한국해양공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집 PP.62~67

인공용승구조물의 수리학적 기능성에 관한 연구

김홍진* · 전용호* · 류청로**

A study on hydrodynamic characteristics of artificial upwelling structures

Hong-Jin Kim* · Yong-ho Jeon* · Cheong-Ro Ryu**

Key Word : Upwelling(용승), Submerged structures(잠제), Artificial upwelling structures(인공용승구조물)

ABSTRACT

While upwelling regions account for only 0.1% of the ocean surface, they yield over 40% of world's fish catch. Thus it is vary important making upwelling region by vaorious methods. This study was performed to find out basic hydrodynamic characteristics(function, stability...) of artificial upwelling structures.

The hydrodynamic characteristics of artificial upwelling structures can be summarized as follows:

1) The falling velocity of blocks was effected size(l_B) of blocks than incident current velocity(V_0).
2) The falling horizontal distance was reduced as induce of stratification parameters and block' size.
3) Generation of artificial upwelling current was effected by size of structures and incident current. When stratification parameters was about 3.0 and relative height(hs/h) of structures was about 0.125~0.15, stable artificial upwelling current was generated in the back-side of structures.

1. 서 론

우리나라는 연간 330만ton의 수산물을 생산하는 세계 10위권의 어업생산국이다. 그러나 변모하는 해양개발의 현실은 해양에 부존하는 에너지와 광물, 수산자원 등을 탐사·개발·획득에 이어지는 자원개발을 위한 각종 과학기술의 발달을 야기하여 왔다.

이러한 조류는 해양환경을 적극적으로 제어하여 적정 생태환경을 조성하기 위한 다양한 수산 증식시설의 개발 및 배치에 응용되고 있다. 그리고 이러한 제반 활동은 연안역 어장의 생산기능이 극대화 될 수 있도록 함으로써 어군행동의 제어에 의해 자원조성, 관리 및 어획 효율화를 위해 활용되어야 할 것이다(류 등1993). 이는 수산생물을 보호, 육성함으로써 생물자원을 조성하고 증대시키기 위한 착저식 및 부유식 인공어초, 해조초, 도류제 인공용승구조물, 저질개량 구조물 등이 설치되고 있다(김과 류, 1997).

세계 해양면적의 불과 0.1%를 차지하는 용승해역은 전체 어류생산량의 50%에 달하는 생산능력을 가지고 있으며 이는 저층의 풍부한 영양염류를 표면으로 이동시켜 용승류에 동승한 식물플랑크톤의 부상에 따른 기초생산력의 증대로 인해 좋은 어장이 형성되고 있다(Ryther, 1969). 연안의 용승해역은 해조류, 새우류, 패류 등의 생산량이 3배, 우뭇가사리의 생산력은 10에 이른다(纐辰·中尾, 1986).

이러한 인공용승류제어구조물의 생산적인 잇점을 확보하기 위해서는 기능성에대한 검토가 선행되어야 할 것이다. 따라서 구조물의 구조적인 문제에 대한 연구는 주로 잠재형식이 주된 대상이 되며 구조물의 형상에 따라 흐름장이 변화하게 되며 크게 주류역, 천이역, 역류역의 세가지 영역으로 구분할 수 있다(杜多, 1992). 이러한 흐름장에 대한 변화특성은 잠재형식의 산맥을 형성한 인공용승구조물의 기능성 및 안정성 평가에 적용된다. 또한 블록적재에 따른 대형 인공용승구조물의 기능성 및 안정성에 대한 연구는 주로 블록의 운반 및 침설, 퇴적특성에 대한 변화특성에 대한 연구가 최근에 진행되고있다(沿岸漁場組成

技術開發研究會, 1999).

