	258
	Donghae·Sokcho	0.03	225	167	58
Sum	1	7,500	7,500	0	

3. 지역별 해상 기름회수능력 유효성 평가

3.1 유효성 평가방법

HBD Model에 따라 설정된 지역별 해상 기름회수능력의 유효성 평가는 해상방제장비 동원 시뮬레이션을 통하여 실시하였다. 동원 시뮬레이션을 위해 먼저 현행 기준에 따라 예상 가능한 최대오염사고가 발생할 수 있는 여수, 울산, 대산·태안·평택지역 중 대산·태안·평택지역에 유출량 회수 목표량인 15,000kl의 기름을 회수하는 것으로 가정하였다. 이는 실제로 가장 많은 양의 방제자원을 보유한 여수, 울산, 대산·태안·평택 세지역간의 해상거리를 감안하면, 방제자원의 동원 측면에서 가장 불리한 지역은 대산·태안·평택지역임을 알 수 있다. 따라서 동원 시뮬레이션은 대산·태안·평택 지역에서 기름유출을 가정하여 이의 회수를 위해 전국에 배치된 해상방제장비를 동원하여 3일 동안 실질적으로 회수가 가능한 기름의 양을 누적 계산하는 것이다. 이의 계산은 설정된 지역별 동원량을 사고지역에서의 실제 작업시간으로 나누어 시간당 기름회수량을 결정하고, 도착 후 매 시간마다 시간당 작업량만큼 회수하는 것으로 가정하여 각 지역별로 동원되는 해상방제장비에 의한 기름회수량을 누적·합산하여 최종적인 기름회수량을 산정한다.

해상방제장비는 원칙적으로 방제선에 의해 수송되는 것으로 하며, 이동시 방제선의 속력은 10 knot, 이동시 해상·기상상태는 양호한 것으로 가정한다. 사고시각은 오전 8시, 1일 작업

위해도 기반 해상기름회수능력 배치모델 적용 및 유효성 평가

시간은 작업자의 피로도를 감안하여 주간시간(08:00~18:00) 동안 8시간만 작업하는 것으로 가정하는데, 동원되는 장비는 계산상의 편의를 위해 사고지점 도착 후 다음 정시부터 작업을 개시하며, 야간에 도착할 경우 익일 오전 8시부터 작업을 개시하는 것으로 가정한다. 지역별 해상방제장비에 의한 해상 기름회수용량은 아래 식(2)에 따라 계산한다.

$$\text{회수량(kl)} = \text{지역 기름회수능력} \times \frac{\text{3일간실제작업시간}}{24} \quad (2)$$

지역별 해상방제장비는 모델에 따라 시간당 회수용량이 정해져 있는데, 현행 기준에 따라 3일(24시간) 동안 회수하는 기름의 양을 기름회수능력으로 볼 수 있다. 따라서, 지역별로 동원되는 해상방제장비의 실질적인 회수용량은 식(2)와 같이 24시간 대비 실제 작업시간을 기준으로 산정할 수 있다.

대산·태안·평택지역에서의 사고지점은 따로 지정하지 않고 지역 관할수역에서 발생한 것으로 가정하여 해상방제장비 동원에 따른 지역내에서의 시간차이는 두지 않으며, 지역간 거리는 국립해양조사원에서 발행한 해상거리표에 따른다(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2011).

3.2 기름회수능력의 유효성 평가

해상방제장비 동원에 따른 기름회수능력 계산 시뮬레이션은 대산·태안·평택 지역에서 발생가능한 최대오염사고인 45,000kl의 기름이 유출된 것으로 가정하여 해상에서 15,000 kl 회수를 목표로 실시하였다.

먼저, 해상거리표에 따른 대산과 각 지역간의 거리, 이 거리에 따른 방제선의 이동시간, 사고후 3일간 실제 작업 시간, 그리고 식(2)에 따라 동원되는 지역별 해상방제장비에 의한 실질적 기름회수량을 Table 2에 표시하였다. 지역별로 동원되는 해상방제장비에 의한 실제 작업시간은 주간시간(08:00~18:00) 동안을 기준으로 하였으므로 지역간 거리에 따른 사고해역 도착시각에 따라 차이가 있다. 이와같이 지역별 해상방제장비의 사고해역 도착시각에 따라 실제 기름회수작업 시간이 결정되고, 24시간과 실제 기름회수작업 시간의 비율에 따라 실질적인 기름회수용량을 계산하였다. 계산된 실질적 기름회수용량을 실제 기름회수작업 시간으로 나누어 지역별 해상방제장비에 의한 시간당 회수용량을 계산하고, 사고해역 도착 후 매시간마다 시간당 회수용량만큼 회수하는 것으로 간주하여 지역별로 동원되는 해상방제장비에 따른 회수량을 누적·합산하였다(Table 3).

