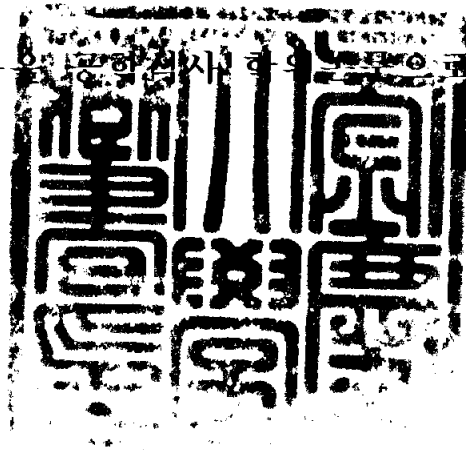


공학석사 학위논문

인공용승구조물의 최적단면에 관한 연구

지도교수 류 청 로

이 논문은 공학석사 학위논문으로 제출함.



2003년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

전 용 호

전용호의 공학석사 학위논문을 인준함.

2002년 12월 26일

주 심 공학박사 김 현 태



위 원 공학박사 이 인 철



위 원 공학박사 류 청 로



목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iv
List of Symbols	v
Abstract	vi
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 방법	3
2. 인공용승구조물에 관한 기초적 논의	4
2.1 인공용승구조물	4
2.2 인공용승구조물의 수리학적 특성	6
3. 인공용승구조물의 최적단면에 관한 수치실험	7
3.1 차원해석과 상사법칙	7
3.2 실험조건 및 방법	11
3.2.1 예비실험	11
3.2.2 실험조건 및 방법	12
3.3 블록의 투하특성	14
3.4 블록의 퇴적특성	22
3.5 용승유량 해석	27
3.5.1 구조물의 규모에 따른 해석.....	27
3.5.2 공극률에 따른 해석	32
4. 인공용승구조물의 최적단면에 관한 수치실험.....	37
4.1 기본방정식	37
4.2 계산영역	40
4.3 결과 및 검증	43
5. 결론	55
참고문헌	56

List of Figures

- Fig. 1-1. History of study.
- Fig. 1-2. Schematic flow of study.
- Fig. 2-1. Schematic of upwelling.
- Fig. 2-2. Conception of Artificial upwelling structures.
- Fig. 3-1. Measuring point (Pre-Experiments).
- Fig. 3-2. Experimental setup.
- Fig. 3-3. Variation of mean falling velocity with block's sizes.
- Fig. 3-4. Variation of mean horizontal falling distance with block's sizes according to stratification parameters.
- Fig. 3-5. Variation of mean horizontal falling distance with block's sizes.
- Fig. 3-6. Photo of falling motion of blocks(interval:0.033sec).
- Fig. 3-7. Distribution of mean horizontal distance of falling blocks with Reynolds number.
- Fig. 3-8. Distribution of mean horizontal distance of falling blocks with Re^{-1} .
- Fig. 3-9. Distribution of mean horizontal distance of falling blocks with Re^{-1} .
- Fig. 3-10. Distribution of mean horizontal distance of falling blocks with Re .
- Fig. 3-11. Photo of flow around the artificial upwelling structures.
- Fig. 3-12. Variation of current field by the artificial upwellig structures.
- Fig. 3-13. Distribution of mean velocity gradient around the artificial upwelling structures.
- Fig. 3-14. Variation of mean velocity gradient with the height of structures.
- Fig. 3-15. Experimental condition of void ratio (a) 0, (b) 0.43, (c) 0.58.

Fig. 3-16. Variation of current field by void ratio.

Fig. 3-17. Distribution of mean velocity gradient by void ratio.

Fig. 3-18. Variation of mean velocity gradient by void ratio.

Fig. 4-1. Definition of coordinate.

Fig. 4-2. Classification of grid system.

Fig. 4-3. Horizontal grid system of computation area.

Fig. 4-4. Variation of velocity at the verification point.

Fig. 4-5. Variation of current field.

Fig. 4-6. Grid system of typical sections.

Fig. 4-7. Variation of velocity gradient at the each section.

Fig. 4-8. Variation of current by height of the structures ($S=2.98$).

Fig. 4-9. Variation of velocity gradient at the each section.

Fig. 4-10. Variation of current by height of structures ($S=3.67$).

Fig. 4-11. Variation of velocity gradient at the each section.

Fig. 4-12. Variation of current by height of structures ($S=4.76$).

Fig. 4-13. Variation of velocity gradient at the each section.

Fig. 4-14. Variation of slip stream length by height of the structures.

List of Tables

Table 3-1. Experimental conditions

Table 3-2. The mean horizontal distance and mean falling speed

Table 3-3. Structural condition of void ratio

List of Symbols

V_0	:	Current velocity
B	:	Width of armour unit
h_s	:	Height of armour unit
h	:	Depth
w_B	:	Weight of block
V_{mean}	:	Mean velocity
$V_{v- mean}$	:	Vertical mean velocity
$V_{f- mean}$	:	Horizontal mean velocity
ρ_w	:	Density of seawater
g	:	Gravitational acceleration
h	:	Water depth at toe of the structure
e	:	Void ratio
μ	:	Dynamic viscosity of water in vicinity
β_B	:	Bottom slope seaward of the structure

A Study on Optimum Section of Artificial Upwelling Structures

Yong-Ho Jeon

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

Abstract

A series of study was carried out to get the basic guideline considering hydraulic characteristic of the upwelling of optimal section design of rubble mound artificial upwelling structures, and the correct section guideline of the structures was suggested use the experimental results for falling and section formation mechanism of the blocks. In the study, the upwelling efficient rate was adopted as the velocity gradient of vertical to horizontal to evaluate the upwelling function of the structures. And the variation rate was checked with the series of hydraulic and numerical experiments considering change of structural characteristic and current field. The section formation mechanism to made the guideline has investigation used the falling velocity, distance and deposition under the current and block conditions. The mechanism results obtained as follows:

- 1) The falling velocity of block decrease with increase of the current velocity, and the block size affects more significantly.
- 2) The mean horizontal falling distance deposit made in the flow field was affected mainly the current velocity more than size of blocks.
- 3) The permeability of rubble mound artificial upwelling structures affects also significantly, and under the condition of the void ratio lower than 0.43 the upwelling efficient rate was almost same as like as impermeable one.
- 4) The upwelling rate was affected strangely by the height of structures(h_s/h) and stratification parameters(S). The stable upwelling current occurred when the height of structures was nearly 0.3 and stratification parameters(S) were around 3.0.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

지금까지 해양개발은 해양에 존재하는 에너지와 광물, 수산자원 등을 탐사, 개발, 이용하기 위한 각종 과학기술을 기반으로 이루어져 왔다. 세계 연안국들의 해양자원 정책은 자국의 실리를 위한 해양자원 관리·이용으로 전환되어 200해리 배타적 경제 수역의 적용이 일반화 되어 왔다. 공해상의 자유로운 바다이용을 전제로 한 해양전서 속의 해양산업(수산업) 체계에서 커다란 사고의 전환·변화를 요구 받게 되었다. 이러한 국제적 해양 이용 질서의 변천 속에서 전통적인 해양 산업인 우리의 연근해 수산 자원의 조성과 관리 문제에 대한 중요성이 더욱 강조 되고 있다.

70년대 초부터 우리나라에서는 연안역 수산자원의 관리를 위해 인공어초 어장의 조성과 인공적 종묘생산 및 방류를 통한 수산자원의 증강에 노력해 왔다. 인공어장 조성을 위한 다각적인 노력이 시도 되었다. 해양환경을 적극적으로 제어하여 적정 생태 환경을 조성하기 위한 다양한 수산 증식시설의 개발 및 배치에 관한 논의가 이론적으로, 실험적으로 활발하게 이루어지고 있다. 연안생태계 제어·조성을 통한 어장 환경 창조, 수산생물자원의 증식을 위한 착지식 및 부유식 인공어초, 해조초, 도류제 인공 용승구조물, 지질개량구조물 등에 관한 요소기술과 종합적 배치기술을 중심으로 생각하여 왔다(柳 등, 1993). 용승류 이용 기술에 관한 관심은 종래의 어장조성 개념 보다 더욱 광범위한 해역의 생태환경 제어를 전제로 한 어장환경 창조라는 의미로 한층 앞을 볼 수 있다. 용승류 발생구조물은 영양염이 풍부한 저층수를 유광층까지 용승시킴으로써 식물플랑크톤의 증식을 유발하여 빈영양 해역에 양질의 어장 생태환경을 형성하게 한다는 말상이다.

세계 해양면적의 0.1%를 차지하는 용승해역은 전체 어류생산량의 40%에 달하는 생산능력을 가지고 있으며, 이는 저층의 풍부한 영양염류를 표층으로 이동시켜 용승류에 동승한 식물플랑크톤의 부상에 따른 기초생산력의 증대로 인해 좋은 어장이 형성되고 있다(Ryther, 1969). 연안의 용승해역은 해조류, 새우류, 패류 등의 생산량이 3배, 우뚝가사리의 생산력은 10배에 이른다(續辰·中尾, 1986).

어장조성 효과가 탁월한 용승해역을 인공적으로 조성하는 노력은 Fig. 1과 같은 선행 연구자들의 조직적 연구에 의해 진행되어 왔다. 이들 연구에서는 어떤 구조형식을 통해 인공용승의 기능을 극대화 할 것인가? 어떻게 심해저에 정확히 시공할 것인가?가 중요한 과제로 다루어지면서 이에 대한 기술적 문제의 해결과 현장적용실험과정이 주된 것이었다.

그러나 이 용승류제어구조물의 설계 및 시공에 있어서는 아직도 그 기본적인 수리특성을 해석·평가 할 수 있는 도구가 정립되지 못하고 있다. 특히 사석식 구조 형식에 의한 인공용승류제어구조물의 최적단면설계 및 그 시공의 정확성을 위한 기초연구 및 지점의 필요성이 강조되어 왔다.

본 연구에서는 먼저 사석식 인공용승구조물을 대상으로 하여 현장조건을 고려한 용승기능 최적화 및 구조물 최적단면 설계를 위한 용승관련 수리특성을 해석·정리하고, 구조물의 최적단면설계에 관한 기본지점을 마련한다. 그리고 설계된 최적단면의 정확한 시공을 위한 사석 투하 지점을 마련 할 수 있는 투하사석의 거동 및 퇴적특성을 규명하고자 한다.

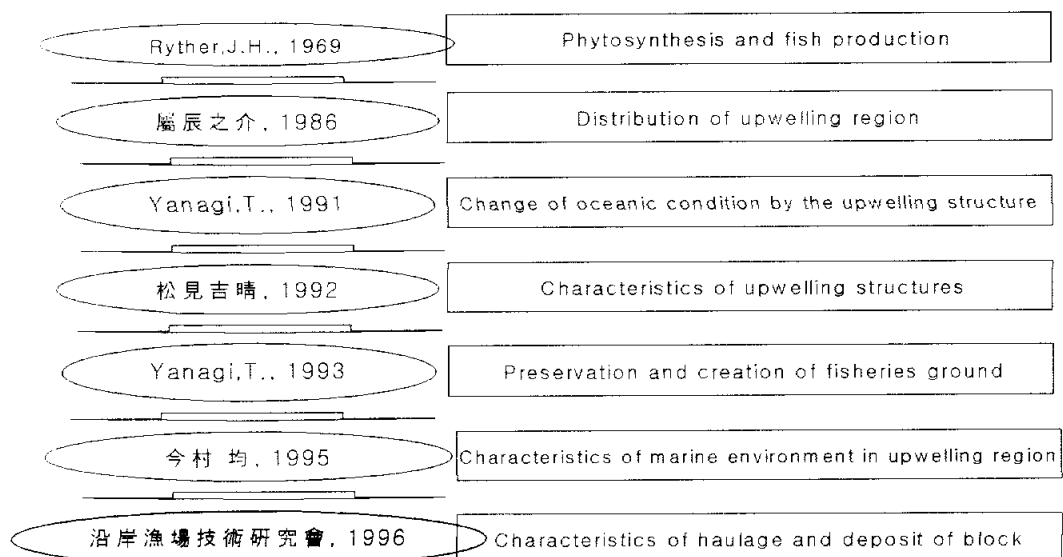


Fig. 1-1. History of study.

1.2 연구 내용 및 방법

전술한 연구목적을 달성하기 위하여 수리모형 실험을 중심으로 한 기본 수리특성의 현상 파악과 선행 연구와 수치실험에 의한 검증 및 보충과정을 거쳐 진행한다. 그 단계적 연구·검토 내용은 다음과 같다.

- (1) 블록의 침강속도 해석
- (2) 블록의 거동 및 퇴적형상의 해석
- (3) 사석식 용승구조물의 투수층 효과를 고려한 용승류 특성 해석
- (4) 용승유량의 발생특성에 따른 용승구조물의 최적단면 검토
- (5) 수치 실험을 통한 기초적 수리특성의 검증 및 보충
- (6) 수리특성을 고려한 최적단면 설계 및 사석 투하 지점의 정리

이들 연구 내용을 조합하여 그 흐름을 보식적으로 나타내면 Fig. 1-2와 같다.

각 연구단계별로 적용한 연구방법은 수리실험과 수치실험에 의한 검증·보충과정을 거쳐 진행하였으며 상세한 것은 관련 각장에서 논의하기로 한다.

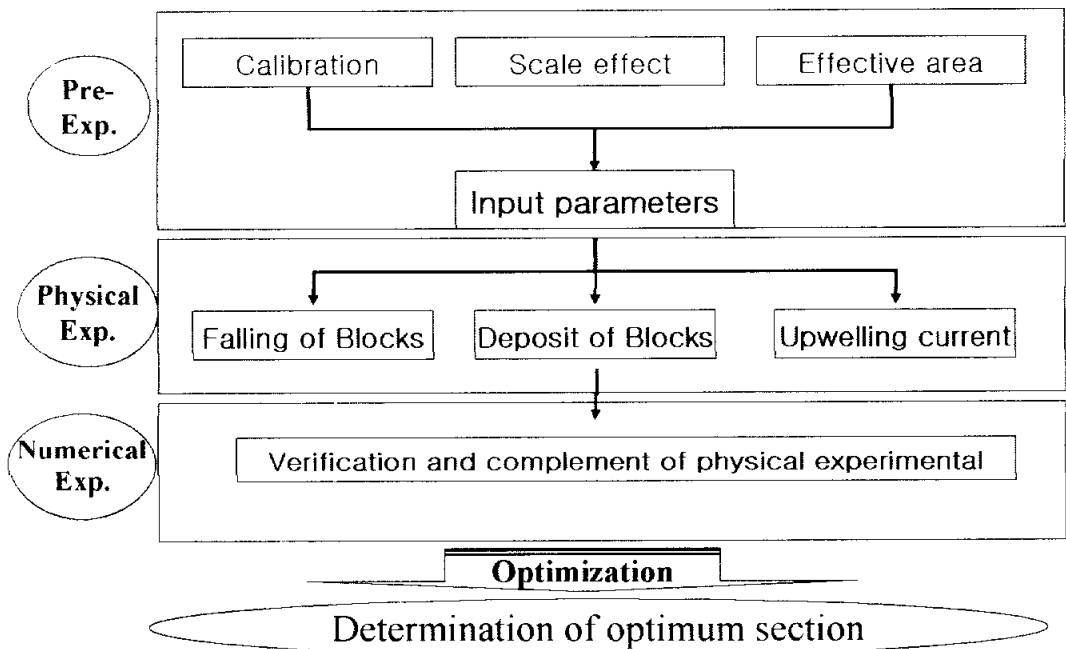


Fig. 1-2. Schematic flow of study.

2. 인공용승구조물에 관한 기초적 논의

2.1 인공용승구조물

일반적으로 용승(upwelling)이란 해저 저층수가 표층으로 솟아오르는 현상을 말하는 것으로 이는 표층에서 대기 및 해류 등의 외력조건에 의해 해수의 이동이 있을 때 표면에서 없어진 물을 보충하기 위하여 연직 상방으로의 흐름이 발생하는 것을 나타낸다. 용승 현상은 영양염류를 다량으로 포함하는 저층수가 표층수로 부상하게 됨에 따라 주변해역의 식물플랑크톤 등과 같은 수산자원에 영양소를 운반하는 역할을 담당하게 된다. 용승지역은 수산생물이 풍부하게 서식하는 지역으로 캘리포니아 연안, 페루연안, 적도 용승지대를 예로 들 수 있다. 앞 절에서 Ryther(1969)는 해양에서 용승류해역의 면적은 0.1% 밖에 되지 않지만, 어류생산량은 전 해양의 40%에 달한다고 보고하였다. 이와 같이 용승류해역의 어류생산성이 높은 이유로써는 영양염이 풍부한 저층수가 용승에 의해 유광층에 까지 운반되어 식물플랑크톤이 대량 발생하여 해양 기초 생산력이 향상되어서 먹이사슬에 의해 어류의 군집을 유도하기 때문이다. 또한, 용승류해역은 다른 해역과 비교해서 해조류, 새우류, 폐류 등의 생산량이 약 3배, 우뚝가사리의 생산력은 약 10배에 달한다고 보고되어 있다.(續辰·中尾, 1986)

최근에는 인위적으로 해양구조물을 설치함으로써 용승류를 발생시켜, 연안역의 기초 생산력을 증대시켜 좋은 어장을 조성하려는 새로운 개념이 대두되고 있다. 기존 연구사례를 살펴보면, 일본 豊後水道 宇和海에서 인공용승류발생구조물(가로 45m, 세로 10m) 설치 시 조류유속 2할 증가, 표층의 클로로필 a 농도 2~3배 증가, 동물플랑크톤의 개체수 및 집전량도 2배 증가하였으며, 저서생물의 경우 구조물설치 후 2년간은 감소하였으며 3년 이후에는 종·개체수도 증가하였던 것으로 보고되었다.(Yanagi and Nakajima, 1991).

또한 이러한 인공용승류 발생구조물은 어조의 구조, 크기, 배치형태 및 시설규모 등의 요인에 따라 어조의 역할도 하여 정어리, 전갱이, 고등어 및 말쥐치 등 어업생산과 직결되는 역할 이외에 비성어 보호 육성 및 자원 배양 기능과 어군을 유도하는 기능

도 할 수 있을 것이라 제안된 바 있다.

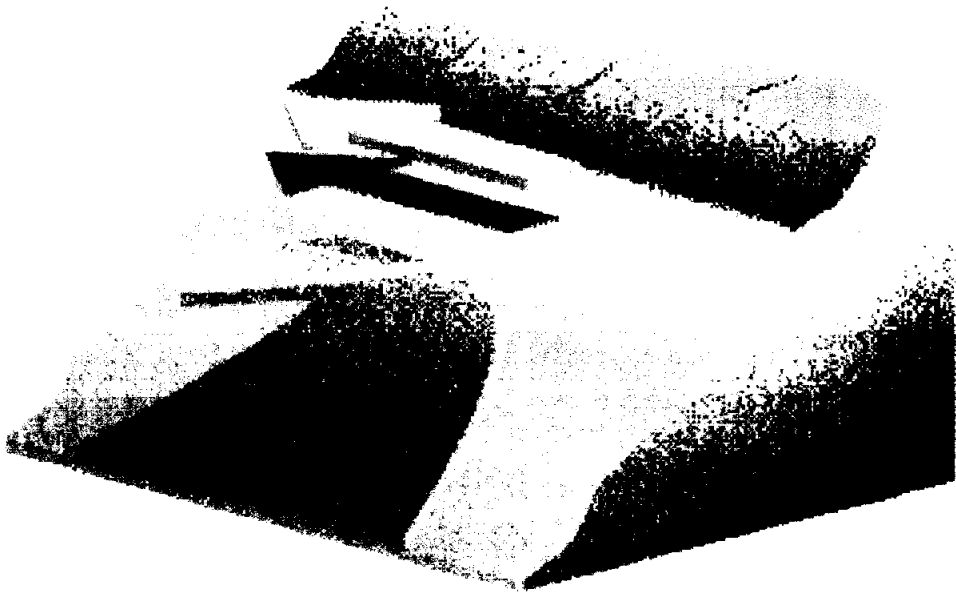


Fig. 2-1. Schematic of upwelling.

