

정상 염수썰기의 형상과 흐름장의 물리적 특성

이 문 옥
여수수산대학 해양토목공학과

The Physical Characteristics of the Flow Field and the Form of Arrested Salt Wedge

MOON-OCK LEE

Department of Ocean Civil Engineering, Yosun National Fisheries College, 550-749, Korea

장방형 단면의 개수로를 사용하여 정상 염수썰기가 존재하는 흐름장의 유동특성을 파악하기 위한 실험을 행하였다. 염수썰기는 전체적으로 매우 안정하여 목시관측이 용이하였으나, 유속의 측정과 계면파의 관측에는 가시화수법을 이용하였다. 연직방향의 밀도변화로부터 정의되는 밀도계면은 목시관측에 의한 계면의 대략 0.5 cm 정도 아래에 존재하였으며, 밀도분포는 Holmboe 모델을 잘 만족하였다. 계면층은 난류강도(turbulent intensity)가 매우 극심한 영역으로서 그 두께는 총평균 Richardson수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며 상층의 약 16% 정도의 크기를 가졌다. 수로의 횡단면상의 유속분포는 수로측벽에 의한 마찰의 영향을 잘 반영하였고, 상층내에서는 Reynolds수가 커질수록 연직방향의 유속분포의 균질성이 증가하는 반면 하층은 대체로 방물형(parabolic type)에 가까운 분포를 보였다. 염수썰기를 썰기장(L_0)에 따라 하구부($x/L_0 < 0.3$, 단 x 는 하구로부터의 거리), 중앙부($0.3 < x/L_0 < 0.7$), 선단부($x/L_0 > 0.7$)의 세 구간으로 나누어 생각하는 경우, 연행계수는 중앙부에서 작고 하구부와 선단부에서 크게 나타났다. 또한 하구부나 중앙부는 계면이 대체로 안정하여 내부표면장력파가 발생하거나 전파하는 반면, 선단부는 매우 불안정하여 cusping ripple 또는 bursting ripple과 같은 계면파가 발생하였다. 염수썰기의 형상은 거의 직선적으로, densimetric Froude수와 Reynolds수와는 독립이었다.

An experimental study is performed in order to catch the characteristics of the flow field at arrested salt wedge, using a rectangular open channel. Arrested salt wedge is generally so stable that the observations are easy, but velocities and interfacial waves are measured with the aid of visualization method, by injection of fluorescent dyes. The density interface, which is defined as the zone of maximum density variation with depth, exists in about 0.5 cm below the visual interface, and vertical density profile is quite well satisfied with Holmboe model. Interfacial layer has high turbulent intensity and its thickness decreases as the overall Richardson number increases and has magnitude of roughly 17% of upper layer. Cross-sectional velocity distribution just shows the influence of a side-wall friction and in the upper layer vertical velocity profile also becomes uniformly as Reynolds number increases, but in the lower layer it shows nearly parabolic type. Suppose that we divide salt wedge into three domains, that is, river mouth, intermediate and tip zone, entrainment coefficient is small at the intermediate zone and large at the river mouth and the tip zone. River mouth or intermediate zone has comparatively stable interface and capillary wave therefore is produced and propagated downstream. On the other hand, tip zone is very unstable, cusping ripple or bursting ripple is then produced incessantly. Arrested salt wedge form is nearly linear and has no relation to densimetric Froude number and Reynolds number.

서 론

약혼합형하구(stratified type estuary)에서는 하천 유출류와 해수와의 밀도 기울기에 의해 해수가 하

천내를 거슬러 올라가는 이른바 염수썰기(salt wedge)가 형성되는데, 염수썰기가 河道内를 거슬러 올라가는 형태 및 길이는 하구에서의 수리조건과 河道 형상에 의해 변화한다.

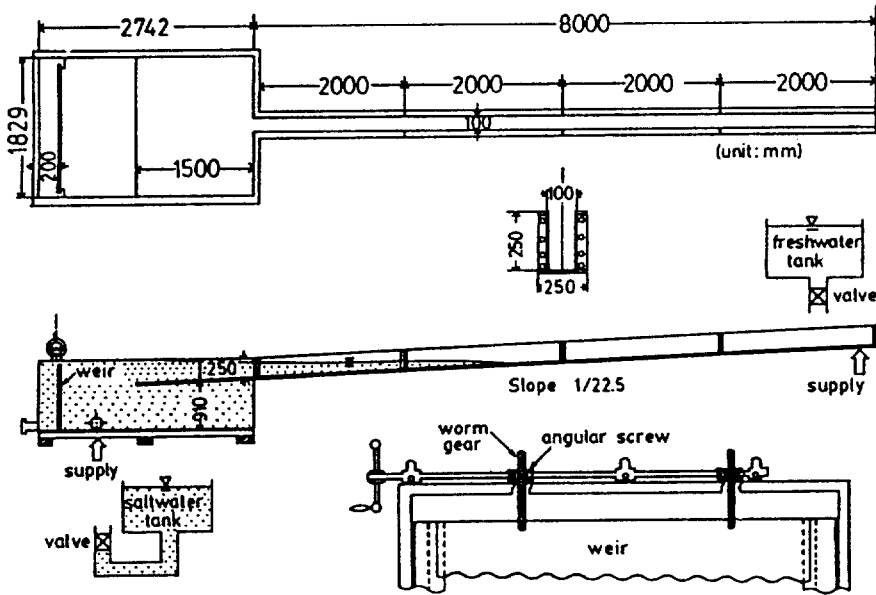


Fig. 1. The outline of experimental equipment.

최근들어 부족한 각종 산업용지의 확보, 공항도 건설, 위락시설의 공간 확충을 위한 대규모적인 하안개발사업(이를테면 water front project)과 더불어 하구의 이용도가 날로 높아져가고 있음은 주지의 사실이며, 특히 용수의 취수, 염해방지공, 하도계획, 어패류의 생식환경의 보전, 수질개선 등의 문제와 관련하여 하도내로 침입하는 염수쇄기를 수공학적인 목적에 따라 적절히 제어해야 할 필요성이 점차 대두되고 있다. 따라서 염수쇄기의 소상형태와 길이를 정확하게 예측하고 그 내부유동 구조를 면밀히 파악하는 것이 무엇보다도 절실한 과제로 생각된다.

염수쇄기와 같은 성층밀도류에 관한 선구적 연구는 1940년대 Keulegan(1949)에 의해 행하여진 이층류의 계면에서 생기는 혼합현상과 관련한 실험연구와 그 직후의 1950년대 초두의 Stommel *et al.* (1952)에 의한 염수쇄기의 실측에 기초한 연구를 들 수 있다. 그 후 밀도류는 수공학적 연구의 주요 테마의 하나로 되어 1950년대의 염수쇄기에 관한 기초적이고 정성적인 연구를 거쳐 1960년대에 들어서부터는 구체적으로 염수쇄기내의 미세구조를 해명하려고 하는 실험적, 이론적 연구로까지 발전하게 된다. 특히 많은 관심을 불러 일으킨 것은 이층류의 계면을 통해서는 혼합현상을 규명하고자 한 연구이며, 난류연행에 관한 실험이 처음으로 1950년대 중반 Rouse and Dodu(1955)

에 의해 행하여졌고 1960년대 및 1970년대에 들어 Turner(1966, 1973)에 의해 연행계수는 Richardson 수의 함수라는 사실이 밝혀져 연구에 자극을 주었다. 이것을 계기로 연행계수와 Richardson 수와의 함수형을 구하기 위한 수 많은 연구가 이루어져, 현재 연행법칙은 거의 확립되었다고 보여진다 (Tamai, 1987).

