

70026020

GOVP1200819465

서남해안에서의 인공용승류 발생 효과에 관한 연구

The Study on the Effect of Artificial Upwelling  
at the Southwestern Coastal Area

목포해양대학교

해양수산부

# 제 출 문

해양수산부 장관 귀하

본 보고서를 “서남해안에서의 인공용승류 발생 효과에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2008년 4월 일

주관연구기관명 : 목포해양대학교

주관연구책임자 : 오 남 선

연 구 원 : 최 익 창

연 구 원 : 이 승 환

여 백

# 요 약 문

## I. 제 목

서남해안에서의 인공용승류 발생 효과에 관한 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

용승류가 형성되는 지역은 영양염이 풍부하게 공급되어 식물플랑크톤이 증가하고 이에 따라 거대한 어장이 형성된다. 최근에는 이와 같은 원리를 이용하여 대규모 해양 구조물을 이용하여 인공적으로 용승류를 발생시키는 사업이 일본의 경우 4개 지구에서 사업이 진행되었으며 우리나라도 남해안 거제도 소매물도 앞바다에 블록을 이용한 대규모 구조물을 설치하여 인공용승류사업을 시작하였다. 우리나라는 해역별로 그 특성이 달라 해역에 따라 조류와 해류의 흐름이 다르게 나타난다. 따라서 이 연구에서는 우리나라의 서남해역에 대하여 인공용승류에 의한 어장조성사업의 기초연구를 실시하고자 한다.

## III. 연구개발 내용 및 범위

이 연구에서는 문헌자료를 통하여 해역의 수심과 유속을 고려하여 어장조성사업이 실시될 수 있는 대표지역을 선정하고자 한다. 다음으로 기존의 사업을 바탕으로 구조물의 적절한 단면의 형상과 크기를 선정하고자 한다. 위와 같이 결정된 대상해역과 인공구조물의 단면을 입력자료로하여 인공용승 효과를 검증하기 위하여 수치해모의를 실시하고자 한다. 그 결과를 이용하여 검사단면에서 영양염 농도의 변화를 관찰하여 인공용승효과를 검증하고자 한다.

## IV. 연구개발 결과

### 1. 모형의 적용

적용모형 : FLOW-3D(난류모형 : RNG k- $\epsilon$ 모형)

수심 : 60m, 조류속 : 0.5m

모델링 영역 : 1,000m(x방향) $\times$ 500m(y방향) $\times$ 60m(z방향)

구조물의 크기 : H=14m, H=17m

표1 적용한 단면의 제원

단면특성	크기(m)
길이	120
사면경사	1:2.5
높이	14, 17
산정간의 거리	50, 35

2. 모형의 결과

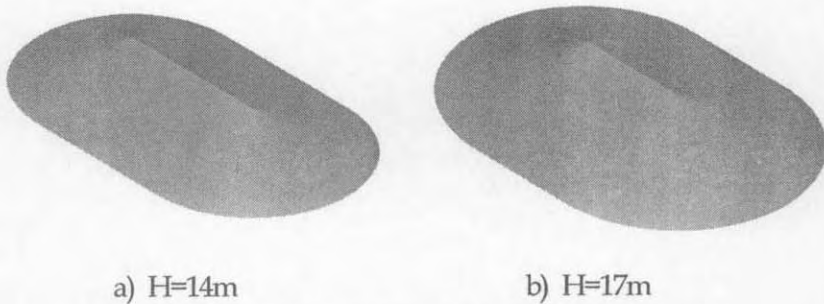


그림1. 적용 구조물의 형상

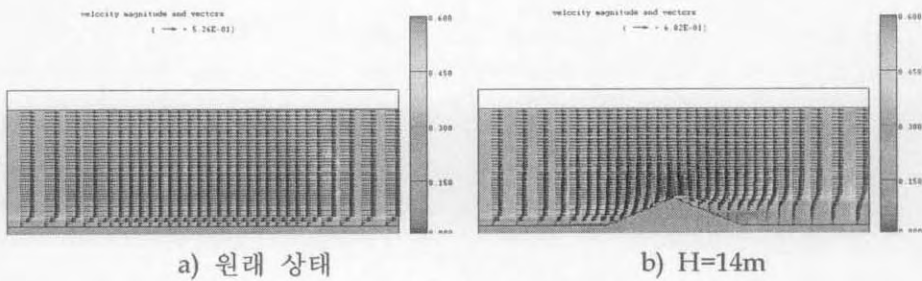


그림2. 유속벡터도

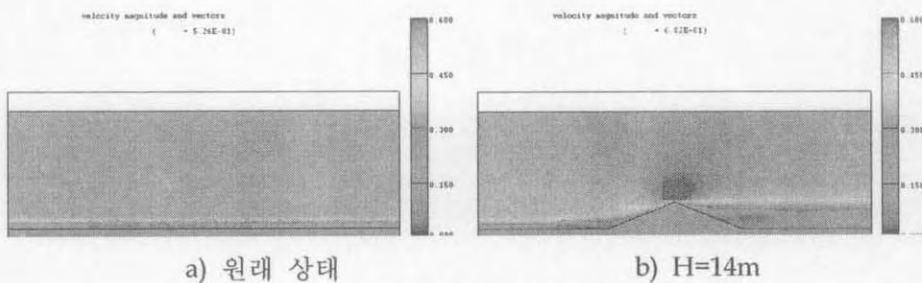


그림3. Marker의 이동양상

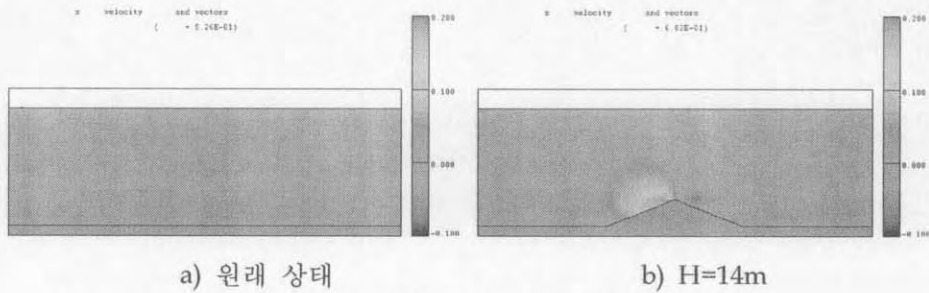


그림4. 연직유속의 등고선도

H=14m일 경우의 연직유속의 최대값은 0.204m/s

H=17m일 경우의 연직유속의 최대값은 0.210m/s

- 수평유속의 크기에 비하여 연직유속의 최대값은 약 40%의 값을 가지며 구조물의 상승부에서 발생하는 것으로 나타남.
- 영양염의 이동은 현재 상태에서는 Marker를 통하여 이송현상만을 재현하였으며 확산현상을 고려하기 위한 연구가 진행중임.
- 최종적인 모형의 완성을 위해서는 현지조사와 관측자료를 이용하여 검증과정 등이 필요함.

#### V. 연구개발 결과의 활용계획

이 연구는 향후 서남해역 또는 다른 지역에서 인공용승류사업이 실시될 때 사전에 활용될 수 있다. 대상해역, 대상단면에 따른 인공용승효과를 사전에 산정함으로써 대상해역에서 사업의 경제성 여부의 판단, 대상해역에 필요한 비용대비 최적단면의 산정 등을 통하여 인공용승류사업의 실시에 크게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## SUMMARY

### I. Title

The study on the Effect of Artificial Upwelling at the Southwestern Coastal Area

### II. Purpose and Necessity of Research

Upwelling area, plankton is provided fluently, make best fishing ground. The basic study about artificial development of fishing ground using artificial upwelling will be performed.

### III. The Scope and Contents of Research

Firstly, the height and velocity will be researched. Secondly, the best section size and shape will be selected. Finally, artificial effect will be verified.

### IV. The Result

#### 1. 모형의 적용

Model : FLOW-3D(Turbulence model : RNG k- $\epsilon$  model)

Height : 60m, Current velocity : 0.5m

Modeling area : 1,000m(x direction) $\times$ 500m(y direction) $\times$ 60m(z direction)

