

2006年 8月  
博士學位論文

물 噴射 筒形 有機堆積物 收去 및  
處理시스템에 관한 研究

朝鮮大學校 大學院

尖端海上運送시스템工學科

金 道 正

물 噴射 筒形 有機堆積物 收去 및  
處理시스템에 관한 研究

A Study on Water Jet Propelled Box Shaped Contaminated  
Organic Sediment Collection System and the Treatment  
System

2006年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

尖端海上運送시스템工學科

金 道 正

물 噴射 筒形 有機堆積物 收去 및  
處理시스템에 관한 研究

指導教授 朴 濟 雄

이 論文을 工學博士學位申請 論文으로 提出함.

2006年 4月

朝鮮大學校 大學院

尖端海上運送시스템工學科

金 道 正

金道正의 博士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 權 寧 燮 印

委員 仁荷大學校 教授 孫 忠 烈 印

委員 仁荷工業專門大學 教授 朴 贊 源 印

委員 韓國海洋研究院 博士 姜 國 珍 印

委員 朝鮮大學校 教授 朴 濟 雄 印

2006年 6月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Nomenclatures	x
초 록	xiv
Abstract	xvii
<b>제1장 서론</b>	<b>1</b>
제1절 연구배경	1
제2절 연구목적과 내용	3
1. 유기퇴적물 수거 시스템	3
2. 유기퇴적물 처리 시스템	4
제3절 연구방법 및 구성	5
1. 연구방법 및 범위	5
2. 연구구성 및 흐름	7
<b>제2장 유기퇴적물 수거 시스템</b>	<b>8</b>
제1절 서론	8
제2절 수거 시스템의 설계 및 제작	13
1. 수거 시스템 구성 및 설계요건	13
2. 수거 시스템의 수중 본체 배관설계	18

3. 수거 시스템의 수중 본체 설계 및 제작 -----	29
제3절 수거 시스템의 시험 및 결과분석 -----	43
1. 시험장비 -----	43
2. 수거 시스템 예비 성능시험 -----	45
3. 유기퇴적물 수거 성능시험 및 결과분석 -----	48
제4절 수거 시스템 수중 본체의 유체역학적 특성 -----	53
1. 개요 -----	53
2. 수치계산법 -----	55
3. 수치해석 결과 및 검토 -----	57
<b>제3장 유기퇴적물 처리 시스템 -----</b>	<b>72</b>
제1절 서론 -----	72
제2절 유기퇴적물의 처리 시스템 -----	77
1. 유기퇴적물의 전처리 공정 -----	77
2. 유기퇴적물의 전처리 시스템 설계 -----	78
3. 유기퇴적물의 처리를 위한 시스템 구성도 -----	84
제3절 유기퇴적물 수거 및 처리 선박 -----	86
1. 설계조건 및 개념설계 -----	86
2. 모형시험 및 성능평가 -----	89
3. 유기퇴적물 처리 선박의 유체역학적 특성 -----	106
<b>제4장 고찰 -----</b>	<b>113</b>

제5장 결론	-----	117
참고 문헌	-----	119

*Appendices*

A : Near-Wall Treatments for Wall-Bounded Turbulent Flows	-----	123
B : 수치계산 MAC(Marker And Cell)법	-----	138
C : Hydrocyclone	-----	146

## *List of Tables*

- Table 2.1 기계식과 유압식 준설의 비교[12]
- Table 2.2 유압식 준설방법간의 비교[12]
- Table 2.3 Sediment cross section[36]
- Table 2.4 개발 시스템의 특성
- Table 2.5 On-deck Pump의 표준성능
- Table 2.6 퇴적물 수거 흡입펌프의 보조 배관 시스템
- Table 2.7 배관시스템의 최적해
- Table 2.8 수중 본체의 Type 별 특성
- Table 2.9 수중 본체의 중량
- Table 2.10 유기퇴적물 수거 시스템의 구성 장비
- Table 2.11 정지상태에서 노즐 위치 변화에 따른 유기 퇴적물 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min, 토출압력=30 bar)
- Table 2.12 해저상태 1에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화
- Table 2.13 해저상태 2에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화
- Table 2.14 해저상태 3에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화
- Table 3.1 오염퇴적물 처리방법 비교[9]
- Table 3.2 Treatment technologies for contaminated dredged material[37]
- Table 3.3 Designed RBI range
- Table 3.4 Screening device classification[41]
- Table 3.5 Designed fine bar range
- Table 3.6 Designed pump specification
- Table 3.7 선형별 성능
- Table 3.8 Principal dimensions of work vessel
- Table 3.9 모형선의 주요제원



Table 3.10 Principal dimensions of ITCWC

Table 3.11 Estimated form factors of WS-models

Table 3.12 Computational conditions

Table 3.13 Comparison of residual and pressure resistance (WO type)

Table C.1 Geometrical proportions of hydrocyclone[31]

## *List of Figures*

- Fig. 1.1 연구구성 및 흐름
- Fig. 2.1 Organic sediment[15] and profile image[38]
- Fig. 2.2 유기퇴적물 수거 시스템의 구성
- Fig. 2.3 설계최적화 관계식의 개념도
- Fig. 2.4 퇴적물 흡입 시스템의 모델
- Fig. 2.5 퇴적물 흡입 시스템의 배관 및 펌프 시스템 모델
- Fig. 2.6 Type 1 수중 본체의 개념도
- Fig. 2.7 Type 1 수중 본체의 형상
- Fig. 2.8 Type 1 수중 본체의 진수 및 문제점
- Fig. 2.9 Type 2 수중 본체의 개념도
- Fig. 2.10 Type 2 수중 본체의 Water Jet 시험
- Fig. 2.11 Type 2 수중 본체의 작업 및 문제점
- Fig. 2.12 Type 3 수중 본체의 개념도
- Fig. 2.13 Type 3 수중 본체의 횡방향 단면도
- Fig. 2.14 Type 3 수중 본체의 종방향 단면도
- Fig. 2.15 Type 3 수중 본체의 측면도
- Fig. 2.16 Type 3 수중 본체의 평면도
- Fig. 2.17 Type 3 수중 본체의 하부
- Fig. 2.18 Type 3 수중 본체의 주요 치수
- Fig. 2.19 유기퇴적물 수거 시스템의 시험 장비
- Fig. 2.20 Type 2 수중 본체 Water Jet 시험
- Fig. 2.21 Type 2 수중 본체의 정지 및 이동시험
- Fig. 2.22 Type 2 수중 본체의 수중 흡입성능시험

- Fig. 2.23 Type 2 수중 본체에 의한 유기퇴적물 수거 전후 상태
- Fig. 2.24 유기퇴적물 배출상태 및 유기퇴적물
- Fig. 2.25 정지상태에서 노즐 위치 변화에 따른 유기 퇴적물 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min, 토출압력=30 bar)
- Fig. 2.26 해저상태 1에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)
- Fig. 2.27 해저상태 2에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)
- Fig. 2.28 해저상태 3에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)
- Fig. 2.29 퇴적물 수거 시스템의 수중 본체 형상과 격자
- Fig. 2.30 Subdivisions of the Near-Wall Region
- Fig. 2.31 수치시뮬레이션에 사용된 구조물과 격자
- Fig. 2.32 수중 본체의 X방향 위치에서 압력 및 유선분포
- Fig. 2.33 수중 본체의 X방향 중앙위치에서 압력 및 유선분포
- Fig. 2.34 수중 본체의 Y방향 위치에서 압력 및 유선분포
- Fig. 2.35 수중 본체의 Y방향 중앙위치에서 압력 및 유선분포
- Fig. 2.36 수중 본체의 Z방향 위치에서 압력 및 유선분포 (Z=-0.15m)
- Fig. 2.37 수중 본체의 Z방향 위치에서 압력 및 유선분포 (Z=-0.12m)
- Fig. 2.38 수중 본체의 Z방향 위치에서 압력 및 유선분포 (Z=-0.06m)

- Fig. 3.1 오염퇴적물 처리 방법 및 기술[9]
- Fig. 3.2 Process train for treatment of contaminated sediments.[37]
- Fig. 3.3 Processing diagram of the primary sediment treatment
- Fig. 3.4 Water profile through a screen
- Fig. 3.5 Spacings of bar racks
- Fig. 3.6 유기퇴적물의 처리를 위한 선상 시스템 구성도
- Fig. 3.7 유기퇴적물 처리를 위한 선상 시스템의 일반배치도
- Fig. 3.8 유기퇴적물 처리선박과 수거시스템 개념도
- Fig. 3.9 Schematic view of test models
- Fig. 3.10 모형선 사진
- Fig. 3.11 Circulating Water Channel
- Fig. 3.12 Comparison of total resistance for WS models
- Fig. 3.13 Comparison of residual resistance for WS models
- Fig. 3.14 Comparison of free surface flows for WS models ( $V=0.4\text{m/s}$ )
- Fig. 3.15 Comparison of wave resistance for WS models
- Fig. 3.16 Bow waves for WS-10 at  $V=1.0\text{ m/s}$
- Fig. 3.17 Comparison of total resistance for WO models
- Fig. 3.18 Comparison of residual resistance for WO models
- Fig. 3.19 Comparison of free surface flows for WO models ( $V=0.4\text{m/s}$ )
- Fig. 3.20 Comparison of residual resistance for WS and WO models
- Fig. 3.21 Comparison of ship's side wave
- Fig. 3.22 Wave height contours
- Fig. 3.23 Pressure contours on the hulls

Fig. A.1 Subdivisions of the Near-Wall region

Fig. A.2 Near-Wall treatments

Fig. B.1 Definition of velocity and pressure points

Fig. B.2 Irregular star in 2D case

Fig. B.3 Movement of marker

Fig. C.1 Schematic diagram of a typical hydrocyclone

Fig. C.2 Flow pattern of hydrocyclone

## *Nomenclatures*

- $L_n$  : n 번째 주배관 길이  
 $l_n$  : n 번째 가지배관 길이  
 $D_n$  : n 번째 주배관 직경  
 $d_n$  : n 번째 가지배관 직경  
 $Q_n(t)$  : n 번째 주배관 유량  
 $q_n(t)$  : n 번째 가지배관 유량  
 $k_i$   $K$  : 관저항 계수  
 $\overline{H_p}$  : 펌프의 설계 총양정  
 $H_p(t)$  : 시간  $t$  의 총양정  
 $\overline{Q}$  : 펌프의 정격 유량  
 $Q(t)$  : 시간  $t$  의 유량  
 $\alpha$  : 전동기 여유율  
 $H_r$  : 토출구 소요압력  
 $v$  : 관유속  
 $\lambda$  : 마찰계수(=0.03)  
 $H_S$  :  $H_n(t)$ 의 평균  
 $U$  : Velocity Parallel to the Wall  
 $\mathcal{U}$  : Shear Velocity  
 $y$  : Distance from the Wall  
 $\nu$  : Kinetic Viscosity ( $\mu/\rho$ )  
 $y^+$  :  $\rho \mathcal{U} y/\mu$   
 $V_a$  : Approach velocity in upstream channel

- $V_b$  : Velocity through the bar racks  
 $A_r$  : Area through bar racks  
 $A_c$  : Channel area  
 $P_s$  : 펌프의 축동력(  $kW$  )  
 $Q_p$  : 펌프의 토출량(  $m^3/sec$  )  
 $H$  : 펌프의 전양정(  $m$  )  
 $\eta$  : 펌프의 효율  
 $P$  : 원동기의 출력(  $kW$  )  
 $D_{inlet}$  : 펌프의 흡입구경(  $mm$  )  
 $V_{inlet}$  : 흡입구의 유속(  $m/sec$  )  
 $LBP$  : Length between perpendiculars  
 $LOA$  : Length overall  
 $LWL$  : Length on waterline  
 $B$  : Breadth  
 $d$  : Draft  
 $\nabla$  : Volume  
 $\Delta$  : Displacement  
 $W.S.A.$  : Wetted surface area  
 $Lcb$  : Longitudinal center of buoyancy  
 $C_b$  : Block coefficient  
 $F_n$  : Froude number  
 $V_s$  : Ship speed  
 $g$  : Gravitational acceleration  
 $C_R$  : 잉여저항계수  
 $C_{TM}$  : 모형선의 전저항계수

- $C_{FM}$  : 모형선의 마찰저항계수  
 $\rho$  : 물의 밀도  
 $S_M$  : 모형선의 침수표면적  
 $V_M$  : 모형선 속도  
 $R_{NM}$  : 모형선의 Reynolds 수  
 $L_M$  : 모형선의 길이  
 $K$  : 형상영향계수  
 $C_W$  : 조파저항계수  
 $\kappa$  : Turbulence kinetic energy  
 $\mu$  : Dynamic viscosity of the fluid  
 $\mu_t$  : Turbulent viscosity  
 $U_P$  : Mean velocity of the fluid at point  $P$   
 $\kappa_P$  : Turbulence kinetic energy at point  $P$   
 $y_P$  : Distance from point  $P$  to the wall  
 $c_p$  : Specific heat of fluid  
 $\dot{q}$  : Wall heat flux  
 $T_P$  : Temperature at the cell adjacent to wall  
 $T_w$  : Temperature at the wall  
 $P_r$  : Molecular Prandtl number ( $\mu c_p / k_f$ )  
 $P_{rt}$  : Turbulent Prandtl number (0.85 at the wall)  
 $A$  : Van Driest constant (= 26)  
 $U_c$  : Mean velocity magnitude at  $y^* = y_T^*$   
 $\Phi$  :  $P/\rho$   
 $\Psi$  : 압력  
 $DT$  : 시간증분



- $\omega$  : 완화계수
- $D_{i,j,k}$  : i,j,k 격자의 발산
- $V_p$  : 속도벡터
- $n$  : 물체표면의 단위법선벡터
- $\xi$  : 자유수면의 위치
- $P_0$  : 대기압
- $V_T$  : Tangential velocity
- $V_r$  : Radial velocity
- $V_a$  : Axial velocity
- $D$  : Hydrocyclone body diameter
- $D_i$  : Inlet equivalent length,
- $L$  : Overall length of hydrocyclone body
- $l$  : Vortex finer length,
- $D_o$  : Overflow diameter
- $\Theta$  : Angle of Cone part

## 초 록

### 물분사 통형 유기퇴적물 수거 및 처리시스템에 관한 연구

김 도 정

지도교수 : 박제웅

첨단해상운송시스템공학과

조선대학교 대학원

연안의 해양환경은 육상으로부터 유입되는 산업폐수와 도시하수 등 오염된 퇴적물과 양식장 자체 오염물질의 장기누적에 따라 해역이 자체적으로 정화할 수 있는 용량을 초과함으로써 퇴적물에 축적된 오염물질의 농도는 갈수록 높아지고 있다.

오염된 퇴적물은 수질오염의 근본적인 원인을 제공하여 생태계 파괴에 치명적인 영향을 주고 있으며, 선진 외국에서는 1960년대부터 환경에 대한 관심과 더불어 퇴적된 오니 준설 및 수질개선에 대한 기술개발을 빠르게 진행하여 오고 있다.

오염퇴적물의 준설 목적은 지형적으로 폐쇄 또는 반폐쇄성 해역의 오염 퇴적물을 준설하고 해수수질 개선을 통해 주민생활환경을 개선하는 것이다.

준설은 일반적으로 항만 및 하천에서 준설선에 의해서 행하여지며, 해역에서의 준설은 막대한 예산이 소요되고 국가적으로 추진되는 대규모 사업이므로 작업의 목적, 해상조건, 준설량, 운반 경로, 공사기간 등을 충분히 고려한 준설 작업의 경제성을 추구하는 수법과 효율적으로 오염퇴적물의 수거·처리할 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 해저의 오염퇴적물중 오염의 주원인인 압밀되어 있지 않은 퇴적물층만을 선별 준설하고, 오타확산에 의한 2차 오염 방지 또는 최소화 할 수 있는 박층 준설방식의 수거장비 및 처리를 위한 시스템을 개발하였으며, 수거된 퇴적물의 처리공정 및 처리선박에 대한 이론적 정립과 산업에의 적용 가능성 등을 제시하였다.

본 논문에서 수행된 연구내용은 다음과 같다.

#### (1) 유기퇴적물의 수거 시스템

퇴적물을 수거하는 펌프시스템의 최적설계인자를 도출하기 위한 설계 최적화에서는 ㉠ 퇴적물을 퍼 올리는 소요시간의 단축, ㉡ 배관 크기의 축소, ㉢ 펌프 규모의 축소 등 서로 경합관계(Trade-off)에 있는 각각의 설계목표를 최적화하는 것으로 배관의 가지배관 직경( $d_n$ ), 주배관 직경( $D_n$ ), 펌프의 규격(총양정)  $\overline{H_p}$ 를 설계변수로 하는 배관 크기의 축소에 대하여 최적화하였다.

유기퇴적물 수거를 위한 시스템 설계 및 개발에 있어서는 기술적으로 문제가 되고 있는 오타확산에 의한 2차 오염 방지 또는 최소화 할 수 있는 Pilot 규모 형태의 흡입식 펌프 준설 시스템을 설계·제작하였으며, 시스템의 성능시험을 통한 적용 가능성을 제시하였다.

유기퇴적물 수거를 위한 최적의 시스템 형태를 도출하기 위하여 수치해석 기법을 통한 퇴적물 수거 시스템의 형상과 그 유체역학적 특성에 대해 파악하고, 제작 시스템의 성능시험에 있어서는 시스템의 정지 상태와 이동 상태에서의 퇴적물 수거 성능에 대한 실험을 수행하였다.

## (2) 유기퇴적물의 처리 시스템

퇴적물 중의 주된 오염 물질은 비교적 작은 입자를 가진 silt나 clay에 부착하려는 경향이 있고, 오염퇴적물을 입자별로 분리하게 되면 오염퇴적물의 부피를 감소시킬 수 있으므로, 본 연구에서는 고·액 분리장치를 사용한 유기퇴적물의 처리를 위하여 해양오염 퇴적물의 처리기술에 대한 분석 및 오염퇴적물의 처리를 위한 하이드로사이클론의 이론적 배경을 정리하였으며, 물리적 처리시스템으로 구성되는 오염퇴적물의 유입시스템, 스크린, 하이드로사이클론 및 탈수장비 등의 선상 처리시스템을 구성하였다.

유기퇴적물 수거 및 처리를 위한 선박으로는, 준설대상이 함수비가 높은 미립의 오니층이고 준설시의 2차 오염을 최소화해야 하므로 특수한 기능을 가진 펌프선의 형태가 요구되며, 또한 준설은 넓은 지역에 걸쳐 실시하지 않으면 주변 해역으로부터의 재 오염 때문에 준설의 효과가 떨어지므로 단기간에 넓은 지역을 효율적으로 처리할 수 있는 선박의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 향후 연안의 해저면 뿐만 아니라 강 및 댐 등에서 오염퇴적물을 효율적으로 수거할 수 있는 썰기형태의 선수형상을 가지는 쌍동형 선형을 설계하여 선수선형의 변화에 따른 조파저항성분에 대해 전산유체역학으로 검증하였으며, 계산결과를 회류수조에서의 모형시험결과와 비교/분석하여 선형개발에 있어서 본 수치해석기법의 적용 가능성을 제시하였다.

## *Abstract*

### *A Study on Water Jet Propelled Box Shaped Contaminated Organic Sediment Collection System and the Treatment System*

Kim, Do-jung

Advisor : Prof. Park, Je-woong Ph.D.

Dept. of Advanced Marine Transportation  
System Engineering,

Graduate School of Chosun University

The ocean environment of coastline has been polluted by industrial waste, residential sewage and fisheries wastes. Though ocean can engulf the waste, unfortunately the concentration of pollution of ocean is increasing at a faster rate than its natural restoring capacity

Contaminated sediments are the actual cause for deterioration of our coastline-ecosystem. So the developed countries have been in the process of making an effort to develop new techniques for monitoring and solving this problem since 1960.

The dredging of contaminated sediments is done by two methods; one is to close the area of operation perfectly and secondly to restrict the area of operation only to half of the region so as to be able to dredge effectively

thereby increasing the quality of seawater. This helps in the improvement of the residential living conditions.

The dredging operation, done in port, stream and coastline, are large scale project in the national arena as it involves a huge budget. For economical optimization of these projects, we need to be cautious about the purpose, sea conditions, dredging area, construction period, etc. Hence it is of utmost importance to develop techniques for recovery, storage and handling of polluted sediments.

This paper makes a research on developing a total system which utilizes a thin-layer dredging method using which, it is possible to recover organic and harmful sediments layer-by-layer distinctly. This characteristic makes an indication that this research can be applied for industrial usage.

In this research, a system is developed that can prevent or minimize secondary pollution by filth diffusion using suction type pump dredging system and make a study on the system handling and the recovery vessels.

The contents of this dissertation are summarized as follows:

#### (1) Remove System of Organic Sediments

Factors affecting the optimum design of the pump system for removing sediments are ① shortened time of deposit suction, ② pipe size reduction and ③ pump size reduction.

Optimum design is the optimization of the above factors that has trade-off relation respectively.

In this research, optimization of the pipe size reduction has been carried out with main pipe diameter ( $D_n$ ), branch pipe diameter ( $d_n$ ) and suction head of pump( $\overline{H_p}$ ) as the design variables .

In making the design and developments of system for collecting the filth from the seabed, suction type pump dredging system of pilot size has been designed and manufactured that can prevent or minimize the secondary pollution.

For the practical use, the application possibility of the developed system has been checked through a system performance test.

And, the evaluation of system performance according to the system type has been carried out for system optimization by using CFD. The performance tests for checking the efficiency of sediment collecting system are done under two conditions i.e. when the system is non-operational and when the system is self-propelled.

## (2) Treatment System of Organic Sediment

The main contaminants in the sediment adhere to silt- and clay- sized particles. Particle separation processes separate the fine clay and silt particles from the coarse particles and thus concentrate the contaminants to smaller volume of sediment, that can be treated effectively in the post step processes.

This paper is an organized effort of a study on organic sediments handling using solid-liquid separation device.

The two main objectives are: ① Analysis of handling techniques of ocean polluting sediments. ② Theoretical background of hydro-cyclone for handling of pollution sediments.

The sediment handling system consists of inflow system of contaminated sediment, screen, hydro-cyclone and dehydrator etc. are organized on the vessel as physical handling system.

The main motives of the dredging/recovery vessel for organic sediments are the removal of fine grained sludge layer and minimize secondary pollution during operation. The dredging operation has to be carried out in a wider region for more efficiency. In smaller region the dredging capabilities are reduced owing to secondary pollutions of nearby coast. Due to the above reasons, recovery vessels for harmful organic sediments are needed. Moreover these vessels are very efficient for sediment handling in short time span.

This research deals with the proper and effective design of twin hull forms having wedge shape bows. These vessels can effectively aid in the removal of pollution sediments in coastal seabed as well as rivers, dams etc.

For an effective operation, the wave-making resistance for these vessels is analyzed and verified with the help of CFD so as to make necessary changes in the bow forms. The application possibility of numerical analysis has been checked, mainly for hull form development.



By using CFD, we performed a theoretical verification and from the results of these experiments the probability of application for the hull form development was suggested.

The performance of vessels was in turn checked by model testing in the CWC (Circulating Water Channel) and a comparative study has been done on the results from CFD and model tests.

# 제1장 서론

## 제1절 연구배경

최근 우리나라 연안의 해양환경은 육상으로부터 유입되는 산업폐수와 도시하수 등 오염된 퇴적물과 양식장 자체 오염물질의 장기누적에 따라 해역이 자체적으로 정화할 수 있는 용량을 초과함으로써 퇴적물에 축적된 오염물질의 농도는 갈수록 높아지고 있다.

하천이나 연안에 지속적으로 유입되는 다양한 물질의 침전과 퇴적현상으로 인하여 쌓인 오염된 토양 및 오염퇴적물은 수질오염의 근본적인 원인을 제공하여 국민건강과 생태계 파괴에 치명적인 영향을 주고 있으며, 연안에 서식하는 어패류 등은 유역에서 유입되는 오염물질을 함유한 토사와 장기간에 걸쳐 축적되어 있는 오염퇴적물에 노출되어 기형 어류발생, 생물 다양성 감소 등으로 나타나고 있다.

이러한 토양과 오염퇴적물의 문제 등으로 오염토양의 정화를 위한 기술의 필요성이 요구되어짐에 따라, 선진 외국에서는 1960년대부터 환경에 대한 관심과 더불어 퇴적된 오니 준설 및 수질개선에 대한 기술개발을 빠르게 진행하여 오고 있으며, 우리나라는 1990년부터 마산만 퇴적오니 준설사업을 시작으로 오염이 우려되는 전국연안에 대한 준설계획을 수립하여 추진하고 있다[12].

오염퇴적물의 준설 목적은 지형적으로 폐쇄 또는 반폐쇄성 해역의 오염 퇴적물을 준설하고 해수수질 개선을 통해 주민생활환경을 개선하는 것으로, 일반적으로 항만 및 하천에서 준설선에 의해서 행하여지며 해역에서의 준설은 막대

한 예산이 소요되고 국가적으로 추진되는 대규모 사업이므로 준설작업 및 준설선의 선정에 있어서는 작업의 목적, 토질조건, 기상, 파랑 및 조류 등의 해상조건, 준설량, 운반 경로, 공사기간 등을 충분히 고려하여 가장 효율적이고 경제적인 방법으로 해야 하지만, 준설작업의 경제성을 추구하는 수법이 아직 확립되어 있지 않은 실정이다.

퇴적물 준설방법으로는 기계식, 유압식 방법 등이 있으며, 기계식은 퇴적물에 직접적인 힘을 가하여 퇴적물을 제거한 후 떠내는 방법이고 유압식은 원심펌프를 이용하여 퇴적물을 흡입하는 방법으로 일반적으로 퇴적물 제거를 원활히 하기 위해서 흡입부에 커터헤드를 장착하고 있다. 기계식의 경우 준설과정에서 상당량의 퇴적물이 재부유되기 때문에 오염퇴적물 제거에 이용되기 위해서는 사전에 치밀한 부유물 확산 방지책이 수반되어야 한다.

최근에는 재부유를 저감하고 흡입퇴적물에 포함된 수분의 함량을 줄이기 위한 준설기술 개발에 주력하고 있으며[12], 미국 및 캐나다의 경우 퇴적물의 재부유를 감소시킬 수 있다는 점에서 유압식 준설방법이 많이 이용되고 있으나, 이와 같은 준설방식은 수질오염의 주 원인인 유기오염물이 다량 함유되어 있는 상층부 퇴적물 외에 상당 부분의 이토까지 준설하게 된다. 이 과잉 준설토를 투기하는 과정에서 발생하는 환경오염문제, 준설토 투기장 선정에 따른 어려움, 준설토 투기에 따르는 처리비용의 과다 등의 사유로 이러한 준설방식들은 오염이 상당히 진행된 해역에서만 선택적으로 시행되고 있는 실정이다 [15].

따라서 오염의 주원인인 압밀되어 있지 않은 퇴적물층 만을 선별 준설할 수 있는 박층 준설방식의 유해성 유기퇴적물 제거를 위한 기술개발이 요구되며, 또한 준설 수요는 항만개발, 항로유지, 하구역 수로개선 및 오염해역 정화

등의 목적으로 계속 증가함에 따라 지속적인 경제 산업 활동의 보장과 해양환경의 보전을 위하여 준설 및 오염퇴적물의 처리에 대한 기술개발의 필요성이 증대되고 있다 하겠다.

## 제2절 연구목적과 내용

본 연구에서는 해저의 오염퇴적물중 오염의 주원인인 압밀되어 있지 않은 퇴적물층 만을 선별 준설할 수 있는 박층 준설방식의 유기퇴적물 수거 및 처리를 위한 시스템을 개발하고자 하였다.

유기퇴적물 수거 및 처리시스템 개발에 대한 연구내용은 다음과 같다.

### 1. 유기퇴적물 수거 시스템

퇴적물이 심하게 오염된 경우, 준설과정에서 재 부유되는 오염물질이 수질 및 수생생물에게 악영향을 미치지 않도록 오탉확산에 의한 2차 오염 방지 또는 최소화 할 수 있는 시스템 설계를 수행하였으며, 수거시스템의 배관설계에 대한 최적화 기법을 정리하고 수거시스템의 모형제작 및 실험을 통하여 성능평가와 그 적용 가능성을 제시하였다.

포집부 형상에 대해서는 수치시뮬레이션을 통하여 유체역학적 특성을 파악하고 효율적인 유기퇴적물 수거를 위한 최적형상을 도출하고자 하였다.

## 2. 유기퇴적물 처리 시스템

퇴적물 중의 주된 오염 물질은 비교적 작은 입자를 가진 silt나 clay에 부착하려는 경향이 있으며 오염된 토양을 입자별로 분리하게 되면 오염토양의 부피를 감소시킬 수 있으므로, 본 연구에서는 고·액 분리장치를 사용한 유기퇴적물의 처리를 위하여 오염퇴적물의 유입시스템, 스크린, 하이드로사이클론 및 탈수장비 등으로 이루어지는 시스템을 구성하였으며, Fig. 3.6에 유기퇴적물 처리 선박과 처리 시스템에 대한 구성을 나타내었다.

유기퇴적물 수거 및 처리를 위한 선박으로는, 단기간에 넓은 지역을 효율적으로 처리할 수 있는 유기퇴적물 처리 선박의 개발이 필요함에 따라, 본 연구에서는 향후 연안의 해저면 뿐만 아니라 강 및 댐 등에서 오염퇴적물을 효율적으로 수거할 수 있는 썩기형태의 선수형상을 가지는 쌍동형 선형을 설계하였으며, 선수부 형상 변화에 따른 저항성능 검토를 위해 회류수조를 이용한 모형시험을 수행하였다.

선수부 선형 변화에 따른 조파저항성분과 모형시험을 통해 계측한 선수부 파형에 대하여 수치계산 결과와의 비교를 수행하였으며, 본 연구에서 사용한 수치해석 기법의 설계에의 적용 가능성을 제시하였다.

## 제3절 연구방법 및 구성

### 1. 연구방법 및 범위

본 연구에서는 오탁확산에 의한 2차 오염 방지 또는 최소화 할 수 있는 박층 준설방식의 수거장비 및 처리를 위한 시스템을 개발하고, 수거된 퇴적물의 처리공정 및 처리선박에 대한 이론적 정립과 산업에의 적용 가능성 등을 제시하였으며, 연구의 범위와 논문의 구성은 다음과 같다.

1장은 서론으로서 연구배경, 연구목적과 내용, 연구방법 및 범위를 내용으로 하고 있다.

2장에서는 해양오염 퇴적물의 준설에 대한 기술의 현황 등을 조사하고, 기술적으로 문제가 되고 있는 오탁확산에 의한 2차 오염 방지 또는 최소화 할 수 있는 새로운 형태의 흡입식 펌프 준설 시스템을 개발을 위하여 흡입 배관의 최적화설계와 퇴적물 수거 시스템의 제작 및 시험을 통하여 그 성능을 확인하고 적용 가능성을 제시하였으며, 수치해석기법을 통하여 퇴적물 수거형상에 대한 최적설계 방안을 도출하였다.

3장에서는 해양오염 준설 퇴적물의 처리기술에 대한 분석을 통하여 물리화학적 처리시스템으로 구성되는 오염퇴적물의 유입시스템, 혼합기, 진동스크린, 하이드로사이클론 및 탈수장비 등으로 이루어지는 전처리 시스템을 구성하였다.

유기퇴적물 처리선택의 개념설계를 위하여는 처리선택의 요건, 주요기능 및 형태 등을 분석하고, 향후 연안의 해저면 뿐만 아니라 강 및 댐 등에서 오염퇴적물을 효율적으로 수거할 수 있는 썰기형태의 선수형상을 가지는 쌍동형 선형을 설계하였다.

선수선형의 변화에 따른 조파저항성분에 대해서 전산유체역학으로 검증하였으며, 계산결과를 회류수조에서의 모형시험결과와 비교/분석하여 선형개발에 있어서 본 수치해석기법의 적용 가능성을 제시하였다.

## 2. 연구구성 및 흐름

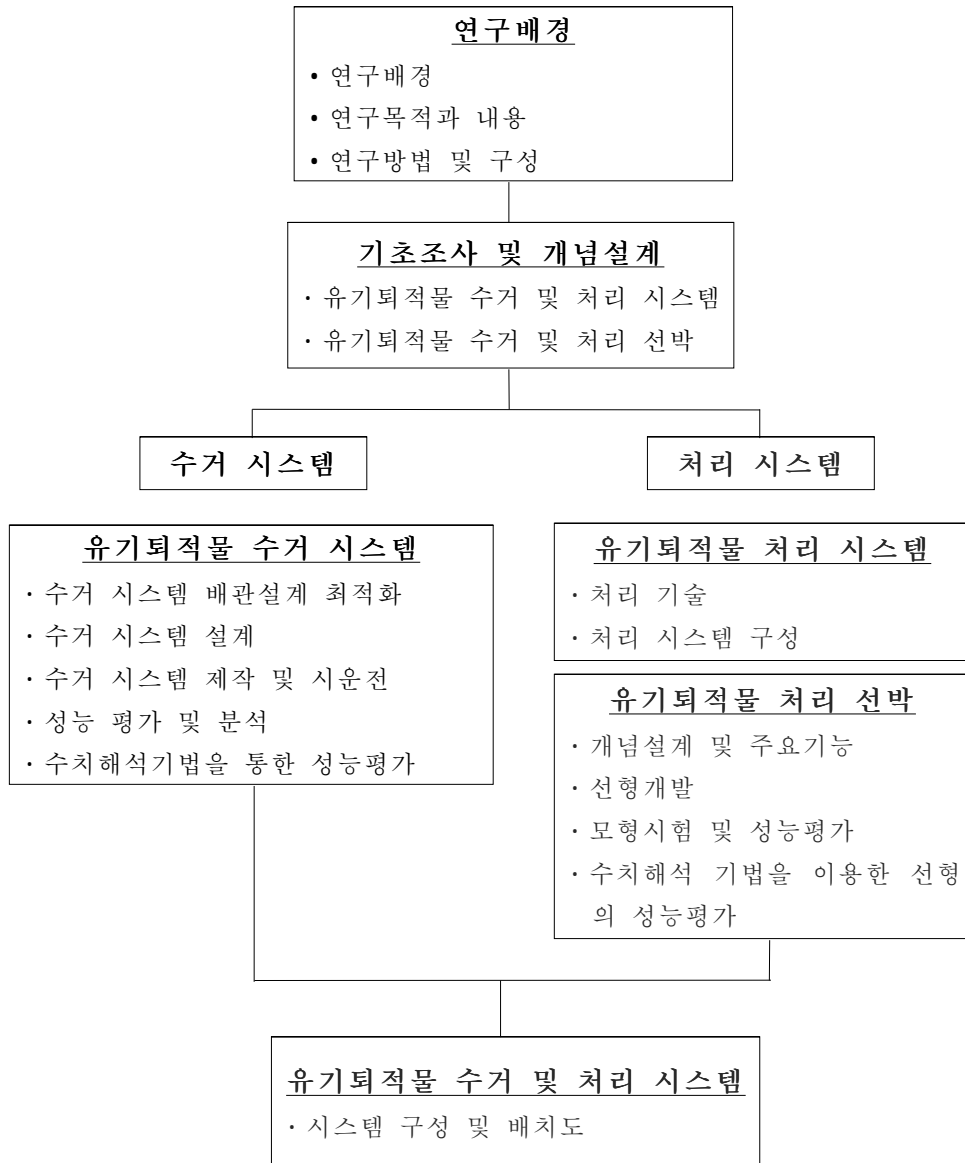


Fig. 1.1 연구구성 및 흐름



## 제2장 유기퇴적물 수거 시스템

### 제1절 서론

오염된 해역의 수질개선을 목적으로 저층퇴적물을 제거하는 작업은 준설을 통한 퇴적물 제거가 지금까지는 가장 기본적인 처리방법이라 할 수 있다.

현행 퇴적물 준설 방식은 크게 기계식과 유압식으로 나눌 수 있으며, 기계식은 퇴적물에 물리적인 기계력을 동원하는 방식으로 퇴적물의 재부유, 준설 퇴적물 누출 등 2차적인 환경영향을 유발할 수 있고, 유압식은 원심펌프의 회전력을 이용하여 필요한 부분을 세밀하게 흡입하는 방식인데, 선진국에서는 퇴적물의 재부유를 저감하고 처리물질 개선을 위해서 압축식 유압방식을 선호하고 있지만 비용부담의 어려움이 있다.

