

원형관에서 상대수심을 고려한 점변류 해석

Analysis of Gradually Varied Flow Considering Relative Depth in Circular Pipe

김민환 · 박정희 · 송창수*

Kim, Minhwan · Park, Junghee · Song, Changsoo*

호남대학교 토목환경공학과

(2006년 12월 12일 논문 접수; 2007년 5월 29일 최종 수정논문 채택)

Abstract

When we use the circular pipes for wastewater and storm water, we should be known the characteristics of the flow for accurate design. To elevate the design accuracy, we want to know the profile of flow. The roughness coefficient in the Manning equation is constant, but in actuality changed with the relative depth in circular pipe. This study was conducted to calculate the relative normal depth in changing the roughness coefficient (named relative roughness coefficient) with the relative depth in the analysis of gradually varied flow in the circular pipe by Newton-Raphson method. We performed the analysis of gradually varied flow using the relative normal depth and the relative roughness coefficient. We presented the 12 flow profiles with the relative depth and the relative roughness coefficient in circular pipe. The flow classification considering relative depth in circular pipe is available to analyse gradually varied flow profiles.

Key words: gradually varied flow, relative depth, normal depth, roughness coefficient of Manning, hydraulic characteristic curve, flow profile

주제어: 점변류, 상대수심, 등류수심, Manning의 조도계수, 수리특성곡선, 수면곡선

1. 서 론

하수나 우수 배수를 위해 원형관이 사용되기도 한다. 최근에 하천수의 수질 오염을 감소시키기 위해 하수 관로의 확충과 정비 사업이 전국을 대상으로 수행되고 있다. 하수관로나 우수 배수를 위한 원형관의 설계를 위해서 흐름의 특성을 파악해야 한다. 관의

손상이나 수로 내의 침식을 야기시키는 과도한 유속을 방지하기 위해 대부분 배수를 위한 관의 설계에 흐름의 상태가 상류인 완경사 흐름이 되어야 한다. 또한 과도한 경사를 갖는 관로 계획은 지표면으로부터 상당한 깊이까지 굴착을 함으로서 시공비가 과대해 질 수 있다. 원형 단면을 갖는 관로 설계에 대한 정확성을 높이기 위해 관로 내의 흐름의 파악이 중요하다.

*Corresponding author Tel: +82-62-940-5467, FAX: +82-62-940-5080, E-mail: cssong@honam.ac.kr (Song, C.S.)

관의 흐름 해석을 위해 Zaghoul 등(1993)은 직접 측차방법에 의해 흐름을 파악할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 전체 구간을 소구간으로 나누어 각 구간에 에너지 개념을 적용한 것이며 그 결과를 일정한 수심 간격으로 수면형상을 표시되도록 구성하여 제시하였다. Zaghoul 등은 이 방법에 의해 원형관에서 점변류 해석을 수행하기 위해 Manning 공식을 적용하였다. 이 공식을 사용하기 위해서는 관의 재료에 따라서 적용되는 Manning의 조도계수가 필요하다. 조도계수는 관의 재료에 따라서 0.009(PVC, 합성수지)에서부터 0.035(매끈하고 균일한 암반수로)의 값이 사용된다(Chow, 1959). 통상적으로 설계에서 선택된 상업용 관의 재료에 따라서 Manning의 조도계수가 채택되어 상수로 취급된다. 실제로 조도계수 값은 원형관에서 상대수심에 따라서 변하며, 상대수심에 따라서 조도계수 값, 유량비, 유속비를 나타낸 수리특성곡선이 Chow(1959)에 의해 제시되었다.

본 논문에서는 원형관에 대한 점변류 해석에 필요한 등류수심을 구하기 위해 기존의 방법과 다르게 상대 조도계수를 적용하여 상대 등류수심을 구하는 방법을 제시하고 그 등류수심을 이용하여 점변류 해석을 수행한다. 이 결과를 상수 조도계수에 의해 산정된 결과와 비교하고 점변류의 12개 영역에 대해 상대수심에 따른 수면곡선을 제시한다.