Size of Structure : H=14m, H=17m

Table 1 Characteristics of Section

Characteristics	Size(m)
Length	120
Slope	1:2.5
Height	14, 17
Mound Length	50, 35

2. Result

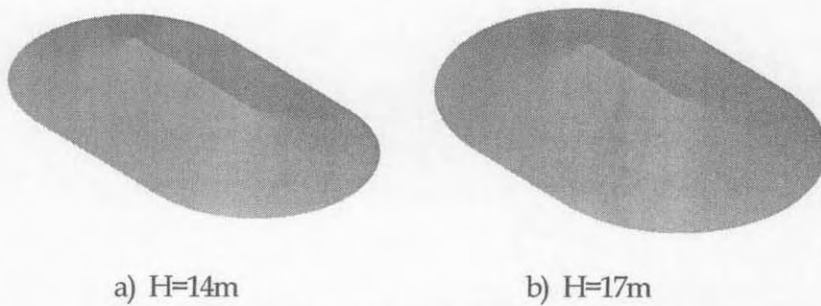


Fig1. Mound Shape

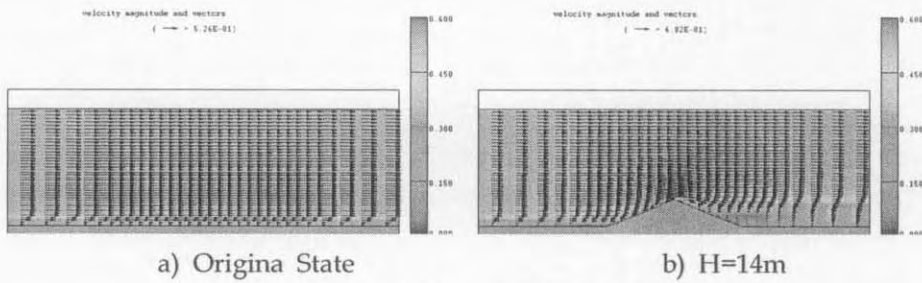


Fig. 2 Current Vector

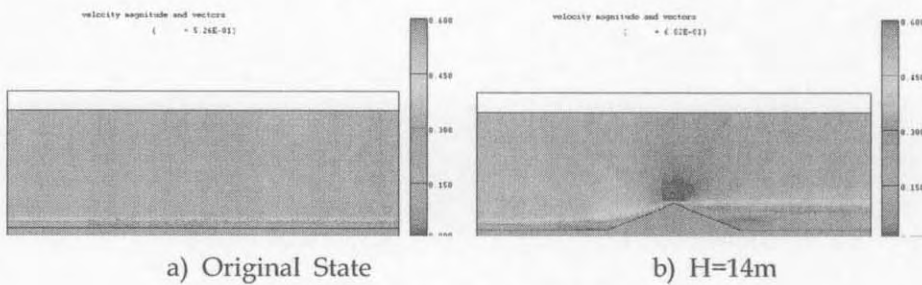


Fig3. Movement of Marker



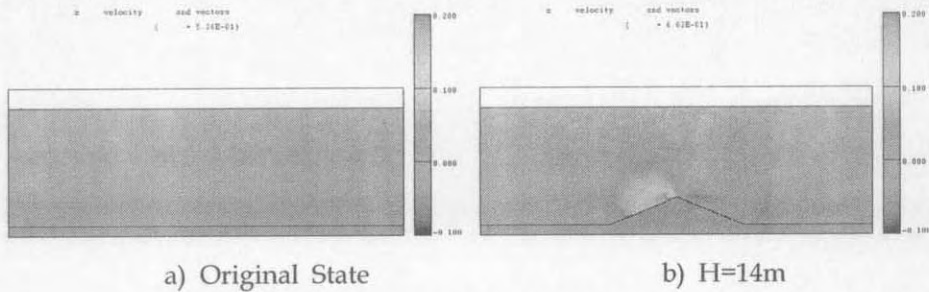


Fig4. Contour of Vertical Velocity

When, H=14m : Max. vertical velocity = 0.204m/s

H=17m : Max. vertical velocity = 0.210m/s

- Maximum vertical velocity is about 40% of horizontal velocity
- In order to evaluate nutrient movement, advection effect was considered
- Verification with field study will be need in future research

#### V. Using Plan

When This research will be used

When artificial upwelling project is planned, this research will be used.

# CONTENTS

## Chapter 1 The Summary of Research

### 1.1 The Purpose and Necessity of Research

### 1.2 The Constets of Research

## Chapter 2 The Present State of Research

## Chapter 3 The Selection of Location and Design Section

### 3.1 The Procedure of Project

### 3.2 The Selection of Location

### 3.3 The Investigation of Mount Axis

### 3.4 The Selection of Design Section

### 3.5 Determination of Best Section

### 3.6 Evaluation of Current

## Chapter 4 The Evaluation of Upwelling Effect

### 4.1 Evaluation Precedure and Method

### 4.2 Selection of Model

### 4.3 Result of Model

## Chapter 5 Achievement and Contribution of Research

## Chapter 6 Using Plan of Research

## Chapter 7 References

여 백

# 목 차

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

### 1.1 연구개발의 목적 및 필요성

### 1.2 연구의 범위

## 제 2 장 국내외 기술개발 및 사업현황

## 제 3 장 사업의 적지 선정 및 설계단면의 선정

### 3.1 사업의 순서

### 3.2 사업의 적지 선정

### 3.3 마운드축의 검토

### 3.4 단면제원의 선정

### 3.5 최적단면의 결정

### 3.6 조류속 검토

## 제 4 장 용승효과의 검토

### 4.1 용승효과의 평가순서 및 방법

### 4.2 모형의 선정 및 개요

### 4.3 모형의 적용 및 결과

## 제 5 장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

## 제 6 장 연구개발결과의 활용계획

## 제 7 장 참고문헌

여 백

# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 1.1 연구개발의 목적 및 필요성

최근들어 일본, 중국 등의 배타적 경제수역 선포, 조업규제강화 등으로 근해어장이 축소되고 있으며 우리나라의 연안역도 도시화, 산업화로 인한 산업 및 생활폐수 등의 유입으로 인하여 어장환경이 해마다 악화되고 있는 실정이다. 따라서 이러한 국내외 어업여건의 변화에 능동적으로 대처하고 연안어업의 경쟁력을 확보할 수 있는 수산 자원 개발과 관련한 기술이 절실히 요구되고 있다.

북남미의 캘리포니아, 칠레, 페루 등의 어장은 심층수가 용승하는 해역으로 용승류에 의하여 영양염이 풍부하게 공급되어 식물플랑크톤이 증가하고 이에 따라 거대한 어장이 형성되는 지역이다. 이들 지역은 해양 전체 면적의 0.1%에 지나지 않으나 세계 어획량의 1/2을 생산하는 곳으로 알려져 있다(金卷精一 and 鈴木達雄, 2001).

보상심도보다 깊은 해수가 유광층으로 용승하는 해역에서는 그 풍부한 영양염의 공급으로 비옥한 해역이 형성되어 식물성 플랑크톤과 해조류가 증식하므로 기초생산력이 증가한다. 그리고 이러한 것을 먹는 동물성 플랑크톤과 어류 등의 고차적인 식물 생산도 증가하여 좋은 어장이 형성된다(中島敏光, 2005).

최근에는 이와 같이 용승류에 의한 대규모 어장이 형성되는 원리를 이용하여 대규모 해양구조물을 이용하여 인공적으로 용승류를 발생시킴으로써 새로운 어장을 조성하는 사업이 진행되고 있다. 일본의 경우 4개 지구에서 사업이 진행중이며 이외에도 새로운 사업이 계획중이다. 우리나라의 경우에도 해양수산부에서 2004년부터 남해안 거제도 소매물도 앞바다에 블록을 이용한 대규모 구조물을 설치하여 인공용승류를 유도하는 사업이 진행중이다.

우리나라는 해역별로 그 특성이 달라 해역에 따라 조석의 크기가 다르고 조류와 해류의 흐름이 다르게 나타난다. 따라서 이 연구에서는 우리나라의 서남해역에 대하여 인공용승류에 의한 어장조성사업의 기초연구를 실시함으로써 향후 서남해안에서 어장조성사업이 시행될 때 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 1.2. 연구의 범위

이 연구에서는 서남해역의 인공용승류에 의한 어장조성사업의 기초조사로써 간단하게 문헌자료를 통하여 어장조성사업이 실시될 수 있는 대표지역을 선정하고자 한다. 적절한 대상해역을 선정하기 위해서는 해당 수역의 물리, 환경조건, 어장조업실태 등을 종합적으로 검토하여야 하나 이 연구에서는 우선 해당 수역의 물리적인 조건인 수심과 유속만으로 대상 후보지를 선정하고자 한다.

다음으로 선정된 대상 해역에 대하여 기존에 제시된 자료를 바탕으로 구조물의 적절한 단면의 형상과 크기를 선택하고자 한다. 인공구조물의 크기는 클수록 용승효과가 큰 것으로 알려져 있으므로 실제 사업에 있어서는 사업비용과 사업에 따른 경제적 효과를 고려하여 대상단면의 형상과 크기 등이 결정되어야 하나 이 연구는 기초연구의 성격으로 기존 사업과 문헌 등으로 통하여 적절한 단면을 가정하고자 한다.

위와 같이 결정된 대상해역과 인공구조물의 단면을 입력자료로하여 인공용승 효과를 검증하기 위하여 수치해석을 실시하고자 한다. 대상해역의 시간에 따른 흐름변화를 모의하기 위해서는 3차원 해수유동 수치모형실험이 필요하다. 이 논문에서는 용승 효과의 검증에 주 목적을 가지고 3차원 흐름의 거동을 모의할 수 있는 FLOW-3D 모형을 이용하였다. 또한 검사단면을 설정하고 검사단면에서 영양염 농도의 변화를 관찰하여 인공용승효과를 검증하고자 한다.

이와 같은 연구는 향후 서남해안에서 실제 인공어장 조성사업이 실시될 때 본격적인 연구와 사업에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 및 사업현황

대규모 해양구조물에 의한 인공용승류의 유도과 이에 따른 어장조성사업은 일본에서 시작되었다. 일본의 경우 長崎縣 生月沖北松海域에서 처음 시범사업이 실시되었으며 1997년에서 2000년도에 걸쳐 시공이 되었다. 이후 일본의 수산기반정비사업에 의하여 長崎縣 北部地區宇久北・對馬沖지역에서 2003년에서 2005년에 걸쳐 경량콘크리트 블록(석탄회 블록)을 이용하여 인공구조물을 시공하였다. 또한 사석을 이용하여 2005년에서 2006년에 걸쳐 長崎縣 西部地區五島西지역에, 2004년에서 2005년에 걸쳐 鹿兒島縣 薩摩地區阿久根沖지역에 인공구조물을 시공하였다.

