

매끄러운 하상위 난류의 내부 영역 유속 분포 공식

An Inner Region Velocity-Profile Formula of Turbulent Flows on Smooth Bed

류 권 규* / 윤 병 만**

Yu, Kwonlyu / Yoon, Byungman

Abstract

The velocity of the inner region of turbulent flow on a smooth bed has complex profile which can not be described with a simple formula. Though there have been a couple of formulas describing the profile, most of them have very complex forms, i.e., with many terms, with integration form, or with implicit forms. It means that it is hard to use them or it is difficult to estimate their parameters. A new single formula that describes the velocity profile of the inner region of the turbulent flow on a smooth bed was proposed. This formula has a form of the traditional log-law multiplied by a damping function. Introducing only one additional parameter, it can describe the whole inner range nicely. It approximates the law-of-the-wall in the vicinity of the bed and approaches to the log-law in the overlap region. The added parameter, damping factor, can be estimated very easily. It is not sensitive to the Reynolds number change and the velocity profile calculated by the formula does not change much due to the change of the parameter.

keywords : turbulent flow, velocity profile, inner region, law of the wall, log-law, damping factor

요 지

난류의 내부 영역의 유속은 단순한 공식으로 표현하기 매우 어려운 형태를 가지고 있다. 이 속도 분포를 기술하는 여러 가지 공식들이 제안된 바 있지만, 모든 공식들은 많은 항들을 가지거나 적분형 또는 음함수꼴을 가지고 있다. 이것은 이 식들이 적용하기 힘들거나, 매개 변수들을 추정하기 어렵다는 것을 의미한다. 이 연구에서는 매끄러운 바닥 위를 흐르는 난류 내부 영역의 유속 분포를 표현할 수 있는 간단한 형태의 새로운 공식을 제안하였다. 이 공식은 전통적인 대수 법칙에 감쇄 함수를 곱한 형태이다. 단 하나의 추가적인 매개 변수를 도입하여, 전체 내부 영역의 유속 분포를 적절하게 표현할 수 있었다. 이 공식은 벽법칙이 성립하는 바닥 근처의 유속과 대수 법칙이 성립되는 중첩 영역의 유속 분포까지를 적절하게 나타낼 수 있다. 또한, 추가된 매개 변수인 감쇄 계수는 쉽게 추정할 수 있다. 이 변수는 Reynolds 수의 변화에 민감하지 않으며, 공식에 의하여 계산된 유속 분포도 또한 이 매개 변수의 변화에 대해서 민감하지 않다.

핵심용어 : 난류, 유속 분포, 내부 영역, 벽법칙, 대수 법칙, 감쇄 계수

1. 서 론

매끄러운 평면 위를 흐르는 난류는 상당히 복잡한

유속 분포를 가지고 있다. 일반적으로 하상 가까이에서 ($y^+ \leq 5$, 점성 저층)는 벽법칙(law of the wall)이, 그

* 정회원 · 동의대학교 토목공학과 전임강사 · 공학박사(e-mail: pururumi@deu.ac.kr)

** 정회원 · 명지대학교 토목공학과 교수 · 공학박사(e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

보다 위의 중폭 영역($30 \leq y^+ \leq 500 \sim 700$, overlap region)에서는 대수법칙(log law)이 널리 알려진 유속분포이다. 여기서 y 는 벽 또는 하상으로부터의 거리, u_* 는 마찰 속도, ν 는 유체의 동점성 계수(kinematic viscosity), $y^+ (\equiv y u_* / \nu)$ 는 벽으로부터의 거리(wall distance)를 나타내는 무차원 변수이다. 또한 어떤 연구에서는 중폭 영역의 유속 분포로 멱법칙(power law)이 대수법칙보다 낫다는 주장이 있어 둘 사이에 두고 심각한 논쟁이 있었으나(Osterlund, 1999; Buschmann and Gad-el-Hak, 2003), 일반적으로는 대수 법칙이 통용되고 있다. 난류 흐름의 일반적인 유속 분포는 무차원 거리 y^+ 와 무차원 유속 $u^+ (\equiv u/u_*)$ 의 관계로 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

