

1. HEC-2 모형 소개

HEC-2 는 1970년대 미국 Hydrologic Engineering Center 에서 개발되어 거듭 그 성능과 기능이 보강되어지고 있는 수면곡선 계산을 위한 프로그램이다. 이 프로그램은 자연하천이나 인공하천에서의 흐름이 정상류(steady flow) 이면서 점변화류(gradually varied flow)일 경우의 수면곡선을 계산한다. 계산방법은 1차원 에너지 방정식을 표준축차법(standard step)으로 해석하는 절차를 따르고 있다. 이 프로그램은 홍수터(flood plain) 관리와 홍수로에 대한 하도잠식(encroachment) 등을 평가할 수 있는 기능이 있기 때문에 홍수방재(flood insurance) 연구에 탁월한 역할을 할 수 있다. 그리고 하천개수(channel improvment) 에 의한 수면곡선의 변화, 다리 등 수리구조물의 존재에 의한 수면곡선의 영향 등을 평가할 수 있는 기능이 있다.

HEC-2 프로그램의 주목적은 주어진 자료를 바탕으로 임의 지점의 수위를 파악하는데 있으며 이를 위한 자료로는 하상자료, 계산시작점의 수위, 유량, 손실계수, 단면자료와 하천길이 등이 필요하다. HEC-2는 한번 실행으로 다양한 수리계산이 가능한 우수한 프로그램이지만 기본적인 운영은 비교적 용이하다. 그리고 특수한 option들이 다수 제공되어지고 있으며 좀더 전문적인 운영을 위해서는 사용자 설명서를 참고하면 된다.

2. HEC-2 의 기본이론과 공식

HEC-2 에서는 흐름의 상류조건을 만족하는 다음의 두식을 반복적으로 해석하는 방법을 채택하고 있다.

$$WS_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2 g} = WS_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2 g} + h_e$$

$$h_e = L S_f + C \left(\frac{a_2 V_2^2}{2 g} - \frac{a_1 V_1^2}{2 g} \right)$$

여기서 아랫첨자 1 = 하류부

아랫첨자 2 = 상류부

WS = 수위

V = 평균유속

a = 유속보정계수

g = 중력가속도

h_e = 에너지손실

L = 하도길이

S_f = 마찰경사

C = 확장 혹은 수축계수

식에서 요구하는 마찰경사는 다음식을 이용한다.

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)$$

여기서 K_1 와 K_2 는 통수능을 의미하며 Manning 식으로부터 구한다.

$$K = \frac{1.49}{n} A R^{2/3} \quad (\text{U.S. metric})$$

한 단면의 통수능은 좌측(상류측에서 하류측을 바라볼때의 좌측을 의미하며 이후도 본 정의를 사용함) overbank, 우측 overbank 그리고 하도에서의 통수능의 합을 의미한다. 또한 속도보정계수 α 는 다음 식으로부터 얻어진다.

$$\alpha = \left(\frac{A_T^2}{K_T^3} \right) \left(\frac{K_{LOB}^3}{A_{LOB}^2} + \frac{K_{CH}^3}{A_{CH}^2} + \frac{K_{ROB}^3}{A_{ROB}^2} \right)$$

여기서 아랫첨자 T = 전체단면(total section)

LOB = 좌측 overbank

CH = 하도

ROB = 우측 overbank

위의 식들은 다음의 가정들을 암시적으로 내포하고 있다.

- ① 흐름은 정상류이다.
- ② 흐름은 점변화류이다.
- ③ 1차원 흐름이다.
- ④ 바닥경사는 완만하다. (1:10 이내)

3. 자료입력

HEC-2 를 통하여 하나의 단면에 대한 수리계산(예를들면 등류수심, 한계수심계산 등)으로부터 800개 단면에 대한 18개의 종단면수면곡선(profile)을 얻을 수 있다. 그리고 모델링되는 대상의 물리적 특성이나 상황에 따라서 특별한 option 들이 사용되기도 한다. 입력되는 데이터 형식은 27가지가 있으며 각각은 특정 line 의 특정 field 에 지정되어 있다. HEC-2 프로그램의 입력화일의 형식은 각 8칸으로 구성되는 10개의 field로 이루어진다. (그림3.1)

(그림 3.1) 입력화일의 표준양식

10.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8.....9.....10

각 입력변수는 각 field 에 기입하면되나 첫번째 field 는 예외이다. 첫번째 field 의 처음 두 칸은 line Identification 문자(예를들면 T1, J1, X1 등)를 기입하게 되며 나머지 6칸이 변수값을 위한 공간이 된다. 변수값들은 field 의 오른쪽에 정렬되도록하며 빈 field 는 0의 값으로 해석된다. 데이터 line 은 (표3.1)에서 분류한 6가지 영역으로 분리된다.

(표3.1) 데이터 field 분류

① Documentation lines	T1-T3	설명문
	AC	설명문
	C	설명문
② Change lines	NC	시작점의 Manning n
	NH	Manning n 의 수평분포
	NV	Manning n 의 연직분포
	QT	유량자료

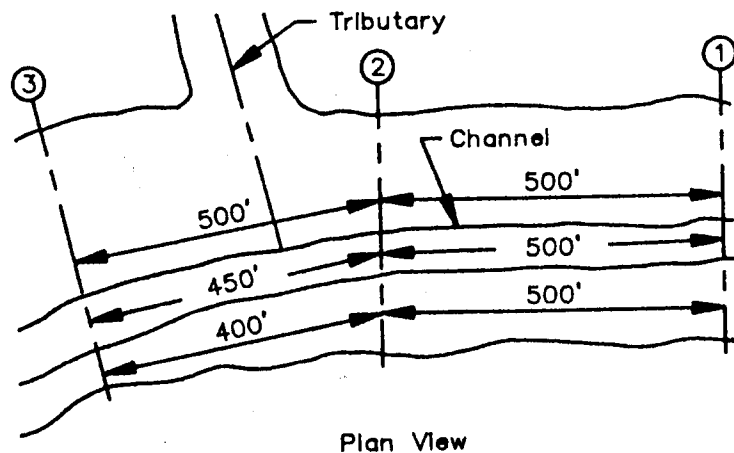
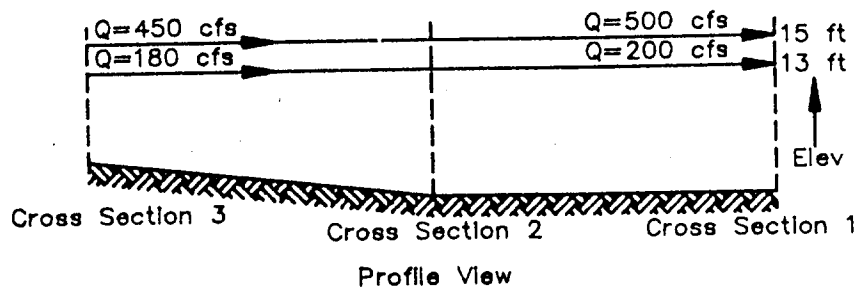
③ Bridge lines	ET	하도잠식
	CI	하도개선
	IC	빙자료
	SB	special bridge
	BT	다리위치 좌표
④ Job control lines	J1	시작지점조건
	JR	시작점의 수위-유량 관계
	JS	분지흐름
	J2-J6	option
	EJ	작업종료
	ER	실행종료
⑤ Cross section lines	X1	단면설정
	RC	수위-유량관계
	X2-X5	option
	GR	하도좌표
	⑥ Split flow lines	SF
JC		계산이름
JP		계산인자
TW		웨어위치
WS		웨어인자
WC		웨어규격
TN		등류수심위치지정
NS		등류수심
NG		지표좌표
TC		수위-유량관계 위치
CR		수위-유량관계
EE		분지흐름 입력종료

Documentation line 은 하천의 이름, 대상구역, 자료출처 등 자료정보를 기술하기 위한 용도로 사용되며 Job control line 은 데이터 처리를 지정하거

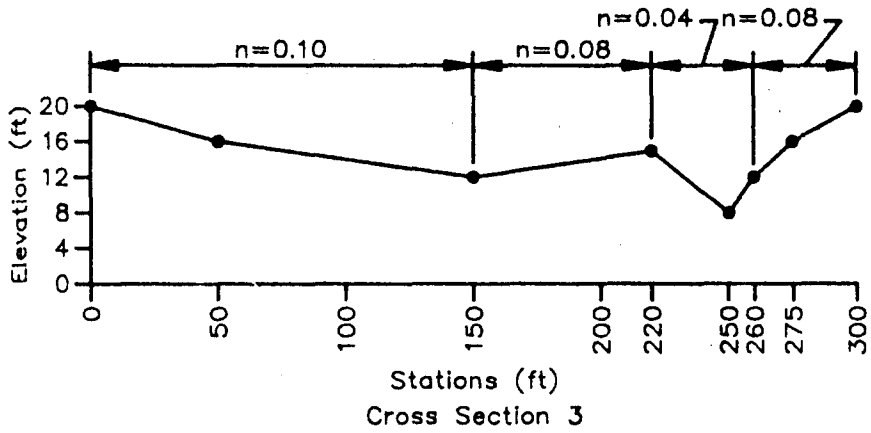
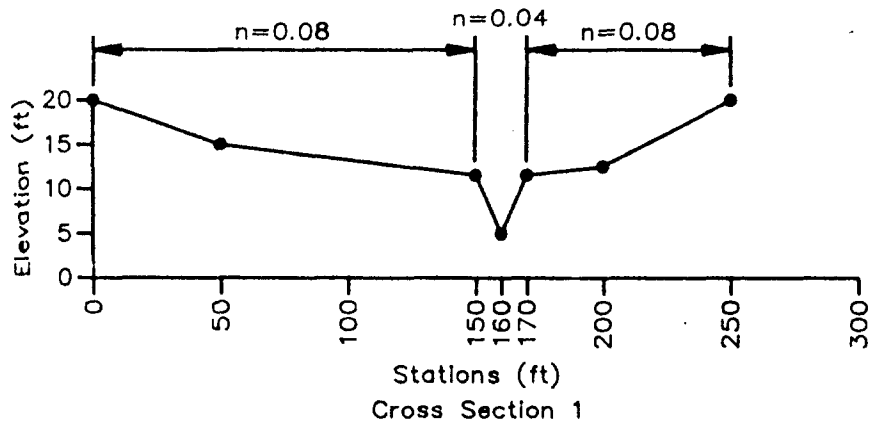
나 출력양식을 조정하고 계산방법을 선택하거나, 수행의 마무리를 지정하는 용도로 사용된다. Change line 은 Manning 의 n 값, 유량, 하도잠식의 조건 등을 초기에 지정하거나, 변경할 때 이용한다. Cross section line 은 하천의 단면에 대한 좌표 등 지형을 지정하는 용도로 사용된다. Bridge and Split flow option line 은 다리 해석 등의 option 을 지정할 경우에 이용된다.

(예제 3.1) HEC-2 입력화일 구성

(그림3.2)과 같은 하도의 두가지 유량조건에 대한 수면곡선을 얻고자한다. 시작점의 수위가 13ft일때의 유량을 200ft³/s라 하고 시작점의 수위가 15ft일때의 유량을 500ft³/s라 하여 이로부터 얻을 수 있는 수면곡선 2가지를 동시에 구하시오. 각 단면의 자료는 (그림3.3)에 수록하였음.



(그림 3.2) 하도의 개략도



NOTE: Cross section 2 was not surveyed. Assume that it is 10% wider and 0.4 ft. higher than cross section 1, based on information from U.S.G.S. topographic map.

(그림 3.3) 3개의 단면자료

4. 출력지정과 해석

출력해석은 모델링과정과 과업평가에 있어서 가장 중요한 부분중의 하나이다. 출력결과를 통해 만족할만한 결과를 얻을 때 까지 입력인자를 재조정하는 과정이 필요한데 이는 출력해석을 통해 이루어진다. 이와같은 출력해석을 위하여 HEC-2 의 출력을 다양한 양식으로 얻을 필요가 있다. 이를 지정하기 위해서 control option 선택이 필요하다. 이와같은 control option 을 (표4.1)에 수록하였다.

(표 4.1) 출력제어 Option

Output	Control (lines)
Commentary	C
Input Data Listing*	J1.1
Detailed Output by Cross Section*	J5
Flow Distribution	J2.10, X2.10
Traces	J2.10, X2.10
Summary Tables*	J2.1, J3, J5

HEC-2 의 출력양식지정은 크게 standard output 과 optional output 의 두 가지로 나누어 지며 각 양식의 특징과 포함되는 내용은 다음과 같다.

* standard output

standard output 은 표제(banner), 입력데이터, 각 단면 수리인자의 상세한 출력, summary table, 수면곡선 등을 포함한다. 이들 항목중 표제를 제외한 항목은 사용자의 지정에 따라 생략될 수도 있다.

① 표제 : 출력화일의 서두에 위치하며 프로그램의 사양에 대한 정보를 수록하고 있다.

② output label : 각 profile 자료나 단면자료 앞에는 고유의 label 이 있는데 (예: *PROF1 혹은 *SCENO 1.000) 이것은 화일에서 찾고자하는 데이터의 위치를 쉽게 찾을 수 있도록 돕는다.

③ 단면출력자료 : 각 단면에서의 40개 변수에 대한 수리계산자료가 제공된다. 각 변수는 약자로 표기되어 있으며 이들 약자에 대한 정의를 (표4.2)에 수록하였다. 또한 빈번하게 special note 와 error message 가 프로그램에 의하여 만들어져서 단면출력자료에 포함되곤 하는데 이는 계산에 사용된 가정이나 option 등을 설명하거나 오류사항을 지적하기 위함이다. 예를 들어 3절의 예제의 첫번째 profile 에 대한 결과를 (그림4.1)에 수록하였다. 여기서 단면 1,000 의 note 에 포함된 "CCHV=.100 CEHV=.300" 은 NC

(표 4.2) 단면출력 자료

Variable	Description
ACH	Cross-section area of the channel.
ALOB	Cross-section area of the left overbank.
AROB	Cross-section area of the right overbank.
BANK ELEV LEFT/RIGHT	Left- and right-bank elevations.
CORAR	Area of the bridge deck subtracted from the total cross-section area in the normal-bridge method.
CRIWS	Critical water surface elevation.
CWSEL	Computed water surface elevation.
DEPTH	Depth of flow.
EG	Energy gradient elevation for a cross section which is equal to the computed water surface elevation CWSEL plus the velocity head HV.
ELMIN	Minimum elevation in the cross section.
ENDST	Ending station where the water surface intersects the ground on the right side.
HL	Energy loss due to friction.
HV	Discharge-weighted velocity head for a cross section.
ICONT	Number of trials to determine the water surface elevation by the slope-area method, or the number of trials to balance the energy gradient by the special-bridge method, or the number of trials required to calculate encroachment stations by encroachment methods 5 and 6.
IDC	Number of trials required to determine critical depth.
ITRIAL	Number of trials required to balance the assumed and computed water surface elevations.
OLOSS	Energy loss due to minor losses such as transition losses.

Q	Total flow in the cross section.
QCH	Amount of flow in the channel.
QLOB	Amount of flow in the left overbank.
QROB	Amount of flow in the right overbank.
SECNO	Identifying cross-section number. Equal to the number in the first field of the X1 line.
SLOPE	Slope of the energy grade line for the current section.
SSTA	Starting station where the water surface intersects the ground.
TIME	Travel time in hours from the first cross section to the current cross section.
TOPWID	Width at the calculated water surface elevation.
TWA	Cumulative surface area (acres or thousands of square meters) of the stream from the first cross section.
VCH	Mean velocity in the channel.
VLOB	Mean velocity in the left overbank.
VOL	Cumulative volume (acre-feet or thousands of cubic meters) of water in the stream from the first cross section.
VROB	Mean velocity in the right overbank.
WSELK	Known water surface elevation; for example, a high-water mark.
WTN	Length-weighted value of Manning's n for the channel. Used when computing Manning's n from high-water marks.
XLCH	Distance in the channel between the previous cross section and the current cross section.
XLOBL	Distance in the left overbank between the previous cross section and the current cross section.
XLOBR	Distance in the right overbank between the previous cross section and the current cross section.
XNCH	Manning's n for the channel area.
XNL	Manning's n for the left overbank area.
XNR	Manning's n for the right overbank area.

SECNO	DEPTH	CWSEL	CRWS	WSELK	EG	HV	HL	OLOSS	BANK ELEV
Q	QLOB	QCH	QROB	ALOB	ACH	AROB	VOL	TWA	LEFT/RIGHT
TIME	VLOB	VCH	VROB	XNL	XNCH	XNR	WTN	ELMIN	SSTA
SLOPE	XLOBL	XLCH	XLOBR	ITRIAL	IDC	ICONT	CORAR	TOPWID	ENDST

*PROF 1

CCHV- .100 CEHV- .300

*SECNO 1.000

1.00	8.00	13.00	.00	13.00	13.07	.07	.00	.00	12.00
200.	5.	194.	1.	17.	90.	5.	0.	0.	12.00
.00	.28	2.15	.28	.080	.040	.080	.000	5.00	116.67
.000590	0.	0.	0.	0	0	0	.00	63.33	180.00

*SECNO 2.000

2.00	7.88	13.28	.00	.00	13.35	.06	.28	.00	12.40
200.	4.	195.	1.	15.	97.	4.	1.	1.	12.40
.07	.25	2.02	.25	.080	.040	.080	.000	5.40	132.38
.000517	500.	500.	500.	1	0	0	.00	64.40	196.79

1490 NH CARD USED

*SECNO 3.000

3495 OVERBANK AREA ASSUMED NON-EFFECTIVE, ELLEA- 16.00 ELREA- 12.00

3.00	5.55	13.55	.00	.00	13.61	.06	.26	.00	16.00
180.	0.	178.	2.	0.	93.	4.	2.	1.	12.00
.14	.00	1.92	.39	.080	.040	.080	.000	8.00	229.22
.000649	500.	450.	400.	1	0	0	.00	36.56	265.78

(그림 4.1) 3장 예제 출력결과

line에서 지정한 수축과 확장계수 값을 의미하고 단면 3.000 에 위치한 “1490”과 “3495”라는 note 는 NH line 과 effective-area option 이 사용되었음을 보여준다.

④ special note : 단면출력자료 곳곳에 special note 가 있을 수 있는데 이는 계산을 위한 가정과 사용된 option 에 대한 정보를 수록하고 있다. 이와같은 special note 의 내용을 확인하려면 사용자설명서의 “Special Note Listing” 부분을 참고하면된다. 간혹 많은 수의 note 는 입력자료의 수정을 요구하는 의미로 파악하기도 한다.

