

침수식생 개수로의 이차흐름에 대한 실험연구

An Experimental Study for Secondary Currents in Open-channel Flows over Submerged Vegetation

양원준*, 최성욱**, 최병웅***

Wonjun Yang, Sung-Uk Choi, and Byungwoong Choi

요 지

본 연구에서는 곧은 식생과 유연한 식생 및 다양한 수심비를 갖는 개수로 흐름 조건에 대한 수리실험을 실시하였다. 레이저 도플러 유속계를 이용하여 수로 전체 단면의 유속을 측정함으로써, 이차흐름이 평균유속 및 난류량에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 하였다. 평균유속의 경우, 수치모의결과와 동일하게 측벽근처에서 최대 유속이 발생하였다. 유속측정자료를 이용하여 침수식생 개수로 흐름의 벡터도를 살펴본 결과, 침수식생 개수로의 경우 일반 개수로 흐름과는 달리 바닥 와 (bottom vortex)가 측벽 근처에서 매우 활발한 것으로 나타났으며, 이로 인해 수로 중앙의 높은 운동량을 가진 유체가 측벽방향으로 이동하고 있음을 확인하였다. 또한 측벽에서 이차흐름으로 인해 발생하는 강한 하강류가 레이놀즈응력 및 난류 강도의 수직방향 분포 형태에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 침수식생, 개수로, 이차흐름, 바닥渦

1. 서론

최근 하천복원 (river rehabilitation)에 있어서 중요시 되고 있는 식생은 호안의 물리적 보호는 물론 경관 조성, 생물의 서식처 및 피난처 제공, 친수공간의 형성, 오염물질의 흡수 및 수질 정화 등 다양한 역할을 수행한다. 기존의 다양한 연구는 침수식생 개수로 흐름의 거칠기와 평균유속 및 난류량의 수직구조에만 관심을 기울여 왔다 (Ikeda와 Kanazawa, 1996; Nepf와 Vivoni, 2000; Finnigan, 2000; Wilson 등, 2003; Carollo 등, 2005). 그러나 침수식생이 평균유속 및 난류량의 단면분포에 미치는 영향을 분석한 연구는 그 수가 많지 않으며 (Nezu와 Onitsuka, 2002; Kang과 Choi, 2007), 현재까지 침수식생 개수로의 단면특성은 일반 개수로와 유사할 것으로 가정하여 왔다.

Kang과 Choi (2007)는 침수식생을 갖는 개수로 흐름에 3차원 레이놀즈응력모형을 적용하였으며, 수치모의를 통해 개수로 흐름의 단면특성에 대한 분석을 실시하였다. 분석결과, 침수식생 개수로 흐름의 최대유속이 수로 중앙이 아닌 측벽 근처에서 발생하는 것을 보고하였으며, 이차흐름 (secondary current)의 형태 및 구조가 일반 개수로 흐름과 다르기 때문인 것으로 분석하였다. 그러나, 이에 대한 수리실험을 통한 검증은 이루어지지 못하였다. 따라서 본 연구는 침수식생을 갖는 개수로의 이차흐름을 수리실험을 통해 확인하고, 이를 통하여 이차흐름이 평균흐름 및 난류량에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

곧은 식생과 유연한 식생 및 다양한 수심비를 갖는 개수로 흐름 조건에 대한 수리실험을 실시하였다. 레이저 도플러 유속계를 이용하여 수로 전체 단면의 유속을 측정함으로써, 이차흐름이 평균유속 및 난류량에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 하였다. 평균유속의 경우, 수치모의결과와 동일하게 측벽근처에서 최대 유속이 발생하였다. 유속측정자료를 이용하여 침수식생 개수로 흐름의 벡터도를 살펴본 결과, 침수식생 개수로의 경우 일반 개수로 흐름과는 달리 바닥 와 (bottom vortex)가 측벽 근처에서 매우 활발한 것으로 나타났으며, 이로 인해 수로 중앙의 높은 운동량을 가진 유체가 측벽방향으로 이동하고 있음을 확인하였다. 또한 측벽에서 이차흐름으로 인해 발생하는 강한 하강류가 레이놀즈응력 및 난류 강도의 수직방향 분포 형태에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

