

인공어초 주변의 흐름장에 관한 수치해석

정철훈* · 김헌태
부경대학교 해양공학과

Numerical Analysis of the Flow Field around Artificial Reefs

Chil-Hoon JEONG* and Heon-Tae KIM

Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

This study investigated the fluid force acting on an artificial reef and the scour pattern at the bottom of the artificial reef in a steady-flow field using the finite difference method (Flow-3D). The structure was tetragonal in shape, like similar objects found in nature. The numerical analysis showed that the hydrodynamic characteristics and incipient scouring pattern matched natural phenomena. The velocity distribution around the tetragon was symmetric and wake occurred inside the tetragon and behind the bottom of the tetragon. The length of the recirculation flow behind the tetragon for each velocity was about 4-5 cm and the magnitude of the recirculation flow inside the tetragon generally increased with the Reynolds' number, although it decreased slightly for Reynolds' numbers from 11,000 to 12,000. In addition, the total fluid force acting on the tetragon increased with the inflow velocity, although the increment was smaller when the velocity exceed 18 cm/sec. The incipient pattern for the scouring of sediment matched the natural phenomenon.

Key words: Artificial reef, Flow field, Shield's parameter, Fluid force, Bottom shear stress, Scour

서 론

인공어초에 대한 기존의 연구는 현장조사, 수리실험 및 이론적 검토 등의 다양한 방법에 의해 체계화 되어졌다. 착저식 인공어초의 기능유지 및 극대화와 관련한 지반거동에 관한 안정성 연구는 현지조사와 수리실험으로 시작되었다. 파랑장에 있어서 어초주변의 세굴이나 침하에 대한 연구는 Ryu et al. (1986)에 의해 수리실험으로 수행된 바 있으며 이들은 세굴의 주요기구에 대한 실험결과를 정리하여 파랑장에서 중요한 인자인 KC (Keulegan-Carpenter) 수의 중요성을 강조하였다. 또 Kimura et al. (1994)는 원통형 어초에 대한 세굴·퇴적 특성과 주요 영향인자를 논하였고, Kim et al. (1995)은 파랑장에서 어초 전면형상에 따른 세굴·퇴적특성을 연구하였다. Ingsrisawang et al. (1995)은 인공어초의 침하특성을 실험 및 실험역 모두에서 검토하였으며, Ryu et al. (1997)은 흐름장에서의 세굴·퇴적 특성과 침하·매몰 방지대책에 관한 연구를 하였다. 또한, Kim (2001)은 실험역의 흐름을 고려한 비정상 흐름장에서의 인공어초 주위에 생기는 세굴 및 침하 특성에 대한 연구에서 흐름의 강도와 향이 변동하는 흐름장에서 지속적인 세굴야기 및 침하를 일으키는 것으로 비대칭적 지반세굴과 이에 따른 어초의 주기적 기울임 현상의 중요성을 언급하였다. 그러나, 이러한 수리실험 및 현장조사에 의한 연구에 비해, 인공어초 설치 시 적지선정, 어초 주변의 국부요소에 작용하는 외력의 해석, 다양한 구조물로의 적용성 등과 같은 장점을 지닌 수치적 연구결과는 아직 미흡한

단계이고, 특히 착저식 인공어초 주변의 세굴에 관한 수치적 연구결과는 거의 찾아볼 수가 없다.

본 연구는 유한차분 수치기법을 적용하여 정상 흐름장에서 인공어초의 기본형상인 사각어초 주변의 흐름변동과 작용외력의 특성 및 사각어초 주변의 초기 세굴패턴에 대해 고찰하였다.

수치모델의 방법 및 제한

사각어초 주변의 흐름장을 해석하기 위해 본 연구에 적용된 구조물, 저질, 흐름 및 수심 등에 대한 제한은 Table 1과 같다. 여기서, ρ_a 는 구조물의 밀도, d_{50} 는 저질의 중앙입경, ρ_s 는 저질의 밀도, ρ_w 는 물의 밀도, U는 평균유속, g는 중력가속도, C_D 는 저항계수, 그리고 θ 는 저질입자의 안식각을 나타낸다. 저질과 수심은 실제 어초가 설치된 경남 통영시 장사도 인근 해역의 어초어장의 해역조건을 적용하였다 (Ryu et al., 1986). 흐름장의 유속조건은 저질 입자가 거동하기 위한 유체의 평균 유속의 관계를 나타내는 경험식을 적용하여, 저질의 중앙입경 (d_{50})이 0.018 cm일 때, 실제 세굴에 영향을 미치는 최소유속조건 0.7 m/sec (Herbich, J.B. et al., 1984)와 실제로 어초가 많이 설치되고 있는 해역의 데이터 및 한계설치 유속으로 제시되고 있는 유속조건 2 m/sec (Kim, 2001)의 범위 내에서 각각 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 (m/sec)를 적용하였다.

수치모델에서 좌표계는 X, Y, Z 축의 Cartesian 좌표계를 사용하였다. 정상흐름장에서 인공어초에 작용하는 외력특성에 대한 해석의 계산조건은 기존의 수리실험과의 정량적 특성을 비교하기 위해 Froud 상수를 적용하여 3/100배로 축소하였다. X축 방향의 길이 (L_x)는 300 cm (-200 - 100), X-min과

*Corresponding author: dutjeh@hanmail.net

Table 1. Numerical modeling conditions for flow fields

Structure	Sediment		Flow	Depth
Tetragon	d_{50} (cm)	ρ_s (g/cm ³)	Velocity condition	
200 cm × 200 cm × 200 cm	0.018	2.062	$U^2 = \frac{4gd_{50}}{3C_D} (\rho_s/\rho_w - 1)\tan\phi$	2×10 ³ cm

