

## 하천 여울의 분류 및 물리, 수리학적 특성 분석

### Classification of Riparian Riffles and Their Physical and Hydraulic Characteristics

김 성 환\* / 양 전 영\*\* / 김 진 흥\*\*\*

Kim, Seong Whan / Yang, Jeon Young / Kim, Jin Hong

#### Abstract

This study performed the systematic classification of the various types of riffles and analyzed their physical and hydraulic characteristics at the Hongcheon River and Seomjin River. The riffles are classified into the long type and the wide type by their ratio of length and width, and also classified into the convergent type and the divergent type by their width change along flow direction. They are also classified into the falling type, the running type, the undular wave and the undular jump by their surface profiles. The falling type and the running type usually occur near the cobbles with multiple diameters, whereas the undular wave and the undular jump occur near the small pebbles. They showed the upward convex type at the middle part, and the slope gets bigger at the downstream part.

**Keywords** : riffle, convergent type, divergent type, falling type, running type, undular wave, undular jump

#### 요 지

본 논문에서는 홍천강과 섬진강을 대상으로 하천에 존재하는 다양한 형태의 여울을 체계적으로 분류하고, 물리적 및 수리학적 특성을 분석하였다. 여울의 길이와 폭 비율을 기준으로 긴 형태와 넓은 형태로 분류하고, 상·하류 폭의 변화 정도를 기준으로 집중 형태와 확산 형태로 분류하였다. 또한 흐름의 물결 형태에 따라 떨어지는 형태, 미끄러지는 형태, 약한 파도 및 약한 도수로 분류하였다. 떨어지는 형태와 미끄러지는 형태는 주로 큰 돌 주위의 다양한 입경을 지닌 하상에서 발생하였으며, 약한 파도와 약한 도수는 주로 잔 돌 주위에서 발생하였다. 여울의 흐름 방향 경사는 가운데 부분에서 위로 볼록하였으며, 하류측으로 갈수록 경사가 커졌다. 여울의 종적 구조에 따른 물결형태를 구분하여 보면, 여울의 집중 형태에서는 흐름 방향으로 약한 파도, 미끄러지는 형태 및 약한 도수가 발생하였다. 긴 형태의 경우, 흐름방향으로 약한 파도, 미끄러지는 형태 및 떨어지는 형태가 발생하였다. 넓은 형태의 여울에서는 약한 파도, 약한 도수 및 약한 파도, 약한 도수가 발생하였다.

**핵심용어** : 여울, 집중 형태, 확산 형태, 떨어지는 형태, 미끄러지는 형태, 약한 파도, 약한 도수

\* 인천대학교 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: kskim@dbeng.co.kr)

Doctoral Student, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

\*\* ㈜호반건설 토목부 대리 (e-mail: didwjsdud@ihoban.co.kr)

Assistant Manager, Hoban Construction, Seoul 136-754, Korea

\*\*\* 교신저자, 중앙대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 교수 (e-mail: jinhkim@cau.ac.kr, Tel: 82-2-820-5893)

Corresponding Author, Prof. Dept. of Civil, Environmental & Plant Eng., Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

## 1. 서론

하천이 사행하게 되면 여울과 소가 반복적으로 자연스럽게 나타난다. 여울이란 큰 돌이나 자갈에 물이 부딪치고 빠르게 흘러가며, 일반적으로 얇고 산소 공급이 활발한 부분을 말한다. 반면 소는 물의 흐름이 느리고 깊은 곳이다. 대부분의 어류가 밤이 되면 소에서 잠을 잔다. 깊은 소는 홍수 때나 다른 동물들의 공격으로부터 어류가 피할 수 있는 피난처이며, 유영력이 약한 치어들의 생육장소이다.

여울은 어류의 먹이가 되는 수생곤충이나 부착조류 등이 소보다도 훨씬 많이 존재한다. 또한 여울은 어류의 먹이 공급지이며 많은 어류들이 여울에서 산란을 한다. 여울은 하천에서 다양한 생태적인 환경을 가지며 수중 생물의 서식처로서의 중요한 역할을 제공한다.

이처럼 여울은 하천 생태계를 보전 및 창출하는 중요한 역할을 하기 때문에 주로 생태학적인 측면에서 연구가 진행되고 있을 뿐(Jamles and Steven, 2001; Bovee, 1988; Webb and Weihs, 1983. Webb and Gerstner, 2000), 여울에 대한 물리적인 구조나 수리학적 특성에 대한 기초적인 연구는 미흡한 편이다. 이와 관련한 논문은 Frissell (1986)과 Chibana et al. (2005)이 여울의 계층적인 구조에 대해 연구한 내용이 있으며, 국내의 경우 Lee et al. (2012)과 Hong et al. (2012)이 여울과 소의 연쇄구조 특성에 대해 연구하였고, Choi and Bae (2011)이 여울과 소의 연속 구조에서 하상토의 입도와 이동 특성을 연구한 내용이 있다. 그러나 여울을 체계적으로 분류하고, 분류된 각 여울에 따른 물리적 및 수리학적인 기본 연구는 국내에 없는 실정이다.

본 논문에서는 현지 하천조사를 통하여 하천에 존재하는 다양한 형태의 여울을 체계적으로 분류하고, 물리적

및 수리학적 특성을 분석하였다. 이를 위해 섬진강과 홍천강을 대상으로, 현지 조사를 통하여 다양한 형태의 여울이 어떠한 수리학적 특성을 가지고 형성되며, 각각의 여울 형태에 따른 물결 모양, 규모, 경사 및 하상 입경을 측정, 비교 분석하였다.

