

# 表面 거칠기가 曲面상의 亂流 境界層에 미치는 影響에 關한 研究

成 相 模 · 金 時 榮\*

(대전수산고등학교 · \*부경대학교)

## I. 서 론

유체 유동이 있는 물체의 표면에 발생하는 경계층의 생성은 그 주된 요인이 유동 유체의 점성에 의한 것이며 부가적으로는 물체 표면의 거칠기 상태나 물체 표면의 곡률 등이다. 그러므로 유동 에너지의 소모를 가져오는 경계층의 생성을 가능한 줄이려고 하는 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 방법들 중에는 경계층이 발생하는 물체표면에 여러 장치들을 설치하여 점성 마찰력을 감소시킬 수 있는 많은 연구가 보고되었다. 이들의 연구에는 표면에 미소핀을 부착시켜 경계층내의 유동을 교란시키도록 하였으며 그 미소핀의 높이를 적절히 조정함으로써 경계층내부와 그 하류 방향으로 점성 마찰력을 감소시킬 수 있었다. 그리고 Madavan 등과 Mercle 등의 연구에서는 경계층 내부에 적당량의 미소 기포를 경계층내에 분출시킴으로써 점성 마찰력을 감소시키는데 매우 효과적인 결과를 얻었다. 그리고 Kato 등의 연구에서는 다공질 평판으로부터 분출되는 미소 기포를 적당한 유속으로 평판 전체에 걸쳐서 경계층의 내부로 분출되도록 장치하여 평판 하류 방향으로 마찰력을 감소시킬 수 있었다. 그러나 이상의 연구 보고들에서는 주로 평판상에 발생하는 경계층의 현상과 그 마찰력 감소를 위한 연구 결과들이다. 그러나 대부분의 경계층 발생은 선체의 접수 표면이나 항공기 등의 동체와 같이 곡면상에서 발생하는 것이 대부분이다.

본 연구에서는 곡면상에 발생하는 경계층의 점성 마찰력의 생성과 그 감소화를 위한 사전 연구로서 선체 표면과 같은 곡면상에 생성되는 난류 경계층에 대하여 그 표면이 부식이나 침식, 그리고 해조류나 패류 등이 부착되어 이러한 물질이 거칠기 영향으로 나타날 때 곡면상의 경계층에 이러한 거칠기가 어떠한 영향을 주게 되는지 분석하고자 하였다.

## II. 실험 장치 및 방법

### 1. 실험장치

본 실험에 사용된 풍동은 Fig. 1과 같다. 공기 흡입구에서는 자연스럽게 공기가 흡입 되도록 Sine Curve 로 하였으며, 시험부 단면은 높이가 350mm, 폭이 650mm, 그리고 측정부 길이는 950mm이다. 그리고

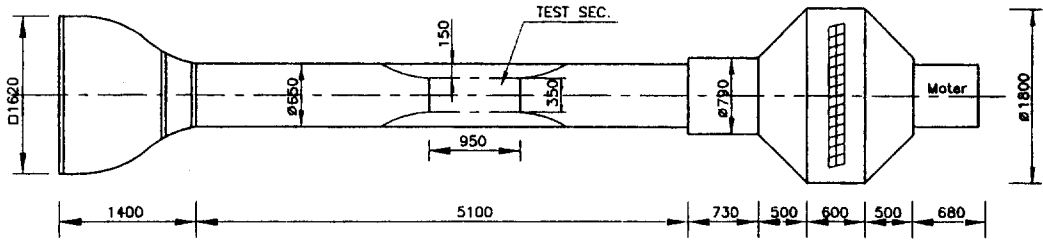


Fig. 1. Wind tunnel

Table 1. 시험 장치 (Wind tunnel)의 제원

덕터 제원		송풍기 제원		구동 모터	
길이	9510mm	임펠러 직경	25000mm	Type	원심식
시험부길이	950	송풍량	230m <sup>3</sup> /s	구동전기모터	4극, 220.57KV
실험단면	650mm×350mm	회전수	230rpm	제어시스템	Inverter System

시험체의 곡면은 그 반경이 785mm이며 계측부는 사각 단면으로서 가로 세로 650×650mm로 하였으며 재료는 사방이 투명 아크릴로 제작하였으며, 측면의 창문에 상하 직선으로 위치별( $X_1=205\text{mm}$ ,  $X_2=410\text{mm}$ ,  $X_3=615\text{mm}$ ,  $X_4=820\text{mm}$ )로 구멍을 뚫어 피토티 튜브 및 벽면 마찰력계를 설치할 수 있도록 하였다. 그리고 시험체 설치 위치는 공기의 유입에 매우 중요한 부분이므로 흐름의 교란을 피할 수 있도록 축소 곡면체로 하였다. 그리고 실험 위치단면(test section)의 벽과 가까운 곳에서 흐름이 가속화 되는 것을 피하기 위하여 균일한 유로 면적으로 하였다. 그리고 아크릴을 지지하는 구조는 철판으로 만들었으며 실험시 모터와 송풍기 등에 의하여 벽면의 흔들림이 없도록 하기 위하여 고무 패킹을 사용하여 볼트체결부분에 삽입하였다. 그리고 풍동 및 시험체의 상세한 치수는 Table 1과 같다.