X-max 경계에는 각각 유입과 유출경계 조건으로 하였고, Y축 방향의 폭 (l_y)은 16 cm (-8 - 8), Y-min과 Y-max 경계에는 인공 어초 주변의 흐름장이 양쪽 경계에 의해 교란되지 않도록 slip조건으로 하였으며, Z축 방향의 높이 (l_z)는 70 cm (0-70), Z-min과 Z-max 경계에는 각각 불투과성 조건과 자유수면 조건으로 하여 계산하였다. 여기서, 사각어초 전면은 계산영역의 중앙 ($x, y, z=0, 0, 0$)에 위치하였고, 계산된 총 격자수는 175,560개 (95×24×77)였으며, 사각어초가 설치되는 영역 ($x=-1-7, y=-4-4, z=0-8$) 사이의 격자간격은 $\Delta x=0.5$ cm, $\Delta y=0.5$ cm, $\Delta z=0.2$ cm로 하였다.

사각어초 주변의 세굴패턴의 특성에 대한 수치계산에서는 실패역의 조건을 적용하였고, X축 방향의 길이 (l_x)는 8,000 cm (-40 - 40), Y축 방향의 폭 (l_y)은 1,600 cm (-8 - 8), Z축 방향의 높이 (l_z)는 4,500 cm (0-45)로 하였으며, 각 축방향의 경계조건은 위와 동일하다. 사각어초 전면은 계산영역의 중앙 ($x, y, z=0, 0, 5$)에 위치하였고 어초의 하부에 지반의 두께는 500 cm로 하였으며, Table 1에서 주어진 저질의 조건을 하부지반에 적용하였다. 이때 계산된 총 격자수는 163,212개 (67×42×58)이고, 사각어초가 설치되는 영역 ($x=-3-3, y=-2-2, z=5-8$) 사이의 격자간격은 $\Delta x=20$ cm, $\Delta y=20$ cm, $\Delta z_1=20$ cm로 하였다. 그러나, 세굴패턴을 나타내기 위한 구조물 하부 지반의 격자간격은 기존의 수리실험 결과 (Kim, 2001)에서 나타난 구조물의 대표길이에 대한 세굴깊이의 비 (d_s/D)의 최대값이 0.3 이하임을 감안하여 구조물 저면에서부터 두께 100 cm 이내의 지반에 대해 $\Delta z_2=5$ cm로 하였다. Fig. 1은 X, Y, Z축의 Cartesian 좌표계에서 지반 상에 배치된 사각어초에 대한 모식도이다.

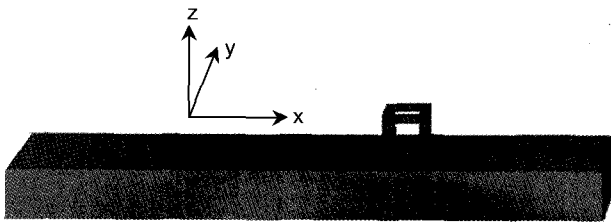


Fig. 1. The shape and position of a tetragon.

수치적 기법

지배방정식

일반적인 질량에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z)$$

$$= RDIF + RSOR \dots\dots\dots(1)$$

여기서, V_F 는 흐름에 대해 개방된 체적, A_x, A_y, A_z 는 각 방향에 대한 유체가 차지하는 셀의 면적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분이다. 그리고 RDIF는 난류확산 항이고, RSOR은 질량소스에 대한 항이다. 식 (1)의 우변의 첫번째 항인 난류확산 항은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$RDIF = -\frac{\partial}{\partial x}(\nu_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\nu_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) \dots\dots\dots(2)$$

여기서, 계수 ν_ρ 는 c_ρ/ρ 와 같다. μ 는 운동량확산 계수이고, c_ρ 는 상수로서 난류에 대한 Schmidt 수이다. 난류확산의 형태는 불균질 밀도를 가지는 유체의 난류 혼합과정에 민감하게 나타난다. 또한 식 (1)을 비압축성 유체로 가정하면, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) = \frac{RSOR}{\rho} \dots\dots\dots(3)$$

운동방정식은 Navier-Stokes 방정식에 다음과 같이 몇 개의 항이 추가된 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

여기서 F_i 는 물체와 점성에 대한 가속도항이고, RSOR항은 밀도소스 항이다. 본 모델에서 자유수면은 유체의 체적 (VOF)에 대한 함수, $F(x, y, z, t)$ 의 항으로 정의되며 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial v}{\partial x}(F A_x u) + \frac{\partial v}{\partial y}(F A_y v) + \frac{\partial v}{\partial z}(F A_z w) \right\} \\ = FDIF + FSOR \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

여기서,

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(\nu_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu_F A_y \frac{\partial F}{\partial y}) \right\}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (6)$$

FSOR항은 식 (4)에서의 밀도소스항인 RSOR과 같다. 이것은 유체부분의 체적에 대한 시간변화율을 의미한다.

지배방정식의 이산화

본 모델은 고정된 직사각형 격자에 유한차분 근사를 사용하였고 모든 변수들은 Fig. 2와 같이 위치한다.

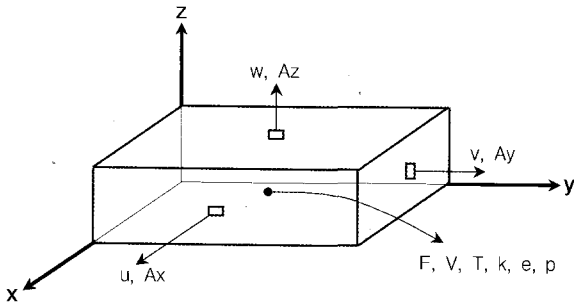


Fig. 2. Location of variables in a mesh cell (staggered grid arrangement).