2.2 인공용승구조물의 수리학적 특성

용승구조물의 주된 기능 및 목적은 저층 영양염류를 표층으로 이동시켜 어업생산성의 향상 및 생태계 활동을 촉진시키는 것이다. 이러한 인공용승의 문제는 해양의 성층상태와도 결부되는 현상이며 일반적으로 성층계수라 하여 에너지 방정식으로부터 다음 식 (2-1)과 같이 주어진다.

$$\log\left(\frac{h}{V^3}\right) \quad (2-1)$$

성층계수(stratification parameter)는 연직수심에 대한 수평유속 3승의 비이다. 이는 수조내의 수직혼합성분을 에너지 평형으로부터 유도한 것으로 주로 조석전선의 위치를 파악하고자 할 때 사용된다. 기존 연구결과에 따르면 해역에 따라 다르지만 일반적으로 성층계수가 2.5~3.0의 범위인 지역에 인공용승구조물의 설치하였을 때 용승효과가 높다고 보고 된 바 있다(Yanagi & Okada, 1993). 이는 유속이 강할 경우에는 성층의 형성에 어려움이 있고, 유속이 약할 경우에는 성층의 형성 자체가 이루어지기 어렵기 때문이다.

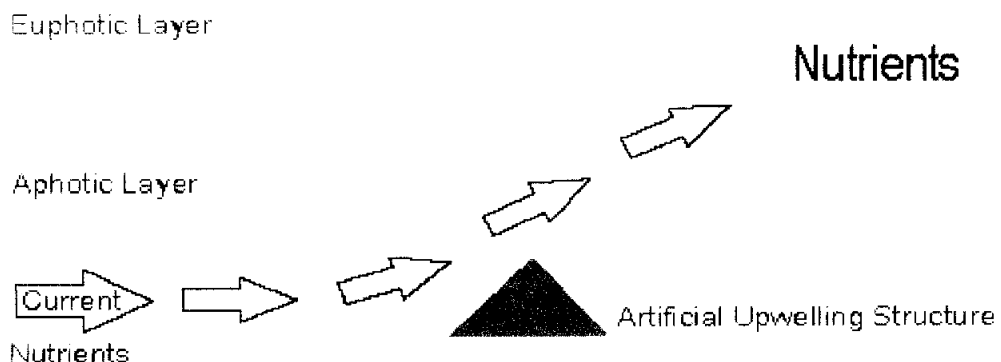


Fig. 2-2. Conception of Artificial upwelling structures.

3. 인공용승구조물의 최적단면에 관한 수리실험

3.1 차원해석과 상사법칙

수리실험에서 차원해석은 실험에서 논의하고자 하는 물리량 등의 상호관계를 무차원화하여 비교하고, 변수간의 상호관계를 예측하기 위해서 사용된다. 현상 및 환경에 대한 물리적인 관계는 물리량들의 차원해석을 통한 상사법칙을 만족하는 검증이 필수적이다. 따라서 본 연구는 현장조건을 고려한 용승기능 최적화 및 구조물 최적단면 설계를 위한 용승관련 수리특성의 해석을 위한 실험으로서, 실험의 영향인자를 검토하면 식(3-1)과 같다.

$$\begin{aligned} F[x] = & f_1[V_0] \\ & + f_2[h_s, h, \theta, w_B, l_B, e] \\ & + f_3[\alpha, l_f, \overline{V_h}, \overline{V_v}] \\ & + f_4[g, \rho_w, \mu, e \cdots] = 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

이 식에서 f_1 은 작용외력에 관한 물리량, f_2 는 구조물의 특성에 관한 물리량, f_3 은 수리현상에 관한 물리량 그리고 f_4 는 기타 제반 실험상의 물리량을 나타내며, F 는 기능성 함수, V_0 는 작용유속이다. 일반적으로 용승구조물의 설치 수심은 50 m이상의 대수심이므로, 파랑의 영향이 해류, 조류와 같은 흐름의 영향보다 상대적으로 작다. 따라서 본 실험에서는 파랑 입사에 따른 영향은 무시하고 성층유속에 대한 조건만을 고려하였다.

또한, 본 연구에서는 대상구조물이 중력에 의한 블록의 설치 및 콘크리트 구조물임을 고려할 때 점성항의 영향보다 관성항의 영향이 지배적이므로 Froude 상사법칙을 적용하고, 버킹검 π 정리에 따라 차원해석을 하고자 한다. 본 실험에서 고려하는 물리적인 변수들은 다음과 같다.

$$f[B, h_s, h, \theta, w_B, l_b, V_{mean}, g, \rho_w, \mu, e] = 0 \quad (3-2)$$

① 작용외력에 대한 변수

V_0 : 작용유속(current velocity)

② 구조물의 기하학적 특성에 관한 변수

B : 제체의 폭(width of core unit)

h_s : 구조물 높이(height of core unit)

h : 수심(depth)

θ : 사면경사(seaside slope angle measured from the horizontal)

w_B : 블록의 무게(weight of block)

③ 수리현상에 대한 변수

α : 블록의 수면임사각

$\bar{V}$: 지점 평균유속(mean velocity)

$\bar{V}_v$: 수직 지점평균유속(vertical mean velocity)

$\bar{V}_f$: 수평 지점평균유속(horizontal mean velocity)

V_{f-r} : 블록의 낙하 속도

l_f : 블록의 이동거리

l_{f-max} : 부하블록의 최대 이격

4) 기타 물리적인 성질 및 외력환경을 표현하는 변수

ρ_w : 물의 밀도(density seawater)

g : 중력가속도(gravitation acceleration)

e : 공극률(void ration)

μ : 동점성계수(dynamic viscosity of water in vicinity of breakwater)

β_B : 해저면 경사(bottom slope seaward of the structure)

차원해석시 반복변수는 길이의 물리량을 내포한 폭(B)와 지면 수립자 속도 ($\overline{V}$), 밀도(ρ_w)를 사용하였고, 종속변수의 지수는 1로 하였다.

$$f[B, h_s, h, \theta, w_B, l_h, \overline{V}, g, \rho_w, \mu, e] = 0 \quad (3-3)$$

$$f\left[\frac{h_s}{B}, \theta, \frac{w_B}{B^3 \rho}, \frac{Bg}{\overline{V}^2}, \frac{\mu}{B \overline{V} \rho}, e, \right] = 0 \quad (3-4)$$

위 항들을 다시 쓰면

$$f\left[\frac{h_s}{B}, \theta, \frac{w_B}{B^3 \rho}, \frac{1}{Fr}, \frac{1}{Re}, e, \right] = 0 \quad (3-5)$$

각 무차원량들은 관성력에 지배적이므로 Froude 상사법칙을 만족한다.

$$\left[\frac{h_s}{B}\right]_M = \left[\frac{h_s}{B}\right]_P$$

$$[\frac{h}{B}]_M = [\frac{h}{B}]_P$$

$$[\alpha]_M = [\alpha]_P$$

$$[\frac{l_B}{B}]_M = [\frac{l_B}{B}]_P$$

$$[\frac{w_B}{B^3 \rho}]_M = [\frac{w_B}{B^3 \rho}]_P$$

$$[\frac{l_f}{B}]_M = [\frac{l_f}{B}]_P$$

$$[\theta]_M = [\theta]_P \quad (3-6)$$

$$[\frac{w_B}{B^3 \rho}]_M = [\frac{w_B}{B^3 \rho}]_P$$

$$[\frac{Bg}{V^2}]_M = [\frac{Bg}{V^2}]_P$$

$$[\frac{\mu}{B V \rho}]_M = [\frac{\mu}{B V \rho}]_P$$

$$[e]_M = [e]_P$$

본 연구에서는 다음의 무차원 변수를 통해 기능성을 검토하고자 하며, 각 무차원 변수는 수리학적 상사를 만족한다.

$$\tan \theta_i = \Phi_1 \{ \frac{h_s}{B}, \frac{l_{f-a}}{h}, \frac{V_{f-v}^2}{g} h \} = 0 \quad (3-7)$$

$$\frac{l_f}{B} = \Phi_2 \{ \frac{\tan \theta_i h_s}{B}, \frac{V_{mean}^2}{g} B \} = 0 \quad (3-8)$$

$$\frac{\overline{V_r}}{\overline{V_f}} = \Phi_3 [\tan \theta, \frac{h-h_s}{h}, \frac{\overline{V_p}}{\overline{V_f}} \log(hg \overline{V_p}) - \log(\overline{V_p}), \frac{\overline{V_p^2}}{g} B] \quad (3-9)$$

3.2 실험 조건 및 방법

3.2.1 예비실험

본 연구에서는 인공용승구조물을 우리나라 연안에 설치·적용하기 위해서 앞 절에서 언급한 조식전선이나 성층계수의 특성을 고려하여 동·남해안을 대상으로 실험조건을 구성하였다.

우리나라 동·남해안의 경우 최강 창·낙조류의 유속이 0.9~2.6 kn 범위이지만, 본 연구에서 대상으로 하는 유속은 1 kn로 제한하여 실험조건을 구성하였는데, 이는 용승류 발생의 최소 유속인 20 cm/sec도 충분히 만족하는 값이다.

일반적으로 수리실험은 여러 가지 계측장비 및 물리적인 파라메타를 대상으로 예비 실험 및 본 실험을 수행하게 된다. 본 연구에서는 계측기기에 대한 보정, 재료 및 모형의 축적효과를 검토하기 위한 예비실험을 수행하였다. 아울러 실험결과와 신뢰성을 높이기 위해 적절한 실험유효영역 선정과 파랑장 축적효과에 대한 실험에 중점을 두었다.

먼저 실험 유효영역 산정을 위한 예비 실험은 현지 유속의 연직분포와 유사한 조건을 실험수조 내에서 확인하는 것으로, 성층 및 실험유량을 측정하여 현장조건과 비교·검토 후 가장 유사한 지점을 선별하였다. 실험방법은 Fig. 3-1에서 보듯이 수조내 y방향 3지점 20 cm간격, x방향 40 지점 50 cm간격 그리고 z방향 7지점 10 cm간격에서 도플러 유속계를 이용하여 유속을 계측하였다.

각 지점유속의 계측결과를 통해 실험의 유효영역을 수조와 좌측 끝단으로부터 15 m 지점의 정수면을 실험원점으로 결정하였다.

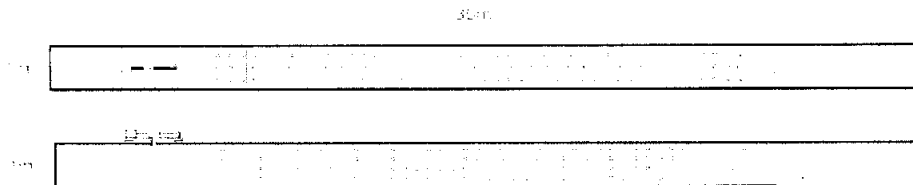


Fig. 3-1. Measuring point(pre-experiments).

3.2.2 실험조건 및 방법

본 실험에서 작용유속은 흐름이 없는 상태와 대상해역유속의 모형치인 6cm/sec에 대하여 실험을 수행하였으며, 축적효과의 검증을 위해 16.7:1, 25.0:1의 모형 축적에 대해서 추가실험을 실시하였다. 이상의 실험조건 및 방법은 Table 3-1에 나타나있다.

Table 3-1. Experimental conditions

Titles	Size of blocks (cm)	Depth (cm)	height of Structures (cm)	Current speed (cm/sec)	Stratification parameters (log h/V ³)	Number of blocks
Falling modes test	0.8	80	×	0	0	500
	2			2.4	2.98	500
	3			5.5	3.67	500
				9.5	4.76	500
Deposit test	0.8	80	×	0	0	2000
	2			2.4	2.98	500
	3			5.5	3.67	1000
				9.5	4.76	1000
Upwelling test	0.8	80	10	2.4	2.98	
			20	5.5	3.67	
			25	9.5	4.76	

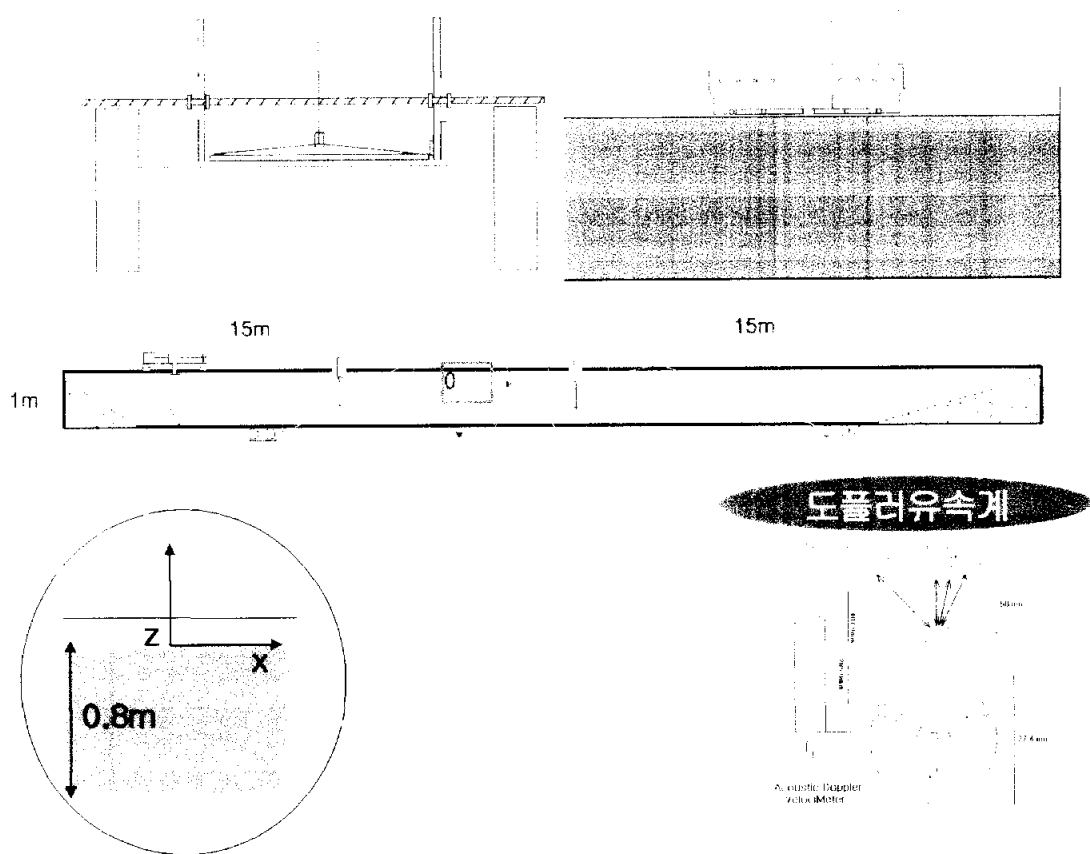


Fig. 3-2. Experimental setup.

본 실험에서 사용된 조파수조는 부경대학교 내 해양수리실험소에 설치된 해류수조로, 본 수조는 불규칙파랑의 조파장치와도 연동이 가능하며, 수조의 크기는 1m(폭)×1m(길이)×35m(길이)로 회류장치에 의한 흐름제어가 가능하다. 축적은 2차원 회류수조의 규모를 고려하여 62.5:1 축적을 사용하였다.

실험에서 사용된 계측기는 도플러 유속계(Acoustic Doppler Velocimeter), 2차원 조파시스템(Two-dimensional Wave generating System)이다. 유속 측정을 위해서 조음파 도플러 유속계 2set를 사용하였으며, 모델명은 ADV lab (NORTEK)이며 측정유속 범위는 ± 2500 mm/s, 조음파 주파수는 10 MHz, 샘플링 불량은 0.25 cm 이하이다.

3.3 블록의 투하특성

인공용 승구조물은 설치수심이 깊고, 블록의 투하에 따른 직재 제방 형태임을 고려할 때 구조물의 안정성은 블록의 기동을 중심으로 검토되어야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 블록의 기동을 투하특성과 퇴적특성으로 나누고 이에 대한 수리학적 특성에 대해서 고찰하고자 하였다.

일반적으로 모형실험은 원형에 가까운 대축직일 때 재현성이 뛰어나므로 수조의 규모를 고려하여 62.5 : 1로 결정하였으며 축척효과를 검토하기 위해 블록의 크기를 한 변의 크기가 8 mm, 20 mm, 30 mm 인 정육면체의 블록을 제작실험하였다.

대수심의 해저에 구조물을 설치하는 방법은 여러 가지 방법이 있겠으나 마지선 혹은 토운선에 의한 투하를 기본적인 직재 방법으로 결정하고 이에 따른 블록의 투하특성을 살펴보기 위해 대상 원형의 한 변이 50cm인 정육면체의 성형블록을 모델화하여 수리실험을 행하였다. 본 실험의 수리모형기준은 1999년 일본 연안이 창조기술개발연구회에서 연구된 바 있는 블록투하수치실험 결과를 검토한 후 현지에 더욱 적절한 범위를 대상으로 구성하였다.

유속이 작용하지 않는 경우 블록을 투하하였을 때 유속이 작용하지 않은 경우 초기 수면임사각에 대한 블록의 투하궤적 및 침강속도를 검토하면, 구조물의 설치 위치를 정확히 예측할 수 있다. 그러나 작용유속이 증가하는 경우에는 초기임사각의 효과보다는 작용유속에 의해 블록에 가해지는 항력이 더욱 크게 작용할 것이다. 따라서 본 연구에서는 현지의 적용성을 고려하여 상대적으로 강한 유속작용이 있을 경우를 대상으로 실험을 구성하였으며, 초기 임사각의 조건을 통일하기 위해 시 투하장치를 설치하여 초기 임사조건을 동일하게 하였다.

또한, 블록의 초기 임사각을 확보하고 블록투하의 초기영향을 일정하게 하기 위해 수면에서 5 mm 상부에 블록투하장치를 설치하여 실험 중의 실험자의 영향으로 인한 효과를 최소화하도록 했다.

실험은 블록을 각각 500개씩 투하하여 수면의 임사 후 저면에 도달하는 장면을 디지털비디오카메라(SONY VX2000)를 이용하여 초당 30프레임으로 촬영하여 각 프레임으로 분할 한 후 수면임사 시 장면을 화상해석하여 초기임사각을 얻었다. 또한 투하궤적은 0.3초(10 프레임) 간격으로 화상캡처를 통하여 침강속도를 관측하였다.

표 3-2는 각 블록의 크기와 작용유속에 대한 평균 수평변위와 평균침강속도를 나타낸다. 침강속도는 작용유속에 비례함을 알 수 있으나, 블록의 크기에 더욱 영향을 받을 수 있다. 수평변위는 초기 입사각의 효과 보다는 유속과 유향에 더욱 큰 영향을 받는다.

