

균일조도 동력경사관의 양해법 설계 Explicit Design of Uniformly-Rough Pipe on a Slope with Pumping Power

유 동 훈* · 강 찬 수*
Yoo, Dong Hoon · Kang, Chan Soo

Abstract

When a pipe is deployed on a sloping bed, pumping power required for a discharge can be estimated immediately without any iteration process with an explicit form of a friction factor equation. Pumping power being given, however, traditional method requires an iteration process for the solution of discharge and pipe diameter even for the uniformly-rough pipe. Yoo (1995b) has suggested explicit equations for the estimation of discharge and pipe diameter particularly for the cases of pipe on a sloping bed without pumping and pipe on a horizontal bed with a pumping power. Based on his approach and previous results, the present researchers have developed explicit equations of discharge and pipe diameter for the general case of pipe on a sloping bed with a pumping power. The equations of boundary criteria are also presented in explicit way which render proper choice of various equations suitable for the flow condition between five characteristics. Verification studies are also carried out by applying the explicit equations to a practical example.

요 지

균일조도관이 경사지에 설치되어 있을 때, 적정량의 유체를 유송하기 위하여 요구되는 펌프의 동력은 양해법으로 바로 산정할 수 있다. 그러나 펌프의 동력이 기지값으로 주어지고 관내 유출률이나 관경을 구하고자 할 때 기존 방법은 상당한 반복과정을 거쳐야 된다. 이러한 경우 유동훈(1995b)은 펌프가 작동치 않는 자연경사관이나 수평관에 펌프만 작동할 때의 균일조도관에 대하여 양해법 산정식을 개발한 바 있다. 본 연구는 그의 연구결과에 기초하여 균일조도 경사관에 펌프가 동시에 작동할 때 반복 시산과정을 거치지 않고 관내 유출률이나 관경을 양해법으로 바로 산정하는 수식을 개발하여 제시하였다. 양해법 산정식의 선택에 있어 관로흐름의 수리특성을 다섯가지로 구분하여 각 수리 특성구간의 경계조건식도 양해법으로 도출하였다. 또한 개발된 양해법 근사식을 간단한 설계예에 적용하여 계산의 효율성과 정확성을 확인하였다.

* 亞洲大學校 工科大学 土木設計工學科

1. 서 론

최근 컴퓨터 기술의 급진적인 발달과 PC의 대중화로 어느 정도 복잡한 수식이나 반복과정을 거쳐 해를 구해야 되는 수식도 설계에 용이하게 이용할 수 있다. 그러나 여러 방안중 하나를 선택하여야 하는 기초설계시 구하고자 하는 해를 양해법으로 즉시 구할 수 있다면 최적방안 선택에서의 반복과정을 상당히 줄일 수 있으며, 반복과정으로 해를 구할시 발생할 수 있는 오류를 쉽게 발견할 수 있다. 더욱이 복잡한 관망에 대하여 펌프동력과 관경을 적절히 조합하여 최적한 용량을 산정하는 문제와 같은 최적설계에는 무수히 많은 반복과정을 거쳐야 하는데 각 관로마다 양해법 산정식이 개발되어 있으면 계산효율을 파격적으로 증진시킬 수 있다. 신영석(1995)은 최적화 과정에 있어 해의 단순화는 계산효율의 증진을 위하여 필수적인 단계임을 밝힌 바 있다.

유체를 수송하는 관이 경사지에 설치되어 있을 때라도 적정량의 유체를 유송하기 위하여 요구되는 펌프의 동력은 양해법으로 바로 산정할 수 있다. 그러나 펌프의 동력이 기지값으로 주어지고 관내 유출물이나 관경을 구하고자 할 때 기존 방법은 상당한 반복과정을 거쳐야 한다. 특히 균일조도관인 경우 관내의 마찰흐름 특성은 층류, 천이층류, 난류, 천이난류, 전난류 등 다섯가지의 흐름 특성중 하나로 뚜렷이 구분되고 각 흐름특성별로 산정식의 형태가 다르기 때문에 반복과정에 수렴조건이 만족되지 못하여 해를 구하기 매우 곤란한 경우도 있다.

관로설계와 관련된 물리량을 산정하는 문제에 있어 양해법으로 해를 구하고자 하는 연구는 이미 여러 연구자들이 시도한 바 있다. Li(1974)는 적합관경을 구하는 문제에 있어 Colebrook-White식을 상용관의 마찰계수를 산정하는 기준식으로 사용하고 관로경사, 관경, 유량, 조고, 점성계수 등을 조합하여 세계의 무차원수를 추출한 후 이들의 관계를 도표로 작성하여 직접 해를 구할 수 있도록 하였다. Simon(1986)은 이디오피아의 Asthana도 유량을 직접 구할 수 있는 관계도표를 작성하였음

을 밝힌 바 있는데 Asthana는 Li와 마찬가지로 Colebrook-White식을 상용관의 마찰계수를 산정하는 기준식으로 사용하고 관경레이놀즈수, 조고레이놀즈수, 조고비 등 네가지 무차원수를 도출한 후 이들의 관계를 도식화하였다. 한편 영국의 수리시험소(Hydraulic Laboratory, 1990)도 Colebrook-White식 또는 이의 양해법 산정식인 Barr(1975)식을 이용하여 관마찰계수를 산정하고 임의 조건에 대하여 관경, 유량 등을 직접 구할 수 있는 표를 작성하여 제시하였다. 그 표는 150 페이지에 이르는 방대한 분량이지만 온도 15°C의 물의 유송에 제한을 두었고 여타 유체의 유송은 전혀 고려치 않았다.

이들의 연구결과에는 몇가지 문제점이 내포되어 있으며 근본적으로 또는 부분적으로 개선될 여지가 많이 있는 것으로 사료된다. 첫째, 그들의 연구결과는 표나 그림으로 제시되어 있기 때문에 임의 조건에 대한 해를 구하고자 할 때 내삽법에 의한 별도의 해석이 필요하거나 그림을 독취할 때 개인별로 약간씩 상이한 오차가 발생할 가능성이 있다. 둘째, 이들 결과를 최적화 수치모형이나 정밀해를 구하기 위한 1차 근사해로 이용코자 할 때 별도의 수식개발이 필요하다. 셋째, 이들이 상용관 마찰계수의 기준식으로 이용하였던 Colebrook-White식은 유동훈(1995a), 유동훈과 원유승(1995), 유동훈과 한상호(1996) 등이 밝힌 바와 같이 근본적인 모순점을 내포하고 있다. 즉 Colebrook-White식은 매끈한 면의 분포율과 거칠은 면의 분포율의 합을 200%로 가정하였기 때문에 근본적인 모순을 갖고 있고, 매끈한 면은 항상 수리학적으로 매끈한 면으로 존재한다고 단정하였으며, 상용관의 조고는 관의 종류와 관경에 따라 변이할 수 있음에도 불구하고 등가조고를 관의 종류에 따른 조고의 평균값으로 고정하고 있다. 넷째, 이상의 기존 연구에는 자연경사관에 펌프동력을 추가하였을 경우에 대한 일반적인 조건을 전혀 고려하지 않았다. 따라서, 관로설계를 위한 관련 물리량의 양해법 해석을 위해서도 상용관 마찰계수에 대한 보다 합당한 산정식의 도입이 필요하고, 가능하면 수식으로의 표현이 바람직하며, 자연경사관에 펌프동력이 동시에

작용하는 일반적인 경우에 대한 해석이 요망된다.

