



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

한천의 대표입경을 이용한  
조도계수 산정

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

李 準 鎬

2012年 8月

한천의 대표입경을 이용한  
조도계수 산정

指導教授 楊 城 基

李 準 鎬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 8月

李準鎬의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2012年 8月

# Estimation of Roughness Coefficient Using a Representative Grain Diameter for Han Stream in Jeju Island

Jun-Ho Lee

(Supervised by Professor Sung-Kee Yang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Master of Engineering

2012. 8

This thesis has been examined and approved by

Thesis director, Won-Bae Park, Doc. of Jeju Development Institute

Thesis director, Sung-Kee Yang, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil & Ocean Engineering

*August. 2012*

Department of Civil & Ocean Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차 .....	i
표 목 차 .....	ii
그 립 목 차 .....	iii
사 진 목 차 .....	iv
Summary .....	v
<b>I. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 목적 .....	2
<b>II. 연구대상 유역현황 .....</b>	<b>3</b>
1. 연구대상 유역 .....	3
1.1 지 형 .....	5
1.2 평면적 특성 .....	5
1.3 평균 고도 .....	6
1.4 평균 경사 .....	8
1.5 하상 경사 .....	10
1.6 지질 및 토양 .....	11
<b>III. 조도계수 기본이론 .....</b>	<b>13</b>
1. 조도계수의 개념 .....	13
1.1 Maning 공식 .....	13
1.2 Chezy 공식 .....	13
1.3 Darcy-Weisbach 공식 .....	14

2. 조도계수 산정방법 .....	14
2.1 Cowan의 방법 .....	14
2.2 Chow의 도표에 의한 방법 .....	15
2.3 Barnes의 사진을 활용한 현장조사법 .....	19
2.4 하상재료를 이용한 방법 .....	23
2.5 수위 자료가 있는 경우 .....	25
<b>IV. 조도계수의 국내외 연구동향 .....</b>	<b>27</b>
1. 국외 조도계수 연구 .....	27
1.1 영국의 CES 기법 .....	27
1.2 일본의 하도계획 기법 .....	27
2. 국내 조도계수 연구 .....	28
1.1 국내 연구동향 .....	28
1.1 국내 조도계수 산정 현황 .....	28
<b>V. 한천의 하상재료 현장측정 .....</b>	<b>30</b>
1. 조도계수 산정 절차와 방법 .....	30
2. 하상재료 채취 및 자료의 분석 .....	32
2.1 조사지점 선정 .....	32
2.2 하상재료 채취 방법 .....	34
3. 입도 분포 시험 결과 .....	46
<b>VI. 한천의 조도계수 산정 .....</b>	<b>48</b>
1. 대표입경을 이용한 조도계수 산정 .....	48
2. 산정된 조도계수의 적용성 검토 .....	51
<b>VII. 결론 .....</b>	<b>61</b>

참고문헌 .....	63
감사의 글 .....	65

## List of Tables

Table II-1. Present status of stream watershed .....	4
Table II-2. General characteristics of basin .....	6
Table II-3. Altitude Analysis chart of the basins to be studied .....	8
Table III-1. Cowan roughness coefficient and correction coefficient .....	15
Table III-2. Roughness coefficient using Chow table .....	16~19
Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section .....	36~45
Table VI-1. Roughness coefficient for each section using bed material .....	50
Table VI-2. Roughness coefficient for each section using Strickler(1923) equation .....	51
Table VI-3. Roughness coefficient for each section using Garde and Raju(1978) equation .....	53
Table VI-4. Roughness coefficient for each section using Lane과 Carlson(1953) equation .....	54
Table VI-5. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and empirical formula .....	60

## List of Figures

Fig. II-1. Basin for the study .....	4
Fig. II-2. Altitude analysis map of the basins to be studied .....	7
Fig. II-3. Slope analysis map of the basins to be studied .....	9
Fig. II-4. Slope of direction analysis map of the basins to be studied .....	10
Fig. II-5. Bed slope using level of deepest bed .....	11
Fig. V-1. Field survey on subject stream .....	31
Fig. V-2. Cross section for each section of subject stream .....	33
Fig. V-3. Collection of bed materials using line-grid method .....	35
Fig. V-4. Grain size analysis using bed material(NO.01, NO.02, NO.03, NO.04) .....	46
Fig. V-5. Grain size analysis using bed material(NO.05, NO.06, NO.07, NO.08, NO.9, NO.10) .....	47
Fig. VI-1. Roughness coefficient for left bank using bed material .....	48
Fig. VI-2. Roughness coefficient for middle using bed material .....	49
Fig. VI-3. Roughness coefficient for right bank using bed material .....	49
Fig. VI-4. Roughness coefficient for each section using bed material .....	50
Fig. VI-5. Roughness coefficient for each section using Strickler(1923) equation .....	52
Fig. VI-6. Roughness coefficient for each section using Garde and Raju(1978) equation .....	53
Fig. VI-7. Roughness coefficient for each section using Lane과 Carlson(1953) equation .....	54
Fig. VI-8. Roughness coefficient for each section using empirical formula .....	55
Fig. VI-9. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and Strickler(1923) equation .....	56
Fig. VI-10. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and	

Garde and Raju(1978) equation .....	57
Fig. VI-11. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and Lane and Carlson(1953) equation .....	58
Fig. VI-12. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and planning report for river improvement .....	59

## Summary

Roughness coefficient was computed for review of applicability based on measurement of representative grain diameter reflecting channel characteristics of Han Stream. After field survey, collection of bed material, and grain analysis on collected bed material, roughness coefficient was computed using representative grain and existing empirical equation for roughness coefficient. Value of roughness coefficient calculated using equation by Meyer-Peter and Muller (1948) was 0.0417 for upstream, 0.0432 for midstream, and 0.0493 for downstream. As a result of comparing the computed roughness coefficient to other empirical equations for review of applicability, coefficient was larger in Strickler (1923) equation by 0.006. Smaller coefficient was shown by Planning Report for River Improvement Works. Equation by Garde and Raju (1978) was larger by 0.004, and equations by Lane and Carlson (1953) and by Meyer-Peter and Muller (1948) were larger by 0.001. Such precise roughness coefficient is extremely important when computing amount of flood in rivers to prevent destruction of downstream embankments and property damages from flooding. Since roughness coefficient is a factor determined by complicated elements and differs according to time and space, continued management of roughness coefficient in rivers and streams is deemed necessary.

# I. 서론

## 1. 연구의 배경

최근 고도의 경제성장과 각종 개발사업의 시행으로 인구증가, 토지이용도의 변화, 기후변화에 따른 태풍이나 집중호우와 지속적인 강우로 인한 홍수 같은 자연재해는 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 효율적인 수자원의 관리와 유역치수 계획 및 하천정비기본계획의 수립은 정확한 홍수위 산정을 통해서 이루어지며, 하천정비기본계획 수립시 제방 및 구조물의 축조높이 등에 활용이 되는 홍수위를 산정할 때는 첨두홍수위에 대한 계산이 보다 정밀해야만 한다. 이러한 정확한 첨두홍수량 및 홍수위를 계산하기 위해서는 조도계수의 산정은 필수적이며 매우 중요한 요소이다.

하도의 흐름해석에서 가장 중요한 물리적 요소는 하도의 기하학적 형태와 하상의 조도계수이다. 이러한 하도의 흐름특성 중 하도의 기하학적 형태는 하도의 중·횡단 형태로서 측량을 통해 정확한 값을 얻을 수 있지만, 하상의 조도계수는 그 자체의 시·공간적인 가변성과 이에 작용하는 인자들의 복잡성과 불확실성 등으로 인해 아직까지 확정적인 값을 얻을 수는 없는 실정이다.

조도계수는 원래 하상재료의 조도(roughness)를 나타내며, 하상재료 및 하상표면의 특성에 의해 결정되지만, 실제 하천의 흐름계산에서는 식생, 하천구조물, 단면형태, 단면 변화양상 등의 하도 상황뿐만 아니라 유량이나 수위에 의해서도 변화기 때문에 이론적으로 조도계수를 정확하게 계산하는 것은 거의 불가능하다(French, 1985). 또한, 자갈하천에서는 자갈층이 하상표면의 대부분을 덮고 있으므로 인해 흐름에 대한 저항은 주로 자갈입자로 구성된 하상표면과의 접촉에 의해 발생한다. 이 같은 점에서 유권(Flow Regime)변화에 따라 하상과(Bed form)가 변하고 흐름 저항이 달라지는 모래하천과는 뚜렷이 구별되고 있다(이찬주, 2010).

## 2. 연구의 목적

우리나라는 지금까지 많은 하천공사가 시행되어 왔지만 조도계수 산정을 위한 체계적인 연구는 이루어지지 않았으나 최근 조도계수 산정과 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 실무적인 하천정비기본계획에서의 조도계수는 자연형 하천에 적용되는 계수만을 전 구간에 일률적으로 사용하는 문제점도 있다.

제주도 하천은 경사가 급하며 대부분 15Km내외의 짧은 구간에 산지와 농·목축업 및 도심을 유과하는 형태로 혼재하고 있어 우리나라 내륙부의 하천과 매우 상의한 특성을 보이고 있다. 또한, 구간별 하상입경분포도 매우 복잡하며 큰 변화를 보이고 있다. 이러한 제주도의 하천의 조도계수를 하천 전 구간에 대해 하나의 조도계수의 값을 일률적으로 적용하여 사용하고 있는 실정이다. 또한, 우리나라는 실제로 하천계획과 관련된 조도계수는 구체적인 실측 자료 없이 일률적인 값을 적용하고 있는 것이 일반적인 것으로 보이며, 실무자의 전문적인 판단에 주로 의존하고 있는 편이다.

본 연구에서는 제주시 도심지를 유과하는 대표적인 하천인 한천의 전 구간을 현장답사하고 구간별 현장실측을 실시하여 조도계수를 산정하여 하천의 특성을 반영한 조도계수를 산정하였다. 이 같은 연구결과는 제주도 하천정비기본계획 수립 및 치수와 방재계획을 수립하는데 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

## II. 연구대상 유역현황

### 1. 연구대상 유역

제주도는 한반도의 남서해상 약 90km지점에 위치하며 본도를 기준으로 경도의 극점은 극서지점인 제주시 한경면 고산리(한장동)의  $126^{\circ} 56' 57''$ 에 놓여 있으며, 위도의 극점은 극남지점인 서귀포시 대정읍 하모리  $33^{\circ} 11' 27''$ 에서 극북지점인 제주시 구좌읍 김녕리  $33^{\circ} 33' 50''$ 에 위치하고 있는 우리나라 최대의 도서이다. 지형은  $N70^{\circ} E$ 의 장축을 가지며 동남 약 73km인 타원형으로서 섬 중앙에 해발1,950m의 한라산을 중심으로 한 원추형의 순상화산을 이루고 있다. 장축인 동서 방향은 매우 완만한 사면인  $3\sim 5^{\circ}$ 를 이루고 단축인 남북방향은 급경사로  $5\sim 7^{\circ}$ 를 갖는 순상화산에서 나타나는 Aspite 화산형태를 보이고 있다.

하천수계는 한라산을 기점으로 북측의 제주시와 남측의 서귀포시는 하천이 발달하여 이상 강우시 원활한 우수배제가 이루어지고 있으나 이상강우시는 국부적인 침수피해가 발생하고 있는 실정이다. 제주도의 연평균 강수량은 1,900mm로서 우리나라에서 가장 비가 많이 오는 지역이며, 강풍 및 다풍으로 인하여 연평균 풍속이  $3\sim 6\text{m/sec}$ 이다.

제주도 북측에 위치한 하천은 한라산 EL.1,950m 고지에서 발원하여 용담동 해안으로 유출되며, 유로연장은 11.5km, 유역면적은  $37.39\text{km}^2$ , 유역의 형상은 좌안으로 토천이 유입되는 것을 제외하고는, 지류가 거의 없는 수지상에 가까운 하천형태를 보이고 있다. 하천 인근으로는 하류부에서는 도심지가 위치하고 있으며 그 외 지역에서는 과수원이 주를 이루며 일부 상류에서는 임야가 분포하고 있다. 하천의 제방은 자연제방의 형태를 띠고 있으나 하류의 주거지와 인접된 구간에서는 옹벽의 형태가 나타나기도 한다. 하상은 암반으로 되거나 큰 돌이 분포하고 있는 구간이 많으며 대부분 유로 내 식생이 빈약한 상태를 나타내고 있다. 하류는 일부는 복개가 약 341m 정도로 되어 도로 및 주차장으로 이용되고 있다. 또한, 하천의 유출은 수백mm이상의 호우 시에만 짧게 발생하며, 나머지 기간은 건천의

상태를 유지하고 있다. 따라서 본 연구 지역은 제주도 북측 중앙 단축부에 해당되며 북쪽 해안에 완만한 경사를 갖는 저지대가 비교적 좁게 발달하고, 하상재료는 자갈 및 호박돌, 전석 등이 산재하면서 고도에 따라 복잡한 양상을 보이거나 많은 구간에서 자갈층이 하상표면의 대부분을 덮고 있다.

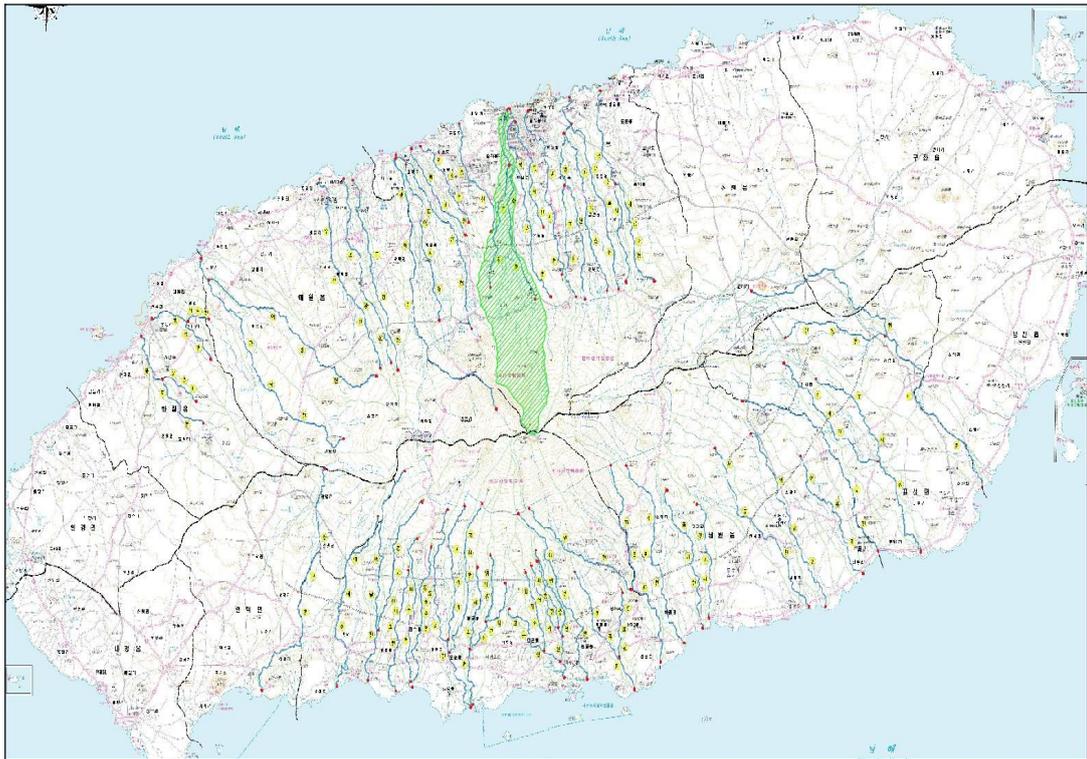


Fig. II-1. Basin for the study

Table II-1. Present status of stream watershed

하천명	수 계		하천 구간		하천 연장 (km)
	본류	제1지류	기점	종점	
한 천	한 천	토 천	제주시 오라동 378번지선	제주시 용담동 433번지선	11.5

## 1.1 지 형

제주시는 제주도 북부 중앙에 위치하고 있으며 남쪽은 한라산 정상을 사이에 두고 행정시인 서귀포시와 접하고 있다. 지세는 한라산 북사면이 단계적으로 낮아지는 형상을 보이며, 한반도와 마주하는 한라산 북사면의 중앙부에 위치한 지역으로 도서이다.

제주도는 화산체로 화산활동이 크게 5회에 걸쳐 이루어졌으며 소규모 용암 분출과 화산쇄설물의 분출은 총 79회 정도가 이루어 졌다. 가장 광범위하게 분포하는 화산암으로는 제3분출기에 분출한 제주 현무암이 있으며, 이 제주 현무암은 해발 500m 이하의 대부분 지역에 분포되어 있다. 해발 500m이상은 제4분출기에 분출한 한라산 현무암이 분포한다. 그리고 봉개동 전역과, 아라동, 삼양동 일부지역에는 성판악 현무암이 분포하는데 이는 여후오름과 물장울오름 등에서 분출한 것으로 보인다.(김, 2003)

지세는 전반적으로 북저남고(北低南高), 서저동고(西低東高)의 지형을 이루고 있으며 지역구분은 해발 200m 이내는 해안지대, 해발 200~300m이내는 중산 지대, 300~600m이내는 산간지대, 600m이상은 고산지대로 구분되고, 여기서 해발 200~600m까지를 중산간지대라고 한다. 제주도의 중앙에 최고봉인 한라산이 솟아 제주도 자체가 썰드화산체를 이루기 때문에 모든 등고선이 해안에 나란히 형성되어 전체적으로 동심원 구조를 이루고 있고 해발 200m이하의 해안지대에는 현무암의 풍화작용, 우수 및 바람에 의해 운반되어 온 토사로 인하여 토심층(土沈層)이 깊게 형성되어 있다(김, 2003)

## 1.2 평면적 특성

유역의 평면특성은 하천의 유출특성과 유출규모를 파악하는데 중요한 인자로서 유역면적, 유로연장, 유역평균 폭 및 형상계수 등이 하천을 조사하고 유역의 수문사항을 분석하는데 있어 매우 중요한 요소이다.

유역 형상계수는 유역의 형태를 나타내는 무차원 수치로서 형상계수가 1.0에 가까울수록 유역의 형상은 정방형에 근접하며, 형상계수가 클수록 유출의 집중성

향이 매우 크므로 침투홍수량이 크게 발생한다. 그러나 형상계수가 작으면 유출의 집중성향도 약해져서 침투홍수량이 비교적 적게 나타날 것으로 예측할 수 있다.