Table 3-2. The mean horizontal distance and mean falling speed

Size of blocks (cm)	Stratification parameters (log h/V^3)	Mean horizontal distance (cm)	Mean falling velocity (cm/sec)
0.8	0	-0.02	13.662
0.8	3.67	0.10	14.468
0.8	2.98	0.29	15.000
2	3.67	0.09	18.285
2	2.98	0.22	20.994
3	0	0.04	26.185

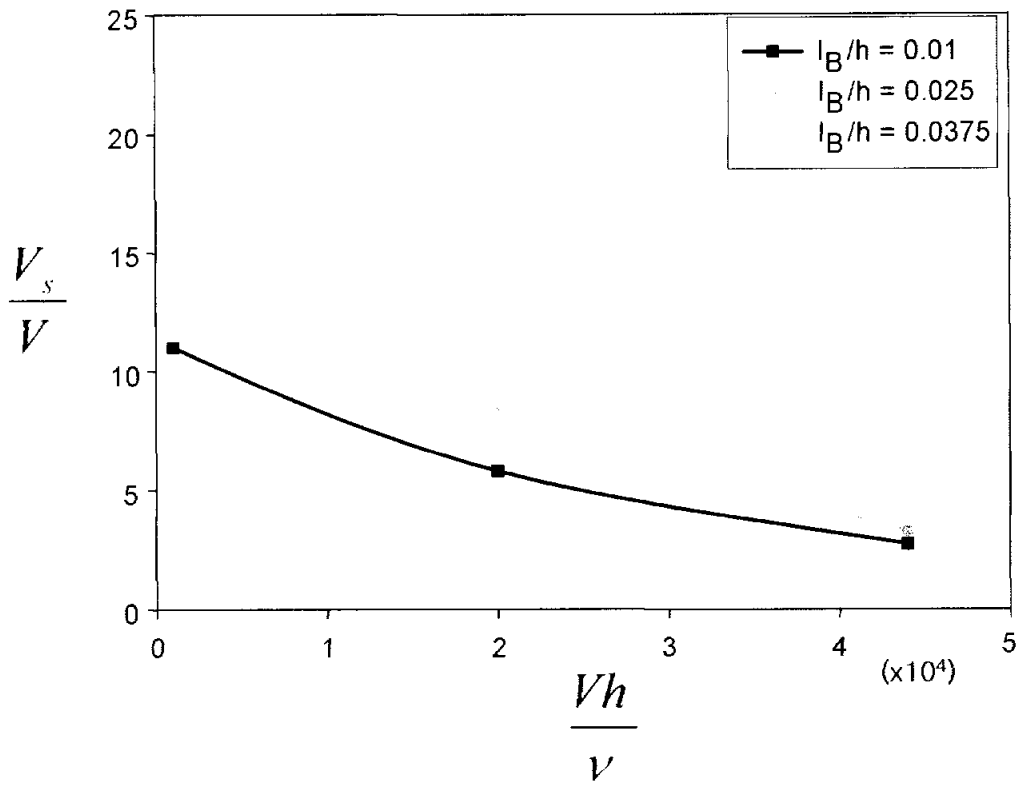


Fig. 3-3. Variation of mean falling velocity with block's sizes.

무차원 유속(vh/ν)이 커지면 블록의 상대낙하속도(v_s/v)가 작아지며, 무차원 유속이 거점에 따라 일정한 점강속도로 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 블록의 크기가 클수록 유속에 대한 영향이 큰데 이는 블록의 투하지점의 유속에 대하여 블록의 크기를 결정해야 한다는 것을 보여주고 있다.

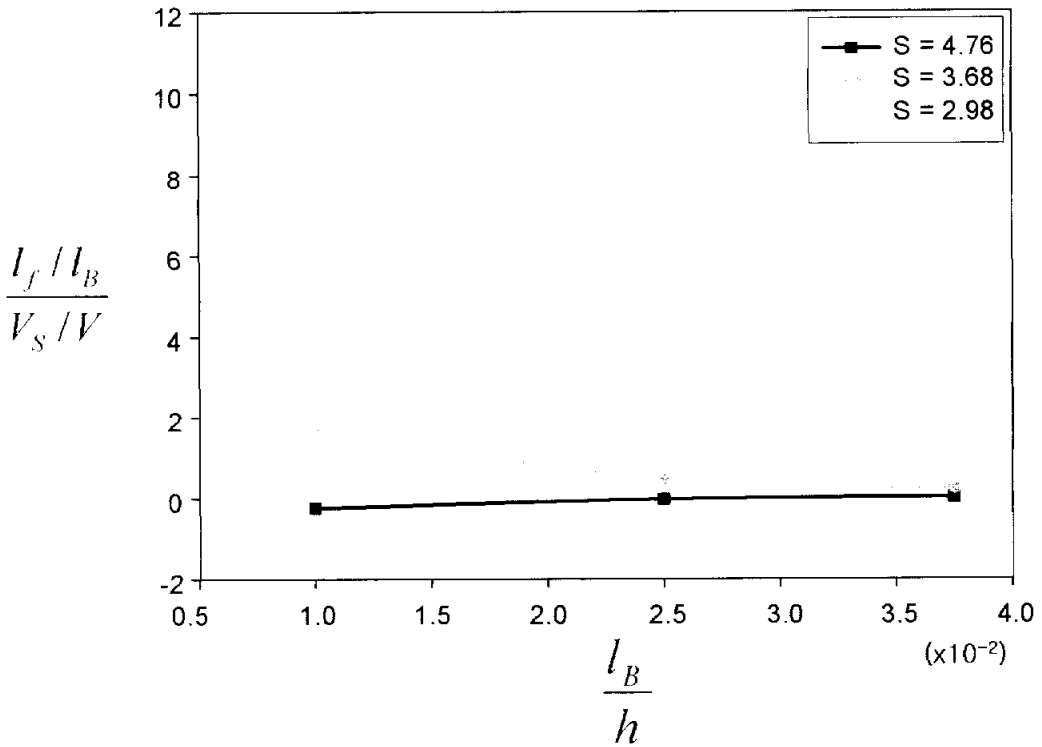


Fig. 3-4. Variation of mean horizontal distance with block's sizes according to stratification parameters.

상대 블럭 크기(l_B/h)가 커지면 블럭의 작지거리($\frac{l_f/l_B}{v_s/v}$)는 0에 가까워지며, 유속이 커지면(S가 작아지면) 충분히 깊은 수심($l_B/h \leq 1$)에서 작지거리가 급속히 증대되는 현상을 볼 수 있다. S가 4.76의 경우는 거의 변화가 없는 특징을 볼 수 있다. 이러한 특성으로부터 $S \geq 4.5$ 인 정류시에($v \leq 2.5 m/s$)에 가까운 시간대를 이용하여 이동거리에 의한 블럭의 경우 분산효과를 극소화 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 현지특정상 흐름이 강한 조건에서 시공해야 할 경우는 S의 크기에 따른 분산특성을 고려함을 잘 보여주고 있다.

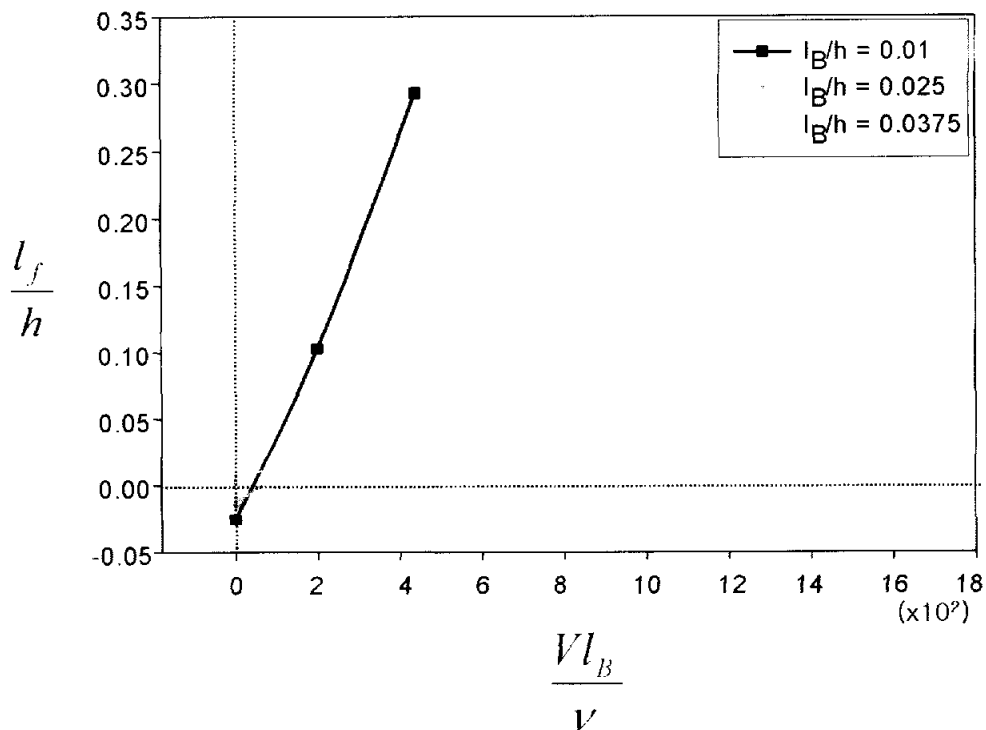
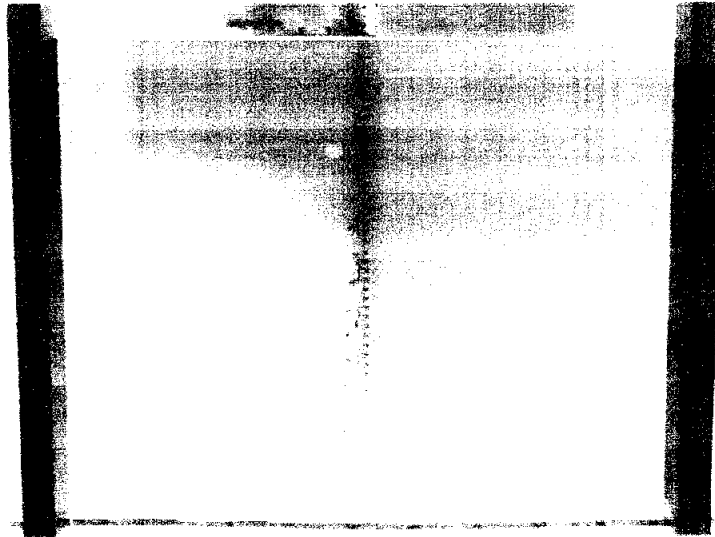
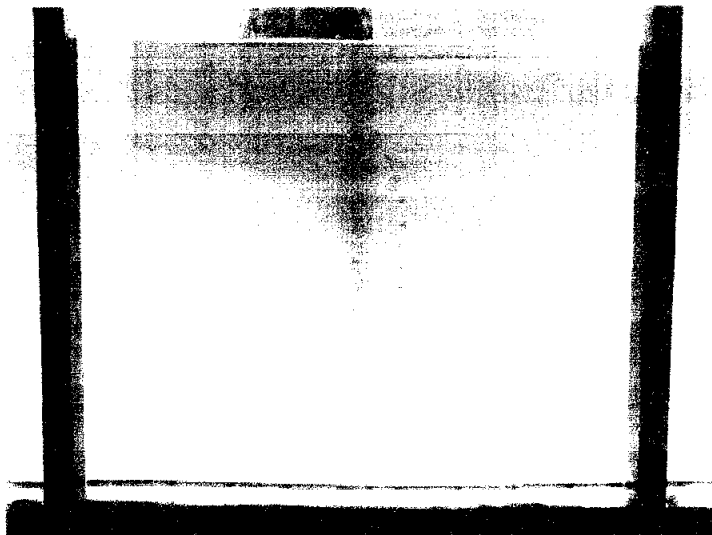


Fig. 3-5. Variation of mean horizontal distance with block's sizes.

Fig. 3-3의 경우는 블록의 크기에 따른 평균 수평변위를 나타내는데 이는 유속이 없을 경우 초기임사특성에 영향을 받는 것을 알 수 있지만 유속이 증가함에 따라 유속에 의한 평균 수평변위가 더욱 커짐을 알 수 있다. 블록투하 시 블록의 분산 효과를 최소화하기 위해서는 수심과 작용유속에 의한 블록 크기의 결정이 중요하다는 것을 보여주고 있는데, 유속이 작을수록 수평이동거리의 변화가 작으므로 유속이 작은 정류시 시간대를 이용해야 함을 보여주고 있다. Fig. 3-6은 블록의 투하형상을 검토하기 위해서 0.033초(30프레임) 간격으로 투하형상을 오버랩핑한 그림이다. 그림 a)~c)까지의 경우는 작용하는 유속을 증가한 경우이고 d)~f)의 경우는 블록의 크기를 증가시킨 경우이다. 블록의 크기가 증가함에 따라 작용유속에 의한 영향이 상대적으로 적고, 침강 속도는 증가하고 있음을 알 수 있다.

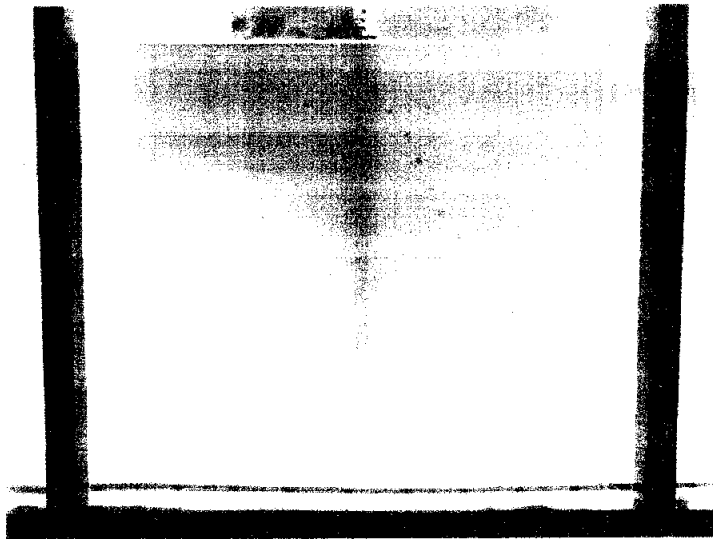


a) $l_b/h=0.01$, $S=0$

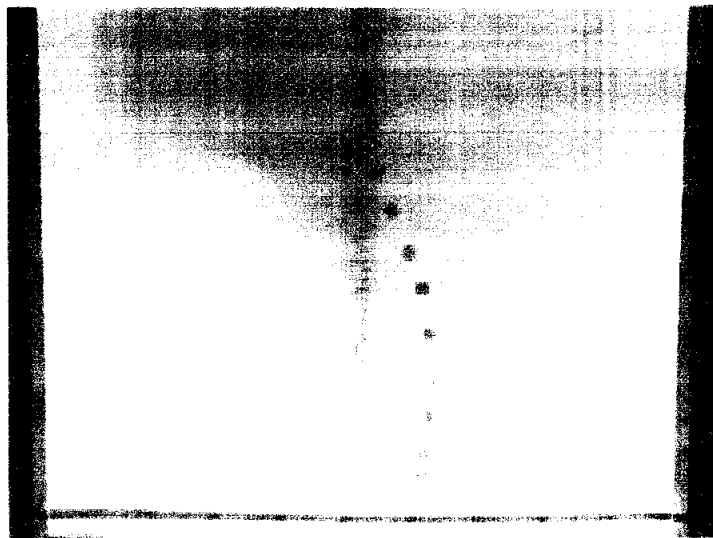


b) $l_b/h=0.01$, $S=3.67$

Fig. 3-6. Photo of falling motion of blocks(interval:0.033sec).

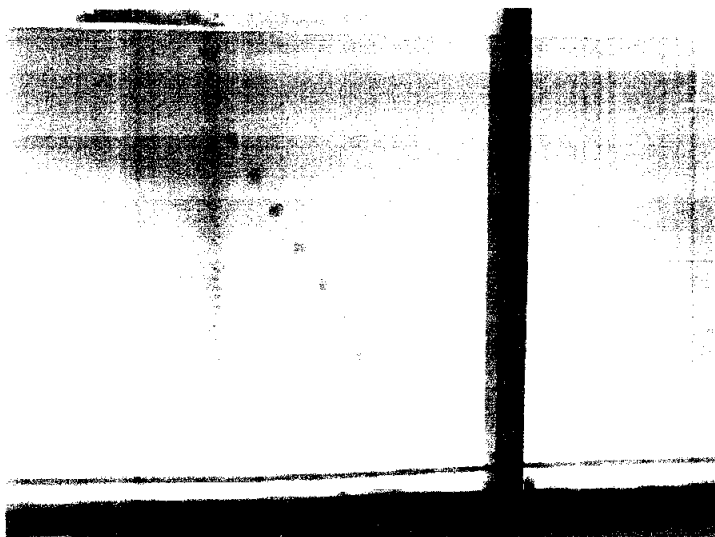


c) $l_B/h=0.01$, $S=2.98$

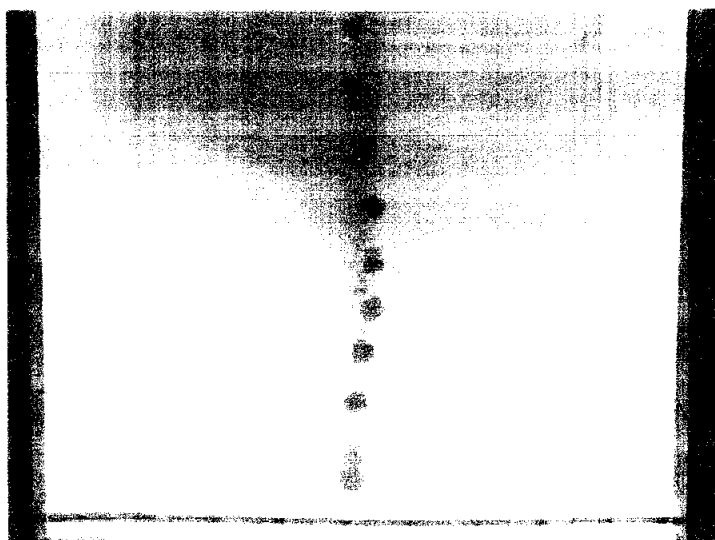


d) $l_B/h=0.0214$, $S=3.67$

Fig. 3-6. Continued.



c) $l_B/h=0.0214$, $S=2.98$



d) $l_B/h=0.0375$, $S=0$

Fig. 3-6. Continued.

3.4 블록의 퇴적특성

작용유속에 따른 퇴적 특성을 살펴보기 위해 작용유속의 범위를 정층계수가 2.5~4.0인 범위를 가지도록 구성하였으며, 동일한 초기 입사각의 조건 하에서 블록의 단면 기동을 관찰하였다. 디지털카메라를 이용하여 블록투하에 따른 구조물의 입사각을 확인하였다.

퇴적위치의 확인을 위해 지면에 격자판을 구성하여 투하위치를 확인하였고, 투하 횟수는 8mm의 경우 500회, 20mm, 30mm의 경우에는 각각 100회씩 실시하였다. 또한 작용유속은 용승유량이 비교적 용이한 정층계수의 범위를 만족하는 유속을 사용하였고, 실험수심은 80cm로 일정하게 유지하였다.

Fig. 3-7과 Fig. 3-9는 정층계수에 대한 투하된 블록의 퇴적위치 분포를 나타내는데 무자원 최적거리를 다르게 해서 표현한 것이다. 정층계수에 따라서 퇴적위치가 반대로 나타나는 것은 작용유속의 표현 때문이다. 정층계수의 감소에 따라 퇴적거리가 증가하며, 즉 작용유속이 커지면 퇴적거리가 증가한다. Fig. 3-8과 Fig. 3-10에서는 블록의 크기에 따른 퇴적거리를 나타내고 있다. 블록의 크기는 유속에 의한 항력의 증가를 가져오는 동시에 자중의 증가로 인한 침강속도의 증가도 동시에 발생하나 본 연구에서는 블록의 비중은 일정한 값으로 가정하였다. 이는 비중이 같을 때 부피의 증가는 무게의 증가를 나타내며 무게의 증가는 길이의 3승으로 증가하게 되어, 블록이 유체로부터 받는 항력의 투영면적은 2승으로 증가하므로 무게의 증가가 더욱 큰 영향을 준다. 이를 통해 블록의 퇴적위치의 문제는 블록의 크기가 가장 중요한 영향을 미침을 알 수 있다.