운동방정식에 대한 일반적인 유한차분의 근사형태는 다음과 같다.

$$u_{i,j,k}^{n+1} = u_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta x)_{i,j+1/2,k}^n} + G_x - FUX - FUY - FUZ + VISX - WSX \right]$$

$$v_{i,j,k}^{n+1} = v_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta y)_{i,j+1/2,k}^n} + G_y - FVX - FVY - FVZ + VISY - WSY \right]$$

$$w_{i,j,k}^{n+1} = w_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta z)_{i,j+1/2,k}^n} + G_z - FWX - FWY - FWZ + VISZ - WSZ \right] \dots \dots (7)$$

여기서, $(\rho \delta x)_{i+1/2,j,k} = (\rho_{i,j,k}^n \delta x_i + \rho_{i+1,j,k}^n \delta x_{i+1})/2$, FUX는 x방향에서 이류 유량 u, VISX는 x성분 점성가속도, WSX는 x방향에서 점성벽면가속도, G_x 는 중력, 회전, 일반적인 비관성(non-inertial) 가속도를 의미한다.

운동방정식으로부터 계산된 속도는 제한된 압축성 연속방정식에 대한 다음의 이산화한 근사를 만족해야 한다.

$$\left(\frac{1}{\rho c^2} \right)_{i,j,k} \cdot V_{F,i,k} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^n) / \delta t + (u_{i,j,k}^{n+1} AFR_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}^{n+1} AFR_{i-1,j,k}) / \delta x_i + (v_{i,j,k}^{n+1} AFB_{i,j,k} - v_{i,j-1,k}^{n+1} AFB_{i,j-1,k}) / \delta y_i + (w_{i,j,k}^{n+1} AFT_{i,j,k} - w_{i,j,k-1}^{n+1} AFT_{i,j,k-1}) / \delta z_i + (u_{i,j,k}^{n+1} AFR_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}^{n+1} AFR_{i-1,j,k}) / XC_i - (RSOR/\rho)_{i,j,k} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

여기서, XC_i 는 격자 i 의 중앙의 x방향의 위치이고, $RSOR/\rho$ 항은 격자에서 유체의 체적을 나타낸다. 위의 방정식을 만족하는 속도에 대하여, 압력을 정하는 것이 필요하고, 따라서 각 계산격자에서의 속도는 유체에 의해 결정된다.

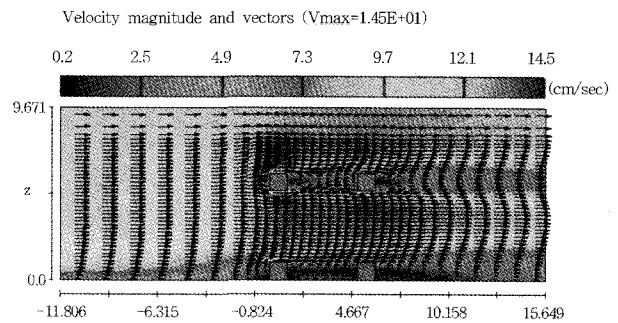
한편, 구조물의 자유경계표면은 No-slip경계를 사용하였으며, 수치적 안정성을 피하기 위한 첫 번째 조건으로 유체가 한 시간 스텝에서 하나의 계산격자 이상 교차하여 흐르지 못하게 하는 기본적인 안정조건을 두었고, 자유표면 또한 표면과의 전달과 관련하여 표면파가 하나의 시간스텝에서 하나의 격자 이상 진행하지 못하는 조건을 두었다.

결과 및 고찰

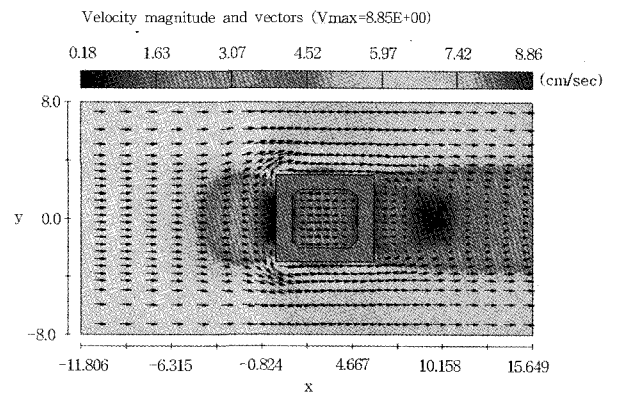
인공어초 주변의 흐름장

Fig. 3은 유입유속이 12 cm/sec인 경우 정상흐름에 의해 사각어초의 주변에서 발생하는 흐름의 변동특성을 두 개의 주요 단면에 대해 나타내었으며(Fig. 3), 이러한 분포는 각 유속조건에서 동일하게 나타났다. 특히 사각어초 저면에 대해 전면과 내부 및 배후에서 유속크기가 거의 0에 가까운 부분이 발생하였고, 이를 경계로 주류와 반대방향인 회전류 영역이 나타났으며, 이는 사각어초 저면의 세굴패턴에 영향을 주는 외력인 자로 작용할 것으로 예상된다.

일반적으로 후류의 길이는 흐름작용에 대한 무차원수인



(a) section 1 (x-z, y=0 cm)



(b) section 2 (x-z, y=0.1 cm)

Fig. 3. Velocity field around a tetragon.

