

해상교통흐름을 고려한 방파제 형상 설계에 관한 연구

정재용* · 박영수** · 고재용***

*목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수, **목포해양대학교 신진연수연구자, *목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

A Study of Breakwater Layout on the Basis of Marine Traffic Flow

Jae-Yong Jung* · Young-Soo Park** · Jae-Yong Ko***

*Professor, Division of Marine Transportation System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**Researcher, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

*Professor, Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 선박 조종자는 방파제를 통항할 경우 조선 부담감을 느낀다. 아직까지 선박 운항자의 조선 부담감을 고려한 방파제 배치에 관한 기준은 없다. 이 연구는 해상교통류 시뮬레이션을 이용하여 조선 부담감이 발생하는 상황을 재현하여 선박 운항자의 조선 부담감을 정량적으로 표현한 모델인 환경스트레스모델을 재현된 상황에 적용, 평가하였다. 주요한 결과는 다음과 같다. (1) 방파제 배치 변화에 의한 조선 부담감의 차이는 그다지 크지 않다. (2) 동일한 방파제 폭일 경우에는 선박의 항행속력의 차이로 인하여 선박 운항자의 조선 부담감은 상이하다. (3) 방파제폭의 확장함으로써 선박 운항자의 조선 부담감이 평균적으로 감소한다.

핵심용어 : 방파제 폭, 방파제 배치, 속도 규제, 조선 부담감, 해상교통류 시뮬레이션, 환경스트레스 모델

ABSTRACT : A mariner feels the ship-handling difficulty when the vessel onboard passes through breakwater. Until now, there is no a layout design of breakwater to take into account the ship-handling difficulty for the mariner. This paper reproduced this situation which ship-handling is difficult by using marine traffic flow simulation, and it applied to Environmental Stress Model as the assessment model which is a quantitative model for evaluating the difficulty of ship-handling arising from restriction in maneuvering water areas and arising from traffic congestion. The results are as follows. (1) The layout change of breakwater has little influence for reduction of ship-handling difficulty in the areas of vessel traffic volume. (2) In the situation of same breakwater width, difference of ship speed has an effect on decrease of ship-handling difficulty. (3) Expansion of breakwater width decreases ship-handling difficulty quantitatively.

KEY WORDS : breakwater width, breakwater layout, speed control, ship-handling difficulty, marine traffic flow simulation, ES model

1. 서 론

각 항만의 방파제는 외해로부터 파랑을 막아 항내의 정온을 유지하여 하역을 원활하게 하고, 선박항행과 정박의 안전 및 항내시설의 보존을 위하여 설치된다. 이러한 방파제의 위치 결정은 파랑의 진행방향, 항구에서 해안까지 거리 등을 고려하여 설계되고 있다. 방파제의 폭을 좁게 하면 정온도를 향상시키지만 항로폭이 좁아져 선박조종자는 조선부담감을 느낀다. 해양수산부가 제정한 항만 및 어항 설계 기준에서는 항로와 방파제의 관계기준에서 “항행폭은 선박의 항행에 지장이 없는 유효 항행폭을 가지고 항행하기 쉬운 방향으로 설계할 것”이라고 기

술하고 있다(한국항만협회, 2000). 즉, 방파제의 배치는 선박운용상 장애물이 되지 않아야 하며, 선박 교통측면에서도 교통 흐름이 원활하도록 고려되어야 할 것이다.

본 연구에서는 방파제폭과 방파제 형상이 선박운용상 통항 선박에 미치는 조선 부담감에 검토하고자 한다.

2. 방파제 폭의 배치

본 연구에서는 해상교통류 시뮬레이션을 실시하여 통항 선박에 대한 선박조종자의 부담감을 정량화한 환경스트레스 모델(ES Model, Environmental Stress Model)을 적용하여 평가한다(Inoue K, 2000).

* 종신회원, jjjong@mmu.ac.kr 061)240-7308

**종신회원, ys-park@hanmail.net 010)3856-1778

***종신회원, jyko@mmu.ac.kr 061)240-7129

2.1 방파제 폭의 조건

본 연구에서의 방파제폭 설정 조건은 다음과 같다.

