

공학석사 학위논문

인공어초 주변의 흐름장에  
관한 수치해석



2006년 2월

부경대학교 대학원

해양공학과

정 철 훈

# 정철훈의 공학석사 학위논문을 인준함

2005년 12월 21일

주 심 공학박사 이 인 철



위 원 공학박사 류 청 로



위 원 공학박사 김 헌 태



# 목 차

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| List of Figures .....         | iii |
| List of Tables .....          | iv  |
| List of Symbols .....         | iv  |
| Abstract .....                | vi  |
| <br>                          |     |
| 1. 서론 .....                   | 1   |
| 1.1 연구배경 및 목적 .....           | 1   |
| 1.2 연구내용 및 범위 .....           | 4   |
| <br>                          |     |
| 2. 인공어초의 안정성 .....            | 5   |
| 2.1 인공어초의 정의와 종류 .....        | 5   |
| 2.2 시설현황 및 설치환경 조건 .....      | 5   |
| 2.3 인공어초의 기능성 .....           | 8   |
| 2.4 인공어초의 안정성 .....           | 8   |
| <br>                          |     |
| 3. 기본 이론 .....                | 14  |
| 3.1 지배방정식 .....               | 14  |
| 3.2 난류모델 .....                | 16  |
| 3.3 자유수면 표현기법(VOF) .....      | 23  |
| 3.4 구조물 형상의 처리기법(FAVOR) ..... | 26  |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 3.5 수치적 접근 .....                | 29        |
| <b>4. 인공어초 주변의 흐름장 해석 .....</b> | <b>36</b> |
| 4.1 차원해석 및 상사법칙 .....           | 36        |
| 4.2 수치모델의 방법 및 제원 .....         | 38        |
| 4.3 수치모델의 결과 및 분석 .....         | 42        |
| <b>5. 요약 및 결 론 .....</b>        | <b>60</b> |
| <b>참고문헌 .....</b>               | <b>63</b> |

# List of Figures

Fig. 3-1. Definition of donor and acceptor.

Fig. 3-2. Control volume choices.

Fig. 3-3. Shape of meshing in control volume.

Fig. 3-4. Comparisons of rectangular and deformed mesh.

Fig. 3-5. Location of variables in a mesh cell (staggered grid arrangement).

Fig. 4-1. Relationship between average current velocity and sediments of uniform texture showing velocities necessary for erosion, transportation, or deposition.

Fig. 4-2. Boundary of calculation area.

Fig. 4-3. Shape and position of tetragon.

Fig. 4-4. Construction of grids.

Fig. 4-5. Velocity distribution around a tetragon( $U=12\text{cm/sec}$ ).

Fig. 4-6. Vertical distribution of velocity in front and rear of a tetragon ( $y=0$ ).

Fig. 4-7. Max. wake velocity in interior of a tetragon( $x=3$ ).

Fig. 4-8. Max. wake velocity at hinterland of a tetragon( $x=8$ ).

Fig. 4-9. Characteristic of wake velocity along the Reynold's number.

Fig. 4-10. Max. and total hydraulic force along the velocity.

Fig. 4-11. Distribution of bottom shear stress of a tetragon.

Fig. 4-12. Transportation of sediment around a tetragon( $x-z$ ,  $y=0$ , 1).

Fig. 4-13. Scouring depth at front side of a tetragon( $x=0$ ).

Fig. 4-14. Deposition height along the Shields number.

Fig. 4-15. Scouring depth along the Shields number.

## List of Tables

Table 4-1. Similarity rate in Froude's similarity laws

Table 4-2. Numerical modeling conditions for flow fields

Table 4-3. Minimum velocities for sediment erosion and deposition

## List of Symbols

|          |                                                 |
|----------|-------------------------------------------------|
| $A$      | transparent sectional area                      |
| $C_D$    | drag force coefficient                          |
| $C_M$    | inertia force coefficient                       |
| $F$      | hydraulic force                                 |
| $H$      | wave height                                     |
| $S_F$    | safety factor                                   |
| $T$      | wave period                                     |
| $V$      | volume of structure                             |
| $V_F$    | fraction volume open to flow                    |
| $W$      | weight of structure                             |
| $\eta$   | water level                                     |
| $\mu_b$  | friction coefficient of structure at sea bottom |
| $\rho$   | fluid density                                   |
| $\sigma$ | angular frequency                               |
| $c_\rho$ | the turbulent schmidt number                    |

|            |                                                             |
|------------|-------------------------------------------------------------|
| $h$        | water depth                                                 |
| $k$        | wave number                                                 |
| $l_W$      | horizontal distance between weight vector and rotation axis |
| $t$        | time                                                        |
| $u_H$      | max. velocity on the marine chart                           |
| $w_w, w_a$ | unit weight of water and artificial reef                    |
| $z$        | vertical coordinate, height on the basis of bottom          |
| $\tau_b$   | bottom shear stress                                         |
| $u_*$      | bottom friction velocity                                    |
| $f_c$      | friction coefficient                                        |
| $d_s, d_p$ | scour depth and deposition height                           |

# **Numerical Analysis of Flow Field around Artificial Reef**

Chil-Hoon Jeong

*Department of Ocean Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University*

## **ABSTRACT**

This study was investigated with hydraulic force acting on artificial reef and scour pattern at the bottom of it by bottom shear stress in steady-flow field by using Flow-3D. The shape of structure was a tetragon installed at real waters. Model condition was impermeable bottom boundary condition for analyzing hydrodynamic characteristics and applied to conditions of real waters as concerns scouring pattern. As a result of the numerical analysis, it was qualitatively corresponded with existing result for hydrodynamic characteristics and incipient scouring pattern around a tetragon. Summarizing principle results, distribution of velocity around a tetragon was shown symmetry and it was the same position of maximum velocity, occurred wake(interior and hinterland for bottom of tetragon) and length of wake(4cm at hinterland) for respectively velocity cases. Magnitude of wake increased in proportion to Reynolds number but slightly decreased from

11,000 to 12,000 of Rynolds number in inner part. Also, total acting hydraulic force increased in proportion to velocity but increment of it increased less and less when velocity magnitude passed by 18cm/sec. In case of the bottom shear stress which is forecasted to scour pattern of sediment, it rapidly increased at the both end in front( $x=0$ ) and back( $x=6$ ) of tetragon, appeared bottom shear stress by wake in center( $x=3$ ) of tetragon. In analysis for scouring and deposition pattern of sediment, it was qualitatively corresponded with experiment for scouring depth increasing according to velocity, incipient position of scouring, scoured shape of the bottom until behavior of tetragon. But, as time goes by, scouring pattern was very different because of continuous erosion of the bottom by fixed structure. Consequently, in aspect of stability for reef and suitability of Flow-3D, it should be investigated behavior of structure, representative value pursuant sediment diameter, principal factor in wave-current field.

# 제 1장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

1970년 세계 각국의 200해리 경제수역을 선포하면서 우리나라의 상당수 원양어선들이 연근해로 몰렸고, 이에 따라 수산자원은 급속도로 고갈 되었으며, 또한 이후의 간척사업의 추진과 연안해역의 오염 등으로 그러한 현상은 가속화 되었다. 이에 대한 대책으로 1971년, 정부는 황폐된 바다를 살리고 수산자원을 확보하기 위한 방안으로 인공어초를 설치하기 시작했다.

인공어초는 딱딱한 물체에 정착하거나 좁고 어두운 공간을 선호하는 수중생물의 본능을 이용한 것으로, 바닷물 속에 존재하는 각종 해조류와 생물의 포자들이 자연 발생적으로 벽에 부착하도록 하기위한 구조물을 바다에 투하한 것이다. 이 해조류는 광합성 작용을 통해 영양 염류를 유기 물질로 전환시키고 이 과정에서 산소를 발생하게 되는데, 이런 과정으로 생겨난 식물성 및 동물성 플랑크톤이 물고기의 먹이가 되어 바다의 엄청난 생명력에 단초 역할을 담당하는 것이다. 인공어초는 또한 수산물 증대에만 영향을 미치는 것이 아니다. 해중립 조성용 인공어초는 백화현상을 치료하기 위한 방책 중의 하나로 사용되고 있는데, 여기서 백화현상이란 바닷물 속에 녹아있는 탄산칼슘이 고체 상태로 되어 흰색으로 보이는 현상을 말한다. 이로 인해 갯바위에 다양한 무늬를 한 분홍색과 흰색의 물질이 달라붙어 각종 어패류와 해조가 죽어가는 등 저층의 해양 황폐화를 가속시킨다.

그러나 풍요로운 생태 조성을 가능하게 하는 인공어초에는 역기능도 있다. 열악한 해상장비와 측정오차로 과거에 설치한 인공어초 때문이다. 현재까지 우리나라에 투하된 인공어초는 약 1,900여 군데, 110만개에 달하며 설치비용만 6,000억 원에 달했지만 불과 몇 년 전까지만 해도 어느 지역에 얼마만큼의 인

공어초가 어떤 상태로 설치되었는지 확인조차 되지 않았었다. 그리고 관리소 홀로 인해 폐그물이 어초를 덮게 되면서 바다의 쓰레기로 전락하는 경우와 과거에 설치한 인공어초가 바닥에 매몰되면서 망실된 인공어초가 허다하다. 결국, 인공어초의 기능을 최대화하기 위한 방안으로 사후 꾸준한 관리 뿐 만 아니라 설치 시 적지의 모색 및 인공어초의 매몰원인에 대한 연구가 요구되어지고 있다.

한편, 인공어초는 설치수심에 따라 표·중층 부유식 어초와 착저식 어초로 크게 나눌 수 있는데, 현재까지 우리나라에 시설된 인공어초를 살펴보면, 설계 및 제작·설치가 상대적으로 용이하고, 파랑에 의한 외력을 상대적으로 적게 받는 착저식 어초이다. 이러한 착저식 어초는 파랑 및 조류에 의한 유체력에 대해서 안정해야 하고, 이에 따른 어초하부의 저질의 거동에 대해서도 안정해야한다. 이에 따라 류 등(1994)은 착저식 구조물의 기능 극대화와 연계한 안정성 해석에 있어서 작용외력의 합리적인 평가와 동시에 지반의 동적거동해석이 함께 수행되어야 함을 지적하였다.

먼저, 인공어초의 기능극대화를 위한 안정성 연구 중 착저식 인공어초가 설치 후 받게 되는 작용 유체력의 산정 및 특성에 관한 연구로는 大西 등(1983), 上北 등(1985), 松見(1991), 류 등(1994) 등의 연구가 있다. 大西 등은 정상류 중에서 세 종류의 인공어초(FP block, convex block,  $\pi$  block)에 대한 유체력 측정 실험을 하여 레이놀즈( $Re = UD/\nu$ )수에 따른 항력계수  $C_D$ 의 변화 특성을 정리하였고, 上北 등은 정상류, 파동류, 파·흐름장을 대상으로 무한 유체장에서의 인공어초에 대한 파력 특성을, 松見은 파랑장에서 착저식 어초를 대상으로 어초부재 및 어초 상호간의 간섭효과, 저면효과 등을 고려한 파랑특성을 논의하였으며, 류 등은 여러 가지 파력산정법의 비교를 통한 합리적인 산정법을 제안하고 최대파력 산정식을 제시하였다.

그리고, 착저식 인공어초의 기능유지 및 극대화와 관련한 지반거동에 관한

안정성 연구는 工藤 등(1980)의 현지잠수조사와 榎木 등(1982)의 수리실험연구로 시작되었다. 특히 榎木 등은 저질이 파 또는 흐름이 초기이동 한계조건 이하일 때에도 어초 주변에 생기는 와류·축류에 의해 국소 세굴이 발생함을 지적하였다. 파랑장에 있어서 어초주변의 세굴이나 침하에 대한 연구는 榎木 등(1984), 류 등(1986)에 의해 수리실험으로 수행된 바 있다. 榎木 등, 류 등은 세굴의 주요기구에 대한 실험결과를 정리하여 KC수의 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, 류 등(1997)은 흐름장에서의 세굴·퇴적 특성과 침하·매물 방지대책에 관한 연구를 하였다. 또한, 윤(2001)은 실험역의 조류현상을 고려한 비정상 흐름장에서의 인공어초 주위에 생기는 세굴 및 침하 특성에 대한 연구에서 흐름의 강도와 방향이 변동하는 흐름장에서 지속적인 세굴야기 및 침하를 일으키는 것으로 비대칭적 기반세굴과 이에 따른 어초의 주기적 기울임 현상의 중요성을 언급하였다.

이상의 연구에서 살펴보면 인공어초의 안정성 해석에 대한 대부분의 연구는 대부분 수리실험 및 현장조사를 통해 흐름장과 파랑장의 환경에서 이루어져 왔다. 최근 이러한 결과를 바탕으로 인공어초의 안정성에 관한 수치해석의 연구가 계속 시도되고 있으며, 인공어초에 작용하는 유체역학적 특성이나 주변의 흐름장 등에 대한 수치해석이 진행되고 있다. 그러나 인공어초의 피해사례 등을 감안한다면 어초주변에서 발생하는 세굴이나 인공어초의 침하, 매물 등 인공어초 하부지반의 안정성에 관한 수치해석적 연구가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 사각어초에 작용하는 기본 외력인 정상 흐름장에서 사각어초 주변의 흐름 변동 특성에 대해 고찰하고, 이에 따른 구조물 하부지반의 기본적인 세굴 현상에 대해 3차원 수치시뮬레이션을 수행하여 어초 주위

의 세굴특성을 파악하고자 한다. 또한, Flow-3D를 이용한 수치시물레이션 결과와 기존의 세굴현상에 관한 수리실험 결과(윤, 2001)와 정성적인 비교·검토를 하고자 하였다.

## 1.2 연구내용 및 범위

본 논문에서는 3차원 정상 흐름장에서 사각어초 주변의 흐름변화를 수치모델(Flow-3D)을 통해 해석하였다. 제 2장에서는 인공어초의 기초적이고 전반적인 논의 및 기존의 인공어초 연구에 대한 안정성에 대해 기술하였고, 제 3장에서는 본 연구에 적용된 수치모델(Flow-3D)의 이론적 고찰 및 지배방정식을 풀어나가는 수치적 방법을 서술하였다. 제 4장에서는 수치계산을 통해 얻어진 인공어초 주변의 흐름특성 및 세굴현상에 대한 결과를 나타내었으며, 제 5장에서는 최종적으로 본 연구의 결과에 대해 요약·정리하였다.

## 제 2장 인공어초의 안정성

### 2.1 인공어초의 정의와 종류

인공어초는 어류 등의 수산생물이 암초, 침몰선 등에 모이는 성질에 착안하여 인공적으로 해저나 해중에 구조물을 설치하여 각종 수산자원의 증대를 꾀하기 위한 시설이다. 이러한 인공구조물을 이용하여 조성된 어장은 대상 수산생물의 어획증대와 함께 보호 육성을 통한 관리기법을 도입하여 지속생산이 가능하도록 하고, 조업의 효율을 높이기 위한 시설로 어초어장이라고 부른다.

현재(1999년)까지 국내의 인공어초 종류별 설치내역을 살펴보면, 주로 사용되고 있는 인공어초는 8종으로 그 중에서도 사각어초, 반구형어초, 뿔삼각형어초가 시설개수·시설면적·시설비 모든 면에서 전체의 90% 정도를 차지하고 있다. 그리고 우리나라에서 시설되고 있는 어초를 시설 수심별로 분류해보면, 근해용 어초와 연안용 어초로 나눌 수 있다. 전자에 속하는 어초로는 사각형, 육각형, 원통형 어초 등이 있으며, 후자에 속하는 어초로는 반구형, 요철형, 육교형, 뿔삼각형 어초 등이 있다. 또한 이들 어초를 기능별로 분류해보면, 어획용 어초, 패·조류용 및 유치자어 보육용 어초로 나눌 수 있는데 어획용 어초로는 앞서 언급한 근해용 어초가 이에 해당하고, 패·조류용 어초와 혼용하여 시설하고 있는 실정이다. 현재 패·조류용 어초로 가장 많이 사용되고 있는 반구형 어초의 경우, 원래는 어획용으로 이용되었으나 구조형태상 표면적이 상대적으로 넓어 패·조류용 어초로 사용되고 있다.

### 2.2 시설현황 및 설치환경 조건

우리나라에서는 1971년부터 정부 주도적으로 수산자원 조성을 위해 인공어

초를 시설하기 시작하여 현재(1999년)까지 4,253억 원을 투자하여 전국 연안 742개소 14만 ha에 98만여 개를 시설하여 새로운 어초어장을 조성하였다. 이러한 어초어장 조성을 위한 설치환경의 기본요건은 생물체계를 비롯한 수온, 염분, 수압 등 해역의 자연환경이 보존되고, 설치 후에도 보존 가능한 해역이어야 한다는 것이다. 이하 세부적인 어초어장의 적지선정에 관련되는 조건 및 내용은 다음과 같다.

#### 1) 생산환경 및 사회환경

어초 시설의 최종 목적은 배양된 생물자원을 어획하는 것이므로 이와 관련된 생산환경 및 사회환경 조건을 만족해야 한다. 생산환경적 조건은 어초어장을 이용할 어업인이 있어야 하고, 조성된 어장을 쉽게 찾을 수 있어야 하며, 기존의 어장과 연계해서 계획적인 조업이 가능한 해역이어야 하고, 조업 가능한 적정 면적규모 이상을 갖추어야 하며, 어법의 종류에 따라 용이하게 조업할 수 있는 곳으로 하여 효율적이고 안전한 어획행위를 할 수 있는 곳이라야 한다. 사회환경 조건으로서는 해양, 특히 연안해역이 가지는 어업, 산업, 휴양 공간 등의 다양한 활용가치에 따른 복잡한 국내적·국제적 법률, 제도, 관행 등에 의해 영향을 받고 있으므로 이들 간의 마찰이 일어나지 않도록 해야 한다는 것이다.

#### 2) 해저지형 및 유동

해저지형은 언덕, 골짜기, 해령 등의 지형 변화가 많은 장소, 급경사가 되기 시작하는 육붕상의 평탄부가 양호한 서식장소로 되는 경우가 많다. 이러한 곳은 해수유동이 평면적·수직적으로 다양하게 변화되는데, 유속이 느려지고 용승이 발생하여 플랑크톤과 벤토스 등 먹이생물이 풍부하여 좋은 어장형성을 기대할 수 있는 곳이다.

#### 3) 수심 및 수질

수심은 대상생물의 종, 성장단계, 생리, 생태적 특징에 따라 다르고 그 범

위도 4~5m에서 대륙붕 연변까지 대상범위로 할 수 있지만, 대체로 어획용 어초의 경우 20~40m 정도가 적합하다. 또 이러한 곳의 수질은 영양염이 풍부하고 염분, 수온, 수소이온 농도의 변화, 일사량 등의 조건이 대상어종의 산란, 성장에 적합하고 기타 수산생물의 일차생산이 가능한 곳이어야 한다. 수질에 관한 환경기준에 의하면 수소이온 농도가 6.5~8.5, 화학적 산소 요구량이 2ml/l 이하이어야 하며, 용존산소량은 5ml/l 이상이 되어야 수산생물의 서식 가능한 환경이 된다.