염수쇄기에 관한 연구는, 염수쇄기 형상의 해석, 계면저항계수와 연행현상, 계면에서 생기는 내부파, 성층류의 내부구조, 염수쇄기 선단부의 거동, 조석작용에 따른 염수쇄기의 비정상적 거동 및 응답특성 등으로 대변할 수 있다.

본 연구는 장래 실제의 하천에 있어서 생기는 염수쇄기의 형상 및 그 길이를 예측하기 위한 수치적 모델의 구축을 목적으로 행한 정상 염수쇄기의 실험결과로서, 염수쇄기가 존재하는 흐름장에 있어서의 밀도분포 및 유속분포, 계면층 두께, 연행현상, 내부파 및 염수쇄기 형상의 특징에 대하여 밝혀진 실험결과와 일부를 소개한 것이다.

실 험

1. 실험장치와 실험방법

실험장치의 개요를 Fig.1에 나타낸다. 수로상기울

Table 1. Experimental conditions

Run	H_0 (cm)	h_1 (cm)	ϵ	Q_1 (cm ³ /s)	Q_s (cm ³ /s)	Re_1	Fd_0	F_0'	L_0 (cm)
1	20.0	17.3	0.0203	207.6	127.8	2356	1.049	0.419	338
2	18.2	13.3	0.0109	345.9	230.6	3852	0.976	0.470	230
3	20.7	14.7	0.0040	345.9	476.9	3786	1.189	0.515	230
4	20.0	15.5	0.0201	207.6	87.8	2322	0.490	0.259	295
5	20.6	17.9	0.0223	207.6	133.0	1950	1.001	0.372	346
6	20.0	17.7	0.0109	207.6	99.7	1668	1.607	0.553	340
7	20.0	16.4	0.0129	255.0	133.0	2630	1.050	0.378	290
8	20.1	15.6	0.0129	389.0	217.0	3984	1.426	0.567	264
9	20.0	15.6	0.0082	255.0	183.0	2612	0.975	0.418	276
10	20.0	15.5	0.0045	255.0	233.0	2692	1.272	0.462	251
11	20.0	17.0	0.0266	255.0	300.0	2724	0.961	0.411	331
12	18.5	13.8	0.0069	255.0	100.0	2771	0.962	0.405	228
13	21.3	15.5	0.0031	255.0	100.0	2750	1.391	0.404	233
14	20.0	14.0	0.0142	207.6	100.0	1796	0.379	0.252	291
16	19.8	16.6	0.0140	207.6	100.0	1761	0.979	0.351	303
17	19.4	17.2	0.0139	207.6	100.0	1786	1.724	0.524	327
18	20.0	16.5	0.0139	207.6	100.0	1713	0.859	0.347	306
19	20.1	17.0	0.0139	207.6	100.0	1727	1.139	0.373	315
20	20.0	16.7	0.0140	207.6	225.0	1713	0.935	0.381	315
21	20.2	15.6	0.0138	431.8	100.0	3603	1.190	0.466	261
22	20.5	16.7	0.0123	207.6	134.8	1564	0.807	0.388	322

기가 1/22.5이고 길이 800cm, 폭 10cm, 높이 25cm의 아크릴제의 장방형 개수로로, 해역에 상당하는 길이 274cm, 폭 183cm, 높이 91cm의 강제의 수조의 중앙에 연결한 것을 사용하고 있다. 하구에서의 수심급증에 의한 국소류효과를 피하기 위하여 하구로부터 외측 150cm까지 개수로부와 동일한 기울기로 저판을 설치하였다. 염수쇄기는 수조에 일정농도의 염수를 채운 후, 담수를 수로상류단으로부터 흘러보내어 형성(形成) 시켰다. 이 때 염수쇄기의 선단 및 계면위치를 일정하게 유지하기 위하여 수조하류단의 저부로부터 염수보급을 행하여, 정상에 달하고부터 측정을 개시하였다. 염분농도는 도전율계로 측정하고, 펜레코드에 의해 기록하였다. 유속측정은 수소기포법을 써서, 비디오촬영 후 해석하였다. 또 성층구조는 메질렌블루용액 또는 우라늄용액에 의해 가시화하였다.

2. 실험조건

본 실험에서 사용하고 있는 수로의 수로상기울기는 1/22.5이기 때문에 그 상류단에서의 담수의 흐름은

사류(supercritical flow)가 되어, 도수(hydraulic jump)가 생긴다. 그러므로 본 실험은 배수영역내에서의 현상을 재현한 것이다. 도수(hydraulic jump)의 위치는 염수쇄기의 선단에서부터 1cm정도 상류측으로서, 그 형태도 약도수(weak jump)에서부터 안정도수(steady jump)이기 때문에 염수쇄기의 거동에 미치는 영향은 거의 무시할 정도로 작다고 생각된다. Table 1에 실험조건을 나타낸다.

결과 및 고찰

1. 내부계면위치의 정의

이층밀도류에 있어서의 내부계면의 부근에서는 내부파가 발생하거나 어느 정도의 두께를 가진 계면층이 존재하며 특히 비정상류의 경우에는 하층유속의 영향도 커서, 계면층(경우에 따라서는 중간층이라고도 한다)의 변화도 현저하다. 또한, 계면저항계수나 연행계수 등을 실험에 의해 구하는 경우에는 내부계면 위치의 취하는 방법에 따라 그 결과가 상당히 다르다(Tamai, 1986).

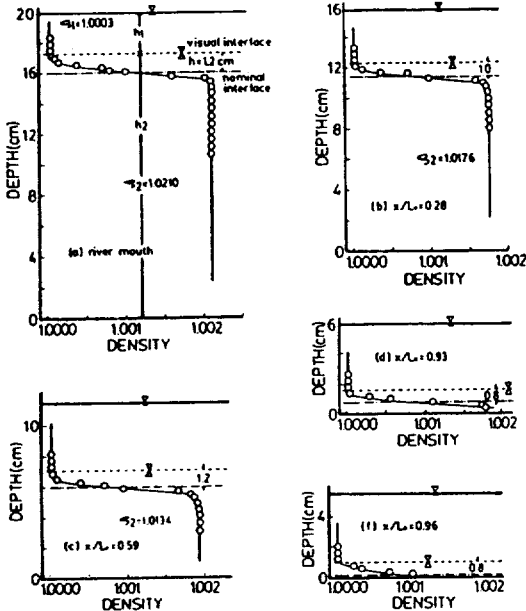


Fig. 2. The relationship between the density interface and the visual interface (Run1).

