

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 34 卷 第 1 號 1997年 2月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 34, No. 1, February 1997

## Fillet 형상이 접합부 주위의 유동에 미치는 영향

김선영\*

### Effects of the Fillet Forms on the Juncture Flow

by

Sun-Young Kim\*

#### 요 약

선체에 부착되는 부가물 주위의 유동 개선에 응용하기 위하여 평판과 스트럿이 만나는 접합부 주위에 fillet을 설치할 때 스트럿 주위의 유동이 어떤 영향을 받는 지를 수치계산을 통하여 살펴보았다. 높이-폭 비 및 곡률이 서로 다른 5가지 형상의 fillet을 스트럿의 앞날 부근에 설치하고 각 경우에 대하여 스트럿에 작용하는 항력 및 스트럿의 후류를 계산하고 이를 비교하였다. 계산방법으로는 N-S 방정식을 풀기 위하여 MAC 방법이 사용되었고 유동은 Reynolds수 5000으로 층류이다. 계산결과 높이-폭 비가 작을 수록, 스트럿의 선단에서 만들어지는 horseshoe 보오텍스의 크기와 형상이 비슷할 수록 그리고 오목한 곡률을 갖는 fillet이 스트럿의 항력 감소 및 후류를 균일하게 하는 데 더 효과적인 것으로 나타났다.

#### Abstract

Horseshoe vortices generated around the juncture between the ship and her appendages often lower a performance of the ship by increasing the appendage drag and making a non-uniform wake on the propeller plane. This paper investigates numerically how the fillet around the juncture of the leading edge influences the juncture flow and the appendage drag. Computation has been made by solving Navier-Stokes equations with MAC method and the flows are at the Reynolds number of 5,000. Five fillets with different height-breath ratios and curvatures are chosen as test models to find out the effects of the shape of fillets on the appendage drag and wake. Computational results show that fillets with a smaller height-breath ratio and/or with a concave curvature has smaller appendage drag and more uniform wake.

---

접수일자 : 1995. 5. 22, 재접수일자 : 1996. 11. 23.

\* 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

## 1. 서 언

경계층 유입류가 판 위에 놓여 있는 물체를 만나게 되면 유동은 물체 앞에서 박리되고 이 박리된 유동은 여러개의 보오텍스들을 만들게 된다. 이 보오텍스들은 물체 주위를 말발굽모양으로 둘러싸며 후류로 흘러가게 되는 데 이들을 그 형상으로부터 이름하여 말굽(horseshoe) 보오텍스라 부른다. 이와 같이 말굽 보오텍스가 존재하는 유동은 말굽 보오텍스가 판 및 물체에서 생성된 경계층류와 상호 간섭하여 매우 복잡한 3차원 유동을 이룬다. 이러한 유동 즉 두 물체가 만나는 접합부 주위에서의 복잡한 유동을 일반적으로 juncture flow라 부른다. 실생활에서는 비행기의 날개 주위, 터보머신의 날개 사이, 선체의 부가물 주위에서 우리는 흔히 juncture flow를 볼 수 있다.

최근 전 세계적으로 초고속선에 대한 관심이 매우 높아져 각국에서 경쟁적으로 고속선 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 개발되어지고 있는 초고속선의 대부분은 선형을 수면 위로 상승시키기 위한 날개(wing) 혹은 선체의 자세 제어를 위한 fin이 부착되어 있어 선체에서 부가물이 차지하는 비중이 매우 높다고 할 수 있다. 따라서 부가물 주위의 유체역학적 특성 즉 juncture flow에 대한 정확한 특성 파악이 이들 초고속선의 설계 및 성능 평가에 필수적이라 하겠다.