Table 2.1 기계식과 유압식 준설의 비교[12]

준설방식	장 점	단 점
기계식	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 현장 퇴적물의 함수량에 상관없이 굴착가능</li> <li>· 고도의 준설 운용성.</li> <li>· 크랩셸(Clamshell)을 이용할 경우 준설 깊이에 대한 제한 없음.</li> <li>· 모든 종류의 고형물질 제거 기능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 다량의 퇴적물 재부유</li> <li>· 준설물질의 재처리 필요</li> <li>· 유압식에 비해 낮은 준설 용량</li> <li>· 유압식에 비해 높은 준설 비용</li> </ul>
유압식	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 퇴적물의 재부유가 상대적으로 적음</li> <li>· 준설물질이 처리지역으로 직접 수송됨에 따라 현장 재처리에 대한 부담 감소</li> <li>· 기계적 준설에 비해 높은 준설 용량</li> <li>· 기계적 준설에 비해 낮은 준설 비용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 퇴적물과 함께 처리장으로 유입된 다량의 수분을 최종 처리 전에 해결.</li> <li>· 설치되는 수송관이 수상교통에 방해 가능성</li> <li>· 준설 해역에 고형물질 잔존 가능</li> </ul>

Table 2.2 유압식 준설방법간의 비교[12]

종류	응용	한계	2차영향	준설선 길이 /전인(m)	준설량 ( $m^3/hr$ )	최대 운용 수심 (m)
운반 가능한 유압식	보통량의 퇴적물; 호수, 강, 하천; 46cm 정도 수심까지 운용	파고의 한계 (30cm 이하); 낮은 준설량과 제한된 깊이	중간 정도의 재부유	7.6 ~ 15.2/0.61~1.5	· 40~1,400	15.2
수동 유압식	정체 수역 내 소량의 고형물 또는 액체; 정밀 드래깅 가능	수상에 노출된 곳에서 운용; 얇은 수심에서만 작업 가능	중간 정도의 재부유	N/A	· 19~190	30.5
단순 흡입식	다량의 부유퇴적물과 액체; 얇은 수역 밑강, 하천	준설물질의 80 ~ 90%가 물; 파도가 있는 개방수계에는 적용 불가; 고품과편에 의해 손상되기 쉬움; 수상 교통 혼란 초래 가능	중간 정도의 재부유	30.5/1.5~1.8	· 20~7,600	18.3
커터 헤드	다량의 고체와 액체; 과화된 점착성 퇴적물; 정체 수역	준설물질의 80 ~ 90%가 물; 파도가 있는 개방수계에는 적용 불가; 쉽게 손상되고 수초에 의해 막힘	중간 정도의 재부유	15.2 ~ 76.2/0.9~4.3	· 20~7,600	15.2

본 연구에서는 퇴적물의 재부유를 저감하고 흡입퇴적물에 포함된 수분의 함량을 줄이기 위한 준설기술의 개발을 목적으로 오염의 주원인인 압밀되어 있지 않은 퇴적물층[Fig. 2.1]만을 선별 준설할 수 있는 박층 준설방식의 유기퇴적물 수거를 위한 기술개발을 수행하였다.



Fig. 2.1 Organic sediment[15] and profile image[38]

Fig. 2.1은 해저에 분포된 압밀되어 있지 않은 유기퇴적물의 형상을 나타내고 있으며, Table 2.3은 퇴적물층을 구성하는 성분들과 각각의 밀도에 대하여 나타내고 있다.

Table 2.3 Sediment cross section[36]

<u>Basic Soil Description</u>	<u>Density</u> <i>-gm/cc</i>	
foam/fluff		
clay	1.0 - 1.3	
silty clay to clayey silt	1.3 - 1.4	
silt	1.4 - 1.6	
silty sand to sandy silt	1.6 - 1.8	
sand	1.8 - 2.2	
hard/compact	> 2.2	

유기퇴적물의 준설에 있어 특별히 고려해야할 점은 일반퇴적물의 준설과는 달리 오염퇴적물의 재부유와 수반된 오염물질 누출의 최소화 및 제거작업의 정확성이 더욱 요구된다는 사실이다.

본 연구에서는 최적화 기법을 통하여 시스템의 배관에 대한 최적설계를 수행하고, 박층 준설방식의 유기퇴적물 수거를 위한 시스템의 제작과 실험을 통하여 퇴적물 수거 성능을 확인하였으며, 개발하고자 하는 새로운 형태의 흡입식 펌프 시스템의 특성을 Table 2.4에 나타내었다.

Table 2.4 개발 시스템의 특성

구 분		개발 시스템
개 요		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 저압의 흡입력을 이용하여 유기퇴적물을 제거하는 방식</li> <li>· 해저 상층부의 비압밀 퇴적물만을 제거하므로 퇴적오염물 투기에 따른 2차 환경오염문제 최소화</li> <li>· 초소형 오토허거시스템이 기동하고 통합운영시스템을 갖춘 선박으로 유지 관리비용 절감</li> </ul>
시 공 성	장비 조합	소형의 오토허거시스템과 고액분리시설 등 통합운영시스템을 갖춘 선박
	준설 대상	해저면에 침전된 비압밀 유기퇴적물
	준설 속도	복수의 오토허거시스템이 배치되어 오토허거속도 향상
경제성		선택 제거방식이므로 절대 제거량이 적어 경제성이 클 것으로 기대
기대효과		저렴한 비용으로 유기퇴적물을 선택적으로 제거하는 방식이므로 환경오염을 사전에 차단할 수 있을 것으로 기대
적용성		해저 유기퇴적물에 의해 오염되는 연안 폐쇄수역과 가두리 양식장 등

유기퇴적물 수거 시스템의 설계와 제작에 있어서는 3가지 형태의 시스템을 설계하고, Pilot Scale의 시스템 제작과 시험을 통하여 문제점을 개선해 나가는 방향으로 시스템의 개발이 수행되었으며, 상용 S/W인 Fluent를 사용하여 설계된 시스템의 유체역학적 특성분석을 위한 수치해석을 수행하였다.

유기퇴적물 수거성능에 대한 실험은 수심, 해저의 상태, 노즐의 위치 변경을 기본으로 작업에 따른 유기 퇴적물의 분산 정도와 퇴적물의 함유율에 대한 실험을 수행하였으며, 수치해석을 통해서는 퇴적물 포집장비의 형상과 포집장비의 하부에 부착된 스커트에 따른 주변 유체흐름의 특성 등을 파악하였다.

## 제2절 수거 시스템의 설계 및 제작

### 1. 수거 시스템 구성 및 설계요건

#### 가. 수거 시스템의 구성

퇴적물 수거를 위한 준설장비로는 그레브, 바켓트, 디어퍼, 흡입식 펌프 등을 생각할 수 있으나, 유기퇴적물의 퇴적상태 및 2차 오염 등과 관련하여 각 장비의 장·단점을 고려할 때 흡입식 펌프가 효과적이라 할 수 있다. 흡입식 펌프에는 설치위치에 따라 On-deck Pump와 Submersible Pump로 분류되며, 이 중에서 퇴적오니 수거에는 On-deck Pump 방식이 경제적이고 효과적이다.

On-deck Pump는 준설 깊이의 제약이 있으므로, 주로 수심이 30M 이하의 준설작업에 적용되며, Submersible Pump에 비하여 Sealing 장치 등에 정밀을 요구하지 않기 때문에 가격이 저렴하며 전기 모터 및 Engine 구동이 적용된다. Table 2.5 에 On-deck Pump의 표준성능을 나타내었다.

Table 2.5 On-deck Pump의 표준성능

Suction Dia.(in)	Delivery Dia.(in)	Total Head(m)	Capacity (m <sup>3</sup> /min)	Pump Speed(rpm)	Horse Power(ps)
3	2	5-20	0.16-0.8	1130-1750	0.8-4.5
5	4	10-45	0.75-3.0	860-1750	4-45
8	6	10-42	1.6-7.0	700-1300	10-90
10	8	10-55	3.7-12.0	395-900	17-220
12	10	10-50	5.4-18.0	365-800	30-320
14	12	10-62	8.2-26.0	310-750	60-560
16	16	10-54	11.0-35.0	320-700	60-600

유기퇴적물을 제거하는 수단으로 가장 범용화 되고 효과적인 것이 흡입식 펌프에 의해 유기퇴적물을 제거하는 방식이지만, 저면에 부착된 물질 중에서 유기퇴적물 뿐만 아니라 다른 성분까지도 함께 제거되므로 생태계 파괴라는 문제가 야기된다.

본 연구에서는 하부가 개방된 통형구조에 분사시킨 고압의 공기 및 물에 의해 저면에 쌓인 유기퇴적물이 수중으로 부유토록 하고, 중앙에 설치된 도관을 통하여 이들 성분을 흡입·제거하는 시스템을 설계하였다.

시스템의 통형구조에 분사된 고압의 물과 공기는 본체자체를 부양시키는 효과를 주게 되므로, 안정된 자세에 의한 작업이 가능하도록 중량물을 함께 부착하여 안정된 자세가 이루어지게 하였다.

이 같은 구성은 단순한 흡입펌프보다 저면에 흡착된 유기퇴적물을 부유시켜 제거하므로 효율이 높고, 모래, 자갈 등은 비교적 적게 제거되는 효과를 거둘 수 있다.

수중 유기퇴적물 제거를 위한 시스템으로 몸체, 부력조절용 공기공급부, 퇴적오니 포집부 및 배출부 등으로 구성하였으며,

시스템의 특징으로는

- 1) 항만 및 양식장 등에 고정 혹은 이동식으로 설치 가능.
- 2) 규모에 따라 1 개의 시스템, 혹은 여러 개의 복합 시스템으로 구성 가능.
- 3) 퇴적오니 흡입구 환경 조절 가능.
- 4) 통형 구조체 내부의 공기 주입량 조절에 의한 부력 조절.
- 5) 다단계 오니 흡입관을 이용하여 다양한 수심에서 작업 가능.
- 6) 몸체에 Air Pocket을 설치하여 작업 중 균형을 유지하도록 하였다.

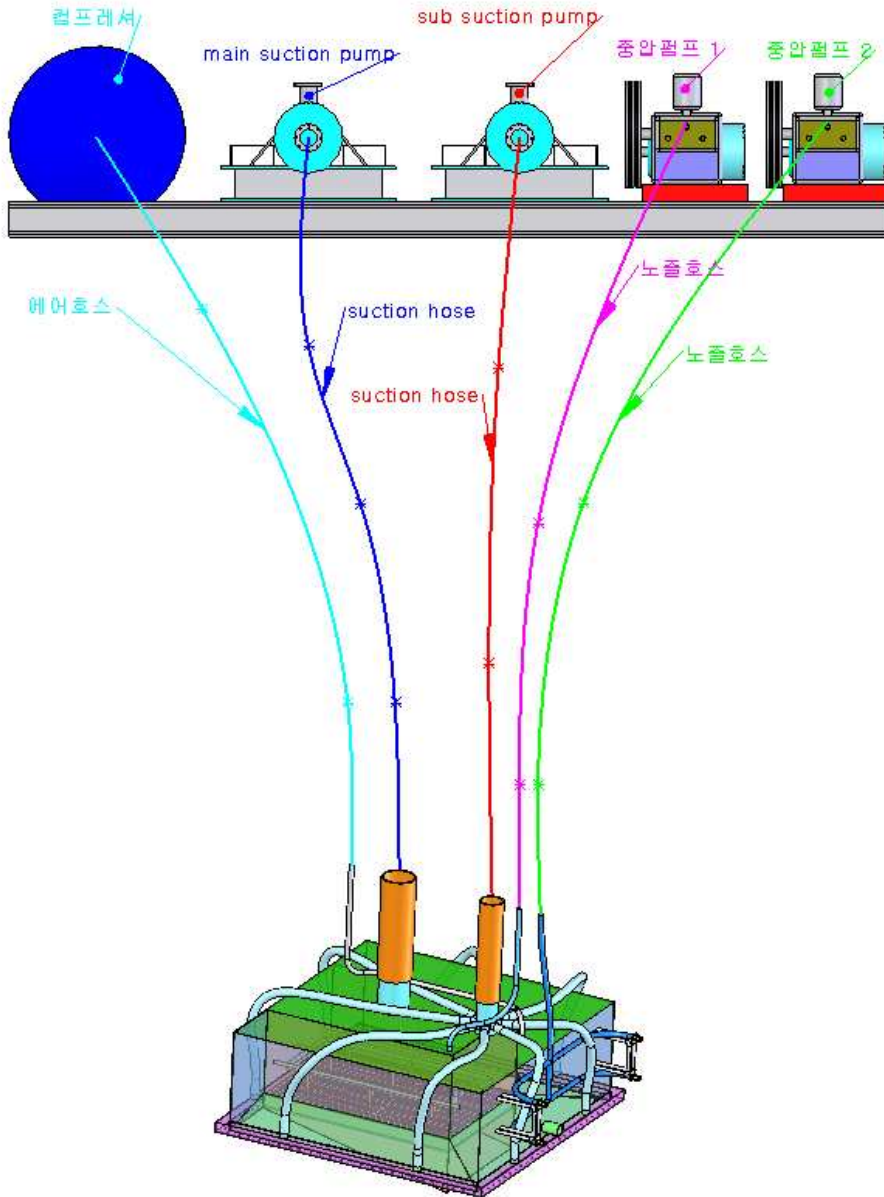


Fig. 2.5 유기퇴적물 수거 시스템의 구성



## 나. 구성 시스템의 설계요건

구성 시스템의 각 부분은 다음의 기능을 가지도록 한다.

### 1) 수중 본체

#### ① 유기퇴적물 흡입구

유기퇴적물을 제외한 이물질(자갈 등)이 흡입되지 않도록 스크린을 설치한다.

#### ② 유기퇴적물 2차 흡입구

수중 본체 밖으로 밀려나는 유기퇴적물까지도 흡입이 될 수 있도록 한다.

#### ③ 본체 이동

##### - 상승 기능

.컴프레셔를 통하여 공기를 주입하며 본체의 공기가 빠져나가지 않도록 한다.

.본체에 공기 주입구 설치(설치위치 - 본체 높이가 낮은 쪽(전진 방향))하고 공기 주입 조절 밸브를 설치한다.

##### - 전진 기능

.컴프레셔 또는 중압펌프를 이용하여 추진토록 하며, 본체 후면에 추진 노즐 및 조절 밸브를 설치한다.

##### - 하강 기능

.공기 배출이 되지 않은 상태에서 유기퇴적물 흡입 시 공기가 동시에 흡입되어 Suction Pump의 오동작 원인이 될 수 있으므로 본체에 공기 배출구(설치 위치 - 본체 상부)와 조절 밸브를 설치한다.

## 2) Suction Pump

### ① 유기퇴적물 흡입

Main Suction Pump로 유기퇴적물을 흡입하는 것으로 본체에 흡입구를 설치하고 호스 연결 및 흡입 제어 밸브를 설치한다.

### ② 유기퇴적물 2차 흡입

Sub Suction Pump로 유기퇴적물을 흡입하는 것으로 본체 외벽 하부에 배관되어 있는 파이프에 흡입 파이프를 분배 설치하며 호스 연결 및 흡입 제어 밸브를 설치한다.

## 3) 중압 펌프

### ① 유기퇴적물 와류 발생

고압의 물 분사로 유기퇴적물을 혼합시키는 것으로 본체에 노즐을 설치하고 호스 연결 및 조절 밸브를 설치한다.

### ② 본체 이동

추진력으로 Air(컴프레셔 이용) 사용 시에는 중압펌프는 사용하지 않는다.

## 4) 공기압축기(Air Compressor)

본체의 상승 및 전진 기능을 위하여 본체에 노즐을 설치하며 호스 연결 및 조절 밸브를 설치한다.

## 2. 수거 시스템의 수중 본체 배관설계

본 연구에서는 퇴적물을 수거하는 배관시스템의 최적설계인자를 도출하기 위하여 설계 최적화 기법을 사용하였다.

### 가. 설계최적화에서의 문제의 기술

설계변수를 구성하는 각각의 조건은 일반적으로 다음과 같은 2개의 제약조건과 목적함수로 표현된다[14].

#### ① 제약조건(Constraints)

$$H_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_i, \quad (i=1, m) \quad (2.1)$$

$$G_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq l_j, \quad (j=1, p) \quad (2.2)$$

#### ② 목적함수(Objective Function)

$$J = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \text{최소(최대)} \quad (2.3)$$

제약조건 ①과 함께 ②의 목적함수를 최대 또는 최소로 한다. 여기서  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 는 설계변수이며, 항목이나 크기 또는 압력이나 온도 등의 물리량이다.

제약조건의 식 2.1은 시스템의 성능관계식이나 강도조건식, 역학법칙 등과 같이 설계상 중요한 관계식이며, 자연법칙을 표현하는 경우가 많다. 식 2.1과 같은 등식의 제약은 등호제약이라 부른다. 식 2.2의 부등식의 경우는 부등호제약이라 부르며, 중량의 한계나 강도한계, 공작상의 한계 등을 나타내는 것이 많으며 모든 것이 인위적(Artificial)인 조건을 나타낸다.

$x_1, x_2, \dots$  등의 설계변수를 결정하는 경우에는 일반적으로 등호제약식 만으로는 조건이 부족한 것이 보통이며, 몇 개의 자유도가 남는다. 이것이 해석문제와 설계문제와의 기본적인 차이이며, 설계에서는 이것을 어떤 관점에서 결정할 필요가 있으며, 이것을 결정하는 것이 최적설계에 있어서 다음 목적함수의 최적화 조건이다.

목적함수인 식 2.3은 설계목적에 대한 평가식을 정식화한 것으로, 코스트나 효율 등이다. 이러한 최적화 조건에서 설계변수의 자유도가 없어지고 최적설계 변수( $x_1^*, x_2^*, \dots$ 로 표현된다)가 결정될 수 있다.

Fig. 2.3은 설계 최적화의 관계식을 나타내며, 빗금 친 부분은 부등호 제약 조건식  $G_i$ 를 만족하는  $x_1, x_2, \dots$ , (그림에서는 2차원으로서  $X_1, X_2$ 로 표시)의 범위에 있으며,  $H_1$ 은 1개의 등호제약식을 나타내는 것이다. 이들은 실행 가능한 영역을 나타내며, 이것을 만족하는 범위가 앞에서 언급한 실행가능 시스템이 된다. 또한 등고선은 식 2.3의 목적함수  $J$  값인  $X_1, X_2$ 에 의한 변화의 상태를 나타낸다. 최적치는 제약조건을 만족하는 영역에서 목적함수를 최대(최소)로 하는 것이므로 그림 중에서 최적치의 점이다.

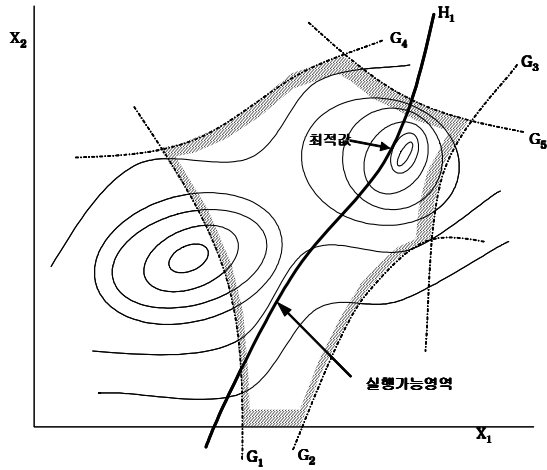


Fig. 2.3 설계최적화 관계식의 개념도

## 나. 시스템 배관의 설계 최적화

### 1) 설계 최적화 문제의 개요

설계 최적화에서는 각각의 설계목표 간에 경합관계(Trade-off)가 존재하며, 퇴적물 수거 시스템의 흡입펌프 설계 목표에서는 ㉠ 퇴적물을 퍼올리는 소요시간의 단축, ㉡ 배관 크기의 축소, ㉢ 펌프 규모의 축소 등이 될 수 있다.

이들은 서로 상반되는 요구조건으로써, 퇴적물을 퍼올리는 시간을 단축하기 위해서는 배관의 직경이나 용량을 크게 할 필요가 있으나 이는 ㉠, ㉡에 상반되며, 또한 ㉡의 배관 직경의 축소는 유동저항의 증가를 초래하므로 펌프의 총양정의 증가, 즉 ㉢의 펌프 규모의 증대를 가져온다.

설계목표는 서로 경합관계에 있는 각각을 최적화하는 것이다.

퇴적물 수거 흡입시스템의 흡입 Nozzle은 여러 개로 구성되며, 배관은 이것을 펌프로 연결하여 갑판상의 토출구에 이르게 된다. 문제는 ㉠,㉢,㉣의 조건을 만족하는 퇴적물 수거시스템의 흡입펌프 배관의 크기를 결정하는 것이 된다.

Fig. 2.4는 이러한 퇴적물 수거 흡입시스템을 모델화하여 나타낸 것이다.

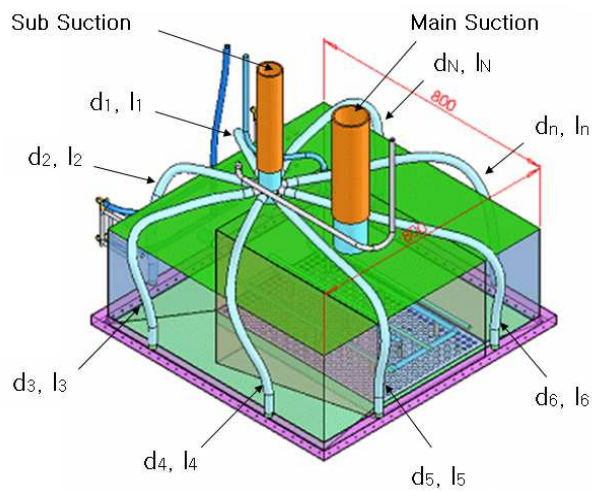


Fig. 2.4 퇴적물 흡입 시스템의 모델

## 2) 설계 최적화 문제의 구성

펌프의 유량, 압력 등은 탱크의 레벨에 의해 시간적으로 변화하며, 이 사이에는 유체역학적인 조건이 존재하므로, 최적설계의 문제를 구성하기에 앞서서 제약조건을 기술할 필요가 있다. 이것은 유량균형과 압력균형으로 정리된다.

퇴적물 수거시스템의 설계 최적화를 위하여 Fig. 2.4 에서와 같이 보조배관(Sub suction)에 대하여 주배관과 가지배관으로 모델화하였다.

각각의 길이를  $L$ ,  $l_i$ , 배관의 직경을  $D$ ,  $d_i$ , 유량을  $Q(\delta)$ ,  $q_n(\delta)$ 라 하면,

① 배관의 결합점에서의 유량균형으로부터

$$q_n(\delta) - Q(\delta) = 0, \quad (1 \leq n \leq N) \quad (2.4)$$

② 배관의 결합점에서의 압력균형으로부터

$$k_n l_n \dot{q}_n^2(\delta) / \dot{d}_n^5 + KLQ^2(\delta) / D^5 \\ - k_{n+1} l_{n+1} \dot{q}_{n+1}^2(\delta) / \dot{d}_{n+1}^5 = 0, \quad (1 \leq n \leq N-1) \quad (2.5)$$

단,  $k_i$ ,  $K$ 는 관의 저항계수이다.

③ 펌프의 성능식으로부터

펌프의 설계 총양정을  $\overline{H}_p$ , 정격 유량을  $\overline{Q}$ , 시간  $t$ 의 총양정을  $H_p(\delta)$ , 유량을  $Q(\delta)$ 라 할 때, 펌프의 성능곡선을 점  $(\overline{Q}, \overline{H}_p)$ 을 지나는 2차식으로 나타내면,

$$H_p(\delta) = \alpha \overline{H}_p + (1-\alpha) \overline{H}_p Q^2(\delta) / \overline{Q}^2 \quad (2.6)$$

이 된다. 여유율  $\alpha$ 는 펌프의 종류가 결정되면 미리 주어지는 것으로 한다.

④ 펌프의 압력균형으로부터

토출구의 소요압력을  $H_r$  로 하면, Fig. 2.5 에 의해 식 2.7 과 같이 된다.

$$k_N M d_N^2(\delta) / d_N^5 + KLQ^2(\delta) / D^5 + H_r + H_d - h_A(\delta) = H_P(\delta) \quad (2.7)$$

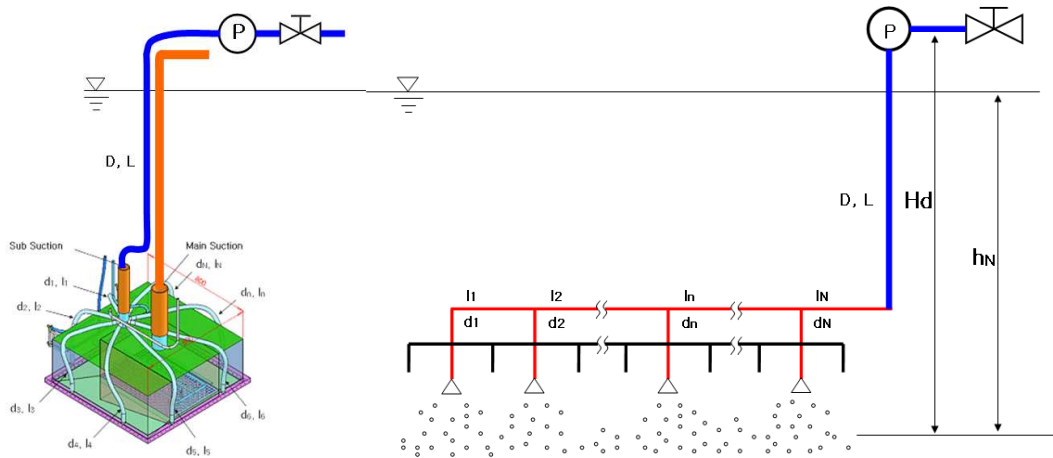


Fig. 2.5 퇴적물 흡입 시스템의 배관 및 펌프 시스템 모델

최적화의 계산에서는 앞에서 언급한 각각의 설계목적 ①, ②, ③를 만족하는 펌프의 항목(정격유량, 총양정)과 배관의 크기를 위의 식 2.4 ~ 2.7의 조건을 시작으로 정해지는 것이지만, 여기서는 다음과 같이 취급하였다.

설계목표 중에 ①의 소요시간인  $\bar{T}$ 를 주어진 조건으로 ②, ③의 목적을 만족하는 최적화를 실시하였으며, 유량은 시간적으로 변하나 일정하다고 취급하였다.



따라서 식 2.4 ~ 2.7에서 제약 조건식은 다음과 같이 된다.

i) 제약조건식

$$\overline{Q}d = \overline{Q} \quad \overline{q}_n(d) = \overline{q}_n \quad (1 \leq n \leq N) \quad (2.8)$$

가지배관의 각 흡입구의 면적을  $A_n$  이라 하면

$$\overline{q}_1/A_1 = \overline{q}_2/A_2 = \dots = \overline{q}_N/A_N \quad (2.9)$$

식 2.9로부터  $\overline{q}_n$  과  $\overline{Q}$ 는 다음과 같다.

$$\overline{q}_n = \overline{Q} A_N / \sum_{n=1}^N A_n \quad (2.10)$$

주어진  $\overline{T}$ 에 대하여,

$$\overline{Q} = (\sum_{n=1}^N V_n) / \overline{T} \quad (2.11)$$

$V_n$ 은 수거시스템의 하부 용량이 N 개로 구성되는 것으로 간주하며,  $\overline{Q}$ 를 구하여 식 2.10에 대입하면  $\overline{q}_n$ 이 정해진다.

$$k_n \overline{q}_n / d_n^2 + KZ \overline{Q}^2 / \overline{D}^5 - k_{n+1} l_{n+1} \overline{q}_{n+1} / d_{n+1}^2 = 0 \quad , \quad (1 \leq n \leq N-1) \quad (2.12)$$

또한  $H_A(d) = \overline{H_P} \cdot h_A(d)$ 의 평균값인  $H_S$ 를 사용하여 식 2.7에 대입하면,

$$k_N \overline{d_N^2} / \overline{d_N^5} + KL \overline{Q^2} / \overline{D^5} + H_r + H_d - H_S = \overline{H_P} \quad (2.13)$$

식 2.8 ~ 식 2.13 이 제약조건식이 된다.

ii) 목적함수

식 2.5, 2.13에서  $\overline{a_n}$ ,  $\overline{Q}$ 를 주어진 조건으로 하여, 배관의 직경  $d_n$ ,  $D$  펌프의 규격(총양정)  $\overline{H_P}$ 를 설계변수로 하여 최적화하였으며, 설계목적의 ㉞, ㉟를 다음과 같이 정식화하였다.

우선, ㉞의 배관크기의 축소화에 대한 크기를 대표하는 평가지표로서,

$$J_1 = \sum_{n=1}^N (LD^2 + l_n d_n^2) \quad (2.14)$$

를 사용한다.  $LD^2$  또는  $l_n d_n^2$ 은 관의 두께가 직경에 비례하는 관의 중량에 연결된 지표이다.

다음에, ㉟의 펌프 규모의 평가지표로서,

$$J_2 = \overline{H_P} Q \quad (2.15)$$

를 사용한다.

$\overline{H_p Q}$ 는 펌프의 소요동력 또는 규모에 연결되어 있으며, 만일 양정시간  $\overline{T}$ 가 주어지면  $\overline{Q}$ 는 일정해지므로  $J_2$ 는  $\overline{H_p}$  즉 펌프의 총양정에 연결된다.

이와같이 ㉠, ㉡, ㉢의 설계목적에 대하여 ㉠만이 주어지는 외적조건이라고 할 때, ㉡, ㉢의  $J_1, J_2$ 를 최소화하는  $D, d_i, \overline{H_p}$ 를 구하는 경우의 다목적 최적설계의 문제가 된다.

$J_1, J_2$ 는 경합관계에 있는 조건이므로 이것의 최적화는 Pareto 최적화가 된다.

### 3) 흡입펌프 배관의 설계 최적화

#### ① 설계 최적화 조건

i) 퇴적물 수거시스템에서 배관시스템의 최적화 설계를 위한 조건을 Table 2.6에 나타내었으며, 가지배관의 흡입부 면적은 수거 시스템의 하부 면적을 가지배관의 수로 나누어 계산하였다.

수거시스템의 하부 용적  $V_n$ 은, 수거 시스템의 노즐이 퇴적물로부터 5cm 높이에 위치하였을 때를 기준으로 하여 펌프의 시간당 흡입용량을 가지배관의 수로 나누는 것으로 하였다.

Table 2.6 퇴적물 수거 흡입펌프의 보조 배관 시스템

배관 No.	흡입부 용적( $m^3$ )	흡입부 단면적( $m^2$ )	주배관 길이( $m$ )	가지배관 길이( $m$ )	관저항(마찰) 계수
1~ 7	3.75	0.08	15	1	0.03
8	3.75	0.08	15	1	0.03

관저항에 의한 손실계산은 총양정을 결정하는데 중요한 것으로 Darcy의 실험식  $H_f = \lambda(L/D)(v^2/2g)$ 로 계산된다. 여기서,  $v$  는 유속, 마찰계수  $\lambda$  는 0.03으로 계산한다.

ii) Fig. 2.4 및 식 2.6에서의  $H_d$  및  $H_s$  ( $H_s(d)$ 의 평균)와 펌프의 여유율  $\alpha$  는 다음과 같이 계산하였다.

$$H_d = H_s = 15m \quad \alpha = 0.25$$

iii) 주어진 조건으로서 양정시간  $\bar{T}$ 에 대해서는 다음과 같이 가정한다.

$$\bar{T} = 1.0hr \quad (\bar{Q} = 30m^3/hr)$$

② 배관시스템의 최적해

배관시스템의 최적설계를 위한 계산에서는 식 2.14 및 2.15의  $J_1, J_2$  에서  $J_2$  는 변화시키지 않으므로  $J_1$  을 최소화하는  $D, d_n$  을 구한다.

Table 2.7 에  $D, d_1 \sim d_8, H_p$  의 최적해를 나타내었다.

Table 2.7 배관시스템의 최적해

Pareto 최적해		최 적 해	설계 및 적용	
목적함수의 최적치	$J_1 \quad m^3$	0.076	0.0053(0.0025)	
	$J_2 \quad m^{-\frac{m^3}{s}}$	0.263	0.125	
최적계산치	주배관 $D \quad m$	0.068	0.05	
	가지배관	$d_1 \quad m$	0.053	0.019
		$d_2 \quad m$	0.029	0.019
		$d_3 \quad m$	0.026	0.019
		$d_4 \quad m$	0.024	0.019
		$d_5 \quad m$	0.022	0.019
		$d_6 \quad m$	0.021	0.019
		$d_7 \quad m$	0.021	0.019
		$d_8 \quad m$	0.021	0.019
		$\overline{H_p} \quad m$	31.59	15
양정소요시간	$\overline{T} \quad hr$	1.0	1.0	

설계에 있어서는 주배관 및 가지배관의 직경을 계산된 최적치보다 작게 하여 통일시켰으며, 목적함수  $J_1$ 에 대해서도 주배관의 길이를 1m로 하여 추정하였다.

실제 적용에 있어서는 FRP 계통의 주배관 및 가지배관을 사용하고 비중 1.4를 적용하였다.

### 3. 수거 시스템의 수중 본체 설계 및 제작

수중 본체는 저면이 개방된 직육면체의 통형 구조체 형태로써 고압수가 저면 개방부를 향하여 분출 가능하며 측면에는 별도의 분사노즐이 설치되어 있다.

수중 본체의 상단부에는 수면에 설치된 흡입펌프와의 연결관, 고압펌프에 의하여 고압수를 공급하도록 하는 연결관, 수면에 노출된 고압펌프, 진공펌프 및 조절장치로 구성된 콘트롤부로 구성되어 있다.

수중 본체는 3가지 형태로 설계 및 제작되었으며, Table 2.8에 각 Type 별 특성에 대하여 나타내었다.

Table 2.8 수중 본체의 Type 별 특성

수중 본체	특 성	설 계 및 제 작	실 험 및 문 제 점
Type 1	하부가 개방된 사각 Box 형태로써 부력실이 ㄷ형의 일체형으로 됨.	개념설계 및 제작	균일하지 않은 부력실의 공기압 분포로 인한 자세 불안정
Type 2	Type 1의 부력실 형태를 수정하여 전체 body의 전 후좌우 끝 4군데에 위치토 록 함.	개념설계 및 제작	후면 스키프로 인한 추진 장애와 퇴적물 흡입성능 저하
Type 3	후면 스키프로 인한 추진 장애요소를 제거하고 주 배관 및 보조배관을 일체 형으로 함.	개념설계	-

## 가. Type 1 수중 본체 설계 및 제작

### 1) 수중 본체 설계

#### ① Main Suction Part

하부가 개방된 사각 Box 형태 (400mm×600mm×420mm-300mm)의 상부에 Suction Hole을 두어 유기퇴적물 수거라인을 확보하도록 하였고, 하부에는 이물질 유입 방지를 고려하여 스크린 망(5mm×5mm)을 설치하도록 하였다.

스크린 상부에는 노즐을 설치토록 하여 중압펌프에서 보내는 물을 고압으로 분사시켜 저면에 퇴적된 유기물을 일으킴으로써 물과 혼합되어 Suction 될 수 있도록 하였다. Box의 하부 형태는 추진 시 장애 요소를 최소화하기 위해 경사지도록 설계하였다.

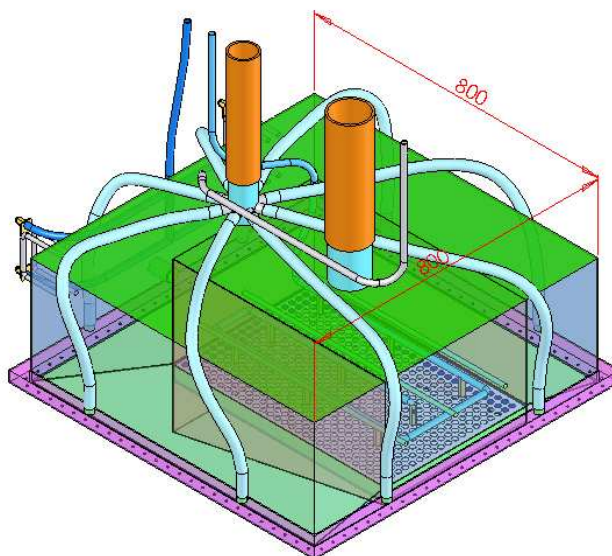


Fig. 2.6 Type 1 수중 본체의 개념도

## ② Buoyancy Part

Main Suction Part의 삼면(양측면, 후면)에 밀폐된 ㄷ형의 Box를 설치토록 하여 공기 주입 시 Body가 부양될 수 있도록 하였고, Box 상부에는 공기 주입 및 배기 역할을 수행할 수 있는 Hole을 두었으며, 후면 하부에는 공기주입시 Box 내의 물이 배출될 수 있도록 배출구를 두었다.

하부를 개방하지 않고 밀폐함으로써 Suction시 Body 전체가 퇴적물에 박히지 않도록 하였다.

## ③ Sub Suction Part

Buoyancy Body 각 면의 하부에는 확산되는 퇴적물을 2차 Suction 할 수 있도록 하부가 Hole 가공된 관을 설치하였으며, 관 상부에는 8개의 Hole을 가공하고 각 Hole에 호스를 연결하도록 하였다.

## ④ Water Jet Part

Buoyancy Body 후면에는 4개의 Water Jet Nozzle을 설치토록 하여 중압펌프에서 보내는 물을 고압으로 분사시킴으로써 전체 Body를 추진 할 수 있도록 하였다.



## 2) 수중 본체 제작 및 문제점



(a) Type 1 수중 본체의 상부 및 측면형상



(b) Type 1 수중 본체의 하부형상

Fig. 2.7 Type 1 수중 본체의 형상

부력실이 ㄷ형으로 칸 나뉘지 않아 하나로 되어 있으며, Fig. 2.8에 보는 바와 같이 부력실에 공기 주입 시, 무게중심과 부력의 Balance가 이루어지지 않아 한쪽으로 기울어지는 문제가 발생하였다.

Suction 할 수 있는 방향으로 Body가 균형을 잡기 위해선 부력실을 나누어 전체 Body가 안정적인 자세를 취할 수 있도록 하는 개선이 필요한 것으로 판단된다.