종래부터 널리 사용되어 온 내부계면위치의 정의로서는 여러 가지가 있으나 (Kashiwamura *et al.*, 1969 ; Dermisiss *et al.*, 1984 ; Suga *et al.*, 1976), 염료착색에 의한 목시계면 또는 두 층간의 중간밀도로 되는 점을 내부계면으로 정의하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 본 실험에 있어서 이들 두 방법에 의한 계면위치의 차이를 Fig.2에 나타낸다.

이 결과에 의하면 목시계면은 대략 상층의 밀도가 변화하기 시작하는 위치에 상당하고, 중간밀도로 정의되는 계면 위치와의 차는 약 1.0 cm 정도이다. 이와 같은 차이는 염수쇄기의 선단에서 약간 변동하지만, 전역에 걸쳐 거의 일정하다. 이층류의 밀도분포형에 대하여는 소위 Holmboe 모델이 자주 사용되고 있는데 (Tomimaga, 1976), 이 모델과 실험결과와를 비교한 것이 Fig.3이다. 그림에서 실선으로 나타낸 것은 Holmboe 모델에 의해 계산한 것으로, 다음 식으로 표현된다.

$$\rho = \bar{\rho} \exp(-\alpha \tanh(z/h)) \quad (1)$$

여기서 $\bar{\rho}$ 는 상하층의 밀도 ρ_1, ρ_2 의 곱의 제곱근 ($=\sqrt{\rho_1 \rho_2}$). α 는 상하층간의 밀도차를 나타내는 무차원 매개변수, Z 는 수심, h 는 약층의 특성적 두

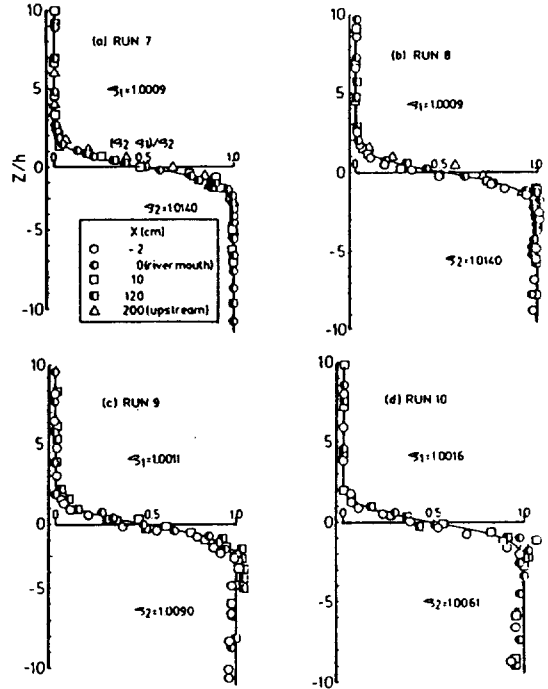


Fig. 3. The comparison between experimental results and Holmboe's density model.

께이다. 실험치는 염수쇄기의 전역에 걸쳐서 Holmboe 모델을 만족하고 있으며, 또 본 실험범위에 있어서는 특성적 두께 $2h$ 는 0.4~1.0 cm 정도로 큰 변화는 보이지 않는다. 즉, 전술한 Fig.2에서 목시에 의한 계면위치와 두층간의 중간밀도로 되는 수심과의 차이가 1.0 cm 정도이며 또 Holmboe 모델에 있어서의 밀도계면과 목시계면과의 차도 0.5 cm 이하인 점으로부터, 본 연구에 있어서는 측정이 용이한 목시에 의한 계면위치를 내부계면으로 정의하였다.

2. 연직방향의 밀도분포

Fig.4는 연직방향의 밀도분포 및 밀도차에 의해 무차원화한 밀도변동의 평균치(즉 rms)를 나타낸다. 우선 평균밀도는 임의 수심까지 일정치를 유지하지만, 계면부근에서 수심과 함께 선형적으로 증가하며 하층내에서는 다시 일정치에 달하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 평균밀도가 수심에 따라 변화하지 않는 층을 수면으로부터 각각 상층, 하층으로 정의하고, 선형적으로 변화하는 밀도기울기가 존재하는 영역을 계면층(interfacial layer)으로서 정의한다(Crapper *et*

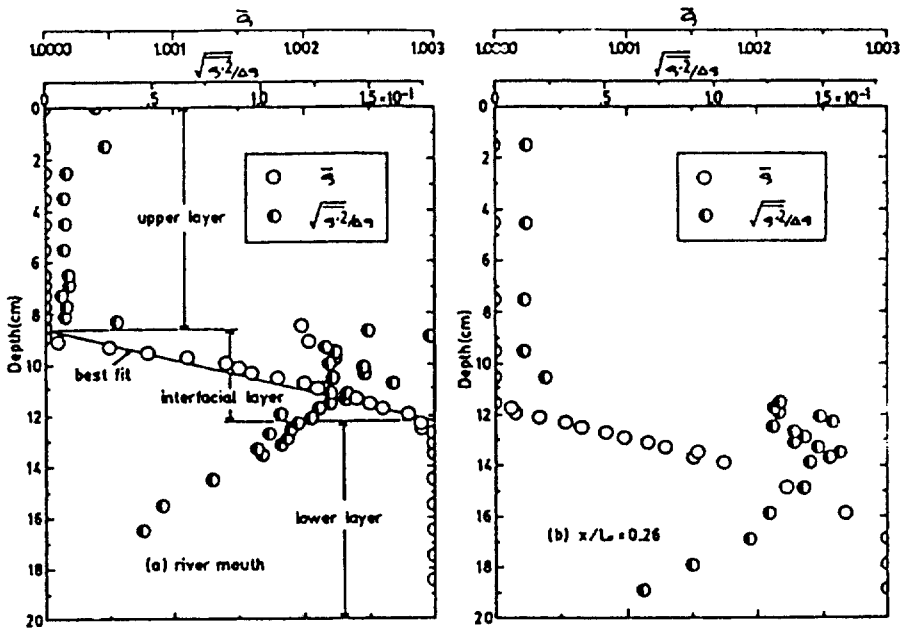


Fig. 4. Typical example of the nondimensional rms of density fluctuations and vertical density distributions (Run 13).

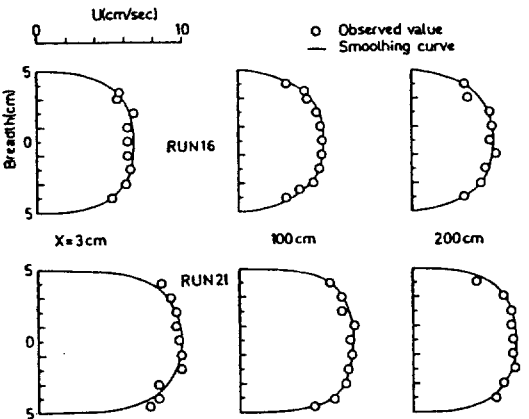


Fig. 5. Cross section velocity distributions at the laboratory open channel.

al., 1974 ; Fernando *et al.*, 1985). 본 연구에서 이 층류로서의 염수쇄기의 해석에서는 계면층을 하층에 포함하고 있다. 한편, 밀도변동량의 평균치(rms)는 계면층의 상한에서 커져서, 계면층의 중앙에서 최대치를 취하고 있다. 그 후 변동량은 수심과 함께 감소하지만, 하층에서의 밀도변동량의 평균치는 상류측 ($x/L_0 = 0.64$, x 는 하구로부터의 수평거리, L_0 는 염수쇄기의 길이)에 있어서도 하구와 거의 같은 크기를 보인다. 이것은 상류로 갈수록 하층에서의 불안정이

증가하고 있음을 의미한다.