Table II-2. General characteristics of basin

하 천	유역면적 A(km <sup>2</sup> )	유로연장 L(km)	유역평균 폭 A/L	형상계수 A/L <sup>2</sup>
한 천	37.39	11.50	3.25	0.28

### 1.3 평균고도

유역의 평균고도는 교점법에 의해 구하며, 교점법은 유역의 지형도를 조밀한 눈금의 그래프용지를 덮고 눈금과 일정한 간격으로 교차되는 점의 등고선에 대한 고도의 누계를 구한다음 그 교점의 수로 나누면 유역의 평균고도가 된다.

$$h_m = \frac{\sum h}{\sum N} \quad (2.1)$$

여기서,  $h_m$ 은 유역의 평균고도,  $h$ 는 그래프선과 교차되는 등고선의 고도,  $N$ 은 그래프선과 등고선의 교차점이다. 연구대상인 한천의 평균고도는 685.398m로서 매우 높은 편이다.

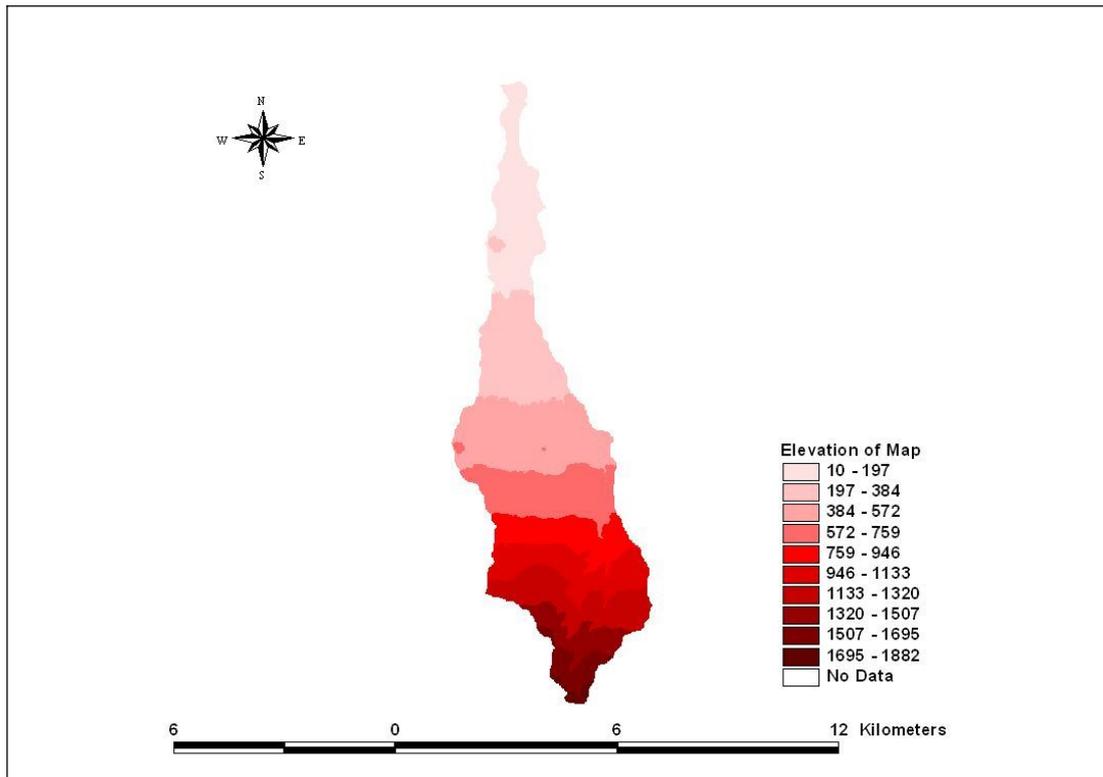


Fig. II-2. Altitude analysis map of the basins to be studied

Table II-3. Altitude Analysis chart of the basins to be studied

표 고(m)	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
0 < H ≤ 200	5.37	14.4
201 < H ≤ 400	5.98	16.0
401 < H ≤ 600	7.42	19.8
601 < H ≤ 800	4.98	13.3
801 < H ≤ 1000	3.54	9.5
1001 < H ≤ 1200	4.33	11.6
1201 < H ≤ 1400	3.28	8.8
1401 < H ≤ 1600	1.6	4.3
1601 < H ≤ 1800	0.82	2.2
1801 < H ≤ 1950	0.07	0.2
합계	37.39	100

#### 1.4 평균경사

유역의 평균경사는 유출, 토사의 침식등과 관계가 깊은 인자로서 연구 대상 지역에서는 Horton의 방법으로 유역의 평균경사를 구하였으며, Horton의 방법은 해당 지역의 지형평면도를 매우 조밀한 눈금의 그래프용지로 덮고 고도차  $\Delta h$ 인 등고선을 기입하고 등고선과 그래프 선과의 교점을 표시한 후 그 교점의 총수를 N이라하면, 서로 인접한 등고선사이에 끼는 그래프선의 선분 수는 N개가 된다.

또한 이들 선분의 길이를  $l$ 이라 하고 이 선분과 등고선 사이의 각을  $a$ 라 하면 등고선 간격은  $l \sin a$ 이다. 그러므로 등고선의 수평거리  $d = \frac{1}{N} \sum l \sin a$ 가 된다. Horton은 N을 충분히 많이 취하면  $a$ 는  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지의 균일하게 분포되어 있는 것으로 가정하고  $\sin a$ 을 평균하여

$$d = \frac{\sum l}{M} \cdot \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin a da = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sum l}{N} \text{ 을 얻는다.}$$

그러므로, 유역의 표면경사는 다음과 같이 표시된다.

$$J = \frac{\Delta H}{d} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta H \cdot N}{\sum l} \quad (2.2)$$

여기서, J는 유역의 평균경사, l는 등고선사이에 낀 선분의 길이, ΔH는 등고선의 간격이며 한천 유역의 평균 경사는 10.908%이다.

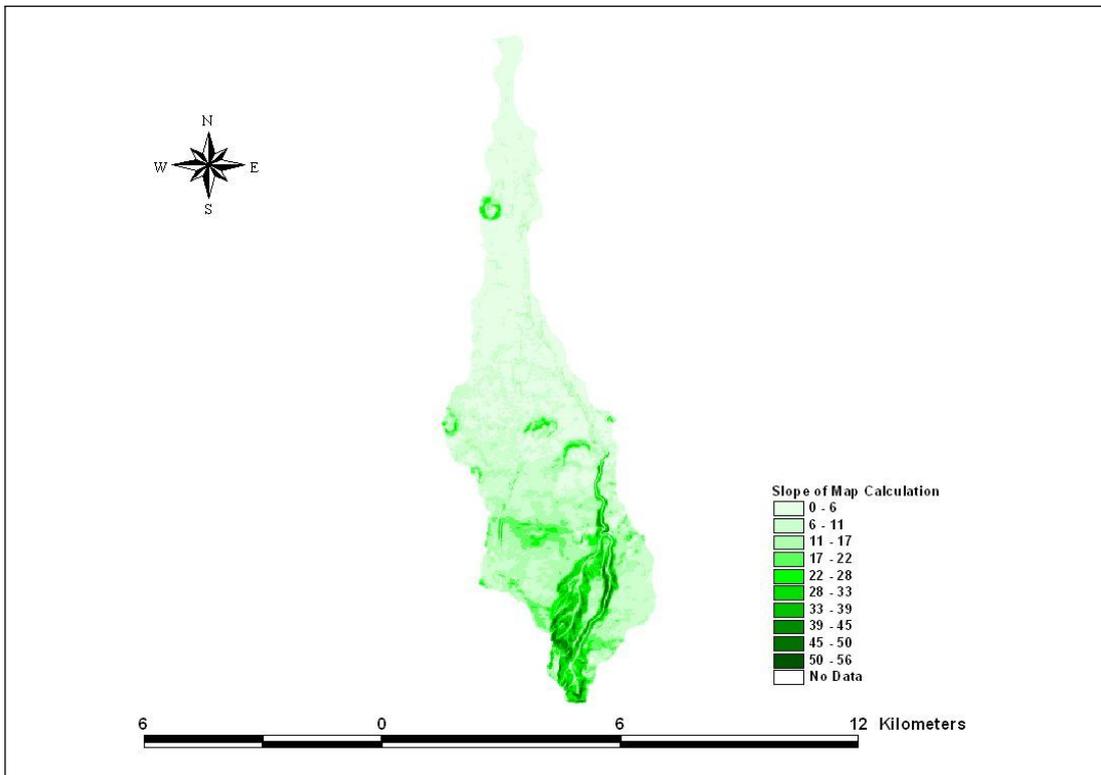


Fig. II-3. Slope analysis map of the basins to be studied

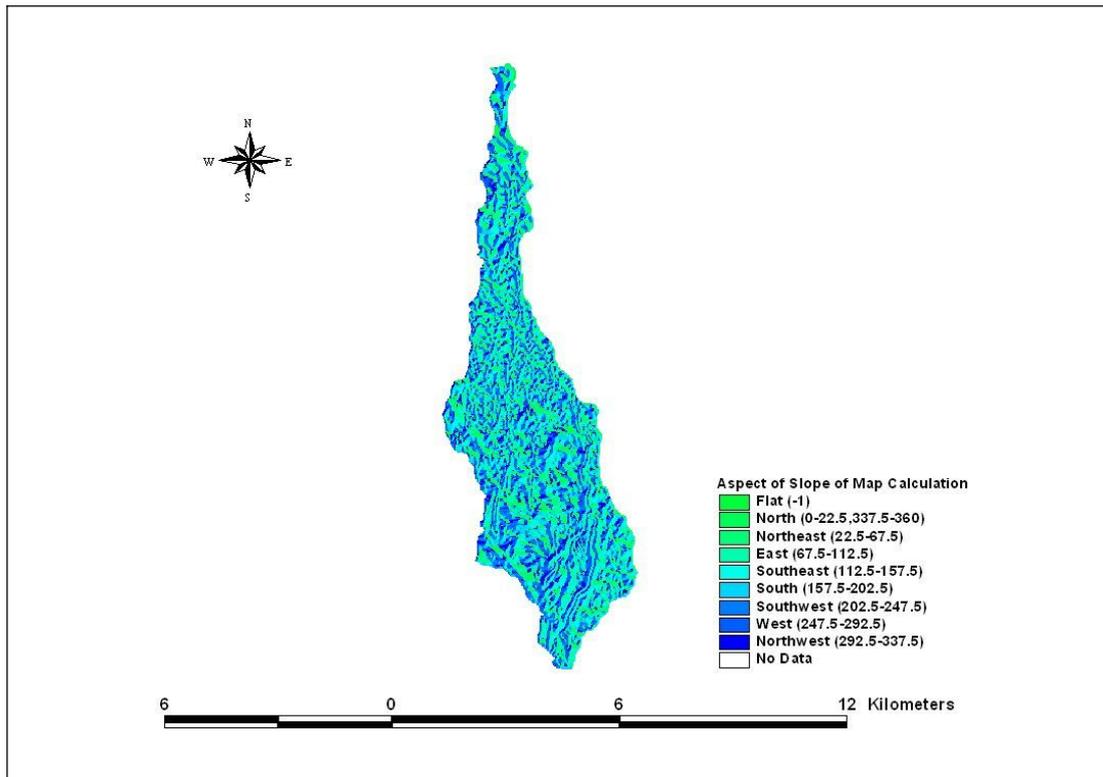


Fig. II-4. Slope of direction analysis map of the basins to be studied

### 1.5 하상 경사

하천의 유로는 일부구간을 제외하고는 대체적으로 자연적 요인인 강수, 지형 및 지질 등과 인공적 요인인 유역의 임상, 제방축조, 하천구조물 설치, 하천골재 채취 등의 복합적 요인에 의해 3차원적으로 많은 변화가 있다

그 중 하천의 종단형상은 장기간에 걸쳐 일어나는 자연적 하천의 유수작용(세굴, 운송, 퇴적작용)에 의해 형성되며 평형하상이 이루어질 때까지 변화를 계속하고 있으며, 상기한 평형하상이란 세굴 및 퇴적량이 동일하여 세굴 및 퇴적이 일어나지 않는다는 것을 의미한다

그러나 자연하천에 있어서 하상은 홍수규모의 변화에 따라서 세굴 및 퇴적작용이 교대로 일어나므로 엄밀한 의미의 평형하상은 존재하지 않는다. 이와 같이 하상의 세굴, 운송 및 퇴적은 유수작용에 기인하고 있으며 이로 인해 형성되는 하상 구성물질은 하천의 유수작용에 따른 자연적 체분석 작용에 의하여 상류로 가면 갈수록 입도가 커지는 경향을 보여주고 있다 그러나 하상 구성물질의 입도

분포는 인위적 수문, 수리량의 조정, 인위적 하천구조물의 설치(댐, 보, 제방 및 교량설치) 및 하천골재의 난골 등에 의해서도 많은 영향을 받기 때문에 전구간에 걸쳐 뚜렷한 체분석 작용을 보여주지 못하는 실정이다.

한천을 현장조사 한 결과 과업구간 대부분의 하상이 제주도의 형성과정에서 발생한 것으로 예측되는 현무암 재질의 암반으로 구성되어 있는 것으로 조사되었다. 지형도 및 하천정비기본계획을 이용하여 GIS Model를 사용한 최심하상고를 이용한 하상경사를 구하였다. 상류부의 최심하상고는 475.719m, 하류부의 최심하상고는 0.55m로 나타났으며, 최심하상고 경사는 4.13%로 분석되었다.

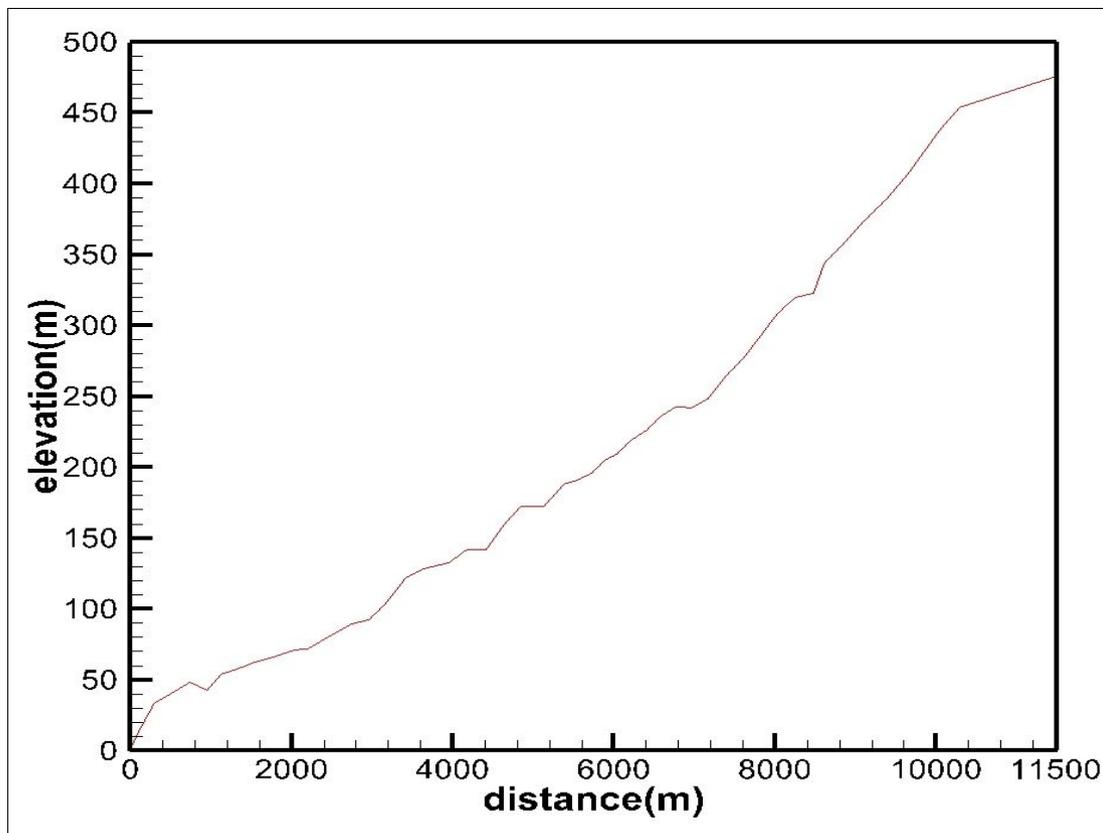


Fig. II-5. Bed slope using level of deepest bed

## 1.6 지질 및 토양

제주도는 순상화산에서 볼 수 있는 Aspite 화산으로 지질은 1,950m의 섬 중앙에 위치한 한라산과 기생화산들에서 용출된 화산용출암으로 현무암류, 조면암류,

조면암질안산암류, 기생화산용출물 및 화성쇄소퇴적암류와 사구로 구성되어 있으며, 현무암류는 감람석, 휘석, 현무암을 기저로 하여 침상장석 감람석현무암 반상 휘석 현무암, 비현정질현무암등이며 이들이 제주도 전체 면적의 95%이상의 분포를 보이고 있다

연구대상 유역의 지질분포는 대부분 현무암으로 되어 있는바 전체 면적의 약 56%가 장석 현무암, 약 33%가 반상휘석 현무암이며 비현정질 현무암이 40%, 계상장석 감람석현무암이 11% 분포하며 나머지 약 51%가 조면암질 안산암과 신터어콘으로 구성되어있다

하천별 분포 현황을 살펴보면 하천의 상류부인 표고 약 400m 이상은 주로 장석현무암으로, 중·하류부는 반상휘석현무암으로, 하류부는 장석현무암으로 분포도를 보이고 있으며 각 하천 유역내에 여러군데의 신터어콘이 형성되어 있다(한국자원연구소, 2000). 유역의 토양성특성은 강우로 인한 유출과정에서의 직접적인 영향을 미치고 토양의 성질에 따라 침투능이 상이하므로 총 강우량 중 직접유출로 유하하는 유효우량의 크기에도 영향을 주는 인자이다.

본 연구대상유역 내의 분포된 토양군으로는 산악 및 구릉지에 형성하는 Mab, Mac, 하천범람지에 분포되어 있는 Afa, Afb, Afc 등이 유역전반에 걸쳐 분포하고 저구릉지 및 산록지에 형성하는 Roa, Rob, Roc, Rod, Rea 등은 농경지인 담으로 활용하고 있으며 산악 곡간지에 위치한 Anb, Anc 등은 하천을 형성하고 있거나 담으로 이용되고 있다(한국토양조사 사업 기구, 1971).

### Ⅲ. 조도계수 기본 이론

#### 1. 조도계수의 개념

수리학에서 조도는 하도의 거친 정도를 의미하며, 하천의 흐름에 저항이 되는 원인이다. Rouse(1965)는 흐름 저항의 4요소는 표면 저항 또는 마찰 저항, 형상 저항, 자유수면 불균형에 따른 파 저항 그리고 흐름의 부정류 특성에 따른 저항으로 설명하고 이 중, 표면 저항과 형상 저항은 하도 특성의 중요한 구성 요소라고 한다.

이러한 조도에 대한 의한 저항을 최초의 일반식으로 표현한 것은 1768년 Chezy로 저항계수  $C$ 를 도입하여 유속과 하천 특성간의 상관식을 제시하였다. 그 이후 Ganguillet와 Kutter(1869)가 수면경사  $S$ 와 조도계수  $n$ 의 함수로 표현되는 Chezy 계수  $C$ 의 일반식을 유도하였다.

