

방사효과를 고려한 개방경계조건

Open Boundary Conditions Considering the Radiating Effect

서	승	원*
Suh,	Seung	Won
신	응	배**
Shin,	Eung	Bai
윤	태	훈***
Yoon,	Tae	Hoon

Abstract

The objective of this study is to enhance the reliability of the computed results by setting up of an improved treatments onto the open boundary condition for tidal motion in finite domain. By the L^2 -norm and RMS error tests, it was revealed that Sommerfeld's radiating condition gives better result than a forced boundary condition. In the numerical tests for a long wave in a simplified rectangular bay, it was found that the computational accuracy of the newly improved technique to the Sommerfeld condition, suggested in this study with the 2 dimensional shallow finite element model, could be improved by 30% of RMS error to the existing Sommerfeld condition.

요 지

본 연구는 국부적으로 한정된 수역의 파동운동 해석시 개방경계의 조건처리에 대한 수치기법을 개선하여 수치실험결과의 신뢰도를 향상시키기 위하여 시도되었다. 개방경계의 적절한 조건을 도출하기 위하여 L_2 -norm 및 RMS 오차분석을 통하여 방사이론이 포함된 조건을 비교한 결과, Sommerfeld 방사조건이 우수한 것으로 나타났다. 본 연구에서 이용된 2차원 유한요소 천수모형에 응용되도록 2단계 기법이 적용된 개방경계조건을 단순화된 구형만에서 장주기 파동에 대하여 수치실험한 결과 Sommerfeld 방사조건보다 RMS 오차가 30% 정도 감소되는 양호한 결과를 나타냈다.

*정회원 · 군산대학 전임강사, 해양공학과

**정회원 · 한국과학기술원 환경공학 연구실

***정회원 · 한양대학교 공과대학 교수, 토목공학과

1. 서 론

해안흐름의 수치모형화에서 그 해석대상 영역은 만이나 하구등을 포함한 해안수역이다. 이러한 해안수역은 육지와와의 경계인 고정경계, 하천 그리고 외해와 접한 개방경계를 갖는다. 해석대상이 되는 수역의 외해방향으로의 한계 즉 개방경계를 육지에서부터 외해로 어느 정도의 거리에 설정하는 것이 최선인가 하는 것은 지금도 연구의 쟁점이 되는 부분이다. 해석자에 따라 유한한 영역이 해석대상으로 설정되고, 설정된 수역의 외해경계인 개방경계에서 수치적인 여산화(discretization)가 끝나게 되나 여기에서 유체운동이 구속되어서는 안되기 때문에 문제가 된다. 또한 이 경계외부의 여러 가지 동적인 변화를 모르거나 혹은 무시하고 있기 때문에 개방경계의 위치설정 및 조건설정에 대한 어려움이 발생하게 된다⁽²⁾.

본 연구에서는 해안흐름에 수치모형을 적용하는데 필요한 기존의 개방경계조건에 대해 개선점을 마련하므로써 수치모형의 신뢰성을 제고하고자 하였다. 수심평면을 취한 2차원의 연속방정식과 운동방정식이 기본방정식으로 이용되었다. 수치모형의 정립은 선형보간함수가 적용된 삼각형요소를 이용한 유한요소법을 택한다. 파동운동은 시간에 따라 변화되는 비정상(unsteady) 운동이므로 기본방정식에 이의 영향을 고려하는 국부가속항에 대한 시간적분으로 양해법의 일종인 2단계 Lax-Wendroff 방법을 적용한다. 또한 유한요소식의 구성 및 풀이에 나타나는 질량행렬의 집중화기법을 응용함으로써 계산의 효율을 증진토록 도모한다.

기존의 연구결과에서 제안된 개방경계조건의 상호비교를 실시하며 특히 계산된 해가 개방경계조건에 의하여 구속되는 것을 제거하기 위한 방사경계조건에 중점을 두어 해석한다.

개방경계조건의 해석에서는 Sommerfeld가 방사경계조건을 제창한 이래 이의 수정된 형태등에 관한 조건들의 특성이 L^2 -norm과 RMS(Root-Mean-Square)오차 비교를 통하여 평가된다.

이와같이 상호비교된 개방경계조건중 최선의 것을 선택하고 이 조건에 대하여 개선점을 마련하므로써 개선된 개방경계조건의 도출을 꾀한다.

2. 연구의 배경

수치모형을 이용한 해안흐름해석에 관한 연구가 국내에서 일기시작한 것은 1980년 이래로 해양에서의 조석운동과⁽³⁾ 조석운동으로 인한 환경문제 및 부유사의 거동⁽⁴⁾, 토사이동^(7, 8) 등을 들 수 있고, 또한 조석물막이 설치로 인한 조류의 변화를 규명하기 위한 연구가⁽¹⁾ 계속되고 있으나, 개방경계에 관하여 기 수행한 연구는 없었던 것으로 사료된다. 외국의 경우 해양의 조석운동에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔으나 역시 개방경계에 관해서는 미미한 실정이다.

