



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

부산해역에서의 해양오염사고 신속대응을
위한 해상방제장비 배치에 관한 연구

A Study on Allocation of On-water response equipment for
effective and efficient response in Busan coastal region



2018年 2月

한국해양대학교 대학원

해양경찰학과

김 태 형

本 論文을 金泰亨의 工學碩士 學位論文으로 認准함.



委員長 李 殷 邦 (인)

委 員 鞠 承 淇 (인)

委 員 尹 鍾 輝 (인)

2018年 2月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
제 1 장 서론	1
1.1. 연구의 배경 및 목적	1
1.2. 연구의 방법 및 구성	2
제 2 장 부산 해역의 특성분석	5
2.1. 부산 해역 특성 분석	5
2.1.1. 지리적 특성	5
2.1.2. 입출항 선박현황	6
2.1.3. 항만 및 기름저장시설 현황	6
2.1.4. 어장 및 양식장 현황	8
2.2. 부산해역 해양오염사고 분석	9
2.2.1. 해양오염사고 현황 분석	9
2.2.2. 규모별 해양오염사고 현황 분석	9
2.2.3. 위치별 해양오염사고 발생현황 분석	10
제 3 장 해상방제의 이론적 고찰	12
3.1. 해상방제의 개요	12
3.1.1. 해상방제의 정의	12
3.1.2. 해상방제방법의 종류	12
3.2. 국가별 해상방제장비 소요량 산정 및 대응시간 분석	17
3.2.1. 미국	17
3.2.2. 일본	23
3.2.3. 캐나다	25
3.2.4. 우리나라의 기준	29
3.2.5. 국가별 비교 분석	34

제 4 장 부산해역 해양오염사고 신속 대응을 위한 해상방제장비배치	37
4.1. 해양오염사고 신속 대응을 위한 해상방제장비 배치 방법	37
4.2. 해상방제장비 배치방법의 이론적 고찰	38
4.2.1. Voronoi Diagram	38
4.2.2. 대응시간	41
4.2.3. Hazard Based Deployment Model(HBD Model)	42
4.3. 부산해역 해양오염사고 신속대응을 위한 해상방제장비 배치장소 선정	44
4.3.1. Voronoi Diagram 작도	44
4.3.2. 해상방제장비 배치장소의 우선순위 선정	45
4.3.3. 대응시간을 이용한 최종 해상방제장비 배치장소 선정	46
4.4. 부산해역 해상방제장비의 적정배치량 산정	47
4.4.1. 지역별 현황 분석	47
4.4.2. 해상방제장비 적정배치량 설정	55
4.5. 결과	56
제 5 장 해상방제장비 배치적정성 평가	58
5.1. 배치 적정성 평가지역	58
5.2. 배치 적정성 평가방법	59
5.3. 배치적정성 평가	61
5.3.1. 부산신항 도선점에서의 지역 최대유출사고	61
5.3.2. 가덕도등대 동방 6마일 위치에서의 지역 최대유출사고	65
5.3.3. 부산 VTS 보고지점의 동쪽 끝단에서의 지역 최대유출사고	69
5.4. 평가 결과	73
제 6 장 결 론	74
참고문헌	77

List of Tables

Table 1	Removal Capacity Planning Table (Open ocean & Offshore)	18
Table 2	Removal Capacity Planning Table	19
Table 3	Emulsification factors for Petroleum oil cargo groups	19
Table 4	On-Water Oil Recovery Resource Mobilization Factors	20
Table 5	Response Times in Hours for each tier and location	22
Table 6	Response Times in Hours for Average Most Probable Discharge	22
Table 7	Maximum Quantity of Oil Spilled for each Tier	25
Table 8	Percentage of Tiered Response Capability	26
Table 9	Response Time for each tier	28
Table 10	Regional expected maximum quantity of oil spilled Computation Criteria	29
Table 11	Area Classification	30
Table 12	MARPOL 73/78 Annex I Reg. 24 & 25	30
Table 13	Expected maximum quantity of oil spilled at Busan	33
Table 14	Comparison of On-water Spill recovery capacity criteria and Response time	34
Table 15	Example Final Hazard Value for Busan	43
Table 16	Priority of On-water recovery equipment allocation	45
Table 17	The Quantity of Oil Transported(Y2012~Y2016, 5years Average)	48
Table 18	The Regional State of Oil Storage Facility(Y2016)	49
Table 19	The Number of Ship' s Entry(Y2012~Y2016)	50
Table 20	Spill Volume of Past Oil Spill Accident(Y2012~Y2016)	51
Table 21	The State of Aquaculture(Y2017)	52
Table 22	The regional State of Particularly Management Sea Area	53
Table 23	The Number of Amenity Users(Y2016)	54
Table 24	Normalization Value	54
Table 25	Final Weight by Analysis Hierarchy Process	55
Table 26	Final Hazard Value	56
Table 27	Optimal Allocation of On-water Spill Response Equipment	57
Table 28	Parameter of time computation for On-water response	60
Table 29	Distance between 1st case spill location and each Port	61

Table 30 Present and Optimal total effective recovery capacity of each port .. 63
Table 31 Distance between 2nd case spill location and each Port 66
Table 32 Distance between 3rd case spill incident location and each Port .. 70
Table 33 Result of time computation for On-water response 73



List of Figures

Fig. 1	Number of Spill Incident at Korea water for 10Y	1
Fig. 2	Range of Busan coastal region in this paper	3
Fig. 3	Flow chart of study	4
Fig. 4	Geographic features and bathymetric chart in Busan coastal region	5
Fig. 5	Number of Spill Incident at Busan region for 5Y	9
Fig. 6	Percentage of Oil spill incident by spill quantity	10
Fig. 7	Location of Spill Incident at Busan region for 5years(2012~2016)	11
Fig. 8	Release Chemical dispersant over an oil spill	14
Fig. 9	In-situ burn after Deepwater Horizon oil spill in 2010	16
Fig. 10	Flow chart of calculating the WCD planning volumes	18
Fig. 11	Sequence for Optimal Allocation of On-water Spill Response equipment	37
Fig. 12	A Basic Voronoi Diagram	38
Fig. 13	Component of Voronoi Diagram	40
Fig. 14	Sequence of making Voronoi Diagram	40
Fig. 15	Voronoi Diagram of Busan coastal region	44
Fig. 16	Location of Oil Incidents (2012~2016)	45
Fig. 17	Coverage of Selected deployment location	46
Fig. 18	Location of Oil Spill Simulation	58
Fig. 19	Response time of present allocation(1st)	62
Fig. 20	Response time of alternative allocation(1st)	62
Fig. 21	On-water response time of present allocation(1st)	64
Fig. 22	On-water response time of alternative allocation(1st)	64
Fig. 23	Comparison of On-water response time(1st)	65
Fig. 24	Response Time of Present Allocation(2nd)	66
Fig. 25	Response Time of Alternative Allocation(2nd)	67
Fig. 26	On-water response time of Present Allocation(2nd)	68
Fig. 27	On-water response time of Alternative Allocation(2nd)	68
Fig. 28	Comparison of Total Response Time(2nd)	69
Fig. 29	Response time of present allocation(3rd)	70

Fig. 30 Response time of alternative allocation(3rd) 71
Fig. 31 On-water response time of Present Allocation(3rd) 72
Fig. 32 On-water response time of alternative allocation(3rd) 72
Fig. 33 Comparison of On-water response time(3rd) 73



부산해역에서의 해양오염사고 신속대응을 위한 해상방제장비 배치에 관한 연구

Kim, Tae Hyung

Department of Coast Guard Studies
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

우리나라는 해양에서 발생하는 오염사고를 대응하기 위한 대비태세로 해상방제장비를 주요항만에 배치하고 있다. 그러나 주요항만에서 떨어진 곳에서 사고가 발생하게 되면 장비의 이동시간이 많이 소요되어 초동대응이 늦어지고, 이로 인해 사전에 막을 수 있는 추가 피해의 원인 될 수 있다. 따라서 사전에 막을수 있는 피해를 방지하기 위해서 해당 해역의 지리적, 사회적, 환경적인 특성을 파악하여 현행보다 더 신속하고 효과적으로 해양오염사고를 대응할 수 있는 방법이 필요하다.

특히 선박의 통항량과 선박사고가 전국에서 가장 많아 유류유출사고가 발생할 개연성이 높은 부산 해역은 2007년 부산신항이 건설되면서 항계가 좌 우로 확대되고 부산의 서쪽해역에 초대형선박의 통항량이 증가하면서 사고 발생 가능성이 높아지고 사고 대응 범위가 늘어났다. 그럼에도 불구하고 부산 서쪽 해역의 해양오염사고에 대응하기 위한 해상방제장비를 따로 배치하지 않고 있어 사

고 발생시 부산 북항이나 마산항에 배치되어 있는 장비를 동원해야함으로 신속한 대응을 하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 해양유출사고 발생 위험요소가 잠재하고 있고, 사고 대응 범위가 넓어 초동대응이 지연되는 부산해역을 대상으로 신속하고 효율, 효과적인 해상방제장비 배치안을 제시하였다.

우선 부산해역의 특성을 지리적, 사회적, 환경적으로 분석하고 과거 해양오염 사고통계자료를 이용하여 사고의 유형을 파악하였다. 그리고 국가별 해상방제장비 소요량 및 대응시간을 비교 분석하여 대응시간 적용 및 지속적인 지역별 가상최대유출량 확인의 필요성을 도출하였다.

항만의 위치를 이용하여 Voronoi Diagram을 작도하고, Voronoi Diagram의 특성, 과거 사고발생위치와 대응시간을 이용하여 부산해역의 주요 사고장소와 최근접하면서 신속하게 방제장비를 동원할 수 있는 배치장소로 부산항, 마산항, 부산신항, 다대포항을 선정하였다.

그 다음 해양환경위해도를 기반으로 한 HBD Model을 이용하여 선정된 항만별 해상방제장비 배치비율을 계산하였다. 이 배치비율에 최대유출사고 발생시 해상기름회수용량을 곱해 해상방제장비 배치량을 제시하였고, 이를 부산해역 유출사고 신속대응을 위한 해상방제장비 배치안으로 제시하였다.

제시한 배치안의 적정성 여부를 판단하기 위해 VTS 통항보고지점내의 해역중 최대유출사고 발생 가능성이 높고 신속한 대응이 어려운 위치 3곳을 대상으로 해상방제시간 산정방법을 통해 현행배치와 비교하였다. 그 결과 1번째와 2번째 위치에서는 대응시간과 해상방제시간이 감소하는 것으로 나타났고 마지막 위치에서는 대응시간은 동일하고 해상방제시간이 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제시한 해상방제장비의 배치는 부산해역의 해양오염 사고를 신속하게 대응하기위한 효과적인 배치안이라 판단할 수 있으며, 신속한 대응을 통해 해상방제시간을 감소시킴으로써 방제효율의 증대와 오염사고로 인한 환경, 사회적 피해 저감에 도움이 될 것으로 예상된다.

KEY WORDS: On-water response equipment 해상방제장비; Allocation 배치; Response time 대응시간; Voronoi Diagram 보로노이 다이어그램

A Study on Allocation of On-water response equipment for effective and efficient response in Busan coastal region

Kim, Tae Hyung

Department of Coast Guard Studies
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

In Korea, on-water response equipment are allocated in major ports to respond to an oil spill. However, if the oil spill occurs away from the deployed port, it will take a long time to move equipment and delay the initial response, which may cause additional damage that could be prevented in advance. Therefore, in order to prevent damage that can be prevented in advance, it is necessary to study a method to respond to the oil spill efficiently and effectively.

Especially, since the Busan New Port was operated from 2007, the harbor limit has been expanded and the marine traffic volume has increased in the coastal region adjacent to Busan. As a result, the risk of the oil spill increased and the response area expanded. Nevertheless, it is difficult to respond efficiently and effectively due to lack of additional

measures.

Therefore, this paper is intended to provide a method on allocation of on-water response equipment for efficient and effective response in the Busan coastal region where the potential risk of the oil spill currently exists and initial response is expected to be delayed due to wide range of oil spill response.

Firstly, the geographical, social and environmental characteristics of the Busan coastal region were analyzed and the types of oil spill incidents were identified using statistical data. In addition, by comparing the criteria of required oil recovery capacity and response time of each country(USA, Canada, and Japan), the necessity of suggestion for applying the response time and continuously checking the expected oil spill amount in the worst case discharge of each region was derived.

Next, Busan port, Masan port, Busan New port and Dadaepo port were selected as the deployment location in order for on-water response equipment for efficient and effective response by analyzing and utilizing the characteristics of Voronoi diagram, the locations of past oil spill incidents, and required response time.

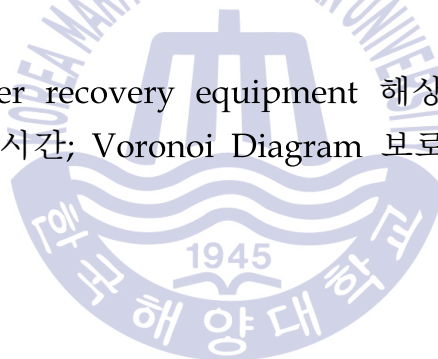
Thirdly, ratio of allocation of the on-water response equipment for each port was derived through the HBD Model which was based on the marine environmental hazard. The required oil response equipment satisfying the oil recovery capacity has been suggested by the multiplication of the forementioned ratio and the recovery capacity in case of the worst oil spill incident, and this has been proposed as allocation of on-water response equipment in order for the efficient and effective response to incidents in the Busan coastal region

Lastly, in order to assess the applicability of the proposed allocation, the proposal has been compared with three locations where there were

relatively high risks of the worst oil spill incidents and difficult response operations are anticipated in those cases. As a result, the first and second location indicated the reduction in the time of the response and the time of the completion of on-water response to the incidents, and the last location indicated the same required time of the response, but reduction in the time of the completion of on-water response.

In conclusion, it is found that the suggested method on allocation of on-water response equipment could be applied efficiently and effectively in order to respond to oil spill incidents expected in the Busan coastal region, and it is anticipated that the method would help the enhancement of on-water response efficiency by reducing the time of on-water response and reduction of environmental and social damage caused by the oil spill incidents.

KEY WORDS: On-water recovery equipment 해상방제장비; Allocation 배치; Response time 대응시간; Voronoi Diagram 보로노이 다이어그램



제 1 장 서 론

1.1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 석유자원의 고갈문제와 환경문제를 해결하기 위해 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획을 수립하는 등 지속가능한 국가경제 발전을 위해 신재생에너지 사용비중을 확대하려는 노력을 지속하고 있다(김유정, 2005; 산업통상부, 2014; 한국에너지공단, 2016). 그럼에도 불구하고 BP p.l.c.(2017)에 따르면 2016년도 우리나라의 일평균 석유소비량은 276만 배럴로 세계 8위를 차지하였고 그 소비량은 지속적으로 증가하고 있다. 그리고 석유소비량에 더불어 석유수입량 또한 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 해상을 통한 원유 및 석유정제품의 운송도 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이와 같이 해상을 통한 유류 운송량의 증가는 자연히 해양오염사고의 발생 가능성을 높이고 있으며, Fig. 1과 같이 매년 200건 이상의 중·소형 유출사고와 Sea Prince호, Hebei Spirit호 그리고 우이산호 해양오염사고와 같은 대형사고가 지속적으로 발생하고 있는 실정이다.

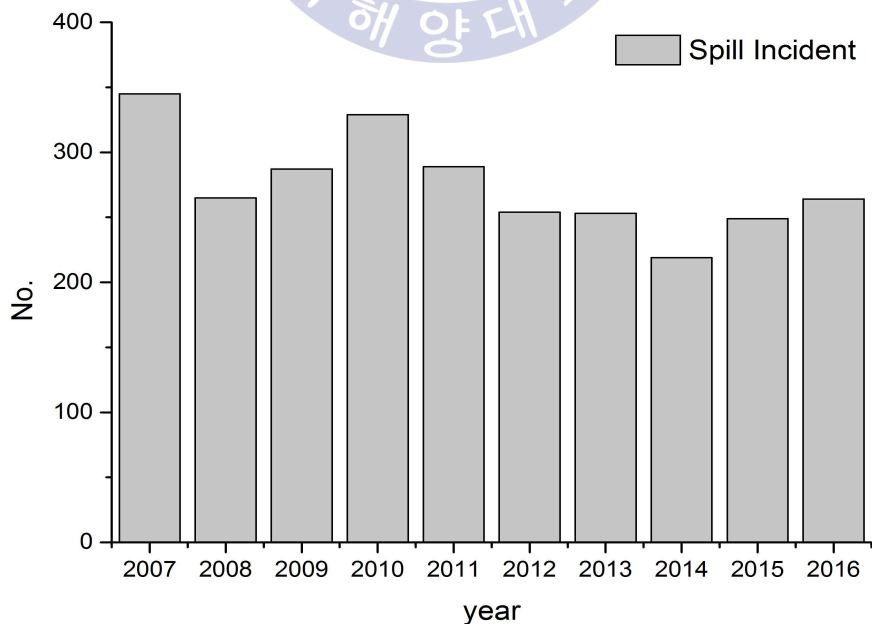


Fig. 1 Number of Spill Incident at Korea water for 10Y

특히, 1995년 여수 앞바다에서 발생한 Sea Prince호의 대형 해양오염사고를 통해 기름유출사고에 의한 경제적·환경적 피해의 심각성을 인식하였고, 이에 분산되어 있던 방제업무를 해양경찰청으로 일원화하였다. 그리고 해양경찰청은 대형 해양오염사고에 대비하기 위해 국가긴급방제계획과 지역긴급방제실행계획을 수립하였고, 전문방제기관의 필요성을 인식하여 해양오염방제조합(현 해양환경관리공단)을 설립하여 해양선진국과 같이 민간이 해양오염사고에 대응할 수 있도록 체제를 구축하였다. 그리고 2010년 이후 국가방제능력에 대한 개념을 지역방제체제로 전환하고, 각 지역(주요 항만) 별 해상방제장비 배치수량을 산정하여 방제대비태세를 강화하였다. 그러나 방제장비를 주요항만에만 배치하고 있어, 방제장비가 배치되어 있는 항만과 멀리 떨어진 지역에서 해양오염사고 발생 시 장비 준비 및 이동시간으로 인해 초동대응이 늦어지고, 이에 따라 사고 초기의 대응을 놓침으로 유출량의 증가 및 오염범위가 확대되면서 사전에 막을 수 있는 막대한 추가피해의 원인이 될 수 있다. 따라서 이러한 추가 피해를 방지하기 위해서는 해양오염사고 발생시 신속하고 효율·효과적으로 대응할 수 있도록 적정 위치에 적정량의 방제장비를 배치하는 것이 요구된다.

이와 관련하여, 본 연구에서는 공간에 대한 수학적/기하학적 개념의 Voronoi Diagram과 방제대응시간을 산정·적용하여 현행 지역별 해상방제배치기준에 따라 우리나라의 최대 항만인 부산해역에 배치되어 있는 해상방제장비를 관할수역내의 임의의 지점에서 사고가 발생할 경우 가장 신속하고 효과적으로 대응하는데 적합한 해상방제장비 분산배치방법을 추구하기 위한 연구를 수행하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 구성

본 연구는 우리나라 해상방제장비 배치장소 중 통항량이 가장 많고 항계의 길이가 가장 길고 항계 내 2개의 대규모항만이 위치하며, 해양오염사고 대응구역이 이분화되는 부산해역을 대상으로, Voronoi Diagram과 과거 오염사고 위치를 이용하여 기존의 방제장비 배치장소를 포함한 해상방제장비 배치장소를 선정한 후 대응시간을 이용하여 앞서 정한 배치장소 중 최적의 배치장소를 선정한다. 그리고 선정된 배치장소에 필요한 해상방제장비 배치량은 HBD Model¹⁾을

통해 산정하여 부산 해역에서 발생하는 해양오염사고를 신속하게 대응하기 위한 해상방제장비 배치를 도출한다. 이 때 부산해역은 Fig.2 와 같이 해상교통관제센터 보고지점 내 지역으로 한정한다.



Fig. 2 Range of Busan coastal region in this paper

본 연구는 총 6장으로 구성되어 있으며 그 내용은 다음과 같다.

제2장에서는 해상방제장비 배치를 위해 부산해역의 지리적·사회적·환경적 특성을 분석하였고, 부산해역의 사고 유형을 파악하기 위해 과거 해양오염사고 통계자료를 이용하여 규모 및 위치별로 분석하였다.

제3장에서는 본 연구의 대상이 되는 해상방제의 정의 및 방제방법을 이론적으로 고찰하고 국가별 해상방제장비 소요량 및 대응시간을 비교·분석하여 대응시간의 필요성과 환경변화에 따른 유출사고 규모 변화에 대응할 수 있도록 지속적인 가상최대유출량 확인의 필요성을 도출하였다.

제4장에서는 Voronoi Diagram, 주요 사고위치와 대응시간을 이용하여 부산해역

1) 하(2014)가 제시한 모델로, 기름회수능력 설정 기준에 환경·경제요소를 추가 반영하여 도출한 해양환경위해도를 기반으로 지역별 해상방제장비 배치량을 계산하는 모델

의 오염사고 신속대응을 위한 배치장소를 선정하였고, 선정된 배치장소에 배치할 해상방제장비의 적정량을 HBD 모델을 통해 산정하여 부산해역에서 발생하는 해양오염사고를 신속하게 대응 할 수 있는 해상방제장비 배치안을 제안하였다.

제5장에서는 제4장에서 제안한 해상방제장비 배치안의 적정성을 검증하기 위한 장으로써, 본 연구에서 도출한 배치와 현행배치에 대한 해상방제시간을 산정방법에 따라 도출하였다. 그리고 각각의 해상방제시간을 비교하여 배치의 적정성을 평가하고자 하였다.

마지막으로 제6장에서는 결론으로 우리나라의 기존 해상방제장비 배치 해역 및 항만에 추가하여 선박 및 저장시설로 인해 해양오염사고 발생 가능성이 있는 다른 항만 및 해역으로 확대의 필요성을 강조하고 본 연구에서 제안한 오염사고 신속대응을 위한 배치에 대해 재정리하였다.

Fig. 3은 연구의 흐름을 나타낸다.

