

## 몰수실린더에 의하여 생성되는 쇄파주위 점성유동의 고찰 (제2부: 점성유동특성)

현범수\*, 신용현\*\*

### On the Viscous Flow Around Breaking Waves Generated by a Submerged Cylinder (Part 2 : Aspects of Viscous Flow)

by

B.S. Hyun\* and Y.H. Shin\*\*

#### 요 약

본 논문은 수면하에서 정속으로 움직이는 원형실린더에 의하여 생성되는 강제쇄파에 대한 실험적연구의 제2부이다. 강제쇄파의 역학적 메카니즘을 규명하는 차원에서 쇄파주위 유동의 점성유동 특성을 조사하였다. 이를 위하여 물체와 쇄파영역 후류에서의 속도와 전수두손실 분포를 측정하였으며 쇄파내부의 난류특성을 보기 위하여 열선유속계를 이용하여 난류강도를 측정하였다. 그 결과 쇄파부근과 그 후류에서 경계층유동과 유사한 유속결손과 수두손실분포를 확인하였으며 쇄파와 몰수체 간의 상호작용을 볼 수 있었다. 또한 측정된 난류용력값은 쇄파영역의 난류유동특성을 잘 보여주었다.

#### Abstract

The present paper is Part 2 of three-part paper for an experimental study on breaking waves generated by a submerged cylinder. Measurements of velocity and head loss profiles at the wakes of cylinder and breaker as well as the turbulent intensities in breaking region were made to elucidate the viscous aspects of breaking waves. Their mutual correlation is also investigated. It is found that the head loss profile is an excellent indicator of the strength and extent of breaker. Very high turbulent intensities measured at and just downstream of the breaker indicate the consequence of energy transfer of wave breaking into turbulence.

접수일자 : 1999년 8월 20일, 재접수일자 : 2000년 1월 21일

\*정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

\*\* 학생회원, 한국해양대학교 조선공학과 대학원

1. 서 언

수면하에서 정속으로 전진하는 물수실린더에 의하여 생성되는 자유표면유동 문제는 물체형상의 단순함에도 불구하고 물수체와 쇠파에서 생성되어 전개되는 와류의 복잡한 상호작용 문제를 내포하고 있기 때문에 유체역학의 대표적 benchmark의 성격을 지니고 있다. 때문에 이에 대한 자료의 축적은 쇠파현상의 이해뿐만이 아니라 와류들간의 상호작용, 와류와 자유수면과의 상호작용 등 많은 유체역학분야 연구개발에 초석이 될 수 있을 것이다.

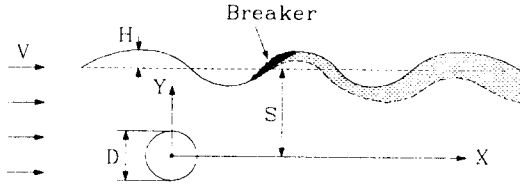


Fig. 1 Schematics of experiments

Fig. 1은 물수체에 의하여 생성되는 쇠파영역 (breaker)과 그 하류에 형성되는 쇠파영향권을 보여주고 있다. 쇠파가 발생하여 전개되는 하류영역은 여러 실험결과 등에 의하면, 물체후류에 전개되는 반류 (wake) 내부유동과 유사하며 그 내부의 유속분포 역시 경계층 (혹은 mixing layer로 불리우는 혼합층)내 유속분포와 유사한 것으로 알려져 있다. Duncan [1]이 전수두 (total head loss)를 측정하여 쇠파저항을 구한 것도 쇠파현상의 이러한 점성유동특성에 기인한다. 또한 쇠파현상이 이상유체에서 파의 위치에너지와 운동에너지가 난류에너지로 변환되는 현상임을 감안할 때 쇠파주위 유동은 난류경계층유동과 유사한 유동형태임을 유추할 수 있다. 이러한 유동현상은 물체의 종류, 물수깊이 및 유속에 따라 여러 가지 복잡한 양상을 띄게 될 것이다.