Fig. 2.8 Type 1 수중 본체의 진수 및 문제점

## 나. Type 2 수중 본체 설계 및 제작

### 1) 수중 본체 설계

#### ① Buoyancy Part

Type 1의 부력실 형태에서 3면의 부력실 중간부분을 절단하고 막음 처리함으로써 부력실을 전체 Body의 전후좌우 끝 4군데에 위치토록 하여 Body의 균형을 유지할 수 있도록 수정하였다.

각 부력실 상부에는 공기 주입 호스를 연결하여 각각의 부력실에 단독으로 공기 주입을 할 수 있도록 하였다.

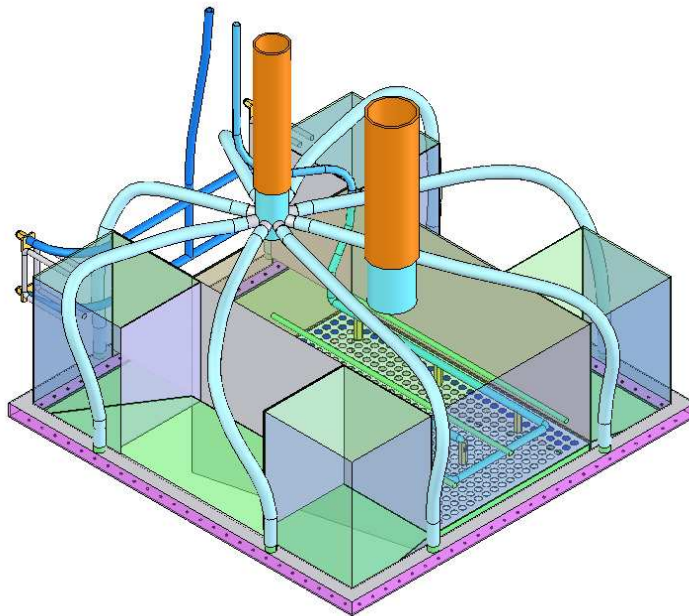


Fig. 2.9 Type 2 수중 본체의 개념도

Table 2.9 수중 본체의 중량

본체의 중량 (Kg)	
2T 강관	37
80A, 50A 강관	4
아연각관	5
스텐봉	1
기타	3
합계(호스제외)	50

2) 수중 본체 제작 및 문제점

Fig. 2.10 은 Type 1의 문제점을 개선하여 제작된 Type 2에 대하여 Water Jet의 시험장면을 나타낸 것이다.



Fig. 2.10 Type 2 수중 본체의 Water Jet 시험



Fig. 2.11 Type 2 수중 본체의 작업 및 문제점

Type2의 작업 및 문제점으로는 Fig. 2.11에서와 같이 Main Suction Part의 후면 스커트가 추진 시 장애요소를 발생시키며, Body 전면에서는 비교적 흡입이 잘 이루어지고 있으나 후면에서는 스커트로 인하여 성능이 저하되고 있다.

따라서 스커트를 제거시키고, 전후좌우 대칭 구조와 Sub Suction Line을 Main Suction Line과 일체화하는 개선이 필요한 것으로 판단된다.

## 다. Type 3 수중 본체 설계 및 개념도

수중 작업 시 Type 2 수중 본체의 문제점 개선을 위한 설계가 수행되었으며, Fig. 2.12 ~ 2.17에 Type 3의 개념도를 나타내었다.

### 1) 수중 본체 설계

#### ① Main Suction Part

내부 공간(길이는 길어지고 높이는 낮아짐)을 줄여 유기 퇴적물 Suction량이 증가하도록 하였다. 이물질 유입방지를 위해 스크린 망을 설치하였으며 스크린 망은 교체가 용이하도록 Body 상부와 볼팅 처리 하였다.

노즐은 Body 상부의 경사진 면의 2곳에 설치하여 분사압력을 높이도록 하였으며, Body 상부 중앙에 Suction Hose을 설치할 수 있도록 하여 무게 중심을 쉽게 잡을 수 있도록 하였다.

하부에는 스커트를 달아 양 옆 바닥의 퇴적물의 흡입을 차단하여 Suction시 전체 Body가 퇴적물에 박히지 않도록 하였으며 스커트 양 끝은 경사지도록 하여 Suction 시작 시 확산될 수 있는 요소를 제거하였다.

#### ② Buoyancy Part

Main Suction Part의 양측면 전후에 Box형태로 설치토록 하여 균형유지가 용이토록 하였으며, 각 실 상부에는 공기 주입 및 배기를 위하여 Hose 설치가 가능토록 하였다.(공기 주입 시 부력실에 채워졌던 물이 밖으로 빠져 나갈 수

있도록 하부가 Open 되었으며, 공기 배출시 하부 Open된 곳으로 물이 유입될 수 있도록 함.)

부력실 밑으로는 바닥을 두어 전체 Body가 퇴적물에 박히지 않도록 하고, 바닥의 전면은 위로 경사지도록 하여 추진 시 장애물을 피할 수 있도록 하였다.

### ③ Sub Suction Part

전체 Body의 각 면을 돌아가면서 관을 설치하여 확산되는 퇴적물을 Suction 할 수 있도록 하였으며, 관 하부에는 퇴적물 흡입 Hole이 가공되도록 하고 상부에는 각 면에 2곳씩 8개의 배출 Hole이 가공되도록 하였다.

배출 Hose는 Main Suction Line과 연결되도록 하여 Main Suction Pump 1대로 Sub Suction 까지 가능토록 하였으며, 또한 Hose Line이 하나가 되어 취급이 용이토록 하였다.

관은 바닥면에서 닿지 않도록 20mm 띄워 관에 의한 퇴적물의 확산을 방지토록 하였다.

### ④ Water Jet Part

4개의 부력실 중 뒤에 위치한 2개의 부력실에 각각 2개의 노즐을 설치하도록 하여 Body를 추진할 수 있도록 하였으며, 노즐 방향은 수평방향에서 상방향으로 15도 정도 기울기를 주어 분사되는 물에 의한 퇴적물의 확산을 방지토록 하였다.

2) 수중 본체 설계 개념도

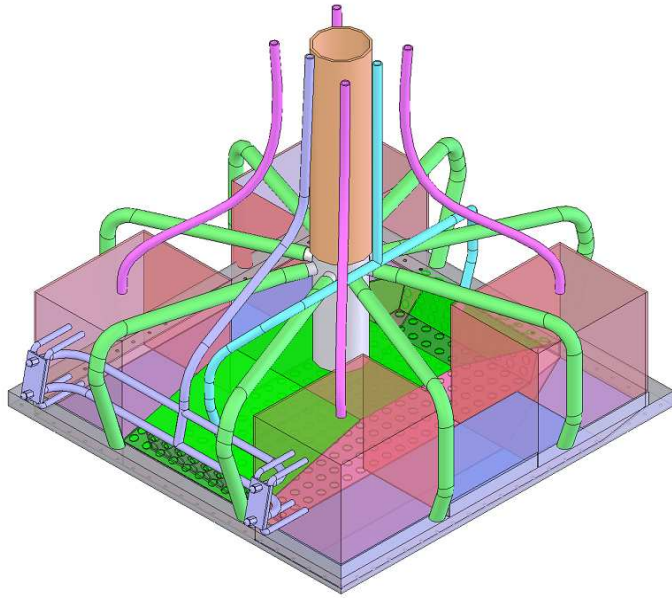


Fig. 2.12 Type 3 수중 본체의 개념도

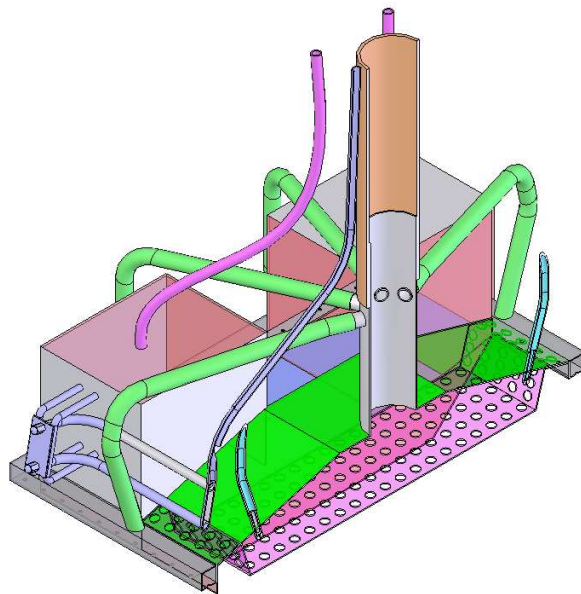


Fig. 2.13 Type 3 수중 본체의 횡방향 단면도



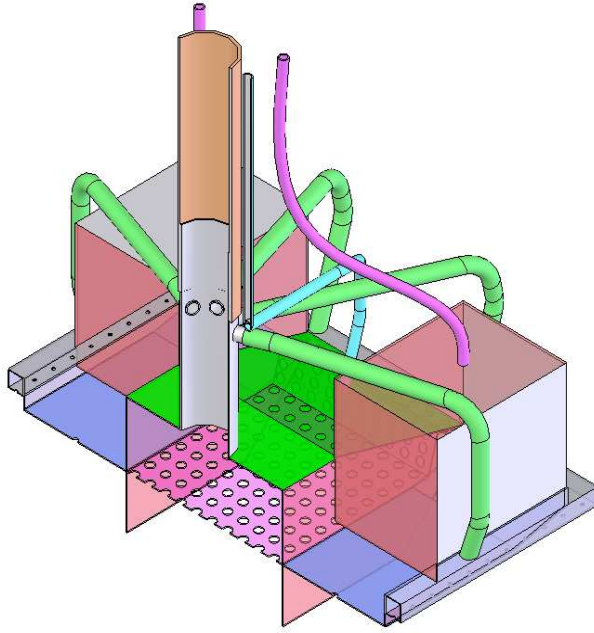


Fig. 2.14 Type 3 수중 본체의 종방향 단면도

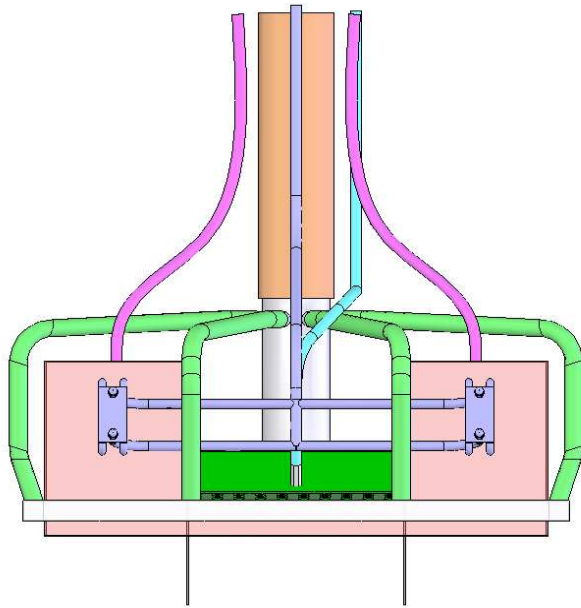


Fig. 2.15 Type 3 수중 본체의 측면도

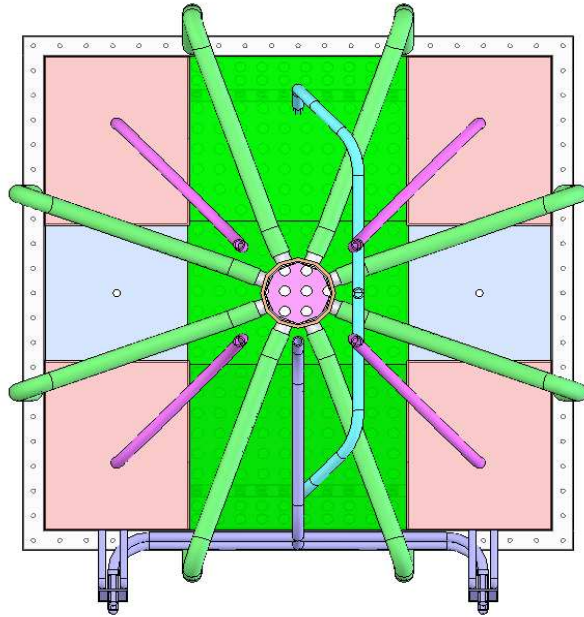


Fig. 2.16 Type 3 수중 본체의 평면도

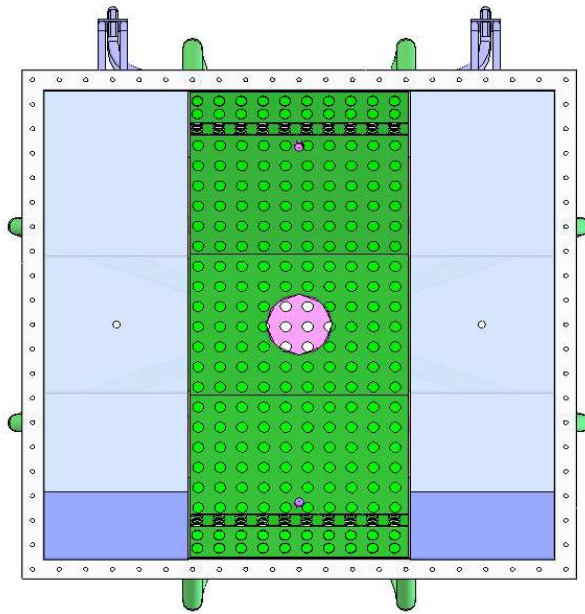
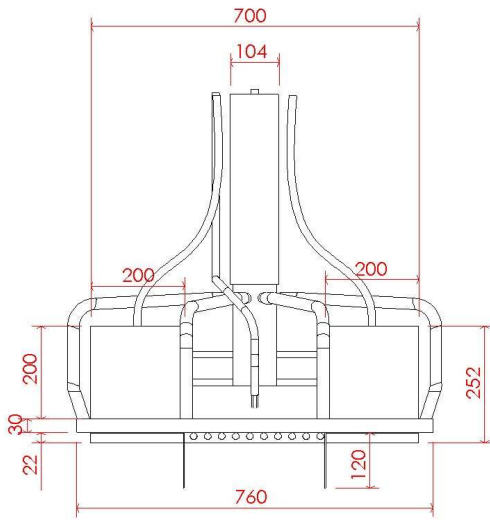
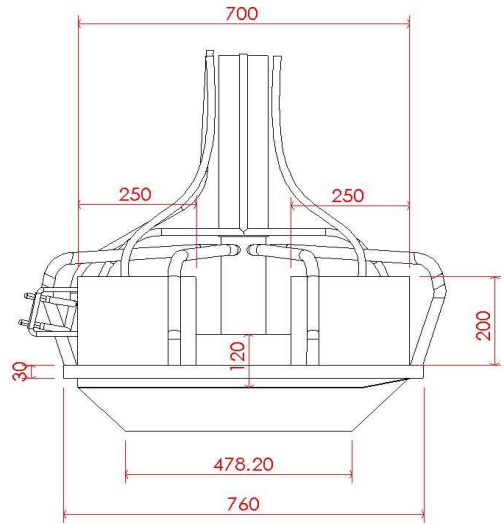


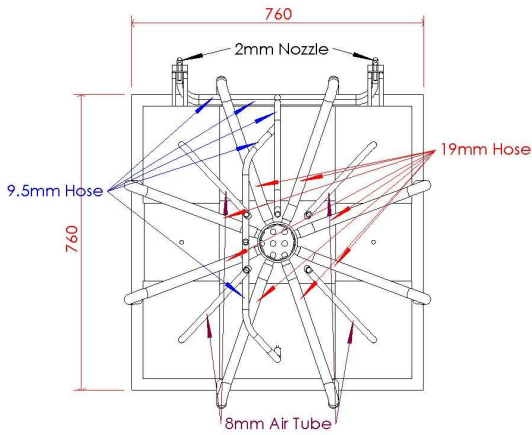
Fig. 2.17 Type 3 수중 본체의 하부



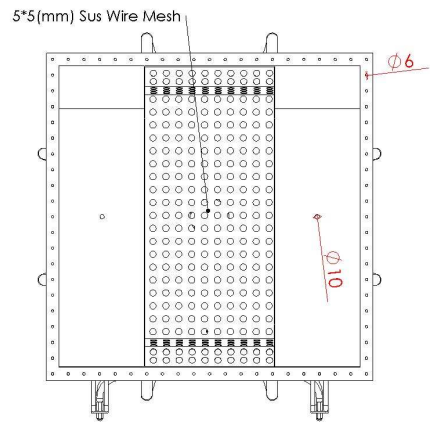
정면



좌측면



평면



배면

Fig. 2.18 Type 3 수중 본체의 주요 치수

### 제3절 수거 시스템의 시험 및 결과분석

#### 1. 시험장비

Fig. 2.19에는 유기 퇴적물 수거를 위한 Pilot-Scale 시험에 필요한 시험장비들을 보이며, 각 장비들의 목적과 사양을 Table 2.10에 나타내었다.



Fig. 2.19 유기퇴적물 수거 시스템의 시험 장비

Table 2.10 유기퇴적물 수거 시스템의 구성 장비

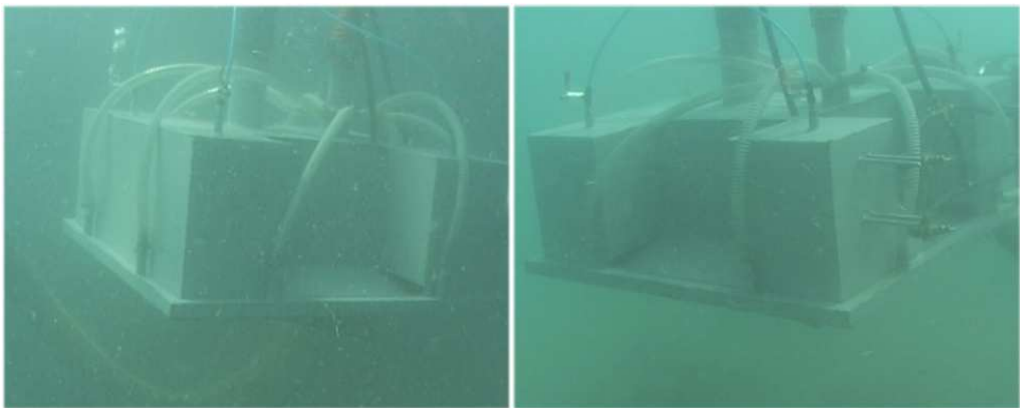
	목 적	사 양
main suction pump	저면에 있는 퇴적물 1차 suction 용 펌프	.비자흡식 펌프 .흡입 및 토출 구경 80mm .유량 1.2 m <sup>3</sup> /min .모터동력 7.5 KW(10HP) AC 삼상 220V/380V 겸용 .양정 20M
sub suction pump	저면에 있는 퇴적물 2차 suction 용 펌프	.비자흡식 펌프 .흡입 및 토출 구경 50mm .유량 0.5 m <sup>3</sup> /min .모터동력 3.7 KW(5HP) AC 삼상 220V/380V 겸용 .양정 15M
중압 pump 1	저면에 있는 퇴적물의 부유를 위한 water 분사용 펌프	.압력 30~40 kgf/cm <sup>2</sup> .흡수량 62~90 ℓ/min .motor 3HP
중압 pump 2	수중 본체 전진을 위한 water jet 분사용 펌프	.압력 30~40 kgf/cm <sup>2</sup> .흡수량 62~90 ℓ/min .motor 3HP
air compressor	수중 본체 상승을 위한 공기 주입용 공기압축기	.탱크용량 150 ℓ .토출량 9.5 kgf/cm <sup>2</sup> .모터동력 3.7 KW(5HP) AC 삼상 220V/380V 겸용
hose	공기주입 및 퇴적물 흡입	air hose, suction hose
body		.구성관 : 본체 구성(재질 - 3T 강관) .스크린 : 고형물 등 이물질 차단(10mm 타공망 개구율 60%) .노즐 : straight nozzle(12EA), 추진용 노즐(4EA) .파이프 : 슬러지 2차 펌핑 배관 .밸브 : 공기주입용 밸브(1EA), 배기용 밸브(1EA), suction용 밸브(2EA)

## 2. 수거 시스템 예비 성능시험

Fig. 2.20 및 Fig. 2.21은 Pilot-Scale로 설계 제작된 Type 2 수중 본체의 Water Jet 추진 장치에 대한 예비 성능 시험모습을 나타낸 것이다.



Fig. 2.20 Type 2 수중 본체 Water Jet 시험



정지 상태

이동 상태

Fig. 2.21 Type 2 수중 본체의 정지 및 이동시험

Fig. 2.22는 수중에서 유기퇴적물의 흡입성능시험을 나타낸 것으로 Body 전면에서는 비교적 흡입이 잘 이루어지고 있으나 후면에서는 시스템 하부의 스커트로 인하여 흡입성능이 저하됨에 따라 Type 3의 설계에서는 스커트를 제거하였다.



흡입중 Body 전면

흡입중 Body 후면

Fig. 2.22 Type 2 수중 본체의 수중 흡입성능시험

Fig. 2.23은 Type2의 시험결과를 나타낸 것으로 스크린 망을 통과하지 못한 자갈 등이 중앙에 쌓여 있다.



Fig. 2.23 Type 2 수중 본체에 의한 유기퇴적물 수거 전후 상태

Fig. 2.24에 해저에서 흡입된 유기퇴적물의 배출상태 및 침전된 유기퇴적물의 결과를 나타내었다.



Fig. 2.24 유기퇴적물 배출상태 및 유기퇴적물



### 3. 유기퇴적물 수거 성능시험 및 결과분석

유해성 유기퇴적물에 관련된 해저의 일반 상태는

- 하구, 포구 등은 자연적인 상태의 퇴적이어서 상대적으로 평탄한 퇴적층이며,
- 양식장의 하부, 가까운 연안 어업 구역은 폐그물 등이 산재되어 있고,
- 섬 주변과 암반 지역은 생물이 서식하기에 적합한 지역임에도 불구하고 틈틈이 유해성 퇴적물이 산재되어 있다.

따라서, 실험은 ① 수심, ② 해저의 상태, ③ 노즐의 위치 변경(압력 변화)을 기본으로 작업에 따른 유해성 퇴적물의 분산 정도를 실험하였으며, 시험조건은 다음과 같다.

- 1) 수심 3m
- 2) 해저 상태 1 : 90%이상의 퇴적물이 평탄하게 산재  
해저 상태 2 : 약간의 경사와 50% 정도의 퇴적물이 산재  
해저 상태 3 : 20도 이상의 경사와 20% 이하의 퇴적물이 산재
- 3) 노즐 위치 1 : 5cm, 노즐 위치 2 : 7.5cm, 노즐 위치 3 : 10cm
- 4) 실험 A : 정지된 위치에서 실험, 슬러지의 분산 상태 확인  
실험 B : 0.1m/min 이동시 실험, 슬러지의 분산 상태 확인  
실험 C : 0.5m/min 이동시 실험, 슬러지의 분산 상태 확인  
실험 D : 1.0m/min 이동시 실험, 슬러지의 분산 상태 확인

Table 2.11과 Fig. 2.25에 상기의 시험조건 해저상태 1,2,3에 대하여 퇴적물 수거시스템이 정지한 경우( $V=0$  m/s) 노즐위치 변화에 따른 유기퇴적물의 함유율을 나타내었다.

Table 2.11 정지상태에서 노즐 위치 변화에 따른 유기 퇴적물 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min, 토출압력=30 bar)

노즐 위치	유기 퇴적물 함유율 (%)		
	해저상태 1	해저상태 2	해저상태 3
5.0 cm	17	8	3
7.5 cm	15	7	1
10.0 cm	7	2	0

노즐의 위치가 5cm 이하에서는 노즐의 토출압력이 강하여 시스템 외부로 퇴적물이 유출되며, 이로 인한 혼탁현상이 발생하였다.

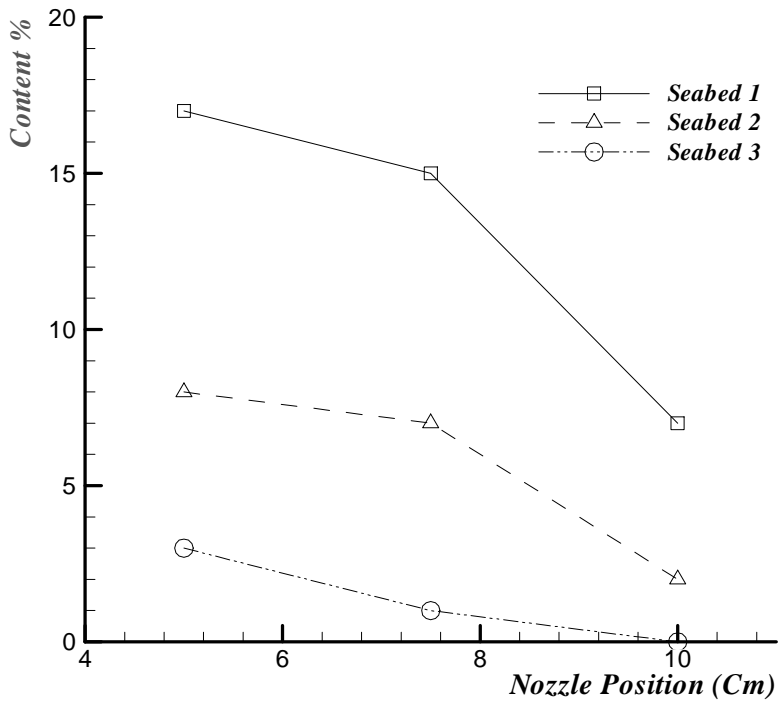


Fig. 2.25 정지상태에서 노즐 위치 변화에 따른 유기 퇴적물 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min, 토출압력=30 bar)

Table 2.12 및 Fig. 2.26 은 90%이상의 퇴적물이 평탄하게 산재한 해저상태 1에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화를 나타낸 것이다.

Table 2.12 해저상태 1에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)

속도 \ 함유율/압력	유기 퇴적물 함유율 (%)				
	10 Bar	20 Bar	30 Bar	40 Bar	50 Bar
V=0.0m/s	11	16	18	20(외부유출)	21(외부유출)
V=0.1m/s	9	10	16	18	18(외부유출)
V=0.5m/s	8	10	15	17(외부유출)	18(외부유출)
V=1.0m/s	5	7	11(외부유출)	17(외부유출)	17(외부유출)

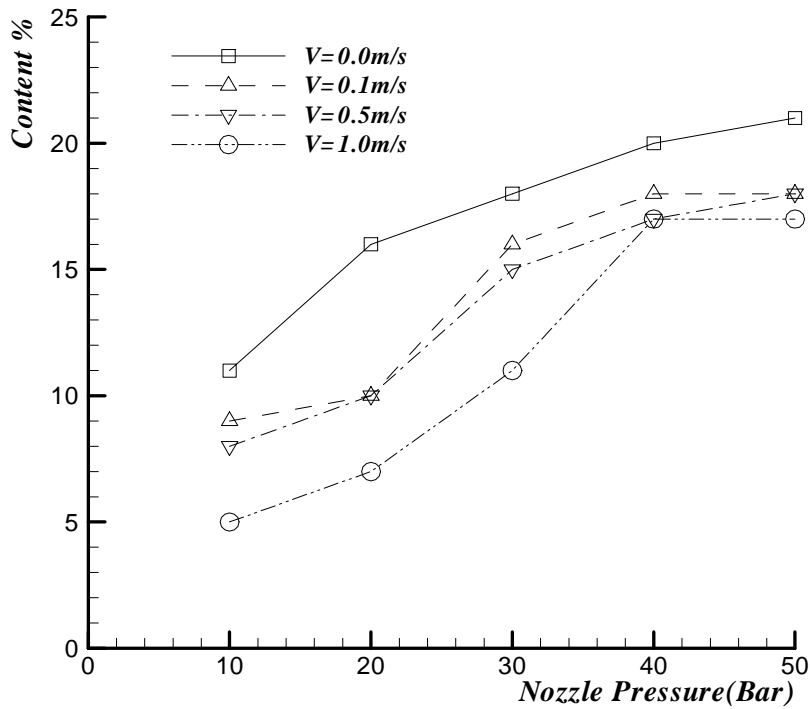


Fig. 2.26 해저상태 1에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)

Table 2.13 및 Fig. 2.27은 약간의 경사와 50% 정도의 퇴적물이 산재한 해저상태 2에서 퇴적물의 함유율 변화를 나타낸 것이다.

Table 2.13 해저상태 2에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)

속도 \ 함유율/압력	유기 퇴적물 함유율 (%)				
	10 Bar	20 Bar	30 Bar	40 Bar	50 Bar
V=0.0m/s	7	7	8	12	12
V=0.1m/s	7	7	8	10	11
V=0.5m/s	5	6	6	9	10(외부유출)
V=1.0m/s	3	4	5	6(외부유출)	6(외부유출)

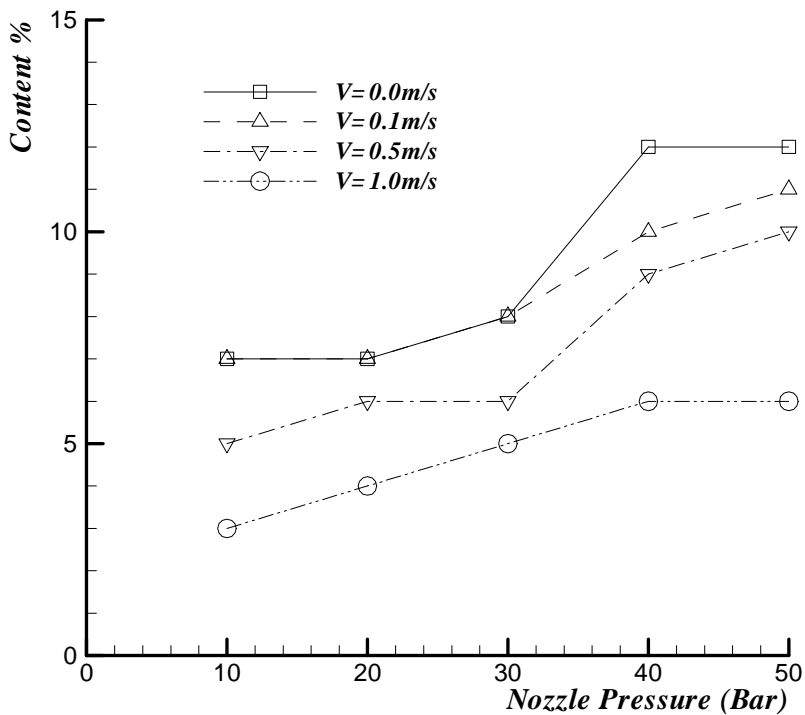


Fig. 2.27 해저상태 2에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)

Table 2.14 및 Fig. 2.28은 20도 이상의 경사와 20% 이하의 퇴적물이 산재 해저상태 3에서 퇴적물의 함유율 변화를 나타낸 것이다.

Table 2.14 해저상태 3에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)

속도 함유율/압력	유기 퇴적물 함유율 (%)				
	10 Bar	20 Bar	30 Bar	40 Bar	50 Bar
V=0.0m/s	0	2	4	4	4
V=0.1m/s	0	2	3	4	4
V=0.5m/s	0	1	2	3	3
V=1.0m/s	0	0	1	1	1

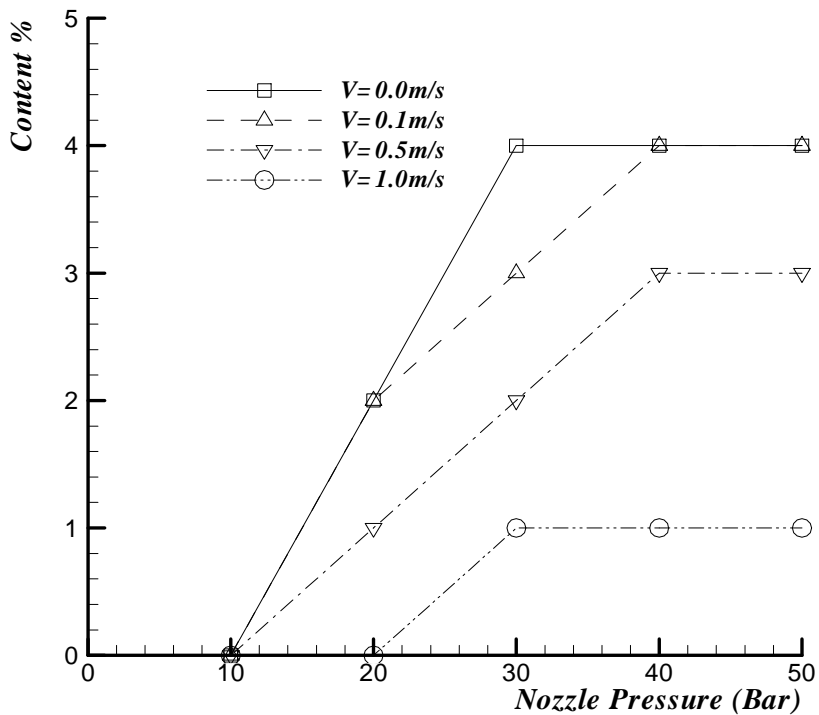


Fig. 2.28 해저상태 3에서 노즐 펌프 압력 변화에 따른 퇴적물의 함유율 변화  
(토출량=1m<sup>3</sup>/min)

## 제4절 수거 시스템 수중 본체의 유체역학적 특성

### 1. 개요

본 연구에서는 유기퇴적물 수거 시스템의 수중 본체 형태와 가동 조건에 따른 유체역학적 특성 분석을 위하여 상용 S/W인 Fluent 6.2를 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

퇴적물 수거 시스템의 수중 본체 형상과 수중 본체의 하부에 부착된 스킨트에 따른 유체흐름의 특성을 살펴보고 최적의 형상을 가지는 수중 본체를 도출하고자 하였으며, 수중 본체가 주변 흐름에 미치는 영향 등을 파악하였다.

수치 시뮬레이션을 위한 수중 본체의 형상은 Type1, Type2 및 Type3의 3가지 형태이며, 주배관 하부에서의 유동특성을 파악하여 퇴적물의 수거성능을 향상시키는 설계에 주안점을 두었고, 확산에 의한 2차 오염 방지를 위한 수중 본체 측면의 배관내 유동에 대해서는 고려하지 않았다.

Fig. 2.29의 Type 2(a) 및 (b)는 수중 본체 하부에 후방 스킨트가 부착되었을 때와 제거되었을 때의 유동현상을 파악하기 위한 수중 본체의 개략도를 나타낸 것이며, 스킨트의 형상은 수중 본체의 전진방향이 낮은 장방형의 모양으로 설계되었다.

Type 3에서의 스킨트 형상은 전후방향으로 Open된 형태로 설계되었고, 폭 방향으로 평행하게 설치된 스킨트 주위의 유동현상 등을 조사하였다.

Fig. 2.29의 Type 1 및 Type 2에서 배관의 직경은 0.08m이며, Type 3의 배관직경은 0.104m로 설계되었다.

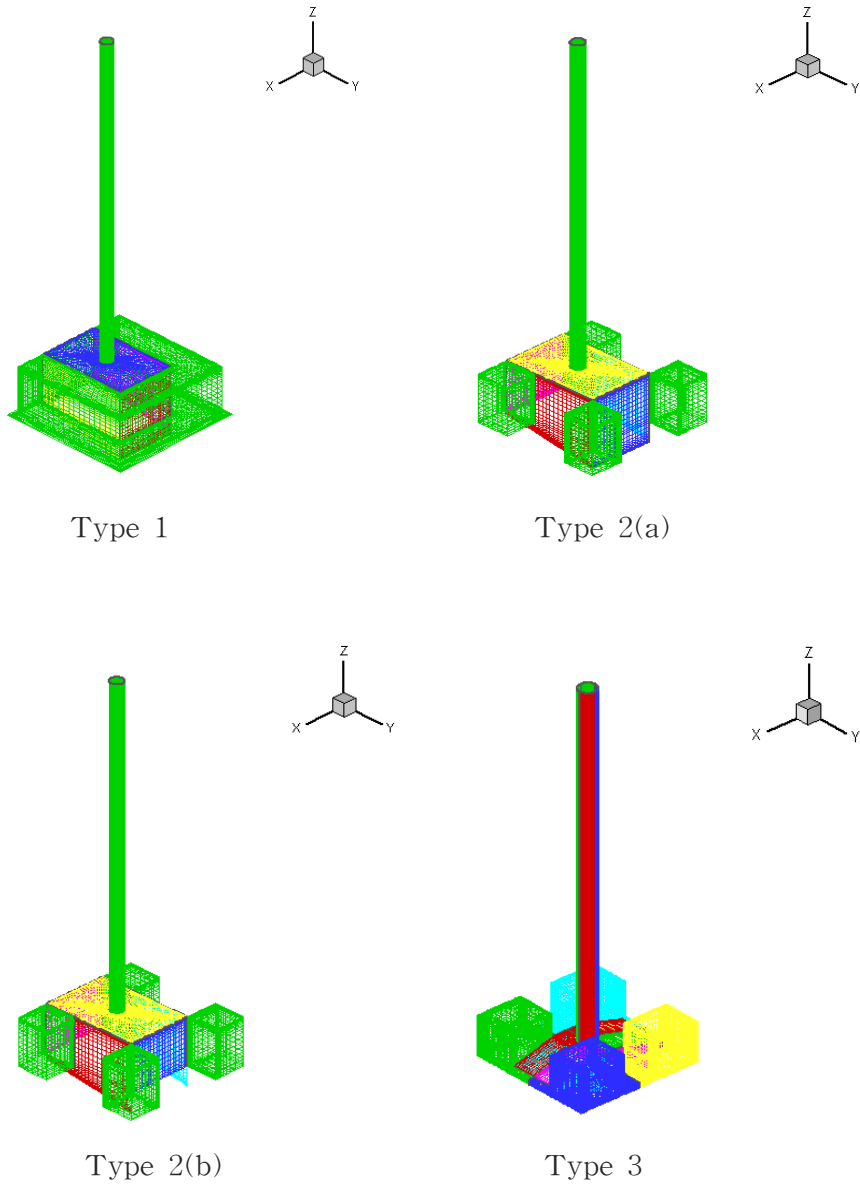


Fig. 2.29 퇴적물 수거 시스템의 수중 분체 형상과 격자

## 2. 수치계산법

격자계는 Gridgen을 이용하여 정렬격자계로 구성하였으며, 과도한 계산 격자를 줄이기 위하여 Wall Function(부록 A)을 도입하였으며, 벽면에서의 난류 유동의 모사가 적절히 되도록 하기 위하여  $Y^+$ 를 약 30 ~ 100 정도로 유지하도록 격자계를 생성하였다.