## 2. 실험방법

시험 위치부에 설치한 곡면을 갖는 대칭 시험 물체의 형상은 Fig. 2와 같다. 그 제원으로서 길이 820mm인 대칭 곡면체의 양쪽면에 거칠기가 없는 경우와 사포(Sand paper, h1(#180), h2(#80), h3(#40))를 각각 교대로 부착함으로써 거칠기의 영향을 주었다. 곡면의 반지름  $R=785\text{mm}$ 로 하였다. 유속은 12m/s, 20m/s 그리고 30m/s로 하였다. 그리고 실험은 벽면에서의 점성 마찰력과 경계층

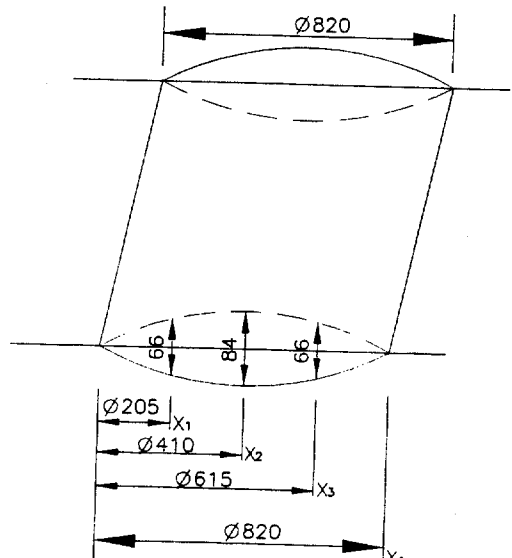


Fig. 2. Experimental object

Table 2. Experimental measurement point

(단위 : mm)

거칠기 유, 무의 경우				
계 측 위 치	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
기준위치 $X/L$	205	410	615	820

내의 속도 분포를 계측하여 각각 무차원의 값으로 표시하였다.

계측 영역은 시험체의 선단으로부터 완전히 난류 영역이 되도록 하기 위하여 균일 평균 유속을 레이놀즈수 106 이상으로 실시 하였다. 점성 마찰력 및 경계층내의 유속 계측 방법은 가는 피토티 관을 사용하여 4곳의 위치에서 경계층의 법선 방향으로 미소거리를 이동하면서 Pascal의 값을 유속으로 변환하는 계측기를 사용하여 유속으로 환산 처리하였다. 그리고 벽면의 마찰력 계수는 주사바늘의 직경이 점성 저층의 두께정도로 피토티관을 만들어 프레스톤( $d=0.02\text{mm}$ )관의 특성을 갖도록 제작하여 그 값을 계측 하였다. 그리고 실험의 계측 위치는 Table 2와 같다

### III. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에서는 유속이 12m/s이고  $X_1=205\text{mm}$ 에서 곡면에 거칠기의 영향이 없는 경우(아크릴면 그대로 상태)와 거칠기 분포가 있는 경우( $h_1=\#180, h_2=\#80, h_3=\#40$ )에 대하여  $X_1=205\text{mm}$  위치에서 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측하였다. 법선 방향의 위치는  $y/\delta$ 의 값이 0.025, 0.04, 0.08, 0.16, 0.25, 0.33, 0.41, 0.50, 0.58, 0.66, 0.75, 0.83, 0.91, 1.00의 위치에서 유속 분포를 각각 계측하였다. 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다도 경계층의 유속분포가 약간 감소하였다. 특히 0.025영역부터 0.5 영역까지의 부분이 그 값의 분포가 크게 감소하였다. 이러한 이유는 곡면을 바깥으로 흐르는 유속이 곡면의 영향을 받아 유속이 더욱 증가되며 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 감소시키는 효과를 나타내었다고 볼 수 있다.