용승류를 제어하기 위해 주로 잠제형식의 흐름제어 구조물을 저층부에 설치하여 저면의 흐름장을 변화시켜 저층의 흐름을 상부로 유도하게 된다. 주로 제작 및 설치가 용이한 대형 블록을 이용하여 구조물을 설치하게 되는데 최근에는 육지의 산업폐기물을 이용한 환경친화성 재료를 사용한 블록을 이용하기도 한다. 따라서 이러한 육지의 환경과 연안역의 환경개선 및 어장조성을 동시에 만족하는 연안 용승류 제어구조물의 기능성 및 시공상의 침설기술에 대한 평가가 절실히 요구된다. 따라서 본 연구에서는 블록을 이용한 인공용승구조물의 용승유량 특성을 검토하고, 구조물의 설치 따른 블록의 투하 및 퇴적에 대한 수리학적 특성을 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연안의 용승

용승구조물의 주된 기능은 효율적인 저층 및 심층에 있는 수괴를 유광층까지 유도하여 어업생산량 및 표층의 생태계를 촉진하는 것이다. 이러한 인공용승의 문제는 해역의 성층상태와도 결부되는 현상이며 일반적으로 성층계수라 하여 에너지 방정식으로부터 사용된다.

$$\log \frac{h}{V^3} \tag{1}$$

여기서 h는 수심(m)이며, V는 유속(m/sec)이다. 성층계수(sfratification parameter)는 연직수심에 대한 수평유속의 비이며 이는 수주내의 수직혼합성분을 에너지 평형으로부터 유도한 것으로 주로 조석전선의 위치를 파악 하고자 할 때 사용된다. 연구결과에 따르면 해역에 따라 다르지만 일반적으로 성층계수가 2.5~3.0의 범위인 지역에 인공용승구조물의 설치하였을 때 용승효과가 높다고 보고된 바 있다 (Yanagi & Okada, 1993). 이는 유속이 강할 경우에는 성층의 형성에 어려움이 있고, 유속이 약할 경우에는 성층의 형성 자체가 이루어지기 어렵기 때문이다. 우리나라의 경우에는 서해안 및 남해안의 성층계수가 1.5~2.5 정도로 알려져 있다.

이러한 성층은 주로 하계의 태양에 의한 수면가열로 인해 이루어지며 이는 조석전선을 형성하게 한다. 본 연구에서는 현장의 적용성을 높히기 위하여 우리나라 남해안의 연직유속분포를 대상으로 실험조건을 구성하였다.

2.2 인공용승구조물의 수리학적 특성 실험

이상에서 언급한 조석전선이나 성층계수와 같은 파라메터를 우리나라 연안역의 인공용승에 관한 일반적인 문제로 적용하기 위해 우리나라 동·남해안를 기준으로 하여 실험조건을 구성하였다.

우리나라의 동·남해안은 일반적으로 최강 창·낙조시의 유속이 0.9에서 2.6 kn이며(해양조사원, 2000) 본 연구에서 대상으로 한 유속은 1 kn를 중심으로 실험조건을 구성하였으며 이는 용승류 발생의 최소유속 인 20 $cm/\sec$를 충분히 만족하는 값이다.

수리실험은 크게 용승구조물의 기능성에 관한 부분과 안정성에 관한 부분으로 구성하였다. 기능성에 대한 문제는 용승유량실험을 통해서 확인하였으며, 안정성에 관한 문제는 투하특성과 퇴적형상에 대한 실험을 통해서 검토하였다. 각 실험에서의 영향인자를 검토하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} F[x] = \; & f_1\,[\,H, L, T, V_0] \\ & + f_2\,[\,h_s, h_u, h, \theta, d_{50}, w_B, l_B\,] \\ & + f_3[\,\alpha, l_f, V_{m-h}, V_{m-v}\,] \\ & + f_4[\,g, \rho_w, \mu, e \ldots etc\,] = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

식에서 f_1은 작용외력에 관한 물리량들이고, f_2는 구조물의 특성에 관한 물리량, f_3은 수리현상에 관한 물리량 그리고 f_4는 기타 제반 실험상의 물리량을 나타낸다. 본 실험에서는 외력조건 중 파랑에 의한 외력은 일반적인 인공용승구조물의 설치수심이 50m 이상의 대수심이므로 파랑의 영향이 상대적으로 적다. 따라서 본 실험에서는 파랑 입사에 대한 조건은 고려하지 않고 성층유속에 대한 실험을 실시하였다.

