

## 수치계산을 통한 방어진 방파제 주위의 유동장 해석

곽 승 현\* · 박 명 규\*\*

### Flow Analysis around the Bang-o-jin Breakwater by Numerical Simulation

S. H. Kwag\* · M. K. Park\*\*

**Key Words** : 가중잔차법(Weighted residual method), 방파제(Breakwater), 4절점요소(quadrilateral element), 격자(grid), 양해법(Explicit Method), 유선(Streamline), 코리올리스력(Coriolis force), 천수(Shallow water), 순환(Circulation), 평균법(averaging technique)



#### Abstract

The flow analysis around the Bang-o-jin breakwater was carried out by the numerical simulation based on the package program NISA II. The averaged Navier-Stokes equations are changed to a weak formulation, which is an application of finite element method. To get a better circulation of sea-water current, various types of breakwater modification were numerically tried for the purpose of comparisons.

According to the numerical results, it proved to be very difficult to have the sea-water circulate in every corner inside the breakwater. However, some cases give the promising feasibility provided that the waste water disposal plant should be additionally made.

#### 1. 序 論

최근 환경오염에 대한 관심이 고조되면서 강이나 육지로부터 배출되는 폐수, 유기물, 선박으로 부터 방출되는 기름등으로 인한 수질 오염 문제에 대한 해결방법과 그에 대한 대책이 강구되고 있다. 또한 바다의 해상상태가 연안 지역의 거주민이나 해상을 왕복하는 선박에 미치는 영향도 상당해지고 있다. 일반적으로 해양에서의 흐름을 크게 나누면 외해쪽에서 거의 일정하게 흐르고 있는 해류, 조석현상에 의해

야기되는 조석류 및 천해지역, 특히 그 중에서도 쇄파대 및 그 부근에서 파랑에 의해 발생하는 해빈류 등이다. 위의 여러가지 흐름 중에서 해빈류는 보통 4개의 부분으로 분리하여 각각 이름을 붙일 수 있는데 파의 질량수송, 해안선과 평행하게 흐르는 연안류, 바닷쪽으로 향해서 흐르는 이안류 및 쇄파대의 바닷쪽 경계부근에 버섯구름 모양의 이안류 등이 있으며 이들을 통틀어 해빈류라 하고 이들의 순환을 해빈류 순환이라고 한다.

Falconer<sup>(1)</sup>는 4개의 항구와 항만에 대한 수

\* 漢拏工業專門大學 造船科

\*\* 정희원, 韓國海洋大學校 造船海洋工學部

학적 모델 및 수치모델을 개발하고 그 응용을 위해 유한 차분법을 써서 실측 자료와 비교하였다. Thabet et al<sup>(2)</sup>은 유한 차분법으로 항만 내의 조수 운동(tidal motion)을 연구한 바 있는데, 격자 크기, 시간 간격 등의 값들이 전 조수운동(overall tidal motion)에 영향을 미치는 구조물, 항만의 크기, 지형상태 등 여러요인에 좌우됨을 보였다.

Young-Linggett-Gallagher<sup>(3)</sup>는 천수파 방정식을 가중잔차법(Weighted residual method)으로 구성한 후, 有限要素法을 사용해 時間積分하여 온도변화와 호수의 밀도 차이에 의한 순환을 계산한 바 있고, Kawahara and Nakazawa<sup>(4)</sup>는 여러가지 陽解法(explicit scheme), 즉 Euler 방법, Leap-frog 방법 및 Lax-Wendroff 방법과 Lumping 방법, 平均法(averaging technique)을 써서 일본의 간도 대지진의 地震波(Tsunami)의 전파를 각각 비교한 바 있다.

Tanaka and Ono<sup>(5)</sup>는 이세 만(Ise bay)에서 태풍 서어지 (surge)의 거동을 예측하기 위해 갤러킨方法(Galerkin method)으로 약형(weak form)을 구하고, 유한요소법으로 이산화한 후 예측자-수정자법 (predictor-corrector methods)으로 時間積分하여 계산한 결과를 유한 차분법에 의한 결과와 비교한 바 있다.

연안류에 관한 연구를 하기 위해서는 항구와 항만에 대한 수학적 모델 및 수치해석을 해야 하는데 여기에는 몇가지 방법이 있다.

본 계산에서는 유한요소법에 기반을 둔 NISA II의 콤팩트 소프트웨어를 가지고 계산하였다. 유동장을 보다 단순화 시키기 위하여 깊이 방향의 海低地面 구조의 효과는 일체 무시하였다. 따라서 기본방정식은 Weighted residual 방법을 이용한 약형으로 수치계산을 하기 위한 4절점 (quadrilateral) 要素로 분할하여 선형 내삽함수로 이산화 하고 해양파의 전파는 계산영역 (domain)의 경계(boundary)에서 입사조건을 주어 수치 계산하였다. 본 연구는 방어진 港의 슬도를 중심으로 방파제 내부의 유동장을 해석하고 방파제 구조를 일부 수정하여 해수의 유동을

원활히 순환시키는 것이 연구과제로, case study를 집중적으로 수행하여 방파제 수정작업 後의 조류의 상태를 검토하였다.

유동장의 계산을 위해서는 정확한 海洋波의 조사가 필요하였으나 이에선 막대한 예산이 소요되기 때문에 계산된 결과가 실제현상과 다소의 차이가 있으리라고 예상되지만 정성적(qualitative)인 相互比較 및 分析에는 큰 도움이 되리라 믿어진다. 그러나 좀 더 자세한 연구는 바람에 의한 영향으로 自由表面에 動壓力, 표면파고의 변화 및 자유표면 마찰력과 지구자전에 의한 코리올리스력(Coriolis force)을 고려해야 하겠다.

## 2. 數值解析

### 2.1 基本假定

Thabet et. al.<sup>(2)</sup>과 Ramming<sup>(6)</sup>의 연구에서와 같이 다음의 가정을 하였다. 유체는 비압축성, 점성 유체이고, 천수(shallow water)이므로 유체 입자들의 수직 방향 속도, 가속도가 중력 가속도에 비해 작으므로 무시하였다. 자유 표면에서의 압력이 대기압 Pa 와 같다고 가정하고, 대기압을 정압으로 가정하였다. 바람에 의한 영향과 지구 자전에 의한 코리올리스 효과(Coriolis effect)를 무시하였다. 또한 깊이 방향으로 수심 변화가 없고, 밀도, 염도 및 온도변화도 없는 것으로 가정하였다.