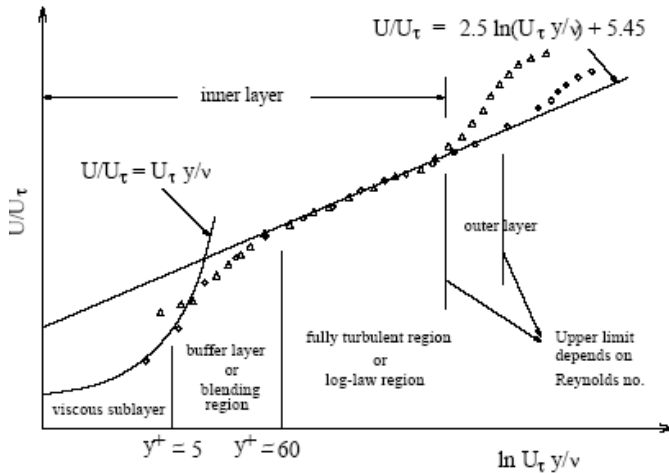


Fig. 2.30 Subdivisions of the Near-Wall Region

여기서,  $U$ : Velocity Parallel to the Wall

$U_\tau$ : Shear Velocity

$y$ : Distance from the Wall

$\nu$ : Kinetic Viscosity ( $\rho/\mu$ )

$y^+$ :  $\rho U_\tau y/\mu$



정도 높은 형상 표현을 위하여 Multi-Block 격자계를 도입하였으며, 사용된 격자계수는 Type 1의 경우 60만개, Type 2의 경우 70만개 그리고 Type 3의 경우 100만개를 이용하였다.

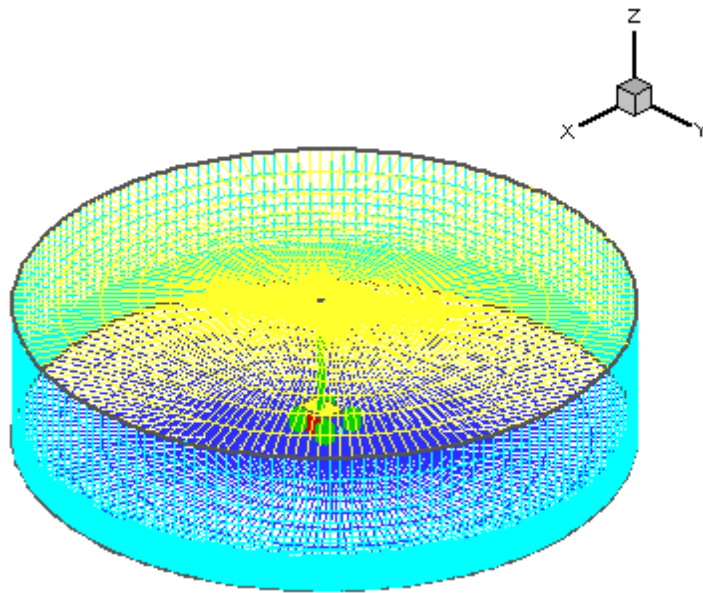


Fig. 2.31 수치시물레이션에 사용된 구조물과 격자

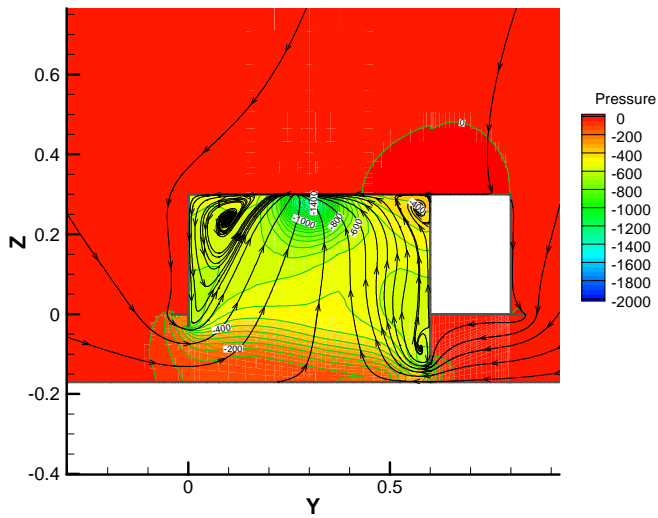
바깥 경계의 영향을 적게 받기 위하여 바깥 경계의 위치는 본체의 약 5배 정도로 구성하였고, 그 경계의 조건은 압력을 일정하게 부여하고 펌프에 의하여 유입되는 물은 지배방정식에 의하여 계산되도록 하였다. 또한 펌프의 효과를 모사하기 위하여 펌프에 유입되는 물의 유입량( $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ )을 일정하게 주었다.

계산에 사용된 지배방정식은 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식이고, 난류모형은 k- $\epsilon$  모형을 사용하였다.

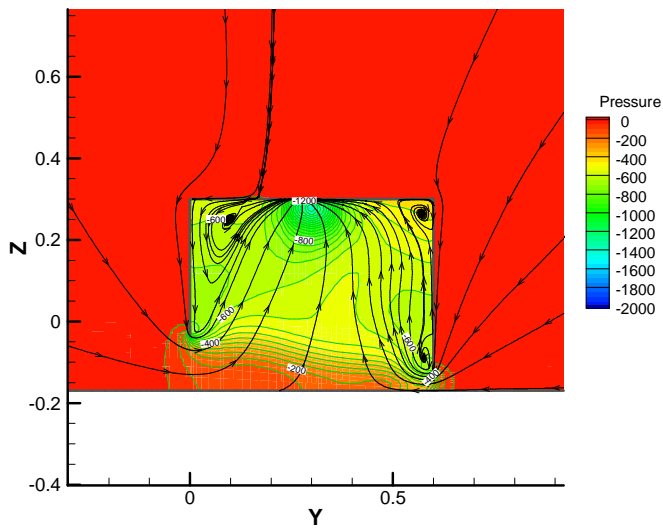
### 3. 수치해석 결과 및 검토

Fig. 2.32 ~ Fig. 2.38에 수중 본체 형상과 조건에 따른 압력 및 유선분포를 나타내었다.

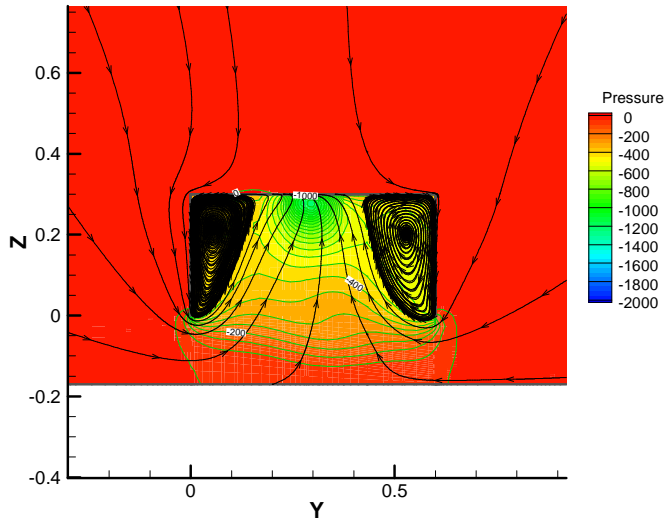
Fig. 2.32에서 계산결과의 X방향 위치는 수중 본체 중양을 기준으로 균등 분할하여 나타낸 것이다.



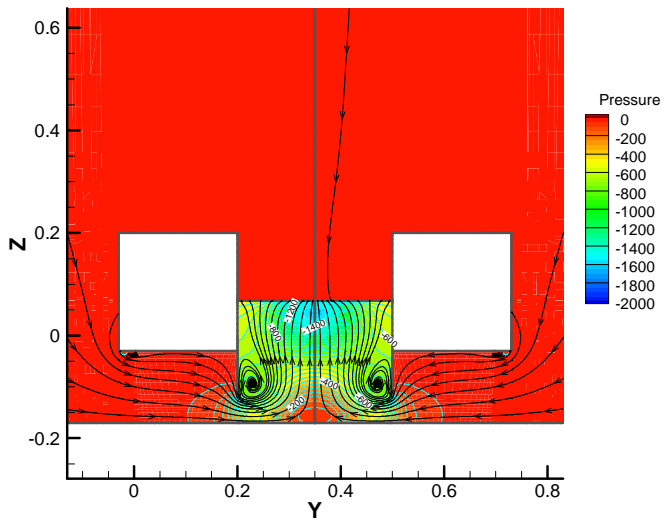
(a) Type 1 (x=0.3m)



(b) Type 2(a) (x=0.3m)



(c) Type 2(b) ( $x=0.3m$ )

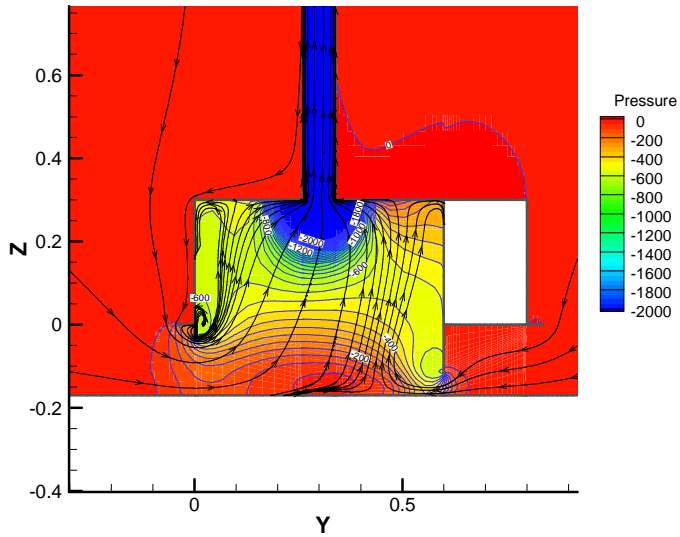


(d) Type 3 ( $x=0.25m$ )

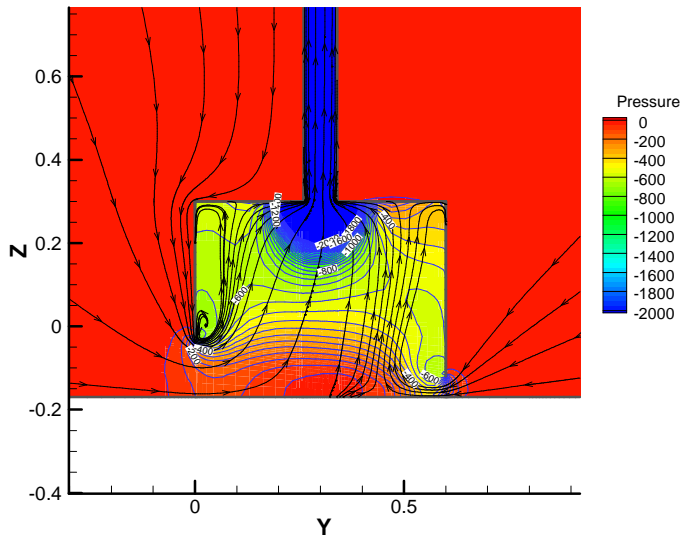
Fig. 2.32 수중 본체의 X방향 위치에서 압력 및 유선분포

Type 1 및 Type 2(a)의 내부유동은 유사하며, Type 2(b)는 내부 양쪽에 발생한 강한 와류로 인하여 흐름이 원활하지 못하고, Type 3는 내부의 압력이 낮아지면서 유속이 빨라지고 Suction이 잘 이루어짐을 나타내고 있다.

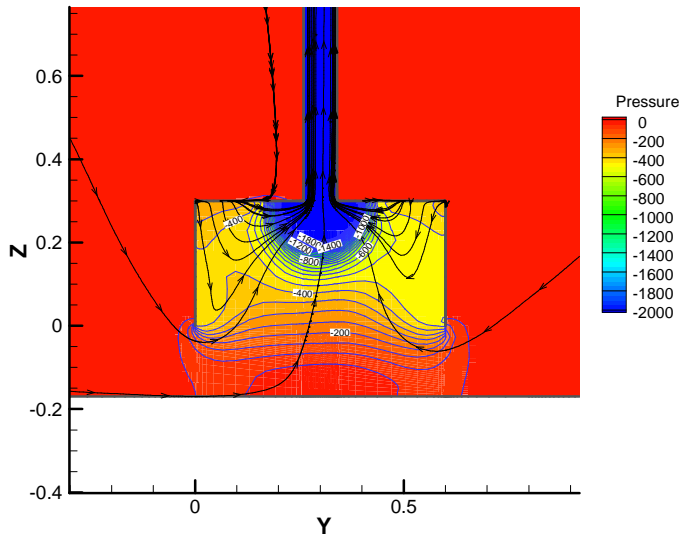
Fig. 2.33에서는 X방향 중앙위치에서 Type 1 및 Type 2(a)의 내부압력 및 유선분포가 같음을 나타내고 있으며, Type 2(b)에서는 스킨트 후방이 제거되면서 전체적으로 내부의 와류현상이 사라지고 있음을 보여주고 있다.



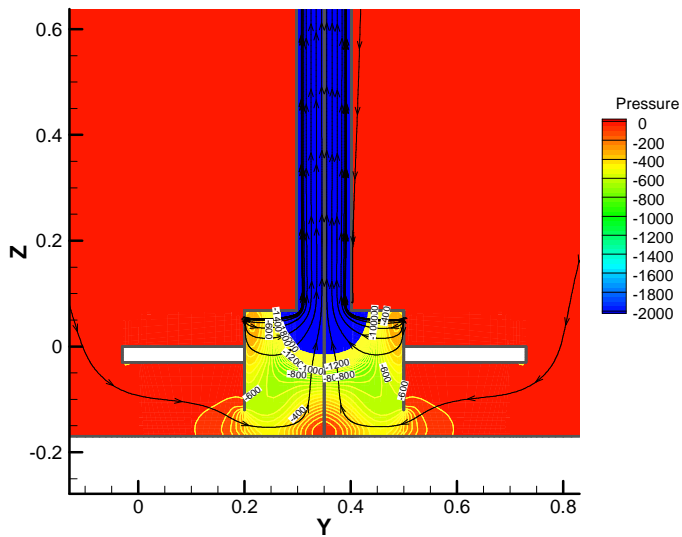
(a) Type 1 (x=0.4m)



(b) Type 2(a) (x=0.4m)



(c) Type 2(b) ( $x=0.4m$ )



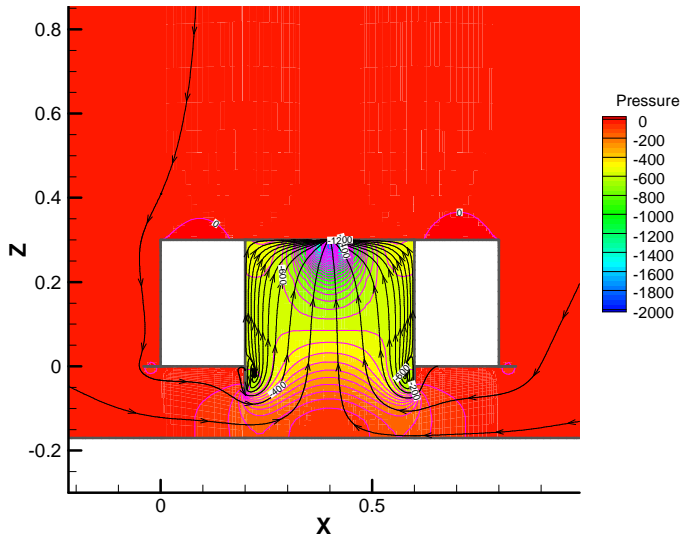
(d) Type 3 ( $x=0.35m$ )

Fig. 2.33 수중 본체의 X방향 중앙위치에서 압력 및 유선분포

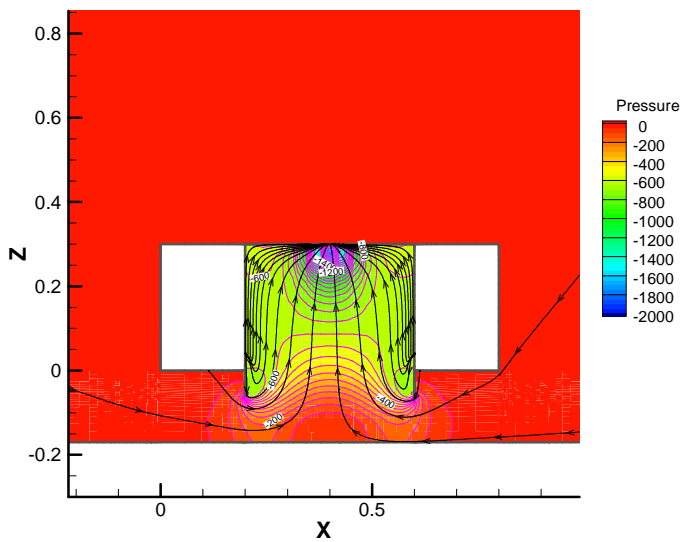
Type 3에서는 배관의 직경이 커짐에 따라 배관주위의 낮은 압력분포의 크기는 다소 줄어들고 있으나, 전체적인 수중 본체 내부의 압력과 유선이 개선되어짐을 나타내고 있다.

Fig. 2.34는 수중 본체 하부의 Y방향 위치에서의 압력 및 유선분포에 대한 계산결과를 나타낸 것이다.

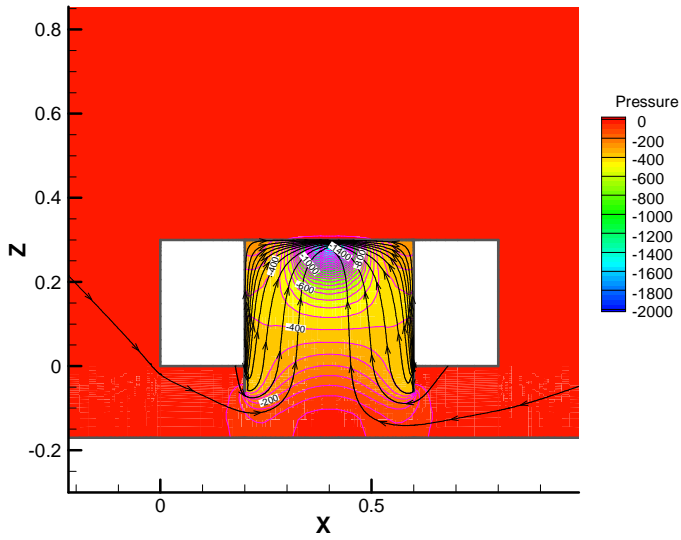
Type 1 및 Type 2의 압력 및 유선분포는 대동소이한 것으로 판단되고,



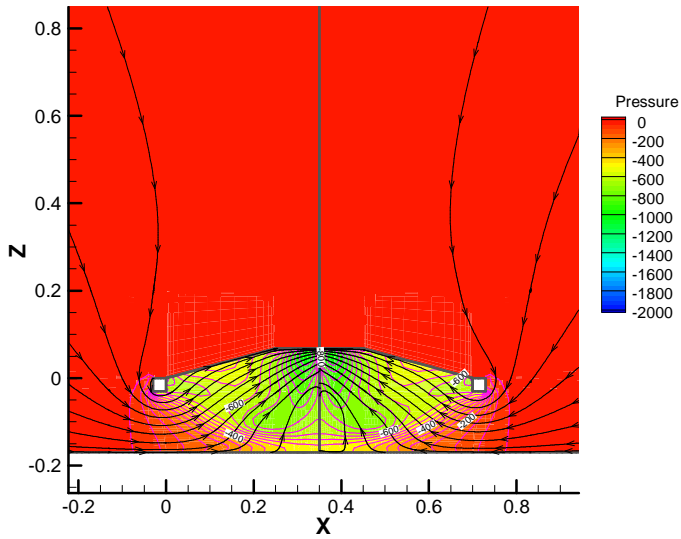
(a) Type 1 ( $y=0.2\text{m}$ )



(b) Type 2(a) ( $y=0.2\text{m}$ )



(c) Type 2(b) ( $y=0.2\text{m}$ )



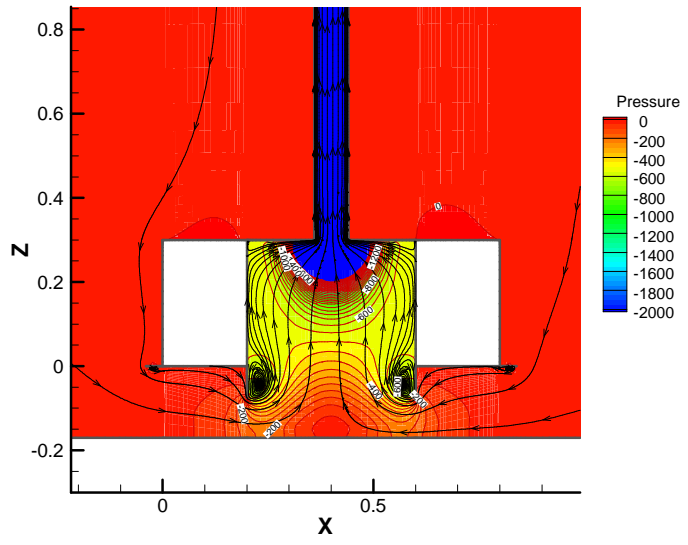
(d) Type 3 ( $y=0.25\text{m}$ )

Fig. 2.34 수중 본체의 Y방향 위치에서 압력 및 유선분포

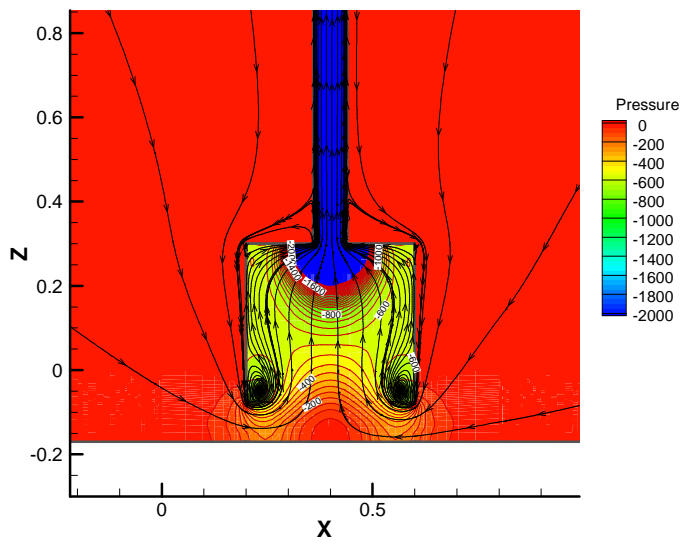
Type 3에서는 전체적인 형상이 Y 방향으로 폭이 넓어지고 깊이가 낮아지면서 수중 본체 내부의 압력이 낮아지고 유선의 분포도 균일하게 나타나는 것으로 보인다.

Fig. 2.35는 수중 본체 하부의 Y방향 중앙위치에서의 압력 및 유선분포에 대한 계산결과를 나타낸 것이다.

Type 1 및 Type 2의 압력 및 유선분포는 대동소이하며, 수중 본체 하부에 강한 와류가 형성되는 것을 나타내고 있다.

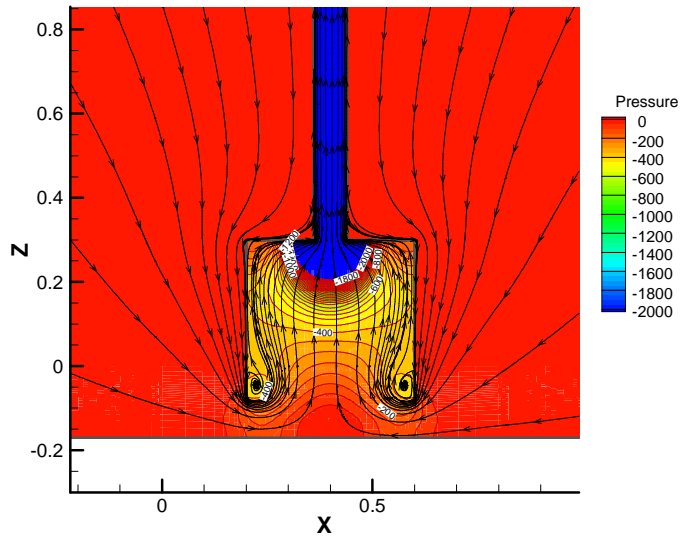


(a) Type 1 (y=0.3m)

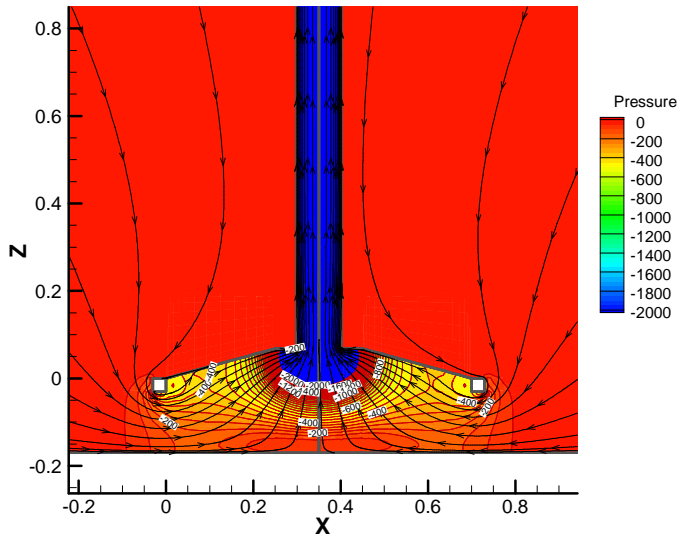


(b) Type 2(a) (y=0.3m)





(c) Type 2(b) ( $y=0.3\text{m}$ )

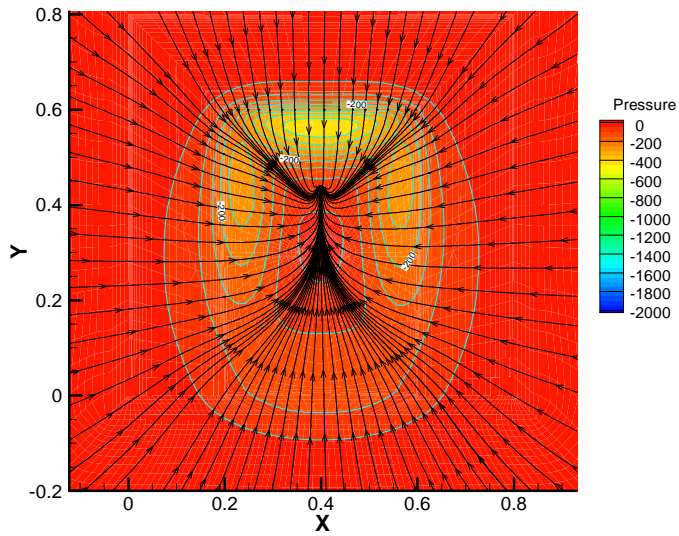


(d) Type 3 ( $y=0.35\text{m}$ )

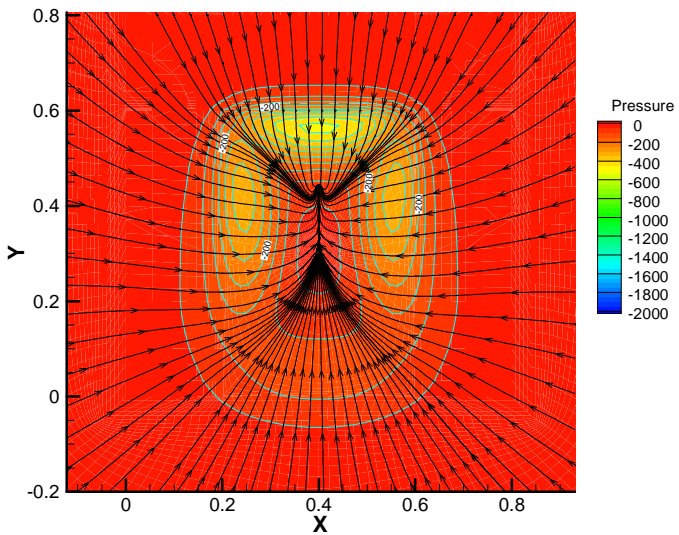
Fig. 2.35 수중 본체의 Y방향 중앙위치에서 압력 및 유선분포

Type 3의 압력분포는 Type 1 및 Type 2 형태와 유사하고, 유선분포는 균일하게 나타나고 있다.

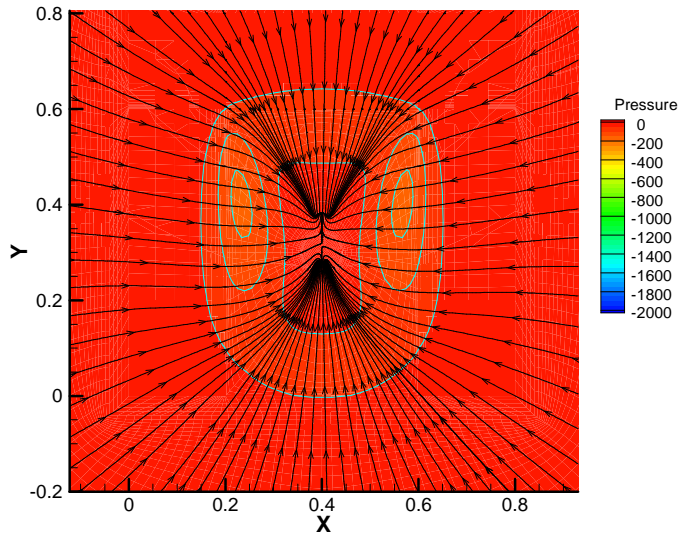
Fig. 2.36의 계산결과는 수중 본체의 바닥위치에서 아래로 0.15m 떨어진 곳에서의 압력 및 유선의 분포를 나타낸 것이다.



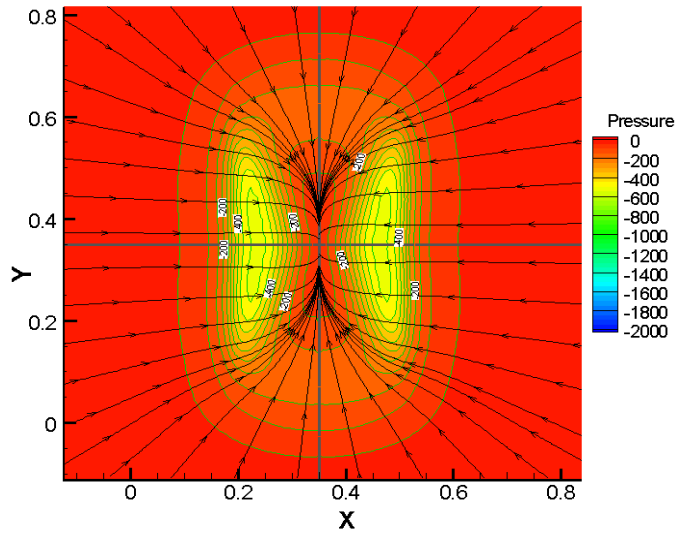
(a) Type 1



(b) Type 2(a)



(c) Type 2(b)

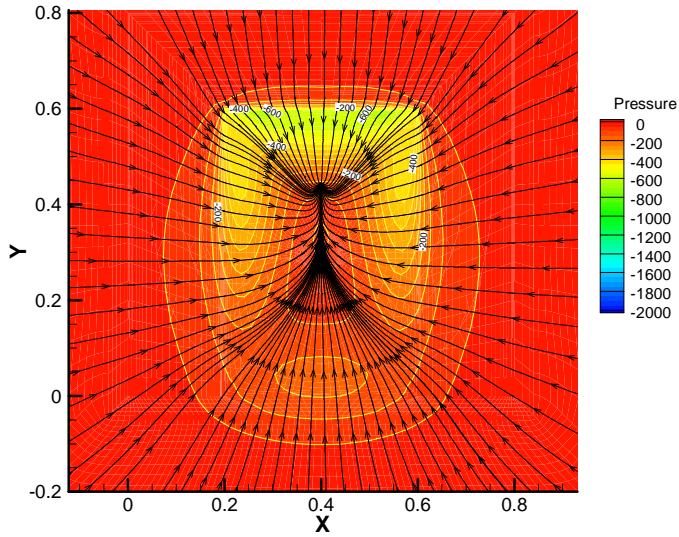


(d) Type 3

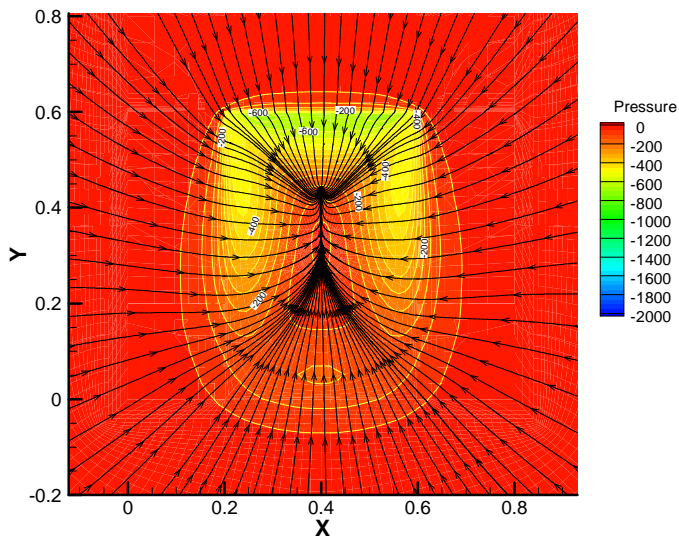
Fig. 2.36 수중 본체의 Z방향 위치에서 압력 및 유선분포 ( $Z=-0.15\text{m}$ )

스커트 후방이 제거된 Type 2(b)에서는 와류가 사라지고 있으며, Type 3에서는 스커트 주위에 와류가 형성되고 있음을 나타내고 있다.

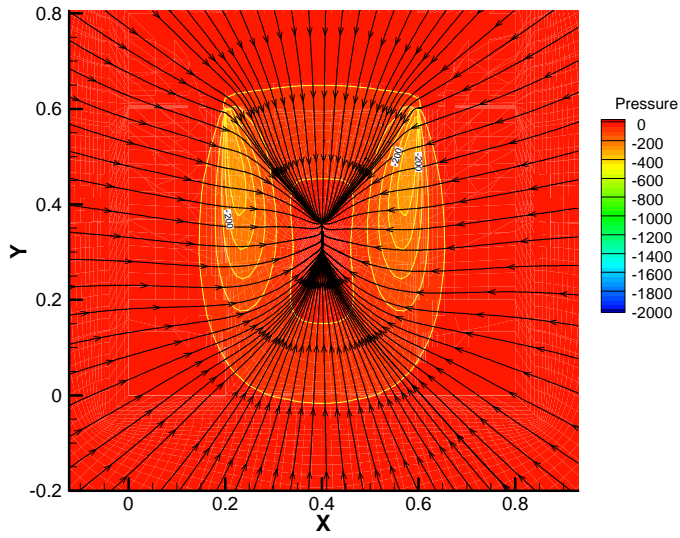
Fig. 37의 계산결과는 계산결과는 수중 본체의 바닥위치에서 아래로 0.12m 떨어진 곳에서의 압력 및 유선의 분포를 나타낸 것으로 Type 1 및 Type 2는 Fig. 2.36과 유사한 형태를 보이나 압력이 다소 높아지고 있다.



