



# 예인수조 LDV를 이용한 평판 경계층과 와이어 타입 난류촉진장치의 상호작용에 관한 연구

박종열<sup>1</sup>·서정화<sup>2</sup>·이신형<sup>1,3,†</sup>

서울대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>

충남대학교 선박해양공학과<sup>2</sup>

서울대학교 해양시스템공학연구소<sup>3</sup>

## Towed Underwater LDV Measurement of the Interaction of a Wire-Type Stimulator and the Boundary Layer on a Flat Plate

Jongyeol Park<sup>1</sup>·Jeonghwa Seo<sup>2</sup>·Shin Hyung Rhee<sup>1,3,†</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University<sup>1</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University<sup>2</sup>

Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University<sup>3</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The present study aims to investigate the interaction of a wire-type turbulence stimulator and the laminar boundary layer on a flat plate by flow field measurement. For the towing tank tests, a one-dimensional Laser Doppler Velocimetry (LDV) attached on a two-axis traverse was used to measure the streamwise velocity component of the boundary layer flow in zero pressure gradient, disturbed by a turbulence stimulator. The wire diameter was 0.5 and 1.0 mm according to the recommended procedures and guidelines suggested by the International Towing Tank Conference. Turbulence development by the stimulator was identified by the skin friction coefficient, mean and Root Mean Square (RMS) of the streamwise velocity. The laminar boundary layer with the absence of the wire-type stimulator was similar to the Blasius solution and previous experimental results. By the stimulator, the mean and RMS of the streamwise velocity were increased near the wall, showing typical features of the fully developed turbulent boundary layer. The critical Reynolds number was reduced from  $2.7 \times 10^5$  to  $1.0 \times 10^5$  by the disturbances caused by the wire. As the wire diameter and the roughness Reynolds number ( $Re_k$ ) increased, the disturbances by the stimulator increased RMS of the streamwise velocity than turbulent boundary layer.

**Keywords** : Turbulence stimulator(난류촉진장치), Flat plate boundary layer(평판 경계층), Laser Doppler velocimetry(레이저 도플러 유속계), Towing tank test(예인수조시험)

## 1. 서론

선박의 모형시험은 실선의 성능을 추정하기 위한 전통적인 방법이다. 선박의 동력성능 추정을 위한 모형시험은 조파저항의 상사를 위해 프루드수(Froude number, Fr)를 모형과 실선 간 동일하게 설계한다. 이 시험 설계에서는 마찰저항에 관계하는 모형과 실선의 레이놀즈수(Reynolds number, Re)의 상사를 달성할 수 없게 되는데, 모형과 실선 간 Re의 차이로 인한 마찰저항 성분의

차이는 경험식을 통해 보정하도록 규정된다.

마찰저항의 차이를 보정하기 위한 경험식은 난류 이론에 근거하여 개발되었으므로, 모형선에서도 충분히 발달된 난류 경계층이 발생되어야 시험의 신뢰성을 확보할 수 있다. 하지만 실선과 달리 모형선에서는 층류와 천이영역이 전체 길이에서 차지하는 비율이 크기 때문에, 난류촉진의 정도가 모형시험을 통한 실선 동력 성능 추정의 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 길이가 3 m 이하인 작은 모형선의 저속 영역 실험에서는 난류촉진장치를 부착하더라도 낮은 Re로 인해 선수부의 상당 부분에 층류와 천이영역

이 형성되어, 모형선 주위 유동에 대한 고려 없이 실선 성능을 추정할 경우 신뢰성 높은 결과의 도출이 힘들다.

국제수조회의(International Towing Tank Conference, ITTC)에서는 모형선 주위의 난류 촉진을 위해 스테드(stud), 와이어(wire), 모래 띠(sand strip), Hama 띠(Hama strip)를 이용한 난류촉진을 권장하고 있으며, 각 난류촉진장치들에 대한 규격, 설치 위치 등에 대한 가이드라인을 제시한 바 있다 (ITTC, 2002). 난류촉진장치의 영향은 단순히 난류의 발생에 그치지 않고, 촉진된 난류로 인한 표면 마찰력 변화, 난류촉진장치의 형상저항 발생, 경계층 유동 구조의 변화 등을 수반한다. 이들은 모형시험 결과에 큰 영향을 줄 수 있으므로, 난류촉진장치가 층류 경계층을 난류로 전이를 촉진시키는 과정에 대한 자세한 이해가 필요하다.

우선 압력 구배가 없는 평판에서 난류 경계층이 어떻게 발달되는지에 대한 이해가 필요하다. 영압력 구배 조건의 평판 경계층에 대한 연구는 대형 와 모사(Large Eddy Simulation, LES), 직접 수치 모사(Direct Numerical Simulation, DNS)를 이용한 전산유체역학 해석과 실험을 통해 활발하게 수행되었다. Wu & Moin (2009)은 DNS 해석을 통해 경계층 내 유속의 평균값, 변동 성분, Reynolds shear stress를 분석하였다. Wu & Moin (2009)의 연구에서 흐름방향 유속( $u$ )의 제곱평균제곱근(Root Mean Square, RMS)의 최댓값이 다른 방향들에 비해 2배 이상 컸으며, 최댓값의 발생 위치도 벽면에 가장 가까웠다. Jiang et al. (2020)은 회류수조에서 입자영상유속계(Tomographic particle image velocimetry, tomo-PIV)를 이용하여 벽면 근처의 저속 흐름띠(low-speed streak)에 의한 유동 구조를 분석하였다. Jiang et al. (2020)은 저속 흐름띠가 분출(ejection)과 쓸림(sweep) 과정을 통해 헤어핀 보텍스와 같은 3차원 유동 구조를 형성하여 등방성이 강화된다고 주장하였다. Paik et al. (2013)은 캐비테이션 터널에서 방오 도료의 도장 유무에 따른 평판 경계층 내 유속을 레이저 도플러 유속계(Laser Doppler Velocimetry, LDV)를 이용하여 계측하고, 표면 마찰력을 비교하였다.

난류촉진장치에 관한 선행연구들에서는 전산유체역학 해석과 풍동과 회류수조에서 열선 유속계(hot-wire anemometer), LDV를 이용한 실험이 주로 수행되었다. Lee (2018)는 초저속의 낮은 레이놀즈수 영역에서 스테드 주위의 유동을 DNS와 LES를 이용하여 분석하였다. Fransson et al. (2004)은 스테드 사이의 간격과 횡방향 파수(spanwise wave number)에 따른 흐름방향 띠(streamwise streak)의 진폭에 대한 실험을 수행하였다. Dos Santos et al. (2020)은 작은 크기의 알갱이와 지그재그 띠를 부착한 평판에 대해 흐름방향 유속의 평균값과 난류 강도를 계측하여, 난류 촉진 정도를 분석하였다.

이처럼 영압력 구배의 평판과 난류촉진장치에 대한 선행연구가 실험, 전산유체역학 해석을 통해 수행되었지만, 난류촉진 과정은 난류촉진장치가 발생시키는 외란과 경계층 내 유동의 상호작용 측면에 대해 연구될 필요가 있다. 에인수조 시설에서는 회류수조나 풍동과 달리 정지된 유체장에서의 실험이 가능하기 때문에, 초기 난류 성분이 최소화된다는 장점이 있다. 본 연구에서

는 난류촉진장치 부착 직후의 위치에서 유속 계측을 통해 경계층의 교란 정도와 후류로 진행함에 따라 난류촉진장치에 의한 외란이 경계층 내 유동에 미치는 영향을 유속의 평균값과 RMS를 이용하여 분석하였다.

선박의 모형시험이 주로 수행되는 에인수조 환경에서 흐름방향 유속 계측을 위해 1차원 LDV를 이용한 평판 경계층 실험 시스템을 구축하여 난류 경계층의 발달을 관찰하였다. 평판에 대해 기존의 실험 결과 및 이론식과 비교하여 실험 시스템을 검증하고, 2차원 난류촉진장치인 와이어를 평판에 부착하여 평판 결과와의 차이를 분석하였다. 와이어의 유무와 와이어의 제원에 따른 속도의 평균값, 변동 성분, 표면 마찰력 변화를 분석하여 난류촉진장치에 의한 난류의 발달과정과 난류촉진장치의 효용성을 평가하였다.