## 2. 여울의 특성

### 2.1 여울의 형성 및 형태

여울은 흐름이 정체되지 않고 크고 작은 물결이 이는 구간을 말한다. 여울은 하천의 중, 상류 급경사 구간과 사행이 발달된 구간에서 많이 발생된다. 하상 경사가 급하여 흐름의 유속이 크고 수심이 얕으며 하상은 암반으로 구성된 경우에서도 발생되나 일반적으로 큰 자갈로 덮여 있는 곳에서 많이 발생한다. 경사의 정도에 따라 다양한 형태의 여울이 분포하며 폭기 현상으로 인한 산소전달이 원활하여 수중 용존산소를 풍부하게 하여 수질을 개선시키는 자정작용을 지니고 있다. 따라서 수중 용존산소가 풍부하므로 여울은 수중 생물들의 생태서식처로서 중요한 역할을 수행한다.

교차하는 사주(alternating bar)에서 생성되는 여울을 보면, 사주의 마루(crest)와 골(trough) 부분에서 여울과 소가 서로 교차하게 되는데, 사주의 생성으로 인하여 하도의 수충부 지점은 흐름으로 인한 침식이 진행되어 어류의 휴식터인 소가 생성되고, 소의 상류측 흐름에는 급경사의 급여울이 형성되며, 소의 하류측 흐름에는 비교적 완만한 흐름의 평여울(run)이 형성된다. Fig. 1은 하천에서 교차 사주 형성에 따른 급여울과 소 및 평여울의 형성 모습을 나타내고 있다(Yang, 2006).

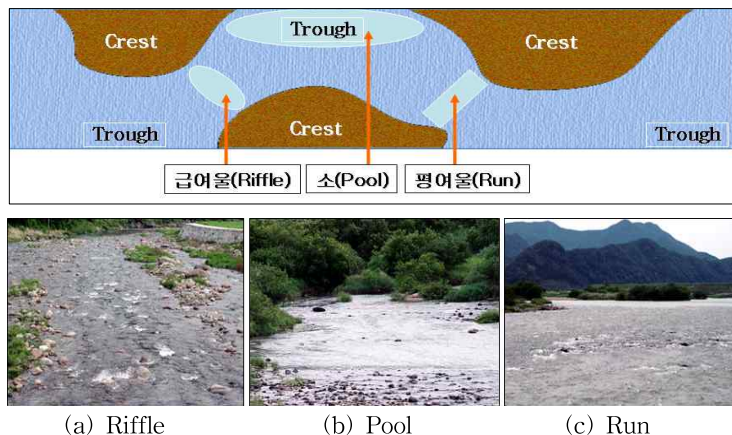


Fig. 1. Formation of Riffles and Pools

## 2.2 여울의 분류

여울은 흐름 폭, 하상 경사 및 물결 형태에 따라 여러 형태로 분류할 수 있다. Chibana et al. (2006)은 일본 하천의 종류에 형성된 여울의 경관적인 측면에서 물결의 형태를 바탕으로 여울을 Figs. 2 and 3과 같이 falling type, submerging type, running type, protrusion type, local convergent type 및 complex type로 구분하였다.

그러나 분석 내용을 보면, falling type와 submerging type는 형태 구분이 분명치 않고 falling type 내에서도 간혹 submerging type가 나타나며, 이들이 유속 및 수심에 따라 교차 발생하고 있어 확인한 구분이 어렵다는 것을 알 수 있다. 또한 protrusion type와 local convergent type는 흐름이 자주 바뀌는 상황에서 발생하며, 이들이 혼재되어 발생하는 경우를 complex type로 정의하였다. 이는 Fig. 3에서도 나타나 있듯이, 이들 형태가 Fr와 상대수심의 영역에서 구분되지 않고 혼재되어 있기 때문이다.

여울을 계층적인 분석(hierarchical analysis)에 의해 분류하는 시도도 있다. Chibana et al. (2005)은 여울과 소의 구조를 reach scale에 의해 취급하고, 여울은 unit scale, 여

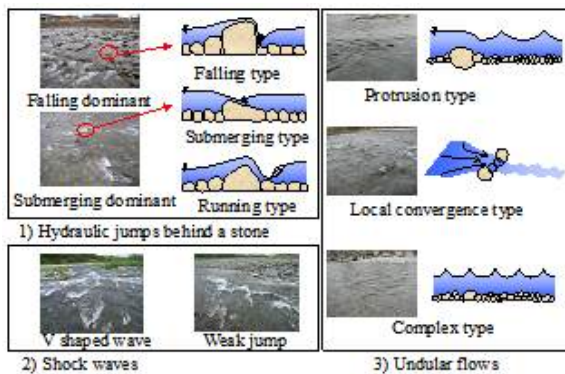


Fig 2. Images of Riffles by Wave Patterns

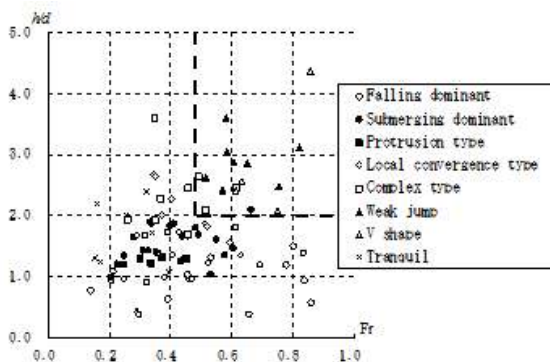


Fig. 3. Classification of Riffles

울의 각 부분을 subunit scale, 여울에서의 흐름 특성을 point scale에 의해 분류하였다. 그러나 흐름 특성에 의한 일부 여울은 subunit scale에서 발생되기도 하는 모호한 측면이 있다. 그들이 조사, 분석한 지점은 하상 변동이 비교적 잘 일어나는 곳으로, 상류로부터 유사에 크게 영향을 받고 있기 때문에 여울의 분류가 명확하지 않는 특성도 있다.