유체역학적으로 연안류가 수심에 영향을 미치지만, 본 연구에서는 방파제 형상수정에 의한 내부의 유동장변화를 예측하는 것으로 수심이 일정하다는 가정이 계산결과와의 비교에 큰 영향이 없다고 판단하였다.

### 2.2 支配方程式

본 계산에 사용한 기초방정식은 나비에 스톡스(Navier-Stokes)방정식과 연속방정식으로 다음과 같다.

$$\rho \dot{u}_i = \partial \sigma_{ij} / \partial x_j + \rho f_i$$

$$\sigma_{ij} = -\rho \delta_{ij} + 2\mu d_{ij}, \quad d_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

벡터를 사용하여 근사화(approximation)과정을 수행하면

$$\rho \left( w_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_j \frac{\partial w_j}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ji}(u)) + R_i$$

$$u_i = 0 \text{ on } \Gamma_{il}$$

$$\sigma_{ji}(u) n_j = 0 \text{ on } \Gamma_D$$

$$\sigma_{ji}(u) n_j = -k_{ij} u_j \text{ on } \Gamma_B \quad (2)$$

위 식에서  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker함수,  $\sigma_{ij}$ 는 압력,  $\Gamma_{ij}$ 는 계산경계,  $n_j$ 는 normal벡터,  $R_{ij}$ 는 외력,  $u$ ,  $w$ 는 속도,  $x_i$ 는 변위를 나타낸다.

$\Gamma_{ij}$ 에서,  $\Gamma_{il}$ 은 특정(specified)값을 부여하는 (예를들면 no-slip은 속도가 zero임),  $\Gamma_D$ 는 flux조건,  $\Gamma_B$ 는 혼합된 형태의 경계조건을 의미한다.

$$u^n = w, \quad \Delta u^{n+1} = u \quad (3)$$

약형은(weak form)은

$$u_i = 0 \text{ on } \Gamma_{il} \quad (4)$$

$$\int_{\Omega} \rho (w_j u_{i,j} \bar{u}_i + u_j w_{i,j} \bar{u}_i) d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ji}(u) \bar{u}_{i,j} d\Omega + \int_{\Gamma_B} k_{ij} u_j \bar{u}_i d\Gamma = \int_{\Omega} R_i \bar{u}_i d\Omega,$$

위에서  $\bar{u}_i = 0$  on  $\Gamma_{il}$

대류방정식(constitutive equation)에서

$$\sigma_{ji}(u) \bar{u}_{i,j} = (\lambda u_{k,k} \delta_{ij} + \mu u_{i,j} + \mu u_{j,i}) \bar{u}_{i,j}$$

$$= \lambda u_{j,j} \bar{u}_{i,i} + \mu (u_{i,j} \bar{u}_{i,j} + u_{j,i} \bar{u}_{i,j}) \quad (5)$$

여기서  $\Omega$ 는 영역(domain),  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 점성계수(coeff. of viscosity, bulk)를 나타낸다.

하나의 유한요소( $\Omega_e$ )에서 속도에 대한 이산화(discretization)과정을 도입하여

$$u_j = u_{j\beta} N_{\beta}(x), \quad \bar{u}_i = \bar{u}_{i\alpha} N_{\alpha}(x) \quad (6)$$

으로 부터 전체 내부영역( $\Omega$ )에 대한 속도장은

$$\int_{\Omega} \rho (w_j u_{i,j} \bar{u}_i + u_j w_{i,j} \bar{u}_i) d\Omega$$

$$= \sum_{e=1}^E \bar{u}_{i\alpha} (C_{i\alpha j\beta}^{1,e} + C_{i\alpha j\beta}^{2,e}) u_{j\beta} \quad (7)$$

여기서

$$C_{i\alpha j\beta}^{1,e} = \int_{\Omega_e} \rho \delta_{ij} w_k N_{\alpha} N_{\beta,k} d\Omega$$

$$C_{i\alpha j\beta}^{2,e} = \int_{\Omega_e} \rho w_{i,j} N_{\alpha} N_{\beta} d\Omega \quad (8)$$

$w_k$ 와  $w_{ij}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$w_k = w_{k\gamma} N_{\gamma}$$

$$w_{i,j} = w_{i\gamma} N_{\gamma,j} \quad (9)$$

만약 행렬  $E_{i\alpha j\beta}^e$ ,  $E_{i\alpha j\beta}^{e,3}$ ,  $f_{i\alpha}^e$ 가 다음과 같이 정의된다면

$$E_{i\alpha j\beta}^e = \int_{\Omega_e} \{ \lambda N_{\alpha,i} N_{\beta,j} + \mu (N_{\alpha,j} N_{\beta,i} + \delta_{ij} N_{\alpha,k} N_{\beta,k}) \} d\Omega \quad (10)$$

$$E_{i\alpha j\beta}^{e,3} = \int_{\Gamma_B} k_{ij} N_{\alpha} N_{\beta} d\Gamma,$$

$$f_{ia}^e = \int_{\Omega_e} R_i N_a d\Omega$$

약형은 다음 식과 같이 이산화 된다.

$$\begin{aligned} u_{ia} &= 0 \text{ on } \Gamma_{il} \\ &\sum_{e=1}^E \bar{u}_{ia} (C_{iaj\beta}^{1,e} + C_{iaj\beta}^{2,e} + E_{iaj\beta}^e) u_{j\beta} \\ &+ \sum_{e=1}^{E_3} \bar{u}_{ia} E_{iaj\beta}^{3,e} u_{j\beta} \\ &= \sum_{e=1}^E \bar{u}_{ia} f_{ia}^e \end{aligned} \quad (11)$$

위에서,  $\bar{u}_{ia} = 0$  on  $\Gamma_{il}$

결국, 지배방정식은 위한 요소 방정식으로 다음과 같이 정리 된다.

$$\begin{aligned} u_{ia} &= 0 \text{ on } \Gamma_{il} \\ &\sum_{e=1}^E (C_{iaj\beta}^{1,e} + C_{iaj\beta}^{2,e} + E_{iaj\beta}^e) u_{j\beta} + \sum_{e=1}^{E_3} E_{iaj\beta}^{3,e} u_{j\beta} \\ &= \sum_{e=1}^E f_{ia}^e \end{aligned} \quad (12)$$

### 2.3 數値計算 및 境界條件

유동장을 수치적으로 계산하기 위하여 계산 영역(domain)을 設定하고 수학적 모델링을 통하여 계산격자를 생성하였다. 여기에서는 가능한 수치계산의 안정을 위해 4절점 요소로 분할하였고 또한 陸地 부분과 방파제 부근에는 비교적 잘게 분할하여 계산의 정확성(accuracy)을 높이는데 역점을 주었다. 격자수는 총 1731개로써 깊이방향을 무시한 계산격자로서는 충분하였고 계산조건으로 육지 부분은 벽법칙(law of the wall)을 적용하였으며 no-slip 조건을 사용하였다. 조석주기, 진폭, 위상은 NISA II의 극한조건(extreme condition)을 적용하였다.