본 실험은 부경대학교 내 해양수리실험소에 설치된 회류수조에서 실시하였다. 본 수조는 불규칙파랑의 조파장치와도 연동이 가능하다. 수조의 크기는 1m(폭)×1m(깊이)×35m(길이)로 회류장치에 의한 흐름 제어가 가능하다.

본 실험의 예비실험으로 흐름제어영역에 대한 연직유속분포를 수조전체에 대하여 실시하였으며, 예비실험의 결과로 결정된 유효영역은 수조의 중앙부 5m 영역을 실험영역으로 결정하였다. 수조 및 실험영역은 Fig. 1 과 같다. 그림에서의 수조내의 중공점들은 유속 관측점이고, 수심은 80cm이다.

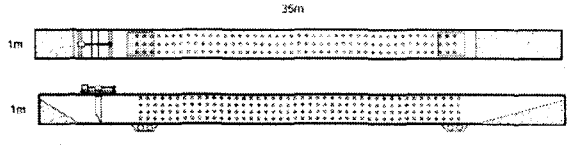


Fig. 1. Schematic diagram of flow flume.

Table 1은 본 연구에 사용된 실험조건을 나타내고 있다. 실험은 세가지 실험을 행하였으며 크게 기능성에 관한 실험과 안정성에 관한 실험으로 구성하였다. 물리변수로는 블록의 크기, 구조물의 크기 그리고 작용유속의 크기를 이용하여 용승구조물의 용승효과를 검토하고자 하였다. 물리변수들의 범위는 용승유량의 발생이 양호한 조건인 성층계수가 3.0정도를 대상으로 하였고, 이는 지역적인 특성을 가지므로 2.5에서 4.0 사이의 범위를 대상으로 하였다.

Table 1. Experimental conditions

Titles	Size of blocks ($l_{B/h}$)	Size of Structures (tan θ(B/h))	Current speed ($\frac{V_0}{\sqrt{gh}}$)	Number of blocks
Following modes test	0.01 0.025 0.0375	×	0 0.0107 0.0214 0.0321	500 500 500 500
Deposit test	0.01 0.025 0.0375	×	0 0.0107 0.0214 0.0321	2000 500 1000 1000
Upwelling test	0.01	0.25(0.5) 0.67(0.75) 0.625(1)	0.0107 0.0214 0.0321	

2.4 인공용승구조물의 안정성 평가

인공용승구조물은 일반적으로 저층 및 심층의 고유수를 저층의 흐름을 제어하여 유광부로 유도하도록 설계된다. 일반적인 구조물의 설치수심이 50m이상의 대수심이고, 본 연구는 대상이 제철산업의 부산물인 플라이 애쉬 및 슬러그의 압축성형블록을 이용한 해저제방형태의 구조물임을 고려할 때 구조물의 안정성은 직접적인 파랑에 의한 영향보다는 구조물 설치시의 블록거동을 제어하여 구조물의 설치상의 안정성을 고려하고자 하였다. 구조물의 설치수심이 깊고, 블록의 투하에 따른 적재 제방 형태임을 고려할 때 구조물의 안정성은 블록의 거동을 중심으로 검토하여야 한다. 본 연구에서는 구조물의 거동을 블록의 투하와 퇴적으로 나누고 이에 대한 특성을 검토하고자 한다.

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

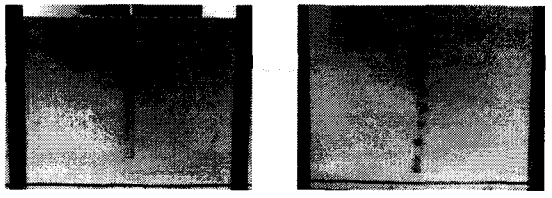
블록의 초기 입사각을 확보하고 블록투하의 초기 영향을 일정하게 하기 위해 수면에서 5mm 상부에 블록투하장치를 설치하여 실험 중의 실험자의 영향으로 인한 효과를 최소화하도록 했다.