- (1) 방파제폭은 500m~1,000m(100m 간격)
- (2) 방파제 자체 길이는 각 1,000m
- (3) 항로는 굴곡이 없는 직선항로
- (4) 항로 길이는 8,000m
- (5) 방파제 배치 형태를 Fig.2와 같이 각(θ)가 10°, 25°, 45°의 파라미터를 가진 방파제 배치

2.2 동향 선박의 발생조건

선박은 방파제를 상행·하행의 양방향으로 통항하며, 선박의 발생 조건은 다음과 같다.

- (1) 선박통행분포는 상행·하행 통항로상의 정규분포
- (2) 선박의 크기는 부산항 입출항 선박의 해상교통조사 자료(박영수, 1998)를 기초로 한 소형, 중형, 대형의 3가지 크기(본 연구의 해상교통류 시뮬레이션상에서 발생한 최대 선박의 크기는 340m이다.)
- (3) 선박의 통항속력은 평균 10노트이며, 최소 6노트~최대 15노트의 범위
- (4) 시간당 선박 발생척수는 5척, 10척, 20척

2.3 피항조선을 고려하지 않은 시뮬레이션

선박이 마주치는 상황에서 피항까지는 [마주침]→[조선자의 부담]→[부하 해소를 위한 피항 동작]의 과정을 거친다. 본 연구에서는 선박간의 마주침 과정에서 장애물과 다수의 선박이 접근 상황에서 대처할 때 변화되는 충돌의 위험에 대한 [조선자의 부담]을 [부하 해소를 위한 피항 동작]을 하지 않는다고 전제하였다. 즉, 마주침이 시작하여 그대로 직진하여 통과할 때까지 어느 정도의 부하가 가해지는지를 예측하여 각각의 마주침에 있어서 본래 가해지는 잠재적 부하를 정량적으로 표현하기 위하여 피항 동작을 하지 고려하지 않았다.

3. 환경스트레스 모델

3.1 환경스트레스 모델의 적용

본 연구에서는 방파제를 통항하는 선박에 대하여 환경스트레스 모델을 적용하여 각 선박에 어느 정도의 조선 부담감이 가해졌는지를 분석하였다.

3.2 환경스트레스 모델

본 연구에서 적용된 평가 모델인 환경스트레스 모델(Inoue K, 2000)의 개념은 아래와 같다.

환경스트레스 모델은 본선을 둘러싸고 있는 주변 환경을 조선환경과 교통환경으로 구분하고, 이 두 환경이 선박조종자에게 가해지는 부하의 정도를 정량적으로 평가하기 위해 개발

된 모델이다. 이 모델은 조선환경과 교통환경이 선박조종자의 행동을 제약할 때 선박 조종자에게 가해지는 부하의 크기를 행동 제약에 따른 조선 부담감에 기초하여 정량화하였다.

자연조건, 지형조건, 시설조건 등과 같은 조선환경에 의해 제약을 받는 조선수역은 선박조종자의 행동을 제약하는데, 이 때 선박 운항자가 느끼는 부담감을 정량화한 것이 조선환경 스트레스 모델이다.