Reynolds (Re)수와 파랑작용에 대한 무차원수인 KC수에 의존하며, Re수가 증가함에 따라 후류길이가 증가하는 경향을 보이나 명확한 선형관계는 찾기 어렵고, KC수에 대해서는 선형적으로 증가하는 경향을 보인다 (Ryu et al., 1986). 특히, Yang and Kim (2000)의 착저식 침선어초에 대한 연구에서는 Re수가 8,000 이상일 때 배후면의 후류의 길이 및 분포가 일정하게 나타남을 보였는데, 본 연구에서 또한 각각의 유속 조건에 대해, Re수는 8,000에서 13,000의 범위에 속하였고, 사각어초의 배후에서 일정한 후류의 길이와 분포를 보였으며, 또한 사각어초 저면의 끝단 (x=6)에서부터 유속이 zero인 지점을 회전류의 크기로 하였을 때, 그 최대 길이는 4-5 cm의 범위로 일정하게 나타나 기존의 연구 결과와 정성적으로 일치함을 알 수 있었다 (Fig. 4).

Fig. 5는 파랑이 작용하지 않는 흐름장에서 사각어초와 유체의 관계가 유체의 점성에 대한 무차원수인 Re수에 관계된다고 할 때, Re수에 대한 사각어초의 저면에서 발생하는 회전류의 최대유속에 대한 결과를 회귀곡선으로 나타낸 것이다. 여기서, U는 유입경계의 유속을 나타내고, u_w 는 저면에서 회전류의 최대유속을 나타내며, u는 사각어초의 상부에서 어초에 의해 교란되는 흐름 즉, 난류경계층을 벗어나 일정한 흐름이 지속되는 위치의 유속 값을 나타낸다. 그리고 D와 ν 는 각각 사각어초에 대한 대표길이와 유체의 동점성계수를 나타낸다. 그 결과 사각어초 내부의 회전류 최대유속이 배후에서 보다 약 1.2-1.3배 가량 더 크게 나타났고, 사각어초의 내부 (Inner)와 배후 (Outside)영역에서 모두 Re수가 증가함에 따라 회전류의 최대유속이 증가하는 형태를 보였으나, 사각어초의 내부에서 Re수가 11,000과 12,000 사이에서 회전류 최대유속의 크기가 다소 작아짐 보였다.

인공어초에 작용하는 유체력

흐름에 의한 유체력은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A u^2 \dots\dots\dots (9)$$

여기서, A는 유선방향의 투영면적, ρ 는 유체의 밀도, u는 어초에 작용하는 유속, C_D 는 항력계수를 나타낸다. 이때 C_D 는 일반적으로 어초의 부재가 원주로 구성된 경우에는 1의 값을, 어초의 부재가 각주로 구성된 경우에는 2의 값을, 어초의 부재가 판으로 구성된 경우에는 3의 값을 가진다.

본 연구에서는 유체력의 계산방법으로, 작용면적은 사각어초의 전면 (x=0)과 후면 (x=5)에서 주류방향에 맞닿는 투영면을 고려하였고, 작용유속은 작용면에 대한 각 격자점의 x방향 유속 값을 적용하였으며, 어초의 안정성에 영향을 미치는 최대 작용 유체력과 전체 작용 유체력을 위주로 해석을 하였다. 사각어초에 작용하는 최대 작용 유체력은 사각어초 전면 (x=0)에서는 사각어초 상부의 가로대의 양단 (y, z=±3, 6), 후면 (x=5)에서는 사각어초 상부의 가로대 중앙 (y, z=0, 6)에 나타났다. 전체 작용 유체력 및 최대 작용 유체력은 유속이 증가함에 따라 그 크기 또한 커지는 양상을 보였으나, 전체