Orlanski는 일차원 선형천수파방정식의 단일파전파에 관하여 반사의 영향을 받지 않는 Sommerfeld의 상사경계조건을 제안하였다⁽¹⁵⁾.

Camerlengo와 O'Brien은 지구과학적인 측면에서의 수치 모의시 개방경계조건의 역할을 살펴보기 위한 해석을 하였다⁽¹⁰⁾. 이들은 수정된 Orlanski 형태를 이용하여 개방경계조건으로 설정하였고 비선형 문제에 대한 개방경계조건 연구를 수행함에 있어 먼저 선형된 경우에 적용하여 지배방정식이 선형천수파인 경우에는 Sommerfeld의 방사조건이 최적의 개방경계조건이라고 결론지었다.

Blumberg와 Kantha는 개방경계에서의 방사조건을 만족시키기 위하여 Dirichlet 조건의 일종인 구속된(clamped) 경계조건을 이용하여 해석하였으며⁽⁹⁾, 특히 경계에서의 감쇄영향을 고려하기 위하여 마찰시간이라는 변수를 도입하고 이의 적절한 값을 결정하고자 민감도분석을 실시한 바 있다.

이러한 기존의 연구들은 방사조건을 고려하도록 연구자들 나름대로 개개의 변형된 형태를 제안하여 해석하고 있으나 그들의 개방경계조건에 대한 정성적인 해석은 없었다. 본 연구에서는 이들 각각의 특성을 파악하고 개방경계조건의 평가를 위하여 기존연구에서 제안된 조건식을 대입하고, 정확해를 구할 수 있는 단순 정형화된 만에 적용하여 정량적인 평가를 L^2 -norm을 이용하여 분석한 후, 최적의 조건에 대한 개선된 조건식의 도출에 중점을 두어 시행하였다.

3. 기본방정식과 유한요소모형

수심평균의 2차원 천수방정식을 유도하기 위해

여 3차원 Navier-Stokes 방정식으로부터 연직방향의 가속과 확산영향을 무시하면 정수압분포의 가정이 포함되는 천수방식의 형태가 된다. 좌표계가 그림 1과 같이 표현되었을 때 수심평균의 2차원 천수연속방정식과 운동 방정식은 식(1) 및 (2)로 표현된다.

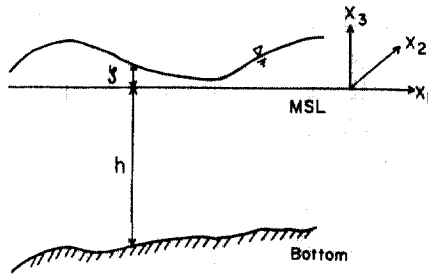


그림 1. 기본방정식의 유도를 위한 좌표계

$$\zeta_{,i} + \{(h + \zeta) u_i\}_{,i} = 0 \quad (1)$$

$$u_{i,i} + u_j u_{j,i} + g \zeta_{,i} + \tau_{in} - \varepsilon u_{i,jj} = u \quad (2)$$

상기식 (1) 및 (2)가 천수영역의 흐름해석에 널리 이용되는 수심평균의 2차원 기본방정식이다. 해석을 단순화하기 위하여 바람의 영향과 지구자전에 의한 영향은 고려하지 않았다. 상기식에서 τ_{in} 은 바닥에서의 마찰영향을 나타내는 항으로서 Manning의 조도계수를 이용하여 표현하면 $\frac{n^2 g}{h^{4/3}} (u_{ij})^{1/2} u_i$ 이고, ε 은 와점성계수이다. 여기에서 ζ 는 평균해수면과 수표면과의 변위를 나타내고 g 는 중력가속도이며 u_i 는 직각좌표계 x_i 에서의 i 방향의 유속을, t 는 시간을 나타내며, i 와 j 는 index이고, \cdot 는 미분을 의미한다.

기본방정식의 유한요소도형을 구성하기 위하여 3점 3각형 요소를 이용한 다음의 Galerkin 형 유한요소법이 이용되었다^(2, 4, 5).

Galerkin의 방법은 기본식의 미지값인 ζ 와 u 에 관한 근사해를 공간에 대한 보간함수 ϕ 를 도입하여 다음식 (3) 및 (4)와 같이 표현한다. 그리고 연속방정식 및 운동방정식에 대한 가중함수를 식 (5), (6)과 같이 표현하고 식 (3), (4)의 근사해를 기본방정식에 대입하여 생성되는 잔차(residual)를 최소화시킨다. 따라서 최종적으로는 식 (5), (6)의 가중함수와 잔차와의 내적을 0으로 취하게 된다⁽¹¹⁾.

$$\zeta = \phi_\alpha \zeta_\alpha \quad (3)$$

$$u_i = \phi_\alpha u_{\alpha i} \quad (4)$$

$$\zeta^* = \phi_\alpha \zeta_\alpha^* \quad (5)$$

$$u_i^* = \phi_\alpha u_{\alpha i}^* \quad (6)$$

여기서 ζ_α 와 $u_{\alpha i}$ 는 유한요소중 α 번째 절점에서 i 의 수위와 평균유속이다. ζ_α^* 와 $u_{\alpha i}^*$ 는 유한요소의 α 번째 절점에 대한 가중함수값을 나타내며 임의의 값이 선택될 수 있다.