#### 4) 저질

저질은 생태학적 요구조건 이외에 세굴·매몰 등에 대한 어초시설의 보존 및 안정된 어로활동이 가능한 곳이라야 한다. 어초의 매몰문제와 관련한 저질 조건에 대한 사항은 암반지대에서는 매몰의 위험이 전혀 없고, 저질이 패각, 자갈이 섞인 사질대는 매몰의 위험성이 거의 없다. 그리고 사니질에서는 어초 저면 주변에서 세굴은 진행되지만, 조류 및 저질조성 등의 조건에 의해 매몰이 결정되고, 조류가 빠르고 저질이 가는 모래의 경우에는 단기간에 매몰할 우려가 있다.

#### 5) 파동 및 조류

파동과 조류는 물리적·생물적 측면에서 다음의 사항에 유의하여야 한다. 물리적 측면에서의 파도와 조류는 주로 인공어초시설의 기능성·안정성에 영향을 미치는 외력문제, 생산활동 등의 안전 문제를 야기한다. 인공어초시설에 작용하는 외력은 구조물 설계에 대한 기본 조건이 되는 것은 물론이고, 특히 착저식 어초에 대해서는 세굴, 매몰 또는 전도 등을 초래하기도 한다. 따라서 파동은 필요로 하는 설계파를 선정하여 이용하고, 조류는 해역의 특성이나 대상생물의 생태에 맞는 곳이면 충분하겠지만 세굴 매몰을 고려하여 대체로 2m/sec 이하인 곳으로 한다. 생산활동의 안정은 어초의 배치 시공, 생산활동에 따르는 어로작업 등의 해상활동에 영향을 주기 때문에 바람, 파도, 조류가

적당해서 쾌적하고 안전한 조업을 할 수 있는 곳이 좋다.

## 2.3 인공어초의 기능성

인공어초 주변에는 각종 수산생물이 모여들고 서식하게 되는데, 이러한 인공어초의 수산자원 증대효과는 크게 어초자체가 주는 기능과 어초주변 흐름이 주는 기능 등 두 가지로 그 기능성을 분류할 수 있다. 인공어초 자체가 주는 기능은 어초가 어류에 대해 포식, 서식, 산란, 도피처를 제공한다는 것이고, 패·조류에 대해서는 산란·서식을 위한 착생공간을 제공한다. 그리고 인공어초 주변흐름이 주는 기능은 어초가 와류(소용돌이)에 의한 음파를 발생시켜 각종 어류를 유인하고, 동시에 난류를 발생시켜 치어 및 다른 어류의 먹이가 되는 작은 생물들이 유영할 수 있는 적당한 흐름의 환경을 만드는 것이다.

## 2.4 인공어초의 안정성

착저식 인공어초의 기능극대화와 관련된 안정성 해석은 작용외력의 합리적인 평가와 지반의 동적거동에 대한 해석이 중요하다. 인공어초에 작용하는 주요 외력으로는 흐름에 의한 유체력과 파랑에 의한 파력을 생각할 수 있으며, 이러한 외력환경은 어초의 기능에 직접적 영향을 주는 것과 동시에 착저식 인공어초가 정적상태를 유지하지 못하고 전도 및 활동을 일으키는 등의 문제와도 밀접한 관련이 있다. 그리고 지반의 거동은 저질의 세굴·퇴적 및 침하 현상으로 나눌 수 있는데 이러한 하부지반의 불안정은 어초의 매몰을 초래하여 효율성 및 경제적 손실을 유발시킨다. 이외에 투하식 설치로 인한 인공어초의 착저 충격력에 대한 안정성도 과거에는 중요하게 다루어져 왔지만, 최근에는 정확한 설치를 위해 어초의 설치방법이 현수식 설치방법으로 바뀔에 따라 그 중요성이 떨어진다.

### 2.4.1 작용유체력에 대한 안정

인공어초에 작용하는 유체력은 조류의 흐름에 의한 수평유체력과 파랑운동에 의한 파력으로 나누어 생각할 수 있으며 이러한 작용 유체력은 일반적으로 항력계수와 관성력계수 특성을 해석함으로써 평가되어진다.

#### 1) 흐름에 대한 유체력

흐름에 대한 힘은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A u^2 \quad (2.1)$$

여기서,  $A$ 는 유선방향의 투영면적,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u$ 는 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. 또, 佐藤(1967)은 항력계수를 Reynold's 수에 대한 함수로 나타낸 바 있고, 최대값으로 원판어초와 사각어초에 대해 각각 1.4와 1.7을 제안하였다.

#### 2) 파랑운동에 의한 파력

인공어초에 작용하는 파력은 항력과 관성력의 합으로서 다음과 같은 Morison식으로 산정될 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= F_D + F_I \\ &= \frac{1}{2} C_D \rho A u^2 + C_M \rho V \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서,  $C_M$ 은 관성력계수,  $V$ 는 체적을 나타낸다. 한편, 류 등(1994)은 파력 측정 결과를 이용해서 Morison식의 파력계수를 산정하는 방법으로 수정 최소

자승법이 가장 안정적임을 보인 바 있다.

### 3) 작용유체력 산정을 위한 유속결정방법

인공어초가 설치되는 대상지역의 저면 유속 현장관측 값이 없는 경우에는 아래와 같은 방법으로 유속을 결정한다. 먼저 흐름장의 경우는 표면유속으로부터 다음 식에 의한 값을 사용한다.

$$u = Ku_H \left( \frac{z}{h} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.3)$$

여기서,  $u$ 는 어초꼭대기부분(頂部) 근처에서의 조류 유속,  $K$ 는 주 흐름방향에서는 1.6, 주 흐름방향과 직각인 방향에서는 1.2의 값을 가지는 계수이고,  $u_H$ 는 해도 등에 기재된 표층최대유속을 나타내며,  $z$ 와  $h$ 는 각각 유속값을 얻고자하는 저면에서의 높이와 수심을 나타낸다.

파랑장에서는 미소진폭파 이론에 의한 다음의 식으로 얻을 수 있다.

$$u_w = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh kz}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.4)$$

여기서,  $H$ ,  $T$ ,  $k$ ,  $z$ ,  $h$ 는 각각 파고, 주기, 파수, 각주파수, 수심을 나타내고,  $z$ 는 유속값을 얻고자 하는 지점의 저면기준 높이이다.

한편 수심저하에 따른 파랑의 비선형성이나 불규칙파에 대한 적용성을 고려할 경우 Koyama & Iwata(1985)가 제시한 아래의 식을 쓸 수도 있다.

$$U(t) = \frac{2\pi}{T} \frac{\cosh k}{\sinh k[h + \eta(1 - s/(h + \eta))]} \eta(t) \quad ; \quad \eta > 0$$

$$U(t) = \frac{2\pi}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kh} \eta(t) \quad ; \quad \eta \leq 0 \quad (2-5)$$

여기서  $T$ 와  $k$ 는 각각 주기와 파수를 나타내고,  $\eta$ 는 평균수면에서의 수위,  $s$ 는 유속값을 얻고자 하는 곳의 저면으로부터  $z$ 방향의 거리를 나타낸다. 그리고 흐름-파랑 공존장의 경우는 흐름장에서의 유속  $u_f$ 와 파랑장에서의 유속  $u_w$ 를 산술적으로 합한 값을 사용하면 된다.

#### 4) 인공어초의 안전률

$$S_F = \frac{W\mu_b(1-w_w/w_a)}{F} \geq 1.2 \quad (2.6)$$

여기서  $S_F$ 는 안전율,  $W$ 는 어초의 공중중량,  $\mu_b$ 는 마찰계수( $=0.5 \sim 0.6$ ),  $w_w$ 와  $w_a$ 는 각각 해수 및 인공어초 재료의 단위중량,  $F$ 는 인공어초에 작용하는 유체력을 나타낸다. 식(2.6)은 인공어초의 이동에 대한 안전율을 나타내는 식으로서, 인공어초가 흐름이나 파도 등에 의해 이동되지 않기 위해서 어초에 작용하는 유체력  $F$ 보다 해저와 어초사이의 마찰 저항이 크면 된다는 것을 말하고 있으며, 통상 1.2 이상이면 안전하다.

$$S_F = \frac{W(1-w_w/w_a)l_w}{Fh} \geq 1.2 \quad (2.7)$$

여기서  $h$ 는 유체력  $F$ 의 작용점(유체력이 작용하는 정사영면의 도심) 높이,  $l_w$ 는 어초의 중량이 작용하는 선과 전도 회전축까지의 수평거리를 나타낸다. 이 식은 인공어초의 전도에 대한 안전율을 나타내는 식으로 인공어초에 작용

하는 저항 모멘트가 전도 모멘트보다 크면 안정하다는 것을 말하고 있으며 통상 안전율은 1.2를 사용한다.

## 2.4.2 지반거동에 대한 안정

인공어초 주위의 국부세굴은 진입하는 주류로부터 어초 전면을 따라 발생하는 하강류와 어초 측면과 경계를 이루는 모서리부분에서 빠르게 돌아가는 수평와류, 모서리부분을 지나면서 생기는 축류의 상호작용으로 인한 저질 이동 때문에 생긴다. 어초 주위의 흐름변화로 인한 세굴 및 퇴적에 대한 초기 연구로는 저질이 반드시 초기이동한계조건을 넘어설 때만 생기는 것이 아니며, 초기 이동한계조건 이하에서도 어초가 일으키는 와류·축류에 의해서 국부세굴이 발생한다는 Sawaragi(1982)의 연구가 있다. 계속해서 인공어초 주위의 다양한 연구가 Sawaragi 등(1984), 류 등(1986)에 의해 수리실험으로 수행된 바 있고, 근래에는 Kim et al.(1995), 김(1995), 류 등(1997)의 연구들이 있다. Kimura et al.(1994)는 흐름장에서 원통형 착저식 구조물에서의 세굴·퇴적 특성과 그것에 미치는 주 영향인자에 대해 논의하였고, 계속해서 Ingsriawang et al.(1995)는 몇 가지 인공어초들의 침하특성을 흐름장 실험 및 실향역 현장에서 각각 살펴보았다.

그리고 인공어초의 최대 세굴깊이, 퇴적높이 및 세굴 침하량은 흐름장에서는 Reynold's 수가, 파랑장에서는 KC 수가 중요한 인자로 고려되며 이와 동시에 저질이동의 지표인 Shield's 수와 지속시간을 고려하여 산정식을 얻을 수가 있으며, 세굴 침하량과 퇴적높이로부터 인공어초의 매몰량을 예측할 수 있다.

## 2.4.3 인공어초의 세굴에 대한 안정성 연구의 필요

인공어초에 대한 기존의 연구는 각종 현장조사, 수리실험 및 이론적 검

토 등의 다양한 방법에 의해 체계화 되어졌다. 그러나 아직도 실제 해석에 투하되는 인공어초에 대한 기능적 역할 수행과 관련하여 인공어초의 세굴·침하에 대한 많은 피해사례가 보고되고 있는데, 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 그리고 인공어초 주변의 기본적인 흐름특성과 관련하여 수리실험과 병행하여 수치모델에 대한 연구 또한 지속적으로 수행되어 오고 있으나 주로 작용 유체력에 대한 연구결과로서, 세굴·침하에 대한 안정성에 관련된 연구는 아직 지속되어야 할 단계에 있으며, 인공어초에 대해 끊임없이 발생하는 문제점에 대한 사례에 비추어 볼 때 보다 합리적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 제 3장 기본 이론

### 3.1 지배방정식

일반적인 질량에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = RDIF + RSOR \quad (3.1)$$

여기서,  $V_F$ 는 흐름에 대해 열려있는 체적의 부분,  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ 는 각 방향에 대한 셀의 면적,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u, v, w$ 는 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 방향의 유속성분이다. 그리고  $RDIF$ 는 난류확산 항이고,  $RSOR$ 은 질량소스에 대한 항이다. 식 (3.1)의 우변의 첫 번째 난류확산 항은 다음과 같이 표현될 수 있다. :

$$RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (3.2)$$

여기서, 계수  $\nu_\rho$ 는  $c_\rho \mu / \rho$ 와 같다.  $\mu$ 는 운동량확산 계수이고,  $c_\rho$ 는 상수로서 난류에 대한 Schmidt수 이다. 난류확산의 형태는 불균질 밀도를 가지는 유체의 난류 혼합과정에 민감하다.

식 (3.1)을 비압축성 유체로 가정하면, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (3.3)$$

운동방정식은 Navier-Stokes 방정식에 다음과 같이 몇 개의 항이 추가 되

있다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \\
\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \\
\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w
\end{aligned} \tag{3.4}$$

여기서  $F_i$ 는 물체와 점성에 대한 가속도이고, RSOR항은 밀도소스 항이다.

본 모델에서 자유수면은 유체의 체적(VOF) 함수,  $F(x,y,z,t)$ 의 항으로 정의되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} (F A_x u) + \frac{\partial v}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial v}{\partial z} (F A_z w) \right\} = FDIF + FSOR \tag{3.5}$$

여기서,

$$RDIF = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \tag{3.6}$$

FSOR항은 식 (3.4)에서의 밀도소스항인 RSOR과 같다. 이것은 유체에 대한 체적부분의 시간변화율을 의미한다. 단일 유체에 대해,  $F$ 는 유체에 의해 차지되는 부분의 체적을 나타내고, 두개의 유체에 대하여는 비압축성 유체 요소의 체적의 부분을 나타내며, 보완영역의 체적의 부분( $1-F$ )은 서로 일정한 밀도로 가질 수 있는데, 그에 대한 밀도는 비압축성유체의 상태방정식으로부터 계산되어진다.

### 3.2 난류모델

난류의 수치모의는 크게 난류현상의 모든 규모에 대해 전부 또는 그 일부를 직접 계산하는 방법인 직접 수치모의 및 LES(Large Eddy Simulation) 방법과 난류방정식을 풀 수 있도록 경험적인 가정을 바탕으로 종결시키는 난류 모형 방법이 있다. 난류모형은 동일한 지점의 이미 알고 있는 변수(레이놀즈 응력 등)를 이용하여 근사화하는 국지적 종결(local closure)과 그 지점 외에 여러 지점의 변수 값을 이용하여 종결하는 비국지적 종결(nonlocal closure)로 나누어진다. 국지적 종결 난류모형은 레이놀즈 방정식의 어느 단계에서 종결하는가에 따라 0단계 종결, 1단계 종결 및 2단계 종결 등으로 구분된다. 0단계 종결은 레이놀즈 방정식을 직접 다루지 않는 방법으로 상사이론 등이 있다. 그러므로 이것은 난류모형의 범주에 포함시키지 않는다. 1단계 종결은 레이놀즈 방정식 만을 직접 계산하고 이를 위해서 필요한 레이놀즈 응력과 같은 2차모멘트를 근사화하는 방법이며, 2단계 종결은 레이놀즈 응력에 관한 방정식을 구성하고 이를 풀기위해 2차모멘트 방정식에 나타나는 3차모멘트를 근사화하는 방법이다.

일반적으로 널리 쓰이는 1단계 종결모형은 식 (3.7)과 같이 와동점성계수의 도입을 통하여 이루어진다.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.7)$$

여기서,  $\nu_t$ 는 와동점성계수이며, 레이놀즈 방정식의 종결문제는 와동점성계수를 어떻게 구하는가 하는 문제로 귀착되고 혼합길이 이론으로부터 와동점성계수는 식(3.8)과 같은 관계를 가진다.

$$\nu_t \sim v l \quad (3.8)$$

여기서  $v$ 는 변동속도의 평균제곱근,  $l$ 은 적분길이의 크기이다.  $v$ 는 난류운동 에너지 방정식으로 산정되므로 레이놀즈 방정식의 종결문제는  $l$ 을 구하는 문제로 귀착된다. 이  $l$ 을 구하는데 필요한 방정식의 개수에 따라 0-방정식 모형, 1-방정식모형, 그리고 2-방정식 모형으로 구분한다.

### 3.2.1 0-방정식 모형

난류모형으로 수송방정식을 포함하고 있지 않은 0-방정식모형은 와점성계수를 대수적인 경험공식의 시행착오법과 평균속도 분포에 상관시킴으로써 계산하는 방법이다. 0-방정식 모형은 일정 와점성 모형, 혼합길이 모형 등으로 구분된다.

#### (1) 일정 와점성 모형

큰 수체에서 일정 와점성/확산계수는 전체 흐름장에 사용되며 물감 확산 실험, 경험적인 수치 또는 시행착오법으로부터 구해진다. 큰 수체의 흐름에서는 운동량 방정식의 난류항이 모형에 미치는 영향이 작으므로 중요하지 않다. 그러나 난류항이 중요한 흐름의 거동을 결정할 때에는 이 모형으로는 거동을 정확하게 기술할 수 없으며, 원역계산(far field calculations)시에 사용이 제한되고, 주로 온도 농도 방정식을 해석하는데 사용된다. 큰 수체의 수치계산에서 해는 종종 수치격자에 의해 좌우된다. 왜냐하면 격자에서 독립해를 얻을 수 있을 만큼 격자를 미세하게 할 수 없기 때문이다. 거친 격자의 사용은 작은 재순환대를 해석할 수 없고, 수송에 대한 재순환대의 기여는 확산으로 설명될 수 있다. 거친 격자의 사용은 수치의 분산을 발생시킨다.

#### (2) 혼합길이 모형

Prandtl의 혼합길이 가정은 와동점성 분포를 기술하는 1차모형이다. Prandtl은 와동점성계수  $\nu_t$ 가 평균 변동속도  $\hat{u}$ 와 혼합길이  $l$ 에 비례한다고 가정했다. 오직 난류응력과 속도 경사만 가지고 있는 전단층을 고려할 때 Prandtl은 식(3.9)와 같이  $\hat{u}$ 가 평균 속도경사와 혼합길이를 곱한 것과 같다고 제시하였다.

$$\hat{u} = l \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.9)$$

식(3.9)에 의해 와동점성계수는 식(3.10)과 같이 표현될 수 있다.

$$\nu_t = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad (3.10)$$

이 모형은 난류의 대류와 확산 수송과정이 중요할 때에는 잘 사용되지 않는다.