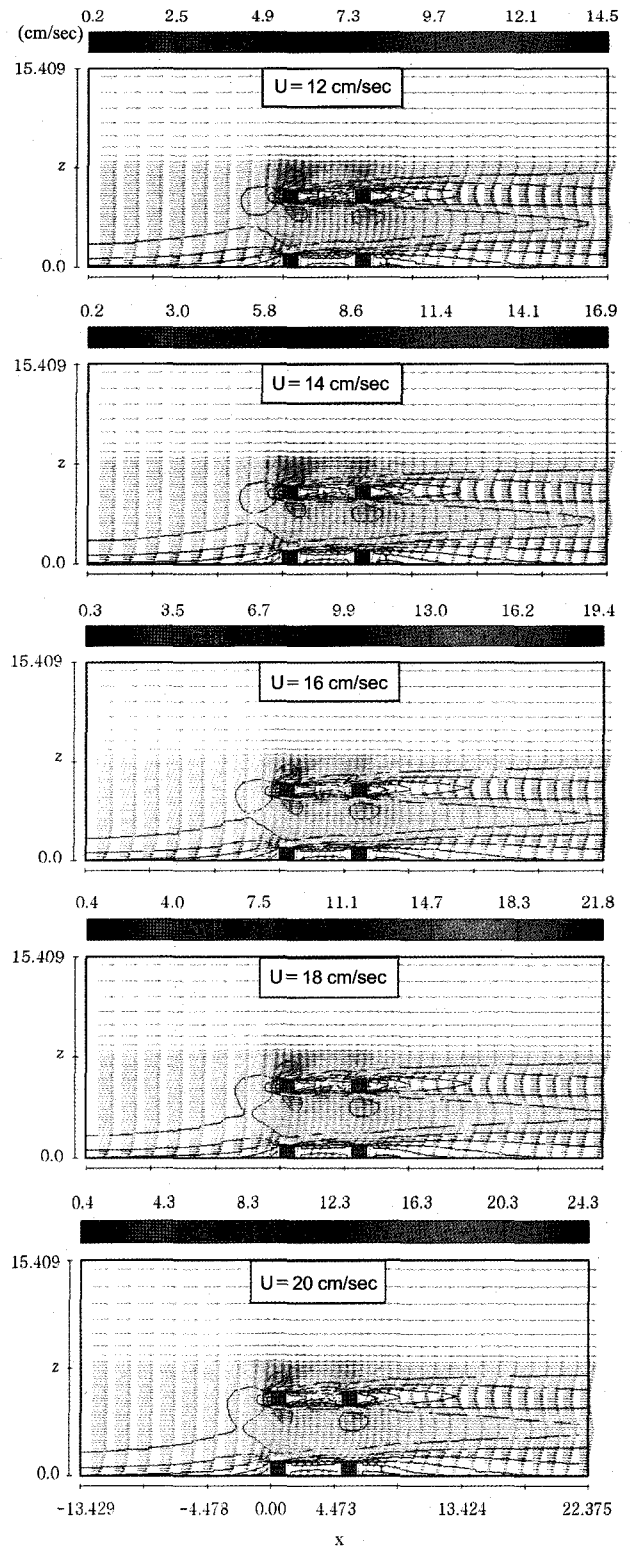


Fig. 4. Velocity distributions around a tetragon(at y=0) for various uniform flow.

작용 유체력은 유입경계의 유속이 18 cm/sec를 지나면서 그 증가량이 점점 감소하였다 (Fig. 6).

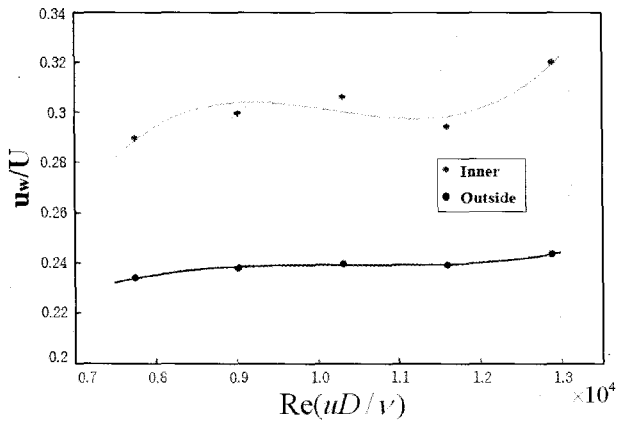


Fig. 5 Characteristics of recirculation flow velocity versus the Reynolds number.
(—, Inner of a tetragon; —, Outside of a tetragon)

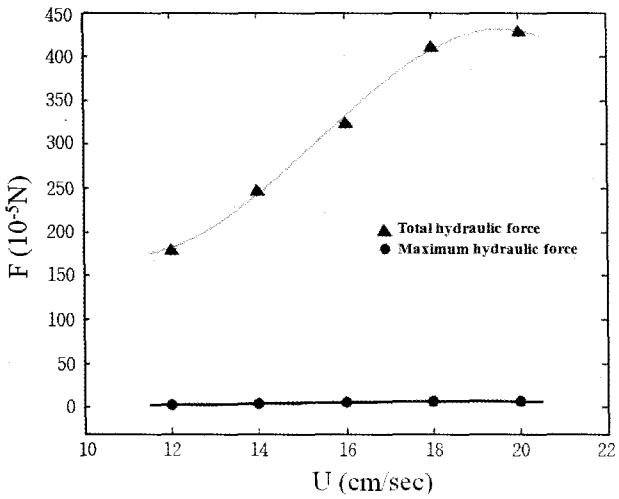


Fig. 6. Maximum and total hydrodynamic force for various velocity.
(—, Total hydraulic force; —, Maximum hydraulic force)

저면전단응력

저면전단응력은 식 (10)과 같은 경험식으로 산정하였으며, 이때 사용된 유속 값은 저면유속이 저질입자에 직접적으로 영향을 미치는 전단응력의 분포를 고려하기 위해 저면에서 가장 가까운 격자층 ($z=0.1$ cm)에서의 유속을 적용하여, 각 격자영역별로 전단응력을 산출하였다.

$$\tau_b = \rho g h l = \rho g \frac{\bar{u}^2}{C^2} = \frac{1}{8} \rho f_c \bar{u}^2 = \rho u_*^2 \dots\dots\dots(10)$$

여기서, h 는 수심, l 는 에너지선의 경사, u 는 수심평균유속 (m/s), C 는 Chezy의 저항계수 ($C^2=8 g/f$), f_c 는 Darcy-Weisbach 마찰계수, ρ 는 유체의 밀도 (kg/m^3), g 는 중력가속도 (m/s^2), u_* 는 저면마찰속도 (혹은 저면최대수립자속도)이다.

