

동력경사 상용관의 양해법 설계

Explicit Design of Commercial Pipe on a Slope with Pumping Power

유 동 훈* / 강 찬 수**

Yoo, Dong Hoon / Kang, Chan Soo

Abstract

Pumping power being given, traditional method requires an iteration process for the solution of discharge and pipe diameter. Yoo and Kang (1996) have developed explicit equations for the estimation of discharge and pipe diameter for the cases of uniformly rough pipe on a sloping bed with a pumping power. The use of power law for the estimation of friction factor enabled to develop the explicit form of equations. Yoo (1995a) has suggested the mean friction factor method for the estimation of friction factor of commercial pipe or composite surface pipe. With the same approach, the present work has developed the explicit equations of discharge or pipe diameter for the general case of commercial pipe on a sloping bed with a pumping power by adopting the mean friction factor method.

요 지

펌프동력이 기지 값으로 주어져 있을 때, 유량이나 관경을 산정하는 경우 기존의 방법으로는 상당한 반복과정을 거쳐야 된다. 이에 유동훈과 강찬수(1996)는 균일조도 동력경사관인 경우 유량이나 관경을 양해법으로 산정하는 식을 개발한 바 있다. 마찰계수 산정을 위한 지수함수식의 이용은 본 양해법 산정식의 개발을 가능하게 하였다. 유동훈(1995a)은 상용관이나 복합면을 가진 관의 마찰계수 산정을 위한 마찰계수 평균법을 제시한 바 있다. 그와 같은 접근방법으로 본고는 마찰계수 평균법을 상용관 마찰계수 산정식에 적용하여 동력경사 상용관의 유량이나 관경을 양해법으로 구할 수 있는 산정식을 개발하였다.

Keywords: commercial pipe, friction factor, power law, pumping power

-
- * 이주대학교 공과대학 토목공학과 부교수
 - ** 이주대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

1. 서 론

일반적으로 관로는 경사진 지형에 설치하며 펌프를 작동시켜 유체를 유송하는 경우 요구되는 설계항목은 펌프 동력이나 관내 통과유량 또는 적정관경 등 세가지 유형으로 크게 구분된다. 이 세가지 유형 중 기존의 방법으로는 적정량의 유체를 유송하기 위해 요구되는 펌프의 동력만을 양해법으로 직접 산정할 수 있을 뿐, 펌프의 동력이 기지값으로 주어질 때 관내 통과유량이나 적정관경을 산정하는 경우는 상당한 반복과정을 거쳐야 하며, 때로는 수많은 반복과정을 거쳐서도 수렴조건이 만족되지 못하여 해를 구하기 매우 곤란한 경우도 있다.

관로 설계시 주어진 조건에 따라 요구되는 통과유량이나 적정관경 등과 같은 관련 물리량을 산정함에 있어 양해법으로 해를 구하려는 연구는 대표적으로 Li (1974)를 비롯해 이미 몇몇 연구자들에 의해 시도된 바 있다. 그러나 이들의 연구결과는 대부분이 표나 그림으로 제시되어 있어 이용의 불편성과 판독자에 따라 비교적 큰 오차를 유발할 가능성을 내포하고 있다. 또한 이들 연구결과의 대부분은 유동훈과 원유승(1995)이 밝힌 바와 같은 근본적인 모순점을 갖고 있는 Colebrook-White식을 상용관 마찰계수 산정의 기준식으로 이용하였으며, 자연경사관에 펌프동력을 추가하였을 경우에 대한 일반적인 조건을 전혀 고려하지 않았다. 이러한 점들로 미루어 기존의 방법들은 여러 가지 개선해야 할 문제점이 많은 것으로 사료된다.

이에 유동훈(1995a)은 상용관 마찰계수를 보다 합리적으로 산정하기 위한 방법으로 마찰계수 평균법을 개발한 바 있으며, 이는 유동훈과 원유승(1995)에 의해 Colebrook(1938)이 수집한 상용관 마찰계수의 분포와 잘 일치함이 확인되었고, 유동훈과 한상호(1996)에 의한 실험을 통하여 마찰계수 평균법의 적합성이 입증되었다. 또한, 유동훈과 강찬수(1996)는 상용관 관로 해석의 1차적인 단계로 균일조도 동력경사관에 대하여 유량이나 관경을 양해법으로 산정하는 식을 개발한 바 있다. 상용관의 경우 마찰계수의 분포가 균일조도관에 비하여 편이하게 다르지만 마찰계수 평균법을 기초로 하면 균일조도관 마찰계수 산정식의 조합으로 산정할 수 있기 때문에 유동훈과 강찬수의 연구결과를 본 연구에 적절히 적용할 수 있으리라 판단된다.