2. 실험조건

본 연구는 연세대학교 수공학연구실이 보유하고 있는 가변 경사식 개수로 실험장치를 이용하였다. 개수로 실험장치의 재원은 폭 0.45 m, 높이 0.5 m, 그리고 길이 8.0 m이다. 표 1에 도시한 것과 같이 동일한 수심에 대하여 유량을 서로 다르게 하여 실험조건을 구성하였으며, U_m 은 단면평균유속, Re 는 Reynolds 수, 그리고

* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후과정 · e-mail: pulip@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · e-mail: schoi@yonsei.ac.kr

*** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 · e-mail: bw628@yonsei.ac.kr

S는 바닥 경사이다. 모형 식생은 웨어에서 하류방향으로 4.0 m 지점부터 7.5 m 지점까지 총 3.5 m의 구간에 식재하였다. 그림 1에 도시된 것과 같이 길이 35.0 mm, 폭 2.0 mm의 폴리에틸렌 필름을 이용하여 유연한 식생, 직경 2.0 mm의 나무 막대를 이용하여 곧은식생을 구현하였으며, 식생밀도는 2.78 m^{-1} 로 설정하였다.

3. 실험결과

그림 2는 각 실험조건에 따른 평균유속 분포를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 최대유속이 측벽 근처 ($y/B = 0.05$)와 수로 중앙에서 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 식생 유연성에 관계없이 나타나고 있으며, 식생수로의 특징으로 볼 수 있는 이같은 현상의 원인을 규명하는 것이 본 연구의 목적이다.

침수식생 개수로의 이차흐름을 분석하기 위해서는 횡방향 유속분포를 측정하여야 하지만, 본 연구에서 사용한 유속 측정장치는 흐름 및 수직방향 유속만을 측정할 수 있기 때문에, Wang과 Cheng (2005)이 제시한 연속방정식을 이용하여 횡방향 유속을 유추하였다. 그림 3은 본 연구의 유속측정결과를 이용하여 얻은 이차흐름 벡터이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 측벽 근처에서 반시계방향으로 회전하는 흐름을 볼 수 있다. 이는 Kang (2004)의 수치모의 결과와 동일한 것으로써, 바닥渦 (bottom vortex)가 증폭된 것이다. 수로 중앙에서는 측벽 방향으로 향하는 흐름이 발생하는 것으로 나타났지만, 이는 유속 측정 격자의 크기와 본 연구에서 적용한 Wang과 Cheng (2005)이 제시한 횡방향 유속 산정 기법으로 인한 오류인 것으로 판단된다.

기존의 다양한 연구 (Naot과 Rodi, 1982; Demuron과 Rodi, 1984; Nezu와 Nakagawa, 1984)에 의하면, 이차흐름은 흐름 방향 유속의 최대점을 이동시키는 velocity dip을 만드는 것으로 알려져 있으며, 본 연구의 실험결과 침수식생 개수로 흐름의 경우에도 동일한 것으로 나타났다. 즉 이차흐름은 수로 중앙의 고운동량 흐름을 측벽 근처로 이동시키게 되며, 이로 인하여 측벽 근처에서 최대 유속이 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

그림 4는 측벽으로부터의 거리에 따른 레이놀즈응력의 수직분포를 도시한 것이다. 그림에서 실선은 자유수면에서의 레이놀즈응력 최소값 (= 0.0)과 식생높이에서 발생하는 최대값 (=)을 연결한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 측벽으로부터의 거리에 관계없이 바닥으로부터 증가하기 시작해서, 식생높이에서 최대값을 가지며, 다시 수면에 가까워질수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 수로 중앙부근 ($y/B > 0.22$)에서의 레이놀즈응력 분포는 실선과 잘 일치하고 있으며, 기존의 알려진 선형 분포를 보이고 있다. 그러나 이차흐름이 강하게 발생하는 것으로 나타나는 측벽에 가까워질수록 ($y/B < 0.16$) 레이놀즈응력은 선형적인 분포를 보이는 것으로 나타났다. 특히 측벽 근처 ($y/B = 0.02$)에서는 선형 분포에 비해 레이놀즈응력이 작게 나타났으며, 아래쪽으로 오목한 형태를 보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 이차흐름에 의한 것으로, 이차흐름의 하강류가 수면 근처의 저운동량 흐름을 아래쪽으로 밀기 때문에 레이놀즈 응력 분포가 오목해 지고, 이와는 반대로 상승류가 발생하는 $y/B = 0.15$ 인 지점에서는 위로 부풀어 오르는 것과 같은 형태를 보이게 된다. 곧은 식생의 경우에도 비교적 유사한 형태를 보이는 것으로 나타났으며, 침수식생 개수로의 이차흐름의 특성은 식생 유연성에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 또한 RH2Q2 케이스의 경우 측벽 근처 ($y/B = 0.02$)에서 레이놀즈 응력의 부호가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 수면 근처에서 발생하는 유속감쇄 (velocity dip) 현상 때문인 것으로 판단할 수 있다.