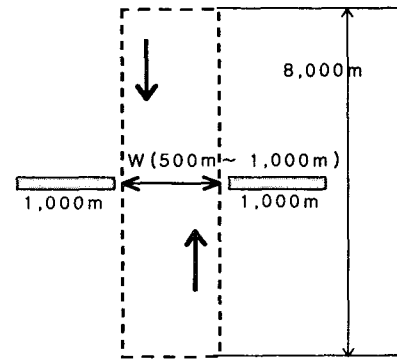


Fig. 1 Area Condition of Marine Traffic Simulation

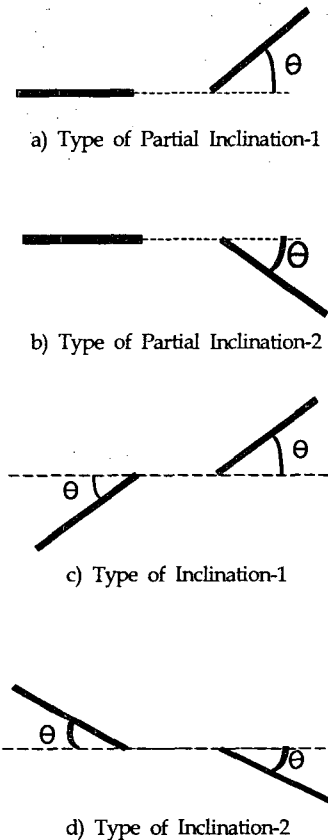


Fig. 2 Type of Breakwater

한편, 다른 선박의 교통흐름과 같은 교통환경이 조선상의 행동을 제약하게 되는데, 이 때 선박조종자가 받는 조선 부담의 크기를 정량화한 것이 교통환경 스트레스 모델이다.

이처럼 본선을 둘러싸고 있는 자연조건, 지형조건, 시설조건, 다른 선박 등의 환경으로 인하여 선박조종자가 느끼는 부

담의 크기를 정량화하여 환경요소가 조선 부담감에 어느 정도 영향을 주는가를 지표로 표현할 수 있다. 즉, 환경스트레스모델이란 환경으로 인한 조선곤란도 평가를 위해 개발된 평가모델이다. 주어진 환경에서 잠재하는 위험이 가시화되어 선박조종자가 받는 환경스트레스의 크기를 '환경스트레스치'라 한다. 환경스트레스치는 지형이나 시설물 등 조선환경에 기인하는 스트레스의 크기인 '조선환경 스트레스치(Land of ES value, ES_L치)'와, 타 선박에 기인하는 스트레스의 크기인 '교통환경 스트레스치(SHIP of ES value, ES_S치)'로 구성되며, 두 스트레스치를 종합하여 '종합환경 스트레스치(Aggregation of ES value, ES_A치)'라 한다. 종합환경 스트레스의 개념은 Fig. 3과 같으며 본 연구에서는 방파제폭 및 배치와 통항교통량을 고려하기 때문에 ES_A치를 사용한다.

3.3 환경스트레스치 계산방법

조선환경 스트레스와 교통환경 스트레스를 구하는 계산식은 도선사, 선장들을 대상으로 한 설문조사와 선박조종 시뮬레이션 실험을 실시하여 조선환경과 교통환경에 대해 느끼는 위험감의 결과를 회귀 분석하여 도출한 회귀식을 이용한다.

1) 조선환경 스트레스치의 계산법

조선환경 스트레스치의 계산식은 장애물까지의 여유시간과 선박조종자가 느끼는 위험감의 관계를 정리하여 도출한 회귀식이다.

조선환경 스트레스치를 계산하는 순서는 다음과 같다.

- ① 본선의 침로에 대하여 좌우 ±90°이내의 침로 범위를 탐색한다.
- ② 각 침로별로 본선과 장애물과의 거리(R), 본선의 속력(V) 등에 의해 충돌 혹은 좌초 등의 위험이 가시화 될 때까지 시간적 여유(R/V)를 산출한다.
- ③ 위험 가시화까지의 시간 여유(R/V)를 선박조종자가 느끼는 위험감으로 산출한다.

Fig. 3에서 육지에 대한 주관적 위험감(SJL: Subject Judgement for Land)은 선박조종자가 조선환경에 대해 느끼는 위험감의 정도를 의미하는 것으로 조선환경 스트레스치라 하며, 본선의 침로로부터 좌우 ±90°의 범위를 1°씩 탐색한 후 선박조종자가 느끼는 위험감과 곱하여 구한다. 육지에 대한 주관적 위험감이 0이 경우는 위험 가시화까지의 시간적 여유가 충분한 경우를 말하고, 육지에 대한 주관적 위험감이 6인 경우는 바로 위험이 가시화되는 경우이다. 좌우 ±90° 범위 내에서 장애물이 존재하지 않는 경우에는 위험감의 최소값인 0에 180을 곱하면 그 범위에서의 조선환경 스트레스치의 총합은 0이 된다. 또한 좌우 ±90° 범위의 어디를 향하더라도 바로 위험이 가시화되는 경우에는 최대 값인 6을 곱하여 그 범위에서의 조선환경 스트레스치의 총합은 1,000이 된다 (6×180=1,000).