Fig. 4에서는 유속이 12m/s이고  $X_2=410\text{mm}$ 인 경우에 대하여 곡면에 거칠기를 달리 할 경우에 대하

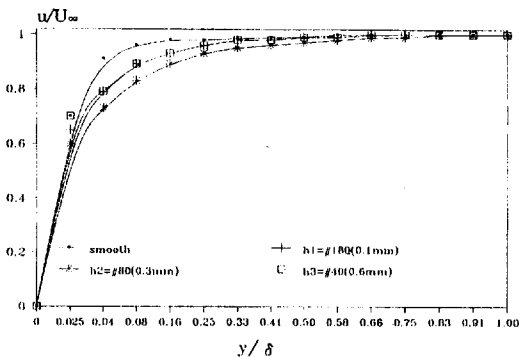


Fig. 3. Velocity Distribution(12m/s)  
( $\delta/R=0.15, x=205\text{mm}$ )

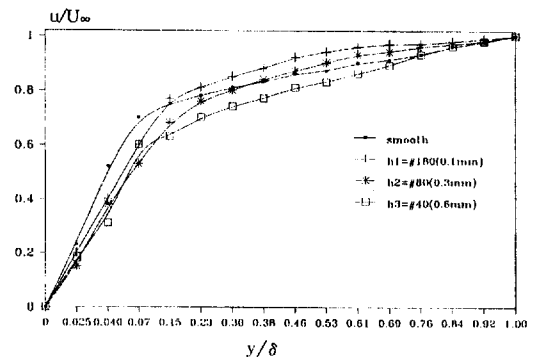


Fig. 4. Velocity Distribution(12m/s)  
( $\delta/R=0.15, x=410\text{mm}$ )

여 境界층내의 법선 方向으로 流速 分포를 계측하였다. 법선 方向의 위치는 0.025, 0.047, 0.07 0.15, 0.23, 0.3, 0.38, 0.46, 0.53 0.61, 0.69, 0.76, 0.84, 0.92, 1.00의 위치에서 계측된 流速 分포는  $y/\delta$ 의 값이 0.1 부근에서는 거칠기 分포가 있는 경우와 없는 경우와 거의 비슷한 값을 나타내 보인다. 특히  $h_1$ 의 경우는 0.15부근에서부터 境界층의 流速 分포가 빠르게 증가해 갔으며 중간 영역을 지나 0.53의 부근에서는 거의 거칠기 分포가 없는 경우와 일치하였다. 이러한 이유는 곡면을 바깥으로 흐르는 유속이 곡률의 영향을 받아 유속이 더욱 증가되며, 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 감소시키는 효과를 나타내는 것은 사실이나 물체의 선단으로부터 하류로 갈수록 유속이 감소되고 境界층이 두꺼워지기 때문이다.

Fig. 5에서는 유속이 12m/s인 경우 대하여 곡면에 거칠기를 달리할 경우에 대하여  $X_3=615\text{mm}$ 에서 境界층내의 법선 方向으로 流速 分포를 계측하였다. 법선 方向의 위치는 0.025, 0.04, 0.07 0.15, 0.23, 0.3, 0.38, 0.46, 0.53 0.61, 0.69, 0.76, 0.84, 0.92, 1.00의 위치에서 계측된 流速 分포는  $y/\delta$ 의 값이 0.23에서 부터 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다 境界층의 流速 分포가 훨씬 빠르게 증가하였으며 0.61을 넘어서는 완만하게 감소하여 갔다. 이러한 이유는 곡률의 값이 중간에서 최대로 되므로 표면 바깥으로 흐르는 유속이 곡률의 영향을 크게 받아 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 크게 감소시키는 효과를 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에서는 유속이 12m/s인 경우 대하여 곡면의 거칠기를 달리할 경우에 대하여  $X_4=820\text{mm}$ 에서 境界층내의 법선 方向으로 流速 分포를 계측하였다. 법선 方向의 위치는 0, 0.025, 0.04, 0.06 0.13, 0.20, 0.26, 0.33, 0.40, 0.46 0.53, 0.60, 0.66, 0.73, 0.80, 0.86, 0.93, 1.00의 위치에서 계측된 流速 分포는  $y/\delta$ 의 값이 0.26에서부터 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다 境界층의 流速 分포가 거의 같은 값을 나타냈으며 그 이전의 영역에서는 거칠기 분포가 가장 작은 경우가 유속이 크게 감소하였다. 이러한 이유는 곡률 표면이 하류 방향에서 유속이 다른 영역보다도 크게 증가하므로 거칠기 영향이 더욱 크게 나타나는 것으로 생각된다. 따라서 境界층의 표면 영역이 바깥 영역보다도 더욱 큰 효과를 나타내었음을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 유속이 20m/s이고  $X_1=205\text{mm}$ 에서 곡면에 거칠기의 영향이 없는 경우(아크릴면 그대로)