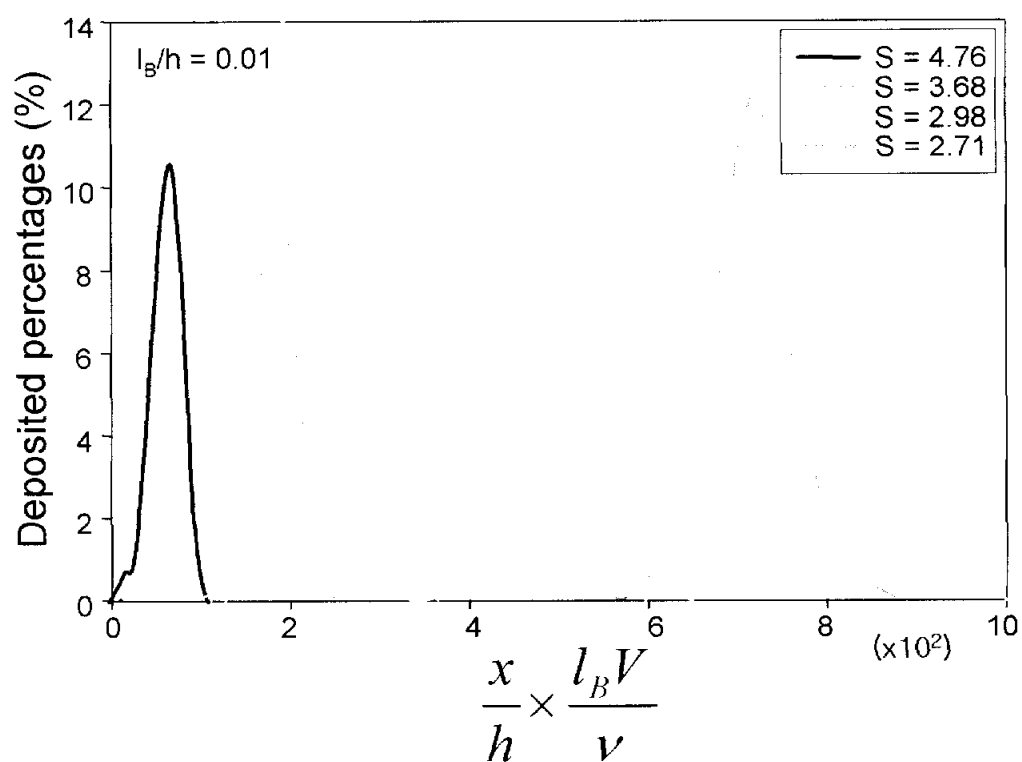


Fig. 3-7. Distribution of mean horizontal distance of fallen blocks with S (Stratification parameter).

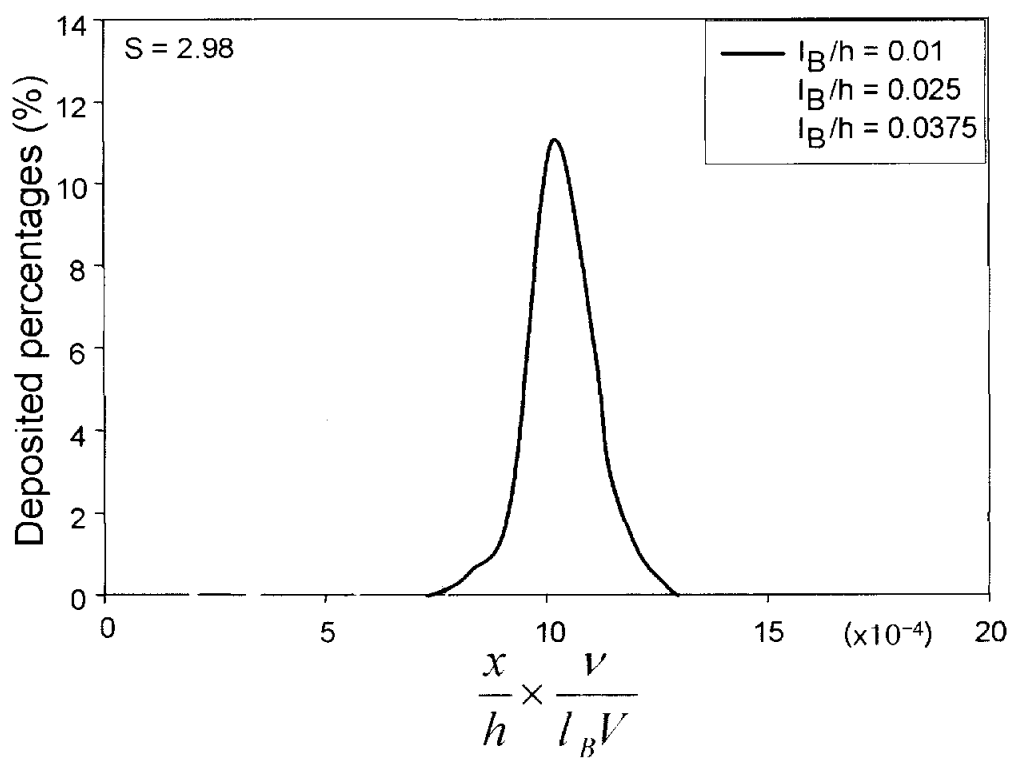


Fig. 3-8. Distribution of mean horizontal distance of fallen blocks with block's size.

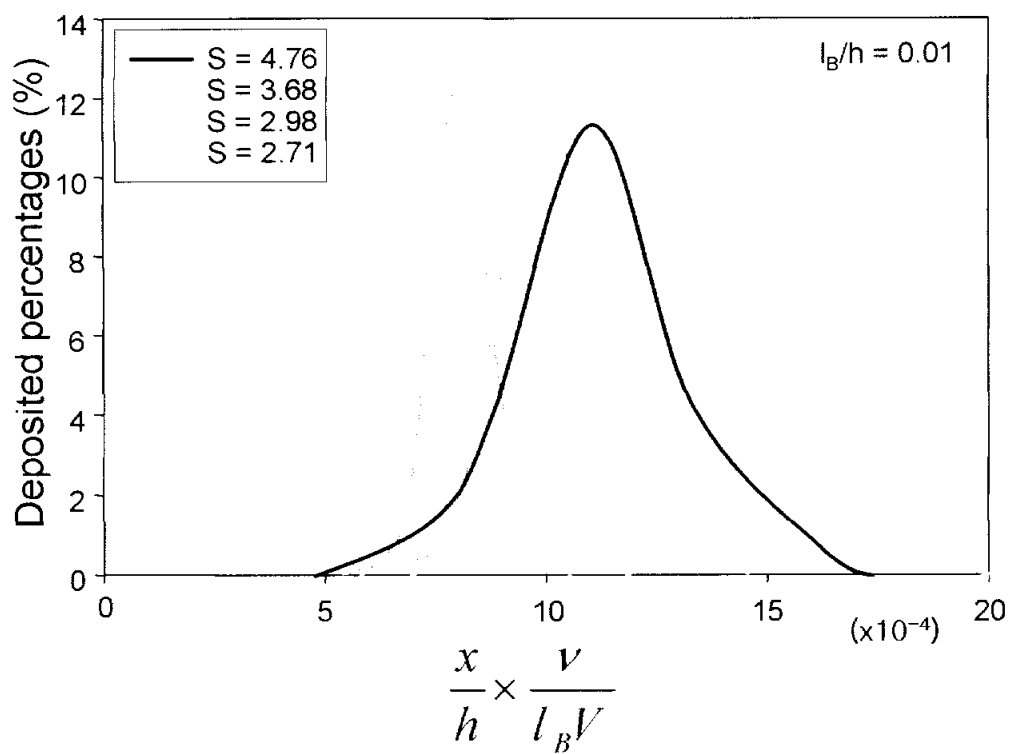


Fig. 3-9. Distribution of mean horizontal distance of fallen blocks with S (Stratification parameter).

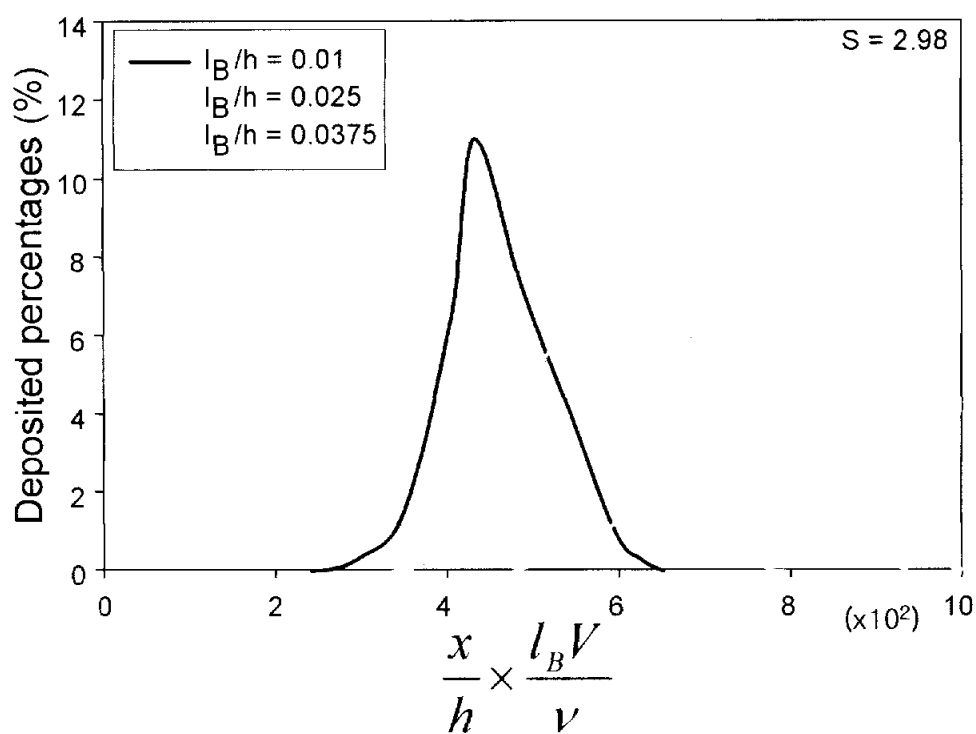


Fig. 3-10. Distribution of mean horizontal distance of fallen blocks with block's size.

3.5 인공용승구조물의 용승유량 해석

3.5.1 구조물의 규모에 따른 해석

인공용승구조물 설치의 주된 목적은 양호한 인공용승유량의 유도이며, 이를 위해 용승유량의 검토 및 예측에 대한 연구는 필수적이다. 본 논문에서는 대표적인 구조물의 단면에 대해 입사유속 조건을 변경하여 상층계수에 따른 용승유량을 검토하고자 한다. 실험조건은 Table 3-2와 같으며, 용승유량 계측 격자 간격은 구조물 주위에서는 $\Delta x/h = 0.125$, 외곽에서는 $\Delta x/h = 0.625$ 으로 구성하였고, 연직계측간격은 $\Delta y/h = 0.125$ 이다.

여기서 수심 h 는 80 cm로 일정하게 유지 하였으며, 유속의 계측은 도플러 유속계를 사용하였다. 정점관측은 관측자료의 통계적 안정을 위해서 20cm의 추줄 간격으로 1024개 이상의 유속 값을 삼축방향으로 계측하였으며, 각 정점에서 산술 평균값을 지점 유속으로 결정하였다. 지점유속의 비를 통하여 구조물 전면에서의 흐름장의 변화와 배후면 후류역에서 계측되어진 수평유속 및 연직유속의 비를 이용하여 평균유속경사를 정의하고 이를 이용하여 각 지점에서의 유향변화를 확인하였다. 용승유량검토를 위한 유향경사는 수평 및 수직 유속의 변화율을 나타내는 식 (3-8)을 사용하여 정의하였다.

$$V_{S \text{ mean}} = \frac{V_{V \text{ mean}}}{V_{H \text{ mean}}} \quad (3-8)$$

정의한 유속경사는 수조 실험특정상 주 흐름 방향인 x방향에 대해 음의 방향유속은 발생되지 않으며, 수조 전체 영역에 대해서 양의 값을 가진다. 따라서 연직 유속성분이 상향방향인 경우 유속경사는 양의 값을 가지며, 하향방향인 경우 음의 값을 가진다.

구조물은 정육면체의 기본 블록을 적재하여 단면을 제작하였고, 각 단면에서 공극률은 일정하게 설정하였다.

실험은 또한 도플러 유속계를 이용한 구조물 주위의 정점관측을 통한 유속 분포 실험과 아울러 유선 및 층류관측을 위한 로다민-B 염료를 희석 투입하여 염료

실험을 수행함으로써 유선 및 층류관측을 통한 용승유량의 시각적, 정량적 평가를 병행하였다.

염료실험은 Fig. 3-11에서 보는 바와 같이 흐름의 저항을 최소화 하는 단면에 염료 투하 장치를 설치하여 구조물 주위의 증발 흐름을 관측하였다. 염료는 로타민-B 용액을 사용하였으며, 염료의 방출 지점은 수심 10cm씩 등간격으로 구성하고, 염료의 확산 화상을 녹화하여 용승유량을 시간적 변화를 검토하였다.

Fig. 3-11의 경우 염료실험을 통해 얻어진 구조물 주위의 흐름을 촬영한 그림으로, 구조물 전면부에서 일정한 유선을 나타내는 염료가 구조물의 상부 및 배후에서 와류와 난류에 의해 혼합되어 가는 과정을 보여준다.

Fig. 3-12은 구조물의 규모와 성증계수의 변화에 따른 구조물 주위 유속벡터의 단면분포를 나타낸 것이다. 염료실험을 통한 유선분포와 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

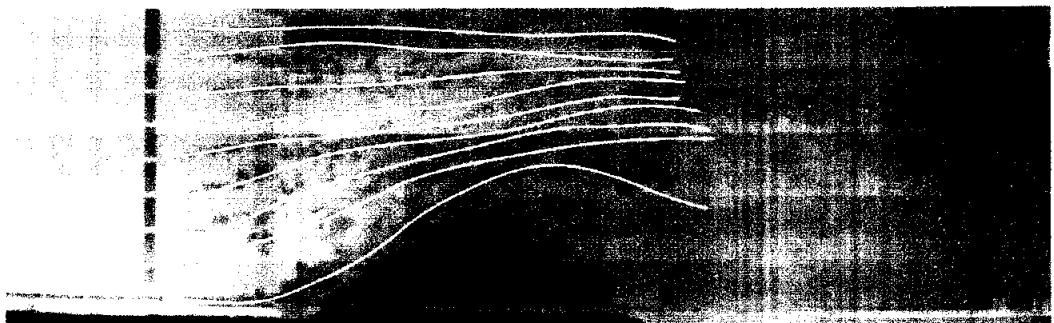


Fig. 3-11. Photo of flow around artificial upwelling structures.

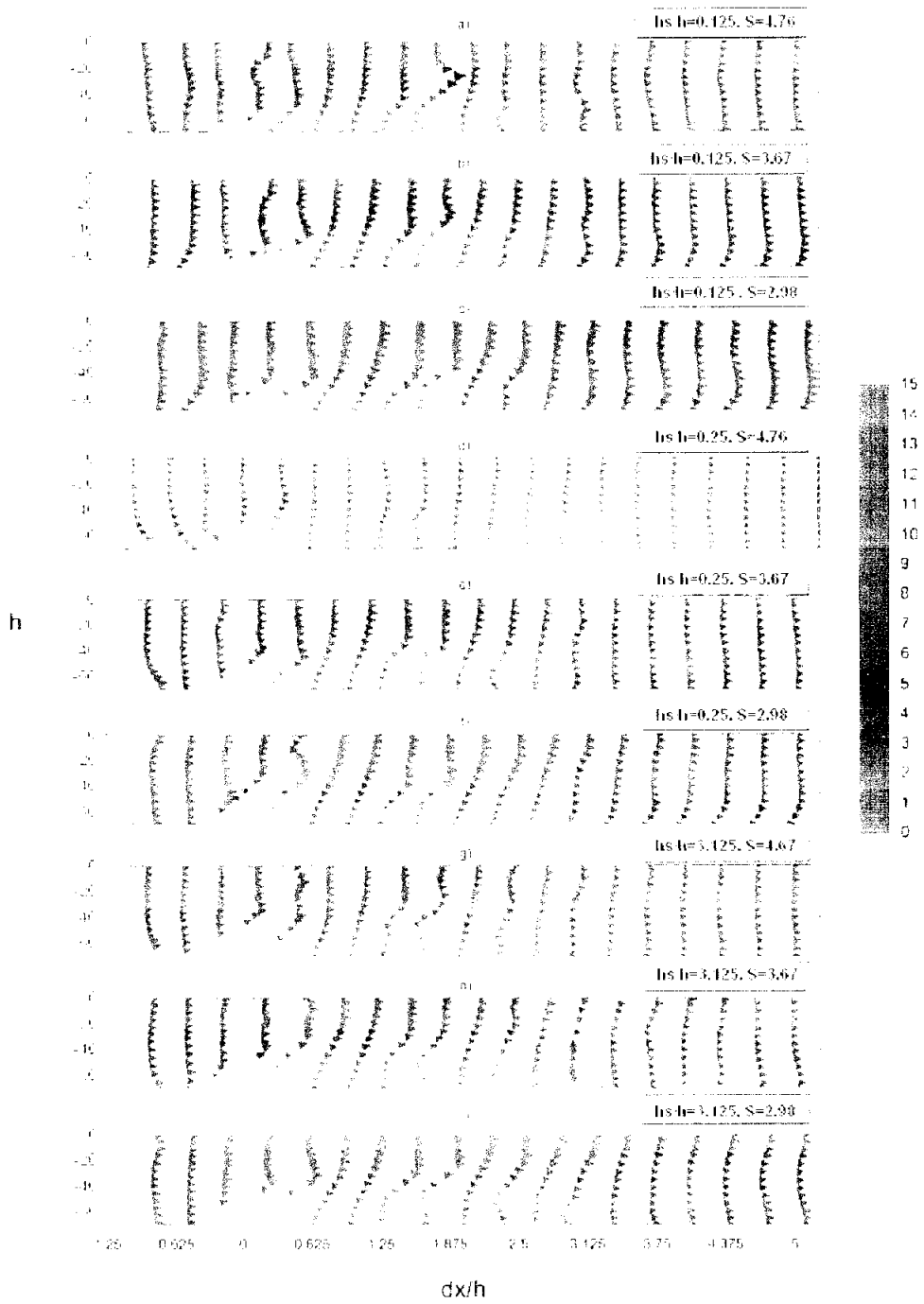


Fig. 3-12. Variation of current field by the artificial upwelling structures.

구조물 규모의 증가에 따른 구조물 주위의 흐름장 변화에서는 후류 길이의 차이가 나타남을 볼 수 있는데, 이는 구조물의 규모가 증가함에 따라 구조물 상부 유속 증가와 아울러 구조물 배후의 와동이 증가하기 때문이다. c), d), i)의 경우 구조물 배후($dx/h = 2.5$ 이상)에서 성층을 이루며 진행하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이들 경우를 제외한 그림을 보면 구조물 배후에서 유속 성분의 부등에 의해 와류와 성층의 발생이 일어나고 있음을 알 수 있다.

구조물 주위에서의 유속분포를 확인을 위해서 지점유속의 수평성분과 연직성분의 비를 Fig. 3-13에 나타내었다. 이를 통해 구조물에 의한 흐름장의 교란으로 연직유속이 발생함을 알 수 있다.