부가물이 선체에 부착되게 되면 부가물에 작용하는 항력은 선체의 영향을 받아 부가물 단독으로 있을 때의 항력에 비하여 증가하는 것이 보통이다. 또한 부가물 주위에서 만들어진 말굽 보오텍스는 부가물의 후류에 설치될 프로펠러에 불균일 유입류를 공급함으로써 프로펠러의 성능을 저하시킬 우려가 있다. 선체에 의하여 유기되는 부가물의 항력 증가 및 부가물 주위에서 만들어지는 말굽 보오텍스의 세기는 부가물의 기하학적 형상 및 선체-부가물 접합부의 형상에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 부가물의 기하학적 형상은 부가물 설계시 고려된 부가물 고유의 기능과도 연관되어 변화시키기 어려우므로 부가물 전

체의 형상은 크게 바꾸지 않고 접합부의 모양만 변화시켰을 때의 부가물 주위의 유동특성의 변화를 조사하여 설계시 보다 작은 부가물 저항을 갖고 작은 세기의 말굽 보오텍스를 갖는 접합부 모양을 찾는 데 응용될 수 있도록 하고자 하였다.

접합부의 형상이 juncture flow에 미치는 영향에 관한 연구는 주로 평판위에 스트럿이 놓여 있는 간단한 경우에 대하여 행하여져 왔다. Kubendran등[1]은 스트럿의 앞날에 fillet을 설치하고 이 fillet에 의하여 스트럿 앞의 박리를 없앨 수 있음을 실험에 의하여 보인 바 있다. Sung과 Lin[2]은 앞날 및 뒷날의 접합부 형상을 순정(fairing)하였을 때 juncture flow에 미치는 영향을 수치 계산에 의하여 살펴본 바 있다. 그들은 계산 결과를 통하여 순정에 의해 스트럿 후류의 불균일성은 줄어드나 스트럿에 작용하는 항력은 크게 줄지 않는다고 주장하였다. Devenport등[3]은 스트럿의 바닥의 주위 전체에 원형 단면으로 순정하였을 때 오히려 말굽 보오텍스의 세기가 커져 유동이 바람직하지 않은 방향으로 변하고 있음을 실험에 의하여 보였다.

앞의 연구들을 살펴보면 접합부에 설치된 fillet의 위치, 형상 및 크기들과 유동조건이 서로 다르기 때문에 fillet이 유동에 미치는 영향에 대한 결론도 약간씩 다르게 나온 것을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 fillet의 위치를 스트럿의 앞날부에 국한시키고 fillet의 크기와 모양(곡률)을 체계적으로 변화시켜 스트럿의 앞날부에 부착된 fillet이 juncture flow에 미치는 영향을 구체적으로 살펴보았다. 스트럿에 작용하는 항력 및 스트럿의 후류에 미치는 영향을 주로 조사하였으며 응용을 위하여 이들과 유동과의 관계도 살펴보았다. 연구 방법은 Navier-Stokes 방정식을 수치계산에 의하여 풀고 그 결과를 이용하여 분석하였다. 계산에 사용된 스트럿은 여러 연구자들[4-7]에 의해 juncture flow의 연구에 사용되고 있는 수정 NACA0020 단면을 가지고 높이 방향으로는 변화가 없는 스트럿이다. 스트럿이 놓여질 판은 평판이고 문제를 단순화시키기 위하여 층류에 대한 계산만을 다루었다.

본 논문의 2장에서는 수치계산 방법에 대하여 기술하였으며 3장에서는 fillet이 없는 경우에 대한 계산 결과로부터 juncture flow의 특성을 살펴본다. 이를 토대로 3장에서는 여러가지 fillet이 있는 경우에 대하여 수치계산하고 각 fillet이 juncture flow 및 스트럿에 작용하는 항력의 크기 및 스트럿의 후류의 불균일 정도에 미치는 영향에 관하여 살펴보기로 한다.

## 2. 수치계산 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서 다룰 비압축성 뉴턴 유체에 대한 지배방정식은 직교좌표계에서 다음과 같이 무차원화 된 Navier-Stokes(NS)방정식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} u_t + uu_x + vu_y + wu_z &= -p_x + \frac{1}{R_n} \nabla^2 u \\ v_t + uv_x + vv_y + wv_z &= -p_y + \frac{1}{R_n} \nabla^2 v \\ w_t + uw_x + vw_y + ww_z &= -p_z + \frac{1}{R_n} \nabla^2 w \end{aligned} \quad (1)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (2)$$

위 식에서 밑 첨자는 미분을,  $(u, v, w)$ 와  $p$ 는 직교 좌표계에서의  $(x, y, z)$  방향의 속도 성분과 압력을 각기 나타낸다. 여기서 모든 변수들은 스트럿의 길이  $L$ , 유입속도  $U_0$ 와 유체의 밀도  $\rho$ 에 의하여 무차원화 되었으며  $R_n$ 은 Reynolds수로  $U_0$ 와  $L$ 에 의하여 무차원화 되었다.