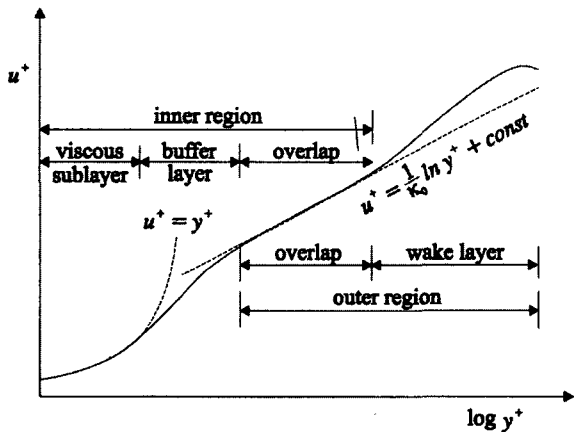


Fig. 1. Sketch of the representative velocity profile in open-channels (Guo, 1998)

대수 법칙과 멱법칙은 다음과 같은 장점을 가지고 있다. (1) 유속 분포를 표현하는데 매개 변수가 2~3개 만으로 충분하다. (2) 공식의 형태가 상대적으로 간단하다. (3) 매개 변수를 추정하기가 용이하다.

그러나 두 법칙 모두 벽에서 멀리 떨어진 외부 영역($y/h > 0.2$)에서는 실제 유속 분포와 상당한 차이를 보이며, 이 때문에 외부 영역에서는 Coles (1956)가 제안한 후류 법칙(wake law)이나 후류항을 포함한 유속 결손 법칙 (velocity defect law)이 성립되는 것으로 알려져 있다(Nezu and Nakagawa, 1993). 전자의 후류 법칙에 대해서는 그 계수에 대한 통일된 견해가 아직 없는 상황이다. 또한, 후자의 유속 결손 법칙은 내부 영역에 대해 유도된 대수 법칙을 후류 영역까지 확장한 것이며, 이 때문에 실제 외부 영역에서 실측치와 많은 오차를 지니고 있다.

위와 같은 노력들과 더불어, 최근에 George and

Castillo (1997)와 Guo (1998) 등은 수심 전체에 적용 가능한 유속 분포 공식을 제안한 바 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고, 벽영역과 중폭 영역 사이에 위치한 완충 영역(buffer region)은 여전히 다루기 힘든 영역으로 남아 있다. 일반적으로 전산유체역학(CFD)에서 3차원 흐름을 모의할 경우, 첫 번째 격자는 반드시 대수 법칙이 적용 가능한 영역, 즉 y^+ 가 적어도 수십 정도가 되도록 하고 있다. 그 이유는 완충 영역을 제대로 기술할 수 있는 공식이 없으며, 그래도 현재까지 신뢰할 수 있는 공식이 대수 법칙인데, 대수 법칙이 성립되는 영역이 y^+ 가 수십 정도인 부분이기 때문이다.

본 연구는 이러한 문제를 해결하고자, 벽영역과 완충 영역, 중폭 영역을 전부 포함하는 내부 영역의 유속 분포를 쉽고 편리하게 수식으로 기술하는 것이다.

2. 내부 영역의 유속 분포

2.1 벽법칙

Kundu (1990)에 따르면, 벽법칙은 다음과 같이 유도되었다.

벽에 인접한 영역에서는 점성 효과가 지배적이어서, 점성 저층(viscous sublayer)으로 불린다. 이 층은 매우 얇기 때문에 이 영역에서 응력은 균일하며 벽전단 응력 τ_o 과 평형을 이룬다. 따라서 유속 경사는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mu \frac{du}{dy} = \tau_o \quad (1)$$

여기서, μ 는 유체의 점성이고, u 는 주류 방향 유속, y 는 벽(하상)으로부터의 거리이다. Eq. (1)은 유속 분포가 선형임을 보여 주고 있다. 벽에서의 점착 조건(no-slip condition)과 무차원 변수를 이용하면, Eq. (1)은 다음과 같은 벽법칙이 된다.

$$u^+ = y^+ \quad (2)$$

여기서 u^+ 는 무차원 유속이다.

2.2 대수 법칙

한편, 경계층의 내부와 외부는 지배하는 척도(scale)가 다르기 때문에 서로 다른 식으로 나타내어진다. 내부 영역에서는 흐름을 지배하는 특성 속도(속도 척도)와 특성 길이(길이 척도)는 각각 u_* 와 ν/u_* 이며,

이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{u}{u_*} = f\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) = f(y^+) \quad (3)$$

한편, 외부 영역에서는 유속 분포는 길이 척도로는 경계층의 두께 δ (개수로 흐름의 경우 수심 h)와 속도 척도로는 외부 영역의 유속 U_∞ 에 의해 나타낼 수 있다. 즉, 유속 분포가 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\frac{U_\infty - u}{u_*} = F\left(\frac{y}{\delta}\right) = F(\xi) \quad (4)$$

여기서 $\xi \equiv y/\delta$ 로 외부 영역의 무차원 거리이다. Eq. (4)는 일반적으로 유속 결손 법칙으로 불린다.