유동훈(1995b)은 펌프가 작동치 않는 자연경사관이나 수평관에 펌프만 작동할 때의 균일조도관에 대하여 양해법 산정식을 개발한 바 있다. 그의 기본 아이디어는 완난류의 일부 구간에만 적합한 Blasius식과 같이 관마찰계수 산정식이 지수함수 형태로 표현될 때 펌프동력을 구하는 문제나, 유출률 또는 적합한 관경을 산정하는 문제나 모두 양해법 산정식을 개발할 수 있다는 점에 있다. 따라서 그는 Nikuradse(1933)의 실험자료로부터 도출한 균일조도관의 마찰계수 분포에 근거하여 모든 구간에 대한 관마찰계수 산정식을 지수함수 형태로 표현하고 펌프동력과 지형경사가 포함된 여러 무차원수를 도입한 후 두가지의 이상적인 경우에 대하여 양해법 산정식을 개발한 바 있다. 두가지 이상적인 경우라 하면 수평관에 펌프만 작동하는 경우와 경사관에 펌프가 작동치 않는 경우이다.

표 1에 제시된 바와 같이 관로 설계는 세가지로 구분되는데 설계구분 A는 펌프동력을 산정하는 경우이며, 설계구분 B는 유출률 또는 유속을 결정해야 하는 경우이고, 설계구분 C는 적합한 관경을 선정하는 경우이다. 이중 유동훈(1995b)은 균일조도관에 대하여 수평경사관 ($i=0$)인 경우와 무동력($P=0$)인 경우에 대하여 각각 양해법 산정식을 개발한 바 있는데, 보다 일반적인 설계로서는 지형이 경사져 있고 펌프도 작동하는 경우일 것이다. 본 연구도 균일조도관에 한정하였으나 보다 일반적인 조건으로 경사관에 펌프가 동시에 작동할 경우에 대한 해석에 주목하였으며, 이상의 이상적인 경우에 대한 유동훈(1995b)의 연구결과에 기초하여 일반적인 경우의 설계구분 B와 C에 대한 양해법 산정식을 개발하여 제시하였다. 또한 관로흐름은 수리특성에 따라 다섯가지로 구분되는데(유동훈, 1993, 1995a), 각 수리조건의 흐름특성 구간을 판별하는 양해법 산정식도 개발하여 제시하였다. 현재 추진중인 연구는 일반적인 조건에서의 상용관 유속에 대한 양해법 해석인데, 이상의 연구결과를 요긴하게 이용하고 있다.

표 1. 단일관로 설계구분

설계구분	산정요구치	주어지는 조건	비고
A	펌프 동력 P	Q, d, l, k, i	
B	유출률 Q 또는 유속 V	d, l, k, P, i	B-1 ; $i = 0$ B-2 ; $P = 0$
C	관경 d	Q, l, k, P, i	C-1 ; $i = 0$ C-2 ; $P = 0$

<주> P; 펌프의 동력, Q; 유출률, d; 관경, l; 관길이,

k; 조고, i; 경사, V; 평균유속

이상의 세가지 경우 모두 기본 지배방정식은 다음과 같이 펌프동력을 산정하는 식이다.

$$P = \rho g Q \left(f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} - il \right) \quad (1)$$

여기서 P, Q, d, l, k, i, V는 표 1에 주어진 바와 같고, ρ 는 유체의 밀도, g는 중력가속도이며, f는 관마찰계수이다. 수로경사 i는 관로 흐름방향으로 기울어져 있을 때 양의 부호로 정하였으며, 역구배로 관로가 놓일 때 수로경사 i는 음의 부호를 갖는다. 관마찰계수 f의 양해법 산정식은 유(1995b)가 여러 종류를 정리하여 제시한 바 있다. f는 레이놀즈수와 조고비의 함수인데 설계구분 A에서 여러 관련 수치는 주어지는 조건으로 구해지며 이들 독립변수에 관한 양해법 산정식으로 f를 산정하면 설계구분 A에서 펌프동력은 반복과정을 거치지 않고 바로 구할 수 있다. 그러나 유출률을 산정하는 설계구분 B나 관경을 산정하는 설계구분 C는 관마찰계수를 지수함수 이외의 양해법 산정식으로 구하더라도 해를 바로 양해법으로 구할 수 없다. 다음은 관마찰계수를 지수함수식으로 표현하였을 때 이러한 설계구분 B인 유출률 산정과 C인 관경 산정에서도 양해법으로 구할 수 있음을 기술한다.

2. 유출률 산정

설계구분 B는 관경, 관의 길이, 관내 조고와 펌프 동력이 주어져 있을 때 관내 통과 유출률 또는 단면평균유속을 산정하는 문제이다. 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 다섯가지 수리조건에서 각 구간의 관마찰계수 산정식이 다르나 전

작용하는 일반적인 경우에 대한 해석이 요망된다.

유동훈(1995b)은 펌프가 작동치 않는 자연경사관이나 수평관에 펌프만 작동할 때의 균일조도관에 대하여 양해법 산정식을 개발한 바 있다. 그의 기본 아이디어는 완난류의 일부 구간에만 적합한 Blasius식과 같이 관마찰계수 산정식이 지수함수 형태로 표현될 때 펌프동력을 구하는 문제나, 유출률 또는 적합한 관경을 산정하는 문제나 모두 양해법 산정식을 개발할 수 있다는 점에 있다. 따라서 그는 Nikuradse(1933)의 실험자료로부터 도출한 균일조도관의 마찰계수 분포에 근거하여 모든 구간에 대한 관마찰계수 산정식을 지수함수 형태로 표현하고 펌프동력과 지형경사가 포함된 여러 무차원수를 도입한 후 두가지의 이상적인 경우에 대하여 양해법 산정식을 개발한 바 있다. 두가지 이상적인 경우라 하면 수평관에 펌프만 작동하는 경우와 경사관에 펌프가 작동치 않는 경우이다.