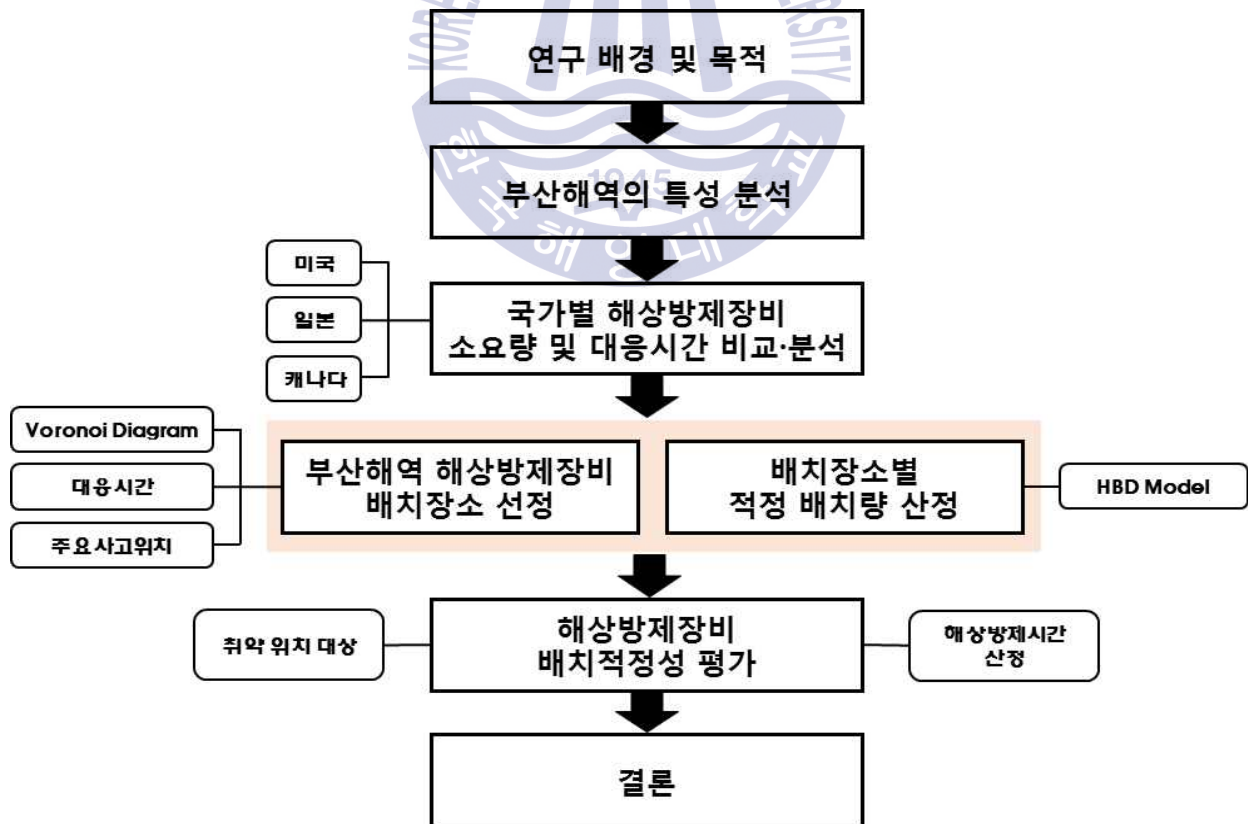


Fig. 3 Flow chart of study

제 2 장 부산 해역의 특성분석

2.1. 부산 해역 특성 분석

2.1.1. 지리적 특성

부산해역은 우리나라 남동쪽에 위치하고 있으며 Fig. 4와 같이 동부지역은 비교적 단조로운 해안선을 가지고 있고, 서부지역은 복잡한 해안선을 가지고 있다. 부산 동부해역의 수심은 외해로 갈수록 급격히 깊어지는 특징을 보이며, 연안에 인접한 해역에서만 10m 이내의 얕은 수심을 보이고 육지에서 20km 이상 벗어나면 대부분 100m 이상의 깊은 수심을 보인다. 서부해역의 수심은 동부해역과 달리 비교적 완만하게 깊어지는 특징을 보이고 연안에서 남동쪽으로 갈수록 점차 깊어 진다(해양경찰청, 2015; 해양조사원, 2016).

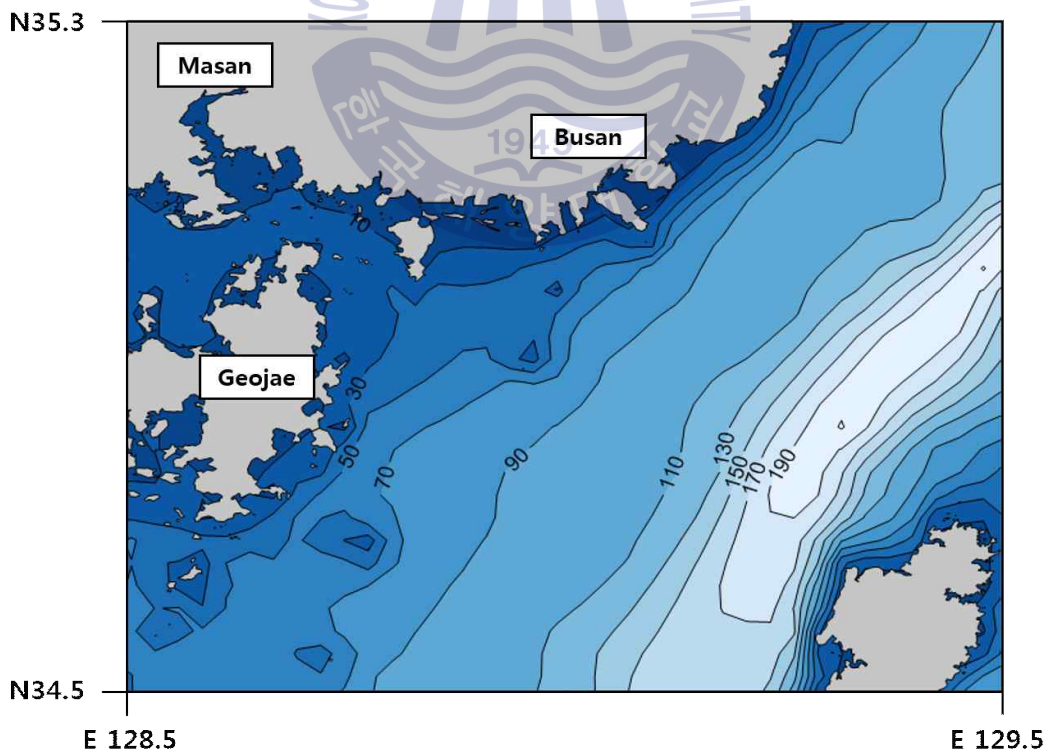


Fig. 4 Geographic features and bathymetric chart in Busan coastal region

2.1.2. 입출항 선박현황

최근 5년간(2012~2016년) 부산해역에 입항한 선박을 해운항만물류정보센터(SPIDC) 통계자료를 이용하여 선종 및 톤수별로 조사하였다(SPIDC, 2017). 5년간 부산해역에 입항한 선박은 총 246,879척으로 우리나라 전체의 24.9%를 차지하고, 가장 많은 선박이 입항하는 것으로 나타났다. 5년간 부산해역에 입항한 선박을 선종별로 분석한 결과 유류유출사고 발생빈도가 높은 위험물 적재선박이 59,633척으로 24.1%를 차지하고 있으며, 이 중 원유 운반선이 3,107척, 석유정제품 운반선 49,643척이고 케미칼 운반선이 5,999척이며, LPG 및 LNG선이 884척으로 나타났다. 그리고 선박을 규모별로 분류하여 분석한 결과, 1천톤 미만의 선박이 116,345척(47.1%)으로 가장 많았고, 그 다음으로 1천톤 ~1만톤 미만의 선박이 78,352척(31.7%)을 차지하고 있고, 1만톤 이상의 선박은 52,182척(21.2%)으로 나타났다.

통계자료에서 부산해역의 입항선박은 중소형 선박이 대부분을 차지하고 있으며, 원유 운반선, 케미칼 운반선 등과 같은 위험물 운반선의 입항 수는 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

2.1.3. 항만 및 기름저장시설 현황

부산항은 우리나라 제1의 항만이며, 우리나라 총 해상수출의 약 24%, 컨테이너 화물의 약 75%, 전국 수산물 생산량의 약 21%을 처리하고 있으며 크게 북항, 남항, 감천항, 다대포항 그리고 신항으로 구분할 수 있다(SPIDC, 2017 ; 부산광역시, 2017).

부산항은 201척의 선박이 동시에 접안할 수 있는 30,709.4m의 안벽시설과 연간 3억 5천만톤을 처리할 수 있는 하역능력을 갖추고 있다. 부산 북항에는 여객부두로는 국제여객부두, 연안여객부두, 크루즈부두와 1부두 그리고 2부두가 있으며, 약 3,900m에 이르는 안벽을 갖추고 있어 200톤급 소형선박에서 17만톤급 대형선박까지 고루 접안 할 수 있다. 자성대부두인 5, 6부두는 5만톤급 선박

4척과 1만톤급 선박 1척을 동시에 접안할 수 있고, 연간 170만 TEU 컨테이너 하역능력을 가진 부두로서 1,447m 길이의 안벽을 갖추고 있다. 우암부두인 7부두와 우암부두는 5천톤급 선박 4척, 1만톤급 선박 1척, 1만5천톤급 선박 1척 그리고 2만톤급 선박 1척이 동시에 접안할 수 있고, 연간 30만 TEU의 컨테이너 하역능력을 가진 부두로서 1,174m 길이의 안벽을 갖춘 중소형 컨테이너 부두이다. 신선대부두는 5만톤급 선박 5척이 동시에 접안할 수 있고, 연간 200만 TEU의 컨테이너 하역능력을 갖춘 컨테이너 전용부두로 1,500m 길이의 안벽을 갖추고 있다. 감만부두는 5만톤급 선박 4척이 동시에 접안할 수 있고, 연간 컨테이너 하역능력이 156만 TEU이며 1,400m 길이의 안벽을 갖추고 있다. 신감만부두는 2002년 개항하였으며, 5만톤급 선박 2척과 5천톤급 선박 1척이 동시에 접안할 수 있는 826m 길이의 안벽을 갖춘 컨테이너 부두로서 연간 78만 TEU의 컨테이너 하역능력을 갖추고 있다. 기타 일반 부두로는 8부두, 연합부두, 동명부두, 용호부두, 감만시민부두, 관공선부두와 양곡부두 등이 있다. 부산 신항은 현재 신항 1부두~5부두가 있으며, 총 6,850m에 이르는 안벽을 갖추고 있어 2만톤~15만톤급 대형 컨테이너선이 접안할 수 있고, 연간 약 1,278만 TEU의 컨테이너 하역능력을 갖추고 있다. 감천항과 다대포항에는 감천 중앙부두, 감천제1부두~7부두와 관공선부두 그리고 다대부두가 있으며, 1,000톤급 선박에서 3만톤급 선박까지 고루 접안할 수 있는 시설을 갖추고 있다. 부산해역의 계류시설 중 유류유출사고 발생빈도가 높은 위험물운반선의 전용계류시설은 총 8개(북항 4개, 감천항 4개)로 선박 11척을 동시에 접안할 수 있다. 연간 100만톤 이상의 기름을 취급하는 계류시설은 북항에 2만톤급 선박이 계류할 수 있는 용호부두의 GS칼텍스(주) 부산저유소 부두, 용호 부두의 현대오일뱅크(주) 부산저유소 부두, 영도구 봉래동 SK에너지(주)부산물류센터 부두 그리고 영도구 동삼동의 (주)미창석유공업 부두가 있고, 감천항에는 감천항 제6부두의 (주)모든 부두가 있다. 이에 추가하여 하역작업을 위한 대기나 연료유를 수급 등을 위한 묘박지는 북항, 남항, 수영만, 감천/다대항 그리고 부산신항에 위치하고 있으며 총 21개로 동시에 123척 정박 가능하다(부산항만공사, 2017; RCP, 2015).

부산항의 항로는 1항로 ~ 3항로의 3개 항로가 운영되고 있고, 부산신항의 진입

수도인 가덕수도가 있다. 제1항로는 북항 입출항로로서 생도 북동쪽 약 2마일 부분에서 시작되어 북항 안쪽으로 연결된다. 제1항로의 입구에는 삼각형 모양의 통항분리해역이 설정되어 있으며, 동측의 입항항로와 서측의 출항항로로 나누어져 있다. 제2항로는 남항의 입구에 설정되어 있고, 제3항로는 감천항 입구에 설정되어 있으며, 가덕수도는 거제도 북동부와 가덕도와 사이에 있는 수도로서 부산신항, 마산항과 진해만을 들어가기 위한 진입수도이다.

부산해역의 기름저장시설은 총 16개소로 224개의 탱크가 있으며, 총 저유용량은 약 43만kl이다. 부산북항의 주요 기름저장시설은 현대오일뱅크(주) 저유소, GS칼텍스(주) 부산물류센터, SK에너지(주)부산물류센터, (주)미창석유공업 등으로 감천항의 주요 기름저장시설은 (주)모든, 부산탱크터미널 등이 있다.

2.1.4. 어장 및 양식장 현황

부산해역의 동부 연안은 수심이 깊고 암반질의 저질 영향으로 보구치, 전갱이 등과 같은 외해성 어류가 대부분인 반면에, 서부연안은 사질점토성 저질의 영향으로 도다리, 놀래미, 송어 등과 같은 저서성 어류가 대부분이다. 어업형태는 주로 양식어업으로 이루어져 있으며, 그 중 해조류 양식이 대부분을 이루고 있다(RCP, 2015). 부산해역의 양식어장은 부산시 양식어장 예찰결과에 따르면 총 174건에 면적은 1,234.1ha이다. 양식업종별 현황은 가덕도 동부해안에 해조류양식이 62건으로 대부분을 차지하고 있으며, 그 외 어류, 복합양식 등이 행해지고 있다.

2.2. 부산해역 해양오염사고 분석

2.2.1. 해양오염사고 현황 분석

Fig. 5는 5년간(2012~2016년) 발생한 부산해역 해양오염사고 건수를 나타낸 그래프이다(SPIDC, 2017). 5년간 총 315건이 발생하였고, 연평균 63건 정도 발생하고 있다. 2013년이 71건으로 가장 많이 발생하였고, 이 후 점차 사고발생수가 줄어들어 2016년에는 53건 발생하였다.

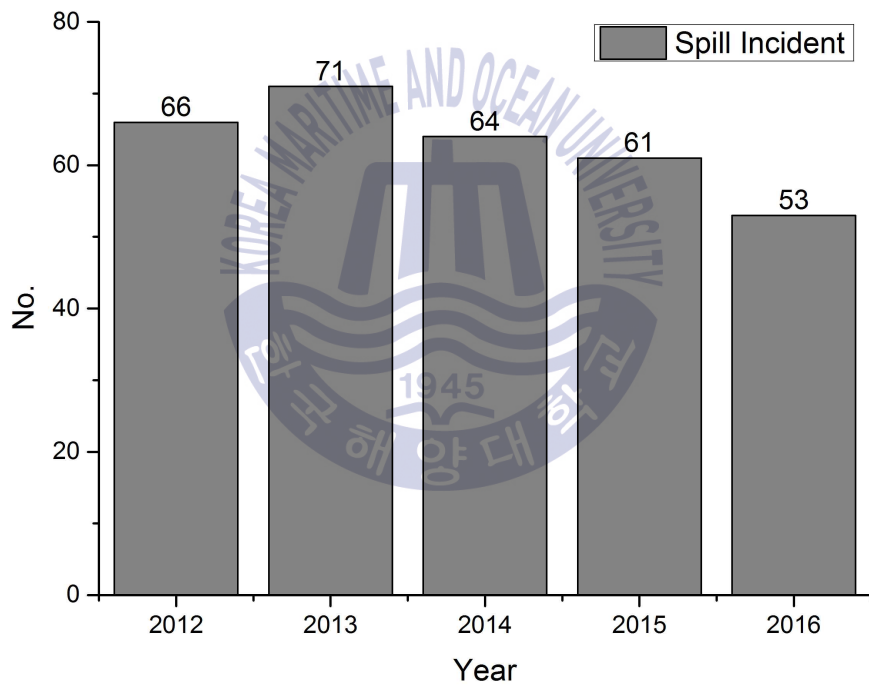


Fig. 5 Number of Spill Incident at Busan region for 5Y

2.2.2. 규모별 해양오염사고 현황 분석

Fig. 6은 5년간 부산해역에서 발생한 해양오염사고를 규모(유출량)별로 구분하여 나타낸 그래프이다(SPIDC, 2017). 5년간 발생한 사고는 315건이며, 총 유출량은 1,010kl이다. 유출량 100kl미만의 소형오염사고가 약 98.4%로 대부분을 차지

지하고 있고, 유출량 100kl 이상 1,000kl미만의 중형오염사고가 2건(0.6%) 발생하였으며, 1,000kl이상의 대형오염사고는 발생하지 않았다. 부산해역에는 소형 유출사고가 대부분이지만, 과거 사례를 보면 1995년 북형제도 남방 1마일해상에서 발생했던 제1유일호 사고유출량 2,392kl와 같은 대형오염사고도 발생한다.

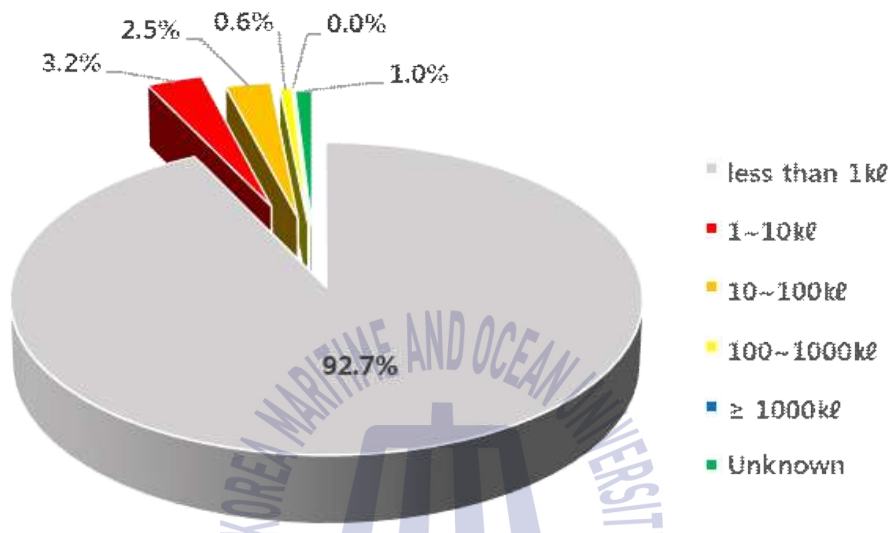


Fig. 6 Percentage of Oil spill incident by spill quantity

2.2.3. 위치별 해양오염사고 발생현황 분석

Fig. 7은 5년간 부산지역에서 발생한 해양오염사고 위치를 나타내는 지도이다. 발생한 사고 위치는 항만내 부두, 북항 제1항로, 남항내 해역 및 입구 주변 해역 등으로 항만내 뿐만 아니라 부산해역의 곳곳에서 사고가 발생하는 것을 알 수 있다. 대부분의 사고가 항만내의 부두 인근 장소에서 발생하였고, 이는 하역작업시 유출사고 발생가능성이 가장 높은 것으로 판단 할 수 있다. 그리고 항만 밖에서 발생한 사고는 남항입구에서 가장 많았으며, 이는 대기선박의 묘박지가 설치되어 있어 많은 선박이 정박하고 있고, 선박통항량이 많아 사고발생이 많은 것으로 판단된다. 사고발생수는 북항(남항 포함), 감천항, 부산신항 순으로 많았다.



Fig. 7 Location of Spill Incident at Busan region for 5years(2012~2016)



제 3 장 해상방제의 이론적 고찰

3.1. 해상방제의 개요

3.1.1. 해상방제의 정의

해상에서 기름유출사고가 발생하면, 부유 유출유의 확산 또는 분산을 방지하고 유출유로 인한 환경, 사람, 재산 등의 위험을 최소화하기 위하여 당시의 상황을 종합·분석 후 최적의 방제방법을 선택하여 해양오염방제조치를 실시한다. 윤종휘(2013)는 해양오염방제를 협의적 의미와 광의적 의미로 나누었다. 바다에 유출 기름 등 유해물질을 해상 및 해안에서 회수·제거하는 활동(대응)을 협의적 의미의 해양오염방제라 하였고, 협의적 의미의 해양오염방제에 추가하여 예방, 대비활동까지 포함한 것을 광의적 의미의 해양오염방제라 하였다. 일반적으로 해양오염방제방법은 자연방산, 해상방제, 해안방제로 나눌 수 있으나, 본 논문에서는 방제방법 중 해상방제만을 한정하여 살펴보았다.

해상방제란 해상에서 이루어지는 모든 방제활동의 통칭이며 협의적 해상방제는 해상에서 이루어지는 유출사고 대응활동을 의미하고 광의적 해상방제는 해상에서 발생될 수 있는 유출사고를 미리 예방·대비하고, 그 사고발생시 해상에서 대응활동까지 포함한 것이다.

3.1.2. 해상방제방법의 종류

해상방제방법의 종류에는 오일붐과 유희수기에 의한 기계적 회수, 유흡착재의 사용, 유처리제 및 화학약제의 사용, 미생물 살포, 현장소각 그리고 자연방산 등이 있다(ITOPF, 2014; 윤종휘, 2014). 이 항의 해상방제방법은 협의적 해상방제의 방법을 의미하고 이를 설명하였다.

(1) 기계적 회수(Mechanical Containment & Recovery)

기계적 회수는 해면상의 기름을 오일뿔²⁾으로 포집한 후 유회수기(skimmer)로 회수하여 이송펌프를 통해 기름저장탱크로 이송하는 방법이다.

기계적 회수는 해양환경에서 기름을 물리적으로 제거하여 환경피해 방지 또는 최소화하는데 가장 이상적인 방법으로 여러 국가에서 1차적으로 채택하고 있다(ITOPF, 2014). 기계적 회수를 하기 위해서는 오일뿔, 유회수기, 저장장치, 이송펌프 등의 장비가 필수적이며, 미국, 일본, 캐나다와 같은 해양선진국에서는 기계적 회수에 필요한 장비 별 소요량을 규정하고 있다. 그러나 기계적회수의 경우 그림과 같은 특징과 단점이 있어, 이 방법을 채택할 경우에는 수량이 충분하고 적합한 타입의 오일뿔과 유회수기의 보유 및 이 장치를 운용하기 위한 충분한 방제선, 방제요원과 기름저장탱크의 확보, 유출유의 물리적 특성 및 상태와 해양·기상상태 등과 같은 조건을 고려하고 평가한 후에 방제전략을 수립하고 방제작업을 시행해야한다.

기계적회수시 사용되는 장비는 해면상의 유출된 기름을 포집하는 오일뿔과 포집된 기름을 회수하는 유회수기, 회수된 유출유를 임시로 저장하는 기름저장탱크 그리고 기름저장탱크로 이송하는 이송펌프가 있다.

(2) 화학적 유처리제(Chemical dispersant)

유처리제는 계면활성제로 유화·분산 작용을 이용하여 해상의 유출유를 해수 중에 미립자로 분산시키는 화학처리제이며 Fig. 8과 같이 선박이나 항공기를 통해 살포한다. 유처리제는 고점도 및 고착화된 에멀션은 분산시키지 못하기 때문에 풍화과정이 시작되기 전에 적용시켜야 효과적이고, 또한 유출유가 민감 지역에 도달하기 전에 유처리제를 적용시켜야 한다.

이 방제방법은 유출유의 에멀션을 억제시키고, 표면적을 증가시켜 수중에서 신속히 희석되고 생분해될 수 있게 해주며, 수면에 접촉하는 동물 및 맹그로브와 같은 민감 연안 자원의 오염 손상을 감소시키는 장점이 있다.

2) 우리나라에서는 오일펜스로 명하나, 본 논문에서는 영문명과 가깝게 오일뿔이라 함

그러나 유처리제를 통해 기름이 분산되어 수주내의 생물과 간석지 바닥에 서식하는 생물과 같이 유출유로 인해 직접적으로 오염되지 않은 생물에게도 영향을 준다. 이와 같은 유처리제의 해양환경 및 생물에 미치는 영향 때문에 많은 국가에서 유처리제 사용을 제한 또는 승인 받도록 의무화하고 있다. 최근 유처리제 사용이 유출초기에 가장 효과적인 점을 감안하여 수심, 이안거리 및 장소의 민감정도 등을 고려하여 현장책임자의 판단에 의해 사용할 수 있거나, 또는 지역방제전문가와 상의하여 사용 여부를 신속히 결정할 수 있도록 유처리제 사용 제한을 완화하는 추세이다.



Fig. 8 Release Chemical dispersant over an oil spill (Source : USCG, KCG)

(3) 유흡착재(Sorbent)

유흡착재는 기름을 흡착 또는 흡수하여 회수하는 물질로서, 일반적으로 방제 작업 과정의 마지막에 사용되거나 유회수기 사용이 어려운 지역, 소형 유출 사고 그리고 어장이나 습지 같은 환경민감해역에서 다른 방법으로 방제하기 곤란한 경우 등에 사용된다.