또한, 그림에서 연직유속이 발달하는 위치가 명확하게 나타내며, 특히 Fig. 3-13 i)의 경우 작용유속에 대해 표층에서의 지점유속비는 큰 것을 알 수 있다. 이에 반해 유속이 상대적으로 강하고, 구조물의 크기가 작은 경우에 실질적인 연직유속 성분은 배후의 표층까지 전달되지 않는 것으로 나타났는데, 이는 구조물의 크기가 현지유속을 고려하여 적절한 크기로 건설될 때 그 효율이 크다는 것을 나타내고 있다. Fig. 3-14는 구조물 배후면에서 전체수심의 1/5 영역에 대해서 평균유속경사 값을 평균하여 구조물의 크기와 지점유속비의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 세 가지 선은 성층계수의 차이를 나타내며 성층계수가 크고 구조물의 크기가 큰 경우 지점유속비는 증가하다가 감소하고 있음을 알 수 있다.

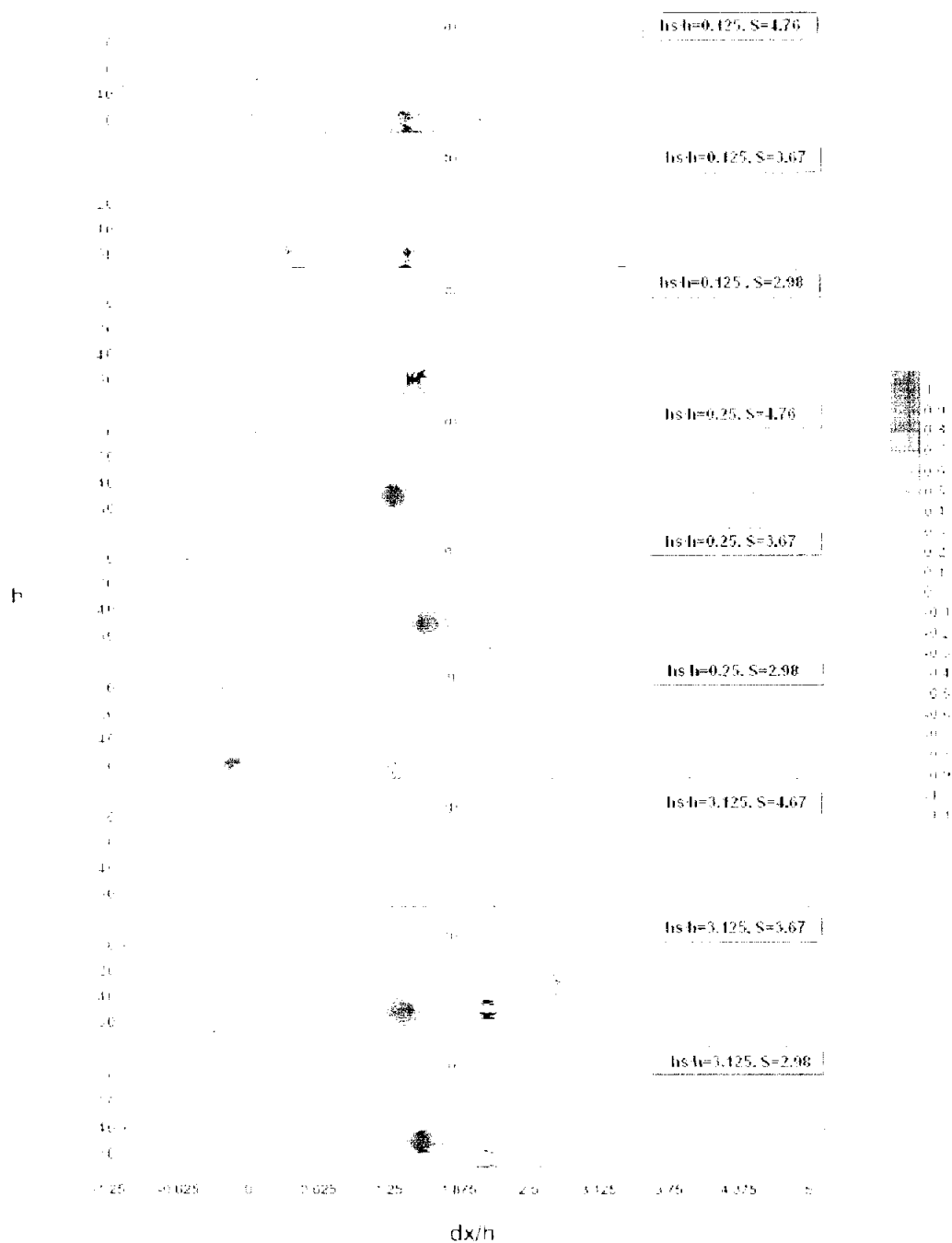


Fig. 3-13. Distribution of mean velocity gradient around the artificial upwelling structures.

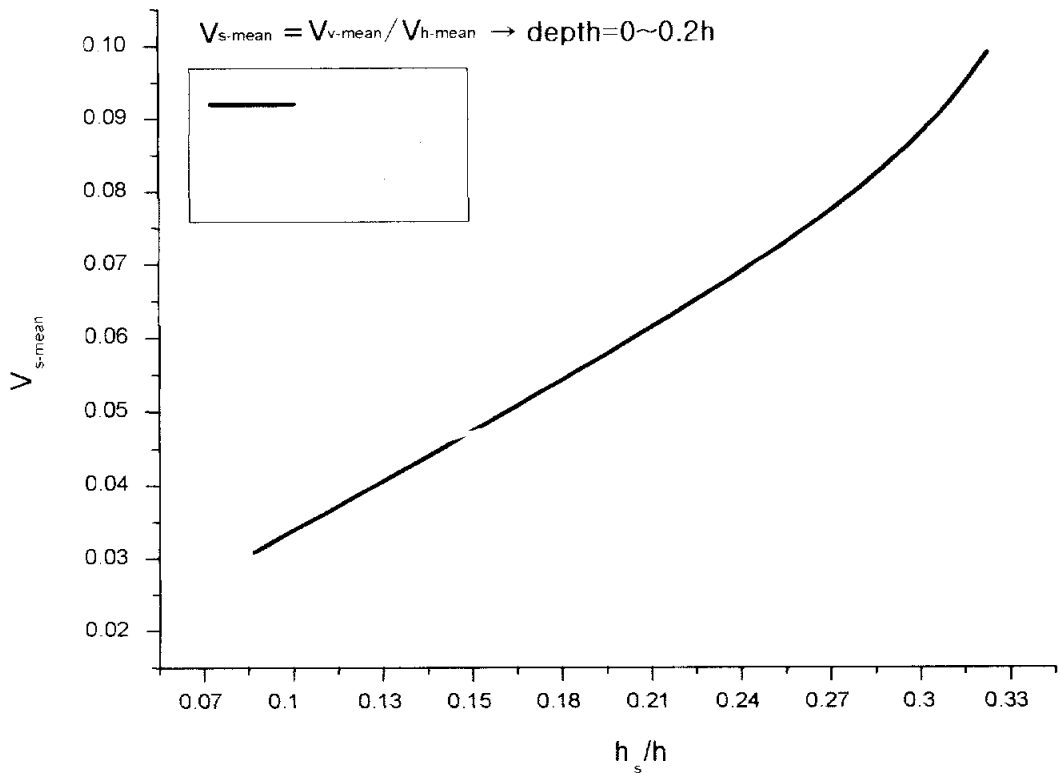


Fig. 3-14. Variation of mean velocity gradient with structures height.

3.5.2 공극률에 따른 용승유량 해석

인공용승구조물의 기능성은 저층 수위가 구조물 표면을 따라 상승하는 경우, 구조물이 가지고 있는 재질 및 형태에 따라 달라질 수 있는데, 그 중에서도 공극률이 중요한 요소라고 할 수 있다.

Table 3-3은 본 연구에서 사용되어진 각각의 구조물의 재질 및 형태에 따른 공극률을 보여주고 있다. 이는 5회에 걸쳐 공극 실험을 수행한 후 얻어진 결과를 평균한 값으로, 블록이 T.T.P보다 공극률이 낮은 것은 정육면체로 구성되어있어서로의 맞물림이 우수하였기 때문으로 생각한다. 이중 T.T.P는 완전포화 상태에서 실험한 수치이다. Fig. 3-15는 수조 내에 불투과성사면, 사석을 설치했을 경우, T.T.P를 설치했을 경우를 보여주는 그림이다. 블록은 한 변이 25 mm인 정육

각형이고, T.T.P는 최선단의 높이가 35 mm이고 무게가 20 g이었다.

Table 3-3. Structures condition of void ratio

Title	Impermeable layer	Block	T.T.P
Void ratio	0	0.43	0.58

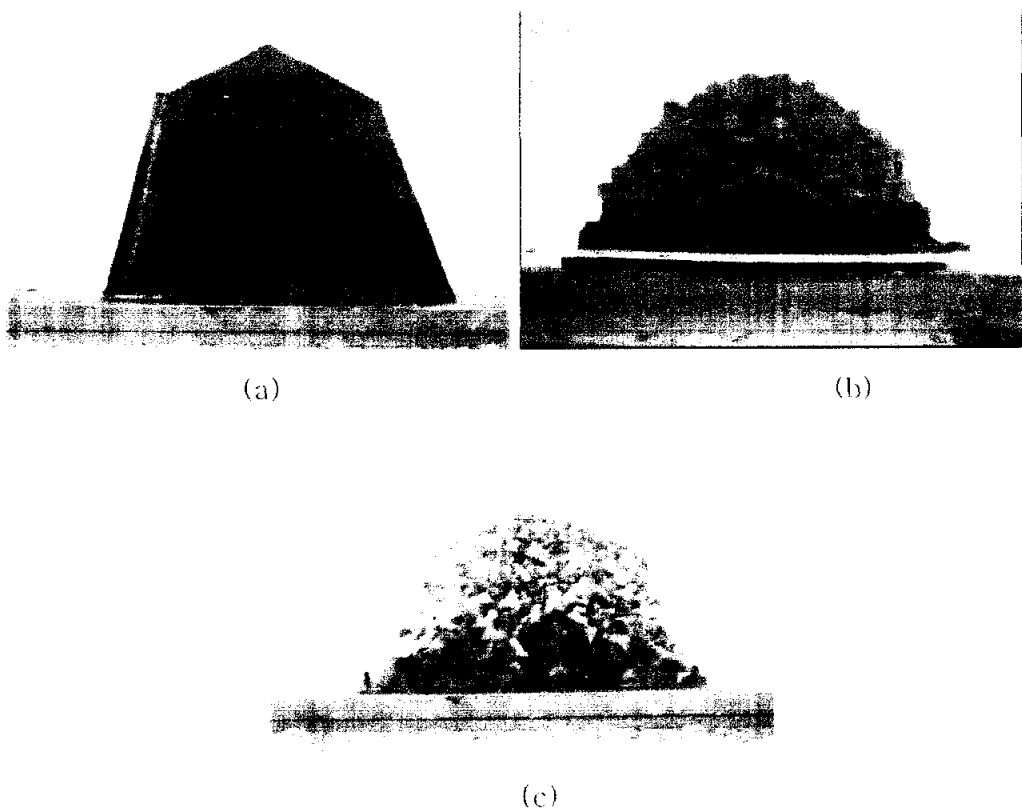


Fig. 3-15. Experimental condition of void ratio (a) 0, (b) 0.43, (c) 0.58.

실험에서 구조물의 크기가 증가하면 와류가 증가한다. 앞서 본 연구의 지층의 수
괴를 3D중으로 유도하기 위한 용승유량의 평가에서 구조물의 대상해역의 외력조

건에 대하여 적절한 규모로 건설되었을 때 가장 양호한 용승유량이 발생함을 알 수 있었다.

따라서 구조물 재질에 따른 즉, 공극률에 따른 인공용승유량 실험에서는 앞서 얻은 실험결과를 고려하여 가장 양호한 용승유량을 발생시킬 수 있는 조건으로 $hs/h = 0.3$, $S = 2.98$ 인 경우만을 수행하였다.

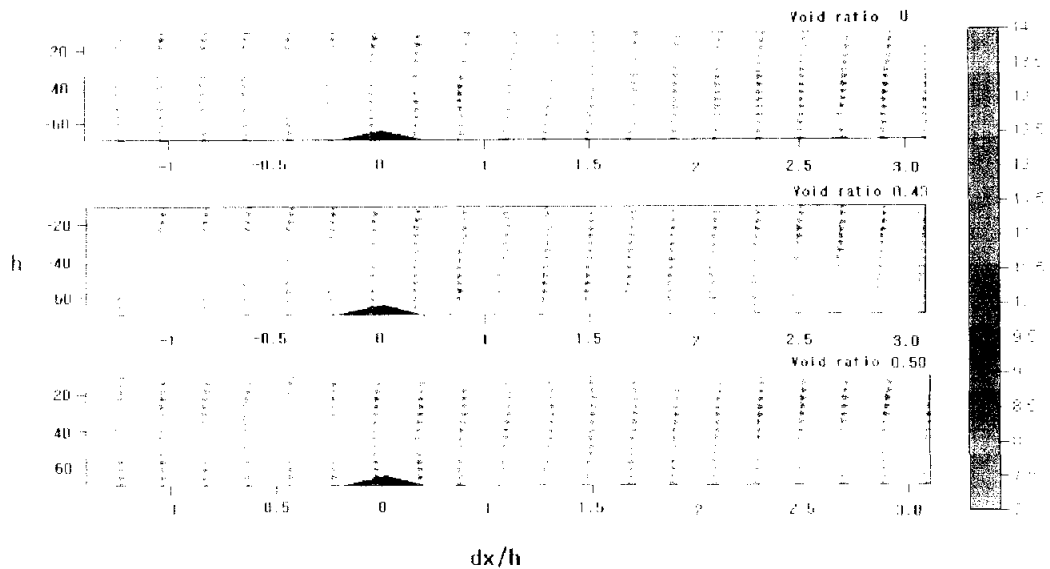


Fig. 3-16. Variation of current field by void ratio.

Fig. 3-16은 조파수조 내 공극률이 다른 3가지 구조물에 대한 실험결과로, 증별 유속분포를 나타내고 있다. 여기서 공극률이 0인 불투과성 사면일 경우 흐름이 구조물을 지나면서 유속이 점점 강해지는 것을 볼 수 있으며, 상층으로 상승하는 유속이 강하게 나타난다. 공극률이 0.43인 불투의 경우에는 구조물을 지나면서 상승하는 유속이 나타나고 있으나 크기는 불투수성 사면 보다 작게 나타남을 알 수 있다. 마찬가지로 공극률이 0.58인 T.T.P의 경우 유속은 구조물을 지나면서 커지는 것이 보이나 상승하는 유속은 많이 일어나지 않는 것을 알 수 있다(붉은 색에 가까울수록 유속이 커짐을 나타냄). 이를 통해 결과적으로 인공용승유량은 불투수성 사면의 경우가 가장 크게 나타나고 있다.

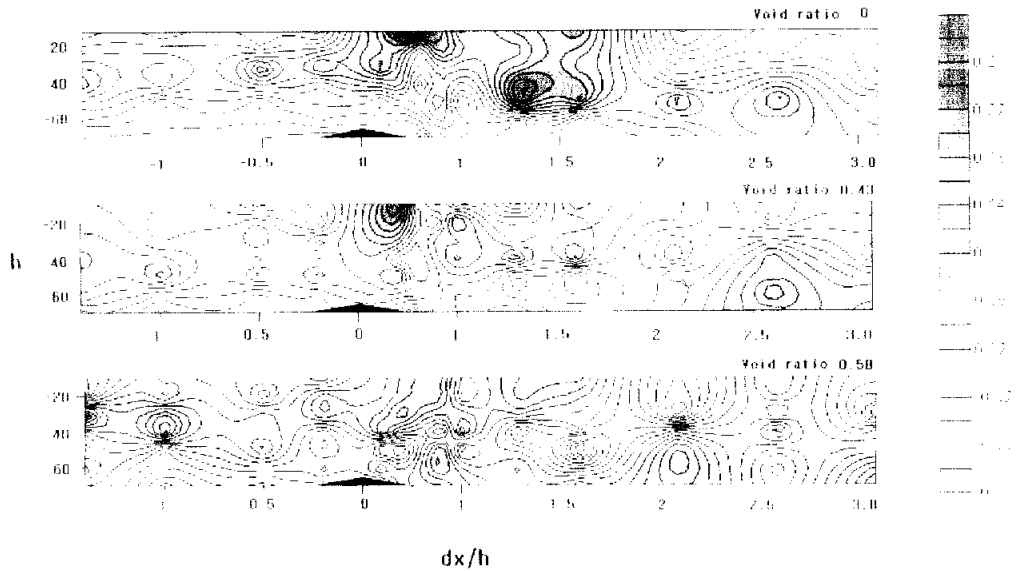


Fig. 3-17. Distribution of mean velocity gradient by void ratio.

Fig. 3-17은 연직유속의 수평유속에 대한 비인 유속경사를 나타낸 것으로 색깔이 진한 부분이 연직 방향으로 상승하는 유속이 크게 나타남을 보여준다. 실험 결과를 통해 불투수단면의 경우가 다른 실험결과와 비교해 구조물 배후에서 색깔이 짙게 나타나고 있으며, 구조물 배후에서 동심원을 그리는 하얀 부분이 나타나지 않는 것으로 와류가 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 불투과성단면의 경우는 그림에서 연직유속이 발달한 위치가 명확하게 나타나고 있다. 공극률이 0.43과 0.58의 경우에서 보면 0.43의 경우는 구조물을 지나면서 진한 색깔이 나타나고 있으나 공극률이 0.58인 경우는 전체적으로 상승유속의 경향을 보인다. 이 경우에는 구조물 배후면에 와류가 형성되는 것을 알 수 있다.

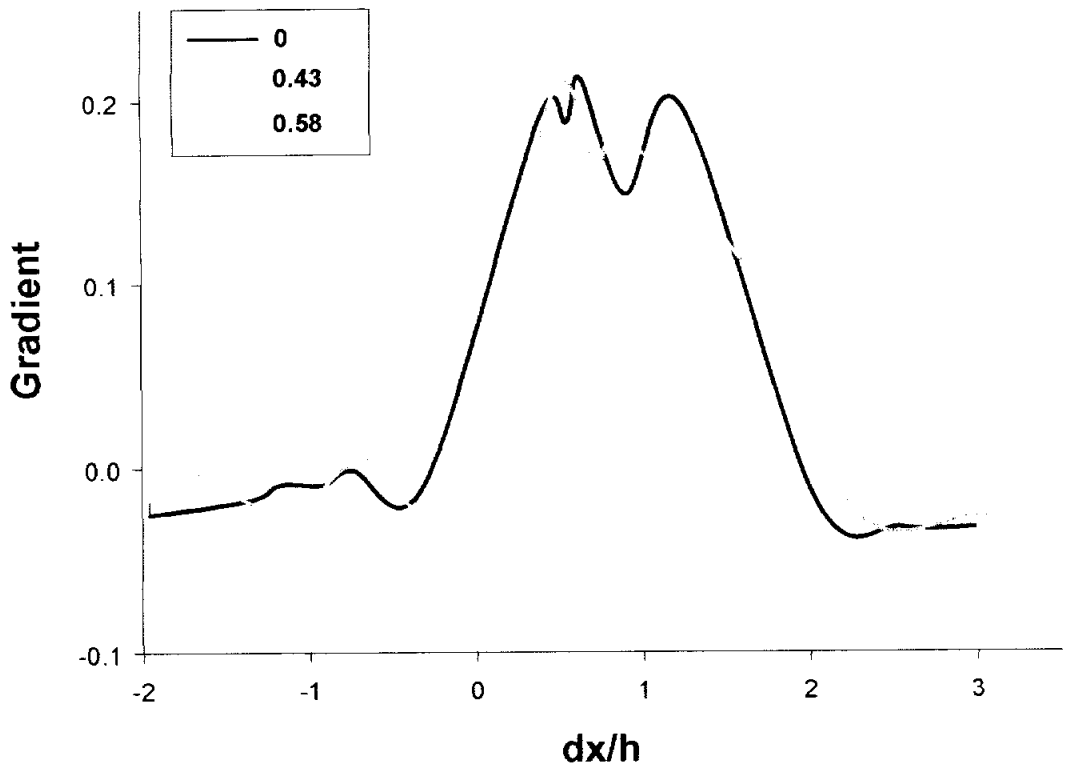


Fig. 3-18. Variation of mean velocity gradient by void ratio.