물체를 정확히 나타내고 경계조건을 적용을 쉽게 하기 위하여 물체적합좌표계(body-fitted coordinate)  $(\xi, \eta, \zeta)$ 를 도입하면 물체적합좌표계에서 NS 방정식은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned} u_t + Uu_\xi + Vu_\eta + Wu_\zeta &= \frac{1}{R_n} \nabla^2 u \\ &\quad - (\xi_x p_\xi + \eta_x p_\eta + \zeta_x p_\zeta) \\ v_t + Uv_\xi + Vv_\eta + Wv_\zeta &= \frac{1}{R_n} \nabla^2 v \\ &\quad - (\xi_y p_\xi + \eta_y p_\eta + \zeta_y p_\zeta) \\ w_t + Uw_\xi + Vw_\eta + Ww_\zeta &= \frac{1}{R_n} \nabla^2 w \\ &\quad - (\xi_z p_\xi + \eta_z p_\eta + \zeta_z p_\zeta) \\ \xi_x u_\xi + \eta_x u_\eta + \zeta_x u_\zeta + \xi_y v_\xi + \eta_y v_\eta + \zeta_y v_\zeta \\ + \xi_z w_\xi + \eta_z w_\eta + \zeta_z w_\zeta &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

위에서  $U, V, W$ 는 contravariant 속도성분으로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} U &= \xi_x u + \xi_y v + \xi_z w \\ V &= \eta_x u + \eta_y v + \eta_z w \\ W &= \zeta_x u + \zeta_y v + \zeta_z w \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 계산 기법 및 경계조건

본 연구에서는 MAC 방법[8]을 도입하여 식 (1),(2)의 NS방정식을 푼다. MAC 방법에서는 식 (1)의 운동량보존방정식에 divergence를 취하고 이를 식(2)의 연속방정식에 대입함으로써 압력에 대한 Poisson 방정식을 얻으며 Poisson 방정식은 점순법(point successive relaxation method)을 사용하여 구한다. 압력이 구해지면 속도는 운동량 보존방정식 (1)로부터 얻는다. 본 연구에서는 완화 계수(relaxation factor) 0.8을 사용하였으며 시간적분은 1차정도 양해법을 사용하였다. 계산은 유속이 0인 상태에서 시작하며 정해진 유속에 도달할 때까지 유속을 조금씩 가속시켰으며 이는 속도 변화가 큰 초기에 큰 시간 간격을 사용하여도 계산이 발산하지 않도록 하기 위함이다.

차분방정식은 운동량보존방정식 (3)을 정규격자에서 이산화함으로써 얻는다. 모든 변수들은 격자 교차점에서 정의되며 공간차분의 경우는 2차 정도의 중심차분을 사용하였다. 단, 대류항의 경우에는 수치 안정을 위하여 풍상차분법을 사용하였다.