그러나 최근에 우리나라를 포함한 일부 국가에서 방제 초기를 비롯하여 방제 과정 중 기계적 회수 장비보다 유흡착재를 더 자주 사용하나 해상에서 발생한 기름유출 사고의 1차적 방제수단으로 유흡착재를 사용할 경우 수면에 떠 있는 유흡착재를 통제하기 어렵고 유회수기의 작업을 방해할 가능성이 있으며 외력의 영향을 받아 유막을 부수어 원래 유출 상태보다 통제하기가 더 어려워져 방

제 작업의 효율을 떨어트릴 수 있다(ITOPF, 2014). 그리고 오염물질을 흡착한 흡착제는 반드시 전량 수거하여 방치로 인한 추가 오염과 피해가 발생하지 않도록 해야 된다. 또한 수거 작업으로 인해 많은 인력이 필요하고 과도한 폐기물을 생성함으로써 방제비용을 증가시키는 등의 2차적 문제를 발생하므로 이 문제를 최소화할 수 있는 방식으로 적절히 사용되어야 한다.

유흡착제는 종류에는 천연유기질 유흡착제, 천연무기질 유흡착제 그리고 합성유기질 유흡착제가 있으며, 종류별 특성이 다르기 때문에 유흡착제를 사용할 경우 기름의 흡착 및 흡수율, 기름 흡착 후의 수면상 부상시간, 시간경과 후 침강여부, 회수 용이성, 처리 용이성 등을 고려하여 선택해야한다(윤종휘, 2014; 하민재, 2014).

(4) 현장소각(In-situ burning)

오염이 발생한 해역의 수면상에 잔존해 있는 유출유를 내화용 오일붐으로 포집하여 현장에서 태움으로써 유출유를 제거하는 방법을 현장 소각이라 한다. 사고 초기에 부유성, 인화성 기름을 태움으로써 해안에 부착되는 유출유의 양을 감소시켜 민감한 해안 생태계를 보호하는 해상방제방법이다. 현장소각은 다른 방법에 비해 비교적 단순하고 경제적인 방법이지만, 소각의 안전성과 효율적인 적용을 위해서는 오염현장의 해양환경에 따라 많은 제약을 받는다(윤종휘, 2014). 현장소각의 효율에 영향을 미치는 요소는 수온, 풍향·풍속, 파고, 유막 두께 그리고 기름의 상태 등이 있다.

Benner(1990)의 실험과 Allen(1990)의 실험 결과에 의하면 현장소각방법을 이용한 경우 많은 양의 유출유가 제거되어 다른 방제방법에 비해 효율면에서 유리한 것으로 나타났으며, 현재 환경에 미치는 영향 또한 작을 것으로 추정되어 해상방제수단으로서 관심이 높아지고 있다. 현장소각은 1989년 Exxon Valdez호의 사고에 처음으로 사용되었으며 그 효과도 입증되었고, 이후 Fig. 9와 같이 2010년 Deepwater Horizon 사고에서도 사용하였다.

현장소각이 유출유 제거에 효과적이지만, 소각에 의해 발생한 발암성분 및

중금속과 같은 연소 생성물에 의해 해양 및 육상의 환경, 안전, 공중에 영향을 미치는 단점이 있어, 현장소각 적용 전에 이를 충분히 고려해야 한다.



Fig. 9 In-situ burn after Deepwater Horizon oil spill in 2010 (Source : NOAA)

(5) 미생물분해 촉진제 살포

미생물분해 촉진제를 살포하여 유출유 분해를 촉진시켜 방제하는 생물학적인 방법이다. 이 방법은 기름저장탱크나 오수처리시설에 들어있는 유출유를 분해하는 데에는 상당히 효과적이거나 해양에서 사용할 경우 촉진제에 포함되어 있는 박테리아배양균, 영양염 등이 급속히 희석되어 분해 효과가 매우 낮아진다 (Fingas et al, 1990 ; 윤중휘, 2014).

미생물분해 과정은 매우 천천히 진행되고 주변 해수온도, 영양염 및 용존 산소량에 따라 그 효과가 달라진다. 이 때문에 미생물분해 촉진제 살포를 통한 방제방법은 온난수와 같이 특정조건에서만 효과적으로 사용되었다.

미생물 분해에 사용되는 촉진제에는 영양염, 효소, 박테리아배양균, 특수유전자 변형물 등이 있다(윤중휘, 2014).

3.2. 국가별 해상방제장비 소요량 산정 및 대응시간 분석

3.2.1. 미국

미국은 오염행위자 방제원칙을 적용시켜, 해상에서 오염물질의 유출사고가 발생할 경우 이를 즉각 대응하기 위한 대비태세의 일환으로 기름저장시설 및 선박의 소유자 또는 운용자에게 계약 또는 기타 승인된 방법을 통해 최악유출사고(Worst Case Discharge ; WCD)에 대응할 수 있는 충분한 수량의 인적·물적 방제자원을 사전에 확보하도록 해양오염방지법(OPA 90)과 연방법령집 33편 155장에 규정되어 있으며 이를 의무화하고 있다.

(1) 해상방제장비 소요량 산정

미국의 최악유출사고시 해상방제기름회수량 산정방식은 33CFR Part 155의 Appendix B에 제시되어 있다. 이에 따르면 Fig. 10 및 식 (1)과 같이 계산되어 지고 그 과정을 설명하면 다음과 같다. 당해 해역을 운항중인 유조선의 적재화물 전량이 유출된 것으로 가정하고 유종 및 위치에 따른 해상방제 백분율(Table 1)을 적용하여 해상방제 기름회수량을 산정한다. 그리고 위의 해상방제 기름회수량에 유종별 에멀션 계수(Table 2)를 곱하여 최종 해상방제 기름회수량을 구한다. 그리고 최종 해상방제 기름회수량에 단계별 방제장비 동원율(Table 3)을 곱하여 최종 WCD 단계(Tier 1, 2, 3) 별 1일 해상방제 기름회수량을 구한다. Table 4 는 작업 기간을 나타낸 표로 사고위치에 따라 해상작업일수가 다르며, 1일 작업시간은 24시간을 기준으로 하나 당시의 해양기상상태, 유막의 이동과 기름의 풍화과정에 의한 성상변화 등과 같은 당시의 상황에 따라 다르게 적용시킬 수 있다.

$$EDRC = (Spill Volume) \times (Percent of Table) \times (Emulsification Factor) \\ \times (Mobilization Factor) \quad (1)$$

단, EDRC : Effective Daily Recovery Capacity(*bbls/day*) for each tier

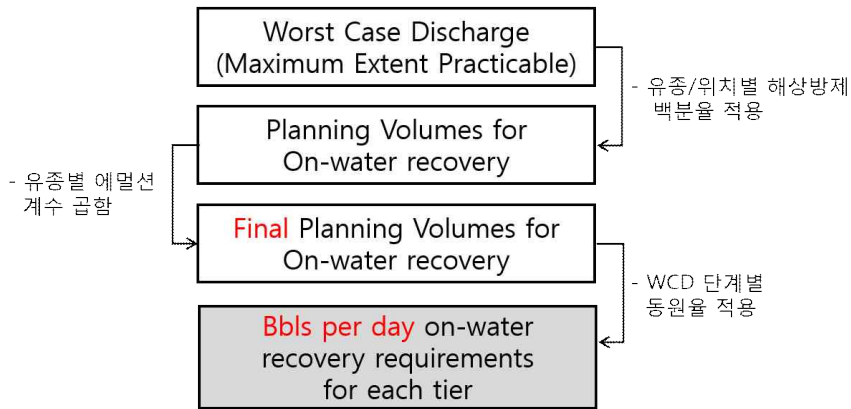


Fig. 10 Flow chart of calculating the WCD planning volumes

Table 1 Removal Capacity Planning Table (Open ocean & Offshore)

오염장소	대 양 (해안에서 50마일 이상인 수역)			외 해 (해안에서 12~50마일 수역)		
	자연분산 (%)	해상방제 (%)	해안방제 (%)	자연분산 (%)	해상방제 (%)	해안방제 (%)
해양작업일수	10일			6일		
유종	자연분산 (%)	해상방제 (%)	해안방제 (%)	자연분산 (%)	해상방제 (%)	해안방제 (%)
Group I Non-persistent oils	100	/	/	95	[5]*	/
Group II Light crudes	90	10	/	75	25	5
Group III Medium crudes and fuels	75	20	[5]*	60	40	20
Group IV Heavy crudes /residual fuels	50	20	[30]*	50	40	30

* 주 : []* 안의 백분율은 방제작업의 연속성을 위해 포함하였으나, 방제계획에는 불필요함

(Source : 33CFR155, Appendix B, Table 3)

Table 2 Removal Capacity Planning Table (Nearshore/Inland/Great Lakes & River)

오염장소	연안역/내수면/오대호 (연안역 : 해안에서 12마일 이내 수역)			하 천		
	4일			3일		
유 종	자연분산 (%)	해상방제 (%)	해안방제 (%)	자연분산 (%)	해상방제 (%)	해안방제 (%)
Group I Non-persistent oils	80	20	10	80	10	10
Group II Light crudes and fuels	50	50	30	40	15	45
Group III Medium crudes and fuels	30	50	50	20	15	65
Group IV Heavy crudes /residual fuels	10	50	70	5	20	75

* 주 : 그룹별 백분율의 합이 100% 이상인 경우는 방제방법 별 중복이 가능함을 의미함

(Source : 33CFR155, Appendix B, Table 3)

Table 3 Emulsification factors for Petroleum oil cargo groups

유 종		에멀션 계수
비지속성 기름	Group I	1.0
	Group II	1.8
지속성 기름	Group III	2.0
	Group IV	1.4

(Source : 33CFR155, Appendix B, Table 4)

Table 4 On-Water Oil Recovery Resource Mobilization Factors

오염장소	WCD 단계별 동원율		
	Tier I	Tier II	Tier III
하천 및 운하	0.30	0.40	0.60
내수면/연안역/오대호	0.15	0.25	0.40
외 해	0.10	0.165	0.21
대 양	0.06	0.10	0.12

* 주 : 동원된 모든 자원에 대한 단계별 동원율이며, 장비 증가율이 아님

(Source : 33CFR155, Appendix B, Table 4)

해상방제장비 중 유회수기의 경우에는 1일 유효기름회수량(Effective Daily Recovery Capacity ; EDRC)을 이용하여 소요량을 구하고 있으며, 다음 2가지의 식으로 구할 수 있다.

$$R = T \times 24 \times E \quad (2)$$

단, R : Effective Daily Recovery Capacity(*bb/s/day*)

T : Throughput rate in *bb/s* per hour(nameplate capacity)

24 : Working hour per day

E : 20%, Efficiency factor(or lower factor as determined by the USCG)

$$R = D \times U \quad (3)$$

단, R : Effective Daily Recovery Capacity(*bb/s/day*)

D : Average Oil Recovery Rate in *bb/s* per hour

U : Hours per day(Ten hours per day)

통상 기름회수용량과 관련된 경우 식 (2)에 해당되며, 이 식을 이용하여 WCD에 대비한 유회수기 소요량을 구할 수 있다.

오일붐의 소요량의 경우에는 충분한 수량의 오일붐을 배치하도록 되어 있으나, 구체적인 산정방식에 대해 제시하고 있지 않다.

회수유 임시 저장장치의 소요량의 경우에는 식 (4)와 같이 최소 1일 유효기름 회수량의 2배로 정하고 있다.

$$TSC = EDRC \times 2 \quad (4)$$

단, TSC : Temporary Storage Capacity per day

EDRC : Effective Daily Recovery Capacity

유처리제의 소요량의 경우에는 식 (5)와 같이 구할 수 있으며, 유처리제를 이용하여 분산시킬 기름의 양에 분산효율을 곱한 값으로 정하고 있으나 유처리제 사용허가지역에 한해 사용 가능하다.

$$CDAC = AO \times PAR \quad (5)$$

단, CDAC : Cumulative Dispersant Application Capacity

AO : Available Oil (WCD-[WCD×Natural Dissipation Factor])

PAR : Planning Application Ratio(0.05, 1gal dispersant/ 20 gals oil)

(2) 대응시간 산정방법

미국은 총 대응시간을 식 (6)과 같이 사고통보시간, 장비동원준비시간 및 항해시간으로 구성되어 있으며, 33CFR Part 155의 Appendix B에 방제자원을 동원하여 사고위치까지 도착하는데 걸리는 시간으로 정의되어 있다. 그리고 사고위치와 유출량 별로 대응시간을 Table.5 와 Table.6 으로 구분하고 있다. 이동속력은 환경특성을 고려하여 기본적으로 해상의 평균속력은 5knots, 육상의 평균속력은 35mph(약 60km/h) 그리고 항공기는 100knots를 적용한다.

$$\text{Mobilization Response Time} = \text{Notification} + \text{Mobilization} + \text{Travel} \quad (6)$$

단, Notification : 사고통보시간, 통보받은 때까지 경과시간(통상 30분 적용)

Mobilization : 장비동원준비시간, 통보받은 때로부터 집결지까지 수송하는데 걸리는 시간(통상 30분 적용)

Travel : 항해시간, 장비동원 준비완료시부터 사고현장까지 도착까지 경과시간

Table 5 Response Times in Hours for each tier and location

유조선 항행수역	유조선			
	MMPD	T-1	T-2	T-3
고위험 항만 (Prince William Sound 내 운항 유조선 제외)	12	12	36	60
오대호	12	18	42	66
하천/운하 이외의 구역, 내수역, 연안/외해	24	24	48	72
원해(해안에서 사고지점까지 항해시간 가산)	24	24+	48+	72+

이 때, MMPD(Maximum Most Probable Discharge)란 기름적재량이 2,500**bbls** 이상인 유조선의 경우 유출량이 2,500**bbls**을 의미하고, 적재량이 2,500**bbls** 미만인 유조선의 경우 적재량의 10%가 유출된 사고를 의미한다.

Table 6 Response Times in Hours for Average Most Probable Discharge

해상방제장비	선박	
	연안역 (12마일이내)	연안역 외부수역 (12~200마일)
오일붐	1시간 이내	1시간 + 항해시간
유회수장치	2시간 이내	2시간 + 항해시간

이 때, Average Most Probable Discharge란 50**bbls** 미만 또는 기름적재량 1% 미만의 기름이 유출된 사고를 의미한다.

3.2.2. 일본

일본에서는 국가방제능력을 따로 설정하지 않고 해양오염 등 및 해상재해의 방지에 관한 법률 제43조의 5에 따라 작성된 ‘排出油等防除計画’ (배출유 등 방제계획)에 장비소요량이 설정되어 있다. 이 계획은 일본의 전 해역을 16개로 구분하고 해당 지역별로 작성되었으며 해당 지역에 대량 유출사고가 발생했을 경우를 가정하여 선박교통의 현황과 해상 및 기상 특성을 반영하여 기름 확산범위의 산정, 가정된 사고에 대응하기 위한 방제자원의 목표수량 및 현재 보유수량 등이 포함하고 있다(Gamada, 2012). 예시로 동경만의 경우 최대유출사고로 항내에서 기름을 만재한 DWT 260,000톤 유조선과 타선박과의 충돌사고가 일어나 기름이 유출되었다고 가정하고, 이 때 최대 유출량은 적재총량의 9%인 23,000kl로 설정한다.

(1) 해상방제장비 소요량 산정

일본은 해상기름회수용량의 계산 방식은 매우 단순하다. 유출유의 풍화과정이나 해상과 해안방제에 대한 구분 없이 단순히 최대유출량 전량을 해상에서 회수한다는 것을 원칙으로 하고 있다. 해상방제작업을 2~3일 동안 1일 12시간의 작업시간을 기준으로 최대유출량의 80%를 기계적 회수로 회수하고 나머지 20%는 유처리제나 유흡착재 등으로 처리할 수 있도록 식 (7)과 같이 장비 목표치를 산정하고 있다.

$$EDRC = [(Spill Volume) \times (80\%)] / [(Working Hour per day) \times (Working Day)] \quad (7)$$

단, EDRC : Effective Daily Recovery Capacity(1일 유효회수량)

Spill Volume : 가상 최대 유출량

Working hour per day : 1일 작업량, 12시간

Working Day : 작업 기간, 2일 또는 3일

해상방제장비 중 유회수기 소요량의 경우 식 (8)과 같이 계산되어지고, 다른 나라와 달리 유회수기의 1일 유효 기름회수용량을 산정시 효율계수를 적용시키지 않고 있다.

$$R = T \times 12 \quad (8)$$

단, R : Effective Daily Recovery Capacity(kl/day)

T : Throughput rate in Kiloniter per hour(nameplate capacity)

12 : Working hour per day

오일붐의 소요량은 지역별로 상이하나, 사고 발생 6시간(외해와 접한 해역의 경우 12시간) 경과 후 유출유의 확산이 예상되는 위치 주변에 이중으로 전장할 때 필요한 수량(유출량의 2배에 해당)으로 하며, 회수유의 임시 저장장치의 소요량의 경우 따로 소요량을 산정하고 있지 않다.

유처리제의 소요량은 식 (9)와 같이 구할 수 있으며, 유처리제를 이용하여 분산시킬 기름의 양에 분산효율을 곱한 값으로 정하고 있다.

$$CDAC = AO \times PAR \quad (9)$$

단, CDAC : Cumulative Dispersant Application Capacity

AO : Available Oil (Spill Volume \times 20% \times Absorbent ratio)

PAR : Planning Application Ratio(일반 4배, 고점도 10배, 자기교반형 20배)

유흡착재의 소요량은 식 (10)과 같이 구할 수 있으며, 유흡착재를 이용하여 제거할 기름의 양에 흡착능력을 곱한 값으로 정하고 있다.

$$CAAC = AO \times PAR \quad (10)$$

단, CAAC : Cumulative Absorbent Application Capacity

AO : Available Oil (Spill Volume \times 20% \times Dispersant ratio)

PAR : Planning Application Ratio(흡착능력의 10배)

(2) 대응시간 산정방법

일본의 경우 미국과 달리 대응시간에 대해 정확하게 규정하고 있지 않다.

3.2.3. 캐나다

캐나다는 미국과 유사한 제도로, 캐나다 해운법(Canada Shipping Act ; CSA)에 의해 오염행위자 책임원칙에 따라 기름저장시설, 선박 소유자 또는 사용자는 오염사고 발생에 대비하여 방제대책을 수립해야 되고, 사고 발생시 전적으로 방제작업을 수행 및 환경피해에 대한 배상책임을 이행해야 한다. 이에 따라 캐나다 수역에 기름을 적재하고 통항하는 선박에게 적재량 또는 최대수송량만큼의 방제능력을 갖춘 방제업체(Response Organization ; RO)와 체결하도록 의무화하고 있다. 그리고 오염사고 장소, 발생빈도, 유출량 및 대응시간 등을 고려하여 단계별로 구분하고 그 중 4단계 사고(10,000톤)에 대비하고 있다. 각 단계별 구분 및 기준은 Table 7과 같다.

Table 7 Maximum Quantity of Oil Spilled for each Tier

단계	최대유출량(톤)
Tier 1	150
Tier 2	1,000
Tier 3	2,500
Tier 4	10,000

(1) 해상방제장비 소요량 산정

Tier 4에 해당하는 양이 해상에 유출된 것으로 가정하고 오염장소에 따른 오염방제비율(Table 4)을 적용하여, 식 (11)과 같이 해상기름회수량을 구한다.

해상방제 작업 기간은 오염현장에 방제장비를 설치한 날로부터 10일 이내로 완료하는 것을 목표로 하고 있고, 1일 작업시간은 24시간을 기준으로 하나 현장작업 시간을 적용하는 등 당시의 상황에 따라 다르게 적용시킬 수 있다.

$$On - Water Recovery Capacity = (Spill Volume) \times (Percent of Table) \quad (11)$$

단, Spill Volume : Tier-4의 유출량, 10,000톤

Percent of Table : Table 8의 방제장소에 따른 백분율

Table 8 Percentage of Tiered Response Capability

오염장소		해안방제(%)	해상방제(%)	
			Sheltered Sea	Unsheltered Sea
Primary Areas of Response	Holyrood	40	40	20
	Come by Chance	40	40	20
	Point Tupper	40	40	20
	Halifax	40	30	30
	Saint John	40	40	20
	Sept-îles	45	30	25
	Québec City	60	30	10
	Montréal	70	30	0
	Nanticoke	50	30	20
	Sarnia	50	40	10
	Vancouver	40	40	20
Enhanced Response Areas	Cabot Strait	40	30	30
	Northumberland Strait	40	0	60
	Juan de Fuca Strait	40	20	40

(Source : Transport Canada, 1995. *Response Organizations Standards*)

그리고 캐나다에서는 방제장비의 소요량을 정해놓고 있다. 방제장비 중 유회수기의 경우에는 1일 유효기름회수량(Effective Daily Recovery Capacity ; EDRC)을 이용하여 소요량을 구하고 있으며, 다음 식 (12)로 구할 수 있다.

$$R = T \times E \times 24 \quad (12)$$

단, R : Effective Daily Recovery Capacity(kl/day)

T : Throughput rate in Kiloliter per hour(nameplate capacity)

E : 20%, Efficiency factor

24 : Working hour per day

오일뿔의 경우 연안역의 지형을 폐쇄형과 개방형으로 구분하여 각 지형별 오일뿔 소요량을 산정하고 있다. 개방형의 지형인 경우 해당 구역의 환경에 적합한 오일뿔 소요량을 산정하고, 폐쇄형의 지형인 경우, 해면상에 부유하고 있는 유막의 회수에 필요한 오일뿔 소요량은 식 (13)으로 산정하고 해안선 부근에 있는 유막의 회수에 필요한 오일뿔 소요량은 식 (14)를 이용하여 산정한다.

$$B_f = 1.25 \times H_s \quad (13)$$

$$B_s = 0.625 \times H_s \quad (14)$$

단, B_f : 해상부유 유출유 포집용 소요량(meters)

B_s : 해안선 부근 유출유 포집용 소요량(meters)

H_s : 유출량(tons)

회수유의 임시 저장장치의 소요량은 1차 저장용기(Primary Temporary Storage Capacity)와 2차 저장용기(Secondary Temporary Storage Capacity)로 구성되며, 1차 저장용기의 소요량은 식 (15)와 같이 1일(24시간) 동안 유회수장치로 유회수 작업이 진행되는 동안 회수된 기름 및 유성혼합수 총량에 해당하는 용량이고 2차 저장용기의 소요량은 식 (16)과 같이 유회수장치로 회수한 기름 및 유성혼합수를 처리하기 이전 임시로 저장하는 용기로써 1일 회수 총량의 2배 이상에 해당하는 용량을 확보하도록 정하고 있다.

$$PTSC = EDRC \quad (15)$$

$$STSC = PTSC \times 2 \quad (16)$$

단, EDRC : Effective Daily Recovery Capacity
 PTSC : Primary Temporary Storage Capacity
 STSC : Secondary Temporary Storage Capacity

(2) 대응시간 산정방법

캐나다의 경우에도 미국과 마찬가지로 총 대응시간을 사고통보시간, 장비동원준비시간 및 항해시간으로 구성하고 있으며, 방제자원을 동원하여 사고위치까지 도착하는데 걸리는 시간을 의미한다. 사고장소에 따른 오염사고 단계별 장비 대응시간기준은 Table 9와 같다. 기타구역의 이동시간은 최근접 1차방제구역 및/또는 강화방제구역에서 사고현장까지 방제선의 평균속력에 의한 이동시간을 말한다. 그리고 1차 방제구역 및 강화방제구역 외부에서 발생한 오염사고장소까지의 이동시간은 해상이동(방제선등)의 경우 6knots, 육상이동의 경우 65km/h 그리고 항공이동의 경우에는 100knots를 평균속력으로 적용하여 산정한다(Transport Canada, 1995).