##### 1.1 Manning 공식

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (3.1)$$

여기서  $R$ 은 동수반경,  $S$ 는 마찰경사,  $n$ 을 Manning의 조도계수라 하며, 수로의 표면 구성 물질에 따라 변하고 실험을 통해 값을 얻을 수가 있다.

##### 1.2 Chezy 공식

$$V = C \sqrt{RS} \quad (3.2)$$

여기서,  $C = \sqrt{2g/K}$ 를 Chezy의 평균유속계수라 하고, 위 식을 Chezy의 공식이

라 한다. 일련의 실험을 통하여 유속과 수로경사간의 관계가 적정한 것으로 나타났지만 유속과 동수반경과 관계에 대해서는 분명하지 않았다.

### 1.3 Darcy-Weisbach 공식

19세기 Darcy와 Weisbach는 원관에 대한 유속 공식으로 Chezy의 공식을 이용하여 다음과 같은 Darcy-Weisbach 공식을 제안하였다.

$$V = \sqrt{\frac{2g}{f}} \sqrt{DS} \quad (3.3)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $f$ 는 마찰손실계수,  $D$ 는 원관의 직경이다.

## 2. 조도계수 산정방법

### 2.1 Cowan의 방법

Cowan방법(SCS 방법)은 다음 식을 이용하여 해당구간의 조도계수를 산정하는 방법이며, 여기서 포함된 각종 보정계수는 표와 같다.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (3.4)$$

여기서,  $n$ 은 조도계수,  $n_0$ 은 해상재료별 기본 조도계수,  $n_1$ 은 하상 표면조도에 따른 보정계수,  $n_2$ 는 하도단면 변화에 따른 보정계수,  $n_3$ 은 장애물의 영향에 따른 보정계수,  $n_4$ 는 식생에 따른 보정계수,  $m_5$ 는 만곡에 따른 보정계수이다.

Table III-1. Cowan roughness coefficient and correction coefficient

수 로 조 건		각 계수값	
하상재료	흙	n <sub>0</sub>	0.020
	분쇄된 암		0.025
	가는 자갈		0.024
	굵은 자갈		0.028
불규칙성 정도	평탄	n <sub>1</sub>	0.000
	작음		0.005
	중간		0.010
	심함		0.020
수로단면의 변화	점진적 변화	n <sub>2</sub>	0.000
	가끔씩 변화		0.005
	자주 변화		0.010 ~ 0.015
장애물의 상대효과	무시할 정도	n <sub>3</sub>	0.000
	작 음		0.010 ~ 0.015
	중간		0.020 ~ 0.030
	심 함		0.040 ~ 0.060
식 생	적음	n <sub>4</sub>	0.005 ~ 0.010
	중간		0.010 ~ 0.025
	많음		0.025 ~ 0.050
	아주많음		0.050 ~ 0.100
만곡의정도	적음	n <sub>5</sub>	1.000
	중간		1.150
	심함		1.300

## 2.2 chow의 도표에 의한 방법

이 방법은 여러 가지 실험자료와 관측자료로부터 하도의 재료, 식생상태 등을 고려하여 개략적인 조도계수를 추정할 수 있도록 Chow가 제시한 도표로부터 조도계수를 선정하는 방법이다. 수로의 형태에 따라 각각 최대, 중간, 최소값을 사용하도록 되어 있다.

Table III-2. Roughness coefficient using Chow table(continue)

수로의 종류	최소값	중간값	최대값
A. 개수로 흐름을 갖는 관거			
A-1. 금속			
a. 황동	0.009	0.010	0.013
b. 철강			
1. 용접이음	0.010	0.012	0.014
2. 리벳이음	0.013	0.016	0.017
c. 주철			
1. 도장됨	0.010	0.013	0.014
2. 도장되지 않음	0.011	0.014	0.016
d. 단철			
1. 흑색	0.012	0.014	0.015
2. 아연도금(양철)	0.013	0.016	0.017
e. 이형관(corrugated metal)			
1. subdrain	0.017	0.019	0.021
2. storm drain	0.021	0.024	0.030
A-2. 비금속			
a. 투명합성수지	0.008	0.009	0.010
b. 유리	0.009	0.010	0.013
c. 시멘트			
1. 매끈한 표면처리	0.010	0.011	0.013
2. 모르터	0.011	0.013	0.015
d. 콘크리트			
1. 퇴적물이 없는 직선 암거	0.010	0.011	0.013
2. 퇴적물이 조금있고 굴곡부와 연결부가 있는 암거	0.011	0.013	0.014
3. 표면처리가 된 관거	0.11	0.012	0.014
4. 맨홀과 유입구가 있는 하수구 등	0.013	0.015	0.017
5. 강을 거푸집으로 사용하여 성형한 관거	0.012	0.013	0.014
6. 결이 고운 나무를 거푸집으로 사용한 관거	0.013	0.014	0.016
7. 결이 거친 나무를 거푸집으로 사용한 관거	0.015	0.017	0.020
e. 나무			
1. 통널관거	0.010	0.012	0.014
2. 여러장으로 처리된 관거	0.015	0.017	0.020
f. 진흙			
1. 일반 배수 타일	0.011	0.013	0.017
2. 유리질 하수관	0.011	0.014	0.017
3. 맨홀과 입구 등이 있는 유리질 하수관	0.013	0.015	0.017
4. 열린 조인트가 있는 유리질로 된 배수관	0.014	0.016	0.018
g. 벽돌			
1. 유약처리	0.011	0.013	0.015
2. 시멘트 모르터 라인링	0.012	0.015	0.017
h. 굴곡부와 연결부를 가진 위생하수관	0.012	0.013	0.016
i. 포장된 암거 및 하수관	0.016	0.019	0.020
j. 파편석공, 시멘트	0.018	0.025	0.030
B. 복공 또는 조립된 수로			
B-1. 금속성			

Table III-2. Roughness coefficient using Chow table(continue)

수로의 종류	최소값	중간값	최대값
1. 깨끗하고, 최근 완성된 경우	0.016	0.018	0.020
2. 깨끗하고, 배수(물내림)가 지난 경우	0.018	0.022	0.025
3. 자갈, 동일 단면, 깨끗한 경우	0.022	0.025	0.030
4. 작은 목초 혹은 잡초가 있는 경우	0.022	0.027	0.033
b. 하상재료가 토양이며, 바람의 영향을 받고 흐름이 느린 수로			
1. 식생이 없는 경우	0.023	0.025	0.030
2. 잔디 잡초가 있는 경우	0.025	0.030	0.033
3. 조밀한 목초가 있거나 수로바닥에 수생식물이 있는 경우	0.030	0.035	0.040
4. 수로바닥과 측면에 쇠석이 있는 경우	0.028	0.030	0.035
5. 암석으로 된 바닥 그리고 목초로 된 독의 경우	0.025	0.035	0.040
6. 바닥에 자갈이 있고 측면에 깨끗한 경우	0.030	0.040	0.050
c. 토사굴착기에 의해 굴착되거나 준설된 수로			
1. 식생이 없는 경우	0.025	0.028	0.033
2. 독에 잡목이 조금 있는 경우	0.035	0.050	0.060
d. 암석을 자른 경우			
1. 매끈하고 단일형인 경우	0.025	0.035	0.040
2. 들쭉날쭉하고 불규칙한 경우	0.035	0.040	0.050
e. 잡초와 덩불이 제거되지 않고 관리되지 않는 경우			
1. 조밀한 잡초, 흐름이 깊은 경우	0.050	0.080	0.120
2. 바닥이 깨끗하고 측면이 덩불이 있는 경우	0.040	0.050	0.080
3. 2.와 동일한 수로에서 최고수위일 경우	0.045	0.070	0.110
4. 덩불이 조밀하고 고수위일 경우	0.080	0.100	0.140
D. 자연하천			
D-1. 소하천(홍수단계의 상측폭<30m)			
a. 평지의 하천			
1. 깨끗한 직선 수로, 고수위, 돌출 또는 깊은 못이 없는 경우	0.025	0.030	0.033
2. 위의 상태와 같으나 암석과 잡초가 더 많은 경우	0.030	0.035	0.040
3. 깨끗하고 바람이 불며 못과 여울이 있는 경우	0.033	0.040	0.045
4. 위의 경우와 같으나 잡초와 암석이 더 많은 경우	0.033	0.040	0.045
5. 위의 경우와 같고 저수위, 영향을 받지 않는 경사와 단면이 더 많은 경우	0.040	0.048	0.055
6. 4.의 경우와 같으나 암석이 더 많은 경우	0.045	0.050	0.060
7. 도달이 늦고 잡초가 많으며 못이 깊은 경우	0.050	0.070	0.080
8. 잡초가 매우 많은 영역, 못이 깊고 홍수터에 큰 각재와 덩불이 있는 경우	0.075	0.100	0.150
b. 계류, 초목이 없는 수로, 일반적인 경사제방, 고수위에서 잠긴 제방을 따라 관목이나 덩불이 있는 경우			
1. 바닥조건 : 호박돌이 거의 없는 자갈층	0.030	0.040	0.050
2. 바닥조건 : 호박돌이 아주 많은 자갈층	0.040	0.050	0.070

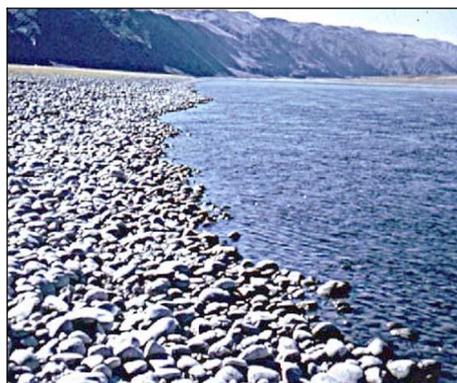
Table III-2. Roughness coefficient using Chow table(continue)

수로의 종류	최소값	중간값	최대값
D-2. 홍수터			
a. 덩불이 없는 목초지			
1. 짧은 잡초	0.025	0.030	0.035
2. 긴 잡초	0.030	0.035	0.050
b. 하상재료가 토양이며, 바람의 영향을 받고 흐름이 느린 수로			
1. 식생이 없는 경우	0.023	0.025	0.030
2. 잔디, 잡초가 있는 경우	0.025	0.030	0.033
3. 조밀한 목초가 있거나 수로바닥에 수생식물이 있는 경우	0.030	0.035	0.040
4. 수로 바닥과 측면에 쇄석이 있는 경우	0.028	0.030	0.035
5. 암석으로 된 바닥 그리고 목초로 된 독의 경우	0.025	0.035	0.040
6. 바닥에 자갈이 있고 측면이 깨끗한 경우	0.030	0.040	0.050
c. 토사굴착기에 의해 굴착되거나 준설된 수로			
1. 식생이 없는 경우	0.025	0.028	0.033
2. 독에 잡목이 조금 있는 경우	0.035	0.050	0.060
d. 암석을 자른 경우			
1. 매끈하고 단일형인 경우	0.025	0.035	0.040
2. 들쭉날쭉하고 불규칙한 경우	0.035	0.040	0.050
e. 잡초와 덩불이 제거되지 않고 관리되지 않는 경우			
1. 조밀한 잡초, 흐름이 깊은 경우	0.050	0.080	0.120
2. 바닥이 깨끗하고 측면에 덩불이 있는 경우	0.040	0.050	0.080
3. 2.와 동일한 수로에서 최고수위일 경우	0.045	0.070	0.110
4. 덩불이 조밀하고 고수위일 경우	0.080	0.100	0.140
D.자연하천			
D-1. 소하천(홍수단계의 상측폭<30m)			
a. 평지의 하천			
1. 깨끗한 직선 수로, 고수위, 돌출 또는 못이 없는 경우	0.025	0.030	0.033
2. 위의 상태와 같으나 암석과 잡초가 더 많은 경우	0.030	0.035	0.040
3. 깨끗하고 바람이 불며 못과 여울이 있는 경우	0.033	0.040	0.045
4. 위의 경우와 같으나 잡초와 암석이 더 많은 경우	0.035	0.045	0.050
5. 위의 경우와 같고 저수위, 영향을 받지 않는 경사와 단면이 더 많은 경우	0.040	0.048	0.055
6. 4.의 경우와 같으나 암석이 더 많은 경우	0.045	0.050	0.060
7. 도달이 늦고 잡초가 많으며 못이 깊은 경우	0.050	0.070	0.080
8. 잡초가 매우 많은 영역, 못이 깊고 홍수터에 큰 각재와 덩불이 있는 경우	0.075	0.100	0.150
b. 계류, 초목이 없는 수로, 일반적인 경사제방, 고수위에서 잠긴 제방을 따라 관목이나 덩불이 있는 경우			
1. 바닥조건 : 호박돌이 거의 없는 자갈층	0.030	0.040	0.050
2. 바닥조건 : 호박돌이 아주 많은 자갈층	0.040	0.050	0.070

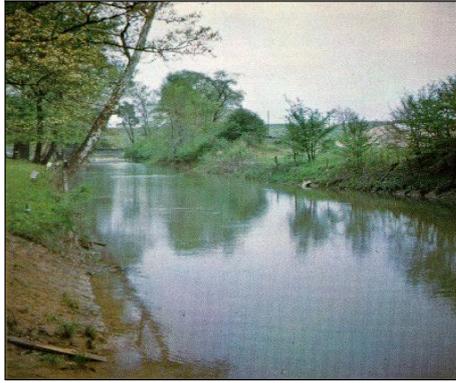
Table III-2. Roughness coefficient using Chow table

수로의 종류	최소값	중간값	최대값
D-2. 홍수터			
a. 덩불이 없는 목초지			
1. 짧은 잡초	0.025	0.030	0.035
2. 긴 잡초	0.030	0.035	0.050
b. 경작지			
1. 곡물이 없는 경우	0.020	0.030	0.040
2. 성장한 작물이 있는 논	0.025	0.035	0.045
3. 성장한 작물이 있는 밭	0.030	0.040	0.050
c. 덩불			
1. 덩불이 드문드문 나고, 잡초가 많은 경우	0.035	0.050	0.070
2. 겨울에 적게 난 덩불과 나무들	0.035	0.050	0.060
3. 여름에 적게 난 덩불과 나무들	0.040	0.060	0.080
4. 겨울에 뾰뾰하게 혹은 적당하게 난 덩불	0.045	0.070	0.110
5. 여름에 뾰뾰하게 혹은 적당하게 난 덩불	0.070	0.100	0.160
d. 나무			
1. 여름에 곧고, 뾰뾰한 버드나무	0.110	0.150	0.200
2. 싹이 없는 나무 그루터기로 된 깨끗한 대지	0.030	0.040	0.050
3. 새싹이 많은 것 외에는 위와 동일한 조건의 대지	0.050	0.060	0.080
4. 뾰뾰한 높은 나무에, 약간의 작은 나무들, 풀은 거의 없는 분지점 아래의 홍수터	0.080	0.100	0.120
5. 분지점에 도달하기 전이라는 것 이외에는 위와 동일한 홍수터	0.100	0.120	0.160
D-3. 주요 하천(홍수터에서 상부 폭>30m)			
a. 표석이나 덩불이 없는 규칙적인 단면	0.025	-	0.060
b. 불규칙하고 거친 단면	0.035	-	0.100

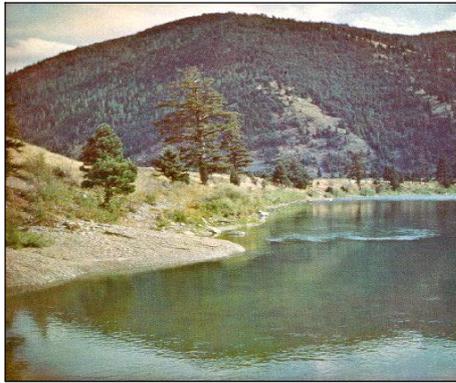
### 2.3 Barnes의 사진을 활용한 현장조사법



(1)  $n = 0.024$  바닥은 진흙으로 뒤덮인 조약돌과 자갈로 구성되어 있다



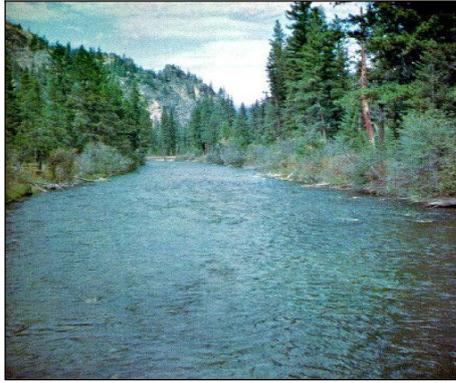
(2)  $n = 0.027$  바닥과 둑은 점토로 구성되어 있으며 하상바닥은 짧은 잔디와 일부 장소에서 나무로 구성되어 있다.



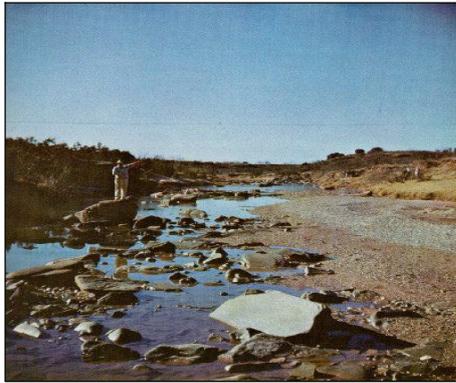
(3)  $n = 0.030$  왼쪽 하상은 모래, 자갈, 그리고 바위로 구성되며 하상재료는 모래의 위주로 되어 있다.



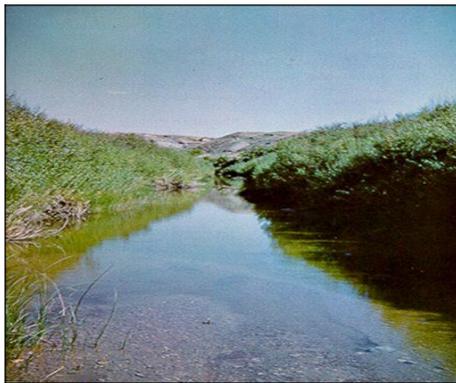
(4)  $n = 0.032$  바닥과 둑은 지름이 0.1m~0.25m인 매끄러운 조약돌과 최대 0.45m의 호박돌로 구성되어 있다.



(5)  $n = 0.036$  바닥이 자갈과 바위이며  $D_{50}=172\text{mm}$ ,  $d_{84}=265\text{mm}$ , 하천양안은 나무가 무성하다.



(6)  $n = 0.041$  바닥은 모래, 자갈, 흩어져 있는 큰 바위와 작은 바위로 구성되어 있으며, 하상바닥은 불규칙하게 침식하고 있다.