본 연구는 현범수, 신용현[2]이 실린더에 의하여 생성되는 자유표면유동을 파형관측과 압력분포 측정을 통하여 조사한 연구의 제2부이다. 제1부의 연구결과를 바탕으로 쇠파의 물리적 특성파악과

물수체와의 상호작용에 의한 점성유동장의 변화에 대한 기본적인 조사를 수행하였다. 이를 위하여 쇠파영역에서의 속도결손과 수두손실을 측정하였으며, 특히 난류계측을 통하여 쇠파와 난류유동간의 관계, 즉 쇠파에 의하여 파에너지가 난류에너지로 변화하는 것과 쇠파발생지점에서 후류로 가면서 난류강도가 감소되는 경향 등을 조사하였다. 본 연구는 궁극적으로 쇠파에 의하여 야기되는 와도 및 난류특성을 밝히는데 기본적인 자료로 이용될 것이다.

2. 실험장치, 계측방법 및 실험조건

자세한 실험장치와 방법은 본 논문의 제1부 [2]와 같다. 여기서는 쇠파현상을 점성유동의 관점에서 해석하기 위하여 물수실린더 후류에서의 유속분포와 수두손실 및 난류강도를 측정하였다. 실험모형은 직경 (D)이 7cm인 원형실린더로서 물체 후류에서의 유속 ( $u$ )과 수두손실  $\Delta H (= H_0 - H)$ 은 표준 Prandtl 관을 물체후류 측정점에 설치하여 전수두  $H$ 와 정압수두 (pressure head)를, 그리고 교란되지 않은 균일 유동부에도 1개를 설치하여 전수두  $H_0$ 를 수주형 마노미터로 읽어들이고 후 자료처리 하였다.

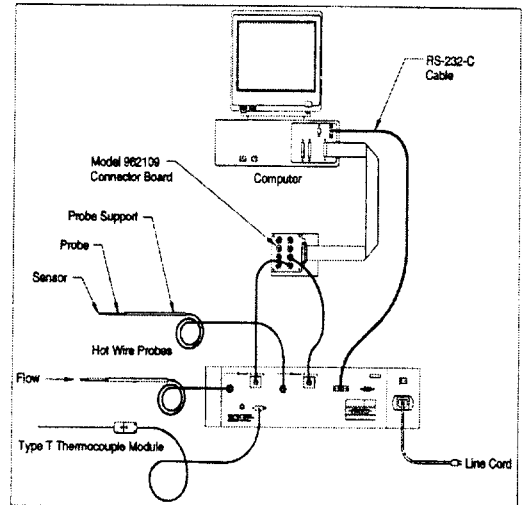


Fig. 2 Hot film anemometer

난류강도 ( $\sqrt{u'^2}/V \times 100$ )의 계측은 1차원 hot-film probe와 TSI IHW100 열선유속계를 사용하였으며 TSI 소프트웨어인 "Flowpoint"를 이용하여 신호처리 하였다. Fig. 2는 열선유속계 시스템의 구성도를 보여주고 있다. Hot-film sensor는 z축 방향, 즉 수조의 폭방향에 평행하게 위치시켰으므로, z축에 수직한 방향의 난류성분을 계측하게 된다. 여기서 z축에 수직한 방향의 난류성분은 흐름의 진행방향 (x방향)과 수조의 깊이방향 (y방향) 성분이 합성된 것으로서, 계측된 신호는 순수한 의미의  $\sqrt{u'^2}$ 와는 다소 다름에 유의해야 한다. 신호의 sampling rate는 1000 Hz, 자료취득시간은 약 6초로 정하였다.

실험은 Froude수  $Fr = 1.0$ 에서 수행하였는데, 이에 해당되는 유속(V)은 0.83m/s이다. 여기서  $Fr = V/\sqrt{gD}$ 이며, Reynolds수 ( $Re = VD/\nu$ )는  $5.8 \times 10^4$ 이다. 물체후류에서의 유속과 수두손실 계측은 몰수깊이(S)가  $S/D = 2.14, 2.86, 4.29$ 인 3종류의 대표적인 파형에 대하여 여러 X/D 위치를 선정하여 계측하였다. 난류응력도 유속계측결과와 상호 비교를 위하여 동일한 위치를 택하였다. 여기서 대표적인 파형이란 각각 ① 쇄파가 발생하지 않고 정상파가 잘 생성되는 몰수심, ② 쇄파가 어느 정도 발생하되 충분히 후방에서는 정상파가 존재하는 몰수심 및 ③ 쇄파가전체 자유표면에 걸쳐 강하게 발생하여 정상파가 더 이상 보이지 않는 몰수심의 경우이다.