유체의 경계조건은 유동장 결과에 중요한 영향을 미치므로 상당한 주의를 요하게 된다. 본

계산에서는 수평 방향으로 흐르는 조류에 +45°, 0°, -45°의 세가지 入射條件을 적용하여 발생할 수 있는 모든 경우에 대비하였다. 그 이유는 태풍과 같이 海上狀態가 몹시 나쁠 경우 오히려 방파제 내부의 조류순환이 몹시 심각하여 內海의 어선 등에 심한 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 각 case의 경우에 每 time-step의 속도차이가 0.001 이내에 도달할때 까지 계산하였으며 이때 수렴된 것으로 하였다. 계산은 약 1000 step까지 수행되었으며 CPU는 1 case경우에 약 7 hour이고 사용된 computer는 워크스테이션 SUN4 SPARC이다. Fig.1은 기존 방파제와 관통부를 만든 경우의 형태를 각 case별로 표시하고 있다. Fig.2, Fig.3은 계산을 위한 격자(grid system)를 보여준다.

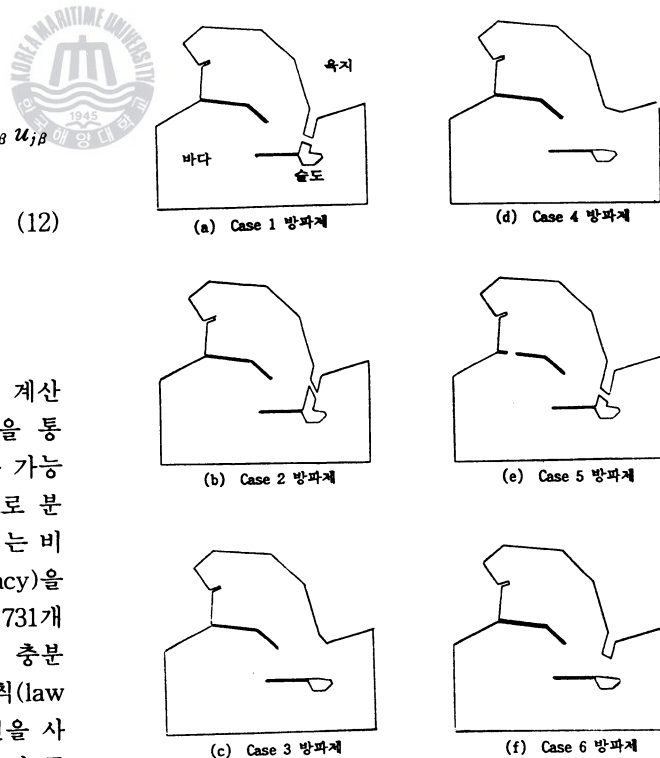


Fig. 1 Arrangement of breakwater for 6 cases

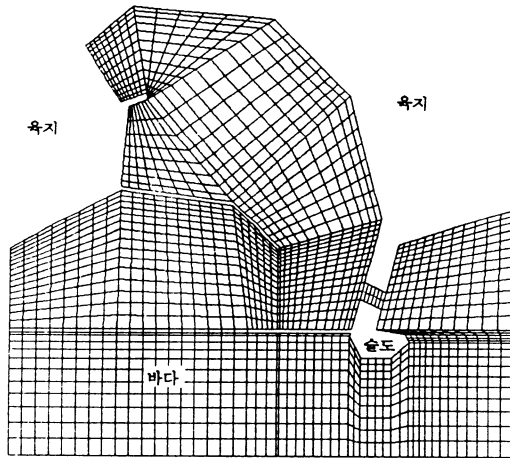


Fig. 2 Grid system for case 1

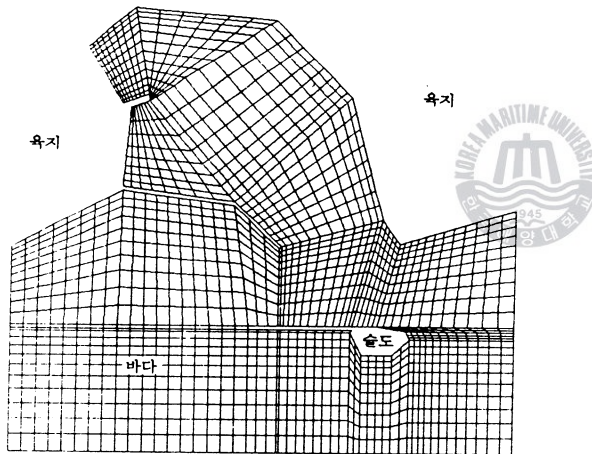


Fig. 3 Grid system for case 3

### 3. 計算結果 및 檢討

유동장 계산은 서로 다른 16 種類의 case study를 통하여 수행하였다. Fig.4, 5, 6은 기존 상태의 방파제에 수평, +45°, 0°, -45°의 流入條件을 주어서 얻은 결과이다. 海上條件으로 보면 유입흐름은 수평방향과 -45°의 中間 어느 점에서 가장 현저한 것으로 추측되며 따라서 Fig.4와 Fig.6의 유동장의 복합이 될것이다. 그럼 下段의 流線分布는 上段의 속도벡터를 물리적으로 설명해 주고 있다. 여기서 속도벡터의

크기와 방향은 각 case study에 대한 방파제 내부의 정성적인 유동장 변화를 나타내며 순환패턴을 확인할 수 있다. 기존 방파제의 유동은 Fig.4와 Fig.6에서 볼 수 있듯이 상당히 微弱해서 방파제 내부의 해수의 순환이 몹시 어려운 상태를 보여 주고 있다.