3. 유속분포

일반적으로 이층류의 문제를 취급함에 있어서는 실제의 하천을 가정하여 벽면마찰을 무시하는 경우가 많다. 그러나 본 연구에서 사용하는 실험수로에서는 전수심이 20 cm 정도에, 폭이 10 cm로 작기 때문에 결코 수로측벽의 영향을 무시할 수 없다. Fig.5에 실험수로의 횡단방향의 유속분포를 수소기포법에 의해 측정된 일례를 나타낸다. 동 그림에서 알 수 있듯이, 벽면마찰의 영향이 수로의 중앙부근에까지 미치어 유속 분포가 균일한 영역은 Reynolds 수에 관계없이, 불과 2~3 cm의 범위에 한정되어 있다. 즉 측벽의 영향을 무시할 수 없으며, 따라서 본 실험에서는 계면저항계수의 평가에 있어서 벽면에 의한 마찰 효과의 보정을 행하여야 한다고 생각된다.

염수쇄기와 같은 성층장의 유속 분포에 관하여는 최근 이론적, 실험적 연구가 수 많이 이루어져, 성층장을 세 개의 영역, 즉 상부난류층, 안정층 및 천이층으로 나누는 해석법이 일반적으로 사용되고 있다 (Keulegan, 1966 ; Suge *et al.*, 1982). Fig.6은 수소기포법에 의해 얻어진 수로 중앙에서의 연직방향의 유속분포를 나타낸다. 이 그림 중의 a와 b는 Reyno-

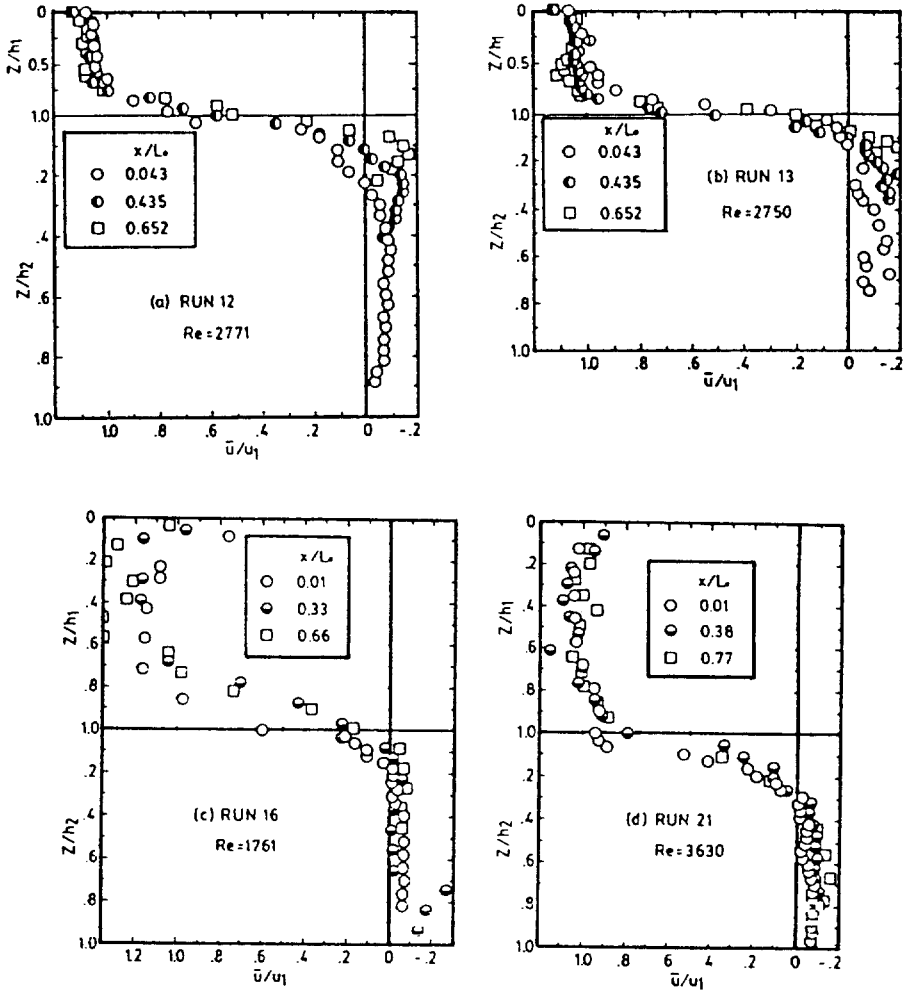


Fig. 6. Vertical velocity distributions at the middle of cross section of a channel.

Reynolds수가 2750 이상으로 order적으로 거의 유사하며, c는 Reynolds가 1761, d는 3630으로 가장 큰 경우이다.

이 결과로부터 상층내의 유속은 계면부근에서의 점성이 탁월한 직선분포 또는 대수분포 영역을 제외하면, 균일한 분포를 이루고 있음을 알 수 있다. 또한 a, b에서는 표면 유속이 $1.06 u_1$, 계면에서의 유속이 $0.63 u_1$ 으로서 (여기서 u_1 은 상층의 평균 유속임), Keulegan(1966)의 실험결과와 잘 일치하고 있다. 그러나, c에서의 상층유속은 분산이 크며, d에서는 수면과 계면근방이 일부를 제외하고는 상층의 전체가 거의 균일한 유속 분포를 보인다.

이러한 유속 분포의 차이는 Reynolds수의 크기에

의존하고 있다. 한편, 하층에서의 유속은 방물형(parabolic type)에 가까운 분포를 나타내고 있으나 Shima *et al.*, (1964), Officer (1978)와 같은 최대유속을 가진 수심과 유속이 0으로 되는 수심 등은 분명치 않다.

4. 계면층의 역할과 그 두께

난류 연행에 관한 연구를 통하여 연행계수 (entrainment coefficient)가 Richardson수의 함수라는 사실이 밝혀진 이래, 이 양자간의 함수형을 정하기 위한 수많은 이론적, 실험적 연구가 행하여져, 다양한 성층장에 적용할 수 있는 연행 법칙이 거의 확립되었으나, 연행현상에 있어서의 혼합과정이나 혼합기구

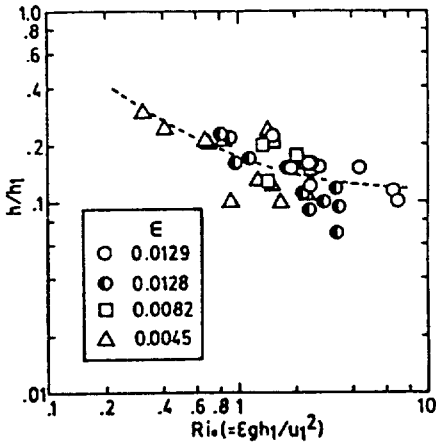


Fig. 7. The relationship between the interfacial layer thickness and overall Richardson number.