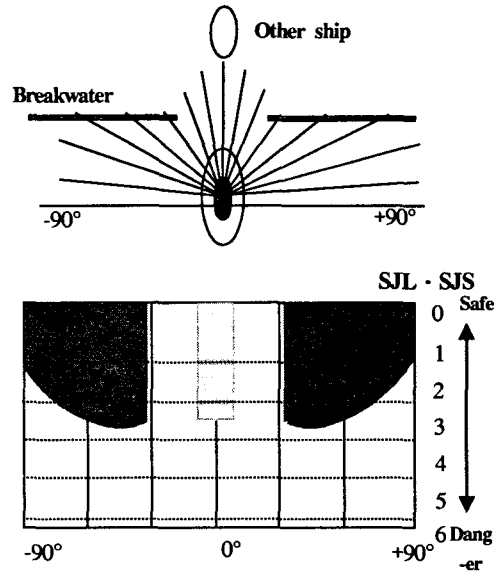


Fig. 3 ES_A Concept Diagram

2) 교통환경 스트레스치의 계산법

교통환경 스트레스치를 구하는 구체적인 순서는 다음과 같다.

- ① 본선 주위에 타 선박의 침입을 허용하지 않는 영역을 설정하고 타 선박의 상대침로 벡터가 설정영역 내에 침입하는 경우에는 충돌이 잠재한다고 생각한다.
- ② 본선의 침로에 대하여 좌우 ±90°의 침로 범위를 설정한다.
- ③ 원침로에 대하여 좌우 ±90°의 침로 범위 내에서 각 침로에서 위험이 가시화 될 때 까지의 시간여유를 구한다. 여기에서 타 선박은 점으로 간주하고 본선 주위에 설정한 ①영역에 침입할 때까지의 시간을 구하여 위험이 현재화될 때까지의 시간여유로 구한다.
- ④ 각 침로별로 구한 위험 가시화까지의 시간적 여유에 대하여 선박조종자가 느끼는 위험의 정도를 설문조사하여 산출한 회귀식을 이용하여 치환한다.

또한 타 선박에 대한 주관적 위험감(SJS: Subject Judgement for Ship)과 선박조종자가 느끼는 위험감의 관계는 육지에 대한 주관적 위험감의 경우와 동일하며, 주위를 항행하는 모든 타 선박을 대상으로 한다.

3) 종합환경 스트레스치의 계산법

조선환경과 교통환경을 동시에 평가하는 경우에는 다음과 같다.

- ① 원침로 좌우 ±90°에서 각 침로별로 본선의 선수를 그 방향으로 향할 때에 잠재하는 장애물에 대한 충돌 위험감(SJL)과, 그 방향으로 향할 때에 잠재하는 타 선박과의 충돌 위험감(SJS)을 비교한다.
- ② 각 침로에 대하여 위험이 가시화되는 경우, 시간적 여

유를 기초로 위험감 중에서 큰 값을 선택한다.

③ 원침로 좌우 ±90°의 침로 범위에서 선택된 위험감의 값을 합계한다.

이 결과를 그 순간에 통합한 것이 종합환경 스트레스치이다.

3.4 환경스트레스치와 선박조종자의 허용기준

Table 1과 같이 환경스트레스치는 0~1,000까지의 범위로 표시되며 ES치가 0 ~ 500까지를 Negligible, 500 ~ 750까지를 Marginal, 750 ~ 900까지를 Critical, 750 ~ 1,000까지를 Catastrophic로 분류된다. 또한 선박조종 시뮬레이터 실험과 설문 조사 결과로부터 ES치와 조선 부담감의 허용감과의 관계는 750~900인 경우를 '허용한계', 900~1,000인 경우를 '허용불가', 750미만은 허용가능한 상태라는 기준을 설정하였다.