표 1에 제시된 바와 같이 관로 설계는 세가지로 구분되는데 설계구분 A는 펌프동력을 산정하는 경우이며, 설계구분 B는 유출률 또는 유속을 결정해야 하는 경우이고, 설계구분 C는 적합한 관경을 선정하는 경우이다. 이중 유동훈(1995b)은 균일조도관에 대하여 수평경사관 ($i=0$)인 경우와 무동력($P=0$)인 경우에 대하여 각각 양해법 산정식을 개발한 바 있는데, 보다 일반적인 설계로서는 지형이 경사져 있고 펌프도 작동하는 경우일 것이다. 본 연구도 균일조도관에 한정하였으나 보다 일반적인 조건으로 경사관에 펌프가 동시에 작동할 경우에 대한 해석에 주목하였으며, 이상의 이상적인 경우에 대한 유동훈(1995b)의 연구결과에 기초하여 일반적인 경우의 설계구분 B와 C에 대한 양해법 산정식을 개발하여 제시하였다. 또한 관로흐름은 수리특성에 따라 다섯가지로 구분되는데(유동훈, 1993, 1995a), 각 수리조건외 흐름특성 구간을 판별하는 양해법 산정식도 개발하여 제시하였다. 현재 추진중인 연구는 일반적인 조건에서의 상용관 유속에 대한 양해법 해석인데, 이상의 연구결과를 요긴하게 이용하고 있다.

표 1. 단일관로 설계구분

설계구분	산정요구치	주어지는 조건	비고
A	펌프 동력 P	Q, d, l, k, i	
B	유출률 Q 또는 유속 V	d, l, k, P, i	B-1 ; $i = 0$ B-2 ; $P = 0$
C	관경 d	Q, l, k, P, i	C-1 ; $i = 0$ C-2 ; $P = 0$

<주> P; 펌프의 동력, Q; 유출률, d; 관경, l; 관길이, k; 조고, i; 경사, V; 평균유속

이상의 세가지 경우 모두 기본 지배방정식은 다음과 같이 펌프동력을 산정하는 식이다.

$$P = \rho g Q \left(f \frac{l V^2}{d 2g} - il \right) \quad (1)$$

여기서 P, Q, d, l, k, i, V는 표 1에 주기된 바와 같고, ρ 는 유체의 밀도, g는 중력가속도이며, f는 관마찰계수이다. 수로경사 i는 관로 흐름방향으로 기울어져 있을 때 양의 부호로 정하였으며, 역구배로 관로가 놓일 때 수로경사 i는 음의 부호를 갖는다. 관마찰계수 f의 양해법 산정식은 유(1995b)가 여러 종류를 정리하여 제시한 바 있다. f는 레이놀즈수와 조고비의 함수인데 설계구분 A에서 여러 관련 수치는 주어지는 조건으로 구해지며 이들 독립변수에 관한 양해법 산정식으로 f를 산정하면 설계구분 A에서 펌프동력은 반복과정을 거치지 않고 바로 구할 수 있다. 그러나 유출률을 산정하는 설계구분 B나 관경을 산정하는 설계구분 C는 관마찰계수를 지수함수 이외의 양해법 산정식으로 구하더라도 해를 바로 양해법으로 구할 수 없다. 다음은 관마찰계수를 지수함수식으로 표현하였을 때 이러한 설계구분 B인 유출률 산정과 C인 관경 산정에서도 양해법으로 구할 수 있음을 기술한다.

2. 유출률 산정

설계구분 B는 관경, 관의 길이, 관내 조고와 펌프 동력이 주어져 있을 때 관내 통과 유출률 또는 단면평균유속을 산정하는 문제이다. 총류, 천이총류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 다섯가지 수리조건에서 각 구간의 관마찰계수 산정식이 다르나 전

난류 구간을 제외하고 나머지 구간에 대하여는 모두 관마찰계수를 Blasius식과 동일한 형태로 표현할 수 있다. 즉,

$$f = \alpha R^\beta \quad (2)$$

여기서 R은 레이놀즈수이며, 상수 α 와 β 는 각 특성구간별로 변이한다(유동훈, 1995b).

이때 지형이 경사져 있는 경우 펌프를 작동시킬 때 펌프동력을 구하는 산정식은 식 (1)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} P &= \rho g Q \left(\alpha R^\beta \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} - i l \right) \\ &= \rho l \frac{\pi}{4} d^2 V \left(\alpha R^\beta \frac{V^2}{2d} - i g \right) \end{aligned} \quad (3)$$

상기식을 전개하여 미지수인 유속이 포함된 레이놀즈수에 관하여 표현하면 식 (4)와 같다.

$$R = R_0 \left(1 + \frac{\pi N^2 R}{4 B^3} \right)^{\frac{1}{3+\beta}} \quad (4)$$

여기서 무차원수 R, B, N은 각각 레이놀즈수, 동력관경수, 레이놀즈-경사 후루드수이며 각각 식 (5), (6), (7)에 제시된 바와 같고, R_0 는 균일조도 수평관($i=0$ 인 경우) 조건에서 계산되는 R을 의미하며 식 (8)에 제시된 바와 같다(유동훈, 1995b). 즉,

$$R = \frac{Vd}{\nu} \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{\nu} \left(\frac{Pd^2}{\rho l} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$N = \frac{\sqrt{gd^3 i}}{\nu} \quad (7)$$

$$R_0 = \left(\frac{8}{\pi \alpha} \right)^{\frac{1}{3+\beta}} B^{\frac{3}{3+\beta}} \quad (8)$$

식 (7)에 의해 산정되는 무차원수 N은 경사 i 의 절대치를 이용하여야 되나, 식 (9)에 제시되어 있듯이 N^2 에서는 오히려 경사 i 의 부호가 부활된다. 즉, 역구배일 때 N^2 은 음의 수치를 갖는다.

$$N^2 = \frac{gd^3 i}{\nu^2} \quad (9)$$

유동훈(1995b)은 R_0 에 대하여 관마찰흐름의 수리조건에 따라 지수함수 형태의 관마찰계수 산정식을 도입하여 양해법 산정식을 개발한 바 있으며, 표 2에 제시된 바와 같다.

상기 표 2에서 층류와 천이층류의 경계조건치 465는 B_{LT} 이며, 천이층류와 완난류의 경계조건치 1017은 B_{TS} 등, 각기 $B_{ST} = 28.6d_k$, $B_{TR} = 206.7d_k$ 이다. 즉 $B < B_{LT}$ 일 때 층류이며, $B_{LT} < B < B_{TS}$ 일 때 천이층류, $B_{TS} < B < B_{ST}$ 일 때 완난류, $B_{ST} < B < B_{TR}$ 일 때 천이난류,

표 2. 관마찰흐름의 수리조건에 따른 R_0 산정식

수리특성분류	경계조건식		R_0	
층류	$B < 465$		$0.2 B^{1.5}$	
천이층류	$465 < B < 1017$		$8.904 B^{0.882}$	
완난류	I	$1017 < B < 2.8 \times 10^4$	$2.136 B^{1.091}$	
	II	$2.8 \times 10^4 < B < 28.6d_k$	$2.984 B^{1.059}$	
천이난류	$28.6d_k < B < 206.7d_k$		$3.12d_k^{0.129} B^{0.968}$	
전난류	$206.7d_k < B$	I	$d_k < 212$	$2.441 d_k^{0.111} B$
		II	$212 < d_k$	$2.833 d_k^{0.083} B$

$B_{TR} < B$ 일 때 전난류 특성을 갖는다. 완난류와 전난류 구간에서는 산정식의 정밀도 향상을 위하여 I과 II 구간으로 분리하였는데 경계조건치는 표 2에 제시된 바와 같다.