등의 보다 구체적인 정보에 대하여는 아직 충분히 설명되어 있지 않다. 이러한 연행의 세부기구를 설명하려는 움직임과 함께 계면층의 역할 또는 그 내부기구에 관한 연구가 최근에 많다(Craper *et al.*, 1974; Deardorff *et al.*, 1980; Narimousa *et al.*, 1987; Long, 1978; Xuequan *et al.*, 1986). 그 대표적인 연구가 Linden(1973)의 vortex ring 모델로서 혼합은 난류층에 의해 주어진 vortex ring을 계면이 반동(recoil)시키는 것에 의해 이루어지는 것을 명확히 하고 있다.

Fig.7은 본 실험에 의해 얻어진 overall Richardson 수 R_o 에 따른 계면층의 두께 h 의 변화를 나타낸다(h_1 은 상층수심). 동 그림에서 계면층의 두께의 Richardson수에 약한 의존성을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 관계는 다음식과 같은 회귀곡선에 의해 주어진다.

$$h/h_1 = 0.109 + 0.0649R_o^{-1} \quad (2)$$

이 결과는 Deardorff *et al.*, (1980)에 의한 대기 혼합층을 모의한 실험결과에서의 무차원 계면층의 두께 $h/h_1 = 0.21$ 또는 Craper *et al.*, (1974)의 0.23~0.24 보다 작지만, Richardson수 R_o 가 커짐에 따라서 어떤 일정치에 접근하는 경향은 일치하고 있다. 또한 계면층 두께의 평균치는 $h/h_1 = 0.16$ 으로, Fernando *et al.*, (1985)의 0.15와 잘 일치하고 있다.

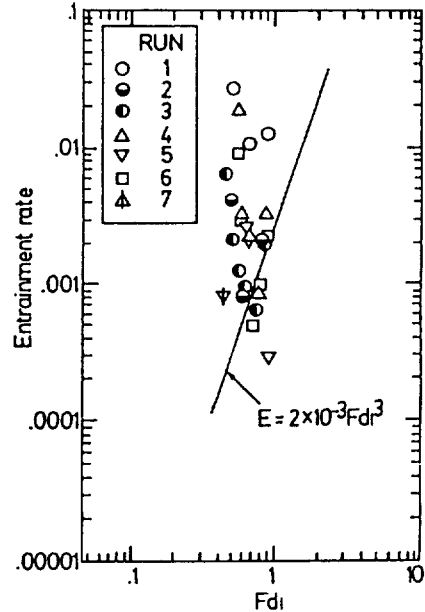


Fig. 8. Variations of entrainment coefficient versus the densimetric Froude number.

5. 연행계수

Fig.8은 연행계수 E 와 Densimetric Froude수 F_{di} 과의 관계를 나타낸다. 그림 중의 실선은 Suga *et al.*, (1971)에 의한 결과이다. 동 그림으로부터 연행계수 E 는 $3 \times 10^{-4} \sim 2.7 \times 10^{-2}$ 의 범위로, 상당한 분산이 보여진다. 이러한 원인으로서 연행계수가 10^{-2} 의 order보다 큰 값은 염수쇄기 선단부에서 얻어진 것으로서, 밀도가 Froude수의 산정시 사용되는 상류에서의 밀도변화가 고려되지 않은 점과, 계면정의의 차이 및 측정상의 오차 등이 생각된다. 또한 이 그림에는 나타나 있지 않지만, 연행속도는 $2 \times 10^{-2} \sim 9.1 \times 10^{-2}$ cm/sec의 범위로, Egashira(1980)에 의한 실험결과와 거의 유사하다.

Fig.9는 염수쇄기의 흐름 방향에 따른 연행계수의 변화를 나타낸다. 동 그림으로부터, 연행계수 W_e/u_1 는 일정하지 않으며, 흐름 방향을 따라 변하고 있는 것을 알 수 있다. 또 이 결과로부터 염수쇄기에는 흐름장의 형태가 다른 세 개의 영역이 존재하며 그 중에 선단에서의 연행계수가 가장 큰 것을 알 수 있다. Table 2는 염수쇄기를 하구부, 중앙부 및 선단부의 세 영역으로 나누어 각 영역에 대한 연행계수의 평균치를

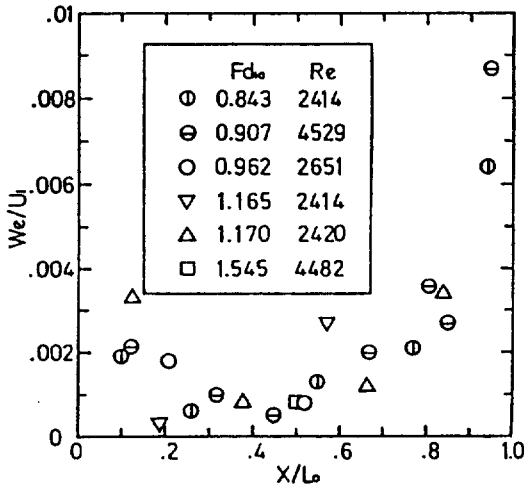


Fig. 9. The longitudinal variation of entrainment coefficient along with the wedge.

구한 것으로서, 전술한 결과를 뒷받침 하고 있다. 단, 본 실험은 $Q_1=208\sim390\text{ cm}^3/\text{sec}$, $\epsilon (= \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}) = 0.0031\sim0.0254$, $R_i = 2410\sim4530$, $Fd_\omega = 0.843\sim1.545$ 의 범위에서 이루어졌다.

일반적으로 염수짜기의 형상과 관련한 흐름장의 이론해석에 있어서는 정수압근사, 상사성의 가정 등이 성립하는 중앙영역을 대상으로 하고 있는데, 전술한 Fig.8 또는 Table 2의 결과로부터, 하구부나 선단부는 정수압근사가 무너지거나 동압이 우세한 영역으로 보여진다.

6. 계면파(interfacial waves)

이층류계면에서의 불안정은 전단불안정(shear instability)에 의해 생기는데, 이것은 계면에 있어서의 유속이나 밀도의 변동에 의해 규정되는 interfacial Richardson수 R_i 와 관련되어 있으며, 그 임계치는 이론적으로 약 0.25로 알려져 있다(Tamai, 1987; Narimousa *et al.*, 1987; Wyatt, 1978). Wyatt(1978)에 의하면, 계면 불안정을 나타내는 임계 Richardson수, 즉 interfacial Richardson수 R_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_i = \frac{g\Delta\rho\delta}{\rho_0 u_i^2} \leq 0.3 \quad \delta \cdot \frac{2\pi}{\lambda_c} \approx 0.8 \quad (3)$$

여기서, ρ_0 : 기준밀도, $\Delta\rho$: 두층 유체간의 밀도차, g : 중력가속도, u_i : 계면에서의 상층류의 평균유속,

Table 2. Mean values of entrainment coefficients in regard to each domain.