우리나라에서는 신정교 등(2004)이 일반 사석, TTP, 이비블록의 구조양식에 대하여 2차원수조에서 실험을 통하여 인공 용승효과를 확인하였다. 인공 용승효과의 확인은 연직방향의 유속성분 변화와 연직방향의 DO 변화를 측정을 통하여 이루어졌다. 그 결과 모든 경우에 대하여 연직방향의 유속성분이 수평방향의 유속성분보다 크게 유발됨을 확인하였고 DO의 측정치도 증가되는 효과를 확인하였다.

우리나라에서는 해양수산부(2005, 2006, 2007)가 '인공용승류를 이용한 어장환경 개선사업'과제의 일환으로 2004년부터 3년에 걸쳐 석탄회콘크리트블록을 이용하여 50억 원의 예산을 들여 인공구조물을 시공하였다. 사업해역은 남해안의 거제도 소매물도 앞바다로 길이 93m, 높이 18m, 폭 45m의 인공구조물을 시공하였다. 이 사업은 구조물의 효과를 평가하기 위하여 수치모델 등을 이용한 물리환경조사와 수질환경조사, 생물상 및 어류상을 조사하였으며, 자원량 조사를 위하여 구조물 설치전후에 대한 수중모니터링을 실시하였다. 또한 구조물의 해수반응을 평가하기 위하여 석탄회 콘크리트 블록의 안정성과 블록에서의 중금속 등 용출에 따른 해수반응을 조사하였다.

표1에 지금까지 시공된 일본과 우리나라의 인공용승류에 의한 어장 조성을 목적으로 한 인공구조물 시공사례를 비교하였다. 조성소재는 사석 또는 석탄회 콘크리트블록을 이용하였으며, 사업해역의 수심은 약 60 - 90m인 지역으로 나타났다. 조성된 인공구조물의 높이는 약 14m - 18m 정도, 구조물의 길이는 90m - 130m, 산정간 거리는 60 - 75m로 나타났다.



표 21 우리나라와 일본의 인공구조물에 의한 어장조성사업 사례

위치	長崎縣 生月沖 北松海域	長崎縣 北部地 區宇久北・對 馬沖	長崎縣 西部地 區五島西	鹿兒島縣 薩摩 地區阿久根沖	거제도 소매물 도 앞바다
조성소재	석탄회콘크리 트블록 (6ton/개)	석탄회콘크리 트블록 (6ton/개)	사석 (1000kg/개)	사석 (500kg/개)	석탄회콘크리 트블록 (1900kg/개)
수심	약 82m	宇久北 85m 對馬沖 89m	약 85m	약 63m	54m-64m
조성규모	높이 11.5m 길이 130m 사면경사 1:3	높이 15m 산정간거리60m 길이 126m 사면경사 1:2,1:2.41	높이 15m 산정간거리75m 길이 150m 사면경사 1:2.5	높이 14m 산정간거리75m 길이 145m 사면경사 1:2.5	높이 17m 길이 90m 폭 50m
시공년도	1997-2000	2003-2005	2005-2006	2004-2005	2004-2006

## 제 3 장 사업의 적지 선정 및 설계단면의 선정

### 3.1 사업의 순서

인공구조물에 의한 어장조성사업의 순서는 그림 1과 같다. 사업의 실시를 위해서는 제일 먼저 현지조사를 실시하여 사업의 적지를 선정하게 된다. 사업 적지를 선정한 후에는 설계하고자 하는 설계단면을 검토하게 된다. 설계단면의 검토는 조성지점의 검토, 마운드축의 검토, 단면제원의 검토 등을 포함하게 된다. 사업적지와 설계단면이 결정되면 인공구조물을 시공한다. 시공이 끝나후에는 지속적인 사후 모니터링을 통하여 용승류 효과를 확인하고 검증한다.

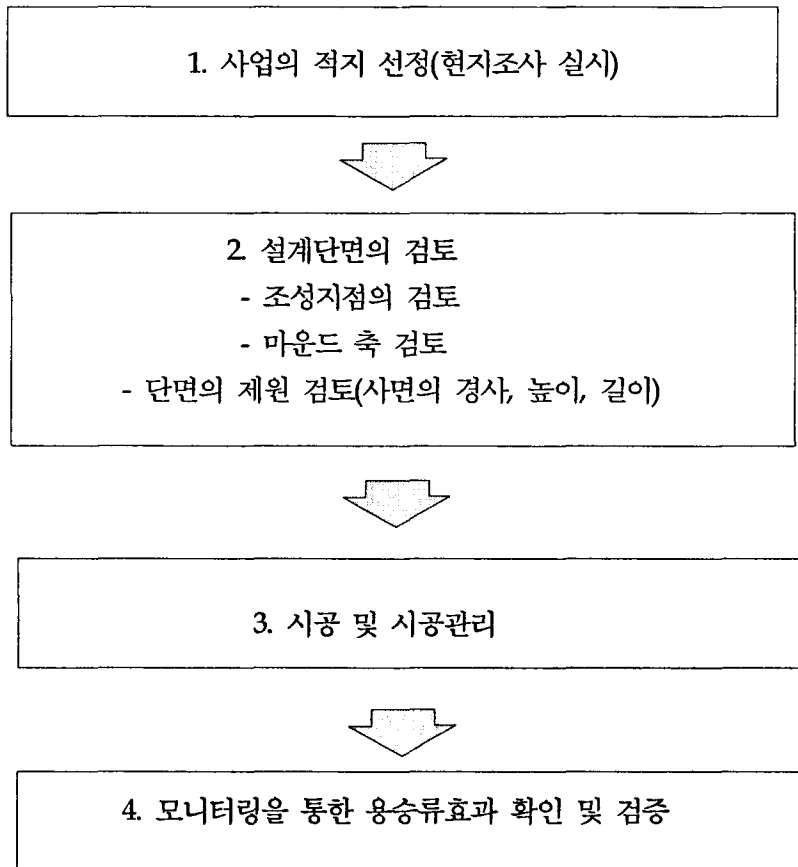


그림 3.1 사업의 순서(武田眞典 and 左々木洋之, 2006)

### 3.2 사업의 적지 선정

이 연구에서는 서남해역의 인공용승류에 의한 어장조성사업의 기초조사로써 간단하게 문헌자료를 통하여 어장조성사업이 실시될 수 있는 대표지역을 선정하고자 한다. 실제 사업의 시행에 필요한 적절한 대상해역을 선정하기 위해서는 표 3.1과 같이 해당 수역의 물리, 환경조건, 어장조업실태 등을 종합적으로 검토하여야 한다.

사업의 적지로 선정되기 위해서는 기본적으로 현재 해역에서 이루어지는 조업의 실태와 함께 원격탐사 등의 방법을 통하여 클로로필a의 분포 등을 조사함으로써 플랑크톤의 증식에 의한 어업자원의 증대가 예상되는 지역을 선택하여야 한다. 또한 사업실시에 적절한 수심을 선택하여야 한다. 이러한 조건을 만족하는 수십 Km 정도의 광역 대상해역을 선정한 후 그 안에서 사업의 시행에 적합한 물리, 환경 조건을 만족하는 수백m에서 수km에 이르는 조성 지점을 결정하게 된다.

사업의 적지로 선정되기 위한 다른 물리, 환경 조건으로는 상층에 비해 저층에 다량의 영양염의 존재하는 곳이어야 하며, 저층의 유속이 비교적 빠른 해역, 상하층의 밀도차가 크지 않은 지역, 조성후에 매물, 이동이 발생하지 않는 지반을 갖춘 지역 그리고 기복이 없는 평탄한 해저면으로 시공에 용이한 조건을 갖춘 지역이어야 한다.

이와 같이 설정된 지점에 적절한 단면을 상정하고 수치해석 등을 통하여 용승류 효과를 확인한 후 경제성을 검토함으로써 최종적인 사업 적지를 선정할 수 있다.

표 3.1 사업 대상 해역의 선정을 위한 기본적인 사항(武田眞典 and 左々木洋之, 2006)

항목	내용
기본조건(조건에 적합한 수십 Km의 광역해역을 선정)	
어업조업 실태	조업실태, 원격탐사에 의한 클로로필a의 분포 파악 등을 통해 플랑크톤의 증식에 의한 어업자원 증대가 예상되는 해역
수심	사업 실시에 적절한 수심이 있는 곳
물리, 환경 조건(수백m~수km의 조성 지점 선정) - 현지조사 필요	
영양염류	상층에 비하여 저층에 다량의 영양염이 존재하는 지역
유황	저층의 유속이 비교적 빠른 지역
밀도	상하층의 밀도차가 그다지 크지 않은 지역
지반조건	조성후에 매물, 이동이 없는 지반
해저지형	기복이 없는 평탄한 해저면이 시공에 용이

이와 같이 사업 적지를 선정하기 위해서는 여러 조건을 현지조사 등을 통하여 검토하여야 하나 이 연구가 인공용승류 조성을 위한 기초연구이며, 한정된 시간과 예산을 고려하여 수심도와 조류도 그리고 해도에 나타난 어장 현황 등을 참고하여 사업 대상 후보지를 표3.2과 같이 선정하였다. 대상해역은 사업의 경제성을 고려하여 육지에서 가능한 멀리 떨어지지 않은 곳, 최소 50m 이상의 수심이 확보되는 광역 해역, 인근 해역의 최대 유속이 대략 2kn 이상되는 해역 그리고 인근에 어장이 형성된 지역 중에서 선정하였다.