본 연구의 대상 지점은 상기 지점과 유사의 영향이 같지 않기 때문에 계층적인 분석에 의해 분류하기 보다는 여울의 평면 형태와 물결 형태에 의해 분류하였다.

## 3. 현지조사 및 측정방법

### 3.1 조사지점 선정

현지조사 대상지점으로 여울이 잘 발달된 강원도 홍천군 서면 반곡리의 홍천강과 전라남도 곡성군의 섬진강을 선정하였다. 전자는 반곡교 하류의 세 지점, 후자는 섬진강과 보성강의 합류점의 세 지점이며, 이들 선정된 여울의 대상지점은 Fig. 4와 Table 1에 나타나 있다.

홍천강 대상지점은 상하류가 공히 급한 사형을 이루지만 대상지점에서 비교적 직선을 이루고 있다. 그러나 하도 중심부에 퇴적이 발생되어 하중도가 형성되어 있고 이로 인하여 유로가 좌·우로 분리되어 있다. 좌·우안의 수로에 위치한 교각은 세굴이 발생되고 있으며, 소류력과 유속이 비교적 커서 세굴방지를 위한 대책이 요구된다. 하상의 조도는 굽은 자갈로 형성되고 부착조류가 풍부하며 수질이 비교적 좋은 편이다.

섬진강 대상지점은 상류에서 요철이 합류하여, 이후 양안이 가파른 경사를 이루는 산지 계곡 사이를 유하하면서, 섬진강 제1지류이며 국가하천인 보성강이 우안에서 합류하고 구레군 구간을 통과하면서 남동향으로 흐르고 있다. 합류점 하류는 하상경사가 급하여 흐름의 소류력이 큰 관계로 세굴이 발생되어 하상 암반이 드러나고 있다. 대상지점의 하상경사는 대략 1/1,000~1/5,000로 유지되고 있다(Iksan Regional Construction Management Administration, 1999).

### 3.2 조사 항목 및 측정 방법

여울을 평면 형태와 물결 형태별로 분류하기 위해 여울의 규모(폭 및 길이), 하폭, 종단 경사, 수리 특성 및 하상 입경을 조사하였다.

여울의 크기 및 월류수심은 5m staff와 100m 줄자를 이용하여 측정하였다. 하상 입경의 측정은 두 가지로 구



(a) Hongcheon River



(b) Seomjin River

Fig. 4. Sample Sites

Table 1. Location of Field Sites

River Basin	Study Area	River	Location
Bukhan River	STA No.1	Hongcheon River	Bangkok Br. 1.5 km downstream, Bangkok-Ri Seo-Myeon, Hongcheon
	STA No.2	Hongcheon River	Bangkok Br. 1.1 km downstream, Bangkok-Ri Seo-Myeon, Hongcheon
	STA No.3	Hongcheon River	Bangkok Br. 0.7 km upstream, Bangkok-Ri Seo-Myeon, Hongcheon
Seomjin River	STA No.1	Boseong River	Apruk Br. 1.5 km downstream, Pyeong-Ri Boksadong-Myeon, Gogseong
	STA No.2	Boseong River	Pyeongho El. School. 0.24 km downstream, Pyeong-Ri Boksadong-Myeon, Gogseong
	STA No.3	Seomjin River	Apruk Sta. 1.5 km downstream, Pyeong-Ri Boksadong-Myeon, Gogseong

분하였다. 큰 돌을 월류하는 여울의 경우 point scale에 입각하여 월류하는 돌의 입경을 무작위 추출하여 평균을 구하였고, 잔돌 주위에서 발생하는 여울은 subunit scale에 입각하여 대상 여울을 정방형 격자로 나누어 이 격자 내

에 분포되어 있는 자갈을 현지 여건을 고려하여 20~30개 정도 무작위 추출하여 입경을 측정하였다. 한편 입도 분포의 경우에는 대상 여울 모두 정방형 격자로 나누어 무작위 추출하여 결정하였다. 흐름의 유속 측정은 2차원 전

기유속계(Model 801 EM Flow Meter)를 사용하여 점유속을 측정하여 평균유속으로 환산하여 측정하였다. 측정 시간은 10초로 하였다.

흐름의 유속과 수심은 여울의 물결 형태별로 측정하되, 다양한 크기를 구현하기 위해 갈수기와 평수기, 풍수기 별로 장기적으로 측정하였다.

여울의 평면적인 형태로서, 여울의 폭( $b$ ), 길이( $L$ ), 하폭( $B$ )을 Fig. 5와 같이 표시하고(Yang, 2006), 폭 비율( $b/B$ ) 및 길이 비율( $L/b$ )을 측정하였다.

여울의 평면 형태에 따른 흐름 방향의 경사를 알아보기 위하여 수표면 경사와 하상 경사를 측정하였다. 측정 방법은 Fig. 6과 같이 여울 형성 구역에서 상류측 기준선으로부터 흐름 방향으로 2m 간격으로 총 20m를 3개의 방향선을 그어 측정하였다.