Fig.7, 8, 9는 case 1 방파제를 적용한 것이다. case 1은 水平으로 부터 約 30° 방향으로 원만하게 관통부를 만든 것이다. Fig.7과 Fig.9는 수평 및 -45° 방향의 유입조건에 對하여 解析한 결과인데 Fig.4, 6의 기존 방파제 결과와 비교시 相對적으로 유체순환이 보다 우월하게 이루어짐을 알 수 있다. 유선(streamline) 분포도의 계산도 기존 방파제의 결과와 비교했을 때 강도가 높게 나타나는데 위의 現狀을 잘 뒷받침해 주고 있다. Fig. 10, 11, 12는 case 2 방파제를 적용한 것이다. case 2는 수평으로 부터 約 50° 방향으로 급격하게 관통부를 만든 것이다.

Fig.10은 수평방향 유입조건인데 Fig. 4의 기존 방파제 유동보다는 양호하지만, Fig.7의 결과와 비교해 볼때 방파제 내부의 유동이 상대적으로 劣惡한 결과를 보여주었다. 그러나 -45° 방향의 유입조건인 Fig.12의 결과는 Fig. 9의 결과와 비슷한 유동현상을 보여주고 있다.

Fig.13, 14는 case 3의 경우로 슬도에 이르는 방파제를 전부 제거한 경우이다. 수평방향 및 -45° 방향의 유입조건을 부여해서 계산한 것인데 Fig.7, 9의 case 1과 비교시 별로 나쁘지 않은 유동장을 보여주고 있다. 이것은 下段의 유선분포도를 보아도 쉽게 알 수 있다. 그러나 슬도에 이르는 방파제를 전부 除去했을 경우는 土木工事量이 대단히 커지게 되며 이의 逆效果로서는 颱風과 같은 심한 파랑중에서 +45°의 유입흐름이 생길 가능성이 높아 방파제를 제거함과 동시에 sharp한 끝부분을 유체역학적으로 원만하게 형태를 수정한 것인데 이 경우에는 상당한 효과를 보여주고 있으나, 역시 앞에서提及한 대로 태풍에 대한 優濾가 더욱 높아질 가능성이 있다. 또한 슬도를 중심으로 어업에 종사하는 魚民에게는 큰 민원이 될 가능성이 높다.

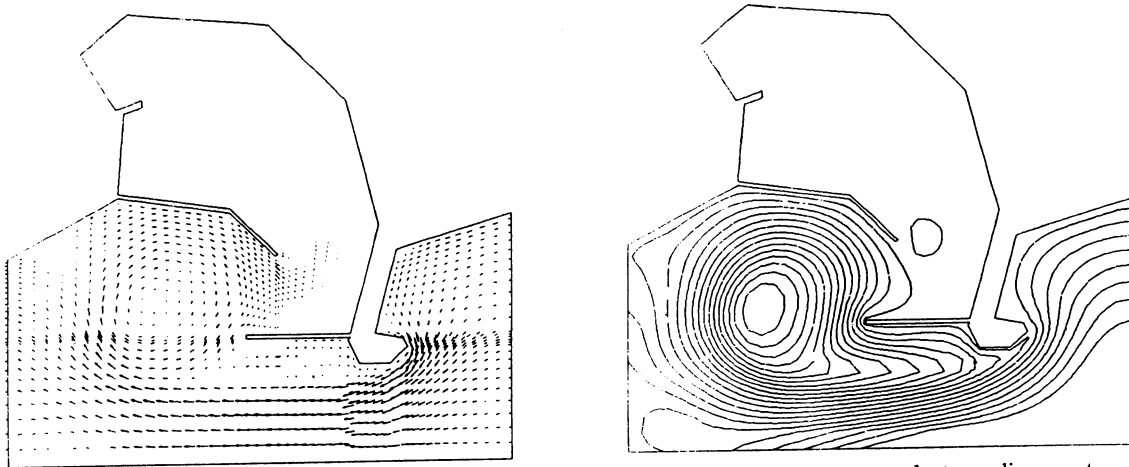


Fig. 4 Horizontal inlet flow condition with existing breakwater (velocity vectors and streamline contour)

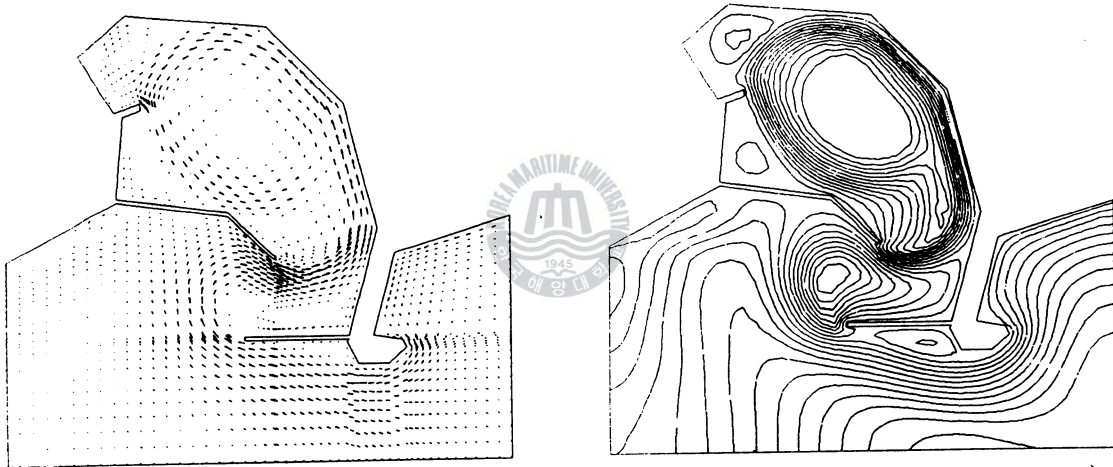


Fig. 5 Inlet +45° flow condition with existing breakwater (velocity vectors and streamline contour)

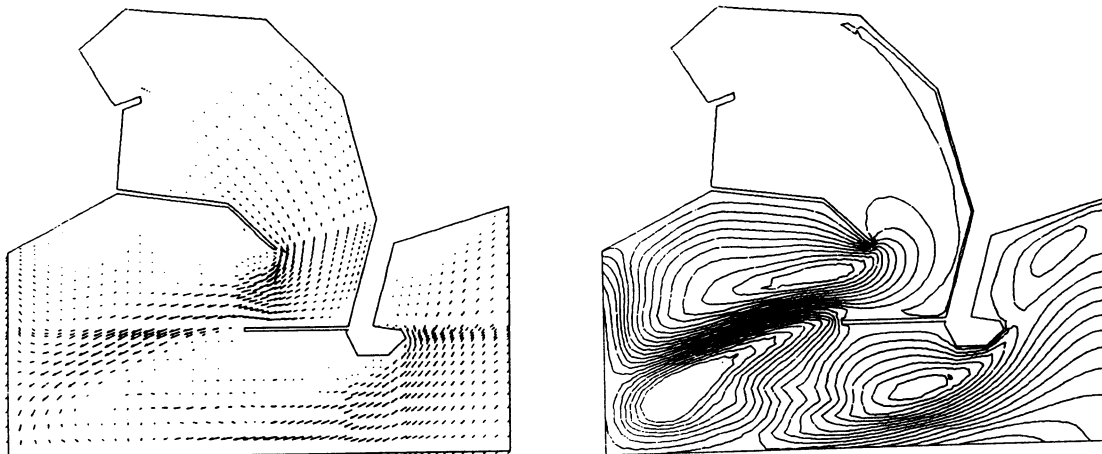


Fig. 6 Inlet -45° flow condition with existing breakwater (velocity vectors and streamline contour)