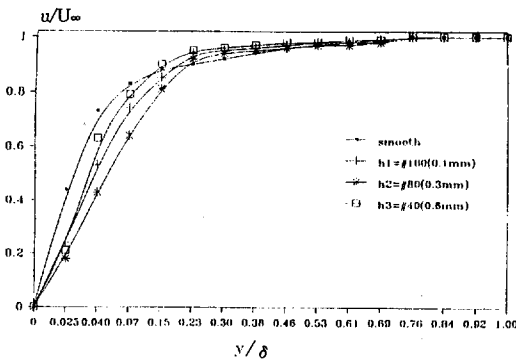


Fig. 5. Velocity Distribution(12m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=615\text{mm}$ )

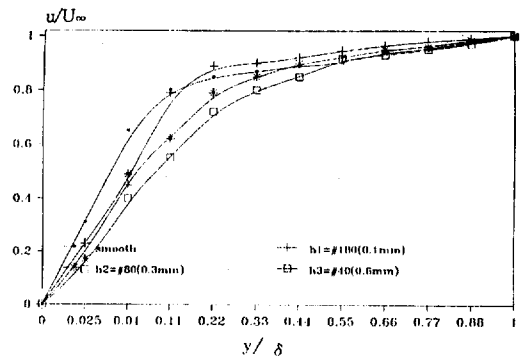


Fig. 6. Velocity Distribution(12m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=820\text{mm}$ )

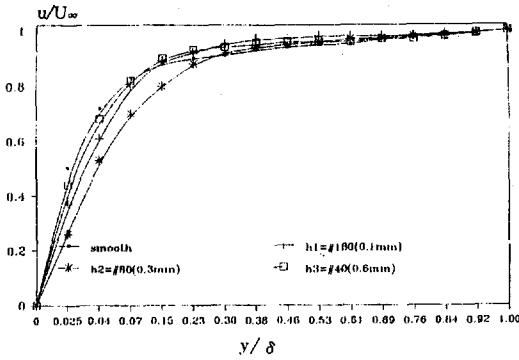


Fig. 7. Velocity Distribution(20m/s)  
( $\delta/R=0.15, x=205\text{mm}$ )

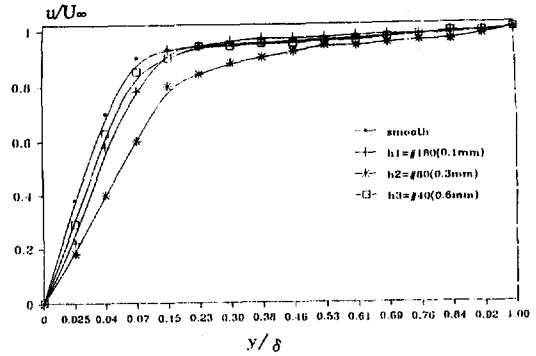


Fig. 8. Velocity Distribution(20m/s)  
( $\delta/R=0.15, x=410\text{mm}$ )

로 상태)와 거칠기 분포가 있는 경우( $h_1=\#180, h_2=\#80, h_3=\#40$ )에 대하여  $X_1=205\text{mm}$  위치에서 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측하였다. 법선 방향의 위치는  $y/\delta$ 의 값이 0.025, 0.04, 0.07, 0.15, 0.23, 0.30, 0.38, 0.46, 0.53, 0.61, 0.69, 0.76, 0.84, 0.92, 1.00의 위치에서 유속 분포를 각각 계측하였다. 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다도 전반적으로 경계층의 유속분포가 약간 감소하였다. 특히 0.38영역부터는 그 값의 분포가 약간 감소하였다. 이러한 이유는 곡면을 바깥으로 흐르는 유속이 곡면의 영향을 받아 유속이 더욱 증가되며 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 감소시키는 효과를 나타내었다고 볼 수 있다.

Fig. 8에서는 유속이 20m/s이고  $X_2=410\text{mm}$ 인 경우에 대하여 곡면에 거칠기를 달리할 경우에 대하여 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측하였다. 법선 방향의 위치는 0.025, 0.04, 0.07, 0.15, 0.23, 0.30, 0.38, 0.46, 0.53, 0.61, 0.69, 0.76, 0.84, 0.92, 1.00의 위치에서 계측된 유속 분포는  $y/\delta$ 의 값이 0.1 부근에서는 거칠기 분포가 있는 경우와 없는 경우와 거의 비슷한 값을 나타내 보인다. 특히  $h_1$ 의 경우는 0.15부근에서부터 경계층의 유속 분포가 빠르게 증가해 갔으며 중간 영역을 지나 0.53의 부근에서는 거의 거칠기 분포가 없는 경우와 일치하였다. 이러한 이유는 곡면을 바깥으로 흐르는 유속이 곡률의 영향을 받아 유속이 더욱 증가되며 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 감소시키는 효과를 나타내는 것은 사실이나 물체의 선단으로부터 하류로 갈수록 유속이 감소되고 경계층이 뚜꺼워 짐을 알 수 있다.