이상과 같이 본 연구는 유동훈과 강찬수(1996)의 균일조도 동력경사관의 양해법 설계를 토대로 이루어졌다. 마찰계수 평균법에 의한 상용관 마찰계수 산정식을 적용하

여 일반적인 경우의 상용관에 대하여 단일관로 설계시 유량 또는 관경을 산정하는 양해법 산정식을 개발하였다.

2. 유량 산정

본 절은 관경, 관의 길이, 관내 조고, 관내 각 조면의 분포율, 지형경사와 펌프동력이 주어질 때 상용관의 관내 통과유량을 산정하는 문제이다. 이 경우 기본 지배방정식은 펌프동력을 산정하는 식으로서 관경의 변화와 부차손실을 고려하지 않는다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \rho g Q \left(f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} - iL \right) \quad (1)$$

여기서 P 는 펌프의 동력, Q 는 관내 통과유량, D 는 관경, L 은 관길이, V 는 관내 평균유속, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, f 는 Darcy-Weisbach 마찰계수를 나타내며 i 는 수로경사로서 관로 흐름방향으로 기울어져 있을 때 양의 부호로 정하였으며, 역구배로 관로가 놓일 때는 음의 부호를 갖는다.

상용관은 관의 이음방법 등에 의한 상용관내 불균일 조고에 의해 발생하는 손실이 주된 원인으로 작용하여 마찰계수 분포가 균일조도관에 비해 상당히 다른 형태를 갖는다. 이러한 상용관의 마찰계수 산정을 위한 기존의 방법으로는 Colebrook-White식, Hazen-Williams식 등이 있으며, 최근에 유동훈(1995a)은 상용관 마찰계수를 산정함에 있어 마찰계수 평균법과 영점높이 평균법을 제시한 바 있다. 그중 마찰계수 평균법이 상용관의 마찰계수를 산정함에 있어 가장 합당한 산정식이라 판단되며(유동훈과 한상호, 1996), 본고는 상용관의 마찰계수를 산정함에 있어 마찰계수 평균법을 적용하여 유량을 산정하는 양해법 산정식을 유추하였다. 이 방법은 동일 상용관 내에 여러 다른 조면 즉, 수리학적으론 매끈한 면과 거칠은 면들이 공존하고 있다고 가정하여, Colebrook-White의 단순조합이 아닌 조고와 레이놀즈수에 따라 각 지점의 수리조건을 결정하여 마찰계수를 분포율에 따라 평균하여 구하는 방법이다. 이에 따르면 상용관 마찰계수의 산정식은 다음과 같다.

$$f = P_s f_s + P_r f_r \quad (2)$$

여기서 P_s 는 매끈한 면의 분포율, f_s 는 매끈한 면의 마찰계수, P_r 은 거칠은 면의 분포율, f_r 은 거칠은 면의 마찰계수이며 $P_s = 1 - P_r$ 이다.

상기식 (2)에서 f_s 와 f_r 을 유동훈(1995b)이 제시한 지수함수 형태의 관마찰계수 산정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_s = \alpha R_D^\beta \quad (3)$$

$$f_r = \alpha' D_r^{\beta'} \quad (4)$$

여기서 R_D 는 관경레이놀즈수로서 VD/ν 이고, D_r 은 조고-관경비로서 D/k_s 이며(k_s 은 거칠은 면의 등가조고), $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ 는 각 수리특성 구간별로 변이하는 상수이다.