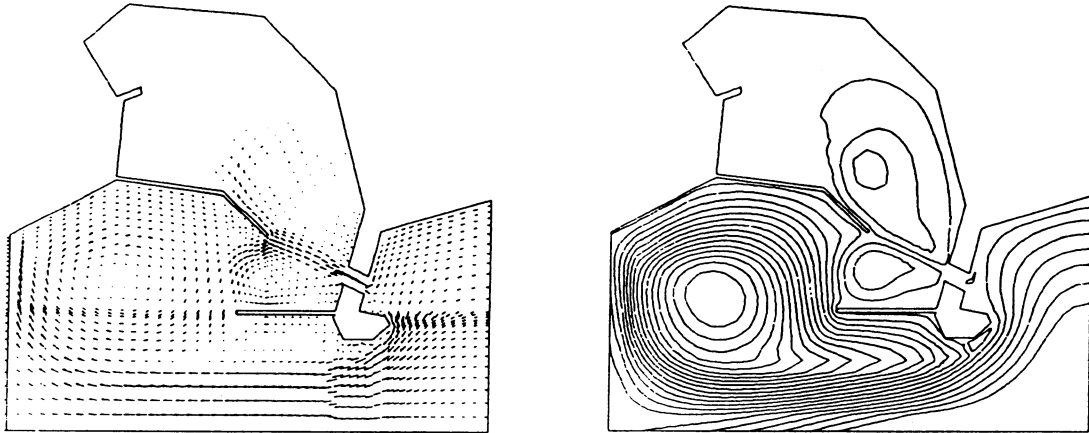


Fig. 7 Horizontal inlet flow condition for case 1 (velocity vectors and streamline contour)

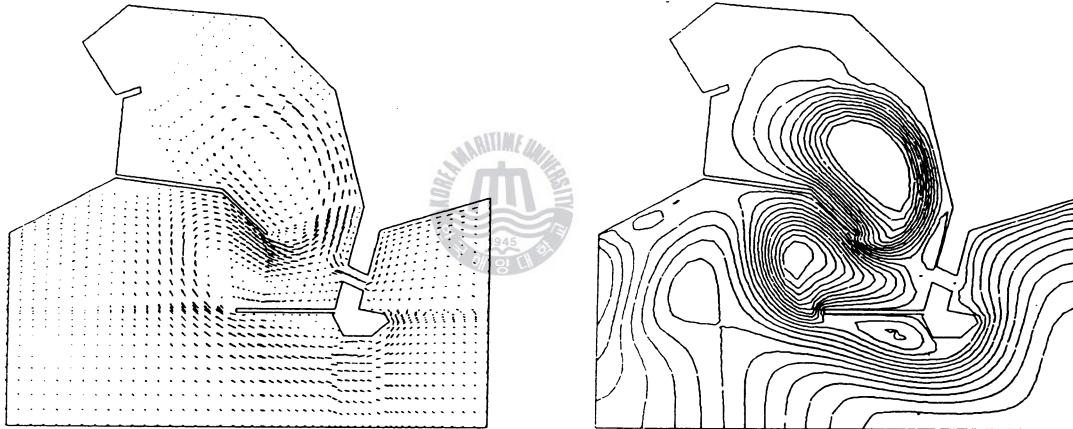


Fig. 8 Inlet +45° flow condition for case 1 (velocity vectors and streamline contour)

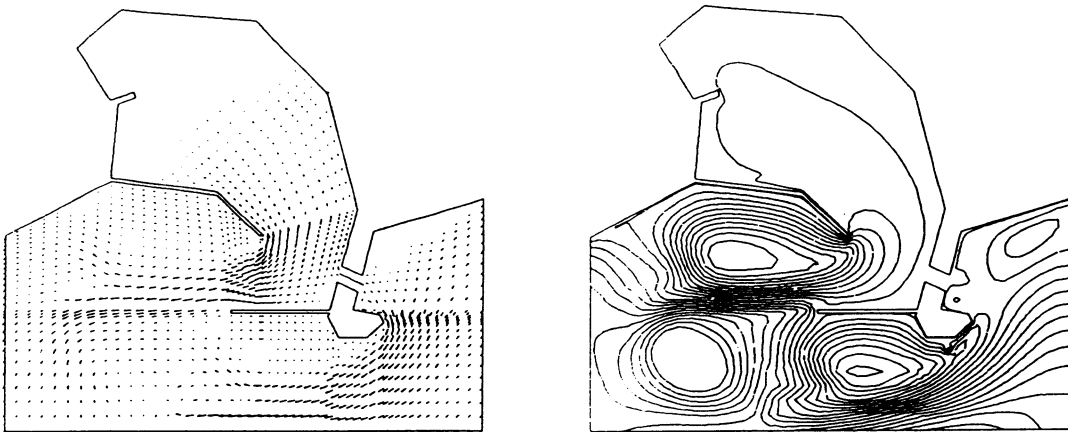


Fig. 9 Inlet -45° flow for case 1 (velocity vectors and streamline contour)

