

수 리 분 과

레이저 도플러 유속계를 이용한 침수식생의 난류측정

최 성 욱(연세대학교 사회환경시스템공학부 교수)

제 1 장 서 론

제 2 장 유속 측정 장비

- 1 절 레이저 도플러 유속계
- 2 절 음파도플러 유속계

제 3 장 일반개수로 난류측정

- 1 절 실험조건
- 2 절 평균흐름 및 난류량

제 4 장 침수식생 조건 개수로의 난류측정

- 1 절 실험조건
- 2 절 침수식생 개수로 흐름의 평균흐름 및 난류량

제 5 장 침수식생 개수로의 고유구조

- 1 절 Bursting 현상
- 2 절 침수식생 개수로 흐름의 고유구조

제 6 장 결론 및 참고문헌

- 1 절 결론
- 2 절 참고문헌

제 1 장 서 론

하도 내 식생은 하천의 수리특성과 주변 생태계에 변화를 준다. 유체역학적으로 식생은 하천의 평균흐름과 난류량을 변화시키며, 이와 관련하여 유사, 영양 물질, 용존 산소, 그리고 서식 동물 등에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 과거에는 식생된 수로의 흐름을 식생에 의한 항력이 증가된 경계층 흐름으로 단순하게 보아 왔으나, 근래의 실험유체역학적인 연구는 식생된 하천의 흐름 구조에 대한 자세한 사항을 제시함으로써 부유사와 소류사 그리고 오염물질의 이송 및 확산에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되고 있다 (Lopez와 Garcia, 1998). 하천 내 식생은 일차적으로 유수에 의한 항력을 유발하여 평균유속을 줄이며 통수능을 감소시켜 홍수시 수위를 증가시키기 때문에 하천 관리에 있어 역기능이 있다. 그러나 식생은 토사의 침식을 억제하여 하천수의 탁도를 경감시키고 오염물질을 여과하여 수질을 개선시키며 하도 내 수생동물의 서식처를 제공하여 수생 생태계 보존에 영향을 미치는 등의 순기능을 가지고 있다. 식생된 개수로 흐름에서 부유사의 퇴적, 유입, 이송 등은 흐름의 난류 특성에 지배적인 영향을 받는다. 따라서 식생된 개수로 흐름에서 부유사의 거동을 이해하기 위해서는 흐름의 난류 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다.

Nepf와 Vivoni (2000)는 수심(h)과 식생높이(h_p)에 대한 상대적인 크기에 따라 식생된 수로의 흐름을 세 가지로 분류하였다. 수심에 비해 식생높이가 매우 작은 경우 ($H/h \rightarrow \infty$)는 terrestrial canopy 흐름에 해당하는데, 식생높이 부근에 강한 전단층 (shear layer)이 형성되는 것이 특징이다. 식생높이 부근에서 레이놀즈응력이 흐름 방향의 압력경사보다 훨씬 크다. 이러한 흐름에서 난류의 특성길이는 식생 높이와 비슷하며, 식생의 후류에 의한 난류 생성은 전체 생성되는 난류의 10% 밖에 차지하지 못하는 것으로 알려져 있다 (Raupach와 Shaw, 1982). 두 번째는 수심의 영향을 받는 침수 식생조건이다. 이 경우는 식생높이 부근에서 레이놀즈응력과 흐름방향의 압력경사가 비슷하며, 수심에 따라 흐름구조가 변하게 된다. 세 번째는 식생높이가 수심을 초과하는 정수 식생조건인데, 흐름방향의 압력경사가 식생높이 부근에서 레이놀즈응력보다 매우 큰 경우이다. 난류의 생성은 주로 후류에 기인하므로 난류의 특성길이가 식생의 지름과 비슷하다.

식생된 수로의 난류 및 고유구조 (coherent structure)에 관한 기존의 연구로 Dunn (1996)의 실험을 들 수 있다. Dunn은 음파 도플러 유속계 (ADV: Acoustic Doppler Velocimeter)를 이용하여 식생된 개수로에서 난류량을 측정하였고, 끝은 식생의 항력계수를 산정하였다. 식생의

항력계수는 깊이에 따라 변하여 식생높이의 1/3 지점에서 최대값을 보이며, 평균값으로 1.13을 얻었다. Ikeda와 Kanazawa (1996)는 레이저 도플러 유속계 (LDA: Laser Doppler Anemometer)와 입자 영상 유속계 (PIV: Particle Image Velocimeter)를 이용하여 유연한 침수 식생조건의 흐름에서 난류구조와 와류 (vortex)에 대하여 연구하였다. 난류강도와 레이놀즈응력은 식생높이 부근에서 최대를 보이는 것으로 나타났으며, 식생높이를 기준으로 하여 상부와 하부 구간에서 각각 분출 (ejection)과 쓸기 (sweep)현상이 지배적인 것을 확인하였다. 또한 식생높이보다 높은 구간에서 타원형의 와류가 생성되며, 이는 분출현상에 영향을 미치는 것을 보였다.

Nepf와 Vivoni (1999)는 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계를 이용하여 침수식생과 정수식생 조건의 개수로에서 난류구조와 고유구조를 연구하였는데, 침수식생의 경우 식생높이 상·하부 구간에서 각각 분출현상과 쓸기현상에 의한 레이놀즈응력이 지배적임을 확인하였다. 또한 정수식생의 경우 쓸기현상과 분출현상이 전체 수심에 걸쳐 거의 평형 상태에 있는 것으로 나타났다. 또한 Nepf와 Vivoni (2000)는 침수식생 조건하의 흐름에서 레이놀즈응력의 분포형으로부터 침투수심 (penetration depth)을 정의하였는데, 침투수심 위와 아래 구간을 각각 연직교환영역 (vertical exchange zone)과 종방향 교환영역 (longitudinal exchange zone)으로 구분하여 영역별 흐름특성을 분석하였다. Ghisalberti와 Nepf (2002)는 레이저 도플러 유속계와 비디오카메라를 이용하여 유연한 식생의 수로 흐름에서 식생과 유수의 연동 (swaying)으로 인하여 식생높이 위에서 발생하는 대규모 渦動 (large vortical motion)에 대해 연구하였다. 이 경우 유연한 식생을 갖는 개수로 흐름의 침투수심은 곧은 식생을 갖는 개수로에 비해 약 60%정도로 감소하는 것을 보였다.

본 연구의 목적은 침수식생 개수로 흐름을 레이저 도플러 유속계로 계측하여, 식생된 흐름의 평균유속 및 난류강도, 레이놀즈 응력, 난류에너지 收支, 그리고 bursting 현상과 같은 식생된 개수로의 흐름특성 변화에 대해 파악하고자 한다.

제 2 장 유속 측정 장비

1 절 레이저 도플러 유속계

레이저 도플러 유속계는 자유수면이나 바닥 근처 혹은 복잡한 구조물 표면에서의 정확한 유속을 측정하기 위해 개발된 장비로서 레이저의 도플러 효과를 이용하여 유속을 측정하는 장비이다. 레이저 도플러 유속계의 측정 부피 (sampling volume)는 약 $1.6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$ 이고, 최대 180 MHz로 신호를 측정할 수 있다. 레이저 도플러 유속계는 흐름 외부에서 레이저를 투사하여 유속을 측정하기 때문에 기기에 의한 흐름의 교란이 없으며 측정 부피가 매우 작기 때문에 구조물 혹은 바닥에 근접한 부분에서의 유속을 측정할 수 있다. 또한 sampling rate이 매우 크기 때문에 미소 스케일 (minor scale)에서의 난류 유동을 측정할 수 있는 장점이 있으며 열선 유속계와는 달리 검정을 필요로 하지 않는다. 그러나 빛을 이용하기 때문에 흐름 내부에 크기가 큰 이물질이 존재할 경우 레이저 照射의 방해로 인하여 유속 측정이 불가능하고, 주변 환경에 많은 영향을 받는 단점이 있다 (Nezu와 Nakagawa, 1993).

개수로에서의 난류구조 연구에 있어서 열선 유속계 혹은 음파 도플러 유속계를 이용할 경우, 흐름장 내부에 유속 측정기기를 장치하여야만 한다. 그러나 흐름장 내부에 장치된 유속 측정기기는 유속을 측정하기 위한 탐침이 흐름장을 교란시키기 때문에 정확한 유속을 측정하기 곤란하다. 그러나 레이저 도플러 유속계의 경우 개수로 흐름 외부에서 레이저를 조사하여 유속을 측정하기 때문에 흐름장을 교란시키지 않고 유속 측정이 가능하다. 음파 도플러 유속계 및 열선 유속계는 측정 부피가 레이저 도플러 유속계에 비하여 매우 크기 때문에 수심이 작은 흐름에서 유속의 수직분포를 측정하기 어렵다. 또한 바닥 근처, 수면 근처에서 유속을 측정하기 어려우며 개수로 흐름 내부에 구조물이 위치할 경우 구조물 근처에서의 유속을 측정하는 것이 쉽지 않다. 그러나 레이저 도플러 유속계의 경우 측정 부피가 매우 작고 레이저를 조사하는 방향을 제어할 수 있기 때문에 앞에서 언급한 문제들이 유속 측정에 있어 크게 영향을 미치지 못한다. 다음 그림 2.1.1 - 그림 2.1.5는 연세대학교 토목공학과 수공학 연구실이 보유하고 있는 레이저 도플러 유속계의 모식도 및 실제 측정 모습을 나타낸 것이다.