Fig. 9에서는 유속이 20m/s인 경우 대하여 곡면에 거칠기를 달리할 경우에 대하여  $x=615\text{mm}$ 에서 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측하였다. 법선 방향의 위치는 0.025, 0.04, 0.07, 0.15, 0.23, 0.30, 0.38, 0.46, 0.53, 0.61, 0.69, 0.76, 0.84, 0.92, 1.00의 위치에서 계측된 유속 분포는  $y/\delta$ 의 값이 0.23에서부터 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다 경계층의 유속 분포가 훨씬 빠르게 증가하였으며 0.61을 넘어서는 완만하게 감소하여 갔다. 이러한 이유는 곡률의 값이 중간에서 최대로 되므로 표면 바깥으로 흐르는 유속이 곡률의 영향을 크게 받아 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 크게 감소시키는 효과를 나타내었다.

Fig. 10에서는 유속이 20m/s이고 곡면의 거칠기를 달리할 경우  $X_1=615\text{mm}$ 에서 경계층내의 법선 방

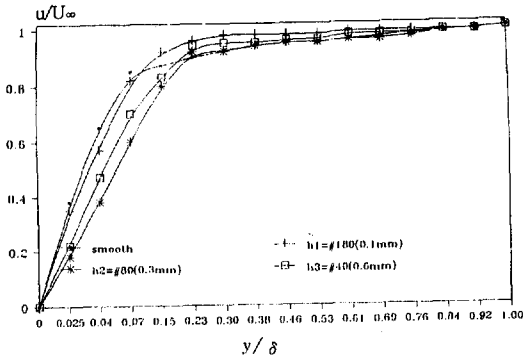


Fig. 9. Velocity Distribution(20m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=6155\text{mm}$ )

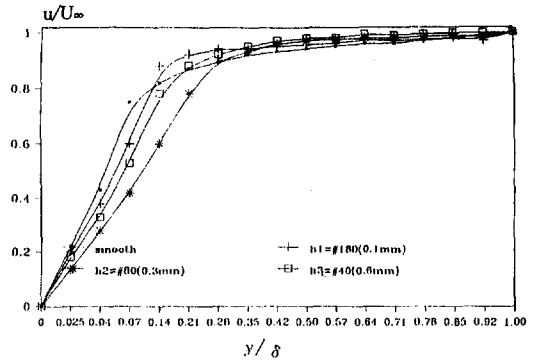


Fig. 10. Velocity Distribution(20m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=820\text{mm}$ )

향으로 유속 분포를 계측한 것이다. 법선 방향의 위치는 0, 0.025, 0.04, 0.07, 0.15, 0.23, 0.30, 0.38, 0.46, 0.53, 0.61, 0.69, 0.76, 0.84, 0.92, 1.00의 위치에서 계측된 유속 분포는  $y/\delta$ 의 값이 0.26에서부터 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다 경계층의 유속 분포가 거의 같은 값을 나타냈으며 그 이전의 영역에서는 거칠기 분포가 가장 작은 경우가 유속이 크게 감소하였다. 이러한 이유는 곡률 표면이 하류 방향에서 유속이 다른 영역보다도 크게 증가하므로 거칠기 영향이 더욱 크게 나타나는 것으로 생각된다. 따라서 경계층의 표면 영역이 바깥 영역보다도 더욱 큰 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에서는 유속이 30m/s이고  $X_1=205\text{mm}$ 에서 곡면에 거칠기의 영향이 없는 경우(아크릴면 그대로 상태)와 거칠기 분포가 있는 경우( $h_1=\#180$ ,  $h_2=\#80$ ,  $h_3=\#40$ )에 대하여  $X_1=205\text{mm}$  위치에서 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측하였다. 법선 방향의 위치는  $y/\delta$ 의 값이 0, 0.025, 0.04, 0.07, 0.14, 0.21, 0.28, 0.35, 0.42, 0.50, 0.57, 0.64, 0.71, 0.78, 0.85, 0.92, 1.00의 위치에서 유속 분포를 각각 계측하였다. 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다도 전반적으로 0.28의 영역에서부터 경계층의 유속분포가 완만하게 감소하였다. 특히 거칠기의 영향이 없는 경우와 비교하여 0.14의 영역부터는 그 값의 분포가 크게 증가하였다. 이러한 이유는 곡면을 바깥으로 흐르는 유속이 곡면의 영향을 받아 유속이