Table 9 Response Time for each tier

사고장소	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
지정항내	6시간	12시간	N/A	N/A
1차방제구역	N/A	N/A	18시간	72시간
강화방제구역	N/A	N/A	18시간	72시간
기타구역	N/A	N/A	18시간+이동시간	72시간+이동시간

3.2.4. 우리나라의 기준

우리나라는 해양선진국과 달리 국가방제능력이란 개념을 도입하여 필요한 방제장비의 소요량을 산정하였으나, 이는 단순히 유희수기에만 국한되어 있고, 지역별 특성이 고려되지 않는 등 문제가 식별되었다. 이에 보다 효율적이고 현장실행력이 높은 새로운 개념의 방제능력으로 전환하고자, 기존의 국가방제능력 대신 지역 특성이 충분히 반영된 지역방제능력을 도입하였다. 그리고 국가방제능력이란 용어 대신 해상기름회수용량으로 변경하여 사용하였다(윤중휘 등, 2009).

우리나라 해역을 선박 입출항이 많은 항만과 방제기관(해양경찰서, 해양환경관리공단 지사)의 위치 등을 고려하여 Table 11과 같이 3개의 권역, 12개 지역으로 구분하고, Table 10과 같은 방법으로 각 지역별 입출항선박, 주변해역 통항선박에 의해 발생 가능한 오염사고와 과거 발생한 최대유출사고를 비교·분석하여 해당 지역의 가상최대유출량을 산출하고, 이에 대응할 수 있는 충분한 수량의 방제자원을 사전에 확보하도록 하고 있다(윤중휘 등, 2009).

Table 10 Regional expected maximum quantity of oil spilled Computation Criteria

지역별 가상 최대유출량 산출 기준	
유출물질	원유 및 벙커유
사고대상선박	- 출입항 선박 중 최대선박 - 연안역을 항행하는 내항유조선
적재용량	항만별 출입항 최대크기의 선박 - 유조선은 화물창 95~98% 적재된 상태 (내항유조선 제외) - 그 외 선박은 연료유 탱크가 약 85% 적재된 상태 - 내항유조선은 최대수송량을 적재용량으로 함
최대유출량	MARPOL Annex I Reg. 24 & 25 의 공식을 이용하여 유출량 계산 - 충돌에 의한 선측손상 시 유출량 (한 선박만 계산) - 좌초에 의한 선저손상 시 유출량 - 2개의 값 중 더 큰 값을 최대 유출량으로 선택함
지역별 가상최대유출량	다음 경우 중 최대치를 지역별 가상최대유출량으로 택하고, 계산에 의해 구해진 값을 대략적인 근사치로 단순화함 - 해당 항만 출입항 최대 선박의 충돌 또는 좌초 사고 - 해당 지역 인근을 통항하는 내항유조선의 충돌 또는 좌초 사고 - 해당 지역에서 과거 20년 동안 발생한 오염사고 중 최대 유출사고

Table 11 Area Classification

권역	지역
서해(대산)권	인천, 태안·대산·평택, 군산
남해(여수)권	목포, 완도, 여수, 제주·서귀포
동해(울산)권	통영·창원, 부산, 울산, 포항, 동해·속초

Table 12 MARPOL 73/78 Annex I Reg. 24 & 25

MARPOL Annex I	내용
Regulation 24 손상범위의 가정	1. 선측손상 1.1 종방향 (l_c) : $\frac{1}{3}L^{\frac{2}{3}}$ 또는 14.5m 중 작은 값 1.2 횡방향, 하계만재홀수선에서 중심선쪽으로의 직각방향 (t_c) : $\frac{B}{5}$ 또는 11.5m 중 작은 값 1.3 수직방향 (v_c) : 기선으로부터 윗방향으로 무한대
	2. 선저손상
Regulation 25 기름의 가상유출량	1. 선측손상 및 선저손상 1.1 선측손상 : 유출량 (O_c) = $\sum W_i + \sum K_i C_i$ 1.2 선저손상 : 유출량 (O_s) = $\frac{1}{3}(\sum Z_i W_i + \sum Z_i C_i)$ 단, W_i = 손상된 현측탱크의 용적(m^3), C_i = 손상된 센터탱크의 용적(m^3) $K_i = 1 - \frac{b_i}{t_c}$: $b_i \geq t_c$ 인 경우 K_i 는 0, $Z_i = 1 - \frac{h_i}{t_s}$: $h_i \geq t_s$ 인 경우 Z_i 는 0 b_i = 하계만재홀수선 레벨의 선측에서 중심선 방향으로 직각으로 측정된 현측 탱크 너비 h_i = 이중저의 최소 높이

	<p>2. Reg. 24에 정하는 l_c보다 짧은 길이의 빈공간(Void Space)이나 분리밸러스트탱크(SBT)가 기름적재용 현측탱크 사이에 있는 경우 선측손상 기름유출량 (O_c)은 해당 구역에 인접하는 1개의 탱크(2개 탱크 용량이 동일한 경우) 또는 2개 탱크 중에서 작은 쪽(2개 탱크의 용량이 다른 경우)의 실제 용량에 아래에 정하는 S_i를 곱한 값을 W_i로 하고, 그 선측손상에 포함되는 다른 모든 현측탱크에 대해서는 실제용량의 값을 적용시켜 계산함.</p> $S_i = 1 - \frac{l_i}{l_c}$ <p>단, l_i는 당해 빈공간 또는 분리밸러스트탱크의 길이</p>
--	--

(1) 기계적 회수 소요량 산정

우리나라는 권역과 지역별로 나누어 해상기름회수용량을 계산하고 이를 이용하여 소요량을 산정한다. 권역의 경우 권역내 통항선 및 입출항 선박 중 최대 크기인 DWT 30만톤급의 초대형 유조선에서 기름유출사고 발생 시 MARPOL Annex I Regulation 24 & 25에 의해 산출된 최대유출량인 45,000kl이고, 이 때 유출량의 1/3인 15,000kl를 해상기름회수용량이라 하며, 이 양을 3일 이내로 회수 완료하는 것을 목표로 한다. 해상기름회수용량의 1/2인 7,500 kl를 권역의 해상방제장비 배치량이라 하며, 지역의 경우는 권역내 지역을 최대오염사고 발생가능지역인 권역중심지역과 기타지역으로 나누고 기타지역의 가상최대유출량을 앞서 설명한 Table 10의 기준을 이용하여 산정하고, 이 양의 1/3을 해상기름회수용량 및 배치량이라 한다. 그리고 권역 중심지역의 배치량은 권역내 기타지역들의 배치량을 제외한 나머지를 배치하는 것을 원칙으로 하고 있다(윤중휘 등, 2009).

방제장비 중 유회수기의 경우 식 (18)과 같이 유회수기의 총 유효회수량 (Total Recovery Capacity ; TRC)을 역으로 이용하여 소요량을 구하고 있다.

$$TRC = T \times 3 \times 8 \times 0.2 \times 0.33 \quad (18)$$

단, TRC : 유회수기 총 유효회수량(=해상기름회수용량, 단위:kl)

- T : 유회수기 명목용량(kl/h) , 소요량
- 3 : 해상방제일수(day)
- 8 : 1일 작업시간(hour)
- 0.2 : 효율계수
- 0.33 : 장비동원율

오일붐은 사고위치와 지형적 조건 그리고 해양기상상태에 적합한 오일붐이 동원되어야 하는 점을 고려한 동원율을 적용하며 식 (19)를 이용하여 산정한다.

$$TRB = (OWRQ \times 2.5) \div 0.5 \quad (19)$$

단, TRB : Total Required Boom, 총 오일붐의 소요량(m)

OWRQ : On-water oil recovery Quantity, 해상기름회수용량

2.5 : 해상에서 포위전장한 기름 1톤당 소요수량

0.5 : 동원율

회수유의 임시저장장치의 소요량은 1일 회수 총량의 최소 2배 이상에 해당하는 용량을 확보하도록 식 (20)과 같이 산정하고 있다.

$$TSC = EDRC \times 2 \quad (20)$$

단, TSC : 임시저장장치 용량(Temporary Storage Capacity)

EDRC : 1일 유효회수용량($TRC \div 3$)

2 : 저장장치 용량 최소배수

위에서 설명한 우리나라 해상방제장비 소요량 산정방식을 이용하여, 본 연구의 대상인 부산해역을 예로 들어 계산해보았다.

우선 부산해역 가상 최대유출량은 앞서 Table 10의 산출 기준을 적용하여 계산하였다. 대상선박은 부산해역에 통항하는 최대 크기의 선박인 13,000TEU 컨테이너선이고 사고유형은 대상선박이 부산신항으로 접근 도중 화물선과 충돌하여 선측 손상이 생긴 것으로 하였다. 선박의 상선은 국적선사가 보유하고 있는 13,000TEU 컨테이너선을 이용하였다. 파손 범위는 현측의 연속되는 연료유 탱크 2개가 손상된 것으로 하였고, 손상된 탱크로부터 유출된 연료유의 양은 MARPOL 공식으로 계산하였다. 이 때 적재량은 최대적재량의 85% 만큼 되어 있는 것으로 산정하였다.

13,000TEU 컨테이너선의 현측에 있는 연료유 탱크 각각의 총 용량은 1,911.2[㎥]과 2,262.1[㎥]이며, 이들의 85%는 1,624.5[㎥]와 1,922.8[㎥]으로 계산되어지고 이를 MARPOL 식에 대입하여 계산된 최대유출량의 근사치는 3,600[㎥]으로 나타났다(Table 13).

Table 13 Expected maximum quantity of oil spilled at Busan

부산 해역 가상최대유출량	
유출물질	연료유(벙커-C)
사고개요	부산신항으로 향하던 13,000TEU 컨테이너선이 일반화물선과 충돌하여 컨테이너선의 좌현 연료유 탱크 2개의 선측이 손상되어 해상으로 기름이 유출된 사고
사고대상선박	- 출입항 선박 중 최대선박 : DWT 15만톤, 13,000TEU 컨테이너선
연료유탱크 용량	- 좌현 1번 연료유 탱크 총 용량 : 1,911.2 [㎥] - 좌현 2번 연료유 탱크 총 용량 : 2,262.1 [㎥]
적재용량	- 선박은 연료유 탱크가 약 85% 적재된 상태 · 좌현 1번 탱크 내 연료유 용량 : 1,624.5 [㎥] · 좌현 2번 탱크 내 연료유 용량 : 1,922.8 [㎥]
지역별 가상최대유출량	- MARPOL Annex I Reg. 24 & 25 의 공식을 이용하여 유출량 계산 - 두 개의 연료유 탱크 내 적재되어 있는 연료유 최대 유출 - 계산에 의해 구해진 값을 대략적인 근사치로 단순화함 ☞ 부산 가상최대유출량 : 3,600 [㎥]

가상최대 유출량의 1/3인 1,200[㎥]이 부산해역의 해상기름회수용량이며 부산해역에서 보유해야할 유회수기의 총 유효회수용량이다. 이를 식 (18)~(20)에 대입하여 계산하면 유회수기의 소요량은 약 757.6kl/h, 오일뿔의 소요량은 6,000^m이고 회수유 임시저장장치의 소요량은 800kl로 나타난다.

(2) 대응시간 산정방법

우리나라의 경우 일본과 마찬가지로 대응시간에 대해 정확하게 규정하고 있지 않다.

3.2.5. 국가별 비교 분석

(1) 해상방제장비 소요량 및 대응시간 비교 분석

앞서 설명한 미국, 일본, 캐나다 그리고 우리나라의 해상방제장비 소요량 산정 및 대응시간 기준을 요약하면 Table 14와 같다.

Table 14 Comparison of On-water Spill recovery capacity criteria and Response time

구분		미국	일본	캐나다	한국
사고대상선박		지역 최대 유조선	지역 최대 유조선 (DWT 26만톤급)	지역 유조선	국가: 최대통항유조선 (DWT 30만톤급) 지역: 지역최대통항선박
최대유출량		적재 화물의 전량	지역마다 상이 (동경만 : 23,000kl)	10,000톤	국가 : 45,000kl 지역 : 지역별 상이함
해상기름회수용량		사고장소 및 기름의 종류별 상이	지역마다 상이 (동경만 : 23,000kl)	사고장소별 상이	국가 : 15,000kl 지역: 지역최대유출량의 1/3
작업일수		사고장소별 상이 (4~10일)	2~3일	10일 이내	3일
작업시간		24시간 (상황에 따라 작업시간 조정가능)	12시간	24시간 (상황에 따라 작업시간 조정가능)	8시간
유회수기	효율	0.2	N/A	0.2	0.2
	동원율	사고장소별 상이	N/A	N/A	0.33
오일붐		충분한 수량	최대유출량×2	해상 : 1.25×유출량 해안 : 0.625×유출량	(OWRC×2.5)/0.5
회수유 임시저장장치		EDRC×2	N/A	Primary : EDRC Secondary : EDRC×2	EDRC×2
유처리제		해상방제량×0.05	해상방제량×0.2 ×분산효율	N/A	N/A
유흡착재		충분한 수량	해상방제량×0.2 ×흡착능력	N/A	N/A
대응시간		사고장소별 상이	N/A	사고장소별 상이	N/A

사고대상선박의 경우 모든 국가에서 지역을 통항하는 최대 크기의 유조선을 채택하고 있다. 그러나 최대 유출량의 경우는 각기 상이하게 설정하고 있다. 미국은 사고 대상선박의 적재화물 전량으로 설정하고 일본은 지역의 배출유 등 방제계획에 따라 각 지역별로 상이하나 동경만을 예로 들면 대상선박의 적재화물의 9%인 23,000kl로 설정하고 있다. 캐나다는 Tier 4의 유출량인 10,000톤으로 설정하고 마지막으로 우리나라는 대상 선박에서 발생할 수 있는 유출사고를 가정하고 MARPOL 식을 이용하여 계산된 45,000kl를 최대 유출량으로 설정하고 있다.

미국은 사고위치, 기름의 종류에 따라 해상기름회수용량과 방제일수를 구분하고 있으며 해상방제작업시 필요한 유회수기, 오일붐, 회수유 임시저장장치 및 유처리제 등의 소요량을 규정하고 있다. 캐나다는 사고장소별로 해상기름회수용량을 구분하고 있고 해상방제작업시 필요한 유회수기, 오일붐 및 회수유 임시저장장치의 소요량을 자세히 규정하고 있다. 일본은 지역의 배출유 등 방제계획에 따라 해상기름회수용량이 상이(동경만의 경우 23,000kl하며 미국, 캐나다와 같이 유회수기 및 오일붐에 대한 소요량은 규정하고 있으나 회수유 임시저장장치에 대한 소요량은 규정하지 않고 있다. 반면, 유처리제, 유흡착재 등의 소요량에 대한 규정이 있다. 우리나라의 경우 국가차원의 해상기름회수용량은 최대 유출량의 1/3인 15,000kl이며 지역별 해상기름회수용량은 당 지역을 통항하는 최대 크기의 선박으로부터 발생할 수 있는 최대 유출량을 이용하여 산출한다. 이를 바탕으로 유회수기, 오일붐 그리고 회수유 임시저장장치의 소요량을 규정하고 있다.

미국과 캐나다에서는 총 대응시간을 사고통보시간, 장비동원준비시간 및 항해시간으로 구성하고 있으며, 방제자원을 동원하여 사고위치까지 도착하는데 걸리는 시간으로 정의하고 있다. 그리고 사고 장소와 단계(Tier)별로 대응시간을 구분하고 있다. 그러나 우리나라와 일본은 대응시간에 대해 구체적으로 규정하지 않고 있다.

(2) 시사점

미국과 캐나다에서는 효율적인 방제작업을 수행하기 위해 사고장소나 유출 규모에 따른 단계로 구분하고, 이에 맞는 대응을 하도록 되어있다. 우리나라는 지역긴급방제실행계획에 지역사고를 규모별로 구분하고 이에 대한 대응을 하고 있으나 해양선진국과 같이 종합적이고 자세히 규정하지 않고 있다. 따라서 우리나라도 해양오염사고 위치 또는 규모에 따른 대응단계를 도입하고 이를 자세히 규정할 필요가 있다. 여기에 추가하여, 각 지역별 가상최대유출량은 입출항 및 통항하는 선박의 대형화, 선종의 다양화 그리고 항만의 확대 등의 환경 변화로 인해 증가할 수 있으므로 이에 대응할 수 있는 방제자원을 확보하기 위해 주기적으로 확인할 필요가 있다고 판단된다.

미국과 캐나다와 같은 해양선진국의 해상기름회수용량은 해양오염사고 규모 뿐만 아니라 방제 효율의 높이기 위해 지역별 해상방제장비의 동원시간을 추가하여 설정하고 있으나, 우리나라의 경우에는 사고 규모만을 이용하여 해상방제량을 설정하고 있다. 따라서 우리나라도 효율적인 해상방제를 위해 해양선진국의 해상유출유회수량 설정 방법을 벤치마킹하여 해상방제장비의 동원시간을 도입할 필요가 있다.

제 4 장 부산해역 해양오염사고 신속 대응을 위한 해상방제장비배치

4.1. 해양오염사고 신속 대응을 위한 해상방제장비 배치 방법

기하학/수학적 개념의 Voronoi Diagram과 과거 발생했던 사고위치를 이용하여 주요 사고위치와 최근접한 해상방제장비 배치장소를 선정된 후 대응시간을 이용하여 앞서 선정된 배치장소 중 최종 해상방제장비 배치장소를 기존 배치장소에 추가하여 선정한다. 그리고 선정된 배치장소에 필요한 해상방제장비 배치를 HBD Model을 통해 해양위해도 기반으로 산정하여, 부산 해역의 오염사고 신속 대응을 위한 해상방제장비 배치를 도출한다(Fig. 11).

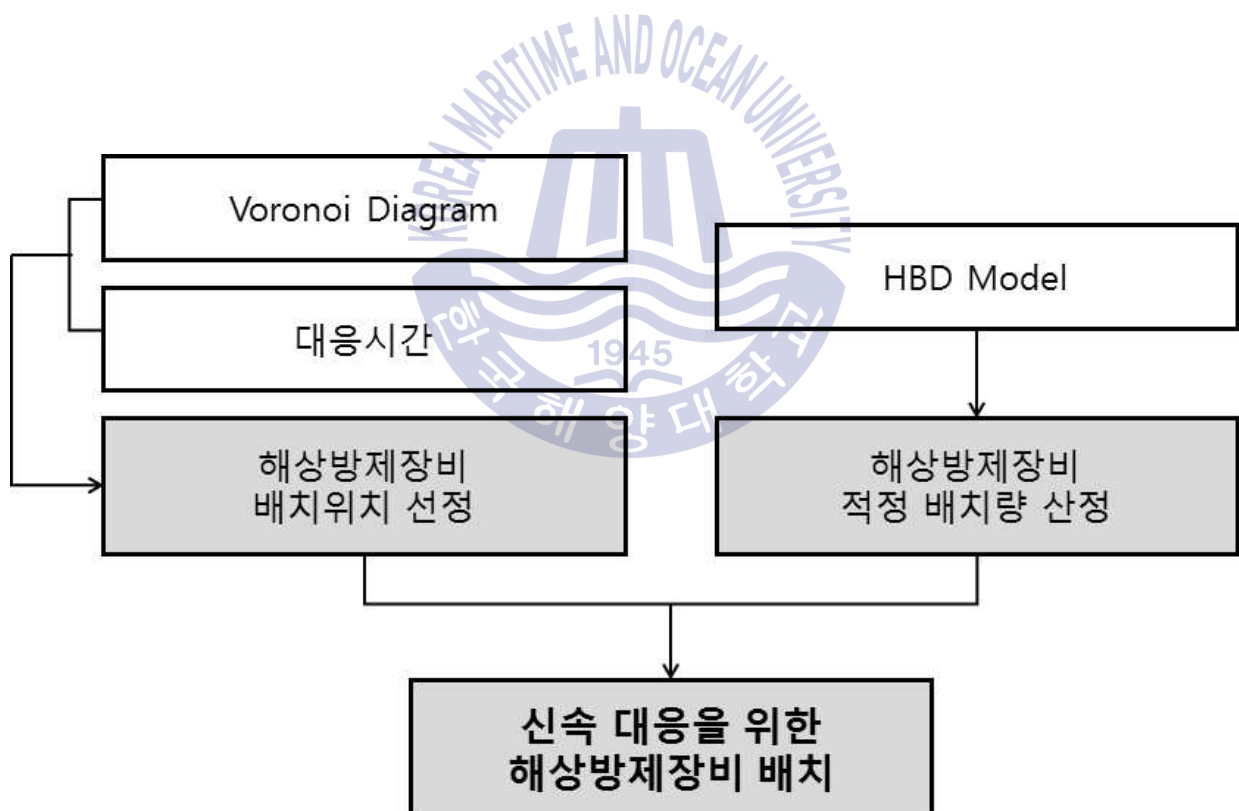


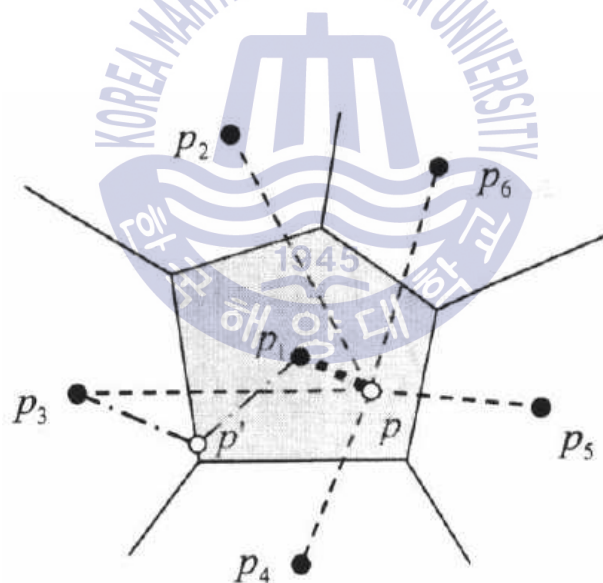
Fig. 11 Sequence for Optimal Allocation of On-water Spill Response equipment

4.2. 해상방제장비 배치방법의 이론적 고찰

4.2.1. Voronoi Diagram

Voronoi Diagram은 공간에 분포되어 있는 점들의 모임, 특정 점(Generators)들 사이의 거리를 기반으로 영역을 구분하는 하나의 방법이다.

Voronoi Diagram은 점 데이터 p_1, p_2, \dots, p_n 을 기준으로 각 영역을 분할하게 된다. 임의의 점 p_i 를 포함하는 영역내의 점들은 다른 영역의 기준점에서의 거리보다 자신이 속한 영역의 기준까지의 거리가 가장 가깝다(A.Dobrin, 2005; 박종진, 지승열, 전한중, 2008). Fig. 12와 같이, p 는 그림상의 다른 점보다 p_1 과 가장 가깝다. 그리고 영역의 경계에 있는 p' 는 두 점 p_1 및 p_3 와 등거리에 있다.



(Source : Okabe, A., 2000)

Fig. 12 A Basic Voronoi Diagram

(1) 수학적 정의

앞에서는 일반적인 의미의 Voronoi Diagram을 설명하였지만, 수학적 문제와 알고리즘 계산을 위해서는 수학적 정의가 필요하다.

유클리디안 평면(R^2) 위에 점의 집합 $P = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$ 이 있고, 그 점의 개수를 $2 \leq n < \infty$ 로 설정하였다. 이 때 점 p_i 의 위치를 데카르트 좌표 (x_{i1}, x_{i2}) 로 표시하고, 그 벡터는 \vec{x} 라 한다. 기준점이 $\forall i, j = 1, 2, \dots, n$ 와 $p_i \neq p_j, i \neq j$ 를 만족할 때 p_i 의 Voronoi Region은 다음과 식 (21)과 같이 정의된다(A.Dobrin, 2005).

$$V(p_i) = \{ \vec{x} \mid \|\vec{x} - \vec{x}_i\| \leq \|\vec{x} - \vec{x}_j\|, \forall j \ni i \neq j \} \quad (21)$$

단, $\|\cdot\| =$ 유클리디안 거리

(2) Voronoi Diagram 구성요소

Voronoi Diagram는 Fig. 13과 같이 기준점(Generators), 선분(Edges) 그리고 정점(Vertex)로 구성된다. P 는 기준점의 집합이고, 정점과 선분위의 점을 제외한 평면위의 모든 점들은 Voronoi Region 위에 있다.