#### 4. 현지조사 결과

##### 4.1 여울의 평면 형태

Table 2는 각 대상지점에서 측정한 여울의 평면적인

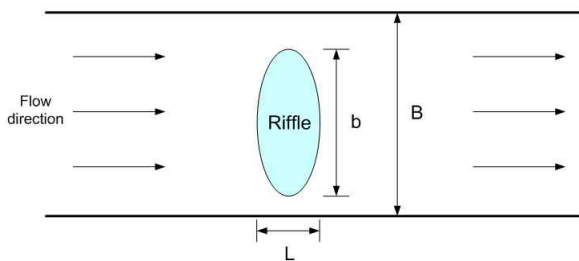


Fig. 5. Plane Shape of Riffle

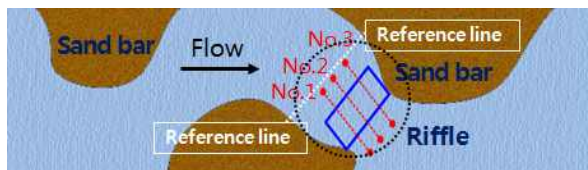


Fig. 6. Estimation Region of Longitudinal Slope

Table 2. Plane Shape of Riffles

	b(m)	L(m)	B(m)	b/B(-)	L/b(-)	Type
Hongcheon River No.1	11.0	43.3	72.6	0.15	3.936	Long Type
Hongcheon River No.2	13.4	30.6	89.4	0.15	2.284	Long, Convergent Type
Hongcheon River No.3	2.7	5.5	10.7	0.25	2.037	Long, Convergent Type
Boseong River No.1	50.0	25.0	80.0	0.62	0.500	Wide, Divergent Type
Boseong River No.2	13.0	9.0	45.0	0.29	0.692	Wide Type
Seomjin River No.3	80.0	30.0	120.0	0.67	0.375	Wide Type

형태이다.

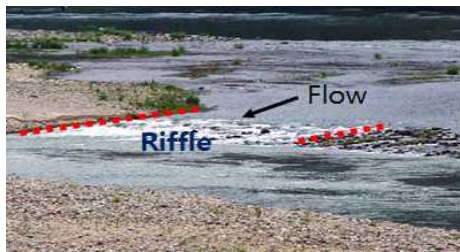
Table 2를 분석하면, 여울의 길이와 폭( $L/b$ ) 비율이 1 일 경우가 정방형이며,  $L/b > 1$ 의 경우 긴 형태의 여울,  $L/b < 1$ 인 경우는 넓은 형태의 여울로 분류하였다. 또한 여울의 형태가 사각형의 형태가 아닌 사다리꼴의 형태로서 상류측의 폭이 하류측으로 갈수록 좁아지는 것은 집중되는 형태로 구분하였으며, 그와는 반대로 상류측의 폭이 하류측의 폭보다 넓은 경우에는 확산되는 형태로 구분하였다(Yang, 2006). 상기 기준에 의해 현지 조사된 여울의 평면 형태를 Fig. 7에 나타내었다.

홍천강 조사 대상지점은 대체적으로 길고 집중되는 형태이었으며, 보성강과 섬진강은 넓고 확산되는 형태이었다. 그러나 확산 형태는 다른 세 형태에 비해 뚜렷하게, 자주 발생되지는 않았다. 이는 홍천강의 경우 대상 지점의 흐름이 하중도에 의해 양분되면서 유로 폭이 좁아지는 반면, 보성강과 섬진강의 경우 흐름 폭이 비교적 크고 합류점에서 흐름이 합쳐지면서 수량이 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

Chibana et al. (2005)은 여울의 평면 형태가 상류로부터 유사에 영향을 받으며, 유사 공급이 원활하지 않아 하상이 저하되는 경우, 평면 형태는 명확하지 않다고 하였다. 이는 현지 조사를 바탕으로 언급된 것으로서 특별한 이론적인 규명은 하지 않았지만, 본 연구의 대상 지점은 하상 변동이 크게 발생하지 않기 때문에 추후 검토해야 할 사항이다.

##### 4.2 여울의 경사

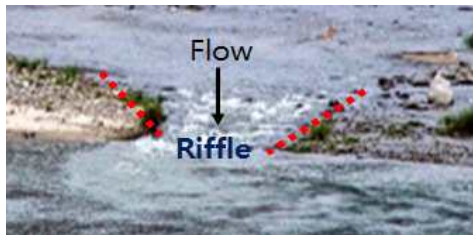
여울은 비대칭 형태로 교차하며 형성이 되는데 여울이 나타나는 Fig. 8의 원형 부분의 ①, ②번 여울의 측면 경사를 보면, ① 부분은 흐름 방향에 대하여 완경사를 이루고 있어 불분명한 수변선을 드러내며, ② 부분은 흐름 방향에 급한 경사와 함께 뚜렷한 수변선을 드러내고 있다. 이는 ① 부분의 경우 홍수시 흐름에 의하여 여울이 자주 유실되어 경사가 낮아지기 때문이며, ② 부분의 경우 흐



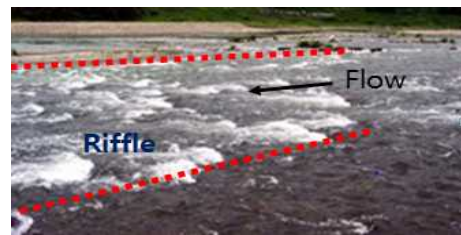
(a) Wide Type (Boseong River No.2)



(b) Long Type (Hongcheon River No.1)



(c) Convergent Type (Hongcheon River No.2)



(d) Divergent Type (Boseong River No.1)

Fig. 7. Riffle Classification by Plane Shape

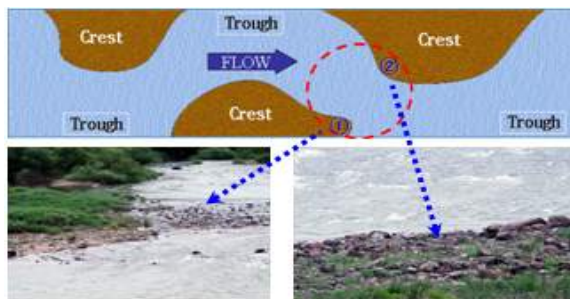


Fig. 8. Lateral Slope of Riffles

림의 영향을 받는 부분으로 높은 유속에 의해 유송 토사를 수변으로 퇴적시키기 때문이다.

Fig. 9는 여울의 형태에 따른 흐름 방향의 경사를 나타내고 있다.