레이저 도플러 유속계는 그림 2.1.1에 도시된 것과 같이 측정자료 처리장치 (processor), 측정에 필요한 레이저를 발생시키는 레이저 발생장치, 그리고 레이저를 조사하는 광학부 (optic probe)로 구성되어 있으며, 실제 사용 모습은 다음 그림 2.1.2와 그림 2.1.3과 같다. 그림 2.1.4와 그림 2.1.5는 레이저 도플러 유속계의 프로세서와 레이저 발생장치의 실제 모습과 측정 자

료를 처리하는 모습을 도시한 것이다.

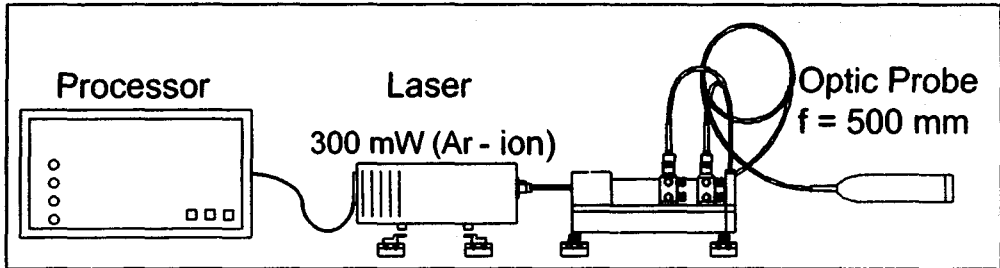


그림 2.1.1 레이저 도플러 유속계 모식도

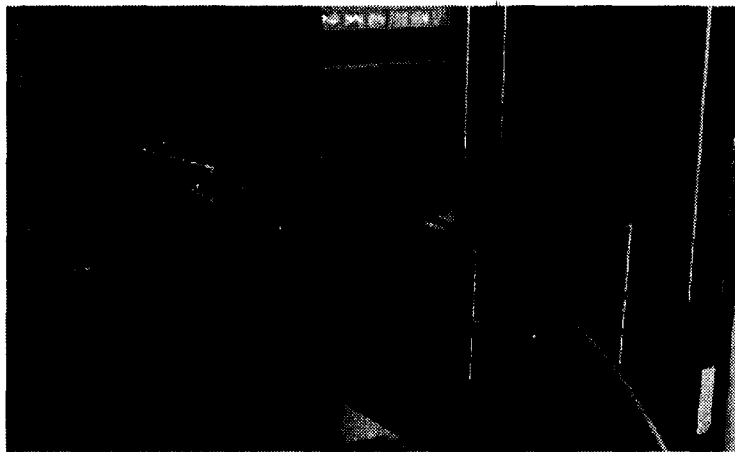


그림 2.1.2 레이저 실제 조사 모습과 광학부
(concrete block bed)



그림 2.1.3 레이저 실제 조사 모습과 광학부
(sand painted bed)

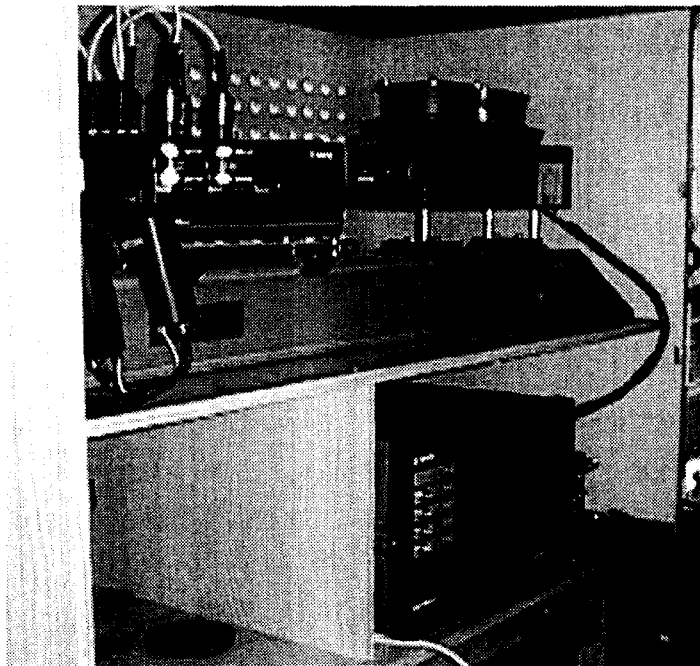


그림 2.1.4 레이저 발생장치와 자료처리 프로세서

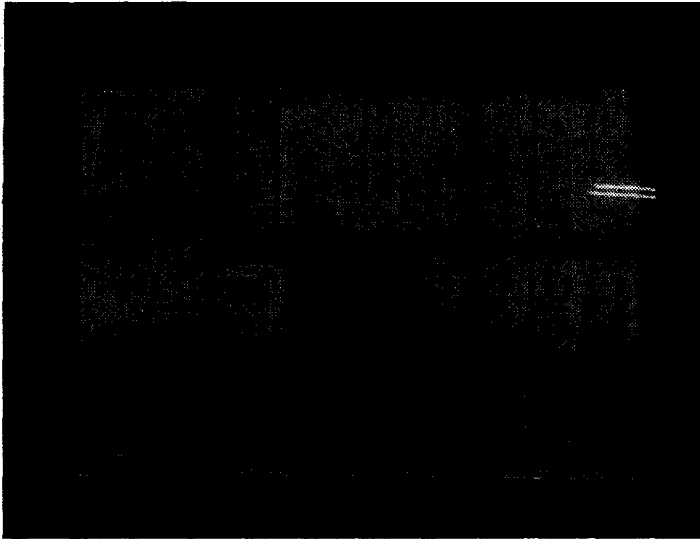


그림 2.1.5 레이저 도플러 유속계를 이용한 실제 유속 측정자료 처리 모습

2 절 음파도플러 유속계

본 연구에서는 레이저 도플러 유속계의 적용성과 정확성을 파악하기 위한 검증 도구로서 음파도플러 유속계를 사용하였다. 음파 도플러 유속계는 사용하기 쉬우면서도 정확한 유속계의 필요에 의해 U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES)에서 개발하였다. 음파를 발사한 뒤 도플러 효과를 이용하여 유속을 측정하는 장비로서 2차원 또는 3차원의 유속을 하나의 탐침을 이용하여 측정할 수 있다. 음파 도플러 유속계의 측정 부피는 0.25 cm^3 이내이고 유속의 허용오차는 0.1 mm/sec , 25 Hz로 신호를 측정할 수 있으며, 무작위성 잡음은 1% 정도로 알려져 있다. 음파 도플러 유속계는 사용방법이 매우 간단하며 검정이 필요 없다. 또한 부피가 작기 때문에 여러 종류의 실험에 사용이 가능하지만 측정 부피가 상당히 크며 음파를 발사하는 부분과 수신하는 부분의 크기가 크기 때문에 흐름을 교란시키는 것으로 알려져 있다 (Lohrmann 등, 1994).

음파 도플러 유속계는 탐침 (probe), 신호조절부 (signal conditioning module), 프로세서 (processor)의 3가지 요소로 구성되어 있으며, 탐침은 신호조절부에 부착되어 있다. 그림 2.2.1는 신호조절부와 탐침을 나타내고 있다. 탐침은 하향 (down-looking) 탐침, 상향 (up-looking) 탐침, 그리고 측방 (side-looking) 탐침으로 구분된다. 하향 탐침은 주로 바닥면에서의 흐름을 측정하는 장치이며, 상향 탐침은 자유수면에서의 흐름을 측정하는데 용이하다. 그리고 측방

탐침은 조파수로에서 수면웨이브에 의한 흐름간섭의 영향을 배제하기 위하여 사용한다. 탐침으로 인한 흐름 교란을 억제하기 위하여 음파 도플러 유속계의 측정위치는 탐침으로부터 일정한 거리 (5-10 cm)에 위치하고 있다.