### 3.2.2 1-방정식 모형

와동점성계수는 많은 난류 현상에 있어서 시공간적으로 그 값이 크게 변하는데 식(3.8)의  $\nu$ 는 난류 운동에너지 방정식으로 산정되고,  $l$ 은 경험식에 의하여 구해진다. 가장 널리 사용되는 1-방정식 모형은 와동점성계수를 난류 운동에너지  $k$ 의 제곱근에 비례한다고 가정하면 식(3.11)로 표현된다.

$$\nu_t = C_\mu \sqrt{k} l \quad (3.11)$$

여기서,  $C_\mu$ 는 경험상수이며, 식(3.11)은 Kolmogorov-Prandtl 식으로 알려져 있다.  $k$ 의 분포는 식(3.12)으로 표현되는 수송방정식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \quad (3.12)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ u_i \left( \frac{u_j \cdot u_j}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right] - \overline{u_i \cdot u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta g_i \overline{u_i \cdot \Phi} - \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

여기서,  $p$ 는 압력,  $\beta$ 는 경험상수,  $g$ 는 중력가속도, 그리고  $\Phi$ 는 부력항이다. 확산과 소산의 상관관계를 알 수 없으므로  $k$ -방정식의 엄밀해를 구할 수 없다. 방정식의 근사해를 구하기 위해  $k$ 의 확산플럭스는 종종  $k$ 의 경사에 비례한다고 가정하고 소산  $\epsilon$ 은  $k$ 와  $l$ 로 나타낸다. 따라서  $k$ -방정식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - c_D \frac{k^{3/2}}{l}$$

난류의 대류와 확산 수송이 중요한 경우, 비록 1-방정식 모형이 혼합길이 모형보다 우수하다 하더라도  $l$ 을 결정하기 어렵기 때문에 폭넓게 사용하는데 장애가 되고 있다.

### 3.2.3 2-방정식 모형

경험식에 의해  $l$ 이 주어지는 1-방정식의 모형을 개선하기 위해  $l$ 을 구

할 수 있는 방정식을 만들고, 이를 통하여  $l$ 을 계산하는 것이 2-방정식모형이다. 그러나  $v$ 에 대한 난류 운동에너지 방정식의 경우와는 달리 물리적으로 엄밀하게 결정된  $l$ 에 관한 방정식은 존재하지 않는다. 따라서 이를 위해서 임의적으로 가정된 경험식에 의존하는 수밖에 없다. 2-방정식 모형으로서 가장 널리 알려지고 공학분야에서 주로 사용되는 것으로서는  $k-\epsilon$ 모형을 들 수 있다. 이 모형에서는  $l$ 을 직접 계산하는 것이 아니라  $\epsilon$ 에 관한 방정식을 만들어 이를 계산한다.

#### (1) $k-\epsilon$ 모형

$k-\epsilon$ 모형은 주로 공학분야에서 난류경계층을 대상으로 많은 실험적인 측정을 통해 보완되고 보정되어 난류에 대한 예측을 하는데 있어서 유용하게 사용되어 오고 있다. 그러나 실제 실험값에 의해 보정된 상황과 매우 다른 난류 현상에 적용하기 위해서는 많은 주의가 필요하다. 난류모형에서 가장 널리 사용되는  $k-\epsilon$ 모형은 Jones and Launder에 의해 수정 보완되었고, 수송방정식의 해를 구하기 위해 난류의 운동에너지  $k$ 와 그 소산율  $\epsilon$ 을 사용하고 있다. 따라서  $k-\epsilon$ 모형은  $k$ 에 대한 식(3.14)와  $\epsilon$ 에 대한 식(3.15)로 구성되어 있다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P + G) - c_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.15)$$

상기 식에서 와동점성계수  $\nu_t$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.16)$$

여기서,  $P = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  이고,  $G = \beta g_i \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}$  이다.

$\epsilon$ 에 대한 식(3.15)는 경험상수  $\sigma_\epsilon$ ,  $c_{1\epsilon}$ ,  $c_{2\epsilon}$ 을 포함하는데 이 상수들은 단순 난류에 대한 실험자료를 이용하여 결정한다. 단순 난류에 대한 실험은 실제 상황과 매우 다르므로 만약 소용돌이, 부력 등에 의해 흐름이 심하게 변형하는 곳에서는  $k-\epsilon$ 모형의 적용은 적합하지 않다.

## (2) RNG(Renormalisation group) 모형

Orszag 등(1992)에 의해 개발된 RNG 모형은  $k-\epsilon$ 모형에서 와동점성계수를 식(3.16)으로 나타낸 것과는 달리 RNG 모형에서는 와동점성계수를 식(3.17)와 같이 표현된다.

$$\nu_{eddy} = \nu_{mol} \left[ 1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\nu_{mol}}} \frac{k}{\sqrt{\epsilon}} \right]^2 \quad (3.17)$$

RNG  $k-\epsilon$ 모형의 큰 레이놀즈식은 식(3.18) ~ 식(3.20)과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \cdot \nabla u_i = -\nabla_i p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_{eddy} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t S^2 - \epsilon + \nabla \alpha \nu \nabla k \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t S^2 - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R + \nabla \alpha \nu \nabla \epsilon \quad (3.20)$$

여기서 변형률  $R$ 은 식(3.21)과 같다.

$$R = \frac{C_\nu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.21)$$

여기서  $\eta = Sk/\epsilon$ 이고,  $S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$  이다.

### 3.2.4 LES(Large Eddy Simulation) 모형

LES 모형은 유체의 시간평균방정식을 대신하여 공간평균방정식을 사용한다. 공간평균 접근의 주요 개념은 흐름장으로부터 작은 와를 제거하고 연속방정식에 큰 규모의 와를 적용하는 것이다. LES 격자-스케일방정식은 식(3.22)-(3.23)과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \overline{u_i u_j} + \lambda_{ij} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.23)$$

LES 모형이 직접 수치모의 보다 모의에 있어서 우월성을 갖지는 못했지만, 단순한 형상에 적용하는 경우에는 비교적 합리적인 결과를 제공한다.

### 3.3 자유수면 표현기법(VOF)

VOF방법에서 각 셀의 체적비율은 다음의 수송 방정식을 계산하여 시간에 대해 전개된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3.24)$$

고정 격자계상의 검사체적에 대해서 유체가 차지하고 있는 체적 비율을 정의할 때, 유체의 영역에 완전히 포함되어 있거나 그 외부 영역에 있는 경우와 달리 자유 표면이 걸쳐있다고 간주되는 검사 체적에서는 체적 비율의 변화가 생긴다. 이러한 경계면에 걸쳐있는 검사 체적과 이웃하는 검사 체적간의 체적 비율의 변화는 자유 표면의 기울기에 대한 정보를 내포한다. 이와 같이 경계면에 걸쳐있는 각각의 검사체적에 대해 내포되어 있는 자유 표면의 기울기에 대한 정보를 무시하고 VOF 방법을 적용하는 경우 수치 확산에 의해 자유 표면의 위치가 흐려지는 현상이 생긴다. 이러한 현상을 방지하기 위한 대표적인 기법이 각 계산 방향에 대하여 셀 표면을 지나는 체적 유량을 계산하고 이를 이용하여 표면을 전진시키는 donor-acceptor 방법이다. 이 방법의 기본적인 개념은 경계면을 통과하는 체적 비율의 유량을 계산할 때 자유 표면의 형상에 따라 donor 셀의 체적비율 값뿐만 아니라 acceptor 셀의 체적 비율도 사용해서 자유 표면의 확산을 막는 방법이다. x 방향의 계산에서 이동하는 체적 비율의 양은 각 제어체적의 오른쪽 경계면에 대해서 계산되며 donor와 acceptor의 설정은 Fig 3.1과 같이 제어 체적의 오른쪽 경계면을 통과하는 속도가 양

이면 donor, 음이면 acceptor가 된다.

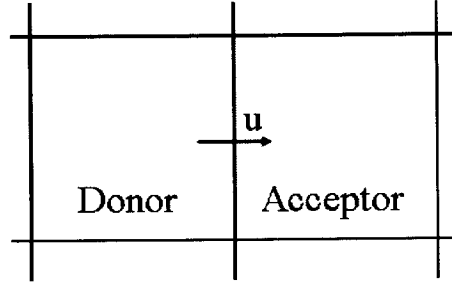


Fig. 3-1. Definition of donor and acceptor.

통과하는 단위 면적당 체적 비율의 양은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta F = \text{MIN}\{F_{AD} |V| + CF, F_D \delta x_D\} \quad (3.25)$$

여기서 하첨자 D는 donor 셀을 뜻하고 AD는 자유 표면의 형상에 따라 donor 셀 또는 acceptor 셀을 가리킨다. 또한 V는 셀 경계면을 통과하는 기체와 액체의 단위 면적당 이동량( $u \delta t$ )으로 이 값이 양이면 donor cell, 음이면 acceptor cell이 된다. 식(3.25)에서 MIN함수는 donor 셀이 실제 가지고 있는 양보다 더 많은 양이 유출되는 것을 막아주는 역할을 하고 CF는 기체의 유량이 유출 가능한 양을 초과했을 때 발생하는 추가적인 유량을 나타내며 식(3.26)과 같이 표현된다.

$$CF = \text{MAX}\{(1.0 - F_{AD}) |V| - (1.0 - F_D) \delta x_D, 0.0\} \quad (3.26)$$

여기서는 수치확산을 방지하기 위한  $F_{AD}$ 의 결정이 중요하다. 이것은 자유 표면의 방향에 의해 좌우되는데 유체가 자유표면에 수직한 방향으로 움직일

때만 acceptor 셀의 값을 사용하고 그렇지 않을 때는 donor 셀의 값을 사용한다. 그러나 acceptor 셀이 비어있거나 donor 셀의 상류쪽 셀이 비어 있을 때는 자유표면의 방향에 상관없이 acceptor 셀의 값을 사용한다. 이는 donor 셀의 액체가 하류의 비어있는 셀에 유입되기 위해서는 반드시 donor cell이 가득차 있어야 한다는 것을 뜻하며 이로 인해 수치 확산이 방지된다. 이러한 방법으로 계산된  $\delta F$ 에 셀 경계면의 면적을 곱하면 이동하는 체적 비율의 양을 구할 수 있고, 이 값을 acceptor 셀에 더하고, donor 셀에서 빼면 다음 시간단계에서의 자유표면의 형상이 나타내어진다. 이와 같은 방법으로 모든 셀에 대하여 계산하면 계산상의 오차로 인하여 체적비율이 1보다 크거나 0보다 작은 셀이 생기게 된다. 계산이 끝난 후 이와 같은 체적비율을 가진 셀은 물리적으로 타당한 값을 가지도록 조정해 주어야 하는데 일반적으로 체적비율이  $10^{-6}$ 보다 작은 곳은 0으로 조정하고  $1-10^{-6}$ 보다 큰 곳은 1로 조정하는 것이 정확한 결과를 산출한다고 알려져 있다. 또한 한 시간 단계의 계산 후 체적비율이 0과 1사이의 값을 갖는 셀에 대하여 유체의 물성치를 변경해 주어야 하는데 식 (3.27), (3.28)와 같이 액체와 기체의 물성치를 선형 보간하여 사용한다.

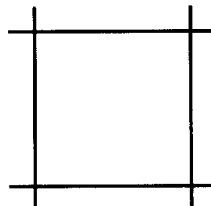
$$\rho = \rho_l F + \rho_g (1 - F) \quad (3.27)$$

$$\mu = \mu_l F + \mu_g (1 - F) \quad (3.28)$$

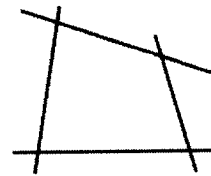
### 3.4 구조물 형상의 처리기법(FAVOR)

복잡한 형상의 모델링에 대해 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방법은 유한요소나 body-fitted 좌표 방법에 비해 아주 간단하다. FAVOR 개념은 격자가 구조물인지 아닌지, 직사각형 또는 왜곡된 요소

를 포함하는 격자인지에 연관되어 사용된다. 직사각형 격자에 대한 한 가지 단점으로 구조물 격자가 국부 영역에서 정도를 높이기 위해 변형될 수 없다는 점을 들 수가 있는데, FAVOR 방법에서 경계면은 하나의 격자와 그 위치가 기록됨으로써 격자의 변형을 통해서가 아니라 격자의 체적비와 면적비의 향으로써 표현이 가능하며, 변형된 격자 기법처럼 수치적으로 근사한 결과를 산출할 수 있다. 일반적으로 격자의 형성은 모델링 하고자 하는 영역을 일련의 작은 제어 체적으로 나누는 과정이라 할 수 있는데, 제어 체적에는 속도, 온도, 압력 등 한개 이상의 종속유동변수가 존재하며 이들은 일종의 국지적으로 평균화된 값이다. 그리고 이 값들은 질량, 운동량, energy 보존법칙을 나타내는 수치적 과정에 의해 각 제어 용적 안에서 계산된다. 계산 격자는 유체의 운동에 따라 변형하는 격자(Lagrangian 격자) 또는 고정된 격자(Euler 격자)가 있으며, 때로는 이 둘을 모두 사용하여 유동 격자의 변형을 최소화하기도 한다 (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian 격자).



< fixed orthogonal of cell >

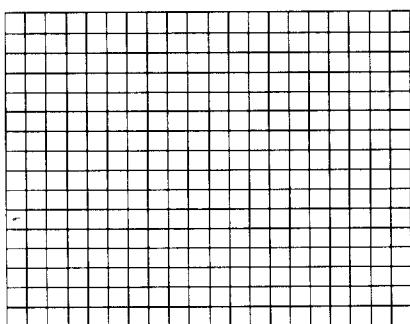


< fixed non-orthogonal cell >

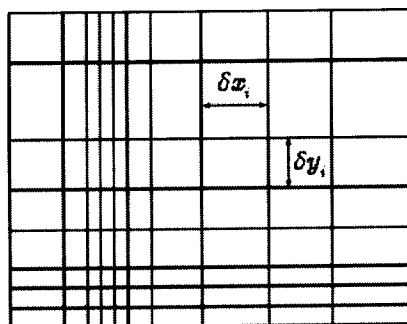
Fig. 3-2. Control volume choices.

또한 격자는 구조적 또는 비구조적 형태를 지닐 수 있다. 구조격자는 그 요소 형상에 따라 여러 형태를 취할 수 있다. 가장 간단한 격자는 격자의 각 면이 이 격자의 면에 평행한 직각요소로 나누어진 직각 격자로부터 생성될 수

있다. 대부분 이 요소들은  $x, y, z$  방향으로 순서대로 정돈되어 격자요소( $i, j, k$ )는  $x$  방향의  $i$ -th 요소,  $y$  방향의  $j$ -th 요소, 그리고  $z$  방향의  $k$ -th 요소가 된다. 이러한 규칙적으로 구성된 격자는 가장 단순한 구조를 가지며 각 요소 면을 정의하는 요소의  $x, y, z$ 값을 저장하기 위해 3개의 1차원 행렬을 필요로 한다. 만일  $I, J, K$ 가 각 방향의 최대값이라면 격자를 정의하기 위한 전체의 수는  $I+J+K$ 이다. 요소가 계단형식으로 변하는 격자를 가지는 직각격자는 수치 해석의 정확도를 유지해 주는 일반성을 보인다. 그러나 일반적으로 형상표면에 있는 직각 격자 요소가 고려가 되지 않아 경계가 계단과 같은 불연속성을 나타나게 된다. 이러한 불연속 경계는 유동의 손실과 바람직하지 않은 임의의 효과를 발생시킨다.



< uniform rectangular cell >

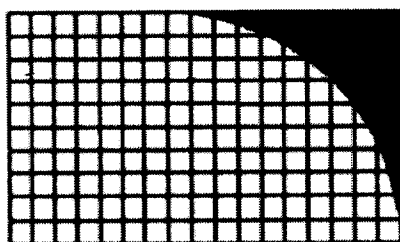


< variable rectangular cell >

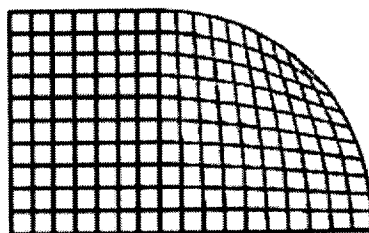
Fig. 3-3. Shape of meshing in control volume.

일반적으로 곡선형 경계표면의 표현 방법에는 두 가지 방법이 있다. 하나는 격자요소를 특정 형상에 일치시키는 것인데, 이때의 요소는 일반적으로 육면체의 형태를 취하며 이런 격자를 body-fitted 격자라고 불린다. 다른 하나는 직각요소를 유지하면서 내부의 경계면을 정의하는 방법을 이용하는 것인데 이

기법이 FLOW-3D에서 사용되는 FAVOR 기법이다.



Rectangular Mesh



Deformed Mesh

- |                                   |                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1) required 3D matrix of 4 pieces | 1) required 3D matrix over 10 pieces |
| 2) easy generation of meshes      | 2) difficult generation of meshes    |
| 3) simple numerical algorithms    | 3) complex numerical algorithms      |

Fig. 3-4. Comparisons of rectangular and deformed mesh.

보통 육면체 요소는 각 모서리를 정의하기 위해 전체 격자에 대해  $3 \times (I+1) \times (J+1) \times (K+1)$  값이 필요하다. 이는 직각격자에 필요한  $I+J+K$  값보다 훨씬 많다. 또한, 면적 또는 체적과 같은 3차원 행렬의 저장에 의해 계산의 실행을 하지 않는데, 이는 많은 저장 memory를 필요로 하고 재사용에 상당한 시간이 걸린다. 그리고 직각형상이 아닌 요소의 뒤틀린 형상은 다른 여러 결과를 수반하게 되는데, 그 중 하나가 수치적 근사가 체적요소의 중심에 있지 않으므로 수치의 정확성을 저하시킨다는 것이다. 이러한 단점은 뒤틀림에 의해 가능해진 국부 격자의 분배를 증가시킴으로써 보완될 수 있으나, 이는 또 다른 뒤틀림에 의해 수치적 근사가 더욱 복잡해지게 된다. 힘과 유출량이 요소면에 수직이면서 평행하게 이루어져야 할 뿐만 아니라, 관심 요소의 모든 주변-요소로부터의 값들을 포함하는 것이 요구된다. 가장 좋은 격자체계의 조건으로는 생성 용이성, memory 필요, 수치정확도, 복잡한 형상에 일치 할 수

있는 유연성, 그리고 국지적으로 mesh를 증감시킬 수 있는 신축성 등이 있다. FAVOR 방법은 형상을 격자 내부에서 물체에 의해 막혀진 각 요소의 부분 용적 및 부분체적을 계산함으로써 정의되는데, 이 방법은 세부분의 면적 및 하나의 체적부분을 저장함에 있어서 body-fitted 격자와 비교할 때 아주 적은 용량을 필요로 한다. FAVOR의 기본 개념은 수치적인 구조가 각 격자 내에서의 압력, 속도, 온도 등에 대한 정보에 의해 이루어지지만, 형상을 정의하기 위해 과도한 양의 정보를 사용하지 않고, 직각요소의 단순함을 유지하면서 각 격자의 체적 안에서 평균 유동량과 일치하는 수준에서 자유표면의 복잡한 형상을 나타낼 수 있는데, 이는 격자와 형상은 FAVOR 기법에서 거의 상관없이 정의될 수 있다고 할 수 있다.