표 3.2 사업 적지의 선정

위치	수심(m)	최대 유속(kn)
진도군 서남쪽 맹골군도 부근	55-60	3
대흑산도 부근	70-80	3
거문도 부근	50-70	2

### 3.3 마운드축의 검토

마운드축은 용승효과를 최대로 얻을수 있는 방향으로 설정하게 되며, 동일단면의 마운드일 경우에도 해저지형, 흐름의 방향 등에 따라 용승효과가 다르게 된다. 마운드 축의 일반적 설정방법은 계절에 따른 흐름방향의 차가 없는 경우 흐름방향에 직각 방향으로 하며, 계절에 따른 흐름방향의 차가 조금 있는 경우 연간 용승효과량에 기여도가 큰 봄, 여름의 흐름방향에 직각방향으로 한다. 그리고 조류와 항류의 흐름방향이 크게 다른 경우, 계절에 따라 흐름방향이 크게 다른 경우, 지형경사방향과 흐름방향이 크게 다른 경우에는 마운드축을 여러개로 설정하여 비교검토하는 것이 필요하다(武田眞典 and 左々木洋之, 2006).

실제 사업에서는 수심측량과 유속 관측 등을 통하여 해저지형과 흐름의 방향을 파악한 후 적절한 마운드 축의 방향을 선정하여야 한다. 이 연구에서는 정확한 사업 지점이 선정되지 않은 관계로 조류의 흐름에 직각방향으로 마운드 축을 설정하는 것으로 가정하여 용승류의 효과를 검토하기로 한다.

### 3.4 단면제원의 선정

인공구조물의 단면은 조성소재에 따라 가능한 사면경사, 시공방법, 시공비용이 다르다. 단면형상에 따라 용승효과가 다르기 때문에 단면제원을 검토할때에는 사면경사, 높이, 연장을 여러곳 설정하여 각 설정단면에 대한 비용대비 효과분석을 실시하여 그 결과를 비교검토하여 최적단면 결정하게 된다. 설정한 단면에 목표한 결과가 얻을수 없는 경우에는 단면제원을 재설정하여 경우에 따라 마운드축과 조성지점을 재검토하는 것이 필요하다(武田眞典 and 左々木洋之, 2006).

이 연구에서는 단면제원의 검토를 위하여 표3.2를 참조하여 어느 지점에나 적용될 수 있도록 해역의 수심을 60m로 가정하였다. 지금까지 조성된 인공용승류 사업(표 21)에서 단면의 길이가 일본의 경우 126m~150m이고, 해양수산부(2005)에서 구조물의 크기 확대의 필요성을 지적한 점을 고려하여 120m로 가정하였다. 표 21에서 사면경사는 사업에 따라 1:2~1:3의 분포를 보이므로 1:2.5로 가정하였다.

당연히 예상되는 결과로 지금까지의 연구결과에서 단면의 규모가 사업의 효과에 비례하는 것으로 지적되어 왔다(해양수산부, 2005). 지금까지의 사업에서 단면의 규모를 결정하는 제일 중요한 인자의 하나인 단면의 높이는 일본의 시범사업을 제외하고는 14m~17m로 설계되었다. 따라서 이 연구에서는 단면의 높이 변화에 따른 인공용승 효과의 변화를 파악하기 위하여 단면의 높이를 14m와 17m로 각각 달리하여인공용승

의 효과를 검토하기로 한다. 지금까지의 가정을 바탕으로 계산하면 단면의 높이가 14m일 때 산정간의 거리는 50m 그리고 단면의 높이가 17m일 때 산정간의 거리는 35m이다. 이와 같이 선정된 단면 가운데 산정간의 거리가 50m일 때의 단면도를 그림 3.2와 그림 3.3에 나타내었다.

표3.3 적용하고자 하는 단면의 제원

단면특성	크기(m)
길이	120
사면경사	1:2.5
높이	14, 17
산정간의 거리	50, 35

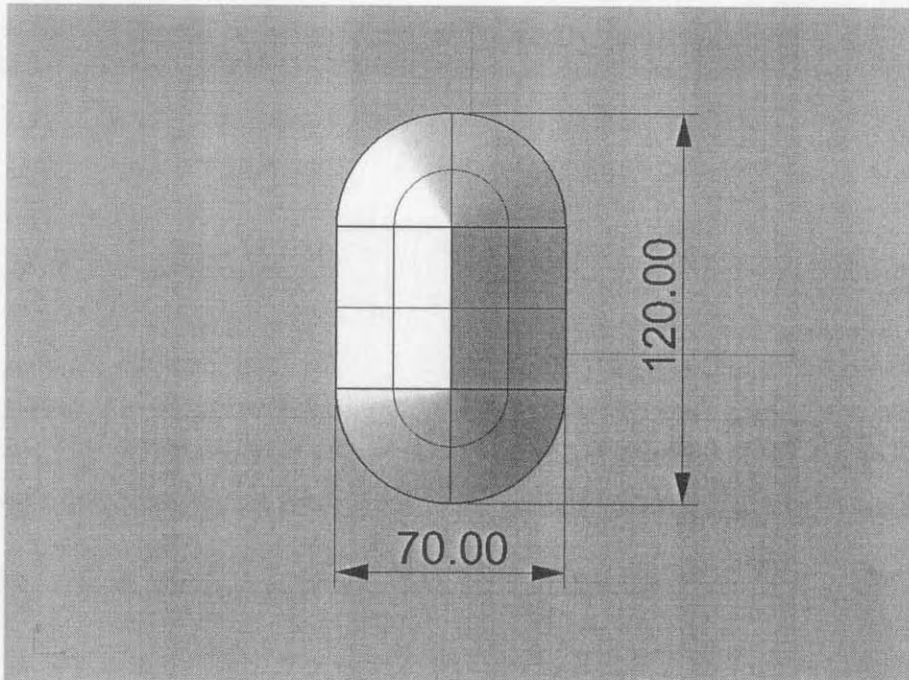


그림 3.2 선정 단면의 입체도 예

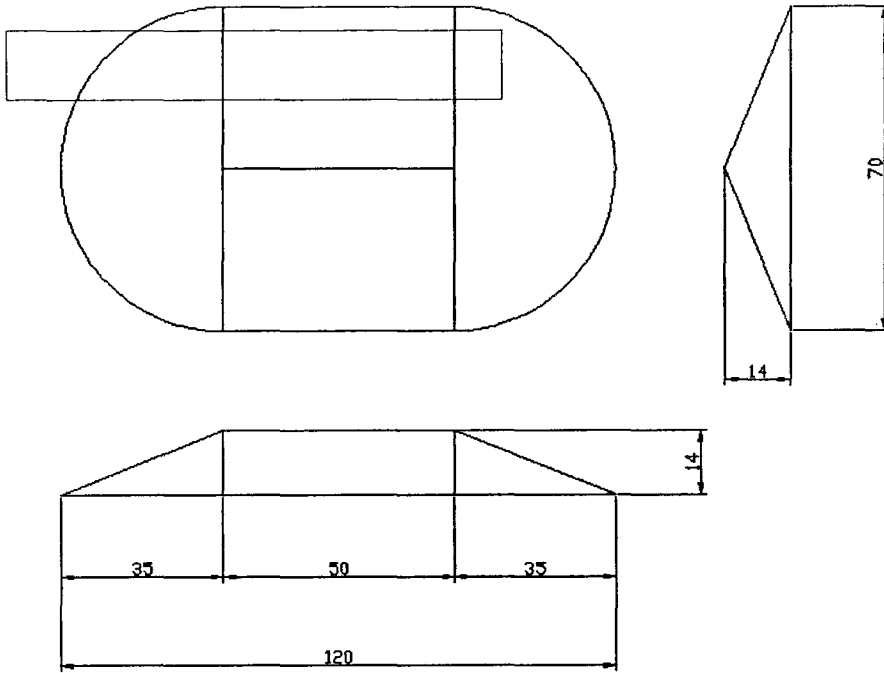


그림 3.3 인공구조물의 단면도 예

### 3.5 최적단면의 결정

3.4절에서 검토한 단면에 대하여 실제 설계에 필요한 최적단면을 결정하기 위해서는 각 설정단면에 대한 비용대 효과분석을 실시하여 비교 검토하여야 한다. 설정된 단면에 대하여 필요한 효과를 얻을 수 없는 경우에는 조성지점, 마운드축 등을 다시 검토하여야 한다. 이러한 순서에 의하여 최적단면을 결정하는 순서도는 그림 3.2와 같다(武田眞典 and 左々木洋之, 2006).

### 3.6 조류속 검토

대상해역의 조류속은 해역에 따라 다르나 최대유속이 대략 2kn(1.04m/sec)정도인 점을 감안하여 0.5m/sec의 흐름이 있는 것으로 가정하여 용승류 효과를 계산하였다.