Table 2. Mobilization of regional oil recovery capacity for max. oil spill accident in Daesan region

Area	Region	Distance from Daesan (n.mile)	Travel Time (hour)	Operation Time for 3 days (hour)	Oil Recovery Capacity (kl)	Actual Recovery Quantity (kl)
Daesan	Incheon	38	4	22	2,400	2,200
	Daesan·Taeon·Pyeongtaek	0	0	24	4,875	4,875
	Gunsan	96	10	20	225	188
Yeosu	Mokpo	163	17	20	600	500
	Wando	203	21	20	1,350	1,125
	Yeosu	277	28	14	4,575	2,669
	Jeju·Seogwipo	265	27	15	975	609
	Tongyeong·Masan	297	30	12	1500	750
Ulsan	Busan	334	34	12	1,575	788
	Ulsan	362	37	12	3,675	1,838
	Pohang	411	42	12	525	262
	Donghae·Sokcho	536	54	4	225	37

Table 3. Accumulated actual oil recovery amount in Daesan·Taeon·Pyeongtaek region

Region	Working Hour (hour)	Accumulated Actual Recovery Quantity(kl)
1st day	1	203
	2	406
	3	609
	4	1,419
	5	1,756
	6	2,150
	7	2,544
	8	2,938
2nd day	1	3,331
	2	3,725
	3	4,119
	4	5,072
	5	6,000
	6	6,928
	7	7,856
	8	8,784
3rd day	1	9,713
	2	10,641
	3	11,569
	4	12,497
	5	13,434
	6	14,372
	7	15,106
	8	15,841

대산과 전국 지역간의 거리를 기준으로 동원되는 해상방제장비에 의한 해상 기름회수 최종 누적량(Table 3)을 계산하면 15,841kℓ로 현행 해상 기름회수 목표량인 15,000kℓ를 충족시키는 것으로 나타났다. HBD Model에 의한 지역별 해상 기름회수능력 설정은 여수, 울산, 대산·태안·평택지역 중 해상방제장비의 동원 측면에서 상대적으로 불리한 지역인 대산·태안·평택지역에서 발생가능한 최대오염사고에 대하여 실제 해상에서 회수가능한 기름의 양이 현행 해상 기름회수 목표량인 15,000kℓ를 충족시키고 있으므로 유효한 것으로 확인되었다. 따라서 HBD Model을 적용한 지역별 해상 기름회수능력 설정은 실행가능한 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 계층분석과정(AHP)을 이용한 위해도 기반 지역별 기름회수능력 설정 방법을 모델(HBD Model)화하여 제시하였으며, 제시된 모델을 적용하여 지역별 기름회수능력을 설정하였다. 또한, 실제 설정된 지역별 기름회수능력의 유효성을 확인하기 위해 최대오염사고의 발생이 가능한 여수, 울산, 대산·태안·평택지역 중 해상방제장비의 동원 측면에서 상대적으로 불리한 대산·태안·평택지역에 발생가능한 최대오염사고를 가정하여 각 지역에 배치된 해상방제장비를 동원하여 기름회수작업을 수행하는 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과, 3일(24시간 작업) 동안 해상에서 회수가능한 기름의 양은 15,841kℓ로 해상 기름회수 목표량인 15,000kℓ를 충족시키는 결과를 보였다. 이와같이 실제 해상에서 회수가능한 기름의 양이 현행 해상 기름회수 목표량인 15,000kℓ를 충족시키고 있으므로 HBD Model에 따른 지역별 기름회수능력 설정은 유효한 것으로 확인되었으며, 따라서 HBD Model을 적용한 지역별 해상 기름회수능력 설정은 실행가능한 것으로 판단할 수 있다.

References

- [1] Korea Hydrographic and Oceanographic Administration(2011), Distance Tables, 2011 Edition.
- [2] Ha, M. J. and J. H. Yun(2013), “A Study on the Setting of Regional Oil Recovery Capacity On Water in Korea”, The Korean Society of Marine environment & Safety, Vol. 19, No. 6, pp. 606-611.
- [3] Ha, M. J.(2014), “Development of Optimum Deployment Model for Marine Spill Response Equipments based on Marine Environmental Hazard”, Doctoral dissertation, Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, Busan.

- [4] Korea Marine Environment Management Corporation(2011), A Study on the Measure for the Advanced Concept of Oil Recovery Capacity & Advance, pp. 23-46.
- [5] Park, Y. M. and H. J. Seol(2010), A Priority Evaluation Methodology for Spin-off of Defense Technology : Patent Analysis and AHP Approach", Military Operations Research Society of Korea, Vol. 36, No. 3, pp. 15-27.
- [6] Yun, J. H., S. W. Kim, S. G. Cook, J. H. Moon and M. J. Ha(2010), “A Study on Computation of Appropriate On-water Recovery Capacity for Catastrophic Spill”, The Korean Society of Marine Environment & Safety, Spring Symposium, pp. 31-37.

원고접수일 : 2014년 08월 19일

원고수정일 : 2014년 10월 10일 (1차)

2014년 10월 23일 (2차)

게재확정일 : 2014년 10월 28일