### 3. 결과해석 및 고찰

#### 3.1 실린더 후류에서의 속도분포

먼저 몰수체 하류에서의 유속분포를 살펴본다. Fig. 3은 Duncan [1]의 Fig. 5를 재생한 것으로서 수중익의 몰수깊이가 얕아지면서 쇄파가 발생한 경우 그 하류의 두 번째 파도의 골에서 얻어진 값들이다. (그림에서 ○가 실제 계측된 유속값을 나타냄.) 선형 Stokes 파에 의한 유속분포는 수표면에 접근할수록 점차로 증가하게 되나,

쇄파가 발생하게 되면 수표면 부근 쇄파가 영향을 미치는 일정 구간 내에서 경계층 유동 (혹은 Mixing Layer)에서와 유사한 유속의 결손이 나타남을 잘 보여주고 있다.

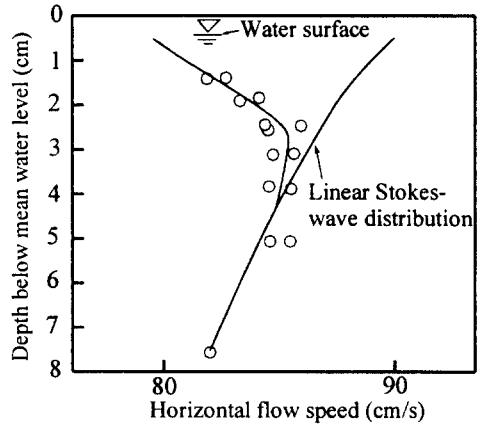


Fig. 3 Horizontal flow velocity versus depth (2nd trough after the breaker, from Duncan [1])

쇄파가 발생하지 않는 몰수심인  $S/D=4.29$ 에서의 물체후류 속도분포는 Fig. 4와 같다.

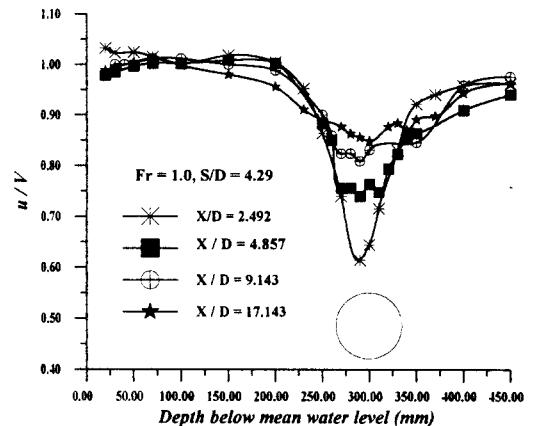


Fig. 4 Horizontal velocity distribution behind cylinder at various axial locations ( $S/D = 4.29$ )

물체의 반류 분포가 후방으로 진행할수록 폭이 넓어지면서 유속분포는 평편해 지는 전형적인 반류분포를 관찰할 수 있다. 수면근처의 유속변화, 즉 수면근처에서의 속도결손은 전혀 눈에 띄지 않는다. 반면 쇠파가 어느 정도 발생하는 조건인  $S/D=2.86$ 에서의 유속분포는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 수면근처에서 속도의 결손을 확연히 감지할 수 있다.

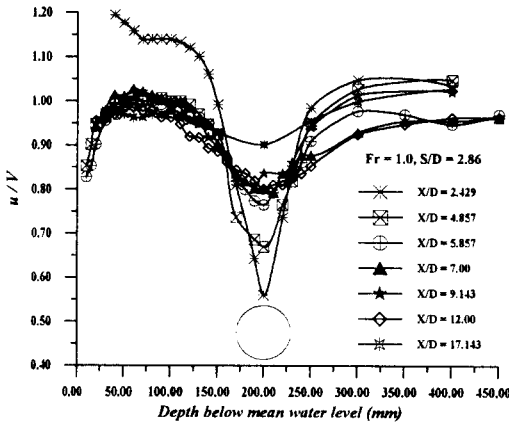


Fig. 5 Horizontal velocity distribution behind cylinder at various axial locations ( $S/D = 2.86$ )