R_0 에 대한 R 의 증폭률(또는 감소률) $\eta = R/R_0$ 를 도입하고, 다음의 식 (10)과 같은 조합무차원 수 N_B 를 이용하면, 식 (11)과 같이 증폭률을 구하는 산정식이 구하여 진다.

$$N_B = \frac{R_0 N^2}{B^3} = \frac{R_0 \rho g d_i}{P} \quad (10)$$

$$\eta = \left(1 + \frac{\pi}{4} \eta N_B\right)^{\frac{1}{3+\beta}} \quad (11)$$

상기식은 증폭률 η 를 구하는 문제인데 양변에 η

가 모두 포함되어 있으므로 음해법으로만 해를 구할 수 있다. 그러나 η 는 N_B 와 β 만의 함수이므로 간단한 형태의 양해법 산정식을 개발할 수 있다. N_B 의 여러 범위와 여러 수리조건에 대한 수치를 적용하여 산정된 결과의 분포곡선으로 부터 양해법 산정식을 개발하였으며, 그 결과는 표 3에 정리된 바와 같다. 표 3에 제시된 바와 같이 근사식은 네 개의 구간으로 나누어 개발하였는데, 정밀식 (11)로부터 산정된 η 의 분포형태를 살펴본 결과 $-1 < N_B < 0$, $0 < N_B < 1$, $1 < N_B < 4$, $4 < N_B$ 등 네개의 구간으로 나누어 양해법 산정식을 개발하여야지만 오차를 1% 내외로 줄일 수 있는 것으로 판단되었다. $N_B < -1$ 의 급한 역구배는 거의 일어날 가능성이 없는 조건이므로 고려치 않았다. 표 3에 제시된 바와 같이 각 구간별로 근사식의 형태가 상이하다.

표 3. 여러 수리조건과 N_B 에 대한 증폭률 η 의 산정식

(a) $-1 < N_B \leq 0$ 일때

수리특성분류	경계 조건 식		η
총 류	$R < 2000$		$\exp(0.385 N_B)$
천 이 총 류	$2000 < R < 4000$		$0.236 N_B + 1$
완 난 류	I	$4000 < R < 1.5 \times 10^5 < R_{ST}$	$0.269 N_B + 1$
	II	$1.5 \times 10^5 < R < R_{ST}$	$0.264 N_B + 1$
천 이 난 류	$R_{ST} < R < R_{TR}$		$0.247 N_B + 1$
전 난 류	$R_{TR} < R$		$0.258 N_B + 1$

<주> 경계조건식에 사용되는 레이놀즈수

총류 및 천이총류에서의 $R = 18.71N^2 B^{-1.235} + 8.904 B^{0.882}$

완난류에서의 $R = 2.351N^2 B^{-0.882} + 2.984 B^{1.059}$

천이난류 및 전난류에서의 $R = 2.404 d_k^{0.258} N^2 B^{-1.065} + 3.12 d_k^{0.129} B^{0.968}$

(b) $0 < N_B \leq 1$ 일때

수리특성분류	경계 조건 식		η
총 류	$R < 2000$		$\exp(0.385 N_B)$
천 이 총 류	$2000 < R < 4000$		$0.220 N_B + 1$
완 난 류	I	$4000 < R < 1.5 \times 10^5 < R_{ST}$	$0.290 N_B + 1$
	II	$1.5 \times 10^5 < R < R_{ST}$	$0.278 N_B + 1$
천 이 난 류	$R_{ST} < R < R_{TR}$		$0.247 N_B + 1$
전 난 류	$R_{TR} < R$		$0.258 N_B + 1$

<주> 경계조건식에 사용되는 레이놀즈수

총류 및 천이총류에서의 $R = 17.442N^2 B^{-1.235} + 8.904 B^{0.882}$

완난류에서의 $R = 2.475N^2 B^{-0.882} + 2.984 B^{1.059}$

천이난류 및 전난류에서의 $R = 2.404 d_k^{0.258} N^2 B^{-1.065} + 3.12 d_k^{0.129} B^{0.968}$

(c) $1 < N_b \leq 4$ 일때

수리특성분류	경계조건식	η
총 류	$R < 2000$	$\exp(0.866\sqrt{N_b} - 0.499)$
천 이 총 류	$2000 < R < 4000$	$\exp(0.353\sqrt{N_b} - 0.156)$
완 난 류	I $4000 < R < 1.5 \times 10^5 < R_{ST}$	$\exp(0.486\sqrt{N_b} - 0.235)$
	II $1.5 \times 10^5 < R < R_{ST}$	$\exp(0.464\sqrt{N_b} - 0.221)$
천 이 난 류	$R_{ST} < R < R_{TR}$	$\exp(0.404\sqrt{N_b} - 0.185)$
전 난 류	$R_{TR} < R$	$\exp(0.424\sqrt{N_b} - 0.197)$

<주> 경계조건식에 사용되는 레이놀즈수
 총류 및 천이총류에서의 $R = 7.618B^{0.882} \exp(1.053NB^{-1.059})$
 완난류에서의 $R = 2.392B^{1.059} \exp(0.802NB^{-0.971})$
 천이난류 및 전난류에서의 $R = 2.593 d_k^{0.129} B^{0.968} \exp(0.714 d_k^{0.065} NB^{-1.02})$

(d) $4 < N_b$ 일때

수리특성분류	경계조건식	η
총 류	$R < 2000$	$0.768N_b + 0.345$
천 이 총 류	$2000 < R < 4000$	$0.6 \sqrt{N_b} + 0.52$
완 난 류	I $4000 < R < 1.5 \times 10^5 < R_{ST}$	$(0.323 \sqrt{N_b} + 0.8)^2$
	II $1.5 \times 10^5 < R < R_{ST}$	$0.97 \sqrt{N_b} + 0.07$
천 이 난 류	$R_{ST} < R < R_{TR}$	$0.75 \sqrt{N_b} + 0.36$
전 난 류	$R_{TR} < R$	$0.82 \sqrt{N_b} + 0.27$