이 문제에서 내부 영역과 외부 영역의 해는 중복되는 영역, 즉 내부 영역의 관점에서는 y^+ 이 상당히 크고, 외부 영역의 관점에서는 ξ 이 상당히 작은 영역에서 서로 만나야 한다. 그런데, 1938년에 Millikan (Kundu, 1990)은 이것을 유속이 같도록 놓지 않고, 유속의 경사가 같도록 놓았다 (Tennekes and Lumney, 1972). Eq. (3)과 Eq. (4)에서 유속의 경사가 같도록 놓으면, 중복 영역의 식은 다음과 같이 유도된다.

$$y^+ \frac{df}{dy^+} = \xi \frac{dF}{d\xi} = \frac{1}{\kappa} \quad (5)$$

여기서 κ 는 von Karman의 상수이다. 위의 Eq. (5)는 오직 내부 영역의 관점에서는 큰 y^+ 와 외부 영역의 관점에서는 작은 ξ 에만 성립한다는 것에 유의해야 한다. Eq. (5)를 적분하면

$$f(y^+) = \frac{1}{\kappa} \log y^+ + B \quad (6)$$

$$F(\xi) = \frac{1}{\kappa} \log \xi + C \quad (7)$$

여기서 B 와 C 는 적분 상수들이다. 단, Eq. (6)은 내부 영역에, Eq. (7)은 외부 영역에 대한 식이다. 실험에 따르면, 매끄러운 하상에 대해 $\kappa \approx 0.41$, $B \approx 5.5$, $C = -1.0$ 인 것으로 알려져 있다. Eq. (6)은 전통적인 대수 법칙이다. 이를 일반적으로 이용하는 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \log\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) + B \quad (8)$$

이 유도 과정에서 확실하게 보인 것처럼 이 식들은 큰 y^+ 와 작은 ξ 에만 성립한다. 이 때문에 대수 법칙의 적용 범위는, 하한은 $y^+ \approx 30 \sim 50$, 상한은 $y/h \approx 0.2$ (y^+ 로는 대략 수백 정도)로 알려져 있다 (Nezu and Nakagawa, 1993). 이러한 대수 법칙의 유도 방법은 1938년에 Clark B. Millikan이 처음 제안하였지만, 대수 법칙 자체는 이미 그 이전에 독일의 유체 공학자인 Prandtl (1925)과 von Karman (1930) 등에 의해 반경험적으로 제시된 바 있다 (Kundu, 1990).

2.3 완충 영역

한편, 점성저층과 중첩 영역 사이의 영역, 즉 $5 \leq y^+ \leq 30$ 의 영역은 위의 두 법칙이 성립하지 않는 지역으로, 완충 영역이라 불린다. 이론적으로는 이 영역의 유속 분포는 다음과 같은 식을 적분하여 구할 수 있다.

$$\frac{du^+}{dy^+} = \frac{2(1-\xi)}{1 + \sqrt{1 + 4(l^+)^2(1-\xi)}} \quad (9)$$

여기서 $l^+ \equiv lu_*/\nu$ 로 무차원 혼합 거리이고, l 은 Prandtl (1925)이 제안한 혼합거리이다.

그러나, Eq. (9)는 그렇게 간단하게 적분되는 형태가 아니다. 이 때문에 약간의 경험적 지식을 이용한 다양한 시도가 있었다. 예를 들어 von Karman (1930)은 $0 \leq y^+ < 5$ 에는 Eq. (2)를, $y^+ \geq 30$ 에는 Eq. (8)을 그대로 이용하고, 완충 영역($5 \leq y^+ < 30$)에 대해서는 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.

$$u^+ = 5 \log y^+ - 3.05 \quad (10)$$

그의 식은 두 영역을 대수지 상에서 직선으로 연결한 것과 같다. 실제 유속 분포는 세 영역이 매끄럽게 연결되는 데 반하여, von Karman의 방법에서는 Eq. (2), Eq. (10), Eq. (8)을 연결하는 것은 꺾은 선이 된다는 것과, 식의 수가 3개나 된다는 것이다.