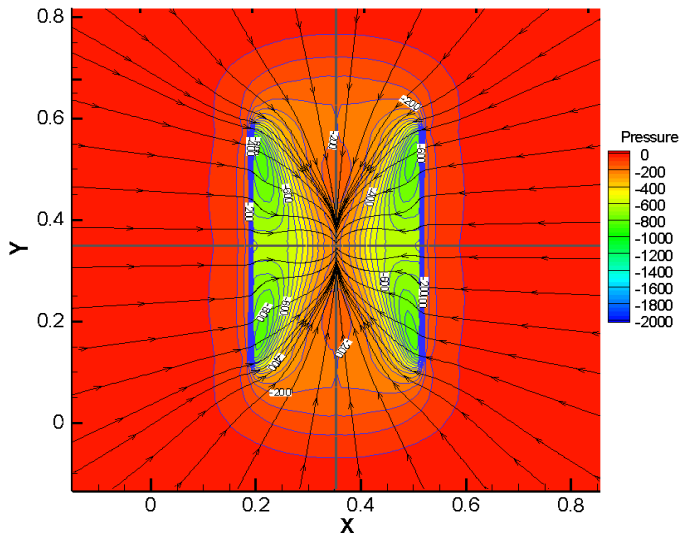
(a) Type 1



(b) Type 2(a)



(c) Type 2(b)

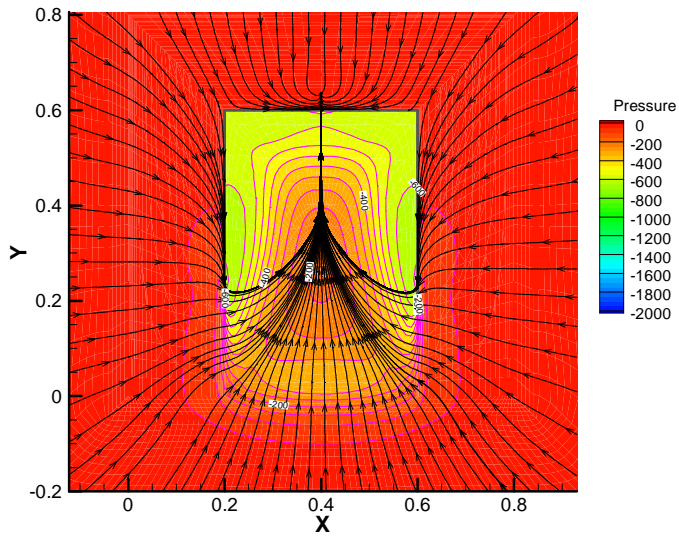


(d) Type 3

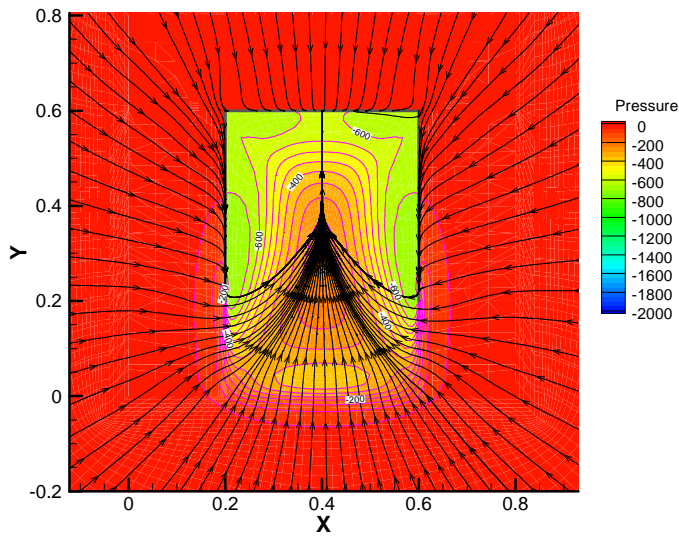
Fig. 2.37 수중 본체의 Z방향 위치에서 압력 및 유선분포 ( $Z=-0.12\text{m}$ )

Type 3에서는 스키투 주위의 압력이 Fig. 2.36( $Z=-0.15\text{m}$ )에 비해 상당히 낮아지고 있음을 나타내고 있다.

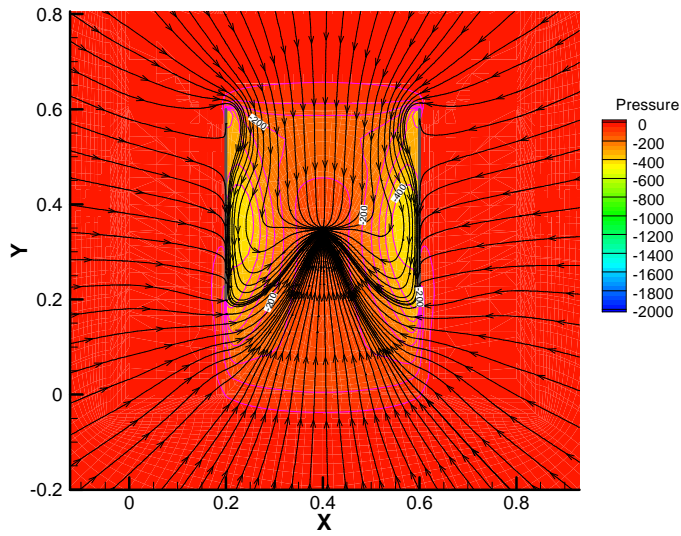
Fig. 2.38의 계산결과는 수중 본체의 바닥위치에서 아래로 0.06m 떨어진 곳에서의 압력 및 유선의 분포를 나타낸 것으로, Type 1 및 Type 2(a)에서 수중 본체 외부로부터 들어가는 유선이 스커트로 인해 차단되고 있음을 나타낸다.



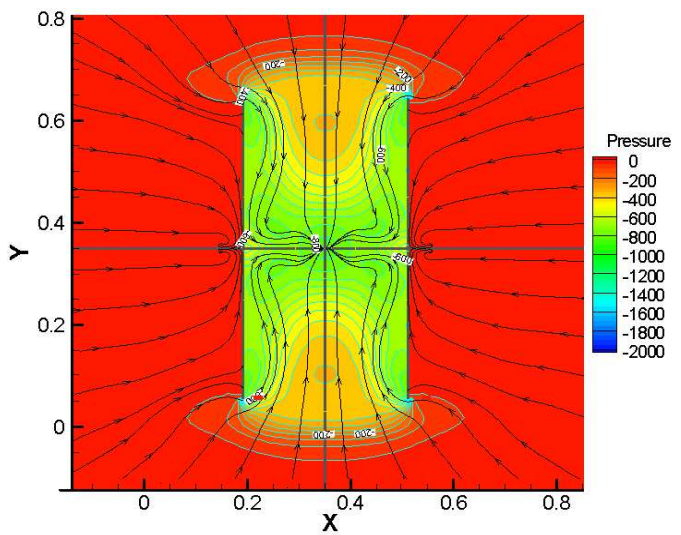
(a) Type 1



(b) Type 2(a)



(c) Type 2(b)



(d) Type 3

Fig. 2.38 수중 본체의 Z방향 위치에서 압력 및 유선분포 ( $Z=-0.06m$ )

Type 3는 상대적으로 낮은 스커트 주위의 압력과 균일한 유선분포를 보여주고 있다.

상용 S/W인 Fluent를 이용하여 유기퇴적물 수거 시스템의 수중 본체 형상과 수중 본체의 하부에 부착된 스키투에 따른 유체흐름의 특성 등을 파악하였다.

수치시뮬레이션에서는 주배관 하부에서의 유동특성을 파악하여 퇴적물의 수거성능을 향상시키는 설계에 주안점을 두었으므로, 확산에 의한 2차 오염 방지를 위한 수중 본체 측면의 배관내 유동에 대해서는 고려하지 않았다.

이를 고려할 경우 전체적인 수중 본체 주위의 압력 및 유선분포 등이 다소 다르게 나타날 수 있으나 Type 1, Type 2 및 Type 3의 세가지 형상에서의 퇴적물 수거성능에는 크게 영향을 미치지는 않을 것으로 판단된다.

Type 2의 (a), (b) 비교에서 (b)는 (a)에 비해 수중 본체 내부의 압력이 높아지고 있으나 유선분포가 균일해지고 있으며, Type 3의 형상은 상대적으로 낮은 압력과 균일한 유선분포를 보이면서 유기퇴적물 제거를 위한 성능면에서 우수한 것으로 판단된다.



### 제3장 유기퇴적물 처리 시스템

#### 제1절 서론

국내에서의 준설오염퇴적물에 대한 처리방안으로는, 대부분 준설한 퇴적물을 응집제를 사용하여 처리한 뒤 매립하고 있는 실정임에 따라, 응집제 등의 화학약품을 사용함으로써 과도한 슬러지가 발생하고 운송비 부담 및 매립지 공간의 부족 등 매립비용의 증가로 인한 경제성이 감소하게 된다.

따라서, 퇴적물 내 오염 물질을 제거하는 효율과 경제적인(Table 3.1) 관점에서 공정의 개선과 다량의 오염퇴적물을 처리하기에 적합한 실용적인 기술의 개발이 요구되고 있다.

Table 3.1 오염퇴적물 처리방법 비교[9]

처리 방법	내 용	비용(\$/ m <sup>3</sup> )
입자분리법	·컨베이어 벨트를 이용하여 전달된 물질을 원심분리기 등의 장비에서 입자 크기별로 분리	67 ~ 383
생물학적 처리법	·미생물을 이용, 퇴적물에 포함되어 있는 오염물질(특히, PCBs )을 분해 및 파괴	추정 불가
추출처리법	·아민계 용매(예, triethylamine)를 이용하여 퇴적물 내 유기 오염물질을 추출 농축시켜 처리(오염물질을 파괴하는 것이 아니라 응축하는 과정 위주)	236 ~ 611
저온열 흡착법	·소각온도보다 낮은 온도에서 퇴적물 내 휘발성 유기오염물질을 휘발시킨 후 기름에 농축(오염물질 자체는 파괴되지 않음)	599 ~ 915

오염된 준설퇴적물 처리는 전·후처리를 포함한 여러 단계의 공정을 거치는데, 오염된 퇴적물의 적절한 처리를 위해서는 계획과 설계 시 퇴적물의 준설, 이송, 전처리, 처리, 처분 및 방류수 처리 등과 같은 제반사항이 고려되어야 하며 오염퇴적물 처리 방법 및 기술은 Fig. 3.1 과 같다.

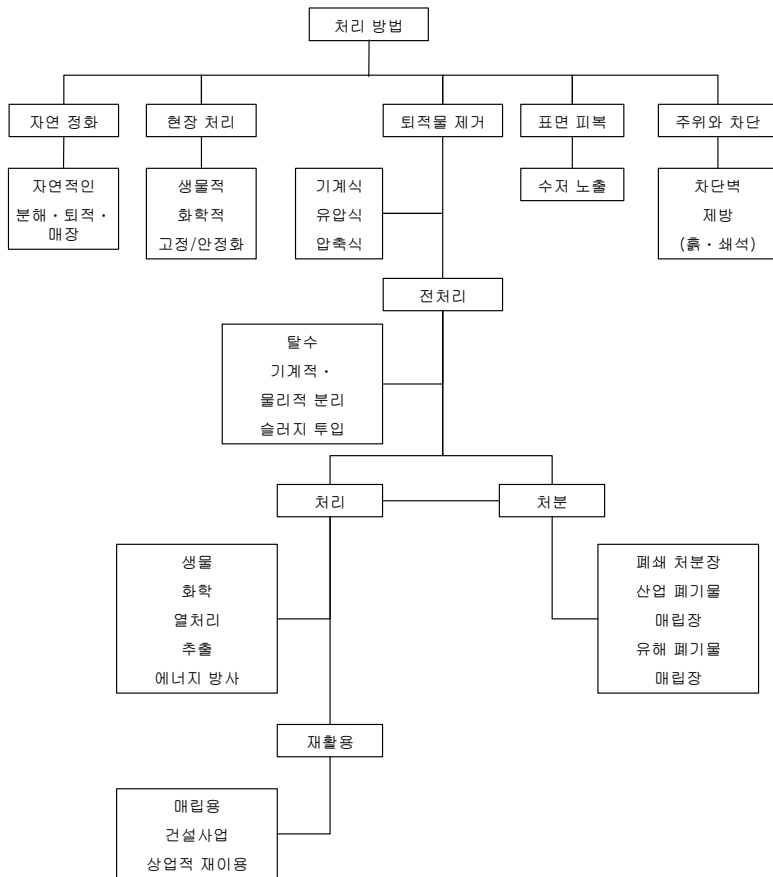


Fig. 3.1 오염퇴적물 처리 방법 및 기술[9]

오염준설퇴적물[Contaminated Dredged Material, CDM]의 처리 및 재활용을 위한 기본적인 공정도는 Fig. 3.2와 같다.

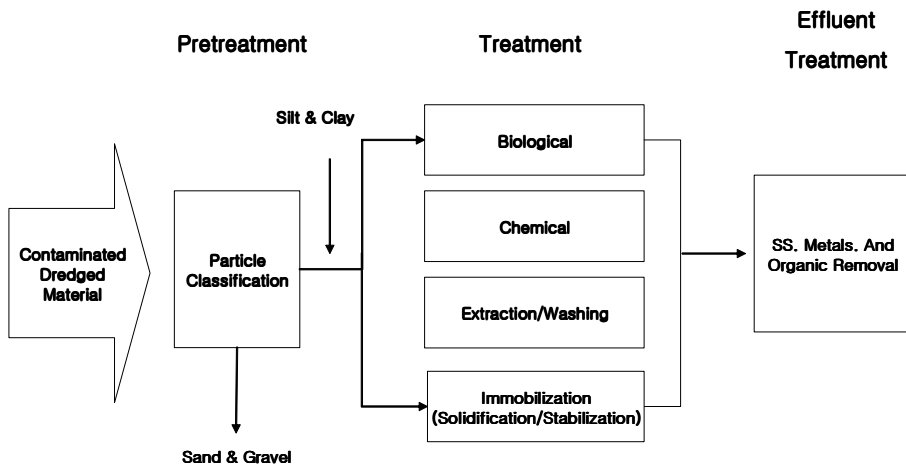


Fig. 3.2 Process train for treatment of contaminated sediments.[37]

준설퇴적물은 전처리 방법인 입자 분류 시스템을 통하여 모래, 자갈 및 실트, 점토로 각각 분리되며, 오염물질의 함유량이 적은 모래 및 자갈은 노반재 및 건설용 자재로 재활용이 가능하다.

오염물질이 다량 함유된 실트 및 점토는 오염원의 성상에 따라서 다양한 처리 방법이 적용되는데, 질소 및 인 등의 영양염류는 물리·화학적 처리를 수행하며, PAHs등과 같은 난분해성 화합물은 생물학적처리 시스템을 통하여 처리되고 있다. 그 후, 유출수의 부유물질 제거 및 중금속 처리를 위한 후속처리 공정을 수행하고, 처리된 퇴적물은 복토재 등으로 재활용된다.

상기와 같이 오염준설퇴적물의 처리공정들은 단독으로 그 기능을 발휘하는 경우가 드물며 보통 전처리공정을 포함한 다양한 처리공정의 조합에 의하여 복합적인 오염물질의 처리에 활용되고 있다.

오염준설퇴적물의 처리공정들에 있어서 처리기술들은 Table 3.2 와 같다.

Table 3.2 Treatment technologies for contaminated dredged material[37]

<i>Pretreatment</i>	<i>Treatment</i>	<i>Effluent Treatment</i>
<b><i>Dewatering</i></b>	<b><i>Biological</i></b>	<b><i>SS removal</i></b>
Settling pond	Bioslurry	Settling
Belt filter	Contained land	Flocculation
Chamber filter	Land farming	Granular media filter
Thickener	Composting	Membrane filter
Centrifuge	<b><i>Chemical</i></b>	Wetlands
<b><i>Particle classification</i></b>	Oxidation	<b><i>Metals removal</i></b>
Flotation	Reduction	Precipitation
Grizzlies	Dechlorination	Ion exchange
Hydrosizer	<b><i>Extraction</i></b>	Adsorption
Hydrocyclones	Organic solvents	Mixed media filters
Screens	Acids/chelates	Wetlands
Spiral classification	Supercritical	<b><i>Organic treatment</i></b>
Shaking tables	Surfactants	Carbon/resin adsorption
Magnetic separation	Electrokinetics	Oxidation
Electrostatic	<b><i>Immobilization</i></b>	Biofilters
Settling basin	Solidification	Wetlands
Attrition scrubbing	Stabiliation	Oil separation
<b><i>Slurry injection</i></b>	Vitrification	
Chemical clarification	Sorption	
Nutrients/microbes	<b><i>Thermal</i></b>	
	Incineration	
	Desorption	
	Pyrolysis	
	Sintering	

본 연구에서의 시스템 구성은 준설퇴적물의 굵은 입자로 인한 사이클론과 펌프의 손상방지를 위하여 예비스크린, 스크린, 회전혼합체, 진동스크린, 하이드로사이클론을 거치는 전처리 공정에 대한 시스템을 구성하였으며, 준설퇴적물의 입자분리를 위한 하이드로사이클론의 이론적 배경에 대하여 부록 C에 정리하였다.

유기퇴적물 수거장비 및 처리 시스템 탑재를 위한 선박 개발에 있어서는 준설퇴적물 확산에 의한 2차 오염을 최소화하고 단기간에 넓은 지역을 효율적으로 처리할 수 있도록 탑재선박의 형태를 오히려 제거 효과가 큰 흡입식 준설퇴적물 형태로 하였으며, 퇴적물 수거 시스템의 안정적 탑재 및 효율적 작업환경 배치와 얕은 수심의(약 5m) 작업현장의 경우에도 접근성 용이를 위해 저흘수 선박의 개념을 도입하였다.

개발 선박의 조파저항성능을 향상시킬 수 있는 방안 검토를 위하여 선수부형상을 2차원 썸머형상으로 단순화(Fig. 3.9)시켰으며, 두 선체 사이의 간격을 변화시켜 가면서 저항성능 및 자유표면 유동특성에 대한 모형시험을 회류수조에서 수행하였다.

수치시뮬레이션은 MAC법을 기반으로 교차가변격자계(Staggered Variable Mesh System)에서 수행하였으며, 계산결과를 회류수조에서의 모형시험결과와 비교/분석하여 본 수치해석기법(부록 B)의 적용 가능성을 검토하였다.

## 제2절 유기퇴적물의 처리 시스템

### 1. 유기퇴적물의 전처리 공정

Fig. 3.3은 준설된 유기퇴적물의 전처리를 위한 선별공정의 개략도이다. 각 공정은 퇴적물의 굵은 입자로 인한 사이클론과 펌프의 손상방지를 위해 예비스크린, 스크린, 준설토의 균질화(homogenization)를 수행하는 회전혼합체, 진동스크린, 하이드로사이클론 및 원심분리기 등을 차례로 거치는 시스템으로 구성하였다.

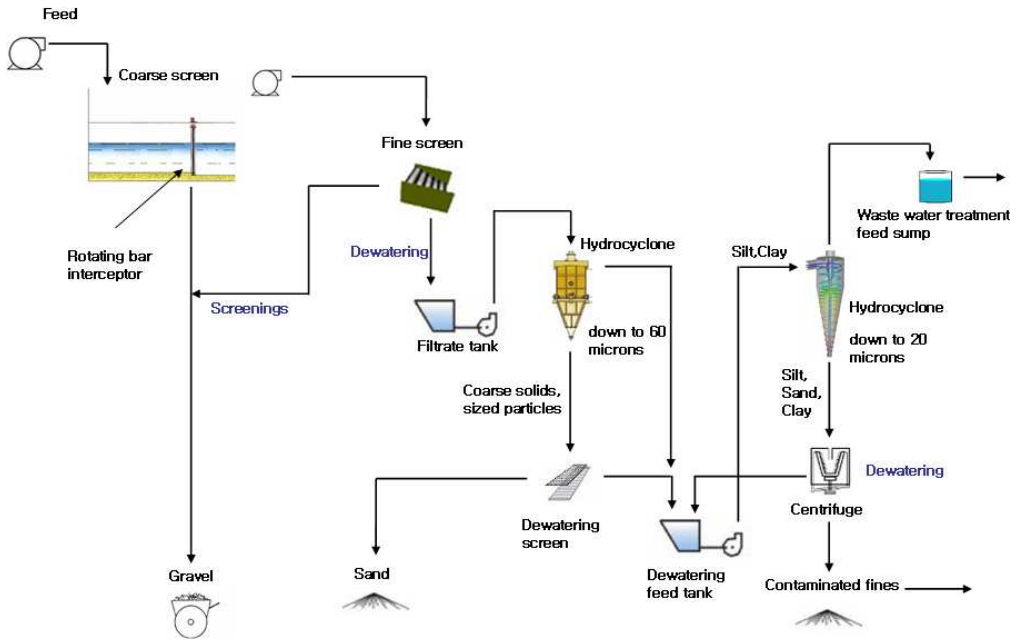


Fig. 3.3 Processing diagram of the primary sediment treatment

해저의 수거시스템에 의해 준설된 유기 퇴적물은 Screen Tank에서 협잡물과 자갈 등 이물질이 1차적으로 분리된다.

이물질이 분리된 퇴적물은 스크린에 의해 여과/탈수되며, 여과된 퇴적물은 Hydrocyclone 등의 입자분류기에서 일차적으로 모래와 실트의 분류를 위해 입자지름 60-80 $\mu\text{m}$ (Desanders)에서 분리가 되도록 하고, 그 다음 미세모래와 미세실트의 분류를 위해 입자지름 20 $\mu\text{m}$ (Desilters)에서 분리되도록 한다.

원심분리기에서 Cake화하여 분리된 오염유기물질은 화학적 처리를 위한 공정으로 이송된다.

## 2. 유기퇴적물의 전처리 시스템 설계

### 1) Screen Tank

Screen Tank에는 Pump 및 다른 기기들을 보호하기 위한 것으로 굵은 모래 등을 제거하는 제거기 앞에 나무, 자갈 등 큰 찌꺼기들을 제거하는 Coarse Bar Rack 이 설치된다. Chamber의 형태는 장방형이며 설계조건으로서 퇴적물 유입유량을 800  $\text{m}^3/\text{day}$  (day는 8시간 기준)로 하며 체류시간은 5분으로 하여 Tank의 규격을 설계하였다.

$$\text{유입유량 } Q = 800 \text{ m}^3/\text{day} = 800 \text{ m}^3 / (8 \times 60)\text{min} = 1.666 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{Tank 용량 } V = t \times Q = 5 \text{ min} \times 1.666 \text{ m}^3/\text{min} = 8.33 \text{ m}^3$$

퇴적물 유입유량을 800  $\text{m}^3/\text{day}$  (day는 8시간 기준)로 한 Tank의 규격은 Safety Factor 1.5 [19]를 적용하여 폭을 1.5 m로 하였을 때 다음과 같이 결정하였다.

$$\text{Tank의 길이} \times \text{폭} \times \text{깊이} = 6.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$$

## 2) Coarse Screens

Screen Tank에서 나무, 자갈 등 큰 찌꺼기들이 제거되도록 Opening Size 75mm 정도의 Coarse Screen(Rotating bar interceptor, RBI)을 퇴적물 유입부의 1.5m 정도에 위치시키고, 후류방향으로 10mm 이상의 굵은 입자를 분리시키는 Bar Rack을 설계하였다.

Table 3.3 Designed RBI range

Channel Width (mm)	1500
Channel Depth (mm)	1400
Number of Bars	9
Bar Width (mm)	75
Bar Spacing (mm)	75

Table 3.4 Screening device classification[41]

Screening Device Classification	Size Classification/Size Range of Screen Opening
Bar screen	
Manually Cleaned	Coarse/25-50 <i>mm</i> (1-2 <i>in</i> )
Mechanically Cleaned	Coarse/15-75 <i>mm</i> (0.6-3.0 <i>in</i> )
Fine bar or perforated coarse screen (mechanically cleaned)	
Fine Bar	Fine Coarse/3-12.5 <i>mm</i> (0.1-0.5 <i>in</i> )
Perforated Plate	Fine Coarse/3-9.5 <i>mm</i> (0.1-0.4 <i>in</i> )
Rotary Drum	Fine Coarse/3-12.5 <i>mm</i> (0.1-0.5 <i>in</i> )



Bar Rack(Fine bar) 설계조건은 고형물의 침전을 방지하기 위한 접근유속  $0.6 \text{ m/s}$  수두손실(Headloss)은  $15 \text{ cm}$  이하가 되도록 하며 수두손실이  $5 \text{ cm}$  이상일 때는 설치된 부이(Floats)를 통해 모터를 작동하도록 한다.

Bar Rack에 의한 수두손실은 베르누이 방정식으로부터 정리하면 식 3.1과 같이 된다.

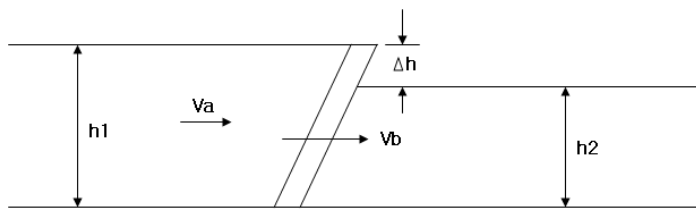


Fig. 3.4 Water profile through a screen

$$\Delta H = \frac{(V_b^2 - V_a^2)}{2g} \times \frac{1}{0.7} \quad (3.1)$$

여기서,  $V_a$ : Approach velocity in upstream channel

$V_b$ : Velocity through the bar racks

$g$ : Gravitational acceleration

유량과 Bar Rack의 면적과의 관계식은 식 3.2와 같이 쓸 수 있으며

$$V_b A_r = V_a A_c \quad (3.2)$$

여기서,  $A_r$ : area through bar racks

$A_c$ : channel area

Channel 과 Bar Rack 의 면적비를 1 : 0.6 이 되도록 설계하여 수두손실은 약 4.7cm 가 되도록 하였다.

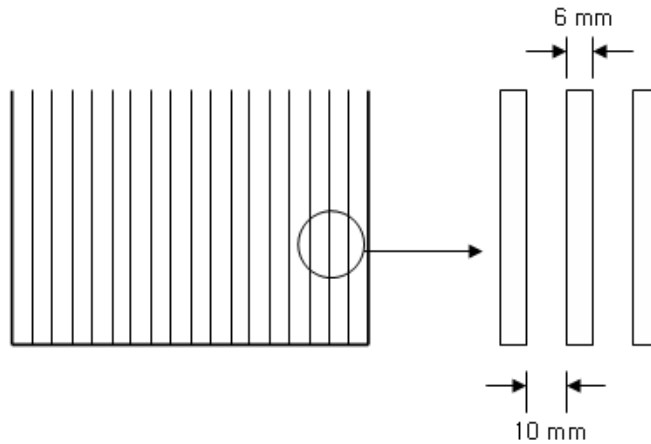


Fig. 3.5 Spacings of bar racks

Table 3.5 Designed fine bar range

Channel Width ( <i>mm</i> )	1500
Channel depth ( <i>mm</i> )	1400
Number of bars	94
Bar width ( <i>mm</i> )	6
Bar spacing ( <i>mm</i> )	10

### 3) Pump

Screen Tank 의 퇴적물을 펌핑하는 것으로 펌프는 1대(예비 1대 포함 2 대)로 설계하며, 펌프의 효율은 75%, 원동기의 여유율 20%로 하고, 총양정 2m 로 설계하였다.

펌프 시설기준에 따라 펌프의 축동력 및 펌프의 흡입구경은 식 3.3 과 3.4에 의해 구하였다.

펌프의 축동력은 다음의 식에 의하여 정한다.

$$P_s = \frac{Q_p \times \rho \times g \times H}{\eta} \times \frac{1}{1000} \quad (3.3)$$

여기서,  $P_s$ : 펌프의 축동력(  $kW$  )

$Q_p$ : 펌프의 토출량(  $m^3/sec$  )

$\rho$ : 양정하는 물의 단위중량(  $kg/m^3$  )

$g$ : 중력가속도(  $9.8 m/sec^2$  )

$H$ : 펌프의 전양정(  $m$  )

$\eta$ : 펌프의 효율

펌프를 운전하는 원동기 출력은 축동력의 여유를 보아 다음의 식에 의하여 계산한다.

$$P = P_s(1 + \alpha) \quad (3.4)$$

여기서,  $P$ : 원동기의 출력(  $kW$  )

$P_s$ : 펌프의 축동력(  $kW$  )

펌프의 흡입구경은 토출량과 펌프흡입구의 유속으로부터 다음의 식에 의하여 정한다.

$$D_{inlet} = 146 \sqrt{\frac{Q}{V}} \quad (3.5)$$

여기서,  $D$ : 펌프의 흡입구경 ( $mm$ )  
 $Q$ : 펌프의 토출량 ( $m^3/min$ )  
 $V_{inlet}$ : 흡입구의 유속 ( $m/sec$ )

단, 흡입구의 유속은 펌프의 회전수 및 흡입실 양정 등을 고려하여 1.5~3.0  $m/sec$  를 표준으로 한다.

Table 3.6 은 식 3.3 ~ 3.5에 의해 펌프의 설계사양을 구한 것으로, Screen Tank 의 퇴적물을 펌핑하기 위한 펌프의 출력 및 펌프의 흡입구경을 나타내었다.

Table 3.6 Designed pump specification

흡입유량 ( $m^3/min$ )	1.7
펌프의 출력 ( $KW$ )	0.893
흡입구경 ( $mm$ )	20.0
양정고 ( $m$ )	2.0
펌프 수	2대(예비 1대 포함)

### 3. 유기퇴적물의 처리를 위한 시스템 구성도

본 연구에서는 해저 유해성 유기퇴적물의 수거 및 처리를 위한 시스템의 일반배치에 대한 개념을 제시하였으며, 준설 유기퇴적물의 전처리 공정[Fig. 3.3]에 따른 선상 시스템의 일반배치에 대한 구성도와 일반배치도를 Fig. 3.6 및 Fig. 3.7에 나타내었다.

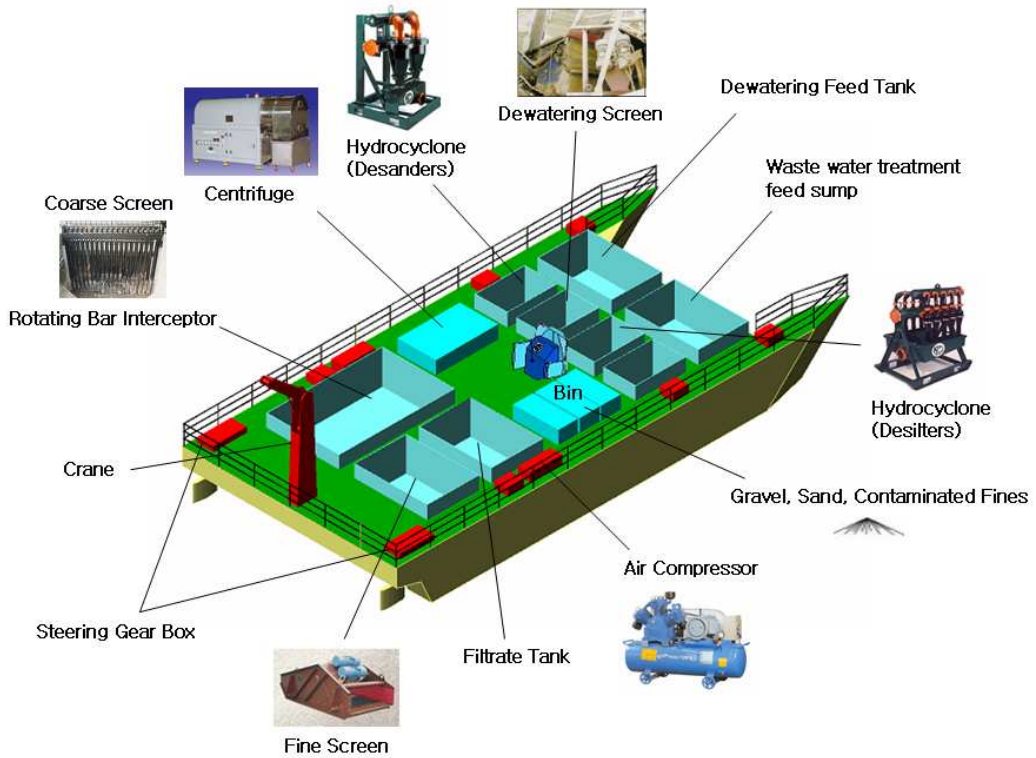


Fig. 3.6 유기퇴적물의 처리를 위한 선상 시스템 구성도

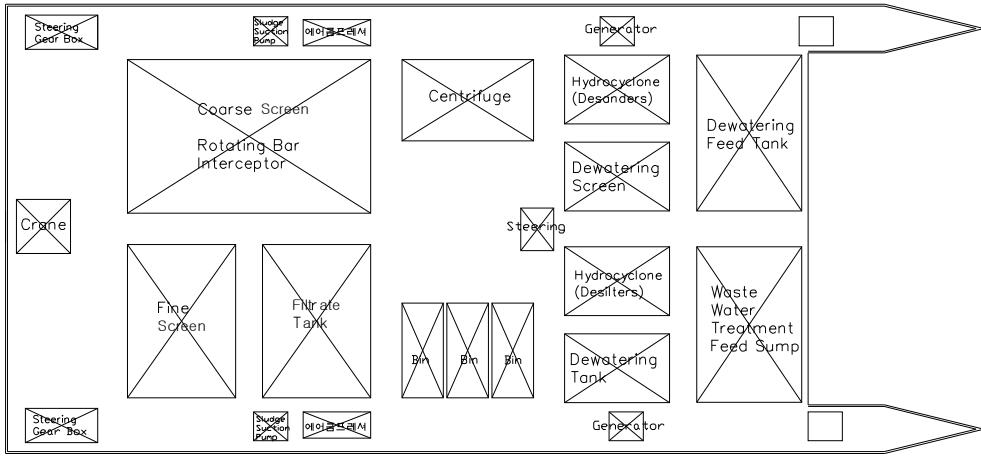


Fig. 3.7 유기퇴적물 처리를 위한 선상 시스템의 일반배치도

Fig. 3.8 은 준설 유기퇴적물 처리선박과 수거시스템의 측면 형상으로 작업 개념도를 나타내고 있다.

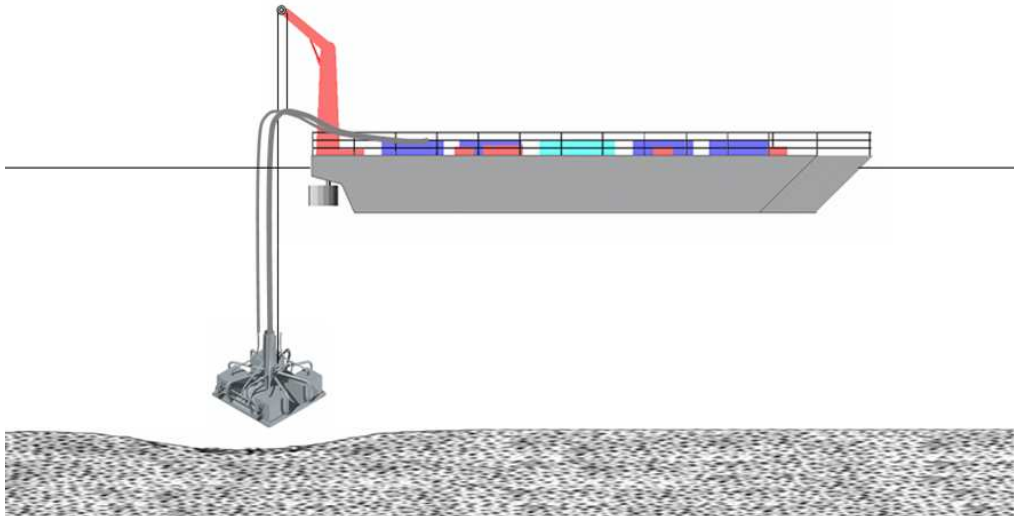


Fig. 3.8 유기퇴적물 처리선박과 수거시스템 개념도

## 제3절 유기퇴적물 수거 및 처리 선박

### 1. 설계조건 및 개념설계

#### 1) 설계조건

유기퇴적물 수거 및 처리 시스템 탑재를 위해 요구되는 선박의 주요 요건 및 기능 등은 다음과 같다.

- 1) 선 체 : 내구성 및 내마모성이 양호한 강선
- 2) 규 모 : 수심 약 5M에서 작업 가능한 선박
- 3) 주요기능 : 퇴적물 수거기능, 선단구성에 따른 무동력선 예인기능,  
수거오염물의 운송 및 하역기능, 해저 촬영가능,  
저질 및 수질 조사 시료 채취 가능
- 4) 기본성능 : 복원성능, 선회성능, 추진성능, 작업 성능의 확보

이러한 선박의 요건 및 주요기능을 만족시키는 선박 설계를 위하여

- 1) 좁은 내항과 같은 제한된 수역에서의 우수한 작업 성능을 고려하여 가능한 소형으로 한다.
- 2) 조종성능이 우수하여야 하므로 Two-propeller system을 채용한다.
- 3) 각종 장비가 탑재 가능하도록 충분한 갑판면적을 확보하여야 한다.
- 4) 흘수는 가능한 낮게 하며, 유지보수를 고려하여 선형을 단순히 한다.

등을 설계조건으로 하였다.

2) 개념설계

준설선은 좁은 내항과 같은 제한된 수역에서의 조종성이 뛰어나야 하며, 준설장비의 탑재를 위하여 넓은 갑판면적을 가져야 하므로, 본 연구에서는 Table 3.7 로부터 쌍동선형을 기본선형으로 규모 및 사양을 결정하였으며 선박의 주요 요건, 기능 및 선박의 형태를 조사하여 향후 연안의 해저면 뿐만 아니라 강 및 댐 등에서 오염퇴적물을 효율적으로 수거할 수 있는 썰기형태의 선수형상을 가지는 쌍동형 선형을 설계하였다.

Table 3.7 선형별 성능

구 분	배 수 량 형	BARGE 형	쌍 동 선 형
추진 성능	우수	불량	양호
복원 성능	불량	우수	양호
선회 성능	우수	불량	양호
작업 흘수	깊음	낮음	중간

퇴적물 수거 시스템의 안정적 탑재, 충분한 작업공간의 확보 및 저흘수 유지를 위한 주요 Dimension 은 Table 3.8 에 나타내었다.