사각어초의 세 단면에 대해 저면의 유속 값을 대입한 결과, 유입경계의 유속강도의 크기에 비례하여 저면의 전단응력이

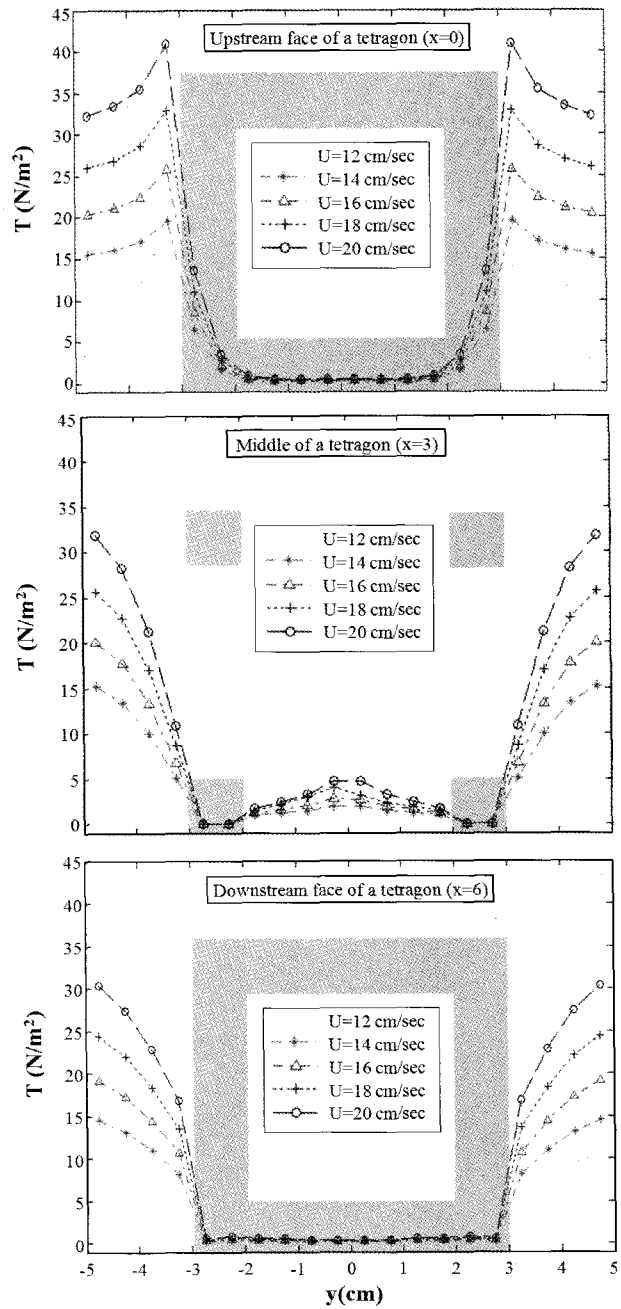


Fig. 7. Distributions of bottom shear stress of a tetragon.

커짐을 알 수 있었고, 이는 세굴깊이 또한 증가함을 예측할 수 있다. 사각어초 전면 ($x=0$)에서 저면전단응력은 중앙에서 양 끝단으로 갈수록 저면의 전단응력이 급격히 증가함을 볼 수 있었다 (Fig. 7). 일반적으로 저면전단응력은 저질의 이동에 의한 세굴현상에 중요한 영향인자로 작용하는데, 사각어초 전면의 경우 전단응력이 가장 큰 양 끝단에서 가장 먼저 세굴 현상이 발생함을 예측할 수 있다. 사각어초의 중앙단면 ($x=3$)에 대한 저면전단응력 분포를 보면 전면에서보다 상대적으로 작은 값을 보이고 있으나, 단면의 중심부에서 회전류에 의한

전단응력이 발생하였으며, 이는 어초내부에서의 세굴패턴에 주로영향을 미친다. 하지만, 어초의 전면에서 발생하는 전단응력에 비해 그 크기가 상대적으로 작은 값을 보여 사각어초 내부의 저면에서 발생하는 세굴현상은 그리 두드러지게 발생하지 않을 것으로 판단된다. 사각어초 뒷면 (x=6)에 대한 저면전단응력 분포는 어초 저면의 모든 지점에서 전단응력이 거의 0에 가깝고 구조물의 양 끝단에서 주류에 의해 역시 급격히 증가함을 볼 수 있다.

사각어초 주변의 세굴 특성

흐름장에서 인공어초 주변에서 발생하는 세굴현상은 구조물 주변에서의 지속적인 저질의 이동에 의해 발생하게 되는데, 이에 대한 대표적인 관계식으로 다음과 같이 저면의 저질에 작용하는 저면전단응력과 저질입자의 정적 전단저항 비를 나타내는 Shields 수 (Sn)를 적용하고 있다 (Madsen and Grant, 1976).

$$S_n = \frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho_w - 1)gd_{50}} \dots\dots\dots(11)$$

여기서, u_* 는 저면마찰속도(저면최대수립자속도), g 는 중

력가속도, ρ_s 와 ρ_w 는 저질 및 물의 밀도를 나타내며, d_{50} 은 저질의 중앙입경을 나타낸다.

실험의 조건을 적용한 사각어초 주변에서 발생하는 저면의 세굴패턴을 두 개의 단면에 대해 나타낸 결과는, 어초의 중심축 (y=0)을 기준으로 서로 대칭적으로 발생하였으며, 유입 유속의 크기가 커질수록 저면의 세굴 깊이가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 앞서 예측한 저면전단응력의 결과와 정성적 일치성을 보인다. 초기 세굴은 어초 전면 (x=0)의 하부 가로대의 양 끝단에서 발생하였고, 차츰 가로대 전체로 확대되어가는 양상을 보였는데, 이러한 초기의 세굴 패턴은 기존의 수리실험 (Kim, 2001)과 현상적으로 일치 하였다 (Fig. 8). 세굴 현상이 가장 두드러지게 발생하는 어초전면 (x=0)에서의 시간에 따른 유속별

세굴깊이를 전면의 중앙 (y=0)과 끝부분 (y=1)에 대해, 각 유속의 크기 별로 나타내었을 때 (Fig. 9), 세굴현상은 유속의 크기가 클수록, 사각어초 전면의 중앙보다는 끝부분에서 먼저 발생하였다. 그리고, 유입유속이 0.7, 0.8, 0.9 m/sec인 경우에는 초기의 세굴깊이가 시간에 따라 계속 유지되나, 유입유속이 1.0 m/sec 이상에서는 시간이 흐를수록 세굴깊이가 지속적으로 증가하다가 차츰 일정한 값에 가까워짐을 보였다. 이러