여울의 흐름 방향 경사는 가운데 부분이 위로 볼록한 (upward convex) 형태로 나타났으며, 경사도는 여울의 상류측보다 하류측이 흐름 방향으로 가파르게 변화됨을 알 수 있다. 이는 여울과 소의 연속구조 형태에서 기인된 것으로 여울 입구의 전반부는 완경사의 평여울(run)이 형성되고, 후반부는 급경사의 급여울(riffle)이 형성되기 때문이다. 여울의 평면 형태에 따른 흐름 방향의 경사도의 차이는 서로 크지 않았는데, 이는 여울의 흐름 방향 경사가 하상 입자의 조건보다는 흐름의 유속에 의해 좌우되기 때문이다. 즉, 평여울 구간의 비교적 낮은 유속과 급여울 구간의 빠른 유속에 의해 여울의 경사가 결정되기 때문이다.

#### 4.3 여울의 물결 형태

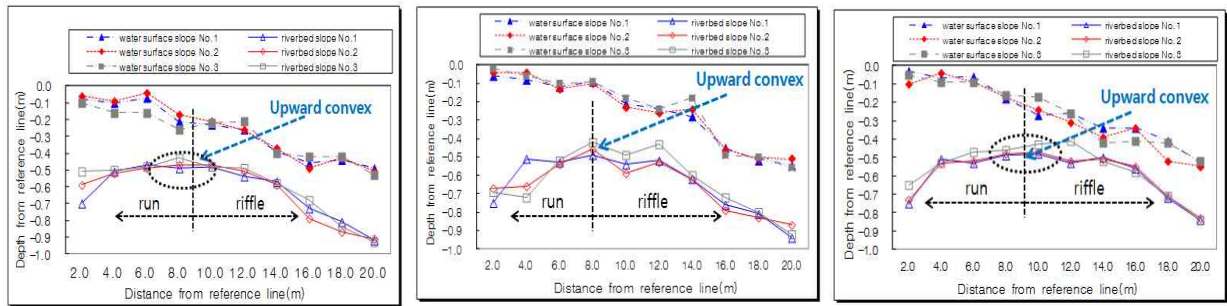
홍천강과 섬진강을 대상으로 물결 형태에 따라 여울을 분류하면, 떨어지는 형태, 미끄러지는 형태, 약한 파도 및 약한 도수로 분류된다. 이는 Chibana et al. (2005)에 의해 분류된 결과와 일치한다. 조사된 이들 형태와 조사지점은 Fig. 10에 나타나 있다.

Fig. 10은 팔호 속의 현지 조사지점을 대상으로 작성된 것이지만, 대상 하천의 다른 지점에도 이와 유사한 네 가지 형태를 나타내었다.

떨어지는 형태와 미끄러지는 형태는 주로 큰 돌이 설치된 지점에서 발생하였다. 떨어지는 형태의 경우에는 큰 돌에 흐름이 월류하면서 흐름의 종단 방향으로 급격한 경사를 이루게 되고, 돌의 하단부에서 폭기 현상이 발생되면서 공기 중의 산소가 수중으로 혼입됨으로써 수질 개선의 결과를 가져오게 된다. 대체적으로 월류 수심(h), 자갈의 직경(d)으로 비교할 수 있는 상대수심(h/d)은 작은 편이다.

미끄러지는 형태의 경우에는 떨어지는 형태에 비하여 월류 유속이 크므로 흐름의 경사는 큰 돌 하류부에서 완만하게 나타나고, 큰 돌을 월류한 흐름은 떨어지는 형태보다 하류측 부분에서 폭기와 도수 현상을 발생시킨다. 떨어지는 형태에 비하여 유량이 크고 국부적으로 유속이 빠른 지점에서 발생하며, 사류 현상도 나타난다.

약한 파도와 약한 도수는 주로 잔 돌 주위에서 발생하는 여울 형태이다. 약한 파도는 마치 파도처럼 잔잔하게 물결치는 듯이 발생하는 여울을 나타내며, 떨어지는 형태와 미끄러지는 형태에 비해 비교적 느린 유속을 나타낸

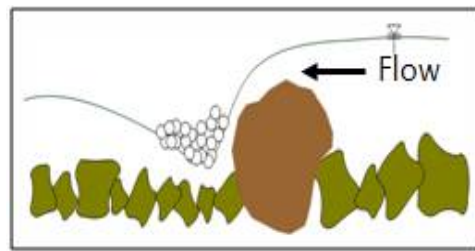


(a) Wide Type  
(Boseong River No.2)

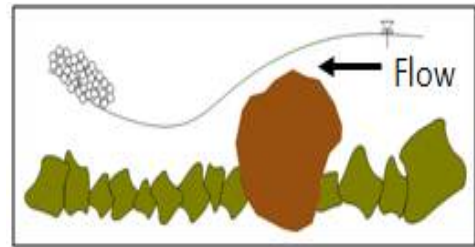
(b) Long Type  
(Hongcheon River No.1)

(c) Convergent Type  
(Hongcheon River No.2)

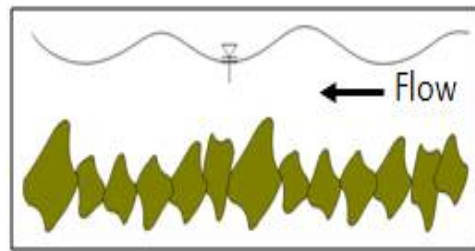
Fig. 9. Longitudinal Slope of Riffles



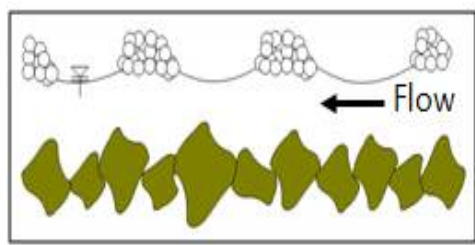
(a) Falling Type (Hongcheon River No.1)



(b) Running Type (Hongcheon River No.2)



(c) Undular Wave (Seomjin River No.3)



(d) Undular Jump (Boseong River No.2)

Fig. 10. Riffle Classification by Wave Shape

다. 약한 도수의 여울 형태는 약한 파도와 같이 파도처럼 잔잔하게 물결치듯 발생하면서, 균데균데 잔잔한 흐름이 아닌 약한 도수가 발생하듯 물결이 튀기는 형태를 나타내고 있다. 상기 여울의 각 형태별 흐름 특성을 측정된 결과는 Tables 3~6과 같다.