## 3.5 수치적 접근

### 3.5.1 유한차분법

본 모델은 고정된 직사각형 격자에 유한차분 근사를 사용하였다. 각 셀에서 모든 독립변수들의 국부적인 평균치와 결합된다. 속도는 셀 표면에 위치하고, 다른 변수들은 셀의 중앙에 위치된다. 곡선의 장애물, 벽체의 경계, 그리고 다른 형상들은 면적비와 흐름에 대한 격자의 체적비로 정의된다. 지배방정식을 수치적으로 푸는데 사용되는 유한차분 격자체계는 폭, 너비, 높이에 대한 직사각형 격자들로 구성된다. 그리고 모든 변수들은 Fig. 3-5와 같이 위치한다.

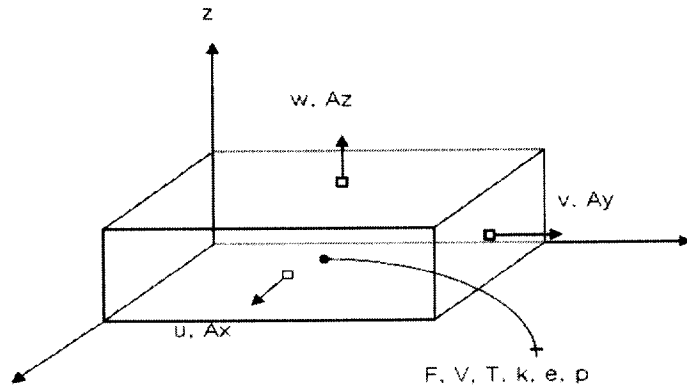


Fig. 3-5. Location of variables in a mesh cell (staggered grid arrangement).

격자  $(i, j, k)$ 와  $(i+1, j, k)$  사이의 면에 위치한  $i+1/2$ 에서의 속도  $u$ 는  $u_{i,j,k}^n$ 로 표시된다. 여기서 첨자  $n$ 은  $n$ 번째 시간 스텝을 말한다. 이와 유사하게,  $F_{i,j,k}^n$  = 시간 스텝  $n$ 에서 격자  $(i, j, k)$ 의 중앙에서의 유체부분 (스칼라변수  $p$ ,  $\rho$ ,  $I$ ,  $k$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ 에 대해서도 동일)를 나타낸다. 그리고,  $u_{i,j,k}^n$  = 시간  $n$ 에서 격자면  $i+1/2$ 의 중앙에서의  $x$ -방향 속도( $v, w$ 에 대해서도 동일)를,  $A_{FR_{i,j,k}} = i+1/2$  격자표면의 중앙에서의 면적  $A_x$ 의 면적의 부분 (다른 격자에 대해서도 동일)를 나타낸다.

운동방정식의 시간에 따른 해를 구하는 기본적인 과정은 다음과 같다.

1) 운동방정식의 양함수의 근사는 새로운 시간 스텝의 속도에 대한 초기의 추정값을 계산하는데 사용된다.

2) 연속방정식을 만족하기 위해, 압력은 각 격자에서 반복적으로 계산되어 조정되고, 각 압력 변화에 의해 야기되는 속도 변화는 1)에서 계산된 속도에 추가된다.

3) 자유표면이나 유체경계가 있을 때는 새로운 유체형상에 대한 방정식을 적용하면서 추가 되어야 하고, 난류량 또한 이 단계에서 추가된다. 각 시간 단계에서 적절한 경계조건은 모든 격자, 구조물, 자유수면에서 부과되어야한다.

운동방정식에 대한 일반적인 유한차분의 근사형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_{i,j,k}^{n+1} &= u_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[ \frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta x)_{i,j+1/2,k}^n} + G_y - FUX - FUY - FUZ + VISX - WSX \right] \\
 v_{i,j,k}^{n+1} &= v_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[ \frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta y)_{i,j+1/2,k}^n} + G_y - FVX - FVY - FVZ + VISY - WSY \right] \\
 w_{i,j,k}^{n+1} &= w_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[ \frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta z)_{i,j+1/2,k}^n} + G_z - FWX - FWY - FWZ + VISZ - WSZ \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

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 x 방향에서 이류 유량 u, VISX는 x 성분 점성가속도, WSX는 x 방향에서 점성벽면가속도,  $G_x$ 는 중력, 회전, 일반적인 비관성(non-inertial) 가속도를 의미한다.

### 3.5.2 연속방정식에 대한 압력해의 구성

비압축성 유체에 대해, 연속방정식은 격자의 압력과 속도상의 타원형조건으로 직접 해석될 수 있다. 운동방정식으로부터 계산된 속도는 제한된 압축성 연속방정식에 대한 다음의 이산화한 근사를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned}
 &\left( \frac{1}{\rho c^2} \right)_{i,j,k} \cdot V_{F_{i,j,k}} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^n) / \delta t \\
 &+ (u_{i,j,k}^{n+1} AFR_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}^{n+1} AFR_{i-1,j,k}) / \delta x_i
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (v_{i,j,k}^{n+1} AFB_{i,j,k} - v_{i,j-1,k}^{n+1} AFB_{i,j-1,k}) / \delta y_i \\
& + (w_{i,j,k}^{n+1} AFT_{i,j,k} - w_{i,j,k-1}^{n+1} AFT_{i,j,k-1}) / \delta z_i \\
& + (u_{i,j,k}^{n+1} AFR_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}^{n+1} AFR_{i-1,j,k}) / XC_i - (RSOR/\rho)_{i,j,k} = 0
\end{aligned} \tag{3.30}$$

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

### 3.5.3 경계조건

모든 구조물과 자유 경계표면은 0의 접선응력을 가지는 표면으로써 Free-slip 경계를 사용한다. 이 조건은 흐름이 0인 면적을 가지는 격자의 표면에서부터 하나 또는 그 이상의 속도 성분을 사용하여 계산되는 모든 속도의 도함수를 0으로 부과된다. 또한 격자 체계의 경계에서 0이 아닌 접선의 벽면 속도를 가질 수 있다. 만약  $i=1$ 인 격자가 임의의 격자이고 고체 벽면이라면, 법선속도는 0이 되어야 한다. 구조물의 벽면에서의 경계조건은 모든  $j, k$ 에 대해서 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
u_{1,j,k} &= 0.0 \\
p_{1,j,k} &= p_{2,j,k} \\
F_{1,j,k} &= F_{2,j,k} \\
\rho_{1,j,k} &= \rho_{2,j,k} \\
(\rho I)_{1,j,k} &= (\rho I)_{2,j,k}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

임의 격자에서 접선속도는 사용하지 않고, Free slip 조건은 벽면을 가로지

르는 모든 속도의 도함수가 자동적으로 0으로 한다.

고정된 속도 또는 고정된 압력경계에서 하나는  $F$ ,  $\rho$ ,  $\rho I$ , 점선속도, 법선속도 또는 압력에 대한 유입값을 설정해야 한다. 특히, 압력과 온도는 유동의 상태방정식의 경계조건과 일관되게 실행하기 위해  $\rho$ 와  $\rho I$ 를 변화시킨다. 고정압력경계는 고정된 속도의 경우와 약간 다르게 처리된다. 고정압력경계가 요구될 때, 압력이 정의에 의해 새로운 추가 경계 격자들을 만들어 낸다. 만약 압력이 국부정적압력이라면, 속도 도함수 조건이 0인 격자가 추가로 부가된다.

유체가 상류영향이 없이 격자의 바깥으로 부드럽게 흐르기 위한 연속적인 유출경계는 낮은 속도 또는 비압축성 흐름에 대한 문제가 자주 생긴다. 흐름이 계산영역 바깥으로 향할 때, 연속경계조건은 모든 법선 미분계수의 소멸이다.

$$\begin{aligned}
 u_{i,j,k} &= u_{2,j,k} \\
 v_{1,j,k} &= v_{2,j,k} \\
 w_{1,j,k} &= v_{2,j,k} \\
 p_{1,j,k} &= p_{2,j,k} \\
 F_{1,j,k} &= F_{2,j,k} \\
 \rho_{1,j,k} &= \rho_{2,j,k} \\
 (\rho I)_{1,j,k} &= (\rho I)_{2,j,k}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

x 방향의 주기경계조건에 대해,  $i=1$ 과  $i=IMAX$  모두 경계가 주기성에 반영되어야 한다. x 방향에서 주기적 흐름에 대한 조건은  $i=1$ 에서 모든  $j, k$ 에 대해,

$$\begin{aligned}
u_{1,j,k} &= \frac{1}{2}(u_{IM2,j,k} + u_{1,j,k}) \\
v_{1,j,k} &= v_{IM2,j,k} \\
&\dots \\
u_{IM2,j,k} &= \frac{1}{2}(u_{IM2,j,k} + u_{1,j,k}) \\
&\dots \\
u_{IM1,j,k} &= u_{2,j,k} \\
v_{IM1,j,k} &= v_{2,j,k} \\
&\dots
\end{aligned} \tag{3.33}$$

여기서, IM1=IMAX-1이고, IM2=IMAX-2이다. 이러한 조건은 운동방정식으로부터 계산된 속도에 부과된 후 각 압력을 반복계산하게 된다.

수치적 안정성을 꾀하기 위해서는 약간의 제한이 필요하다. 그래서 다음의 조건을 만족하는 시간 스텝을 선택해야 한다.

첫째, 유체는 한 시간스텝에서 하나의 계산격자 이상 교차하여 흐르지 못한다. 이 이류수송은 속도뿐만 아니라, 흐름에 대한 면적/체적의 부분도 포함한다. 기본적인 안정조건은 다음과 같다.

$$\delta t < CON \cdot \min\left(\frac{V_F \delta x_i}{A_x u}, \frac{V_F \delta y_j}{A_y v}, \frac{V_F \delta z_k}{A_z w}\right) \tag{3.34}$$

여기서,  $(u, v, w)$ 는 속도의 크기이고, CON=0.45는 아주 불안정한 경우에 대해 사용되어 진다.

안정조건의 다른 형태로 자유표면 또한 표면파의 전달과 관련된다. 만약 가속도 ACCN이 자유표면에 접선방향으로 유체에 적용된다면,  $\sqrt{ACCN \cdot h}$  항의 속도로 표면파가 될 수 있다. 여기서 h는 유체의 깊이 또는 파의 길이이다.

표면파가 하나의 시간스텝에서 하나의 격자 이상 진행하지 못한다고 하면, 다 음식과 같다.

$$\delta t < 0.5 \frac{\min\{\delta x_i, \delta y_j\}}{\sqrt{\delta z_k \cdot ACCN}} \quad (3.35)$$

선형 해석은 시간스텝에서 동점성이 0이 아닌 값이 사용될 때 더욱 제한된 다. 이에 대한 조건은 다음과 같다.

$$\delta t < 0.25 / \max \left\{ RM \cdot \frac{\mu}{\rho} (1/\delta x_i^2 + 1/\delta y_j^2 + 1/\delta z_k^2) \right\} \quad (3.36)$$

여기서, RM은 확산과정의 모든 형태에 대해  $\mu$ 에 사용된 최대 곱이다.

## 제 4장 인공어초 주변의 흐름장 해석

이 장에서는 Flow-3D를 통해 인공어초 주변의 3차원 흐름장을 해석하였다. 먼저 일정한 흐름장에서 사각어초 주변에 작용하는 유체력 특성에 대해 알아보았고, 이에 대한 정성적인 세굴현상에 대해 고찰하였다.

### 4.1 차원해석 및 상사법칙

수리실험이나 수치모델에 있어서 차원해석과 상사법칙은 공학적으로 복잡한 문제를 풀어나가는데 아주 기본적인 과정이다. 이는 논의하고자 하는 물리량들의 상호관계를 무차원화 하여 비교하고 변수들 간의 상호관계를 예측하기 위해 사용된다. 일반적으로 흐름 및 파랑 장에서 인공어초 주변에서 일어나는 유속분포와 세굴에 따른 침하특성을 살펴보기 위한 주요 영향인자들은 다음과 같다.

$$f(D, \rho_a, \epsilon_a, S_a, U, \rho_w, \mu, g, d_{50}, \rho_s, C_u, t, H, T, T_t, \theta, d_s) = 0 \quad (4.1)$$

여기서,  $D$ 는 어초의 대표길이,  $\rho_a$ 는 어초의 밀도,  $\epsilon_a$ 은 어초의 공극률,  $S_a$ 는 어초의 형상,  $U$ 는 평균유속,  $\rho_w$ 는 유체의 밀도,  $\mu$ 는 유체의 점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $d_{50}$ 은 저질의 중앙입경,  $\rho_s$ 는 저질의 밀도,  $C_u$ 는 균등계수,  $t$ 는 지속시간,  $H$ 와  $T$ 는 각각 파고와 주기를 나타내고,  $T_t$ 는 비정상흐름(조류)의 주기,  $\theta$ 는 어초의 설치방향,  $d_s$ 는 인공어초의 세굴깊이를 나타낸다.

인공어초의 세굴깊이  $d_s$ 를 종속변수로 하고, 식(4.1)의 독립변수에서  $D$ ,  $U$ ,  $\mu$ 를 반복변수로 하여 Buckingham의  $\pi$ 정리를 이용하여 정리하였다. 각 차원

량을 무차원량으로 정리하면, 무차원의 세굴 침하량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d_s}{D} = f \left\{ \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_w - \rho_s}, \epsilon_a, S_a, \frac{UD}{\nu}, \frac{U}{\sqrt{gD}}, \frac{D}{d_{50}}, \frac{U^2}{(\rho_s/\rho_w - 1)gd_{50}}, C_u, \frac{UT}{D}, \frac{t}{T}, \frac{t}{T_t}, \theta \right\} \quad (4.2)$$

식 4.2의 우변에서 1항은 어초의 자중과 저질의 밀도에 따른 자중 침하의 깊이와 관련한 항이며, 2항은 어초의 공극률, 3항은 어초의 형상, 4항은 인공 어초에 대한 Reynold's수로서 흐름의 변화에 관계되는 항이며, 5항은 구조물에 대한 Froude수, 6항은 저질입경에 대한 구조물의 대표길이의 비, 7항은 Shield's수로서 저질의 이동한계와 관련한 것이며, 8항은 저질의 균등계수, 9항은 KC수, 10항과 11항은 지속시간, 12항은 어초의 기울기를 나타내는 항이다. 흐름장에서 인공어초 설치에 따른 유동패턴의 변화지표는 식(4-2)의 4항인 Reynold's 수가 유효한 변수인 것으로 고려되며, 저질의 이동에 대한 지표로서는 Shield's수가 중요한 인자로 고려되며, 자중침하, 구조물의 Froude 수, 저질 특성 및 경과시간에 대한 영향의 검토 또한 필요할 것으로 판단된다. 상사법칙으로는 중력이 지배적일 때는 Froude 상사법칙, 점성력이 지배적일 때는 Reynold's 상사법칙, 표면장력이 지배적일 때는 Weber 상사법칙, 그리고 압축성 유체에서처럼 탄성력이 지배적일 때에는 Cauchy 상사법칙을 사용한다. 인공어초가 설치되는 지반의 세굴에 의한 어초의 침하특성을 고려하여, 중력성분이 지배적이고 점성의 영향이 무시될 수 있는 Froude 상사법칙을 적용하였다. 기하학적 축척비가  $\lambda$ 일대 Froude 상사법칙에 의한 주요 상사율은 Table 4-1과 같다.

Table 4-1. Similarity rate in Froude's similarity laws

| Compartment       | Velocity, Time          | Flux                    | Frequency                | Shear stress | Force       |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|-------------|
| Law of similitude | $\lambda^{\frac{1}{2}}$ | $\lambda^{\frac{5}{2}}$ | $\lambda^{-\frac{1}{2}}$ | $\lambda$    | $\lambda^3$ |

## 4.2 수치모델의 방법 및 제원

사각어초 주변의 흐름장을 해석하기 위해 모델에 적용된 구조물, 저질, 흐름 및 수심 등에 대한 제원은 Table 4-2와 같다. 이는 실제 해역의 조건을 실물: 모형=1:0.03으로 축척하여 얻은 수치이며, 저질에 대한 조건은 실제 해역과 동일하다(수산청, 1994).

여기서, 유속의 크기는 실제 사각어초가 설치되는 곳의 저질에 대한 한계소류력과 관련해 실제적으로 세굴에 영향을 미치는 유속을 고려하였다. Fig. 4-1에서는 저질입자의 크기별로 평균유속 강도에 따른 저질입자의 수송, 침식, 퇴적에 대한 한계상태를 보여주고 있으며(Hjulström, 1939), 이에 대한 침식과 퇴적이 일어나는 최소 유속을 정리한 것이 Table 4-3이다(Blumberg, 1974). 본 수치실험에서 사용된 저질입경은 0.18mm이고, 유속조건은 Fig. 4-1에서 세굴이 두드러지게 발생하는 범위내의 최소 유속조건과 실제로 어초가 많이 설치되고 있는 해역에서 데이터 및 한계설치 유속으로 제시되고 있는 유속(2m/sec)을 고려하였다. 기존 수리실험의 경우에서 또한, 유속이 8~10cm/sec까지는 세굴현상이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다(윤, 2001).

Table 4-2. Numerical modeling conditions for flow fields

| Structure                                                                                                          |                                  | Sediment         |                                                               |                                  | Flow                        | Depth<br>(cm) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------|
| Shape<br>(cm)                                                                                                      | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $d_{50}$<br>(mm) | $\sigma_s$<br>$\left( = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \right)$ | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $U$<br>(cm/sec)             |               |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tetragon</li> <li>• Length×Width×Height<br/>= 6×6×6 [2m×2m×2m]</li> </ul> | 1.514                            | 0.18             | 1.48                                                          | 2.062                            | 12~20<br>(0.7~1.2<br>m/sec) | 60<br>[20m]   |

• [ ] : Condition in a real sea area

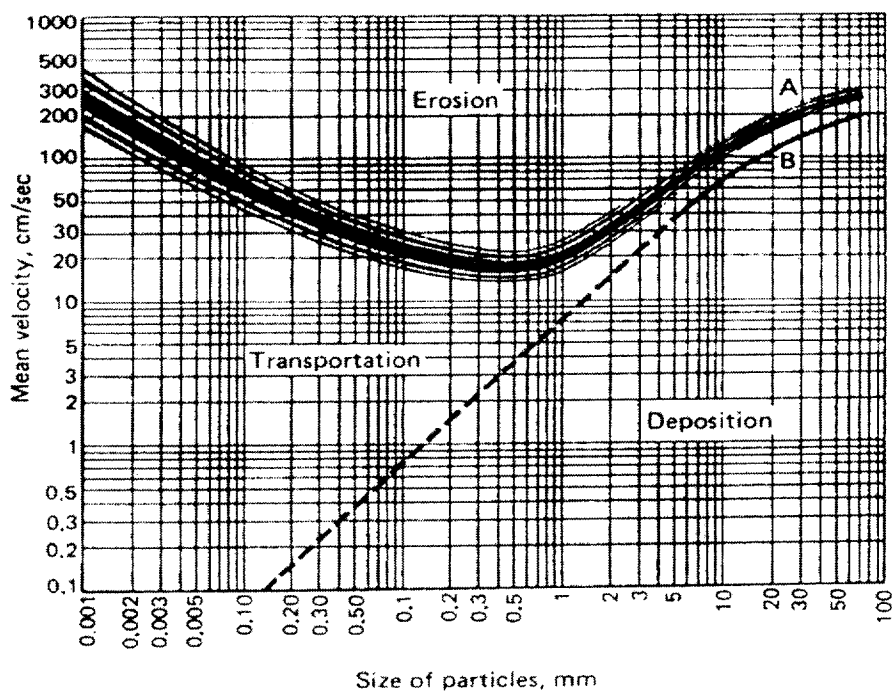


Fig. 4-1. Relationship between average current velocity and sediments of uniform texture showing velocities necessary for erosion, transportation, or deposition.

