

유량비에 따른 하도흐름의 실험적 연구

An Experimental Study on the Stream Flow by Discharge Ratio

김기형¹⁾, 최계운²⁾, 조준범³⁾

Gee Hyoung Kim, Gye Woon Choi, Jun Bum Cho

요 지

하도내에 설치된 3개의 구조물이 모두 제거된 상태에서 원형하천의 합류부 하류의 유량이 $Q_{100}=12,090\text{m}^3/\text{sec}$ 인 경우에 대해 본류와 지류의 유량비(Q_s/Q_m)가 0.99, 0.85, 0.72, 0.67, 0.57로 변화하는 경우의 유량을 실험유량으로 사용하여 수리모형실험을 수행하였다.

하도의 구조물이 제거된 경우 합류부로 근접할수록 서서히 증가한 수위는 합류부를 지나면서 급격히 감소한다. 이때 본류와 지류의 유량비(Q_s/Q_m)가 감소할수록 합류부에서 증가된 수위는 하류쪽으로 이동하며 합류부 이후에서의 감소폭이 작아지며 각 단면에서의 수위변화율은 합류부 상류 구간에서는 감소하고 합류부 하류 구간에서는 증가하고 있다. 또한 합류부에 가까울수록 횡단면에서의 수위차는 증가하여 합류부 중심 직하류 단면에서 최대를 보이는데 유량비가 감소할수록 합류부 횡단면에서의 수위차는 하류구간에서는 감소하며 합류부 상류구간에서는 증가한다. 합류구간의 유속변화에 있어서는 합류부에 가까울수록 평균유속이 감소하다가 합류부에서 증가하기 시작하여 합류부 중심 직하류 단면에서 평균유속이 최대를 나타내며 최대유속의 변화율은 합류부 하류구간보다 합류부 상류구간에서 더 크게 나타난다. 합류지역의 주흐름구간은 합류점 이후 구간에서 합류점 부근의 평균 유속보다 큰 유속을 보이는 구간으로 유량비가 감소하면 주흐름구간의 폭이 증가하며 하도의 하류쪽으로 이동하기는 하나 유량비에 의한 영향은 크지 않다.

핵심용어 : 합류부, 자연하천, 유량비, 횡단면 수위변화

1. 서론

자연하천은 인공수로와는 달리 단면이 일정하거나 완전한 직선형태를 보이는 것도 아니며, 서로 다른 하천이 만나 형성되는 합류구간에서의 흐름해석이 복잡하기 때문에 대부분 이를 단순화하고 많은 가정을 통한 해석이 이루어지고 있다.

특히, 하천에 대한 대부분의 홍수위 해석에 있어 횡단면에 대한 내·외측의 수위차이를 고려하지 못하고 횡단면에서 모두 동일한 평균수위만을 계산하고 있으며 합류구간에서의 해석은 단순히 지류에서의 유량 유입으로 가정하여 해석하고 있기 때문에 합류구간에서 실제로 발생하는 복잡한 수리특성은 거의 고려하지 못하고 있는 실정이다. 자연하천의 합류구간에 있어서는 단면의 형상과 본류에 대한 지류의 접근각도, 그리고 지류유량의 본류에 대한 흐름각도 등이 정형화되지 않고 제각각으로 구성되기 때문에 수리모형이나 수치모형을 통한 해석도 어렵고, 이론적인 접근도 쉽지 않기 때문에 구체적이고 세부적인 연구가 미진하여 최대한 단순화시킨 가정을 통한 해석이 이루어지고 있는 실정이다.

따라서, 모형실험을 통해 실제하천에서의 현상에 가까운 흐름특성을 도출하고, 도출된 하도의 흐름특성을 실제하천에 적용하기 위해서는 정형화된 단면이 아닌 자연단면으로 구성된 모형을 대상으로 하는 하도에서 본류와 지류의 유량비 변화에 따라 수면폭과의 관계, 합류구간에서의 영향을 고려한 하도의 흐름특성을 파악하기 위한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