Table 3.8 Principal dimensions of work vessel

	Main Hull
$LBP$ (m)	27.6
$LWL$ (m)	27.6
$B$ (m)	2.3
$d$ (m)	1.84
$\nabla$ ( $m^3$ )	204.4
$W.S.A.$ ( $m^2$ )	323.7
$Lcb$ (m)	0.0 from midship
$Cb$	0.875



운항 시 선체의 외측으로부터 발생하는 파는 정박된 선박에 손상을 주지 않도록 작아야 하며, 내측은 선수파에 의한 최소의 유체력이 퇴적물 흡입관에 작용하도록 선수선형과 선체간격을 결정해 주어야 하므로, Fig. 3.9와 같이 단순화된 쐐기형(Wedge-type) 선형의 특성을 가지는 쌍동형 선박을 본 퇴적물 수거 시스템의 기본선형으로 하였으며, 두 선형에 대한 성능시험을 통하여 선수형상과 선체간격을 결정하였다.

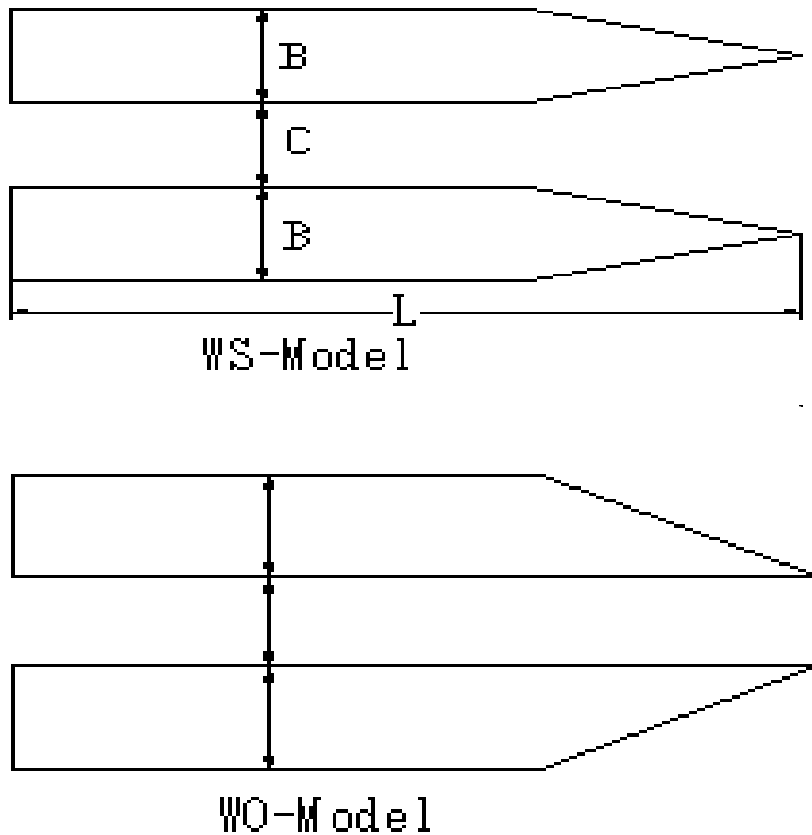


Fig. 3.9 Schematic view of test models

## 2. 모형시험 및 성능평가

### 1) 모형시험

모형은 Fig. 3.9 에서 보는 바와 같이 앞부분이 뾰족한 2차원 썩기형상으로 단순화하였다.

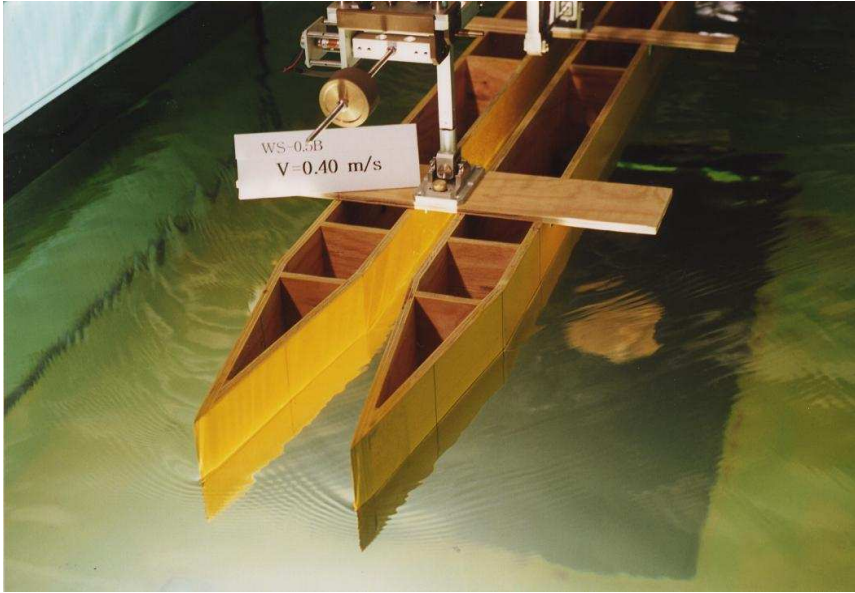
여기에서, WS-model은 단동체의 형상이 대칭인 경우이고 WO-model은 단동체의 형상이 비대칭인 경우로서 조파저항성능을 향상시킬 수 있는 방안을 검토하고자 시도하였다.

모형선의 길이( $L$ )는 1.5m, 단동체 폭( $B$ )은 0.1m로 하였으며, WO-model의 선수부는 유동 가시화의 편의를 위하여 아크릴로 그리고 나머지 부분은 나무로 제작되었다.

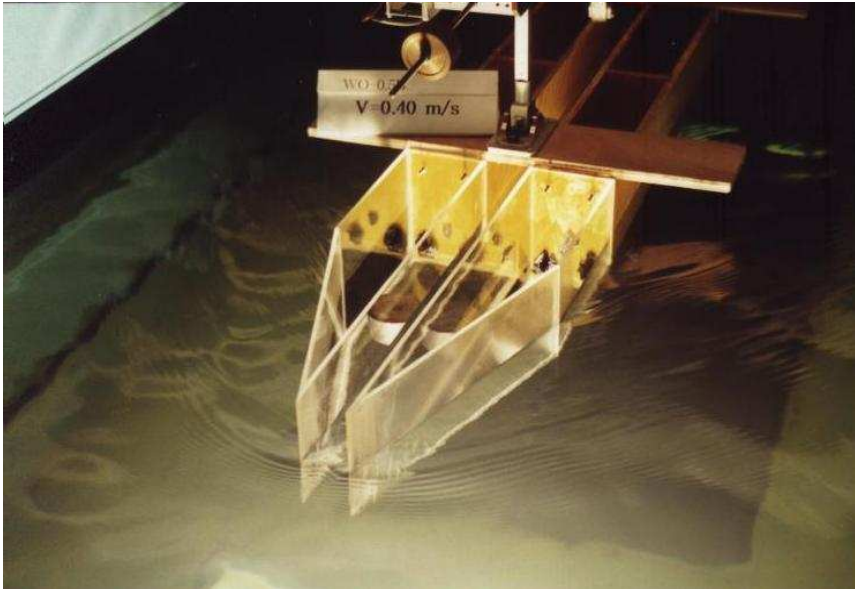
실험은 흘수를 0.08m로 고정하여 모든 경우에서 배수량과 침수표면적이 동일한 조건이 되도록 하였다.

두 선체 사이의 간격(C)은 각각 단동체 폭의 0.5, 1.0 그리고 1.5배로 변화시켜 가면서 저항성능 및 자유표면 유동특성을 회류수조에서 모형시험을 수행하였다.

이하 이를 각각 WS-05, WS-10, WS-15, WO-05, WO-10 및 WO-15 이라고 한다.



(a) WS-05 모형선



(b) WO-05 모형선

Fig. 3.10 모형선 사진

Table 3.9 모형선의 주요제원

길이 ( $L$ )	1.20 m
폭 ( $B$ )	0.10 m
깊이 ( $D$ )	0.15 m
흘수 ( $d$ )	0.08 m
배수량 ( $\Delta$ )	21.6 Kg(쌍동선)

본 연구에서의 대상선박의 속도는 퇴적물 제거 작업속도 1 ~ 3노트와 이동을 위한 운항속도 9~10노트 정도를 목표속도로 하였다.

1.2m 모형선의 경우 0.5m/s 정도에서는 자유수면 유동특성이, 0.8~1.1m/s에서는 저항특성이 중요하게 됨에 따라, 본 실험에서는 유속 0.4~1.1m/s에서 저항시험을 수행하면서 자유수면 유동특성을 함께 관찰하였다.

본 실험의 주된 목적이 쌍동선의 두 선체 사이의 간격이 저항특성 및 자유수면 유동특성에 미치는 영향에 대한 상대적인 비교/평가이므로 난류촉진장치는 부착하지 않고 실험을 수행하였다.

모형시험은 인하공업전문대학 회류수조에서 수행되었으며, 회류수조는 모형선을 고정시키고 물을 강제로 순환시키는 철제 관 구조물로서 수조 상부에 측면과 바닥이 특수 유리로 이루어진 관측부가 있는데 이 관측부에 모형선을 고정시키고 실험을 수행하면서 모형선 주위의 흐름을 직접 육안으로 관찰할 수 있다. 따라서 선체 주위의 유동 현상을 장시간 쉽게 관찰할 수 있다는 장점이 있지만 비교적 작은 모형선을 사용하기 때문에 실선의 성능을 추정할 경우 오차가 상대적으로 커지는 단점이 있다.

회류수조는 임펠러에 의하여 물을 강제로 순환시키기 때문에 유체입자의 회전, 고유난류 등과 같은 고유의 특성들을 갖고 있고, 이러한 특성들이 모형시험에 큰 영향을 주기도 한다. 따라서 초기 선형개발 단계에서 보다 우수한 선형개발을 위한 비교연구 및 유동가시화 목적으로 많이 사용되고 있다.

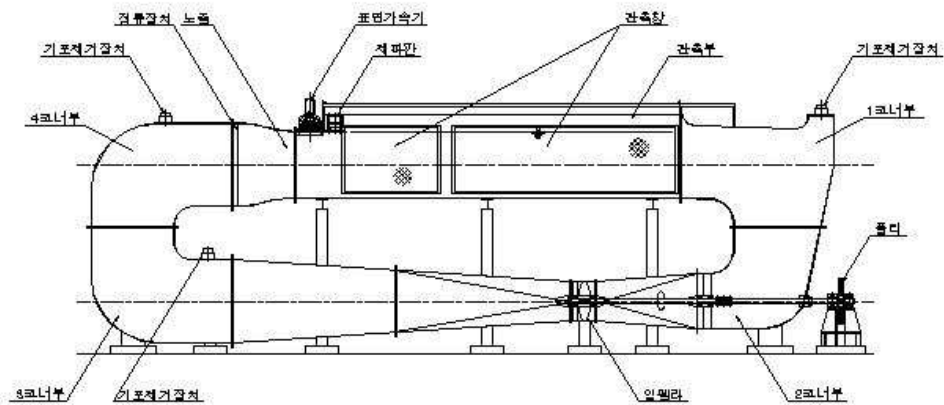


Fig. 3.11 Circulating Water Channel

모형시험이 수행된 인하공업전문대학 회류수조(Circulating Water Channel of Inha Technical College, 이하 ITCWC)의 주요 제원을 Table 3.10 에 나타내었다.

Table 3.10 Principal dimensions of ITCWC

	Whole body	Measuring section
$L(m)$	8.5	3.5
$B(m)$	1.5	1.2
$H(m)$	4.0	0.8
Vel. Range	0.15 ~ 1.7m/s ( $\pm 0.2\%$ at $V=1.0m/s$ )	

## 2) 모형시험 해석법

모형시험은 Froude의 상사법칙을 기본으로 하였다. 즉, 관성력과 중력에 의한 힘의 비율인 무차원 계수(Froude number; 이하  $F_n$ )를 실선과 모형선에서 같다고 둔 후 각각의  $F_n$ 에서 잉여저항계수( $C_R$ )는 실선과 모형선에서 동일하다고 가정한다.

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (3.6)$$

여기에서  $V$ ,  $g$ ,  $L$ 은 각각 선속, 중력가속도 및 배의 길이를 뜻하고, 잉여저항계수는 다음의 식 3.7로 계산된다.

$$C_R = C_{TM} - C_{FM} \quad (3.7)$$

여기에서  $C_{TM}$ 은 Newton 단위로 계측된 모형선의 전저항 값( $R_{TM}$ )을 식 3.8과 같이 무차원계수로 나타낸 것이고,  $C_{FM}$ 은 모형선의 마찰저항계수로 1957년 국제선형수조협회(ITTC)에서 제안한 방법으로 식 3.9에 의하여 계산된다.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \rho S_M V_M^2} \quad (3.8)$$

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log R_{NM} - 2)^2} \quad (3.9)$$

여기에서  $\rho$ ,  $S_M$ ,  $V_M$ 는 각각 물의 밀도, 모형선의 침수표면적 그리고 선속을 뜻하고,  $R_{NM}$ 은 모형선의 Reynolds 수로서 다음과 같다.

$$R_{NM} = \frac{V_M \cdot L_M}{v} \quad (3.10)$$

여기에서  $L_M$ 과  $v$ 는 각각 모형선의 길이와 유체의 동점성계수를 뜻한다.

이상에서 언급한 방법은 식 3.9에서 계산되는 마찰저항 값이 모형선에 대응하는 평판의 마찰저항을 나타내는 것이기 때문에 물체의 형상에 대한 모든 영향은 식 3.7로 나타낸 잉여저항( $C_R$ )에 포함되어 있다. 이러한 해석 방법을 2차원 해석법이라고 부른다.

한편, 물체 형상에 의한 저항(형상저항)은 형상영향계수(Form factor)를 도입하여 다음과 같이 전저항을 표현하기도 한다. 이를 3차원 해석법이라고 한다.

$$C_{TM} = (1 + K) \cdot C_{FM} + C_W \quad (3.11)$$

여기에서  $K$ 를 형상영향계수라 하고,  $C_W$ 를 조파저항계수라 한다. 이 3차원 해석법에서는 형상영향계수  $K$ 와 조파저항계수( $C_W$ )를 실선과 모형선에서 각각 같다고 가정한다.

본 연구에서는 2차원 해석법에 의한 잉여저항과 3차원해석법에 의한 형상영향계수 및 조파저항을 함께 비교하였다. 형상영향계수( $K$ )는 Prohaska가 제안한 방법으로 추정하였다. 즉,

$$\frac{C_{TM}}{C_{FM}} = (1 + K) + A \frac{F_n^4}{C_{FM}} \quad (3.12)$$

여기에서  $A$ 는 임의의 상수이다.

### 3) 모형시험 결과 및 평가

WS-model의 전저항을 Fig. 3.12 에 비교하여 나타내었다. 전반적으로 세 경우의 저항값 차이는 그리 크지 않지만, 고속영역에서 쌍동선의 두 선체 사이의 거리가 멀어질수록 저항값이 작아지는 경향을 보이고 있다.

$V=1.0\text{m/s}$  이상에서는 WS-15 및 WS-05의 저항값이 가장 크고, WS-10 순서로 그 값이 작아지고 있다. 세 경우 모두 배수량 및 침수표면적이 동일하므로 이러한 저항값의 차이는 전부 잉여저항의 차이라고 할 수 있다.

WS-15의 경우에는 모형선의 전 폭이 0.35m로 수조 폭 1.2m에 비하여 비교적 크기 때문에 고속에서는 측벽효과(Blockage effect)가 상대적으로 크게 작용한 것도 또 다른 한 이유가 된다고 보여진다.

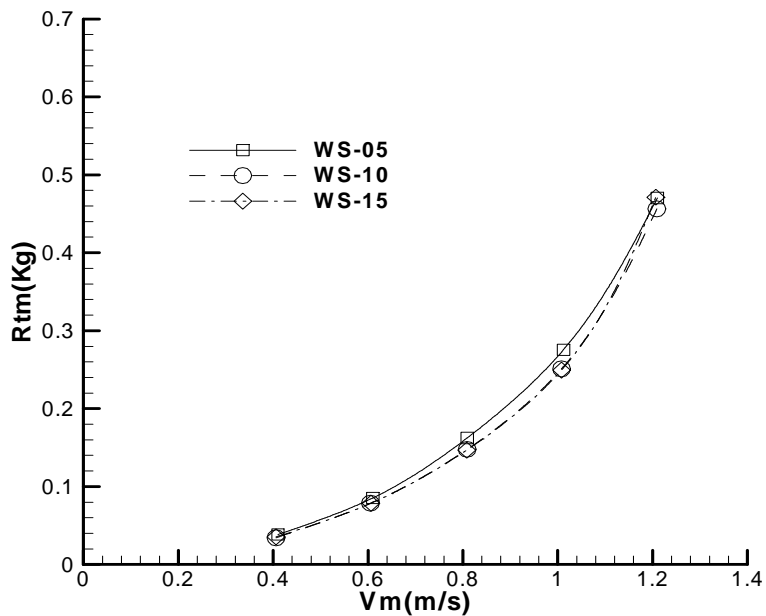


Fig. 3.12 Comparison of total resistance for WS models



잉여저항의 비교를 Fig. 3.13 에 나타내었다. 마찰저항은 ITTC-1957 Line에 의하여 계산되었다. 앞의 전저항값 비교에서 나타난 바와 같이  $V=1.0\text{m/s}$  이상의 영역에서는 두 선체 사이의 거리가 멀어질수록 잉여저항이 크게 나타나고 있지만 그 이하에서는 이와는 반대되는 경향이 나타나고 있다. 즉, 고속영역에서는 WS-15의 경우가, 그리고 저속영역에서는 WS-05의 경우가 잉여저항이 더욱 크게 나타났다.

물론, 앞에서 언급한 바와 같이 WS-15의 경우 모형선의 폭이 다른 모형보다 상대적으로 크기 때문에 고속영역에서 측벽효과의 영향이 크게 작용한 것도 한 이유이겠지만 WS-10의 경우 다른 두 모형선의 중간 정도의 값이 나오는 것으로 보아 잉여저항은 고속영역에서는 두 선체 사이의 거리가 멀어질수록, 그리고 저속영역에서는 그 거리가 짧아질수록 더 커진다는 것을 알 수 있다.

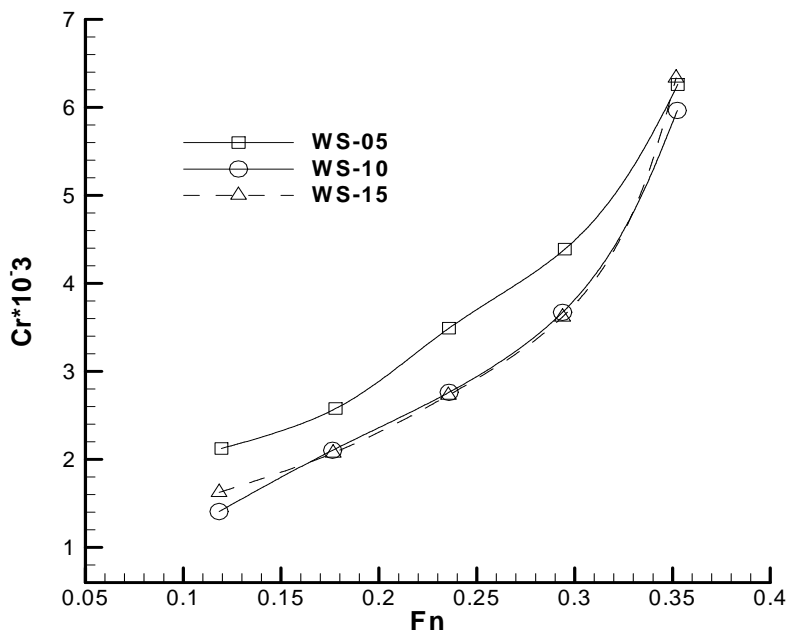


Fig. 3.13 Comparison of residual resistance for WS models

이는 Fig. 3.14 에서 보는 바와 같이 두 선체사이의 거리가 가까워질수록 두 선체 사이에서의 파간섭이 강해지고 이러한 파간섭이 저속영역에서 저항 특성에 미치는 영향이 크기 때문이라고 판단되며, 고속영역에서는 두 선체 사이의 파 간섭에 의한 저항특성보다 조파저항 특성이 강해지기 때문이라고 보인다.

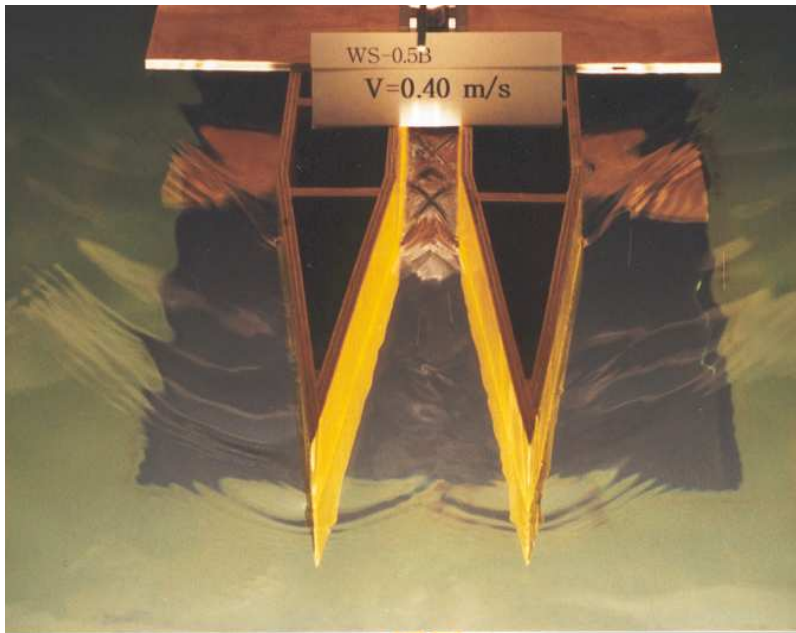
이는 3차원 해석법에 의한 형상영향계수(Table 3.11)와 조파저항(Fig. 3.15)의 비교에서 잘 설명되어진다.

형상영향계수는 Prohaska 방법으로 추정되었으며 수면경사와 같은 회류수조 고유의 특성이 포함된 값으로 통상의 예인수조에서의 결과와는 다소 차이가 있으리라 보여진다.

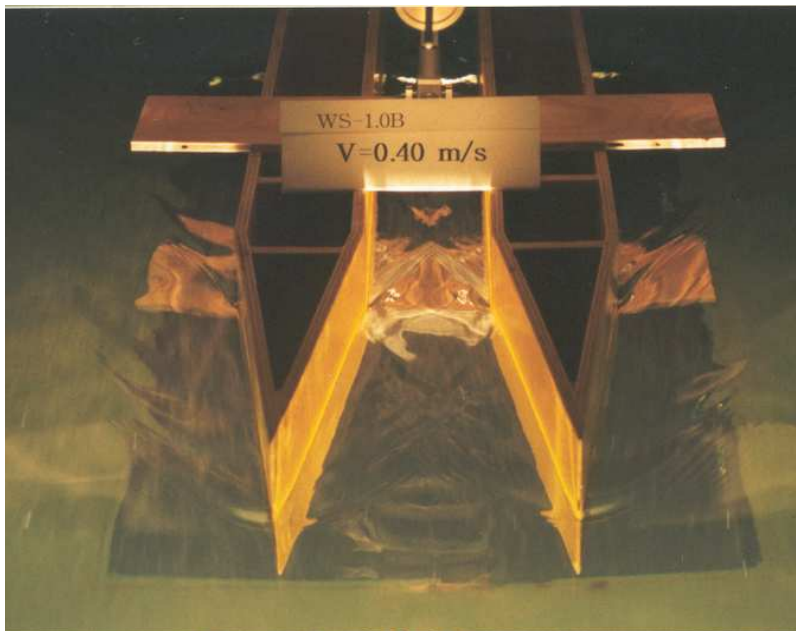
형상영향계수는 두 선체 사이의 거리가 가까워질수록 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 두 선체 사이의 거리가 가까워질수록 두 선체 사이에서 유동의 상호간섭이 증가하기 때문이라고 보이며, 반면에 조파저항은 고속영역에서 전반적으로 두 선체 사이의 거리가 멀어질수록 커지는 것을 알 수 있다.

Table 3.11 Estimated form factors of WS-models

Model	Form factor( $K'$ )
WS-05	1.12
WS-10	1.02
WS-15	1.00



(a) WS-05



(b) WS-10



(c) WS-15

Fig. 3.14 Comparison of free surface flows for WS models ( $V=0.4\text{m/s}$ )

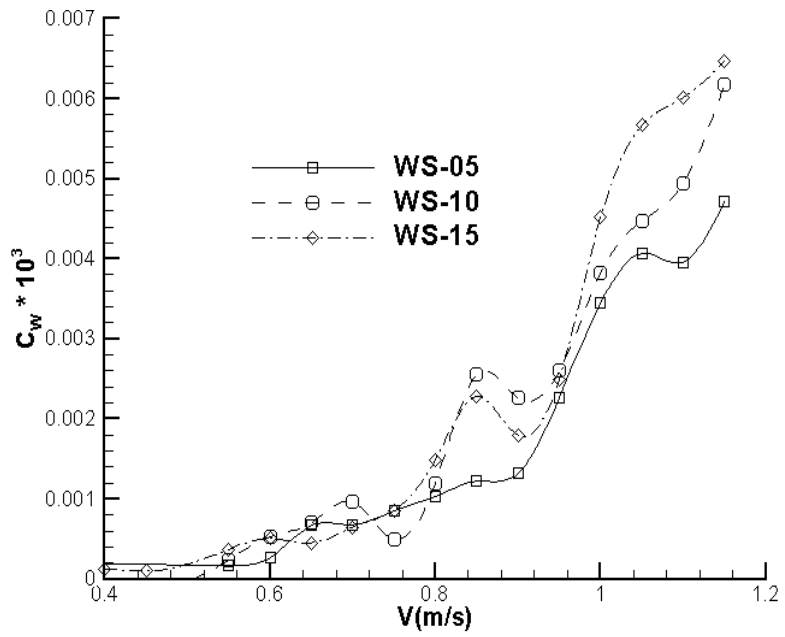


Fig. 3.15 Comparison of wave resistance for WS models

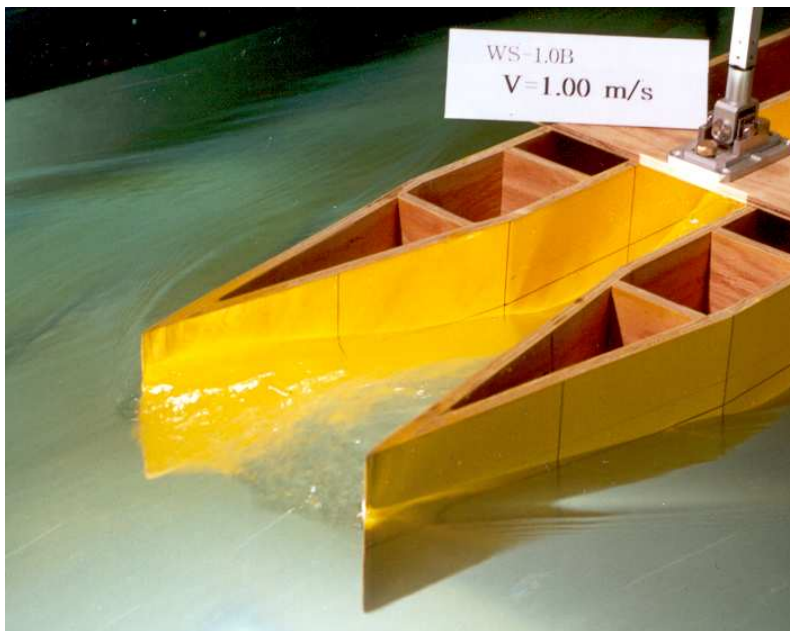


Fig. 3.16 Bow waves for WS-10 at  $V=1.0$  m/s

WO-model의 전저항을 Fig. 3.17 에 비교하여 나타내었다.

전반적으로 세 경우의 저항값 차이는 그리 크지 않지만  $V=1.0\text{m/s}$  이상에서는 WO-05의 저항값이 다소 크게 나타나고 있다. 즉, 쌍동선의 두 선체 사이의 거리가 가까울수록 저항값이 커지는 경향을 보이고 있다.

이는 정우철 등[10]의 연구결과와 상반된 내용을 보여주는 것으로, Insel 등 [24] 등의 연구결과로부터 이 속도 영역에서 두 선체 사이의 복잡한 파 간섭이 때로는 우호적으로 때로는 그 반대로 작용하기 때문인 것으로 여겨지며, WO-model 에 있어서 두 선체 사이의 거리변화와 잉여저항과는 일정한 경향이 없는 것으로 판단된다.

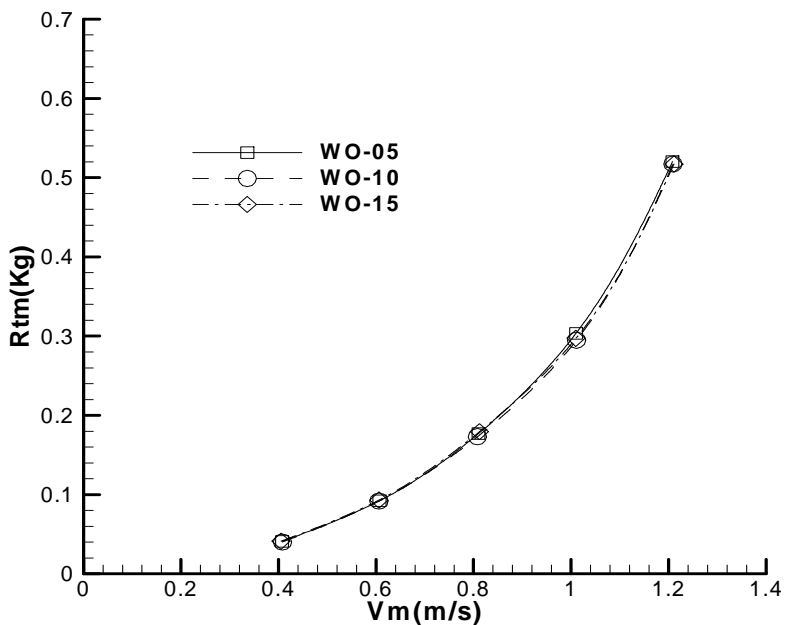


Fig. 3.17 Comparison of total resistance for WO models

WO-model의 거리변화에 대한 잉여저항의 비교를 Fig. 3.18 에 나타내었다.

WO-05의 잉여저항은 Fig. 3.13의 WS-05 잉여저항의 경우와 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 즉, WS-model에서는  $V=1.0$  m/s의 영역에서 두 선체간의 폭이 좁아지면서 잉여저항이 크게 나타나고 있으나, WO-model에서는 잉여저항이 줄어들며 두 선체 사이의 거리변화와 잉여저항과의 사이에 일정한 경향이 없는 것을 보이고 있다.

Fig. 3.19에서 보는 바와 같이, WO-model의 선수부형상이 두 선체 사이에서 입사각을 갖지 않음으로 내부에 생성되는 선수부 파형이 현저히 줄어들고 두 선체의 거리변화에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

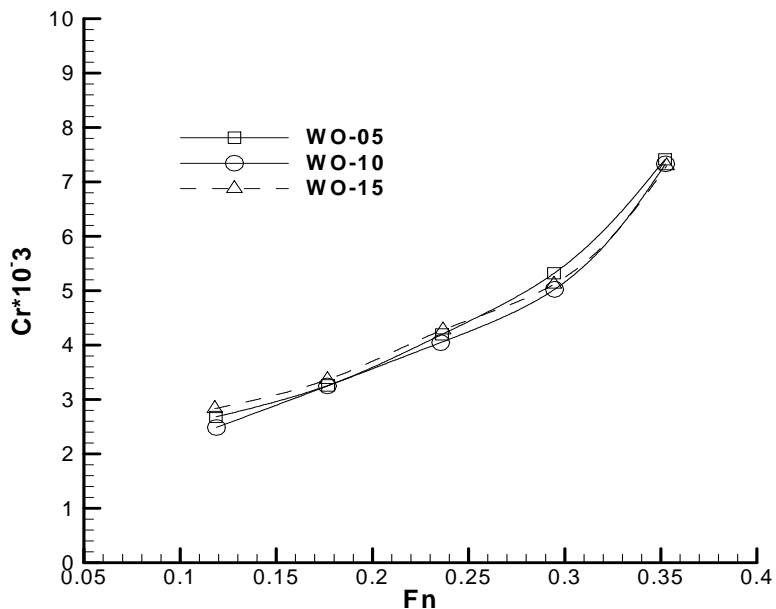
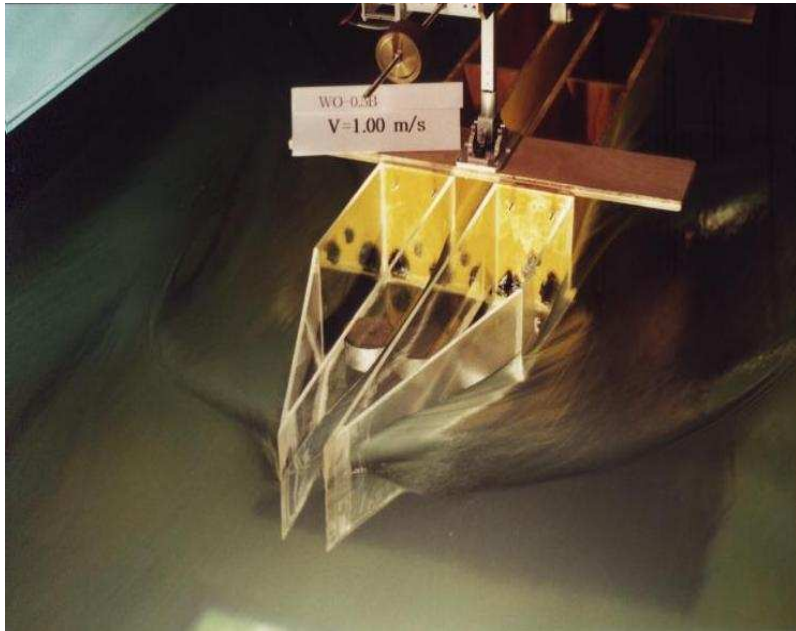


Fig. 3.18 Comparison of residual resistance for WO models

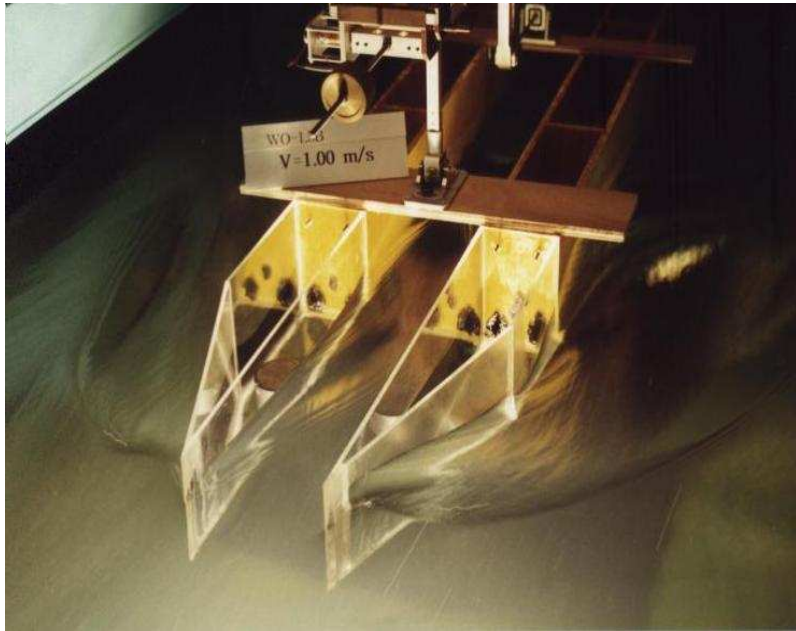


(a) WO-05



(b) WO-10





(c) WO-15

Fig. 3.19 Comparison of free surface flows for WO models ( $V=0.4\text{m/s}$ )

WO-model의 경우 두 선체 사이에서의 파 간섭은 크게 나타나지 않으나, 외부에 놓여진 Shoulder에서 강한 Wave가 나타나고, 이로 인하여 운항 중 정박되어 있는 어선 등에 영향을 줄 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 3.20에 WS 및 WO model 의 잉여저항을 비교하였다.

WS-10 및 WS-15 의 저항성능이 우수한 것으로 판단되므로, 해저 유기퇴적물 수거를 위한 장비와 유기퇴적물 처리를 위한 설비 등의 충분한 공간 확보를 위하여 두 선체의 간격이 WS-10 선정하였으며, 퇴적물 처리를 위한 공정도와 일반배치도가 Fig. 3.3 및 Fig. 3.7에 제시되었다.