2. 원형관에서 상대 조도계수

일반적으로 하수관이나 우수관의 설계를 위해 등류에 대한 Manning의 공식이 사용된다. 이 때 Manning의 조도계수는 상대수심에 관계없이 재료에 따라서 상수로 가정하여 적용되어 왔다. 실제 관의 흐름에서 상대수심에 따라 흐름에 대한 저항은 변하는 것으로 알려져 있다. 관의 상대수심에 따른 조도계수의 변화에 대한 실험을 통해서 얻어진 자료를 분석한 결과(Camp, 1946), 관의 일부만을 차서 흐르는 경우의 조도계수 n 이 완전히 충전되어 흐르는 경우의 조도계수 n_0 보다 크며 이 관계를 상대수심 (y/d) 에 따라서 조도계수 값의 비 (n/n_0) 로 나타냈다. 이 관계 곡선은 Fig. 1과 같으며, 상대수심 $y/d=0.25$ 일 때 조도계수 값 $n/n_0=1.28$ 로 최대를 나타내고 있다. 이 곡선

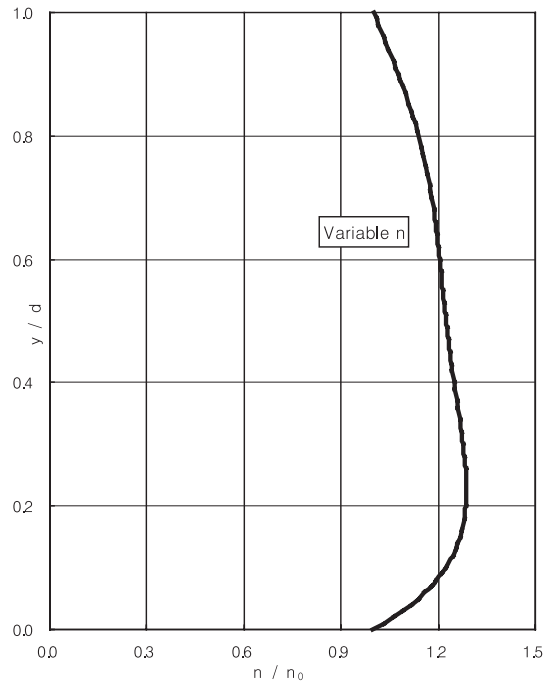


Fig. 1. Relative roughness coefficient.

에 대해 고차 다항식을 이용하여 근사적인 곡선식으로 나타내면 다음과 같다(Zaghoul, 1997).

$$\begin{aligned} (n/n_0) = & 0.9987 + 3.4616(y/d) - 14.7108(y/d)^2 \\ & + 27.2574(y/d)^3 - 23.4963(y/d)^4 \\ & + 7.4909(y/d)^5 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 y 는 관에서 수심, d 는 관의 직경이다. 이 때 n 은 상대수심에 따라서 변하기 때문에 상대 조도계수라고 부른다. 상대 조도계수는 유량의 비 (Q/Q_0) 와 유속의 비 (V/V_0) 에도 영향을 준다. 첨자 0은 관에서 흐름이 충전되어 흐를 때를 나타낸다. 이와 같이 상대수심에 따른 상대 조도계수를 반영하여 나타낸 수리특성곡선을 Fig. 2에 나타냈다. 상대수심을 고려한 상대 조도계수 식 (1)을 이용한 수리특성곡선에서 유량비 (Q/Q_0) 는 수심비가 0.97일 때 1.04로 최대이며, 유속비 (V/V_0) 는 수심비가 0.94일 때 1.05로 최대이다. 이 값은 유량비와 유속비를 상대수심에 대해 미분하여 0으로 놓고 구할 수 있다. 조도계수가 상수일 때와 비교하여 Table 1에 정리하였다. 상대수심을 고려한 상대 조도계수를 적용한 결과, 유량비와 유속비가

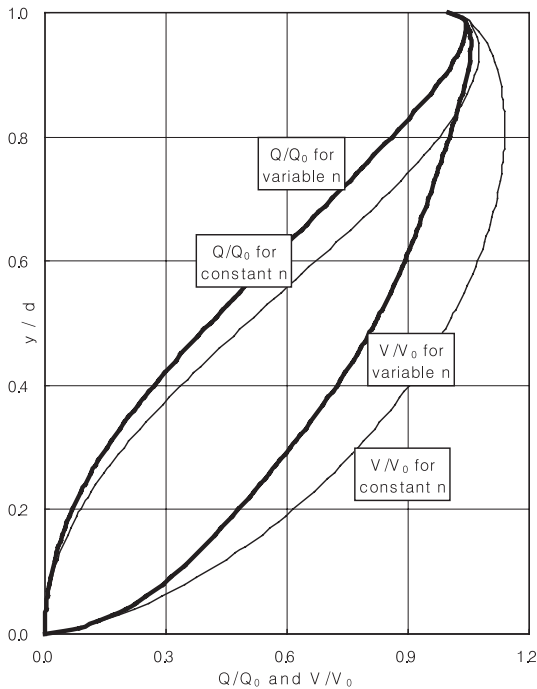


Fig. 2. Ratio of flowrate and velocity with relative depth.