⑤ profile plot : 5개 이상의 단면 자료가 입력되는 경우 출력화일에서 profile plot 를 발견할 수 있다. 여기에는 수면곡선외에도 한계수심, 에너지선, 하천최저부(invert), 좌우제방 등이 도시된다.

⑥ summary table : multiple profile 을 수행할 때 제공된다. 하지만 한 개의 profile 을 수행할 경우에도 J2 line 의 첫번째 field에 -1를 기입하면 이 table 을 얻을 수 있다.

* optional output

유량분포(flow distribution) 나 계산추적(computational trace) 등과같은 부가적인 출력내용을 얻기 위하여 별도의 option 이 이용되기도 한다.

① 유량분포 : 이 option이 지정되면 단면의 횡방향에 대한 면적, 유속, 유량의 백분율분포 등이 출력된다.

② 계산추적 : 이 option 은 주요변수(key variable)의 값을 계산순서대로 출력시켜서 수행을 검토하거나 오류를 찾아낼 경우에 도움을 준다. 두 단계의 추적이 가능한데 이들 중 부추적(minor trace)은 단면보간된 ~~자점의~~ 출력, Manning 의 n, 계산수위, 한계수심 등을 추적한다. 주추적(major trace)은 minor trace 의 결과에 부가하여 각 단면의 부분면(subdivision)에서의 수리인자 등을 추적한다.

③ 표와 그림 : 예약지정된 표 option 은 (표4.3)과 같다. 이외에 사용자 지정도 가능한데 이는 사용자설명서를 참고하면 된다.

(표 4.3) 예약정의된 요약표

Code	Table
100	Cross-section output at bridges (special bridge only)
105	Four-cross-section output at bridges (special bridge only)
110	Encroachment data
120	Channel improvement data
150	Standard summary (two tables produced)
200	Floodway data
201	Flood insurance zone data

5. 출력해석(Output Analysis)

프로그램 자체의 오류를 제외하고는 출력의 질은 전적으로 입력자료의 질에 좌우된다. 따라서 입력자료의 검토 및 조정에 대한 검토는 모형개발이나 사업평가 등에 있어서 중요한 과제가 된다.

오류를 발생시킬 가능성이 있는 주요변수를 검토하기 위하여 summary table 과 단면출력자료를 이용하는 것이 바람직하다. 계산수심, 수면폭, 유속, 에너지경사, 유량분포, 통수능비율(conveyance ratio) 등과 같은 주요변수들은 단면 단면 비교할 필요가 있다. 이들 값의 극단적인 변화는 입력자료에 문제점이 있음을 나타내기도 하기 때문이다. 이들 주요인자의 오류원인과 대책을 다음에 요약 하였다.

- ① 계산수심 : 근거가 없이 계산수심이 큰 폭으로 변화하면 이는 명백한 오류의 표시이다. 계산수심은 계산과정의 마지막 결과물이기 때문에 다른 부분의 오류로부터 발생하여 전달되었을 가능성이 크다. 다른 변수와 입력자료를 재검토하여 문제의 근원을 찾아내도록 한다.
- ② 수면폭(top width) : 이것의 극단적인 변화는 GR point 로 정의된 단면 지형자료 입력에 문제점이 있음을 보여준다. 측량자료와, 지도 그리고 단면출력결과를 바탕으로 검토한다.
- ③ 유속 : 단면사이의 급격한 유속변화는 단면 지형이 적절히 정의되어 있지 않거나 마찰손실 혹은 부차적에너지손실(minor energy loss)이 정확히 지정되어있지 않기 때문으로 발생할 수 있다.
- ④ 에너지선 : 단면사이의 에너지 경사가 클 경우는 에너지손실이 적절히 모델링되지 못했을 경우에 발생한다. 큰 에너지선의 경사는 통수능의 급격한 변화를 의미한다. 따라서 통수능 계산의 문제점을 검토한다. 긴 하도에서 이런 문제가 발생할 경우 단면 사이에 추가로 단면자료를 삽입한다.

일반적으로 30% 이상의 에너지 감소 혹은 40% 이상의 에너지 증가가 발생할 경우 단면 사이의 거리가 너무 멀리 있을 경우 발생하는 오류로 해석하기도 한다.

⑤ 유량 : 단면사이의 횡방향의 유량분포가 급격히 차이를 보일경우 단면입력자료의 검토가 필요하다.

⑥ 통수능 : 통수능을 출력하는 option(K_R option) 은 사용자가 지정해야한다. 이 값은 에너지선경사의 경우처럼 단면사이의 거리의 적절성을 확인하는데 사용한다. 일반적으로 K_R 의 범위가 $0.7 < K_R < 1.4$ 의 범위 밖에 있는 경우 추가 단면이 필요하다고 판단한다.

이 이외에도 다른 변수들의 검토는 필요하고 문제점이 파악되면 적절한 조정을 기한다. 비교적 빈번하게 발생하는 문제의 원인은 크게 다음 3가지로 요약할 수 있다.

① Manning 의 n 값은 토지사용자료와 항공사진, 실지조사 등을 통하여 얻는다. 이 값은 공간적으로 다르게 분포할 수도 있고 같은조건 하에서도 측정자에 따라서 대략 25%의 변화를 보이기도 한다. 이 점에 유의하여 입력자료의 검토를 시행한다.

② 확장 및 수축계수가 정확히 설정되어 있는지 살펴본다.

③ 굴곡진 단면에서의 단면설정 갯수가 적절한지 검토한다. 굴곡각도가 18° 이상일 경우 추가로 단면자료가 기존단면 사이에 새로 설정되어야 한다.

(예제5.1) 출력분석

(그림5.1)을 살펴보면 첫번째 수면곡선의 수면폭이 472ft, 468ft, 330ft, 382ft로 나타나있다. 이와같이 수면폭이 468ft에서 330ft로 변해가는 것이 과연 타당한 결과일까?

(예제5.2)

(그림5.2)는 단면출력을 나타낸 것이다. 여기서 흐름분포를 살펴보면 어떤 오류를 나타내고있을 가능성이 있다. 이를 설명하시오.

SUMMARY PRINTOUT TABLE 150

SECHO	XLCH	ELTRD	ELLC	ELMIN	Q	CMSEL	CRIMS	EG	10K*S	VCH	AREA	.01K
5150.000	.00	.00	.00	707.20	5600.00	722.30	.00	722.50	9.95	4.75	2524.75	1774.90
5150.000	.00	.00	.00	707.20	16000.00	729.88	720.57	730.09	7.95	5.71	7034.49	5675.10
5170.000	1200.00	.00	.00	707.40	5600.00	723.54	.00	723.76	10.95	5.18	2346.76	1692.50
5170.000	1200.00	.00	.00	707.40	16000.00	730.92	721.81	731.18	10.15	6.56	6123.60	5021.89
5192.000	425.00	.00	.00	706.60	5600.00	724.06	.00	724.18	11.24	4.40	2930.37	1670.18
5192.000	425.00	.00	.00	706.60	16000.00	731.40	721.87	731.52	7.80	5.13	7762.85	5730.55
5195.000	1825.00	.00	.00	707.65	5600.00	725.98	.00	726.08	9.65	4.26	3053.57	1802.63
5195.000	1825.00	.00	.00	707.65	16000.00	732.88	723.07	733.01	8.46	5.40	7360.14	5499.36

SUMMARY PRINTOUT TABLE 150

SECHO	Q	CMSEL	DIFWSP	DIFMSX	DIFKMS	TOPWID	XLCH
5150.000	5600.00	722.30	.00	.00	.00	381.65	.00
5150.000	16000.00	729.88	7.58	.00	-10.12	729.65	.00
5170.000	5600.00	723.54	.00	1.24	.00	329.71	1200.00
5170.000	16000.00	730.92	7.38	1.04	.00	598.16	1200.00
5192.000	5600.00	724.06	.00	.53	-7.34	467.98	425.00
5192.000	16000.00	731.40	7.34	.48	.00	766.75	425.00
5195.000	5600.00	725.98	.00	1.91	.00	472.13	1825.00
5195.000	16000.00	732.88	6.90	1.47	.00	704.84	1825.00

(그림 5.1) 예제 5.1을 위한 출력표

CCHV- .200 CEHV- .400
 *SECNO 5150.000

3265 DIVIDED FLOW

5150.00	15.10	722.30	.00	722.30	722.50	.20	.00	.00	713.20
5600.	2138.	2903.	559.	1514.	610.	401.	0.	0.	709.20
.00	1.41	4.75	1.40	.120	.055	.120	.000	707.20	191.15
.000995	0.	0.	0.	0	0	0	.00	381.65	593.75

*SECNO 5170.000

3265 DIVIDED FLOW

5170.00	16.14	723.54	.00	.00	723.76	.22	1.25	.01	713.40
5600.	2277.	2725.	599.	1426.	526.	395.	67.	10.	709.40
.10	1.60	5.18	1.51	.120	.055	.120	.000	707.40	146.15
.001095	1200.	1200.	1200.	2	0	0	.00	329.71	486.18

FLOW DISTRIBUTION FOR SECNO- 5170.00 CWSSEL- 723.54

STA-	146.	192.	252.	268.	372.	408.	432.	486.
PER Q-	4.1	3.1	3.1	30.4	48.7	8.0	2.6	
AREA-	189.8	171.6	114.2	950.2	525.7	243.3	152.0	
VEL-	1.2	1.0	1.5	1.8	5.2	1.9	1.0	

*SECNO 5192.000

USGS GAGE BISON CREEK AT LA PORTE

5192.00	17.46	724.06	.00	731.40	724.18	.12	.40	.02	709.70
5600.	1248.	1672.	2680.	676.	380.	1875.	88.	13.	717.70
.14	1.85	4.40	1.43	.120	.055	.120	.000	706.60	154.30
.001124	175.	425.	475.	2	0	0	.00	467.98	622.28

*SECNO 5195.000

5195.00	18.33	725.98	.00	.00	726.08	.11	1.90	.00	710.75
5600.	1213.	1587.	2800.	715.	372.	1966.	213.	33.	718.75
.36	1.70	4.26	1.42	.120	.055	.120	.000	707.65	109.83
.000965	1825.	1825.	1825.	2	0	0	.00	472.13	581.96

(그림 5.2) 예제 5.2를 위한 단면출력

6. 수면곡선 계산예

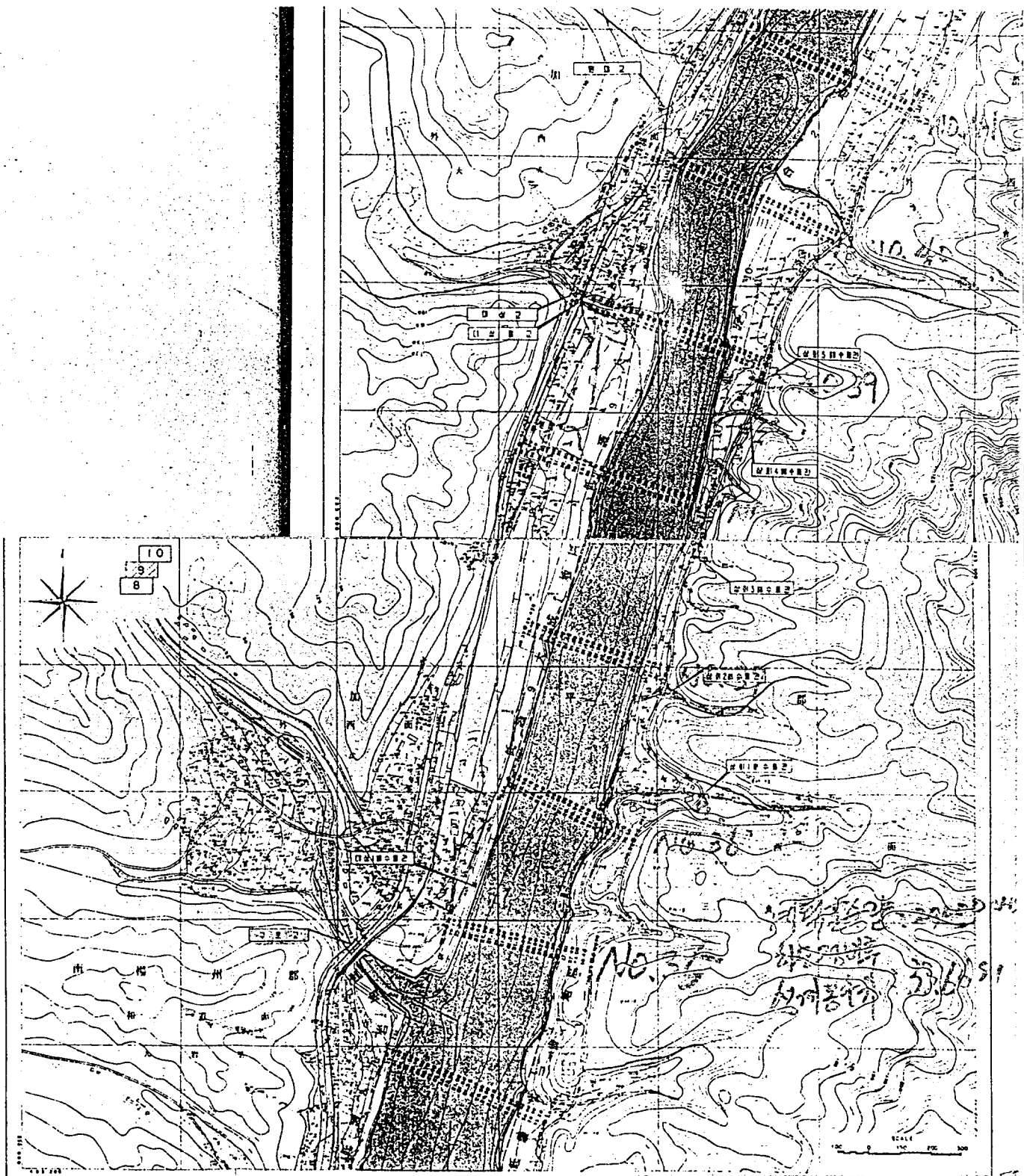
자료는 북한강 대성리 3 km 구간을 잡아서 7개의 단면자료를 이용하였다. 이것은 북한강 하천조사 보고서 (1990.8)에서 측점 35 ~ 41 이 이에 해당된다.

수위와 유량은 설계홍수위와 설계홍수량으로 가정하였는데 이는 측점 35를 기준으로 하였다.

수위 : 33.66 m

유량 : 20,000 m³/s

Manning 의 n 값은 북한강 하구부터 청평댐까지 추정된 값인 0.032를 가정하였다.



7. 다리를 통과할 경우의 수면곡선의 변화

대부분의 도시 유역에 대한 홍수터(flood plain) 연구에 있어서 다리를 통과할 경우의 수면곡선의 변화에 관한 해석은 중요한 문제이다. 다양한 다리의 형태와 복잡한 조건으로 인하여 다리로의 흐름 해석은 다루기 어려운 문제중의 하나이다. 다리와 암거(culvert) 에서 일어나는 대부분의 에너지 손실은 구조물의 직상류 수로와 직하류 수로에서 발생하는 손실과 구조물 통과시의 손실로 볼 수있다. 다리의 직상류는 다리 입구로 들어갈 때 수축으로 인한 천이(transition) 상태이고, 다리 직하류는 다리 출구를 빠져나갈 때 확장으로 인한 천이 상태이다. 보통 이 두 수로구간에서의 에너지 손실을 HEC-2 에서는 표준축차법(standard step) 으로 해석한다. 다리구조물을 통과할 때의 해석방법은 3가지가 있는데, normal bridge method, special bridge method, external hydraulic calculation 이 그것들이다.

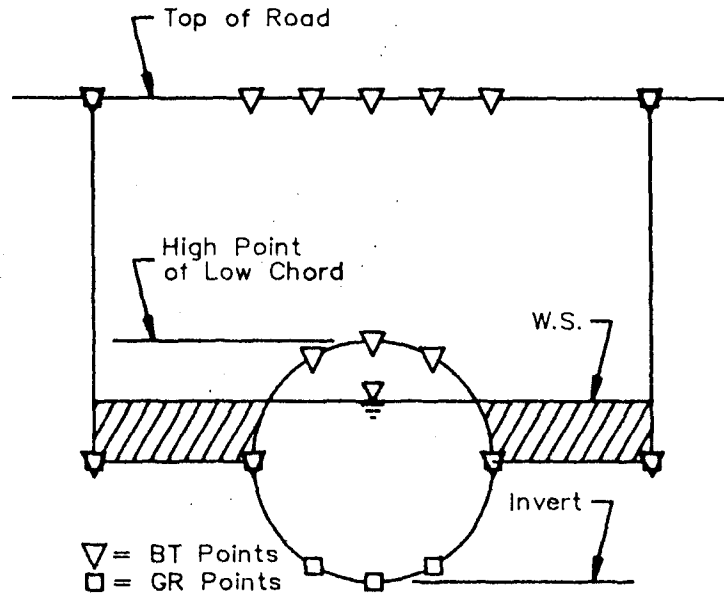
7.1 THE NORMAL BRIDGE METHOD

normal bridge method 는 수면곡선을 Manning 식과 표준축차법을 이용하여 계산하며 다리가 존재하지 않는 하천에서의 수면 계산과 유사하다. HEC-2 프로그램은 다리의 존재를 수면하의 다리 구조물에 의한 전체 흐름 면적(total flow area) 의 감소와 다리와 물과의 접촉으로 인한 윤변의 증가로 파악한다. 다리는 도로정상부(top of road way) (ELTRD) 와 low chord (ELLC) 를 X2 line 에 기입함으로 정의된다. 또한 축점(roadway station) 과 도로 정상부에 대한 표고는 BT line 에 기입함으로써 정의된다. 이를 정리하면 normal bridge 방법하의 다리 구조물은 2가지 방법으로 표현할 수 있다.