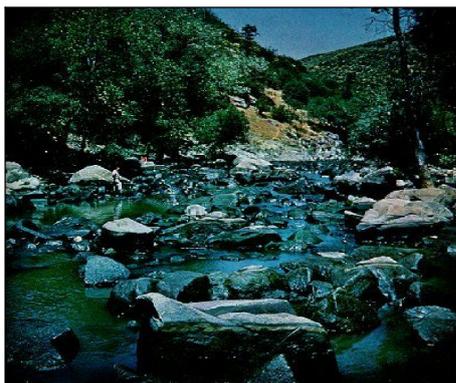
(7)  $n = 0.043$  바닥은 주로 모래로 구성되어 있으며, 양안은 수풀로 무성하다.



(8)  $n = 0.046$  바닥은 주로 점토와 모래로 구성되어 있으며, 양안은 매우 조밀한 나무로 구성되어 있다.



(9)  $n = 0.050$  바닥과 둑은 직경이 0.7m인 모난 전석으로 구성되어 있다.



(10)  $n = 0.053$  바닥은 큰 바위로 구성되어 있으며, 둑은 나무로 구성되어 있다.



(11)  $n = 0.060$  바닥과 둑은  $d_{50}=0.21\text{m}$ ,  $d_{84}=0.38\text{m}$ 인 호박돌로 구성되어 있다.



(12)  $n = 0.075$  바닥은  $d_{50}=0.22\text{m}$ ,  $d_{84}=0.42\text{m}$ 인 호박돌로 구성되어 있고, 둑에는 나무가 무성한 것으로 볼 수 있다.

#### 2.4 하상재료를 이용한 방법

하상토사 입경으로부터  $n$ 값을 추정하기 위해 많은 경험적 방법들이 연구되었다. 이들 중에서 가장 널리 알려진 것은 1923년 Strickler(1923)의 연구로 Manning의  $n$ 값과 하상재료 사이에 1/6승의 관계가 있음을 이론적으로 제시하였다.

$$n = 0.047 d^{1/6} \quad (3.5)$$

여기서,  $d$ 는 Strickler에 의해 사용된 인공수로의 벽과 바닥에 부착된 균등한

모래의 직경(mm)이다. Simons와 Sentu가(1977)는 Strickler에 의해 사용된 실험상의 설계 때문에 식(3.5)는 이동성을 가진 하상위의 흐름에는 적용될 수 없다고 기술하였다.

Henderson(1966)은 Stricker의 연구는 인공수로가 아니라 자갈 하상위의 흐름에 기초하였다는 것과  $d$ 는 하상 재료의 중앙값 크기( $d_{50}$ )라고 기술하였다. Henderson은 Strickler 식에 기초한 다음과 같은 방정식을 산출하였다.

$$n = 0.034d^{1/6} \quad (3.6)$$

여기서,  $d$ 의 단위는 ft이다.

Raudkivi(1976)는 Strickler의 방정식을 다음과 같이 기술하였다.

$$n = 0.042d^{1/6} \quad (3.7)$$

여기서,  $d$ 의 단위는 m이다.

Garde와 Raju(1978)는 다양한 흐름으로부터 자료분석을 통하여서 Strickler 식에 기초하여 다음 식을 유도하였다.

$$n = 0.039d_{50}^{1/6} \quad (3.8)$$

여기서,  $d_{50}$ 은 토사재료의 통과백분율 50%에 해당하는 입경(ft)이다.

Subramanya(1982)는 Strickler의 방정식을 다음과 같이 변형하였다.

$$n = 0.047d_{50}^{1/6} \quad (3.9)$$

여기서,  $d_{50}$ 의 단위는 ft이다.

거친조직의 크기를 중요한 비율로 섞은 재료의 혼합물에 대해서 Meyer-Peter와 Muller(1948)는 다음의 방정식을 제시하였다.

$$n = 0.038 d_{90}^{1/6} \quad (3.10)$$

여기서,  $d_{90}$ 은 토사재료의 통과백분율 90%에 해당되는 입경(ft)이다.

자갈로 구성된 운하를 포함한 현장실험 결과로부터 Lane과 Carlson(1953)은 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$n = 0.026 d_{75}^{1/6} \quad (3.11)$$

여기서,  $d_{75}$ 는 토사재료의 통과백분율 75%에 해당되는 입경(ft)이다.

## 2.5 수위 자료가 있는 경우

조도계수를 산정하기 위한 적절한 수위자료가 있는 경우는 다음과 같은 방법으로 조도계수를 산정하고 적절한 조도계수를 산정하여야 한다.

### 1) 부등류 계산으로 조도계수를 역산하는 방법

하천의 하류로부터 상류까지 일관하여 조도계수를 구할 경우로서 특히 그 가운데 조도계수가 일정하다고 생각되는 비교적 긴 구간의 하도가 있을 경우에 표준측차법이나 Euler 방법 등 부등류 계산법에 의하여 조도계수를 역산할 수 있다. 즉, 유량과 하류단의 수위자료나 수위-유량관계 곡선에 의한 자료를 이용하여 조도계수에 따른 상류단의 수위를 계산하고 상류단의 수위자료와 비교를 통하여 조도계수를 산정한다. 비교적 짧은 구간의 조도계수는 수면경사를 에너지경사로 치환한 다음 식으로 조도계수를 역산할 수도 있다.

$$n^2 = 2\{(H_2 + V_2^2) - (H_1 - V_1^2)\} / \left\{ \frac{V_1^2}{R_1^{4/3}} + \frac{V_2^2}{R_2^{4/3}} \Delta X \right\} \quad (3.12)$$

단, 아래첨자의 1은 하류단면, 2는 상류단면을 나타낸다.

## 2) NCALC 모형

실측 유량과 실측 위로부터 직접 조도계수를 산정하기 위하여 미국 지질조사국(USGS)에서 개발된 NCALC 모형(Jarrett and Petsch, 1985)를 사용한다. NCALC는 Manning 식을 사용하여 구간의 수리특성을 반영하고 조도계수를 계산하는 모형으로 대상구간에 m개의 단면이 존재하는 경우, 다음과 같은 식으로 조도계수가 산정될 수 있다.

$$n = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{(h_1 + h_{v1}) - (h_m + h_{vm}) - \sum_{i=2}^m (k_{i-1,i} - \Delta h_{vi-1,i})}{\sum_{i=2}^m \frac{L_i - 1, i}{Z_{i-1} Z_i}}} \quad (3.13)$$

여기서, Q는 유량(m<sup>3</sup>/sec)이며, n은 Manning 조도계수, Z는 A/R<sup>2/3</sup>이다. A는 흐름단면적(m<sup>2</sup>), R은 동수반경(m)이며 Δh는 단면사이의 수위차, Δh<sub>v</sub>는 속도수두차, L은 단면사이 거리이고, k는 수축/확장계수로 단면이 수축되는 경우는0, 확장되는 경우는 0.5로 가정한다.

NCALC는 평균 조도계수를 산정하는 방법 이외에 각 구간에서 Manning 식으로 계산된 조도계수 마찰수두(h<sub>f</sub>)로 가중치를 주어서 평균 조도계수를 산정하는 방법을 제공한다. 가중치는 대상구간의 총 마찰수두와 각 구간의 마찰수두로 계산된다.

$$n = \frac{n_{1,2} f_{f1,2} + \dots + n_{N-1,N} h_{fN-1,N}}{h_{f1,2} + \dots + h_{fN-1,N}} \quad (3.14)$$

## IV. 조도계수의 국내외 연구동향

### 1. 국외 조도계수 연구

#### 1.1 영국의 CES 기법

영국의 조도계수 산정 기법은 환경청(EA)의 지원하에 HR Wallingford에서 2003년에 개발한 방법으로 CES(Conveyance Estimation System) 방법이라고 한다. 이 방법은 미국, 유럽, 일본 등의 최신 흐름 저항에 대한 연구 결과를 바탕으로 현장 자료에 대한 자료수집, 분석을 통해 조도계수와 통수능 산정을 위한 1차원 시스템으로 개발되었으며, CES 방법은 마찰손실과 형상손실을 분리하여 계산하고, 마찰손실은 현장자료가 구축된 DB를 이용하여 산정한다(이찬주 2009).

형상손실은 복단면에서는 고수부지와 저수로의 에너지교환을 고려하고, 평면적으로는 사행영향을 반영하며, 단면과 평면의 영향을 분리하여 계산하도록 하였다. 또한 조도계수의 정밀한 계산과 2차류 분석을 위해 단면을 세분화하여 적용하고 있다.

#### 1.2 일본의 하도계획 기법

일본에서 1990년대 이후 조도계수 산정과 하도계획을 위해 표준적으로 활용되는 기법은 '하도계획 기법'이다. 이 방법은 세그먼트 이론에 기초하여 있으며 하도 특성별로 하상재료와 소규모 하상과의 형상을 고려하여 저수로의 조도계수를 산정한다. 이러한 하상재료의 이동성을 판단하는 인자인 무차원 소류력과 수심과 상대조고간의 비율로 유속분포 특성을 나타내는 유속계수를 이용하여 하상의 상황을 추정하고, 하도특성을 고려한 조도계수를 설정한다. 또한 식생으로는 홍수터의 수목이 조도계수에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 수고, 가지밀길이, 홍

고직경, 식생의 밀생도, 투과계수, 하초 유무 등을 반영하는 식을 제시하여 활용하고 있다.(이찬주 2009).

## 2. 국내 조도계수 연구

### 2.1 국내 연구동향

일반 자연하천에서의 조도계수를 산정하는 방법에 대한 연구가 최근에 많이 수행되었으며 특히, 하상재료, 식생, 수리학적 모형과 관련된 연구가 많이 이루어졌다.

조도계수를 추정하는 연구로 하상재료와 관련해서는 이선자와 박상우(2006)는 수위-유량자료가 없고 자갈하상 갖는 하천에 대해 조도계수를 산정하고자 하상표면에 작용하는 전단응력을 통해 등가조도를 산정하였고, 식생과 관련된 연구로는 이동섭 등(2006)이 식생 조도계수 산정에 관한 기초 연구의 일환으로 일반 개수로에서 현재 제방에 널리 사용되고 있는 한국 잔디를 선정하여 실험을 하였다.

### 2.2 국내 조도계수 산정 현황

국내 조도계수를 빈도별 홍수위 계산에 활용하는데, 대체로 두가지 방법으로 산정하는 것으로 나타났으며, 첫 번째는 하천설계기준이나, Chow(1959)의 책등에서 제시한 도표를 활용하는 방법이다. 이 방법은 하천계획이 처음 수립되는 하천에서 참고자료로 활용된 것으로 보이며, 두 번째는 기존에 수립되었던 하천계획 또는 치수종합계획에 기록된 조도계수를 참고하거나 인용하는 경우로서, 자료가 있는 대하천이 해당되며, 일부 중소하천에서는 인근 대하천의 자료를 참고하여 적용하는 경우도 있었다. 다만, 이 두가지 방법을 활용한 경우에도 제시한 수치를 뒷받침 할만한 구체적인 자료를 제시하는 경우는 드물었다.

전국 대부분의 하천의 98%에서 조도계수 값은 0.025~0.040 사이에 있는 것으

로 타나났으며, 56%의 하천에서는 0.031~0.036의 값을 사용하고 있는 것으로 나타나 조도계수 산정시 대체로 다른 하천에서 조사되었던 값과 유사한 범위에서 적용했다는 점을 짐작케 한다. 또한 하천계획에서 통상 과업구간이 수 Km 달하는 점을 염두에 두고 전체 과업구간을 어떻게 분할하여 조도계수를 적용했는지를 살펴보았으며, 그 결과 과업구간을 2~5개 소구간으로 분할하여 조도계수를 적용한 경우는 65%, 6개 이상으로 적용 구간을 분리한 경우는 16% 불과하였다(이찬주, 2009).

제주도의 하천은 전 구간에 대해 일률적으로 하나의 고정된 조도계수를 적용하고 있으며, 우리나라는 실무적으로 하천계획과 관련하여 조도계수를 산정할 때는 대체로 구체적인 실측 자료와 이를 토대로 한 계량적인 분석이 충분히 시행되지 않았던 것으로 보이며, 대부분 실무자의 전문적인 판단에 의존하고 있음을 보여주고 있다.

## V. 한천의 하상재료 현장측정

### 1. 조도계수 산정 절차와 방법

자갈하천은 자갈층이 하상표면을 덮고 있으며, 자갈입자로 구성된 하상표면과의 접촉에 의해서 발생한다. 하천의 흐름 조건이 가해지기 전에는 흐름 저항의 주요인인 하상이 변형되지 않고 그 형태를 유지하고 있어 그 이하 범위의 흐름 조건에 대해서는 하상의 거칠기를 주요인으로 고려하는 조도계수 산정이 가능하다.

현장실측을 통한 조도계수를 산정하는 방법은 다음의 과정에 따라 산정하였다.

1단계에서는 대상 하천구간을 도상 조사를 통해 예비적으로 산정하며, 이때 지형도, 항공사진, 위성사진을 활용하여 대상구간을 선정한다.

대상구간은 직선형에 가까운 하도로서 하폭의 5배 이상의 길이를 갖는 하천을 선택하며, 하천정비기본계획을 활용하여 하상재료와 식생분포, 하도 특성, 유량 측정 여부 등을 검토한다.

2단계는 예비 대상구간을 실제로 답사하여, 도상조사 결과와 비교하면서 현장 실측 지점이 적절한지 평가한다. 지도나 항공 위성사진에서 확신할 수 없는 실제 하상재료의 크기, 흐름의 정체, 인공적인 구조물, 배수 여부에 의한 영향 등을 조사한다.

3단계는 확정된 대상구간을 실측하는 과정으로, 수위계 설치, 유량 측정, 측량, 하상재료 채취 및 분석이 포함된다. 채취한 표본은 입경 분석 후 대표입경인  $d_{20}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{80}$  등을 산정한다. 4단계는 이렇게 실측된 자료를 이용하여 각 지점별 조도계수를 계산하고 그 특성을 분석하며, 자료를 정리한다.



Fig. V-1. Field survey on subject stream

## 2. 하상재료 채취 및 자료분석 방법

### 2.1 조사지점 선정

전 하천구간을 현장답사 및 현장조사를 실시하였으며, 하상재료 조사는 원칙적으로 하천의 종단방향은 1km 간격, 한 단면에 대해 3개 지점 이상에서 시료를 채취하였다. 또한, 하상변동을 위해 모든 하천 측량 단면에서 하상재료 시료를 채취하는 것이 바람직하다. 시료 채취 시 점 사주, 여울이나 웅덩이 등 국부적으로 하상재료의 변화가 심한 구역은 피하며, 가급적 그 구역에서 보편적으로 있는 하상재료를 선택한다.

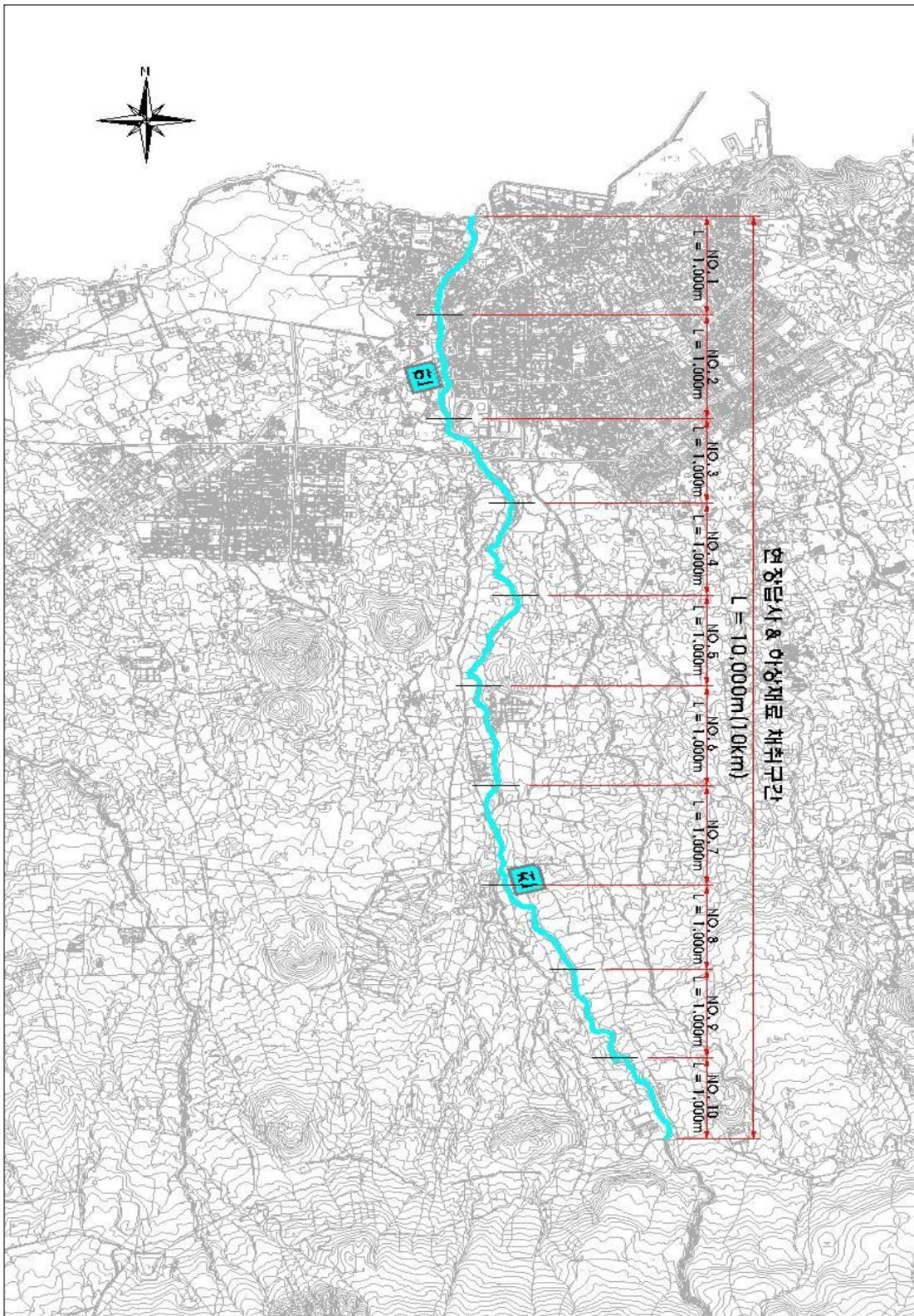


Fig. V-2. Cross section for each section of subject stream

## 2.2 하상재료 채취 방법

하상재료의 입도 특성을 이용하여 조도계수 산정하기 위한 적합한 하상재료 채취방법은 모래 재료는 현장 시료를 채취하여 체 분석으로 실시하며, 실트 이하 재료는 현장 시료를 채취하여 BW관 등을 이용한 침강속도로 분석으로 한다.