Table 1 Stress Ranking and Acceptance Criteria

ES Value	Stress Ranking	Acceptance Criteria
0~500	Negligible	Acceptable
500~750	Marginal	Acceptable
750~900	Critical	Unacceptable
900~1000	Catastrophic	Unacceptable

4. 방파제폭과 통항량의 관계

대상 해역을 통항한 모든 선박에 가해진 환경스트레스치의 시계열 데이터를 Fig. 5와 같이 수집하고, 그 통항로상에서 선박 운항자가 허용할 수 없는 상황 즉 종합환경스트레스치가 750 이상이 가해지는 비율 $P[ES_A \geq 750]$ 을 계산하였다. Fig. 5는 방파제폭이 500m, 시간당 통항량이 20척인 해역에서 각 선박의 환경스트레스치의 변화 그래프이다.

예를 들어, 선박 길이가 50m인 경우에는 대상해역을 통항하는 동안 선박조종자가 허용할 수 없는 상황이 0%였고, 100m인 경우는 1.32%, 250m 경우는 026.29%, 340m 경우는 45.45%로 계산되었다. 이와 같이 해상교통류 시뮬레이션 상에서 발생된 전 선박에 대한 계산값을 구하였다.

4.1 방파제 폭의 변화

시간당 통항선박 척수가 동일한 경우, 일자형 방파제 폭의 변화에 따른 선박조종자의 조선 부담감 변화를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6의 횡축에는 방파제폭의 변화를, 종축에는 선박조종자가 허용할 수 없는 범위($P[ES_A \geq 750]$)를 표시하였고, 시간당 5척의 통항량의 경우는 세모(▲)로 표시하였고, 10척의 통항량은 마름모(◆), 20척인 경우에는 네모(■)로 각각 도시하였다.

Fig. 6을 정리하면 아래와 같다.

(1) 방파제폭을 확장하면 조선 부담감이 감소한다. 즉, 방파제폭을 100m로 확장하면 선박조종자가 허용할 수 없는 부담감 $P[ES_A \geq 750]$ 이 감소하고 있다. 이러한 경향은 시간당 통항척수가 많을수록 뚜렷하다. 방파제폭 100m에 시간당 통항척수가 5척인 해역에서는 0.25%, 시간당 통항척수가 10척인 해역에서는 0.47%, 시간당 통항척수가 20척인 해역에서는 0.81% 정도가 감소하기 때문에 교통량이 많은 해역일수록 방파제폭을 확장하면 조선부담감을 감소하는 효과가 커진다.

(2) 방파제폭이 동일한 경우, 시간당 통항척수가 증가할수록 선박조종자가 허용할 수 없는 범위 $P[ES_A \geq 750]$ 은 높아지고, 그 값은 통항 척수 1척당 0.6~0.8% 정도 높아진다.

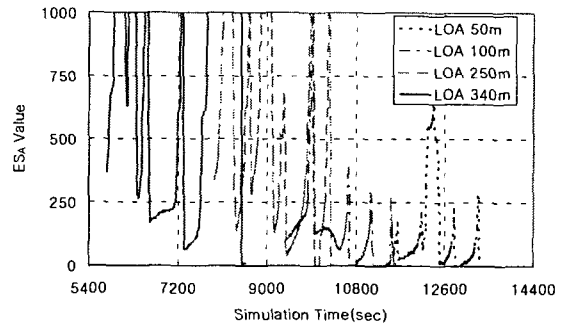


Fig. 5 Example of Time-Scale ES_A Values

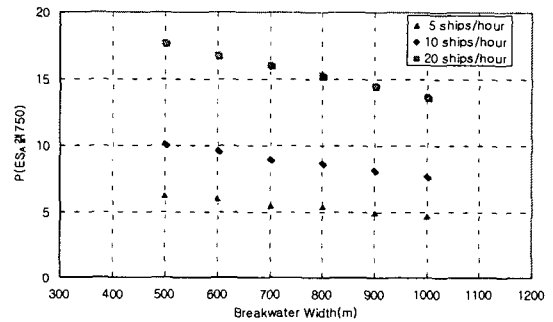


Fig. 6 Ship-handling Difficulty of Each Breakwater Width

(3) 시간당 통항척수 통제는 방파제폭의 확장 효과가 있다. 예를 들면 시간당 10척이 통항하는 해역에서는 방파제폭을 100m 확장한 효과와 약 2척의 선박의 입출항을 통제 한 효과가 동일하다.