식 (22)와 같이 선분은 $V(p_i)$ 와 $V(p_j)$ 가 만나 형성된다.

$$V(p_i) \cap V(p_j) = e(p_i, p_j) \quad (22)$$

만약, 두 Voronoi Region이 인접한 경우, $e(p_i, p_j) \neq 0$ 이 된다.

정점은 평면상의 3개의 기준점으로부터 등거리에 있으며, 이웃하는 세 개의 Voronoi Region $V(p_i), V(p_j), V(p_k)$ 의 교점이다.

기준점의 개수가 n 개일 때, 선분은 최대 $3n-6$ 개이며, 정점은 최대 $2n-5$ 개이고, 한 개의 기준점 당 이웃 기준점의 평균 개수는 6개이다.

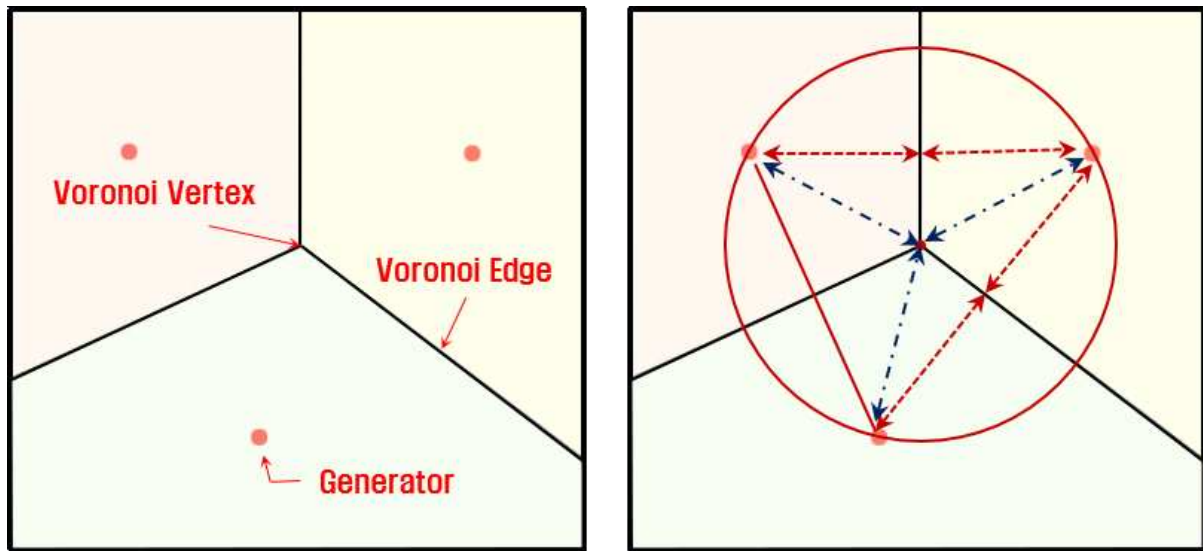


Fig. 13 Component of Voronoi Diagram

(3) Voronoi Diagram 작도법

Fig. 14는 Voronoi Diagram을 작도하는 방법을 나타낸 그림으로 평면 위에 Generators(기준점)를 찍은 다음 가장 인접한 2개의 Generator를 선택해 수직이등분선을 그리면 된다. 수직이등분선에 의해 나누어진 평면은 여러 개의 Voronoi Region으로 분할되고 이렇게 그려진 그림을 Voronoi Diagram이라고 한다.

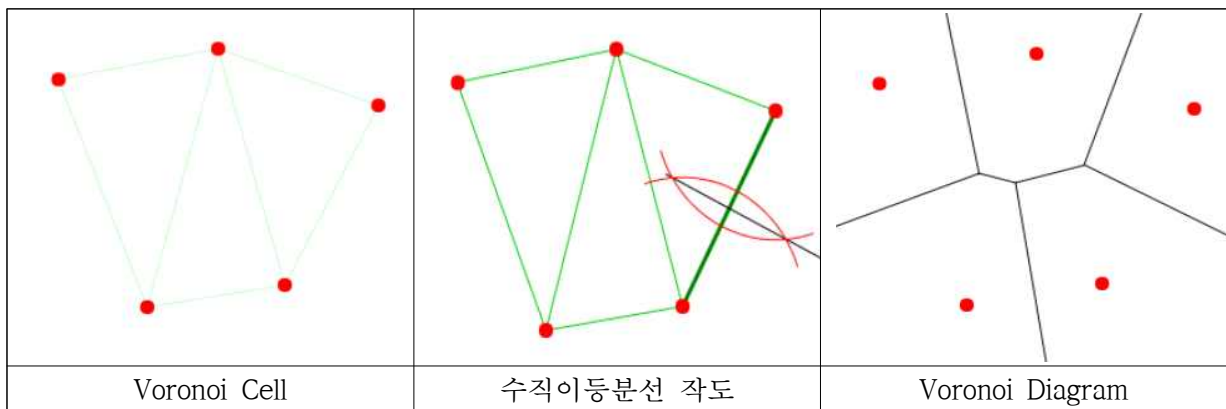


Fig. 14 Sequence of making Voronoi Diagram

(4) Vornoi Diagram 사례

Vornoi Diagram은 아주 오래전부터 이용되어져 왔다. 그 기원은 17세기까지 되돌아간다. 1644년 데카르트가 저술한 Principia Philosophiae에 이 다이어그램을 이용하여 태양계 내의 행성들의 관계를 설명하였다. 이후 1850년에 Dirichlet가 2-Dimensional, 3-Dimensional Vornoi Diagram에 대해 언급하였고, 1908년 러시아 수학자 Georgy Fedoseevich Voronoi에 의해 증명되었다. 이후 공간적 분포 자료를 분석하는데 사용되었다.

현재 Voronoi Diagram은 다양한 분야에서 응용되어 사용되고 있다. 계산기하학, 생물학에서 동·식물의 세포 구조 분석, 로봇이나 GPS의 최단경로 설정, 디자인 및 건축학, 지도 정보시스템 그리고 지리학 등에서 쓰이고 있으며, 본 연구와 유사 사례로는 Okabe, A. and Suzuki, A.(1997)의 위치 최적화 문제해결에 관한 연구, 김재원, 강지훈, 이의영(2007)의 공공서비스의 관할 구역에 설정에 관한 연구 그리고 A.Shirzadi Babakan et al.(2011)의 응급센터 최적배치에 관한 연구 등이 있다.

4.2.2. 대응시간

해양선진국에서 사용하는 대응시간은 기름유출사고가 발생한 시점부터 해상 방제장비가 사고 현장까지 도달하는 시간을 말하며, 사고통보시간, 장비동원 준비시간 및 항해(이동)시간으로 구성된다.

우리나라의 경우에는 전술한 것과 같이 대응시간에 대한 기준이 없다. 따라서 본 연구에서는 대응시간의 기준을 해양선진국의 기준을 차용하여 대응시간에 대한 기준을 제시하고 본 연구에 적용하였다.

본 연구의 대응시간의 기준을 살펴보면 총 대응시간은 3시간으로 하며, 사고통보시간은 사고발생시각부터 방제 담당기관이 오염사고를 통보 받은 때까지 경과한 시간으로 미국과 같이 평균 30분으로 하고 장비동원준비시간은 사고발생 통보 시각부터 방제장비 비축기지로부터 방제장비 동원, 방제인력 집결 및

방제선 출항준비완료시까지 소요되는 시간으로 미국과 같이 평균 30분으로 하나 비축기지가 없어 방제장비가 항만지역에 배치된 곳은 이를 제외한다. 항해(이동)시간은 장비동원 준비 완료시부터 사고현장 도착시까지 경과시간을 말하며, 방제장비 위치에서 현장까지의 거리에 방제선의 속력을 나눈 값이다. 이 때 방제선의 평균속력은 환경영향을 반영한 5knots이다(33CFR155). 그리고 미국과 캐나다의 경우에는 대응시간을 위치 및 단계별로 다르게 구분하여 정의하고 있으나 이는 넓은 관할 해역을 반영하였기 때문에 여기에서는 따로 반영하지 않았다.

4.2.3. Hazard Based Deployment Model(HBD Model)

HBD 모델은 지역을 통항하는 최대크기의 선박과 과거 해양오염사고로 인한 최대유출량 기준으로 설정한 현행 기름회수능력 설정 기준에 환경·경제적인 요소를 추가, 반영하여 도출한 해양환경위해도를 기반으로 지역별 해상방제장비 배치량을 계산하는 정량적 모델이고 식 (23)과 같다(하민재, 2014).

$$H_j = \left[\sum_{i=1}^7 \left(\frac{n_{ij}}{\sum_{a=1}^{m_n} n_{ia}} \times A_i \right) \right] \times Q \quad (23)$$

단, H = 위해도 기반 지역별 해상방제장비 배치량

m = 권역 내 지역의 개수

n = 요소 별 지역의 점수치

i = 7개의 해양환경위해도 요소

j = 1, 2, ..., m

a = 권역 내 지역의 번호($a=1, 2, \dots, m$)

A_i = 항목의 가중치

Q = 권역 별 해상방제장비 총 소요량

이 모델에서 사용된 해양환경위해도 요소는 크게 개연성 요소와 사후민감도 요소로 나누어진다. 사고 개연성요소에는 기름물동량, 기름저장시설의 최대 저장량, 선박입항척수, 과거 해양오염사고 유출량의 총합으로 구성되어 있고 사후민감도 요소로는 양식업의 면적, 환경관리해역의 면적, 위락시설의 이용객수로 구성되어 있다. 각 항목에 대한 권역내 지역별 현황수치를 백분율로 정규화를 실시하고, 계층분석과정(AHP)를 통해 각 항목간의 가중치를 도출한다. 정규화 결과와 항목별 가중치를 종합한 값을 권역내 지역별 해양환경위해도라 하고 이 값에 따라 기존 지역별 기름회수 능력을 분산·배치하는 방식이다(하민재, 2014).

예를 들어 부산항의 항목별 정규화 값과 가중치가 Table 15 일 경우, 부산항의 최종 위해도 값은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \text{Final Hazard} &= (0.31 \times 0.04) + (0.12 \times 0.015) + (0.16 \times 0.5150) + (0.10 \times 0.2140) \\
 &+ (0.18 \times 0.046) + (0.07 \times 0.5960) + (0.06 \times 0.6200) = 0.2052
 \end{aligned}$$

Table 15 Example Final Hazard Value for Busan

Weight Region	Oil Transport (0.31)	Oil Storage (0.12)	Vessel Entry (0.16)	Past Accident (0.10)	Sea Farming (0.18)	E.M Sea (0.07)	Tourist (0.06)	Final Hazard Value
Busan	0.0040	0.0150	0.5150	0.2140	0.0460	0.5960	0.6200	0.2052

그리고 부산항을 포함하는 권역별 해상방제장비 중 유회수기 소요량이 7,500kl라 할 때 부산항의 소요량은 권역별 배치량에 최종 위해도를 곱한 1,539kl가 된다.

4.3. 부산해역 해양오염사고 신속대응을 위한 해상방제장비 배치장소 선정

4.3.1. Voronoi Diagram 작도

4.2.1에서 설명한 임의의 점 p_i 를 포함하는 Voronoi Region 내 점들은 다른 영역의 기준점(Generator)보다 자신이 속한 영역의 기준까지의 거리가 최단거리가 되는 Voronoi Diagram의 특징을 이용하여, 부산해역에서 발생하는 해상유출사고를 가장 신속하게 대응할 수 있는 해상방제장비 배치 장소를 선정한다.

해상방제장비 배치장소는 일반적으로 방제선을 계류할 수 있고 방제인력이 방제선에 접근하기 용이하며 방제장비를 비치할 수 있는 장소인 항만으로 한다. 따라서 해상방제장비 배치장소가 될 수 있는 항만을 Voronoi Diagram을 작도하기 위한 기준점으로 한다. 기준점(Generator)으로 부산해역 인근에 있는 항만인 부산항, 다대포항, 부산신항, 천성항, 마산항, 진해항 그리고 옥포항을 선정하였고, 각 항구의 위치 좌표 값을 구글맵 Open API를 이용하여 입력한 다음 Voronoi Region을 도출하였다. 이 때 다대포항과 감천항의 경우와 옥포항, 외포항과 장승포항의 경우는 항만간의 거리가 매우 가까워 단일의 항만으로 합쳐서 적용하였다. 도출된 Voronoi Diagram은 Fig. 15와 같으며, Generator인 항만은 Region 내에 발생한 해양오염사고위치 최단거리가 되며, 부산해역 내에서 발생하는 해양오염사고를 대응하기 위한 해상방제장비를 가장 신속하게 동원할 수 있는 항만이 된다.

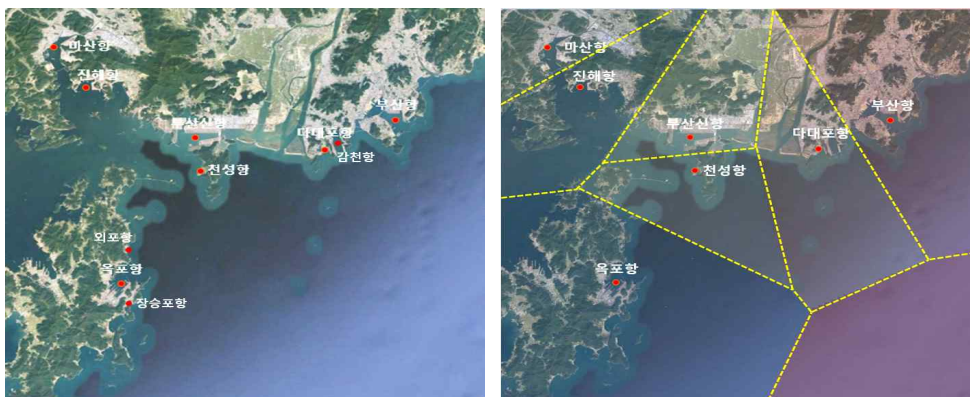


Fig. 15 Voronoi Diagram of Busan coastal region

4.3.2. 해상방제장비 배치장소의 우선순위 선정

해상방제장비의 수요 및 사고 발생 빈도와의 상관관계를 확인하고자 부산 인근 해역의 5년간 유출사고위치를 Voronoi Region 위에 작도하니 Fig. 16과 같이 나타났다. 대부분의 사고가 항만 내에서 발생하였으며, 부산항 Region이 221건으로 가장 많았고, 다대포항 Region이 81건으로 그 다음으로 많았으며, 마산항 Region, 진해항 Region, 부산신항 Region 그리고 천성항 Region과 옥포항 Region 순으로 많았다.

현재 해상방제장비가 배치되어 있는 부산항과 마산항을 제외하고, 사고건수가 많은 지역을 우선순위로 나타내면 Table 16과 같이 다대포항이 1순위, 진해항이 2순위, 부산신항이 3순위 그리고 마지막은 천성항과 옥포항으로 나타났다.

Table 16 Priority of On-water recovery equipment allocation

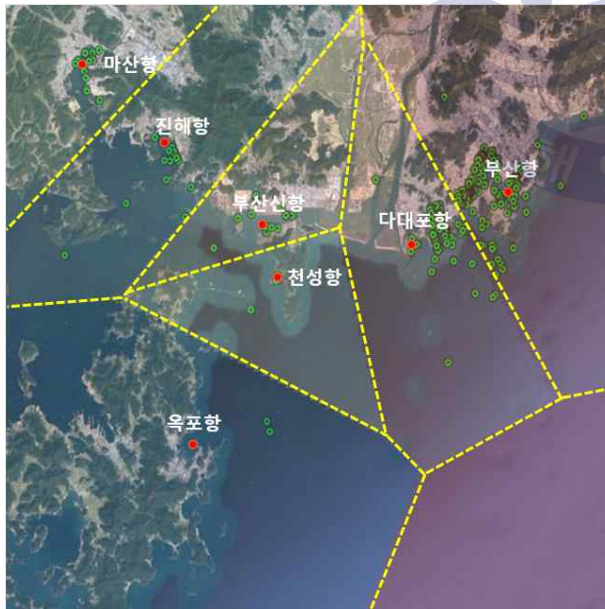


Fig. 16 Location of Oil Incidents (2012~2016)

지역	5년간 유출사고발생수	순위
부산항 Region	221건	-
다대포항 Region	81건	1
마산항 Region	24건	-
진해항 Region	15건	2
부산신항 Region	11건	3
천성항 Region	2건	4
옥포항 Region	2건	4

4.3.3. 대응시간을 이용한 최종 해상방제장비 배치장소 선정

선정된 배치장소별로 대응시간 내 도달할 수 있는 범위를 구글맵을 이용하여 도출하고, 부산해역의 해상유출사고위치에 대응시간 내 해상방제장비를 동원할 수 있는 최종 배치장소를 선정하였다. 이 때 사고통보시간과 장비동원 준비시간은 실제 방제선 및 방제장비가 해상을 통해 이동하는 시간이 아니므로 계산시 생략한다. 따라서 대응시간 내 도달할 수 있는 범위는 사고통보시간(30분)과 장비동원시간(30분)을 제외한 이동시간(2시간) 동안 방제선의 평균속력 5knots로 움직인 거리이다. 최종 배치장소 선정 시 현재 해상방제장비가 배치되어있는 항만으로부터 대응시간 내에 도달할 수 있는 항만은 제외하였고, 그 결과 기존의 해상방제장비 배치항만인 부산항, 마산항에 추가하여 부산신항 그리고 다대포항을 최종 배치장소로 선정하였다. 우선순위가 가장 높은 진해항은 앞서 설명했듯이 기존 배치항만인 마산항으로부터 2시간 이내에 도달할 수 있으므로 제외하였다. 그리고 천성항과 옥포항의 경우는 사고빈도가 가장 낮고 추가 배치장소로 선정된 부산신항으로부터 2시간 이내에 도달할 수 있으므로 최종 배치장소로 선정하지 않았다. 선정된 배치장소에서 해상유출사고를 대응시간 내 해상방제장비를 동원할 수 있는 범위는 Fig. 17과 같고 부산 해역의 해양오염사고를 대응시간 내 동원하는 것으로 나타났다.

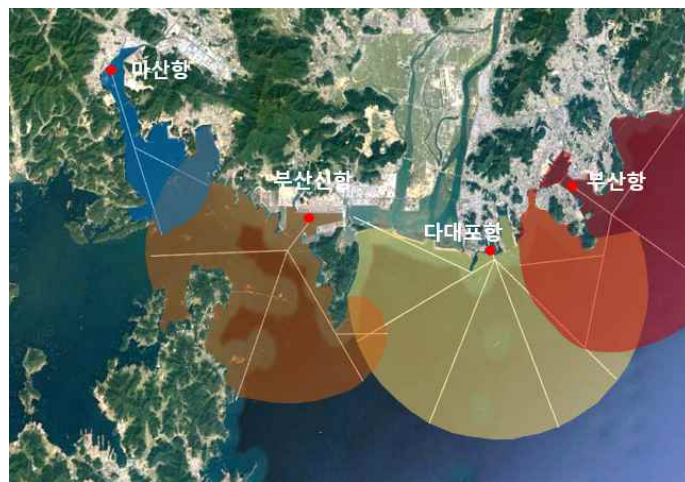


Fig. 17 Coverage of Selected deployment location

4.4. 부산해역 해상방제장비의 적정배치량 산정

앞 절(4.3)에서는 Voronoi Diagram과 해양오염사고 대응시간을 이용하여 부산해역의 해양오염사고를 대응하기 위한 해상방제장비 배치장소를 선정하였다. 이 절에서는 3.2.4에서 구한 부산해역의 지역가상최대유출량을 이용하여 도출한 해상방제장비 소요량을 HBD Model을 이용하여 배치장소별 적정배치량을 산정한다. HBD Model은 기존에 보유중인 장비를 각 지역의 해양환경위해도를 상대적으로 평가하여 분산 배치하는 것으로, 부산신항은 창원해양경찰서의 오염방제 관할 구역이므로 창원해경서의 해상방제장비를 배치하고 있는 마산항과 해양환경위해도를 평가하여 적정배치량을 산정하고 다대포항의 경우에는 부산해양경찰서의 오염방제 관할 구역이므로 부산해경서의 해상방제장비를 배치하고 있는 부산항과 해양환경위해도를 평가하여 적정배치량을 산정한다.

4.4.1. 지역별 현황 분석

(1) 사고개연성 요소

(가) 기름물동량

기름물동량은 해운항만물류정보센터(SPIDC)의 항만별 화물처리실적과 부산항항만물류정보시스템(BPA-NET)의 부두별 화물처리실적을 이용하여 정리하였으며, 원유(역청유), 석유와 석유정제품의 5년(2012년~2017년)간 처리실적(톤/척)의 평균치를 기름물동량으로 사용하였다.

Table 17을 보면 부산해경서 관할 구역(이하, 부산수역이라 함)에서 부산항이 다대포항에 비해 연간 10배 이상의 기름을 처리하였다. 창원해경서 관할 구역(이하, 창원수역이라 함)에서는 2012~2014년까지는 마산항이 부산신항보다 많은 기름을 처리하였으나, 2015년에는 부산신항의 기름처리실적이 전년도에 비해 비약적으로 증가하였고 점차 증가추세에 있는 것으로 나타났다.

지역별 기름물동량을 비율로 정규화한 결과 부산수역에서는 부산항이 0.8390, 다대포항(감천항)은 0.1610으로 계산되고, 창원수역에서는 마산항이 0.5468, 부산신항은 0.4532로 계산된다.

Table 17 The Quantity of Oil Transported(Y2012~Y2016, 5years Average)

해상방제장비 배치장소		입항척수(톤/척)					정규화 (비율)	
		2012	2013	2014	2015	2016		평균
부산 해경서	부산항	6,719,655	5,761,106	5,332,444	5,656,450	5,954,638	5,884,861	0.8390
	다대포항	507,649	446,485	588,052	462,232	527,613	506,408	0.1610
창원 해경서	마산항	1,580,740	1,387,846	1,326,104	1,502,440	1,601,159	1,479,658	0.5468
	부산신항	909,504	683,678	905,451	1,648,159	1,983,866	1,226,132	0.4532

(나) 기름저장시설의 분포

기름저장시설은 해양오염에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 해양시설로 등록되어 있는 기름저장시설로 한정하여 파악하였고, 해양경찰청의 해양시설현황(2016)을 이용하여 정리하였으며, 해양시설 중 기름저장시설들의 최대 저장량의 총합을 기름저장시설의 분포로 사용하였다.

Table 18을 보면 부산수역에서는 부산항이 다대포항에 비해 약 1.7배 많은 기름저장시설이 분포하였다. 창원수역의 경우 마산항에만 기름저장시설이 분포하였다. 부산신항의 경우 기름 물동량은 증가추세이나 따로 기름저장시설은 분포하지 않았다.

지역별 기름저장시설의 최대 저장량을 비율로 정규화한 결과 부산지역에서는 부산항이 0.6303, 다대포항은 0.3697로 계산되고, 마산지역에서는 마산항이 1.0000, 부산신항은 0.0000으로 계산된다.