<주> 경계조건식에 사용되는 레이놀즈수
 총류 및 천이총류에서의 $R = 15.941B^{-0.176}N + 4.630B^{0.882}$
 완난류에서의 $R = 5.0B^{-0.088}N + 0.209B^{1.059}$
 천이난류 및 전난류에서의 $R = 4.133 d_k^{0.194} B^{-0.05}N + 1.123 d_k^{0.129} B^{0.968}$

전난류 구간인 경우 판마찰계수는 조고비 d/ks 식이 구하여 진다. 의 함수이며, 약산식으로 다음과 같다(유동훈, 1995b).

$$f = \alpha \left(\frac{d}{k_s} \right)^\beta \quad (12)$$

이때 펌프동력 산정식은 다음과 같다.

$$P = \rho g Q \left[\alpha \left(\frac{d}{k_s} \right)^\beta \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} - il \right] \quad (13)$$

유사한 방법으로 R_0 에 대한 R 의 증폭률 $\eta = R/R_0$ 을 도입하고 $N_b = R_0 \nu \rho g d l i / P$ 을 이용하면, 다음과 같이 전난류 구간에 대하여 증폭률을 구하는 산정

$$\eta = \left(1 + \frac{\pi}{4} \eta N_b \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

상기식도 전난류 구간에 있어 증폭률 η 를 구하는 문제인데 양변에 η 가 모두 포함되어 있으므로 음해법으로만 해를 구할 수 있다. 그러나 η 는 N_b 와 β 만의 함수이므로 간단한 형태의 양해법 산정식을 개발할 수 있다. N_b 의 여러 범위와 여러 수리조건에 대한 수치를 적용하여 산정된 결과의 분포곡선으로부터 양해법 산정식을 개발하였으며, 그 결과는 표 3에 정리된 바와 같다.

총류, 천이총류, 완난류, 천이난류 구간에 대하여는 식 (11)을, 전난류 구간에 대하여는 식 (14)

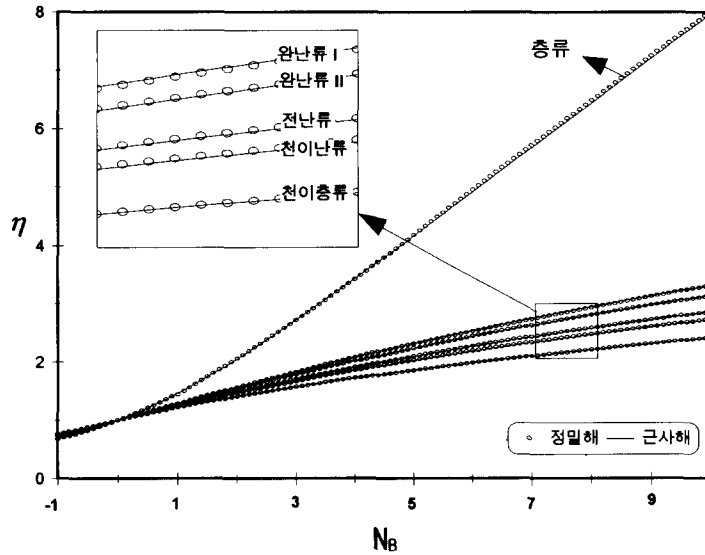


그림 1. 각 구간에 대하여 정밀식으로 구한 η 와 양해법 근사식으로 구한 η 의 비교

를 반복 시산과정으로 풀어 구한 η 의 정밀해와 표 3에 제시된 η 의 근사해가 그림 1에 비교되어 있다. 도시된 바와 같이 두 수치해는 차이를 구분할 수 없을 정도로 매우 근접함을 알 수 있다. 특히 층류, 완난류, 천이난류, 전난류 구간에서는 거의 완벽하게 일치하고, 천이층류 구간에서 약간의 오차가 보이나 이들 오차도 1% 이내인 것으로 나타났다. 주목할 점은 증폭률 η 의 증가율이 특성 구간의 변이에 따라 일정하게 증가하거나 감소하는 것이 아니라는 점이다. 층류인 경우에 증가율이 가장 높으며, 다른 특성 구간에서는 이보다 상당히 작은데 완난류, 전난류, 천이난류, 천이층류의 순으로 증가율이 작아진다.

Nikuradse(1933)의 실험결과에 기초하여 유동훈(1995b)은 관마찰흐름의 수리조건을 다음과 같이 구분하였다.

- 층류: $R < 2000$
- 천이층류: $2000 < R < 4000$
- 완난류 I: $4000 < R < 1.5 \times 10^5$
- 완난류 II: $1.5 \times 10^5 < R < R_{ST}$ (15)
- 천이난류: $R_{ST} < R < R_{TR}$
- 전난류 I: $R_{TR} < R$ & $d_k < 212$
- 전난류 II: $R_{TR} < R$ & $212 < d_k$

여기서 각 구간의 마찰계수를 지수함수 형태로 표현할 때 경계조건 레이놀즈수는 $R_{ST} = 80 d_k^{1.1}$, $R_{TR} = 543 d_k^{1.1}$ 이다. 유동훈(1995b)이 제시한 완난류 구간 III과 IV는 드물게 나타나는 구간이므로 제시하지 않았으나, 고려하는데 별다른 어려움은 없다. N_B 의 조건에 따라 각 구간별로 R 을 표 3에 제시된 산정식으로 구한 후 상기 조건식 (15)를 이용하여 흐름특성을 판별한 후 최종적으로 적합한 조건에서의 레이놀즈수 $R(=\eta R_0)$ 을 구한다.

3. 관경 산정

설계구분 C는 유송길이 즉 관길이의 조고, 펌프의 동력, 유출률 등이 조건으로 주어질 때 관경을 결정하는 문제이다. 천이난류 구간에서도 관마찰계수 산정식이 조고비의 함수이므로 전난류 구간과 천이난류 구간을 제외하고 지형경사가 있는 조건에서 펌프동력 산정식을 제시하면 식 (3)과 같다. 이를 관경 d 가 포함된 무차원수 S 를 구하는 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S = \epsilon T^5 \quad (16)$$

$$\epsilon = \left[\frac{\alpha}{2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{2+\beta} \right]^{\frac{1}{5+\beta}} \quad (17)$$

$$\zeta = -\frac{5}{5+\beta} \quad (18)$$

여기서 비례상수 ϵ 과 ζ 는 유동훈(1995b)이 제시한 수치와 동일하며, T는 무차원수 E와 G의 조합으로서 다음과 같다.

$$T = (E^5 + G^5)^{\frac{1}{5}} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{PQ^2}{\rho l} + Q^2 g l \right)^{\frac{1}{5}} \quad (19)$$

또한 각각의 무차원수 S, E, G는 각각 레이놀즈 역수, 동력유출수, 유출경사수로서 유동훈(1995b)이 제시한 바와 같이 다음과 같다.

$$S = \frac{\nu d}{Q} \quad (20)$$

$$E = \frac{1}{\nu} \left(\frac{PQ^2}{\rho l} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (21)$$

$$G = \frac{1}{\nu} (Q^2 g l)^{\frac{1}{5}} \quad (22)$$

각 구간별 수리조건은 무차원수 T로서 구분되며 각 수리구간의 경계조건식은 유동훈(1995b)이 제시한 E 또는 G 로서 구분되는 경계조건식과 그 수치가 동일하다. 이로써 무차원수 T로부터 관경

레이놀즈 역수 S 를 구할 수 있으며, 산정식 (16)의 비례상수는 각 수리특성 구간별로 표 4에 제시된 바와 같다.