4.2 방파제 배치 형태의 변화

방파제 배치는 파랑의 진행방향을 고려하여 설계되지만, 본 절에서는 이런 방파제 배치가 선박 운항자의 조선 부담감에 어느 정도 영향을 미치는지에 대하여 알아보고, 선박 통항량과 방파제 배치의 관계에 대하여도 분석하여 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)는 시간당 통항척수가 10척일 경우, Fig. 7(b)는 시간당 통항척수가 20척일 경우에 방파제폭 500m~1,000m의 방파제 배치 형태(경사각 45°)에 따라 플롯팅하였

다. 경사각이 10°, 25°의 방파제 배치 형태의 조선 부담감은 직선 방파제 형태와 거의 동일하여 여기서는 45°의 경사각을 가진 방파제 배치와 비교하였고 교통량은 시간당 10척, 시간당 20척인 경우를 예시하였다.

Fig 7에서 알 수 있듯이 전체적으로 부분경사형 방파제 및 경사형 방파제 형태가 직선 방파제 형태보다 조선 부담감이 약간 높지만, 큰 차이는 보이지 않는다. 이는 1척의 선박이 항행할 경우는 방파제만이 선박 운항상에 걸림돌이 되지만, 교통 흐름이 존재하는 해역에 방파제가 설치된 경우에는 선박 운항자는 방파제의 형태보다는 타 교통 흐름이 조선 부담감에 더욱 큰 영향을 주는 것으로 사료된다.

시간당 통항척수의 차이에 의한 조선 부담감은 통항척수가 많아질수록 선박조종자가 허용할 수 없는 조선 부담감이 증가한다. 이 경향은 모든 방파제 형태에서도 동일하며, 통항량의 증가에 의하여 조선 부담감은 일률적으로 비례하여 증가한다.

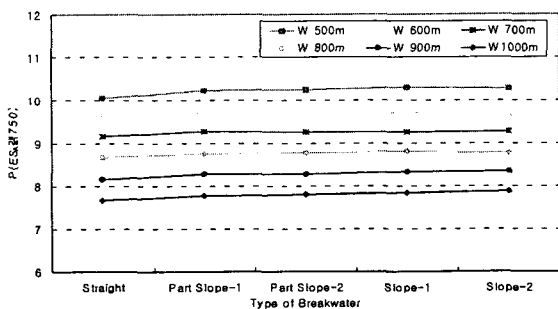
4.3 선박의 속력 규제에 의한 조선 부담감 변화

지금까지는 선박의 항행속력을 자유롭게 하여 해상교통류 시뮬레이션을 실시하였으나, 해상교통법규에 규정된 항내 속력 규제 해역이면 항행하는 모든 선박이 12노트 이하로 통항해야 할 것이다.

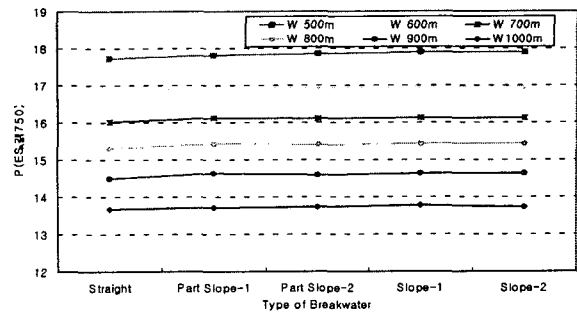
본 절에서는 선박이 자유롭게 항행하는 해역에서 속력을 12노트로 규제할 경우에 대한 조선 부담감을 분석하였다. 대상 방파제폭은 500m와 1,000m로, 시간당 통항척수는 10척, 20척으로 설정하여 계산하였다. 계산결과는 Table 2와 같다.