Domain	Entrainment coefficient	Relative ratio
River mouth ($x/L_0 < 0.3$)	0.00188	1.525
Intermediate ($0.3 \leq x/L_0 < 0.7$)	0.00123	1.0
Wedge tip ($x/L_0 \geq 0.7$)	0.00448	3.633

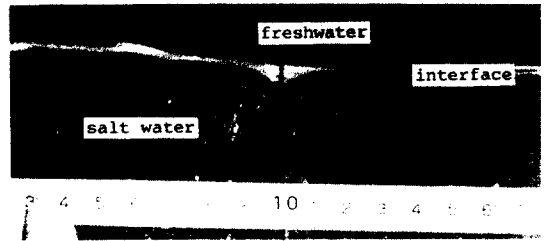


Plate 1.

δ : 대표적 길이 scale, λ_c : 불안정으로 되는 임계파장

위의 식으로 부터, 계면에서의 평균유속 u_i 를 알면 대표적길이 scale δ 가 정해져 계면파가 불안정하게 되는 임계파장 λ_c 가 구하여 진다. 이러한 계면파의 쇄파에 의해 연행이 생기고, 또 계면파가 전단층에 의하여 공급받은 난류 에너지는 점성에 의해 소모 되기 때문에, 계면파는 계면에 작용하는 저항에도 중요한 역할을 한다. 그래서 계면저항 및 혼합현상을 해명하는 실마리를 파악하기 위하여 목측과 가시화에 의해 계면파 및 선단부를 측정 한 결과를 소개한다.

염수짜기의 하구부에서는 계면이 매우 안정하여, 파장이 짧은 고주파수의 파는 거의 보이지 않는다. 관찰된 계면파의 파장은 대략 7 cm정도로, 분류상 *internal capillary wave* 또는 *internal gravity wave*에 속하는 것으로 보여진다(사진 1, 2)(Hirata *et al.*, 1976; Murota *et al.*, 1978). 여기서, 계면의 불안정과 관련한 대표적 길이 δ 는 난류 운동의 적분길이의 scale l 과 같다고 생각하고 전술한 계면층의 두께 h 와의 경험칙 $h \approx 1.5l$ 를 이용하면(Crapper *et al.*, 1974; Narimousa *et al.*, 1987), 식 (3) 및 실험조건으로부터 interfacial Richardson 수 $R_i = 0.21$ 이

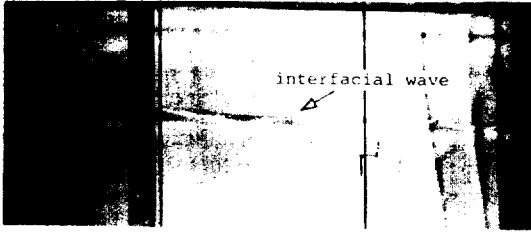


Plate 2.

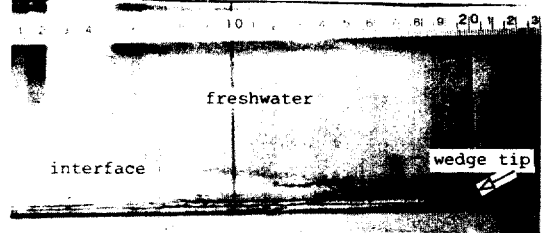


Plate 5.

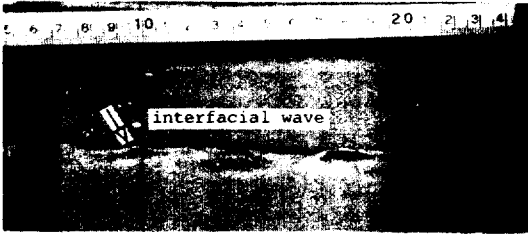


Plate 3.

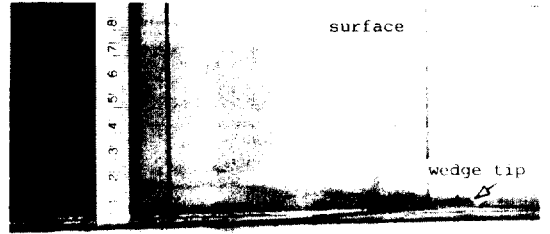


Plate 6.

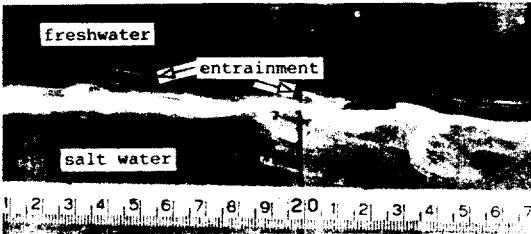


Plate 4.

언어진다. 이 값은 계면 불안정이 야기되는 임계 Richardson수인 0.3 또는 0.25보다 작음에도 불구하고, 계면은 극히 안정하다. 이와 같은 계면의 안정은 Wyatt(1978)의 식에 의한 임계파장 λ_c 의 3.9 cm보다 본 실험에서 얻은 계면파의 파장 7 cm가 더 길다는 사실로 부터 이해할 수 있다.

염수쇄기의 중앙부에 있어서는 계면은 비교적 안정하나, 선단부로부터 전파되는 파의 영향으로 크고 작은 파가 불규칙적으로 관찰된다(사진 3). 이러한 파가 중앙부를 통과하는 과정에서 상층류의 요란에 의해 발생한 고주파수의 파는 서서히 감쇄하고, 저주파수의 파가 하구쪽으로 진행해감에 따라 발달해 간다. 그래서 충분히 발달한 저주파수의 계면파에 의해 유속변동이 발생하여(Komatsu *et al.*, 1980), 염수가 담수층으로 또는 담수가 염수층으로 감겨 들어가는 모습이 보인다(사진 4).

한편, 염수쇄기의 선단부는 상층류와 충돌하는 곳으로 가장 불안정한 상태에 있다. 특히 염수쇄기가 형성되어 아직 충분한 시간이 경과하지 않았을 때는 선단은 끊임없이 진동한다. 이 때 염수쇄기의 선단이 하류로 향해 이동하는 경우는 상하층간의 상대속도가 작아지므로 계면에 작용하는 전단력이 작아져 파정이 뾰족한 안정한 파가 존재한다(사진 5). 이에 대해, 선단이 상류로 향해 이동하는 경우에는 상하층간의 상대속도가 커져 계면전단력도 커지므로 상층으로 진행되는 모습이 관찰된다(사진 6). Murota *et al.*, (1978)의 내부파의 분류에 의하면, 전자의 파정이 뾰족한 파는 *cusping ripple*에, 또 후자의 꼬리모양으로 진행되는 파는 *bursting ripple*에 속하는 것으로 판단된다. 이러한 파는 모두 *internal ripple*에 속하는 고주파수의 파로서 하류로 전파해 간다.