그림 5는 난류강도를 도시한 것이다. 난류강도의 분포형태는 레이놀즈 응력과 유사하게 식생높이 근처에서 최대값을 가지고, 수면과 바닥방향으로 감소하는 형태를 보인다. 레이놀즈 응력과는 다르게 실제 식생높이보다 높은 지점에서 난류강도의 최대값이 나타나고 있으며, 이는 $y/B = 0.15$ 인 지점에서 확인할 수 있다. 이는 이차흐름으로 인해 발생한 상승류에 난류강도가 직접적인 영향을 받기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 특히 흐름방향 난류강도의 수직분포에도 이차흐름이 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 하강류가 지배적인 $y/B = 0.02$ 지점의 경우, 흐름방향 난류강도는 레이놀즈 응력과 유사하게 아래쪽으로 오목한 형태를 보이고 있으며, 상승류가 지배적인 구간에서는 이와는 반대되는 현상을 보이고 있다.

4. 결론

본 연구는 침수식생 개수로 흐름의 단면특성에 관한 실험연구이다. 폭 0.002 m, 길이 0.035 m인 폴리에틸렌 필름을 이용하여 유연한 식생을 모사하였으며, 다양한 흐름조건에 대한 수리 실험을 수행하였다. 유입부의 영향이 없고, 흐름이 잘 발달된 지점에서 유속측정을 실시하였으며, LDA를 이용하여 각 지점에서의 순간속도를 측정하였다. 바닥 및 측벽으로부터의 거리에 따른 평균유속, 레이놀즈응력, 난류강도와 같은 난류량을 살펴보았다.

측정된 횡방향 지점별 평균유속은 기존 연구결과와 유사하였다. 그러나 최대 유속 발생지점이 수로 중앙이 아닌 측벽 근처로 이동하였고, 등유속선의 형태가 물결모양으로 나타났다. 이는 기존에 알려진 개수로 흐름과는 다른 것으로 판단할 수 있으며, 이와 같은 현상의 발생 원인은 침수식생으로 인한 이차흐름 때문

인 것으로 판단할 수 있다. 또한 레이놀즈응력 및 난류강도의 경우, 이차흐름의 영향을 확인하였다. 식생높이 근처에서 최대값을 가지고, 수면 및 바닥에 가까워질수록 감소하는 것은 일반적인 식생수로와 동일하였지만, 이차흐름의 영향을 받기 때문에 최대값 발생위치와 수직분포 형태가 변화하는 것을 관찰하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 연구비지원 (06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

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

Kang, H. and Choi, S.U. (2005). "Reynolds stress modeling of rectangular open-channel flows." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 51, 1319-1334.

Kang, H. and Choi, S.U. (2007). "Numerical Investigations of Streamwise Vortex in Fully Vegetated Open-Channel Flows." *Journal of KSCE*, 39(B), 237-245(in Korean).

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. (1984). "Cellular secondary currents in straight conduit." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(1), 173-193.

Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*. IAHR Monograph, A.A. Balkema, Rotterdam.