Table 4-3. Minimum velocities for sediment erosion and deposition

| Grain size |       | Velocity for Erosion |           | Velocity for Deposition |         |
|------------|-------|----------------------|-----------|-------------------------|---------|
| in.        | mm    | ft/sec               | m/sec     | ft/sec                  | m/sec   |
| 0.4        | 10.0  | 3.3-4.9              | 1.0-1.5   | 2.30                    | 0.7     |
| 0.2        | 5.0   | 1.6-3.3              | 0.5-1.0   | 1.30                    | 0.4     |
| 0.04       | 1.0   | 0.5-0.8              | 0.15-0.25 | 0.03                    | 0.08    |
| 0.02       | 0.5   | 0.4-0.7              | 0.12-0.22 | 0.13                    | 0.04    |
| 0.004      | 0.1   | 0.5-1.0              | 0.15-0.30 | 0.023                   | 0.007   |
| 0.0004     | 0.01  | 1.6-3.3              | 0.5-1.0   | < 0.003                 | < 0.001 |
| 0.00004    | 0.001 | 6.6-13.0             | 2.0-4.0   | < 0.003                 | < 0.001 |

계산될 수치모델의 영역은 X축 방향의 총 길이  $l_x = 300\text{cm}(-200 \sim 100)$ 이고, X-min부분에 유입경계 조건을 주었으며, X-max 부분에서는 유출경계를 주어 유입경계에서 흘러들어오는 흐름의 진행에 영향을 주지 않게 하였다. Y축방향의 총길이는  $16\text{cm}(-8 \sim 8)$ 이고, 벽면의 전단응력에 의한 인공어초 주변의 흐름장이 교란되지 않도록 대칭영역을 두었다. 그리고, Z축 방향에 대해서는 일반적으로 인공어초가 설치되는 실제 해역의 수심 20m를 축척시킨 모델상의 수심 60cm를 고려하여, 총 높이를  $80\text{cm}(-10 \sim 70)$ 로 하였으며, Z-min과 Z-max에 대한 경계에는 각각 불투과성 바닥과 자유수면 경계조건으로 하였다.

세굴현상의 재현을 위한 실험에서는 대상을 실험조건으로 하였다. 사각어초의 위치는 하부지반 상의 계산영역 중앙( $x, y, z = 0, 0, 0$ )에 위치시켰고, 하부지반의 총 두께는 3m로 하였다. 계산영역의 총 격자수는  $69 \times 40 \times 46$ 개이며, 사각어초 주변의 흐름장에 대한 특성을 고려하기 위해 구조물 주변에 가변격자( $\Delta x = \Delta y = 0.2\text{m}$ )를 적용하였으며, 구조물 하부지반의 격자간격은 기존의 수리실험

결과에서 나타난 구조물의 대표길이에 대한 세굴깊이의 비( $d_s/D$ )의 최대값이 0.3이하임을 감안하여, 구조물 하부의 두께 1m이내의 지반에 대해서는  $\Delta z=0.05m$ 로 가변격자를 적용시켰다.

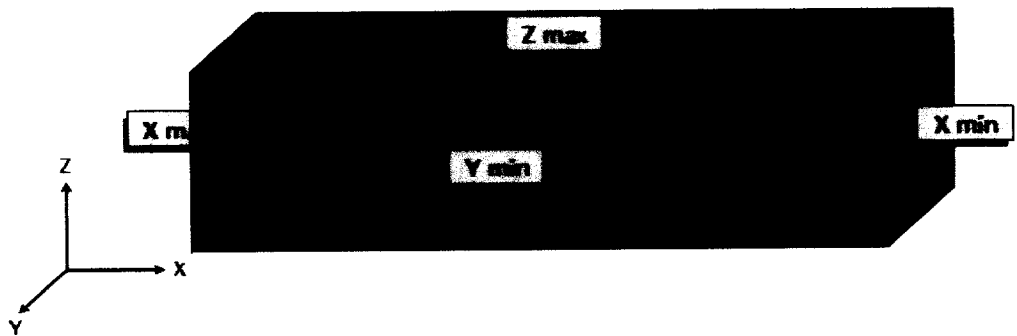


Fig. 4-2. Boundary of calculation area.

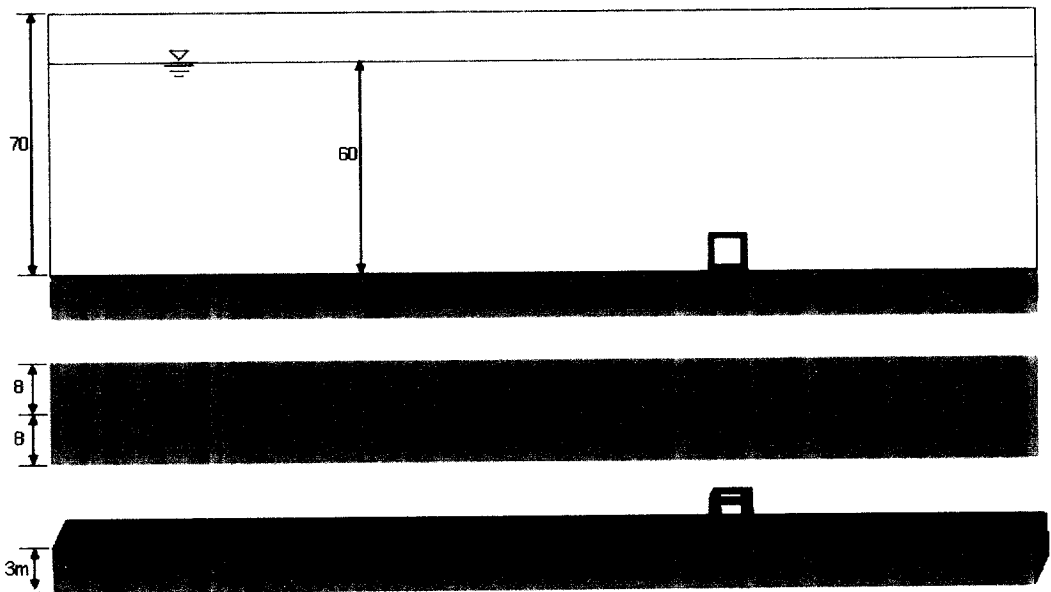


Fig. 4-3. Shape and position of tetragon(unit : cm).

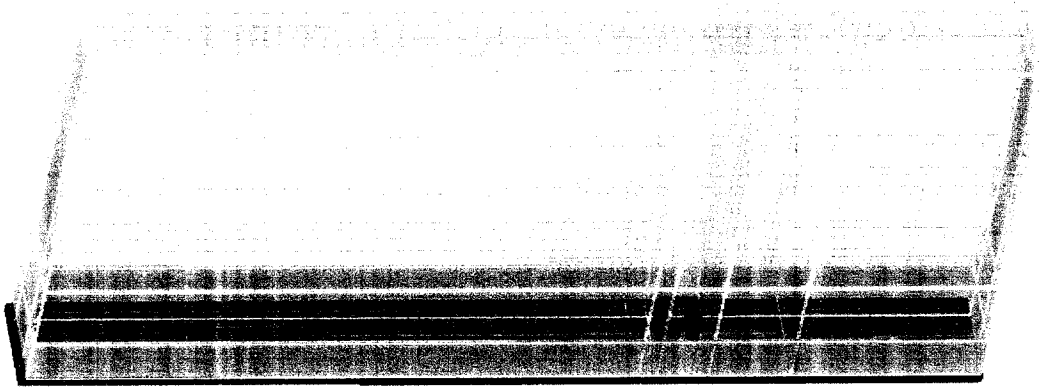


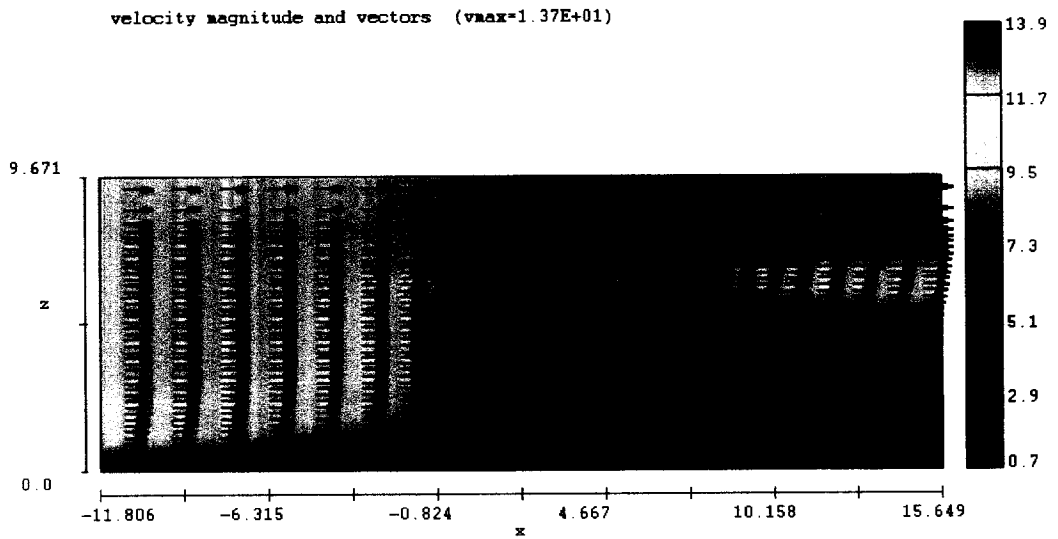
Fig. 4-4. Construction of grids.

### 4.3 수치모델의 결과 및 분석

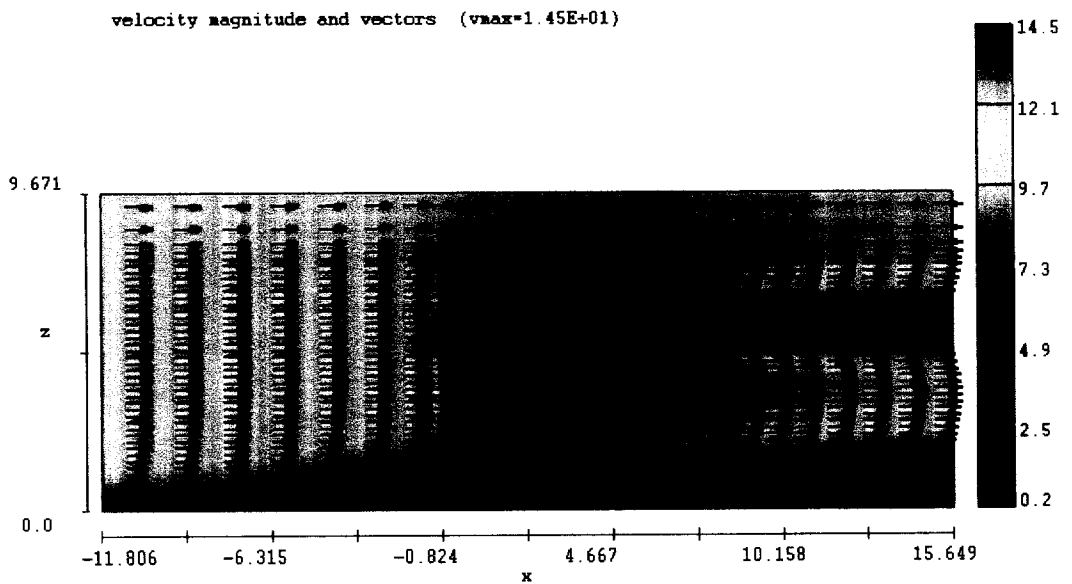
흐름 및 파랑 장에서 인공어초 주변의 흐름에 대한 연구는 기존에 많이 논의된 바 있다. 이들 연구의 대부분은 수리모형실험을 바탕으로 행하여 졌는데, 체계화된 이러한 결과들은 수치해석의 결과에 중요한 검증자료로써 사용되고 있다. 일반적으로 저질의 이동은 저질의 이동한계유속보다 강한 흐름에 의해 발생한다. 그러나 흐름 또는 파랑장에서 어초를 설치하기 전의 수립자 속도가 저질의 이동한계유속 이하 일지라도 어초설치 후에 어초 주변의 축류나 와류 등에 의해 수립자 속도가 국부적으로 한계유속 이상이 되면서 세굴 및 퇴적이 일어날 수 있다. 또한 착저식 인공어초와 같은 해중 구조물에서 발생하는 세굴현상은 실제 해역에서 지배적인 작용 외력이 흐름인지 파랑인지 또는 파랑과 흐름이 모두 작용하는지에 따라 그 결과가 달라진다. 이 절에서는 작용 외력으로써 일정한 흐름장을 적용하였으며, 이에 따른 사각어초의 주변에서 나타나는 흐름변동 특성과 저질의 세굴패턴에 대해 고찰하였다.

#### 4.3.1 인공어초 주변의 흐름장

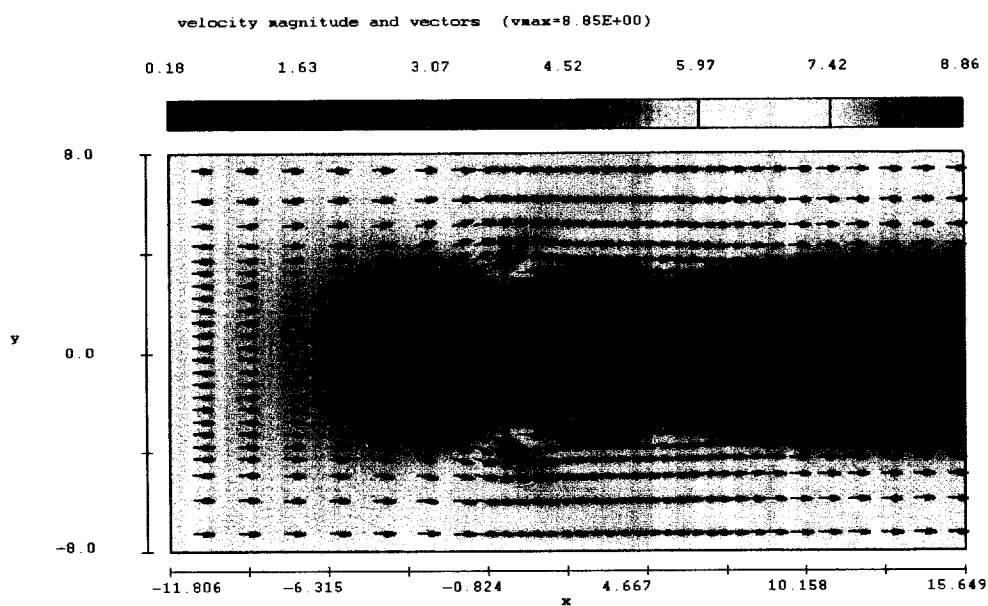
정상 흐름장에서 저면의 세굴현상에 간섭을 받지 않는 인공어초 주변의 흐름장에 의한 작용 유체력의 특성을 검토하기 위해 저질을 불투과성 경계조건으로 하였다. 수치해석의 결과, 일정한 흐름에 대한 사각어초 주변의 유속분포는 각각의 유속 Case에 대해 공통적으로 Fig. 4-5와 같았고, 최대유속의 위치 또한 사각어초 전면의 상단중앙( $x, y, z = 0, 0, 20$ )에 각각 위치하였다. 마찬가지로 각각의 유속 Case에서 사각어초 저면에서 어초의 배후영역( $x = 6 \sim 10$ )과 사각어초 내부( $x = 0 \sim 6$ )에서 주류와 반대되는 흐름이 발생함을 보였는데(Fig. 4-5의 (b), (c)), 기존의 연구에서는 어초의 저면에서 주류방향의 역방향으로 수평방향의 유속성분이 발생하는 이 영역을 후류영역으로 정의하고 있다(樺木, 1979). 후류의 길이는 주로 레이놀드수와 KC수에 의존하며, 레이놀드수가 증가함에 따라서 후류길이가 증가하는 경향을 보이나 전체적인 분산이 커서 명확한 선형관계를 찾기 어렵고, KC수에 대해서는 선형적으로 증가하는 경향을 보인다고 하였다(류 등, 1986). 또한, 착저식 침선어초에 대한 연구에서 Reynold's수가 8,000이상의 값을 가질 때에는 배후면의 후류의 길이가 일정하게 나타남을 보였다.(Kim 등, 2000). 본 연구의 해석결과, 각각의 유속Case에서 후류의 최대 길이는 사각어초의 끝단( $x = 6$ )에서부터 배후영역의 유속이 0인 지점까지 4~5cm로 일정하게 나타났다. 각 Case에서의 Reynold's수는 8,000에서 13,000의 범위에 속하며 기존의 연구 결과와 정성적으로 일치함을 알 수 있었다.