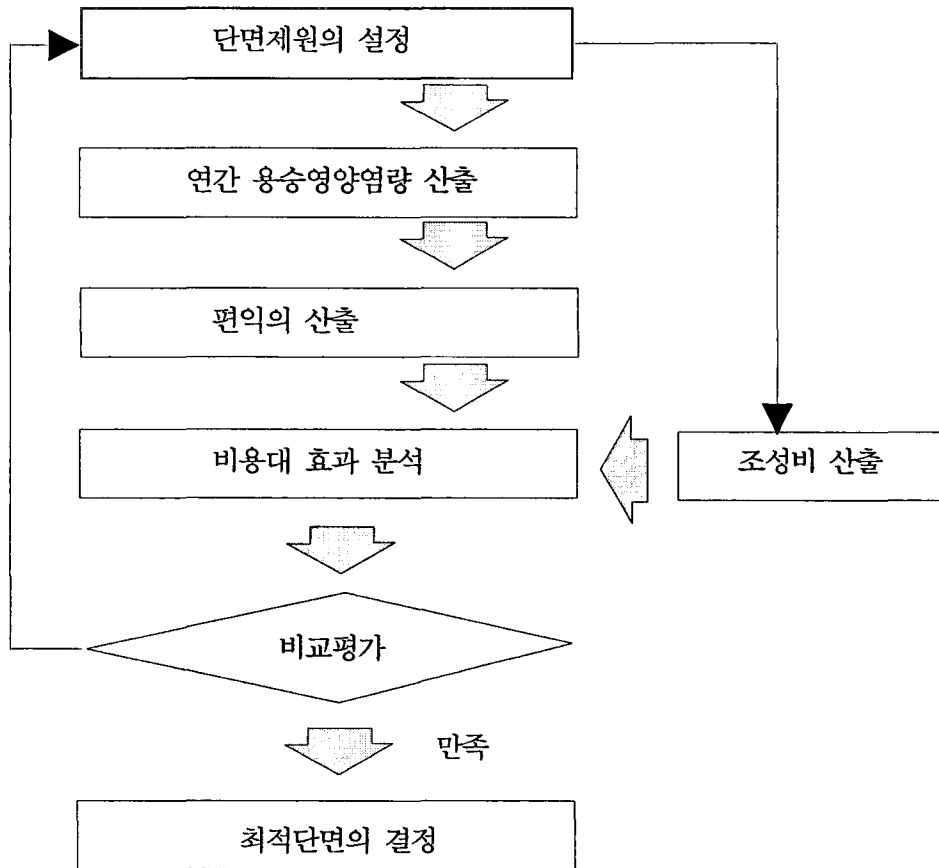


그림 3.2 단면제원의 검토 순서(武田眞典 and 左々木洋之, 2006)



## 제 4 장 용승효과의 검토

인공구조물 건설에 의한 어장조성 사업의 수행을 위해서는 계획단계에서 마운드의 규모와 형상에 따른 사업의 효율성을 판단하는 것이 필요하다. 사업의 효율성을 판단하기 위해서는 구조물 시공에 따른 용승효과가 검토되어야 한다. 인공적인 용승효과를 직접적으로 예측하기는 어려우므로 보통 시공 전후의 영양염량의 변화를 예측하여 용승효과를 판단하게 된다. 즉 식물성플랑크톤이 생존가능한 유광층내에서 수산물의 기초생산자인 식물성플랑크톤의 증식에 필요한 영양염량의 변화를 예측함으로써 용승효과를 간접적으로 판단하게 된다.

### 4.1 용승효과의 평가순서 및 방법

용승효과를 예측하기 위한 수치모의 순서는 그림4.1과 같다. 수치모의를 수행하기 위하여 먼저 마운드의 형상과 계절변동 등의 기본조건과 유속, 밀도분포, 영양염농도 분포 등의 경계조건을 설정한다. 그리고 수치해석 프로그램을 이용하여 용승과정을 모의하게 된다. 그리고 보상심도와 검사단면을 결정한 후 모의된 결과를 바탕으로 용승되는 영양염량을 산정함으로써 간접적으로 용승효과를 검토하게 된다. 시뮬레이션을 실시하는 데에는 밀도효과, 비정상변동, 난류확산 등에 관하여 충분히 고려하고 실제 현상에 대응하는 수치모델링을 선택하는 것이 필요하다.

#### 가. 기본조건

시공하고자 하는 마운드의 규모와 형상에 따른 용승류의 효과를 검토하는 것이 필요하다. 따라서 수치모의를 위한 기본조건으로 시공하고자 하는 마운드의 높이, 산정간의 거리 그리고 사면경사를 변화시킨 복수의 계산케이스를 선정하는 것이 필요하다. 또한 계절별로 물리환경의 조건이 다르면 계절을 고려하여야 한다.

#### 나. 경계조건의 결정

수치모의에 필요한 입력조건으로 유속, 밀도, 영양염 농도의 분포가 필요하다. 실효역에 걸친 흐름은 조류성분과 향류성분이 혼재하여 유향, 유속이 항상변화한다. 그러나 복잡한 흐름장을 시뮬레이션에 의해 재현하는 것은 어렵다. 따라서 지금까지의 사례에서는 현지조사결과에 근거하여 일방향정상류 또는 규칙적으로 변화하는 흐름(왕복류)에 근사하여 검토되어 왔다. 또한 현지조사에서 얻어지는 수온, 염분의 연직

분포에 기초하여 밀도조건을 설정하고 현지조사에서 얻어지는 영양염의 연직분포에 기초하여 영양염 농도의 분포를 설정하게 된다.

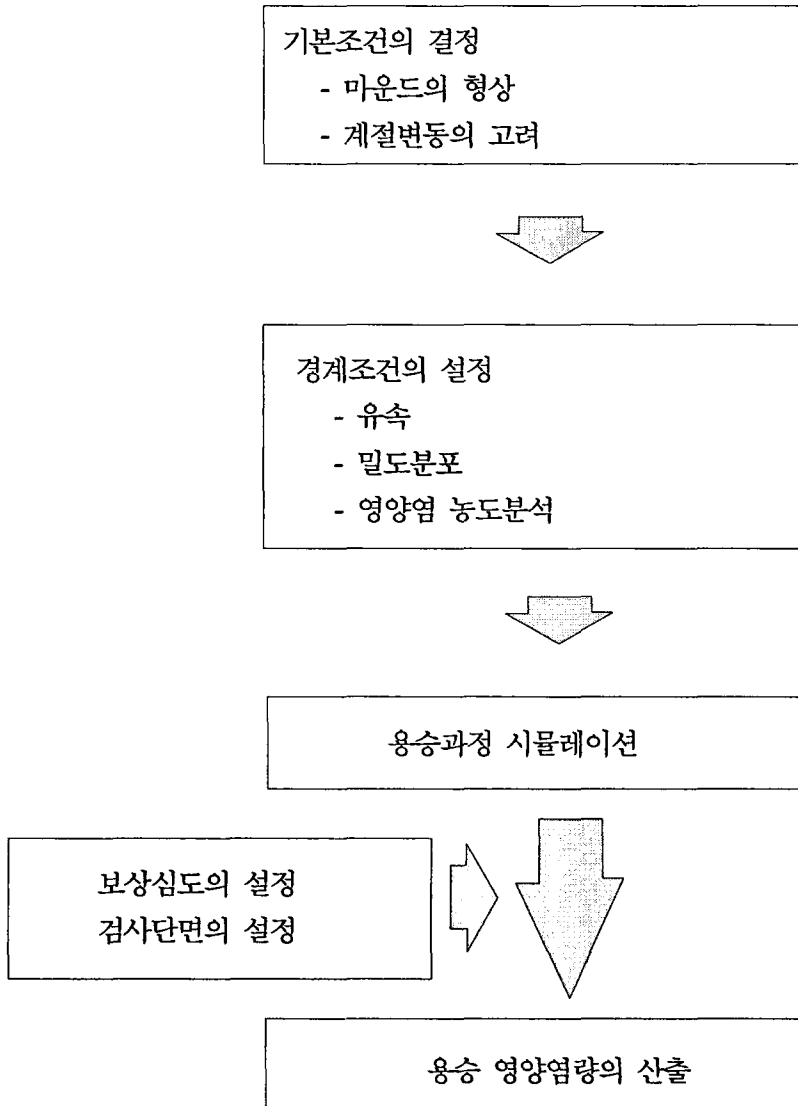


그림 4.1 용승 영양염량 예측 순서도(武田眞典 and 左々木洋之, 2006)

#### 다. 용승효과의 평가

용승효과를 평가하기 위하여 우선 보상심도를 설정한다. 보상심도는 식물플랑크톤에 의한 호흡소비와 광합성생산이 가능한 심도로 식물플랑크톤이 생식 가능한 한계가 된다. 따라서 용승효과의 평가는 보상심도 이내에 증가하는 영양염량을 평가함으로써 수행된다. 보상심도는 아래항목에서 현지조사결과를 기초로 종합적으로 판단하여 결정하게 된다.

- 투명도의 2-3배의 심도
- 광량 감쇄율이 1%가 되는 심도
- 클로로필 a의 농도가 급격히 감소하는 심도

보상심도가 결정되면 영양염량의 변동을 조사하기 위한 검사단면을 결정한다. 검사단면은 마운드에서 흐름방향의 하류측에 걸쳐 흐름축과 수직방향으로 보상심도 이내에 복수의 단면을 설정한다. 용승 영양염량의 산정은 검사단면에서의 영양염농도차(용승후 농도 - 용승전 농도)와 검사단면에 걸친 평균유속 그리고 검사단면적과의 곱에 의하여 산정한다. 이렇게 계산된 검사단면에서의 용승 영양염량값들을 합함으로써 최종적인 용승효과를 평가하게 된다.