따라서, 지형이 경사져 있는 경우 펌프를 작동시킬 때 펌프동력을 구하는 산정식 (1)에 식 (2), (3), (4)를 적용하여 다음과 같이 표현된다.

$$P = \rho L \frac{\pi}{4} \frac{VD}{\nu} \nu D \left[\{(1-P_r)\alpha R_D^\beta + P_r\alpha' D_r^{\beta'}\} \left(\frac{VD}{\nu} \right)^2 \frac{\nu^2}{2D^3} - ig \right] \quad (5)$$

상기식을 전개하여 관경레이놀즈수 R_D 를 이용하고, 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{8}{\pi} \frac{1}{\nu^3} \frac{PD^2}{\rho L} = (1-P_r)\alpha R_D^{3+\beta} [1 + \mu_r' - \mu_i'] \quad (6)$$

여기서 무차원수 μ_r' 과 μ_i' 은 다음과 같다.

$$\mu_r' = \frac{P_r}{1-P_r} \frac{\alpha'}{\alpha} D_r^{\beta'} R_D^{-\beta} \quad (7)$$

$$\mu_i' = \frac{2D^3 ig}{(1-P_r)\alpha R_D^{2+\beta}\nu^2} = \frac{2N^2}{(1-P_r)\alpha R_D^{2+\beta}} \quad (8)$$

상기식 (8)에서 N 은 레이놀즈-경사후루드수라 칭하며, i 의 부호를 고려하여 N^2 으로 표현하면 다음과 같고, 역구배일 때 N^2 은 음의 수치를 갖는다.

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

식 (6)을 무차원 관계식으로 유도하여 R_D 에 대하여 정리하면, 다음과 같은 산정식이 구해진다.

$$R_D = \left[\frac{8}{\pi\alpha} \frac{1}{(1-P_r)(1+\mu_r' - \mu_i')} \right]^{\frac{1}{3+\beta}} B^{\frac{3}{3+\beta}} \\ = \left[\frac{1}{(1-P_r)(1+\mu_r' - \mu_i')} \right]^{\frac{1}{3+\beta}} R_0 \quad (10)$$

여기서 B 는 동력-관경수라 칭하는 무차원수로서 식 (11)과 같고, R_0 는 균일조도 수평관에서의 레이놀즈수로서 식 (12)에 제시된 바와 같다(유동훈, 1995b).

$$B = \frac{1}{\nu} \left[\frac{PD^2}{\rho L} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$R_0 = \left(\frac{8}{\pi\alpha} \right)^{\frac{1}{3+\beta}} B^{\frac{3}{3+\beta}} \quad (12)$$

식 (10)에서 R_0 에 대한 R_D 의 증감률 $\eta = R_D/R_0$ 를 도입하면, 식 (10)은 다음과 같은 증감률 η 를 구하는 산정식으로 표현된다.

$$\eta = [(1-P_r)(1+\mu_r' - \mu_i')]^{-\frac{1}{3+\beta}} \quad (13)$$

여기서 η 는 다음 절에 기술한 관경 증감률 η_d 와 구분하여 유속 증감률이라 칭한다.

그러나 상기식 (13)의 무차원수 μ_r' 과 μ_i' 은 미지수인 유속이 포함된 레이놀즈수 R_D 의 함수로서 미지의 항이므로 식 (7)과 식 (8)을 η 의 함수로 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_r' = \frac{P_r\alpha' D_r^{\beta'}}{(1-P_r)\alpha R_0^\beta} \eta^{-\beta} = \frac{1}{(1-P_r)} \mu_r \eta^{-\beta} \quad (14)$$

$$\mu_i' = \frac{2N^2}{(1-P_r)\alpha R_0^{2+\beta}} \eta^{-(2+\beta)} \\ = \frac{1}{(1-P_r)} \mu_i \eta^{-(2+\beta)} \quad (15)$$

여기서 무차원수 μ_r 과 μ_i 는 다음과 같다.

$$\mu_r = \frac{P_r\alpha' D_r^{\beta'}}{\alpha R_0^\beta} \quad (16)$$

$$\mu_i = \frac{2N^2}{\alpha R_0^{2+\beta}} \quad (17)$$

따라서, 식 (13)을 μ_r 과 μ_i 의 함수로 정리하면 최종적으로 η 는 다음과 같이 표기된다.

$$\mu_r \eta^3 + (1-P_r)\eta^{3+\beta} - \mu_i \eta - 1 = 0 \quad (18)$$

상기식에 지수함수식의 대표적인 완난류 구간의 β 값인 $-1/6$ 또는 $-1/4$ 을 대입하고 Newton-Raphson법을 적용하면 반복시산과정을 통해 η 의 해를 산정할 수 있다. 이렇게 산정하여 도출한 η 의 산정치를 $\eta = f(\mu_r, \mu_i, P_r)$ 의 함수형태로 회귀분석하면, 다음과 같은 양해법 근사식이 구해진다.