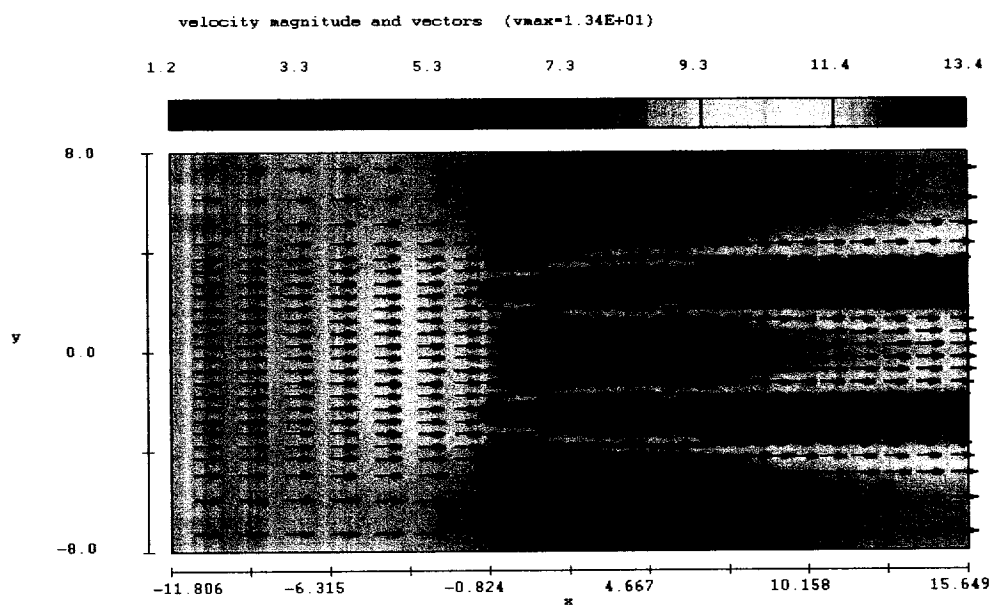
(a) end section( $x$ - $z$ ,  $y=-3, 3$ )



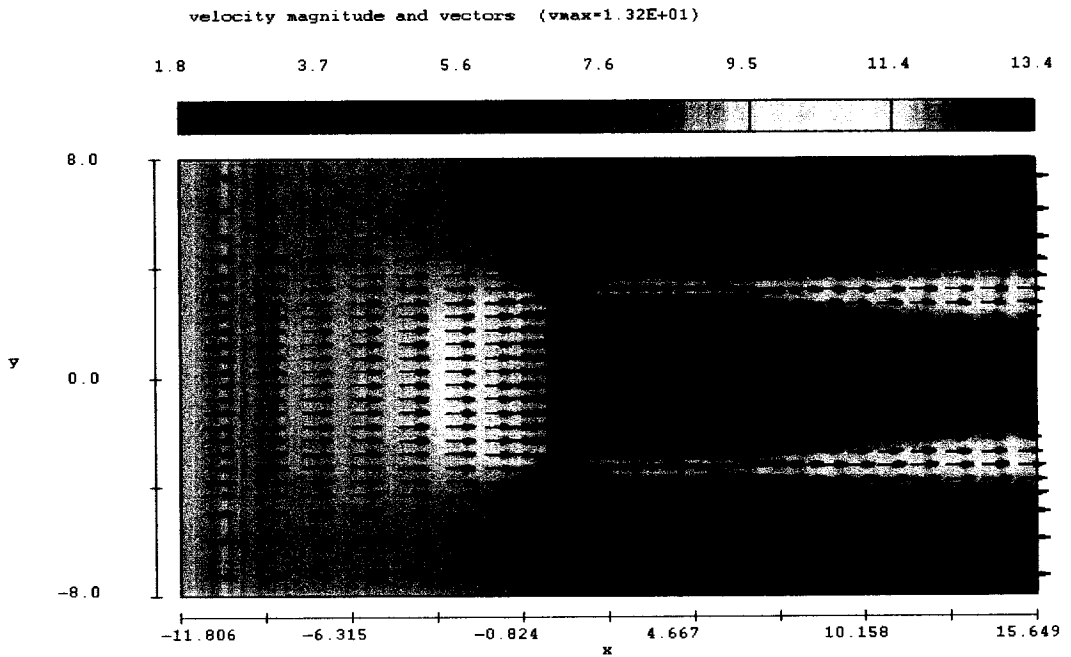
(b) middle section( $x$ - $z$ ,  $y=0$ )



(c) lower section( $x$ - $y$ ,  $z=0$ )



(d) middle section( $x$ - $y$ ,  $z=3$ )

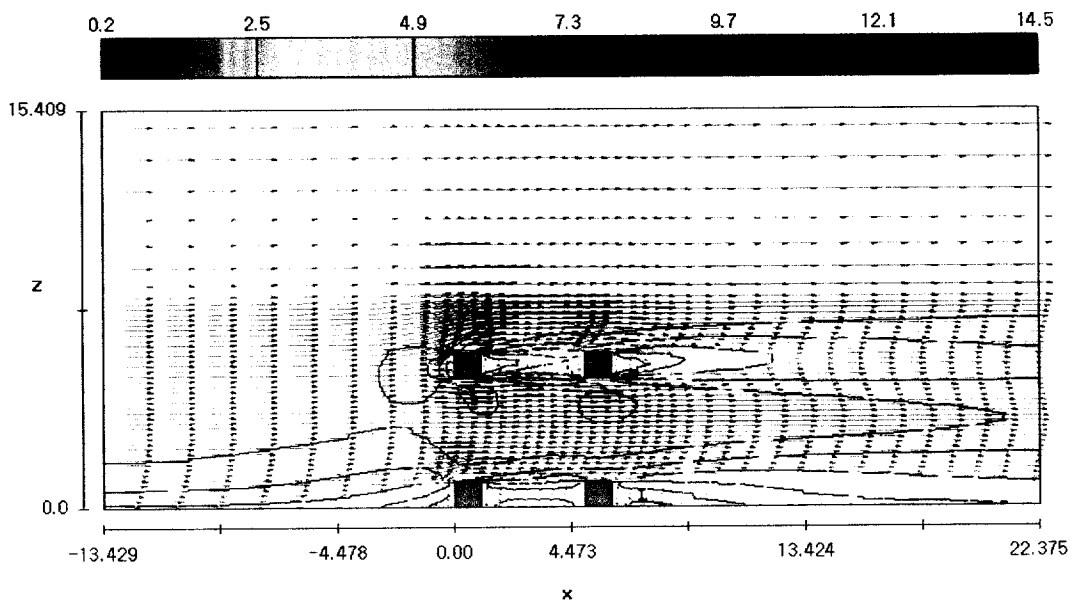


(e) upper section(x-y, z=6)

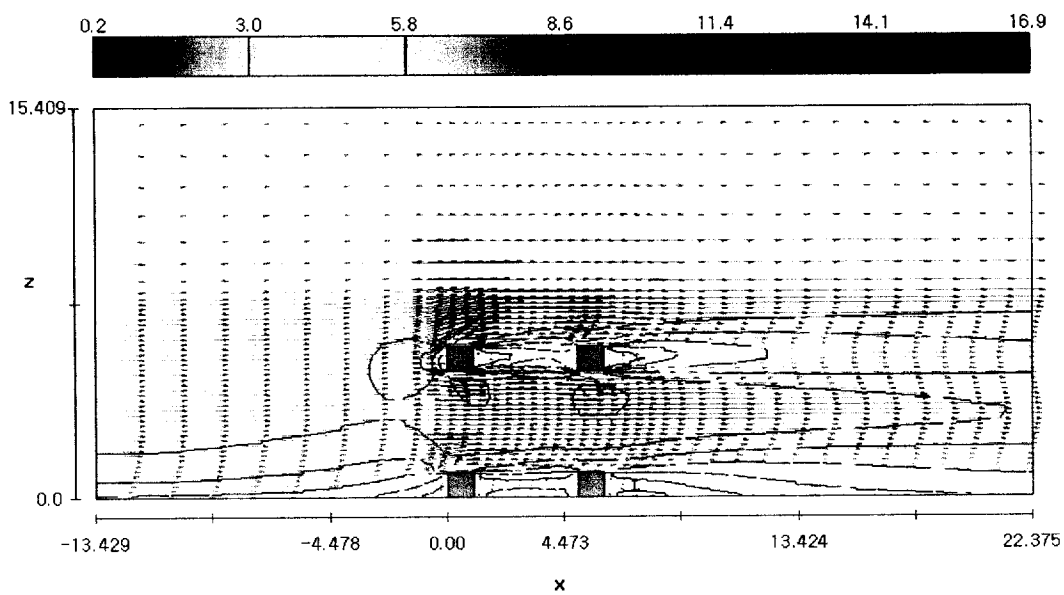
Fig. 4-5. Velocity distribution around a tetragon( $U=12\text{cm/sec}$ ).

Fig. 4-6은 일정 흐름장에서 흐름이 연직적으로 안정화 되었을 때 각 유속 Case별 인공어초의 중앙단면에 대한 유속분포를 나타낸 것이고, Fig. 4-7~8는 각 유속 Case별로 중앙단면(x-z, y=0)에서 사각어초의 내부와 배후에서 발생하는 후류의 최대유속지점을 선정하여, 이 지점에 대한 시간별 유속에 대해 도식화한 것이다. 전체적으로 시간이 지날수록 흐름의 안정화 단계에 접어들면서 일정 유속을 유지하였고, 흐름의 초기에 사각어초의 배후영역에서는 내부에 비해 순간적인 유속의 변동 폭이 큼을 알 수 있었다. 파랑이 작용하지 않는 흐름장에서 사각어초와 유체의 관계가 유체의 점성에 대한 무차원수인 레이놀즈수에 관계한다고 할 때, Fig. 4-9는 레이놀즈수에 따른 후류유속의 크기를 나타낸 모식도이다. 여기서, 사각어초 상부에서의 흐름은 어초에 의해

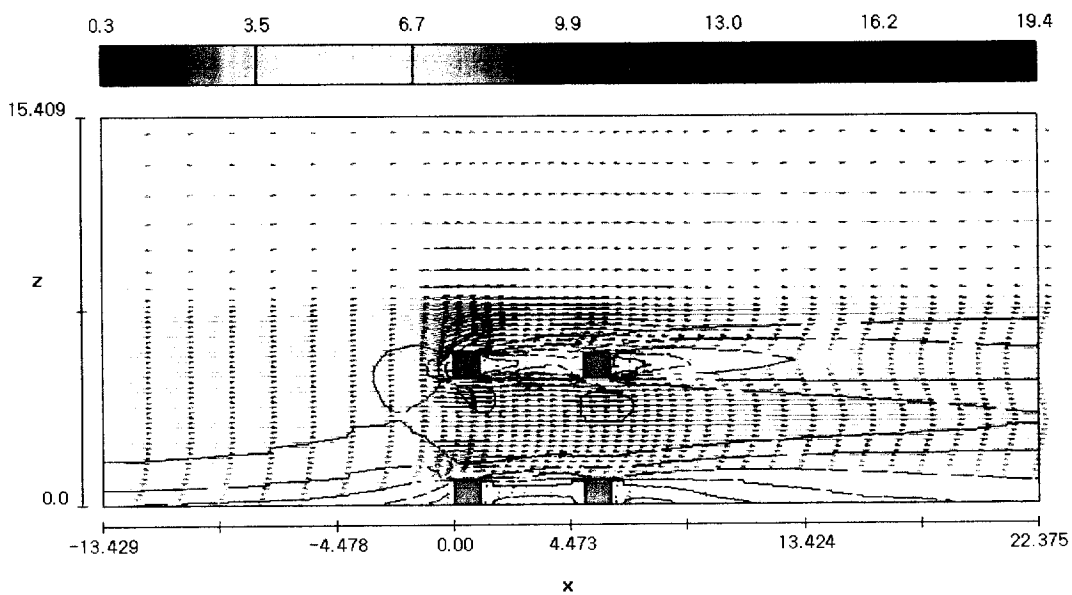
교란되는 흐름과 그렇지 않은 흐름사이의 경계층이 발생하는데, 여기서 평균 유속  $U$ 는 사각어초 상부의 경계층을 벗어나 일정한 흐름이 지속되는 유속값을 사용하였다.  $u^*$ 는 후류유속의 최대값을 적용하였고,  $D$ 는 사각어초에 대한 대표길이를 적용하였다. 이 결과 사각어초의 내부와 배후영역에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 상대적인 후류유속의 최대값이 증가하는 양상을 보였는데, 사각어초의 내부에서는 레이놀즈수가 11,000과 12,000사이에서 다소 감소하는 양상을 보였다.



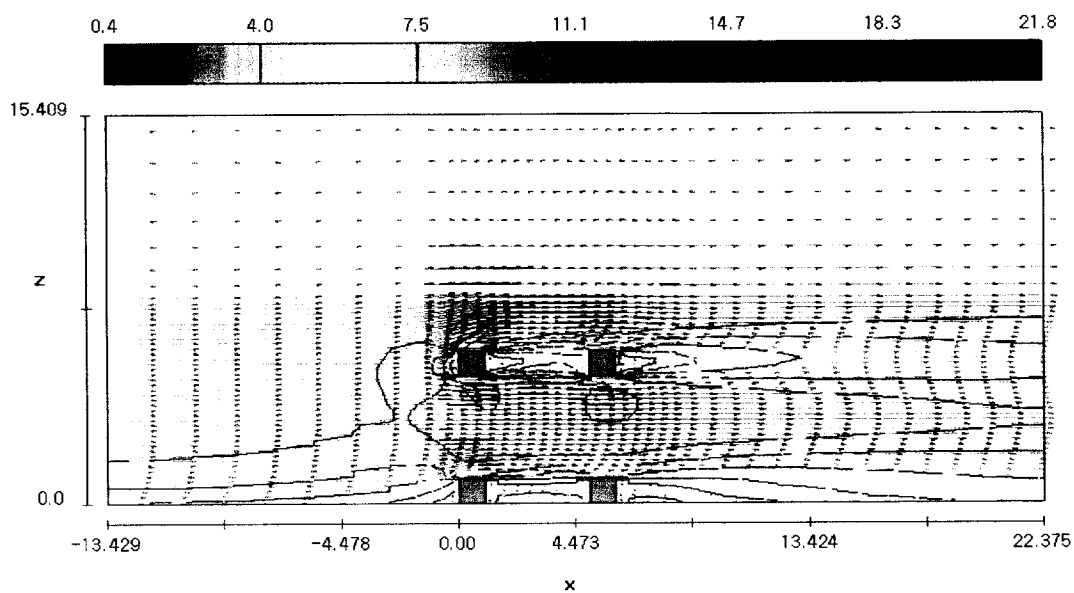
(a)  $U=12\text{cm/sec}$



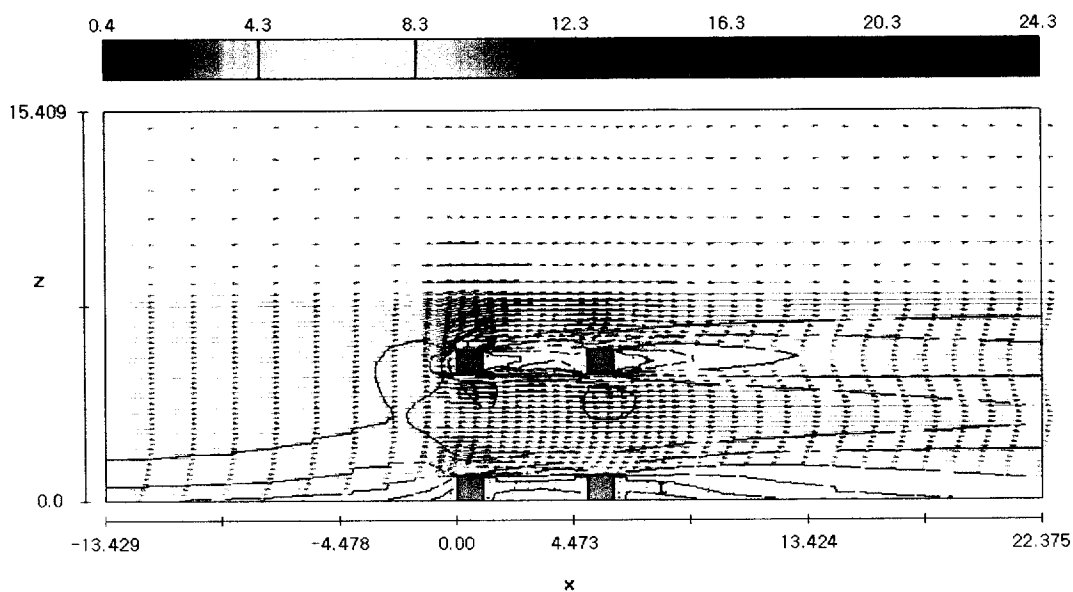
(b)  $U=14\text{cm/sec}$



(c)  $U=16\text{cm/sec}$



(d)  $U=18\text{cm/sec}$



(e)  $U=20\text{cm/sec}$

Fig. 4-6. Vertical distribution of velocity in front and rear of a tetragon ( $y=0$ ).

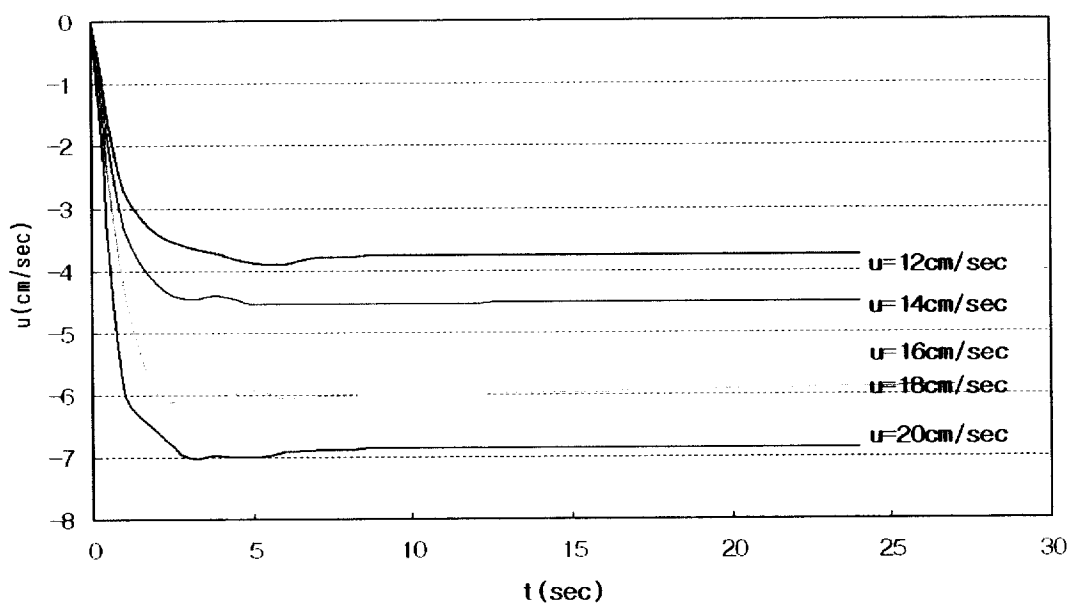


Fig. 4-7. Max. wake velocity in interior of a tetragon( $x=3$ ).

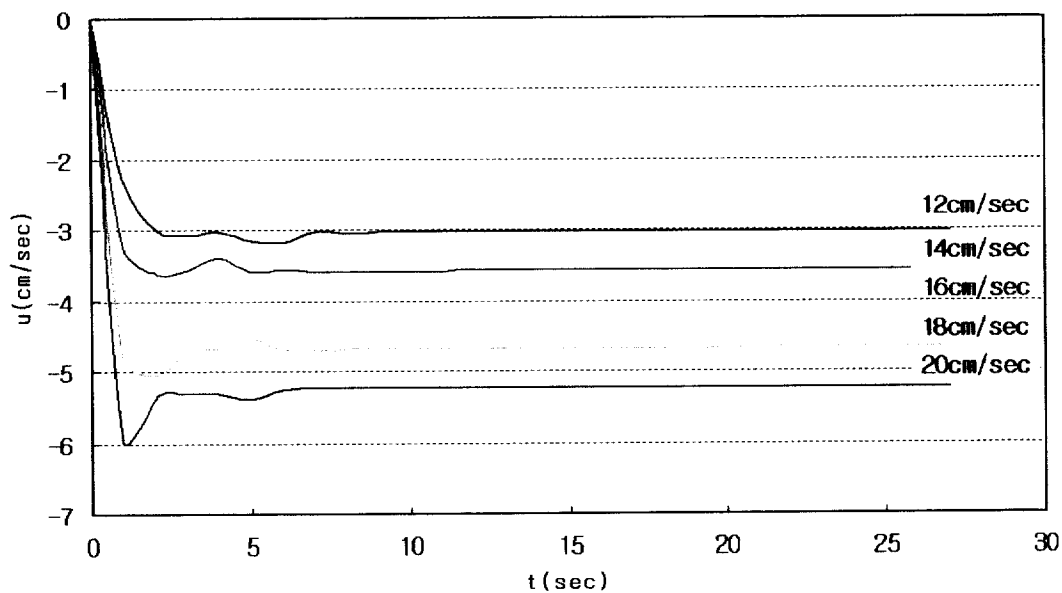


Fig. 4-8. Max. wake velocity at hinterland of a tetragon( $x=8$ ).