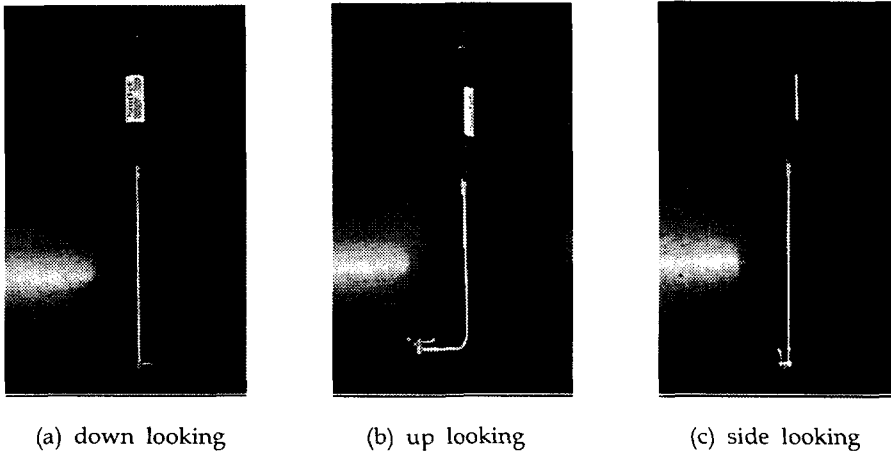


그림 2.2.1 음파 도플러 유속계 실제 모습

제 3 장 일반개수로 난류측정

본 장에서는 침수식생 개수로 흐름의 유속분포를 측정하기에 앞서 레이저 도플러 유속계의 적용성 및 측정 자료의 정확도를 살펴보기 위하여 거친 하상 개수로에서의 유속측정결과를 살펴보았다. 연세대학교 수공학연구실이 보유하고 있는 가변 경사식 개수로 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 개수로 실험장치의 재원은 그림 3.1.1에 도시된 것과 같이 폭 0.9 m, 높이 0.6 m, 그리고 길이 12 m이며, 바닥 경사는 0.0001로 설정하였다. 거친 하상 개수로는 D_{50} 이 420 μm 인 #40 사포 (sand paper)를 이용하여 그림 3.1.2에 도시된 것과 같이 구현하였다.

1 절 실험조건

유량의 관측은 개수로의 상단부에 설치된 높이 0.4 m의 아크릴 사각 예연웨어를 이용하였다. 수심관측은 거친하상 개수로 구간의 상·하류부와 중앙, 그리고 측정지점에서 실시하여 수심 변화를 관찰하였다. 실험에서 단위폭당 유량 (q)과 수심 (H)은 각각 0.05 m^2/sec 와 0.18 m로 설정하였으며, 본 연구에서 적용한 실험조건은 표 3.1.1과 같다. 표에서 U_m 은 단면평균유속, Re 는 Reynolds 수, Fr 은 Froude 수, 그리고 S_0 는 바닥 경사이다. 좌표축은 주흐름방향, 횡방향 그리고 하상의 수직방향을 각각 x , y , z 축으로 설정하였다. 측정결과의 용이한 비교를 위하여 동일한 지점에서 측정을 하였으며, 측정된 자료의 신뢰성을 확인하기 위해서 레이저 도플러 유속계는 한 지점 당 100초씩 측정하여 약 10,000 개의 자료(측정속도 약 100 Hz)를 획득하였으며, 음파 도플러 유속계는 120초씩 측정하여 3,000 개의 자료(측정속도 25 Hz)를 획득하였다.

표 3.1.1 거친하상 개수로 실험조건

q (m^2/s)	H (m)	U_m (m/s)	Re	Fr	S_0
0.05	0.18	0.309	55,620	0.232	0.0001

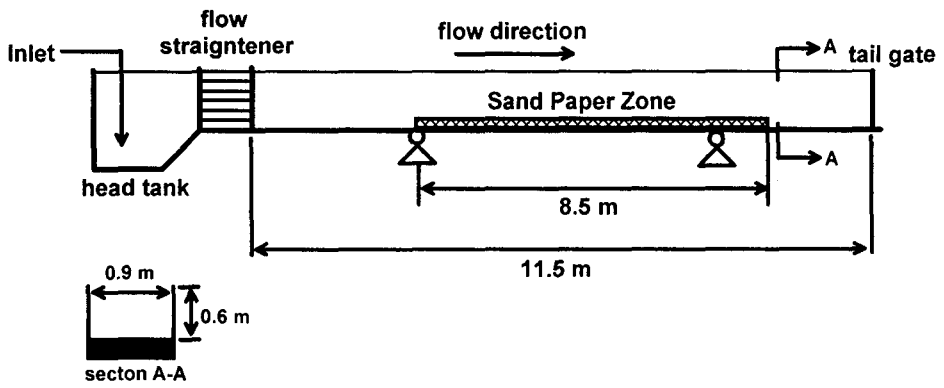


그림 3.1.1 실험수로의 모식도

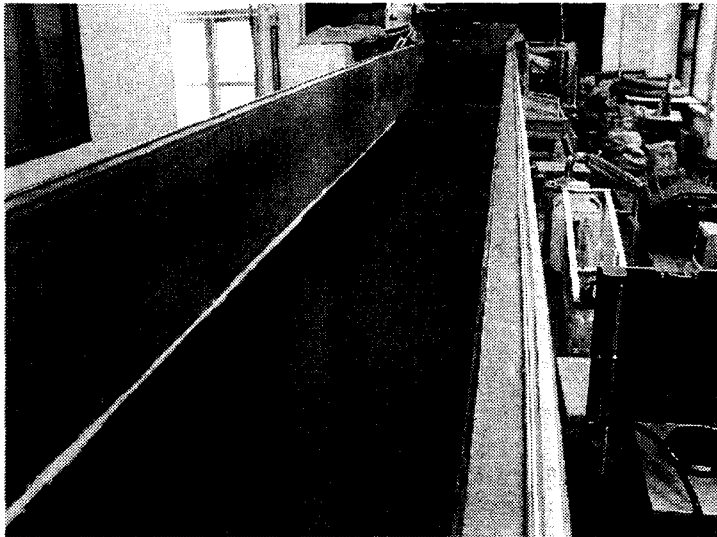


그림 3.1.2 사포를 이용하여 구현한 거친하상 개수로

2 절 평균흐름 및 난류량

그림 3.2.1은 임의 지점에서의 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계를 이용하여 측정된 자료를 직접 비교한 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 레이저 도플러 유속계에 의한 측정자료는 동일한 시간동안 더욱 많은 유속자료를 측정하는 것을 볼 수 있다. 그림 3.2.2는 바닥으로부터의 거리에 따른 평균유속의 변화를 도시한 것이다. 흐름방향 유속은 전단속도를 이용하여 무차원화 하였으며, 바닥으로부터의 거리는 조도높이 (k_s)를 이용하여 무차원화 시켰다. 전단속도는 레이놀즈 응력 분포를 이용하여 산정하였고, 조도높이는 중앙입경 ($D_{50} = 420 \mu\text{m}$)을 이용하여 산정하였다. 각 측정자료 및 하상경사를 이용하여 산정한 유속분포와 조도높이는 다음 표 3.2.1과 같다. 유속 측정 결과를 살펴보면 두가지 기기에 의해 측정된 평균유속이 대수법칙과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 레이저 도플러 유속계의 경우에는 음파 도플러 유속계보다 더욱 바닥 근처 유속을 측정할 수 있는 것으로 확인할 수 있다.

그림 3.2.3은 바닥으로부터의 거리에 따른 레이놀즈 응력을 도시한 것이다. 레이놀즈 응력은 전단속도를 이용하여 무차원화 하였다. 그림을 살펴보면 레이놀즈 응력은 바닥에서부터 증가하기 시작하여 무차원 수심이 약 0.1인 지점에서 최대값을 가지고 수면에 가까워질수록 감소하여 수면 근처에서는 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 레이저 도플러 유속계에 의한 측정결과는 이러한 형상을 잘 보여주고 있으나, 음파 도플러 유속계에 의한 측정결과는 기기 자체에 의한 흐름 교란에 의하여 이러한 형상을 정확하게 나타내지 못하고 있다. 또한 표 3.2.1에 도시된 것과 같이 레이놀즈 응력을 이용하여 전단속도를 산정한 결과 레이저 도플러 유속계에 의한 전단응력은 $u_{*LDA} = 0.0134 \text{ m/s}$ 이고, 음파 도플러 유속계에 의한 전단응력은 $u_{*ADV} = 0.0122 \text{ m/s}$ 로 서로 비슷하지만, 하상경사를 이용하여 산정한 전단속도 ($u_* \sqrt{g h S} = 0.018 \text{ m/s}$)에 비해 작은 것으로 나타났다.