한편, 그로부터 10년 후에 Reichardt (1940)는 다음과 같은 공식을 제안하였다.

$$u^+ = 2.5 \log(1 + 0.4y^+) + 7.8 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{11}\right) - \left(\frac{y^+}{11}\right) \exp(-0.33y^+) \right\} \quad (11)$$

이 식의 적용 범위는 내부 영역 전체이다. 그러나, 이 식의 유용성에 대해서는 검토된 바 없다.

완충 영역의 식에 대한 또 하나의 시도는 Deissler (1955)에 의한 것이다. 그는 다음과 같이 두 개로 이루어진 식을 제안하였다.

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{1}{1 + n^2 u^+ y^+ \{1 - \exp(-n^2 u^+ y^+)\}} dy^+ \quad (12)$$

$$0 \leq y^+ < 26$$

$$u^+ = 2.78 \log y^+ + 3.8, \quad 26 \leq y^+ \quad (13)$$

그의 식은 두 개의 식으로 이루어져 있으며, Eq. (12)는 더구나 적분형을 이루고 있어, 상당히 복잡한 계산을 필요로 한다. Reichardt (1940)의 경우와 마찬가지로 Deissler (1955)의 식에 대해서도 적용성이 검토된 바 없다.

한편, van Driest (1955)는 감쇄 함수(damping function)을 이용하다 다음과 같은 내부 영역의 유속 공식을 제안하였다.

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2}{\sqrt{1 + 4\kappa^2 (y^+)^2 \{1 - \exp(-y^+/A^+)\}^2}} dy^+ \quad (14)$$

여기서 A^+ 는 난류에 대한 상수이며, 26의 값을 갖는 것으로 제안되었다. Nezu and Rodi (1986)에 따르면, 이 경험식의 유용성이 입증되었다고 한다. 그러나 Eq. (14)는 적분형태를 띄고 있기 때문에 적용하는 데 상당한 어려움이 있다.

내부 영역에 대한 또 하나의 연구는 Spalding (1961)이 제안한 것이다. 그는 u^+ 대신에 y^+ 의 양함수 형태로 내부 영역의 유속 분포를 나타내었다.

$$y^+ = u^+ + \exp(-\kappa B) \left\{ \exp(\kappa u^+) - 1 - \kappa u^+ - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6} \right\} \quad (15)$$

여기서 κ 와 B 는 대수 법칙의 매개 변수와 같다. Spalding의 식은 u^+ 에 대해 음함수 꼴이므로, 그 해를

구하기가 쉽지 않으며, 항의 수도 적지 않은 것이 문제이다.

이와 같이 완충 영역 또는 이것을 포함한 내부 영역에 대한 유속 분포 공식들은 대부분 매우 복잡한 형태를 하거나, 적분형이나, 음함수 꼴로 나타내어지는 문제가 있다. 다시 말하자면, 원하는 지점의 유속을 손쉽게 구하기 힘들고, 매개 변수를 추정하기 힘들다.

3. 새로운 내부 영역 유속 공식의 제안

3.1 이용된 자료

내부 영역의 유속 분포 공식을 만들기 위해서는 이용하는 자료는 반드시 내부영역의 자료이어야 한다. 즉, Nezu and Nakagawa (1993)에서 지적하였듯이 $y/h \leq 0.2$ 정도의 측정 자료여야 하며, 충분히 바닥 가까이, 즉 $y^+ < 5$ 인 영역의 자료 또한 포함하여야 한다. 그런데 점성 저층에서의 유속은 측정하기가 매우 힘든 문제가 있다. 이 때문에 내부 영역 전체에 걸쳐 측정된 자료는 찾기가 매우 힘들다. 이런 점에서 Laufer (1953)의 자료는 이 분야의 연구에서 대표적으로 이용되는 자료이다. 그의 자료는 관로 흐름의 자료이며, Reynolds 수가 50,000인 것과 500,000인 것의 두 가지 자료이다. 측정은 벽 근처에서는 $y^+ \cong 5$ 까지 이루어졌다. 최근에 Osterlund (1999)는 풍동에서 70개의 유속 분포를 측정하였다. 그도 또한 $y^+ \cong 5$ 근처까지 유속을 측정하였다. 그의 자료는 인터넷에서 쉽게 구할 수 있다.

새로운 유속 분포 공식을 만들기 위해서, Laufer의 자료 2개와 Osterlund의 자료 11개를 이용하였다. 이 13개 자료의 Reynolds 수의 범위는 2,500에서 500,000이다.