Fig. 3-18은 수심 20 cm인 지점에서의 평균유속경사를 나타내는 것이다. 공극률이 0인 경우를 보면 구조물을 지나면서 평균유속경사가 0.2까지 상승했다가 수심대비 거리가 2인 지점에서 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 공극률이 0.43인 경우는 구조물을 지나면서 공극률이 0인 경우와 마찬가지로 평균유속경사가 0.2까지 상승하다가 수심대비 거리가 1.5인 지점을 지나면서 감소하는 경향을 보인다. 그러나 공극률이 0.58인 경우는 구조물을 지나면서 평균유속경사가 0.05까지 상승하다가 수심대비 거리가 1.5인 지점에서부터 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 공극률이 0.43보다 작은 값을 가질 때 용승 효과가 안정적으로 일어남을 보여준다.

4. 수치실험

4.1 기본방정식

본 과제에서 사용된 수치모델의 기본방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 바닥의 마찰력 및 중력을 포함시켜서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\zeta + h)U] + \frac{\partial}{\partial y}[(\zeta + h)V] = 0 \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + U \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + V \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad (4-3)$$

여기서 U , V 는 x , y 방향의 유속, f 는 Coriolis 계수 ($=2\omega \sin \phi$, ϕ 는 위도), g 는 중력가속도, ζ 는 수면변위, h 는 수조내 일정수심, C 는 Chezy의 조도계수를 나타낸다.

본 모델에서는 수립된 수치적 계산을 위해서 Leendertse (1971)에 의해 응용되어, 현재 널리 사용되고 있는 ADI법(Alternating Direction Implicit method)을 사용하였다. ADI법은 양해법(explicit method)과 음해법(implicit method)을 동시에 사용하여 계산하는 방식으로, 해의 수렴성과 계산시간의 경제성 등에서 아주 뛰어나다. 이 방법에 의한 수치계산의 개요는 다음과 같다.

먼저 대상영역을 평면적으로 Fig. 4-1과 Fig. 4-2에 나타낸 것처럼 좌표계와 격자체계로 구성하고, 동시에 수위, 유속, 수심 등을 정의한 후 점 $((i, j), (i+(1/2), j), \text{ 및 } (i, j+(1/2)))$ 에 있어서 식(4-1), 식(4-2), 식(4-3)을 각각 차분 표시한다. 계산을 반복하여 계산결과가 안정될 때까지 계산을 수행하면 계산영역의 중앙영역에서의 유속을 구할 수 있다. 그리고 경계에서는 다음과 같은 경계조건에 의해서 계산된다.

$$lU + mW = U_n^* \text{ on } S \quad (4-4)$$

여기서, (l, m) 은 경계에 있어서 x, y 방향의 단위법선벡터, U_n^* 는 경계 S 에 있어서 경계에 직각방향의 유속으로서 사전에 주어진다.

여기서 u, v 는 $-h \leq y \leq \xi$ 사이에서 평균화된 x, y 방향의 유속성분을 나타내고, A_h 는 와동 점성계수를 각각 나타내며, C 는 Chezy의 조도계수, g 는 중력가속도, t 는 시간, h 는 수심이다.

또한, 시간간격 $(\Delta t/2)$ 은 계산의 안정성 및 수렴성을 지배하는 주된 인자으로써 일반적으로 다음의 안정조건을 만족하도록 $\Delta t/2$ 계산시간간격을 다음과 같은 CFL의 안정조건식을 만족하여야 한다.

$$\frac{\Delta t}{2} \leq \frac{\alpha \Delta s}{\sqrt{gh_{\max}}} \quad (\alpha = 1 - 3) \quad (4-5)$$

여기서 Δt 는 계산시간간격, Δs 는 계산격자간격, $h_{\max}$ 는 수심, g 는 중력가속도를 나타내며, 해저마찰과 관련이 있는 Chezy 계수는 $C = 19.4 \ln(0.9 \sqrt{h})$ 를 적용시켰다.

계산에서 z 방향으로의 폭도 일정하게 계산하였으며, 양측 경계조건의 경우 유량을 주어서 유속을 제어하였다. 그리고 y 방향의 수위값에 의한 영향은 없다고 가정하였다.

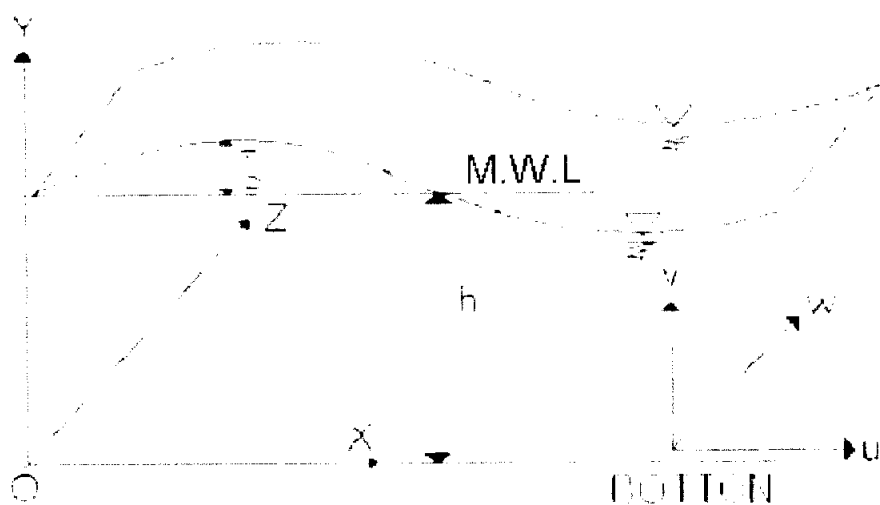


Fig. 4-1. Definition of coordinate.

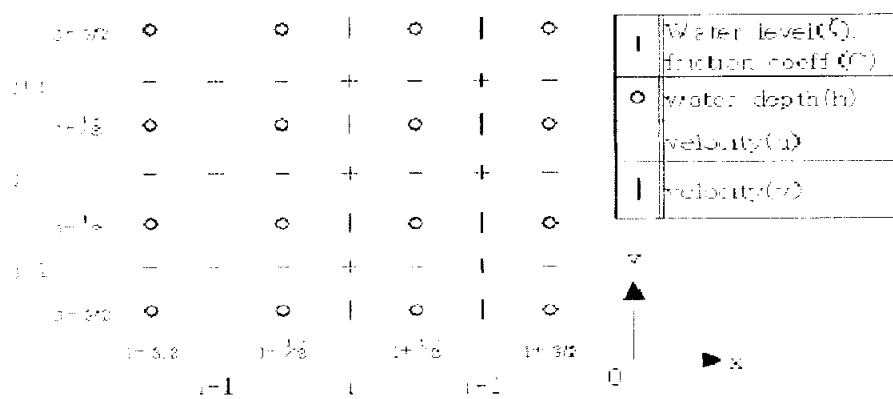


Fig. 4-2. Classification of grid system.

4.2 계산영역

수치모델의 계산 영역은 수리실험을 기초로 하였으며, Fig. 4-3에서와 같이 격자는 가로 방향으로 200격자, 세로 방향으로 50격자로 구성하였다. 가로 방향의 격자의 간격은 10cm이며 세로 방향의 격자는 1.6cm로 하였다. 유속은 유량값으로 제어하였으며, 이는 상층계수 $S=\log(h/v^3)$ 가 2.96, 3.68, 1.76인 경우를 대상으로 하였다.

계산 결과 검증점은 구조물 주변 P1, P2, P3, P4 4개 지점을 선정하여 각 지점의 계산 유속값이 일정한 수치를 나타낼 만큼의 충분한 계산을 수행하였다. 경우를 정상상태로 판단하였다. 이에 대한 계산 결과는 Fig. 4-4와 같다.



Fig. 4-3. Horizontal grid system of computation area.

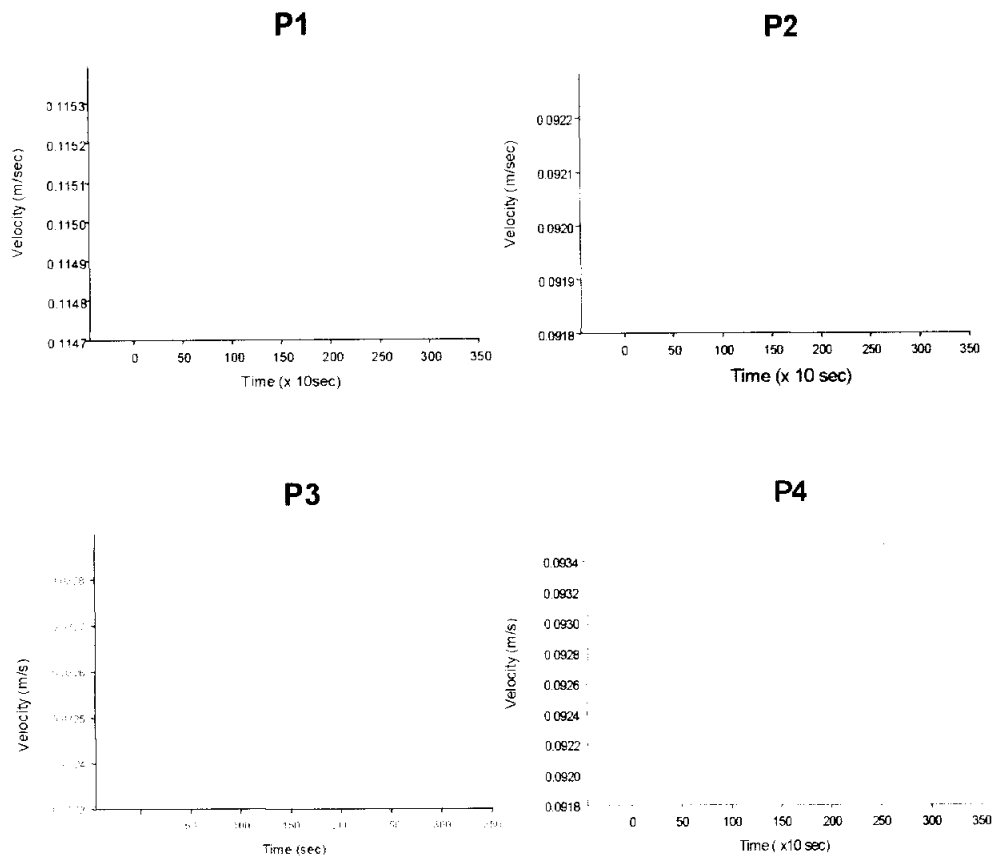


Fig. 4-4. Variation of velocity at point.

4.3 결과 및 검증

계산의 결과는: 전술한 실험케이스를 바탕으로 하여 계산을 실시하였고, 계산결과를 바탕으로 하여 구조물의 크기를 변화시켜 구조물 높이에 대한 용승효과를 알아보고자 하였다.

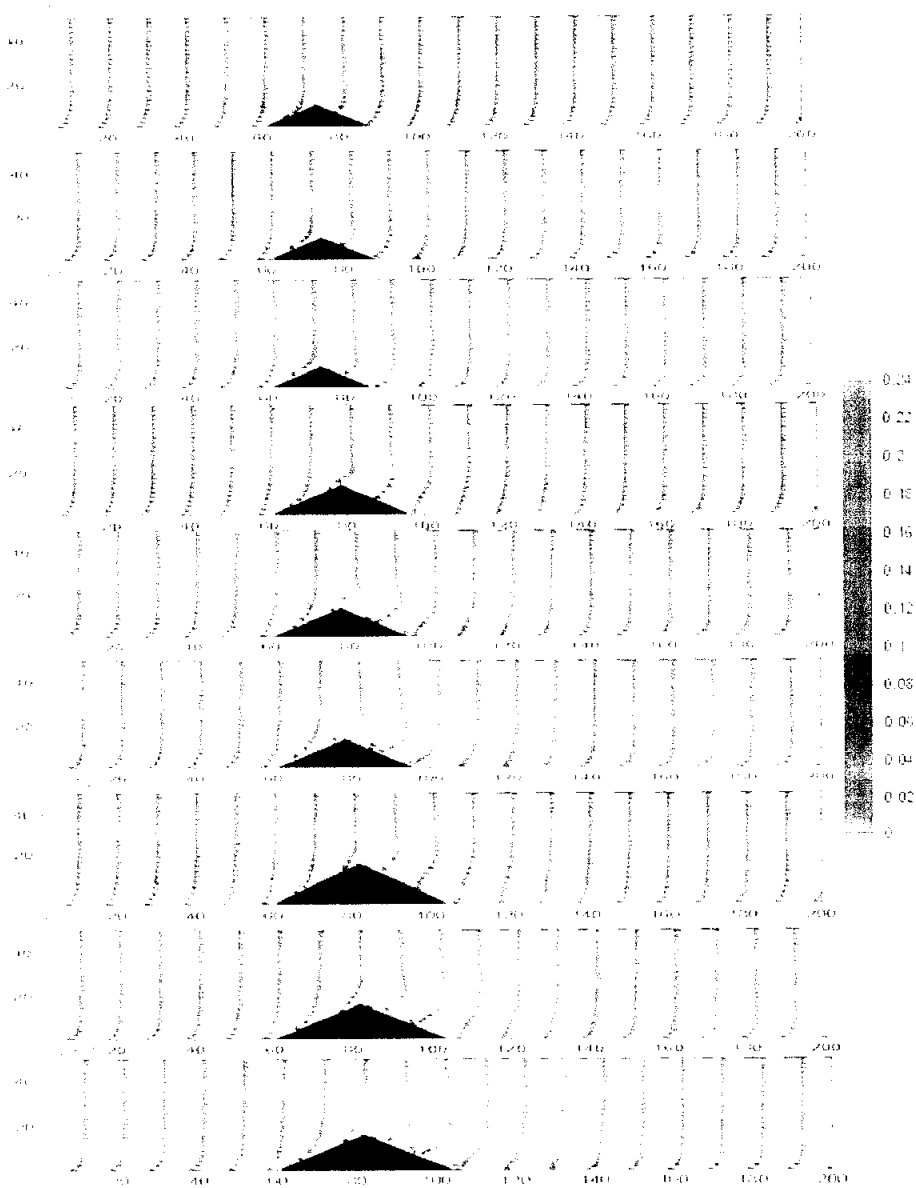


Fig. 4-5. Variation of current field.

Fig. 4-5에서 case 1, 4, 7의 경우는 성층계수 S 가 4.76인 경우이고, case 2, 5, 8의 경우는 성층계수 S 가 3.68인 경우이다. 그리고 case 3, 6, 9의 경우는 성층계수 S 가 2.98인 경우이다. 그리고 case 1-3은 hs/h 가 0.12, case 4-6은 hs/h 가 0.24, case 6-9는 hs/h 가 0.3인 경우이다. 그림을 보면 구조물이 커지면 서 유속이 강해지는 것을 보여주고 있다.

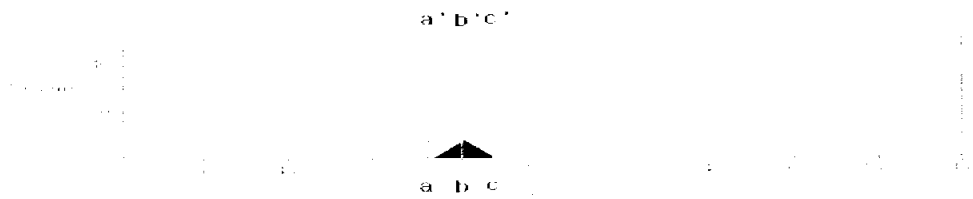


Fig. 4-6. Grid system of section.

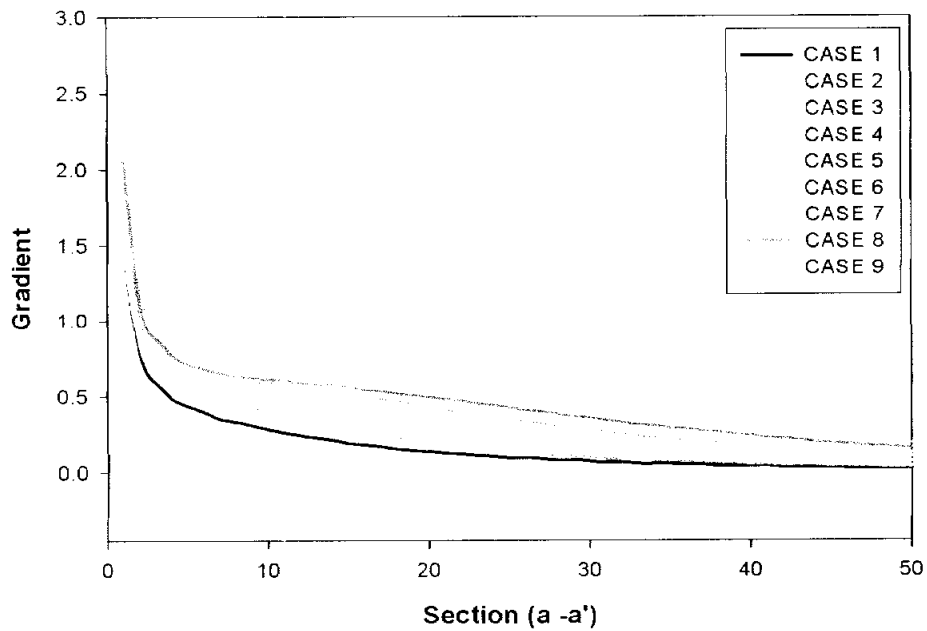


Fig. 4-7. Variation of velocity gradient at each section.

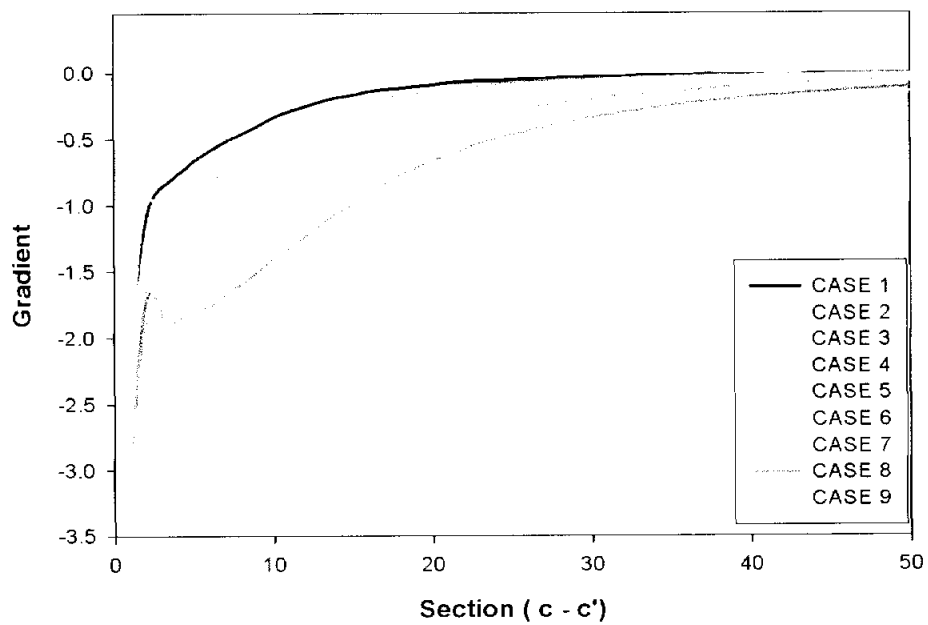
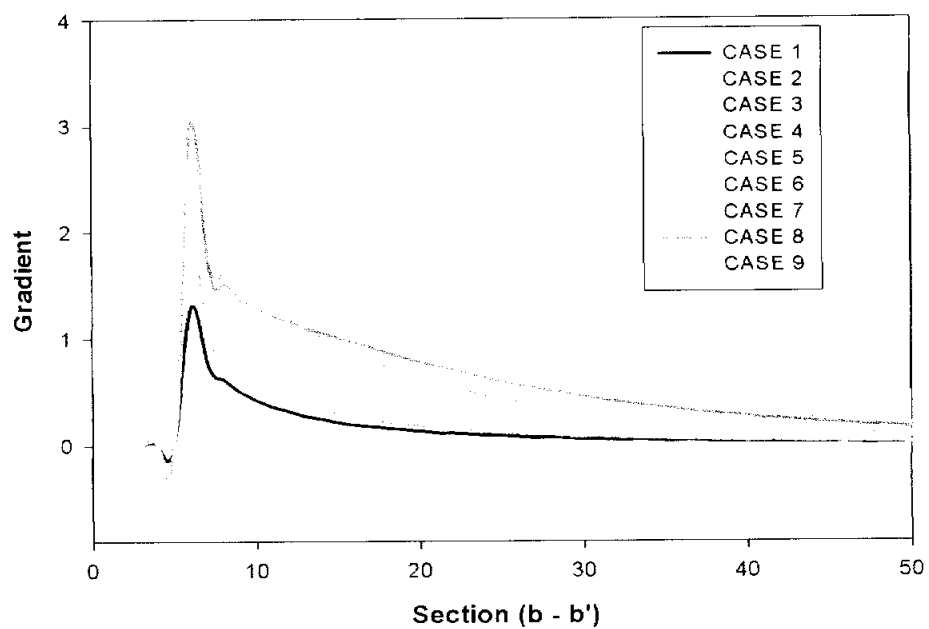


Fig. 4-7. Continued.