그림 3.2.4와 그림 3.2.5는 바닥으로부터의 거리에 따른 흐름방향 및 수직방향 난류강도를 나타낸 것이다. 난류강도의 경우에는 기존의 연구결과와 동일하게 바닥에서 최대값을 가지고 수면에 가까워질수록 감소하는 것을 확인할 수 있으며, Nezu와 Nakagawa (1993)가 제시한 실험식과 유사한 것을 확인할 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 것과 같이 음파도플러 유속계를 이용한 측정 결과는 기기에 의한 흐름장 교란으로 인하여 실험식과 잘 일치하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 특히 수직방향 난류강도의 경우에는 이러한 현상이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

표 3.2.1 전단속도 및 조도높이

u_{*LDA} (m/s)	u_{*ADV} (m/s)	$u_* (\sqrt{ghS})$ (m/s)	k_s (m)
0.0134	0.0122	0.018	0.00084

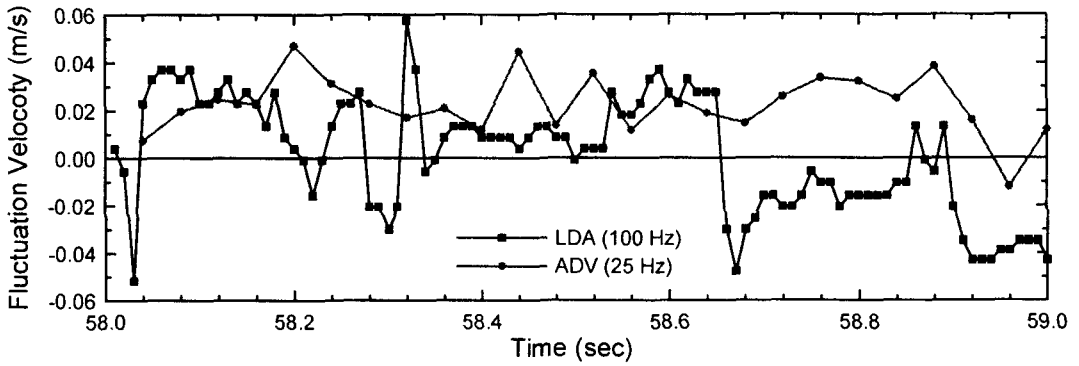


그림 3.2.1 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계의 측정속도 비교

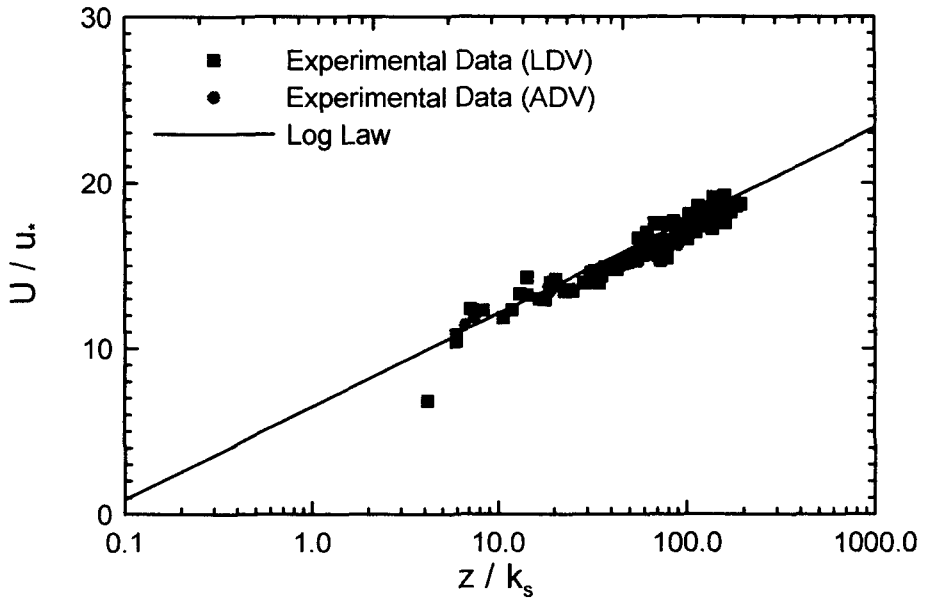


그림 3.2.2 바닥으로부터의 거리에 따른 평균 유속 분포

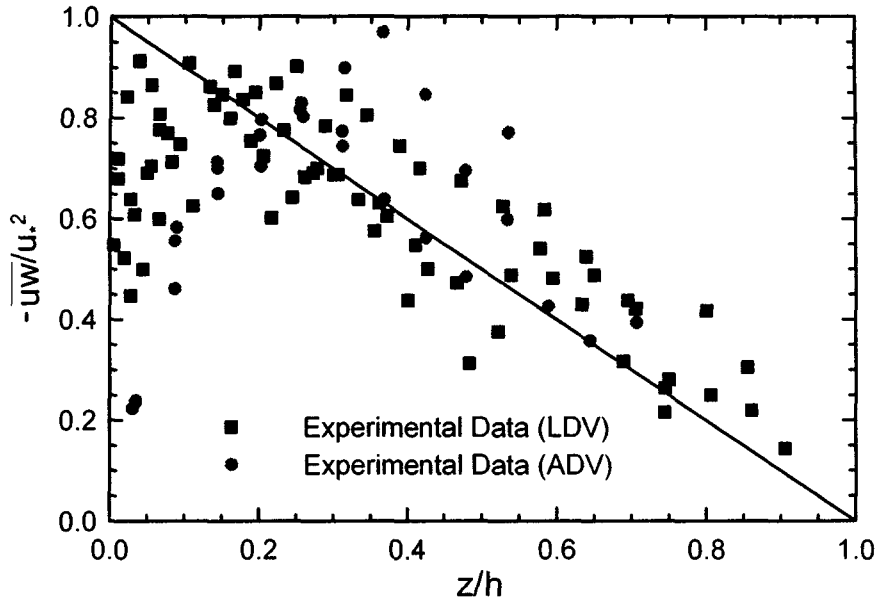


그림 3.2.3 바닥으로부터의 거리에 따른 레이놀즈 응력 분포

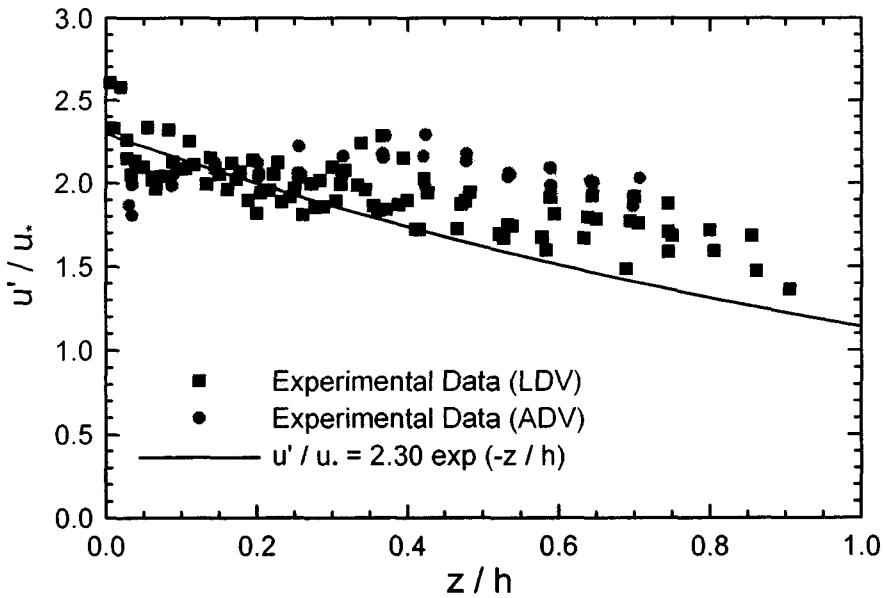


그림 3.2.4 바닥으로부터의 거리에 따른 흐름방향 난류강도

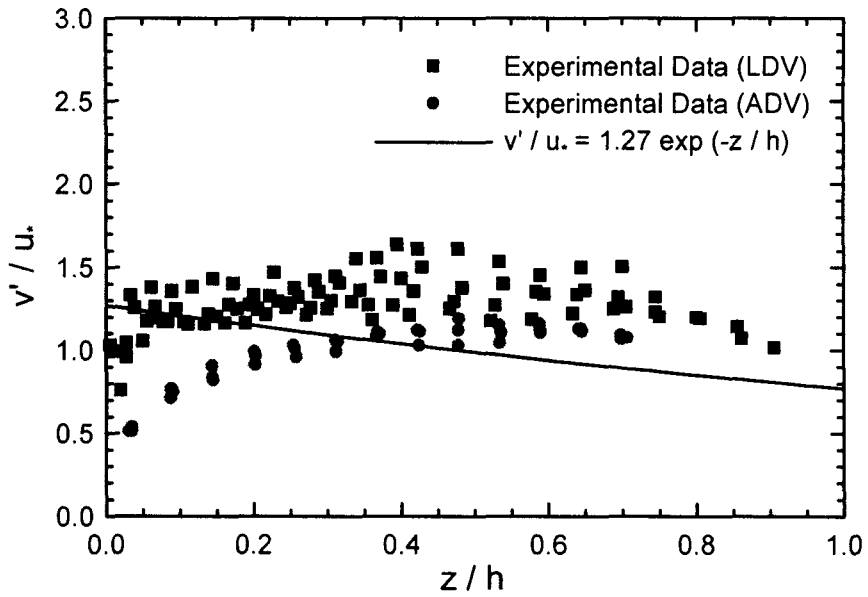


그림 3.2.5 바닥으로부터의 거리에 따른 수직방향 난류강도

제 4 장 침수식생 조건 개수로의 난류측정

1 절 실험조건

본 연구는 연세대학교 수공학연구실이 보유하고 있는 가변 경사식 개수로 실험 장치를 이용하였다. 개수로 실험장치의 재원은 앞에서 언급한 것과 같으며, 다음 그림 4.1.1에 도시된 것과 같이 폭 0.9 m, 높이 0.6 m, 그리고 길이 12 m, 바닥 경사는 0.0016으로 설정하였다. 모형 식생은 웨어에서 하류방향으로 4.5 m 지점부터 9.5 m 지점까지 총 5 m의 구간에 식재하였다. 길이 100 mm, 직경 5 mm의 플라스틱 실린더를 이용하여 다음 그림 4.1.2와 같이 개수로 실험 장치에 식생을 구현하였으며, 1 m² 당 100 주의 모형 식생을 식재하였다.