3.2 공식 형태의 선정

Spalding (1961)이 지적하였듯이, 내부 영역의 유속 분포 공식은 수학적으로 다음과 같은 사항을 만족하여야 한다.

- ① $y^+ = 0$ 에서 $u^+ = 0$ 을 통과하여야 한다.
- ② $y^+ = 0$ 에서 $u^+ = y^+$ 에 접해야 한다.
- ③ y^+ 가 커지면 대수 법칙에 접근해야 한다.
- ④ 완충 영역에서는 측정된 유속 자료를 잘 적합시켜야 한다.
- ⑤ 이들 조건에 덧붙이자면, 내부 영역의 유속 공식은 다음 조건들 또한 만족시켜야 한다.
- ⑥ 공식은 매개 변수들의 추정이 용이하도록, 간단한 형태여야 한다.

⑥ 매개 변수들은 지나치게 민감하거나 둔감하지 않아야 한다.

⑦ 매개 변수들은 Reynolds 수에 대해 변화하지 않아야 한다. 만일 어떤 매개 변수가 Reynolds 수의 함수라면, 이 효과를 표현하기 위해 공식에 매개 변수를 하나 더 고려하거나 다른 하나의 관계가 주어져야 한다.

이상의 조건을 염두에 두고, 먼저 공식의 기본적인 형태를 살펴 보아야 한다. Fig. 2 는 측정된 유속 분포를 대수 법칙으로 나눈 것이다. 이 그림은 유속 분포와 대수 법칙 사이에 체계적인 경향이 있음을 보여 준다. 또한 이 그림은 간접적으로 대수 법칙의 효용 범위가 y^+ 가 수 백 정도의 범위임을 알려 준다.

Fig. 2의 가능한 함수 형태는 지수 함수나 분수 함수에 감쇄 함수를 곱한 꼴이다. Fig. 2를 나타낼 수 있는 후보들로는 다음과 같은 식들을 생각할 수 있다.

$$g(y^+) = 1 - \exp(-Dy^+) \quad (16)$$

$$g(y^+) = 1 - \exp\{-D(y^+)^2\} \quad (17)$$

$$g(y^+) = 1 - 1/(Dy^+) \quad (18)$$

여기서 $D(> 0)$ 는 벽 근처에서 대수 법칙의 감쇄 효과를 나타내는 계수로서 감쇄 계수(damping factor)라 불리운다. 위의 Eqs. (16)~(18) 중에서 Eq. (16)이 Fig. 2를 가장 잘 적합시키는 것으로 나타났다. 그러나, 세 식의 결과 차이는 그리 크지 않다. Eq. (8)과 Eq. (16)을 곱하면, 내부 영역의 유속 분포 공식은 다음과 같이 된다.

$$u^+ = \left(\frac{1}{\kappa} \log y^+ + B\right) \{1 - \exp(-Dy^+)\} \quad (19)$$

Eq. (19)의 일반적인 특성은 다음과 같다.

첫째, Eq. (19)는 y^+ 가 커지면, 지수 함수가 급격히 0에 가까워지며, 결과적으로 식 전체가 대수 법칙으로 접근한다. 예를 들어, $D=0.15$ 일 경우 $y^+ = 43.5$ 에서 $1 - \exp(-Dy^+) \cong 0.999$ 의 값을 갖는다.

둘째, Eq. (19)는 작은 y^+ 에 대해서는 근사적으로 일차 함수의 꼴을 갖는다. 다시 말하자면, 작은 y^+ 에 대해서는 Eq. (19)는 $u^+ \cong y^+$ 의 형태가 된다. 예를 들어 $D=0.15$ 일 경우 $y^+ = 0.101$ 에서 $u^+ = 0$ 의 값을 갖

는다. 물론, 이것은 완벽하게 $y^+ = 0$ 에서 $u^+ = 0$ 가 되도록 하는 것은 아니지만, 일반적으로 유속 분포의 관심 범위가 $y^+ \geq 1$ 이라는 점을 고려하면, 충분히 만족스런 결과라고 볼 수 있다.

셋째, Eq. (19)는 매우 간단한 형태를 가지고 있다. van Driest (1955)나 Spalding (1961)의 공식들과 비교해 보면 더욱 쉽게 알 수 있다. 이런 간편성 때문에 공식의 매개 변수들의 추정이 매우 쉽게 이루어질 수 있다.