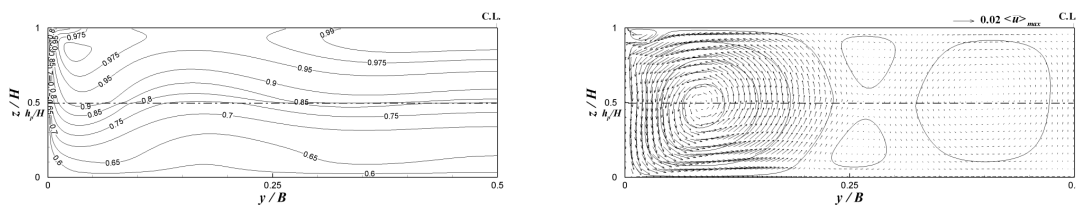
Tsujimoto, T., Kitamura, T., Fujii, Y., and Nakagawa, H. (1996). "Hydraulic resistance of flow with flexible vegetation in open channel." *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 14(1), 47-56.

Wilson, C.A.M.E., Stoesser, T., Bates, P.D., and Pinzen, A.B. (2003). "Open-channel flow through different forms of submerged flexible vegetation." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129(11), 847-853.

Yang, W. and Choi, S.U. (2009). "Impact of stem flexibility on mean flow and turbulence structures in depth-limited open channel flows with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, accepted.

표 1. 실험 조건

Case	Q (m ³ /s)	H (m)	H/h_1 (-)	S (-)	u_* (m/s)
FH2Q1	0.0075	0.075	2.73	0.00151	0.0265
FH2Q2	0.0105	0.075	3.00	0.00266	0.0361
RH2Q1	0.0075	0.075	2.14	0.00141	0.0235
RH2Q2	0.0105	0.075	2.14	0.00269	0.0325