Table. 1. Ratio of flowrate and velocity with relative depth

	max. ratio of flowrate/ relative depth	max. ratio of velocity/ relative depth
constant roughness coefficient	1.08/0.94	1.14/0.81
relative roughness coefficient	1.04/0.97	1.05/0.94

감소됨을 알 수 있다. 특히 상대수심이 0.72에서 유량비에 대한 상대오차가 14.7%로 나타났으며, 상대수심이 0.53에서 유속비에 대한 상대오차가 17.8%로 나타났다.

조도계수를 상수로 가정하였을 때 상대수심의 비가 0.5와 1.0에서 유속의 비는 $V/V_0=1$ 로 같다. 그러나 상대 조도계수를 이용하면, 상대수심의 비가 0.8과 1.0에서 유속의 비는 $V/V_0=1$ 로 같다. 이와 같이 상대 조도계수는 유량과 유속의 비에 영향을 줄 뿐만 아니라 에너지 경사에도 영향을 준다. Manning 공식(김민환, 2004, 우효섭, 2001)을 사용하여 에너지 경사(S_f)를 나타내면 다음과 같다.

$$S_f = \left(\frac{nQ}{AR^{2/3}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 Q 는 유량, A 는 관의 면적, R 은 동수반경, n 은 상대 조도계수로서 식 (1)을 사용한다. Fig. 1에 나타난 것처럼 상대수심이 0과 1일 때를 제외하고 상대 조도계수가 1보다 크므로 유량과 관의 크기가 주어질 때 상대 조도계수를 이용하여 구한 에너지 경사가 상수 조도계수를 이용한 것 보다 크게 나타난다. 상수 조도계수와 상대 수심에 따른 상대 조도계수에 의해 수리특성(유량비, 유속비)이 다를 수 있다. 이를 근거로 본 논문의 연구 대상인 원형관의 점변류에 대해 상대수심에 따른 상대조도계수를 적용하여 흐름을 분류함으로써 기존 Zaghoul 등(1993)의 점변류 해석을 개선하려고 한다.

3. 상대수심을 고려한 등류수심과 한계수심 계산

원형관에서 직경과 수심에 의해 기하학적 특성을 나타낼 수 있으며, 유량(혹은 유속), 조도계수, 에너지와 운동량 원리에 의해 수리학적 특성을 나타낼 수 있다. Zaghoul 등(1993)은 원형관에서 흐름 해석을 위해 무차원 수리학적 특성을 이용하였다. 수리학적 특성으로 상대 등류수심, 상대 한계수심, 무차원 비에너지 등이 있다. 이와 같은 특성 변수에 의해 점변류에 대한 흐름을 분류하였으며 이를 토대로 점변류 해석을 수행하였다. Zaghoul 등(1993)은 상대 등류수심(relative normal depth), 상대 한계수심(relative critical depth)을 구하기 위해 다음과 같은 식을 각각 이용하였다.

$$\frac{AR^{2/3}}{d^{8/3}} = \frac{Qn_0}{\sqrt{S_0 d^{8/3}}} \quad (3)$$

$$\frac{A\sqrt{D}}{d^{2.5}} = \frac{Q}{\sqrt{g/\alpha d^{2.5}}} \quad (4)$$

여기서 S_0 는 하상경사이고, α 는 에너지 보정계수, g 는 중력가속도, D 는 수리수심, n_0 는 상수 조도계수이다. 식 (3)은 Manning 공식을 변형시킨 것이며 식 (4)는 한계류 조건으로부터 유도된 단면계수이다. Zaghoul 등(1993)은 유량, 상수 조도계수, 관의 직경

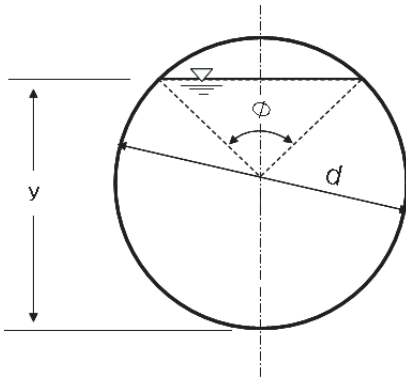


Fig. 3. Circular section.