식 (3)-(6)으로 표현된 근사해와 가중함수를 기본방정식인 식 (1), (2)에 대입하고 대상영역에 관하여 정리하면 다음의 행렬식이 구성된다. (문헌 2 참조)

$$M_{\alpha\beta} \dot{Z}_\beta + (F_{\alpha\beta r} + G_{\alpha\beta r})(h_\beta + Z_\beta) V_r = 0 \quad (7)$$

$$M_{\alpha\beta} \dot{V}_\beta + C_{\alpha\beta r} V_\beta V_r + P_{\alpha\beta} Z_\beta + B_{\alpha\beta} V_\beta + E_{\alpha\beta} V_\beta = T_\alpha \quad (8)$$

여기서 $M_{\alpha\beta}$, $F_{\alpha\beta r}$, $G_{\alpha\beta r}$, $C_{\alpha\beta r}$, $P_{\alpha\beta}$, $B_{\alpha\beta}$, $E_{\alpha\beta}$, T_α 등은 계수행렬을 나타내고⁽²⁾ Z_β 와 V_β 는 미지값인 ζ_β 와 $u_{\beta i}$ 를 조합한 것을 의미한다. α, β, r 는 유한요소의 절점을 나타내고 첫항의 \cdot 는 시간미분을 의미한다.

식 (7)과 (8)의 질량행렬(mass matrix) $M_{\alpha\beta}$ 를 풀이해야 되므로 계산시간과 기억용량을 줄이기 위해 질량집중화기법(Mass Lumping Technique)을 이용한 2단계 Lax-Wendroff 방법을 이용하여 다음과 같이 적분한다.⁽²⁾

$$1 \text{ 단계} : L_{\alpha\beta} U_\beta^{n+1/2} = M_{\alpha\beta} U_\beta^n - \Delta t / 2 \cdot X_\beta^n \quad (9)$$

$$2 \text{ 단계} : L_{\alpha\beta} U_\beta^{n+1} = M_{\alpha\beta} U_\beta^{n+1/2} - \Delta t \cdot X_\beta^{n+1/2} \quad (10)$$

여기서 $L_{\alpha\beta}$ 는 $M_{\alpha\beta}$ 의 질량집중행렬(lumped mass matrix)이며, 미지값인 Z_β 와 V_β 는 U_β 로 표현되었고, X_β 는 식 (7)과 (8)의 시간미분항 이외의 항들을 대표하며 n 은 적분시간단계를, Δt 는 시간간격을 의미한다. 이때 시간간격 Δt 는 다음과 같은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 안정조건에 지배된다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta S}{\sqrt{2gh}} \quad (11)$$

여기서 ΔS 는 유한요소의 가장 짧은 변의 길이이다.

4. 방사경계조건

방사경계(radiating boundary)라 함은 대상영역 내의 파에너지가 이 경계를 통하여 어떠한 교란이나 제약을 받지 않고 외해로 전파될 수 있는 경계를 일컫는다⁽¹⁰⁾. 이 조건을 적용하는 이유는 분산된 파에너지가 개방경계에 의하여 내부영역으로 되돌아오는 반사영향(reflection effect) 없이 외해로 방

사되도록 하기 위함이다.

광학분야에서 Sommerfeld 가 무한원방에서 광파장의 반사영향이 전혀 없어야 된다는 무한원방의 방사이론을 수립하였다⁽³⁶⁾. 현재까지의 개방경계에 대한 해석의 대부분은 바로 이 방사이론을 응용한 것이다. 그러나 무한원방까지로 확장시키지 않고도 수치모형을 운용하는 한정된 유한영역내에서 방사경계의 요구조건을 충족시킴으로써 대상영역의 해가 개방경계조건에 의하여 구속되는 것을 최소화하는 것이다.

개방경계에서의 방사조건을 고려하는 조건식과 이에 대한 수치화는 유한차분법을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

1) Sommerfeld의 방사조건식; (SOM)

$$\phi_{,t} + c\phi_{,n} = 0, c = \sqrt{gh} \quad (12)$$

조건식의 수치화

$$\phi_B^{t+1} = \phi_B^t - c_r(\phi_B^t - \phi_{B-1}^t) \quad (13)$$

2) 부분구속조건식⁽³⁷⁾; (PCL)

$$\phi_{,t} + c\phi_{,n} = -\phi/T_r, c = \sqrt{gh} \quad (14)$$

조건식의 수치화

$$\phi_B^{t+1} = \phi_B^t(1 - \Delta t/T_r) - C_r(\phi_B^t - \phi_{B-1}^t) \quad (15)$$