격자틀 방법 중 선 격자법은 하상주변에 위치해 있는 자갈 중 큰 것을 선택하여 자갈의 입경만큼 같은 간격으로 이동하여 하상의 샘플을 100개 채취, 하상의 입경분포를 분석하였다. 면 격자법은 자갈 하상에 일정한 크기의 격자망을 형성하고 격자점 바로 아래 있는 입자를 채취하는 방법이다.  $1\text{m}^2$ 보다 작은 크기의 사각형 격자판을 사용할 경우 사진촬영을 하여 축척을 고려한 사진판독으로 입경을 구할 수 있다.

그 외에 임의로 걸으면서 일보 또는 수보마다 한번씩 발끝에 체이는 시료를 채취하거나 눈을 감은 채 손을 뻗어 손끝에 걸리는 돌을 채취하는 방법이 있으나 이 경우 도보측정이 가능한 얇은 수심의 하천에 적합하며, 큰 입자가 채취될 확률이 작은 입자보다 높은 것으로 알려져 있다. 면적채취 방법은 선정된 영역 안에 노출된 모든 입자를 채취하는 방법으로 분사 페인트를 이용하거나 해당 지역에서 사진촬영을 하는 방법이다. 또한 횡단채취 방법은 채취영역에서 끈 등으로 직선을 설정하고 선 아래의 모든 입자를 채취하는 방법이다. 면적채취나 횡단채취 방법에 의한 분석은 파괴채취 방법에 의한 결과로 환산하기 위해 가중치를 고려해야 하나 격자채취 방법으로 입경을 측정하는 경우는 파괴채취 방법에 의한 결과와 동등한 것으로 알려져 있다. 이와같은 하상재료 조사는 하천 측량시 병행하는 것이 효율적이며, 하천 조도, 유사 이송, 하상 변동, 하도 설계 등에 관련되는 하상재료의 입경 분포, 비중, 침강 속도, 현장토의 걸보기 단위중량과 공극률 등을 측정한다. 하천 유역 전체의 하상재료 상태를 전반적으로 조사하기 위해서는 항공사진 등을 이용할 수 있다.

보다 표준화된 하상재료채취 방법의 기준을 마련하고자 여러 관련 보고서 및 관련 연구 논문을 조사하였으며 하천설계기준, 하천정비기본계획, 재해영향평가서, KS기준 등을 종합해 볼 때 현재 국내에서 하상재료 채취를 위한 자세한 기준은 없으며, ISO기준인 ISO4364 기준으로 선 격자법으로 실시하여 서로 다른

위치에서 25개 이상씩 지점당 총 100개 이상의 자갈 입자를 표본으로 취하여 중경(intermediate axis)을 측정하였다.



Fig. V-3. Collection of bed materials using line-grid method

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.01)		하상재료 직경(mm)	
	좌 안	$d_{20} = 205$	
		$d_{50} = 317$	
		$d_{80} = 487$	
	중 앙	$d_{20} = 214$	
		$d_{50} = 323$	
		$d_{80} = 464$	
	우 안	$d_{20} = 197$	
		$d_{50} = 345$	
		$d_{80} = 427$	

63	165	187	227	262	294	319	348	385	412	476	525	667
97	165	191	227	263	295	321	351	385	413	476	526	671
102	167	191	227	264	299	321	352	386	413	482	527	672
102	170	191	228	264	300	321	353	387	417	483	538	672
103	172	193	229	265	300	323	356	387	417	483	543	687
105	172	197	231	265	302	323	357	387	417	483	545	697
105	172	197	236	265	307	323	358	387	421	485	547	743
110	172	197	237	273	307	324	360	389	421	487	553	745
117	172	201	237	274	307	325	360	392	422	487	565	786
119	172	201	238	274	307	327	362	393	426	489	565	786
128	173	205	239	274	311	327	363	394	427	489	567	793
136	174	205	241	276	312	327	363	397	427	494	569	816
137	174	207	241	276	313	327	365	397	427	495	576	
138	176	207	243	276	314	328	368	397	436	496	583	
142	176	209	243	276	316	335	368	401	436	496	592	
142	176	209	247	276	316	337	372	401	436	497	597	
147	177	212	247	283	316	340	372	401	442	497	605	
147	179	213	247	284	316	341	372	401	447	498	607	
148	181	214	248	285	317	342	374	403	464	507	612	
151	182	214	251	285	317	343	376	403	465	512	633	
157	182	216	253	286	317	345	378	405	467	513	635	
161	183	217	254	291	317	347	380	406	467	516	643	
162	186	224	256	291	317	347	381	409	472	517	664	
164	186	227	258	293	319	347	382	410	475	523	664	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.02)	하상재료 직경(mm)	
	좌 안	d <sub>20</sub> = 286
		d <sub>50</sub> = 478
		d <sub>80</sub> = 637
	중 앙	d <sub>20</sub> = 364
		d <sub>50</sub> = 513
		d <sub>80</sub> = 673
	우 안	d <sub>20</sub> = 324
		d <sub>50</sub> = 429
		d <sub>80</sub> = 572

101	239	287	358	390	429	470	510	527	572	632	708	872
104	243	287	360	392	429	471	512	527	572	634	715	876
109	246	289	360	393	429	471	512	527	573	637	719	935
127	247	298	361	394	430	472	512	528	573	637	721	943
145	247	308	364	394	431	473	512	528	579	638	728	997
151	256	309	367	394	432	473	513	531	580	638	728	1030
173	259	312	368	396	433	474	514	531	587	642	737	1042
174	264	314	372	397	435	475	514	532	587	643	738	1107
187	267	316	372	397	436	478	514	534	587	643	745	1287
190	268	317	375	397	436	478	514	536	590	646	753	1363
194	268	317	376	401	436	486	514	537	599	647	758	1465
197	270	317	378	405	436	487	514	543	603	650	768	1905
198	275	318	382	405	436	487	517	547	612	652	771	
204	276	319	384	405	437	487	517	547	613	668	773	
207	276	324	384	415	437	490	517	556	613	673	776	
212	276	324	384	416	437	490	517	557	614	673	782	
219	278	324	385	417	437	493	517	561	614	675	785	
223	279	329	386	417	438	493	518	568	616	683	786	
224	281	334	387	418	438	496	519	568	617	683	787	
227	284	335	387	419	445	497	519	569	618	687	789	
227	285	342	387	421	457	498	523	571	624	697	816	
230	286	344	387	421	461	499	523	572	624	703	819	
237	286	348	387	425	463	503	524	572	625	705	835	
237	287	356	389	425	468	504	526	572	628	705	853	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.03)		하상재료 직경(mm)	
	좌 안	d <sub>20</sub> = 268	
		d <sub>50</sub> = 524	
		d <sub>80</sub> = 493	
	중 앙	d <sub>20</sub> = 349	
		d <sub>50</sub> = 508	
		d <sub>80</sub> = 674	
	우 안	d <sub>20</sub> = 374	
		d <sub>50</sub> = 357	
		d <sub>80</sub> = 641	

102	238	304	342	370	411	449	494	524	579	628	678	804
108	247	305	343	371	413	456	496	530	581	631	678	827
117	257	306	343	372	414	458	496	536	582	636	678	842
119	257	307	344	374	420	459	497	539	583	637	683	846
119	267	307	344	374	420	462	497	541	584	637	690	867
121	268	307	346	375	426	463	497	542	584	637	697	894
125	272	311	346	376	427	471	497	542	586	638	697	894
134	273	314	347	376	427	472	499	543	586	639	704	904
134	273	317	348	380	432	472	502	545	590	639	709	1012
142	276	319	349	381	433	476	504	546	592	639	713	1042
162	276	322	349	383	436	478	508	547	594	641	726	1149
179	276	323	352	384	436	479	514	547	597	643	728	1237
179	278	324	356	385	436	479	514	547	598	643	732	
186	279	326	357	387	436	480	515	547	598	648	736	
189	279	327	359	387	436	484	518	548	599	648	736	
189	284	327	361	387	437	487	518	560	603	648	736	
195	285	327	362	389	438	487	519	564	606	652	742	
198	285	337	362	391	438	488	519	572	616	657	746	
203	286	341	364	392	446	489	519	574	617	657	748	
204	289	342	365	394	446	491	522	574	618	660	752	
212	293	342	367	394	447	491	524	576	618	663	752	
219	293	342	367	396	447	492	524	578	623	673	763	
226	302	342	368	397	447	492	524	578	623	674	804	
226	302	342	370	403	449	493	524	579	628	678	804	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.04)		하상재료 직경(mm)	
	좌 안	$d_{20} = 311$	
		$d_{50} = 497$	
		$d_{80} = 517$	
	중 앙	$d_{20} = 388$	
		$d_{50} = 509$	
		$d_{80} = 662$	
	우 안	$d_{20} = 385$	
		$d_{50} = 406$	
		$d_{80} = 586$	

112	296	331	368	399	441	464	492	524	571	605	652	735
213	299	331	370	403	442	465	495	524	571	607	655	747
226	307	331	370	406	442	466	496	527	572	609	656	748
248	307	332	372	407	443	467	497	527	574	611	657	772
257	308	333	378	411	444	468	498	531	577	616	660	777
259	309	333	380	412	444	468	500	532	578	617	662	780
262	309	335	381	415	447	471	502	533	579	617	667	793
262	309	336	385	415	447	472	504	533	580	623	670	838
264	311	345	386	417	447	474	504	534	580	624	673	883
266	312	347	387	418	447	475	506	536	581	625	676	932
266	313	348	388	418	448	475	506	539	582	625	682	959
273	314	349	388	420	449	477	506	541	585	627	696	1242
273	315	349	390	421	449	479	507	544	585	627	696	
275	315	350	391	421	449	480	507	553	586	628	700	
277	320	352	391	421	450	481	508	556	588	628	703	
277	321	354	392	424	453	481	509	558	588	630	703	
278	322	356	393	428	455	482	509	560	589	630	703	
282	322	357	393	428	458	487	515	562	590	630	704	
282	323	358	394	429	459	488	516	566	592	637	715	
288	326	359	395	430	460	488	517	566	593	638	717	
291	326	359	396	433	461	490	517	567	597	644	721	
291	327	365	397	434	461	490	518	567	597	646	723	
293	327	365	398	434	461	491	519	568	597	649	724	
295	329	367	398	438	461	492	523	570	599	650	726	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.05)		하상재료 직경(mm)	
	좌 안	$d_{20} = 322$	
		$d_{50} = 522$	
		$d_{80} = 597$	
	중 앙	$d_{20} = 305$	
		$d_{50} = 437$	
		$d_{80} = 614$	
	우 안	$d_{20} = 383$	
		$d_{50} = 449$	
		$d_{80} = 617$	

101	267	309	347	393	424	464	502	531	582	611	643	763
114	268	314	351	393	427	465	502	533	582	612	644	793
134	268	315	354	395	428	465	504	539	583	614	646	842
143	272	316	354	395	428	468	507	541	584	615	648	871
154	275	317	359	397	430	475	507	541	585	617	649	883
189	278	317	360	397	433	477	507	542	585	617	652	894
204	279	322	361	399	436	477	507	542	586	617	673	894
213	282	326	365	399	437	477	507	542	588	617	673	932
223	282	327	367	403	442	480	508	543	589	617	681	985
226	284	329	367	403	442	481	508	543	589	619	690	1079
228	286	332	368	403	443	483	508	547	590	623	690	1228
235	291	333	374	405	446	485	509	548	594	623	696	1502
236	293	333	376	407	449	485	514	551	594	623	697	
238	298	336	378	409	449	487	517	560	594	624	697	
239	299	337	380	411	449	490	519	560	597	624	700	
241	305	339	380	412	449	491	519	567	597	624	703	
241	307	342	381	413	450	492	521	571	603	628	704	
245	307	342	383	417	450	493	522	571	605	628	704	
249	307	342	386	417	458	497	524	572	605	630	712	
257	307	342	387	418	459	497	527	574	605	630	715	
257	307	345	388	420	461	497	529	578	607	634	724	
264	308	345	389	421	461	498	530	578	607	637	728	
266	308	346	390	421	461	500	531	579	609	637	746	
266	308	347	390	421	463	500	531	582	609	641	752	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.06)		하상재료 직경(mm)	
	좌 안	$d_{20} = 347$	
		$d_{50} = 774$	
		$d_{80} = 867$	
	중 앙	$d_{20} = 328$	
		$d_{50} = 500$	
		$d_{80} = 751$	
	우 안	$d_{20} = 450$	
		$d_{50} = 487$	
		$d_{80} = 1203$	

134	297	347	393	419	479	533	604	703	794	1004	1215	1669
192	298	347	393	425	480	536	604	704	830	1004	1215	1771
194	299	348	393	427	482	537	611	711	835	1019	1253	1771
198	307	352	395	429	486	537	617	714	835	1021	1254	1780
203	308	353	395	430	486	537	624	718	835	1021	1266	1890
204	309	356	397	435	487	539	629	724	842	1042	1314	2099
208	309	356	398	446	494	539	634	729	857	1042	1332	2162
218	312	356	400	449	498	539	643	735	860	1042	1332	2184
218	312	357	401	450	498	539	644	737	862	1049	1355	2184
223	315	362	401	450	500	541	648	739	862	1049	1369	2405
246	315	364	403	450	501	543	651	746	862	1062	1369	3730
264	318	364	405	457	502	554	653	751	867	1080	1369	4400
264	323	365	405	457	504	555	655	758	867	1095	1418	
264	324	369	407	459	506	555	657	760	867	1097	1418	
272	326	374	408	459	509	560	665	764	877	1105	1458	
272	327	374	410	460	513	561	665	770	894	1107	1493	
272	328	380	411	464	514	571	673	770	910	1110	1493	
277	335	380	412	464	514	582	675	773	912	1133	1493	
278	336	384	413	466	519	582	677	774	938	1185	1570	
280	340	385	417	468	521	583	683	774	938	1189	1587	
282	340	386	418	472	524	588	685	783	958	1203	1587	
283	343	387	418	472	525	597	692	785	958	1203	1587	
283	343	387	418	472	527	598	696	789	958	1203	1653	
293	345	391	418	474	528	598	702	793	1002	1213	1660	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.07)		하상재료 직경(mm)										
	좌 안	d <sub>20</sub> = 272										
		d <sub>50</sub> = 617										
		d <sub>80</sub> = 714										
	중 앙	d <sub>20</sub> = 362										
		d <sub>50</sub> = 492										
		d <sub>80</sub> = 794										
	우 안	d <sub>20</sub> = 401										
		d <sub>50</sub> = 419										
		d <sub>80</sub> = 1085										
120	247	304	356	401	443	486	538	611	756	875	1160	1696
140	253	305	356	401	443	491	539	616	767	880	1165	1746
150	264	308	359	403	446	492	539	617	770	883	1166	1771
185	264	309	363	404	447	494	539	623	772	896	1185	1782
192	265	309	364	407	449	495	541	643	773	905	1192	2000
195	266	312	364	407	450	500	547	646	774	912	1203	2162
195	271	315	368	410	450	501	555	648	774	932	1215	2184
198	272	322	369	410	458	501	558	651	776	938	1215	2208
200	275	323	372	415	459	506	560	653	779	938	1233	2621
202	277	324	374	416	460	506	560	657	783	949	1248	2745
203	277	325	375	418	460	506	567	662	785	954	1266	2765
213	279	325	380	419	461	507	574	665	794	958	1332	2985
218	282	327	382	420	461	514	581	665	803	975	1369	
223	283	328	382	422	466	517	582	675	824	1002	1406	
224	283	328	384	424	466	517	583	677	827	1004	1418	
225	288	328	385	425	471	519	585	704	830	1021	1430	
225	292	332	385	428	471	521	588	705	835	1042	1447	
226	296	333	386	428	472	524	589	714	842	1049	1462	
233	298	334	387	429	474	525	595	721	845	1085	1478	
235	300	335	387	429	474	531	597	724	860	1085	1493	
245	300	340	390	435	475	533	597	728	862	1095	1505	
245	301	342	394	435	479	535	598	735	867	1110	1515	
245	301	343	397	439	480	537	600	739	867	1111	1587	
246	303	352	398	440	484	537	609	749	867	1115	1669	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.08)		하상재료 직경(mm)										
	좌 안	d <sub>20</sub> = 375										
		d <sub>50</sub> = 539										
		d <sub>80</sub> = 1002										
	중 앙	d <sub>20</sub> = 372										
		d <sub>50</sub> = 501										
		d <sub>80</sub> = 760										
	우 안	d <sub>20</sub> = 369										
		d <sub>50</sub> = 537										
		d <sub>80</sub> = 1042										
192	298	361	397	443	474	506	560	675	808	983	1248	1669
194	301	362	397	443	476	515	572	685	819	1002	1253	1696
198	304	363	401	444	479	517	574	692	834	1004	1266	1771
203	308	364	401	446	479	519	579	702	835	1019	1270	1899
218	309	364	404	447	486	524	581	711	845	1021	1285	1920
223	309	366	407	447	489	524	586	714	845	1021	1332	2041
233	312	367	412	448	489	524	589	718	857	1042	1362	2122
257	317	368	415	449	489	525	597	722	860	1049	1369	2162
267	318	368	417	450	491	528	604	729	862	1054	1383	2184
271	323	369	418	453	491	528	606	735	867	1097	1415	2414
271	323	372	418	453	492	528	611	737	867	1097	1418	2582
272	324	373	419	459	494	531	616	749	867	1153	1447	2621
274	327	375	422	460	495	532	620	756	877	1160	1462	
277	328	377	423	460	496	535	623	759	877	1165	1475	
277	328	382	424	461	496	537	626	760	880	1166	1478	
279	334	382	424	464	498	538	629	770	896	1189	1493	
279	336	383	428	466	501	539	643	773	910	1191	1503	
282	337	384	429	466	501	539	645	774	912	1193	1515	
283	338	384	429	468	501	541	648	774	938	1196	1543	
283	350	385	429	468	501	552	654	776	938	1203	1570	
287	353	392	436	471	502	554	657	779	949	1214	1587	
290	356	393	437	471	504	555	662	783	950	1215	1653	
293	356	394	439	472	505	555	665	789	954	1233	1660	
296	359	396	440	474	506	560	675	792	958	1236	1669	

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section(continue)