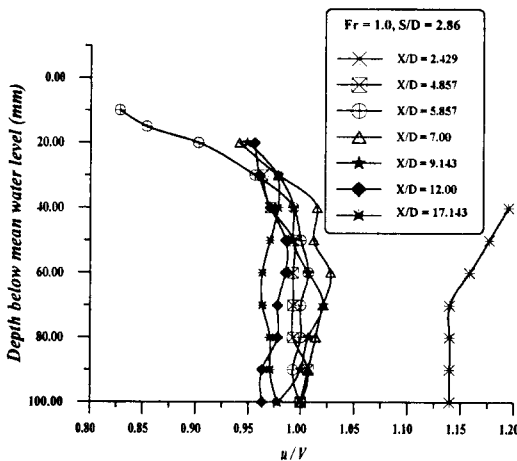


Fig. 6 Enlarged view of Fig. 5 in breaking region ( $S/D = 2.86$ )

즉, 쇠파발생 지점 (대략  $X/D=4.5$ )의 전방인  $X/D=2.43$ 과 달리  $X/D=4.86$  이후에서의 쇠파 경계층내 속도분포는 일반적인 경계층 (혹은 반류) 유속분포와 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 5의 쇠파발생 영역 부근을 확대한 그림인 Fig. 6로부터 본 실험은 Duncan의 결과와 같은 경향을 보여줌을 좀 더 자세히 확인할 수 있다. 한편, 물수깊이가 더 얕아진  $S/D=2.14$ 에서의 유속분포 (Fig. 7)는 쇠파발생 지점부터 하류로 감에 따라 wake의 변화를  $S/D=2.86$ 의 경우보다 더 명확하게 보여주고 있다.

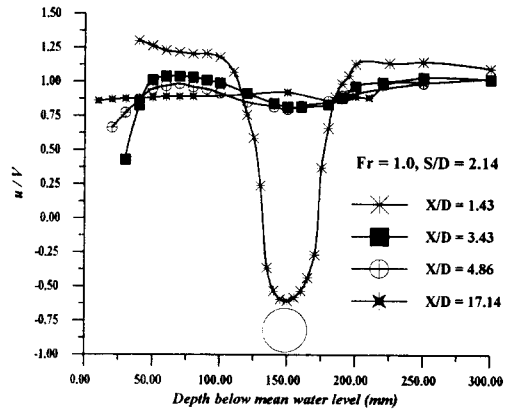


Fig. 7 Horizontal velocity distribution behind cylinder at various axial locations ( $S/D = 2.14$ )

이로부터 쇠파내부의 유동은 물체에 의하여 생성되는 반류와 아주 흡사한 점성유동임을 짐작할 수 있으며, 쇠파가 발생하는 지점을 "breaker"라는 명칭으로 사물화 한 것이 근거가 있음을 알 수 있다. 그러나 쇠파영역이 워낙 국부적이고 그 내부에서 기포의 과도한 포함 등으로 인하여 Prandtl 판이 수표면 가까이 까지 접근하지 못하는 문제점이 있었기 때문에 속도분포로부터 반류 폭과 wake centerline velocity의 변화 등의 특성을 자세히 파악하기에는 한계가 있었다.

### 3.2 수두손실 계측결과

위에서 본 수표면 부근에서의 유속감소는 점성의 영향, 좀 더 정확하게는 난류의 영향에 의한

것으로서, 이를 보다 더 규명하기 위하여 쇄파영역 내부에서의 전수두손실 ( $\Delta H$ )을 계측하였다. Fig. 8은 쇄파가 발생하지 않는 몰수심  $S/D=4.29$ 에서의 값이다. 계측위치가 하류로 갈수록 몰수체의 반류 폭이 증가하는 일반적인 양상이 보이며, 실린더 후류의 형상은 거의 대칭성을 가지고 있다.

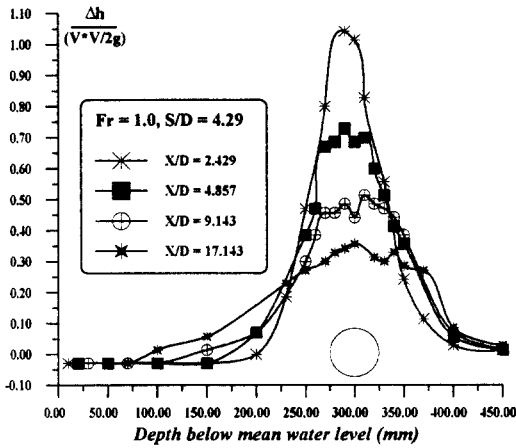


Fig. 8 Head loss distributions behind cylinder ( $S/D = 4.29$ )

수표면에서의 수두손실은 보이지 않으며  $X/D = 17$  정도까지 하류로 이동하여도 자유표면 파도와 물체의 후류간의 상호간섭은 존재하지 않는다. 이때의 파형은 잘 발달된 비점성 정상파가 형성되는 경우이다.