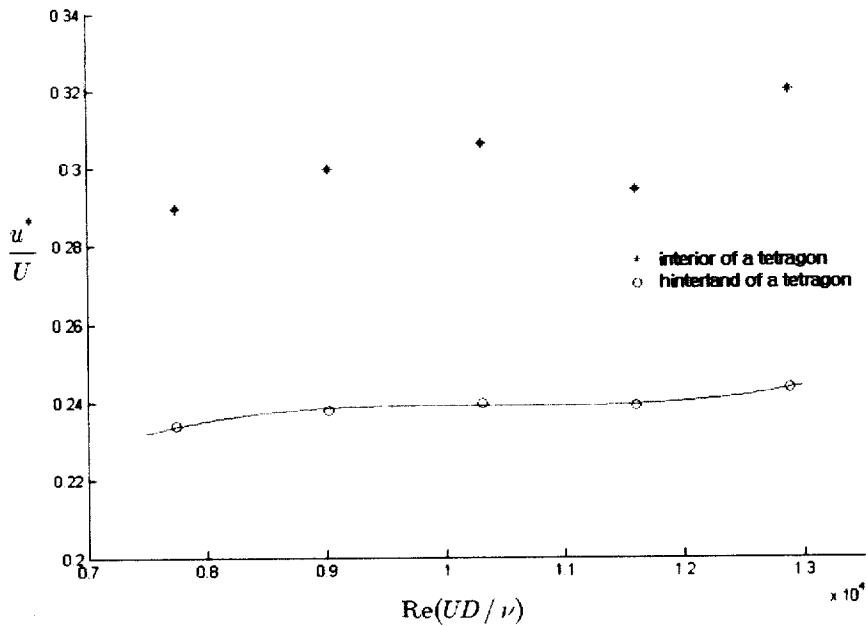


Fig. 4-9. Characteristic of wake velocity along the Reynold's number.

#### 4.3.2 인공어초에 작용하는 유체력

인공어초의 안정성에 대해 유체력이 미치는 영향에 대해서는 파랑과 흐름에 대하여 2장에서 논의된바 있었다. 일정한 흐름장의 사각어초에 작용하는 유체력을 계산함에 있어서 정의 되어야 할 조건은 작용면적과 그 면적에 작용하는 유속의 크기가 될 것이다. 본 연구에서 유체력의 계산을 위한 작용면적은 사각어초의 전면( $x=0$ )와 후면( $x=5$ )에서 주류방향에 맞는 투영면적을 고려하였고, 작용유속은 각 지점별 유체력의 크기를 비교하기 위해 작용면적의 각 격자별  $x$ 방향 유속 값을 적용하였다. 그 결과, 사각어초에 작용하는 유체력은 각각의 유속Case에 대해 공통적으로 어초의 중앙( $y=0$ )을 기준으로 서로 대칭성을 띠었고, 최대 작용유체력에 대해서 사각어초 전면은 상부의 양단( $y, z=\pm 3, 6$ )에서, 후면은 상부의 중앙( $y, z=0, 6$ )에서 각각 발생하였다. 전체 작용

유체력 및 최대 작용 유체력은 유속의 증가에 비례하는 양상을 보였으나, 전체 작용 유체력은 유속이 18cm/sec를 지나면서 그 증가량이 점점 감소함을 알 수 있었다(Fig. 4-10).

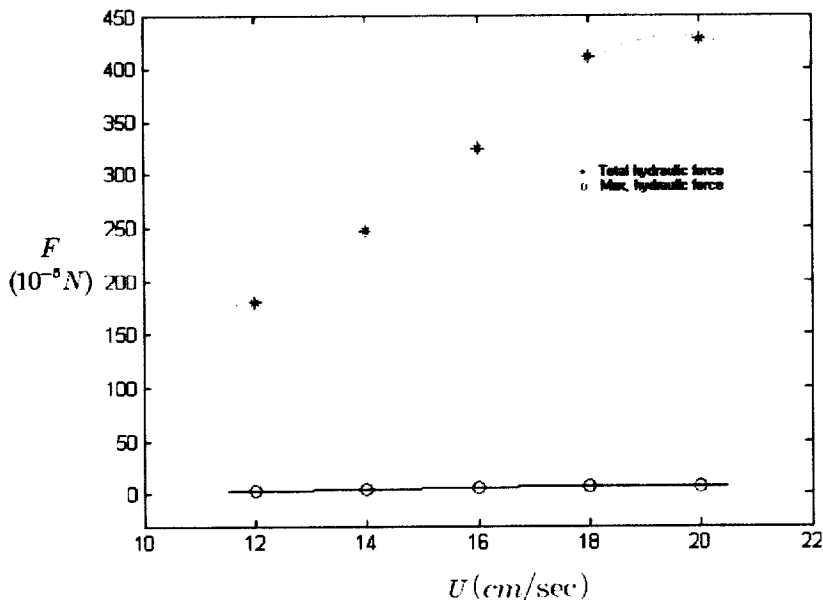


Fig. 4-10. Max. and total hydraulic force along the velocity.

### 4.3.3 저면전단응력

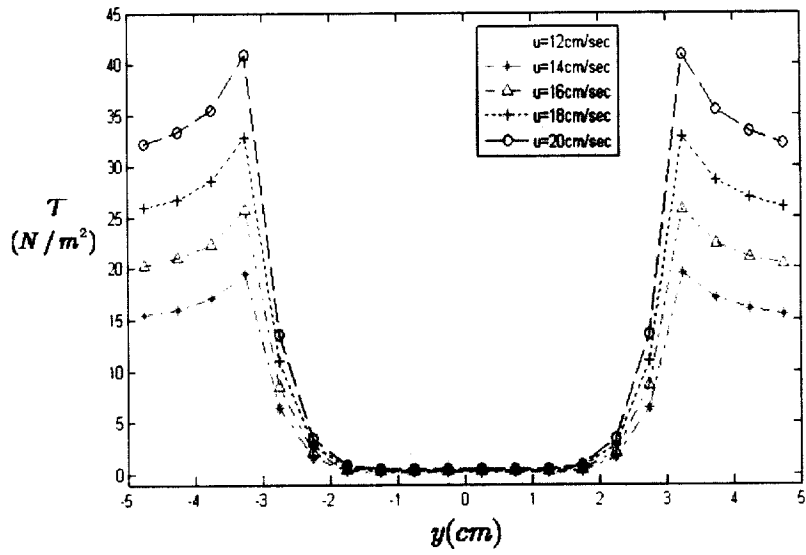
미세한 저질입자들에 대한 성질과 수립자의 거동에 영향을 주는 주요 외력인자인 흐름과 파랑의 성질을 대표하는 값들을 산정하는 것에 관한 연구가 지속되어지고 있는 가운데, 저질의 이동에 관해서는 많은 경험식들이 기존의 여러 연구자들에 의해 이론과 경험을 바탕으로 제시되어왔다. 본 연구에서는 기존의 제시된 다음의 경험식을 바탕으로 흐름에 의한 사각어초 주변의 저면 전단응력을 산정하였으며, 이때 사용된 유속 값은 저면유속이 저질입자에 직접적으로 미치는 전단응력의 분포를 고려하기 위해 저면에서 가장 가까운

격자( $z=0.25\text{cm}$ )에서의 유속을 적용하여, 각 격자영역별로 전단응력을 산출하였다.

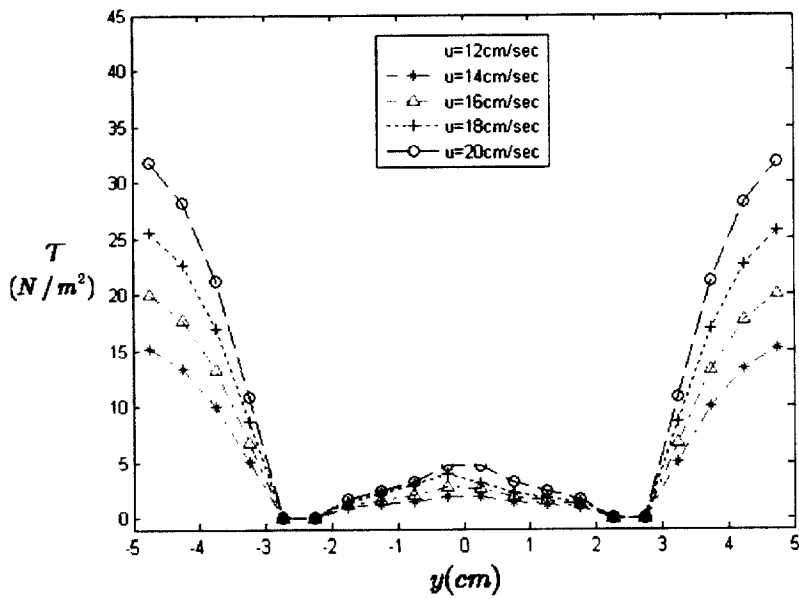
$$\tau_b = \rho g h I = \rho g \frac{u^2}{C^2} = \frac{1}{8} \rho f_c u^2 = \rho u_*^2 \quad (4.3)$$

여기서,  $h$ =수심,  $I$ =에너지선의 경사,  $u$ =수심평균유속( $\text{m/s}$ ),  $C$ =Chezy 저항계수( $C^2 = 8g/f_c$ ),  $f_c$ =Darcy-Weisbach마찰계수,  $\rho$ =유체의 밀도( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$ =중력가속도( $\text{m/s}^2$ ),  $u_*$ 는 저면마찰속도(혹은 저면최대수립자속도)이다. 이때, 마찰계수  $f_c$ 나 Chezy계수  $C$ 는 흐름상태가 층류인가 천이상태인가 또는 난류인가에 따라 달라지며, 저면이 수리학적으로 매끄러운지 거친지에 대해서도 달라진다.

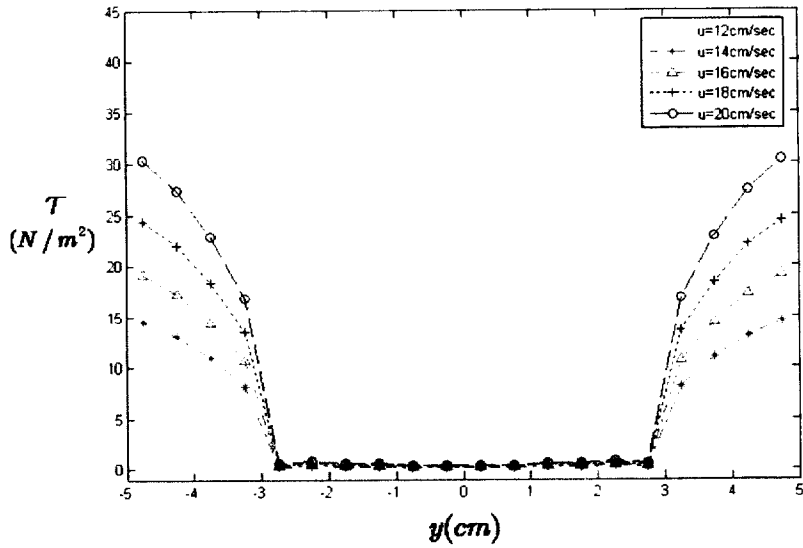
실제 저면의 유속 값을 대입한 결과는 Fig. 4.11과 같다. 사각어초 전면( $x=0$ )에서의 저면전단응력은 중앙에서 양 끝단으로 갈수록 저면의 전단응력이 급격히 증가함을 볼 수 있었다. 일반적으로 저면전단응력은 저질의 이동에 의한 세굴현상에 중요한 영향인자로 작용하는데, 사각어초 전면의 경우 전단응력이 가장 큰 양 끝단에서 가장먼저 세굴현상이 발생함을 예측할 수 있을 것이다. 사각어초의 중앙단면( $x=3$ )에 대한 저면전단응력 분포를 보면 전면에서 보다 상대적으로 작은 값을 보이고 있다. 특이점이 있다면 단면의 중심부인데, 이 부분은 앞의 저면 유속분포도(Fig. 4-5의 (c))를 통해 볼 수 있듯이, 주류와 반대방향인 후류의 흐름에 의한 것으로서, 이는 기존의 사각어초 주변의 세굴에 관한 수리실험에서 재현되었듯이 어초내부에서 초기 세굴패턴의 요인이라 할 수 있다. 사각어초 후면( $x=6$ )에 대한 저면전단응력 분포는 어초의 저면에서 전단응력이 거의 0에 가깝고 구조물의 양 끝단에서 급격히 증가함을 볼 수 있다.



(a) the front of a tetragon( $x=0$ )



(b) the middle of a tetragon( $x=3$ )



(c) the background of a tetragon(x=6)

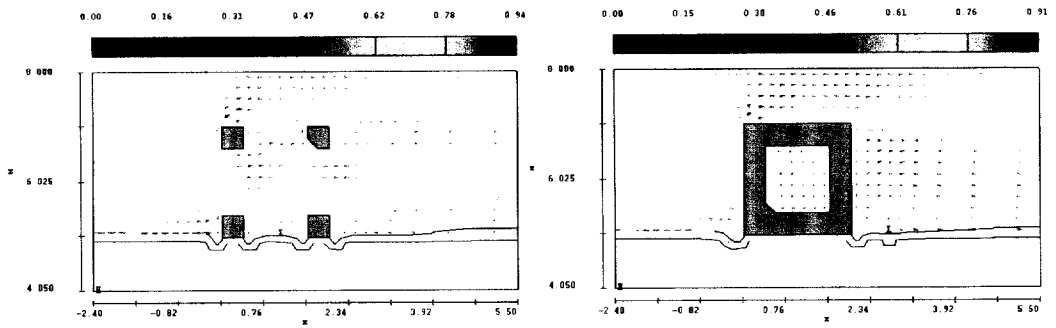
Fig. 4-11. Distribution of bottom shear stress of a tetragon.

#### 4.3.4 사각어초 주변의 세굴 특성

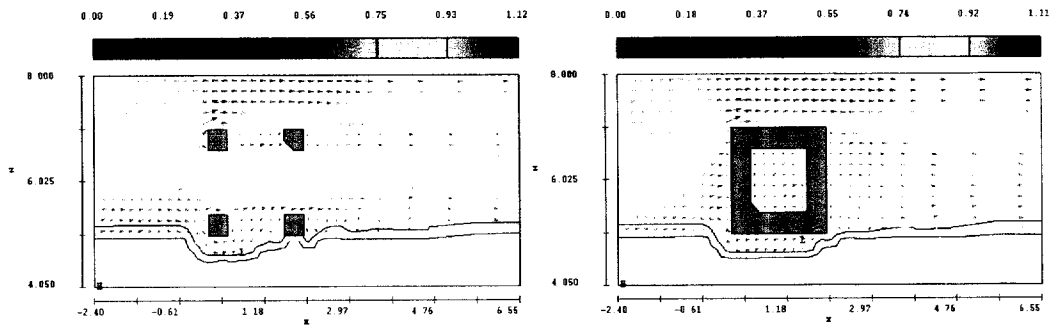
사각어초 주변의 세굴특성에 대한 수치계산 조건은 실제 해역에서의 저질 특성을 감안하여 실제 해역의 조건을 적용하였다. 흐름장에서 인공어초 주변에서 발생하는 세굴현상은 구조물 주변에서의 지속적인 저질의 이동에 의해 발생하게 되는데, 일반적으로 저질의 이동한계는 수리실험에 의한 경험식으로 정리되어 진다. 대표적인 방법으로 저면의 저질에 작용하는 저면전단응력과 저질입자의 정적 전단저항 비를 나타내는 Shield's수(식4.4)를 적용하고 있다.

$$S_n = \frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho_w - 1)gd_{50}} \quad (4.4)$$

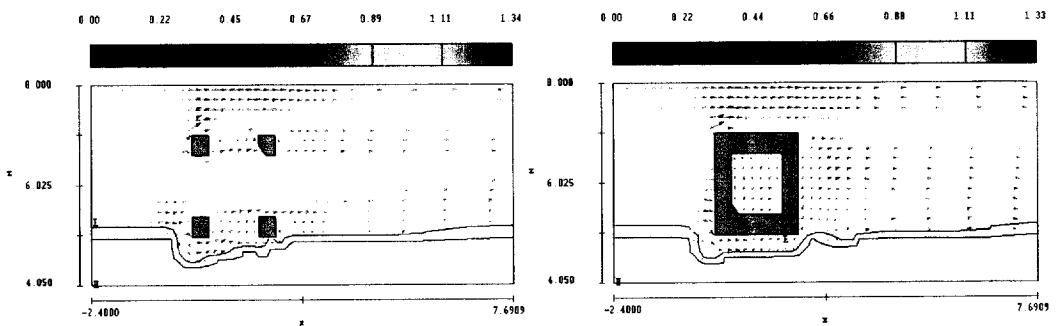
여기서,  $u_*$ 는 저면마찰속도(저면최대수립자속도),  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_s$ 와  $\rho_w$ 는 저질 및 물의 밀도를 나타내며,  $d_{50}$ 은 저질의 중앙입경을 나타낸다. 이러한 저질의 상태를 고려하여 유속 크기별 사각어초 주변에서 발생하는 세굴 및 퇴적의 현상에 대한 수치계산 결과를 Fig. 4-12에 나타내었다. 저면의 세굴 및 퇴적의 양상은 어초의 중심축( $y=0$ )을 기준으로 서로 대칭적으로 발생하였으며, 유속의 크기가 커질수록 세굴의 깊이가 증가하는 경향을 보였다. 초기 세굴은 어초 전면의 하부 가로대의 양 끝단에서 발생하였으며, 차츰 가로대 전체로 확대 진행되어가는 양상을 보였다. 세굴현상에 관한 이러한 기본적인 패턴은 기존의 수리실험(윤, 2001)과 정성적인 일치를 보였으나, 시간이 지남에 따라 계속된 세굴의 패턴은 전혀 다른 양상을 보였다. Fig. 4-13는 어초전면에서 시간에 따른 유속별 세굴깊이를 나타낸 것이고, Fig. 4-14~15는 Shield's수에 따른 사각어초 주변의 최대 세굴깊이( $d_s$ )와 최대 퇴적높이( $d_p$ )에 대한 결과를 도식화 하였는데, 실험 결과와 다소 차이를 보임을 알 수 있었다. 이는 기존의 수리실험의 경우 세굴이 진행되면서 사각어초 하부지반의 비대칭적인 불안정 상태에 따른 침하거동이 발생하게 되는데 본 연구에서의 사각어초는 고정상태의 구조물로써 지속적인 하부지반의 침식을 가져오는 원인으로 판단된다.