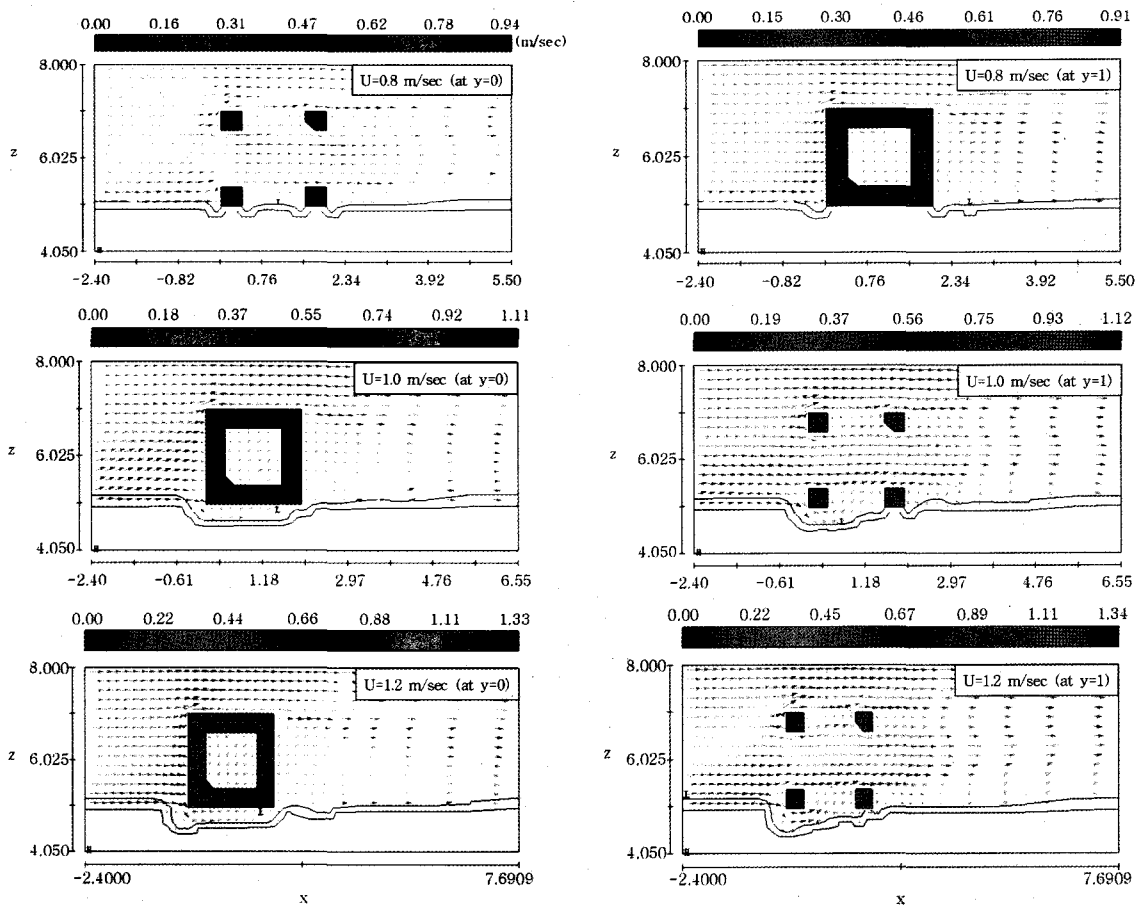


Fig. 8. Scouring patterns around a tetragon for inflow at y=0 and y=1 section.

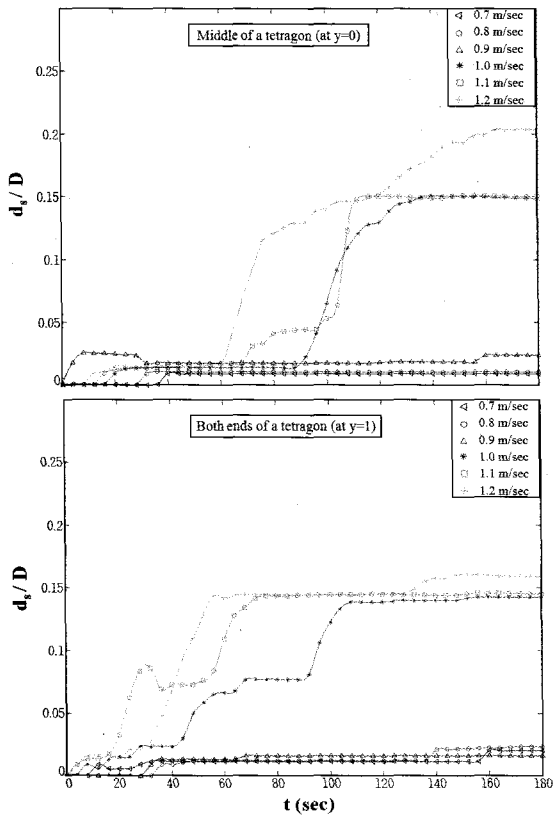


Fig. 9. The maximum scouring depth at upstream side of a tetragon (at $x=0$).

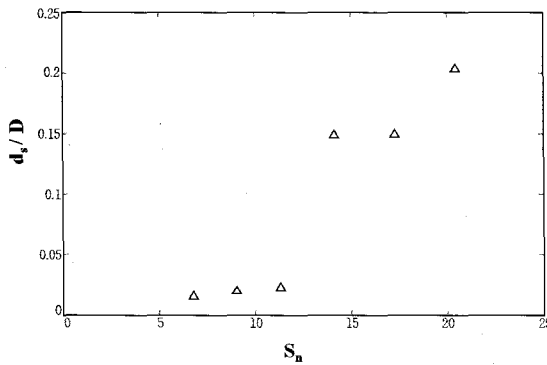


Fig. 10. The maximum scouring depth versus Shields number.