유량의 관측은 개수로의 상단부에 설치된 높이 0.4 m의 아크릴 사각 예연웨어를 이용하였다. 수심관측은 식생 구간의 상·하류부와 중앙에서 실시하여 식생 구간의 수심 변화를 관찰하였다. 본 연구에서는 식생조건에 따른 개수로 흐름의 변화를 살펴보기 위해서 2 가지 경우의 식생높이에 대한 실험을 수행하였으며, 이에 대한 자세한 실험조건은 다음 표 4.1.1과 같다. 표에서 U_m 은 단면평균유속, Re 는 Reynolds 수, Fr 은 Froude 수, 그리고 S_0 는 바닥 경사이며, 측정결과와의 용이한 비교를 위하여 그림 4.1.3과 같이 동일한 지점 (5 지점)에서 측정을 하였으며, 측정된 자료의 신뢰성을 확인하기 위해서 레이저 도플러 유속계는 한 지점당 100초씩 측정하여 약 10,000 개의 자료(측정속도 약 100 Hz)를 획득하였으며, 음파 도플러 유속계는 120초씩 측정하여 3,000 개의 자료(측정속도 25 Hz)를 획득하였고, 이를 이용하여 침수식생 개수로 흐름을 분석하였다.

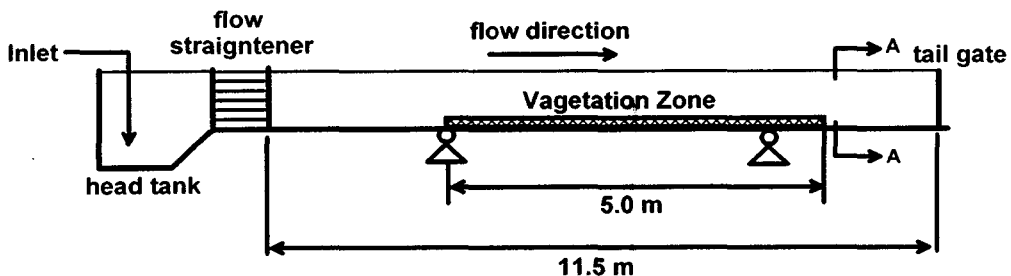


그림 4.1.1 개수로 실험장치의 모식도

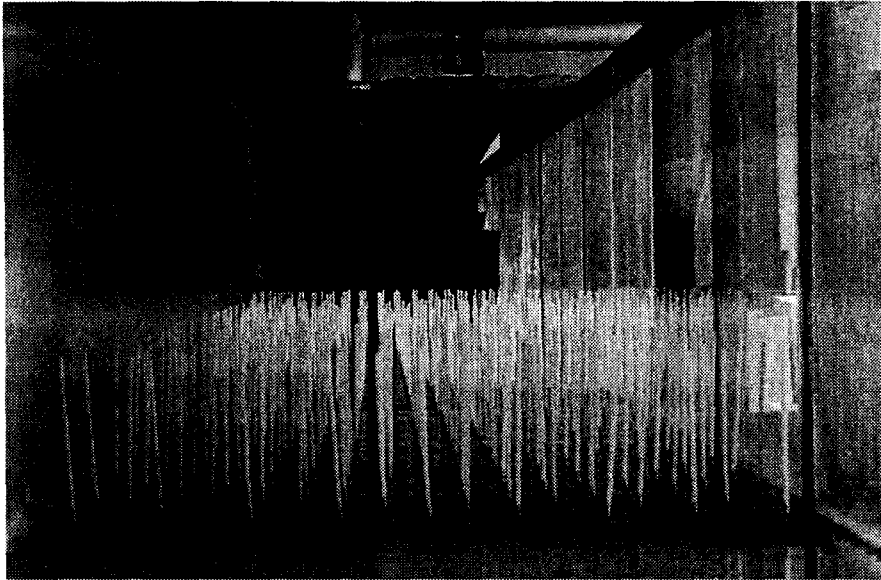


그림 4.1.2 플라스틱 실린더를 이용하여 구현한 침수식생 개수로 흐름

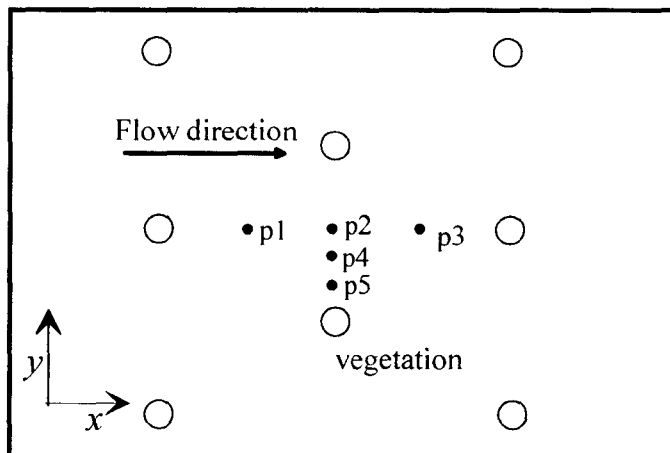


그림 4.1.3 유속 측정지점

표 4.1.1 침수식생 개수로 흐름의 실험조건

Exp. Case	q (m^2/sec)	h (m)	h_p (m)	U_m (m/sec)	Re (-)	S_0 (-)	수심비 (h/h_p)
Case 1	0.060	0.30	0.15	0.22	60,000	0.0016	2.0
Case 2	0.045	0.25	0.10	0.20	46,000	0.0016	2.5

2 절 침수식생 개수로 흐름의 평균흐름 및 난류량

그림 4.2.1은 바닥으로부터의 거리에 따른 평균유속의 변화를 도시한 것이다. 식생높이보다 높은 구간에서는 일반적인 개수로의 유속분포와 유사한 형태를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 식생높이보다 낮은 구간에서는 식생이 존재하지 않는 개수로 흐름의 유속분포와 전혀 다른 양상을 보이고 있다. 이것은 기존 강형식과 최성욱 (2000), Nepf와 Vivoni (1999) 등의 연구결과와 일치하는 것이다. 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계의 측정결과를 살펴보면 동일한 흐름에 대하여 레이저 도플러 유속계가 더욱 세밀하게 측정이 가능하며, 특히 수면 근처와 바닥근처에서의 유속분포를 조밀하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

또한 각각의 실험조건에 대하여 다음 식을 이용하여 기준면 변위를 산정하였다. 그 결과 그림에서 볼 수 있듯이 두 가지 실험 모두 매우 유사한 흐름방향 평균 유속 분포를 보이고 있으며, 각각의 실험 자료로부터 식생높이로 무차원화 한 수심이 0.7인 지점이 기준면 변위 (zero-plane displacement)가 나타나는 지점으로 산정되었다. 그리고 기준면 변위 상부에서는 유속분포가 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으나, 기준면 변위 하부에서는 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 기준면 변위 하부에서는 식생이 흐름에 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단되며, 이를 고려할 수 있도록 식생밀도, 식생조건, 수심비 등이 고려된 무차원 변수의 선정이 필요한 것으로 판단된다.