본 논문은 다음의 순서로 구성된다. 2장에서는 에인수조에서의 LDV를 이용한 계측 및 실험 시스템에 대해 설명하였다. 3장에서는 평판과 와이어를 부착한 평판의 경계층 내 유속 계측 결과를 정리하였다. 4장은 연구 내용의 요약과 결론으로 구성된다.

## 2. 실험 구성

### 2.1 실험 모형

실험 대상은 수직 방향으로 설치되는 평판으로, 길이는 1.2 m, 폭은 0.8 m, 두께는 15 mm이다. 평판의 전연(leading edge) 형상은 Hanson et al. (2012)의 선행연구를 참고하여 영압력 구배 조건을 잘 형성하도록 비대칭 타원형으로 제작하였다. 후연(trailing edge)은 Williams et al. (2018)의 썩기형 전연 형상을 참고하여 썩기 각도를 선행연구와 동일하도록 제작하였다. 평판의 전연과 후연 형상에 대한 자세한 그림은 Fig. 1에 나타내었다. 전연에서 타원 형상이 차지하는 길이는 0.150 m이며, 후연의 썩기 형상이 차지하는 길이는 0.162 m이다.

ITTC (2002)의 권고사항에서는 0.5~1.0 mm 직경의 와이어를 사용하는 것을 권장하고 있다. 본 연구에서는 원기둥 단면 형상의 0.5, 1.0 mm 직경의 와이어에 대한 실험을 수행하여 와이어의 직경이 난류로의 전이에 미치는 영향을 분석하였다. 와이어는 유동 방향을 가로질러 평판의 표면에 평행하게 놓인다. 평판을 수직으로 세우고 와이어를 평판에 고정시킨 후 소량의 액체 순간 접착제를 와이어를 따라 흘러내려 보내며 아크릴 평판의 손상을 최소화시키며 와이어를 부착하였다. 실험에 사용된 아크릴 평판의

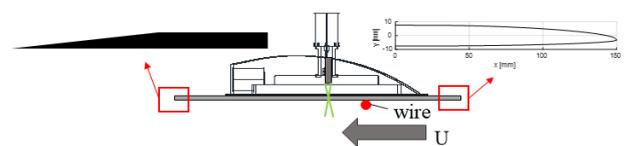


Fig. 1 The geometry of the leading edge and trailing edge of the flat plate

Table 1 Local Reynolds number at the wire position ( $Re_{x,wire}$ ), and the ship length-based Froude number ( $Fr$ )

U [m/s]	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$Re_{x,wire}$	$1.5 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5$	$2.5 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$3.5 \times 10^5$
$Fr$ (L=3m)	0.1843	0.2458	0.3072	0.3687	0.4301
$Fr$ (L=4m)	0.1197	0.1596	0.1995	0.2395	0.2794
$Fr$ (L=7m)	0.0517	0.0690	0.0862	0.1034	0.1207

조도는 SJ-210 조도 측정기(Mitutoyo Corporation, Kanagawa, Japan)를 이용하여 계측하였으며, 중심선 평균 거칠기 (arithmetical average roughness,  $R_a$ )는  $0.157 \mu\text{m}$ 이다.

예인수조에서 선박의 모형시험이 수행되는  $Re$ 와  $Fr$  조건을 고려하여 모형시험과 비슷한 유동 조건이 형성되도록 와이어의 부착 위치는 전연으로부터 0.5 m 거리로 선정하였다. Table 1에는 와이어가 부착되는 위치( $x_{wire}$ )에서 예인속도( $U$ )에 따른  $Re_{x,wire}$ 를 나타내었으며, 물의 동점성계수는  $10^{-6}$ 으로 계산하였다. 본 실험에서는 실험이 수행된 날의 수온을 측정하여 동점성계수 및  $Re$ 를 계산하였다. 모형선 길이(L)의 5% 위치에 난류촉진장치가 부착될 때,  $Re_{x,wire}$ 에 해당하는 유속을 계산하여  $Fr$ 를 계산한 결과를 Table 1에 나타내었다. 모형선의 크기가 3, 4, 7 m일 때,  $Fr$ 의 범위는 각각 0.1843–0.4301, 0.1197–0.2794, 0.0517–0.1207으로 예인수조 시험을 수행하는 상선들의 일반적인 운항 조건 범위에 포함됨을 확인하였다.

## 2.2 계측 및 실험 장비

앞서 Wu & Moin (2009)과 Jiang et al. (2020)의 연구를 통해 알려진 바와 같이, 흐름방향 유속 성분은 RMS 값이 다른 방향 속도 성분에 비해 2배 이상 크며, 흐름방향 유속의 변동 성분과 저속 흐름띠는 벽면 근처에서의 3차원 유동 구조를 발생시키는 주요한 역할을 하기 때문에 난류 촉진 여부를 판별하는데 가장 중요한 물리량이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 흐름방향 유속 계측에 중점을 두어 실험을 수행하였다.

경계층 내의 흐름방향 유속을 계측하기 위해 1D LDV 장비를 사용하였다. Dantec Dynamics FiberFlow (Dantec Dynamics, Skovlunde, Denmark) 제품 군 중 레이저 빔의 직경이 가장 작아 경계층 계측에 유리한 14 mm 직경의 프로브를 사용하였다. 레이저 빔 사이의 간격은 8 mm, 빔 직경은 0.27 mm, 렌즈로부터 계측지점까지의 거리는 50 mm이다. LDV 프로브는 수중에 설치되며, 수중 작동 환경을 고려하여 방수용 프로브와 케이블로 제품을 구매하여 사용하였다.

Fig. 2에 실험 시스템과 좌표계를 나타내었다. x축은 흐름방향 (streamwise), y축은 수직방향(normalwise), z축은 횡방향

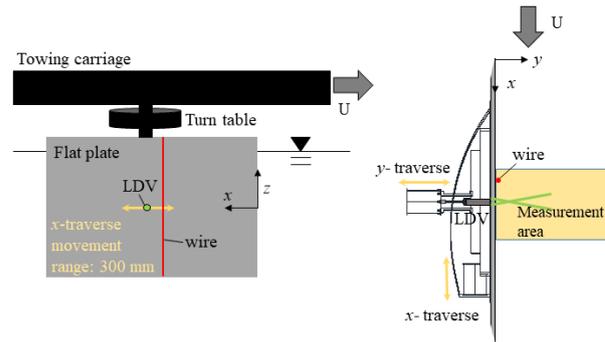


Fig. 2 Experimental setup and the coordinate system

(spanwise)으로 설정하였다. 우선 유동 방향에 평판이 완전히 정렬되도록 턴테이블(turn table)을 이용해 평판을 z방향으로 회전하였다.

LDV 프로브는 계측부(measurement area)의 반대편에 설치되며, 투명한 아크릴 평판을 이용하여 LDV의 레이저 빔이 평판을 투과하여 계측부의 유속 측정이 가능하도록 설계하였다. LDV 프로브는 2축 이송장치에 설치되어 x축과 y축으로 이동하며 경계층 내의 흐름방향 유속( $u$ )을 계측하였다. x축 이송장치의 이동범위는  $x=0.45\text{--}0.75$  m로 0.3 m 범위 내에서 0.05 m 간격으로 경계층 내 유속을 계측하였다. y축 이송장치는 경계층 계측 시 정밀 제어를 요구하며, 이송장치의 위치 조정을 위한 최소 해상도는  $50 \mu\text{m}$ 이다. 볼스크류를 이용하여 300 mm 당 누적 오차가  $50 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖도록 시스템을 설계하였다.