측정 구간(NO.09)													하상재료 직경(mm)				
													좌 안		d <sub>20</sub> = 232		
															d <sub>50</sub> = 475		
															d <sub>80</sub> = 1062		
													중 앙		d <sub>20</sub> = 299		
															d <sub>50</sub> = 410		
															d <sub>80</sub> = 794		
													우 안		d <sub>20</sub> = 285		
															d <sub>50</sub> = 367		
															d <sub>80</sub> = 875		
90	208	264	300	345	380	405	468	547	665	830	1185	2208					
115	215	264	301	345	380	405	470	549	675	842	1192	2225					
120	218	264	303	347	380	407	475	558	677	842	1215	2248					
124	220	264	305	347	380	408	480	558	685	875	1254	2337					
125	220	265	315	348	385	410	482	561	700	880	1275	2405					
135	224	265	315	352	385	410	484	565	705	905	1275	2745					
140	225	272	315	353	385	410	490	574	705	920	1355	2765					
150	225	274	315	356	385	416	490	580	721	975	1406	2985					
165	225	275	323	356	385	418	492	582	728	983	1430	3368					
167	232	278	324	357	387	425	500	583	739	987	1458	3730					
183	235	280	325	360	387	425	500	585	747	1017	1465	3783					
184	235	282	325	362	387	425	506	585	758	1062	1480	4400					
185	235	283	328	363	390	427	513	588	765	1085	1505						
185	238	283	328	363	390	435	514	595	767	1085	1644						
190	240	283	330	364	390	435	515	598	768	1095	1746						
194	245	285	335	364	391	435	515	598	772	1105	1753						
195	245	288	335	365	395	437	517	600	785	1107	1780						
195	245	292	335	367	397	437	521	600	794	1110	1782						
198	246	295	338	369	398	440	522	604	800	1110	1840						
200	246	297	340	370	398	443	535	605	803	1111	1890						
200	247	298	340	372	400	443	537	651	818	1115	1985						
202	253	299	342	374	403	447	537	653	820	1133	2000						
204	253	300	343	374	405	450	538	655	824	1178	2099						
205	264	300	343	378	405	465	543	658	827	1183	2200						

Table V-1. Diameter of bed material for each measurement section

측정 구간(NO.10)		하상재료 직경(mm)	
	좌 안	$d_{20} = 381$	
		$d_{50} = 537$	
		$d_{80} = 1005$	
	중 앙	$d_{20} = 305$	
		$d_{50} = 482$	
		$d_{80} = 764$	
	우 안	$d_{20} = 355$	
		$d_{50} = 542$	
		$d_{80} = 1183$	

135	270	320	364	404	462	513	573	658	794	1019	1430	2230
151	271	321	368	405	465	516	581	659	812	1049	1458	2248
164	278	326	370	410	465	519	584	668	813	1055	1488	2300
170	278	327	371	411	471	521	585	672	813	1057	1502	2323
176	280	334	372	411	472	522	591	672	815	1061	1512	2420
197	281	337	372	412	472	523	597	673	821	1090	1556	2525
197	281	337	373	412	474	523	598	683	832	1110	1625	2550
215	283	339	378	412	482	525	601	690	854	1111	1663	2733
217	284	341	378	417	482	527	601	695	857	1118	1703	2920
218	285	349	381	418	487	527	603	698	893	1121	1725	3140
237	287	349	381	419	491	528	608	698	912	1124	1745	3782
245	288	350	381	420	492	528	608	705	921	1130	1754	4988
248	290	351	382	421	492	528	611	708	928	1157	1805	
253	290	352	385	421	492	533	612	713	930	1183	1819	
254	298	352	385	421	493	533	616	714	948	1188	1821	
257	301	353	388	423	495	537	620	725	950	1190	1832	
259	303	355	388	425	499	542	624	725	964	1278	1914	
260	305	358	390	432	500	548	628	729	965	1295	1954	
261	305	358	393	433	503	550	632	730	967	1312	2000	
261	305	358	397	443	503	554	636	743	981	1320	2012	
263	307	361	398	446	505	563	638	763	994	1332	2020	
264	307	361	398	449	507	563	646	764	1000	1355	2083	
267	311	361	400	460	511	564	648	768	1005	1372	2104	
268	319	362	401	462	512	572	654	793	1013	1398	2155	

### 3. 입도 분포 시험 결과

대상하천인 경우 일반하천보다 큰 하상재료를 덮고 있어 ISO 4364기준을 참고하여 선 격자법을 이용한 하상재료를 채취하였다. 격자틀 방법 중 선 격자법은 하상주변에 위치해 있는 자갈 중 큰것을 선택하여 자갈의 입경만큼 같은 간격으로 이동하여 하상의 샘플을 구간마다 100개 채취하였다.

채취한 시료를 ISO 9195 기준으로 한 입도 분포를 구하였으며, 대표입경을 산정하였다. 하상재료 입도 분포 시험결과는 그림Ⅳ-2, 3와 같다.

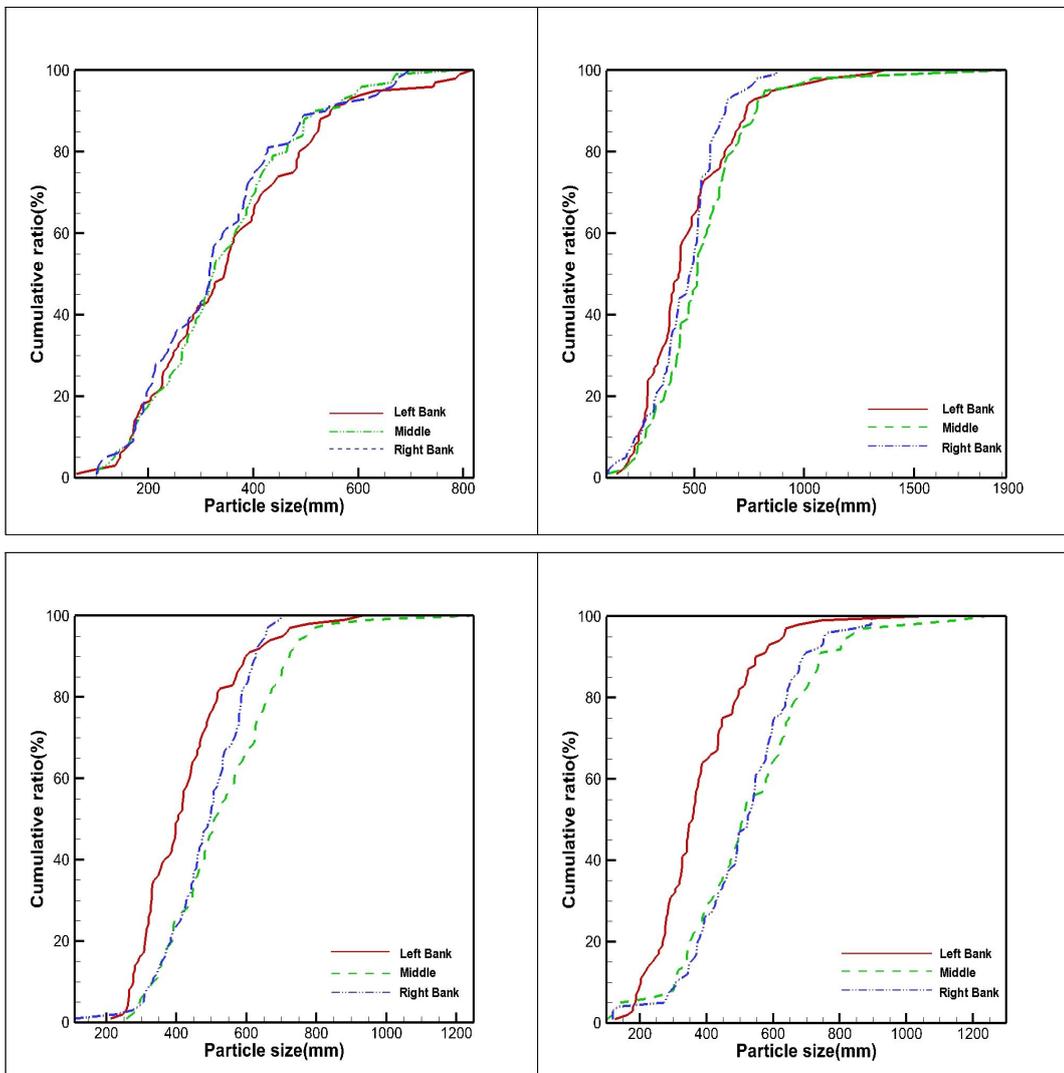


Fig. V-4. Grain size analysis using bed material(NO.01, NO.02, NO.03, NO.04)

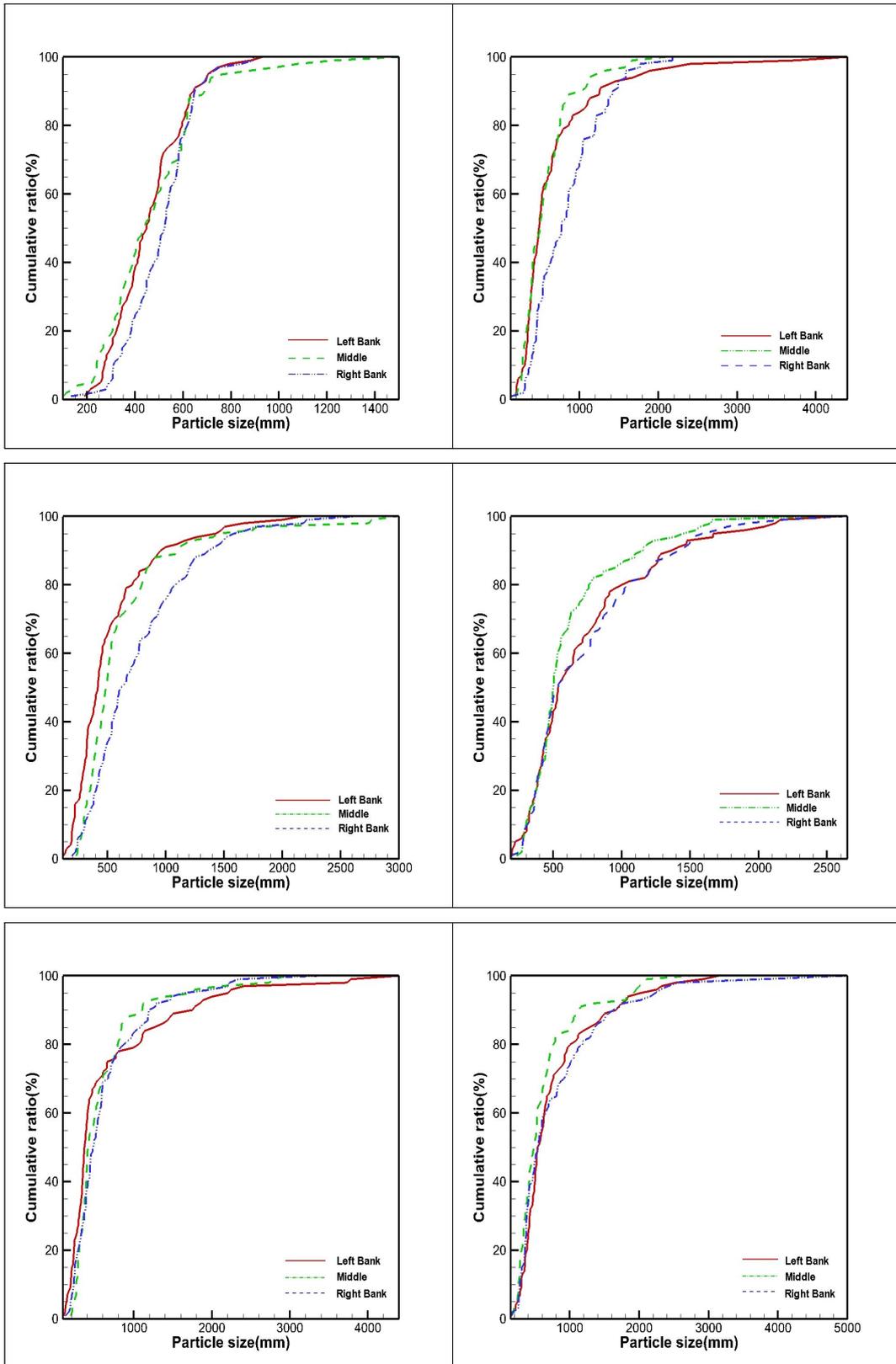


Fig. V -5. Grain size analysis using bed material(NO.05, NO.06, NO.07, NO.08, NO.9, NO.10)

## VI. 한천의 조도계수 산정

### 1. 대표입경을 이용한 조도계수 산정

각 지점별 입도분포 시험결과를 Strickler(1923)의 Manning의  $n$ 값과 하상재료 사이에 1/6승의 관계를 관련된 식인 Meyer-Peter와 Muller(1948) 식에 대입하여 조도계수를 산정하였으며, 지점별 하상재료의 대표입경을 이용한 조도계수를 산정 하였다.