3) Orlanske의 방사조건식⁽³⁸⁾; (ORL)

$$\phi_{,t} + c\phi_{,n} = 0 \quad (16)$$

$$c = \Delta x/\Delta t, \phi_{,t}/\phi_{,n} > \Delta x/\Delta t$$

$$= \phi_{,t}/\phi_{,n}, 0 < \phi_{,t}/\phi_{,n} < \Delta x/\Delta t \quad (17)$$

$$= 0, \phi_{,t}/\phi_{,n} < 0$$

조건식의 수치화

$$\phi_B^{t+1} = [\phi_B^{t-1}(1 - C_r) + 2C_r\phi_{B-1}^t]/(1 + C_r)$$

$$C_r = 1, C_L > 1 \quad (18)$$

$$= C_L, 0 < C_L < 1 \quad (19)$$

$$= 0, C_L < 0$$

$$C_r = \frac{\phi_{B-1}^{t-2} - \phi_{B-1}^t}{\phi_{B-1}^t + \phi_{B-1}^{t-2} - 2\phi_{B-1}^{t-1}} \quad (20)$$

4) 수정형태의 Orlanski 방사조건식⁽³⁹⁾; (MOO)

$$\phi_{,t} + C\phi_{,n} = 0$$

$$c = \Delta x/\Delta t, \phi_{,t}/\phi_{,n} > 0 \quad (21)$$

$$= 0, \phi_{,t}/\phi_{,n} < 0 \quad (22)$$

조건식의 수치화

$$\phi_B^{t+1} = \phi_B^{t-1}, C_L > 0$$

$$= \phi_B^{t-1}, C_L < 0 \quad (23)$$

상기식에서 ϕ 는 개방경계에서의 수위 혹은 유속

t 는 시간

n 은 개방경계의 수직방향

c 는 파의 전파속도

c_r 은 Courant 수($C = \Delta t/\Delta x$)

T_r 마찰의 영향을 표현하는 시간단위

C_L 은 수치적인 파의 전파속도(numerical celerity)

위첨자 $t-2, t-1, t, t+1$ 은 계산이 행하여지는 시간단계

아래첨자 $B, B-1, B-2$ 는 개방경계 및 인접한 내부의 절점을 의미한다.

본 연구에서는 방사경계이론을 응용한 개방경계 조건의 변형된 형태와 이에 관한 수치화로 차분기법을 이용한다. 그리고 이들 방사조건은 개방경계 지점에서 수위의 주기함수 형태인 $\phi = A \sin(\omega t)$ 로 부여되는 통상의 개방경계조건 (common) 적용과 함께 고려된다.

5. 구형만에서의 장주기 파동실험

대상영역에 대한 개방경계조건의 개선된 처리기법을 수립하고자 먼저 단순화시킨 경우로 내부전단응력, 바닥마찰등을 무시하였고, 해석적인 해와 비교가능하도록 2 차원 천수방정식에 포함된 비선형항을 무시하였다. 만의 형태도 그림 2와 같이 구형으로 취하여 Ippen 이⁽³³⁾ 해저마찰을 무시하고 정확해를 구한 단순한 형태의 구형만의 대하여 실험한다.

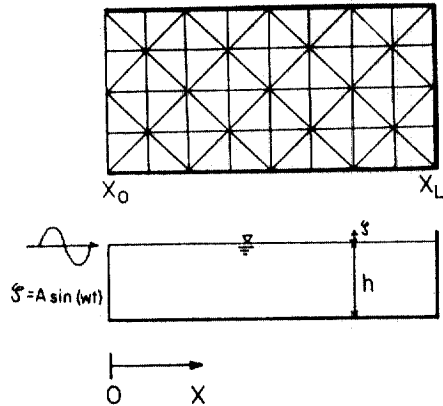


그림 2 파동해석에 이용된 구형만의 형상

장주기에 대한 실험에서는 만의 입구부 폭을 100 m, 길이를 200 m 로 취하였고, 외해에서 만내로 입

입사하는 파의 진폭은 0.25m 로 하였으며 주기는 200 초로 설정하였고, 적분시간간격 Δt 는 CFL 안정조건에 맞도록 1 초로하여 파주기의 5 배인 1000 초까지 수치실험을 실시하였다. 개방경계에 대한 조건으로는 통상의 형태(common)로 개방경계에서 수위의 주기형태인 정현함수로 부여하였으며, 방사조건을 만족하도록 SOM, PCL, ORL, MOO 등의 조건을 부여하고 수치실험을 실시하였다. 그림 3에는 식 (24)로 산장된 시간별 L^2 -norm의 변화가 도시되었다.