(a)  $U=0.8\text{m/sec}$

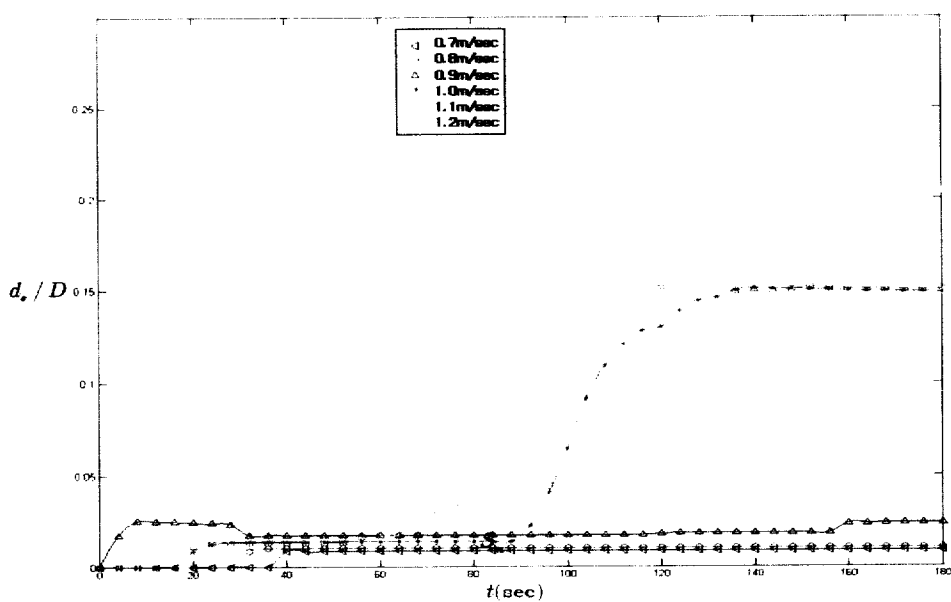


(b)  $U=1.0\text{m/sec}$

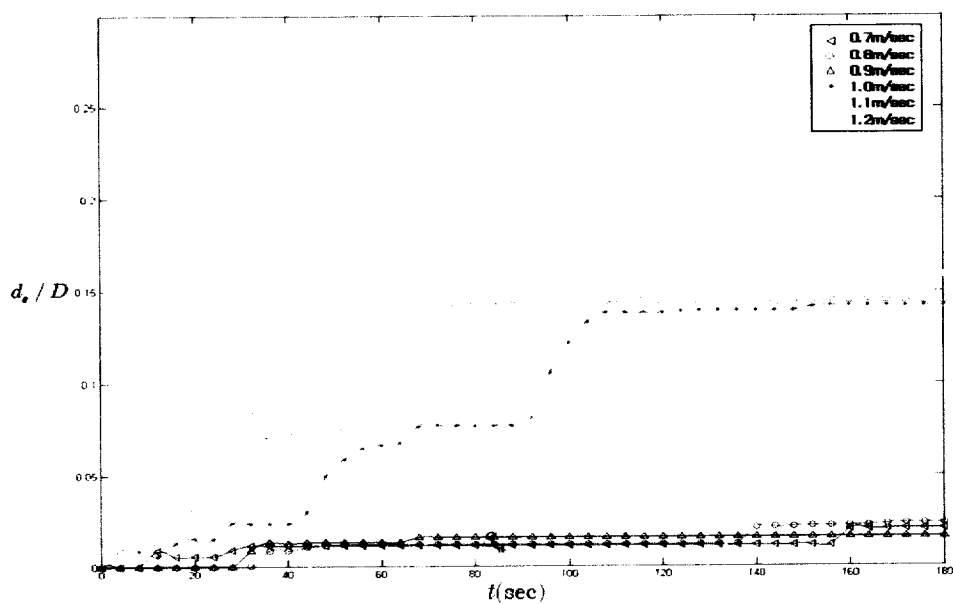


(c)  $U=1.2\text{m/sec}$

Fig. 4-12. Transportation of sediment around a tetragon( $x$ - $z$ ,  $y=0, 1$ ).



(a) the middle of a tetragon( $y=0$ )



(b) the end of a tetragon( $y=-1, 1$ )

Fig. 4-13. Scouring depth at front side of a tetragon( $x=0$ ).

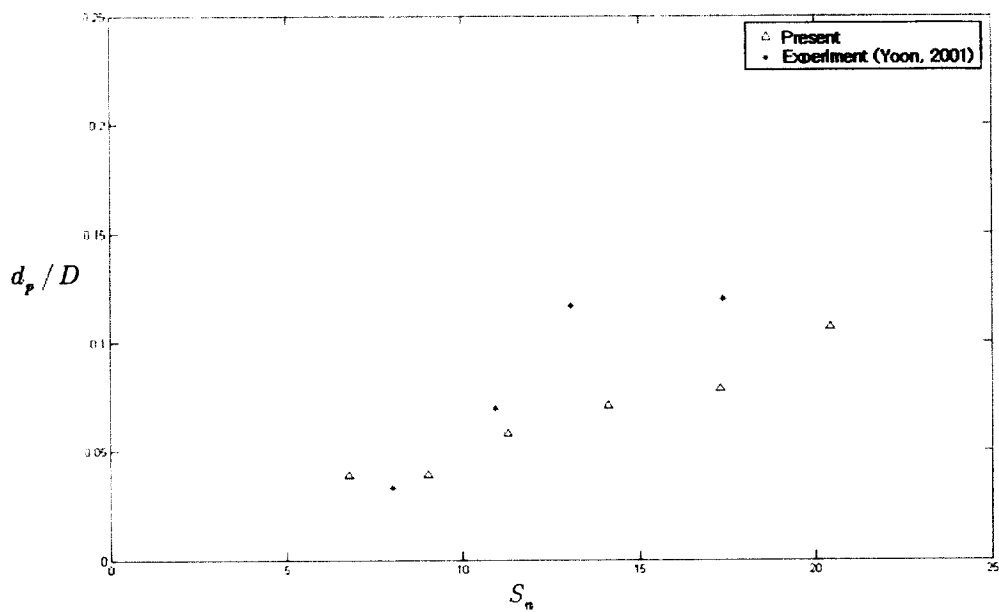


Fig. 4-14. Deposition height along the Shield's number.

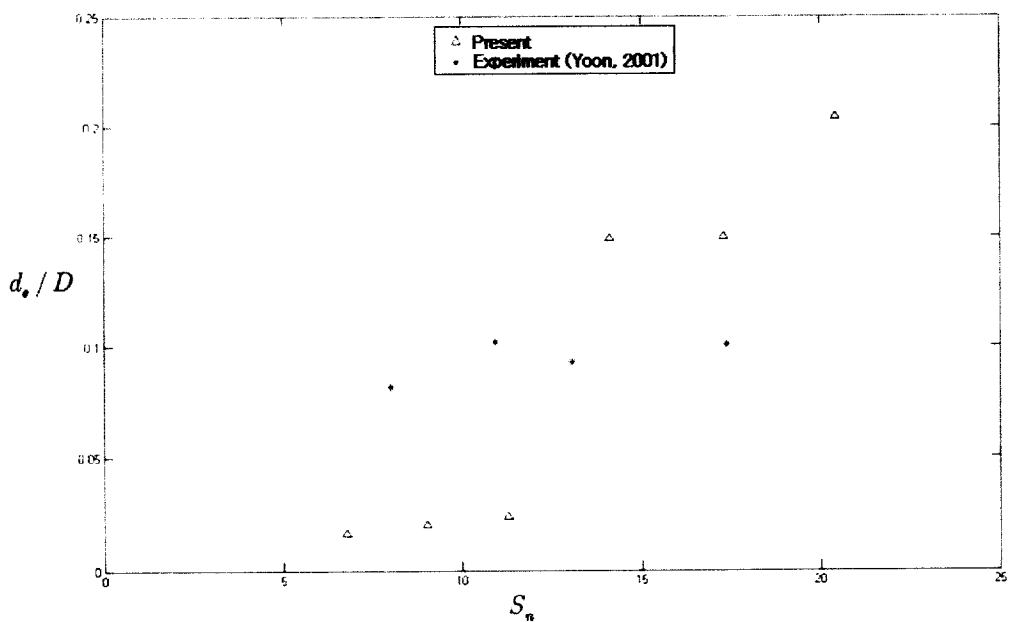


Fig. 4-15. Scouring depth along the Shield's number.

## 제 5장 요약 및 결론

본 연구는 정상 흐름장의 상태에서 인공어초 주변의 흐름 변동특성과 구조물 하부 지반의 세굴 현상을 Flow-3D를 이용한 수치시뮬레이션을 수행하여 그 특성을 파악하고자 하였으며, 기존의 수리실험결과와 정성적인 비교·검토를 하였다. 대상 구조물은 현재 실제 해역에 가장 많이 투하된 사각어초로 하였으며, 먼저 인공어초 주변의 흐름장에 의한 유체역학적 특성에 대해 고찰하였고, 세굴현상에 대한 부분에는 수치 계산조건을 실험조건으로 하여 수치시뮬레이션 수행하였다.

본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 정상 흐름장에 대한 사각어초 주변의 유속분포는  $y=0$ 의 축을 기준으로 대칭성을 띠었고, 각각의 유속 Case에 대해 공통적으로 최고유속의 위치와 후류의 발생위치(사각어초 저면에서 어초의 배후영역) 및 길이(배후영역에서 4~5cm)가 동일하였으며, 기존의 연구결과와 유속Case 내에서 정성적인 일치를 보였다.
2. 유속 Case 별로 최대 후류유속의 크기는 사각어초의 내부와 배후영역에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 상대적인 후류유속의 최대값이 증가하는 양상을 보였고, 특히 사각어초의 내부에서는 레이놀즈수가 11000과 12000 사이에서 다소 감소하는 양상을 보였다.
3. 사각어초에서 최대 작용유체력은 사각어초 전면의 상부 양단에서 발생하였고, 어초의 후면에서는 최대 작용유체력이 어초 상부의 중앙에서 발생하

였다. 전체 작용 유체력 및 최대 작용 유체력은 유속의 증가에 비례하는 양상을 보였으나, 전체 작용 유체력은 유속이 18cm/sec를 지나면서 그 증가량이 점점 감소함을 알 수 있었다.

4. 저질의 세굴현상을 예측할 수 있는 사각어초 주위의 저면전단응력을 전면( $x=0$ ), 중앙( $x=3$ ), 후면( $x=6$ )의 세 단면에 대해서 살펴보았다. 어초의 전면에서는 중앙에서 양 끝단으로 갈수록 저면의 전단응력이 급격히 증가함을 볼 수 있었고, 중앙단면에서는 전면에서보다 상대적으로 작은 값을 보이고 있으나 중심부에서 후류에 의한 전단응력이 크게 나타났으며, 후면에서는 어초의 저면에서 전단응력이 거의 0에 가까웠고, 구조물의 양 끝단에서 급격히 증가함을 볼 수 있었다.

5. 저면의 세굴 및 퇴적현상에 대해 살펴보았다. 유속에 따른 세굴깊이의 증가, 세굴발생 시작위치, 세굴이 일어난 지형의 형상 등 기본적인 초기의 세굴현상은 기존의 수리실험과 정성적인 일치를 보였다.

6. 그러나, 시간이 지남에 따라 계속되는 세굴현상은 전혀 다른 양상을 보였다. Shield's수에 따른 사각어초 주변의 최대 세굴깊이와 최대 퇴적높이에 대한 결과는 수리실험 결과와 아주 큰 차이를 보임을 알 수 있었는데, 이는 본 모델의 고정상 구조물로 인한 지속적인 하부지반의 침식을 가져오는 원인으로 판단되며, 모델에 제시된 저질의 물성치에 대한 보정의 필요성이 요구된다.

이상의 결과들은 본 수치해석에서 나타난 것들이다. 일정 흐름장에서 사각어초 주변의 유속의 분포특성이나 유체역학적 특성 및 초기 세굴형상 등은 기

존의 연구와 정성적으로 일치하는 경향을 보였다. 그러나 어초의 안정성에 관한 측면에서 인공어초에 대한 주요 피해사례가 세굴이나 매몰이라는 점을 감안하여 인공어초에 대한 본 수치모델의 적용성을 향상시키기 위해 향후 연구·검토 되어져야 할 과제들을 다음과 같이 정리하면서 본 논문의 결론을 맺고자 한다.

첫째, 본 연구의 결과에서도 언급하였듯이, 외력 작용에 의한 구조물의 거동 특성에 대한 보완이 필요하다. 일반적으로 인공어초의 세굴에 대한 주요 변수의 하나로써 지속시간을 들 수가 있는데, 중력장에서 지속시간에 따른 어초 주변의 저질의 이동과 유속의 변동으로 인해 발생하는 구조물 거동은 필연적인 현상이며, 이는 구조물 주변의 세굴현상에 중요한 영향을 미친다.

둘째, 저질 입경의 크기에 따른 본 수치모델의 적용성에 대한 연구가 필요하다. Flow-3D 모델에서 제안된 저질에 대한 입력변수는 사질지반에 한하고 있으나, 기존의 수리실험 결과에서는 저질입경의 크기에 따른 구조물 주변의 세굴특성이 다르게 나타나고 있다.

셋째, 파·흐름 공존장에서 인공어초의 안정성에 관한 수치적 연구가 필요하다. 흐름장 및 파랑장에서의 주요 영향인자들에 대한 상호작용 및 특성을 명확히 파악해서 보다 종합적이고 체계적인 이론의 정립이 요구되어 진다.

## 참고문헌

- Bernard Le Mehaute (1976) : "An introduction to hydrodynamics and water waves". SPRINGER-VERLAG.
- C. W. Hirt, B.D. Nichols, and N.C. Romero (1971) : "Calculating Three-Dimensional Free Surface Flows in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures", *Journal of Computational Physics*, Vol. 12, pp.234-246.
- F.H. Harlow and J.E. Welch (1965) : "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow", *The Physics of Fluids*, Vol. 8, pp.2182-2189.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D., (1981) : "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries". *J. Comp. Phys.* 39, 201.
- Hirt, C.W., Amsden, A.A., and Cook, J.L., (1974) : "An Arbitrary Lagrangian- Eulerian Computing Method for all Flow Speeds". *J. Comp. Phys.*, 14, 227.
- Hirt, C.W., Cook, J.L. and Butler, T.D., (1970) : "A Lagrangian Method for Calculating the Dynamics of an Incompressible Fluid with Free Surface". *J. Comp. Phys.* 5, 103.
- Ingsrisawang, V., M. Ban, H. Kimura (1995) : "Comparative study on the sinking of artificial reefs by local scour between laboratory and field experiments. *Fisheries Engineering*". 32(2), 95-103.
- J. N. Newman : "Marine Hydrodynamics". The MIT Press.
- John B. Herbich, Robert E. Schiller Jr., Wayne A. Dunlap, Ronald

- K.Watanabe (1984) : “Seafloor scour - Design guidelines for ocean-founded structures”. MARCEL DEKKER, INC.
- 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. of ECOSSET'95, 168-173.
- Kimura, H., V. Ingsrisawang, M. Ban (1994) : “A study on the local scour of cylinder artificial fish reefs”. Fisheries Engineering, 31(1), 33-40.
- Koyma H. and K. Iwata (1985) : Estimation of water particle velocities by a modified transfer function method. Coastal Engineering in Japan, 28, 1-13
- Nian-Sheng Cheng, B. Mutlu Sumer, Jorgen Fredsoe (2003) : “Investigation of bed shear stress subject to external turbulence”. International Journal of Heat and Fluid Flow 24(2003) 816-824.
- Nichols, B.D. and Hirt, C.W. (1971) : “Calculating Three-Dimensional FreeSurface Flows in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures”. *J. Comp. Phys.* 12.
- Rodi, W. (1980) : “Turbulence Models and their Applications in Hydraulics”, International Association for Hydraulic Research(IAHR).
- Subhasish Dey, Abdul Karim Barbhuiya (2005) : “Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical-wall abutment.” Flow Measurement and Instrumentation 17.
- 工藤基善 等 (1980) : 日向灘中部沿岸の人工魚礁水調査結果. 水産土木, 17(2), 9-15.
- 棋木 亨 (1984) : “漁礁周辺の局所洗掘とその対策工法について”. 第31回海岸工學講演會論文集, 30, 345-349.

- 棋木 亨 (1991) : “波と漂砂と構造物”. 技報堂出版.
- 大西外明, 松本要一 (1983) : “魚礁ブラクの抗力係數實驗的檢討”. 水産土木, 20(1), 7-14.
- 上北征男, 明田定滿 (1985) : “角形魚礁に作用する流體力の特性について”. 第32回海岸工學講演會論文集, 643-646.
- 松見吉晴 (1991) : “着底式魚礁に作用する流體力に關する研究”. 海岸工學論文集. 38, 801-805.
- 김헌태, 윤상준 (2001) : “비정상 흐름-파랑 공존장의 인공어초 침하특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, vol.15/3 p.28-34
- 김현주 (1995) : “연안 생태계제어 구조물의 안정성과 기능 극대화를 위한 기초적 연구”. 부산수산대학교 해양공학과 공학박사 학위논문.
- 류청로, 장선덕, 임기봉 (1986) : “인공어초의 규모와 배치에 관한 연구”. 부산수산진흥원 연구보고 제38호 별쇄.
- 류청로, 이익효, 김현주, 정진호 (1993) : “수중스산시설물에 작용하는 유체력 및 지반거동의 동적해석”. 한국해양공학회 학술발표논문 초록집, 101-105.
- 류청로, 김현주 (1994) : 착저식 인공어초에 작용하는 파력특성에 관한 연구. 한수지, 27(5), 605-612
- 류청로, 김현주, 이한수, 신동일 (1997) : 생태계 제어 시설물의 설계 및 배치 최적화(2) - 흐름장에서의 인공어초 침하 및 매물 특성-. 한수지, 30(1), 139-147
- 양찬규, 김현주 (2000): “침선어초 주위의 유동특성에 관한 연구”. 한국해양공학회지, 제14권 제4호, pp 9~16.
- 윤상준 (2001) : “비정상 흐름장의 인공어초 침하특성에 관한 실험적 연구”. 부경대학교 해양공학과 공학석사 학위논문.

이정우, 배헌민, 김창길 (1995) : “인공어초 모형의 유체역학적 특성 연구”. 수  
진연구보고, 49, 1-6.

수산청 (1994) : “해양목장화를 위한 적정어초 및 설계기술개발”.