1) 정회원-인천발전연구원 연구위원-E-mail : water@idi.re.kr

2) 정회원-인천대학교 토목환경시스템공학과 교수-E-mail : gyewoon@incheon.ac.kr

3) 정회원-도화종합기술공사 수자원부 사원-E-mail : cho@dohwa.co.kr

2. 연구동향

합류구간에서의 특성 파악을 위한 연구는 동일한 폭을 가진 수로에 대해 합류구간의 접근각도 변화에 따른 수리특성 파악과 동일한 접근각도에서 본류와 지류의 유량변화에 따른 수리특성 파악에 대한 연구 등 크게 두가지 부류로 대별할 수 있으며, 합류구간의 흐름특성 파악을 위한 수리모형의 구성에 대해 정리한 연구도 있다. Modi 등(1981)은 본류와 지류의 합류구간이 30°, 60°, 90°로 구성된 합류점에 대한 흐름특성의 연구결과 본류와 지류에 대한 한계 유량비는 본류와 지류의 하폭 증가뿐 아니라 본류와 지류가 합류되는 합류각도의 증가에 따라 증가한다고 하였으며 흐름이 정체되는 정체점(Stagnation Point)은 지류와 본류가 만나는 측면을 따라 발생한다고 하였다. Best와 Reid(1984)는 합류점에서 분리지역(Separation Zone)의 크기는 서로 다르기 때문에 합류점 직전의 합류 흐름 폭의 경계는 중요하게 고려되어야 한다고 하였으며 지류와 본류의 합류흐름에 지배받는 합류직전 수로 폭의 마찰은 유속에 직접적인 영향을 받는다고 하였다. 또한 정류 흐름은 합류점과 지류의 유량비가 클수록 잘 나타나고 분리지역은 합류점의 각도가 45°, 70°, 90°로 갈수록 점차 커지고 수로의 유량비가 0.3~0.35 범위에서 최대를 보이는 반면에 15°일 때는 45°, 70°, 90°인 경우와 반대의 현상이 나타나는 실험 결과를 제시하였다. 그러나, 분리지역의 모양은 거의 변화 없이 일정한 것을 볼 수 있었다.

국내에서의 합류구간 관련 연구를 보면 심기오(1996)는 Froude 상사를 통해 소하천 합류구간에서 장애물에 의한 수위와 유속의 변화를 분석하고 하상의 경사와 합류각도가 수심비에 미치는 영향을 규명하였다. 박용섭(2003)은 본류와 지류의 폭비가 0.8인 모형수로를 이용하여 합류구간에서의 유량비별, 접근각도별 수리특성을 분석하여, 합류구간 흐름에서 평균 유속보다 빠른 가속유로를 제안하고 합류각도가 클수록 가속유로의 영향권이 증가한다고 하였다.

3. 실험장치 구성

합류부와 만곡구간이 동시에 존재하는 자연형 하천에 설치된 구조물을 제거하는 경우 유로내의 흐름특성을 분석하기 위하여 실제 자연하천의 단면을 지닌 모형수로를 제작하였다. 강원도 영월지역의 남한강과 평창강이 만나는 합류부를 포함한 남한강 6km, 평창강 1.2km구간의 실제하천을 대상구간으로 하여 수평방향 1/200, 수심방향 1/66.7의 축척을 적용한 왜곡도가 3인 왜곡모형을 제작하였다.

제작된 모형수로의 총 연장은 42m이며 수로를 구성하는 단면의 폭은 1~5m까지 다양하게 변화되고 있고 모형수로 내에 교량 5개, 취수댐과 소수력댐 등 총 7개의 구조물을 설치하였다. 또한 본 실험에서는 5가지 유량에 대해 수위일치법으로 조도를 조정하였는데, 조도검증 실시 후 계산수위와 모형에서의 실측 수위에 대하여 실시한 적합도분석에서 표준오차가 0.12로 계산수위와 모형에서의 실측수위는 거의 유사하게 나타났다. 실험을 위한 유량조건으로 합류부 하류의 유량을 100년 빈도로 고정하고 합류부 상류의 본류와 지류의 유량비를 변화시켜 본류와 지류의 유량비 ($Q_r=Q_s/Q_m$)가 0.99, 0.85, 0.72, 0.57 등 4가지의 경우에 대해 흐름특성을 분석하였다.