초기조건으로써 cold start 를 (수학적으로는 초기조건이 기본 편미된 방정식을 만족시켜야 하므로 해양에서의 조석운동 해석시 널리 택하고 있음) 취한 경우 초기조건의 영향은 조석주기의 약 3 주

기 이후부터 소멸되어 만내의 파운동은 준정상상태에 달한다. 그림 3 에는 모형실험시 5 주기까지 계산을 수행하였을 때 마지막 한주기동안의 5 가지 개방경계조건에 따른 L^2 -norm 의 변화가 도시되었다. L^2 -norm 은 다음과 같이 정의된다⁽²²⁾.

$$\|e\|_{L^2} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N [(u_{i1}^n - u_{i1}^o)^2 + (\zeta_i^n - \zeta_i^o)^2]}{\sum_{i=1}^N [(u_{i1}^0)^2 + (h^0)^2]} \right\}^{1/2} \quad (24)$$

여기에서 위첨자 n 과 o 은 각각 임의의 시간대와 초기상태를 의미하고 아래첨자 i 는 계산되는 영역의 모든 절점을 나타내며 N 은 총절점수이다. ζ_i^o 및 u_{i1}^o 는 각각 수위의 유속의 정확해를 의미한다⁽²²⁾.

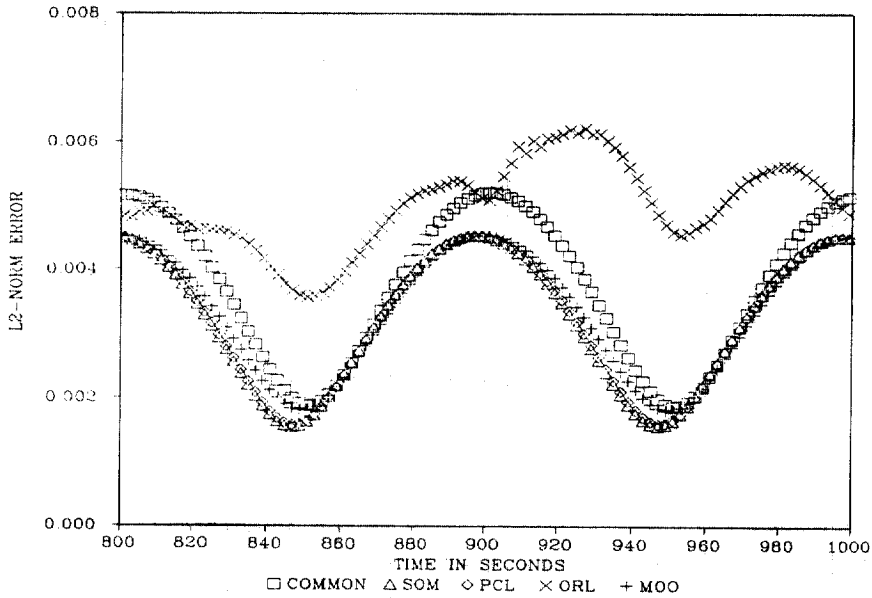


그림 3 준정상상태에 도달된 파동 1 주기간의 L^2 -norm 변화

그림 3에서 보는 바와 같이 통상의 개방경계를 취한 경우보다는 Sommerfeld 의 방사조건과 Blumberg 에 의한 부분적으로 구속된 개방경계조건 및 Carmelengo 와 O'Brien 이 제시한 수정된 Orlanski 방사경계조건이 정확해에 더욱 가까운 결과를 나타내고 있다.

6. 개방경계조건에 대한 수치기법의 개선

5절에서의 수치모형 실험결과에서 알 수 있듯이

통상의 개방경계조건을 부여하는 것보다는 SOM, PCL 등의 방사영향이 고려된 개방경계조건을 적용함으로써, 개방경계조건에 구속됨 없이 만내의 파동운동을 보다 이상적으로 해석할 수 있다는 결론에 도달한다. 본절에서는 기존 Sommerfeld 방사경계조건에 대하여 개선된 수치기법을 정립하고, 계산 결과를 해석하므로써 본 2 차원 유한요소 천수모형에 적합한 개방경계조건을 수립하고자 한다. 개선된 수치기법은 Sommerfeld 의 방사조건을

충족되는 식 (12) 에서 공간에 대하여 후방차분화 (backward difference) 를 취한 기존의 연구에 반하여, 정확도를 제고시키고자 중앙차분화 (central difference) 가 취하여졌다. 시간에 대한 적분은 유한요소모형의 정립에 응용된 2 단계 양해법을 적용하면 개방경계조건식은 다음과 같은 2 단계식으로 표현될 수 있다⁽²⁾.

$$1 \text{ 단계 : } \phi_B^{t+1/2} = \phi_B^t - C_r/4(\phi_B^t - 2\phi_{B-1}^t + \phi_{B-2}^t) \quad (25)$$

$$2 \text{ 단계 : } \phi_B^{t+1} = \phi_B^t - C_r/2(\phi_B^{t+1/2} - 2\phi_B^t + \phi_B^{t-1/2})$$

상기식 (25) 로 표현되는 개선된 수치기법의 Sommerfeld 방사조건식(IMPSON) 을 적용하여 5 절에서 실시한 모형실험과 동일조건하에서 해석된 결과가 그림 4에 도시되었다.