7. 정상 염수쇄기의 형상

실제의 하구에 있어서 염수쇄기의 형상 및 그 깊이를 양호하게 예측하는 것은 환경수리학적 면에서 매우 중요하며, 또한 염수쇄기의 거동은 언제나 비정상적이므로 여하한 하구조건 변화에도 적용할 수 있는 범용적인 예측모델의 개발이 요망된다. 그러나 하구조건 또는 하천유량의 시간적 변화가 대단히 긴 주기를 가진 근사적인 정상상태를 생각하고 그것에 의해 얻어진 염수쇄기의 거동에 관한 해석

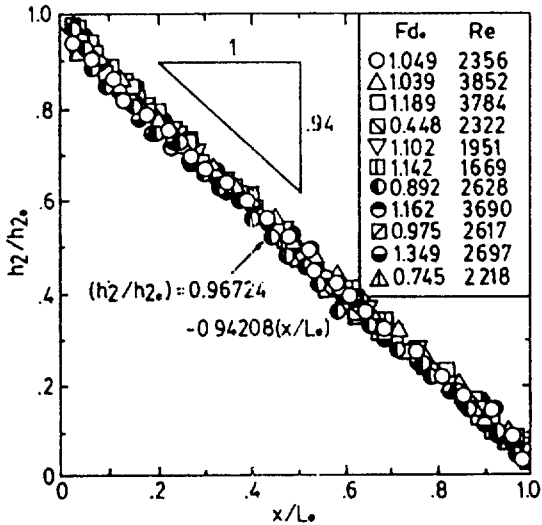


Fig. 10. Nondimensional salt wedge.

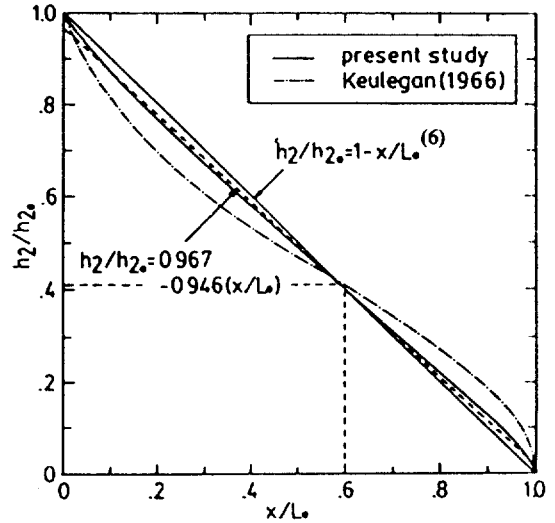


Fig. 11. Comparison of salt wedge from.

결과는 실용면에서도 유효하게 사용될 수 있다. 그래서, 우선 비정상 염수쇄기의 거동과 비교하기 위하여 행한 정상적 염수쇄기의 형상에 관한 실험결과를 소개한다.

Fig.10은 염수쇄기의 형상으로서, 횡축은 쇄기의 길이 L_0 에 의해 무차원화한 하구로부터의 거리 x 를, 종축은 하구에서의 염수심 h_{20} 에 의해 무차원화한 염수심을 나타내고 있다. 이 그림으로부터, 염수쇄기의 형상은 하구에서의 밀도 Froude수나 Reynolds수에 관계없이 상사인 것을 알 수 있으며, 이것은 Keulegan(1966)에 의해서도 동일한 결과를 얻고 있다. 또 염수쇄기의 형상은 하구와 선단부근의 일부를 제외 하고는 거의 직선형이며 Hukuoka *et al.*, (1986)에 의해 행하여진 Agano River에 있어서의 염수소상의 실측결과에서 보여지는 계면형상과도 일치하고 있다. 본 실험결과에서 얻어진 무차원 염수쇄기의 형상이 가진 물리적 의미를 검토하기 위하여 편의상 다음 식과 같은 직선형을 근사한다.

$$h_2/h_{20} = 0.97 - 0.95(x/L_0) \quad (4)$$

$$h_2/h_{20} = a - b(x/L_0) \quad (5)$$

Fig.11은 전술한 염수쇄기의 형상을 평면수로(flat floor channel)에서 행한 Keulegan(1966)의 결과와 비교한 것이다. 그림 중의 식(6)은 염수쇄기의 형상이 완전한 직선형, 즉 $a=b=1$ 의 경우의 식이다. 이 그

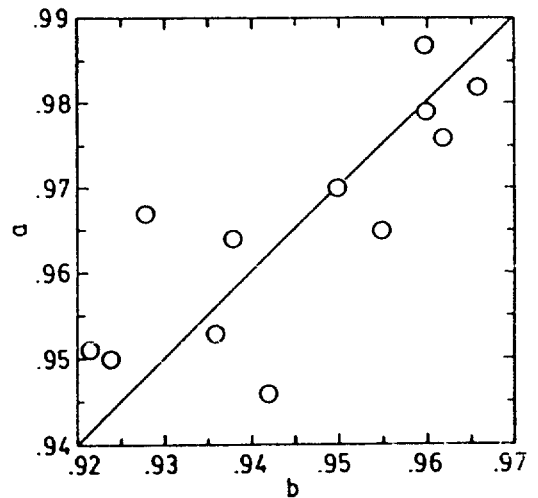


Fig. 12. Relationship between a and b, indicating nonlinearity of arrested salt wedge.

림에서, 본 실험결과 및 Keulegan에 의한 결과는 대체로 $x/L_0=0.6$, 즉 쇄기장의 60%가 되는 점에서 직선형과 교차함을 알 수 있다. 또한 본 실험결과에서 얻어진 염수쇄기의 형상은 거의 직선에 가까우나, Keulegan의 결과는 비선형성이 보다 강하다. 이러한 형상의 차이는 본 실험에서 사용한 급경사 수로와 Keulegan의 평면 수로에서의 흐름의 조건 또는 저면의 영향이 각각 달랐기 때문으로 생각된다. 전술한 식 (5)에서의 계수 a 및 b는 염수쇄기의 직선형으로

부터의 벗어난 양, 즉 비선형성의 정도를 나타내는 하나의 지표로서, a 및 b 가 1과의 차가 클수록 썰기형상의 비선형성이 강한 것을 나타낸다. 이들 계수 a 와 b 와의 관계를 나타낸 것이 Fig.12이다. 이 그림에서, a 와 b 는 서로 독립적인 것이 아니고, 다소의 분산은 있지만 선형적 관계에 있음을 알 수 있다. 즉 계수 b 의 변화에 따라 a 가 일의적으로 변화하는 것은 염수썰기형상에 있어서의 어떤 임의점(본 실험결과와 경우는 하구로부터 썰기장의 60%인 점)을 경계로 하여 반드시 아래로 볼록한 부분과 위로 볼록한 부분으로 나누어지는 것을 의미한다.

결 론

정상 염수썰기의 흐름장의 물리적 특성을 파악하기 위한 수리실험을 행하여, 횡방향 및 연직방향의 유속분포와 밀도분포를 측정하고, 또 가시화수법에 의한 계면파를 관측하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 상층에 있어서의 유속분포는 Reynolds수가 커짐에 따라 균일해지는 경향을 보인다. 또한 수로의 횡방향의 유속분포는 Reynolds수의 대소에 불구하고 측벽에 의한 마찰의 영향을 받는다.

2. 계면층의 두께는 overall Richardson수와의 약한 상관관계에 있었고, 본 실험의 범위에 있어서는 평균하여 상층 두께의 약 16% 정도의 크기를 가진다.