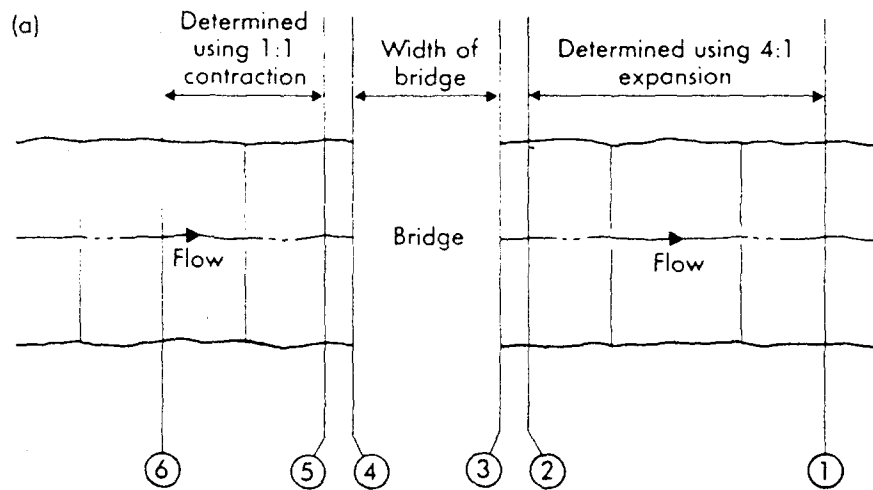
- ① BT line 에 도로 축점과 low chord 좌표를 기입하는 방법

② X2 line 에 일정한 값의 low chord 나 도로 정상부를 기입하고, 나머지 중요한 부분은 GR line 에 좌표로 기입한다. 첫번째 방법으로 기입하는 단순한 다리 구조물의 예가 (그림7.1)에 나타나 있다. 작은 사각형은 다리가 없는 경우의 하천 단면을 정의한 것으로, 삼각형으로 표현된 다리 구조물의 좌표가 추가 되는데 이는 도로 정상부와 low chord 의 표고를 말한다. 다리교대면은 교대 위치의 GR line 에 표시된 지표 표고 좌표와 동일한 위치에 BT line 의 low chord elevation 을 기입함으로써 표시된다. 다리 입구면은 GR line 은 바닥을 표시하고 BT line 은 입구의 low chord 를 기입한다. 그림과 같은 곡선 입구는 축점수를 증가시킴으로써 보다 개선된 곡선을 묘사할 수 있다. 표준측차법 계산에서 프로그램은 빗금친 영역으로 묘사된 부분을 인식하고 통수능(conveyance)을 감소시킨다. 또한 물과 접촉하는 다리면을 묘사하기 위하여 윤변을 조정한다. 다리 입구의 조도 계수는 NC, NH, NV line 에 지정한다. 만일 NV option 을 사용할 때 이는 연직방향으로의 조도 변화를 지정하는 것으로 이때는 조도(roughness) 대 표고(elevation) 의 자료가 필요하다. 한 다리 단면이 lower chord 와 바닥 조도가 다를때 composite N 값 대 표고의 연관 관계가 꼭 필요하다. 이 프로그램은 lower chord 와 channel portion 이 다른 N 값을 사용토록 하는 능력은 없다.

normal bridge method 를 사용하여 다리 모델링을 하려면 여섯개의 단면이 필요하다.(그림7.2) 첫번째 단면은 다리로 부터 하류 방향으로 충분히 먼 거리로 흐름이 완전히 확장되어 유선간이 평행을 이루는 유역이다. 두번째 단면은 다리의 직하류면에 일정하고, 세번째 네번째 단면은 각 면과 인접한 다리 내부의 면이다. 다섯번째 면은 다리의 직하류면이고 여섯번째면은 다리의 상류 방향으로 충분히 먼 거리에 수축의 영향이 없는 곳으로 유선간은 평행한 곳이다.



(그림 7.1) 다리구조물 좌표정의



(그림 7.2) Normal Bridge Method 에 필요한 단면

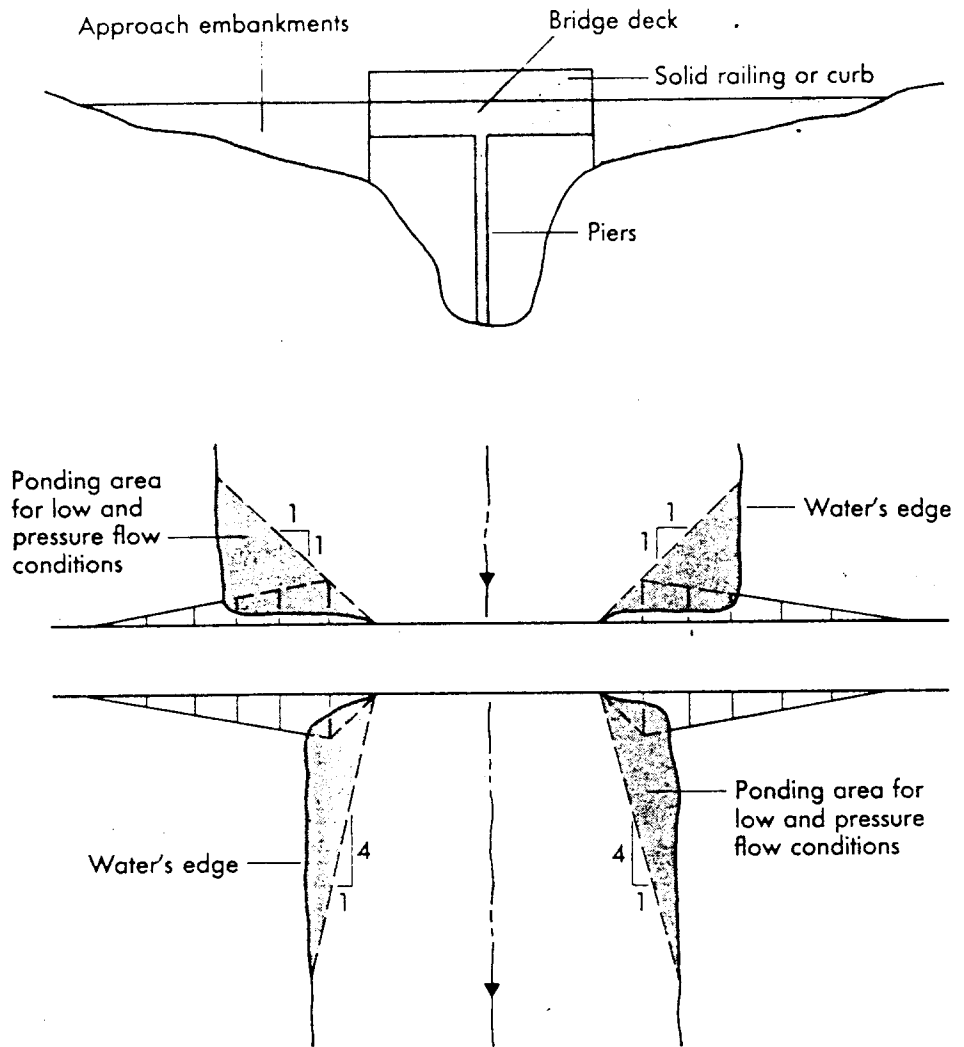
단면 1 은 다리 해석의 첫번째로 요구되는 곳이나, 하천 전체의 모델링에서의 첫번째 면이 아니어도 된다. 따라서 상하류에 이 여섯면 이외에도 다른 면이 있어도 된다.

관측을 통한 경험으로 확장각은 4:1 이다. 다시말해서 단면 1 은 두 교대 거리의 4 배를 하류방향으로 위치한다. 만일 이 방법에 의해 계산된 거리가 납득이 안갈 정도로 길 경우 임의로 짧게하기위해 단면 1, 2 사이에 위치토록 한다. 단면 3, 4 사이에 거리가 멀거나 (긴 암거), 형태나 조도의 변화가 있을 경우 3 과 4 사이에 추가된 단면이 필요하다. 단면 6 의 위치는 단면 1 과 비슷한 개념으로 축소각 1:1 을 사용한다.

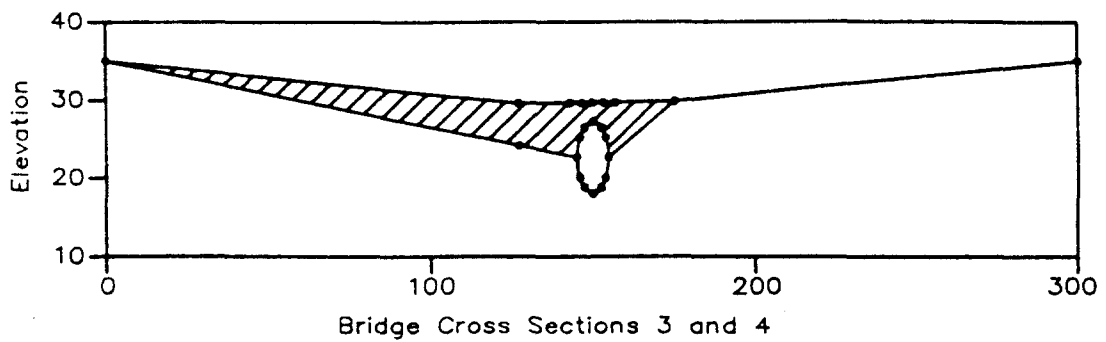
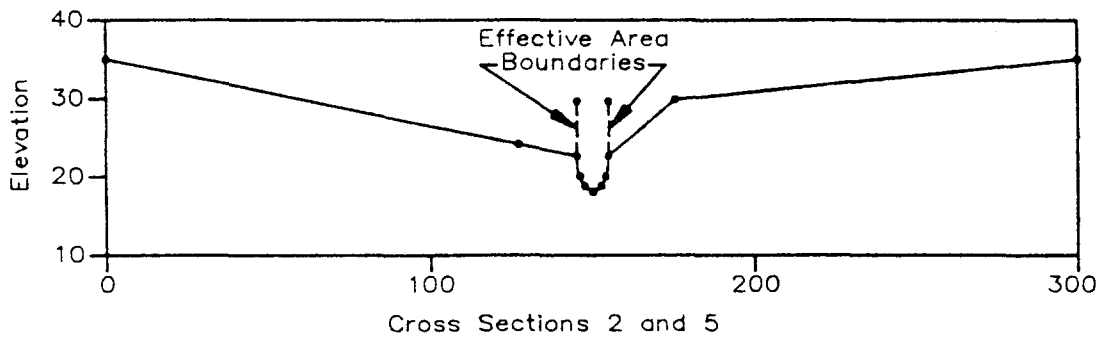
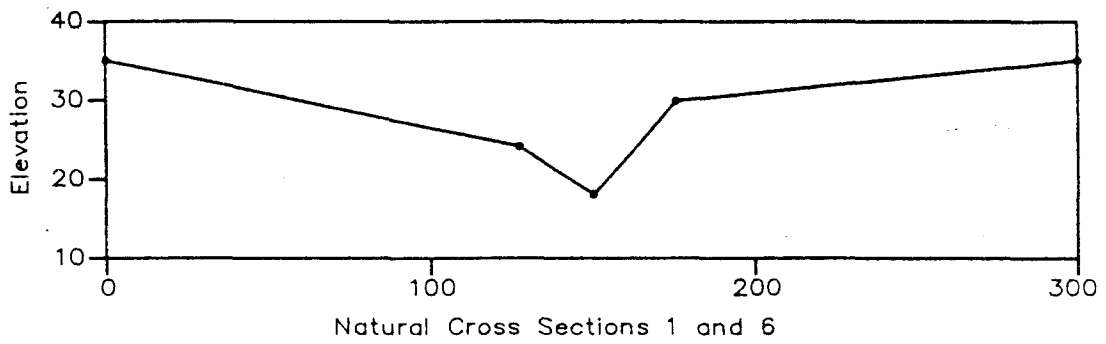
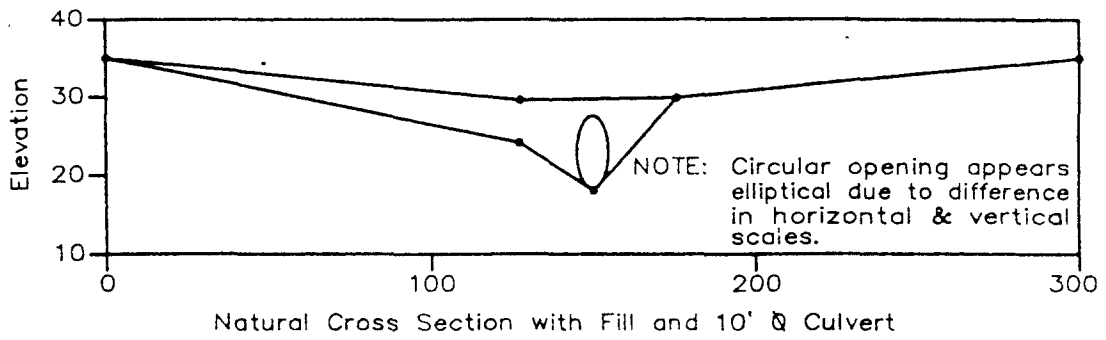
유효단면(effective area) 은 한 단면중 유속의 방향이 단면에 수직으로 하류방향으로 흐르는 부분을 말한다. 이에 하류방향으로 흐름을 수송하지 않는 부분을 비유효 단면(ineffective flow area) 라고 한다. (그림 7.3)에 다리의 존재로 생기는 비유효 단면의 예를 소개하였다. 비유효 단면은 GR line 과 BT line 에서 정의된 도로 정상부와 low chord 부분이며 계산에서는 제외된다. 그리고 GR line 에서 정의된 제방의 표고를 넘지않는 한 모든 흐름은 하천 단면에 제한된다. 유효 단면 설정에 필요한 자료는 X3 line 에 사용된다.

(예제7.1) normal bridge method

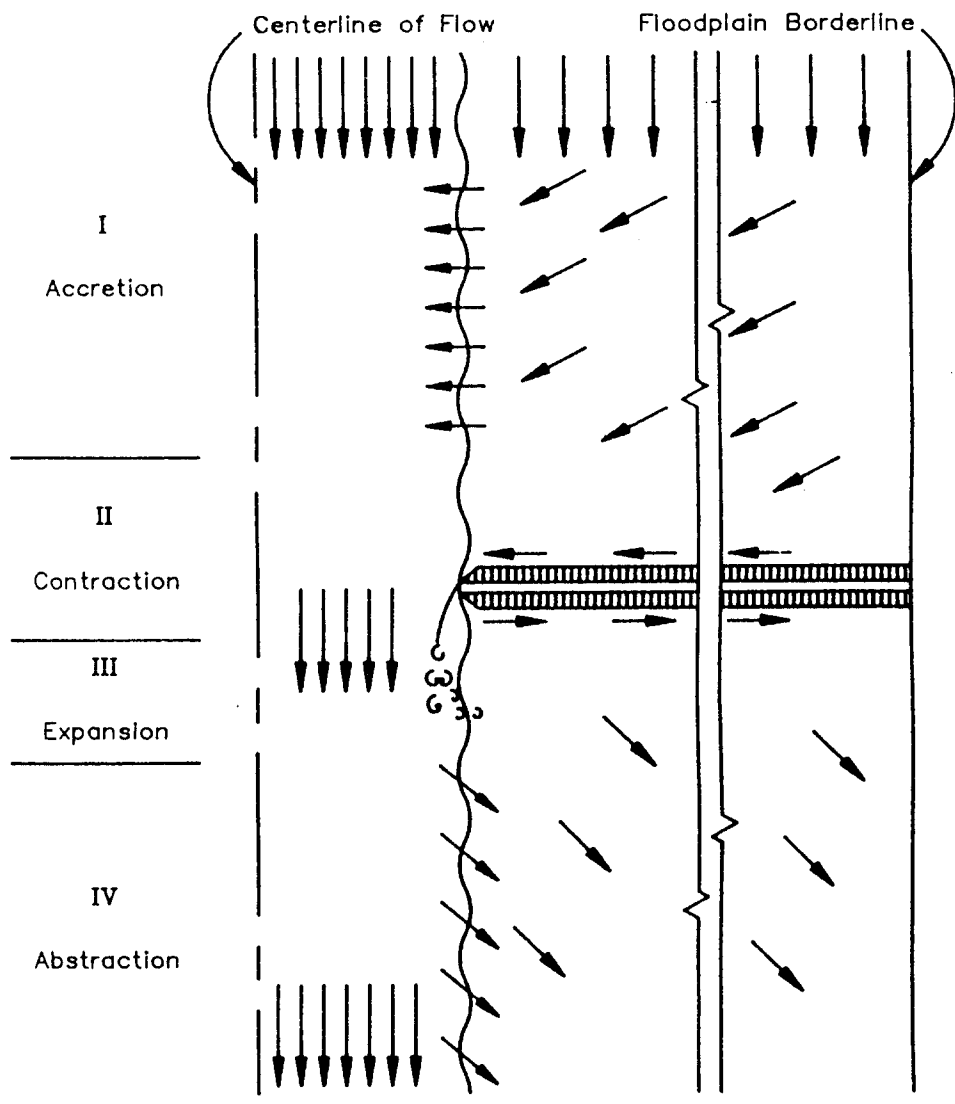
(그림7.4)에 도시한 6개의 단면자료를 갖는 암거에서 발생하는 수면곡선의 변화를 구하시오.