Table 18 The Regional State of Oil Storage Facility(Y2016)

해상방제장비 배치장소		기름저장시설의 최대 저장량(kl)	정규화(비율)
부산 해경서	부산항	246,036	0.6303
	다대포항	144,334	0.3697
창원 해경서	마산항	110,768	1.0000
	부산신항	-	0.0000

(다) 선박의 입출항척수

선박의 입출항척수는 해운항만물류정보센터(SPIDC)의 항만별 입출항실적통계와 부산항 항만물류정보시스템(BPA-NET)의 부두별 입출항실적을 이용하여 정리하였으며, 선박의 입항과 출항이 중복되어 집계될 수 있으므로 항만별 입항선박의 5년(2012년~2017년)간 처리실적(톤/척)의 평균치를 선박의 입출항척수로 사용하였다.

Table 19를 보면 부산수역에서는 부산항이 다대포항에 비해 약 2.0배 많은 입항선박을 처리하였다. 창원수역의 경우 부산신항이 마산항에 비해 약 12.0배 많은 입항선박을 처리하였다. 부산항과 부산신항의 경우에는 입항 선박의 척수도 많지만 다대포항(감천항)과 마산항에 비해 대형선박의 입항이 많아 상대적으로 더 높은 결과가 나타났다.

지역별 입항척수(톤/척)을 비율로 정규화한 결과 부산수역에서는 부산항이 0.6688, 다대포항(감천항)은 0.3312으로 계산되고, 창원수역에서는 마산항이 0.0732, 부산신항은 0.9268로 계산된다.

Table 19 The Number of Ship's Entry(Y2012~Y2016)

해상방제장비 배치장소		입항척수(톤/척)						정규화 (비율)
		2012	2013	2014	2015	2016	평균	
부산 해경서	부산항	9,041	8,668	9,016	9,084	9,942	9,150	0.6688
	다대포항	4,718	4,522	4,176	4,584	4,656	4,531	0.3312
창원 해경서	마산항	3,428	3,502	3,538	3,929	4,538	3,787	0.0732
	부산신항	41,877	46,277	46,712	50,975	53,909	47,950	0.9268

(라) 과거 해양오염사고

과거 해양오염사고는 해양경찰청에서 발행하는 해양경찰백서와 오염사고현황을 이용하여 정리하였으며, 항만별 오염사고의 5년(2012년~2016년)간 유출량의 평균치를 과거 해양오염사고로 사용하였다.

Table 20을 보면 부산수역에서는 부산항이 다대포항에 비해 약 20.0배 많은 해양오염사고가 발생하였다. 창원수역의 경우 부산신항이 마산항에 비해 약 3.2배 많은 해양오염사고가 발생하였다. 부산신항의 경우에는 평소 해양오염사고가 많이 나지 않지만, 2015년 모래운반선 707바루다호의 침몰사고로 발생한 기름유출로 인해 높은 결과가 나타났다.

지역별 과거 해양오염사고 유출량을 비율로 정규화한 결과 부산수역에서는 부산항이 0.9520, 다대포항(감천항)은 0.0480으로 계산되고, 창원수역에서는 마산항이 0.2369, 부산신항은 0.7631로 계산된다.

Table 20 Spill Volume of Past Oil Spill Accident(Y2012~Y2016)

해상방제장비 배치장소		과거 해양오염사고 유출량(리터)						정규화 (비율)
		2012	2013	2014	2015	2016	평균	
부산 해경서	부산항	19,978	146,934	574,435	59,982	109,261	182,118	0.9520
	다대포항	5,327	511	36,660	320	3,106	9,185	0.0480
창원 해경서	마산항	297	1,263	223	714	1,872	874	0.2369
	부산신항	-	150	204	13,676	43	2,815	0.7631

(2) 사후민감도 요소

(가) 양식업 분포

양식업 분포는 부산광역시와 경상남도에서 시행하는 양식어장 예찰결과(2017년 1월)를 이용하여 정리하였으며, 항만별 분포하고 있는 양식어장 면적 총합을 양식업 분포로 사용하였다.

Table 21을 보면 부산수역에서는 부산항이 다대포항(감천항)에 비해 약 1.6배 많은 양식장이 분포하고 있다. 창원수역의 경우 부산신항에는 양식장이 분포하고 있지 않고, 마산항에만 분포하고 있다.

지역별 양식어장의 분포를 비율로 정규화한 결과 부산수역에서는 부산항이 0.6214, 다대포항(감천항)은 0.3786으로 계산되고, 창원수역에서는 마산항이 1.0000, 부산신항은 0.0000으로 계산된다.

Table 21 The State of Aquaculture(Y2017)

해상방제장비 배치장소		양식어장의 면적(ha)					정규화 (비율)
		해면 어류	내수면 어류	해조류	패류	총합	
부산 해경서	부산항	9.1	-	757.0	-	766.1	0.6214
	다대포항	-	17.0	450.0	-	467.0	0.3786
창원 해경서	마산항	260.4	-	1,207.0	518.0	1,985.0	1.0000
	부산신항	-	-	-	-	-	0.0000

(나) 환경관리해역

환경관리해역은 해양환경관리법 제15조, 동법 시행령 10조 별표 1과 2를 이용하여 정리하였으며, 항만별 분포하고 있는 환경관리해역 면적을 환경관리해역으로 사용하였다. 부산항, 다대포항 그리고 부산신항은 구역 구분 기준에 따라 부산연안특별관리해역에서 면적을 계산하였다.

Table 22를 보면 부산수역에서는 다대포항이 부산항에 비해 약 2.0배 넓은 해양관리해역이 분포하고 있다. 창원수역의 경우 마산항이 부산신항에 비해 약 8배 넓은 해양관리해역이 분포하고 있다.

지역별 해양관리해역 면적을 비율로 정규화한 결과 부산수역에서는 부산항이 0.3281, 다대포항(감천항)은 0.6719로 계산되고, 창원수역에서는 마산항이 0.8891, 부산신항은 0.1109로 계산된다.

Table 22 The regional State of Particularly Management Sea Area

해상방제장비 배치장소		환경관리해역의 면적(km ²)	정규화(비율)
부산 해경서	부산항	231.0	0.3281
	다대포항	473.0	0.6719
창원 해경서	마산항	300.7	0.8891
	부산신항	37.5	0.1109

(다) 위락시설

위락시설은 통계청의 해수욕장의 이용객 통계와 지방해양수산청의 국내·외 여객선 이용객 통계를 이용하여 정리하였으며, 항만별 해수욕장의 이용객수와 국내·외 여객선 이용객수의 합을 이용하여 계산하였다.

Table 23을 보면 부산수역에서는 부산항은 다대포항에 비해 약 7.1배 많은 이용객이 이용하였다. 창원수역의 경우 마산항은 기존에 있던 해수욕장을 다 폐쇄하여 해수욕장이용객수는 없으며, 연간 매우 작은 인원이 여객선을 이용하였고 부산신항의 경우에는 해수욕장과 여객선운항이 없어 이용객수는 없는 것으로 나타났다.

지역별 위락시설 이용객수를 비율로 정규화한 결과 부산수역에서는 부산항이 0.8779, 다대포항은 0.1221로 계산되고, 창원수역에서는 마산항이 1.0000, 부산신항은 0.000으로 계산된다.

Table 23 The Number of Amenity Users(Y2016)

해상방제장비 배치장소		위락시설 이용객			정규화(비율)
		해수욕장 이용객수	여객선 이용객수	합계	
부산 해경서	부산항	40,873,182	1,225,375	42,098,557	0.8779
	다대포항	5,923,800	-	5,923,800	0.1221
창원 해경서	마산항	-	2,174	2,174	1.0000
	부산신항	-	-	-	0.0000

(3) 정규화 결과

사고개연성 요소 4개와 사후민감도 요소 3개에 대한 지역별 자료를 정리하여, 각 요소에 대한 항만별 비율로 정규화하여 Table 24와 같이 정리하였다. 하민재(2014)는 정규화 값을 지역의 항목별 점수치라 하였고, 이 점수치로 특정항목을 대한 지역내 항만의 비중을 파악할 수 있다.

Table 24 Normalization Value

해상방제장비 배치장소		사고개연성				사후민감도		
		기름 물동량	기름 저장시설	선박 입출항	과거 오염사고	양식장 분포	환경관리 해역	위락시설 이용객
부산 해경서	부산항	0.8390	0.6303	0.6688	0.9520	0.6214	0.3281	0.8779
	다대포항	0.1610	0.3697	0.3312	0.0480	0.3786	0.6719	0.1221
창원 해경서	마산항	0.5468	1.0000	0.0732	0.2369	1.0000	0.8891	1.0000
	부산신항	0.4532	-	0.9268	0.7631	-	0.1109	-

4.4.2. 해상방제장비 적정배치량 설정

항만에 따른 항목별 현황을 분석하고 정규화한 값에 항목간의 가중치(Table 25)를 적용하여 합한 값을 지역 내 항만의 최종 위해도로 결정한다. 즉, 항만별로 7개의 항목에 대한 위해도 점수치를 구하고, 여기에 항목에 대한 가중치를 곱한 값의 총합이 항만의 수역내 최종 위해도가 되는 것이다.

Table 25 Final Weight by Analysis Hierarchy Process

상위평가항목	하위평가항목	최종 가중치
사고개연성 (0.682)	기름 물동량(0.449)	0.31
	기름저장시설(0.170)	0.12
	선박의 입출항(0.235)	0.16
	과거 오염사고(0.146)	0.10
사후민감도 (0.318)	양식장 분포(0.577)	0.18
	환경관리해역(0.229)	0.07
	위락시설이용객(0.195)	0.06
최종가중치 = 상위평가항목 가중치 × 하위평가항목		

(Source : 하민재, 2014)

수역별 항만을 대상으로 최종 위해도를 산정하면 Table 26과 같다. 부산수역에서 부산항의 최종위해도는 0.73이고 다대포항의 최종위해도는 0.27으로 부산항이 월등히 높은 것으로 나타났다. 이는 가중치가 낮은 환경관리해역을 제외한 모든 부분에서 부산항의 비율이 높았기 때문이다. 그리고 창원수역에서는 마산항의 최종위해도가 0.63이고 부산신항의 최종위해도가 0.37로 마산항이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 부산신항은 마산항보다 선박입출항과 과거 오염사고가 월등히 높게 나타났지만, 가중치가 가장 높은 기름 물동량의 차이와 점수치가 없는 항목 때문이다.

Table 26 Final Hazard Value

가중치 수역		기름 물동량 (0.31)	기름 저장시설 (0.12)	선박 입출항 (0.16)	과거 오염사고 (0.10)	양식장 현황 (0.18)	환경관 리해역 (0.07)	위락시설 이용객 (0.06)	최종 위해도
부산 해경서	부산항	0.839	0.630	0.669	0.952	0.621	0.328	0.873	0.73
	다대포항	0.161	0.370	0.331	0.048	0.379	0.672	0.127	0.27
창원 해경서	마산항	0.547	1.000	0.073	0.237	1.000	0.889	1.000	0.63
	부산신항	0.453	-	0.927	0.763	-	0.111	-	0.37

4.5. 결과

부산해역의 해상방제장비 배치장소가 될 수 있는 항만을 기준으로 Voronoi Diagram을 작도하여, 부산해역 내에서 발생하는 해양오염사고를 대응하기 위해 해상방제장비를 가장 신속하게 동원할 수 있는 항만을 선정하였다. 그리고 Voronoi Region 별 5년간 발생했던 해양오염사고 발생수를 이용하여 배치항만의 우선순위를 부여하였다. 배치항만의 우선순위와 대응시간 이내 도달할 수 있는 범위를 이용해 부산 해역에서 발생하는 해상유출사고를 대응시간 내 방제장비를 동원할 수 있는 배치장소로 부산항, 마산항, 부산신항, 다대포항을 선정하였다. 그리고 HBD Model을 이용하여 해상방제장비 배치장소 별 최종 위해도를 산정하였다.

최종적으로 배치장소 별 최종위해도와 현행 해상방제장비 배치량의 곱으로 적정 배치량을 산정하였고, 그 결과는 Table 27과 같다. 이 때 부산항과 마산항의 해상계획수거량은 두 항만 사이에서 발생할 수 있는 최대유출량은 3.2.4에서 계산한 부산해역 가상최대유출량과 같기 때문에 이 양의 1/3인 해상기름회수용량 1,200kl를 부산항과 마산항의 현행 해상방제장비 배치량으로 설정하였다.

Table 27 Optimal Allocation of On-water Spill Response Equipment

해양방제장비 배치장소		최종 위해도 (A)	현행 배치량 (B)	적정 배치량 (A×B)	적정 소요량		
					유회수기 (kl/h)	오일뿔 (m)	임시 저장장치 (kl)
부산 해경서	부산항	0.73	1,200	876	553.1	4,380	1,752
	다대포항	0.27	-	324	204.5	1,620	648
창원 해경서	마산항	0.63	1,200	756	477.3	3,780	1,512
	부산신항	0.37	-	444	280.3	2,220	888

부산 해역에서 발생하는 해양유출사고를 대응시간 내에 신속하게 방제장비를 동원하여 방제작업을 할 수 있는 배치장소로 부산항, 다대포항, 마산항 그리고 부산신항을 선정하였으며, 배치장소 별 해양방제장비 적정배치량(유효 회수용량)은 부산항 876kl/h, 다대포항 324kl/h, 마산항 756kl/h 그리고 부산신항 444kl/h로 나타났다. 그리고 이를 식 (18)~(20)을 이용하여 각 항만별 소요량을 계산한 결과 Table 27과 같이 나타났다.

제 5 장 해상방제장비 배치적정성 평가

5.1. 배치 적정성 평가지역

Fig. 18과 같이 선박이 부산 인근 해역을 통항 시 해상교통관제센터에 보고하는 지점을 기준으로 해당 통항보고지점 내 해역 중 부산지역의 최대유출사고 발생 가능성이 높고 신속한 대응이 어려울 것으로 예상되는 위치를 3개 선정하여 본 연구에서 제안한 해상방제장비 배치의 적정성을 평가한다. 대부분의 유출사고 발생시 VTS를 통해 사고내용 전달이 되므로 본 연구에서는 배치적정성 평가지역을 선박과 VTS와의 교신이 원활한 지역인 통항보고지점 내의 해역으로 선정하였다. 좌우로 통항하는 선박과 부산신항, 마산항 및 진해만을 입출항하는 선박의 교통량이 많고 이로 인해 사고 발생 가능성이 매우 높은 부산신항 도선지점을 첫 번째 적정성 평가지역으로 선정하였다. 부산항과 부산신항의 거리상 가운데 지역이며 유출사고 발생시 신속한 대응이 이루어지기 어렵고 좌우로 통항하는 선박량이 많아 사고 발생가능성이 높은 곳으로 가덕도등대로부터 동방 6마일 떨어진 위치를 두 번째 적정성 평가지역으로 선정하였다. 그리고 마지막 적정성 평가지역은 해상교통관제센터 보고지점의 동쪽 끝단이며, 좌우로 통항하는 선박의 교통량이 많은 해상교통관제센터 보고지점의 동쪽 끝단을 선정하였다.



Fig. 18 Location of Oil Spill Simulation

5.2. 배치 적정성 평가방법

부산해역 해양오염사고의 신속한 초동대응을 위한 해상방제장비배치의 적정성 평가는 지역의 최대유출사고 발생시의 해상방제시간 산정방법을 통해, 현행 배치와 연구결과의 배치를 비교하여 적정성을 평가한다. 해상방제시간 산정방법은 유회수기, 오일붐 그리고 임시저장탱크를 대상으로 한다.

해상방제시간 산정방법을 이용한 적정성 평가방법은 2단계로 나누어 실시한다. 1단계에서는 대응시간을 평가하는 단계로써 사고발생시각부터 해상방제장비(유회수기, 오일붐, 임시저장탱크)를 방제선에 탑재하여 사고 현장까지 도착하는데 걸리는 총 시간을 계산하여 비교하는 것이고, 2단계는 대응시간과 유출유 전량 회수에 걸린 시간의 합인 해상방제시간을 평가하는 단계로써 대응시간에 추가하여 동원된 방제장비를 이용한 유출유 회수작업 시작부터 종료까지의 방제작업시간을 계산하여 비교하는 것이다. 이 때 방제작업시간은 유회수기의 총 유효회수량을 이용하여 지역 최대유출사고 발생 시 목표 해상수거량 전량을 회수한 시간으로 한다. 그리고 임시저장장치와 오일붐은 소요량만큼 비치되어 유회수기가 유효회수량만큼 회수할 수 있으므로 2단계 평가시에는 임시저장장치와 오일붐에 대한 평가는 생략한다.

해상방제시간 산정에 필요한 항목들을 가정요소와 입력요소로 나눈다. 가정요소로는 날씨, 방제인력의 작업가능시간, 방제작업의 시작시점과 종료시점 그리고 해상거리가 있다. 해상·기상이 좋지 않은 경우 해상에서의 기름회수가 제한되므로, 날씨조건은 기름을 회수할 수 있는 조건인 B.F Scale 2~3으로 설정하고, 방제작업시간은 해상방제장비가 사고 현장에 도착하여 방제작업을 시작한 시각부터 목표 해상 수거량 전량을 회수 완료할 때까지 경과한 시간을 말하며, 사고현장에서 방제인력을 통해 이루어지는 방제작업은 우리나라 현행 기준에 따라 주간(08시~18시)동안 8시간 작업하는 것으로 한다. 방제장비가 주간 도착시에는 도착시각을 시작 시점으로 하고, 야간 도착시에는 익일 오전 8시를 시작 시점으로 한다. 해상거리는 국립해양조사원에서 발간하는 해상거리표를 기본으로 하고, 해상거리표 상에 없는 거리는 ECDIS를 이용하여 해상방제장비

배치항만의 중앙에서 사고위치까지 선박의 통상적인 항로를 따라 측정하고 이를 적용한다. 입력요소로는 사고통보시간, 장비동원준비시간, 항해시간 그리고 시간당 유희수기의 회수량이 있다. 사고통보시간은 사고발생시부터 해양경찰이 오염사고를 통보 받은 때까지 경과한 시간으로 4.3.3에 제시한 기준에 따라 30분으로 입력한다. 장비동원준비시간은 사고발생 통보 시각부터 출항준비완료시까지 소요되는 시간으로 방제장비 비축기지로부터 방제장비 동원, 방제인력의 집결 등이 포함되며 4.3.3에 제시한 기준에 따라 비축기지가 있는 지역은 평균 30분으로 입력하고 비축기지가 없는 지역은 시간을 따로 입력하지 않는다. 항해(이동)시간은 장비동원 준비 완료시부터 사고현장 도착시까지 경과시간을 말하며, 이동속력의 평균은 4.3.3에 제시한 기준에 따라 평균속력 5knots를 입력한다. 해상수거량은 우리나라의 기준에 따라 지역 최대유출량의 1/3으로 입력하고, 이 양을 기준으로 보유중인 유희수기 회수량을 나누어 작업시간을 산정한다. 작업시간 계산시 사용되는 시간당 유희수기 회수량은 우리나라 소요량 산정 기준을 이용하여 지역별 총 회수용량에 목표 해상방제 작업완료시간(3일간 매일 8시간, 총 24시간)을 나눈 값인 지역의 시간당 유희수기 유효회수량으로 한다.

Table 28 Parameter of time computation for On-water response

해상방제시간 산정 파라미터		
가 정 요 소	날씨	Beaufort Scale 2~3
	방제인력의 해상방제 작업 가능시간	주간(08시~18시)동안 방제요원의 피로도를 감안하여 8시간 작업하는 것을 원칙으로 함.
	작업시간	해상방제작업 시작시점 ~ 해상방제작업 종료시점
	방제작업 시작시점	주간 도착의 경우 도착시각을 기준으로 하며 야간 도착의 경우 익일 오전 8시 기준
	방제작업 종료시점	지역 최대유출사고시 해상수거량을 회수 완료한 시각
입 력 요 소	대응시간	사고통보시간 + 장비동원준비시간 + 항해(이동)시간
	사고통보시간	30분
	장비동원준비시간	30분(지역에 방제장비 비축기지가 있는 경우)
	항해(이동)시간	해상거리 ÷ 5knots
	항만의 시간당 유희수기 회수량(kl/h)	항만별 총유효회수량 ÷ (3일×8시간) (시간당 유희수기 유효회수량)

5.3. 배치적정성 평가

5.3.1. 부산신항 도선점에서의 지역 최대유출사고

부산신항 도선점에서 지역 최대유출량인 3,600kl가 유출된 것으로 설정하고 이 중 1/3인 1,200kl를 해상에서 회수하는 것으로 한다.

(1) 대응시간 평가

Table 29에 나타나 있는 사고위치와 각 항만간의 거리를 기준으로 현행 배치 장소에서 사고지점까지 걸리는 대응시간은 Fig. 19와 같이 사고통보시간 0.5시간, 이동시간 3.8시간으로 총 4.3시간 걸리는 것으로 계산되었고, 본 연구에서 제안한 배치에서 사고지점까지 걸리는 대응시간은 Fig. 20과 같이 사고통보시간 0.5시간, 이동시간 1.8시간으로 총 2.3시간 걸리는 것으로 계산되었다. 두 대응시간을 비교하면 현행 기준일 때보다 연구결과로 제시한 배치의 대응시간이 46.5%가 단축되어, 해상방제장비를 부산항, 마산항, 다대포항 그리고 부산신항에 분산 배치한 경우 해양오염사고를 더 신속하게 대응하는 것으로 나타났다.