Table 2에 의하면 시간당 통항척수가 10척 이하일 때 방파제폭 500m와 1,000m인 경우에는 모두 속력규제로 인하여 조선 부담감이 각각 2.51%, 1.74% 감소하였다. 그러나 통항척수가 20척일 경우에는 반대로 조선 부담감이 2.25%, 2.05% 증가하였다. 이는 속력을 규제하면 각 선박간의 항행거리가 좁아져 선박 운항자가 많은 조선 부담감을 가지는 것으로 사료된다. 즉 통항량이 많은 해역에서는 선박의 속력규제가 오히려 역효과를 낼 수 있다.

즉 동일한 방파제 폭을 설계할 경우에는 통항척수가 적은 해역(시간당 10척 이하)에서 12노트 속력 규제를 규제하는 것이 효과적이고, 반대로 통항척수가 많은 해역(시간당 20척 이하)에서는 속력 규제를 하지 않는 것이 효과적이다.



(a) Traffic Volume: 10ships/hour



(b) Traffic Volume: 20ships/hour

Fig. 7 Relationship of Breakwater Layout and Ship-handling Difficulty of Each Breakwater Width

Table 2 Relationship of Ship-handling Difficulty and Speed Limitation

Width of Breakwater	Traffic Volume (ships/hr)	Without Speed(12kts) Limitation	With Speed Limitation
500m	10	10.06%	7.55%
	20	17.74%	19.99%
1000m	10	7.72%	5.94%
	20	13.68%	15.73%

5. 결론

선박 운항자는 외항 방파제 및 내항 방파제를 통항할 경우 조선 부담감을 가진다. 이러한 상황을 해상교통류 시뮬레이션으로서 선박을 재현하여 선박 운항자의 부담감을 정량적으로 수치화한 모델을 이용하여 평가하였다.

이 연구의 평가 결과는 다음과 같다.

(1) 방파제폭을 확장함으로써 선박조종자가 허용 할 수 없는 부담감이 평균적으로 감소하는 것을 수치적으로 알 수 있었다. 또한 시간당 통항척수가 많은 해역일수록 이 경향은 뚜렷하였다.

(2) 직선 방파제 배치 형태보다 부분경사형 방파제 및 경사형 방파제 배치 형태가 조선 곤란성이 미소한 차이로 높은 것으로 나타났지만 커다란 차이는 없는 것으로 분석되었다. 이것은 교통흐름이 존재하는 해역에서 방파제 배치의 차이(경사 45°이내일 경우는)는 그다지 크지 않다는 것을 의미한다.

(3) 방파제폭이 동일할 경우에 선박의 항행속력의 차이로 인하여 선박 운항자의 조선 부담감은 상이하였다.

방파제 폭 설정 및 배치는 선박 운항자의 조선 부담감에 영향을 미친다. 특히 통항선박이 증가할수록 이 경향은 뚜렷하기 때문에 선박의 교통흐름이 고려된 방파제 폭 설정 및 배치가 바람직하다.

참 고 문 헌

- [1] 박영수(1998), 부산항 접근수역의 항로지정에 관한 조사 연구, 한국해양대학교 공학석사 학위 논문.
- [2] 한국항만협회(2000), 해양수산부제정 항만 및 어항설계 기준 제7편 외곽시설, pp. 695-696.
- [3] Inoue, K.(2000), Evaluation Method of Ship Handling Difficulty for Navigation in Restricted and Congested Waterways, The Journal of Navigation, The Royal Institute of Navigation, Vol. 53, No. 1, pp. 167-180.
- [4] Inoue, K. and et al., 1998, "Modeling of Mariners Perception of Safety", The Journal of Navigation, The Japan Institute of Navigation, No. 98, pp. 235-245.