2.4.1 블록의 투하형상 실험

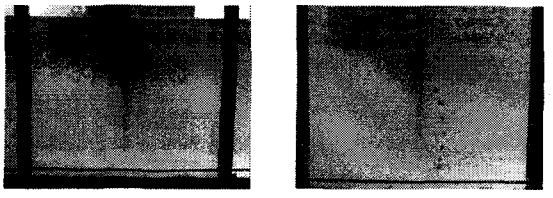
블록의 투하특성실험은 블록을 투하하였을 때 초기 수면입사각에 대한 블록의 투하궤적 및 침강속도를 검토하여 구조물의 설치를 위한 블록의 거동을 예측할 수 있다.

실험은 블록의 종류에 따른 각각 500개씩 투하하여 수면의 입수장면을 디지털비디오(Sony VX2000)를 이용하여 초당 30프레임으로 촬영 후 각 프레임으로 분할 한 후 수면입사 시 장면을 화상해석하여 초기입사각을 얻었다. 또한 투하궤적은 0.3초(10 프레임) 간격으로 화상을 캡쳐하여 침강속도를 관측하였다. 통계적인 안정성을 위해서 각각의 경우에 500회의 투하를 실시하였으며 각각의 경우에 대한 대표적인 투하특성은 Fig. 2와 같다.

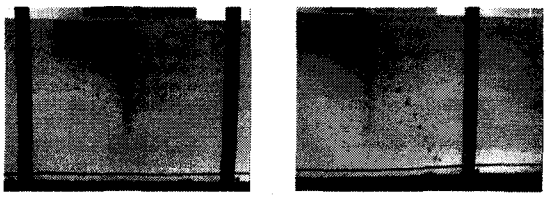
그림에서 블록의 축척효과를 검토하기 위해서 각 작용유속에 대한 다른 모형을 사용하여 검토하였다. 유속이 없을 경우에는 초기입사각이 블록의 투하위치에 영향이 크며 유속이 작용할 경우에는 블록의 크기와 유속의 관계에 따라 형태가 달라진다. Table 2 는 각 블록의 각 수심에서의 수평변위와 침강속도



a) $l_{B/h}$=0.01, $\frac{V_0}{\sqrt{gh}}$=0 b) $l_{B/h}$=0.0375, $\frac{V_0}{\sqrt{gh}}$=0



c) $l_{B/h}$=0.01, $\frac{V_0}{\sqrt{gh}}$=0.01 d) $l_{B/h}$=0.0214, $\frac{V_0}{\sqrt{gh}}$=0.01



e)$l_{B/h}$=0.01, $\frac{V_0}{\sqrt{gh}}$=0.02 f) $l_{B/h}$=0.0214, $\frac{V_0}{\sqrt{gh}}$=0.02

Fig. 2. Photo of falling motions of the blocks.

를 나타낸다. 작용유속과 침강속도는 비례하고 있음을 알 수 있으나, 블록의 크기에 더욱 민감함을 알 수 있다. 수평 변위는 유속에 더욱 지배적이다.

Table. 2. The Mean horizontal distance and mean falling speed

Size of Blocks (l_B/h)	Current speed $\left(\frac{V_0}{\sqrt{gh}}\right)$	Mean horizontal distance (l_{h-mean})	Mean falling velocity (V_f)
0.01	0	-2.06	13.662
0.01	0.01	8.22	14.468
0.01	0.02	23.43	15
0.025	0.01	7.09	20.994
0.025	0.02	17.93	18.285
0.0375	0	0.366	26.185

2.4.2 블록의 퇴적특성 실험

블록의 퇴적위치를 검증하고 예측하는 것은 블록의 적재에 따른 인공용승구조물의 설치상의 안정성을 확보하는 데에 필수적일 것이다. 따라서 본 연구에서는 인공용승구조물의 설치에 따른 블록의 퇴적형상 특성을 검토하고자 하였다.