천이난류 구간인 경우 관마찰계수는 식 (2)의 형태로 산정될 수 있으나 유동훈(1995b)이 산정한 바와 같이 $\alpha = 0.075 d_k^{-2/5}$, $\beta = 1/10$ 으로서 관마찰계수 자체가 조고비 즉 관경의 함수로 표현된다. 이들 수치를 식 (3)에 도입하고 관경 d가 포함된 무차원수 S에 관하여 풀면 식 (16)과 같고, 비례상수 ϵ 과 ζ 는 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.6K^{0.073} \quad (23)$$

$$\zeta = -\frac{10}{11} \quad (24)$$

여기서 무차원수 K는 조고레이놀즈 역수이며, 역시 유동훈(1995b)이 제시한 바와 같이 다음과 같다.

$$K = \frac{\nu k_s}{Q} \quad (25)$$

마찬가지로 비례상수 ϵ , ζ 와 경계조건식도 유동훈(1995b)이 제시한 것과 동일하고, 표 4에 제시된 바와 같다.

전난류 구간인 경우 관마찰계수는 조고비 d/k_s 의 함수이며, 관마찰계수 산정식은 식 (12)이고 펌프동력 산정식은 식 (13)과 같다. 마찬가지로 식 (13)으로부터 관경 d가 포함된 무차원수 S를 구하는 식으로 표현하면 식 (16)과 같고, 비례상수 ϵ 과 ζ 는 다음과 같다.

표 4. 각 수리특성 구간별 관경 레이놀즈 역수 S의 산정식에 도입되는 비례상수 ϵ 과 ζ

수리특성분류	경계조건식	ϵ	ζ
총 류	$T < 754.1$	2.526	-5/4 (-1.25)
천 이 총 류	$754.1 < T < 1594.9$	0.294	-25/27 (-0.926)
완 난 류 I	$1594.9 < T < 5.0 \times 10^4$	0.741	-20/19 (-1.053)
완 난 류 II	$5.0 \times 10^4 < T < 1.3 K^{-0.5}$	0.609	-30/29 (-1.034)
천 이 난 류	$1.3 K^{-0.5} < T < 13.6 K^{-0.5}$	$0.6 K^{0.073}$	-10/11 (-0.909)
전 난 류 I	$13.6 K^{-0.5} < T < 0.002 K^{-1}$	$0.694 K^{0.063}$	-15/16 (-0.938)
전 난 류 II	$13.6 K^{-0.5} < 0.002 K^{-1} < T$	$0.633 K^{0.048}$	-20/21 (-0.952)

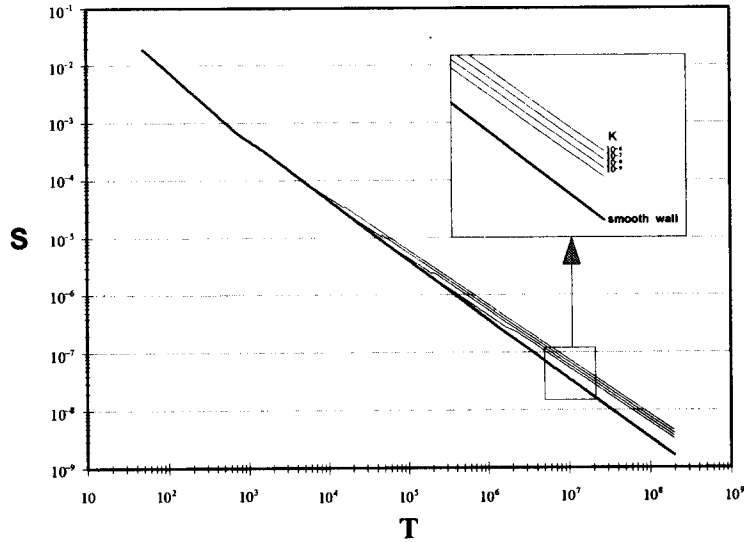


그림 2. 무차원수 T 에 대한 레이놀즈 역수 S 의 변이

$$\epsilon = \left[\frac{\alpha}{2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 \right]^{-\frac{5}{3}} K^{1+\epsilon} \quad (26)$$

$$\zeta = \frac{5}{5-\beta} \quad (27)$$

마찬가지로 전난류 구간에서도 비례상수 ϵ , ζ 와 경계조건식도 유동훈(1995b)이 제시한 것과 동일하며, 표 4에 제시되어 있다.

상기 표 4에서 층류와 천이층류의 경계조건치 754.1은 T_{LT} 이며, 천이층류와 완난류의 경계조건치 1594.9는 T_{TS} 등, 각기 $T_{ST} = 1.3 K^{-0.5}$, $T_{TR} = 13.6 K^{-0.5}$ 이다. 즉 $T < T_{LT}$ 일 때 층류이며, $T_{LT} < T < T_{TS}$ 일 때 천이층류, $T_{TS} < T < T_{ST}$ 일 때 완난류, $T_{ST} < T < T_{TR}$ 일 때 천이난류, $T_{TR} < T$ 일 때 전난류 특성을 갖는다. 완난류와 전난류 구간에서는 산정식의 정밀도 향상을 위하여 I과 II 구간으로 분리하였는데 경계조건치는 표 4에 제시된 바와 같다.

이상의 연구결과로 지형이 경사져 있고 펌프도 동시에 작동하는 경우 구하고자 하는 관경이 포함된 레이놀즈수는 전적으로 동력-경사 무차원수 T와 조고의 함수임을 알 수 있고 경계조건식과 상관

계수의 수치는 표 4에 요약되어 있는 바와 같다. 이상과 같이 설계구분 C는 설계구분 B와는 달리 음해법 과정을 거치지 않고 주어진 수치로 계산되는 무차원수 T를 산정하면 구하려는 무차원수 S를 바로 양해법으로 산정할 수 있다. 그림 2에는 레이놀즈 역수 S의 분포가 무차원수 T의 함수로 도시되어 있는데 유동훈(1995b)이 제시한 S-E Graph와 동일하며, 단지 E를 T로 대체하였다. 그림 2에 도시되어 있듯이 무차원수 T의 범위에 따른 S의 분포양상은 T의 증가에 따라 일정한 기울기로 감소하는 추세를 보이며, 매끈한 면으로부터 조고가 증가함에 따라 S도 증가하는 양상을 보인다.