(그림 7.3) 다리구조물과 유효단면



(그림 7.4) 예제 7.1을 위한 단면도



7.2 THE SPECIAL BRIDGE METHOD

special bridge method 는 lowflow, pressure flow, weir flow 혹은 이들의 조합으로 이루어진 흐름 조건에 대하여 개개 상황에 적절한 수리공식을 사용하는 방법이다. 이 방법에서는 다리밑의 입구를 주어진 표고와 바닥너비 그리고 측면경사를 근거로 사다리꼴로 근사한다. 교각의 존재는 전체 너비로 설명한다. 그리고 단면자료는 4개가 필요하다.(그림7.5)

low flow 경우는 다리의 low chord 와의 접촉이 없는 흐름이 다리밑으로 흐르는 경우이다. low flow 경우에서 교각이 없는 경우 HEC-2 는 자동적으로 normal bridge 방법을 선택하는데 이는 그러한 경우에는 더욱 정확하기 때문이다. 교각이 있는 다리밑 low flow 의 경우에 HEC-2 는 3 가지의 경우를 고려할 수 있다. CLASS A, CLASS B, CLASS C 가 그것이다.(그림7.6) CLASS A low flow 는 흐름은 상류라 가정하고 수위의 변화는 YARNELL 공식을 통하여 계산한다.

$$H_3 = 2K (K + 10\omega - 0.6) (a + 15a)^4 (V_3^2 / 2g)$$

여기서

H_3 = 다리를 통과하면서 발생한 수위차

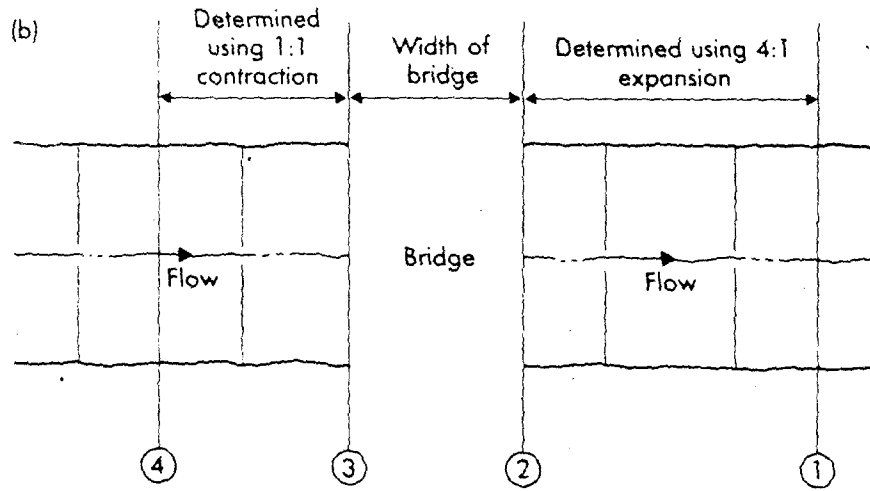
K = 교각 형상 계수(pier shape coefficient)

ω = 다리 하류 수위에 대한 속도 수두비

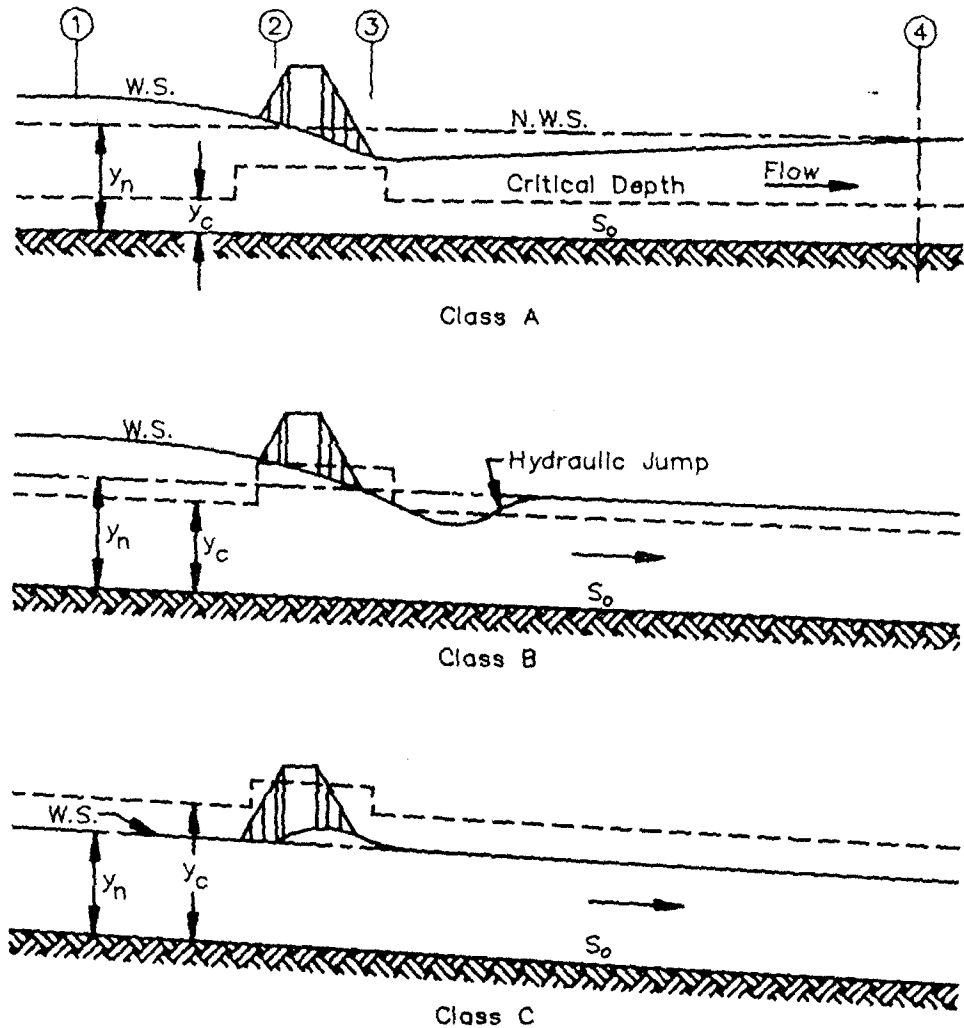
$$a = \frac{\text{차단 면적(obstructed area)}}{\text{비차단 면적(total unobstructed area)}}$$

V_3 = 다리 하류의 속도

그리고 식에 필요한 교각 형상 계수를 (표7.1)에 실었다.

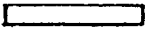
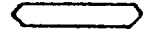

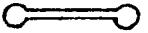
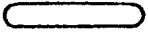


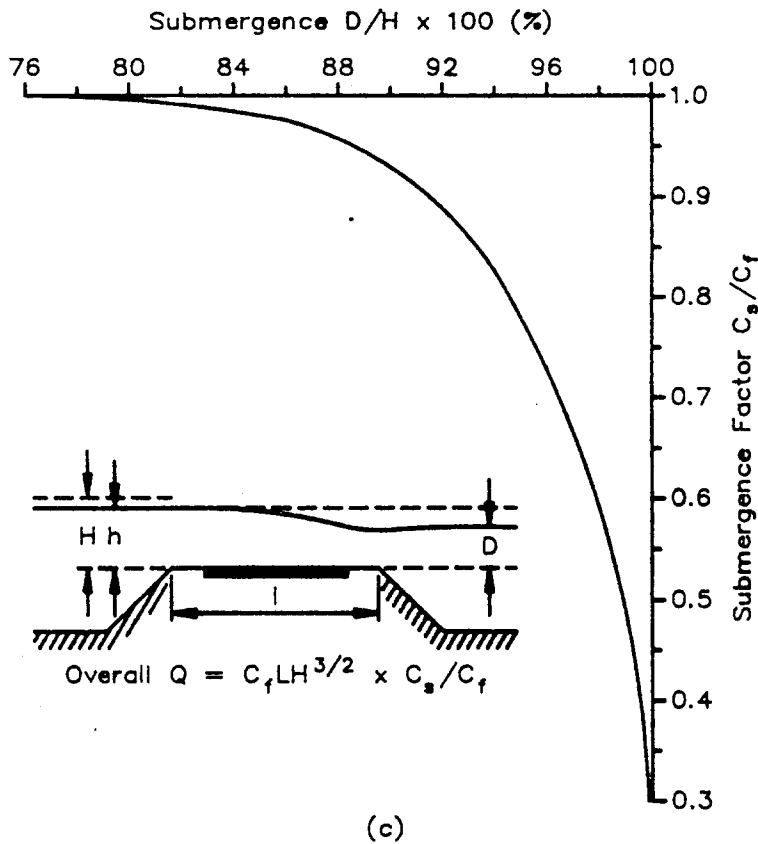
(그림 7.5) Special Bridge Method 에 필요한 단면



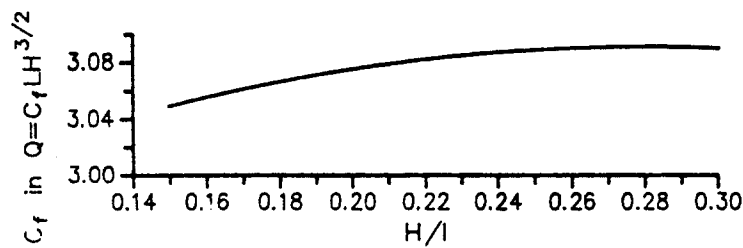
(그림 7.6) 흐름의 상태에 따른 수면곡선의 변화

(표 7.1) 교각 형상계수

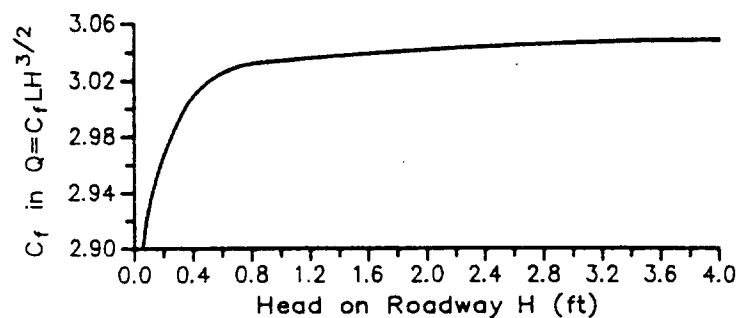
Pier shape		K
Square nose and tail		1.25
90° triangular nose and tail		1.05
Twin-cylinder piers without diaphragm		1.05
Twin-cylinder piers with connecting diaphragm		0.95
Semicircular nose and tail		0.90



(c)



(b)



(a)

(그림 7.7) 웨어계수 산정

CLASS B low flow 는 다리밑을 한계수심으로 흐를때의 경우를 말한다.
HEC-2 는 여기서 momentum balance 공식을 사용한다. CLASS C low flow 는
흐름이 사류일 경우를 말하며, CLASS B 와 같은 과정을 사용한다.

pressure flow 는 다리의 deck 가 잠겨서 low chord 가 물과 접촉할 때 발
생한다. 이런 pressure flow 는 다음식을 사용하는 orifice flow 와 유사
하게 해석하면 된다.

$$Q = A (2gH / K)^{0.5}$$

여기서 H = 상하류간의 전체에너지 차

K = 손실 계수(loss coefficient)

A = 다리 입구의 단면적

Q = 유량

HEC-2 에서는 H 를 에너지선에서 오리피스의 중심까지의 거리로 정의한다.

weir flow 는 유량이 다리 위로 흐르기 시작할 때를 말한다. 이때 HEC-2
는 표준 weir 공식을 사용한다.

$$Q = CLH^{3/2}$$

C = 유량 계수

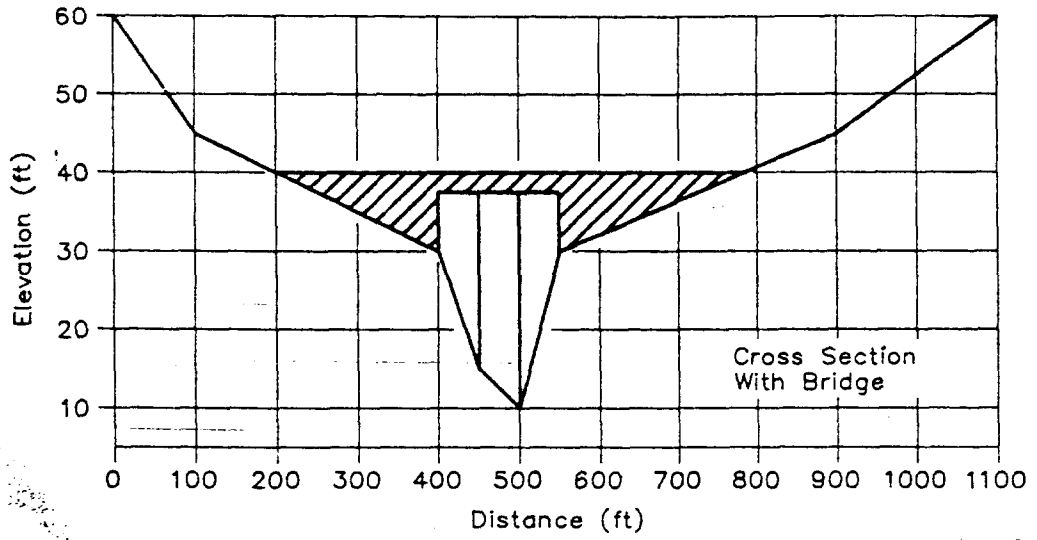
L = weir 의 유효 거리

H = 전 수두차

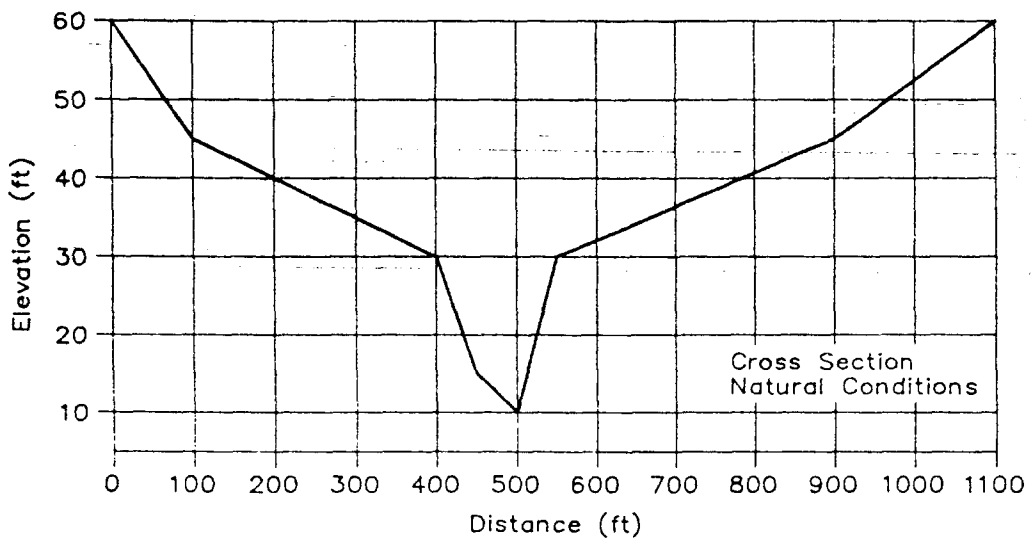
유량 계수 C 는 다리와 다리위 도로의 구성에 따라 변한다. (그림7.7)에
이들 유량 계수의 산정을 위한 그림을 수록하였다.

(예제7.2) special bridge method

하천의 단면형상이 모두 일정하다고 가정하고 다리를 설치 하였을 때
(그림 7.8) 다리의 영향으로 발생하는 수면곡선의 변화를 구하시오



(b)



(a)

(그림 7.8) 예제 7.2을 위한 단면도

8. 홍수터 관리 (Flood Plain)

홍수터란 강, 하천, 호수 등에 접한, 평상시에는 건조하지만 홍수기간 중에는 범람되는 지역을 말하며, (그림8.1)에 나타낸 것처럼 하천과 홍수터는 하천의 통수기능을 담당하는 일체의 조합으로 볼 수 있다.

홍수터 분석을 하는 첫번째 과정은 자료수집이다. 수집되는 자료로는 지형도, 홍수자료, 단면자료, 하도 조도 등이 포함되고, 또한 원하는 재현기간에 대한 홍수량의 산정이 요구된다. 원하는 재현기간에 대한 홍수량이 결정되면 다음과정은 하천을 따라서 수면 곡선을 계산한다.

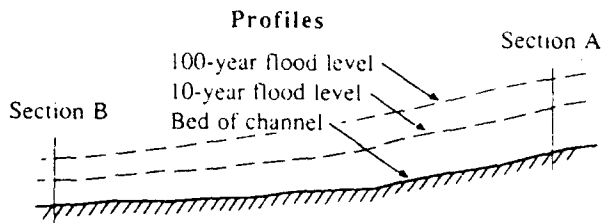
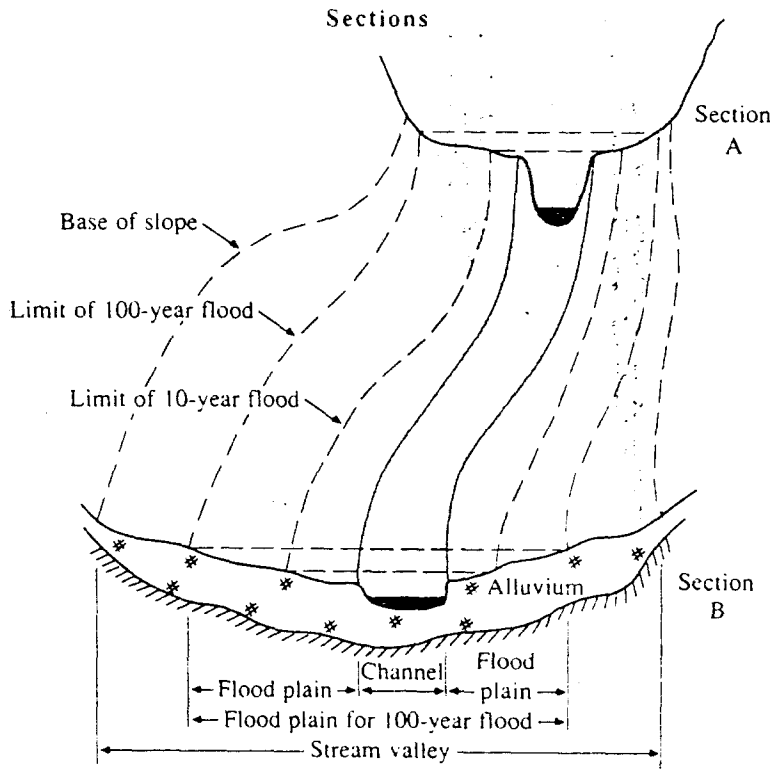
U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA) 는 홍수터 관리 기준의 수립을 목적으로 100년 빈도 홍수를 기저홍수 (Base Flood) 라 정하였다.

매립 등에 의한 홍수터의 하도잠식 (encroachment) 은 통수능을 저하시키고 하천의 홍수위를 증가시키며 하도 잠식된 지역 뒤쪽 지역의 홍수 위험도를 증가시킨다. 하지만 홍수터 관리의 한 국면은 홍수 위험도의 증가를 수반하는 홍수터의 개발로부터 얻어지는 경제적 이익을 무시할 수 없는 점에 있다.