LDV의 z 방향 계측 위치는 Longo et al. (1998)의 예인수조에서의 평판 경계층 계측 실험 결과를 참고하여, 자유수면의 영향을 받지 않도록 수면에서 300 mm 아래의 위치로 설정하였다.

## 2.3 실험 조건

평판 경계층에 영향을 미치는 주요 변수로는 예인속도( $U$ ), 와이어의 부착위치( $x_{wire}$ ), 전연으로부터 계측지점까지의 거리( $x$ )가 있다. Table 1의  $Re_{x,wire}$ 와  $Fr$ 를 참고하여 예인속도 조건은 0.3–0.7 m/s, 와이어의 부착위치는 전연으로부터 0.5 m 위치로 설정하였다. 전연으로부터 계측지점까지의 거리는 0.45–0.75 m 범위에서 0.05 m 간격으로 유속을 계측하여 Fig. 3과 같이 흐름방향의 경계층 발달과정을 계측하였다. 평판에서 발달하는 경계층 유동과 와이어가 부착됨에 따라 변화하는 경계층 유동을 국부 레이놀즈수( $Re_x$ ) 변화에 따라 분석하였다.

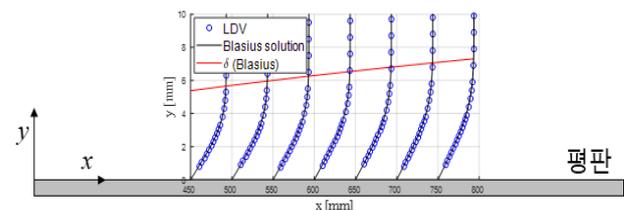


Fig. 3 Mean streamwise velocity of the boundary layer on a flat plate ( $U=0.4$  m/s)

선행연구들 (Smith & Clutter, 1959; Huber & Mueller, 1987)에서는 와이어의 직경(k)과 교란되지 않은 경계층의 와이어 직경 높이에서 유속( $u_k$ )을 이용하여  $Re_k$  (roughness Reynolds number)를 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$Re_k = \frac{u_k k}{\nu} \quad (1)$$

풍동의 선행연구들에서는 천이가 일어나기 위한 최소  $Re_k$ 는 40-600의 값을 가진다고 언급하였다. 하지만, 층류 경계층에서 Blasius solution을 만족한다고 가정하고  $u_k$ 에 대한 식을 전개하면,  $Re_k$ 는 식 (2)와 같이 전개된다.

$$Re_k = 0.332 Re_x^{1.5} \frac{k^2}{x^2} = 8.0039 \sqrt{Re_x} \left(\frac{k}{\delta}\right)^2 \quad (2)$$

식 (2)를 살펴보면, 동일한  $Re_k$ 와 k 조건이라도 난류촉진장치가 부착되는 위치 x에 따라  $Re_k$ 의 값은 달라져, 실험 시스템의 구성에 많은 영향을 받을 것으로 예상된다. 풍동실험 결과를 종합하였을 때도 천이가 일어나는  $Re_k$ 의 범위가 40-600으로 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

와이어의 직경이 0.5, 1.0 mm일 때,  $Re_k$ 는 각각 19.28-68.64, 76.89-271.88의 값을 가진다. 와이어의 직경이 2배가 됨에 따라  $Re_k$ 의 값은 4배 정도 증가하여 난류촉진장치의 높이와 경계층 두께의 비율에 따른 영향을 분석할 수 있다. 경계층 두께는 Blasius solution을 이용하여 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\delta = 4.91 \frac{x}{\sqrt{Re_x}} \quad (3)$$

와이어의 직경에 따른 경계층 두께( $\delta$ ),  $u_k$ ,  $Re_k$  와 같은 경계층 내의 주요 값들을 Table 2와 3에 나타내었다. Table 2와 3의  $\delta$ ,  $u_k$ ,  $Re_k$  는 와이어 부착위치인  $x=0.5$  m 위치에서 계산되었다.

Table 2 Main parameters of the boundary layer (k=0.5 mm)

U [m/s]	$Re_x$	$\delta$ [mm]	$u_k/U$	$u_k$ [m/s]	$Re_k$
0.3	$1.5 \times 10^5$	6.3388	0.1285	0.0386	19.28
0.4	$2.0 \times 10^5$	5.4895	0.1484	0.0594	29.68
0.5	$2.5 \times 10^5$	4.9100	0.1659	0.0830	41.48
0.6	$3.0 \times 10^5$	4.4822	0.1816	0.1090	54.48
0.7	$3.5 \times 10^5$	4.4197	0.1961	0.1373	68.64

Table 3 Main parameters of the boundary layer (k=1.0 mm)

U [m/s]	$Re_x$	$\delta$ [mm]	$u_k/U$	$u_k$ [m/s]	$Re_k$
0.3	$1.5 \times 10^5$	6.3388	0.2563	0.0769	76.89
0.4	$2.0 \times 10^5$	5.4895	0.2955	0.1182	118.20
0.5	$2.5 \times 10^5$	4.9100	0.3297	0.1649	164.85
0.6	$3.0 \times 10^5$	4.4822	0.3604	0.2162	216.24
0.7	$3.5 \times 10^5$	4.4197	0.3884	0.2719	271.88

### 3. 실험 결과

#### 3.1 평판 실험 결과

평판 실험이 수행된  $Re_x$  범위는  $1.19-4.23 \times 10^5$ 이다. 천이가 일어나는  $Re_{x,crit}$  값은 일반적으로  $3 \times 10^5$  정도로 알려져 있으며, 3.1 절에서는 층류/천이영역/난류 경계층에 대한 결과로 나누어 설명하였다. Fig. 4에는  $Re_x=1.19-2.65 \times 10^5$  범위 내에서 흐름 방향 평균 유속 결과를 Blasius solution과 비교하여 나타내었다. x 위치와 에인속도에 무관하게 전체적으로 층류 경계층의 특성을 잘 보이는 것으로 확인되었다.

Fig. 5에는  $Re_x=1.19-2.65 \times 10^5$  범위 내에서 흐름방향 유속의 제곱평균제곱근인  $u_{rms}$  결과를 나타내었다.  $u_{rms}$ 는  $y/\delta=0.3$  부근에서 최댓값이 발생하였으며, 그 이후에는 감소하여 경계층 밖에

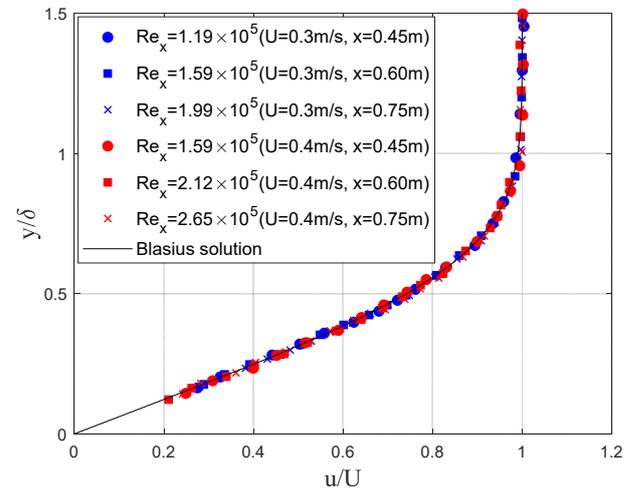


Fig. 4 Profiles of the mean of the streamwise velocity in the laminar boundary layer (flat plate, U=0.3, 0.4 m/s)

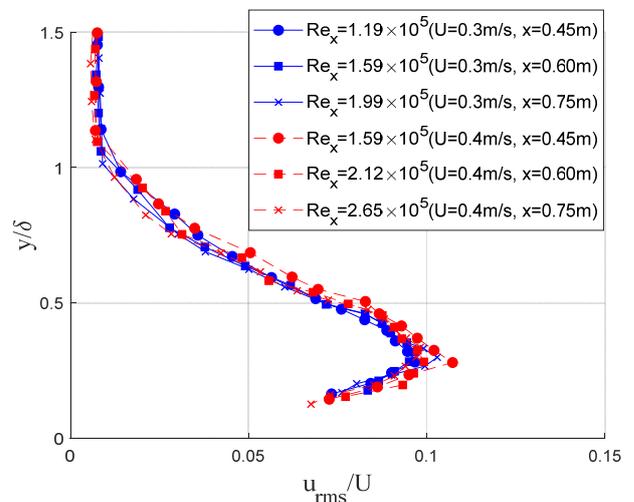


Fig. 5 Profiles of the RMS of the streamwise velocity in the laminar boundary layer (flat plate, U=0.3, 0.4 m/s)

서의  $u_{rms}/U$  값은 0.7% 정도의 값을 가졌다. 경계층 밖의  $u_{rms}/U$  는 유입류의 난류강도로, 정지된 유체장에서 평판을 예인하더라도 예인전차의 속도 정밀도인 2 mm/s에 해당하는 0.7%의 값을 가졌다.