(a) 평균유속 분포 (b) 이차흐름 벡터
 그림 1. Kang and Choi (2007)의 수리실험 결과

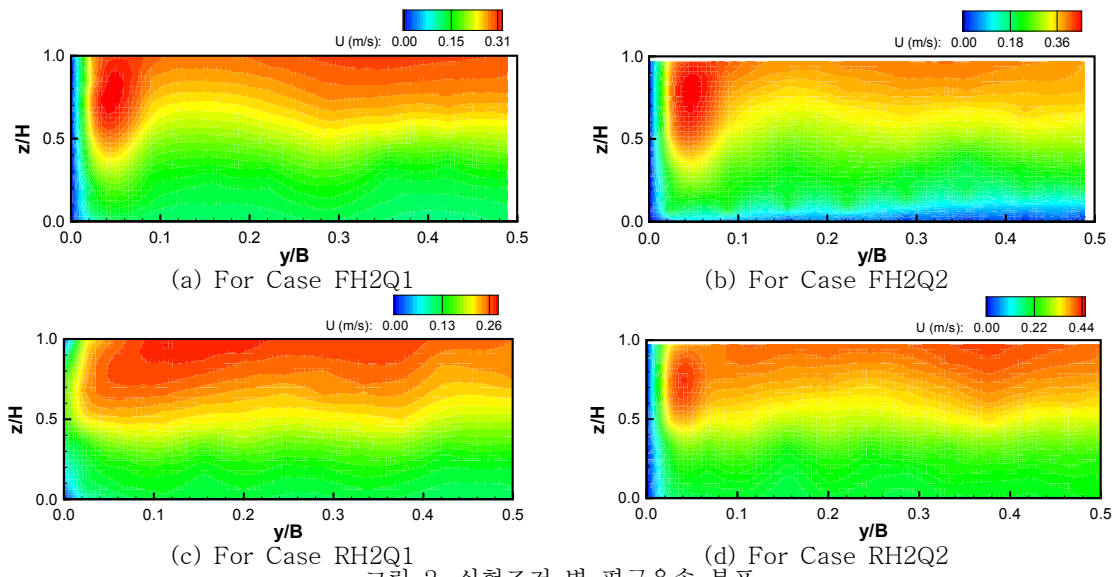


그림 2. 실험조건 별 평균유속 분포

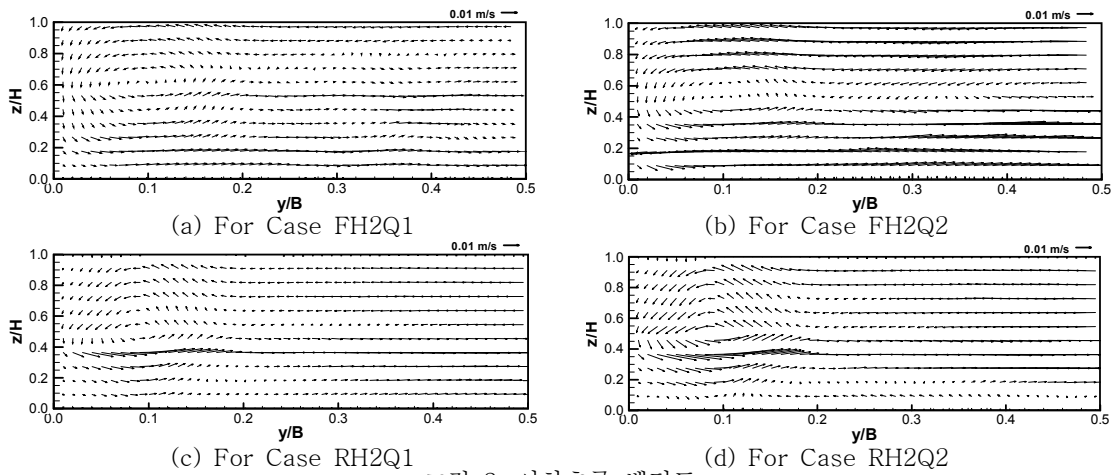


그림 3. 이차흐름 벡터도

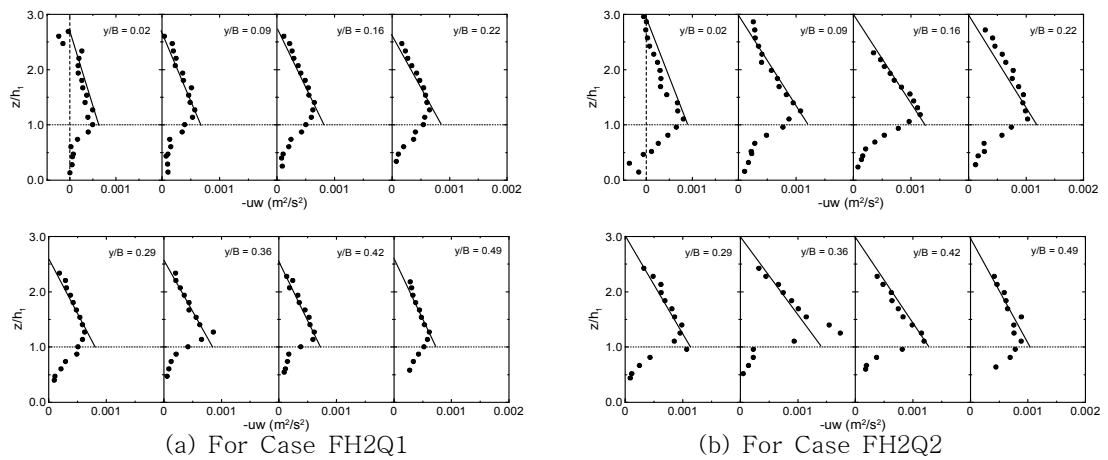
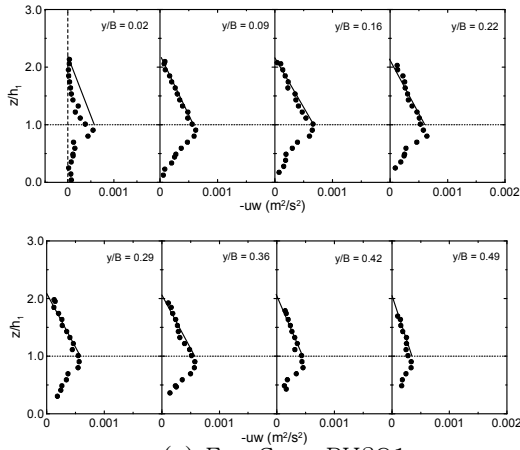
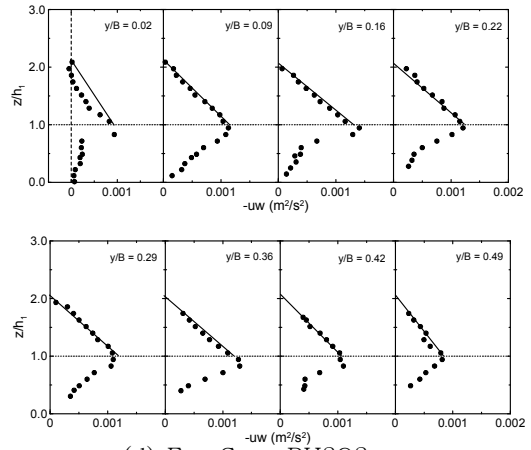