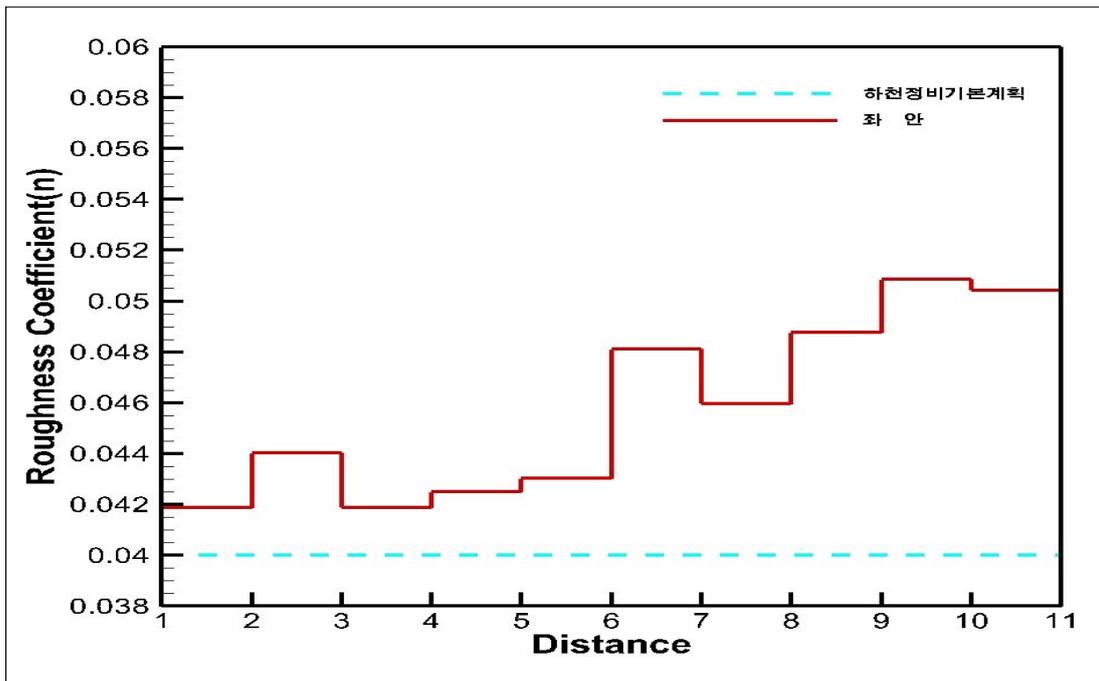


Fig. VI-1. Roughness coefficient for left bank using bed material

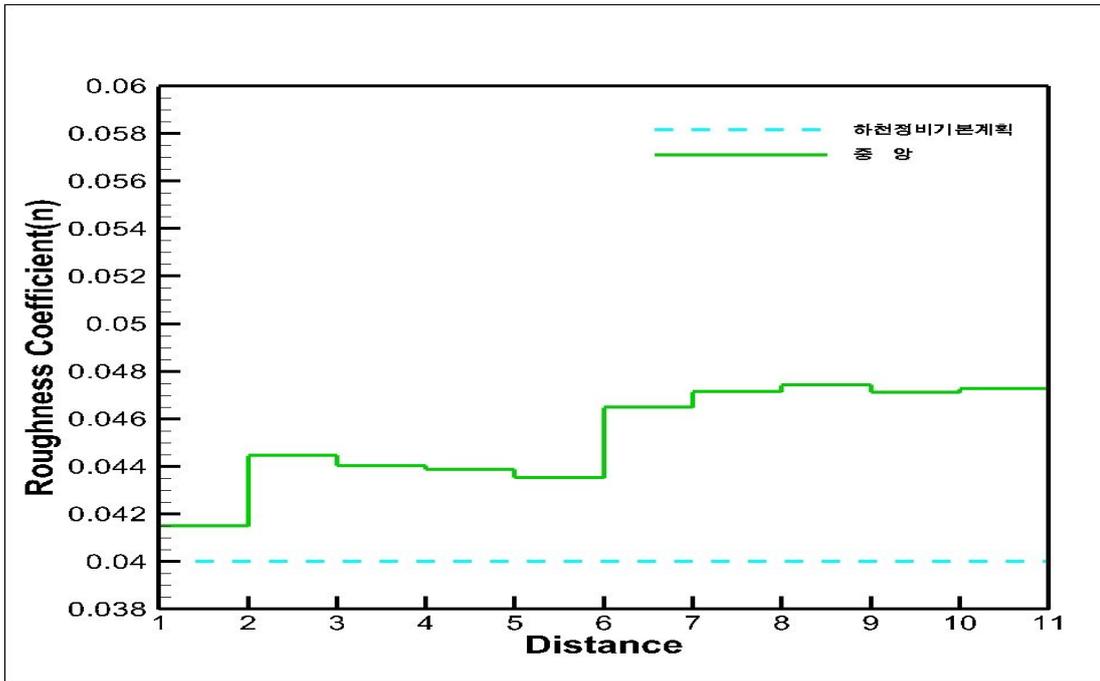


Fig. VI-2. Roughness coefficient for middle using bed material

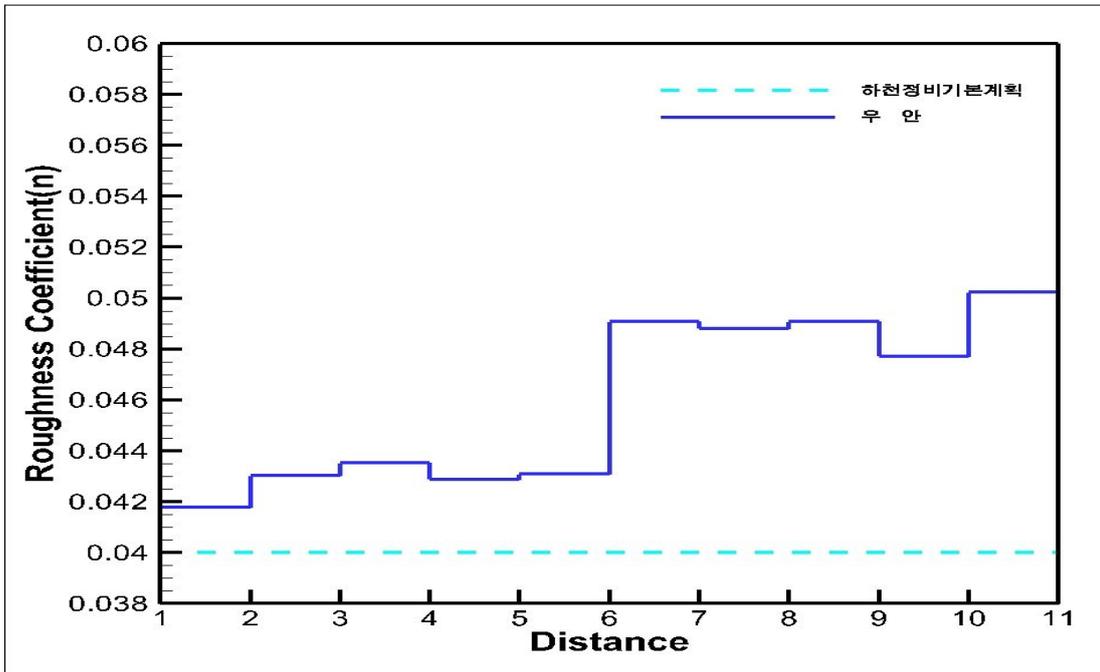


Fig. VI-3. Roughness coefficient for right bank using bed material

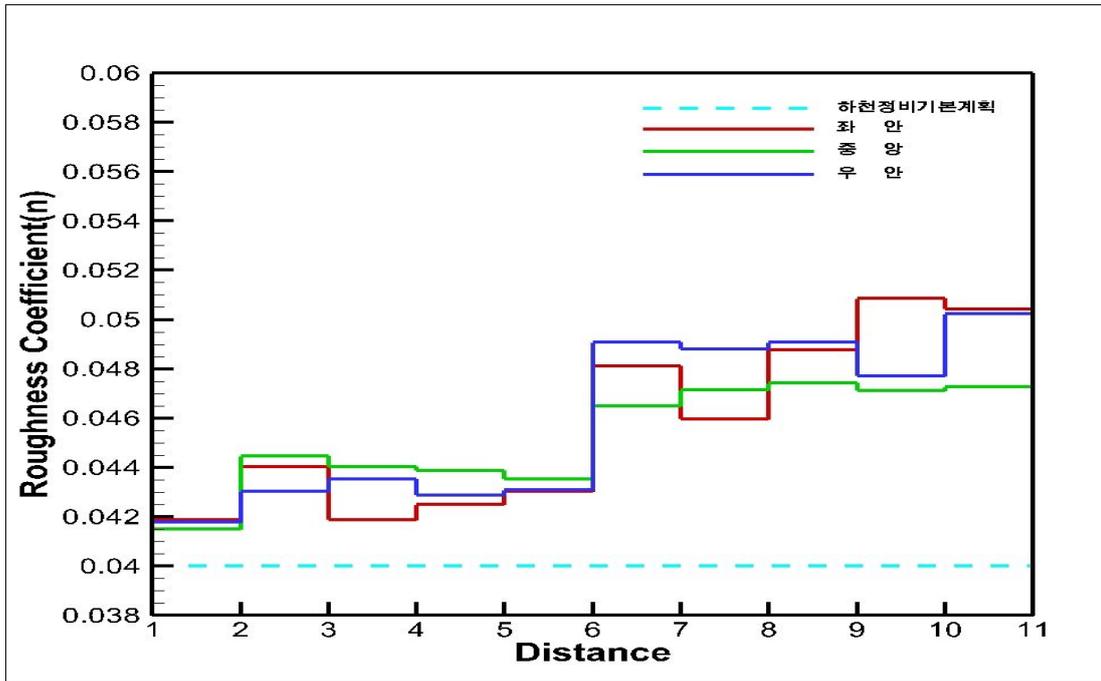


Fig. VI-4. Roughness coefficient for each section using bed material

Table VI-1. Roughness coefficient for each section using bed material

구 간	좌 안	중 앙	우 안	비 고
NO.1	0.0419	0.0415	0.0418	하천정비기본계획 0.04
NO.2	0.0440	0.0445	0.0430	
NO.3	0.0419	0.0440	0.0435	
NO.4	0.0425	0.0439	0.0429	
NO.5	0.0430	0.0435	0.0431	
NO.6	0.0481	0.0465	0.0491	
NO.7	0.0460	0.0471	0.0488	
NO.8	0.0488	0.0474	0.0491	
NO.9	0.0509	0.0471	0.0477	
NO.10	0.0504	0.0473	0.0502	

## 2. 산정된 조도계수의 적용성 검토

하상 재료의 입경을 이용한 방법으로 산정된 조도계수를 산정하였으며, 산정된 조도계수의 비교·분석을 위하여 다른 경험식을 이용하여 각 구간마다 조도계수를 구하였다.

Table VI-2. Roughness coefficient for each section using Strickler(1923) equation

구 간	좌 안	중 앙	우 안	비 고
NO.1	0.0480	0.0475	0.0473	하천정비기본계획 0.04
NO.2	0.0498	0.0513	0.0507	
NO.3	0.0483	0.0512	0.0514	
NO.4	0.0493	0.0512	0.0510	
NO.5	0.0501	0.0499	0.0514	
NO.6	0.0508	0.0510	0.0549	
NO.7	0.0496	0.0509	0.0529	
NO.8	0.0516	0.0511	0.0517	
NO.9	0.0485	0.0494	0.0506	
NO.10	0.0517	0.0507	0.0517	

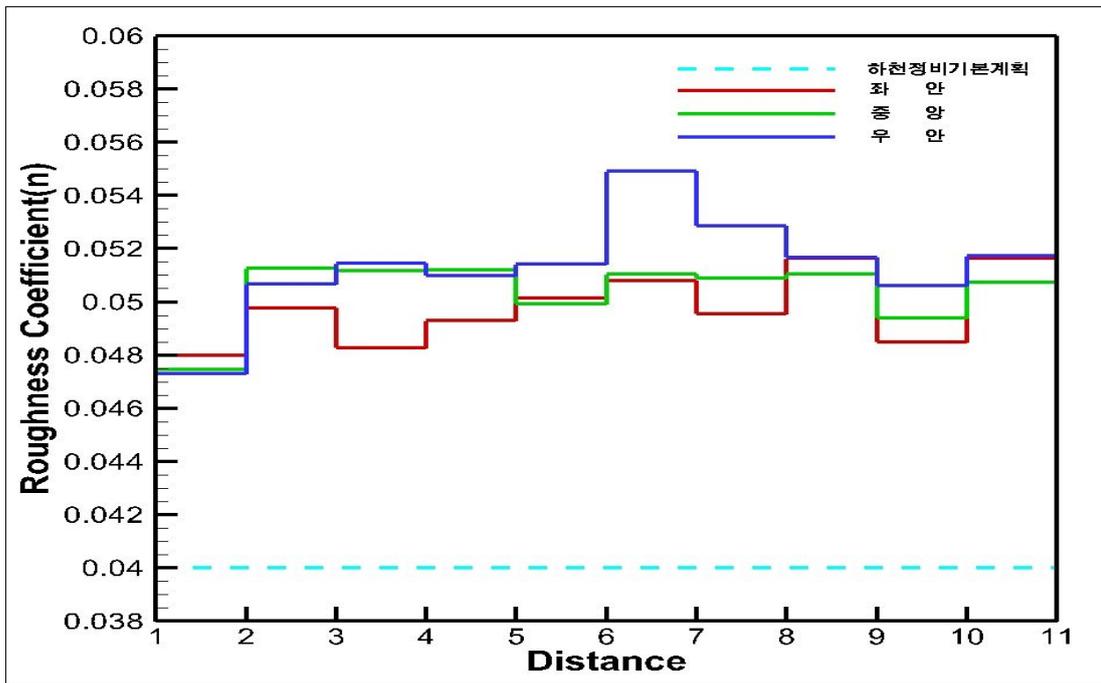


Fig. VI-5. Roughness coefficient for each section using Strickler(1923) equation

Table VI-3. Roughness coefficient for each section using Garde and Raju(1978) equation

구 간	좌 안	중 앙	우 안	비 고
NO.1	0.0398	0.0394	0.0393	하천정비기본계획 0.04
NO.2	0.0413	0.0425	0.0420	
NO.3	0.0400	0.0425	0.0427	
NO.4	0.0409	0.0425	0.0423	
NO.5	0.0416	0.0414	0.0427	
NO.6	0.0422	0.0424	0.0456	
NO.7	0.0411	0.0422	0.0439	
NO.8	0.0429	0.0424	0.0429	
NO.9	0.0402	0.0410	0.0420	
NO.10	0.0429	0.0421	0.0429	

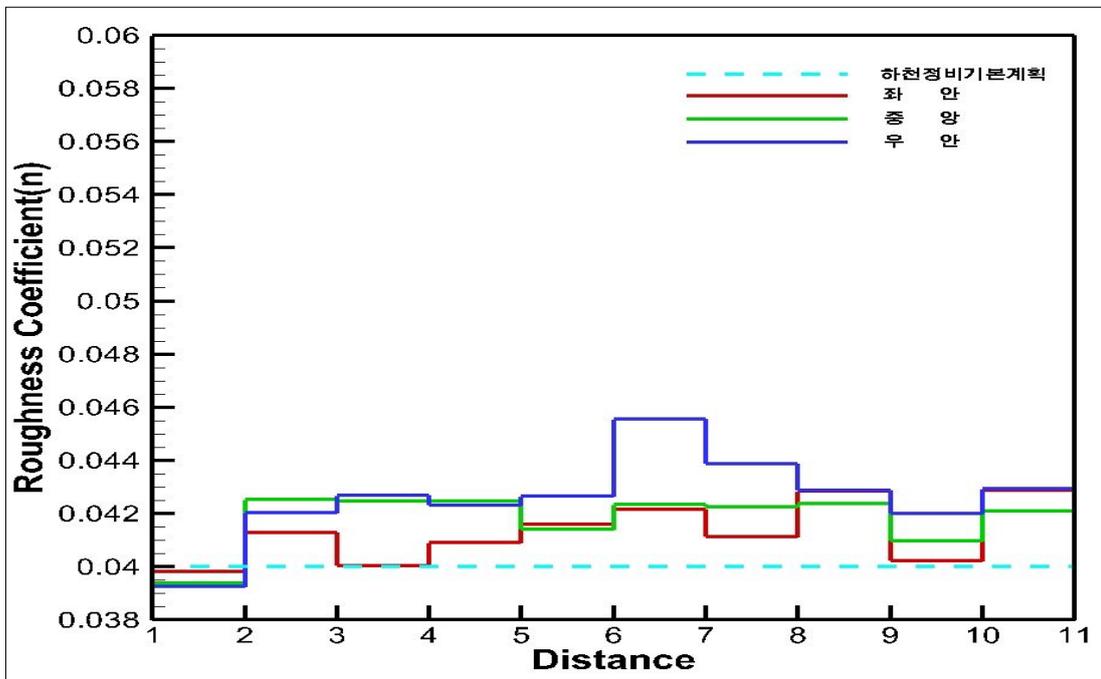


Fig. VI-6. Roughness coefficient for each section using Garde and Raju(1978) equation

Table VI-4. Roughness coefficient for each section using Lane과 Carlson(1953) equation

구 간	좌 안	중 앙	우 안	비 고
NO.1	0.0424	0.0414	0.0412	하천정비기본계획 0.04
NO.2	0.0439	0.0444	0.0436	
NO.3	0.0419	0.0446	0.0441	
NO.4	0.0426	0.0444	0.0438	
NO.5	0.0435	0.0440	0.0439	
NO.6	0.0453	0.0454	0.0483	
NO.7	0.0443	0.0454	0.0478	
NO.8	0.0469	0.0451	0.0475	
NO.9	0.0447	0.0454	0.0455	
NO.10	0.0473	0.0451	0.0481	

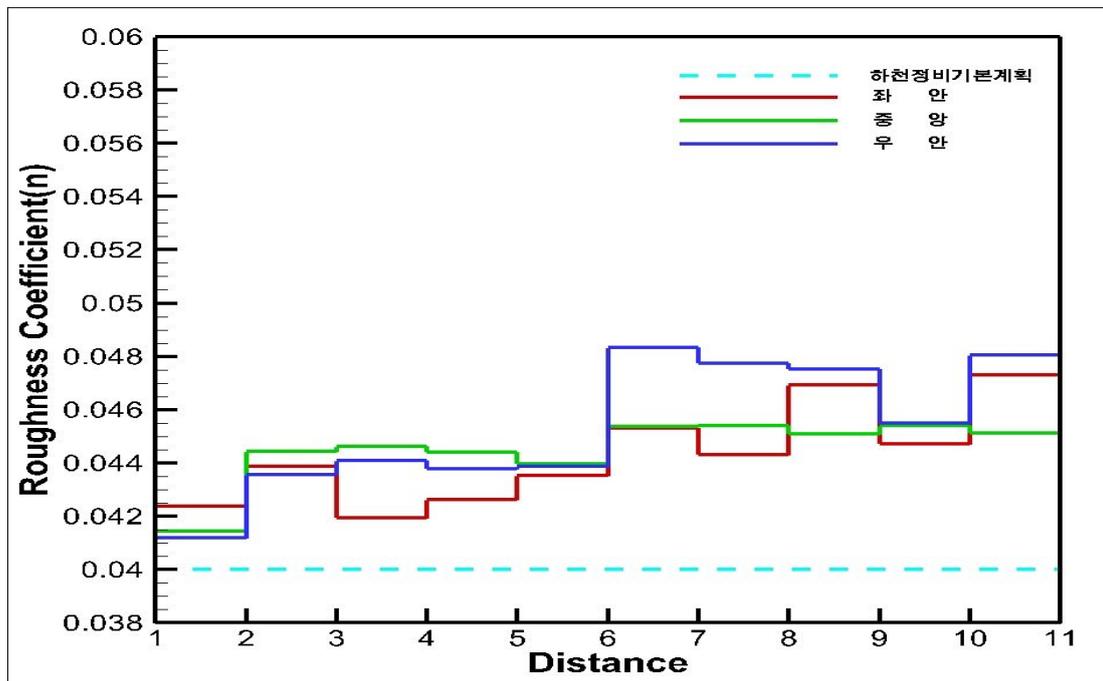


Fig. VI-7. Roughness coefficient for each section using Lane과 Carlson(1953) equation

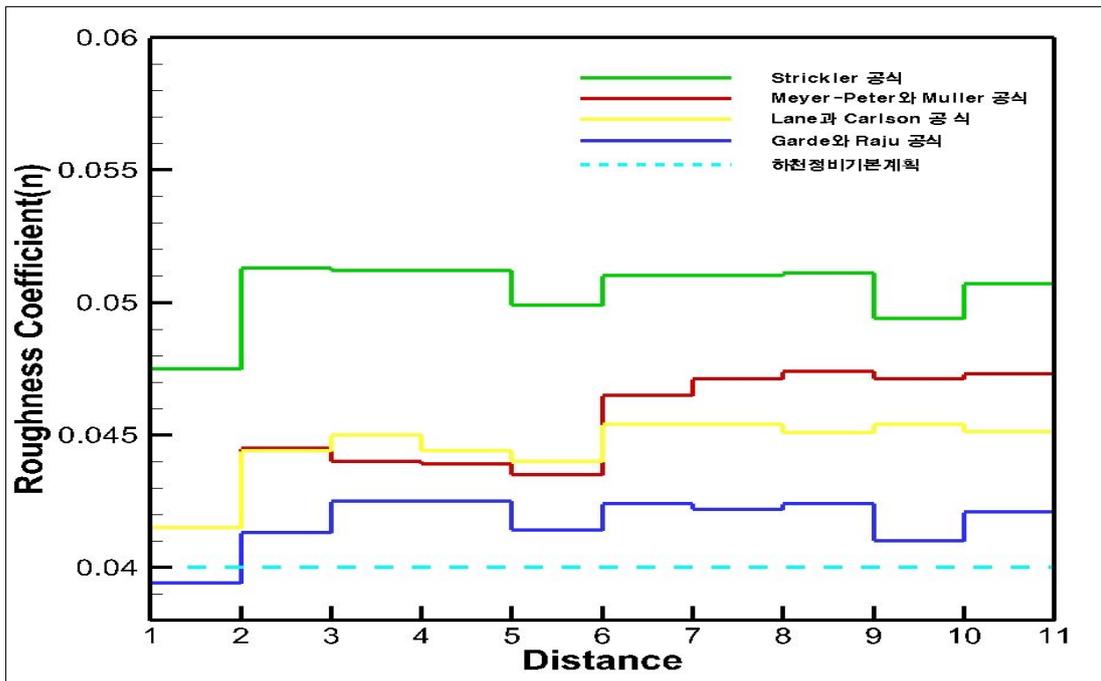


Fig. VI-8. Roughness coefficient for each section using empirical formula

하천의 하상재료를 이용하여 Strickler의 Manning의  $n$ 값과 하상재료 사이에 1/6승의 관계식을 Meyer-Peter와 Muller(1948)식, Garde와 Raju(1978)식, Lane과 Carlson(1953)식 그리고 Strickler(1923)식에 적용하여 비교하였으며, 조도계수의 비교는 하천의 중앙 단면 조도계수 값을 비교하여 RMS 오차를 계산하였다.

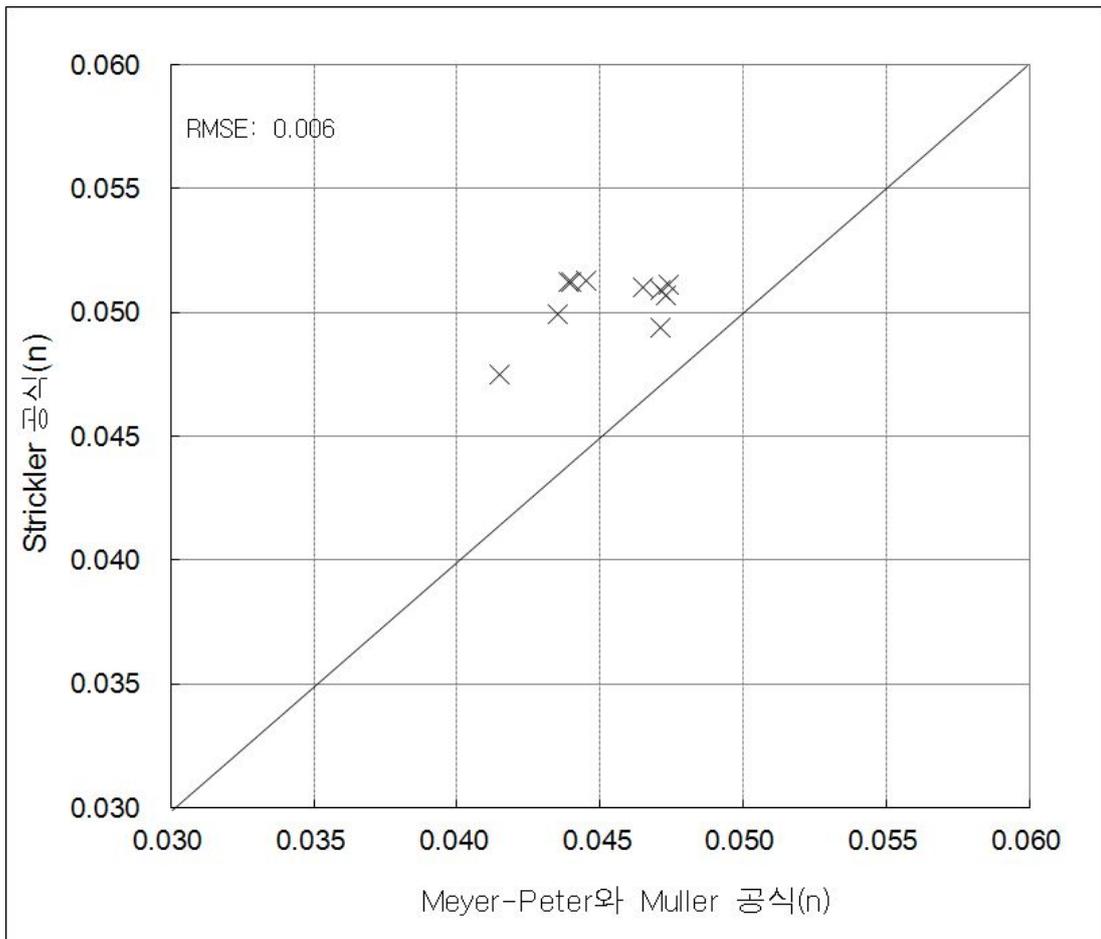


Fig. VI-9. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and Strickler(1923) equation

Strickler(1923)의 Manning의  $n$ 값과 하상재료 사이에 1/6승의 관계를 관련된 식과 Meyer-Peter와 Muller(1948)식의 RMS 오차분석 결과 RMSE는 0.006으로 나타났으며, 경험식 중 가장 큰 값을 보였다.