$Re_x$ 가  $1.19\sim 2.65 \times 10^5$ 인 조건에서는 층류 경계층이 발달하여 Fig. 4와 같이 Blasius solution과 평균 유속 결과가 유사하였으며,  $u_{rms}$  결과도 Fig. 5와 같이 최댓값이 발생하는  $y/\delta$ 가 0.3 근처로 비슷하였다. 층류 경계층의 분석 시에는 경계층 두께( $\delta$ )와 유입류의 유속( $U$ )을 이용하여 무차원화하였을 때, 일정한 경향성이 확인되었다.

난류 경계층의 분석 시에는 주로 벽면 속도( $u_\tau$ )를 이용하여 무차원화한 값을 사용한다. 속도 구배를 이용하여 벽면 속도를 추정하기 위해서, 완전 발달된 난류 경계층의 평균 유속 결과를 이용한 방법이 연구되어 벽면 속도 계산 시에 사용되고 있다 (Clauser, 1956; Kendall & Koochesfahani, 2008; Jiang et al., 2020). 본 연구에서도 선행연구들과 동일하게 속도 구배를 이용하여 벽면 속도를 추정하였으며, 수직방향 거리  $y$ 와 흐름방향 유속  $u$ 는 식 (4)와 같이 무차원화하였다.

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau}, y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (4)$$

완전 발달된 난류경계층은  $y^+$ 에 따라 점성저층(viscous sublayer), 완충층(buffer layer), 내층(log-law region)으로 구분된다. 점성의 영향이 지배적인 점성저층에서 난류 경계층의 평균 속도는 식 (5)와 같다.

$$u^+ = y^+ \quad (5)$$

내층에서 난류 경계층의 평균 속도는 로그 법칙을 성립하여 식 (6)과 같이 표현되며, 매끈한 평판에서 von Karman 상수  $\kappa$ 는 0.41,  $B$ 는 5.0의 값을 가진다고 알려져 있다.

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

Spalding (1961)은 점성저층, 완충층, 내층에 대해 멱급수 내삽 방법을 이용하여 평균 속도 식을 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$y^+ = u^+ + \exp(-\kappa B) [\exp(\kappa u^+) - 1 - \kappa u^+ - (\kappa u^+)^2/2 - (\kappa u^+)^3/6] \quad (7)$$

Musker (1979)는 eddy viscosity를 이용하여 식 (8)과 같이 평균 속도 식을 정리하였으며  $s$ 는 0.001093의 상수 값을 사용하였다.

$$\frac{du^+}{dy^+} = \frac{\frac{(y^+)^2}{\kappa} + \frac{1}{s}}{(y^+)^3 + \frac{(y^+)^2}{\kappa} + \frac{1}{s}} \quad (8)$$

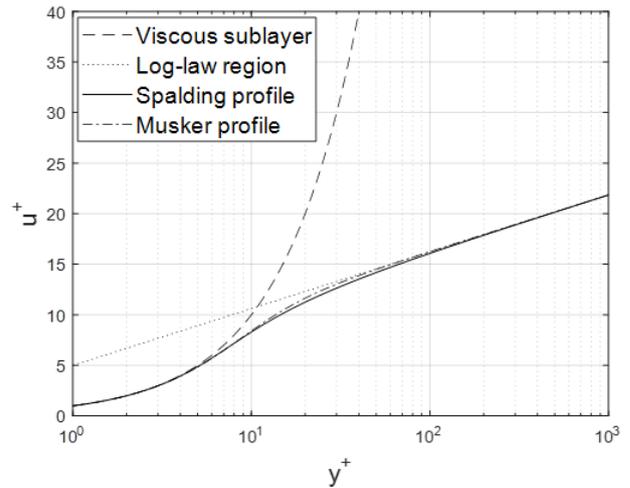


Fig. 6 Mean velocity profile in a turbulent boundary layer

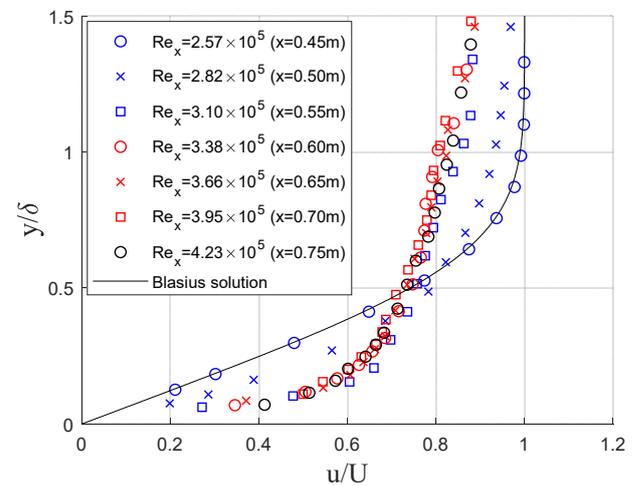


Fig. 7 Profiles of the mean of the streamwise velocity normalized by  $U$  and  $\delta$  (flat plate,  $U=0.7$  m/s)

Fig. 6에는 식 (5)–식 (8)의 결과를 종합하여 나타내었다. Musker의 평균 속도 식을 계산해보면 Spalding의 평균 속도 식과 유사한 결과가 얻어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에는  $Re_x=2.57\sim 4.23 \times 10^5$  범위 내에서 평균 유속과  $u_{rms}$  결과를 나타내었다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 벽면 근처에서 Blasius solution에 비해 유속이 증가하며, 층류 경계층의 결과인 Fig. 4와 Fig. 5의 결과들과 차이가 발생하였다.

Fig. 9에는  $Re_x=2.57\sim 4.23 \times 10^5$  범위 내에서 벽면 속도( $u_\tau$ )를 이용하여 무차원화한 흐름방향 평균 유속 결과를 나타내었다. 벽면 속도는 표면 마찰력 계수(skin friction coefficient,  $C_f$ )와 유입류의 유속( $U$ )에 따라 식 (9)와 같이 정의된다. 층류 경계층의 표면 마찰력 계수는 Blasius solution인 식 (10)을 이용하였고, 난류 경계층의 벽면 속도는 1/7승 법칙에서 유도되는 식 (11)을 사용하였다. 천이영역의 벽면 속도를 알기 위해서는 전단력을 직접 측정해야 하나, 전단력을 직접 측정하기 위한 센서들은 고정된 위치에 설치되어 특정 위치에서의 값만을 측정할 수 있다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는  $y^+=10$  근처의 평균 유속 결과를

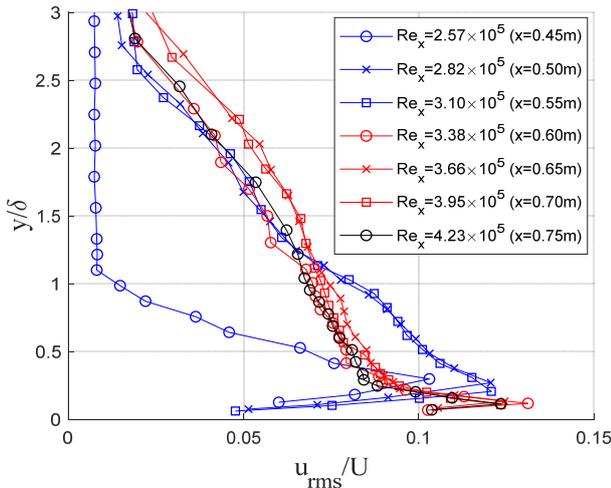


Fig. 8 Profiles of the RMS of the streamwise velocity normalized by U and  $\delta$  (flat plate, U=0.7 m/s)