4. 적용 및 검증

본절에서는 주어진 수리조건으로부터 구하고자 하는 유출량과 관경을 바로 구하는 양해법 근사식을 실적용하는 방법을 보여주고자 한다.

[예제] 상류 저수지와 하류저수지의 수위차가 10 m 일 때 관경 1 m, 관 길이 1 km, 등가조고 10 mm 인 균일조도관으로 상류에서 하류로 물을 송출하고자 펌프동력 200 kW를 가하였다. 이때

송출 유량을 산출하고자 하며, 산출한 유량을 이용하여 펌프동력을 산정하여 주어진 펌프동력과 일치하는지 검토하고자 한다. 또한 동일조건에서 양해법 근사식을 사용하여 동일관경이 산출되는지 확인하고자 한다 ($\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, $\rho = 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$, $g = 9.8\text{m}/\text{sec}^2$).

4.1 유량산출 풀이과정

우선, 주어진 조건으로부터 식 (6)을 적용하여 B를 구한다.

$$B = \frac{1}{\nu} \left(\frac{Pd^2}{\rho l} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$= \frac{1}{10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}} \left[\frac{(200 \times 10^3\text{W})(1\text{m})^2}{(1000\text{kg}/\text{m}^3)(1000\text{m})} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$= 584,804$$

제시된 표 2를 적용하여 B의 경계조건식을 산정한다.

$$d_k = \frac{d}{k_s} = \frac{1\text{m}}{10\text{mm}} = 100$$

$$B_{ST} = 28.6d_k = (28.6)(100) = 2,860$$

$$B_{TR} = 206.7d_k = (206.7)(100) = 20,670$$

B의 범위가 $B_{TR} < B$ 이므로 전난류 영역에 속하며, $d_k < 212$ 이므로 전난류 I 구간이고, 제시된 표 2에 의하여 R_0 를 산정하면 다음과 같다.

$$R_0 = 2.441d_k^{0.111}B = (2.441)(100)^{0.111}(584,804) = 2,380,006$$

다음, 무차원수 N_B 를 산정하기 위하여 식 (7)을 적용하여 경사후루드수 N을 구한다.

$$\text{에너지 경사 } i = \frac{10\text{m}}{1\text{km}} = 0.01$$

$$N = \frac{\sqrt{gd^3i}}{\nu} = \frac{\sqrt{(9.8\text{m}/\text{sec}^2)(1\text{m})^3(0.01)}}{10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}} = 313,050$$

B와 R_0 , N을 구하였으므로 식 (10)을 적용하여 N_B 를 산정하면 다음과 같다.

$$N_B = \frac{R_0 N^2}{B^3} = \frac{(2,380,006)(313,050)^2}{(584,804)^3} = 1.1662$$

N_B 의 범위가 $1 < N_B < 4$ 이므로 제시된 표 3(c)를 적용하여 η 를 구한다. η 를 구하기 위해서는 우선 표 3(c)의 <주>를 이용하여 경계조건식을 산정해야 한다.

경계조건 레이놀즈수

$$R_{ST} = 80d_k^{1.1} = (80)(100)^{1.1} = 12,679$$

$$R_{TR} = 543d_k^{1.1} = (543)(100)^{1.1} = 86,060$$

천이난류 및 전난류에서의 R

$$R = 2.593d_k^{0.129}B^{0.968} \exp(0.714d_k^{0.065}NB^{-1.02})$$

$$= (2.593)(100)^{0.129} (584,804)^{0.968} \exp[(0.714)(100)^{0.065} (313,050)(584,804)^{-1.02}] = 2,666,606$$

$R_{TR} < R$ 이므로 흐름은 전난류 영역에 속하며 제시된 표 3(c)에 의하여 η 는 다음과 같이 산정된다.

$$\eta = \exp(0.424\sqrt{N_B} - 0.197) \exp(0.424\sqrt{1.1662} - 0.197) = 1.2981$$

또한, $\eta = R/R_0$ 이므로 레이놀즈수 R을 구하면 다음과 같다.

$$R = \eta R_0 = (1.2981)(2,380,006) = 3,089,486$$

식 (5)를 적용하여 관내의 유속은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$V = \frac{\nu R}{d} = \frac{(10^{-6} \text{m}^2/\text{sec})(3,089,486)}{(1\text{m})}$$

$$= 3.089 \text{m/sec}$$

따라서, 주어진 조건에서의 송출 유량은 다음과 같이 산정된다.

$$Q = AV = \frac{\pi}{4} d^2 V = \left(\frac{\pi}{4}\right) (1\text{m})^2 (3.089 \text{m/sec})$$

$$= 2.426 \text{m}^3/\text{sec}$$

이상의 산정결과에 대한 검토로서 우선, 산정된 유량을 가지고 펌프동력을 계산한다. 관마찰계수 f 는 유동훈(1995b)이 제시한 지수함수식인 식 (12)를 적용하여 다음과 같이 산정된다.

$$f = \alpha \left(\frac{d}{k_s}\right)^\beta = (0.175)(100)^{-\frac{1}{3}} = 0.0377$$

따라서, 송출 유량이 주어졌을때 요구되는 펌프용량은 다음과 같이 산정된다.

$$P = \rho g Q \left(f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} - i l \right)$$

$$(1000 \text{kg/m}^3)(9.8 \text{m/sec}^2)(2.426 \text{m}^3/\text{sec})$$

$$\left[(0.0377) \frac{(1000\text{m})}{(1\text{m})} \frac{(3.089 \text{m/sec})^2}{(2)(9.8 \text{m/sec}^2)} \right.$$

$$\left. - \frac{(10\text{m})}{(1000\text{m})}(1000\text{m}) \right] = 198.6 \text{kW}$$

검토 결과 주어진 펌프동력 200kW에 거의 일치하며, 오차는 0.7 %로서 1% 이내임을 알 수 있다. 실제로 반복법에 의한 정밀해는 $Q = 2.430 \text{m}^3/\text{s}$ 로서 유량 산정치의 오차는 0.16 % 이다.