이 주어질 때 식 (3)과 (4)를 만족하는 상대수심을 구하기 위해 반복법을 이용하였으며 식 (3)에 의해 구한 상대 등류수심은 상수 조도계수를 이용하였다.

본 논문에서는 Manning 공식을 이용하고 이 식을 상대수심에 따른 중심각의 변수로 변환하여 등류수심에 해당하는 중심각을 구하고 이를 상대 등류수심으로 변환시켰다. 이 때 상수 조도계수 대신에 식 (1)을 이용하여 상대 조도계수를 적용하고 Newton-Raphson 법에 의해 등류수심에 해당하는 중심각을 구하였다. 직경이 d , 수심이 y 일 때 단면의 중심각이 ϕ 인 원형 단면은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 수심이 y 일 때 단면적 A , 윤변 P , 동수 반경 R 을 중심각 ϕ 로 나타내면 다음과 같다.

$$A = \frac{d^2}{4} \left(\pi - \frac{\phi}{2} + \frac{\sin \phi}{2} \right) \quad (5)$$

$$P = d \left(\pi - \frac{\phi}{2} \right) \quad (6)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{d}{4} \left(1 + \frac{\sin \phi}{2\pi - \phi} \right) \quad (7)$$

이 식들을 이용하여 상대 등류수심에 해당하는 중심각 ϕ 를 구하기 위하여 Manning 공식을 이용한다.

$$AR^{2/3} - \frac{Qn}{\sqrt{S_0}} = 0 \quad (8)$$

식 (8)에 식 (5)와 (7), 식 (1)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(\phi) = & \frac{d^{8/3}}{4^{5/3}} \left[\left(\pi - \frac{\phi}{2} + \frac{\sin \phi}{2} \right) \left(1 + \frac{\sin \phi}{2\pi - \phi} \right)^{2/3} \right] \\ & - \frac{Qn}{\sqrt{S_0}} \left[n_0(0.9987 + 3.4616 \left(\frac{y}{d} \right) \right. \\ & - 14.7108 \left(\frac{y}{d} \right)^2 + 27.2574 \left(\frac{y}{d} \right)^3 \\ & \left. - 23.4963 \left(\frac{y}{d} \right)^4 + 7.4909 \left(\frac{y}{d} \right)^6 \right] \quad (9) \end{aligned}$$

여기서 Fig. 3을 참고하여 상대수심을 중심각으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{y}{d} = \frac{\cos \frac{\phi}{2} + 1}{2} \quad (10)$$

그러므로 식 (9)는 유량 Q , 관의 경사 S_0 , 관의 재료에 따른 상수 조도계수 n_0 가 주어지면 중심각 ϕ 만의 함수이다. 이 식을 Newton-Raphson 방법의 반복법에 의해 ϕ 를 구하면 상대 등류수심에 해당하는 중심각을 구할 수 있으며 이 중심각을 식 (10)에 대입하면 상대 등류수심이 결정된다. Newton-Raphson 방법에 의한 해는 다음과 같다.

$$\phi_{i+1} = \phi_i - \frac{f(\phi_i)}{f'(\phi_i)} \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f'(\phi) = & \frac{d^{8/3}}{4^{5/3}} \left[\left(-\frac{1}{2} + \frac{\cos \phi}{2} \right) \left(1 + \frac{\sin \phi}{2\pi - \phi} \right)^{2/3} \right. \\ & + \frac{2}{3} \left(\pi - \frac{\phi}{2} + \frac{\sin \phi}{2} \right) \left(1 + \frac{\sin \phi}{2\pi - \phi} \right)^{-1/3} \\ & \left. \left(\frac{\sin \phi}{2\pi - \phi} + \frac{\sin \phi}{(2\pi - \phi)^2} \right) \right] \\ & - \frac{Qn_0}{4\sqrt{S_0}} \sin \frac{\phi}{2} \left[(-3.4616 + 14.7108 \right. \\ & \left. \times 2 \left(\frac{\cos \frac{\phi}{2} + 1}{2} \right) - 27.2574 \times 3 \left(\frac{\cos \frac{\phi}{2} + 1}{2} \right)^2 \right] \quad (12) \end{aligned}$$

$$+ 23.4963 \times 4 \left[\frac{\cos \frac{\phi}{2} + 1}{2} \right]^3 - 7.4909 \times 5 \left[\frac{\cos \frac{\phi}{2} + 1}{2} \right]^4$$