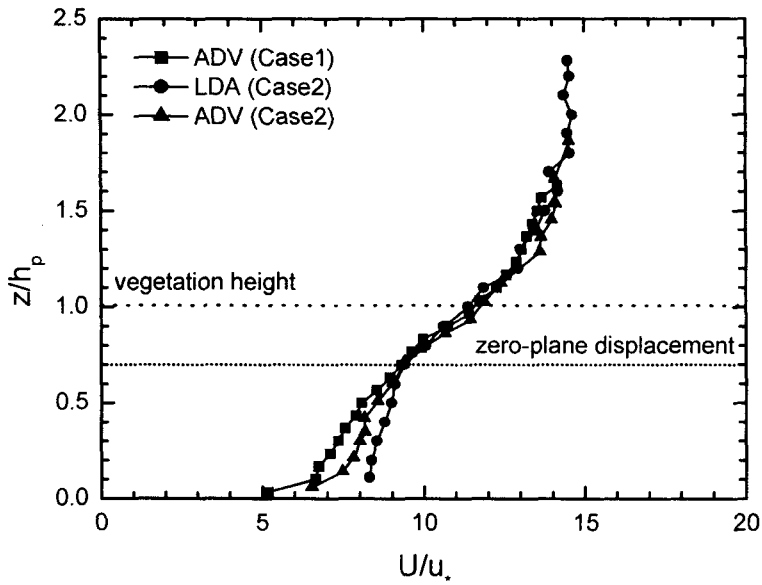


그림 4.2.1 침수식생 개수로 흐름의 평균유속 분포

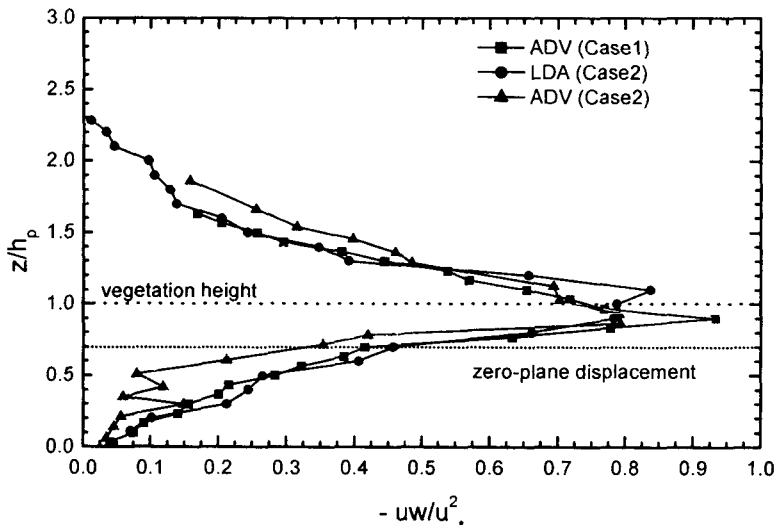


그림 4.2.2 침수식생 개수로 흐름의 레이놀즈 응력 분포

그림 4.2.2는 바닥으로부터의 거리에 따른 레이놀즈 응력분포를 도시한 것이다. 그림에서 가로축인 레이놀즈 응력은 전단속도로 무차원화 시켰으며, 세로축의 수심은 식생높이를 이용하여 무차원화 하였다. 두 실험 모두 식생높이 부근에서 레이놀즈 응력이 최대값을 형성하며 수면과 바닥 양 방향으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 식생높이 부근에서 레이놀즈 응력의 최대값이 형성되는 이유는 식생높이 부근에서 강한 전단층이 형성되기 때문으로 알려져 있다 (Nepf와 Vivoni, 2000). 또한 서로 다른 수심비를 가짐에도 기준면 변위 상부에서의 레이놀즈 응력 분포형태가 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림을 살펴보면 기준면 변위 상부의 레이놀즈 응력 분포가 무차원 수심이 약 2-2.5인 지점에서 0이 되는 것을 볼 수 있으며, 이는 기존의 실험결과와도 유사하다. 즉 식생높이의 약 2-2.5 배 지점까지가 식생의 영향을 받는 지점인 것으로 판단되며, 침수식생 개수로 흐름의 수심비가 이 이상이 되면 식생이 바닥 저항 요소의 일부로 간주할 수 있는 표면저항 흐름이 되는 것으로 판단할 수 있다.

개수로 흐름의 중요 변수중 하나인 레이놀즈 응력을 표 4.2.1에 도시된 것과 같이 레이놀즈 응력을 이용하여 전단속도를 산정하였다. 레이저 도플러 유속계에 의한 전단응력은 $u_{*LD} = 0.0161$ m/s이고, 음파 도플러 유속계에 의한 전단응력은 $u_{*ADV} = 0.0148$ m/s로 차이가 크지 않았지만, 하상경사를 이용하여 산정한 전단속도 ($u_* \sqrt{gh_s} = 0.0195$ m/s)와는 큰 차이를 나타내었다.

그림 4.2.3과 그림 4.2.4는 흐름방향과 수직방향의 난류강도 (u' , w')를 도시한 것이다. 단속도로 무차원화시킨 2가지의 난류강도 분포가 서로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그림을 살펴보면 흐름방향 및 수직방향 난류강도 모두 기준면 변위 지점에서 최대값을 보이고 있으며, 기준면 변위에서 아래쪽으로는 선형적으로 감소하고, 위쪽으로는 지수함수 형태로 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 전 수심에 대하여 수직방향 난류강도가 흐름방향 난류강도의 절반정도로 나타났다. 레이놀즈 응력과 난류강도 모두 평균유속의 경우와 동일하게 레이저 도플러 유속계가 음파 도플러 유속계에 비하여 수심 근처에서는 약 0.05 m, 바닥 근처에서는 약 0.02 m 정도 더 측정이 가능한 것으로 나타났다. 그리고 그림 4.2.2의 레이놀즈 응력과 그림 4.2.4의 수직방향 난류강도의 경우 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계의 측정결과가 약간 다르게 나타났다. 이것은 음파 도플러 유속계에 의해 측정지점 주변의 흐름이 교란되었기 때문으로 판단되며, 레이저 도플러 유속계의 경우에는 이러한 흐름 교란이 발생하지 않기 때문에 더욱 정확한 측정치를 보여주는 것으로 판단된다.

표 4.2.1 전단속도 및 조도높이

Exp. Case.	u_*^{LDA} (m/s)	u_*^{ADV} (m/s)	$u_* (\sqrt{ghS})$ (m/s)
Case 2	0.0161	0.0148	0.0195

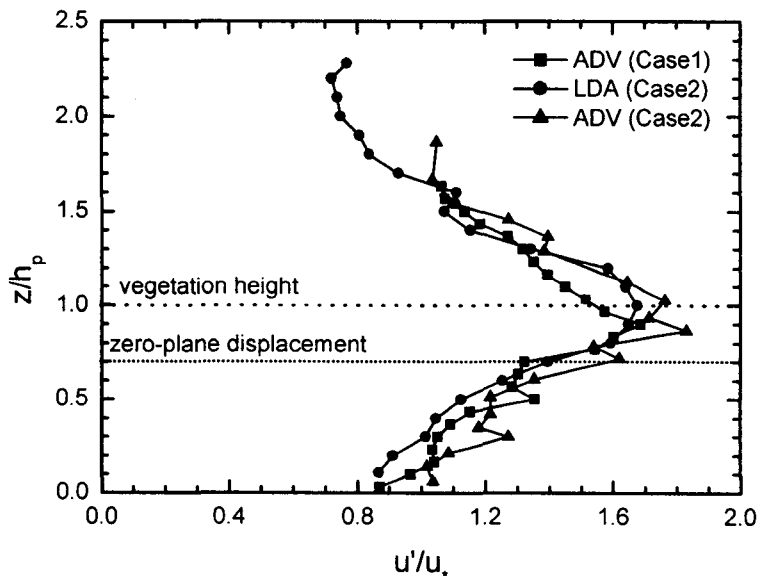


그림 4.2.3 침수식생 개수로 흐름의 흐름방향 난류강도

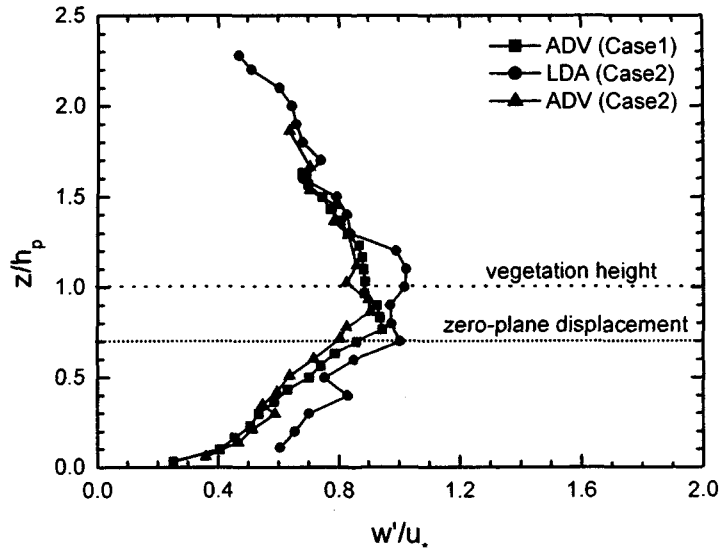


그림 4.2.4 침수식생 개수로 흐름의 수직방향 난류강도

제 5 장 침수식생 개수로의 고유구조

1 절 Bursting 현상

개수로 난류흐름의 바닥 부근은 유속이 느린 저속 영역 (low speed region)과 상대적으로 유속이 빠른 고속영역 (high speed region)으로 형성되어 있다. 고속영역에서 저속영역으로의 횡방향 흐름이 존재하고 고속영역과 저속영역의 중심에는 각각 하강류와 상승류가 발생하여 하나의渦 (vorticity)를 형성하게 된다. 이러한 현상을 측방향에서 관측하면 흐름이 상승과 하강을 반복하게 된다. 저속영역과 고속영역의 상호작용에 의하여 발생하는渦는 생성과 발달, 그리고 소멸이 반복적으로 발생하는 준주기성을 나타내는데, 이와 같은 유속의 주기적인 변화를 bursting 현상이라고 하며, 개수로 흐름의 고유구조 중에서 bursting 현상의 주기성은 하상 토립자 유입의 수리학적 조건, 흐름 내 부유사의 농도 분포, 그리고 하상의 사구 형성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다 (Sechet와 Le Guennec, 1981).