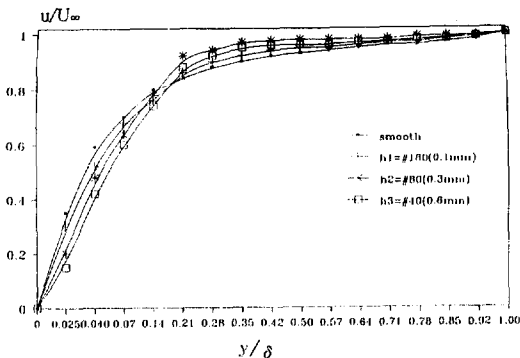


Fig. 11. Velocity Distribution(30m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=205\text{mm}$ )

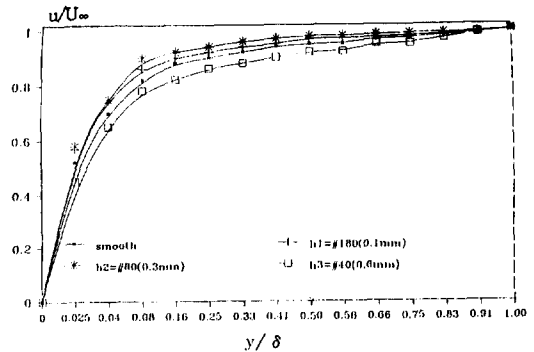


Fig. 12. Velocity Distribution(30m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=410\text{mm}$ )

더욱 증가되며 거칠기 영향은 오히려 유속을 감소시키는 효과를 나타내었다고 볼 수 있다.

Fig. 12에서는 유속이 30m/s이고  $X_2=410\text{mm}$ 이고 곡면에 거칠기를 달리 할 경우 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측한 것이다. 법선 방향의 위치는 0, 0.025, 0.04, 0.07, 0.14, 0.21, 0.28, 0.35, 0.42, 0.50, 0.57, 0.64, 0.71, 0.78, 0.85, 0.92, 1.00의 위치에서 계측된 유속 분포는  $y/\delta$ 의 값이 0.025 부근에서 그 값이 크게 증가하다가 0.33의 영역이후부터 그 값이 완만하게 감소하여 갔다. 특히  $h_3$ 의 경우는 0.04 부근에서부터 경계층의 유속 분포가 감소해 갔으며 중간 영역을 지나 0.33의 부근에서는 거의 거칠기 영향이 있는 경우와 일치하였다. 이러한 이유는 곡면을 바깥으로 흐르는 유속이 곡률의 영향을 받아 유속이 더욱 증가되며 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 감소시키는 효과를 나타내는 것은 사실이나 물체의 선단으로부터 하류로 갈수록 유속이 감소되고 경계층이 뚜꺼워 짐을 알 수 있다.

Fig. 13에서는 유속이 30m/s 인 경우 대하여 곡면에 거칠기를 달리 할 경우에 대하여  $x=615\text{mm}$ 에서 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측하였다. 법선 방향의 위치는 0.025, 0.04, 0.07, 0.15, 0.23, 0.30, 0.38, 0.46, 0.53, 0.61, 0.69, 0.76, 0.84, 0.92, 1.00의 위치에서 계측된 유속 분포는  $y/\delta$ 의 값이 0.15에서 부터 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다 경계층의 유속 분포가 훨씬 빠르게 증가하였으며 0.46을 넘어서는 완만하게 감소하여 갔다. 이러한 이유는 곡률의 값이 중간에서 최대로 되므로 표면 바깥으로 흐르는 유속이 곡률의 영향을 크게 받아 거칠기 영향은 오히려 마찰력을 크게 감소시키는 효과를 나타내었다.

Fig. 14에서는 유속이 30m/s 인 경우 대하여 곡면의 거칠기를 달리 할 경우에 대하여  $X_1=820\text{mm}$ 에서 경계층내의 법선 방향으로 유속 분포를 계측하였다. 법선 방향의 위치는 0, 0.025, 0.04, 0.08, 0.16, 0.25, 0.33, 0.41, 0.50, 0.58, 0.66, 0.75, 0.83, 0.91, 1.00의 위치에서 계측된 유속 분포는  $y/\delta$ 의 값이 0.25에서부터 거칠기 분포가 있는 경우가 없는 경우보다 경계층의 유속 분포가 증가하였으며 그 이전의 영역에서는 거칠기 분포가 가장 작은 경우가 유속이 크게 증가하였다. 이러한 이유는 곡률 표면이 하류 방향에서 유속이 다른 영역보다도 크게 증가하므로 거칠기 영향이 더욱 크게 나타나는 것으로 생각된다. 그리하여 경계층의 표면 영역이 바깥 영역보다도 더욱 큰 효과를 나타내었다.