4.2 관경산출 풀이과정

본 예제에서 계산된 유량의 정밀해 $Q = 2.430 \text{m}^3/\text{s}$ 를 적용하고 나머지 조건은 동일하게 취하여 적합한 최소 관경이 1 m 로 산정되는지 검토하고자 한다. 적합 관경 산정을 위하여 우선 식 (19)로부터 무차원수 T 를 구한다.

$$T = \frac{1}{\nu} \left(\frac{PQ^2}{\rho l} + Q^3 g i \right)^{\frac{1}{5}} = \frac{1}{10^{-6}} \times$$

$$\left[\frac{(200,000)(2.43)^2}{(1000)(1000)} + (2.43)^3 (9.8)(0.01) \right]^{\frac{1}{5}}$$

$$= 1.209 \times 10^6$$

다음, 특성구간을 판별하기 위하여 식 (25)로부터 무차원수 K 를 구하고, T 의 경계조건을 살펴본다.

$$K = \frac{\nu k_s}{Q} = \frac{(10^{-6})(0.01)}{2.43} = 0.412 \times 10^{-8}$$

$$T_{ST} = 1.3K^{-0.5} = 2.026 \times 10^4$$

$$T_{TR} = 13.6K^{-0.5} = 2.119 \times 10^5$$

따라서 전난류 구간임이 확인되며, $T = 1.209 \times 10^6 < 0.002 K^{-1} = 4.85 \times 10^6$ 이므로 전난류 I 구간에 든다. 표 3으로부터 식 (16)의 비례상수를 구하는데 전난류 I 구간에서 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon = 0.694K^{0.063} = 0.206$$

$$\zeta = -\frac{15}{16} = -0.9375$$

상기 비례상수를 식 (16)에 대입하여 레이놀즈 역수 S 를 구하면 다음과 같다.

$$S = 0.206T^{-0.9375} = 4.089 \times 10^{-7}$$

마지막으로 식 (20)으로부터 구하고자 하는 관경은 다음과 같이 산정된다.

$$d = \frac{S Q}{\nu} = \frac{(4.089 \times 10^{-7})(2.43)}{10^{-6}} = 0.994 \text{m}$$

산정된 결과는 정해진 수치 1 m와 아주 근접한 수

치이며, 오차는 0.6 %로서 유량 산출과 마찬가지로 1 % 이내의 오차를 갖는다.

5. 결론 및 토의

경사관에 펌프가 작동하는 경우 균일조도관에 대하여 유출률 또는 관경을 산출하기 위한 양해법 산정식을 개발하였다. 수평관인 경우와 무동력관인 경우에 대한 양해법 산정식 개발을 위하여 유동훈(1995b)은 네가지 무차원수, 즉 동력-관경수 B , 레이놀즈-경사후루드수 N , 동력-유출수 E 와 유출-경사수 G 를 도입하였는데, 일반적인 경우의 동력 경사관에 대하여는 이들 무차원수의 조합으로 N_B 와 T 를 도출하였으며, 두 경우 모두 반복과정을 거치지 않고 정확한 해를 직접 구할 수 있게 되었다.

유출률 산정의 경우에는 N 과 B 와 수평관 레이놀즈수 R_0 의 조합무차원수 N_B 의 함수로 레이놀즈수의 증폭률 η 를 산정하는 식이 음해법의 형태로 구해지는데 계산된 결과의 분포형태를 파악한 후 네개의 구간으로 나누어 양해법 산정식을 개발하였다. 이 경우 양해법 산정식이라 하더라도 다소 복잡한 형태를 이루기는 하지만 컴퓨터를 이용한 프로그램으로 관망해석을 해야하는 음해법 산정식에 비한다면 비교적 간단한 설계시의 관망해석에서는 매우 간편하게 이용될 수 있으리라 판단된다. 물론 보다 정교한 설계시에는 음해법의 반복 시산과정을 통한 정밀해의 산정이 요구되겠지만 그러한 경우라도 손쉽게 개략적인 근사해에 접근하기 위해서는 양해법 산정식이 유용하리라 판단된다. 반복 시산하여 구한 정밀해와 비교하여 양해법 근사해는 대부분의 조건에서 거의 일치하는 결과를 보였으므로 큰 오차는 발생하지 않았다. 한편 관경 산정의 경우에는 E 와 G 의 조합무차원수인 T 의 함수로 적합한 관경을 구하는 산정식이 바로 양해법의 형태로 나타났다. 따라서 이 경우에는 양해법으로 간단히 정밀해를 구할 수 있게 되었다. 개발된 양해법 산정식은 간단한 예를 들어 적용한 후 정밀도를 확인하였다.

이상의 연구결과는 모래입자를 균일하게 정착하여 실험한 Nikuradse의 관측자료에 기초하여 개발

된 관마찰계수 분포로부터 유추한 것이기 때문에 관로 흐름의 수리조건이 Nikuradse 실험조건과 판이하게 다를 때는 적용에 주의를 요한다. 상용관의 마찰계수 분포는 균일조도면의 마찰계수 분포와 판이하게 다른 것으로 나타났지만 균일조도관 마찰계수 산정식의 조합으로 산정할 수 있기 때문에 본 연구결과에 기초하여 상용관에 대한 양해법 산정식을 개발할 수 있을 것이다. 특히 유동훈(1995a)의 마찰계수 평균법은 유동훈과 원유승(1995)이 확인한 바와 같이 Colebrook(1938)이 수집한 상용관 마찰계수의 분포와 잘 일치할 뿐만 아니라 분포율의 조합으로 표현되어 있기 때문에 관로설계를 위한 양해법 산정식 개발에도 유리하다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 아주대학교 공동연구기기 구입에 따른 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 표한다.

참고 문헌

- 신영석 (1995). "혼합 이산 변수를 가진 보강 평판의 최적설계." 한국강구조학회지, 제7권, 제4호, pp. 177-184.
- 유동훈 (1993). "균일조도 원형관 마찰계수." 대한토목학회 논문집, 제13권, 제5호, pp. 165-172.
- 유동훈 (1995a). "복합면 마찰계수." 대한토목학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 134-145.
- 유동훈 (1995b). "균일조도관의 양해법 설계 기준식." 한국수자원학회지, 제28권, 제5호, pp. 175-189.
- 유동훈, 원유승 (1995). "상용관 마찰계수." 대한토목학회 논문집, 제15권, 제6호, pp. 1593-1606.
- 유동훈, 한상호 (1996). "상용관 마찰흐름에 관한 실험연구." 대한토목학회 논문집, 제16권, 제1호, pp. 1-12.
- Barr, D.I.H. (1975). "Two additional methods of direct solution of the Colebrook-White function." *Proc. Inst. Civil Eng., Part 2, Vol. 61*, pp. 827-835.
- Colebrook, C.F. (1938). "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition re-

- gion between the smooth and rough pipe laws." *J. Inst. Civil Eng.*, London, Vol. 11, pp. 133-156.
- Li, W.-H. (1974). "Direct determination of pipe size." *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 44, No. 6, pp. 567-575.
- Nikuradse, J. (1933). "Strömungsgesetze in rauhen Rohren." *Ver. Dtsch. Ing. Forsch.*, Vol. 361.
- Simon, A.L. (1986). *Hydraulics*. John Wiley & Sons.

〈접수: 1995년 12월 26일〉