본 실험을 위해서 입사하는 유속의 범위를 성층계수가 2.5~4.0의 범위를 가지도록 구성하였으며, 유속이 작용하지 않을 때의 값을 이용하여 입사각에 따른 퇴적위치를 확인하였다. 입사각은 수면과 블록이 이루는 각을 입사각으로 결정하였으며 이는 입수시의 디지털영상을 해석하여 얻었다. 허나 현장의 경우 조류 및 해류로 인한 영향이 크므로 유속이 작용할 때는 작용유속에 의한 영향보다 입사각에 의한 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있으며, 퇴적위치는 유속에 비례하여 이동하는 현상을 보인다.

퇴적위치의 확인을 위해 저면에 격자판을 구성하여 투하위치를 확인하였다. 각각의 투하 횟수는 8 mm의 경우 500개, 20 mm, 30 mm의 경우에는 100회씩 실시하였다. 또한 작용유속은 성층계수의 범위를 만족하는 유속을 사용하였고, 실험수심은 80cm로 일정하게 실시하였다.

Fig. 3은 성층계수에 대한 각 블록의 퇴적위치를 나타낸다. 성층계수의 감소에 따라 퇴적거리가 증가하는 것을 보이며 Fig. 4에서는 블록의 크기에 따른 퇴적거리를 나타내고 있다. 블록의 크기는 유속에 의한 항력의 증가를 가져오는 동시에 자중의 증가로 인한 침강속도의 증가도 동시에 이루어지나 본 연구에서는 블록의 비중은 하므로 블록의 크기에 대한 퇴적거리의 관계는 반비례하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 성층계수(S), 퇴적거리 그리고 블록의 크기를 동시에 표현한 그림이다. 성층계수에 따른 퇴적거리는 반비례하며 이는 유속의 영향보다. 블록의 크기에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

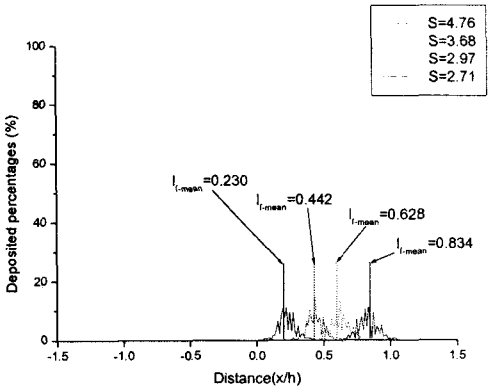


Fig. 3. Distribution of Deposited blocks with S(Stratification parameter).

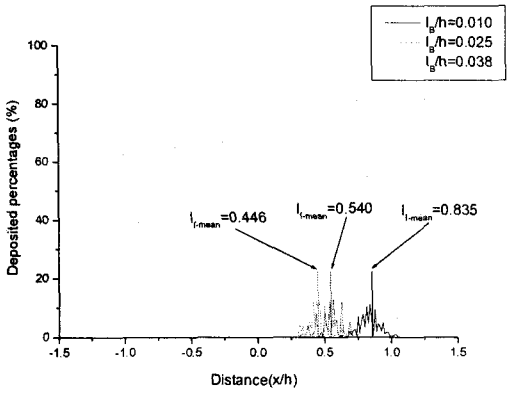


Fig. 4. Distribution of Deposited blocks with Block's size.