## 4.2 모형의 선정 및 개요

대상해역과 인공구조물의 단면을 입력자료로하여 인공용승 효과를 검증하기 위하여 수치해석을 실시하고자 한다. 대상해역의 시간에 따른 흐름변화를 모의하기 위해서는 3차원 해수유동 수치모형실험이 필요하다. 이 논문에서는 용승효과의 검증에 주목적을 가지고 3차원 흐름의 거동을 모의할 수 있는 FLOW-3D 모형을 이용하였다. 또한 검사단면을 설정하고 검사단면에서 영양염 농도의 변화를 관찰하여 인공용승효과를 검증하고자 한다.

### 가. 지배방정식

직교좌표계(x, y, z)에서 비압축성 유체의 3차원 흐름을 해석하기 위한 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \end{aligned} \quad (4.4)$$

여기에서,

$(u, v, w)$  : velocity components in the coordinate directions  $(x, y, z)$

$V_F$  : fractional volume open to flow

$(A_x, A_y, A_z)$  : fractional area open to flow in the coordinate directions  $(x, y, z)$

$\rho$  : density

$\rho_o$  : reference density

RSOR : density source term

$p$  : pressure

$(G_x, G_y, G_z)$  : body accelerations in the coordinate directions  $(x, y, z)$

$(f_x, f_y, f_z)$  : viscous accelerations in the coordinate directions  $(x, y, z)$

$(b_x, b_y, b_z)$  : flow losses in the coordinate directions  $(x, y, z)$

물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 다음과 같은 지배방정식을 만족하는 VOF (volume of fluid) 함수를 정의한다. F가 1인 경우는 검사체적에 유체가 가득한 상태를, 0인 경우는 검사체적에 유체가 없는 경우를 나타내는 것으로 자유수면에서는 F가 0과 1사이의 값을 가진다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right) = FDIF + FSOR \quad (4.5)$$

여기에서,

FDIF : turbulent diffusion term

FDIF : time rate of change of the volume fraction associated the mass source

운동방정식, 에너지, VOF함수의 수송방정식에 사용되는 확산항은 난류확산과 분자확산으로

구분할 수 있다. FLOW-3D에서 난류확산을 산정하기 위하여 제공하는 난류모형은  $k-\varepsilon$ , RNG  $k-\varepsilon$ , LES (Large Eddy Simulation) 모형이다. 본 과업에서는 실무적인 관점에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 RNG  $k-\varepsilon$  난류모형을 사용하였다. 난류확산을 산정하기 위한 난류 운동에너지와 난류확산의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial k}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P + G + Diff - \varepsilon \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \quad (4.7)$$

$$= \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon}{k} (P + CDIS3 \cdot G) + DDif - CDIS2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}$$

여기에서,

P : shear production term

G : buoyancy production term

Diff, DDif : diffusion term

CDIS1, 2, 3 : constants

## 나. 수치모의 알고리즘

지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화 되는데, FLOW-3D는 유한차분법에 FAVOR기법을 도입한 유한체적법의 접근법을 사용한다. 해석 영역을 격자로 나눈 후, 이 격자 단위로 계산이 이루어지는데, 각 격자에 대해서 주어진 압력에 대해 다음 시간에서의 속도를 구하며 이 속도를 이용하여 Poisson 방정식 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정하고 그 후에 자유수면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어나가는 방법을 이용한다. FLOW-3D에서 사용하는 격자계는 그림 4.2와 같다.

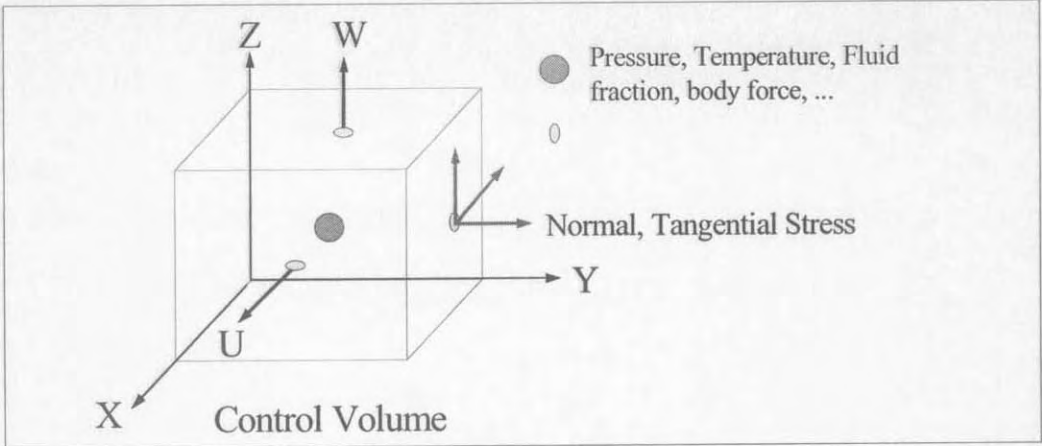


그림 4.2 FLOW-3D에서 사용하는 격자체계

격자체계(grid system)의 구성시 격자망(mesh)과 지형(geometry)은 독립적으로 입력된다. 이는 그림 4.3의 FAVOR (Fractional Area and Volume Obstacle Representation)기법을 사용하는 것으로, 육면체 격자망에 구조물, 벽체 등의 지형정보가 포함된다.

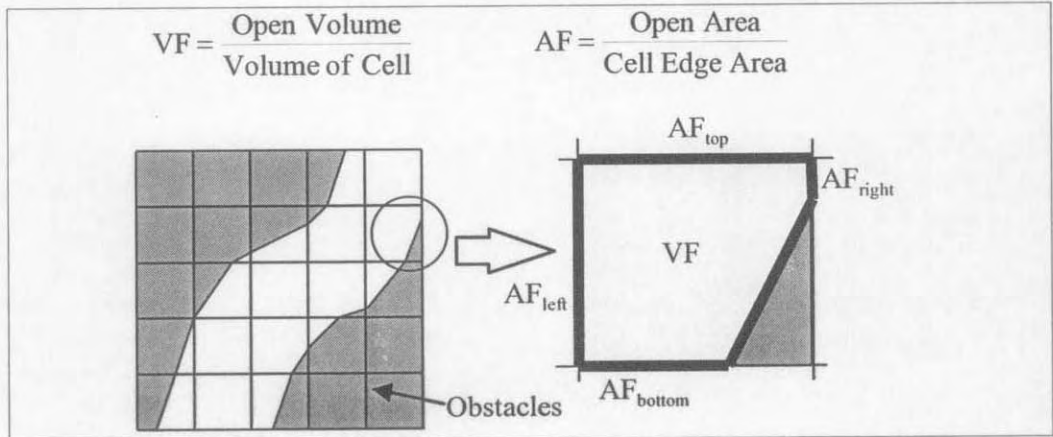


그림 4.3 FAVOR 기법의 개념도

제트, 비산, 파랑 등과 같은 자유수면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지안(Lagrangian)방법보다 고정 오일러리안(Eulerian)방법을 사용하는 VOF 방법이 일반적이다. FLOW-3D에 사용하는 VOF 방법은 정확한 압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 유한차분시 경계면의 Smearing을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유수면으로 가정함)사이의 운동을 기술할 수 있는 수치 해석 방법이다. 그림 4.4에 VOF방법의 개념도를 나타내었다.

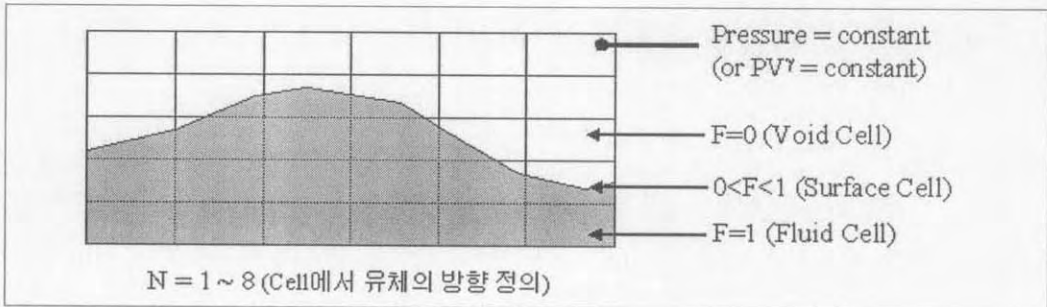


그림 4.4 VOF 방법의 개념도

지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 연속방정식을 만족하도록 압력항을 계산하기 위해서는 SOR(successive over relaxation)법과 SADI(special alternating-direction, line implicit)법을 사용할 수 있다. 계산은 (1) 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각 방향의 유속을 계산 (2) 연속방정식을 만족하도록 운동방정식의 압력과 유속을 반복 계산 (3) 자유수면, 난류특성, 에너지 수송방정식을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.