상기 표에서 h는 월류 수심(m), d는 하상 입경(m), V는 흐름의 월류 유속(m/s), Fr는 Froude number로 아래 식으로 표시된다.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

여기서, g는 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)이다.

상기 표의 내용을 보면, 떨어지는 형태와 미끄러지는 형태는 약한 파도나 약한 도수에 비해 월류 수심이 작고,

하상 입경과 흐름의 유속이 크다는 것을 알 수 있다. 이들 흐름의 변수를 무차원화 시킨 월류 수심과 하상 입경의 비(h/d, 상대 수심) 및 Fr로 나타낸 것이 Fig. 11에 나타나 있다. 떨어지는 형태, 약한 파도, 약한 도수는 모두 Fr가 1보다 작은 상류의 흐름 영역에서 발생하는 반면에, 미끄러지는 형태의 경우는 상류와 사류의 흐름이 모두 존재하면서 도수가 발생하고 유속이 빠른 지점에서 발생함을 알 수 있다. 한편 약한 파도와 약한 도수 및 미끄러지는 형태는 대체적으로 Fr가 클수록 상대수심이 작아지는 경향을 보이고 있는 반면, 떨어지는 형태는 일정한 상대수심을 유지하고 있다. 특히 미끄러지는 형태에서 Fr가 클수록 상대수심이 작아지는데, 이는 큰 돌을 월류하는 흐름이 수심이 작아지면서 흐름의 유속이 크게 되는 활강 흐름(chute flow)를 나타내기 때문이다.

Table 3. Flow Characteristics at Falling Type

Type	h(m)	d(m)	h/d(m)	V(m/s)	Fr
Falling Type	0.053	0.063	0.84	0.375	0.52
	0.051	0.057	0.89	0.365	0.52
	0.056	0.058	0.97	0.299	0.40
	0.041	0.041	1.00	0.294	0.47
	0.043	0.047	0.91	0.346	0.53
	0.046	0.062	0.74	0.651	0.97
	0.051	0.076	0.67	0.571	0.81
	0.049	0.087	0.56	0.412	0.59
	0.053	0.104	0.51	0.432	0.60
	0.049	0.094	0.52	0.381	0.55
	0.053	0.075	0.71	0.372	0.52
	0.056	0.068	0.58	0.312	0.42

Table 4. Flow Characteristics at Running Type

Type	h(m)	d(m)	h/d(m)	V(m/s)	Fr
Running Type	0.054	0.068	0.79	0.500	0.69
	0.056	0.064	0.88	0.561	0.76
	0.045	0.072	0.63	0.489	0.74
	0.053	0.071	0.75	0.493	0.68
	0.076	0.065	1.17	0.482	0.55
	0.048	0.071	0.68	0.436	0.64
	0.031	0.073	0.43	0.698	1.26
	0.067	0.098	0.68	0.941	1.16
	0.045	0.104	0.43	0.912	1.37
	0.086	0.114	0.75	0.922	1.00
	0.053	0.097	0.55	0.845	1.17
	0.074	0.086	0.86	0.633	0.74

Table 5. Flow Characteristics at Undular Wave

Type	h(m)	d(m)	h/d(m)	V(m/s)	Fr
Undular Wave	0.132	0.047	2.81	0.231	0.21
	0.131	0.078	1.68	0.212	0.19
	0.124	0.049	2.53	0.214	0.19
	0.126	0.051	2.47	0.312	0.28
	0.121	0.055	2.20	0.262	0.24
	0.111	0.064	1.73	0.235	0.23
	0.091	0.065	1.40	0.301	0.32
	0.165	0.072	2.29	0.286	0.22
	0.179	0.069	2.59	0.245	0.18
	0.162	0.079	2.05	0.332	0.26
	0.161	0.072	2.24	0.296	0.24
	0.153	0.068	2.25	0.303	0.25

Table 6. Flow Characteristics at Undular Jump

Type	h(m)	d(m)	h/d(m)	V(m/s)	Fr
Undular Jump	0.084	0.028	3.00	0.233	0.26
	0.094	0.040	2.35	0.321	0.33
	0.103	0.042	2.45	0.241	0.24
	0.113	0.048	2.35	0.354	0.34
	0.095	0.044	2.16	0.312	0.32
	0.087	0.060	1.45	0.298	0.32
	0.151	0.070	2.16	0.323	0.27
	0.143	0.064	2.23	0.285	0.24
	0.145	0.075	1.93	0.362	0.30
	0.149	0.060	2.48	0.291	0.24
	0.098	0.060	1.63	0.377	0.38
	0.083	0.042	1.98	0.310	0.34



#### 4.4 여울 물결 형태별 하상 입도분포

여울의 물결 형태는 하상의 입도분포와 어느 정도 관련성을 지니고 있다. Fig. 12는 여울 물결 형태별 입도분포 곡선을 나타낸 것이다.