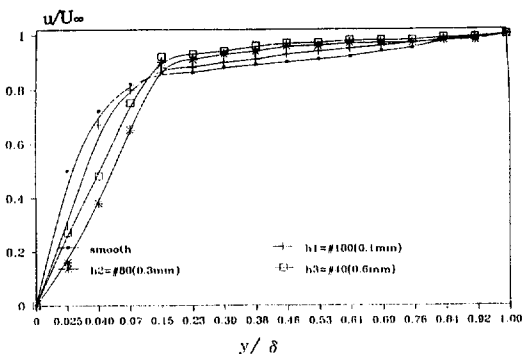


Fig. 13. Velocity Distribution(30m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=615\text{mm}$ )

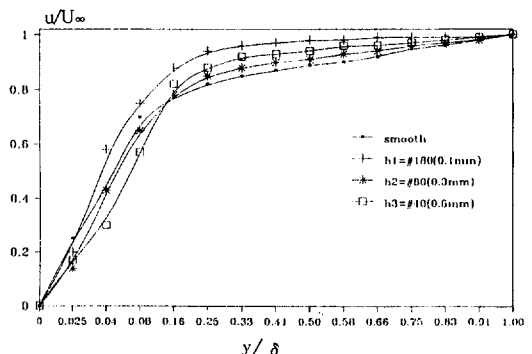


Fig. 14. Velocity Distribution(30m/s)  
( $\delta/R=0.15$ ,  $x=820\text{mm}$ )

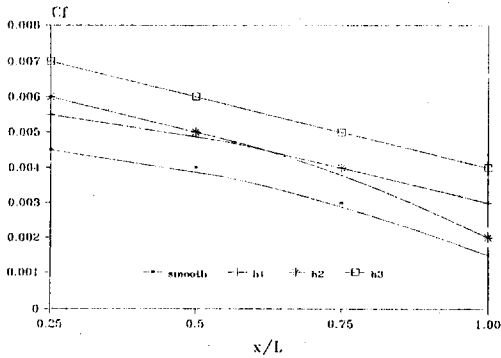


Fig. 15. Skin friction distribution(12m/s)

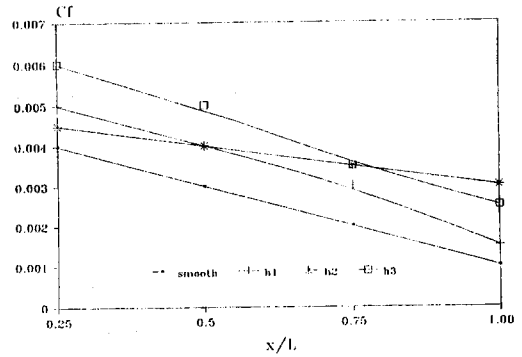


Fig. 16. Skin friction distribution(20m/s)

그리고 Fig. 15에서는 유속 12m/s인 경우에 위치별로 점성 저층의 유속을 측정하여  $u_w/u_\infty = \sqrt{C_f/2}$ 의 식으로부터  $C_f$ 를 계산하였다.  $X/L = 0.25(X=205\text{mm})$ 의 위치에서는 곡면과 거칠기의 영향이 위치의 하류 방향으로 이동하면서 거칠기가 있는 경우가 없는 경우보다도 마찰력 계수의 값이 크게 나타났다. 그러나 유속이 12m/s인 경우는 거칠기 크기의 영향이 곡율과의 영향에서 거칠기가 큰 것이 곡율에 대하여 마찰력 효과가 크게 나타났다. 그 이유는 곡율에 대하여 거칠기의 영향이 유속증가에 기인하는 효과가 크다고 볼 수 있다.

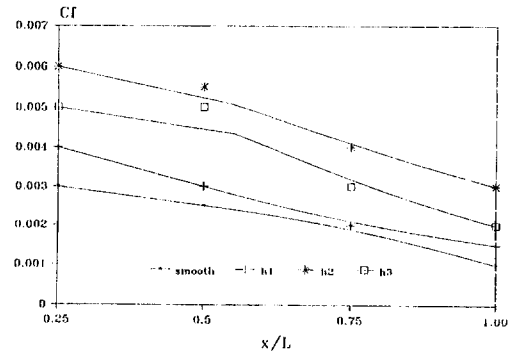


Fig. 17. Skin friction distribution(30m/s)

그리고 Fig. 16에서는 유속 20m/s인 경우에 위치별로 점성 저층의 유속을 측정하여  $C_f$ 를 계산하였다.  $X/L = 0.50(X=410\text{mm})$ 의 위치에서는 곡면과 거칠기의 영향이 위치의 하류 방향으로 이동하면서 거칠기가 있는 경우가 없는 경우보다도 마찰력 계수의 값이 크게 나타났다. 그러나 유속이 20m/s인 경우는 거칠기 크기의 영향이 곡율과의 영향에서 거칠기가 큰 것이 곡율에 대하여 마찰력 효과가 크게 나타났다. 특히 h1과 h2의 비교에서 하류( $X_3=615\text{mm}$ )에서는 오히려 h2이 h1의 영향을 증가하여 곡율에 대하여 거칠기의 영향이 유속증가에 기인하는 효과가 크다고 볼 수 있다.