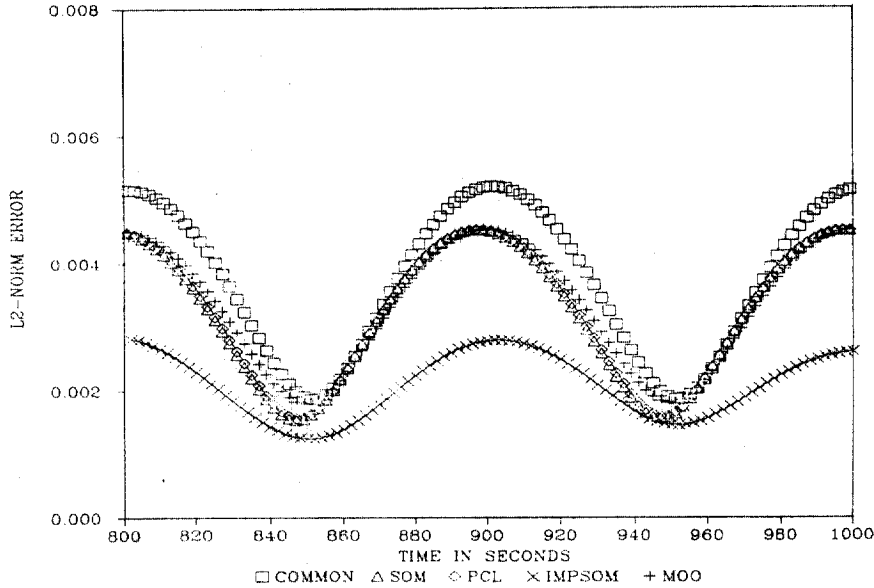


그림 4 개선된 개방경계조건과 기존경계조건과의 L²-norm 비교

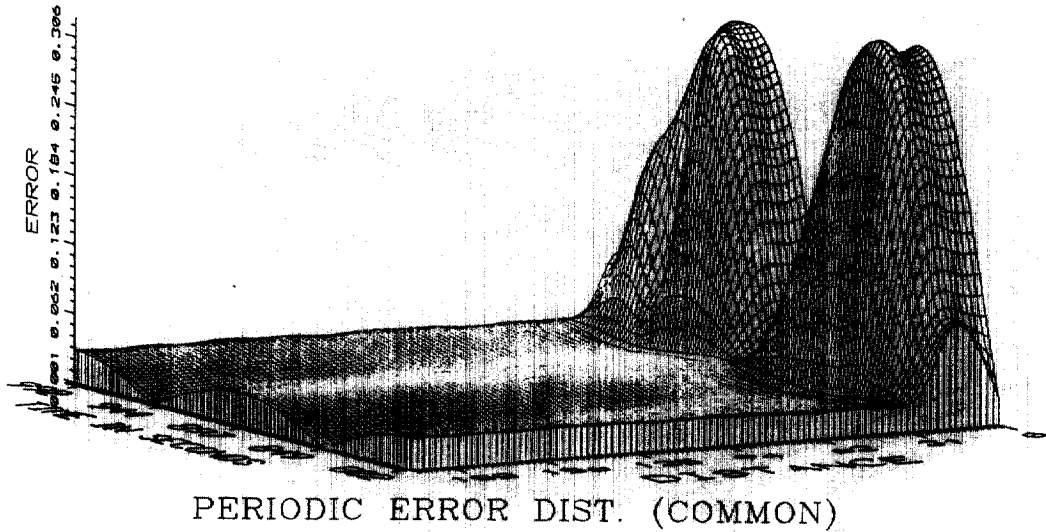
IMPSON 조건이 부여된 경우의 L²-norm 은 방사조건이 부여된 경우 보다도 정확해에 가까운 결과를 제공하고 있음을 알 수 있다.

지금까지의 L²-norm 개념에 의한 여러가지 개방경계조건의 비교는 대상영역전체에 관한 시간적인 변화를 파악하는데는 매우 유익하다. 그러나 초기 조건의 영향도 오차산정에 포함되어 있어 실질적으로 구하고자하는 수위와 유속등의 미지치에 대한 절대적인 오차의 반영이 미흡하며, 만내영역의 공간적인 오차의 변화를 파악하기에는 미흡하다. 따라서 대상영역의 조석주기동안의 시간과 공간적인 오차의 변화를 파악하고 오차의 절대치를 비교하기 위하여 그림 2에서 보인 만의 $X=X_0$ 에서 $X=X_1$ 까지의 만 중심선상의 개개의 절점에서 계산한 다음의 RMS(Root-Mean-Square) 오차를 산출하여 이용한다.

$$\text{오차 } e = [(u_{1a} - u_{1c})^2 + (\zeta_a - \zeta_c)^2]^{1/2} \quad (26)$$

여기서 아래첨자 a 와 c 는 각각 해석적인 해와 수치해를 의미한다.