Bursting 현상의 주기를 결정하기 위해 uw 사분면 (uw quadrant) 기법과 vita (variable interval time average) 기법이 주로 사용된다. Lu와 Willmarth (1973)에 의하여 제안된 uw 사분면 기법은 주흐름 방향과 연직 방향의 변동속도를 측정하여 bursting 현상의 구조와 주기를 파악하는 방법이다. Blackwelder와 Kalpan (1976)이 제안한 vita 기법은 주흐름방향의 변동속도만을 고려하여 bursting 현상의 특성을 파악한다. uw 사분면 기법과 vita 기법을 bursting 현상의 가시화 실험과 비교하여 각 기법의 정도를 분석한 Bogard와 Tiederman (1986)의 연구에 의하면, uw 사분면 기법이 vita 기법에 비하여 신뢰성 있는 결과를 나타내는 것으로 보고되고 있다.

uw 사분면 기법은 주흐름 방향 (x)과 연직 방향 (z)의 변동속도인 u 와 w 를 이용하여 bursting 현상을 검출하며, bursting 현상이 레이놀즈응력에 미치는 영향과 bursting 현상의 주기 등을 파악할 수 있다. 최성욱과 박문형 (2001)은 거친하상의 개수로 흐름에 uw 사분면 기법을 적용하여 순간 레이놀즈응력 (instantaneous Reynolds stress)의 조건부 확률과 bursting 현상의 주기에 대하여 연구하였다. 그들은 개수로 바닥에 조도높이가 일정한 블록을 포설하여 조도를 균일하게 하였는데, 바닥부근에서 조도요소의 높이까지는 쓸기현상이 이후 구간에서는 분출현상이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 그림 5.1.1에 제시된 바와 같이 순간 레이놀즈응력은 u 와 w 의 부호에 따라 외향상호작용 (outward interaction), 분출현상, 내향상호작용 (inward interaction), 그리고 쓸기현상의 4개 영역으로 구분할 수 있다. 그림에서 사선

으로 표시된 영역은 배제구간으로서 임계값 H_i (hole size: threshold level)는 시간평균 레이놀즈응력에 대한 순간 레이놀즈응력으로 다음 식과 같이 정의된다.

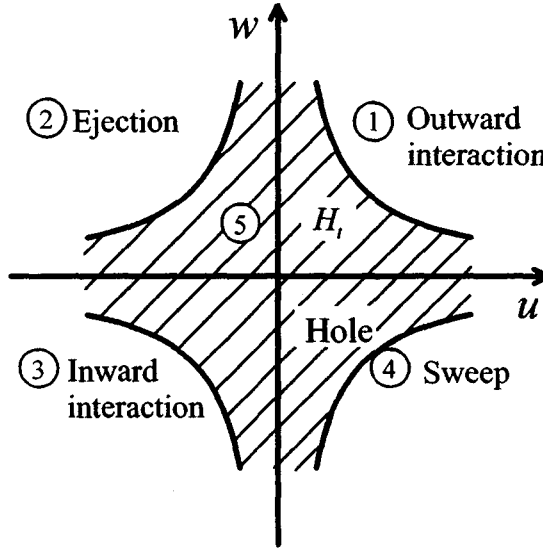


그림 5.1.1 Bursting 현상의 구분

$$H_i = |\psi| = \left| \frac{uw}{\overline{uw}} \right| \quad (5.1.1)$$

여기서 \overline{uw} 는 시간평균된 레이놀즈응력이다. 식(5.1.1)은 uw 사분면 기법에서 bursting 현상의 검출기준으로 사용되며, 각 사분면에서 무차원화된 순간 레이놀즈응력의 절대값이 H_i 보다 작은 경우에는 4개의 영역에서 제외된다. 앞에서 언급된 각 영역에 포함되는 순간 레이놀즈응력 (uw)이 시간평균 레이놀즈응력 (\overline{uw})에 미치는 영향인 기여율 (contribution rate) RS_i 는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$RS_i = \int_{-\infty}^{-H_i} \psi p_i(\psi) d\psi \quad i=1,3 \quad (5.1.2)$$

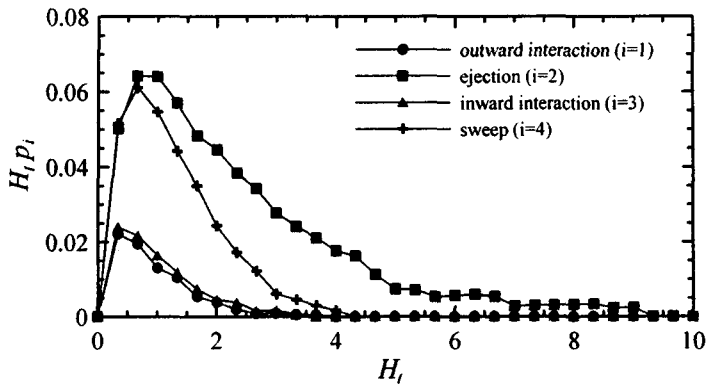
$$RS_i = \int_{H_i}^{\infty} \psi p_i(\psi) d\psi \quad i=2,4 \quad (5.1.3)$$

여기서 i 는 각 사분면을 나타내고, $p_i(\psi)$ 는 i 사분면에 위치할 조건부 확률을 나타낸다.

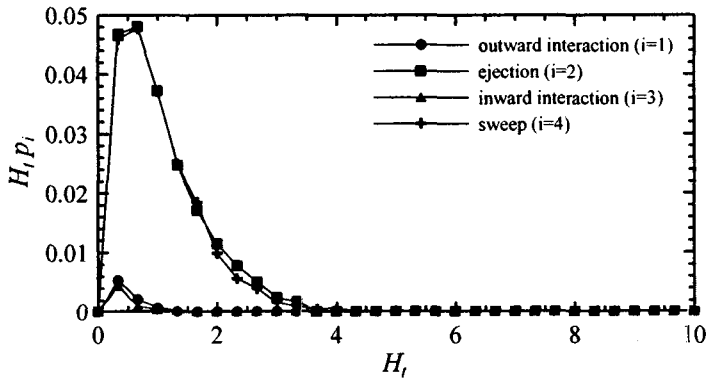
2 절 침수식생 개수로 흐름의 고유구조

그림 5.1.2는 무차원 수심이 각각 0.5, 1.033, 1.5인 지점에서의 배제구간의 임계값 H_c 에 따른 각 사분면에서의 조건부 확률을 도시한 그림이다. 모든 영역에서 2와 4 사분면의 분출과 쓸기 현상이 조건부 확률이 1과 3 사분면에 해당하는 상호작용보다 현저하게 크게 나타나고 있으며, 배제구간의 임계값이 9를 초과할 경우 상호작용이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림을 살펴보면 각 지점에서의 상호작용이 전 수심에 걸쳐 일정하게 나타나지 않는 것을 보여주고 있다. 식생높이보다 높은 구간에서는 분출현상이 쓸기현상에 비해 높은 빈도로 나타나고 있으며, 식생높이 근처에서는 두 현상이 동일한 빈도를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 식생높이보다 낮은 구간에서는 분출보다 쓸기현상이 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

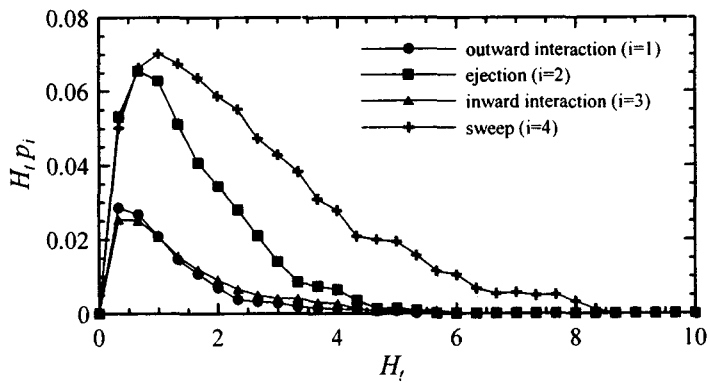
그림 5.1.3은 식생높이 상부 구간, 하부 구간, 그리고 식생높이 부근에서의 임계값의 변화에 따른 기여율의 변화에 대하여 도시한 그림이다. 그림 5.1.2와 유사하게 식생높이 상부에서는 쓸기현상, 식생높이 하부에서는 분출현상이 지배적임을 확인할 수 있다. Lopez 등 (1995)이 조약돌 하상의 개수로에서 uw 사분면 기법을 이용한 기여율 분석 결과를 통하여 분출현상과 쓸기현상이 각각 조약돌 평균입경의 위와 아래에서 지배적으로 발생하는 것을 확인하였다. Raupach와 Thom (1981)은 조도저층 바로 위 매끈한 바닥의 관성아 영역과 동일한 특성을 가지는 완충층 (buffer layer)이 존재하는 것을 밝힌바 있다. 완충층 이후 구간에서는 분출현상이 크게 나타나며, 완충층 아래 구간에서는 쓸기현상이 크게 나타난다. 즉 식생높이와 변위된 기준면 근처에서 완충층이 발생하는 것으로 판단되며, 앞에서 언급한 바와 같이 기준면 변위를 통해 얻은 새로운 기준면을 전단속도 및 기타 난류량의 기준면으로 보는 것이 타당한 것으로 판단된다.