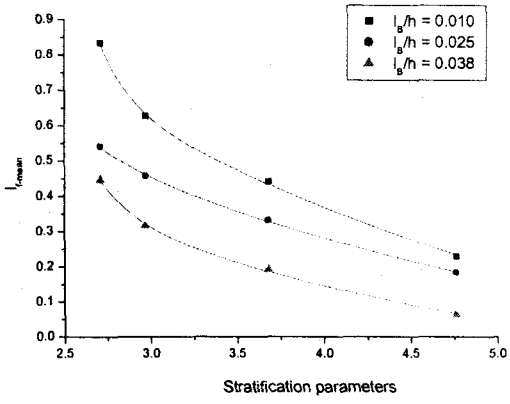


Fig. 5. Relationship between S(Stratification parameter) and l_{f-mean}.

2.5 용승유량실험

인공용승구조물 설치의 주된 목적은 양호한 인공용승유량의 유도이다. 따라서 용승유량의 검토 및 예측에 대한 연구는 필수적이며 본 연구에서는 대표적인 구조물의 단면에 대해 입사유속 조건을 변경하며 성층계수에 따른 용승유량을 검토하고자 한다. 실험조건은 표 와 같으며, 그림 과 같이 구조물 주위에서는 $\Delta x/h$ = 0.125이며, 외곽에서는 $\Delta x/h$ = 0.625의 간격으로 격자를 구성하였고 수심은 80cm로 일정하며, 계측격자는 $\Delta y/h$ = 0.125이다.

유속의 계측은 도플러유속계를 사용하여 계측하였다. 구조물은 정육면체의 기본 블록을 적재하여 단면을 제작하였고, 각 단면에서의 공극율은 일정하다.

용승유량을 평가하기 위해서 본 연구에서는 입사하는 유속이 수평유속이므로 구조물 전면에서의 흐름장의 변화와 배후면 후류역 까지의 수평유속 및 연직유속의 비를 이용하여 유향경사를 정의하였다. 식 는 용승유량검토를 위한 유향경사를 나타내며, 수평 및 수직 유속의 변화율을 통해서 용승유량을 검토한다.

실험은 도플러유속계를 이용한 구조물 주위의 정점관측을 통한 유속분포실험과 유선 및 층류관측을 위한 로다민-B 염료실험을 행하였다. 정점관측은 관측자료의 통계적 안정을 위해서 20msec의 추출간격으로 2000개의 유속값을 삼축 방향으로 계측하였으며, 각 정점에서의 산술평균값을 지점유속으로 결정하였다.

염료실험은 수심 10cm 간격으로 흐름에 저항을 최소한으로 주는 최소 지지단면에 염류투하 바늘을 설치하여 구조물주위의 층별 흐름을 관측하였다. 염료로는 로다민-B 용액을 사용하였으며, 염료의 확산화상을 녹화하여 용승유량을 검토코자 하였다.

아래의 Fig. 6은 각 구조물에 작용하는 흐름에 대한 구조물 주위의 유속벡터의 분포를 단면으로 나타낸 것이다.

그림의 위에서부터 구조물의 규모의 증가에 따른 구조물주위의 흐름장의 변화 즉 후류길이의 차이가 현저함을 볼 수 있으며 구조물의 크기가 증가하면서

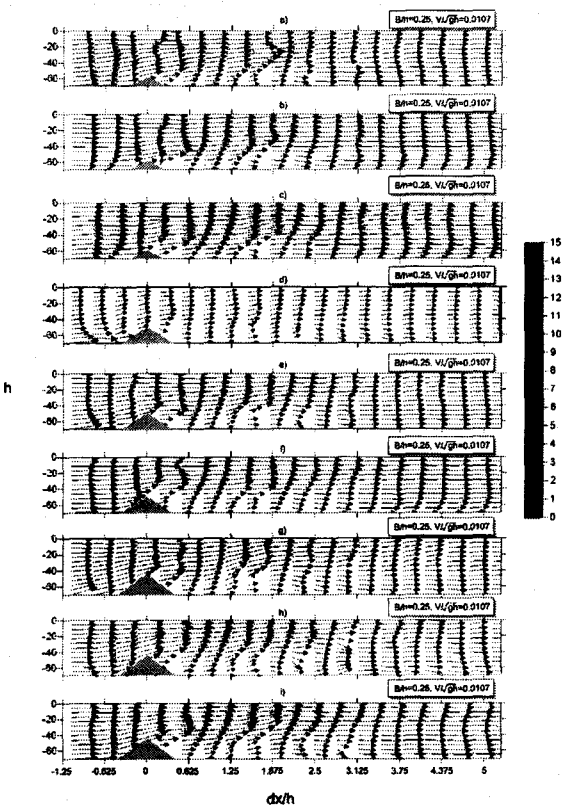


Fig. 6. Distribution of current vectors around the structures.