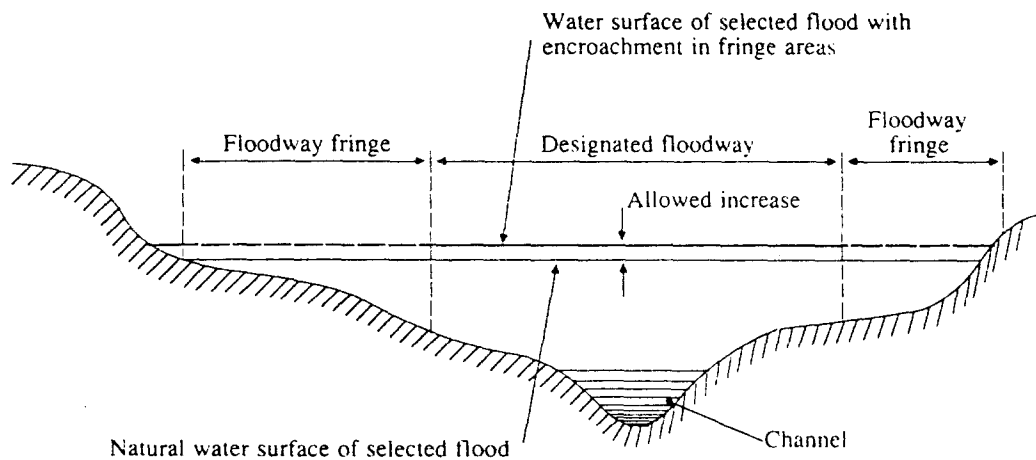
FEMA 는 (그림8.2) 와 같이 100년 빈도 홍수로 단면을 다음과 같이 홍수로 (floodway) 와 홍수로건 (floodway fringe) 로 나누었다.

홍수로란 하천과 바로 인접한 홍수터를 말하며 이는 100년 빈도의 홍수가 통과하여도 심각한 수위증가가 없도록 하도 잠식이 없도록 해야 하는 부분이다. FEMA 은 위험한 유속이 발생하지 않는 선에서 홍수위가 1.0foot 를 넘지 않도록 하는 하도 잠식을 위한 최소 규정을 정하였다.

그리고, 홍수로건은 100년 빈도 홍수에 대하여 1.0foot 이상의 홍수위 증가가 없는 홍수로와 경계를 접한 홍수터의 부분을 말한다.



(그림 8.1) 홍수터



(그림 8.2) 홍수터의 분류

미 정부는 홍수로 설정에 있어서 다음과 같은 지침을 정하였다.

- ① 홍수로의 결정은 기저 홍수라 지정된 100년 빈도의 홍수량에 의하여 한다.
- ② 홍수터는 홍수로 지역과 홍수로건 지역으로 나눈다.
- ③ 홍수로의 설정은 기존의 홍수터에서 기저 홍수량이 흐를 경우의 수위보다 1foot 이내의 수위를 유지토록 한다.
- ④ 홍수로건은 홍수로의 경계와 기존의 홍수터 경계의 사이의 면적을 말하며 수리계산을 위해서는 이곳의 통수능은 제외한다.
- ⑤ 특별한 이유가 없는 한 하천의 양 단면에 일정하게 통수능을 감소시킴으로써 홍수를 결정한다.
- ⑥ 홍수로 결정에 관한 수리, 수문학 적용은 기존 유역의 조건을 바탕으로 한다.
- ⑦ 홍수로 결정의 최종 승인은 주, 지역 공무원의 조정을 통한다.

8.1 모형화 과정

HEC-2 에서는 홍수로 산정의 절차를 다음에 의한다.

- ① 과거 홍수자료를 조사한다.
 - ② 기존의 홍수터에 대하여 1내지 0.2% 확률의 홍수를 포함한 유량에 대하여 수면 곡선 계산을 한다.
 - ③ 적합한 결과를 보이고 있는지 분석한다.
 - ④ 기저 홍수 (1%의 확률) 를 하도 잠식 조건에 적용하여 수면 곡선 계산을 한다.
 - ⑤ 기존 홍수터에 대한 결과와 하도 잠식 후의 결과를 비교한다.
- 이 때 계산된 수위가 기준을 넘을 경우, 유속이 심각하게 빨라질 경우, 홍수

로전 내에서 납득하기 힘든 수위상승이 발생할 경우, 기복이 심한 흐름경계가 발생할 경우 등에는 조정을 한다.

⑥ 조정된 입력으로 다시 수행한다. 필요하면 받아들여질 수 있는 결과를 얻을 때까지 몇번씩 반복한다.

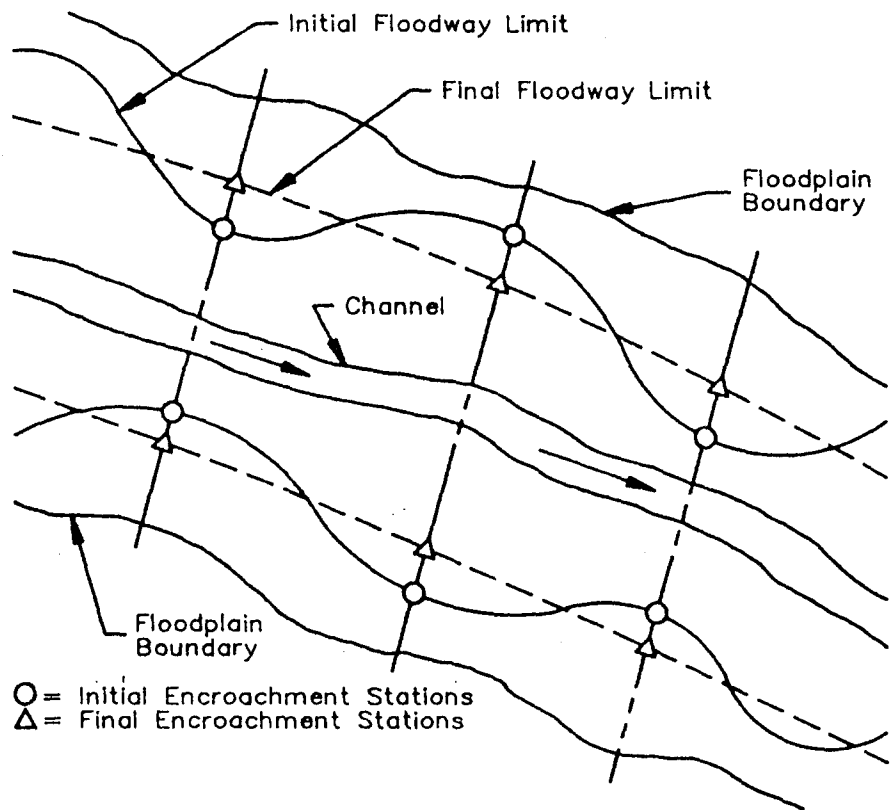
8.2 기복이 심한 흐름 경계 처리

HEC-2 는 한번에 한 단면에 대하여 하도 잠식 조건에 따른 수위와 그 외의 변수를 계산한다. 따라서 이 결과로 인하여 단면에서 단면으로 계산과정이 옮겨갈 때 하도 잠식 구간의 수면폭이 심각하게 차이가 날 가능성이 있다. (그림8.3) 에 보인 것과 같이 하도 잠식 한계치 (encroachment limits) 간의 경계를 하천에 따라 그리면 기복이 심하다. 이런 홍수로의 경계는 비실용적이다. 따라서 홍수 흐름의 경계를 부드럽게 변환시키는 기교가 필요하다.

(그림8.3)의 점선과 같이 다시 그리는 방법이 보다 실용적이다. 이런 방법으로 경계를 부드럽게 처리하면 단면의 수위가 계산치와 다르게 될 수 있으므로 목표값의 변화가 심각하게 일어나지 않도록 신중히 하여야 한다.

8.3 기존 홍수터 해석

홍수로 산정에 있어서 첫번째로 얻어야 하는 수면 곡선은 기존의 조건에 기저 유량이 흐를 때의 수면 곡선이다. 이것은 앞에서 수행한 수면 곡선 계산과 같은 방법으로 얻을 수 있다. 이 과정에서는 홍수로 분석을 위하여 유용한 정보를 얻을 수 있도록 일부, 혹은 전체 단면에 대한 흐름분포를 요구하는 option 을 사용토록 추천한다. 이 option 을 사용하면 단면의 횡방향으로 GR Point 에 의하여 지정된 최대 13 개의 overbank 면의 유량의 면



(그림 8.3) 하도잠식 경계처리

적, 유속의 분포를 출력시킬 수 있다.

이 흐름 분포 (flow distribution) 출력의 예는 다음과 같다.(그림8.4)

(그림 8.4) 흐름분포 출력

FLOW DISTRIBUTION FOR SECTO=		.34		CWSEL=		394.69	
STA=	38.	50.	275.	486.	1720.	1780.	1799.
PER Q=	.1	92.8	2.4	2.3	2.1	.2	
AREA=	27.5	4356.1	495.7	484.7	281.6	44.1	
VEL=	2.4	11.3	2.5	2.5	4.0	2.5	

홍수로 결정에 있어서 흐름 분포 출력 중 가장 유용한 정보를 제공하는 결과는 유량의 백분율 분포이다.

이 때 통수능은 유량과 비례하므로 통수능의 백분율 분포나 유량의 백분율 분포의 그것과는 동일하다. 이 통수능의 분포를 하도 잠식에 이용하는 이 유는 하도 잠식 option 중 다수는 통수능 감소를 근거로 하고 있고, 이 정보는 다양한 하도 잠식 효과 분석에 기초가 되기 때문이다.

흐름 분포는 비유효흐름단면 (ineffective flow area)를 결정하는 데도 유용하다. 그리고 대단히 느리거나 중요치 않은 유속을 갖는 부단면 (subdivision)도 쉽게 판별한다. 이 흐름 분포 option 은 모든 단면이나 개별 단면에 대하여 모두 적용할 수 있다. J2 의 10번째 field 에 대하여 15를 기입하면 모든 단면에 대하여 흐름 분포를 제공하며, X2 의 10번째 field 에 15를 기입하면 한 단면에 대하여 흐름분포를 제공한다.

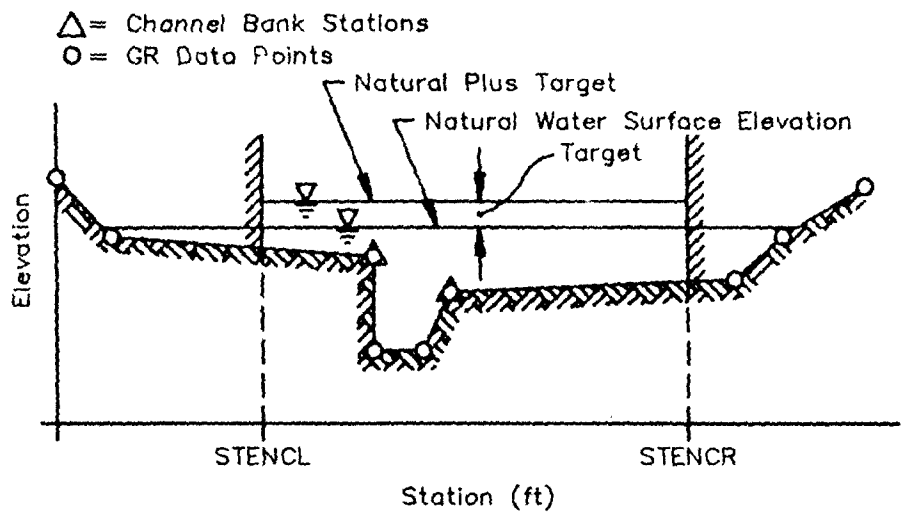
8.4 HEC-2 를 통한 하도 잠식 계산

이 방법은 HEC-2 의 하도 잠식 방법 중 가장 폭넓게 쓰이는 방법이다.(그림 8.5) 이 방법은 기존 홍수터에 대한 수위의 목표값 증가분을 근거로 하여

단면의 하도 잠식 한계를 설정한다. HEC-2 프로그램은 첫째로 기존 홍수터에 대한 수위를 계산한다. 그리고 이 프로그램은 목표값 양만큼 이 수위를 상승시킨 후 이 때의 모든 단면에 대한 통수능의 백분율 증가분을 계산한다. 그리고 나서 양 overbank 구역의 두 끝단으로부터 같은 양만큼 증가된 통수능과 등가로 폭을 줄여감으로써 하도 잠식 구간을 설정한다. 이 방법에서 한쪽 overbank 의 통수능이 충분치 못하면 프로그램은 다른 쪽에서 부족분을 보상한다. 이때 한번 하도 잠식 좌표가 설정되면 그 단면에 대한 수위를 계산한다. 그리고 이 과정을 모든 단면에 대하여 반복한다.

이러한 하도 잠식에 대한 option 은 J1 과 ET LINE 에 설정한다. 그리고 ET LINE 의 5번째 field 에 10.4라는 값을 기입하면 목표값은 1foot 이고 하도 잠식방법이 4 라는 것을 말한다. 즉 소숫점 왼쪽의 10은 1foot 를 의미 하는 것이다. 방법 4 를 이용하여 하도 잠식을 계산하는 또 다른 방법이 있다. 전형적인 방법은 양 overbank 에서 같은 양만큼의 통수능을 제거하는 것이지만 반면 이 방법은 양 overbank 의 기존의 통수능의 분포에 비례하여 제거한다. 이 방법은 ET LINE 의 목표값과 방법을 선택하는 값 앞에 '-'기호를 붙임으로써 가능하다.(예, -10.4)

어떤 사용자는 방법 4 의 결과에 대하여 혼란을 느낄 것이다. 왜냐하면 설정된 하도 잠식으로 인한 수면 곡선이 목표값만큼 증가된 기존의 수면 곡선과 같기를 기대하기 때문이다. 방법 4 는 이 결과를 제공하지 않을 수 있다. 하도 잠식이 설정되면 이 단면 변화를 바탕으로 표준 축차법으로 수면 곡선을 만든다. 이 결과는 목표 수위보다 다소 높거나 낮다. 이 결과는 단면 변화에 따른 유속과 유량의 재분포나, 하류의 하도 잠식에 의해 배수고 (back water) 효과가 복합적으로 이루어지기 때문이다. 따라서 반복 수행을 통하여 이를 보정해 나가야 한다.



(그림 8.5) 하도잠식방법 4

(예제8.1) 하도잠식

100년빈도의 첨두유량이 $53000 \text{ ft}^3/\text{s}$ 라 할때 다음 3가지 조건에 대한 수면곡선을 구하고 결과를 논하시오.

- ① 기존의 홍수터에서의 수면곡선
- ② 목표상승수위를 0.8ft 로 제한할 경우의 수면곡선
- ③ 목표상승수위를 1.0ft 로 제한할 경우의 수면곡선

EJ				
T1	FLOODWAY DETERMINATION EXAMPLE			
T2	METHOD 4 (0.8FT TARGET INCREASE)			
T3	COW CREEK	3		392.8
J1				
J2		2	-1	
T1	FLOODWAY DETERMINATION EXAMPLE			
T2	METHOD 4 (1.0FT TARGET INCREASE)			
T3	COW CREEK	4		393.0
J1				
J2		15	-1	

ER

(DATA 4)

(예제 8.1)을 위한 입력화일

HEC-2 水面曲線 프로그램

基礎理論

* 目次 *

1. 不等流計算의 基本公式
2. 開水路 흐름의 分類
3. 基礎資料
4. 1次元 에너지 公式의 自然河川에 適用

1. 不等流計算의 基本公式

정지되어 있는 상태에서 물이 가지고 있는 총에너지는 위치에너지와 물의 중량으로 인한 압력에너지라할 수 있다. 만일 외부에너지 공급이 없는 상태에서 물이 흐른다면 이 총에너지의 일부가 운동학적에너지(kinematic energy)로 변하며 동시에 이 에너지의 일부는 마찰 또는 다른 손실에 의하여 사용되어져 버린다. 수면형상의 계산은 이러한 각 에너지 성분의 크기를 해석적인 방법으로 구하는 것과 같으며 에너지 및 질량보존의 법칙을 적용한다. 즉 어떤 질량이 한 점에서 다른 점으로 움직였을 때 에너지보존 법칙을 적용한다면 다음과 같다. 즉

$$E_2 + \text{WORK} = E_1 + \Delta E \quad (1.1)$$

여기서 E_1 : 점 1에서의 에너지

E_2 : 점 2에서의 에너지

ΔE : 점 1과 2사이에서 손실된 에너지

WORK : 점 1과 2사이에서 추가된 외부에너지

여기서 각 항의 단위는 meter-kilogram force(m-kgf)이다. 정의에 의하여 운동에너지(kinetic energy)는 $1/2 M v^2$ 이며 또한 질량 M은 W/g 로 표시된다. 여기서 W는 중량, g는 중력가속도이다. 따라서 운동에너지는 $W V^2/2g$ 로 표시되며 식(1.1)에서 E_1 과 E_2 를 운동에너지와 위치에너지의 합으로 표시하면

$$E_1 = W V_1^2 / 2 g + Y_{o1} W \quad (1.2)$$

$$E_2 = W V_2^2 / 2g + Y_{o2} W \quad (1.3)$$

이고 또 WORK는 점 1과 2사이에서 추가된 에너지라면

$$WORK = F_2 dl - F_1 dl \quad (1.4)$$

이다. 여기서

F_1, F_2 : 힘 (kilogram force, kgf)

dl : 유선관의 점 1과 2사이의 거리

이다. 또한 힘 F는 압력과 작용하는 면적의 곱으로 표시되므로 WORK는

$$WORK = P_2 A dl - P_1 A dl \quad (1.5)$$

이다. 식(1.2) - (1.5)를 식(1.1)에 대입하면

$$\frac{V_2^2}{2g} + Y_{o2} + \frac{(P_2 A dl - P_1 A dl)}{W} = \frac{V_1^2}{2g} + Y_{o1} + \frac{\Delta E}{W} \quad (1.6)$$

무게 W는 유선관 점 1과 2 사이의 유체의 무게 이므로 $W = \gamma A dl$ 로 표시되며 ΔE 의 단위가 m-kgf이며 W는 kgf이므로 $\Delta E/W$ 는 길이의 단위로 표시된다. 즉 식(1.6)을 다시 표시하면

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Y_{o2} = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Y_{o1} + H_L \quad (1.7)$$

이다. 이는 유명한 베르누이 식이다. 식(1.7)의 각 항은 길이의 단위를 갖고 있으므로 각 항을 속도수두, 압력수두, 위치수두, 손실수두라 하기도 한다. 여기서 속도 V_1 과 V_2 는 면적 A에서의 평균유속을 말하나 실은 면적

A에서의 속도는 균일하지 않고 각기 다른 속도로 분포되어 있으므로 각 유선의 운동에너지의 합과 평균유속을 이용한 운동에너지는 다르게 된다. 따라서 이를 보정하여주기 위한 운동에너지 보정계수 α 를 적용하면 식(1.7)은

$$\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Y_{o2} = \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Y_{o1} + H_L \quad (1.8)$$

식(1.8)은 보통 1차원 에너지식 또는 베르누이 공식이라고 말하며 이는 또한 수면형상을 계산하기 위한 기본방정식이다. 그러나 일반적인 하천에서 교각이 있다던지 단면의 변화가 있는 경우에는 완전히 일차원의 흐름은 아니므로 이러한 자연하천에 대한 식(1.8)의 적용성에 대하여서는 경우마다 적용하는 사람의 주관적인 판단이 요구된다.