표 1. 실험 조건별 원형과 모형의 유량비

(단위 : m³/sec)

유량비(Q_s/Q_m)	구분	남한강	평창강	합류부 하류
0.99	원형	6,090	6,000	12,090
	모형	0.05900	0.05195	0.11095
0.85	원형	6,530	5,560	12,090
	모형	0.05994	0.05101	0.11095
0.72	원형	7,040	5,050	12,090
	모형	0.06462	0.04633	0.11095
0.67	원형	7,230	4,860	12,090
	모형	0.06634	0.04461	0.11095
0.57	원형	7,720	4,370	12,090
	모형	0.07086	0.04009	0.11095

4. 실험결과

4.1 합류부에서의 수위변화

유량비가 0.99인 경우 본류의 수위는 합류부로 오면서 감소하다가 합류부 근처에서 급격히 증가하여 합류점 중앙부근에서 최대수위를 유지하고 합류부를 지나면서 급격히 감소하고 감소된 수위는 다시 증가와 감소를 반복하는 경향을 보이고 있다. 수심의 경우 합류부 중앙 상류쪽 수위는 다른 지역에 비하여 높게 나타나고 있

는데 이는 본류와 지류에서 합류부로 유입되는 흐름이 충돌하여 급격한 수위상승을 유발하기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 유량비가 0.85, 0.72, 0.67, 0.57인 경우에도 공통적으로 나타나고 있으며, 유량비가 변화함에 따라 합류부에서의 수위변화도 복잡한 경향을 보이며 변화하고 있어 합류부의 수위변화는 본류와 지류의 유량비에 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 사료된다.

유량비가 0.57인 경우는 유량비가 커서 지류의 유량이 많은 경우에 비하여 합류부에서의 수위증가는 감소하였으나, 수위가 증가된 구역의 범위가 넓고 증가된 수위의 감소폭은 더욱 작아진 것을 알 수 있다. 따라서, 유량비가 감소할수록 합류부의 수위증가는 하류쪽으로 이동하며 증가된 수위가 합류부 이후에서 감소하는 감소폭은 작아지고 있는 것으로 분석되었다.

합류부 하류구간과 상류구간에 대해 수위변화를 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 합류부 하류구간의 경우 대체로 하류단면으로 갈수록 수위변화율은 작은 값을 보여 수위가 감소하고 있음을 알 수 있는데, 이는 일반적인 하도에서의 수위변화율과 유사한 경향이며 다만, 합류부 구간내에 있는 단면인 76번, 75번, 74번 단면의 경우는 합류부를 벗어난 하류구간의 다른 단면에 비해 유량비에 따라서 수위변화율이 (+)값을 나타내는 경우도 있어 합류부 중심부에서는 유량비에 따라 하류로 갈수록 수위가 증가하는 경우도 발생하고 있는 것으로 나타났다.

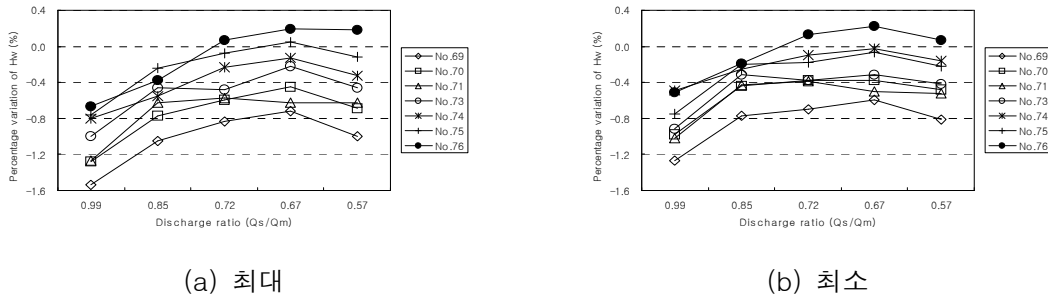


그림 1. 합류부 하류의 수위변화율

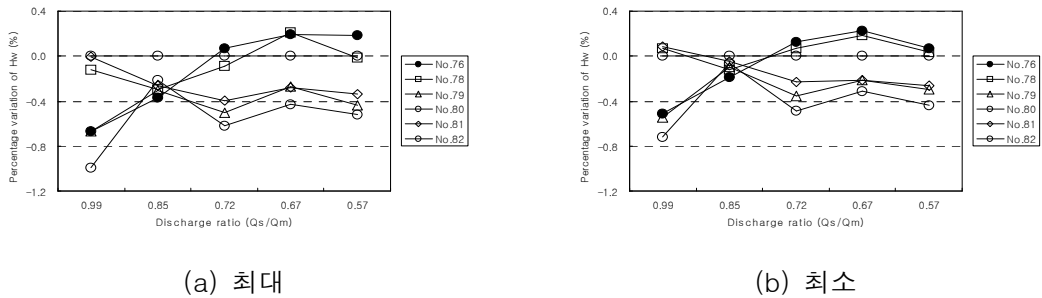


그림 2. 합류부 상류의 수위변화율

또한 유량비가 0.85인 경우에 각 단면간의 수위변화율은 가장 작은 차이를 보이고 있는 것으로 나타나 0.85의 유량비가 가장 안정적인 상태로 나타났다.