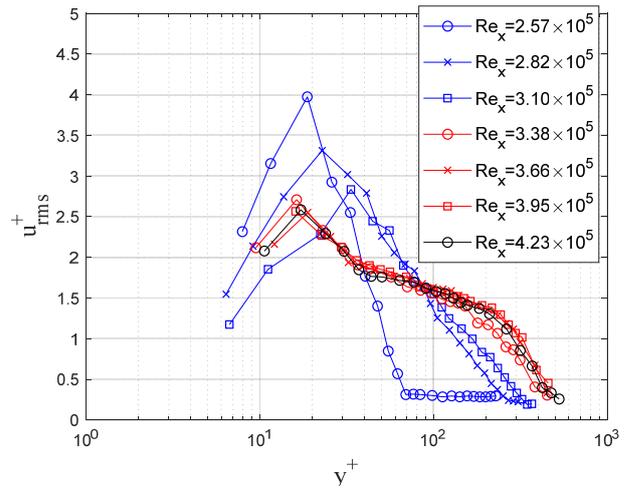


Fig. 10 Profiles of the RMS of streamwise velocity in the transitional and turbulent boundary layer (flat plate, U=0.7 m/s)

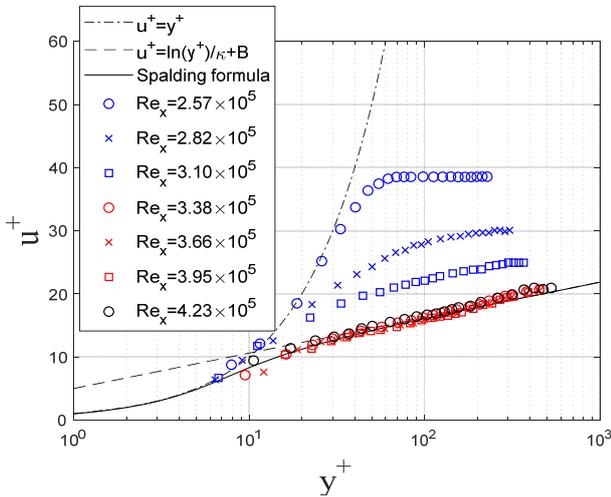


Fig. 9 Profiles of the mean of streamwise velocity in the transitional and turbulent boundary layer (flat plate, U=0.7 m/s)

이 식 (5)와 오차가 적게 계산되도록 천이 영역의 벽면 속도를 추정하였다.

$$u_\tau = U \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (9)$$

$$C_f = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}} \quad (10)$$

$$C_f = \frac{0.0592}{Re_x^{1/5}} \quad (11)$$

Fig. 9의  $Re_x=2.82 \times 10^5$  에서부터 천이가 발생하며,  $Re_x=3.38 \times 10^5$  이후에는 식 (6)과 식 (7)인 로그 법칙과 Spalding 식과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 10에는  $Re_x=2.57-4.23 \times 10^5$  범위 내에서  $u_{rms}$  결과를 나타

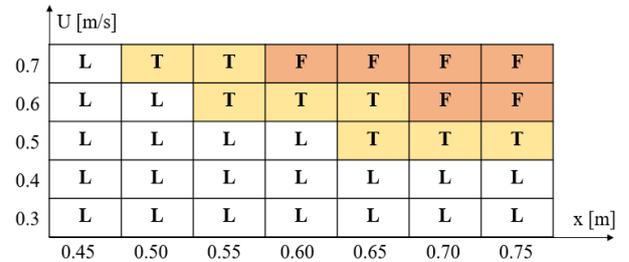


Fig. 11 The characteristics of the boundary layer on a flat plate (L: laminar, T: transition, F: fully developed turbulent)

내었다.  $u_{rms}$  결과도 Fig. 9의 결과와 비슷하게  $Re_x=2.82-3.10 \times 10^5$  구간에서는 일정한 경향성이 보이지 않지만,  $Re_x=3.38 \times 10^5$  이후에는 일정한 경향성이 확인되었다. 완전 발달된 난류 경계층에서는 완충층 부근인  $y^+=15$  근처에서  $u_{rms}$ 의 최대값이 발생하였으며,  $y^+=300$  이상인 외부층(outer layer) 밖에서  $u_{rms}$ 는 급격히 감소하였다.

Fig. 4와 Fig. 9에서 U=0.3, 0.4, 0.7 m/s 조건에 대한 경계층 특성을 확인할 수 있으며, Fig. 11에는 전체 실험 조건에 대한 평판 경계층의 특성을 정리하여 나타내었다. 층류 경계층은 L, 천이영역은 T, 완전 발달된 난류 경계층은 F로 표시하였다. U와 x의 함수인  $Re_x$  값에 따라 층류, 천이영역, 난류로 구분됨을 확인할 수 있다.

### 3.2 와이어 부착 평판 실험 결과

3.1절의 평판 실험에 사용된 평판에 전연으로부터 0.50 m 위치에 0.5, 1.0 mm 직경의 와이어를 부착하였다. 와이어가 부착됨에 따라 난류로의 천이가 촉진되었으며, 와이어를 부착한 실험 결과는 재부착/과속진/난류 경계층에 대한 결과로 나누어 설명하였다.

Elsinga & Westerweel (2012)은 회류수조에서 지그재그 띠를

부착한 평판에 대해 tomo-PIV를 이용하여 유동장 구조를 분석하였다. 지그재그 띠의 후류에서 지그재그 띠에 의해 박리된 유동과 재부착 과정을 확인하였다.

본 연구에서 재부착(reattachment)은 와이어에 의해 박리된 유동이 재부착되는 지점까지의 영역을 재부착 영역으로 정의하였다. 와이어의 직경이 작은 경우에 와이어로 인해 생성된 교란이 작아 천이에 큰 영향을 못 미치며, 유동이 다시 안정화되어 층류 유동이 형성되었다. 0.5 mm 직경의 와이어 실험 중 낮은 유속 조건에서  $Re_x$ 와  $Re_k$ 의 값이 작아 재부착 영역이 확인되었다. 재부착이 발생하는 경우인  $Re_k=19.29$ 에서의 평균 유속 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12의 와이어 부착 직후인  $x=0.51$  m에서 벽면 근처부터 Blasius solution과 차이가 발생하며, 0.65 m 이후에는 교란의 영향이 감소하여 Blasius solution과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

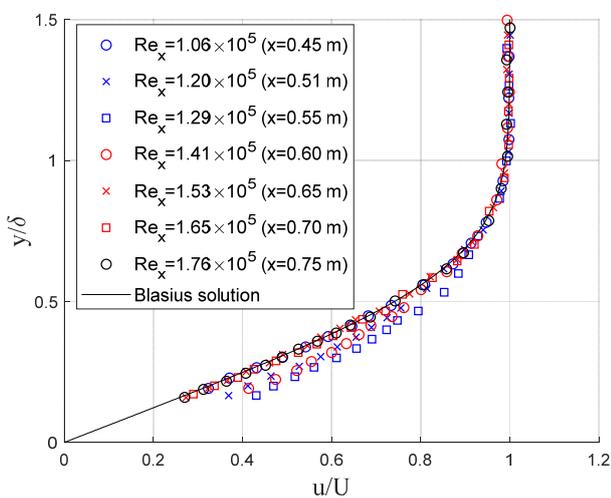


Fig. 12 Profiles of the mean of streamwise velocity in the laminar boundary layer (0.5 mm wire,  $Re_k=19.29$ ,  $U=0.3$  m/s)