쇄파발생이 육안으로 판별 가능한  $S/D=2.86$ 에서의 Fig. 9를 보면, 쇄파 발생부의 상류 ( $X/D=2.43$ )에서는 실린더에 의한 반류분포만이 일어나나 쇄파가 일어나는  $X/D=4.86$ 에서는 수표면 가까이 좁은 영역에서 급격한 수두손실과 물체에 의한 반류 내부에서의 수두손실 분포가 점점 근접하다가  $X/D=7$ 에서 서로 합쳐진 (merging) 이후에는 서로를 구별할 수 없게 되는데, 이 정도가 되면 자유표면은 물체에 의한 반류의 영향을 받아서 매우 난류적인 양상을 보이기

시작하며 규칙적인 정상파가 거의 소멸되어 진다. 물체에 의한 반류분포를 보면 이미 비대칭성이 나타나고 있는데 이는 자유표면과 실린더 반류 간의 상호작용에 의한 것으로 여겨진다. 수표면 가까이를 자세히 보기위하여 확대한 그림은 Fig. 10에 나타나 있다.

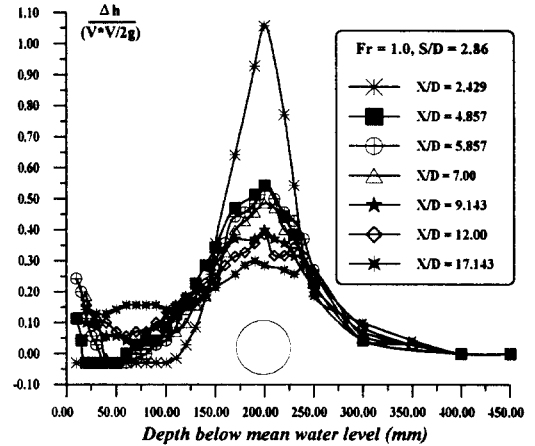


Fig. 9 Head loss distributions behind cylinder ( $S/D = 2.86$ )

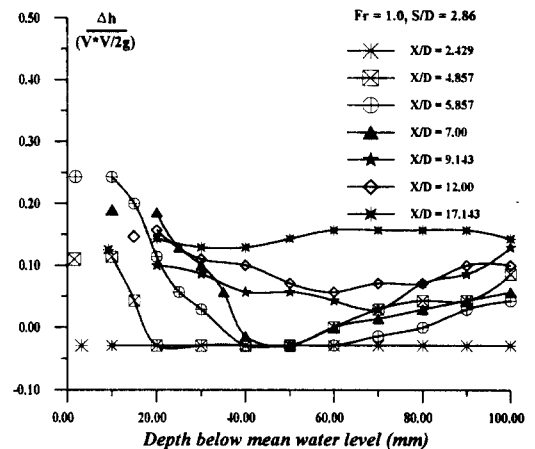


Fig. 10 Enlarged view of Fig. 9 in breaking region

하류로 갈수록 쇄파에 의한 수두손실의 범위가 수표면으로부터 깊이방향으로 점차 확대되는 것과

더불어 수두손실값 자체의 크기도 줄어들지 않는 경향이 있는데 이는  $X/D=4.86$ 의 위치가 아직 "breaker"라 불리는 쇄파영역 상에 있기 때문에  $X/D=5.86$ 에서의 수두손실보다 적게 측정된 것이 기인하는 것으로 판단된다. 그렇지 않다면 평균흐름으로부터 방출되는 에너지로 생성되는 난류의 생성구역 (쇄파영역)에 의하여 발생하는 운동량 결손 (혹은 쇄파저항)값이 하류로 가면서 증가할 수 없기 때문이다. 이에 대하여는 추후 보다 정밀한 측정을 통하여 수표면 가까이에서의 수두손실을 측정한 후 이를 적분함으로써 각  $X$ 위치에서의 쇄파저항을 구하여 비교하는 작업이 요구된다.