## 4.3 모형의 적용 및 결과

### 가. 모형의 적용

4.1절에 서술한 용승효과의 평가순서에 따라 모형을 적용하였다. 모형에 적용한 인공구조물의 형상은 그림 4.5와 같다. 그림에 제시된 인공구조물의 형상에 대하여 4.2절에서 서술한 FLOW-3D모형을 이용하여 모델링을 하였으며 모델링의 영역은 1,000m(x방향)×500m(y방향)×60m(z방향)이고, x방향 60개, y방향 70개, z방향 50개의 가변격자를 이용하였다.

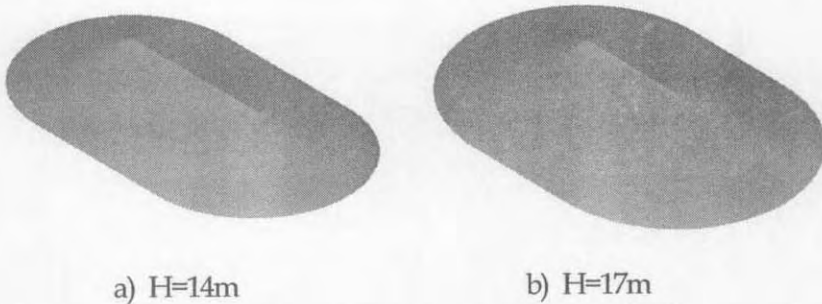
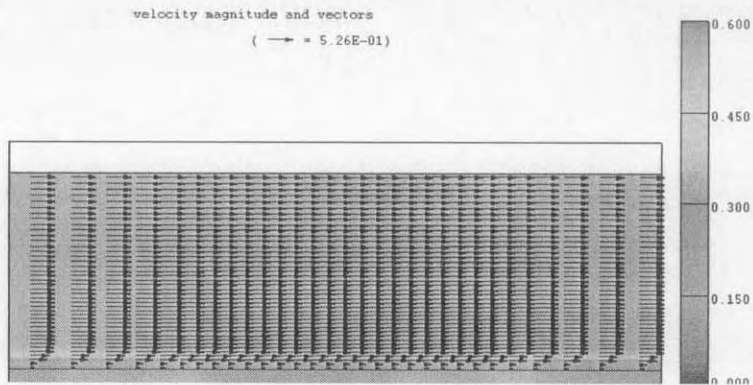


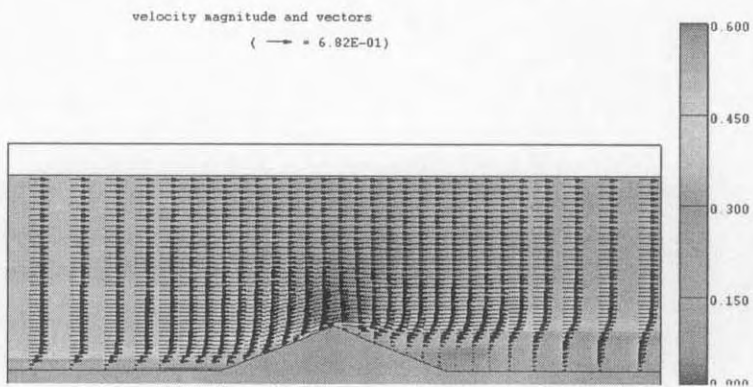
그림 4.5 인공구조물의 형상

### 나. 모형의 결과

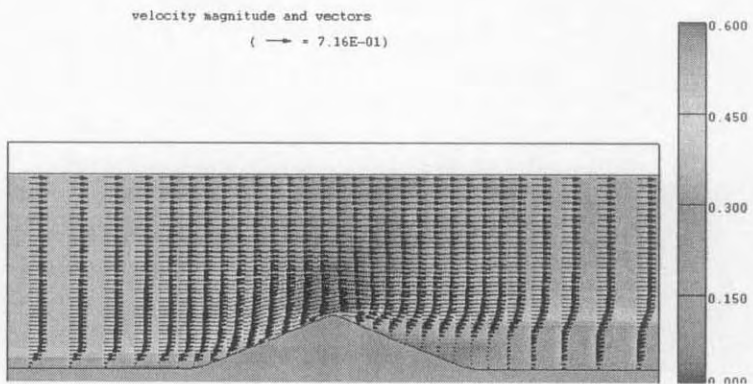
수치해석의 결과로 얻어진 원래 상태, 높이 H=14m, H=17m에 대한 유속벡터도를 그림 4.6에 나타내었다. 그림에서 원래 상태에 비하여 구조물이 설치될 때 연직방향의 흐름이 발생함을 알 수 있으며 H=14m와 비교하여 H=17m에서 더 큰 유속이 발생할 것을 확인 할 수 있다. 그림 4.7은 난류에너지와 유속벡터도를 같이 표시한 그림이다. 그림 4.8은 영양염의 이동을 모의하기 위한 첫단계로 이송현상만을 고려하여 Marker를 설정하고 그 이동을 모의하였다. 그림 4.9는 모형에서 모의된 연직방향의 유속을 등고선으로 표시하였다. H=14m일 경우의 연직유속의 최대값은 0.204m/s, H=17m일 경우의 연직유속의 최대값은 0.210m/s로 나타났다. 연직유속의 최대값은 구조물의 상승부에서 발생하였으며 수평속도의 약 40%정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.