개수로의 경우 압력수두 P/γ 는 개수로의 바닥으로부터의 깊이를 나타내주므로 자유수면은 위치수두와 압력수두의 합으로 나타낸다. 즉

$$WS = P/\gamma + Y_o \quad (1.9)$$

WS는 자유수면의 위치를 말해준다. 식(1.9)를 식(1.8)에 적용하면

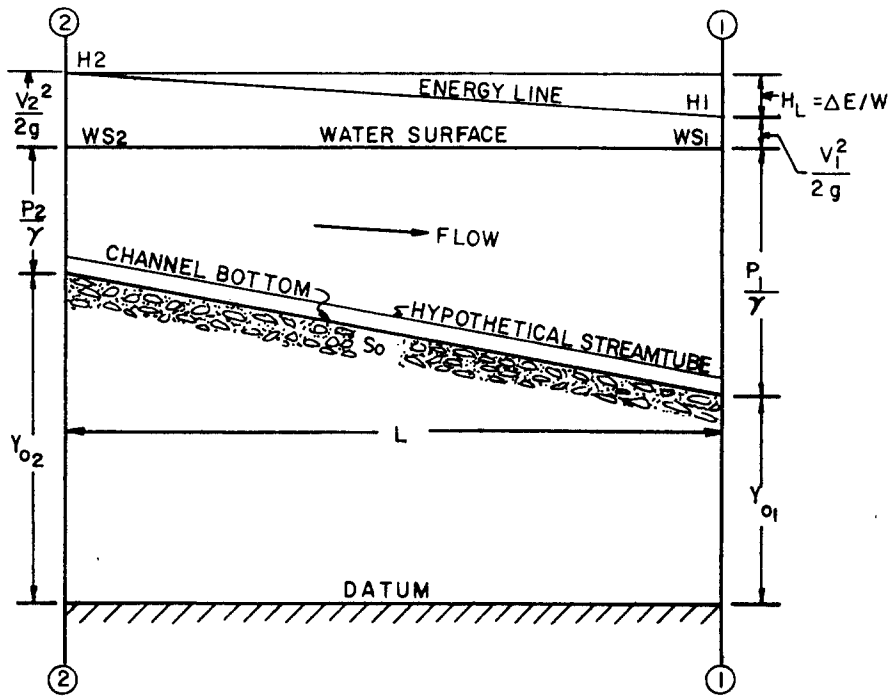
$$WS_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = WS_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + H_L \quad (1.10)$$

이며 단면 1과 2에서의 유량이 같으므로 $V = Q/A$ 를 대입하면 식(1.10)은 최종적으로 다음과 같다.

$$WS_2 + \alpha_2 \frac{Q^2}{2g A_2^2} = WS_1 + \alpha_1 \frac{Q^2}{2g A_1^2} + H_L \quad (1.11)$$

식(1.11)을 분석하여보면

- (1) 면적 A 는 WS 가 결정되면 계산될 수 있으며
- (2) α 는 WS 와 단면조도의 함수이며
- (3) H_L 은 Manning 공식의 마찰에 의한 손실과 기타손실(축소 및 확대)이며
- (4) 초기조건인 계산 시작점에서의 WS 와 Q 를 알아야 하며
- (5) 또한 흐름이 사류, 상류인가를 판단 하여야 한다.



H_L = Total change in energy (loss) between sections 1 and 2

L = Reach length

V = Velocity of flow

W = Weight of fluid

P/γ = Depth of flow

Y_o = Height of channel bottom above a datum

g = Acceleration of gravity

1 and 2 = Downstream cross section and upstream cross section, respectively

그림(1.1) Terms in the Bernoulli equation

2. 開水路 흐름의 分類

개수로의 수위는 시간과 위치에 따라 변하게 되며 결과적으로 수위, 유량 및 바닥의 경사는 서로 상관성을 가지고 있다. 따라서 개수로의 흐름은 어느 다른 흐름의 종류보다 더 복잡하게 되며 특히 수면형상을 계산하는 데는 점성과 중력에 의하여 흐름이 매우 다르게 됨을 알 수 있다.

점성의 영향

일반적으로 흐름은 세가지 상태로 구분되는데 이는 층류, 천이흐름 (Transitional flow) 및 난류이다. 이는 점성이 흐름에 주는 영향의 크기에 따라 구분되며 이것은 관성력과 점성에 의한 힘의 비로서 표시되는 무차원 값인 Reynold's Number로 나타내줄 수 있다. 즉

$$R_e = \frac{V L}{\nu} \quad (2.1)$$

R_e : Reynold's Number

V : 흐름의 속도

L : 특성길이

ν : 운동점성계수 ($\nu = \mu/\rho$)

개수로에서는 층류, 난류, 천이흐름의 경계는 보통 다음과 같이 정의한다.

$R_e < 500$	층류
$500 < R_e < 2000$	천이흐름
$R_e > 2000$	난류

일반적으로 개수로에서의 흐름은 난류가 대부분으로서 흐름이 난류의 경우에는 에너지손실은 주로 바닥이나 벽에서의 조도에 따라 결정되어지므로 경계에서의 마찰에 의한 에너지손실은 수면형상을 계산하는 데 매우 중요한 요소가 된다.

중력의 영향

개수로에서 중력은 흐름상태에 큰 영향을 주며 주로 중력에 의한 힘은 운동에너지로 변환하는 데 사용된다. 그림(2.1)에서 보인 바와 같이 압력수두와 속도수두는 같은 비에너지에 있어서는 상호보완적임을 알 수 있다. 유량이 같은 경우 유속이 증가하면(즉 속도수두가 증가) 반대로 압력수두가 감소하고 또한 비에너지(바닥이 수평인 경우에는 총에너지)는 따라서 감소하게 된다. 이러한 현상이 계속되면 비에너지는 최소값으로 되며 이 때 압력수두의 감소율은 속도수두의 증가율과 균형을 이루게 된다. 이 때의 수심을 한계수심(Critical depth)이라 한다.

이러한 중력에 의한 영향을 고려하기 위한 변수로서 관성력과 중력에 의한 힘의 비로서 표시되는 Froud Number를 사용한다.

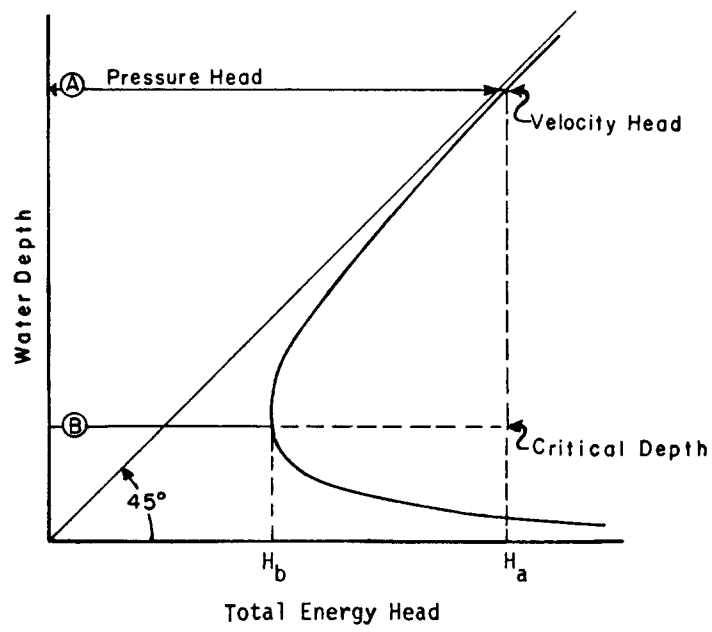
$$F = \frac{V}{\sqrt{g D}} \quad (2.2)$$

F : Froud Number

V : 유속

D : 특성길이 (흐름 단면적을 폭으로 나눈 값)

g : 중력가속도



그림(2.1) Relationship depicting critical depth

Froud 수의 값에 따라 흐름은 상류, 한계류, 사류로 구분된다. 즉

$F < 1.0$	상류
$F = 1.0$	한계류
$F > 1.0$	사류

수면형상을 계산하는 데 흐름상태를 아는 것은 매우 중요하다. 상류인 경우에는 계산은 하류로부터 상류방향으로 시행하여야 하며 반대로 사류인 경우에는 계산을 상류에서 하류방향으로 시행하여야 한다. 만일 계산방향이 틀렸을 경우에 계산은 확산되고 올바른 해답에 접근하지 않게된다.

부동류 흐름의 형태

부동류(Non-uniform flow, Varied flow)에는 크게 서서히 변하는 흐름(Gradually varied flow)과 급격하게 변하는 흐름(Rapidly varied flow)로 구분할 수 있다. Rapidly varied flow는 도수와 같이 육안으로 수면의 변화를 볼 수 있는 상태를 말하며 정수압의 이론을 적용시킬 수 없는 경우가 대부분이다.

Gradually varied flow의 분류는 바닥경사와 수면의 위치에 따라 하게된다. 바닥경사는 Mild(M), Critical(C) 및 Steep(S)의 3종류로 구분하는데 이는 흐름이 궁극적으로 상류가 되는가, 한계류가 되는가 또는 사류가 되는가에 따라 M, C, S 경사라 부르게 된다.(그림(3.1) 참조) 또한 바닥경사가 수평인 경우에는 H, 역경사(Adverse)인 경우에는 A경사라 한다.

수면은 상류수심(Normal depth) 및 한계수심과의 상대적인 위치에 따라 I, II, III으로 구분하게 되는데 다음과 같이 정의한다.

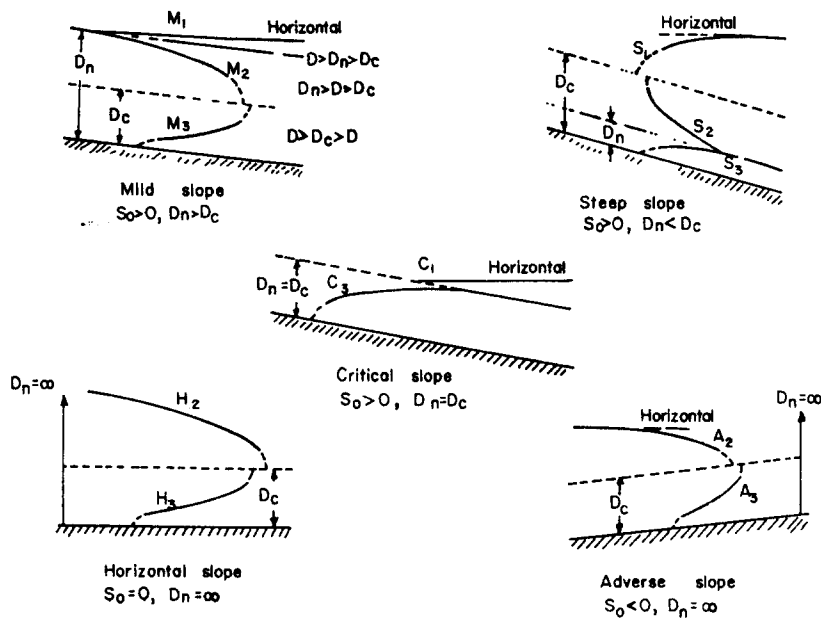
	$D > D_c > D_N$	Steep 경사
	$D > D_c$	Horizontal 경사
Zone II	$D_N > D > D_c$	Mild 경사
	$D_c > D > D_N$	Steep 경사
Zone III	$D_N > D_c > D$	Mild 경사
	$D_c > D_N > D$	Steep 경사
	$D_c > D$	Horizontal 경사

여기서 D_N : 상류수심(Normal depth)

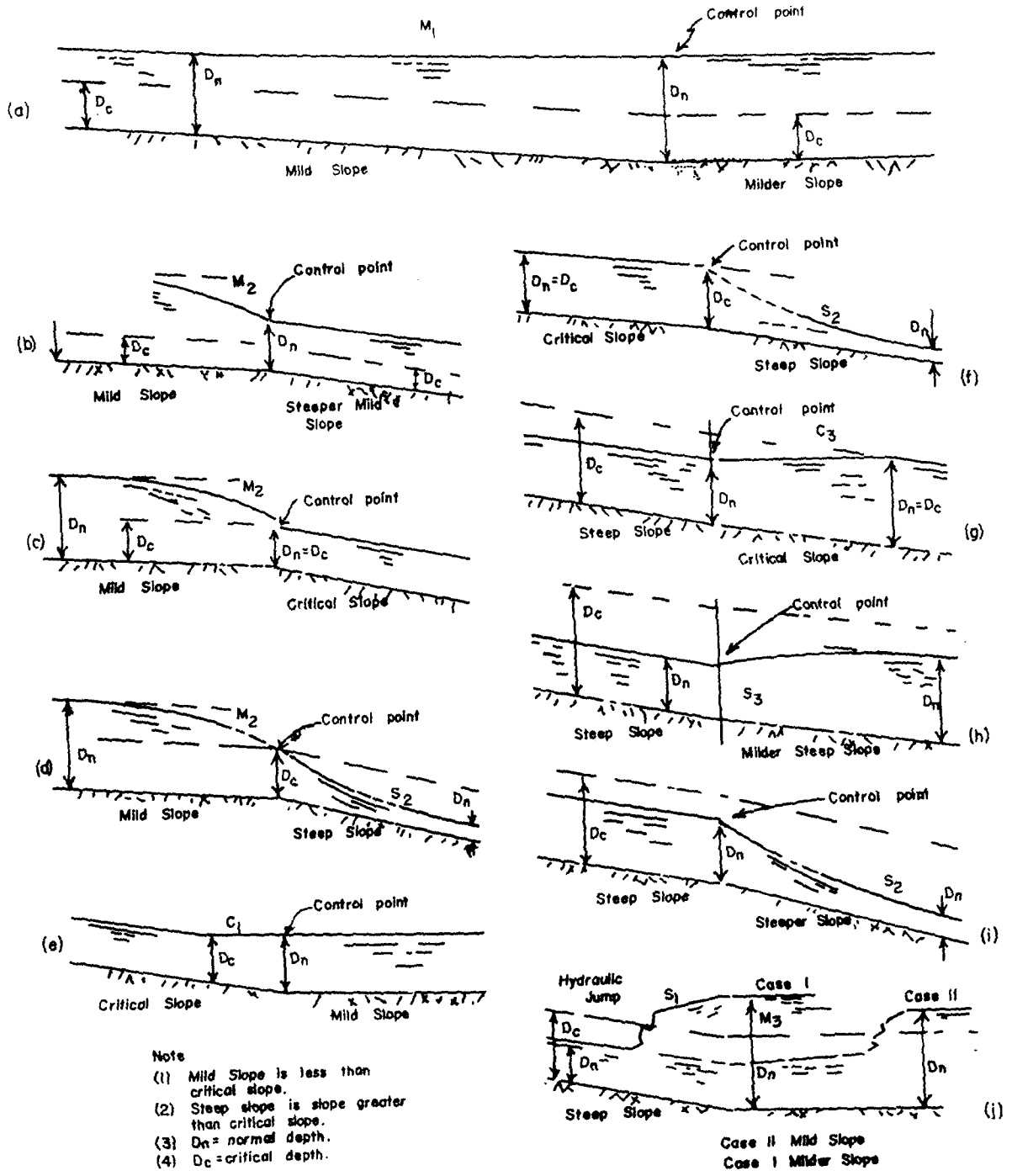
D_c : 한계수심(Critical depth)

D : 실제수심

수면형상을 계산하기 이전에 고려대상의 수면형상이 어떻게 될 것인가를 미리 안다는 것은 매우 중요하다. 이는 계산이 올바른 방향으로 되어 나가는지를 확인할 뿐만 아니라 계산의 오류를 쉽게 판단할 수 있기 때문이다.



그림(3.1) Classification of flow profiles



그림(3.2). Water surface profiles over a break in grade.

3. 基礎資料

HEC-2를 사용하는데 필요로하는 자료는 3그룹으로 나눌 수 있다. 즉 하천단면 자료와 같은 기하학적 자료(Geometric Data), 조도계수, 유량 및 수위자료 등이다. 이러한 자료의 정확성은 계산결과에 어떻게 영향을 미치는지 신중히 고려하여야 한다. 도심지 이외의 지방의 경우에는 비교적 토지의 가격이 비싸지 않으므로 정확한 자료수집에 많은 노력을 기울이는 것 보다는 다소의 부정확한 자료를 사용하되 Free board 등을 여유있게 주는 것이 경제적이거나 도시구역에서는 부정확한 자료에 의한 결과가 자칫 잘못하면 인명 또는 막대한 재산상의 피해를 주게 되므로 매우 조심스럽게 접근하여야 한다.

기하학적 자료

여기서 다루고자하는 자료는 흐름의 직각방향으로 측정한 하천의 단면 자료와 단면과 단면 사이의 거리(Reach)를 말한다. 일반적으로 하천에서는 약 150m 간격으로 단면을 측량하며 보통 하폭이 단면간 거리의 약 2-3배로 되도록한다. 그러나 이것에 대한 특별한 규칙은 없으며 단면의 변화가 크다면지 하도조도가 크게 다른 구간에서는 단면측량을 자주할 필요가 있다. 반면에 하천 단면의 모양이나 조도가 크게 변하지않고 비교적 일정한 경우에는 2-3km 간격으로 단면측정을 실시하며 이 때에는 마찰손실을 계산하는 방법을 좀더 정확하게 정할 필요가 있다. 하천의 단면과 단면간의 거리를 측정할 경우 다음과 같은 지점들이 고려되어야 한다.