Fig. 4-6은 계산영역에서 단면 유속 분포를 알아보기 위한 격자체계이다. 유속 변화가 구조물 주위에서 변화가 큰 것을 예상하여, 구조물 전면, 중간과 후면의 단면을 설정하였다. Fig. 4-7은 구조물 주위에서의 유속을 나타내고 있다. 그림에서 보면 구조물 전면인 a-a'에서는 상승하는 유속이 case 6과 9가 크게 나타나고 있으며, 중앙인 b-b'는 case 6이 크게 나타나고 있다. 단면 c-c'에서는 6과 9가 크게 나타나는데, 이는 구조물을 지나면서 강한 유속과 구조물 높이에 의해서 아래로 향하는 유속이 크게 나타나는 것이다.

따라서 구조물이 case 6과 같은 경우에 유속변화가 크게 일어나므로, 이 구조물에 대한 높이의 변화를 알아보고자 하였다.

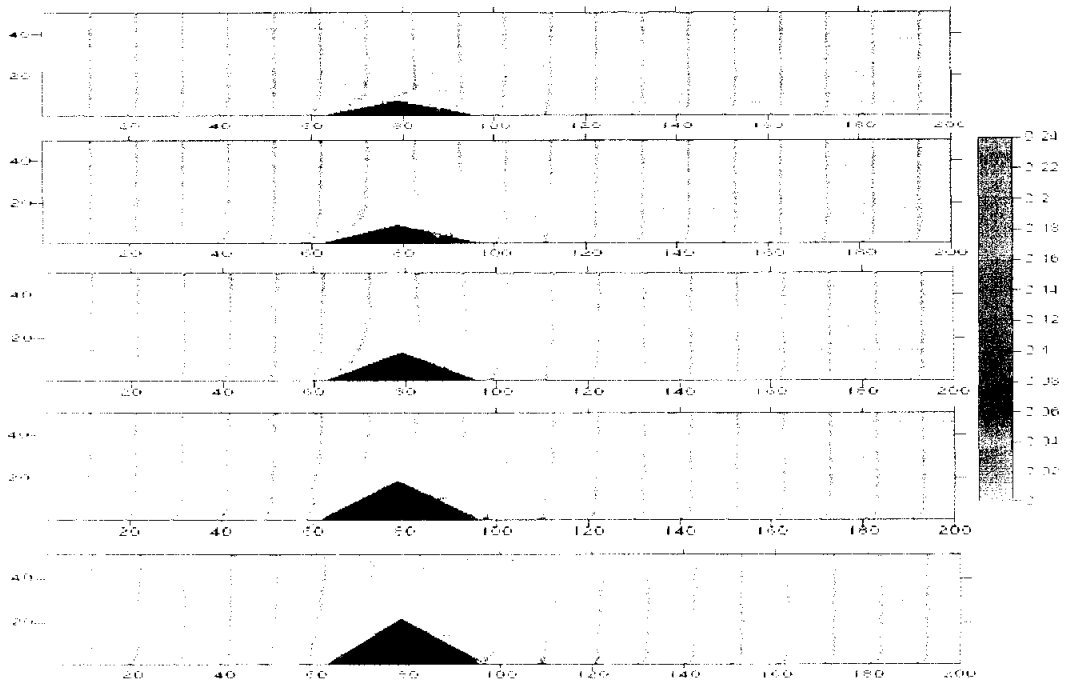


Fig. 4-8. Variation of current by structures height (S=2.98).

Fig. 4-8은 구조물의 높이 h_s 를 h_s/h 가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5인 경우에 대한 유속변화를 나타내고 있다. 그림을 보면 h_s 가 0.3인 경우부터 보다 큰 변화가 보이고 있다.

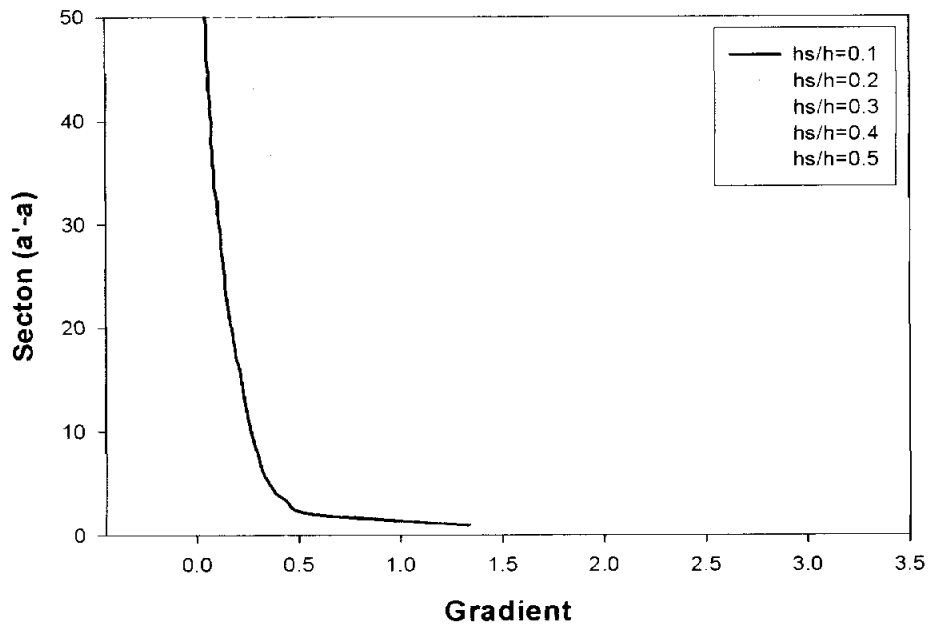


Fig. 4-9. Variation of velocity gradient at each section.

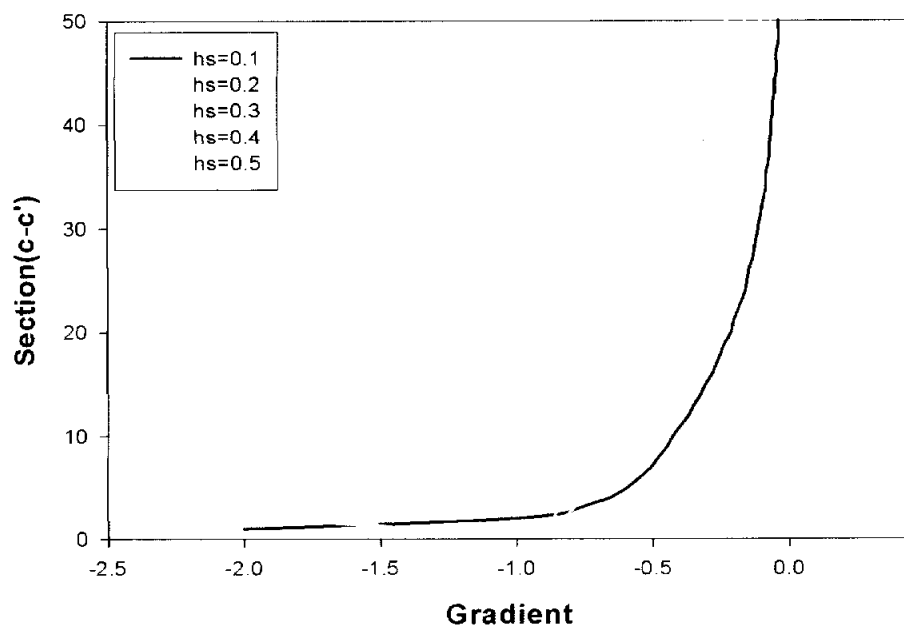
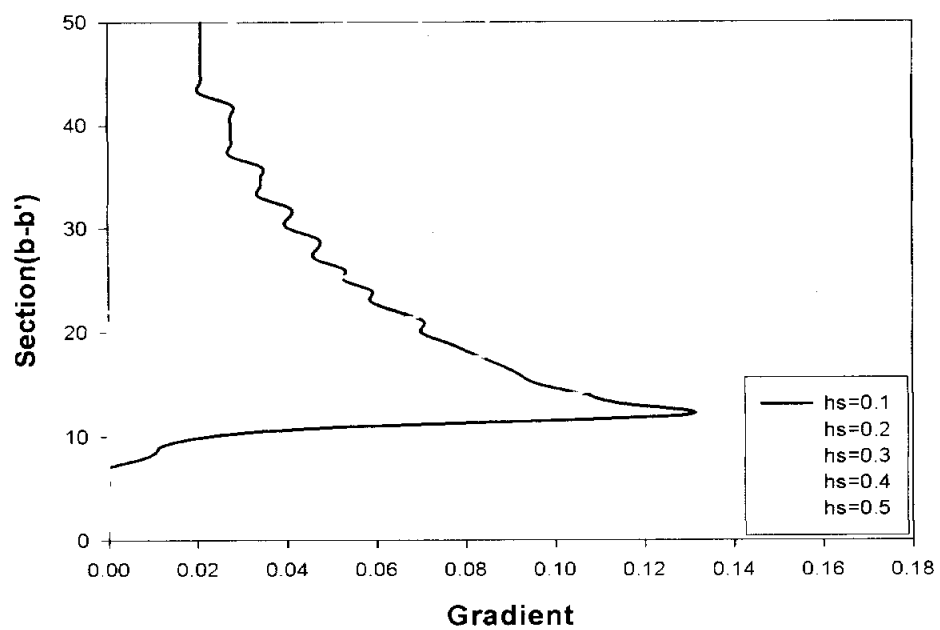


Fig. 4-9. Continued.

Fig. 4-9는 단면에 따른 유속경사 변화도를 나타내고 있다. 가로 축은 유속경사 값을 나타내고 있으며, 세로 축은 구조물 주위의 단면을 나타내고 있다. 이는 S 가 2.98인 경우이며 구조물의 크기가 수심대비 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5를 나타내고 있다. 단면 a-a'에서는 구조물의 크기가 0.3이상인 경우에 유속경사가 급격하게 커지는 것을 나타내고 있다. 단면 b-b'를 보면 구조물 중앙에서의 유속경사를 나타내고 있는데 유속경사가 $h_s/h=0.3$ 인 경우가 가장 큰 값인 0.163을 나타내고 있다. 단면 b-b'를 보면 대체적으로 표층까지 상향 유속이 발달하고 있는 것을 알 수 있다.

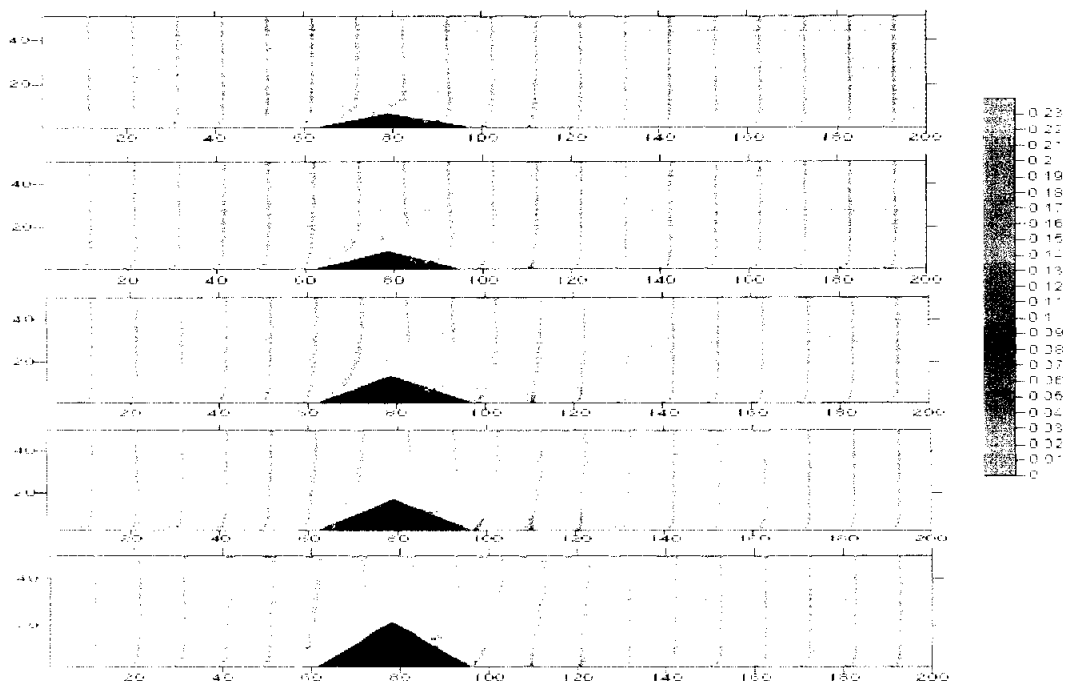


Fig. 4-10. Variation of current by structures height ($S=3.67$).

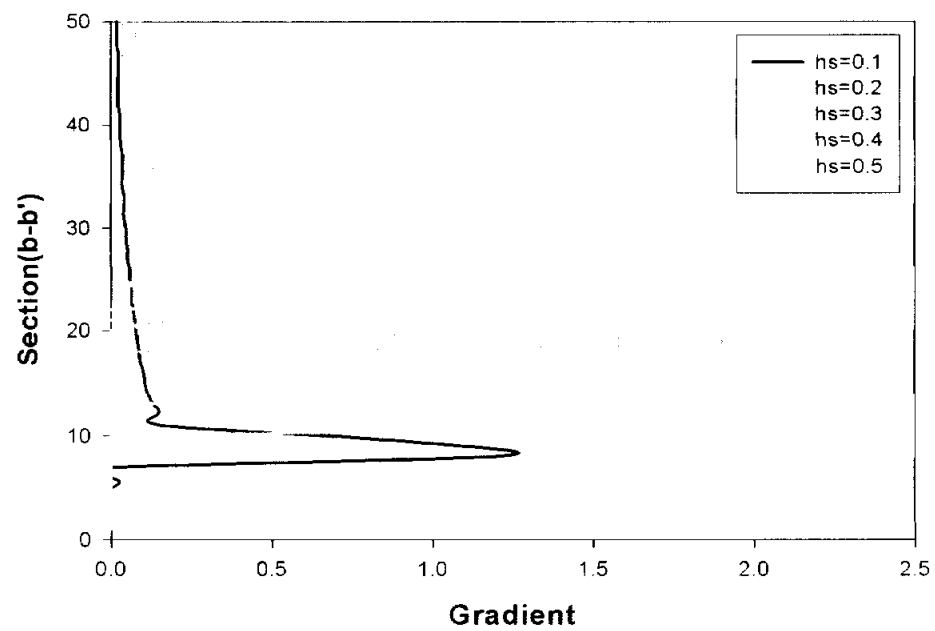
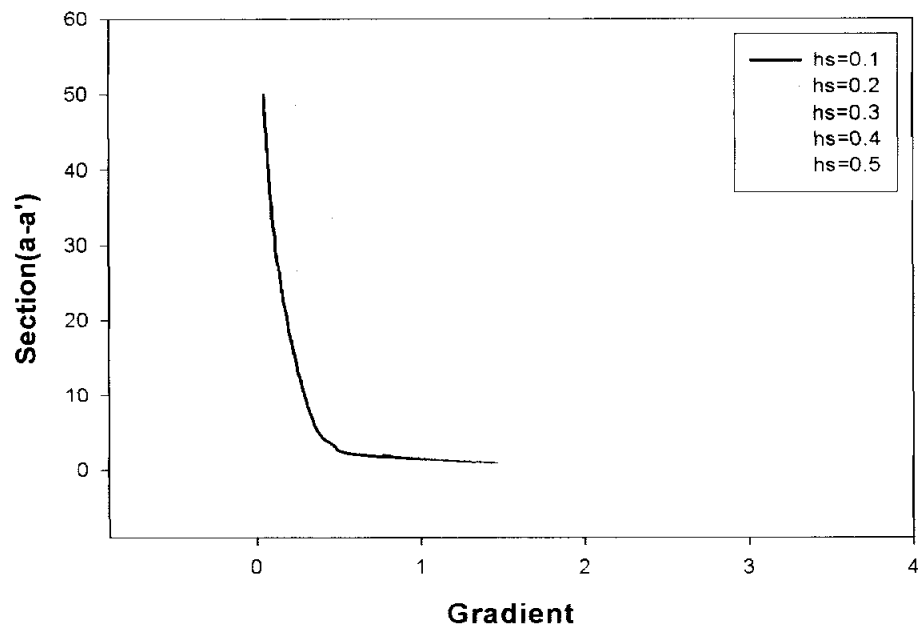


Fig. 4-11. Variation of velocity gradient at each section.

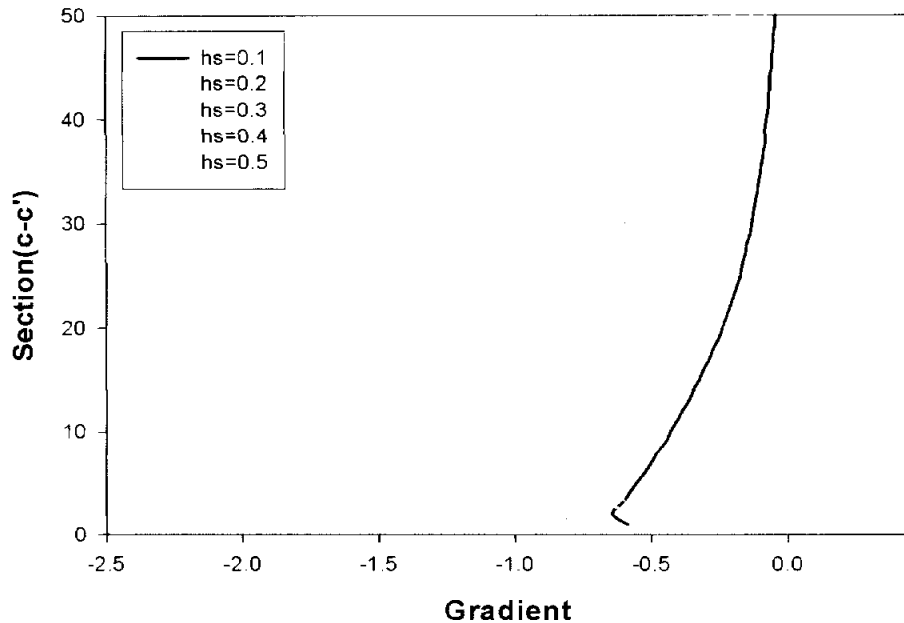


Fig. 4-11. Continued.