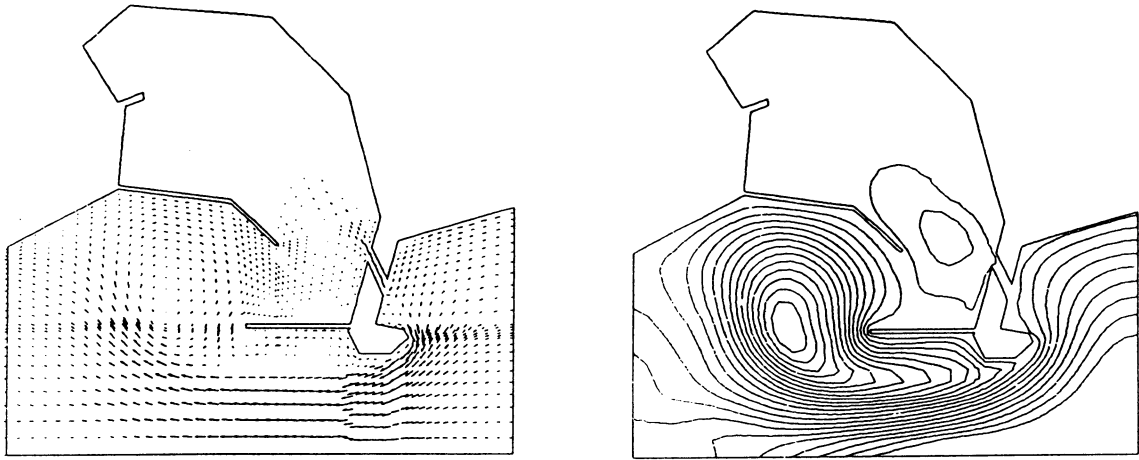


Fig. 10 Horizontal inlet flow condition for case 2 (velocity vectors and streamline contour)

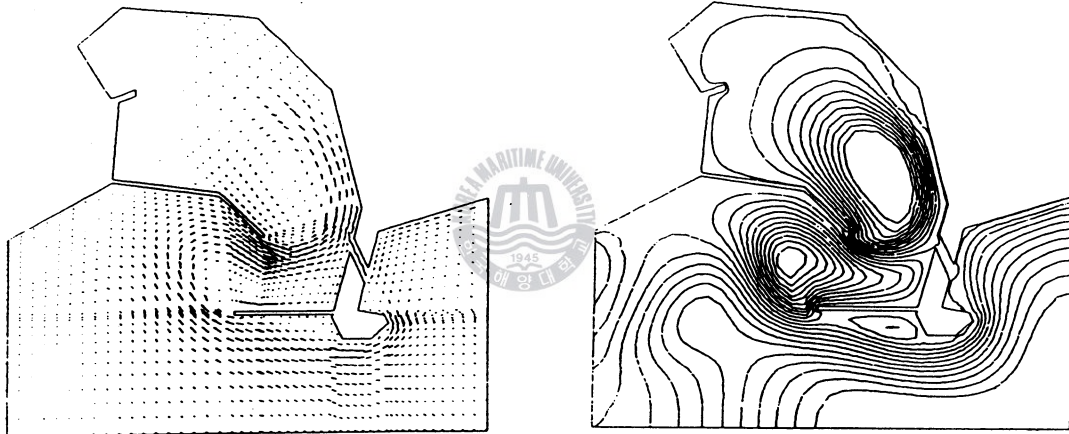


Fig. 11 Inlet +45° flow condition for case 2 (velocity vectors and streamline contour)

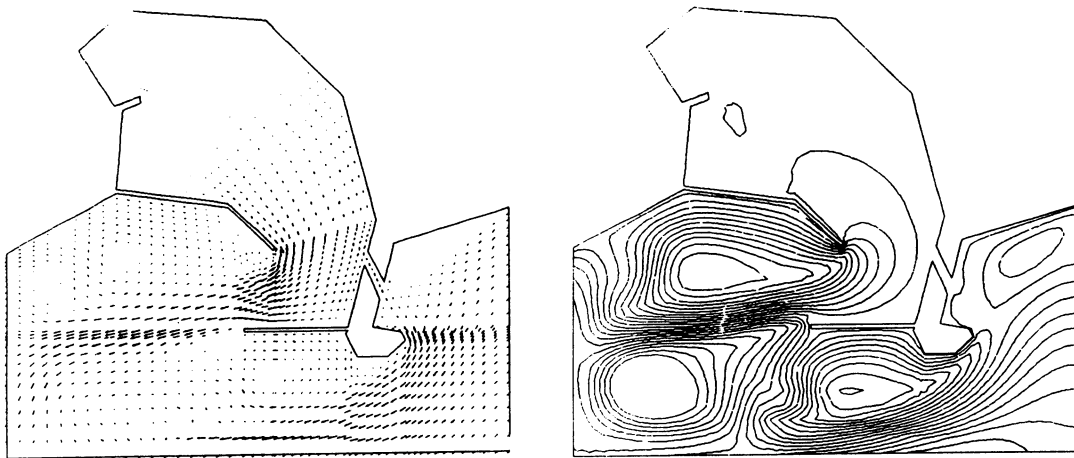


Fig. 12 Inlet -45° flow condition for case 2 (velocity vectors and streamline contour)



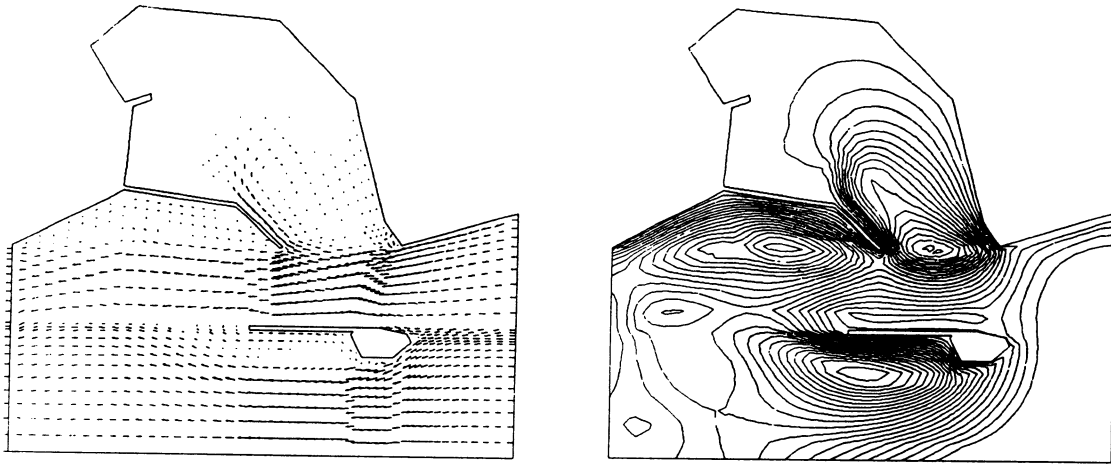


Fig. 13 Horizontal inlet flow condition for case 3 (velocity vectors and streamline contour)