(a) $z/h_p = 1.5$

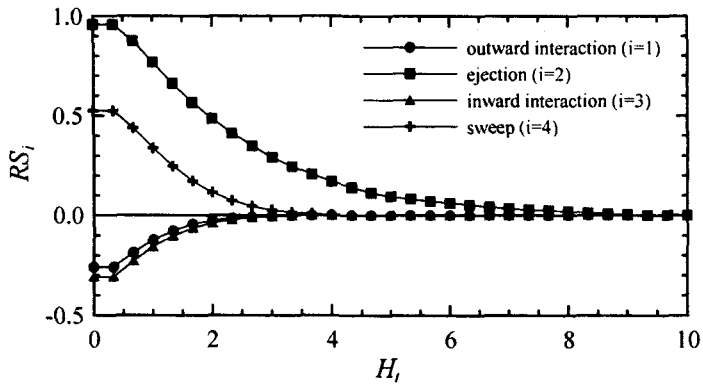


(b) $z/h_p = 1.033$

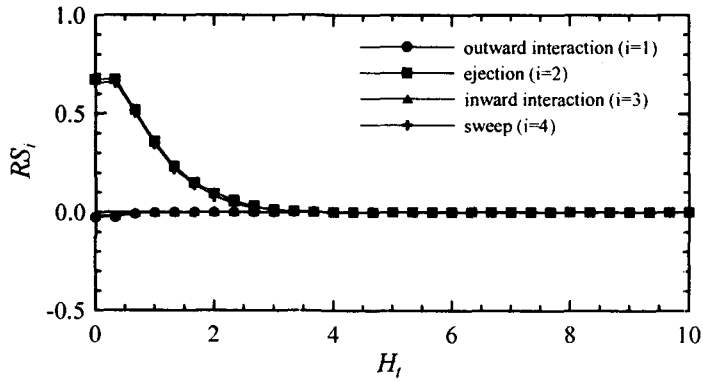


(c) $z/h_p = 0.5$

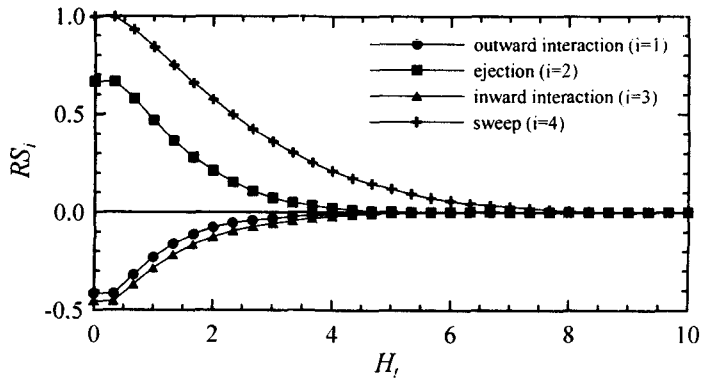
그림 5.1.2 바닥으로부터의 거리와 배제조건에 따른 조건부 확률분포



(a) $z/h_p = 1.5$



(b) $z/h_p = 1.033$



(c) $z/h_p = 0.5$

그림 5.1.3 바닥으로부터의 거리와 배제조건에 따른 기여율

제 6 장 결론 및 참고문헌

1 절 결론

본 연구에서는 2차원 레이저 도플러 유속계를 이용하여 거친하상 개수로와 침수식생 개수로의 유속을 측정하였다. 3차원 음파 도플러 유속계를 이용하여 측정자료의 정확성을 비교하였다. 거친하상은 #40 사포, 침수식생은 플라스틱 실린더를 이용하여 흐름조건을 구현하였으며, 유입부의 영향이 없고 흐름이 잘 발달된 지점에서 유속을 측정하였다. 바닥으로부터 거리에 따른 평균유속과 레이놀즈 응력, 난류 강도를 산정하였고, 음파 도플러 유속계에 의한 측정결과와 비교하여 레이저 도플러 유속계의 적용성을 살펴보았다. 그리고 bursting 현상을 파악함으로써 침수식생 개수로 흐름의 고유구조를 파악하였다.

거친하상 개수로 흐름의 평균유속 분포는 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계에 의한 측정결과는 매우 유사하였으며, 대수 법칙과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 레이놀즈 응력의 경우 전반적으로 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계에 의한 측정결과가 유사하였으나, 바닥 부근에서는 음파 도플러 유속계에 의한 측정결과가 레이저 도플러 유속계에 의한 측정결과보다 작게 나오는 것을 확인하였다. 흐름 방향 난류강도의 경우 두 측정기기 모두 유사하게 나타났지만, 수직방향 난류강도는 레이저 도플러 유속계에 비하여 음파 도플러 유속계에 의한 측정결과가 작게 산정되었다. 측정자료를 이용하여 전단속도를 산정한 결과 레이놀즈 응력 분포를 이용하여 산정한 전단속도가 하상경사를 이용하여 산정한 전단속도에 비하여 작은 것으로 나타났으며, 레이저 도플러 유속계와 음파 도플러 유속계에 의한 측정결과는 서로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

침수식생 개수로 흐름의 평균유속은 식생높이 상부에서는 기존 대수법칙과 유사한 형태를 나타내며, 식생높이 하부에서는 식생이 없는 개수로 흐름과는 전혀 다른 양상을 나타내고 있음을 확인하였다. 이는 기존의 연구결과와 동일한 것으로 확인하였으며, 레이저 도플러 유속계에 의한 측정결과 또한 동일하였다. 레이놀즈 응력과 난류강도 또한 식생높이에서 최대값을 가지며, 수심과 바닥에 가까워 질수록 감소하는 형태를 나타내었으며, 음파 도플러 유속계와 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 수직방향 난류강도와 레이놀즈 응력은 레이저 도플러 유속계에 의한 측정값과 음파 도플러 유속계에 의한 측정값이 약간 다르게 나타났다. 이것은 음파 도플러 유속계에 의해서 측정지점 주변의 흐름이 교란되기 때문인 것으로 판단된다. 레이저 도플러 유속계는 음파 도플러 유속계로는 측정하기 어려운 수면근처와 바닥 근처에서의 정밀

한 유속측정이 가능한 것으로 나타났으며, 이것은 레이저 도플러 유속계의 측정부피가 작기 때문인 것으로 판단된다.

유속측정 자료를 이용하여 개수로 흐름의 중요 변수중 하나인 전단속도를 산정한 결과 하상경사를 이용하여 산정한 전단속도에 비하여 레이놀즈 응력분포를 이용하여 산정한 전단속도가 작은 것으로 나타났으며, 이는 앞에서 언급한 거친하상 개수로 흐름과 유사한 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 그리고 식생된 개수로 흐름의 고유구조를 분석하기 위하여 uw 사분면 기법을 적용하였는데, 식생높이를 기준으로 하여 상·하부에서 각각 분출현상과 쓸기현상이 지배적임을 확인하였다.

2 절 참고문헌

강형식, 최성욱 (2000). "식생된 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동 현상의 수치해석." *한국수자원학회논문집*, 33(5), 581-592.

최성욱, 박문형 (2001). "균일 조고 개수로 흐름의 고유구조." *대한토목학회논문집*, 21(4B), 347-357.

Blackwelder, R.F. and Kaplan, R.E. (1976). "On the wall structure of the turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 76, 89-103.

Bogard, D.G. and Tiederman, W.G. (1986). "Bursting detection with single-point velocity measurements." *Journal of Fluid Mechanics*, 162, 389-413.

Dunn, C.J. (1996). *Experimental determination of drag coefficients in open channel with simulated vegetation*, M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2002). "Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 107(C2), 1-10.

Ikeda, S. and Kanazawa, M. (1996). "Three dimensional organized vortices above flexible water plants." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 122(11), 634-640.

Lohrmann, A., Cabrera, R., and Kraus, N.C. (1994). "Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) for Laboratory Use." *Proceedings of the symposium Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, ASCE, 351-365.

Lopez, F. and Garcia, M. (1998). "Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling." *Water Resources Research*, AGU, 34(9), 2341-2352.

Lopez, F., Dunn, C., and Garcia, M. (1995). "Turbulence characteristics of flow over a cobble bed." *Proceeding of the First International Conference on Water Resources Engineering*, San Antonio, TX, 1, 66-70.

Lu, S.S. and Willmarth, W.W. (1973). "Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 60, 481-511.

Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (1999). "Turbulence structure in depth-limited, vegetated flow: Transition between emergent and submerged regimes." *28th IAHR congress*, Graz, Austria.

Nepf, H.M. and Vivoni, E.R. (2000). "Flow structure in depth-limited, vegetated flow." *Journal of Geophysical Research*, AGU, 105(C12), 28547-28557.

Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, A.A. Balkema, Brookfield, VT.

Raupach, M.R. and Shaw, R.H. (1982). "Averaging procedures for flow within vegetation canopies." *Boundary Layer Meteorology*, 22, 79-90.

Raupach, M.R. and Thom A.S. (1981). "Turbulence in and above plant canopies." *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 13, 97-129.

Sechet, P. and Le Guennec, B. (1981). "Bursting phenomenon and incipient motion of solid particles in bed-load transport." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 37(5), 683-696.