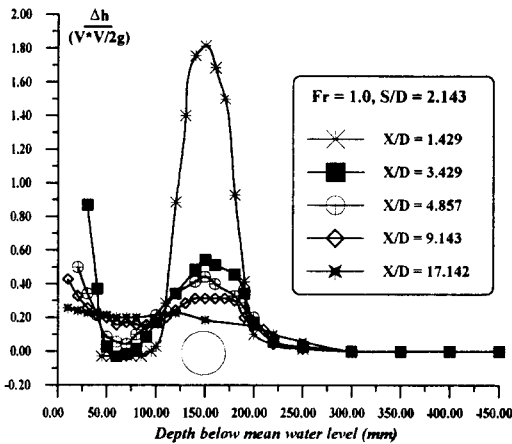


Fig. 11 Head loss distributions behind cylinder ( $S/D = 2.14$ )

쇄파가 완전히 전체 수표면을 지배하여 정상파가 관찰되지 않는  $S/D=2.14$ 에서의 결과는 Fig. 11과 같은데, 전체적으로 자유표면과 반류의 상호 간섭이 더 심해졌음을 볼 수 있다. 즉,  $X/D=3.43$  근방에서 이미 쇄파에 의한 수두손실 분포가 실린더에 의한 반류와 서로 합쳐진다. 수표면 근처에 대한 보다 자세한 관찰은 Fig. 12를 참조하자. 쇄파에 의한 수두손실분포는 하류로 갈수록 완만한 변화를 보이는 전형적인 경계층 혹은 반류의 특성을 잘 나타내고 있다.

수두손실의 측정이 속도분포측정보다 반류의 폭을 결정하는데 보다 유용함은 지금까지 소개한 그

림들로부터 쉽게 짐작할 수 있겠다.

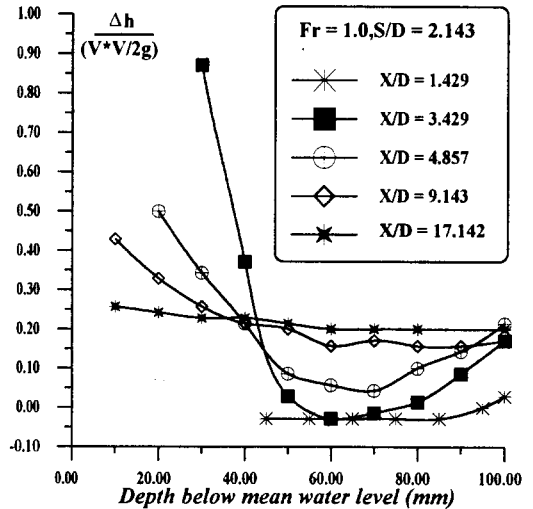


Fig. 12 Enlarged view of Fig. 11 in breaking region

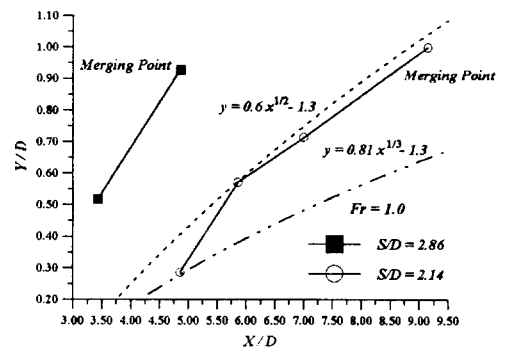


Fig. 13 Breaker width versus  $X/D$

Fig. 13은  $S/D=2.86$ 과  $S/D=2.14$ 에서 측정된 수두손실 분포로부터 얻어진 쇄파영역의 폭 (두께)을 보여주고 있다. 각각  $X/D=9.14$ 와  $X/D=4.86$  이후는 쇄파에 의한 반류와 물체의 반류가 서로 이미 합쳐진 상황이기 때문에 반류의 폭을 분별하기가 어려운 위치이다. 여기서 반류의 폭은 수면으로부터 수두손실값이 거의 제로가 되는 지점까지의 거리이다. 경향을 파악하기는 어려

우나 하류로 진행하면서 증가되는 반류의 폭은 대체적으로  $x^{1/2}$ 에 비례하는 2차원 반류와  $x^{1/3}$ 에 비례하는 축대칭 반류 유동의 특성치 사이에 놓여 있는 것으로 판단되었다. 이상에서 보듯이 쇄파에 의한 수두손실의 계측은 쇄파의 강도와 영역을 파악하는데 매우 유용한 정보를 제공하며, 쇄파의 영역은 육안으로 관찰되는 것보다 훨씬 광범위한 영역에 걸쳐 영향을 미침을 알 수 있었다.