표 1. 유속 증감률 근사식의 계수 a, b, c, d 산정식

(a) $\beta = -1/6$ 인 경우

구 간	a	b	c	d
$-3 < \mu_i < 0$	$0.474 P_r + 1.035$	$0.330 P_r + 0.237$	$0.160 P_r + 0.405$	$0.105 P_r + 0.087$
$0 < \mu_i < 3$	$0.315 P_r + 0.349$	$0.265 P_r + 0.151$	$0.570 P_r + 1.055$	$0.420 P_r + 0.256$
$3 < \mu_i$	$\exp(0.67 P_r + 0.13)$	$\exp(1.4 P_r - 1)$	0.530	0.041

(b) $\beta = -1/4$ 인 경우

구 간	a	b	c	d
$-3 < \mu_i < 0$	$\exp(0.43 P_r + 0.036)$	$\exp(1.098 P_r - 1.402)$	$\exp(0.364 P_r - 0.893)$	$\exp(0.943 P_r - 2.377)$
$0 < \mu_i < 3$	$\exp(0.801 P_r - 0.988)$	$\exp(1.325 P_r - 1.749)$	$\exp(0.485 P_r + 0.057)$	$\exp(1.212 P_r - 1.318)$
$3 < \mu_i$	$\exp(0.669 P_r + 0.127)$	$\exp(1.543 P_r - 1.079)$	0.562	0.075

$$\eta = \begin{cases} -\frac{1}{\mu_i} & \mu_i < -3 \\ (a - b\sqrt{\mu_r}) \exp[(c - d\sqrt{\mu_r})\mu_i] & -3 < \mu_i < 0 \\ (a - b\sqrt{\mu_r})\mu_i + (c - d\sqrt{\mu_r}) & 0 < \mu_i < 3 \\ (a - b\sqrt{\mu_r})\mu_i^{c-d\sqrt{\mu_r}} & 3 < \mu_i \end{cases} \quad (19)$$

용하였을 때 여러 μ_r 과 μ_i 의 변이에 따른 η 의 음해법 식에 의한 해와 양해법 근사식에 의한 해가 비교되어 있다. 여기서 η 의 음해법 식에 의한 해는 식 (18)을 반복시산 과정으로 풀어 구한 수치이며, 양해법 근사식에 의한 해는 식 (19)와 표 1(b)를 이용하여 구한 수치이다. 도시된 바와 같이 두 수치해는 차이를 구분할 수 없을 정도로 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 주목할 점은 μ_i 가 -3보다 작은 경우 η 의 수치가 μ_r 의 변이와 관계없이 일정하다는 점과 μ_i 가 -3 이상인 경우는 μ_r 의 증가에 따라 η 의 수치가 감소한다는 점이다.

여기서 a, b, c, d 는 β 값에 따른 각 구간별 계수로써 이들의 산정식은 표 1에 제시된 바와 같다.