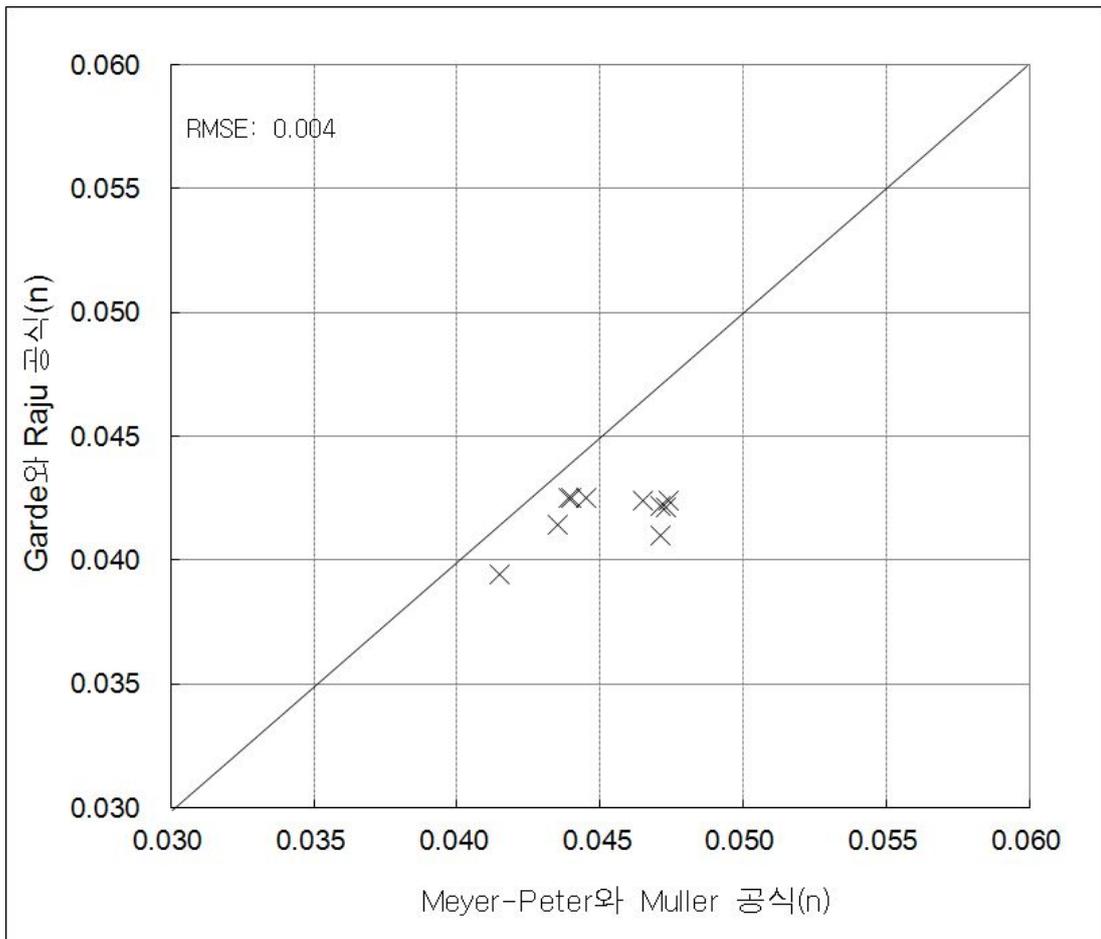


Fig. VI-10. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and Garde and Raju(1978) equation

Garde와 Raju(1978) 식과 Meyer-Peter와 Muller(1948)식의 RMS 오차분석 결과 RMSE는 0.004으로 나타났다. Garde와 Raju(1978) 식은 다양한 흐름과 다양한 하천의 특성에 맞게 된 식으로써 본 연구의 하천의 자갈하천의 특성을 제대로 반영하지 못하였으며, Garde와 Raju(1978) 식은 하천정비기본계획에 제시된 조도계수 값과 비슷한 값이 도출되었다.

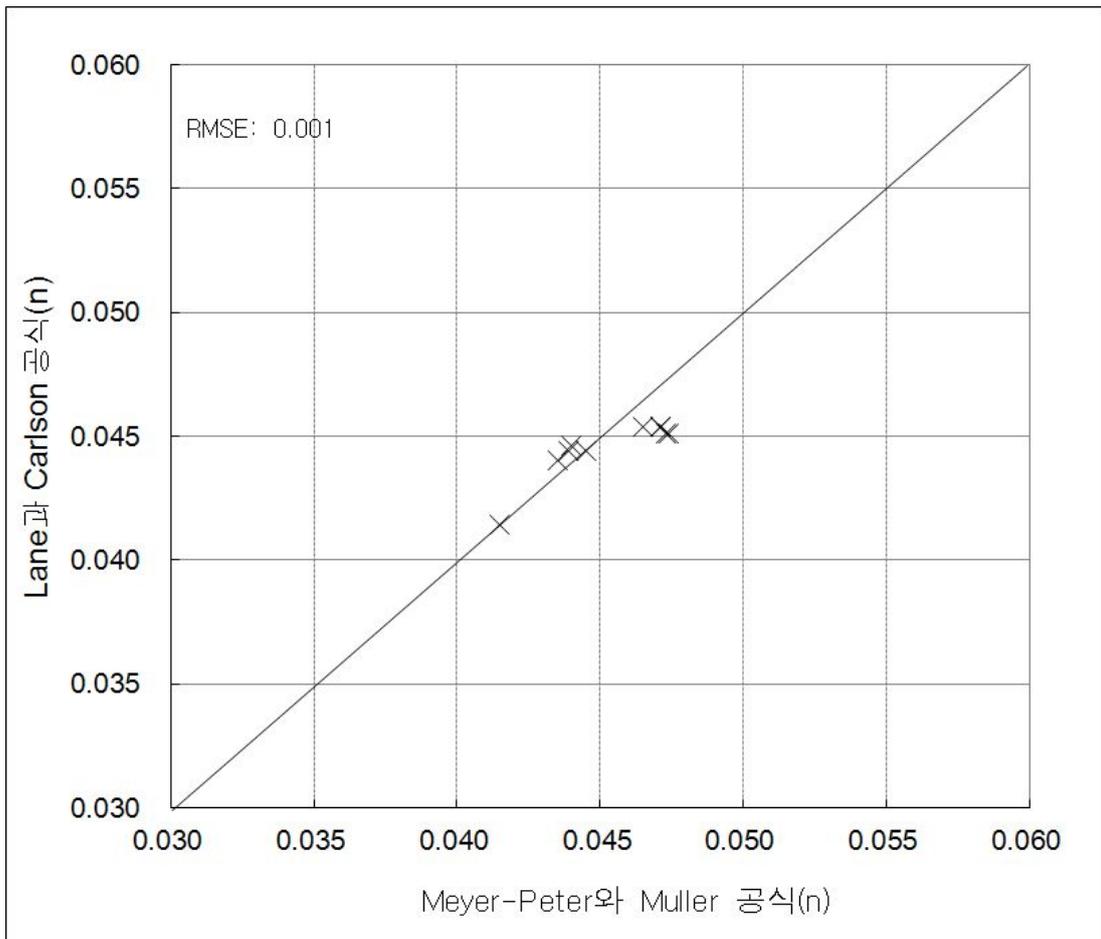


Fig. VI-11. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and Lane and Carlson(1953) equation

Lane과 Carlson(1953)식과 Meyer-Peter와 Muller(1948)식의 RMS 오차분석 결과 RMSE는 0.001으로 나타나 조도계수가 매우 정확하게 산정되었다.

Lane과 Carlson(1953) 식은 자갈하천과 자갈로 구성된 운하를 포함한 현장시험으로부터 얻은 경험식이므로 Meyer-Peter와 Muller(1948)식과 매우 유사한 조도계수 값을 도출할 수가 있었다.

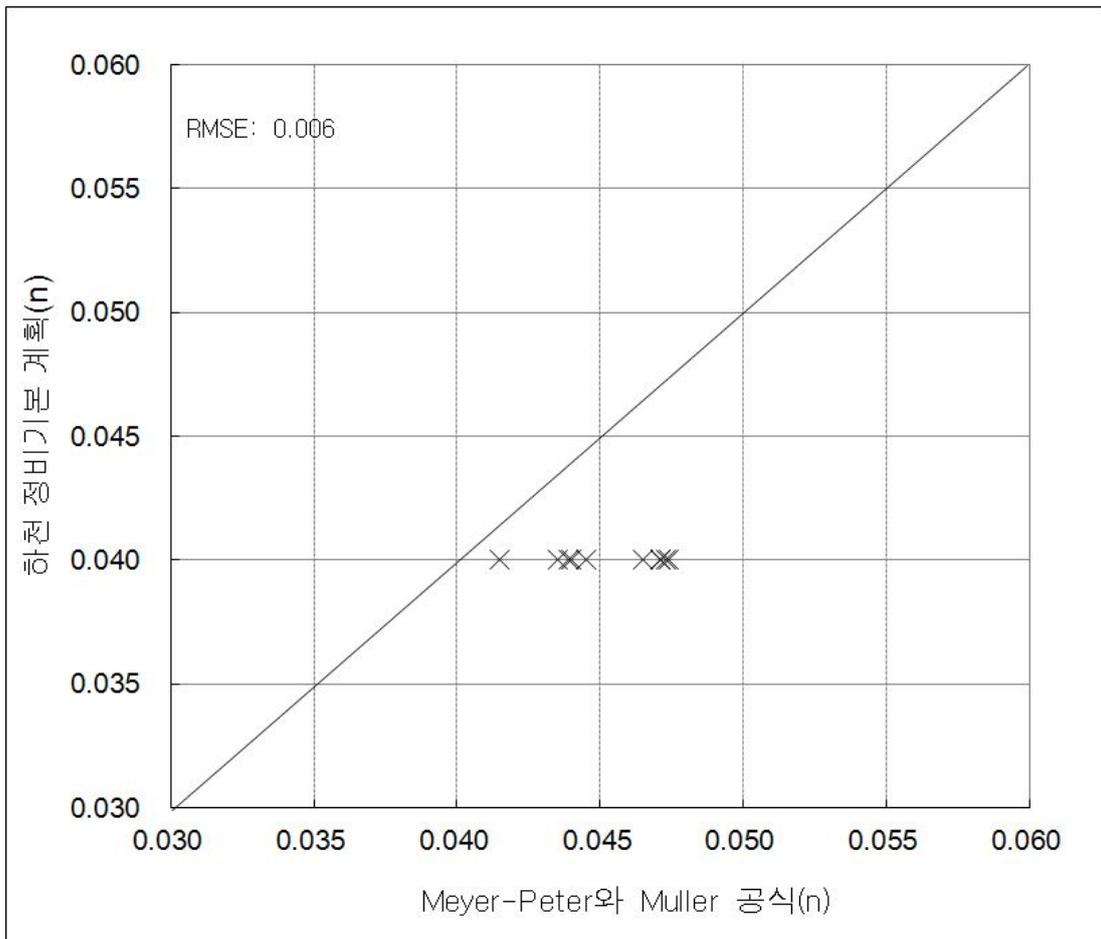


Fig. VI-12. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and planning report for river improvement

하천의 하상재료를 이용하여 Strickler의 Manning의  $n$ 값과 하상재료 사이에 1/6승의 관계를 관련된 식인 Meyer-Peter와 Muller(1948)식, Garde와 Raju(1978)식, Lane과 Carlson(1953)식 그리고 Strickler(1923)식을 적용하여 비교하였다.

조도계수 비교는 하천의 중앙 단면 조도계수 값을 비교하여 RMS 오차를 계산하였으며, Garde와 Raju(1978)식의 RMSE는 0.04, Strickler(1923)식의 RMSE는 하천정비기본계획의 제시한 조도계수 값과 같은 0.06으로 나타났다.

Lane과 Carlson(1953) 식은 자갈하천에 잘 반영된 경험식이므로써 RMSE는 0.01으로 매우 비슷한 값을 얻을 수가 있었다.

Table VI-5. Analysis on RMS error of Meyer-Peter and Muller(1948) and empirical formula

구 분	대표입경	공 식	RMSE
Meyer-Peter와 Muller(1948)	D90	$n = 0.038d_{90}^{1/6}$	-
Strickler(1923)	D50	$n = 0.047d^{1/6}$	0.006
Garde와 Raju(1978)	D50	$n = 0.039d_{50}^{1/6}$	0.004
Lane과 Carlson(1953)	D75	$n = 0.026d_{75}^{1/6}$	0.001
하천정비기본계획	-	도표로 의한 방법	0.006

## VII. 결 론

제주도 한천의 하도특성을 반영한 대표입경을 현장에서 측정한 결과를 토대로 조도계수를 산정하고 적용성을 검토하였다. 조도의 현장조사 및 하상 재료를 채취하고, 채취한 하상재료를 입도분석하고 대표입경을 기존의 조도계수 경험식으로부터 조도계수를 산정한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 한천의 실제 현장답사 실시하여 하천 고도별 하상재료가 상의하고 상류부로 올라갈수록 하상재료의 입경이 커지고 있었다. 한천의 하상재료를 채취하여 입경을 이용한 입도분포곡선을 작성하고 경험식에 의한 구간별 조도계수값은 상류 0.0417, 중류부 0.0432, 하류부 0.0493로 산정되었다.

2. 산정된 조도계수와 타 경험식을 이용한 조도계수의 산정 오차범위를 비교·분석한 결과, Strickler(1923)식은 0.006으로 보다 높게, 하천정비기본계획은 낮게 나타났고, Garde와 Raju(1978)식은 0.004, Lane과 Carlson(1953)식과 Meyer-Peter와 Muller(1948)식의 0.001으로 보다 높게 나타났다.

3. Garde와 Raju(1978)식은 다양한 흐름과 다양한 하천의 특성에 적용된 식이므로 한천의 자갈하천 특성을 제대로 반영하지 못하였으며, Lane과 Carlson(1953)식은 자갈하천과 자갈로 구성된 운하를 포함한 현장시험으로부터 얻은 경험식으로서 Meyer-Peter와 Muller(1948)식과 매우 유사한 조도계수 값을 도출할 수가 있었다.

5. 하천의 홍수량 산정시 정확한 조도계수의 값은 하천 하류부의 제방파괴, 홍수범람 등으로 부터 재산피해를 방지하는데 매우 중요하며, 매우 복합적인 요소들에 의해 결정이 되며, 조도계수는 시·공간적으로 따라 달라지는 인자이므로 지속적인 조도계수를 관리해 나가야 할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 부정류 모형인 HEC-RAS을 이용한 조도계수를 산정하여 보다 정밀한 조도계수를 산정을 할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 건설교통부 (2001), 지방2급하천정비기본계획 보고서. pp.
- 김지성, 이찬주, 김원 (2007), 실측 수위에 의한 자갈하천의 조도계수 산정.
- 김지성, 이찬주, 김원 (2007), 현장실측에 의한 조도계수 산정의 불확실도 평가.
- 김지성, 이찬주, 김원 (2007), 자갈하천의 유량에 따른 조도계수 특성
- 김미령 (2003), 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 석사학위논문
- 김주영, 김한섭, 이정규 (2011), 실측 자료를 이용한 국내하천의 조도계수 특성검토, 한국수자원학회 논문집, pp. 695~710
- 박현진 (2010), 수리학적 방법과 하상 입경을 이용한 하천의 조도계수 산정 연구, 한양대학교 학위논문.
- 이신재, 박상우, 장석환, 오경두, 전병호 (2005), 하천 조도계수 산정의 불확실성에 관한 연구, 한국수자원학회 05 학술발표회 논문집, pp. 329-333.
- 이신재, 박상우 (2006), 수위-유량자료가 부재한 자갈하천의 조도계수 산정에 관한 연구, 한국수자원학회 06 학술발표회 논문집, pp. 985-996.
- 이찬주, 김원, 김지성 (2009), 국내외 조도계수 산정 현황과 국내 하천에서 실측에 의한 조도계수 산정 사례, 대한토목학회 09 대한토목학회논문집, pp. 62-71
- 정우진 (2007), 대표입경을 이용한 조도계수 산정에 관한 연구, 경희대학교 석사학위논문.
- Barnes, H.H., Jr., (1967). Roughness characteristics of natural channels, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339.
- Chow, V. T., (1959), "Open-channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., New York.
- Fread, D.L (1974). Numerical Properties of Implicit Four-Point Finite Difference Equations of Unsteady Flow. HRL-45, NOAA Tech. Memo NWS HYDRO-18, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service.

- Fread, D.L, and Smith, G.F (1978). Galibration technique for 1-D unsteady flow models. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 104, NO. 7, pp.1027-1043.
- Garde, R. J., and Ranga Raju, K. G. (1978). Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems, Wiley Eastern, New Delhi.
- Henderson, F.M. (1966). Open channel flow. Macmillan, London
- Lane, E. W., and Carlson, E. J., (1953) Some factors affecting the stability of cannaiss constructed in coarse granu-lar materials, proc Minnesota, Intern., Hydraulic Conv., IAHR, pp. 37-48
- Meyer-Peter, and Muller R., (1948) Formulas for Bed-Load Transport., Proceedings of the 3rd Meeting of IAHR Stockholm, pp. 39-64
- Raukivi (1976). Loose Boundary Hydraulics, Pergamon Press, New York.
- Stickler, A. (1923). Beitrage und Frage der Geschwindigheits - Formel und der Rauhigkeitszahlen fur Strome, Kanale und Geschlossene Leitungen. (Some contributions to the question of a velocity formula and roughness data for streams, canals and cloesd conduits). Mitteilungen des Eidgenossischer Amtes fur Wasserwirtschaft, Bern, Switzerland, No. 16g