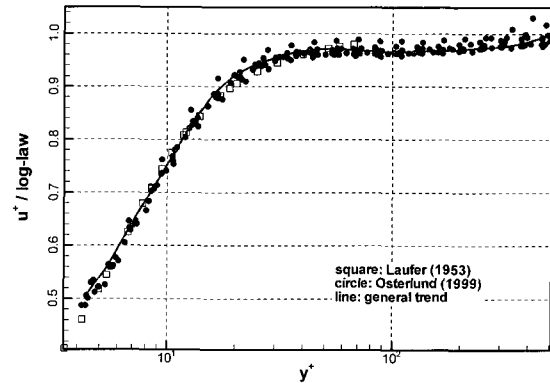


Fig. 2. General trends of velocity profile divided by the log-law

3.3 매개 변수의 추정

감쇄 계수의 추정은 Gauss-Newton 법을 이용한 비선형 회귀(Draper and Smith, 1981)에 의해 쉽게 구할 수 있다. Fig. 3은 Laufer (1953)와 Osterlund (1999)의 자료 중에서 몇 가지 예를 보인 것이다. 13개의 자료 셀을 이용하여 구한 감쇄 계수의 최대값은 0.1522, 최소값은 0.1292, 그리고 평균은 0.1387이었다. 따라서, 일반적인 값으로 0.139나 0.14의 값을 이용하는 것이 좋을 것이다.

3.4 매개 변수의 민감도 분석

먼저, 조건 ⑦에서 매개 변수들은 Reynolds 수에 대해 변화하지 않아야 한다고 제시하였다. 이 조건을 검토하기 위해, Eq. (19)를 개발하는 데 이용된 13개 자료의 감쇄 계수를 Fig. 4에 보였다. 이 그림은 분명하게, 감쇄 계수의 평균 0.14 정도이며, 이 계수가 Reynolds 수에 무관함을 보여 준다.

또한 앞서 기술한 바와 같이 공식의 매개 변수들은 지나치게 민감하거나 둔감하지 않아야 한다(조건 ⑥). 이 민감도를 검토하기 위해 평균값인 $D = 0.140$ 일 때, 감쇄 계수가 +10% ($D = 0.154$)와 -10% ($D = 0.126$)