그림 1에는 대표적으로 P_r 은 0.2, β 는 -1/4을 사

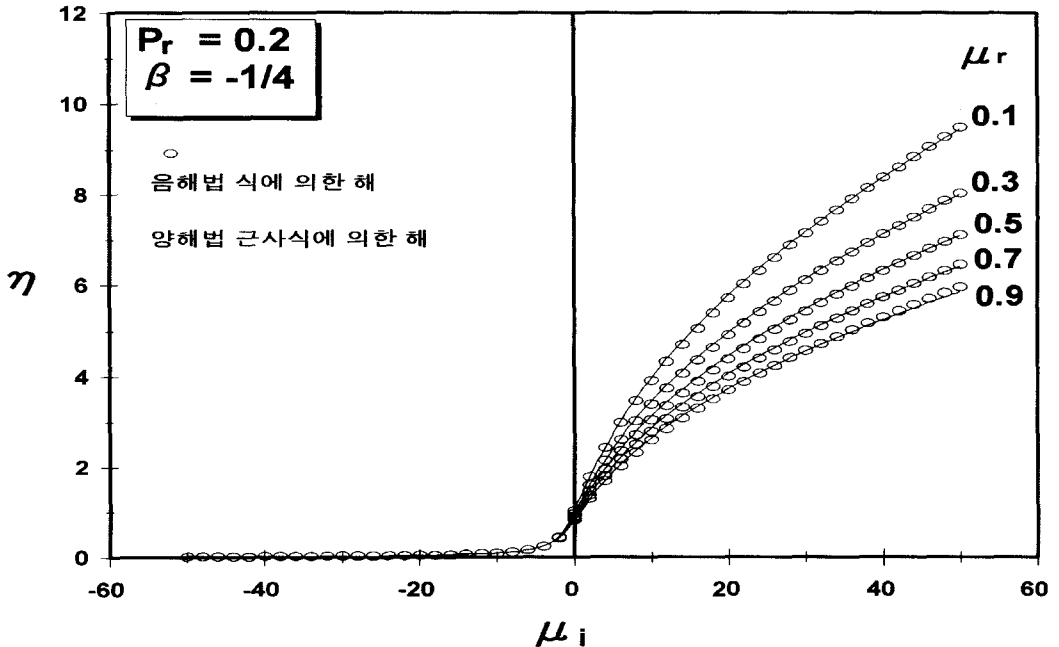


그림 1. μ_i 의 변이에 따른 η 의 음해법 식에 의한 해와 양해법 근사식에 의한 해 비교

3. 관경 산정

본 절은 관내 통과유량, 관의 길이, 관내 조고, 관내 각 조면의 분포율, 지형경사와 펌프동력 등이 주어져 있는 상용관의 적경관경을 산정하는 문제이다. 유량 산정에서와 마찬가지로 기본 지배방정식은 식 (1)로 표현되는 펌프동력을 산정하는 식이며, Darcy-Weisbach 마찰계수를 $f_s = \alpha B D^\beta$, $f_r = \alpha' D_r^{\beta'}$ 로 표현하면, 지형이 경사져 있는 경우 펌프를 작동시킬 때 펌프동력을 구하는 산정식은 다음과 같이 구해진다.

$$P = \rho L Q \left[(P_s \alpha R^\beta + P_r \alpha' D_r^{\beta'}) \frac{V^2}{2D} - i g \right] \quad (20)$$

상기식 (20)을 무차원수인 관경-유출수 $S (= \nu D/Q)$ 를 이용하여 정리하면, 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{2+\beta} P_s \alpha \frac{\nu^5}{Q^2} S^{-(5+\beta)} \rho L (1 + \mu_{rd}' - \mu_{id}') \quad (21)$$

여기서 무차원수 μ_{rd}' 과 μ_{id}' 은 다음과 같다.

$$\mu_{rd}' = \frac{P_r \alpha'}{P_s \alpha} \left(\frac{\pi}{4} \right)^\beta S^{\beta'+\beta} K^{-\beta'} \quad (22)$$

$$\mu_{id}' = 2 \left(\frac{\pi}{4} \right)^{2+\beta} \frac{1}{P_s \alpha} G^5 S^{5+\beta} \quad (23)$$

K 와 G 는 각각 조고-유출수, 유출-경사수라 칭하는 무차원수로서 다음의 식 (24)와 (25)에 제시된 바와 같다.

$$K = \frac{\nu k_r}{Q} \quad (24)$$

$$G = \frac{1}{\nu} (Q^3 g i)^{\frac{1}{5}} \quad (25)$$

식 (21)을 무차원 관계식으로 유도하여 관경-유출수 S 에 대하여 정리하면,

$$S = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{2+\beta} P_s \alpha (1 + \mu_{rd}' - \mu_{id}') \right]^{\frac{1}{5+\beta}} E^{\frac{-5}{5+\beta}} \quad (26)$$

$$= [P_s \alpha (1 + \mu_{rd}' - \mu_{id}')]^{\frac{1}{5+\beta}} S_0 \quad (26)$$

여기서 E 는 동력-유출수와 칭하는 무차원수로서 식 (27)과 같고, S_0 는 균일조도 수평관에서의 관경-유출수로서 식 (28)에 제시된 바와 같다.

$$E = \frac{1}{\nu} \left(\frac{P Q^2}{\rho L} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (27)$$

$$S_0 = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{2+\beta} \right]^{\frac{1}{5+\beta}} E^{\frac{-5}{5+\beta}} \quad (28)$$

식 (26)을 S_0 에 대한 S 의 증감률 $\eta_d = S/S_0$ 를 도입하면, 식 (26)은 다음과 같은 증감률 η_d 를 구하는 산정식으로 표현된다.

$$\eta_d = [P_s (1 + \mu_{rd}' \eta_d^{\beta'+\beta} - \mu_{id}' \eta_d^{5+\beta})]^{\frac{1}{5+\beta}} \quad (29)$$

여기서 η_d 는 관경 증감률이라 칭한다.