3.3 난류용력분포

물수체에 의하여 발생하는 강제쇄파 현상은 Baba [3]가 비대전박의 선수에서 발생하는 쇄파를 연구하면서 오래전에 지적하였듯이 명백한 점성의 영향 (즉, 조파저항이 아니라 난류에 기인한 점성저항의 일부) 임을 보았다. 관찰한 바에 의하면 쇄파영역에서 물입자들이 부서지는 현상 (spraying)을 보이는 것으로 보아 어떤 변동속도가 강하게 존재함을 알 수 있다. 이 변동속도가 순수한 의미의 난류 (random, chaotic) 성분인지, 어떤 종류의 일관성있는 구조 (coherent structure)인지는 순수 유체역학적인 측면에서 연구가 계속되어야 할 중요한 분야이다.

이러한 쇄파영역의 난류특성을 조사하기 위하여 single-sensored hot-film을 이용하여 난류용력을 계측하였다. 액체 중에서 열선유속계를 사용하는 것이 공기 중에서의 실험에 비하여 자료의 정확도가 현저히 감소 함은 주지의 사실이다. 즉, hot-film의 가열정도는 물에서 보통 섭씨 65도 정도로서 공기 중에서 열선 (hot wire)을 사용할 때 설정하는 섭씨 200도 이상의 overheating에 비하여 매우 낮기 때문에 계측의 정도가 떨어지며, 수온의 변화에 따른 센서의 응답이 급격히 변하기 때문에 안정된 신호취득이 곤란하다. 또한 통상 회류수조수에 다량의 불순물과 기포가 함유되어 있는 것도 실험에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 그러나 난류의 계측을 위하여는 현재까지 열선유속계가 가장 유력한 방법으로 알려져 있기 때문에 정성적으로나마 쇄파내부의 난류강도를 조사하기 위하여 hot film을 사용하여 후류유동을 계측하였다.

먼저 쇄파가 수면상에서 어느정도 발생하는 조건인  $S/D=2.86$ 에서 몇 개의 하류위치에서 계측한 난류강도분포를 Fig. 14에 보였다. 쇄파가 발생하는 지점 ( $X/D=4.50$ ) 부근인  $X/D=4.86$ 에서 매우 큰 난류강도를 보여주고 있다. 이는 쇄파 지점에서의 강력한 난류생성, 즉 파에너지로부터 난류에너지로의 활발한 에너지 이동을 의미한다.  $X/D=7$  이후에서도 난류강도가 수면근처에서 다소 높게 계측되는 경향이 보이기는 하나 그 정도는 쇄파발생지점에 비하면 현저히 감소된 수치이다. 쇄파가 보다 크게 발생하는 계측조건인  $S/D=2.14$ 에서의 난류강도는 Fig.15에 나타나 있다.

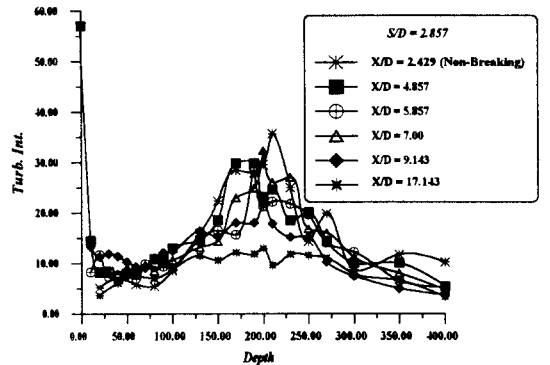


Fig. 14 Turbulent intensities behind cylinder ( $S/D = 2.86$ )