Fig. 4-10과 11은 $S=3.68$ 인 경우에 대해서 구조물의 높이를 변화시켜서 나타낸 그림이다. Fig. 4-10은 h_s 가 0.1-0.5까지의 유속의 변화를 나타낸 그림이다. 그리고 Fig. 4-11은 각각의 구조물의 단면에 대한 유속경사의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4-8과 4-10의 비교에서 상중계수가 변화하면 단면 a-a'와 c-c'는 변화양상이 없으나 단면 b-b'는 많은 변화를 보이는데, 이는 유속이 변함으로 해서 구조물 중앙에서의 유속의 경사의 변화가 급격하게 일어나는 것을 볼 수 있다. Fig 4-8에 비하여 Fig. 4-10은 단면 b-b'에서 상향방향으로의 속도경사가 표중까지 이어지지 못하고 있는데, 이는 유속이 일정한 값 이상을 가지게 되면 속도경사가 일어나는 것보다는 구조물을 타고 넘어가는 유속이 강해진다는 것을 알 수 있다. 그러나 $h_s=0.3$ 에서 가장 큰 값을 가지는 것에는 변화가 없다.

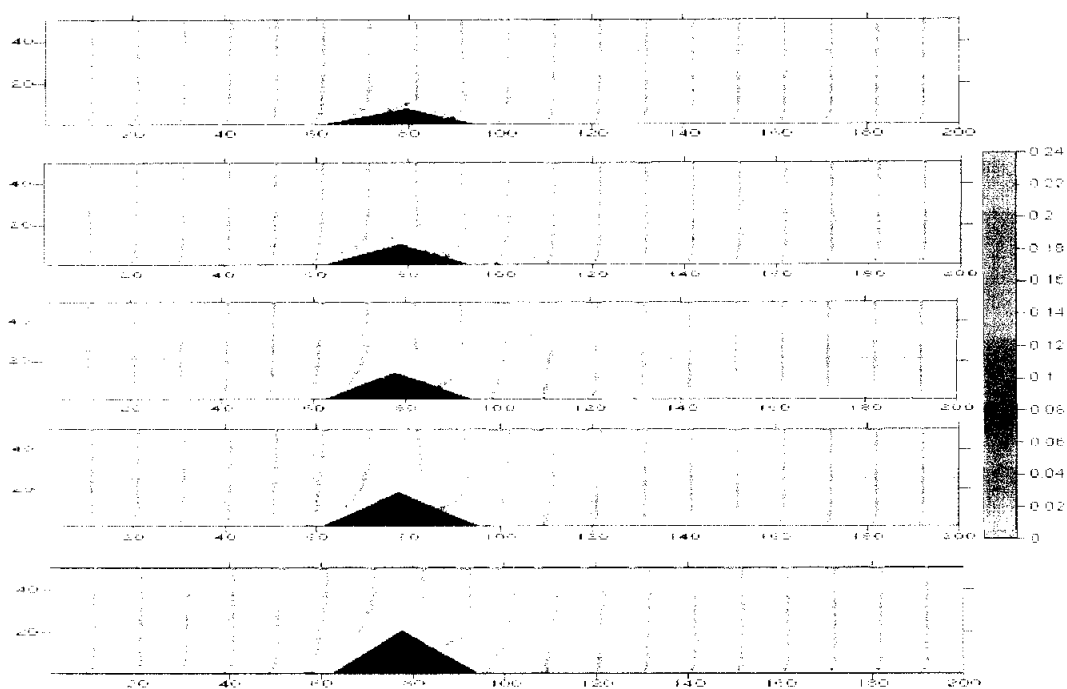


Fig. 4-12. Variation of current by structures height ($S=4.76$).

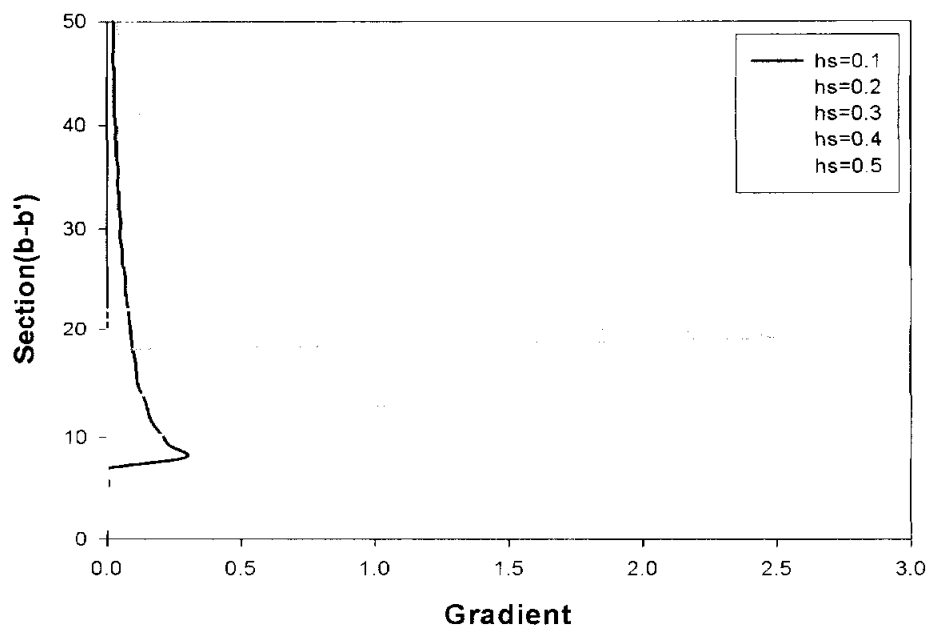
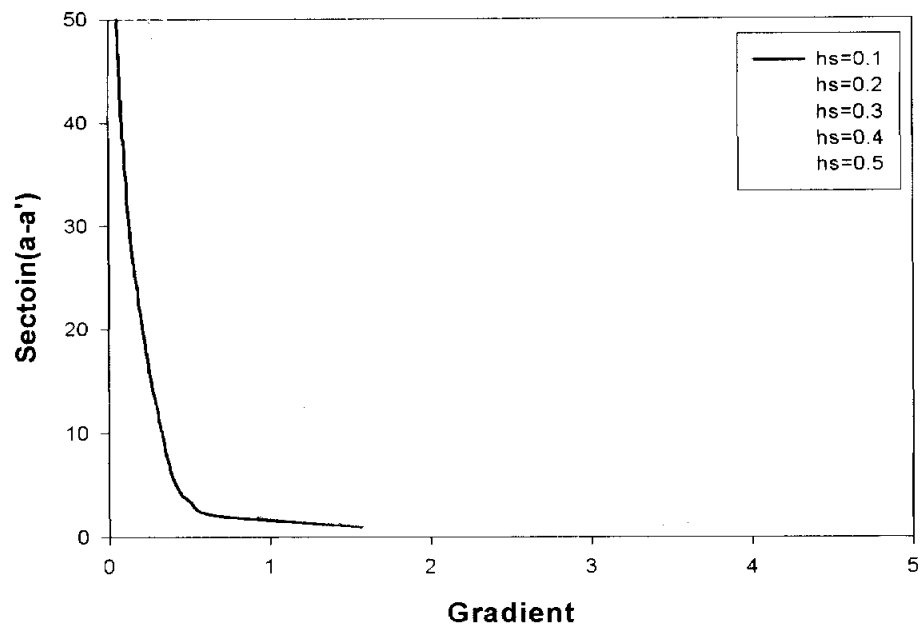


Fig. 4-13. Variation of velocity gradient at each section.

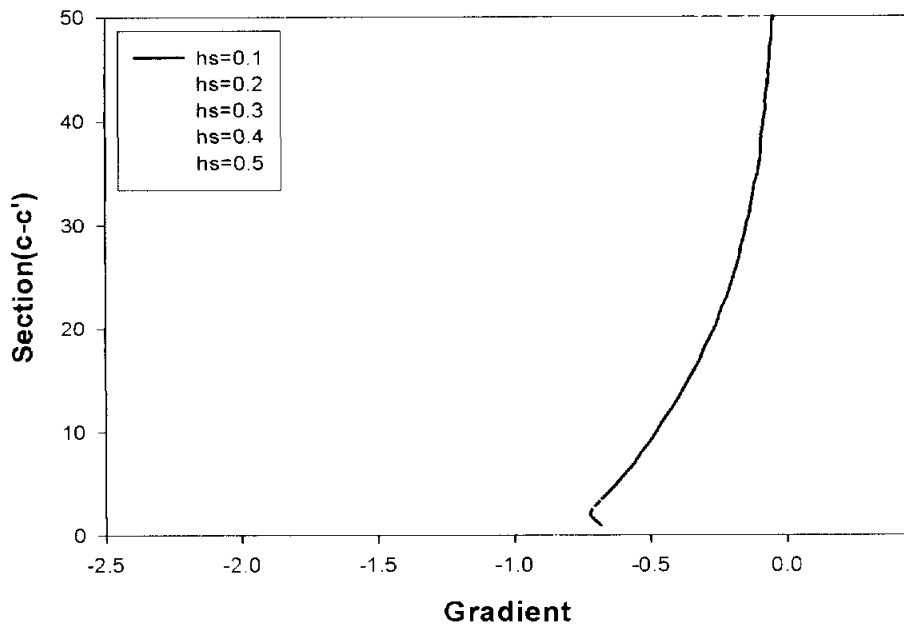


Fig. 4-13. Continued.

Fig. 4-12와 4-13은 $S=4.76$ 인 경우에 대해서 구조물의 높이를 변화시켜서 나타낸 그림이다. 그림 5-2-11은 h_s 가 0.1-0.5까지의 유속의 변화를 나타낸 그림이다. 그리고 5-2-12는 각각의 구조물의 단면에 대한 유속경사의 변화를 나타내고 있다. 성층계수가 변화하면 단면 a-a'와 c-c'는 변화양상이 없으나 단면 b-b'는 많은 변화를 보이는데, 이는 유속이 변함으로 해서 구조물 중앙에서의 유속의 경사의 변화가 급격하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 그러나 $h_s=0.3$ 에서 가장 큰 값을 가지는 것은 성층계수 S 가 2.96, 3.86과 4.76인 경우에도 변화가 없다. 결과적으로 구조물의 높이는 $h_s=0.3$ 인 경우에 구조물에서 유속경사가 크게 나타났으며, 성층계수가 2.98인 경우가 표층까지 보다 안정적으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

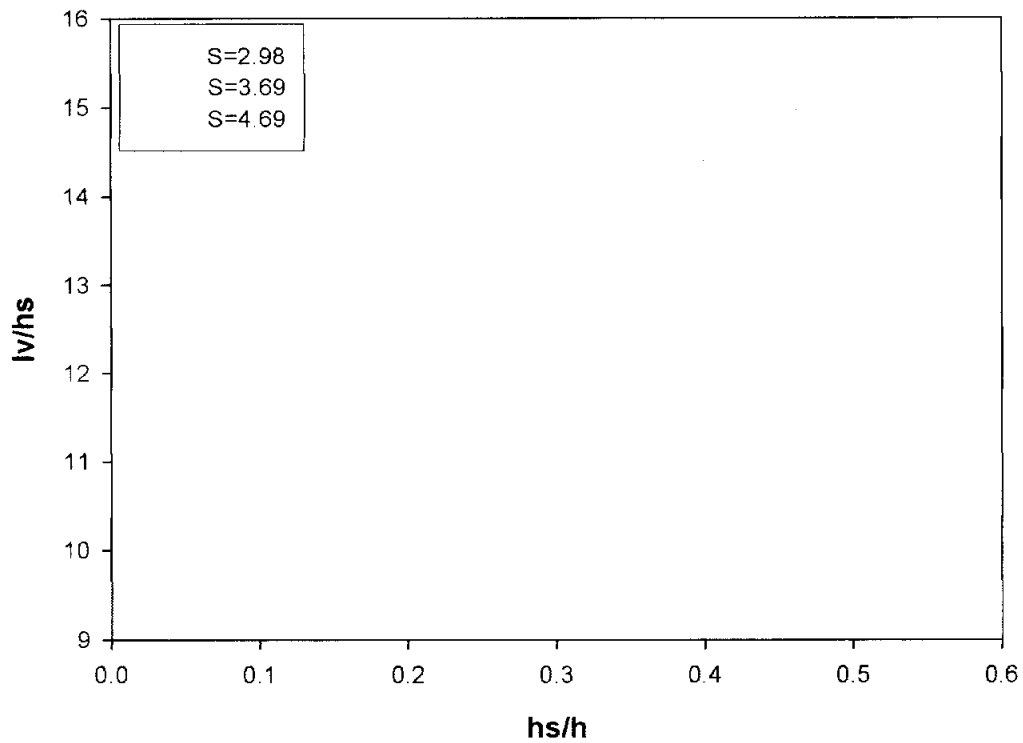


Fig. 4-14. Variation of slip stream length by structures height.

Fig. 4-14의 경우는 구조물 주위의 후류길이에 대한 변화를 나타낸 그림으로서 가로는 수심에 대한 구조물 높이의 비를 나타내고 있으며, 세로는 수심에 대한 후류길이의 길이를 나타내고 있다. 후류길이는 구조물 높이의 연장선상에서 연직 방향의 유속의 변화가 없는 지점까지의 거리로 정의 하였다. 그림을 보면 구조물의 높이 변화와 유속의 변화에 따라서 후류길이가 비례적으로 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 유속이 변하여도 후류길이가 $hs/h=0.3$ 부근에서 상대적으로 길어짐을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 변지 사석식 인공용승구조물을 대상으로 하여 현장조건을 고려한 용승기능 최적화 및 구조물 최적단면 설계를 위한 용승관련 수리특성을 해석·정리하고, 구조물의 최적단면설계에 관한 기본지침을 마련하였다. 그리고 설계된 최적단면의 정확한 시공을 위한 사석 투하 지침을 마련 할 수 있는 투하사석의 거동 및 퇴적특성을 규명하고자 하였다. 이를 위하여 블록의 침강속도 실험, 블록의 낙하 퇴적형상 실험을 통하여 정확한 시공을 위한 수리 특성을 규명하였고, 투수층 효과를 고려한 공극률 실험, 용승유량에 의한 용승구조물의 최적단면 검토에 대한 실험을 통하여 용승관련 수리 특성을 파악하였다. 2차원 수치 실험을 통하여 수리실험의 결과를 보충하여 용승류의 특성을 해석하여 단면 최적설계를 위한 기초 자료로 정리할 수 있었다. 이러한 일련의 연구로부터 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 블록의 침강속도는 작용유속에 반비례하지만 블록의 크기에 대한 영향이 더 크게 나타난다.
- (2) 흐름장에서 블록의 평균 수평이동거리는 블록의 크기보다 작용유속의 영향이 더 크다.
- (3) 사석식 용승구조물의 투수층 효과를 고려하면, 안정적인 용승효과를 얻기 위하여 공극률 0.43이하에서 공극률 0(불투과성)의 구조형식이 같은 용승효율과 큰 차이를 보이지 않았다.
- (4) 용승효과는 구조물 상대높이(h_s/h)와 성층계수(S)에 영향을 받는다. 수리실험에서 성층계수가 3.0부근, 구조물 상대높이가 0.3 정도에서 속도경사가 큰 안정적인 용승류가 발생함을 알 수 있었다.

이상의 결과를 통해 기본적인 인공용승구조물의 설치에 대한 구조물의 최적단면 설계를 위한 기초적인 수리학적 특성을 파악할 수 있었다. 이들 결과를 이용하면 현장조건에 따라 용승효과를 극대화 할 수 있는 구조물의 초기 단면의 최적설계가 가능 할 것이다.

참고문헌

- A. P. Kroon, K. Hoekstra, K. Houwman and G. Ruessink, 1994. Morphological monitoring of a shore face nourishment nourtee experiment at Terschelling, The Netherlands. *Coastal Eng.*, 161: 2222-2236.
- D. M. DiToro, D. J. O'Connor and R. V. Thomann, 1971. A dynamic model of phytoplankton population in the Sacramento-San Joaquin Delta, *Advances in Chemistry Series*, America Chemistry Society, 106: 131-180.
- E. Saito and T. Shibayama, 1992. Local scour around a large circular cylinder on the uniform bottom slope due to waves currents. *Coastal Eng.* 214: 2799-2810.
- G. Voulgaris, S. Wallbridge, B. N. Tomlinson and M. B. Collins, 1995. Laboratory investigations into wave period effects on sand bed erodibility, under the combined action of waves and currents. *Coastal Eng.* 26: 117-134.
- H. A. Einstein and N. Chien, 1956. Similarity of distorted river models with Movable Beds, *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, 121: 440.
- I-C. Lee, K. Fujita and M. Ukita, 1998. Water quality management in Seto-inland sea, Japan by using the water and sediment quality model, *Proceedings of 4th international Scientific Symposium (UNESCO/IOC/WESTAPAC)*: 388-396.
- I-C. Lee and C-R. Ryu, 2001. A numerical prediction of nutrient circulation in Hakata Bay by sediment-water ecological model (SWEM). *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* Vol. 4 , No. 2: 3-14.
- J. H. Ryther, 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. The production of organic matter and its conversation to higher forms of life vary throughout the world ocean. *Science*, 166:

72-76.

- Komura, 1962. Similarity and design methods of river models with Movable Bed, Trans. Japan. Soc. Civil Engs., 80:31.
- K. I. Ranasoma and J. F. A. Sleath, 1992. Velocity measurements close to rippled beds. Coastal Eng. 183: 2383-2396.
- R. Deigaard and J. Fredsoe, 1989. Shear stress distribution in water waves, Coastal Eng., 13: 357-378.
- R. C. Nelson, 1995. Wave bed friction damping over shoaling, Movable Beds. Coastal Eng., Vol 25: 65-80.
- S. A. Hughes, 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering, World scientific, 20: 169-332.
- S. W. Nixon and N. J. Kremer, 1978. A coastal marine ecosystem, simulation and analysis, Ecological series, Vol 24: 217.
- T. R. Fisher, P. R. Carlson and R. T. Barber, 1982. Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries. Estuarine Coastal and Shelf Science, 14: 101-106.
- T. Toue, H. Katsui and K. Nadaoka, 1992. Mechanism of sediment transport around large circular cylinder. Coastal Eng. 219: 2867-2878.
- T. Yanagi and M. Nakajima, 1991. Change of oceanic condition by the man-made structure for upwelling. Marine Pollution Bulletin, 23: 131-135.
- T. Yanagi and S. Okada, 1993. Tidal front in the Seto Inland Sea. Memoirs of the Faculty of Engineering, Ehime University, 12-4: 337-343.
- 榎本 亨 著 , 金南亨 譯, 1996. 漂砂と 海岸侵蝕, 清文閣: 37-76.
- 堀辰之介・中尾徹, 1986. 天然湧昇域の海洋環境特性について, 水産土木 第22巻 第2号.
- 柳哲雄・中嶋昌記・大竹臣哉・近藤浩右, 1991. 魚礁としての人工湧昇流発生構造物, 水産工学, 27: 73-77.

今村 均・友田啓二郎・鈴木達雄・細野成一, 1995. 人工湧昇流發生漁場造成の研究, 沿岸工學論文集, 第42号: 1131-1135.

沿岸漁場技術研究會, 1996-1999, マウンド漁場造成システムの開發にする報告書.

류정로, 이의효, 김현주, 정진호, 1993. 수중수산시설물에 작용하는 유체력 및 지반거동의 해석, 한국해안해양공학회 학술발표논문초록집: 101-105.