떨어지는 형태와 미끄러지는 형태의 경우는 하상의 입자 크기가 다양한 편으로, 하상의 돌이 다양한 크기로 존재한다는 것을 알 수 있다. 반면에, 약한 파도의 경우에는 하상 입자의 크기가 다양하지 못하며, 비교적 작은 잔돌로 형성되어 있다. 한편, 약한 도수의 경우는 하상 입자의

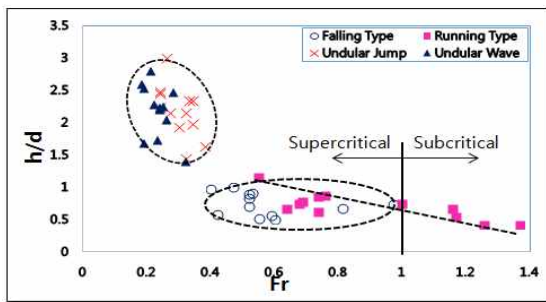


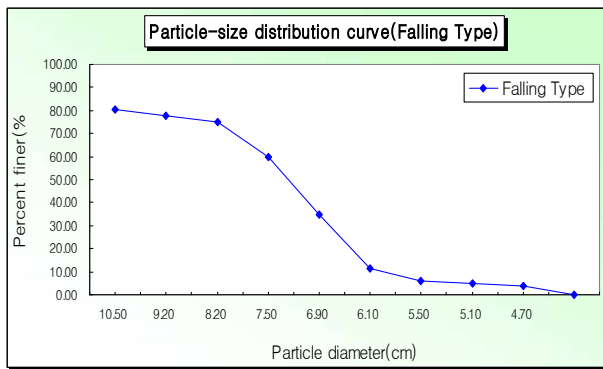
Fig. 11. Relationship between Fr and h/d by Wave Shape

변화가 다양하지는 않지만, 입자의 크기는 약한 파도에 비하여 조금 크다는 것을 알 수 있다.

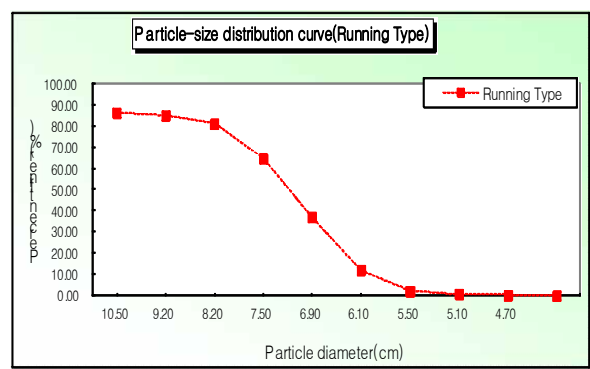
#### 4.5 여울의 종적 구조와 물결 형태

앞서 여울은 흐름의 종적 방향으로 상류부에서 경사가 낮아지며 중류부에서 하류부로 갈수록 급해지는 위로 볼록한 형태임을 밝혔다. 이 같은 경사는 여울의 물결 형태에도 영향을 미치게 된다. 대체적으로 상류부에서는 완경사인 관계로 약한 파도의 물결 형태가 발생하며, 중류부 이하는 급경사가 형성되어, 중류부에서 미끄러지는 형태나 떨어지는 형태, 하류부에서 미끄러지는 형태나 떨어지는 형태 또는 약한 도수가 발생하게 된다. 이들 여울의 종적 구조에 따른 물결 형태는 4.1에서 언급한 집중 형태와 긴 형태 및 넓은 형태 별로 구분하여 분석할 수 있다.

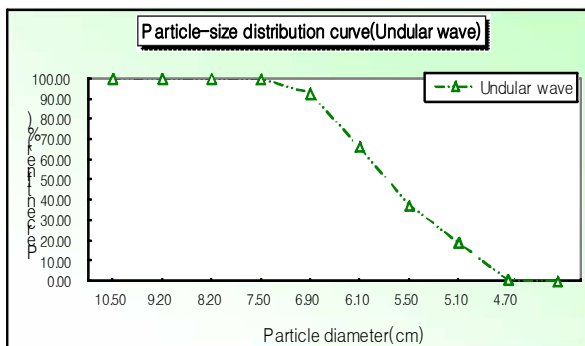
Fig. 13은 여울의 평면 형태에 따른 종적 구조와 물결 형태를 나타내고 있다. 집중 형태에서 상류부의 수심은 하류부보다 크고 유속이 완만하여 약한 파도의 물결 형태가 발생하며, 중류부 지점에서 수심이 낮아지는 단계로 빠른 유속이 발생하여 미끄러지는 형태의 물결 형태가 발생하고 있다. 하류부는 하상이 급경사를 이루지만 중류부에 비하여 수심이 일정하게 유지되고 물결이 파동치는 약



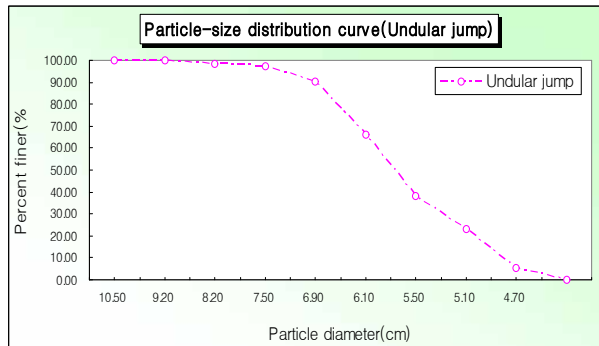
(a) Falling type (Hongcheon River No.1)



(b) Running type (Hongcheon River No.2)



(c) Undular wave (Seomjin River No.3)



(d) Undular jump (Boseong River No.2)

Fig. 12. Particle Size Distribution Curve by Wave Shape of Riffle Type

한 도수가 발생하게 된다.