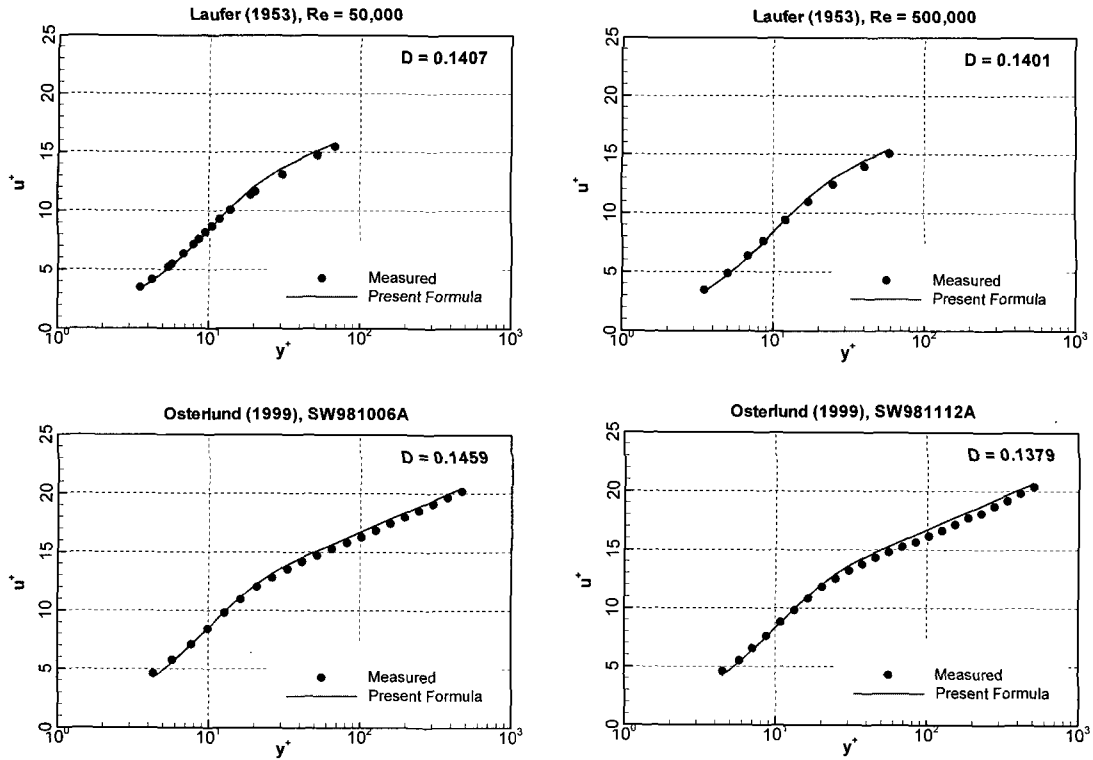


Fig. 3. Results of the present formula

일 때의 유속 분포의 변화를 Fig. 5에 제시하였다. 이 그림은 분명히 유속 분포가 감쇄 계수의 변화에 대해 지나치게 민감하지도 둔감하지도 않음을 보여 준다. 또한, 감쇄 계수를 일반적으로 평균값인 0.14로 사용하여도 무방하다는 것을 암시해 준다.

3.5 적용 예

본 연구에서 개발된 Eq. (19)를 실측 자료에 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 검토에 이용된 자료는 Nezu and Rodi (1986)의 P-1 ($Fr = 0.077$, $Re = 2.3 \times 10^4$) 자료와 Lindgren (1965)의 네 개의 자료

($Re = 6100, 10000, 27000, 49000$)이며, 그 결과는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 이 때 매개변수들의 값은 각각 $\kappa = 0.41$, $B = 5.5$, $D = 0.14$ 를 채택하였다. 이 두 그림은 본 연구에서 개발된 Eq. (19)가 모든 경우의 실측 자료를 매우 잘 표현할 수 있음을 입증하고 있다. $y^+ \leq 500$ 인 영역에 대해서만 살펴 보면 Nezu and Rodi (1986)의 P-1 자료에 대해서는 u^+ 의 평균 오차는 0.011 이고 최대 오차는 0.109이다. 또한, Lindgren (1965)의 자료에 대해서는 $y^+ \leq 500$ 인 영역에서 u^+ 의 평균 오차는 0.031 이고 최대 오차는 0.134이다.

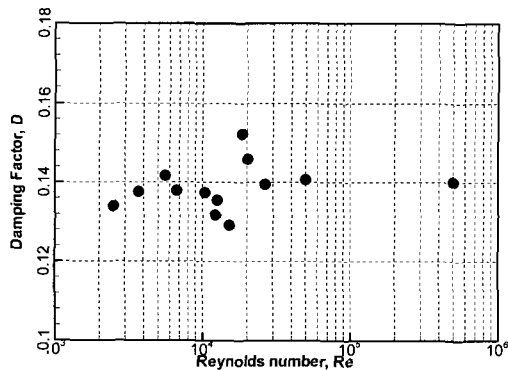


Fig. 4. Change of the Damping factor due to change of Reynolds number

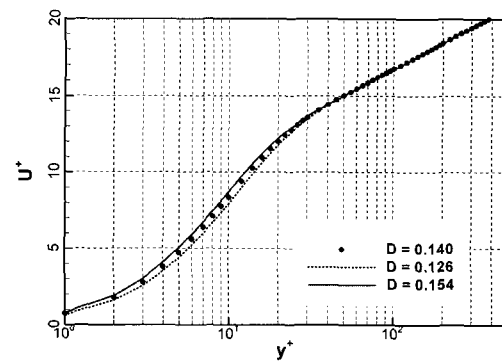


Fig. 5. Sensitivity of the velocity profile due to the change of the damping factor