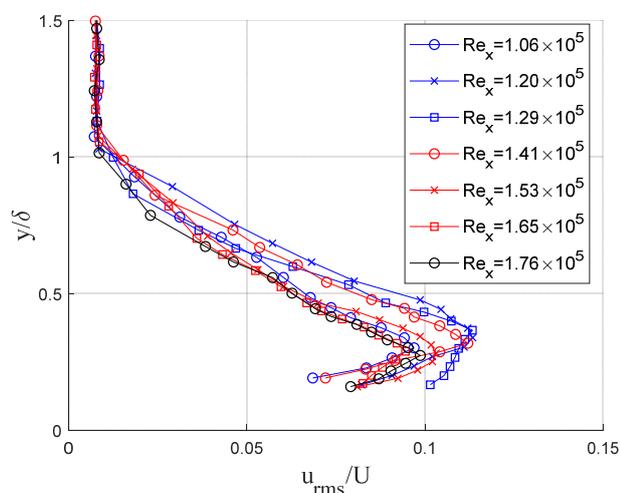


Fig. 13 Profiles of the RMS of streamwise velocity in the laminar boundary layer (0.5 mm wire,  $Re_k=19.29$ ,  $U=0.3$  m/s)

Fig. 13에는 재부착이 확인되는  $Re_k=19.29$ 에서의  $u_{rms}$  결과를 나타내었다. 평판의 층류 경계층에서 결과인 Fig. 5와 비교하였을 때, 평판의 층류 경계층에서  $u_{rms}/U$ 의 최댓값은 0.10 정도였으나, 와이어 부착 직후에  $u_{rms}/U$ 의 최댓값은 0.12 정도로 증가하였다. 그러나, 후류로 진행됨에 따라  $u_{rms}/U$ 의 최댓값은 다시 0.10 정도로 감소하여 천이를 일으킬 과도한 교란은 아닌 것으로 판단된다.

과촉진(overstimulate)은 와이어로 인해 생성된 교란이 과도한 경우로, 와이어가 난류로의 천이를 촉진시키지만 변동 성분이 일반적인 난류 경계층의 값보다 크게 계속되는 경우이다. 와이어 직경이 0.5 mm인 경우에는 과촉진 현상이 확인되지 않았지만, 와이어 직경이 1.0 mm인 경우에 와이어 부착 위치 직후에서 변동 성분이 일반적인 난류 경계층에 비해 크게 계속되었다. 과촉진이 발생한  $Re_k=271.88$  조건에서의  $u_{rms}$  결과를 선행연구들 (Purtell et al., 1981; Spalart, 1988; Wu & Moin, 2009; Jiang et al., 2020)과 비교하여 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 14의  $u_{rms}$  결과에서 확인할 수 있듯이 1.0 mm 직경의 와이어를 부착한 직후인  $x=0.55-0.65$  m 위치에서 변동 성분의 값이 평판 난류 경계층의 변동 성분의 값보다 크게 계속되었다.  $x=0.70$  m 이후에서는 외란의 영향이 후류로 진행함에 따라 감소하여 평판 난류 경계층 결과와 비슷한 값을 가짐을 확인하였다.

과촉진이 된 경우의 평균 유속 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 동일한 유입류 유속 조건인 Fig. 7과 비교하였을 때, 와이어가 부착됨에 따라 벽면 근처에서의 유속이 더 빠르게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

벽면 속도로 무차원화한 평균 속도 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 과촉진이 된 경계층의 평균 유속은 Spalding formula와 잘 일치하며, Fig. 9와 비교하였을 때 평균 유속의 결과로는 과촉진 정도를 확인할 수 없었다.

난류 경계층과 과촉진이 된 경우의 횡방향 유속의 변동 성분 ( $w'$ ) 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 횡방향 유속은 LDV 장비를 90도 회전시켜 계측을 수행하였다.

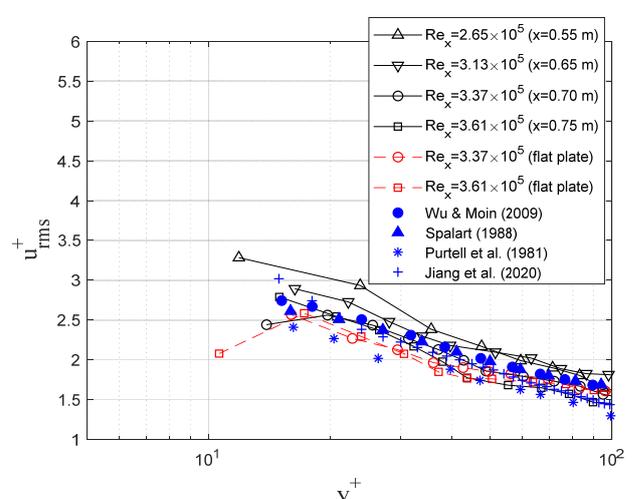


Fig. 14 Profiles of the RMS of streamwise velocity in the turbulent boundary layer (1.0 mm wire,  $Re_k=271.88$ ,  $U=0.7$  m/s)

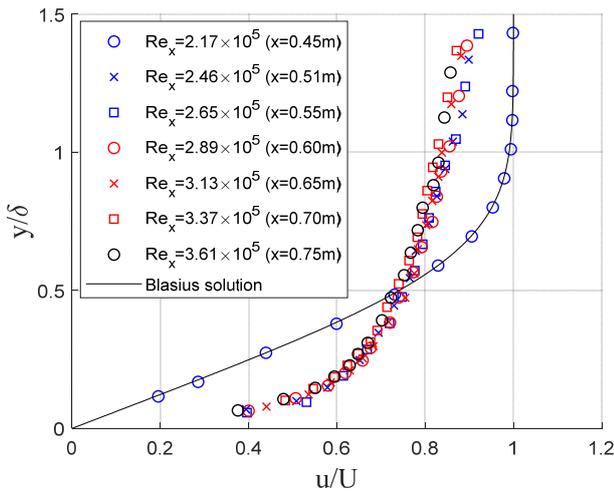


Fig. 15 Profiles of the mean of the streamwise velocity normalized by  $U$  and  $\delta$  (1.0 mm wire,  $Re_x=271.88$ ,  $U=0.7$  m/s)

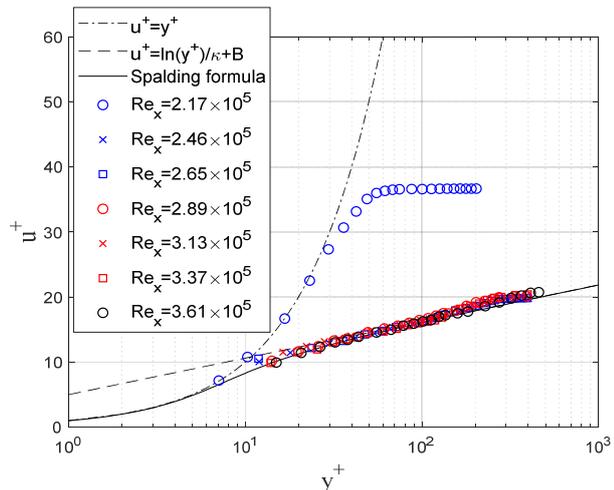


Fig. 16 Profiles of the mean of streamwise velocity in the turbulent boundary layer (1.0 mm wire,  $Re_x=271.88$ ,  $U=0.7$  m/s)