한 결과로 초기 세굴깊이의 한계상태를 초과하는 유속에 대해 연속적인 세굴이 발생함을 예측할 수 있다. 또한, 사각어초 주변의 최대 세굴깊이 (d_s)와 Shields 수를 비교하여 보면 (Fig. 10), Shields 수가 커질수록 세굴깊이 또한 증가하는 형태를 보이나, 급격한 변화를 보이는 결과 값으로 인해 그 분산도가 아주 크게 나타나는데, 이 부분에 대해서는 초기 세굴패턴을 지나 시간의 경과에 따른 지속적인 세굴에 의한 하부지반의 불안정 상태와 사각어초 간의 상호작용에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

결론 및 고찰

본 연구는 정상 흐름장에서 사각어초 주변의 흐름 변동 특성과 사각어초 하부지반의 세굴 패턴의 특성에 대해 수치해석을 수행하였다. 대상 구조물은 사각어초로 하였으며, 먼저 인공어초 주변의 흐름장에 의한 유체역학적 특성에 대해 고찰하였고, 세굴패턴에 대한 부분에 대해서는 수치 계산조건을 실험역 조건으로 하였다. 그 결과, 정상 흐름장에서 사각어초 주위의 유속분포 형태와 사각어초의 배후의 후류특성에 대해 기존의 연구 결과와 정성적으로 일치함을 보였고, 사각어초 주위의 저면에서 발생하는 회전류의 특성에 대해, 사각어초 내부의 회전류 최대유속이 배후에서 보다 약 1.2-1.3배 가량 더 컸으며, 사각어초의 내부에서 Re수가 11,000과 12,000 사이에서 회전류 최대유속의 크기가 다소 감소하였다. 저질의 이동에 의한 세굴현상에 중요한 영향인자로 작용하는 사각어초의 저면전단응력 분포에 대한 고찰하였다. 사각어초 전면 ($x=0$)에서는 전단응력이 가장 큰 양 끝단에서 가장 먼저 세굴현상이 발생함을 알 수 있었고, 단면의 중심부 ($x=3$)에서는 어초 내부의 세굴패턴에 주로영향을 미치는 회전류에 의한 전단응력이 발생하였으나, 그 크기가 전면에 비해 상대적으로 작은 값을 보여 사각어초 내부의 저면에서 발생하는 세굴현상은 그리 두드러지게 발생하지 않을 것으로 나타났다. 이러한 특성은 본연구의 초기 세굴패턴의 결과와 정성적 일치함을 보였다. 초기의 세굴패턴은 유입유속이 0.7, 0.8, 0.9 m/sec인 경우에는 초기의 세굴깊이가 시간에 따라 계속 유지되나, 유입유속이 1.0 m/sec 이상에서는 시간이 흐를수록 세굴깊이가 지속적으로 증가하다가 차츰 일정한 값에 가까워짐을 보였는데, 이는 초기 세굴깊이의 한계상태를 초과하는 유속에 대해 연속적인 세굴이 발생함을 알 수 있다. 또한 Shields수와 사각어초 주변의 최대 세굴깊이 (d_s)의 관계에서 Shields수가 커질수록 세굴깊이 또한 증가하는 형태를 보였으나, 결과 값의 그 분산도가 아주 크게 나타났다. 이에 대해 초기 세굴패턴을 지나 시간의 경과에 따른 지속적인 세굴에 의한 하부지반의 불안정 상태와 사각어초 간의 상호작용에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2004년도 부경대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

Cheng, N.S., B.M. Sumer and J. Fredsoe. 2003. Investigation of bed shear stress subject to external turbulence. *Int. J. Heat. Fluid Flow*, 24, 816-824.
 Herbich, J.B., R.E. Schiller, Jr., W.A. Dunlap and R.K. Watanabe. 1984. *Seafloor scour - Design Guidelines for Ocean-founded Structures*. Marcel Dekker, Inc., 21-63

- Ingrisawang, V., M. Ban and H. Kimura. 1995. Comparative study on the sinking of artificial reefs by local scour between laboratory and field experiments. *Fish. Engineer.*, 32, 95-103.
- Kim, H.T. and S.J. Yoon. 2001. A study of artificial reef subsidence in unsteady flow-wave field. *Kor. Soc. Ocean Engineer.*, 15, 28-34.
- Kim, H.T. 2001. A study of artificial reef subsidence in unsteady flow field. *Kor. Soc. Ocean Engineer.*, 15, 33-38.
- Kim, J.Q., N. Mizutani and K. Iwata. 1995. Experimental study on the local scour and embedment of fish reef by wave action in shallow water depth. *Proc. ECOSET'95*, 168-173, .
- Kimura, H., V. Ingrisawang and M. Ban. 1994. A study on the local scour of cylinder artificial fish reefs. *Fish. Engineer.*, 31, 33-40.
- Koyama, H. and K. Iwata. 1985. Estimation of water particle velocities by a modified transfer function method. *Coast. Engineer. Jap.*, 28, 1-13.
- Madsen, O.S. and W.D. Grant. 1976. Quantitative description of sediment transport by waves. *Proc. 15th Coast. Engineer. Conf., ASCE*, 1093-1112.
- Ryu, C.R., S.D. Chang and K.B. Lim. 1986. A study on the scale and the arrangement of artificial reefs. *Bull. Fish. Res. Dev. Agency*, 38, 1-24.
- Ryu, C.R. and Kim, H.J. 1994. A study on the characteristics of wave forces on artificial reefs. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 27(6), 605-612.
- Ryu, C.R., H.J. Kim, H.S. Lee and D.I. Shin. 1997. Structural and layout design optimization of ecosystem control structures. (2) Characteristics of subsidence and burial of artificial habitat due to sediment transport in flow field. *J. Kor. Fish. Soc.*, 30, 139-147.
- Yang, C.K. and H.J. Kim. 2000. A study on the characteristics of the flow around a sunken vessel. *Kor. Soc. Ocean Engineer.*, 14, 9-16.

2006년 12월 12일 접수
2007년 2월 23일 수리