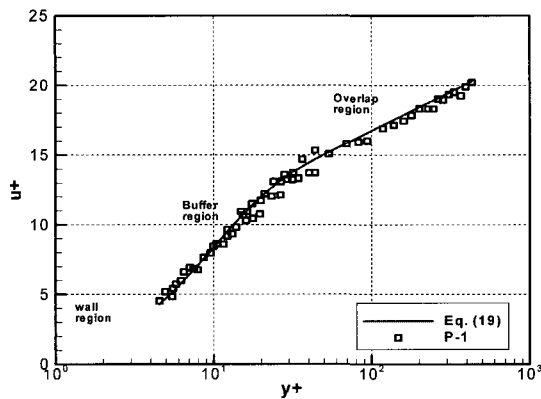


Fig. 6. Comparison of the present formula with Nezu and Rodi (1986)'s data

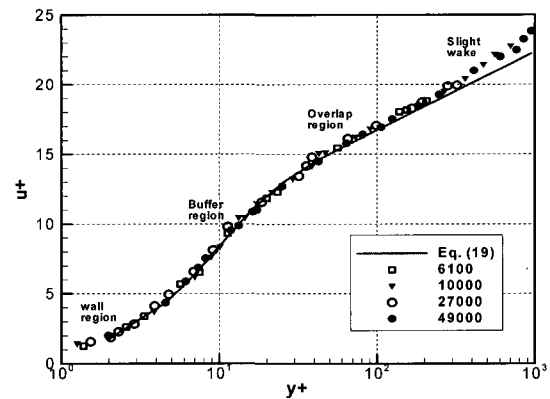


Fig. 7. Comparison of the present formula with Lindgren (1965)'s data

4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 매끄러운 하상 위를 흐르는 난류의 내부 영역의 평균적인 유속 분포를 나타내는 식을 제안하였다. 이 공식은 대수 법칙에 감쇄 함수를 곱한 형태로 이루어져 있다. 이 식은 대수 법칙에 하나의 새로운 매개 변수, 감쇄 계수를 도입한 것이다. 이 식은 점성 저층에서 중복 영역에 이르는 내부 영역을 하나의 간단한 함수 형태로 표현할 수 있다.
2. 제안된 공식은 여러 연구자들에 의해 측정된 자료들을 잘 적합시키는 것으로 나타났다.
3. 감쇄 계수는 평균적으로 $D = 0.14$ 의 값을 갖는다. 이 공식에 의한 유속 분포는 감쇄 계수의 작은 변화에 대해 지나치게 민감하거나 둔감하지 않다. 또한 이 계수는 Reynolds 수의 변화에 무관한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

Buschmann, M.H., and Gad-el-Hak, M. (2003). "Debate concerning the mean-velocity profile of a turbulent boundary layer." *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 4, pp. 565-572.

Coles, D. (1956). "The law of the wake in the

turbulent boundary layer," *J. of Fluid Mech.*, Vol.1, pp. 191-226.

Deissler, R.G. (1955). *Analysis of turbulent heat transfer, mass transfer and friction in smooth tubes at high Prandtl and Schmidt numbers*, NACA Tec. Rep. 1210.

Draper, N., and Smith, H. (1981). *Applied regression analysis*, 2nd ed., John Wiley & Sons.

George, W.K., and Castillo, L. (1997). "Zero-pressure-gradient turbulent boundary layer," *Applied Mechanics Review*, Vol. 50, No. 11, pp. 689-729.

Guo, J. (1998). *Turbulent velocity profiles in clear water and sediment-laden flows*. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Laufer, J. (1953). *The structure of turbulence in fully developed pipe flow*, National Advisory Committee for Aeronautics, Vol. 18.

Kundu, P.K. (1990). *Fluid mechanics*, Academic Press, Inc.

Lindgren, E. R. (1965). *Experimental study on turbulent pipe flows of distilled water*, Oklahoma State Univ., Civil Engineering Dept., Report 1AD621071.

Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, A.A. Balkema.

Nezu, I., and Rodi, W. (1986). "Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 5,

- pp. 335-355.
- Osterlund, J.M. (1999). *Experimental studies of zero-pressure gradient turbulent boundary-layer flow*, Ph.D Thesis, Dept. of Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Prandtl, L. (1925). "Bericht über die Entstehung der Turbulenz," *Z. Angew. Math Mech.* Vol. 5, pp. 136-139.
- Reichardt, H. (1940). "Vollständige Darstellung der turbulenten Geschwindigkeitsverteilung in glatten Leitungen," *Z. angew. Math Mech.*, Vol. 31, pp. 208-209.
- Spalding, D.B. (1961). "A single formula for the law of the wall." *J. of Applied Mechanics*, Vol. 28, pp. 455-457.
- Tennekes, H., and Lumney, J.L. (1972). *A first course in turbulence*, The MIT Press.
- van Driest, E.R. (1955). "On turbulent flow near a wall," *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 23, Nov., pp. 1007-1011.
- von Karman, T. (1930). "Mechanische Ähnlichkeit u. Turbulenz," *Nachr. Ges. der Wiss. Göttingen, Math Phys. Klasse*, Vol. 58.

(논문번호:06-56/접수:2006.05.22/심사완료:2006.08.02)