합류부 상류구간의 경우에도 하류구간과 마찬가지로 수위변화율이 (+)값을 보이는 단면이 존재하는데, 76번 단면과 78번 단면으로 모두 합류부에 근접된 합류부 주변단면으로써 합류부 하류구간에서와 동일한 경향을 보이고 있다.

합류부 하류구간과 마찬가지로 0.85의 유량비를 제외하고 유량비가 증가할수록 각 단면에서의 수위변화율도 점차로 증가하다가 유량비가 0.67이후에는 다시 감소하는 경향을 보이고 있으며, 0.85의 유량비에서는 각 단면간의 수위변화율이 가장 작은 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다.

4.2 합류부 주변 횡단면에서의 수위차 변화

합류부의 각 횡단면에서 발생하는 수위차를 각 단면과 유량비의 변화에 따라 분석하기 위하여 각 횡단면에서의 최대수위와 최소수위의 차이(Δh_w)를 평균수심(d_w)으로 나누어 무차원화하여 하도구간에 따라 그림 3에 나타내었다.

합류부 상류의 최상류 단면인 82번 단면의 평균 수심이 작아서 평균수심에 대한 횡단면의 수위차 비율이 큰 것을 제외하면 합류부 단면인 76번 단면에 가까울수록 횡단면의 수위차 비율이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 수위차 비율은 지류의 경우보다 크게 나타나 약 5~16% 범위를 보이고 있는데 80번 단면에서 20% 이상을 보이는 것은 측정오차로 인한 값으로 사료된다. 합류부 하류구간에 대한 횡단면에서의 수위차 변화는 합류부 상류구간의 경우와 마찬가지로 합류부에서 멀어질수록 평균수심에 대한 횡단면에서의 수위차 비율은 감소하고 있는 경향을 보이고 있으나, 합류부 직하류 단면인 75번 단면에서는 횡단면의 수위차가 최대 비율을 보이고 있어 합류점을 중심으로 하는 하도구간에서는 합류 중심 직하류 단면이 횡단면에서의 수위차가 가장 크게 나타나고 있고 이는 합류부 중심 직하류 단면이 가장 불안정한 흐름상태를 보이기 때문으로 판단된다.

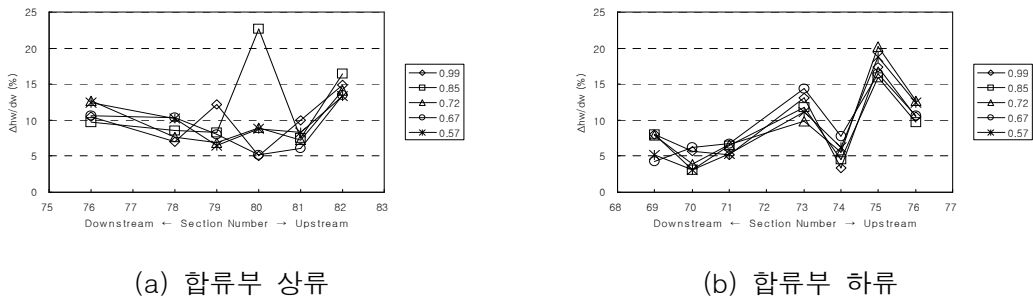


그림 3. 합류부에서 횡단면의 수위차

4.3 합류부에서의 유속 변화

합류부 주변의 각 횡단면에서 측정된 유속을 유속선으로 표현하여 유량비에 따른 유속선의 분포를 그림 4에 나타내었다.