그리고 상대 한계수심을 구하기 위해 한계류 조건을 나타내는 단면계수를 이용한다.

$$A\sqrt{D} - \frac{Q}{\sqrt{g/\alpha}} = 0 \tag{13}$$

유량 Q 가 주어지면 이 식의 두 번째 항은 상수가 되고 첫 번째 항에 식 (5)와 $D=A/T$ (여기서 $T=d \sin \phi/2$)를 대입하면 $f(\phi) = 0$ 의 형태로 변환된다. 이 식을 Newton-Raphson 방법에 의해 풀면, 중심각 ϕ 를 구할 수 있다. 이 중심각을 식 (10)에 대입하면 상대 한계수심이 결정된다.

Zaghloul 등(1993)은 상대 등류수심과 상대 한계수심을 구하기 위해 식 (3)과 (4)를 이용하였다. Zaghloul 등의 논문에서 사용된 예를 소개하면 유량 $Q = 350\text{fs}$, 직경 $d = 10\text{ft}$, Manning의 조도계수 $n_0 = 0.012$, 수로경사 $S_0 = 0.001$ 일 때 이 경우의 상대 등류수심과 한계수심을 Table 2에 제시하였다(단위환산 계수 1.49 적용). 본 논문에서는 상대수심에 따른 상대 조도계수를 이용하여 구한 등류수심을 Table 2에 제시하고 그 결과를 비교하였다. 상대 등류수심을 구하기 위해서는 식 (11)을 이용하였다. 한계수심을 구하기 위한 단면계수는 조도계수와 무관하기 때문에 상대 한계수심의 결과는 동일하게 계산된다.

등류수심과 한계수심의 상대적 크기에 따라 일반적인 점변류 분류에서 완경사와 급경사로 구분되는 중요한 인자이다. 그러므로 원형관에서 조도계수를 상수로 취급하여 제시한 Zaghloul 등(1993)의 흐름의

형태를 개선하고자 한다.

4. 수면곡선의 분류와 계산

제3장에서 계산된 등류수심과 한계수심은 흐름을 분류하고 계산하는 기준으로 사용되는 중요한 값이다. 등류수심과 한계수심의 상대적 크기에 따라서 흐름을 완경사, 한계경사, 급경사로 분류되며 이 때 흐름은 常流, 限界流, 射流가 된다. 일반적으로 개수로 수리학에서 점변류의 분류는 등류수심선과 한계수심선 상대적인 크기에 따라서 완경사(Mild slope, M곡선) 수로와 급경사 수로(Steep slope, S곡선)로 구분하고, 이 흐름은 각각 3개의 영역으로 구분된다. 한계경사(Critical slope, C곡선) 수로에서는 2개의 영역, 하상이 수평인 수평(Horizontal, H곡선) 수로에서는 한계수심을 기준으로 2개 영역이 존재한다. 역경사(Adverse slope, A곡선) 수로에서도 수평수로에서 같이 2개 영역의 흐름이 존재하기 때문에 총 12개의 흐름 영역이 존재한다(김민환, 2004, 우효섭, 2001). 본 논문에서도 단면이 원형인 수로에 대해 12개의 흐름으로 분류하고 상대수심에 따라서 흐름을 계산한다. 상대 조도계수를 사용하여 얻은 상대 등류수심과 한계수심을 이용하여 12개의 흐름 영역에 대해 수면곡선을 제시하려고 한다. 우선 12개의 수면곡선 중 M1곡선은 점변류의 완경사 흐름으로 관내 점변류 수심이 등류수심보다 크면서 배수곡선(backwater curve)을 형성한다. M1곡선은 흐름의 상태가 상류(常流)이므로 수면곡선은 하류통제를 받는다. 그러므로 수면곡선계산 방향은 하류의 지배단면으로부터 상류방향으로 계산한다. M1곡선 형상의 상류단은 등류수심선에 접근하며 하류단은 수평수면에 접근한다. 여기서 M1곡선에 대해 Zaghloul 등(1993)과 본 논문에서 구한 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 그림에서 가로축은 상대거리, 세로축은 상대수심을 의미한다. 그림에서 보는 것처럼 지배단면에서 상류방향으로 등류수심 101% 지점까지 각 각 수면곡선을 계산하였다. 등류수심과 상대 등류수심의 차이로 인해 수면곡선은 약간 상이함을 알 수 있다.