그림 5는 개방경계조건으로 통상의 조건을 부여한 경우로 준정상상태에 도달하였을 때 파동주기 1 주기간의 시간적인 변화에 따른 RMS 오차가 만의 입구로부터 끝단까지 공간적으로 변화되는 것을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 만의 입구부 즉, 개방경계조건으로 관측자료등을 취한 지점에서 특히 오차가 크게 나타나고 있다. 이와같이 만의 입구부에서 오차가 전주기동안 크게 발생되고 있는 것은 만내에서 반사되는 파의 영향이 경계조건으로 주어지는 바로, 개방경계지점에서 구속되어 외해로 전파되지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 지금까지 해양에서의 수치모형운용시 통상의 경계조건을 부여하고 해석한 것은 상당한



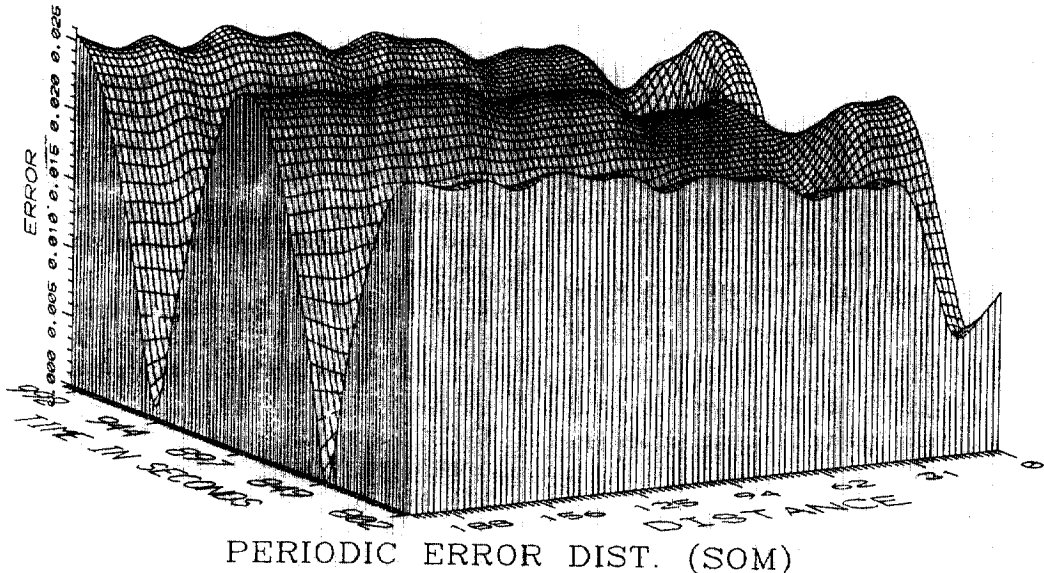
PERIODIC ERROR DIST. (COMMON)

그림 5 통상의 개방경계조건이 부여된 경우의 공간과 시간적인 오차변화

오차가 수반된 비현실적인 결과를 초래한 것으로 판단된다.

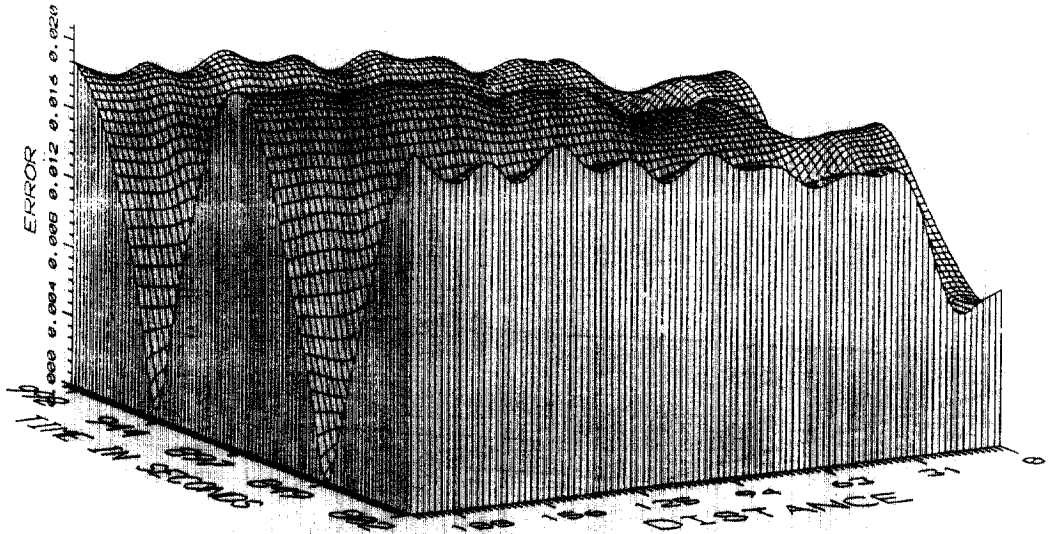
그림 6에는 SOM 조건인 경우의 오차변화가 도시되어 있다. 특히 common의 경우에서의 같은 입구부의 큰 오차인 0.306은 전혀 나타나지 않으며, 오히려 개방경계에서의 오차가 만내보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 오차의 최대치 0.025는 common의 만내오차 0.030보다 작게 나타났다.