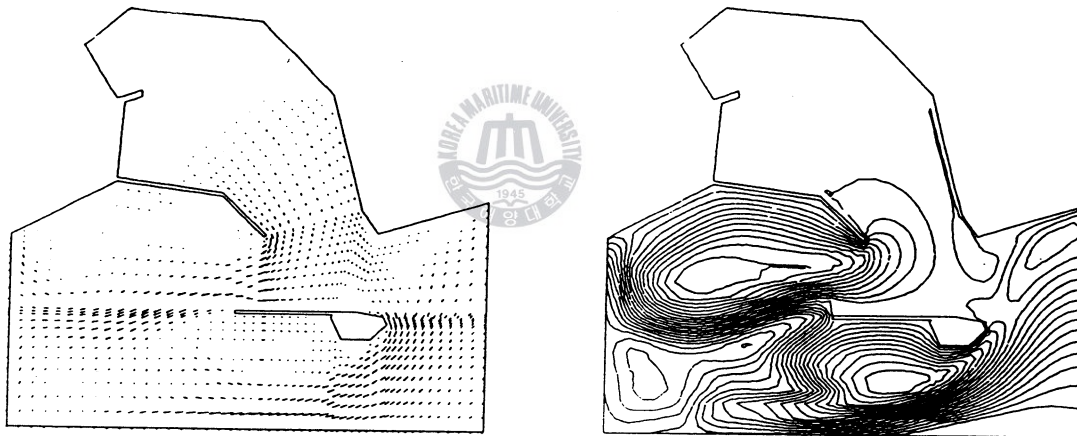


Fig. 14 Inlet  $-45^\circ$  flow condition for case 3 (velocity vectors and streamline contour)

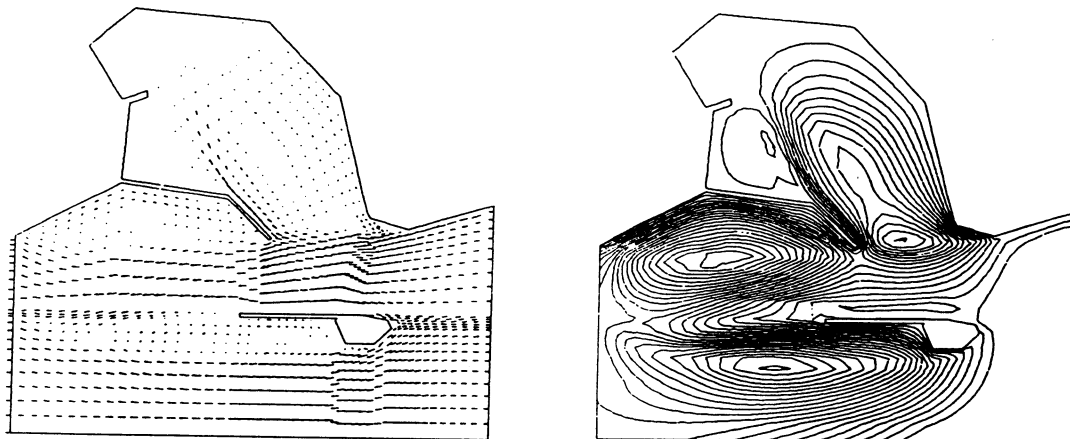


Fig. 15 Horizontal inlet flow condition for case 4 (velocity vectors and streamline contour)

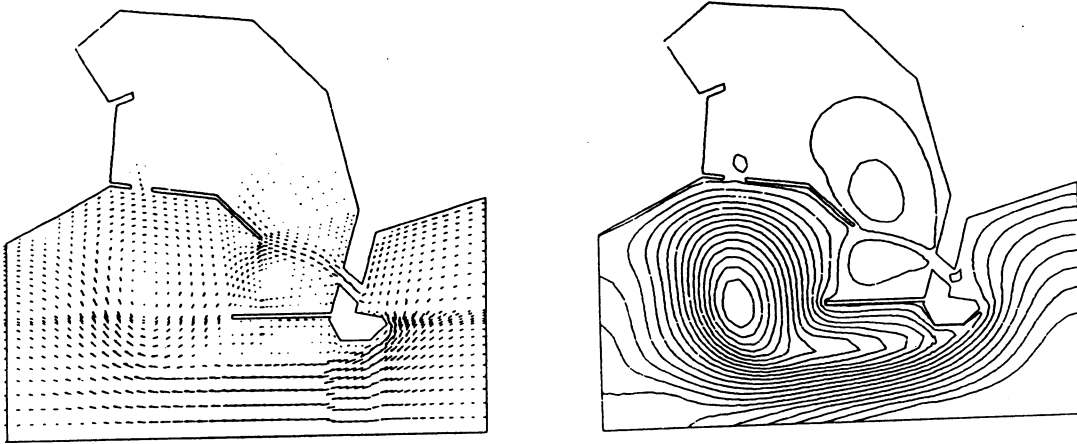


Fig. 16 Horizontal inlet flow condition for case 5 (velocity vectors and streamline contour)

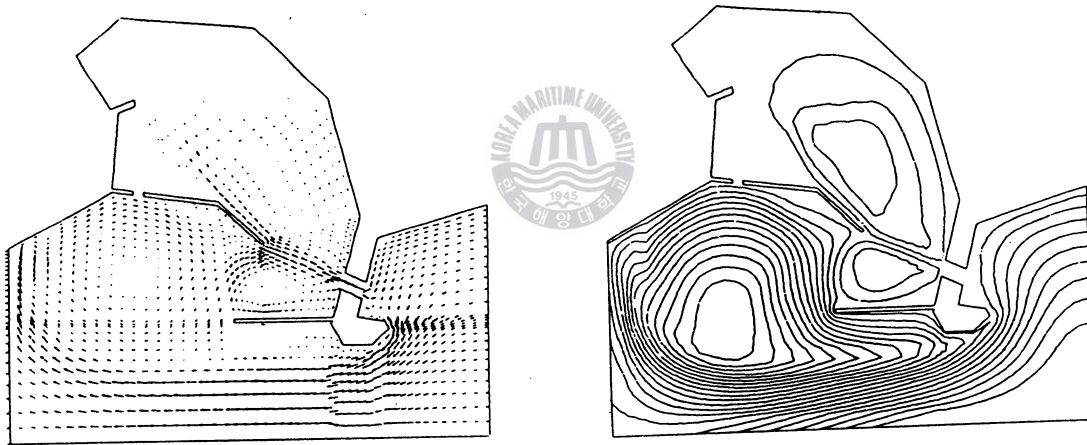


Fig. 17 Horizontal inlet flow condition for case 5 (velocity vectors and streamline contour)

Fig.16, 17은 case 5의 경우로 이것은 反對쪽의 방파제에 관통부를 내어서 複合的인 흐름을 유도하려고 시도한 것이다. Fig.16은 반대편 관통부의 크기가 약간 크고 슬도의 관통부에 경사를 약간 주었지만 Fig.17은 크기도 작고 경사도 완만하였다. 計算結果를 보면 Fig.16은 別로 좋지 않았고, Fig.17은 普通以上の結果는 나왔으나 반대편 방파제의 효과는 전혀 없는

것으로 판명되었다.