Table 29 Distance between 1st case spill location and each Port

항만	사고위치 (N.Miles)	부산항 (N.Miles)	다대포항 (N.Miles)	마산항 (N.Miles)	부산신항 (N.Miles)
사고위치	0	19	11	21	9
부산항	19	0	11	38	24
다대포항	11	11	0	30	17
마산항	21	38	30	0	17
부산신항	9	24	17	17	0

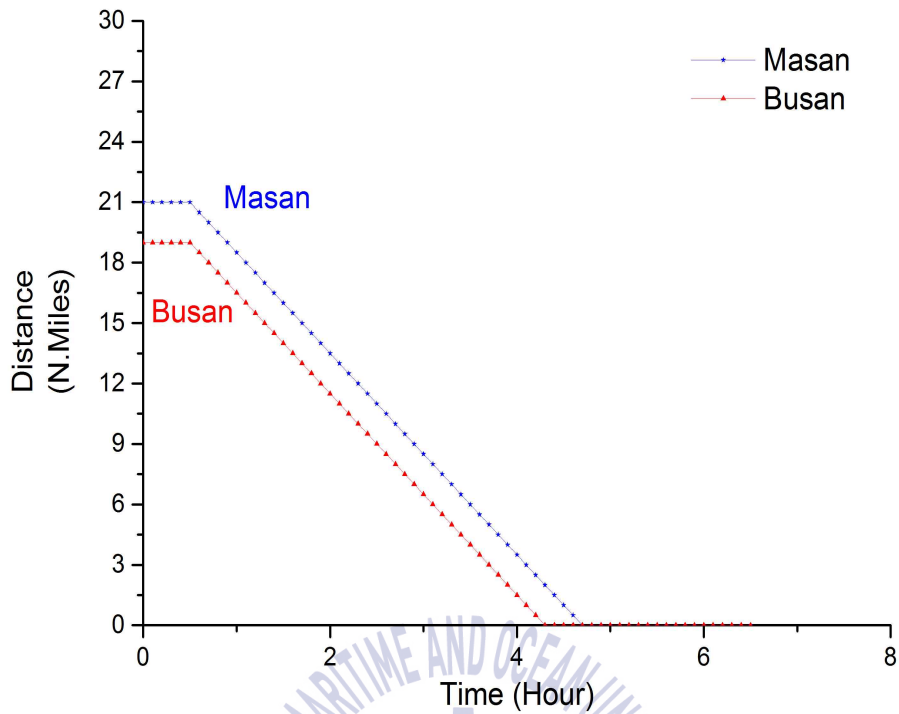


Fig. 19 Response time of present allocation(1st)

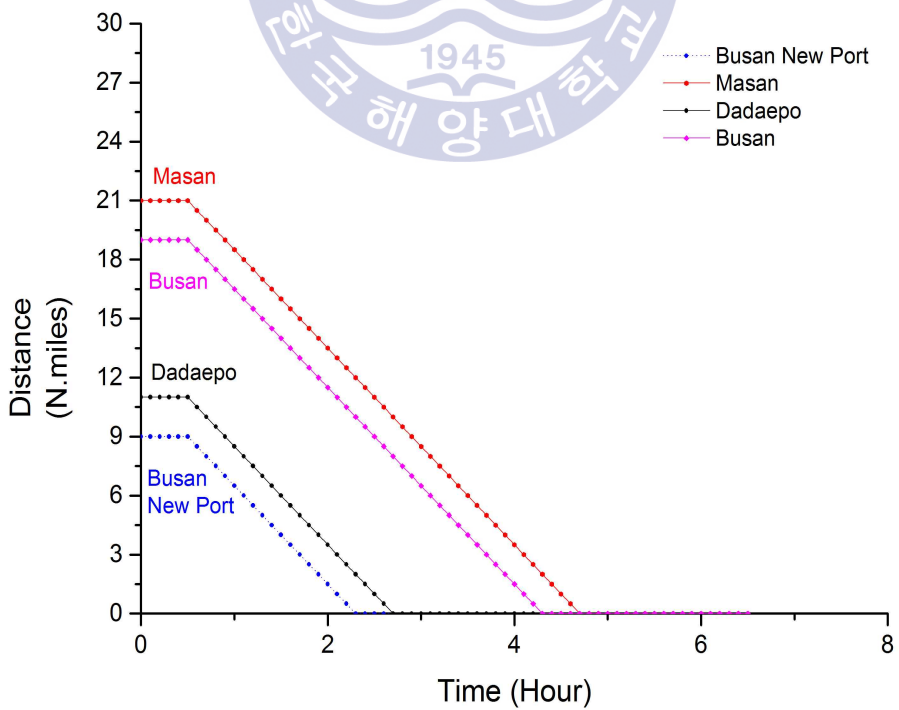


Fig. 20 Response time of alternative allocation(1st)

(2) 해상방제시간 평가

Table 30에 나타나 있는 각 항만에 배치되어 있는 해상방제장비량을 기준으로 대응시간에 추가하여 목표 해상수거량 전량을 회수 완료할 때까지 경과한 총 해상방제시간은 현행 배치의 경우 Fig. 21과 같이 대응시간 4.3시간, 방제작업시간 12.2시간으로 총 16.5시간이 걸리는 것으로 계산되었고, 제안된 배치의 경우 총 해상방제대응시간은 Fig. 22와 같이 대응시간 2.3시간, 방제작업시간 13.54시간으로 총 15.84시간 걸리는 것으로 계산되었다.

Fig. 23과 같이 총 해상방제시간을 비교하면 현행 기준일 때보다 연구결과로 제시한 배치의 해상방제시간이 4.00%가 단축되어, 해상방제장비를 부산항, 마산항, 다대포항 그리고 부산신항에 분산 배치한 경우 해양오염사고를 더 신속하게 대응하는 것으로 나타났다.

Table 30 Present and Optimal total effective recovery capacity of each port

항만	현행 해상방제장비 배치량 (유효회수량, kl/h)	적정 해상방제장비 배치량 (유효회수량, kl/h)
부산항	1,200	876
다대포항	-	324
마산항	1,200	756
부산신항	-	444

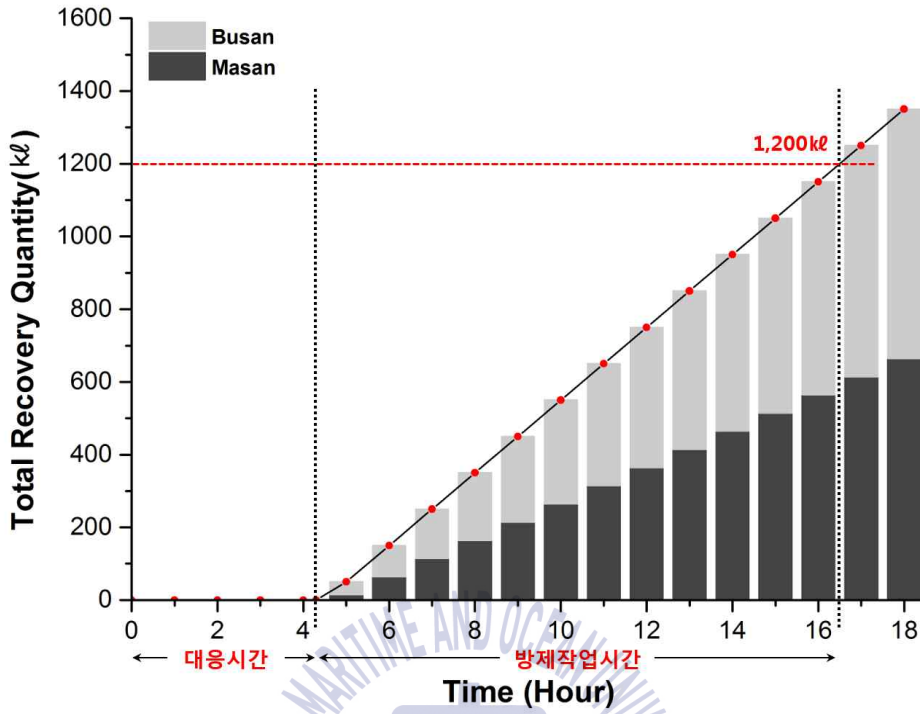


Fig. 21 On-water response time of present allocation(1st)

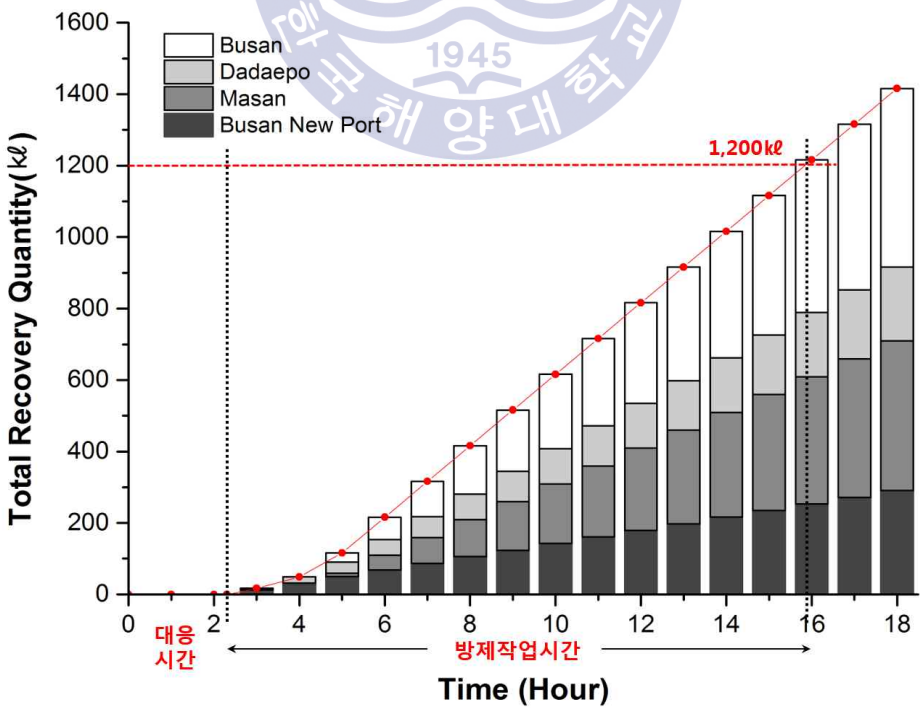


Fig. 22 On-water response time of alternative allocation(1st)

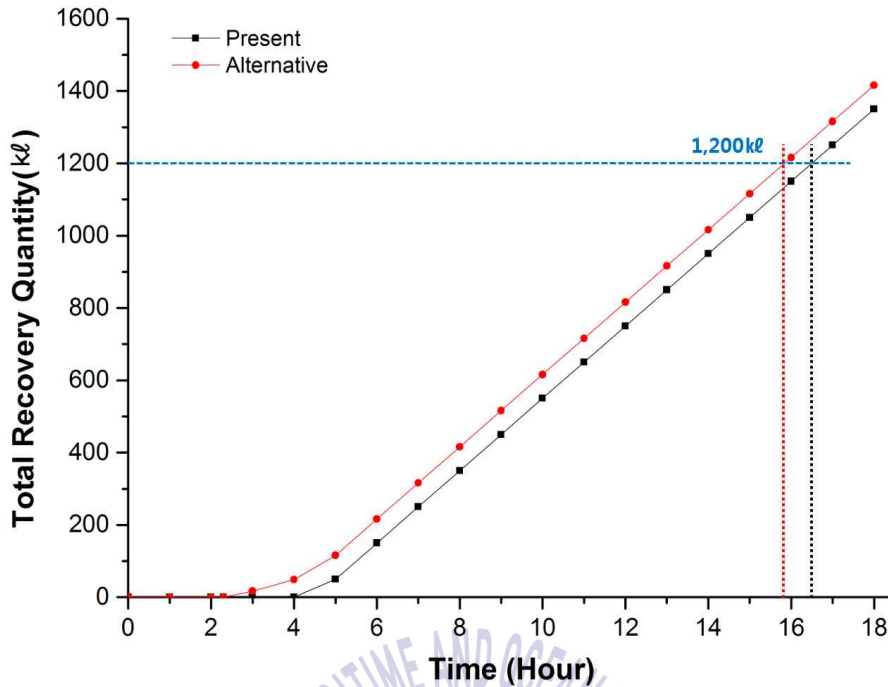


Fig. 23 Comparison of On-water response time(1st)

5.3.2. 가덕도등대 동방 6마일 위치에서의 지역 최대유출사고

가덕도등대 동방 6마일 위치에서 지역 최대유출량인 3,600kl가 유출된 것으로 설정하고 이 중 1/3인 1,200kl를 해상에서 회수하는 것으로 한다.

(1) 대응시간 평가

Table 31에 나타나 있는 사고위치와 각 항만간의 거리를 기준으로 현행 배치 장소에서 사고지점까지 걸리는 대응시간은 Fig. 24와 같이 사고통보시간 0.5시간, 이동시간 2.6시간으로 총 3.1시간 걸리는 것으로 계산되었고, 본 연구에서 제안한 배치에서 사고지점까지 걸리는 대응시간은 Fig. 25와 같이 사고통보시간 0.5시간, 이동시간 1.0시간으로 총 1.5시간 걸리는 것으로 계산되었다. 두 대응시간을 비교하면 현행 기준일 때보다 연구결과로 제시한 배치의 대응시간이 51.6%가 단축되어, 해상방제장비를 부산항, 마산항, 다대포항 그리고 부산신항에 분산 배치한 경우 해양오염사고를 더 신속하게 대응하는 것으로 나타났다.

Table 31 Distance between 2nd case spill location and each Port

항만	사고위치 (N.Miles)	부산항 (N.Miles)	다대포항 (N.Miles)	마산항 (N.Miles)	부산신항 (N.Miles)
사고위치	0	13	5	24	12
부산항	13	0	11	38	24
다대포항	5	11	0	30	17
마산항	24	38	30	0	17
부산신항	12	24	17	17	0

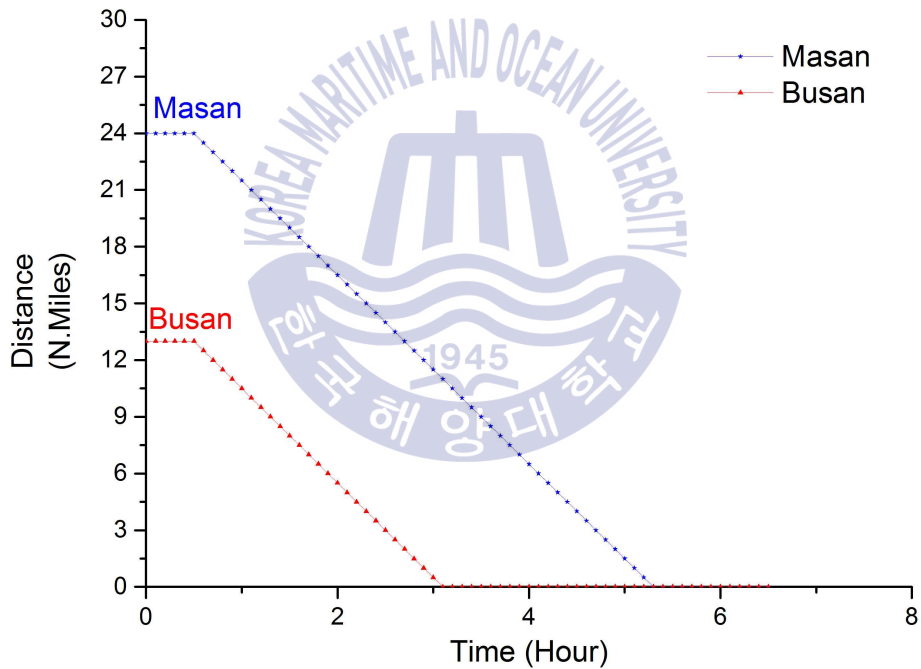


Fig. 24 Response Time of Present Allocation(2nd)

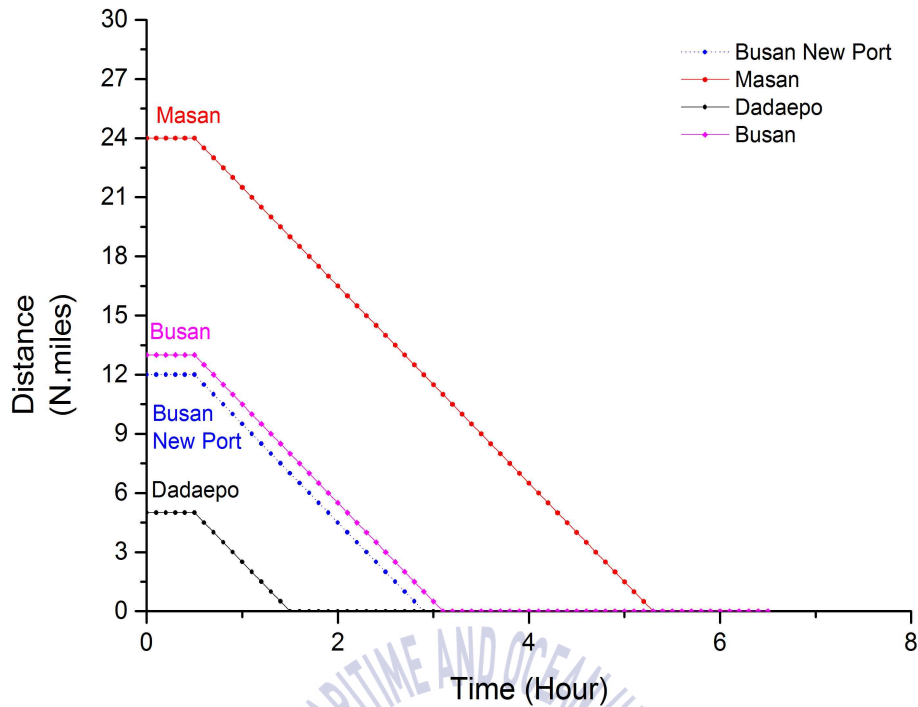


Fig. 25 Response Time of Alternative Allocation(2nd)

(2) 해상방제시간 평가

Table 30에 나타나 있는 각 항만에 배치되어 있는 해상방제장비량을 기준으로 대응시간에 추가하여 목표 해상수거량 전량을 회수 완료할 때까지 경과한 총 해상방제시간은 현행 배치의 경우 Fig. 26과 같이 대응시간 3.1시간, 방제작업시간 13.15시간으로 총 16.25시간이 걸리는 것으로 계산되었고, 제안된 배치의 경우 해상방제시간은 Fig. 27과 같이 대응시간 1.5시간, 방제작업시간 14.08시간으로 총 15.58시간 걸리는 것으로 계산되었다.

Fig. 28과 같이 총 해상방제시간을 비교하면 현행 기준일 때보다 연구결과로 제시한 배치의 해상방제시간이 4.12%가 단축되어, 해상방제장비를 부산항, 마산항, 다대포항 그리고 부산신항에 분산 배치한 경우 해양오염사고를 더 신속하게 대응하는 것으로 나타났다.

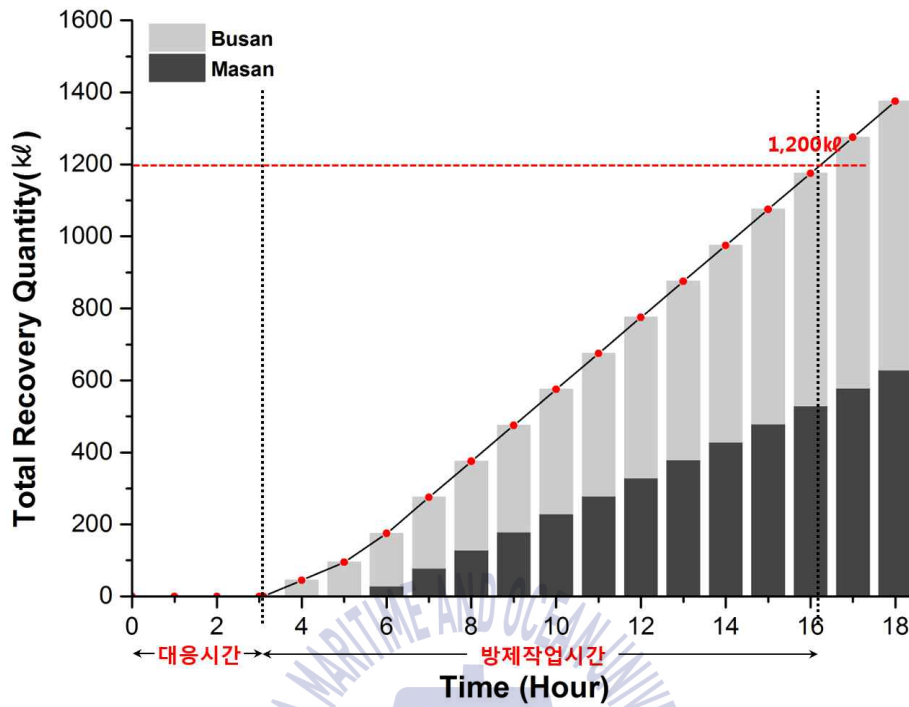


Fig. 26 On-water response time of Present Allocation(2nd)

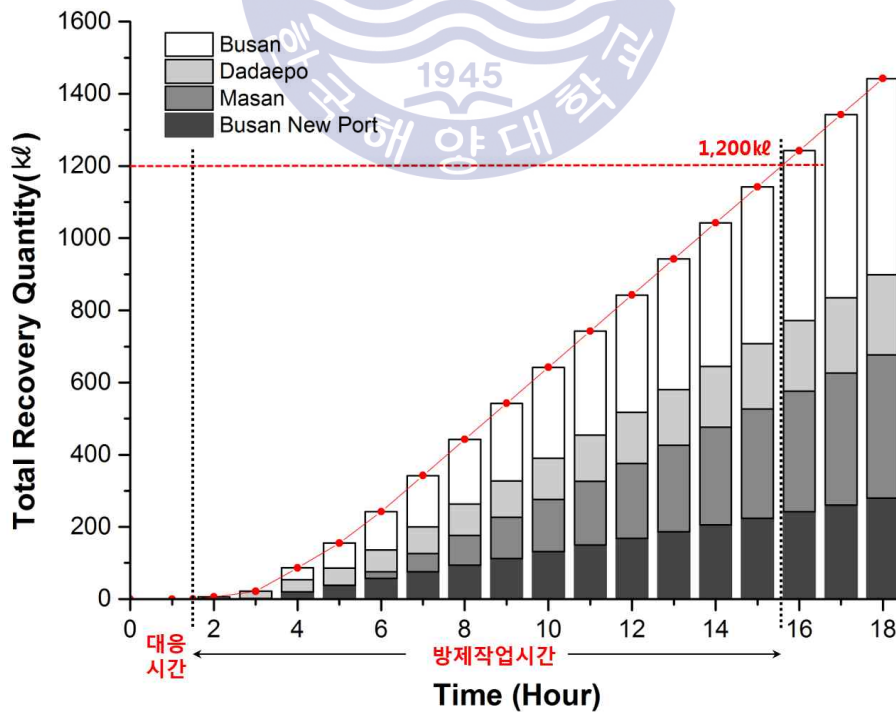


Fig. 27 On-water response time of Alternative Allocation(2nd)

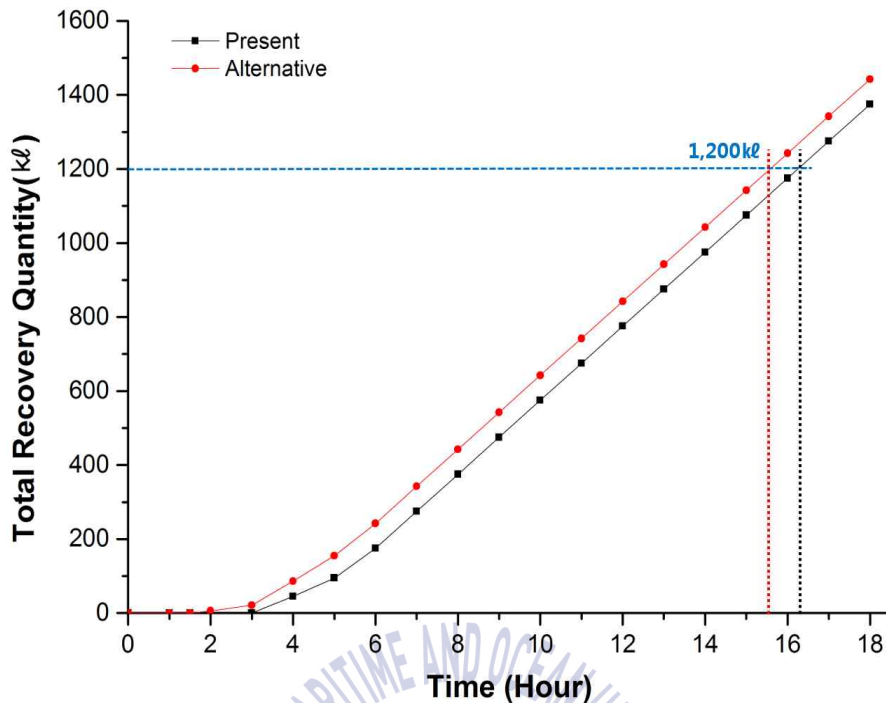


Fig. 28 Comparison of Total Response Time(2nd)

5.3.3. 부산 VTS 보고지점의 동쪽 끝단에서의 지역 최대유출사고

부산 해상교통관제센터 보고지점의 동쪽 끝단에서 지역 최대유출량인 3,600kl가 유출된 것으로 설정하고 이 중 1/3인 1,200kl를 해상에서 회수하는 것으로 한다.

(1) 대응시간 평가

Table 32에 나타나 있는 사고위치와 각 항만간의 거리를 기준으로 현행 배치 장소에서 사고지점까지 걸리는 대응시간은 Fig. 29와 같이 사고통보시간 0.5시간, 이동시간 1.0시간으로 총 1.5시간 걸리는 것으로 계산되었고, 본 연구에서 제안한 배치에서 사고지점까지 걸리는 대응시간은 Fig. 30과 같이 사고통보시간 0.5시간, 이동시간 1.0시간으로 총 1.5시간 걸리는 것으로 계산되었다. 두 대응시간이 같은 것으로 나타났다.