직접측차법을 이용하여 계산된 M1곡선에 대한 결과를 Table 3에 작성하였다. Table 3에서 (12)란과 (13)란의 (-)부호는 하류에서 상류방향으로 계산한

Table 2. Comparison on relative normal depth and critical depth

	Zaghloul etc (1993)	This study
Relative normal depth	0.568	0.629
Relative critical depth	0.443	0.443

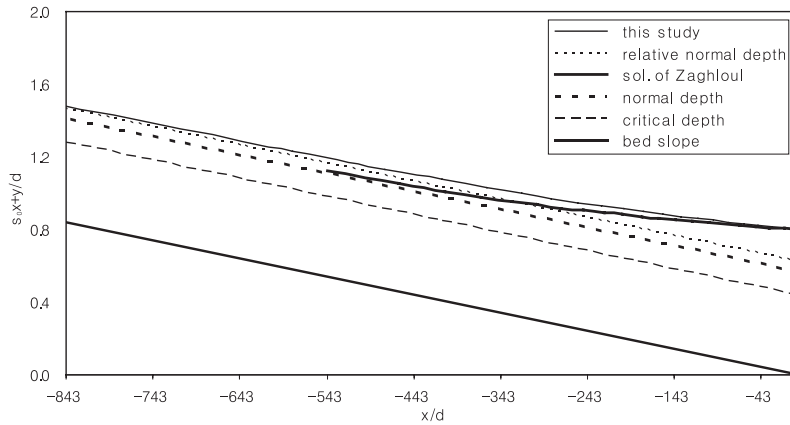


Fig. 4. M1 flow profile.

Table 3. Calculated result of M1 flow profile

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
y/d	A/(d ²)	P/d	R/d	(R/d) ^{4/3}	Q ² /2g(2) ² d ⁵	E/d	S	DE/d	S _e avg	S ₀ -S _e avg	Dx/d	x/d
0.800	0.674	2.214	0.304	0.205	0.042	0.842	5.18E-04					
0.792	0.667	2.194	0.304	0.204	0.043	0.835	5.32E-04	-7.19E-03	5.25E-04	4.75E-04	-15.14	-15.14
0.784	0.661	2.175	0.304	0.204	0.044	0.828	5.47E-04	-7.15E-03	5.40E-04	4.60E-04	-15.54	-30.68
0.776	0.654	2.156	0.303	0.204	0.044	0.82	5.63E-04	-7.11E-03	5.55E-04	4.45E-04	-15.99	-46.67
0.768	0.647	2.136	0.303	0.203	0.045	0.813	5.80E-04	-7.07E-03	5.71E-04	4.29E-04	-16.50	-63.18
0.760	0.640	2.118	0.302	0.203	0.046	0.806	5.97E-04	-7.03E-03	5.88E-04	4.12E-04	-17.08	-80.26
0.752	0.634	2.099	0.302	0.202	0.047	0.799	6.15E-04	-6.99E-03	6.06E-04	3.94E-04	-17.74	-98.00
0.744	0.627	2.081	0.301	0.202	0.048	0.792	6.34E-04	-6.94E-03	6.25E-04	3.75E-04	-18.50	-116.50
0.736	0.620	2.062	0.300	0.201	0.050	0.786	6.54E-04	-6.90E-03	6.44E-04	3.56E-04	-19.39	-135.89
0.728	0.613	2.044	0.300	0.200	0.051	0.779	6.75E-04	-6.85E-03	6.65E-04	3.35E-04	-20.43	-156.31
0.720	0.605	2.026	0.299	0.200	0.052	0.772	6.97E-04	-6.80E-03	6.86E-04	3.14E-04	-21.67	-177.98
0.712	0.598	2.009	0.298	0.199	0.053	0.765	7.21E-04	-6.74E-03	7.09E-04	2.91E-04	-23.17	-201.15
0.704	0.591	1.991	0.297	0.198	0.054	0.758	7.45E-04	-6.68E-03	7.33E-04	2.67E-04	-25.03	-226.18
0.696	0.584	1.974	0.296	0.197	0.056	0.752	7.71E-04	-6.62E-03	7.58E-04	2.42E-04	-27.38	-253.56
0.688	0.576	1.956	0.295	0.196	0.057	0.745	7.98E-04	-6.56E-03	7.85E-04	2.15E-04	-30.46	-284.02
0.680	0.569	1.939	0.293	0.195	0.059	0.739	8.27E-04	-6.49E-03	8.13E-04	1.87E-04	-34.65	-318.68
0.672	0.561	1.922	0.292	0.194	0.060	0.732	8.57E-04	-6.42E-03	8.42E-04	1.58E-04	-40.69	-359.37
0.664	0.554	1.905	0.291	0.193	0.062	0.726	8.89E-04	-6.35E-03	8.73E-04	1.27E-04	-50.13	-409.49
0.656	0.546	1.888	0.289	0.191	0.064	0.72	9.23E-04	-6.27E-03	9.06E-04	9.36E-05	-66.95	-476.45
0.648	0.539	1.871	0.288	0.190	0.066	0.714	9.59E-04	-6.18E-03	9.41E-04	5.87E-05	-105.37	-581.82
0.640	0.531	1.855	0.286	0.189	0.068	0.708	9.97E-04	-6.09E-03	9.78E-04	2.17E-05	-281.06	-862.87