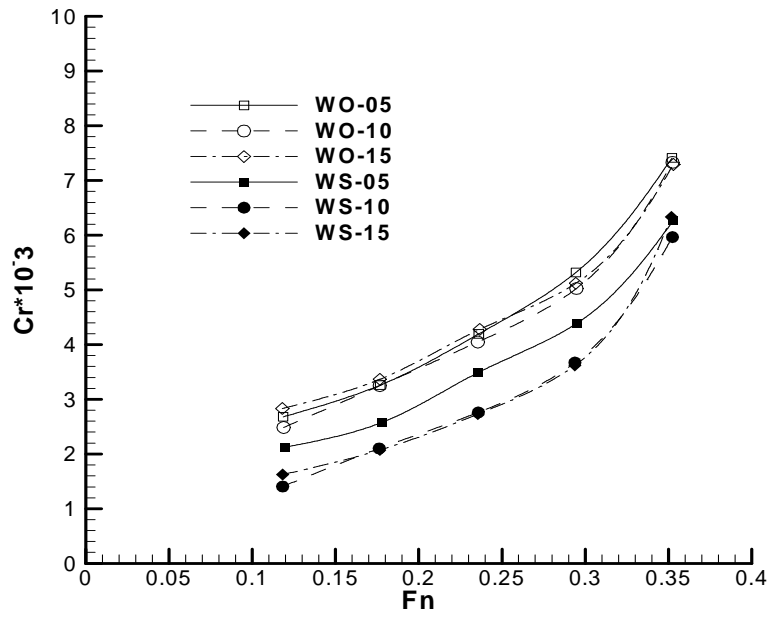


Fig. 3.20 Comparison of residual resistance for WS and WO models

### 3. 유기퇴적물 처리 선박의 유체역학적 특성

#### 1) 개요

본 연구에서는 개발된 선형의 조파저항성분에 대해 전산유체역학으로 검증하였으며, 수치계산은 MAC(Marker And Cell)법을 기초로 한 직사각형 격자계에서 수행되었다.[1]

격자계로는 기하학적으로 복잡한 3차원 임의형상주위의 격자구성에 있어서 적용성이 우수한 직사각형 교차가변(Rectangular Staggered Variable) 격자계를 사용하였으며, 계산결과를 회류수조에서의 모형시험결과와 비교/분석하여 본 수치해석 기법(부록B)의 적용 가능성을 검토하였다.

모든 격자들은 유체격자, 물체경계격자, 물체내부격자로 분류되며, 각각에 대하여 적절한 계산 기법들이 적용되었다.

물체경계에서는 free-slip 조건을 적용하였으며, 물체경계격자에서의 압력 반복계산식은 free -slip 조건과 연속의 조건을 동시에 만족시키면서, 주위 압력들의 유무에 관계없이 압력 계산이 가능하도록 속도압력 동시반복법을 사용하였다.

수치 시뮬레이션을 위한 쌍둥선 선형의 선수부 형상은 대칭인 WS 및 비대칭인 WO의 2가지 형태이며, 선수부 형상과 두 선체의 거리에 따른 유동특성을 파악하여 퇴적물 수거시 작업 성능을 향상시키는 선형 도출에 주안점을 두었다.

## 2) 수치계산

계산영역은 한쪽 단동체의 선수만을 포함하는 유동장으로 구성하였으며, 중앙면에 대칭조건을 적용하여 유동장의 대칭성을 고려하였다.

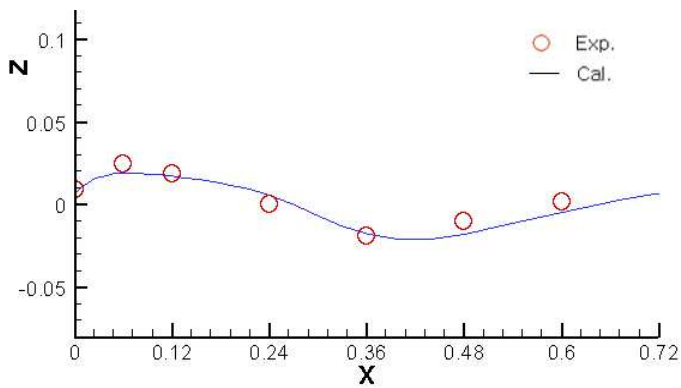
본 연구에서의 계산조건은 Table 3.12 와 같다.

Table 3.12 Computational conditions

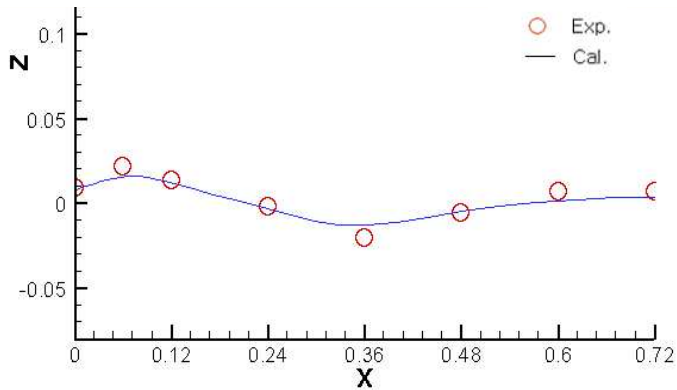
Number of Cell	X	60
	Y	140
	Z	35
Computational domain	X	1.22 m
	Y	0.35 m
	Z	0.28 m
Cell Size	X min	0.005 m
	Y min	0.002 m
	Z	0.008 m
Velocity		0.6, 0.8, 1.0 (m/s)
DTND		0.005
Acceleration time steps		1600
Total steps		4000

### 3) 수치해석결과 및 검토

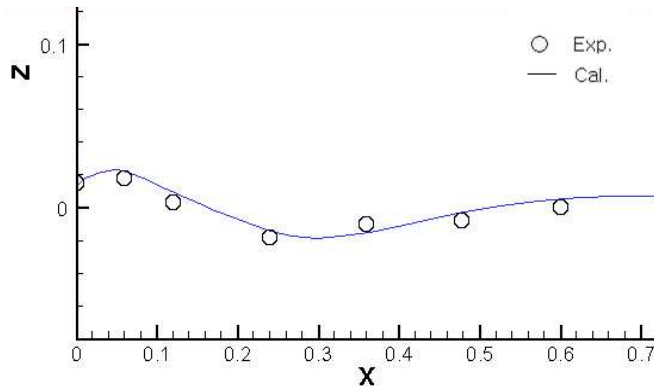
수치 시뮬레이션의 정도를 검증하기 위하여 선측과형을 비교하였다. Fig. 3.21 에서와 같이 선측과형 비교결과 수치 시뮬레이션이 잘 일치하는 것을 확인하였다.



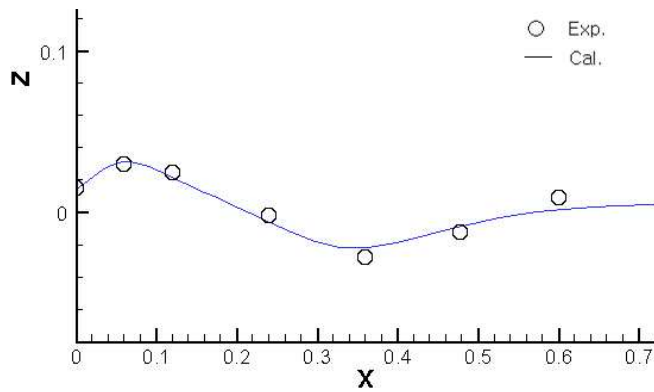
(c) Inside (WS-10, 1.0m/s)



(d) Outside (WS-10, 1.0m/s)



(e) Inside (WO-10, 1.0m/s)



(f) Outside (WO-10, 1.0m/s)

Fig. 3.21 Comparison of ship's side wave

또한 계산된 압력저항은 선수만을 계산한 것으로 실험을 통해 얻은 잉여저항과 직접 비교할 수 없으므로, Table 3.13 과 같이 정성적으로 잉여저항과 선수부 압력저항의 속도에 따른 차이를 비교하였다.

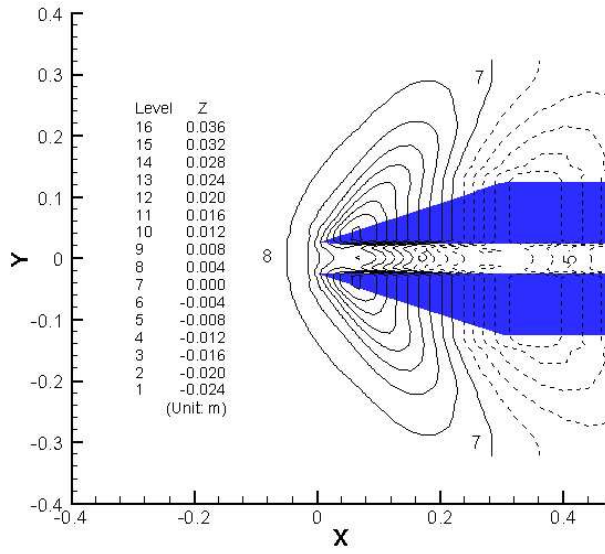
Table 3.13 Comparison of residual and pressure resistance (WO type)

(unit: Kg)

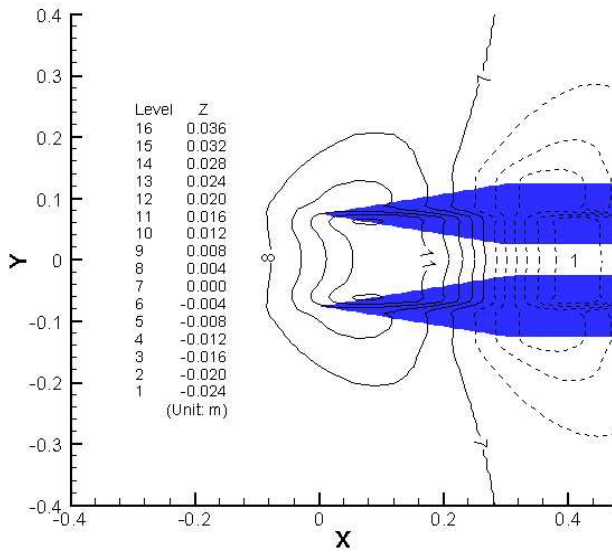
		Residual resistance	Difference (C=B-A)		Pressure resistance
WO-05	0.6m/s	0.0731 <sup>A</sup>	0.052 <sup>C</sup>	0.048	1.334
	0.8m/s	0.125 <sup>B</sup>	0.186	0.168	1.382
	1.0m/s	0.312			1.55
WO-10	0.6m/s	0.072	0.078	0.062	1.328
	0.8m/s	0.150	0.164	0.174	1.39
	1.0m/s	0.331			1.564
WO-15	0.6m/s	0.0755	0.062	0.058	1.336
	0.8m/s	0.137	0.180	0.176	1.394
	1.0m/s	0.317			1.57

Fig. 3.22 는 WO 선형 및 WS 선형의 선측파고에 대한 계산 결과를 나타낸 것이다.

WO 선형의 경우 수직한 선측의 파고가 낮을 것으로 예상하였으나, 큰 입사각에 의하여 선수 앞에서부터 파가 발달하여 WS 선형에 비하여 높은 파고가 나타남을 확인할 수 있다.



(a) WO-05, 1.0m/s



(b) WS-05, 1.0m/s

Fig. 3.22 Wave height contours



Fig. 3.23은 선체를 정면에서 바라본 그림으로, WO 선형의 경우 선수부에 큰 압력이 작용하고 있음을 알 수 있으며, WS 선형의 경우 Fig. 3.21의 선측파고 비교에서 나타내었듯이 WO 선형에 비하여 선측파고도 낮고, 선수부에 걸리는 압력이 작게 나타남을 알 수 있다.

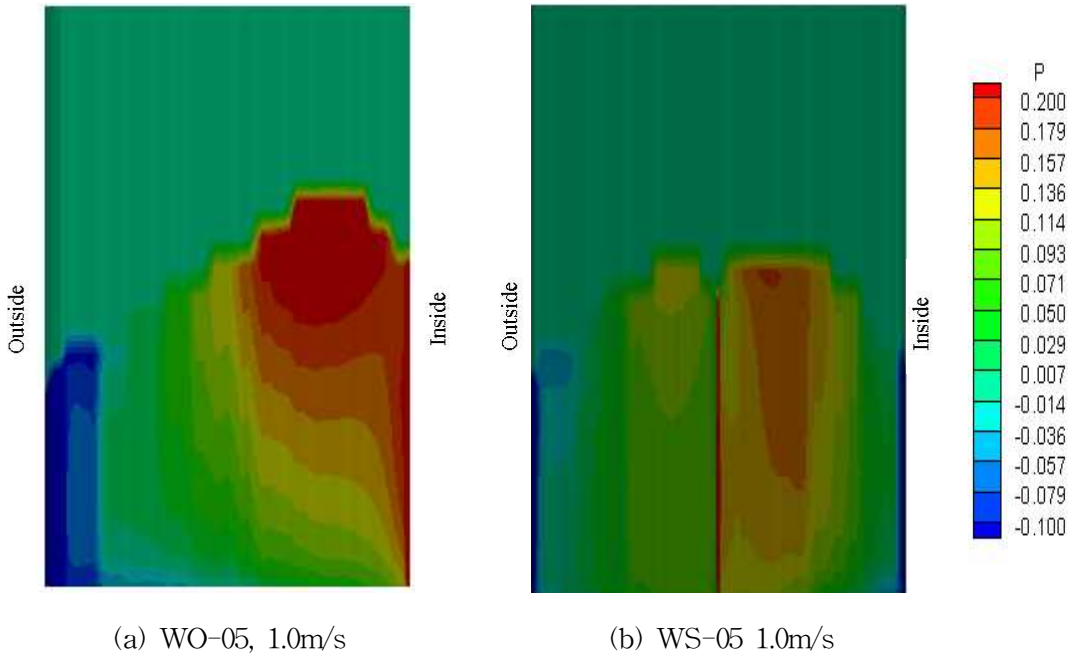


Fig. 3.23 Pressure contours on the hulls

## 제4장 고 찰

### 1. 유기퇴적물 수거 시스템 연구결과

본 연구에서는 해저의 오염퇴적물중 오염의 주원인인 압밀되어 있지 않은 퇴적물층만을 선별하여 준설할 수 있는 수거 시스템을 구성하고 Pilot-Scale 모형제작 및 성능시험을 수행하였으며, 시스템의 효율 향상을 위하여 수중 본체의 형상과 유동특성에 관한 연구를 수행하였다.

#### 1) 시스템 구성과 성능시험

본 수거 시스템의 특징은 고압의 공기 및 물 분사에 의해 저면 상층부의 유기퇴적물을 부유토록 하여 이들을 흡입·수거하는 방식으로 준설과정에서 재부유되는 오염물질의 오타확산을 방지하거나 최소화 하도록 하는 것이다.

시스템 구성과 Pilot-Scale 모형제작 및 성능시험으로부터 항만 및 양식장 등에 침전 퇴적되어 있는 유기 오염퇴적물의 제거에 적용 가능함을 보였다.

또한, 규모에 따라 1 개 또는 여러 개의 복합 시스템으로 구성할 수 있도록 하여 상부 오염토층을 선택적으로 제거할 수 있는 준설 장비의 개발 가능성을 확인하였다.

수거 시스템의 퇴적물 수거 효율은 노즐의 위치가 퇴적물로부터 5cm 정도에서 가장 높은 수거효율을 보이고 있으나, 노즐의 위치가 5cm 이하에서는 노즐의 토출압력이 강하여 시스템의 수중 본체 외부로 퇴적물이 유출되며 이로 인한 혼탁현상이 발생하였다.

정지 및 이동 시의 퇴적물 수거 효율에 대한 성능시험으로부터 퇴적물 함유율이 17%이상 되도록 하기 위해서는 퇴적물 부유 및 수거를 위한 정지 시 노즐의 토출압력은 30 Bar 이상, 이동 시 노즐의 토출압력은 40 Bar 이상이 요구됨을 확인하였다.

90%이상의 퇴적물이 평탄하게 산재한 해저상태에서 퇴적물의 함유율을 높이기 위해 노즐의 토출압력을 높이는 것은 수중 본체 외부로 퇴적물이 유출됨에 따라 혼탁현상이 발생되며, 이러한 혼탁현상을 방지하기 위해 노즐의 토출압력을 낮추는 것은 수중 본체의 이동속도가 높아지면서 퇴적물 수거효율이 급격히 떨어지게 된다.

따라서, 고압의 노즐 토출압력에서도 혼탁현상을 방지하고 수중 본체의 고속 이동 시에도 퇴적물 수거효율을 향상시키기 위해서는 수중 본체 내부의 퇴적물 집적장치에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 2) 수중 본체의 형상과 유동특성

유기퇴적물 수거 시스템의 수중 본체 형태와 가동 조건에 따른 유체역학적 특성 분석을 위하여 상용 S/W인 Fluent 6.2를 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

수치 시뮬레이션은 수중 본체의 주배관 하부에서의 유동특성을 파악하여 시스템의 퇴적물 수거성능을 향상시키기 위한 것으로 Type 1, Type 2 및 Type 3의 3가지 형상에 대해서 수행하였으며, Type 2의 수중 본체에 있어서 하부의 후방 스키투를 제거한 경우 수중 본체 내부의 압력은 높아지나 유선분포가 균일해지는 경향을 보이고, Type 3의 형상은 수중 본체 내부에 낮은 압력과 균일한 유선분포를 보임에 따라 유기퇴적물 수거를 위한 성능 면에서 우수한 것으로 판단된다.

## 2. 유기퇴적물 처리 시스템 연구결과

본 연구에서는 준설된 유기퇴적물의 감량화를 목적으로 Hydrocyclone을 이용한 준설퇴적물의 전처리 공정에 대한 시스템의 개념을 제시하였으며, 퇴적물 수거 및 처리시스템의 탑재를 위한 선박으로 썰기형태의 선수형상을 가지는 쌍동선형에 대하여 모형시험을 통한 성능분석과 수치 시뮬레이션을 통한 비교 연구를 수행하였다.

### 1) 준설퇴적물의 전처리 공정

퇴적물 내 오염 물질의 효율적인 제거와 다량의 오염퇴적물을 처리하기에 적합한 준설퇴적물의 전처리 공정에 대한 시스템을 구성하였다.

시스템은 준설퇴적물의 굵은 입자로 인한 사이클론과 펌프의 손상방지를 위하여 예비스크린, 스크린, 회전혼합체, 진동스크린 및 Hydrocyclone을 거치도록 하였다.

예비스크린에 의해 이물질이 분리된 퇴적물은 스크린에 의해 여과/탈수되며, 여과된 퇴적물은 Hydrocyclone 등의 입자분류기에서 일차적으로 모래와 실트의 분류를 위해 입자지름 60-80 $\mu\text{m}$ (Desanders)에서 분리가 되도록 하고, 그 다음 미세모래와 미세실트의 분류를 위해 입자지름 20 $\mu\text{m}$ (Desilters)에서 분리되도록 하였으며, 원심분리기에서 Cake화하여 분리된 오염유기물질은 화학적 처리를 위한 공정으로 이송되도록 하였다.

호소 및 하천 등지에서 Hydrocyclone을 이용한 준설퇴적물 내 오염물질의 분리방안에 대한 연구<sup>[2],[3],[6],[8]</sup> 등으로부터, 본 연구에서 제시한 유기퇴적물 전처리공정에서의 Hydrocyclone 적용은 충분히 유용할 것으로 판단된다.

## 2) 퇴적물 수거 및 처리 선박의 모형시험과 수치해석

본 연구에서는 단순화된 썰기형 선형의 특성을 가지는 쌍동선형을 기본선형으로 하고 각 단동체의 형상이 대칭인 WS 선형과 비대칭인 WO 선형의 경우에 대하여 두 선체 사이의 거리를 변화시켜 가면서 저항성능 실험을 수행하였으며, 선측과형에 대해서는 모형실험과 수치 시뮬레이션의 결과를 비교하였다.

WS 선형의 경우 고속영역에서는 두 선체 사이의 거리가 멀어질수록, 저속영역에서는 그 거리가 짧아질수록 잉여저항은 더 커지는 결과를 나타내었다.

이는 저속영역에서는 두 선체 사이의 거리가 가까워지면서 강해지는 파 간섭이 저항 특성에 미치는 영향이 크고, 고속영역에서는 두 선체 사이의 파 간섭에 의한 저항특성보다 조파저항 특성이 강해지기 때문으로 판단된다.

WO 선형의 경우, 저중속 영역에서 두 선체 사이의 거리변화와 잉여저항과는 일정한 경향이 없음을 보였으며, 이는 Insel & Molland(1991), Rovere(1997) 등[24]의 연구결과에서처럼 두 선체 사이의 복잡한 파 간섭이 때로는 우호적으로 때로는 그 반대로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

모형실험과 수치 시뮬레이션의 선측과형을 비교한 결과는 정성적으로나 정량적으로 잘 일치함을 보였으며, 저속에서 쌍동선의 선체간 거리는 저항특성에 큰 영향을 주지 않고 선체를 구성하는 단동체의 선형이 보다 더 중요함을 확인하였다. 또한, 작은 입사각을 가지고 있는 WS 선형이 선체 사이의 거리와 무관하게 가장 작은 저항값을 보였으며, 실험에서나 계산에서 가장 우수한 저항 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

## 제5장 결 론

본 연구에서 수행된 유기퇴적물 수거 및 처리 시스템에 관한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 유기퇴적물 수거를 위한 Pilot-Scale 모형제작 및 성능시험으로부터 항만 및 양식장 등에 침전 퇴적되어 있는 유기 오염퇴적물의 상부 오염토층만 선택적으로 수거할 수 있는 준설 장비의 개발 가능성을 확인하였다.
- 2) 수거 시스템의 퇴적물 수거 효율은 노즐의 위치가 퇴적물로부터 5cm, 노즐의 토출압력 30 Bar에서 퇴적물 함유율 17% 정도의 가장 높은 수거효율을 보인다.
- 3) 수중 본체의 정지 및 이동 시 퇴적물 함유율 17% 이상의 수거 효율을 유지하기 위해서는, 정지 시 노즐의 토출압력은 30 Bar 이상, 이동 시 노즐의 토출압력은 40 Bar 이상이 요구된다.
- 4) 수중 본체의 형상에 있어서는 전체적인 폭을 넓히고 깊이를 낮추는 것이 수중 본체 내부에 낮은 압력과 균일한 유선분포를 유도하여 유기퇴적물 수거를 위한 효율 면에서 우수한 것으로 판단된다.
- 5) 준설된 유기퇴적물의 감량화를 목적으로 하이드로사이클론을 이용한 준설퇴적물의 전처리 공정에 대한 시스템의 개념을 제시하였다.
- 6) 저속에서 쌍동선의 선체간 거리는 저항특성에 큰 영향을 주지 않고 단동체의 선형이 보다 더 중요함을 확인하였으며, 작은 입사각을 가지고 있는 WS 선

형이 선체 사이의 거리와 무관하게 가장 작은 저항값을 보이고 실험에서나 계산에서 가장 우수한 저항성능을 가지고 있음을 확인하였다.

추후 연구에서는 퇴적물 수거효율을 향상시키기 위한 방안으로 고압의 노즐 토출압력에서도 혼탁현상을 방지하고 수중 본체의 고속 이동 시에도 퇴적물 함유율을 높일 수 있는 수중 본체 내부의 퇴적물 집적장치 등에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 김규석, 이영길, 정광열, 강대선, “Transom stern을 가지는 선박의 선미선형 설계에 관한 기초적 연구2” 대한조선학회 추계학술대회논문집, 제27권, 2004. PP. 740-747.
- (2) 김성훈, “Hydrocyclone을 이용한 토양현탁액의 오염입자분리”, 석사논문, 연세대학교 대학원 도시공학과, 2001.6
- (3) 김홍용, “퇴적준설물 내 오염물질의 분리방안에 관한 연구”, 석사논문, 연세대학교 산업대학원, 2001.6
- (4) 김희대, “마산만 퇴적오니 준설공사 급속침강공법”, 토지개발기술 통권 제27호, 1994. PP. 113 - 122
- (5) 박주식 · 우병국 · 박홍규, “펌프준설에 의한 청초호 주설토의 체적변화에 관한 연구“, 대한토목학회 정기학술대회, 2004.
- (6) 박진홍, “Hydrocyclone을 이용한 저수지 퇴적물의 분리”, 석사논문, 경희대학교, 2002.8
- (7) 수산청, “어장정화선 모델개발 보고서 -개념설계-”, 1991.12
- (8) 이성재, “오염준설퇴적물 감량화 및 재활용을 위한 물리화학적-생물학적 연계처리공정”, 박사학위논문, 중앙대학교, 2003.6
- (9) 이창희 · 김은정, “호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안”, 한국환경정책평가원, 1998.12
- (10) 정우철, 박찬원, 홍기섭, 2001, “쌍동형 부유쓰레기 청소선의 선수선형 개량을 위한 실험적 연구” 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 53-59.
- (11) 조용진 · 강국진 · 고창두, “2,500톤급 삼동선의 개념설계”, proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK,Koje, 19-20, April, 2001 PP. 74-77
- (12) 최동현, “한국의 오염해역준설 현황과 정책과제”, 2001
- (13) 한국해양수산개발원, “주요항만의 오염실태조사 및 관리방안 연구(I)”,



2000.3

(14) 홍성완 · 박제웅 · 이상직, “엔지니어링 시스템 설계 공학”,원창출판사, 1994.2

(15) 해양수산부, “수두차를 이용한 퇴적물 준설장비 개발”,2005.3

(16) A. L. Hakstege and L. A. van Geldermalsen., Pilot Remediation of Sediment from The Petroleum Harbour in Amsterdam. Water. Sci. Tech. Vol. 37, No 6- 7. 1998. pp. 403- 409.

(17) B. E. Launder and D. B. Spalding., The Numerical Computation of Turbulent Flows., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp.269-289, 1974.

(18) C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol. 39, 1981.

(19) Department of Defense Handbook, "Wastewater Treatment System Design Augmenting Handbook", MIL-HDBK-1005/16, 31. Oct. 1997.

(20) E . J . Pry or., Miner al Processing Industrial Sizing and Soring., 3rd edition.,1965. pp 222- 232.

(21) Guus C. Stefess., Monitoring of Environmental Effects and Process Performance during Biological Treatment of Sediment from The Petroleum Harbour in Amsterdam., Water. Sci. Tech. Vol. 37, No 6- 7. 1998. pp. 395- 402.

(22) Heinz D. Detzner , Wolfgang Schramm, Ulrich Doring and Wolfgang Bode., New Technology of Mechanical Treatment of Derdged Material from Hamburg Harbour., Water. Sci. Tech. Vol. 37, No 6- 7. 1998. pp. 337- 343.

(23) H. Miyata and S. Nisimula, "Finite Difference Simulation of Nonlinear Ship Waves", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 157, 1985.

- (24) Insel, M. and Molland, A.F., "An Investigation into the Resistance Components", The Royal Institution of Naval Architects, 1991. pp.1- 20.
- (25) J. A. Viecegli, "A Computing Method for Incompressible Flows by Moving Walls", Journal of Computational Physics, Vol. 8, 1971.
- (26) J. E Welch, F. H. Harlow, J. P. Shannon and B. J. Daly, "The MAC Method", Los Alamos Scientific Lab. Report, LA-3425, 1966.
- (27) Kelsall, D. F., The Theory and Applications of The Hydrocyclone. In Pool and Doyle : Soild - liquid Separation, H.M.S.O., London. 1996.
- (28) M. Antunes , R. A. Medronho., Bradley Hydrocyclone, Design and Performance Analysis., Hydrocyclone, analysis and applications. 1992. pp. 3-13.
- (29) Luo Qial, Xu Ji Run., The effect of Air Core on The Flow Field within Hydrocyclone., Hydrocyclone, analysis and applications. 1992. pp 51- 62.
- (30) Liang Yin Chu, Qian Luo, Ren Hyan Yu., Concentration and Classification Characteristics in a Modified Air - Sparged Hydrocyclone (ASH)., Int. J. Miner. Process. 48. 1996. pp 73- 93.
- (31) Ladislav Svarovsky., Soild - Liquid Separation., Second edition. Butterworths. 1981.
- (32) Ladislav Svarovsky., Soild - Liquid Separation., Third edition. Butterworths. 1990.
- (33) Ladislav Svarovsky., Jan Svarovsky., A New Method of Testing Hydrocyclone Grade Efficiencies. Hydrocyclone, analysis and applications. 1992. pp135- 145.
- (34) Mayer, F. W., Zement - Kalk - Gips. 19. No. 6. 1966, pp259- 268.
- (35) Malcolm R. Davidson., An Adaptive Method of Predicting The Air Core Diameter for Numerical Models of Hydrocyclone Flow., Int. J. Miner.

Process. 43. 1995. pp 167- 177.

(36) Marc Tuchman, Callie Bolattino and Jan Miller, "Solving Great Lakes Contaminated Sediment Problems", National Conference on Management and Treatment of Contaminated Sediments, Proceedings Cincinnati, OH May 13-14, 1997.

(37) US Army Corps of Engineers, Multiuser Disposal Site (MUDS) for Contaminated Sediments from Puget Sound-Subaqueous Capping and Confined Disposal Alternatives, Engineer Research and Development Center, ERDC TR-00-3, July 2000.

(38) US Army Corps of Engineers, Field Evaluation of Hopper Dredge Overflow for the Delaware River, Environmental Laboratory, ERDC/EL TR-02-17, July 2002.

(39) US Army Corps of Engineers, Field Pilot Study of In Situ Capping of Palos Verdes Shelf Contaminated Sediments, Engineer Research and Development Center, ERDC TR-02-5, Sep. 2002.

(40) U.S. EPA., "Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediments", EPA/823/B93/001, 1993b.

(41) U.S. EPA., Wastewater Technology Fact Sheet, "Screening and Grit Removal", 2003

(42) Y. G. Lee, H. Miyata and H. Kajitani, "Some Application of the TUMMAC Method to 3D Water Wave Problems" Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 25, 1988.

(43) Xue-Nong Chen, Som D. Sharma, and Norbert Stuntz, "Wave Reduction by S-Catamaran at Supercritical Speeds", Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 1, March 2003, pp. 1 - .10

# *Appendix A : Near-Wall Treatments for Wall-Bounded Turbulent Flows*

## *A.1 Overview*

Turbulent flows are significantly affected by the presence of walls. Obviously, the mean velocity field is affected through the no-slip condition that has to be satisfied at the wall. However, the turbulence is also changed by the presence of the wall in non-trivial ways. Very close to the wall, viscous damping reduces the tangential velocity fluctuations, while kinematic blocking reduces the normal fluctuations. Toward the outer part of the near-wall region, however, the turbulence is rapidly augmented by the production of turbulence kinetic energy due to the large gradients in mean velocity.

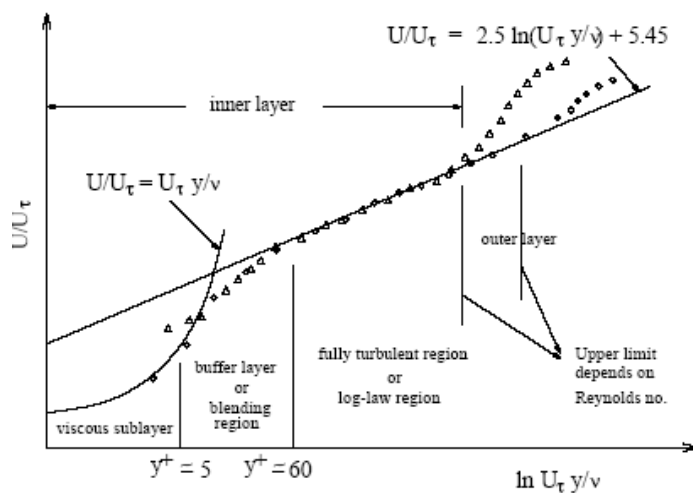
The near-wall modeling significantly impacts the fidelity of numerical solutions, inasmuch as walls are the main source of mean vorticity and turbulence. After all, it is in the near-wall region that the solution variables have large gradients, and the momentum and other scalar transports occur most vigorously. Therefore, accurate representation of the flow in the near-wall region determines successful predictions of wall-bounded turbulent flows.

The  $k-\varepsilon$  models, the Reynolds Stress Model(RSM), and the Large Eddy Simulation(LES) model are primarily valid for turbulent core flows (i.e., the flow in the regions somewhat far from walls). Consideration therefore needs to be given as to how to make these models suitable for wall-bounded

flows.

Numerous experiments have shown that the near-wall region can be largely subdivided into three layers. In the innermost layer, called the "viscous sublayer", the flow is almost laminar, and the (molecular) viscosity plays a dominant role in momentum and heat or mass transfer. In the outer layer, called the fully-turbulent layer, turbulence plays a major role. Finally, there is an interim region between the viscous sublayer and the fully turbulent layer where the effects of molecular viscosity and turbulence are equally important.

Fig. A.1 illustrates these subdivisions of the near-wall region, plotted in semi-log coordinates.

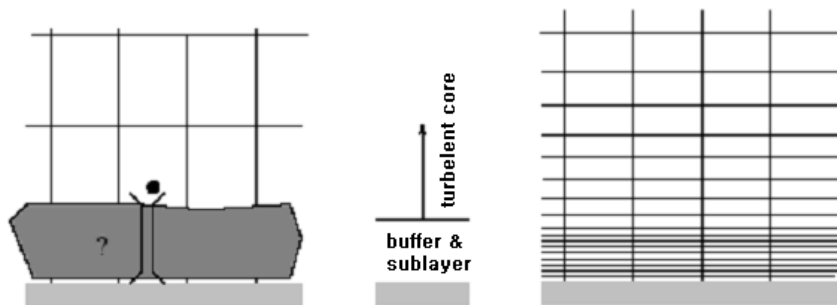


**Fig. A.1** Subdivisions of the Near-Wall Region

## *Wall Functions vs. Near-Wall Model*

Traditionally, there are two approaches to modeling the near-wall region. In one approach, the viscosity-affected inner region (viscous sublayer and buffer layer) is not resolved. Instead, semi-empirical formulas called "wall functions" are used to bridge the viscosity-affected region between the wall and the fully-turbulent region. The use of wall functions obviates the need to modify the turbulence models to account for the presence of the wall.

In another approach, the turbulence models are modified to enable the viscosity-affected region to be resolved with a mesh all the way to the wall, including the viscous sublayer. For purposes of discussion, this will be termed the "near-wall modeling" approach. These two approaches are depicted schematically in Fig. A.2



### *Wall Function Approach*

- The viscosity-affected region is not resolved, instead is bridged by the wall functions
- High-Re turbulence models can be used.

### *Near-Wall Model Approach*

- The near-wall region is resolved all the way down to the wall.
- The turbulence models ought to be valid throughout the near-wall region

**Fig. A.2** Near-Wall Treatments

In most high-Reynolds-number flows, the wall function approach substantially saves computational resources, because the viscosity-affected near-wall region, in which the solution variables change most rapidly, does not need to be resolved. The wall function approach is popular because it is economical, robust, and reasonably accurate. It is a practical option for the near-wall treatments for industrial flow simulations.

The wall function approach, however, is inadequate in situations where the low-Reynolds-number effects are pervasive in the flow domain in question, and the hypotheses underlying the wall functions cease to be valid. Such situations require near-wall models that are valid in the viscosity-affected region and accordingly integrable all the way to the wall.

## *A.2 Wall Functions*

Wall functions are a collection of semi-empirical formulas and functions that in effect "bridge" or "link" the solution variables at the near-wall cells and the corresponding quantities on the wall.

The wall functions comprise

- laws-of-the-wall for mean velocity and temperature (or other scalars)
- formulas for near-wall turbulent quantities

FLUENT offers two choices of wall function approaches:

- standard wall functions
- non-equilibrium wall functions

## Standard Wall Functions

The standard wall functions are based on the proposal of Launder and Spalding [17], and have been most widely used for industrial flows.

### - Momentum

The law-of-the-wall for mean velocity yields

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad (\text{A.1})$$

where

$$U^* \equiv \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (\text{A.2})$$

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (\text{A.3})$$

and

$\kappa$  = von Kármán constant (= 0.4187)

$E$  = empirical constant (= 9.793)

$U$  = mean velocity of the fluid at point  $P$

$k_P$  = turbulence kinetic energy at point  $P$

$y_P$  = distance from point  $P$  to the wall

$\mu$  = dynamic viscosity of the fluid

The logarithmic law for mean velocity is known to be valid for  $30 < y^* < 300$ . In FLUENT, the log-law is employed when  $y^* > 11.225$ .



When the mesh is such that  $y^* < 11.225$  at the wall-adjacent cells, FLUENT applies the laminar stress-strain relationship that can be written as

$$U^* = y^* \tag{A.4}$$

It should be noted that, in FLUENT, the laws-of-the-wall for mean velocity and temperature are based on the wall unit,  $y^*$ , rather than  $y^+$  ( $\equiv \rho u_{\tau} y / \mu$ ). These quantities are approximately equal in equilibrium turbulent boundary layers.

#### - *Energy*

Reynolds' analogy between momentum and energy transport gives a similar logarithmic law for mean temperature. As in the law-of-the-wall for mean velocity, the law-of-the-wall for temperature employed in FLUENT comprises the following two different laws:

- linear law for the thermal conduction sublayer where conduction is important
- logarithmic law for the turbulent region where effects of turbulence dominate conduction

The thickness of the thermal conduction layer is, in general, different from the thickness of the (momentum) viscous sublayer, and changes from fluid to fluid. For example, the thickness of the thermal sublayer for a high-Prandtl-number fluid (e.g., oil) is much less than its momentum sublayer thickness. For fluids of low Prandtl numbers (e.g., liquid metal), on the contrary, it is much larger than the momentum sublayer thickness.