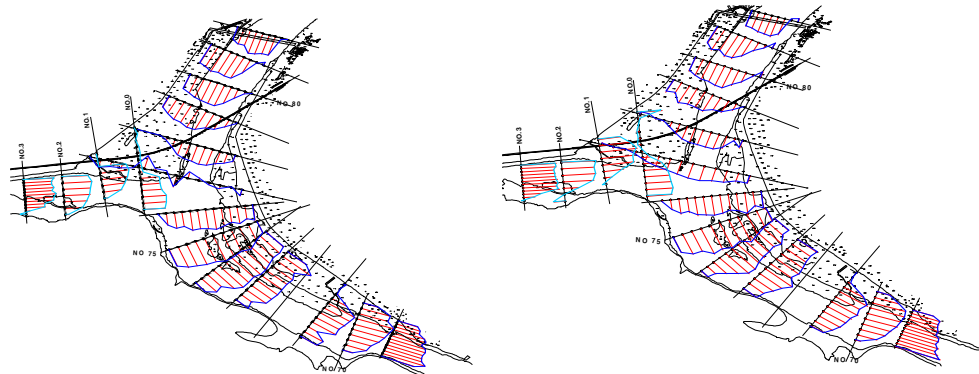
분류와 지류의 유량비가 0.99인 경우는 분류와 지류의 유량이 거의 동일한 상태로 분류와 지류의 유속분포가 합류구간을 지나 거의 동일하게 연결되어 있어 Y형태의 유속분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 다만, 합류부의 중심에서는 분류와 지류의 유속이 충돌하여 특정한 유속분포가 나타나지 않고 복잡한 형태를 보이고 있는데, 합류구간 상류의 유속에 있어분류의 경우는 우안에서 주흐름이 관측되며 지류의 경우는 좌안에서 주흐름이 관측되고 있는데 모두 만곡구간의 외측 부분에서 주흐름이 발생하고 있음을 알 수 있다.

유량비가 0.99 이후로 점차로 감소함에 따라 상대적으로 지류의 유량은 감소하고 분류의 유량은 증가하기 때문에 하도의 흐름은 분류의 흐름에 대한 영향을 많이 받게 된다. 유량비가 0.99보다 감소하게 되면 지류의 경우 주흐름의 영역은 좌안쪽으로 이동하고 있는 형상을 볼 수 있으며, 분류의 경우는 합류부 중심에서 복잡한 형태를 보였던 흐름이 다소 안정적으로 변화하였고, 합류부 이후의 흐름도 0.99인 경우에 비해 유량비가 감소할수록 안정적인 형태를 보이고 있다.

또한 지류에서 유입되는 유량의 유입각도는 합류중심에 위치한 단면인 75번 단면에서 볼 때 유량비가 감소할수록 합류부 상류의 분류 흐름에 거의 직각에 가까운 각도로 유입되고 있는 것으로 나타났다.

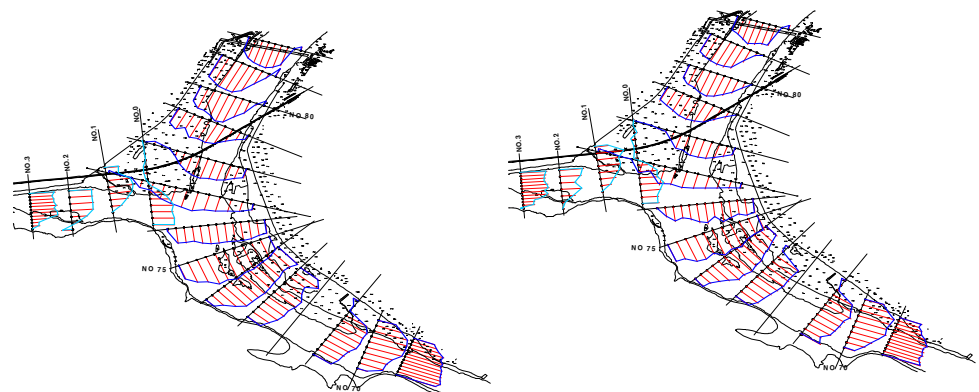
합류부 주변의 각 단면에서 측정된 평균유속은 그림 7에 나타내었다. 지류인 평창강의 경우 합류부로 가까워질수록, 그리고 유량비가 감소하여 지류 유량이 감소할수록 평균유속은 감소하고 있음을 알 수 있다.

분류인 남한강의 경우 합류부로 갈수록 평균유속이 감소하다가 합류부에서 증가하기 시작하여 합류부 중심 직하류 단면에서 평균유속이 최대를 보이고 합류부를 지나면서 다시 유속이 감소하고 있는 것으로 나타났는데 71번 단면 이후의 유속증가는 하도의 단면적이 감소하여 발생하는 것으로 판단된다.