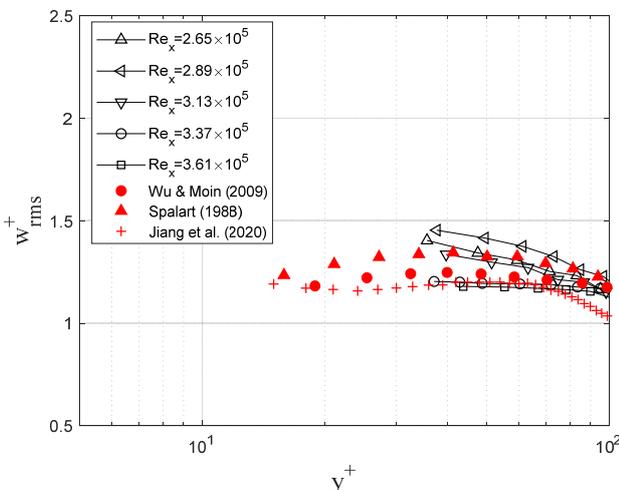


Fig. 17 Profiles of the RMS of spanwise velocity in the turbulent boundary layer (1.0 mm wire,  $Re_x=271.88$ ,  $U=0.7$  m/s)

Table 4 The difference of  $u_{rms}$  and  $w_{rms}$  with Spalart (1988)'s study (1.0 mm wire)

Diff.	$Re_x=2.65 \times 10^5$	$Re_x=2.89 \times 10^5$	$Re_x=3.13 \times 10^5$	$Re_x=3.37 \times 10^5$	$Re_x=3.61 \times 10^5$
$u_{rms}^+$	+8.76%	+15.14%	+6.79%	-2.47%	-8.02%
$w_{rms}^+$	-0.09%	4.61%	-3.03%	-9.13%	-9.72%

횡방향 유속의 변동 성분도 과촉진이 발생함에 따라 선행연구들에 비해 큰 값을 가졌지만, 흐름방향의 변동 성분의 차이에 비해 그 크기는 작았다. 횡방향 유속의 평균값은 0이고, 변동 성분만 존재하기 때문에 도플러 신호의 크기가 흐름방향에 비해 작다. 벽면 근처에서는 낮은 유속 조건과 센서의 잡음으로 인하여 횡방향 유속의 신뢰성 있는 결과를 얻기 힘들어, 흐름방향 유속 계측 결과에 비해 벽면 근처 지점에서의 유속 계측이 불가능하였다.

과촉진이 일어난 경우의 흐름방향과 횡방향 유속의 변동 성분의 차이를 Spalart (1988)의 결과와 정량적으로 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 선행연구 결과와의 차이(Diff.)는 식 (12)와 같이 정의하였다. Spalart (1988)의 실험 결과는 DNS 해석의 검증용 데이터로 주로 사용되고 있어 본 연구에서도 Spalart (1988)의 결과와의 차이를 정량화하였다.

$$Diff. = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{data_{i,LDV} - data_{Spalart}}{data_{Spalart}} \times 100 [\%] \quad (12)$$

Fig. 14의 평판 난류경계층의 흐름방향 변동 성분을 정량화하였을 때,  $Re_x=3.37 \times 10^5$ ,  $Re_x=3.61 \times 10^5$ 에서 각각 -6.26, -7.93%로 Spalart (1988)의 결과에 비해서 작은 값이 계산되었다. 이러한 차이는 실험이 수행된 실험 환경과  $Re$ 의 차이로 인해 필연적으로 발생하게 되며, Fig. 14의 선행연구들의 결과도 서로 간의 편차가 있음을 확인할 수 있다.

Table 4의 와이어가 부착되었을 때의 차이는  $Re_x=3.61 \times 10^5$ 에서 -8.02%로 평판에서 완전 발달된 난류 경계층의 값인 -7.93%와 비슷하였다. 과촉진이 된 경우에는 흐름 방향 성분의 Diff.가 +15.14%까지 증가하였으나, 후류로 진행됨에 따라 -8.02%로 다시 감소함을 확인할 수 있었다. 횡방향 유속의 변동 성분은 완전 발달된 난류경계층인  $Re_x=3.61 \times 10^5$ 에서 Spalart (1988)의 결과와 차이는 -9.72%였다. 횡방향 변동 성분은 완전 발달된 난류 경계층에 비해 과촉진 상황에서 증가폭이 14.33%로 흐름방향의 증가폭인 23.16%에 비해 작았으며, 후류로 진행함에 따라 더 짧은 거리에서 수렴함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 와이어에 의해 발생한 교란은 흐름방향의 유속에 더 큰 영향을 미치며, 이는 와이어의 2차원 형상에 의해 발달한 교란의 특성으로 보인다.

### 3.3 난류촉진장치 영향 분석

3.1절과 3.2절의 평판, 와이어 실험 결과를 모두 종합하여

$Re_x$ 에 따른 표면 마찰력 계수( $C_f$ )를 비교하였다. 표면 마찰력 계수는 식 (13)과 같이 벽면 속도( $u_\tau$ )와 유입류의 유속( $U$ )을 이용하여 계산된다.

$$C_f = 2\left(\frac{u_\tau}{U}\right)^2 \quad (13)$$

Fig. 18에 모든 실험 결과를 종합한 표면 마찰력 계수 결과를 나타내었다. 층류와 난류의 표면 마찰력 계수는 식 (10)과 식 (11)을 통해 계산되었다. 평판에서는  $Re_x$ 가  $2.7 \times 10^5$  이하에서 층류 경계층이 형성되었으며,  $3.3 \times 10^5$  이상에서 난류 경계층이 형성되었다. 0.5, 1.0 mm 직경의 와이어를 부착한 경우에는  $Re_{x,wire}$ 가 각각  $1.8 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^5$  이상에서 난류로의 천이가 촉진되었다.

평판의 천이 영역에서 표면 마찰력 계수는  $Re_x$ 에 따라 선형적인 기울기를 가지는 반면에, 와이어 실험의 천이 영역에서 표면 마찰력 계수는 일정한 기울기를 갖지 않고 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 와이어가 부착된 위치 이후에 와이어에 의한 교란으로 천이가 발생하기 때문에, 천이가 일어나는  $Re_x$ 가

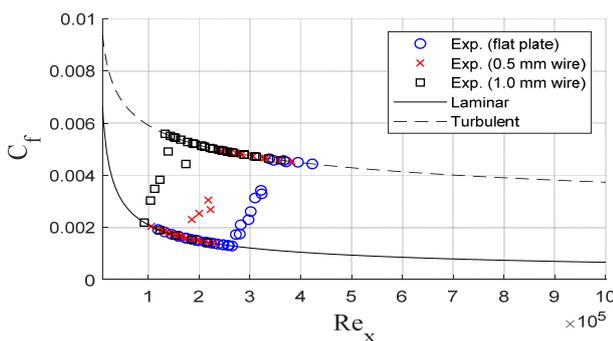


Fig. 18 Skin friction coefficients of all experiment results

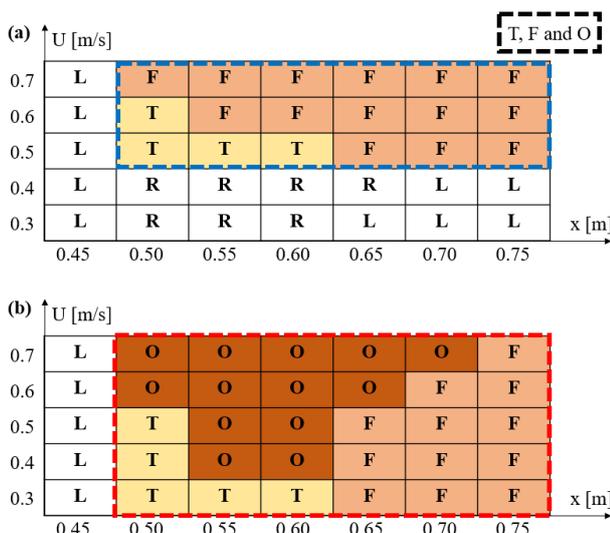


Fig. 19 The characteristics of the boundary layer on a flat plate with the wire – (a): 0.5 mm wire, (b): 1.0 mm wire (L: laminar, T: transition, F: fully developed turbulent, R: reattachment, O: overstimulated)

$Re_{x,wire}$ 의 영향을 받기 때문이다. 즉, 동일한  $Re_x$ 라도  $Re_{x,wire}$ 보다 작은 경우에는 천이가 발생하지 않지만  $Re_{x,wire}$ 보다 큰 경우에는 천이가 발생하여 표면 마찰력 계수 결과는 일정한 기울기를 갖지 않고 분포하게 된다.