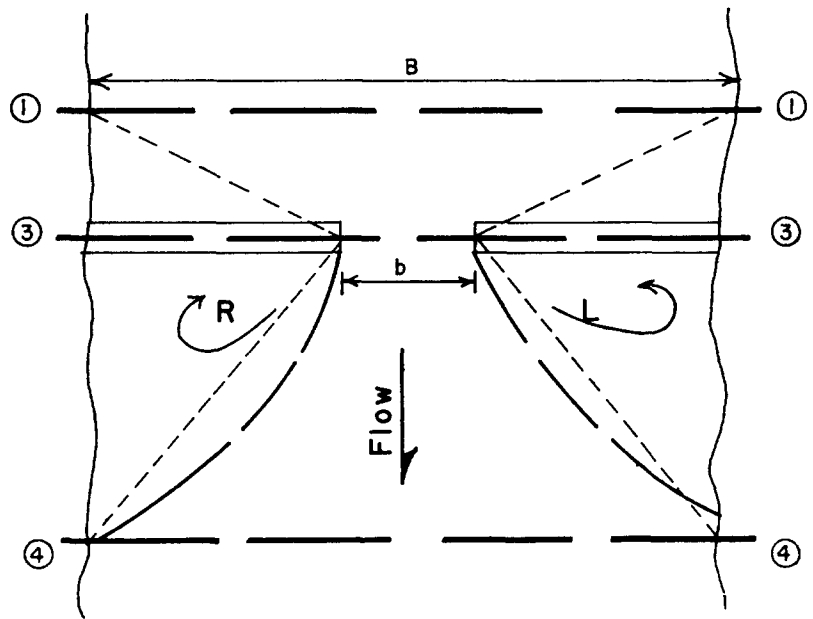
- (1) 바닥경사가 급격히 변하는 지점
- (2) 하폭이 축소 또는 확대되는 지점
- (3) 지천과 합류되는 합류점에서 지천은 합류점의 직상류, 본류는 직

하류 지점

- (4) 하천조도가 다르다고 판단되는 지점
- (5) 웨어와 같은 통제점(Control Point)의 직 상하류 지점
- (6) 단면은 예상되는 최대수위가 포함되도록할 것

교각에서의 자료준비

교각이 있는 지점 부근에서 하천의 기하학적 자료를 측정하는 것은 매우 어렵다. 이는 2차원적이거나 3차원 흐름의 성격이 더 강하므로 자료를 작성하는데 따라 계산결과가 크게 다르기 때문이다. 우선 흐름의 방향을 예상하고 이들에 직각이 되도록 단면을 결정하고 실제로 흐름이 어느 부분에 흐르는지를 결정하여야 한다. 그림(3.3)과 같은 경우를 생각해 보면 폭이 B인 하천에 날개벽과 접근도로 교각으로 인하여 흐름 폭이 b로 축소되었을 때 단면 ①은 상류로 충분한 거리를 가지고 있어 폭 B의 흐름을 나타낼 수 있어야 한다. 단면 ①과 ③사이의 거리는 보통 폭 b와 같이 하면 큰 무리가 없다. 단면 ④는 하류로 충분한 거리가 유지되어 확대흐름을 충분히 반영되도록 한다. 하천에서 이를 판단 하기가 어려우므로 보통 흐름 방향에서 약 15° 각을 갖는 선을 그어 양안과 맞나는 지점을 택한다. 그림(3.3)에서 단면 ④를 ③에 가깝게하는 것이 합리적이다. 이는 단면 ③과 ④에서 확대로 인한 에너지손실을 이 단면들의 통수능(Conveyance)으로부터 계산되기 때문이다. 그림(3.3)에서의 예는 매우 나쁜 경우의 예지만 교각의 수가 그렇게 많지 않고 충분한 하도단면이 유지된다면 그림(3.3)에서와 같은 큰 수두손실은 일어나지 않는다. 단지 고려되는 것은 교각으로 인한 윤회의 증가와 흐름단면의 감소이다. 하도에 있어서 수두손실은 주로 단면 확대, 교각의 모양, 축소부분에서의 마찰이며 각 경우에 따라 이들의 상대적인 크기가 다르다.



그림(3.3) Flow boundary geometry at bridges showing contracting and expanding flow

조도

하도의 단면에 대한 기하학적 자료가 정확하다 하여도 하상의 조도가 정확하지 않으면 계산 결과는 많은 오차를 갖게된다. 이를 보완하기 위한 방법으로는 두지점에서의 실측된 수위-유량자료가 있으면 다행이나 그렇지 않은 경우에는 표(3.1)에서 참조하거나 또는 기타 참고도서에서 구하는 수 밖에 없다. 일반적으로 많이 쓰이는 Manning 의 n 값은 계산구간에 따라 조정되어야 한다. 하도 또는 홍수터, over bank 구역등 각 경우마다 n 값이 다를뿐 아니라 도시지역에 있어서는 포장된 도로, 잔디, 보도등 모두가 흐름특성이 다르기 때문에 이들을 고려하는 방법이 강구되어야 한다.

교각의 손실계수

교각사이에서의 흐름상태가 상류, 한계류, 하류에 따라 교각으로인한 수위강하의 공식이 다르게 된다. 상류인 경우 Yarnell의 에너지공식은

$$H_3 = 2 K (K + 10 \omega - 0.6) (a + 15 a^4) \frac{V_3^2}{2g} \quad (3.1)$$

여기서 H_3 : 교량의 상류로부터 하류까지 수위강하 (ft)

K : 교각 형상계수

ω : 교량으로부터 하류에서 수심에 대한 속도수두의 비

a : 교각을 제외한 하천 단면적 / 교각을 포함한 전체면적

V_3 : 교각 하류의 속도 (ft/sec)

즉 교량으로부터 상류의 수위는 하류수심과 H_3 를 합한 것이다.

表(3.1) .* Coefficient of roughness,
average channels

<u>Value of "n"</u>	<u>Channel Condition</u>
0.016-0.017	Smoothest natural earth channels, free from growth, with straight alignment.
0.020	Smooth natural earth channels, free from growth, little curvature.
0.0225	Average, well-constructed, moderate-sized earth channels in good condition.
0.025	Small earth channels in good condition, or large earth channels with some growth on banks or scattered cobbles in bed.
0.030	Earth channels with considerable growth. Natural streams with good alignment, fairly constant section. Large floodway channels, well maintained.
0.035	Earth channels considerably covered with small growth. Cleared but not continuously maintained floodways.
0.040-0.050	Mountain streams in clean loose cobbles. Rivers with variable section and some vegetation growing in banks. Earth channels with thick aquatic growths.
0.060-0.075	Rivers with fairly straight alignment and cross section, badly obstructed by small trees, very little underbrush or aquatic growth.
0.100	Rivers with irregular alignment and cross section, moderately obstructed by small trees and underbrush. Rivers with fairly regular alignment and cross section, heavily obstructed by small trees and underbrush.
0.125	Rivers with irregular alignment and cross section, covered with growth of virgin timber and occasional dense patches of bushes and small trees, some logs and dead fallen trees.
0.150-0.200	Rivers with very irregular alignment and cross section, many roots, trees, bushes, large logs and other drift on bottom, trees continually falling into channel due to bank caving.

표(3.2) 교각 형상계수

교각형상	K
반 원 형	0.90
연결되어 있는 두개의 원주	0.95
연결되어 있지않은 두개의 원주	1.05
90°의 삼각형	1.25

웨어계수

웨어를 월류하는 흐름은 두가지로 구분되는바 이는 자유흐름과 잠수흐름이다. 자유흐름(free flow)은 웨어 하류의 흐름이 웨어의 월류에 아무런 영향을 주지 않는 경우이며 잠수흐름은 웨어 하류수심이 상류흐름에 영향을 주는 것을 말한다. 웨어 흐름공식은

$$Q = C L H^{3/2} \dots\dots\dots (3.2)$$

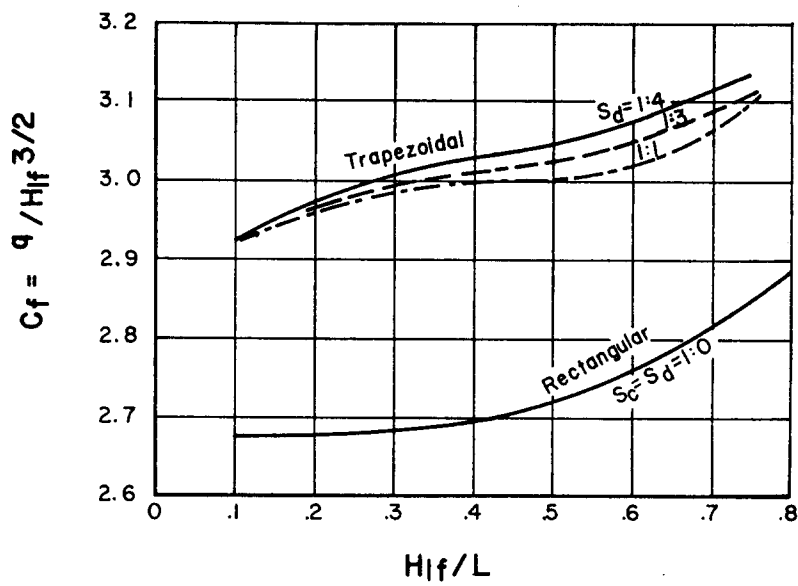
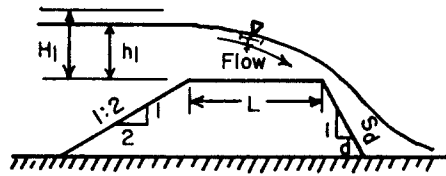
여기서 C : 유량계수

L : 웨어의 유효길이

H : 웨어 천단부와 상류 에너지선까지의 차

Q : 유량

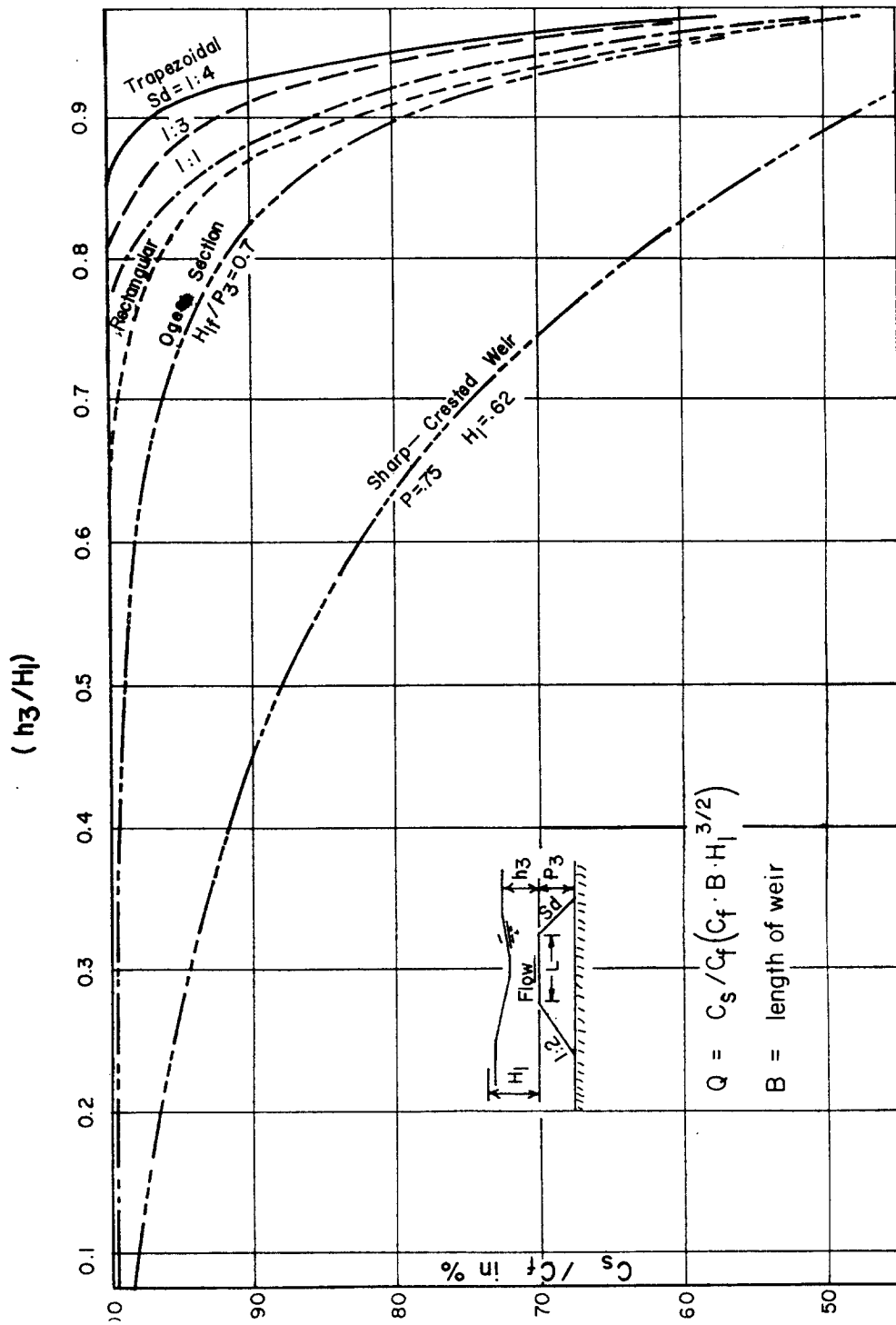
C의 값은 1.39~1.72(feet 단위에서는 2.5~3.1) 사이로 변한다. 그림(3.4)는 feet 단위에서의 계수임을 주의하여야 한다. 그림에서 보는 바와 같이 웨어의 형태에 따라 웨어계수가 크게 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 실제



$$H_1 = h_1 + \frac{v^2}{2g}$$

$H_{1f} = H_1$ for free flow conditions

그림(3.4) Effect of weir geometry on free flow discharge coefficients



그림(3.5) Effect of weir geometry on submerged flow discharge coefficients

적용하는데 있어서는 웨어의 형상을 정확히 파악한 후에 그림(3.4)를 적용하여야 한다.

축소 및 확대 손실계수

유체역학에서의 축소 및 확대에 대한 수두손실은 Minor Loss에 포함시켜 처리하며 이는 상하류 손실수두의 차에 손실계수를 곱하여 처리한다. 일반적으로 손실계수는 단면축소인 경우 0.1 이며 단면확대인 경우에는 0.3 을 적용한다.

	계 수	
	확 대	축 소
Gradual Transition	0.3	0.1
Abrupt Transition	0.8	0.6

이들 계수는 1.0 보다 크거나 음의 값을 가질 수 없다.

4. 1次元 에너지 공식의 自然河川에 適用

서론

앞에서 기술한 바 있는 에너지 공식(식 (1.1))을 다시 표시하면 다음과 같다.

$$WS_2 + \alpha_2 Q^2 / 2gA_2^2 = WS_1 + \alpha_1 Q^2 / 2gA_1^2 + H_L \quad (4.1)$$

여기서 A_1 : $f(WS_1, \text{단면형상})$

A_2 : $f(WS_2, \text{단면형상})$

H_L : 마찰 및 기타손실

Q : 독립변수 (일반적으로 주어진 값)

WS_1 : $f(Q)$

WS_2 : 종속변수

α_1 : $f(WS_1, \text{단면형상}, \text{조도계수})$

α_2 : $f(WS_2, \text{단면형상}, \text{조도계수})$

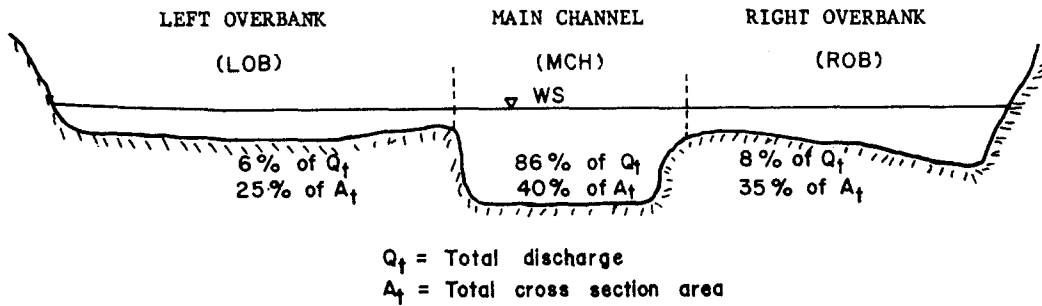
변수 A , K , 및 α 는 비선형이며 경우에 따라서는 WS 에 따른 비연속함수이기도 하다. 따라서 식 (4.1)의 해를 구하는 방법은 Standard Step 방법을 많이 사용한다. 이 방법도 여러가지로 수행될 수 있으나 해를 구하는데 가장 중요한 사항들은 결국 계산결과의 정확성 및 계산시간의 최소화이다. 이는 다시 말하여 단면 사이의 거리를 최대로 하는 것이나 마찬가지이다.

변수들의 평균치

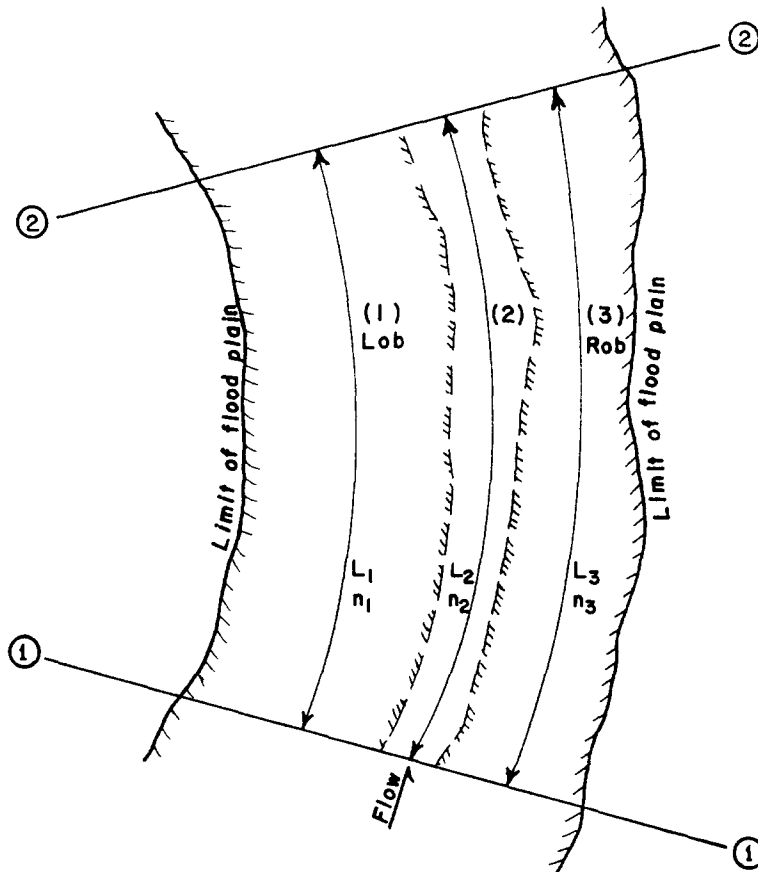
일차원의 공식을 적용시키기 위해서는 유량, 유속 등의 변수의 값을 단면 전체의 평균값을 사용하여야 한다. 그러나 이들 변수들은 단면에 균일하게 분포되어 있지 않기 때문에 평균값이 전체를 정확하게 나타내 주지 않게 된다. 그림(4.1)의 예를 본다면 단면의 유속은 $V_A = Q_t / A_t$ (Q_t : 전체유량, A_t = 전체단면적)으로 계산된다. 그러나 실제로 Main Channel에서의 통수능력이 전체유량의 86 % 를 차지한다면 이에 따라 유속은 평균값의 2.15 배가 되어야 한다. 이러한 유속분포를 가지고 마찰 또는 축소, 확대에 따른 손실수두를 계산한다면 전체 평균유속 V_A 로 계산한 것과는 크게 다르게 된다. 또 수위에 따라 단면 부분마다 유량의 배분이 다르게 되므로 또한 이를 고려해 주어야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 유속분포계수 α 를 적절하게 사용할 수 있다. 이러한 문제는 속도의 분포 이외에도 조도계수가 같은 단면내에서 다른 경우, 또 그림(4.2)에서 보는 바와 같이 단면과 단면간의 길이가 우안쪽과 좌안쪽이 다른 경우들이 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 즉 하천이 굽어져 있으며 좌안쪽과 우안쪽의 단면이 고수부지의 형태를 띠고 있을 때에는 단면을 같은 성질을 갖고 있는 부단면(Subsection)으로 나누어 각각의 부단면이 서로동질성이 있도록 한다. 그림(4.1)이나 그림(4.2)에서는 3개의 부단면으로 나눌 수 있으나 많은 경우 7~8 개의 부단면으로 나누기도 한다. 이들 부단면은 서로 독립적으로 거동한다고 가정하여 계산을 실시하고 전체단면에 대한 값을 얻기 위하여서는 산술평균, 기하평균 등의 적절한 평균방법을 사용한다.