그러나 상기식의 무차원수 μ_{rd}' 과 μ_{id}' 은 미지수인 관경이 포함된 관경-유출수 S 의 함수로서 미지의 항이므로 식 (22)와 (23)을 η_d 의 함수로 정리하면,

$$\begin{aligned} \mu_{rd}' &= \frac{1}{P_s} \frac{P_r \alpha'}{\alpha} \left(\frac{\pi}{4} \right)^\beta S_0^{\beta'+\beta} K^{-\beta'} \eta_d^{\beta'+\beta} \\ &= \frac{1}{P_s} \mu_{rd} \eta_d^{\beta'+\beta} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\mu_{id}' = \frac{1}{P_s} \frac{2}{\alpha} \left(\frac{\pi}{4} \right)^{2+\beta} G^5 S_0^{5+\beta} \eta_d^{5+\beta} = \frac{1}{P_s} \mu_{id} \eta_d^{5+\beta} \quad (31)$$

여기서 무차원수 μ_{rd} 와 μ_{id} 는 다음과 같다.

$$\mu_{rd} = \frac{P_r \alpha'}{\alpha} \left(\frac{\pi}{4} \right)^\beta S_0^{\beta'+\beta} K^{-\beta'} \quad (32)$$

$$\mu_{id} = \frac{2}{\alpha} \left(\frac{\pi}{4} \right)^{2+\beta} G^5 S_0^{5+\beta} \quad (33)$$

따라서, 식 (29)를 μ_{rd} 와 μ_{id} 의 함수로 정리하면 최종적으로 η_d 는 다음과 같이 표기된다.

$$(1 + \mu_{id}) \eta_d^{5+\beta} - \mu_{rd} \eta_d^{\beta'+\beta} - P_s = 0 \quad (34)$$

상기식 (34)에 지수함수식의 대표적인 완난류 구간의 β 값인 $-1/4$ 또는 $-1/6$ 을 대입하고, 전난류 구간의 두가지 경우 β' 값인 $-1/3$ 과 $-1/4$ 을 대입하여 Newton-Raphson법을 적용하면 반복시산과정을 통해 각각 네가지 경우에 대한 η_d 의 해를 산정할 수 있다. 이렇게 산정하여 도출한 η_d 의 해를 $\eta_d = f(\mu_{rd}, \mu_{id}, P_s)$ 의 함수형태로 회귀분석하면 근사적으로 η_d 를 산정할 수 있는 양해법 근사식이 구해진다. 그런데, 상기 음해법식 (34)로 도출한 네가지 경우의 η_d 의 해는 비교 분석 결과 β 값에 따라서는 변이하지만 β' 값에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 판별되었다. 따라서 η_d 산정을 위한 양해법 근사식은 β 값이 $-1/4$ 인 경우와 $-1/6$ 인