구조물 배후의 와동의 증가, 구조물 상부로의 유속증가가 현저하다. 또한 a)~c)의 경우 구조물의 배후 (dx/h=2.5 이상)에서는 성층을 이루며 진행하는 것을 볼 수 있다. 그러나 아래의 d)~i)까지의 그림을 보면 유속 분포의 부등에 의한 와류의 발생 및 성층의 발생이 저해되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7의 경우 염료실험을 통해 얻어진 구조물 주위의 흐름을 촬영한 그림이다. 구조물전면에서 진행된 염료가 구조물 배후에서 와류와 단면 축소에 따른 유속증가로 인해 난류가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 인공용승구조물의 규모만으로는 양

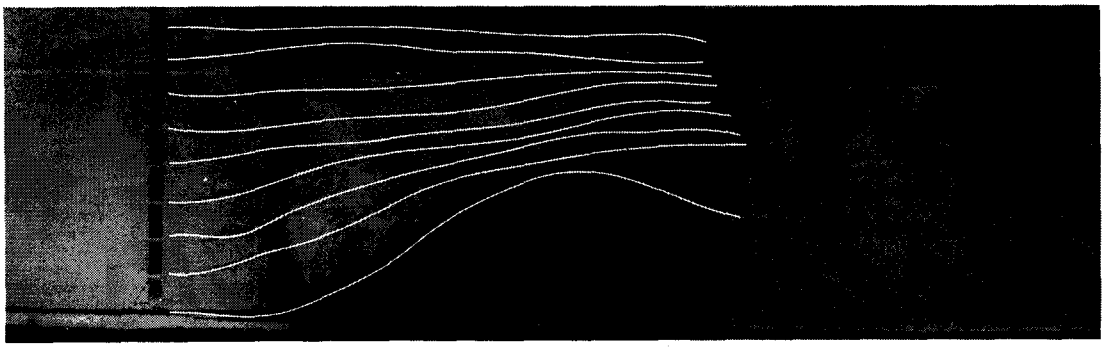


Fig. 7. Photo of flow field around artificial upwelling structures(hs/B=0.714, $V/\sqrt{gh}$=0.0086).

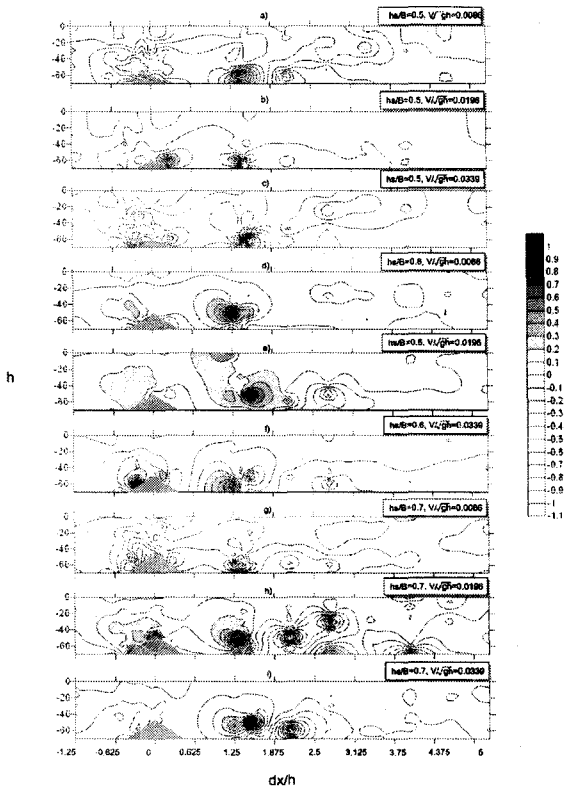


Fig. 8. Distribution of velocity gradient around the structures(V_{v-mean}/V_{h-mean}).