기하학적 특성

수면형상을 계산하기 위하여는 수위에 따른 단면적, 운변, 수리반경 등이 계산되어야 한다. 어떤 경우에는 미리 수위를 변화시키면서 이러한 기하



그림(4.1) Distribution of discharge and flow area at a cross section



그림(4.2) Distribution of reach lengths and n-values

학적 특성을 계산하여 표로 만들어 이를 내삽법 또는 외삽법에 의하여 필요한 수위에서의 값을 구한다. 가장 좋은 방법은 주어진 수위에 대하여 기학적 특성을 계산하는 것이 좋으나 계산이 수동으로 행해지는 경우에는 미리 표를 작성하여 놓는 것도 방법이겠으나 정확도는 앞의 방법보다 떨어짐이 단점이다. 가장 정확도가 떨어지는 것은 앞에서 작성한 표를 Curve fitting하여 공식으로 사용하는 방법이다. 이는 편리하기는 하지만 내삽 또는 외삽에 의한 정확도의 저하뿐만 아니라 Curve fitting으로 인한 오차가 추가적으로 포함되기 때문이며 또한 불연속점과 같은 것이 표현되기가 어렵다.

단면을 여러개의 부단면(Subsection)으로 나누었을 경우에도 계산방법은 마찬가지이며 이 경우 수리반경은 수심으로 대체하여도 큰 오차는 없다.

Manning 공식은 구간별마다 마찰에 의한 에너지 손실을 계산하기 위하여 사용되며 이 중 기하학적항과 조도항을 합한 것을 Conveyance라 한다.

Manning 공식은

$$Q = (C_m/n) \cdot AR^{2/3} \cdot S_f^{1/2} \dots\dots\dots (4.2)$$

또는

$$Q = K_t \cdot S_f^{1/2} \dots\dots\dots (4.3)$$

여기서

$$K_t = C_m \cdot \sum_{i=1}^J \frac{A_i R_i^{2/3}}{n_i} \dots\dots\dots (4.4)$$

Q = 총유량

C_m = 단위 환산계수, meter 단위에서는 1.0, feet 단위에서는

1.486

n = 조도

A = 단면적

R = 수리반경

S_f = 총 마찰경사

K_t = Total Conveyance

I = 부단면수

i = 부단면 i

수동계산인 경우에는 각 부단면에 대하여 Conveyance 곡선을 작성하고 이를 면적과 수리반경곡선 대신에 사용한다.

속도분포계수

속도분포계수의 대표적인 값은 일정한 직선 단면수로인 경우에 1.03 에서 1.36 사이에 변한다. 그러나 이 계수는 수면형상을 계산하는데 있어서 다른 불확실성에 비하여 상대적으로 중요한 것은 아니다. 그러나 경우에 따라서는 단면이 복잡한 경우에 그 값이 2 또는 20 보다도 클때가 있다. 해석적인 방법에 의하여 이 계수를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\int V^2 dQ}{V^2 Q} \quad (4.5)$$

dQ : 속도에 따른 유량

Q : 총유량

V : 평균유속

V : 정유속

위의 공식을 통수능과 면적의 항으로 표시하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^I K_i (K_i/A_i)^2}{K_t (K_t/A_t)} \quad (4.6)$$

여기서 K_i : 부단면 i 에서의 통수능

A_i : 부단면 i 의 면적

I : 부단면의 총 수

t : K 또는 A 의 합

마찰손실

마찰손실은 일반적으로 Manning 공식으로부터 계산한다. 점진적으로 변하는 흐름에서 마찰경사는 흐름의 방향에 따라 변한다.

$$h_f = \int_0^L S_f dX \quad (4.7)$$

여기서

$$S_f = \left[\frac{Q}{C_m/n A R^{2/3}} \right] \quad (4.8)$$

A : 단면적

C_m : 단위환산계수

H_f : 마찰에 의한 손실수두

L : 구간거리

n : Manning 식의 n

Q : 총 유량

R : 수리반경

S_f : 마찰경사

위의 공식을 개략적으로 계산하는 절차로는 다음과 같은 4가지 방법을 사용한다.

$$h_f = 0.5 L (S_{f1} + S_{f2}) \quad (4.9)$$

$$h_f = L \sqrt{S_{f1} S_{f2}} \quad (4.10)$$

$$h_f = \left[\frac{Q n}{C_m 0.5 (A_1 + A_2) (R_1 + R_2)^{2/3}} \right]^2 \quad (4.11)$$

$$h_f = L \left[\frac{2 Q}{K_1 + K_2} \right]^2 \quad (4.12)$$

여기서 첨자 1과 2는 상류와 하류단면을 말한다. 경험에 의하면 식(4.9)는 단면과 단면사이가 매우 가까운 경우에 사용될 수 있으며 식(4.12)는 단면과 단면사이가 매우 길며 수면형상이 M2, H2 또는 A2 형일 경우에 적용된다.

기타손실(Form Losses)

기타손실로서는 자연적인 하천폭의 팽창 또는 수축에 의한 손실, 또는 Eddy 손실, Shock 손실 등이다. 팽창이나 수축에 의한 손실은 다음 공식에 의하여 계산될 수 있다.

$$h_o = C' \left| a_1 \frac{V_1^2}{2g} - a_2 \frac{V_2^2}{2g} \right| \quad (4.13)$$

여기서 C' : 팽창계수 $V_1 < V_2$ 경우

축소계수 $V_1 > V_2$ 경우

일반하천에서 대표되는 값으로는 팽창계수인 경우는 0.3, 축소계수는 0.1이다.

Standard Step 방법

비선형 공식인 식(4.1)의 해를 얻기 위해서는 계속적인 계산이 필요하다. WS_2 의 시작값을 가정하고 손실수두 값과 속도수두의 변화를 합하여 이 값을 하류수위에 더함으로서 WS_2 를 얻게된다. 초기에는 시작값과 계산된 수위의 차이가 크므로 이를 수렴시키기 위한 수치적인 방법이 필요하다. 다음 방법은 해가 확산되지 않고 정확한 해에 수렴되기 위한 절차이다. 흐름이 상류인 경우에 유량은 주어지나 초기에는 상류 다음 단면에 대한 정보가 없으므로 단순히 시작단면에서의 마찰경사에 다음 단면까지의 거리를 곱한 것을 상류단면수위에 더하여 이를 그 단면의 수위로 가정한다. 즉

$$TWS_{u1} = CWS_d + (Q/K_d)^2 L \quad (4.14)$$

여기서 K : 통수능

L : 상류단면까지의 거리

Q : 유량

CWS : 하류단면에서의 수위

TWS : 상류단면에서의 시작수위

u : 상류

d : 하류

l : 시산횟수

상류수위에대한 계산을 시작하고 오차를 시험한다.

$$\text{ERROR} = | \text{CWS}_{u1} - \text{TWS}_{u1} | \leq \text{TOLERANCE} \quad (4.15)$$

허용오차는 보통 3mm에서 30mm 사이로 택한다.

두번째 시산에서는 첫번째 시산의 결과를 이용하여 다음과 같은 식을 제시한다.

$$\text{TWS}_{u2} = \text{TWS}_{u1} + 0.9 (\text{CWS}_{u1} - \text{TWS}_{u1}) \quad (4.16)$$

수렴의 조건으로서는 다음식을 만족하여야 한다.

$$| \text{CWS}_{u2} - \text{TWS}_{u2} | < | \text{CWS}_{u1} - \text{TWS}_{u1} | \quad (4.17)$$

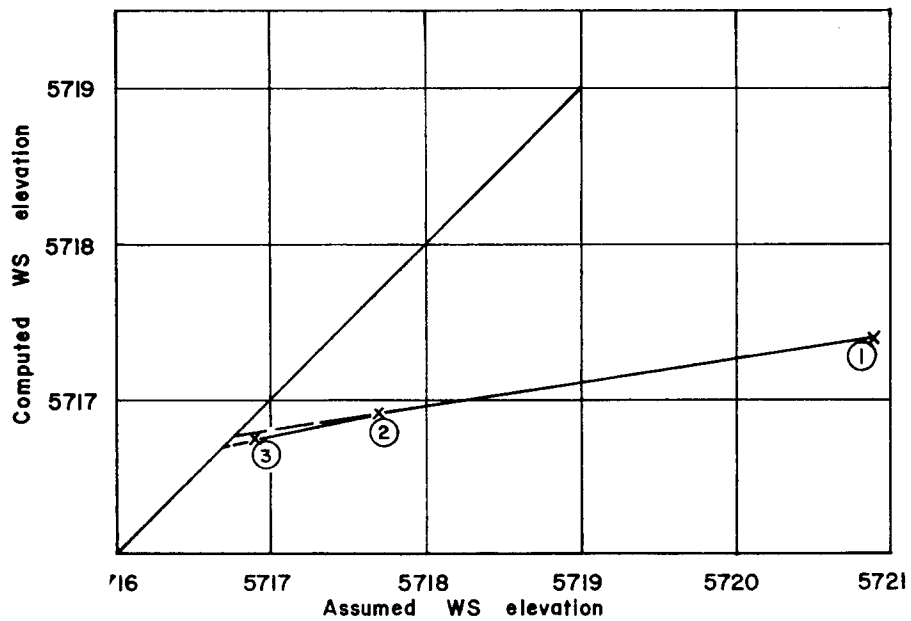
만일 두번째 시산의 결과가 식(4.17)의 조건을 만족시키지 않는 경우에는 해는 확산됨으로 새로운 시산값을 사용한다.

$$\text{New TWS}_{u2} = 0.5 (\text{Present TWS}_{u2} + \text{TWS}_{u1}) \quad (4.18)$$

세번째 시산에서는 첫번째와 두번째 시산값을 선형외삽법에 의하여 구한 값을 사용한다. 이것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{TWS}_{u3} = (\text{TWS}_{u1} - \text{XM CWS}_{u1}) / (1. - \text{XM}) \quad (4.19)$$

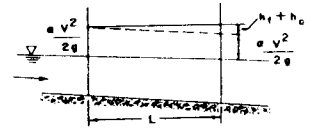
$$\text{XM} = (\text{TWS}_{u2} - \text{TWS}_{u1}) / (\text{CWS}_{u2} - \text{CWS}_{u1}) \quad (4.20)$$



그림(4.3). Graphic technique for converging trial to computed water surface elevation

WATER-SURFACE PROFILE CALCULATIONS

PROJECT: Sea Fox River
 $Q = 5000$ cfs
 $C_o = 0.1$ $C_c = 0.1$



CROSS SECTION NO.	WATER SURFACE ELEVATION		AREA A	HYDRAULIC RADIUS R	R ^{2/3}	n	K	K _c	S _f	L	h _f	K ³ /A ²	a	V	a ³ /2g	Δ(a ³ /2g)	h _o	Δ(WATER SURFACE ELEVATION)	
	ASSUMED	COMPUTED																	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	
												X 10 ⁶							
1		5709.0	355	6.1	3.35	0.03	58,900	--					1.0	14.1	3.08				
2	5712.6		360	6.1	3.3	0.03	58,800					1568							
			80	1.6	1.4	0.05	3,300					6							
		5713.0	440				62,100	60,500		500	3.42	1574	1.27	11.4	2.54	+54	.05	4.01	
	5713.0	5713.0	380	6.3	3.4	0.03	64,000					1815							
			100	1.8	1.5	0.05	4,460					9							
			480				68,460	63,700		500	3.08	1824	1.31	10.4	2.21	+87	.09	4.04	
3	5716.2	5715.9	820	5.4	3.1	0.03	126,600	97,200		400	1.06	--	1.0	6.1	0.58	+1.63	.16	2.85	
	5715.9	5715.9	780	5.1	2.9	0.03	112,000	90,200		400	1.22	--	1.0	6.4	0.64	+1.57	.16	2.95	
4	5720.9	5716.7	780	6.4	3.4	.036	109,000	110,500		400	0.82	--	1.0	6.4	0.64	0	0	0.82	
	5716.9	5716.15	380	4.5	2.7	.036	42,400	77,200		400	1.68	--	1.0	13.2	2.69	-2.05	0.62	0.25	
	5716.1	5715.45	315	4.1	2.56	.036	33,300	72,650		400	1.89	--	1.0	15.9	3.92	-3.28	.98	-0.41	
NOTE:		At 5716.1 V = 15.9 fps, celerity = 12.0 fps, Froude No. = V/c = 1.32. Flow is supercritical.																	

- (8) $K = C_m AR^{2/3}/n$
- (9) $\bar{K}_c = .5(K_{upstream} + K_{downstream})$
- (10) $\bar{S}_f = (Q/\bar{K}_c)^2$
- (11) $h_f = L \bar{S}_f$
- (12) $h_f = L \bar{S}_f$
- (13) K^3/A^2
- (14) $a = \frac{(A_c)^2 E (K_c^3/A_c^2)}{(K_c)^3}$
- where: 1 = incremental value, c = total value
- (15) $V = Q/A_c$
- (16) $X 10^6$
- (17) $\Delta(a \frac{V^2}{2g}) = (a \frac{V^2}{2g})_{downstream} - (a \frac{V^2}{2g})_{upstream}$
- (18a) $h_o = C_c | \Delta(a \frac{V^2}{2g}) |$ for $\Delta(a \frac{V^2}{2g}) < 0$
- (18b) $h_o = C_c | \Delta(a \frac{V^2}{2g}) |$ for $\Delta(a \frac{V^2}{2g}) > 0$
- (19) $\Delta(\text{water surface elevation}) = \Delta(a \frac{V^2}{2g}) + h_f + h_o$

contraction losses due to interchanges between kinetic and potential energies as the water flows), and column 19 contains the computed change in water surface elevation. Conservation of energy is accounted for by proceeding from section to section down the computation form.

Column 1, RIVER MILE, is the cross-section identification number. Miles (or kilometers) upstream from the mouth are recommended.

Column 2, ASSUMED, is the assumed water surface elevation which must agree to within ± 0.05 feet, or some allowable tolerance, with the resulting computed water surface elevation for trial calculations to be successful.

Column 3, COMPUTED, is the rating curve value for the first section but, thereafter, is the value calculated by adding ΔWS to the computed water surface elevation for the previous cross section (Section 5.13).

Column 4, A, is the cross section area. If the section is complex and has been subdivided into several parts (e.g., left overbank, channel and right overbank) use one line of the form for each subsection and sum to get A_t , the total area of cross section (Section 5.04).

Column 5, R, is the hydraulic radius. Use the same procedure as for column 4 if section is complex, but do not sum subsection values (Section 5.04).

Column 8, K, is conveyance and is defined as $C_m AR^{2/3}/n$ where C_m is 1.0 for metric units or 1.486 for English units. If the cross section is complex, sum subsection K values to get K_t (Section 5.04).

Column 9, \bar{K}_t , is average conveyance for the reach, and is calculated by $0.5 (K_{td} + K_{tu})$ where subscripts d and u refer to downstream and upstream ends of the reach, respectively (Section 5.07).

Column 10, \bar{S}_f , is the average friction slope through the reach determined by $(Q/\bar{K}_t)^2$ (Section 5.07).

Column 11, L, is the distance between cross sections; different values may be used in each strip (Section 5.02).

Column 12, h_f , is energy loss due to friction through the reach and is calculated by $h_f = (Q/\bar{K})^2 L$ (Section 5.07).

Column 13, K $(K/A)^2$, is part of the expression relating distributed flow velocity to an average value. If the section is complex, calculate one of these values for each subsection and sum all subsection values to get a total. If one subsection is used, Column 13 is not needed and α (Column 14) equals one (Section 5.05).

Column 14, α , is the velocity distribution coefficient and is calculated by $\sum K(K/A)^2 / K_t (K_t/A_t)^2$ where the numerator is the sum of values in column 12 and the denominator is calculated from K_t and A_t (Section 5.05).

Column 15, V, is average velocity and is calculated by Q/A_t .

Column 16, $\alpha V^2/2g$, is the average velocity head corrected for flow distribution (Section 5.05).

Column 17, $(\Delta\alpha V^2/2g)$, is the difference between velocity heads at the downstream and upstream sections. A positive value indicates velocity is increasing, therefore, use a contraction coefficient for "other losses". A negative value indicates the expansion coefficient should be used in calculating "other losses" (Section 5.01).

Column 18, h_o , is "other losses," and calculated with either C_e or C_c (Section 5.09).

Column 19, ΔWS , is the change in water surface elevation from the previous cross section. It is the algebraic sum of columns, 12, 17 and 18.