Fig.18, 19는 case 6의 경우로 슬도에 이르는 방파제를 절반 가량 제거시킨 것이다. 수평방향의 유입조건인 Fig.18의 결과는 Fig.4의 case 1의 결과와 비교해서 별다른 효과가 없는 것으로 나타났고, Fig.19의  $-45^\circ$  방향 흐름에 대해서도 기대할 만한 효과는 없었다.

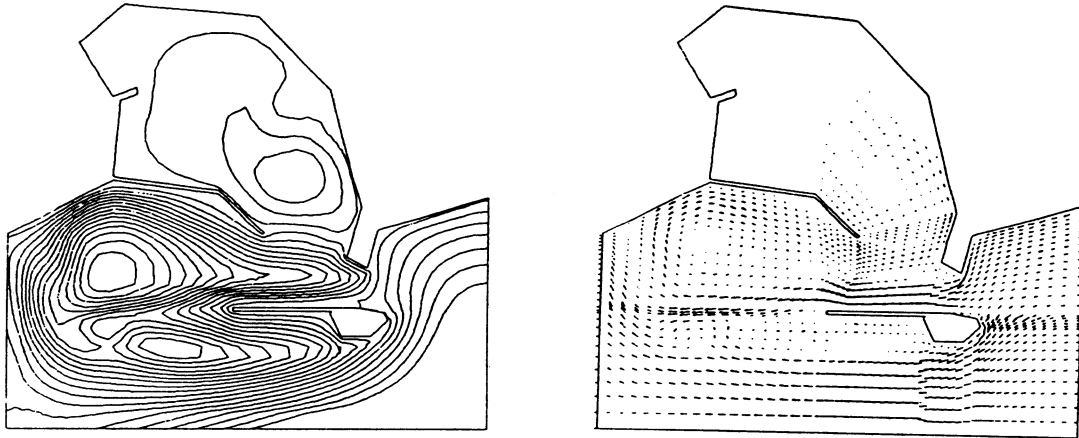


Fig. 18 Horizontal inlet flow condition for case 6 (velocity vectors and streamline contour)

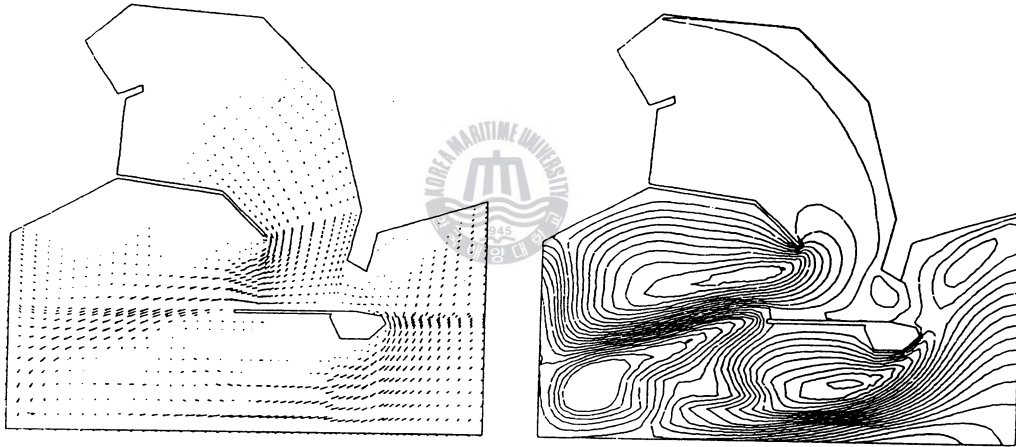


Fig. 19 Inlet  $-45^\circ$  flow condition for case 6 (velocity vectors and streamline contour)

#### 4. 結 論

方魚津 방파제 내부의 유체순환을 촉진시키는 방법을 數値解析을 통하여 수행하였다. 16 가지 경우의 case study를 수행하였으나 기존 방파제에 어떠한 형태의 관통부를 뚫는다 하더라도 滿足스러운 유동장을 얻기가 힘들었다. 깊숙한 內海까지는 해류 순환이 미치지 못했지만 case 1과 같이 슬도에 이르는 방파제에 관통부를 부분적으로 뚫을 경우에 어느 정도의 효과는 나타났다. Case 6의 경우는 슬도쪽의 방파제를 절반 정도 삭제한 경우인데 이 경우도 滿足스럽

지는 못하지만 부분적인 순환은 가능하리라 예측된다. 最終의 方案은, 內海 깊숙한 곳의 순환은 기존의 방파제를 일부 修正해서는 不可能하며 所期의 목적을 달성하기 위해서는 방어진 陸地地域에서 들어오는 폐수 시스템을 再調整하여 방파제의 밖으로 出口를 유도하고 그 상태에서 case 1 또는 case 6을 채택한다면 효과적인 결과를 얻을 수 있으리라 예측된다.

#### 參 考 文 獻

- 1) Falconer, R.A "Application of numerical

- models in the hydraulic design and operation of four U.K. harbours", BHRA, paper A1, 1985.
- 2) Tabet, R.A.H., Verboom, G.K. and Akkerman, G. J., "Two dimensional modelling of tidal motion for harbour studies", BHRA, paper A3, 1985
  - 3) Gallagher, R.H. and Zienkiewicz, O.C., "Finite Element in Fluids", Vol 3, John Wiley & Sons, Ltd., 1978.
  - 4) Kawahara, M. and Nakazawa, S. "Finite element method for unsteady shallow water wave equation", U.S-Japan Seminar on Interdisciplinary Finite Element Analysis, 1978.
  - 5) Tanaka, T. and Ono, Y. "Finite element analysis on typhoon surge in Ise Bay", U.S-Japan Seminar Interdisciplinary Finite Element Analysis, 1978.
  - 6) Ramming, H. G. and Kowalik, Z., "Numerical modelling of marine hydrodynamics", Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.