호한 용승유량을 얻지 못한다는 알 수 있으며 d)~i)의 경우보다는 a)~c)의 경우가 더욱더 지속적이고 안정된 용승유량을 형성할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 구조물주위에서의 수직유속에 대한 수평유속의 비(V_{v-mean}/V_{h-mean})를 나타낸 것이다. 기존의 성층을 이루고 진행하는 흐름장에 대해서 구조물을 설치할 경우 구조물에 의한 흐름장의 교란으로 연직유속이 작용한다. 따라서 이 그림은 연직유속의 수평유속에 대한 비를 나타내어 연직 유속성분의 크기를 확인하고자 한다. 그림에서 연직유속이 발달하는 위치가 명확하게 나타나며 그림을 통해 유속이 상대적으로 강하고, 구조물의 크기가 상대적으로 강할 때 연직유속은 배후면에서 발달하고 배후의 수면까지 전달되지 않고 있음을 알 수 있다. 본 그림에서 중실폐곡선의 경우 등연직속도비 선은 하향유속이며, 색이 포함되지 않은 중공폐곡석의 경우 등연직속도비 선은 상향방향 유속을 이야기한다. a), d), g)의 경우 성층계수(S)가 4.76 이며, b), e), h)의 경우는 3.68이다. 그리고 나머지 그림의 성층계수는 2.98로서 비교적 유속이 강하게 작용한다. 허나 Fig. 8을 통해서 구조물 배후에 전체적으로 연직유속을 발생시키는 경우는 c)의 경우이다. 이는 유성층계수가 3정도의 크기를 가지고 있으며, 구조물의 경사가 0.5 정도일 때이다.

이상의 세 가지 실험을 통해서 인공용승구조물의 설치와 형상에 따른 기능성을 검토하였으며 기능성을 극대화하기 위해서는 상대구조물의 높이와 사면의 경사를 동시에 고려하여 설계하여야 하며, 구조물의 설치를 위해서는 성층계수와 블록의 크기에 대한 관계를 검토하여야 한다.

3. 결 론

이상의 인공용승구조물의 기능성에 관한 연구결과 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 침강속도는 작용유속보다 블록의 규모에 더욱 민감하다.

2) 성층계수 및 블록의 크기가 증가함에 따라 퇴적거리는 감소한다.

3) 인공용승류의 발생은 구조물의 크기와 작용유속에 영향을 받지만 성층계수가 3.0 이고, 구조물의 높이가(hs/h)가 0.125~0.15 일 때 구조물 배후에서 안정적인 용승류가 발생한다.

참 고 문 헌

1) Ryther,J.H, 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.

2) 屬辰之介・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卷 第2号.

3) Yanagi,T. and M.Nakajima, 1991, Change of oceanic condition by the man-made structure for upwelling. Marine Pollution Bulletin, 23, pp.131-135.

4) Fredsoe, J. and Sumer, B.M., "Turbulent Boundary layer in wave-current motion", ASCE, Hydro Engineering, Vol. 110, No. 8, 1103-1120, 1984.

5) Foti, E. and Blondeaux, P., "Sea Ripple Formation: the Heterogeneous Sediment Case", Coastal Engineering Vol. 25, 237-253, 1995.Nelson, R..C., "Wave Bed Friction Damping over Shoaling, Movable Beds", Coastal Engineering Vol. 25, 65-80, 1995.

6) 今村 均・友田啓二郎・鈴木達雄・細野成 ·, 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.

7) 沿岸漁場技術研究會, 1996, 1997, 1998, 1999, マウンド漁場造成システムの開發にする報告書.