(a) $Q_s/Q_m = 0.99$

(b) $Q_s/Q_m = 0.85$



(c) $Q_s/Q_m = 0.72$

(d) $Q_s/Q_m = 0.67$

그림 4. 합류부에서의 유속분포

5. 결 론

일반적인 자연하천은 곡선구간과 직선구간이 혼재하며 본류와 지류가 복잡하게 연결되어 있고 인위적으로 구조물이 설치되어 있어 하도내의 흐름 특성은 매우 복잡한 양상을 띠게 된다. 본 연구에서는 자연하천에 설치된 수중구조물과 유량의 변화에 따른 하도의 흐름특성을 파악하기 위하여 수리모형실험을 실시하였다.

수리모형은 대상구간인 영월지역의 남한강과 평창강 합류지점을 중심으로 수평 1/200, 수심 1/66.7의 축척으로 왜곡도는 3으로 제작하였으며 기하상사를 통해 원형하천과 동일한 단면으로 구성하고 제작된 모형수로에 대해 조도검증을 통해 원형과 동일한 조도를 갖도록 하였다. 하도내 구조물이 모두 제거된 상태에서 원형하천의 합류부 하류의 유량이 $Q_{100}=12,090\text{m}^3/\text{sec}$ 인 경우에 대해 본류와 지류의 유량비(Q_s/Q_m)가 0.99, 0.85, 0.72, 0.67, 0.57로 변화하는 경우의 유량을 실험유량으로 사용하여 수리모형실험을 수행하였다. 각각의 경우에 유속변화, 수위변화 등을 비교, 분석하였으며 본 실험 조건에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 구조물의 상태가 변화되어 하도의 구조물이 제거된 경우 합류부로 근접할수록 서서히 증가한 수위는 합

류부를 지나면서 급격히 감소하고 있으며 본류와 지류의 유량비(Q_s/Q_m)가 감소하여 본류의 유량이 커질수록 합류부에서 증가된 수위는 하류쪽으로 이동하며 합류부 이후에서의 감소폭이 작아진다. 또한 본류와 지류의 유량비가 감소할수록 각 단면에서의 수위변화율은 합류부 상류 구간에서는 감소하고 합류부 하류 구간에서는 증가하는데 0.67의 유량비일 때 수위변화율이 최대를 보이고 있다.

2. 합류구간의 수위변화에 있어서 합류부에 가까울수록 횡단면에서의 수위차는 증가하여 합류부 중심 직하류 단면에서 최대를 보이는데 유량비가 감소할수록 합류부 횡단면에서의 수위차는 하류구간에서는 감소하며 합류부 상류구간에서는 증가한다. 합류구간의 유속변화에 있어서는 합류부에 가까울수록 평균 유속이 감소하다가 합류부에서 증가하기 시작하여 합류부 중심 직하류 단면에서 평균유속이 최대를 나타내며 최대유속의 변화율은 합류부 하류구간보다 합류부 상류구간에서 더 크게 나타난다.
3. 합류지역의 주흐름구간은 합류점 이후 구간에서 합류점 부근의 평균 유속보다 큰 유속을 보이는 구간으로 유량비가 감소하여 본류의 유량이 증가할수록 주흐름구간의 폭이 증가하며 하도의 하류쪽으로 이동하기는 하나 유량비에 의한 영향은 크지 않다.

참고 문헌

- Best, J. L., Reid, I. (1984), Separation Zone at Open-Channel Junctions , Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.110 No.11, pp.1588 ~ 1594.
- Choi, G. W., Park, Y.S., Han, M. S., Kim, Y. K., The analysis of hydraulic characteristics at channel junction through hydraulic model test , Journal of Korea Water Resources Association, KWRA, Vol. 37 No.10, pp.881 ~ 888.
- Modi, P. N., Ariel, P. D., Dandekar, M. M. (1981), Conformal Mapping for Channel Junction Flow , Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol.107 No.HY12, pp.171 ~ 1733.
- Sim G. H. Experimental Study on the Depth-Variations of Confluence Area in Small Urban Channel ,,Journal of Korea Water Resources Association, KWRA, Vol. 28 No.3, pp.197 ~ 204.
- Park, Y. S., The analysis of hydraulic characteristics depending upon the variation of discharge and approaching angle at channel junction , Degree of Doctor of philosophy, Incheon University