Table 32 Distance between 3rd case spill incident location and each Port

항만	사고위치 (N.Miles)	부산항 (N.Miles)	다대포항 (N.Miles)	마산항 (N.Miles)	부산신항 (N.Miles)
사고위치	0	5	14	39	27
부산항	5	0	11	38	24
다대포항	14	11	0	30	17
마산항	39	38	30	0	17
부산신항	27	24	17	17	0

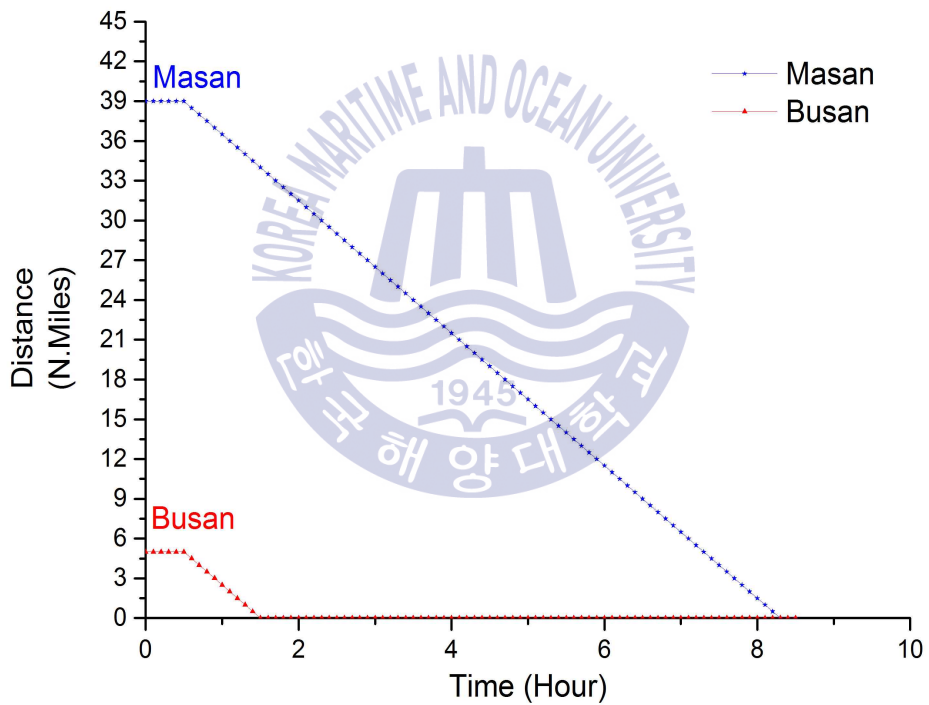


Fig. 29 Response time of present allocation(3rd)

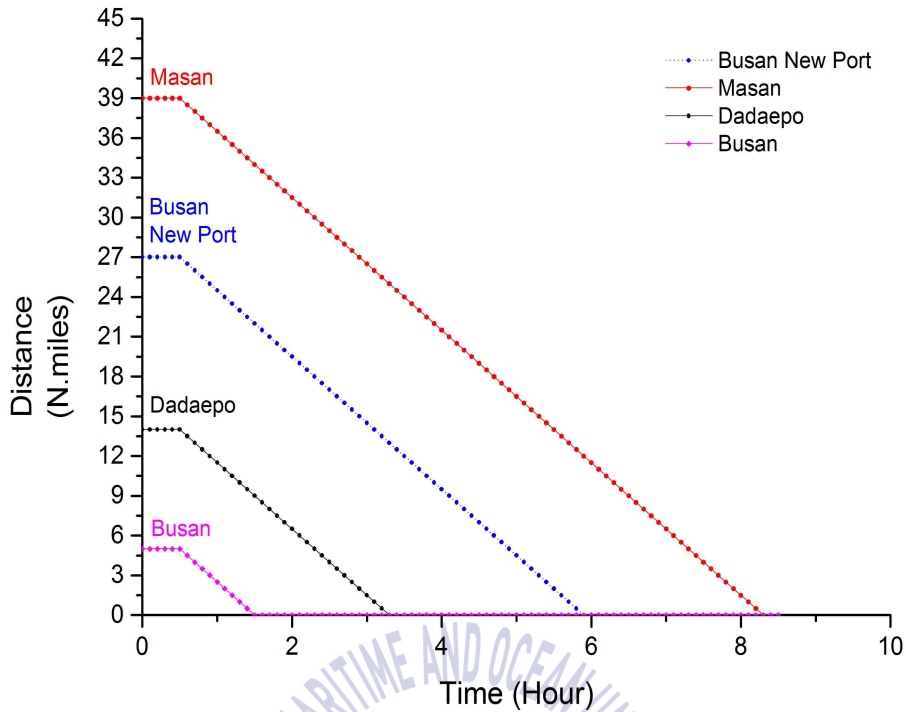


Fig. 30 Response time of alternative allocation(3rd)

(2) 총 해상방제시간 평가

Table 30에 나타나 있는 각 항만에 배치되어 있는 해상방제장비량을 기준으로 대응시간에 추가하여 목표 해상수거량 전량을 회수 완료할 때까지 경과한 총 해상방제시간은 현행 배치의 경우 Fig. 31과 같이 대응시간 1.5시간, 방제작업시간 15.4시간으로 총 16.9시간이 걸리는 것으로 계산되었고, 제안된 배치의 경우 총 해상방제대응시간은 Fig. 32와 같이 대응시간 1.5시간, 방제작업시간 15.2시간으로 총 16.7시간 걸리는 것으로 계산되었다.

Fig. 33과 같이 총 해상방제대응시간을 비교하면 사고대응초기에는 현행 기준이 더 신속하게 대응작업이 되었으나, 사고발생 7시간 이후부터는 연구결과로 제시한 배치가 더 빠르게 대응작업이 이루어지는 것으로 나타났으며, 현행 기준일 때보다 연구결과로 제안한 배치의 경우 해상방제시간이 1.18%가 단축되어, 해상방제장비를 부산항, 마산항, 다대포항 그리고 부산신항에 분산 배치한 경우 해양오염사고를 더 신속하게 대응하는 것으로 나타났다.

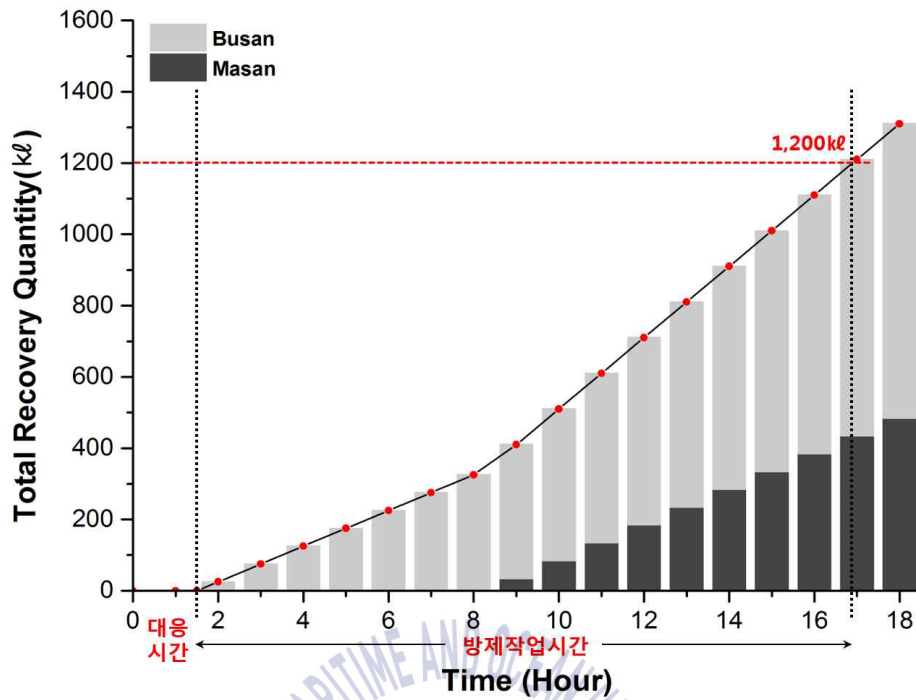


Fig. 31 On-water response time of Present Allocation(3rd)

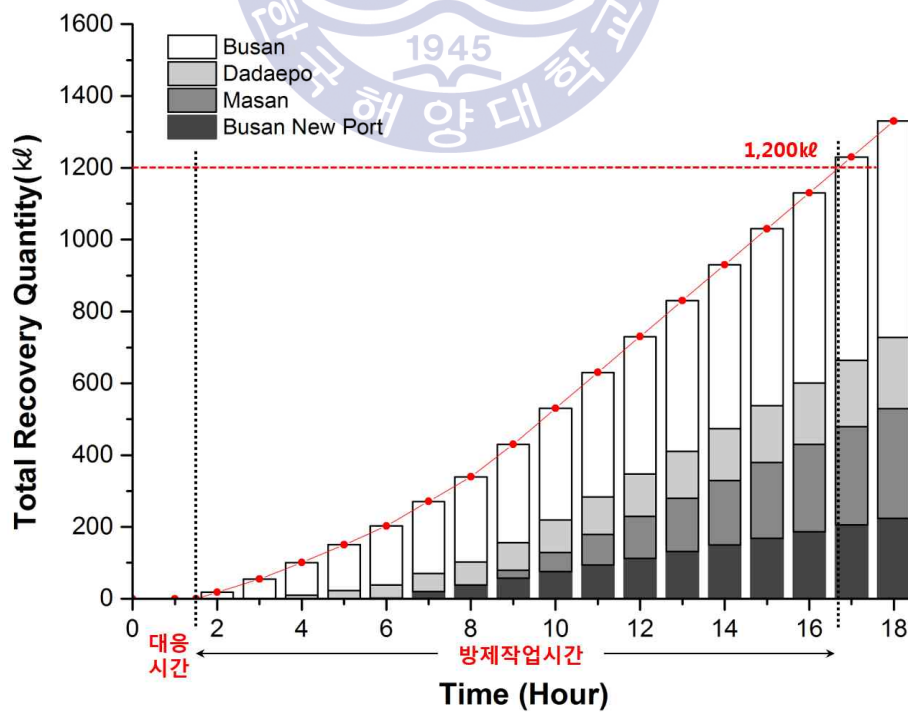


Fig. 32 On-water response time of alternative allocation(3rd)

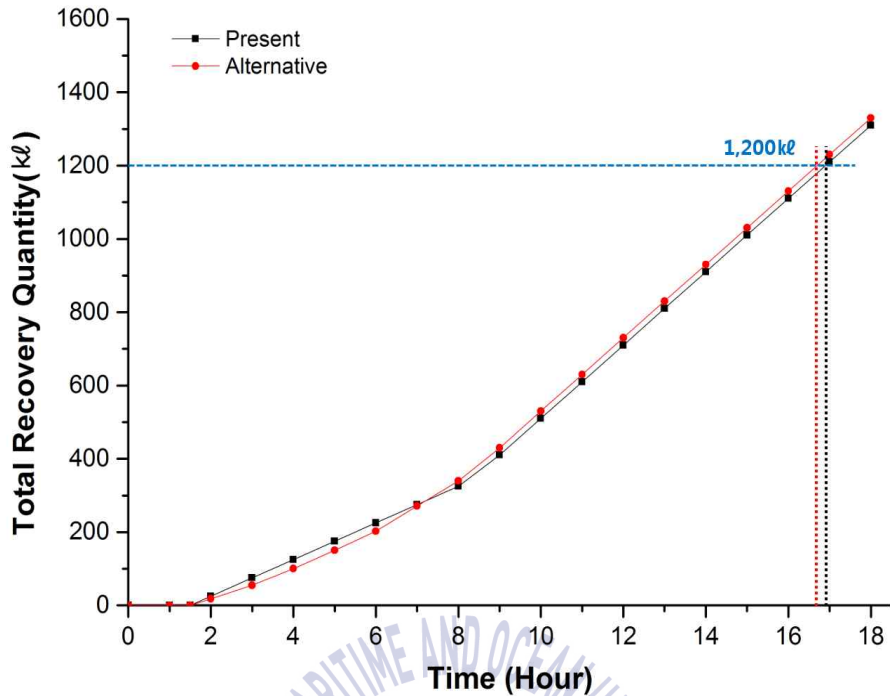


Fig. 33 Comparison of On-water response time(3rd)

5.4. 평가 결과

부산해역에서 지역 최대유출사고 발생을 가정하여 산정한 해상방제시간은 Table 33과 같이 나타났으며, 본 연구에서 제시한 해상방제장비 배치가 현행의 해상방제장비 배치보다 더 신속한 초동대응뿐만 아니라 해상에서의 이루어지는 방제시간도 줄어드는 것으로 나타났다.

Table 33 Result of time computation for On-water response

시뮬레이션 위치	대응시간(Hour)			총 해상방제시간(Hour)		
	Present	Alternative	Diff	Present	Alternative	Diff
부산신항 도선점	4.3	2.3	-2.0 (-46.5%)	16.5	15.84	-0.66 (-4.0%)
가덕도등대 동방 6마일 위치	3.1	1.5	-1.6 (-51.6%)	16.25	15.58	-0.67 (-4.12%)
부산 VTS 보고지점 동쪽 끝단	1.5	1.5	-	16.9	16.7	-0.2 (-1.18%)

제 6 장 결 론

우리나라는 오염사고 발생 시 사고대응하기 위한 대비태세의 일환으로 방제 자원을 배치하고 있다. 그러나 현재 방제장비를 주요항만에만 배치하고 있어, 방제장비를 보유하고 있는 항만과 먼 해역에서 해양오염사고 발생 시 장비 준비 및 사고 현장까지 이동에 소모하는 시간 등으로 인해 신속한 초동대응이 어렵고, 이로 인해 사전에 제어할 수 있는 피해가 추가 발생하면서 막대한 손실이 발생 할 수 있다. 특히, 선박의 통항량과 선박사고가 전국에서 가장 많아 유류유출사고가 발생할 개연성이 높은 부산 해역은 2007년 부산신항이 건설되면서 항계가 좌우로 확대되고 부산의 서쪽해역에 초대형선박의 통항량이 증가하면서 사고 발생 가능성이 높아지고 사고 대응 범위가 늘어났다. 그럼에도 불구하고 부산 서쪽 해역의 해양오염사고에 대응하기 위한 해상방제장비를 따로 배치하지 않고 있어 사고 발생시 부산 북항이나 마산항에 배치되어 있는 장비를 동원해야함으로 신속한 대응을 하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 해양유출사고 발생 위험요소가 잠재하고 있고, 사고발생시 신속한 대응이 어려운 부산해역을 대상으로 Voronoi Diagram의 특성, 주요 사고위치와 대응시간을 이용하여 해상방제장비 배치장소를 선정하였고, 위해도 기반으로 해상방제장비 배치량을 산정하는 HBD Model를 이용하여 배치장소별 적정 방제장비 배치량을 계산하여, 부산해역에서 발생하는 해양오염사고의 신속대응을 위한 해상방제장비 배치안을 제시했다.

본 연구의 결론을 요약하면 아래와 같다.

첫째, 부산해역의 항만을 이용하여 Voronoi Diagram 작도 및 Voronoi Region을 하여 도출하고 대응시간과 지난 5년간 사고발생위치를 이용하여 주요 사고발생위치와 최근접하면서 사고발생시 신속한 대응을 할 수 있는 항만을 도출하였다. 그 결과 신속 대응을 위한 해상방제장비 배치항만으로 부산항, 마산항, 부산신항, 다대포항을 선정하였다.

둘째, 7가지 사고개연성과 사후민감도 요소로 이루어져있는 해양환경위해도

기반으로 한 HBD Model을 이용하여 앞서 선정된 항만에 필요한 해상방제장비 적정 배치비율을 계산하였고 그 결과는 부산해역의 서부연안에 위치한 마산항과 부산신항의 배치비율은 0.63과 0.37로 나타났고, 부산해역의 동부연안에 위치한 부산항과 다대포항의 배치비율은 0.73과 0.27로 나타났다. 각 항만별 배치비율에 부산해역의 최악 사고발생시 해상기름회수용량을 곱해 항만별 해상방제장비 배치량을 계산하였다.

셋째, 선정된 배치항만별 배치량은 부산항 876kl, 다대포항 324kl, 마산항 756kl, 부산신항 444kl로 나타났으며, 이를 부산해역 유출사고 신속대응을 위한 해상방제장비 배치안으로 제시하였다.

넷째, 제시한 배치안의 적정성 여부를 판단하기 위해 통항보고지점 내의 해역 중 최대유출사고 발생가능성이 높고 신속한 대응이 어려울 것으로 예상되는 지역인 부산신항 도선점, 부산항과 신항의 중간 지점인 가덕도 등대 동방 6마일 위치 그리고 VTS 보고지점 동쪽 끝단에서 지역 최대유출사고가 발생한 것으로 가정하고 해상방제시간 산정방법을 통해 계산 한 결과, 첫번째 사고에 대한 해상방제시간 산정 결과 현행보다 제시한 배치안의 경우 대응시간은 46.5%가 감소하였고 총 해상방제시간은 4.0%가 감소하였다. 2번째 사고에 대한 해상방제시간 산정 결과 기존 배치보다 대응시간은 51.6% 감소되었고 총 해상방제시간은 4.12%가 감소되었으며, 마지막 사고에 대한 결과는 대응시간은 동일하였으나 총 해상방제시간이 1.18% 감소한 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 해상방제장비 배치는 적정성 평가를 통해 모든 경우에 해상방제시간을 감소시키는 것으로 나타나 부산해역에서 발생하는 해양오염사고를 신속하게 대응하기 위한 효과적인 배치안이라 판단할 수 있다. 그리고 이 배치안은 신속한 대응을 통해 해상방제시간을 감소시킴으로써 방제효율의 증대와 오염사고로 인한 환경·사회적 피해 저감에 도움이 될 것으로 예상된다.

향후, 부산 뿐 아니라 해양오염사고 발생 가능성이 존재하는 해역을 대상으로 해상방제장비 배치의 확대가 필요하며 본 연구에서 적용한 방법에 추가하여 GIS를 통한 공간분석, 과거에 발생한 사고이력 DB를 활용한 유출사고 발생가능

성 추정 그리고 방제장비의 추가 또는 분산 배치를 통한 비용·편익 분석 등 다양한 요소를 추가하여 해양오염으로 인한 피해를 최소화할 수 있는 해상방제 장비 최적배치모델이 개발되어야 할 것이다.



참 고 문 헌

- 가마다 시노부, 2012. *면적기반 해상기름회수 목표량 평가방식 설계에 관한 연구*, 석사학위 논문, 부산:한국해양대학교
- 국립해양조사원, 2016. *남해안항로지*, 서지 제120호, 부산:국립해양조사원
- 김유정, 2005. 신재생에너지 정책동향 및 지속가능성 분석, *과학기술정책 통권 154호*, 세종:과학기술정책연구원
- 김재원, 강지원, 이의영, 2007. Voronoi Diagram을 적용한 공공서비스의 관할구역 설정에 대한 연구 - 서울 강남지역의 소방서를 사례로 하여. *대한지리학회 학술대회논문집*, pp.326-330
- 박종진, 지승열, 전한중, 2008. 건축 디자인 생성에서의 보로노이 다이어그램 적용에 관한 연구. *대한건축학회 학술발표대회 논문집*, 28(1), pp.25-28
- 부산광역시, 2017. *부산시 양식어장 예찰결과* [Online] Available at : <http://www.busan.go.kr> [Accessed 23 Mar 2017]
- 부산광역시, 2017. *해양정보 통계* [Online] Available at : <http://www.busan.go.kr/ocean> [Accessed 23 Mar 2017]
- 부산항만공사, 2017. *부산항 시설현황* [Online] Available at : <http://www.busanpa.com> [Accessed 23 Mar 2017]
- 부산항항만물류정보시스템, 2017. *부두별 입출항실적* [Online] Available at : <http://www.bpa-net.com> [Accessed 23 Mar 2017]
- 부산항항만물류정보시스템, 2017. *부두별 화물처리실적* [Online] Available at : <http://www.bpa-net.com> [Accessed 23 Mar 2017]
- 윤종휘 등, 해양경찰청, 2009. *실용적 국가방제능력 산정방안 연구 최종보고서*
- 윤종휘, 2014. *기본 해양오염방제*, 부산:다솜출판사

통계청, 2017. *해수욕장 이용객 통계* [Online] Available at : <http://kostat.go.kr>
[Accessed 23 Mar 2017]

하민재, 2014. *해양환경위해도 기반 해상방제장비 적정 배치모델 개발*, 박사학
위 논문, 부산:한국해양대학교

해운항만물류정보센터, 2017. *선박입출항실적 통계* [Online] Available at :
<http://www.spdic.go.kr> [Accessed 23 Mar 2017]

해양경찰청, 2012~2016. *해양오염사고통계(2012~2016)*

해양경찰청, 2015. *부산지역긴급방제실행계획*, 세종:해양경찰청

해양경찰청, 2016. *해양시설현황*

해양환경관리법

Allen, A.A, 1990. Contained controlled burning of spilled oil during the Exxon
Valdez oil spill. *Spill Technology Newsletter*, 15(2), pp.1-5

Aurenhammer, F., Klein, R., Lee, D.T., 2013. Voronoi Diagrams and Delaunay
Triangulations, World Scientific

Benner, B.A. Jr., Bryner, N.P., Wise, S.A., Mulholand, G.W., Lao, R.C. and
Fingas, M.F., 1990. Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from the
combustion of crude oil on water. *Environmental Science & Technology*,
24(9), pp.1418-1427

BP p.l.c., 2017. *BP Statistical Review of World Energy 2017*, London: BP

Dobrin, A., 2005. A review of properties and variations of Voronoi diagrams.
Whitman College

Descartes, R., 1644. *Principia Philosophiae*, Amsterdam:Ludovicus Elzevirius

Dirichlet, G.L., 1850. Über die Reduktion der positiven quadratischen Formen
mitdrei unbestimmten ganzen Zahlen, *Journal für die reine und angewandte
Mathematik*, 40, pp.209-227

- Fingas, M.F., Stoodley, R.G. and Stone, N.D., 1990. Evaluation of oil spill treating agents, *Spill Technology Newsletter*, 15(1), pp.4-8
- Fingas, M.F., 2012. *The Basics of Oil Spill Cleanup 3rd Edition*, New York: CRC Press
- International Maritime Organization, 2017. *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships(MARPOL 2017 Consolidated Edition)*
- Japan Coast Guard, 2010. *海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律*
- Japan Coast Guard, 2004. *東京湾排出油等防除計画*
- Okabe, A., Suzuki, A., 1997. Locational optimization problems solved through Voronoi diagrams, *European Journal of Operational Research*, 98, pp.445-456
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., Chiu S.N., 2000. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams 2nd Edition*, England: John Wiley & Sons
- Shirzadi Babakan, A., Delavar, M.R., Taleai, M., Karimi, F., 2011. Space allocation of emergency centers using Voronoi Diagrams. *Geo-Information for Disaster Management Conference*, Antalya, Turkey, May 2011
- The International Tanker Owners Pollution Federation Limited(ITOPF), 2014. *Technical Information Paper*, London:ITOPF
- Transport Canada, 1995. *Response Organization Standards*
- Transport Canada, 2001. *Canada Shipping Act*
- Transport Canada, 2013. *Response Organizations and Oil Handling Facilities Regulations*
- United States Coast Guard, 2016. *Determining and Evaluating Required Response Resources for Vessel Response Plans*, Code of Federal Regulation Title 33 Part 155 Appendix B, Office of the Federal Register

United States, 1990. *Oil Pollution Act*

Voronoi, G. F., 1908. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. deuxième Mémoire: *Recherches sur les paralléloèdres primitifs*. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 134, pp.198-287

Voronoi, G. F., 1909. Deuxième mémoire: recherches sur les paralléloèdres primitifs. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 136, pp.67-181