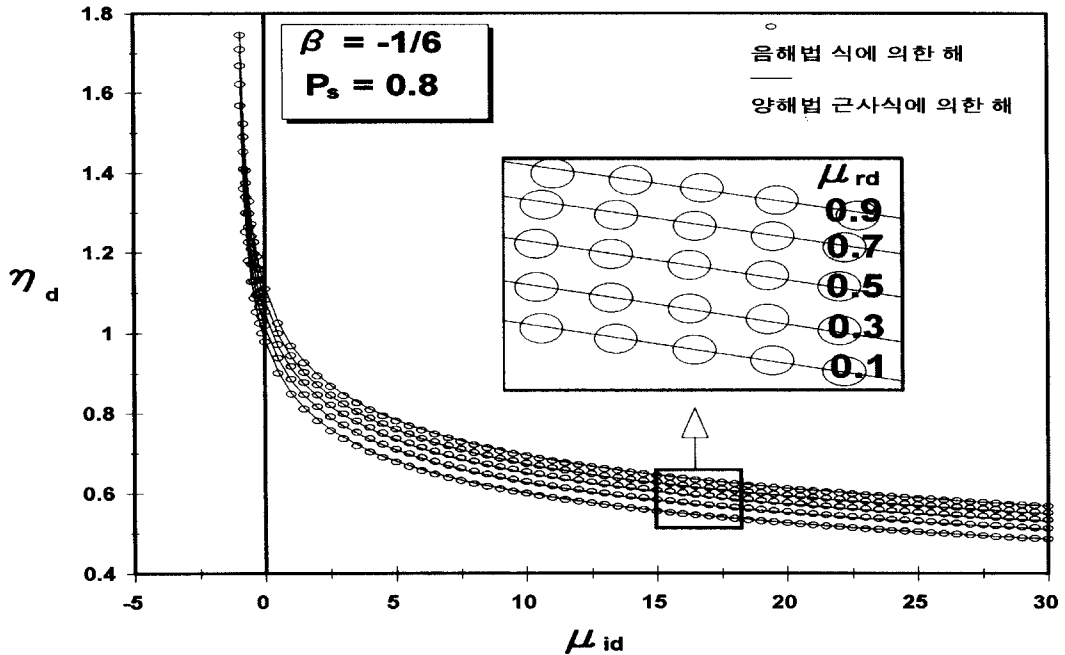


그림 2. 여러 μ_{rd} 와 μ_{id} 의 변이에 따른 η_d 음해법식에 의한 해와 양해법 근사식에 의한 해 비교

표 2. 관경 증감을 근사식의 계수 a' , b' , c' 산정식계수

계수	$\beta = -1/4$ 인 경우	$\beta = -1/6$ 인 경우
a'	$-0.113 P_s + 0.257$	$-0.111 P_s + 0.253$
b'	$0.229 P_s + 0.784$	
c'	$0.004 \ln \mu_{rd} - 0.198$	$0.004 \ln \mu_{rd} - 0.196$

경우의 두가지로 합쳐지며 다음의 식 (35)와 같다. 식 (35)에서 지수 β 에 따라 변이하는 근사식의 각 상수는 표 2에 제시된 바와 같다.

$$\eta_d = (a' \mu_{rd} + b')(\mu_{id} + 1)^{c'} \quad (35)$$

그림 2에는 대표적으로 $P_s = 0.8$ (또는 $P_r = 0.2$)인 경우 β 는 $-1/6$ 을 사용하였을 때 여러 μ_{rd} 와 μ_{id} 의 변이에 따른 η_d 의 음해법 식에 의한 해와 양해법 근사식에 의한 해가 비교되어 있다. 여기서 η_d 의 음해법 식에 의한 해는 식 (34)를 반복시산 과정으로 풀어 구한 수치이며, 양해법 근사식에 의한 해는 식 (35)와 표 2를 이용하여 구한 수치이다. 도시된 바와 같이 두 수치해는 차이를 구분할 수 없을 정도로 거의 일치함을 알 수 있다. 여기서 주목할 점은 η_d 의 수치는 μ_{id} 가 -1 에 근접해 갈수록 μ_{rd} 의 변이와 관계없이 항상 일정해지며, ∞ 로 발산한다는 점과 μ_{id} 가 대략 0 이상인 경우

η_d 의 수치는 μ_{rd} 의 증가에 따라 증가하며, μ_{id} 의 증가에 따라 감소한다는 점이다.

4. 결론 및 토의

경사진 상용관에 펌프가 작동하는 경우에 대하여 유량 또는 관경을 산출하기 위한 양해법 근사식을 개발하였다. 유동훈(1995b)은 균일조도관의 두가지 경우, 즉 수평관에 펌프가 작동하는 경우와 자연경사관에 펌프가 작동하지 않는 경우에 대한 양해법 근사식 개발을 위하여 동력-관경수 B , 레이놀즈-경사후루드수 N , 동력-유출수 E , 유출-경사수 G , 조고-유출수 K , 관경-유출수 S 등의 무차원수를 도입하였으며, 유동훈과 강찬수(1996)는 균일조도 동력경사관의 유량을 양해법으로 산정하는 식을 개발함에 있어 이들 무차원수의 조합형태인 새로운 무차원수를 도출하였고, 유동훈(1995b)이 제시한 수평관 조건에서의 양해법 산정식을 적용하여 이를 기준으로 레이놀즈수의 증감을 η 를 유추하여 양해법 산정식을 개발하였다. 본 연구에서도 유동훈(1995b)이 도출한 이들 무차원수를 이용하였으며, 유동훈과 강찬수(1996)가 유추한 균일조도 수평관 조건에서의 산정식을 기준으로한 증감률 η 또는 η_d 를 적용하였다.

상용관 마찰계수 산정식은 상용관의 경우 마찰계수의