3. 염수썰기를 하구부($x/L_0 < 0.3$), 중앙부($0.3 \leq x/L_0 < 0.7$) 및 선단부($x/L_0 \geq 0.7$)의 세구간으로 나누어 생각한 경우, 하구부와 선단부에서의 연행계수는 중앙부에서의 값의 각각 1.5배 및 3.6배로 크게 나타났다.

4. 하구부에서의 계면파는 파장 7 cm 정도로 매우 안정하며 internal capillary wave에 속하는 것으로 보인다. 중앙부에 있어서도 계면은 대체로 안정하나, 선단부로부터 전파되는 파의 영향으로 대소의 파가 불규칙적으로 겹쳐져서 관찰된다. 그러나 염수썰기의 선단부에서는 가장 불안정하여, 하층의 염수가 상층으로 연행되는 soaring 등, cusping ripple 또는 bursting ripple의 계면파가 존재한다.

5. 염수썰기의 형상은 거의 직선적이며 밀도 Froude수 및 Reynolds수와는 무관하다. 이것은 평균수로에서 행한 Keulegan(1966)의 결과에서 보여지는 것과 같은 염수썰기의 비선형적 형상과는 대조적이며, 급경사수로의 하나의 특징으로 보여진다.

또한 염수썰기의 형상은 하구로부터 썰기장의 약 60%되는 점을 경계로 하여 아래로 볼록한 부분(하구부)과 위로 볼록한 부분(선단부)으로 나누어진다.

사 사

본 논문을 정리하는 데 있어 시종일관 열심히 지도해 주신 일본 오오사카대학 공학부 토목공학과 무로타 아키라 선생님, 또한 마지막까지 원고작성에 각별한 지도와 수많은 조언을 아끼지 않았던 동 대학의 나카쓰지 선생님 및 미치오쿠 선생님께 깊은 감사말씀 드립니다.

참고문헌

- Crapper, P.E. and P.F. Linden, 1974. The structure of turbulent density interfaces. *J. Fluid Mech.*, **65**: 45-63.
- Deardorff, J.W., G.E. Willis and B.H. Stockton, 1980. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer. *J. Fluid Mech.*, **100**: 41-64.
- Dermissis, V. and E. Partheniades, 1984. Interfacial resistance in stratified flows. *J. Wat. Port and Coastal Ocean Eng.*, **110**(2): 231-252.
- Egashira, S., 1980. Fundamental studies on the mixing mechanism and flow in stratified density field. The thesis of Doctor of Engineering, Kyoto Univ., p. 87 (in Japanese).
- Fernando, H.J.S. and R.R. Long, 1985. On the nature of the entrainment interface of a two layer fluid subjected to zero-mean-shear turbulence. *J. Fluid Mech.*, **151**: 21-53.
- Hirata, T. and A. Murota, 1976. Experimental studies on interfacial entrainments in stratified density current (I). Proc. the 31st Ann. Conf. of the Japan Soc. of Civ. Eng., **2**: 381-382 (in Japanese).
- Hukuoka, S. et al., 1986. Actual conditions of salt water going up Agano River. Proc. the 33rd Japanese Conf. on Coastal Eng., **33**: 596-600 (in Japanese).
- Kashiwamura M. and S. Yoshida, 1969. The flow mechanism at river mouth (II). Proc. the 16th Japanese Conf. on Coastal Eng., **16**: 209-212 (in Japanese).
- Keulegan, G.H., 1949. Interfacial instability and mixing in stratified flow. J. Res. Nat. Bureau of Standard, 487-500.
- Keulegan, G.H., 1966. The mechanism of arrested saline water. In: Estuary and Coastline Hydrodynamics, pp. 546-574. Ed. by A.T. Ippen, McGraw-Hill Book Company, NY.
- Komatsu T., T. Tsubaki and Shimota G., 1980. Turbulence and internal wave at the interface of a two

- layer flow. Proc. the 35th Ann. Conf. of the Japan Soc. of Civ. Eng., **35**: 596-600 (in Japanese).
- Long, R.R., 1978. A theory of mixing in a stably stratified fluid. *J. Fluid Mech.*, **84**: 113-124.
- Murota A. and T. Hirata, 1978. The mixing mechanism and the characteristics of internal wave in stratified density currents. Proc. the 22nd Japanese Conf. on Hydraulics, **22**: 107-112 (in Japanese).
- Narimousa, S. and H.J.S. Fernando, 1987. On the sheared density interface of an entraining stratified fluids. *J. Fluid Mech.*, **174**: 1-22.
- Officer, C.B., 1978. Arrested salt wedge flow. In: Physical oceanography of estuaries (and associated coastal water), pp. 105-112. Ed. by C.B. Officer, Wiley Interscience Co., NY.
- Rouse, H. and J. Dodu, 1955. Turbulent diffusion across a density discontinuity. *Houille Branche*, **10**: 522-532.
- Shima Y., H. Shiigai and N. Tamai, 1964. On the salt wedge at laboratory open channel with a slope. Proc. the 19th Ann. Conf. of the Japan Soc. of Civ. Eng., **19**(2): 71-72 (in Japanese).
- Stommel, H. and H.G. Farmer, 1952. Abrupt change in width in two layer open channel flow. *J. Mar. Res.*, **11**: 205-214.
- Suga, G. and A. Takahashi, 1971. Two or three considerations on the saline wedge by a large channel experiment. Proc. the 26th Ann. Conf. of the Japan Soc. of Civ. Eng., **27**(2): 137-140 (in Japanese).
- Suga, G. and A. Takahashi, 1976. Entrainment coefficients in a two layer flow of the freshwater and salt water. Proc. the 31st Ann. Conf. of the Japan Soc. of Civ. Eng., **31**(2): 383-384 (in Japanese).
- Suge K. and N. Tamai, 1982. On velocity distributions of arrested saline wedge. Proc. the 37th Ann. Conf. of the Japan Soc. of Civ. Eng., **37**(2): 503-504 (in Japanese).
- Tamai, N., 1986. Unification of entrainment concepts and its application in buoyancy-associated flows. Tokyo Univ., 9-17 (in Japanese).
- Tamai, N., 1987. Unification of entrainment concept and formulae of the entrainment coefficient. Proc. the Japan Soc. of Civ. Eng., **38**1(II-7): 1-11 (in Japanese).
- Tominaga S., 1976. Internal Waves. In: Waves in the ocean, pp. 528-569. Ed. by S. Tominaga, Kyoritsu Publishing Co., Tokyo (in Japanese).
- Turner, J.S., 1966. Jet and Plumes with negative or reversing buoyancy. *J. Fluid Mech.*, **26**: 779-792.
- Turner, J.S., 1973. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press, London, p. 368.
- Wyatt, L.R., 1978. The entrainment interface in a stratified fluid. *J. Fluid Mech.*, **86**: 293-311.
- Xuequan, E. and E.J. Hopfinger, 1986. On mixing across an interface in stably stratified fluid. *J. Fluid Mech.*, **166**: 227-244.

Received January 23, 1990

Accepted June 7, 1990