긴 형태의 경우, 상류부는 약한 파도가 발생하며 중류부는 수심이 급격하게 낮아지고 빠른 유속이 발생되어, 집중 형태에 비하여 여울의 길이가 길어지므로 미끄러지는 형태와 떨어지는 형태가 혼재한다. 하류부의 경우도 중류부와 마찬가지로 미끄러지는 형태와 떨어지는 형태가 혼재하여 발생한다. 넓은 형태의 여울에서는 수심이 비교적 일정하며, 상류부에서는 유속이 완만하여 약한 파도가 발생하며, 중류부는 수심이 일정하나 경사가 보다 급해져 유속이 빨라지는 관계로 약한 도수와 약한 파도가 혼재된다. 하류부는 중류부보다 하상 경사가 보다 급해져 유속이 증가하면서 물결이 파동치는 약한 도수만 발생하게 된다.

본 연구에서는 여울을 평면 형태와 물결 형태에 의해 분류하였다. 전자는 계층적인 분석에 의하면 subunit scale이며, 후자는 point scale과 subunit scale이 혼재된다. 따라서 계층적인 분석에 의한 여울의 분류는 모호한 점이 있다. 또한 2개 하천에 대해서 조사한 결과이기 때문에 보다 많은 하천을 대상으로 조사하여 여울의 분류를 일반화하는 것이 바람직하다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 섬진강과 홍천강을 대상으로 현지 조사를 통하여 하천에 존재하는 다양한 형태의 여울을 체계적으로 분류하고, 각각의 형태에 따른 물결 모양, 규모, 경사 및 하상 입경 등을 측정, 비교 분석하였다.

여울의 길이와 폭 비율을 기준으로 긴 형태와 넓은 형태의 여울로 분류하였으며, 상·하류 폭의 변화 정도를 기준으로 집중 형태와 확산 형태로 분류하였다. 또한 물결 형태에 따라 떨어지는 형태, 미끄러지는 형태, 약한 파도 및 약한 도수로 분류하였다. 떨어지는 형태와 미끄러지는 형태는 주로 큰 돌 주위에서 발생하였으며, 약한 파도와 약한 도수는 주로 잔 돌 주위에서 발생하였다. 떨어지는 형태, 약한 파도 및 약한 도수는 모두 Fr가 1보다 작은 상류의 흐름 영역에서 발생하는 반면에, 미끄러지는 형태의 경우는 상류와 사류의 흐름이 모두 존재하면서 도수가 발생하고 유속이 빠른 지점에서 발생하였다. 떨어지는 형태와 미끄러지는 형태의 경우는 하상의 입자 크기가 다양한 반면, 약한 파도와 약한 도수의 경우에는 하상 입자의 크기가 비교적 작고 다양하지 못하였다. 여울의 흐름 방향 경사는 여울 가운데 부분이 위로 볼록한 형태로 나타났으며, 경사도는 여울의 상류측보다 하류측이 흐름 방향으로

가파르게 변화하였다.

여울의 종적 구조에 따른 물결형태를 구분하여 보면, 집중 형태에서는 흐름 방향으로 약한 파도, 미끄러지는 형태 및 약한 도수가 발생하였다. 긴 형태의 경우, 흐름 방향으로 약한 파도, 미끄러지는 형태 및 떨어지는 형태가 발생하였다. 넓은 형태의 여울에서는 약한 파도, 약한 도수 및 약한 파도, 약한 도수가 발생하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Bovee, K.D. (1998). Stream Habitat Analysis Using Instream Flow Incremental Methodology. Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004, Fort Collins, U. S. Geological Survey.
- Chibana, T., Iwamoto, H., and Tsujimoto, T. (2006). "Landscape Characteristics and Hydraulic Conditions of Riffles in the Tama River", Academic Research, No. 262, The Tokyu Foundation for Better Environment, pp. 1-10.
- Chibana, T., Tsujimoto, T., Miyake, M., and Iwamoto, H. (2005). "Hierarchical Analysis of Physical Environment in Riffles." KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 1-6.
- Choi, S.W., and Bae, H.D. (2011). "Gradation and Transport Characteristics of Bed Materials in Pool-Riffle Sequence in the Gap Stream, Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 1, pp. 67-72.
- Frissell, C.A. (1986). "A Hierarchical Framework for Stream Habitat Classification, Viewing Streams in a Watershed Context." *Environmental Management*, Vol. 10, No. 2, pp 199-214.
- Han River Flood Control Office. (2000). Flow Measurement at Water Basin of Bukhan River-Anseong Stream.
- Hong I., Gang, J.G., and Yeo, H.G. (2012). "Study on the Characteristics of Riffle-Pool Sequence in the Namdae Stream." Proceedings 2012 Conference of KWRA. Taebaek, Kangweondo, p. 972.

- Iksan Regional Construction Management Administration. (1999). Investigation of Usage of Yeongsan-Seomjin River Water and Estimation of Instream Flow.
- James, L.C., and Steven, V.F. (2001). "Inter-Annual Changes in Benthic Community Structure of Riffles and Pools in Reaches of Contrasting Gradient." *Hydrobiologia*, Vol. 459. pp. 187-200.
- Lee, J.H., Kim, Y.J., and Lee, S.H. (2012). "A Study on Numerical Simulation of Hydraulic Characteristics of Surface-Groundwater Mixed Zone at Riffle-Pool Sequence" *Journal of Korean Wetland Society*, Vol. 14, No. 1, pp. 75-87.
- Webb, P.W., and Gerstner, C.L. (2000). Fish Swimming Behaviour, Predictions from Physical Principles. Biomechanics in Animal Behaviour. Oxford, England, pp. 59-77.
- Webb, P.W., and Weihs, D. (1983). Fish Biomechanics. Biology, New York.
- Yang, J.Y. (2006). "A Study on Fish Swimming Behavior by Riffle Characteristics." Master's Dissertation, Chung-Ang University.

paper number : 14-075

Received : 12 August 2014

Revised : 21 January 2015 / 23 January 2015

Accepted : 23 January 2015