그림 7은 장주기 파동의 경우에 개방단에서 IMP-SOM을 부여하였을 때 파동 1주기만 만내의 중심선상 절점에 대한 시간과 공간적인 RMS 오차분포 상황을 도시한 것으로써, 전반적인 오차의 분포양상은 SOM과 거의 비슷한 양상을 보이며 common과는 달리 개방경계에서 큰 오차의 발생없이 만내 전영역에 오차가 고르게 분포되어 있다. 오차의 절대치는 SOM의 최대치 0.026에 비하여 0.0185로 약



PERIODIC ERROR DIST. (SOM)

그림 6. Sommerfeld 방사조건이 부여된 경우의 공간과 시간적인 오차변화



PERIODIC ERROR DIST. (IMPSON)

그림 7. 개선된 개방경계조건이 부여된 경우의 공간과 시간적인 오차변화

30% 정도 향상되는 양호한 결과가 나타났다.

따라서 본 개선된 개방경계조건은 common 에 비하여 현저하게, 그리고 기존의 Sommerfeld 방사 경계조건보다도 정확하게 훨씬 근접하는 해를 줄 수 있는 양호한 방사경계 조건으로 판단된다.

7. 결 론

2차원 천수모형을 이용하여 파동운동을 해석할 때, 개방경계 조건에 대한 처리기법의 개선점을 마련하고자 시도된 본 연구를 통하여 얻은 결과들 간추리면 다음과 같다.

1) 해양의 개방경계에 통상의 경계조건을 부여 하였을 때 경계조근처에서 불합리한 오차가 발생 되고 전체영역에 영향을 미치나 방사조건이 고려 됨으로써 이 영향이 감소되었다.

2) 방사경계조건에 대한 비교연구에서 종래의 조건식중 Sommerfeld의 방사경계조건식이 양호한 것으로 판단되었다.

3) 방사조건식의 수치화에서 공간에는 중앙차분이 시간에는 2단계 양해법이 적용되는 수치기법의 개선이 제안되었다.

4) 본 유한요소모형에 부합되는 방사조건수치기법이 적용될 때 Sommerfeld 조건식 보다 계산결과의 정확도가 30% 정도 향상되었다.

따라서 다른 수치모형에서도 본 방사조건 수치 기법이 적용될때 더욱 실제에 가까운 결과가 도출 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 농업진흥공사, 남포방조제 설치로 인한 조류 및 유사 이동 영향, 1984.
2. 서승원, 2차원 천수방정식의 개방경계조건, 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1988.
3. 윤태훈, "유한요소법에 의한 항만에서의 토사이송 추정 모형", 대한토목학회 논문집, 2권 2호, 19-28, 1982.
4. 윤태훈, 서승원, "만에 적용되는 천수방정식의 개방경계 조건", 한국수문학회지, 20권 3호, 219-228, 1987.
5. 윤태훈, 서승원, "유한요소법을 이용한 개수로 단면 급 확대부의 순환현상해석", 한국수문학회지, 21권 1호, 67-75, 1988.
6. 이정규, 조류에 의한 부유사 농도의 확산거동에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1985.
7. 최병호, "동지나해의 토사이동 경로", 대한토목학회 논문집, 3권 4호, 83-93, 1983.
8. 해양연구소, 해안개발에 따른 해안변형예측을 위한 수치해석 모델기법 개발연구, 1986.
9. Blumberg, A. F. and Kantha, L. H., "Open Boundary Condition for Circulation Model", *J. of Hydr. Div. ASCE*, Vol. 111, No. HY2, 237-255, 1985.
10. Comerlengeo, A. L. and O'Brien, J.J., "Open Boundary

- Conditions in Rotating Fluids", *J. of Computational Physics*, Vol. 35, 12-35, 1980
11. Commor, J. J. and Brebbia, C. A., "*Finite Element Technique for Fluid Flow*", Newnes-Butterworth, 1976.
 12. Garcia, R. and Kahawita, R. A., "Numerical Solution of the St. Venant Equations with the MacCormack Finite Difference Scheme", *Int. J. Num. Methods in Fluids*, Vol. 6, 259-274, 1986.
 13. Ippen, A. A., edr., "*Estuary and Coastline Hydrodynamics*", McGraw-Hill, 1966.
 14. Mei, C. C., "*The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*", John Wiley and Sons, 1983.
 15. Orlanski, O., "A Simple Boundary Condition for Unbounded Hyperbolic Flows", *J. of Computational Physics*, Vol. 21, 251-269, 1976.
 16. Sommerfeld, A., "*Optics*", Academic Press, 1954.

(接受: 1988. 12. 27)