방향을 의미한다.

Table 3에서 (1)열은 상대수심이며 원형관의 수로 경사($S_0 = 0.001$)를 고려하여 Fig. 4의 세로좌표에, (13)열의 값은 수심에 대한 거리의 비로서 가로좌표에 나타냈다. 자연하천과는 다르게 단면형이 일정한 원형인 경우에 상대수심에 따라 수리특성을 파악할 수 있는 장점이 있다. 원형관에서 점변류의 수면형을

상대수심과 상대거리로 나타냄으로서 설계에 도움이 된다. 여기서 사용된 직접축차계산법은 수면곡선을 구하고자하는 구간을 여러 개의 소구간으로 나누어 지배단면에서부터 축차적으로 계산해 나간다(김민환 2004, 우효섭, 2001). 나머지 흐름에 대해서도 M1 곡선을 구하는 절차와 동일하게 상대 조도계수와 상대 등류수심을 적용하여 구하며 12개 흐름에 대한 수면

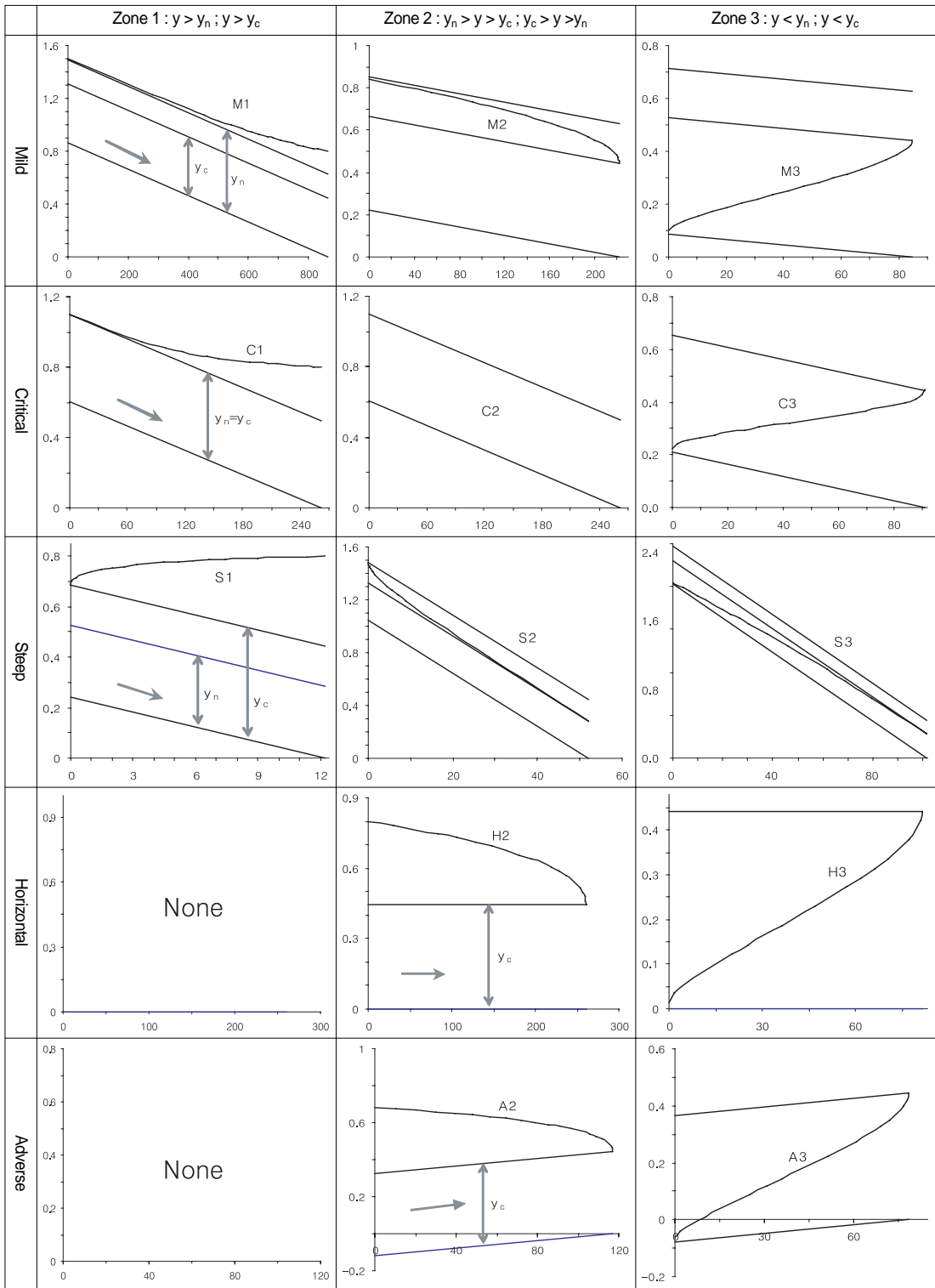


Fig. 5. 12 Flow profile of gradually varied flow.

곡선을 Fig. 5에 제시하였다.

본 논문에서 제시된 수면곡선은 상대 조도계수를 고려한 것으로 Zaghoul 등(1993)이 제시한 수면곡선을 개선한 결과로 볼 수 있다.

5. 결 론

Zaghoul 등은 원형관에서 점변류 해석을 수행하기 위해 Manning 공식을 적용하였다. 이 공식을 사용하기 위해서는 관의 재료에 따라서 적용되는 Manning의 조도계수가 필요하다. 통상적으로 설계에서 선택된 상업용 관의 재료에 따라서 Manning의 조도계수가 채택되어 상수로 취급된다. 실제로 조도계수 값은 원형관에서 상대수심에 따라서 변하기 때문에 이를 원형관의 점변류 해석에 적용하였다.

본 논문에서는 상대 조도계수를 적용하여 Newton-Raphson 방법에 의해 상대 등류수심과 한계수심을 구하는 식을 유도하였다.