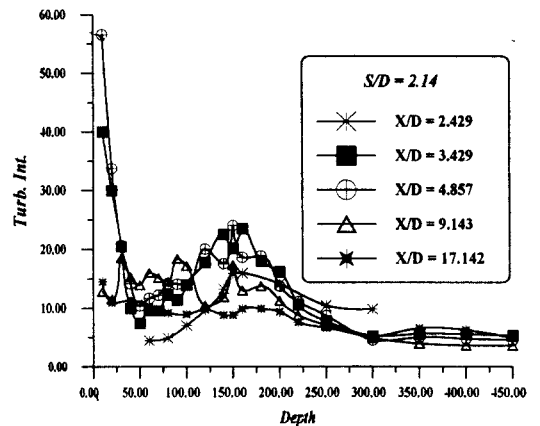


Fig. 15 Turbulent intensities behind cylinder ( $S/D = 2.14$ )

역시 쇠파발생지점인  $X/D=3.43$ 에서와 그 바로 하류지점인  $S/D=4.86$ 에서 큰 난류강도가 감지되고 있으나,  $X/D=9.14$  부터는 수면근처의 난류강도가 매우 낮음을 볼 수 있다. 즉, 실험의 정도가 부족한 관계로 명확한 결론을 내기는 어려우나 breaker에서 생성된 난류에너지는 후류로 가면서 급격히 소멸된다고 여겨진다. 이는 수두손실 값이 충분히 하류에서도 비교적 큰 값을 보이고 있는 것과 상이한 결과로서, large scale turbulence에서 small scale turbulence로의 에너지 이동이 비교적 빨리 이루어지는 것으로 해석할 수 있다.

난류강도에 관한 이상의 결과로부터 쇠파가 발생하는 지점에서의 난류강도는 대단히 크며, 이 난류에너지가 쇠파영역의 수두손실을 유발하는 중요한 인자인 것으로 해석할 수 있다. 또한 난류에너지는 수두손실 분포에서와는 달리 쇠파발생지점에서 하류로 가면서 빨리 소멸되나, 수두손실로 대표되는 점성저항 값은 하류에서도 충분히 계속 가능한 물리량을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론 및 제언

균일류 중 수면하에 놓여있는 실린더에 의하여 생성되고 소멸되는 쇠파에 대한 점성유동 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 물체와 쇠파영역의 후류에서 계측된 유속 분포로부터 쇠파영역에서의 유동이 물체 후류에 형성되는 반류유동과 흡사함을 알 수 있었다.

(2) 물수체 후류에서 수두손실을 계측하여 쇠파영역과 물수체 후류의 유동을 조사하였다. 쇠파가 발생한 영역에서부터 급격한 수두손실 분포가 수표면에서 얻어졌으며 하류로 진행하면서 2차원 및 축대칭 반류유동의 특성을 잘 나타내었다. 쇠파 연구에는 수두손실의 계측이 쇠파의 강도와 영역, 그리고 쇠파와 물수체 간의 상호작용을 파악하는데 매우 유용함을 알 수 있었으며 쇠파영역은 육안으로 관찰되는 것보다 훨씬 광범위한 영역에

걸쳐 영향을 미침을 알 수 있었다.

(3) 쇠파가 발생하는 부근에서 매우 큰 난류용력값을 보여준 것으로부터 그 지점에서 파에너지가 난류에너지로 변환된다는 사실을 확인할 수 있었다. 난류에너지는 수두손실분포와는 달리 빨리 소멸되는 특성을 보여주었다. Hot film을 사용한 난류계측의 부정확성으로 보다 자세한 해석이 수행되지 못한 아쉬움이 있으며, 추후 보다 안정된 실험기법의 확보로 쇠파영역에서의 난류와 와도의 생성 및 전개과정을 연구할 필요가 있겠다. 또한, PIV를 이용한 유동가시화를 통하여 물수체와 breaker 간의 순간 와도장 변화를 보다 현상학적으로 분석할 필요가 있겠다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원으로 1996년부터 3년간 수행한 특정기초연구사업 (과제번호 : 96-0200-14-01-3)의 연구결과 임을 밝힌다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Duncan, J.H., "The Breaking and Non-Breaking Wave Resistance of a Two-Dimensional Hydrofoil", *J. Fluid Mech.*, Vol. 126, pp. 507-520, 1983.
- [2] 현범수, 신용현, "물수실린더에 의하여 생성되는 쇠파주위 점성유동의 고찰 (제1부 : 파형 및 압력분포)", 대한조선학회 논문집 제37권 제1호, 2000.
- [3] Baba, E., "A New Component of Viscous Resistance", *J. Soc. Naval Archi. Japan*, Vol.125, 1969.