a) 원래 상태

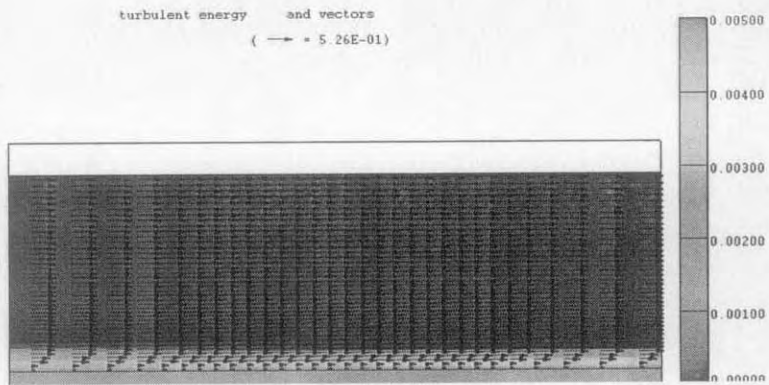


b) H=14m

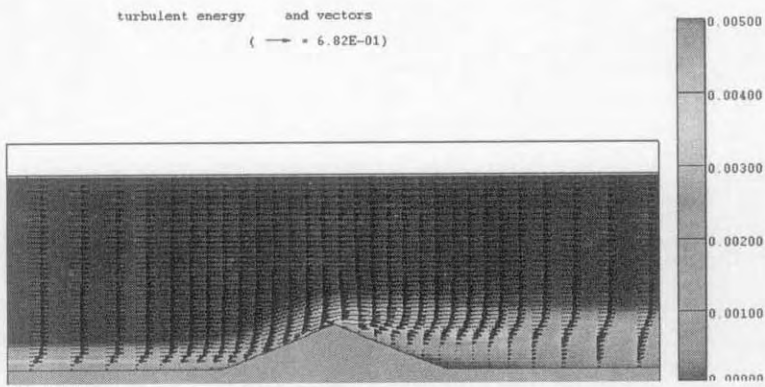


c)H=17m

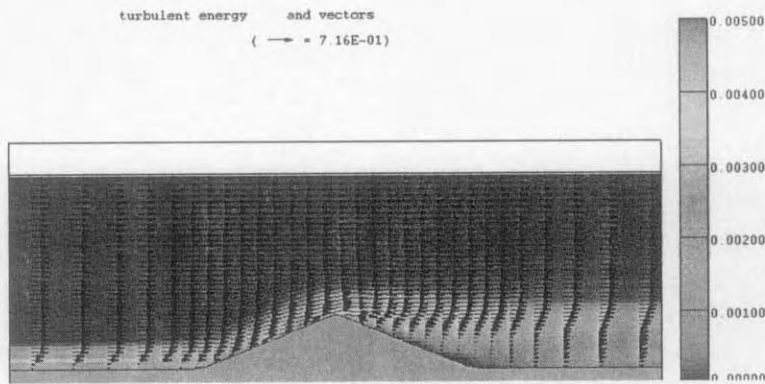
그림 4.6 유속벡터도



a) 원래 상태

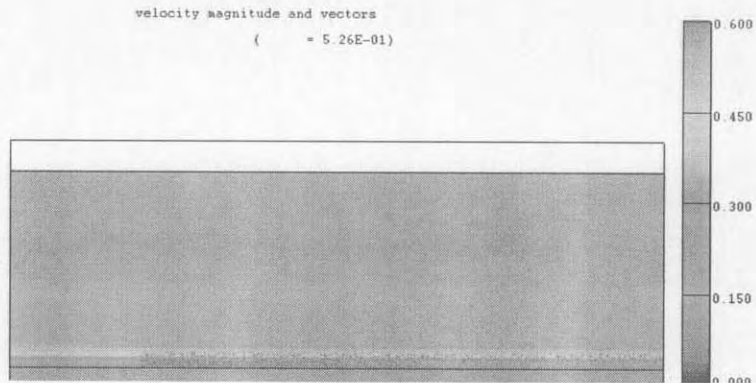


b) H=14m

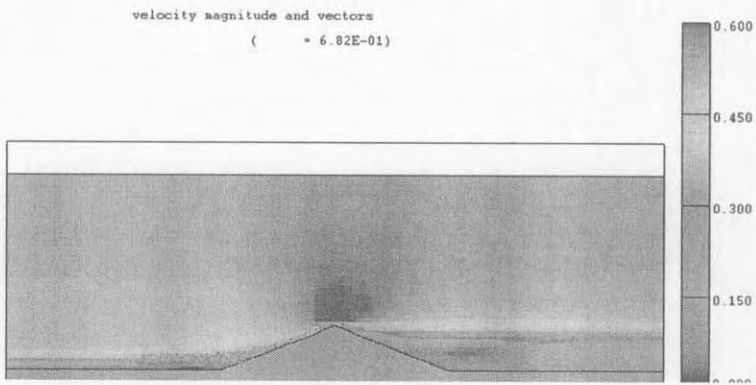


c) H=17m

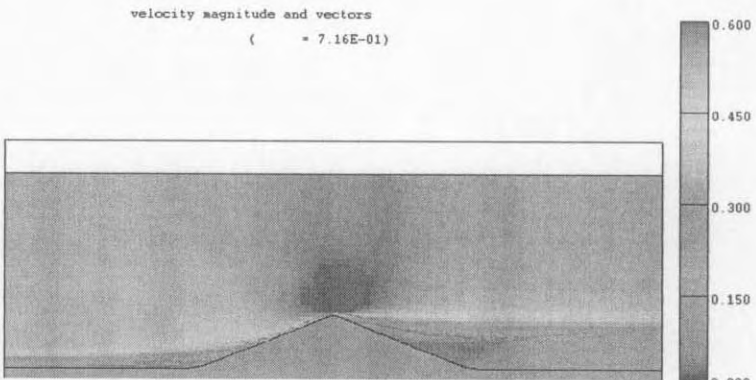
그림 4.7 난류운동에너지 및 벡터도



a) 원래 상태

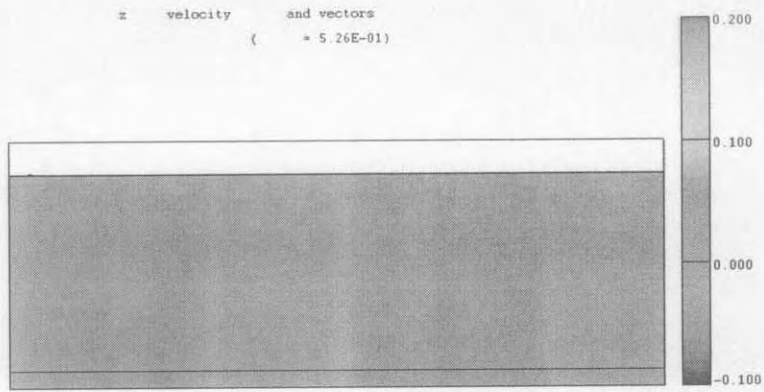


b) H=14m

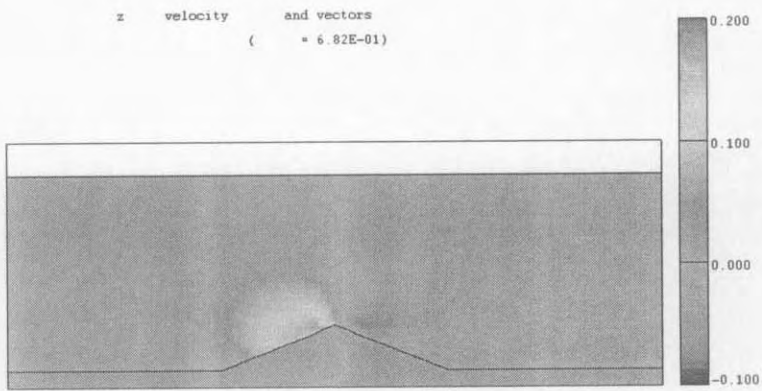


c)H=17m

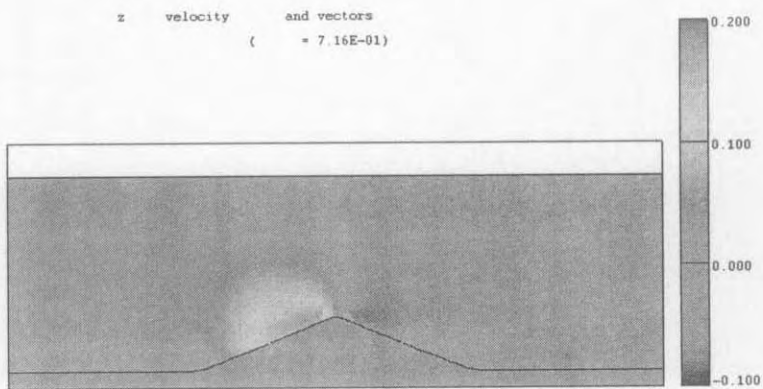
그림 4.8 Marker의 이동양상



a) 원래 상태



b) H=14m



c)H=17m

그림 49 연직유속 분포도

## 제 5 장 연구개발 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

이 연구에서는 우리나라 서남해안에서의 인공용승류 사업을 위한 기초연구를 실시하였다. 사업을 실시하기 위해서는 해당 수역의 물리, 환경조건, 어장조업실태 등을 종합적으로 검토하여야 하나 이 연구에서는 우선 해당 수역의 물리적인 조건인 수심과 유속만으로 대상 후보지를 가상으로 선정하였다.

다음으로 선정된 대상 해역에 대하여 기존에 제시된 자료를 바탕으로 구조물의 적절한 단면의 형상과 크기를 선택하였다. 인공구조물의 크기는 클수록 용승효과가 큰 것으로 알려져 있으므로 실제 사업에 있어서는 사업비용과 사업에 따른 경제적 효과를 고려하여 대상단면의 형상과 크기 등이 결정되어야 하나 이 연구는 기초연구의 성격으로 기존 사업과 문헌 등을 참고하여 적절한 단면을 가정하였다.

위와 같이 결정된 대상해역과 인공구조물의 단면을 입력자료로하여 인공용승 효과를 판단하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 대상해역의 흐름은 용승효과의 검증에 주 목적을 가지고 흐름의 상태를 정상상태로 가정하고 3차원 흐름의 거동을 모의할 수 있는 FLOW-3D모형을 이용하였다. 모형을 이용하여 흐름을 해석하고 검사단면에서 영양염 농도의 변화를 관찰하여 인공용승효과를 검증하였다.

이상과 같이 이 연구에서는 향후 인공용승효과를 이용한 어장형성사업 실시에 선행하여 필요한 인공용승효과의 검증에 관한 기초 연구를 수행하였다. 인공용승 효과를 검증할 수 있는 모형을 수립하였으며 그 모형을 가상해역과 가상단면에 적용하여 인공용승 효과를 확인하였다. 이와 같이 이 연구에서는 연구개발 목표를 모두 달성하였다.

해양수산부(2005)에서 실시한 사업에서는 대상해역의 선정, 대상단면의 선정 과정에서 구조물의 건설에 따른 용승효과의 정량적 조사가 이루어지지 않았다. 향후 서남해역 또는 다른 지역에서 인공용승류사업이 실시될 때 이 연구의 결과를 활용함으로써 대상해역, 대상단면에 따른 인공용승효과를 사전에 산정할 수 있을 것이다. 산정된 인공용승효과의 결과는 대상해역에서 사업의 경제성 여부의 판단, 대상해역에 필요한 비용대비 최적단면의 산정 등을 통하여 인공용승류사업의 실시에 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

## 제 6 장 연구개발결과의 활용계획

전 장에서 언급한 바와 같이 이 연구는 향후 서남해역 또는 다른 지역에서 인공용승류사업이 실시될 때 사전에 활용될 수 있다. 대상해역, 대상단면에 따른 인공용승효과를 사전에 산정함으로써 대상해역에서 사업의 경제성 여부의 판단, 대상해역에 필요한 비용대비 최적단면의 산정 등을 통하여 인공용승류사업의 실시에 크게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서는 해당 수역의 물리, 환경조건, 어장조업실태 등을 종합적으로 검토하여야 하나 제한된 자원으로 우선 해당 수역의 물리적인 조건인 수심과 유속만으로 대상 후보지를 가상으로 선정하였다. 또한 가상 해역에 대하여 기본조건과 경계조건을 가정하여 인공용승효과를 산정하였다. 따라서 실제사업에 필요한 해당 수역의 물리, 환경조건, 어장조업실태 등에 대한 연구 및 현지조사가 반드시 필요하다. 이러한 조사를 바탕으로 이 연구의 결과를 활용함으로써 인공용승에 의한 경제효과를 사전에 판단하고 사업의 시행여부를 결정할 수 있을 것이다.

## 제 7 장      참고문헌

신정교, 김규한, 편종근(2004), 인공리프의 용승류 발생효과에 관한 연구, 대한토목학회 정기학술대회논문집

金卷精一, 鈴木達雄(2001), 沖合域における漁場造成の課題, 水産工学關係試験研究推進會議 水産基盤部會報告書, 水産工学研究所, pp.23-41

武田眞典, 左々木洋之(2006), 人工海底山脈 漁場造成 現状 課題, 全國漁港漁場整備技術研究發表會 講演集, vol. 5, pp.105-120

해양수산부(2005), 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구 1차년도 보고서

해양수산부(2006), 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구 2차년도 보고서

해양수산부(2007), 인공용승류를 이용한 어장환경 개선 연구 3차년도 보고서

中島敏光(2005), 해양심층수의 개발 및 이용, 신기술