0.5, 1.0 mm 직경의 와이어 실험에서 형성된 경계층의 특성을 Fig. 19에 정리하였다. 층류 경계층은 L, 천이영역은 T, 완전 발달된 난류 경계층은 F, 재부착 영역은 R, 과촉진은 O로 표시하였다.

Dos Santos et al. (2020)의 연구에서는 모래 알갱이의 직경과 지그재그 띠의 형상에 대해 실험을 수행하였으며, 본 연구와 유사하게 변동 성분의 차이가 큰 난류촉진장치들에 대해 과촉진이 발생하였다고 주장하였다. 와이어가 부착되지 않은 평판에서 완전 발달된 난류 경계층의 Diff.는  $Re_x$ 에 따라 -7.93%에서 -6.26%의 값을 가졌으며, 과촉진은 Diff.가 -5%보다 큰 경우로 정의하였다. 1.0 mm 직경의 와이어를 부착하였을 때,  $Re_x = 118.20$  ( $U=0.4$  m/s),  $164.85$  ( $U=0.5$  m/s) 조건에서는  $x=0.51$  m에서 천이가 시작되고  $x=0.55-0.60$  m에서 과촉진이 확인되었다.  $Re_x$ 가  $216.24$  ( $U=0.6$  m/s),  $271.88$  ( $U=0.7$  m/s)로 증가함에 따라 과촉진이 확인되는 거리는  $x=0.65, 0.70$  m까지로 길어졌으며, 이는  $Re_x$ 가 증가함에 따라 외란의 영향이 더 커지기 때문이다.  $Re_x$ 가 증가하기 위해서는 와이어 높이에서의 유속인  $u_k$ 가 증가하거나, 와이어의 높이  $k$ 가 증가하여야 한다. 경계층 두께 내에서 와이어가 차지하는 비율이 크거나, 와이어를 지나는 유속이 빠를수록 와이어에 의한 외란의 영향이 증가하게 된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 ITTC 권고안에서 제안되는 난류촉진장치의 효용성과 영향을 확인하기 위해서, 2차원 난류촉진장치인 와이어를 이용한 실험을 수행하고 평판의 경계층 결과와 비교하였다. 흐름 방향 속도의 평균값과 변동 성분, 횡방향 속도의 평균값과 변동 성분을 이용하여 경계층 특성을 분석하였다. 천이가 일어나는  $Re_{x,crit}$ 은 평판에서  $2.7 \times 10^5$ 의 값을 가졌으나, 0.5, 1.0 mm 직경의 와이어가 부착됨에 따라 각각  $1.8 \times 10^5$ ,  $1.0 \times 10^5$ 로 감소하였다.

0.5 mm 직경의 와이어가 부착되었을 때  $Re_x$ 와  $Re_k$ 가 작은 시험 조건에서는 와이어에 의한 교란의 정도가 작아, 벽면 근처에서 평균 유속이 증가하지만 유동이 후류로 진행함에 따라 다시 안정화되어 층류 경계층 결과를 가지며 재부착 영역이 확인되었다. 1.0 mm 직경의 와이어가 부착되었을 때  $Re_x$ 와  $Re_k$ 가 과도하게 클 경우에는 와이어 부착 위치 직후에서 와이어에 의한 교란이 경계층 내의 변동 성분을 증가시켜, 일반적인 난류 경계층의 값보다 변동 성분이 큰 과촉진 현상이 확인되었다. 완전 발달된 난류 경계층과 과촉진 시의 변동 성분 차이를 비교하면, 흐름방향의 증가 폭이 23.16%로 횡방향의 증가 폭인 14.33%에 비해 더 컸다. 이는 와이어의 2차원 형상에 의해 발생한 교란이 흐름방향의 변동 성분에 주로 영향을 주기 때문이다.

추후 연구로는 선박의 모형시험에서 주로 사용되는 3차원 난류촉진장치인 스테드에 대한 실험이 필요할 것으로 보인다. 스테드의 경우, 스테드의 주요제원인 지름/높이/간격에 따라 천이 정도가 달라질 수 있다. 스테드의 3차원 형상으로 인해 생성되는 교란은 흐름방향과 횡방향 유속에 모두 영향을 미치기 때문에, 변동 성분이 증가하고 복잡한 유동구조가 형성되어 등방성이 강화되고 난류로의 천이가 촉진될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단(NRF-2020R111A2074369, NRF-2021R1A6A3A13045434)의 지원을 받아 수행되었으며, 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사를 드립니다.

## References

- Clauser, F.H., 1956. The turbulent boundary layer. *Advances in Applied Mechanics*, 4, pp.1-51.
- Dos Santos, F.L., Sanders, M.P.J., de Santana, L.D., & Verner, C.H., 2020. Influence of tripping devices in hastening transition in a flat plate submitted to zero and favorable pressure gradients. *Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, United States of America. 6-10 January 2020, 0046.
- Elsinga, G.E., & Westerweel, J., 2012. Tomographic-PIV measurement of the flow around a zigzag boundary layer trip. *Experiments in Fluids*, 52(4), pp.865-876.
- Fransson, J.H., Brandt, L., Talamelli, A., & Cossu, C., 2004. Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer. *Physics of Fluids*, 16(10), pp.3627-3638.
- Hanson, R.E., Buckley, H.P., & Lavoie, P., 2012. Aerodynamic optimization of the flat-plate leading edge for experimental studies of laminar and transitional boundary layers. *Experiments in Fluids*, 53(4), pp.863-871.
- Huber, A.F., & Mueller, T.J., 1987. The effect of trip wire roughness on the performance of the Wortmann FX 63-137 airfoil at low Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*, 5(4), pp.263-272.
- ITTC, 2002. Procedures for resistance, propulsion and propeller open water tests. *23rd International Towing Tank Conference*, Venice, Italy. 8-14, September, 2002, 7.5-01-01-01.
- Jiang, X.Y. et al., 2020. Experimental study on low-speed streaks in a turbulent boundary layer at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 903.
- Kendall, A., & Koochesfahani, M., 2008. A method for estimating wall friction in turbulent wall-bounded flows. *Experiments in Fluids*, 44(5), pp.773-780.
- Lee, S.B., 2018. Direct numerical and large eddy simulations of transitional flows around turbulence stimulators at very low speeds. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(3), pp.265-273.
- Longo, J., Huang, H.P., & Stern, F., 1998. Solid/free-surface juncture boundary layer and wake. *Experiments in Fluids*, 25(4), pp.283-297.
- Musker, A.J., 1979. Explicit expression for the smooth wall velocity distribution in a turbulent boundary layer. *AIAA Journal*, 17(6), pp.655-657.
- Paik, B.G. et al., 2013. Study on the drag performance of the flat plates treated by antifouling paints. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.399-406.
- Purtell, L.P., Klebanoff, P.S., & Buckley, F.T., 1981. Turbulent boundary layer at low Reynolds number. *Physics of Fluids*, 24(5), pp.802-811.
- Smith, A.M.O., & Clutter, D.W., 1959. The smallest height of roughness capable of affecting boundary-layer transition. *Journal of the Aerospace Sciences*, 26(4), pp.229-245.
- Spalart, P.R., 1988. Direct simulation of a turbulent boundary layer up to  $Re_\tau = 1410$ . *Journal of Fluid Mechanics*, 187, pp.61-98.
- Spalding, D., 1961. A single formula for the "Law of the wall". *Journal of Applied Mechanics*, 455.
- Williams, O.J., Sahoo, D., Baumgartner, M.L., & Smits, A.J., 2018. Experiments on the structure and scaling of hypersonic turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 834, pp.237-270.
- Wu, X., & Moin, P., 2009. Direct numerical simulation of turbulence in a nominally zero-pressure-gradient flat-plate boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 630, pp.5-41.



박종열

서정화

이신형