그리고 Fig. 17에서는 하류 방향의 전 구간에 걸쳐서 거의 차이가 없으나 대체로 하류 방향으로 이동하면서 전반적인 마찰력 계수의 값은 감소하였다. 그리고 Fig. 20에서는  $X=0.5, 0.75(X_2=410$  및  $X_3=615\text{mm})$  위치에서 거칠기의 영향이 없는 경우가 점성 마찰력 계수가 더욱 크게 나타났으며 그 하류의 위치에서는 거의 같은 값을 나타내었다. 유속이 30m/s에서는 경계층의 점성 저층의 두께 영향의 증가로 거칠기의 영향과 곡면의 영향을 무시할 수 있었다. 그리고 평판의 경우와 비교하여 곡면의 경우 거칠기 영향은  $X/L = 0.75$ 이전에서는 곡면의 효과에 의하여 크게 감소된 것을 알 수 있었다.



#### IV. 결 론

곡면상에 발생하는 경계층에 대하여 표면 거칠기를 분포시켜 곡면의 영향과 그 상호 작용에 대하여 조사한 결과는 다음과 같다.

(1) 유속과 곡률 반경이 일정할 경우 표면 거칠기의 영향은 그 값이 증가할수록 원심력은 증가하여 경계층내의 유속은 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 곡면과 거칠기의 영향에서 하류로 갈수록 점성 마찰계수의 영향은 감소되었으며 이것은 점성 저층의 성장 영향과 난류 경계층의 두께의 증가 현상때문에 곡면의 영향은 거칠기의 영향을 감소시키는 것으로 나타났다.

(3) 곡면상의 난류 경계층의 생성에 대하여 표면 거칠기가 분포된 경우는 거칠기가 없는 경우에 비하여 경계층내의 유동이 더욱 촉진되어 점성 마찰력 효과가 크게 나타나는 것으로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

- Tewfik, O. E., Some Effects of Surface Roughness on the Turbulent Boundary Layer, AIAAJ, Vol. 1, No 3, 1963, pp. 2178 ~2179.
- Bogdevich, V. G. and Evseev, A. R. Gas Saturation Effect on Near Wall Turbulence Characteristics, Proc. Second Intl. Conf. on Drag Reduction, 31 - Aug., Cambridge, U. K., 1977, pp. D2 : 25 ~37.
- Johansson, A. V. and Alfredsson, P. H., Recent Developments of Drag Reduction Methods for Ships, Second Intl. Symposium on Ship Viscous Resistance, 1985, pp. 24 : 1~13.
- Legner, H. H., A Simple Model for Gas Bubble Drag Reduction, Phys., Fluids, Vol. 27(12), 1984, pp. 2788~2790.
- Madavan, N. K., Deutsch, S. and Merkle, C.L., Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles, Phys. Fluids, Vol.27(2), 1984, pp. 356~363.
- Madavan, N. K., Merkle, C.L. and Deutsch, S., Numerical Investigations into the Mechanisms of Microbubble Drag Reduction, J.of Fluids Engineering, Vol. 107, 1985, pp. 370~377.
- Merkle, C.L. and Deutsch, S., Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection, Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, AIAA, Washington, 1990, pp. 351~412.
- 加藤洋治, 藤井雄作, 山口 一, 宮永 大, 高粘性流體の噴出による摩擦抵抗低減(第1報), 日本造船學會論文集, 第168號, 1991, pp. 39~50.
- 加藤洋治, 藤井雄作, 山口 一, 宮永 大, 高粘性流體の噴出による摩擦抵抗低減(第2報), 日本造船學會論文集, 第170號, 1993, pp. 45~54.
- Kim, S. Y. and Kato, H., Frictional Drag Reduction by Injecting Microbubble into Buffer Layer of Turbulent Boundary Layer, Proc. Second Japan - Korea Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, 28 - 30 June, Osaka, Japan, 1993, pp. 257~292.
- Dvorak, F. A. Calculation of Turbulent Boundary Layers on Rough Surface in Pressure Gradient, AIAA Journal, Vol. 7, No. 9, 1968, pp. 1752~1759.