그림 4. 레이놀즈응력 분포

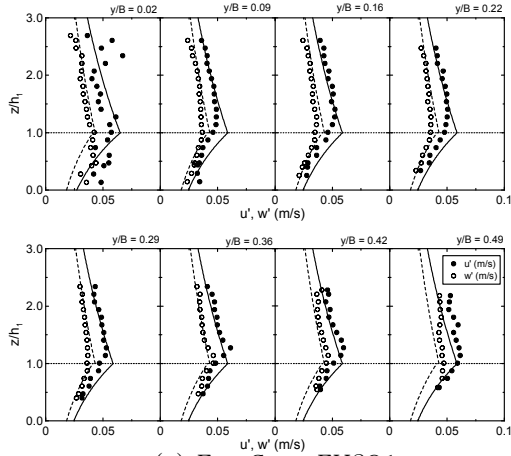


(c) For Case RH2Q1

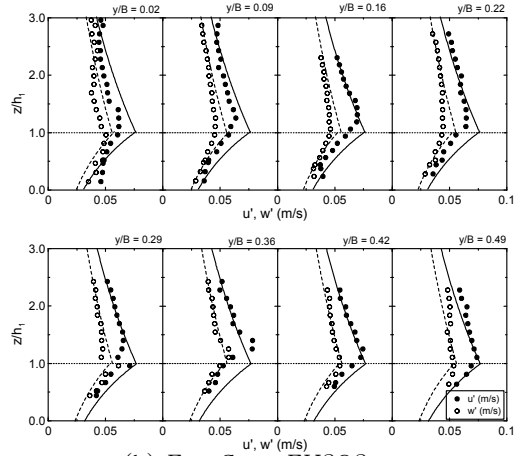


(d) For Case RH2Q2

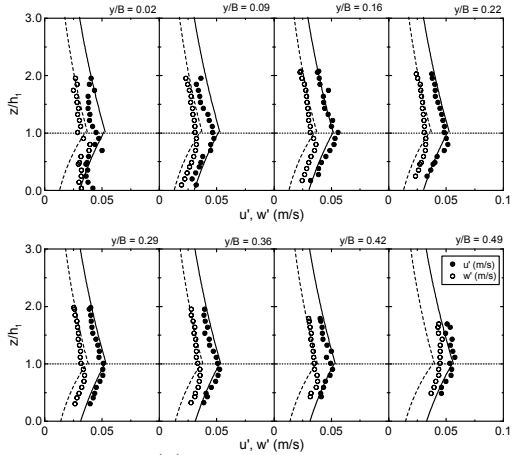
그림 4. (계속)



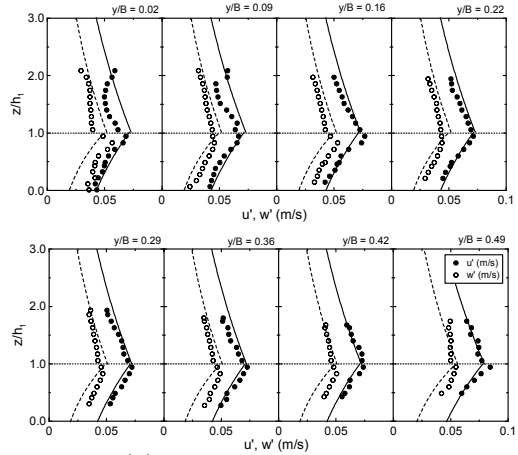
(a) For Case FH2Q1



(b) For Case FH2Q2



(c) For Case RH2Q1



(d) For Case RH2Q2

그림 5. 난류강도 수직분포