In highly compressible flows, the temperature distribution in the near-wall region can be significantly different from that of low subsonic flows, due to the heating by viscous dissipation. In FLUENT, the temperature wall functions include the contribution from the viscous heating.

The law-of-the-wall implemented in FLUENT has the following composite form:

$$T^* \equiv \frac{(T_w - T_p) \rho c_p C_v^{1/4} k_p^{1/2}}{q} = \begin{cases} \text{Pr} y^* + \frac{1}{2} \rho \text{Pr} \frac{C_v^{1/4} k_p^{1/2}}{q} U_p^2 & (y^* < y_T^*) \\ \text{Pr} \left[ \frac{1}{K} \ln(E y^*) + A \right] + (y^* > y_T^*) & (A.5) \\ \frac{1}{2} \rho \frac{C_v^{1/4} k_p^{1/2}}{q} \{ \text{Pr} U_p^2 + (\text{Pr} - \text{Pr}_t) U_d^2 \} \end{cases}$$

where  $P$  is computed by using the following formula:

$$P = 9.24 \left[ \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_t} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[ 1 + 0.28 e^{-0.007 \text{Pr} / \text{Pr}_t} \right] \quad (A.6)$$

and

$k_p$  = turbulent kinetic energy at point P

$\rho$  = density of fluid

$c_p$  = specific heat of fluid

$q$  = wall heat flux

$T_p$  = temperature at the cell adjacent to wall

$T_w$  = temperature at the wall

$\text{Pr}$  = molecular Prandtl number ( $\mu c_p / k$ )

$\text{Pr}_t$  = turbulent Prandtl number (0.85 at the wall)

$A$  = Van Driest constant (= 26)

$U_c$  = mean velocity magnitude at  $y^* = y_T^*$

Note that, for the segregated solver, the terms

$$\frac{1}{2} \rho \text{Pr} \frac{C_p^{1/4} k_p^{1/2}}{q} U_P^2$$

and

$$\frac{1}{2} \rho \frac{C_p^{1/4} k_p^{1/2}}{q} \{ \text{Pr} U_P^2 + (\text{Pr} - 1) U_D^2 \}$$

will be included in Equation A.5 only for compressible flow calculations.

The non-dimensional thermal sublayer thickness,  $y_T^*$  in Equation A.5 is computed as the  $y^*$  value at which the linear law and the logarithmic law intersect, given the molecular Prandtl number of the fluid being modeled.

The procedure of applying the law-of-the-wall for temperature is as follows. Once the physical properties of the fluid being modeled are specified, its molecular Prandtl number is computed. Then, given the molecular Prandtl number, the thermal sublayer thickness,  $y_T^*$ , is computed from the intersection of the linear and logarithmic profiles, and stored.

During the iteration, depending on the  $y^*$  value at the near-wall cell, either the linear or the logarithmic profile in Equation A.5 is applied to compute the wall temperature  $T_w$  or heat flux  $q''$  (depending on the type of the thermal boundary conditions).

The function for  $\rho$  given by equation Equation A.6 is relevant for the

smooth walls. For the rough walls, however, this function is modified as follows:

$$P_{rough} = 3.15 \text{Pr}^{0.695} \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{E} \right)^{0.359} + \left( \frac{E}{E} \right)^{0.6} P \quad (\text{A.7})$$

where  $E$  is wall function constant modified for the rough walls.

### - Species

When using wall functions for species transport, FLUENT assumes that species transport behaves analogously to heat transfer. Similarly to Equation A.5, the law-of-the-wall for species can be expressed for constant property flow with no viscous dissipation as

$$Y_i^* \equiv \frac{(Y_{i,w} - Y_i) \rho C_u^{1/4} k_p^{1/2}}{J_{i,w}} = \begin{cases} \mathcal{S}c y^* & (y^* < y_d^*) \\ \mathcal{S}c \left[ \frac{1}{K} \ln(E y^*) + P_d \right] & (y^* > y_d^*) \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

where  $Y_i$  is the local species mass fraction,  $\mathcal{S}c$  and  $\mathcal{S}c_i$  are molecular and turbulent Schmidt numbers, and  $J_{i,w}$  is the diffusion flux of species  $i$  at the wall. Note that  $P_c$  and  $y_c^*$  are calculated in a similar way as  $P$  and  $y_T^*$  with the difference being that the Prandtl numbers are always replaced by the corresponding Schmidt numbers.

### - Turbulence

In the  $k-\varepsilon$  models and in the RSM (if the option to obtain wall boundary conditions from the  $k$  equation is enabled), the  $k$  equation is solved in the whole domain including the wall-adjacent cells. The boundary condition for  $k$  imposed at the wall is

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (\text{A.9})$$

where  $n$  is the local coordinate normal to the wall.

The production of kinetic energy,  $G_k$  and its dissipation rate,  $\varepsilon$  at the wall-adjacent cells, which are the source terms in the  $k$  equation, are computed on the basis of the local equilibrium hypothesis. Under this assumption, the production of  $k$  and its dissipation rate are assumed to be equal in the wall-adjacent control volume.

Thus, the production of  $k$  is computed from

$$G_k \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{\kappa \rho C_{\mu}^{1/4} k_P^{1/2} y_P} \quad (\text{A.10})$$

and  $\varepsilon$  is computed from

$$\varepsilon_P = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa y_P} \quad (\text{A.11})$$

The  $\varepsilon$  equation is not solved at the wall-adjacent cells, but instead is computed using Equation A.11.

Note that, as shown here, the wall boundary conditions for the solution variables, including mean velocity, temperature, species concentration,  $k$  and  $\varepsilon$  are all taken care of by the wall functions. Therefore, you do not need to be concerned about the boundary conditions at the walls.

The standard wall functions described so far are provided as a default option in FLUENT. The standard wall functions work reasonably well for a broad range of wall-bounded flows. However, they tend to become less reliable when the flow situations depart too much from the ideal conditions that are assumed in their derivation. Among others, the constant-shear and local equilibrium hypotheses are the ones that most restrict the universality of the standard wall functions. Accordingly, when the near-wall flows are subjected to severe pressure gradients, and when the flows are in strong non-equilibrium, the quality of the predictions is likely to be compromised.

The non-equilibrium wall functions offered as an additional option can improve the results in such situations.

### ***Non-Equilibrium Wall Functions***

In addition to the standard wall function described above (which is the default near-wall treatment) a two-layer-based, non-equilibrium wall function is also available. The key elements in the non-equilibrium wall functions are as follows:

- Launder and Spalding's log-law for mean velocity is sensitized to pressure-gradient effects.
- The two-layer-based concept is adopted to compute the budget of turbulence kinetic energy ( $\overline{G_R} \overline{\epsilon}$ ) in the wall-neighboring cells.

The law-of-the-wall for mean temperature or species mass fraction remains the same as in the standard wall function described above.

The log-law for mean velocity sensitized to pressure gradients is

$$\frac{\tilde{U} C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( E \frac{\rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right) \quad (\text{A.12})$$

where

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dP}{dx} \left[ \frac{y_v}{\rho \kappa \sqrt{k}} \ln \left( \frac{y}{y_v} \right) + \frac{y - y_v}{\rho \kappa \sqrt{k}} + \frac{y_v^2}{\mu} \right] \quad (\text{A.13})$$

and  $y_0$  is the physical viscous sublayer thickness, and is computed from

$$y_0 \equiv \frac{\mu y_v^*}{\rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2}} \quad (\text{A.14})$$

where  $y_v^* = 11.225$ .

The non-equilibrium wall function employs the two-layer concept in computing the budget of turbulence kinetic energy at the wall-adjacent cells, which is needed to solve the  $k$  equation at the wall-neighboring cells. The wall-neighboring cells are assumed to consist of a viscous sublayer and a fully turbulent layer. The following profile assumptions for turbulence quantities are made:

$$\tau_w = \begin{cases} 0, & y < y_0 \\ \tau_w, & y > y_0 \end{cases} \quad \begin{cases} \left( \frac{y}{y_0} \right)^2 k_P, & y < y_0 \\ k_P, & y > y_0 \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{2y k}{y^2}, & y < y_0 \\ \frac{k^{3/2}}{C_\ell y}, & y > y_0 \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

where  $C_\ell = \kappa C_{\mu}^{-3/4}$ , and  $y_0$  is the dimensional thickness of the viscous sublayer, defined in Equation A.14.

Using these profiles, the cell-averaged production of  $k$ ,  $\overline{G_k}$  and the cell-averaged dissipation rate,  $\overline{\varepsilon}$  can be computed from the volume average of  $G_k$  and  $\varepsilon$  of the wall-adjacent cells. For quadrilateral and hexahedral cells for which the volume average can be approximated with a depth-average,

$$\overline{G_k} \equiv \frac{1}{y_n} \int_0^{y_n} \tau_t \frac{\partial U}{\partial y} dy = \frac{1}{K y_n} \frac{\tau_w^2}{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}} \ln\left(\frac{y_n}{y_v}\right) \quad (\text{A.16})$$

and

$$\overline{\varepsilon} \equiv \frac{1}{y_n} \int_0^{y_n} \varepsilon dy = \frac{1}{y_n} \left[ \frac{2\nu}{y_v} + \frac{k_P^{1/2}}{C_\ell} \ln\left(\frac{y_n}{y_v}\right) \right] k_P \quad (\text{A.17})$$

where  $y_n$  is the height of the cell ( $y_n = 2y_P$ ). For cells with other shapes (e.g., triangular and tetrahedral grids), the appropriate volume averages are used.

In Equations A.16 and A.17, the turbulence kinetic energy budget for the wall-neighboring cells is effectively sensitized to the proportions of the viscous sublayer and the fully turbulent layer, which varies widely from cell to cell in highly non-equilibrium flows. It effectively relaxes the local equilibrium assumption (production = dissipation) that is adopted by the standard wall function in computing the budget of the turbulence kinetic energy at wall-neighboring cells. Thus, the non-equilibrium wall functions, in effect, partly account for non-equilibrium effects neglected in the standard wall function.



### *Standard Wall Functions vs. Non-Equilibrium Wall Functions*

Because of the capability to partly account for the effects of pressure gradients and departure from equilibrium, the non-equilibrium wall functions are recommended for use in complex flows involving separation, reattachment, and impingement where the mean flow and turbulence are subjected to severe pressure gradients and change rapidly. In such flows, improvements can be obtained, particularly in the prediction of wall shear (skin-friction coefficient) and heat transfer (Nusselt or Stanton number).

### *Limitations of the Wall Function Approach*

The standard wall functions give reasonably accurate predictions for the majority of high-Reynolds-number, wall-bounded flows. The non-equilibrium wall functions further extend the applicability of the wall function approach by including the effects of pressure gradient and strong non-equilibrium. However, the wall function approach becomes less reliable when the flow conditions depart too much from the ideal conditions underlying the wall functions.

Examples are as follows:

- Pervasive low-Reynolds-number or near-wall effects (e.g., flow through a small gap or highly viscous, low-velocity fluid flow).
- Massive transpiration through the wall (blowing/suction).
- Severe pressure gradients leading to boundary layer separations.
- Strong body forces (e.g., flow near rotating disks, buoyancy-driven

flows).

- High three-dimensionality in the near-wall region (e.g., Ekman spiral flow, strongly skewed 3D boundary layers).

If any of the items listed above is a prevailing feature of the flow you are modeling, and if it is considered critically important to capture that feature for the success of your simulation, you must employ the near-wall modeling approach combined with adequate mesh resolution in the near-wall region. This approach can be used with the three  $k-\varepsilon$  models and the RSM.

## Appendix B : 수치계산 MAC(Marker And Cell)법

### B.1 수치계산법

수치계산은 MAC(Marker And Cell)법을 기초로 한 직사각형격자계에서 수행되었으며[1], 격자계로는 기하학적으로 복잡한 3차원 임의형상주위의 격자구성에 있어서 적용성이 우수한 직사각형 교차가변(Rectangular Staggered Variable) 격자계를 사용하였다.

계산영역은 한쪽 단동체의 선수만을 포함하는 유동장으로 구성하였으며, 중앙면에 대칭조건을 적용하여 유동장의 대칭성을 고려하였다.

좌표의 원점은 자유수면과 선수단이 만나는 점으로 정의하고 X축은 선체의 길이 방향을, Y축은 선체의 폭 방향을, Z축은 수직 상 방향을 (+)방향으로 하였다. Fig. B.1 은 속도와 압력 정의점을 보여준다.

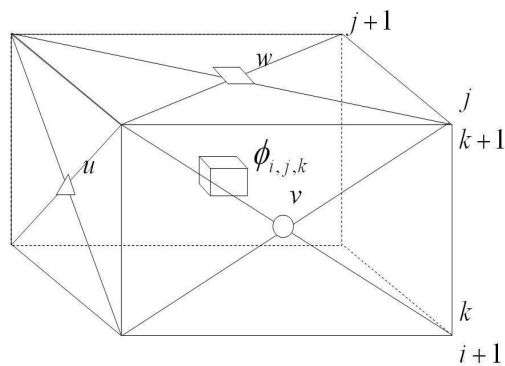


Fig. B.1 Definition of velocity and pressure points

지배방정식은 유동장을 비압축성, 비점성유동이라고 가정하여, 보존형의 3차원 Euler 방정식(B.1)과 연속방정식(B.2)을 사용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{\partial\Phi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{\partial\Phi}{\partial y} \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial\Phi}{\partial z} + g$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{B.2})$$

식 B.1과 B.2에서

$(x, y, z)$	: 직교좌표
$(u, v, w)$	: x, y, z -방향 각 속도성분
$\rho$	: 밀도
$g$	: 중력가속도( $-9.8 \text{ m/sec}^2$ )
$\Phi$	: $P/\rho$
$P$	: 압력

지배방정식의 차분화에 있어서는, 대류항을 제외한 나머지 항들은 시간에 대하여 전진차분, 공간에 대하여 2차 중심차분으로 이산화하였다. 대류항의 차분기법으로는 2차 중심차분과 Donor cell법을 조합한 Hybrid scheme을 적용하였다 [1].

연속방정식과 대류항의 차분식은 각각 식 B.3 및 식 B.4와 같다.

$$\begin{aligned}
 u_{i+1/2, j, k}^{n+1} &= \xi_{i+1/2, j, k} - \frac{\Psi_{i+1, j, k} - \Psi_{i, j, k}}{DX_i} DT \\
 v_{i, j+1/2, k}^{n+1} &= \eta_{i, j+1/2, k} - \frac{\Psi_{i, j+1, k} - \Psi_{i, j, k}}{DY_j} DT \\
 w_{i, j, k+1/2}^{n+1} &= \zeta_{i, j, k+1/2} - \frac{\Psi_{i, j, k+1} - \Psi_{i, j, k}}{DZ_k} DT
 \end{aligned} \tag{B.3}$$

$$\begin{aligned}
 \xi_{i+1/2, j, k}^{n+1} &= u_{i+1/2, j, k} - DT \cdot UC_{i+1/2, j, k} \\
 \eta_{i, j+1/2, k}^{n+1} &= v_{i, j+1/2, k} - DT \cdot VC_{i, j+1/2, k} \\
 \zeta_{i, j, k+1/2}^{n+1} &= w_{i, j, k+1/2} - DT \cdot WC_{i, j, k+1/2} + g
 \end{aligned} \tag{B.4}$$

여기서,  $(DX, DY, DZ)$  : x, y, z 방향의 격자크기  
 $(UC, VC, WC)$  : x, y, z 각 방향의 대류항  
 $\Psi$  : 압력  
 $DT$  : 시간증분  
 위 첨자  $(n+1)$  :  $(n+1)$ 의 시간단계  
 아래첨자  $i, j, k$  : 격자의 위치

식 B.3과 연속방정식을 이용하면, 압력의 Poisson 방정식(식 B.5)을 얻을 수 있다.

$$\Psi_{i,j,k} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{DX1 \cdot DX2} + \frac{1}{DX1 \cdot DX2} + \frac{1}{DX1 \cdot DX2} \right\}^{-1} \quad (B.5)$$

$$\times \left\{ \begin{aligned} & \frac{DX1 \cdot \Psi_{i+1,j,k} + DX2 \cdot \Psi_{i-1,j,k}}{DX1 \cdot DX2 \cdot 1/2(DX1 + DX2)} \\ & + \frac{DY1 \cdot \Psi_{i,j+1,k} + DY2 \cdot \Psi_{i,j-1,k}}{DY1 \cdot DY2 \cdot 1/2(DY1 + DY2)} \\ & + \frac{DZ1 \cdot \Psi_{i,j,k+1} + DZ2 \cdot \Psi_{i,j,k-1}}{DZ1 \cdot DZ2 \cdot 1/2(DZ1 + DZ2)} - R_{i,j,k} \end{aligned} \right\}$$

여기서,

$$R_{i,j,k} = \frac{\xi_{i+1,j,k} - \xi_{i,j,k}}{DT \cdot DX_i} + \frac{\eta_{i,j+1,k} - \eta_{i,j,k}}{DT \cdot DY_j} + \frac{\zeta_{i,j,k+1} - \zeta_{i,j,k}}{DT \cdot DZ_k}$$

$$DX1 = \frac{DX_{i-1} + DX_i}{2}, \quad DX2 = \frac{DX_i + DX_{i+1}}{2}$$

$$DY1 = \frac{DY_{j-1} + DY_j}{2}, \quad DY2 = \frac{DY_j + DY_{j+1}}{2}$$

$$DZ1 = \frac{DZ_{k-1} + DZ_k}{2}, \quad DZ2 = \frac{DZ_k + DZ_{k+1}}{2}$$

식 B.5의  $R_{i,j,k}$ 는 Source term으로서 다음 계산단계에 사용된다. 식 B.5는 식 B.6와 같은 SOR(Successive Over-Relaxation)기법에 의하여 반복 계산된다.

$$\Psi_{i,j,k}^{m+1} = \Psi_{i,j,k}^m - \frac{\omega \cdot D_{i,j,k}^m}{2 \cdot DT \left\{ \frac{1}{DX1 \cdot DX2} + \frac{1}{DY1 \cdot DY2} + \frac{1}{DZ1 \cdot DZ2} \right\}} \quad (B.6)$$

$$\text{여기서, } D_{i,j,k}^m = \frac{u_{i+1,j,k}^m - u_{i,j,k}^{m+1}}{DX_i} + \frac{v_{i,j+1,k}^m - v_{i,j,k}^{m+1}}{DY_j} + \frac{w_{i,j,k+1}^m - w_{i,j,k}^{m+1}}{DZ_k}$$

$\omega$  : 완화계수

$D_{i,j,k}$  : i,j,k 격자의 발산

## B.2 경계조건

### 1) 물체표면 경계조건 (*Body boundary condition*)

본 해석법은 점성의 영향을 무시하였으므로 물체표면에서는 미끄러짐 조건 (Free-slip condition)을 적용하였다. 물체경계격자에서는 다음 세가지 조건을 만족시켰다.

- 1) 물체표면에 수직 방향속도는 '0' 이다.
- 2) 물체표면에 접한 속도는 Normal gradient를 갖지 않는다.
- 3) 물체경계격자의 발산(Divergence)은 '0'이다.

물체경계격자에서의 압력계산은 Free-slip 조건과 연속의 조건을 동시에 만족시키면서, 식 B.7과 같은 방법으로 계산된다[23].

$$\Psi_{i,j,k}^{m+1} = \Psi_{i,j,k}^m - \frac{w}{2 \cdot \delta \cdot DT} (V_P \cdot n) \quad (\text{B.7})$$

여기서, 
$$\delta = \frac{1}{DX_i} + \frac{1}{DY_j} + \frac{1}{DZ_k}$$

$V_P$  : 속도벡터

$n$  : 물체표면의 단위법선벡터

식 3.14는 ( $V_P \cdot n$ )이 '0'이 되었을 경우 수렴하는 것으로 물체경계에서 유체 부분의 발산이 '0'이고, 물체경계를 지나는 유체가 없다는 것을 의미한다.

## 2) 자유수면 경계조건 (*Free surface boundary condition*)

자유수면에서의 점성응력(viscous stress)과 표면장력(surface tension)의 효과를 무시하였으며 자유수면의 동역학적 조건과 운동학적 조건을 다음과 같이 사용하였다.

$$\phi = \phi_0 \quad \text{dynamic condition} \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{D\xi}{Dt} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + w \quad \text{kinematic condition} \quad (\text{B.9})$$

위 식의  $\xi$  은 자유수면의 위치를 나타내며,  $\phi_0 = P_0/\rho$  이고  $P_0$ 는 대기압이다.

자유수면 주위에서의 압력은 Irregular star[23, 42] 기법을 이용하여 아래와 같이 계산하였다.

$$\phi_{i,j,k} = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 + \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 + \eta_1 \eta_2 \eta_5 \eta_6} \times \left[ \frac{\eta_2 \phi_1 + \eta_1 \phi_2}{\eta_1 \eta_2 (\eta_1 + \eta_2)} + \frac{\eta_4 \phi_3 + \eta_3 \phi_4}{\eta_3 \eta_4 (\eta_3 + \eta_4)} + \frac{\eta_6 \phi_5 + \eta_5 \phi_6}{\eta_5 \eta_6 (\eta_5 + \eta_6)} - \frac{1}{2} R_{i,j,k} \right] \quad (\text{B.10})$$

위 식의  $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$  은 압력 점들의 거리를 나타내며, Fig. B.2에서는 2차원의 Irregular star를 보여준다.



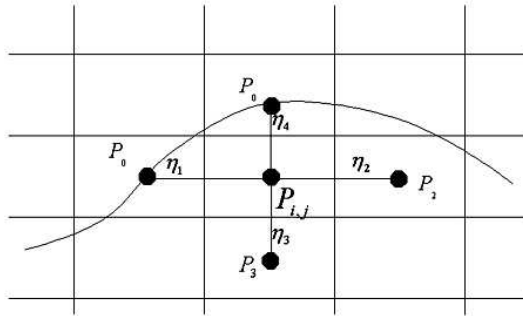


Fig. B.2 Irregular star in 2D case

식 B.8의 운동학적 경계조건은 Marker-particle을 이용하여 만족시켰으며, Marker-particle은 Fig. B.2 에서와 같이 Lagrangian manner[26]로 움직여 매 시간단계에서의 자유수면의 위치를 결정하였다.  $(x_i, y_i, z_i)$ 는 자유수면의 위치이고  $(u_i, v_i, w_i)$ 은  $(n)$ 번째 시간단계에서의 속도성분이라면,  $(n+1)$ 번째 시간단계에서 자유수면의 위치는 아래의 식을 이용하여 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_i^{n+1} &= x_i^n + DT \cdot u_i \\
 y_i^{n+1} &= y_i^n + DT \cdot v_i \\
 z_i^{n+1} &= z_i^n + DT \cdot w_i
 \end{aligned}
 \tag{B.11}$$

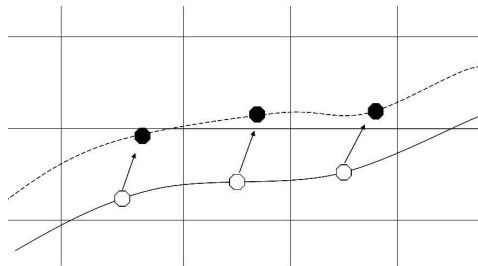


Fig. B.3 Movement of marker

### 3) 기타 경계조건 (*Other boundary condition*)

본 수치계산은 선체가 좌우대칭이므로 선박의 반에 해당하는 영역만 계산하였다. 따라서 대칭면에서는 대칭조건을 부과하였고, 유출경계에서는 모든 물리량이 부드럽게 변하도록 Zero-gradient extrapolation을 적용하였다.

## Appendix C : Hydrocyclone

준설퇴적물의 전처리과정 중에서 입자분리에 사용되는 하이드로사이클론은 원심력 침전으로 부유입자를 분리시키게 하는 원심가속도 및 유체 중 부유물질의 비중과 유체 비중의 차이를 이용하는 것으로, 10~2,000  $\mu\text{m}$ 의 입자크기와 고형물 함량 30% 이내에서 높은 분리효율을 나타낸다.[40] 또한, 단순구조로 되어 있어 소규모 공간에서 적은 비용으로 고형물을 분리하는데 폭 넓게 사용되고 있다.

### C.1 하이드로사이클론의 원리 및 특성

유체의 선회류(旋回流)에 의해서 생기는 원심력을 이용한 분리장치로서 고액분리에 이용된다.

사이클론의 본체는 보통 Fig. C.1 과 같이 원통부와 원추부로 이루어져 있으며, 원통부와 측벽에 접선방향으로 공급되는 유입슬러리에 의해 사이클론의 내부에 선회운동(vortex motion)이 일어나고 상향류와 하향류의 두 가지 흐름의 특성을 갖는다.

Slurry 속에 함유되어 있는 크기·밀도가 큰 입자는 원심력에 의해서 선회하면서 상대적으로 큰 원심력을 받아 Hydrocyclone의 측벽을 향하게 되고 원추부 하단에 위치한 하부배출구(Underflow orifice)를 통하여 하향 배출되며, 미세 입자(Fine fraction)를 포함한 유체는 상방향의 흐름을 통해 Overflow pipe 또는 Vortex finder라 하는 배출관을 통하여 배출된다.

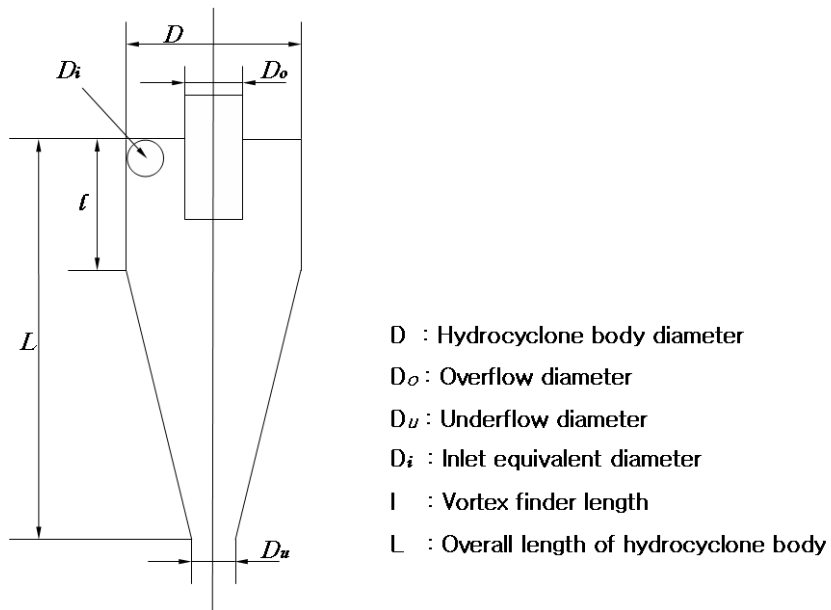


Fig. C.1 Schematic diagram of a typical hydrocyclone

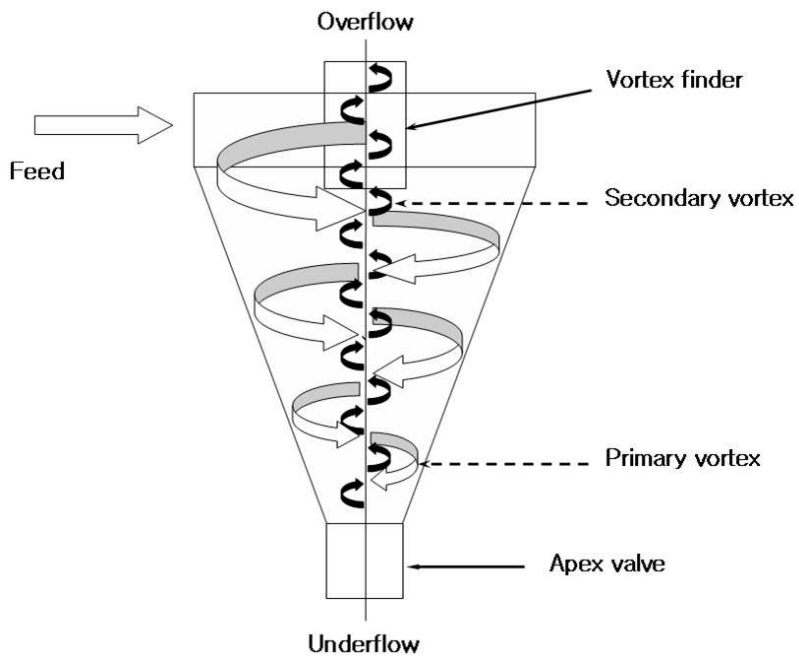


Fig. C.2 Flow pattern of hydrocyclone

## C.2 하이드로사이클론 내부 유체의 흐름

하이드로사이클론 내부 흐름은 접선방향 유입관(Tangential inlet duct)을 제외하고 원형대칭으로 구성되며, 접선속도(Tangential velocity,  $V_t$ ), 반경속도(Radial velocity,  $V_r$ ) 및 축방향속도(Axial velocity,  $V_a$ )로 구성성분을 분석할 수 있다.

### 1) 접선속도(Tangential velocity, $V_t$ )

하이드로사이클론의 접선속도는 반경( $r$ )에 비례하며 반경이 증가하면 접선속도는 감소한다. Vortex finder의 가장자리 하단부분은 반경이 작아짐에 따라 선회류의 반경이 작아져 접선속도는 증가하고, 상단부분은 큰 반지름으로 인해 접선속도가 감소되는 특성을 나타내는데 관계식은 식 C.1 과 같다

$$V_t r^n = \text{constant} \quad (\text{where } n \text{ is normally } 0.6 \leq n \leq 0.9) \quad (\text{C.1})$$

### 2) 축방향속도(Axial velocity, $V_a$ )

하이드로사이클론은 실린더와 원추부의 바깥 벽면을 따라 강한 하향류를 나타내며 이 흐름은 하부 배출구(Apex)로 분리되는 입자를 제거하기 때문에 사이클론 운전에서 필수적이다. Vortex finder의 가장자리 상부는 아래로 향하는 큰 속도가 다시 사이클론 벽 가까이에서 발생한다. 사이클론의 벽과 상부 배출구 사이의 반경에서 축방향 속도는 상향이 되며 사이클론 상부를 따라 내부로 이동하는 벽유도 흐름(Wall-induced flow) 때문에 Vortex finder 주변에서 강한 하향류가 관찰될 수도 있다.

### 3) 반경속도(*Radial velocity, $V_r$* )

하이드로사이클론의 반경속도는 접선속도 및 축방향속도보다 정상적인 상태에서 작은 값을 나타내며 정확히 측정하기가 어렵고 반경의 감소와 함께 그 속도도 감소하는 특성을 보인다.

### C.3 하이드로사이클론 내부 부유입자의 거동

고형물 입자가 실린더 벽 근처로 유입될 때 유입부에서의 강력한 난류혼합 때문에 내부로 급속히 분산되는데 실린더에서 유체의 거동에 관한 정보는 거의 없다. 하이드로사이클론에서는 이 부분을 예비 분리지역(Preliminary separation zone)으로 간주하고, 정밀한 분리는 원추부에서 수행되는 것으로 판단한다.

하이드로사이클론 내부의 흐름에서 입자는 기본적으로 가속도(중력과 원심력)와 항력의 두 가지 힘에 의해서 지배를 받는다. 중력의 영향은 보통 무시하기 때문에 단지 원심력과 항력만이 고려된다.

입자들은 원심력분리(Centrifugal elutriation)를 통해서 입자에 작용하는 원심력이 항력보다 크면 외부 방향으로 급속하게 이동하고, 항력이 더 크면 입자는 내부로 이동하는 특성을 보인다. 접선 방향과 축 방향에서 입자의 이동은 어떠한 힘에도 지배를 받지 않고 접선속도와 축방향 속도에만 관련된다. 하이드로사이클론에 존재하는 입자들의 항력과 원심력은 접선속도와 축방향 속도에 의해 결정되기 때문에 분리 지역내 모든 위치에서 접선속도와 축방향속도의 상대적인 값이 전반적인 사이클론 운전에 대해 중요한 역할을 한다.

## C.4 하이드로사이클론의 설계 및 특성

### 1) 설계 및 운전 변수

하이드로사이클론 설계 시, 최적의 운전조건을 위한 설계변수로는 장치특성인 유입구의 직경, 본체의 직경 및 길이, 상·하부 배출구의 직경, vortex finder의 길이 등의 변수와 입자의 비중, 압력 및 고형물 농도 등 유입슬러리의 특성에 의한 변수를 들 수 있다.[31]

사이클론 설계에 있어서 고형물 회수율(Solids recovery)을 향상시키기 위해서는 상대적으로 작은 유입 구경과 유출 구경을 가진 사이클론이 효율적이지만 흐름에 대한 저항이 높아지므로 처리용량이 작아진다. 적절한 한계 내에서 사이클론 길이를 제외하고는 모든 사이클론 크기에 대해 비율이 적용된다.

하부유출구의 크기(Underflow orifice diameter)는 사이클론의 최적 운전을 수행하기 위하여 중요하므로 반드시 변화 가능하게 만들어져야하며 설계변수보다는 운전변수로 간주되기도 한다.

하이드로사이클론 운전의 영향인자는 유입압력 유입수의 농도 시료입자의 특성, 유입 Slurry의 온도 및 혼합 정도 등 다양한데, 그중에서 가장 중요한 것은 운전압력(Operating pressure)와 유입수 농도(Feed concentration)이다. 압력을 증가시키면 분리 효율은 증가하고 유입수 농도가 증가하면 분리효율은 급속히 감소한다. 압력을 5, 6 bar 이상 증가시키는 경우는 거의 없고, 대형 사이클론에 대한 전형적인 운전 압력은 1~2 bar 이다. 높은 회수율을 얻으려고 할 때는 저농도의 유입수를 이용하여 하이드로사이클론을 운전한다.

Table C.1 Geometrical proportions of hydrocyclone[31]

Cyclone type and size of hydrocyclone	Geometrical proportions				
	$D_i/D$	$D_o/D$	$l/D$	$L/D$	Angle $\theta$ degrees
Rietema's design (optimum separation) $D=0.075\text{m}$	0.28	0.34	0.4	5	20
Bradley's design $D=0.038\text{m}$	0.133 (1/7.5)	0.5 (1/5)	0.33 (1/3)	6.85	9
Mozley's cyclone $D=0.022\text{m}$	0.154 (1/6.5)	0.214 (3/14)	0.57 (4/7)	7.43	6
Mozley's cyclone $D=0.044\text{m}$	160 (1/6.25)	0.25 (1/4)	0.57 (4/7)	7.71	6
Mozley's cyclone $D=0.044\text{m}$	0.197 (1/5)	0.32 (1/3)	0.57 (4/7)	7.71	6
Warman $D=0.076\text{m}$	0.29 (1/3.5)	0.2 (1/5)	0.31	4.0	15
RW 2515(AKW) $D=0.125\text{m}$	0.2 (1/5)	0.32 (1/3)	0.8	6.24	15

Note)  $D$ : Hydrocyclone body diameter,  $D_i$ : Inlet equivalent length,  
 $L$ : Overall length of hydrocyclone body,  $l$ : Vortex finder length,  
 $D_o$ : Overflow diameter,  $\theta$ : Angle of Cone part



## 2) 크기 및 적용 범위

일반적인 하이드로사이클론의 직경은 10mm~2.5m 범위이고, 고형물의 절단입경( $d_{50}$ )은 2~250 $\mu$ m, 유량(용량)은 0.1~7,200  $m^3/h$ 의 범위이다. 운전 압력은 0.35~6.12  $kg/cm^2$ 이고, 큰 하이드로사이클론보다 작은 하이드로사이클론에서 대부분 고압으로 운전된다. 또한 사이클론의 크기와 설계 변수, 운전 조건 및 분리되는 고형물의 특성에 의존하는 하부 고형물 농도는 대부분 부피비가 45~50%를 초과하지 않는다.[32]

하이드로사이클론의 장점을 최대한으로 활용하기 위해서는 직렬(series), 혹은 병렬(parallel)로 연결한 다단 사이클론을 사용하는 방법도 매우 효율적이다. 예를 들면 정화공정에서 높은 유량을 처리하기 위해서 작은 사이클론을 병렬로 연결하면 더 효율적이다. 반면에 직렬연결은 농축된 하부 유출과 깨끗한 상부 유출을 동시에 확보할 수 있어 정화 공정에서 총회수율을 향상 시킬 수 있다.

## 3) 장점 및 단점

하이드로사이클론은 구조가 단순하고 구입비용이 경제적이며 설치 및 운전이 용이하여 액체 정화, 슬러리농축, 고형물 분리 및 세척, 두 가지 혼합되지 않는 액체분리 및 액체로부터 탈가스등 매우 다양한 응용분야에 사용된다.

또한 사이클론 흐름 내의 높은 전단력(Shear force)은 다양한 고형물을 분리할 수 있어 Thixotropic과 Bingham 플라스틱 Slurry의 처리에도 적용된다.

그러나 하이드로사이클론이 설치 및 운전되면 유량과 유입수 농도에 크게 의존하기 때문에 낮은 강하비(Turn-down ratios)를 나타내므로 고정적인 특성을 지닌다.

운전 절단 입경(Operating cut size) 범위, 탈수 운전 및 정화 동력이라는 관점에서 고품물 분리에 한계성이 있다. 이러한 특징 중 몇가지는 다단배열을 통해 향상될 수도 있지만 추가적인 동력 및 투자비용이 필요하다.