그리고 상대수심에 따른 상대 조도계수를 적용한 결과, 원형관에서의 상수 조도계수를 사용한 값보다 에너지 경사가 크게 나타났다. 상수 조도계수를 이용하여 상대 등류수심과 한계수심을 구한 결과와 상대수심에 따른 상대 조도계수를 이용하여 구한 결과를 비교하여 그 차이를 제시하였다. 계산된 등류수심과 한계수심은 흐름을 분류하고 계산하는 기준 값으로 사용되는 중요한 값이며 본 논문에서는 상대수심을

고려한 결과이므로 기존의 방법에 의해 구한 결과를 개선하였다고 판단할 수 있다. 이 결과를 이용하여 등류수심과 한계수심의 상대적 크기와 하상경사에 따라서 일반적인 개수로 점변류 해석과 같이 12개의 흐름 영역으로 분류하여 제시함으로써 각각의 흐름에 대한 원형관의 설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2006학년도 호남대학교 교내 연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김민환 (2004) *수리학*, 도서출판 새론, 서울, pp. 188-215.
2. 우효섭 (2001) *하천수리학*, 청문각, 서울, pp. 137-141.
3. Zaghoul N.A. and Marwan M.S. (1993) Computer simulation of gradually varied flow profiles in circular sections, *Advances in Engineering Software*, **16**, pp. 37-46.
4. Chow V.T. (1959) *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, pp. 109-136.
5. Camp, T.D. (1946) Design of sewers to facilitate flow, *Sewage Works*, **18**, pp.1-16
6. Zaghoul N.A. (1997) Unsteady gradually varied flow in circular pipes with variable roughness, *Advances in Engineering Software*, **28**, pp. 115-131.