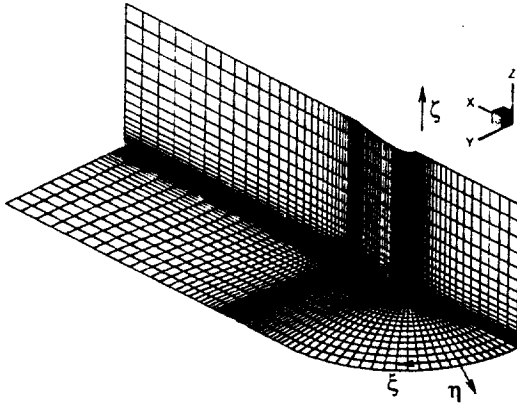


Fig. 1 Grid and coordinate system

C형 수치격자를 사용하였으며 좌표계는 Fig.1에 보인 바와 같이 Cartesian 직교 좌표계로 원점은 평판 위, 스트럿의 앞날에 놓여있고 x,y,z 방향은 각기 유입속도 방향과 이에 대한 수평 및 수직 방향이다. 변환된 물체 적합좌표계에서  $\xi$ -,  $\eta$ -축은 각기 스트럿의 현방향(girthwise)과 스트럿의 면에 직교하는 방향이며  $\zeta$ -축은 z-축과 일치한다. 따라서 스트럿의 면은  $\eta$ -면에 놓여있고 평판은  $\zeta$ -면에 놓여 있다. 본 연구에서 사용한 수치격자는 기하학적(geometrical)방법[8]에 의해 만들어졌다. 각 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

물체 표면

스트럿과 평판 위에서 속도성분은 모두 0이고 압력에 대한 경계조건은 Neumann조건을 사용하였다.

대칭면

스트럿의 전후 중앙대칭면에서는 유동이 좌우 대칭이라고 가정하여 다음과 같은 대칭조건을 사용하였다.

$$v = u_\eta = w_\eta = p_\eta = 0$$

외부면

외부 경계는 스트럿의 전방 및 측방으로 스트럿의 영향이 나타나지 않을 정도로 멀리 떨어진 곳에 위치하며 이 곳에서는 Blasius 유동이라고 생각한다. 따라서 이 곳에서의 압력은 0으로 놓고 속도는 Blasius profile을 준다. 본 계산에서 스트럿이 놓여있는 평판의 앞날의 위치는 미리 정하게 되어 있으므로 각 점에서의 Blasius profile은 Blasius 미분방정식으로부터 쉽게 계산될 수 있다. 단, 속도 u와 w의 경우는 Blasius profile로부터 계산되나 속도 v는 별도로 부과하지 않았다.

상부면

스트럿의 상부에서는 다음과 같은 상하 대칭조건을 사용하며 이는 물리적으로 스트럿이 평판 사이에 끼어 있음을 의미한다.

$$w = u_\zeta = v_\zeta = p_\zeta = 0$$

하류면

유동이 충분히 발달되어 있다고 가정하여 다음과 같이 0-구배 조건을 부여하였다.

$$u_\xi = v_\xi = w_\xi = p_\xi = 0$$

**3. Fillet이 없는 경우 접합부 주위의 유동**

Fillet이 스트럿과 평판이 만나는 접합부 주위의 유동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 먼저 fillet이 없는 상태에서 스트럿이 평판 위에 받음각 없이 연직으로 서 있을 때의 유동에 대한 수치계산을 수행하고 그 결과를 분석하기로 한다.

**3.1 계산조건**

계산에 사용된 스트럿은 수정 NACA0020 단면을 가지며 높이 방향으로의 단면 변화는 없다. 수정 NACA0020 단면은 앞부분은 축비 3:2의 타원, 뒷 부분은 NACA0020 단면으로 되어 있으며 NACA0020 단면의 최대 두께인 곳에서 결합된다. 이 단면은 앞 부분의 곡률 반경이 커서 세기가 큰

말굽 보오텍스를 앞 부분에서 만들어 내며 이러한 이유로 이 단면은 juncture flow에 관한 연구 모형으로 여러 연구자들에 의하여 사용된 바 있다[4-7].

계산 영역에서 스트럿의 높이는 2)이나 상부면에서 대칭조건을 사용하고 있기 때문에 실제로는 스트럿의 높이는 4가 되며 스트럿의 양단에 평판이 붙어 있는 상황이다. 평판은 스트럿의 옆방향과 후류방향으로는 무한히 뻗어 있고 평판의 앞날은 스트럿의 앞날로부터 5만큼 떨어져 있다고 가정하였다. 계산은 스트럿의 길이(chord length)로 무차원화 된 레이놀드 수 5000에 대하여 수행하였으며 이 때 평판의 앞날부터 발달된 경계층은 스트럿이 없다면 스트럿 앞날의 위치에서 경계층 두께가 0.158이 된다.

격자는 먼저 2차원 격자를 기하학적방법에 의해 만들고 이 2차원 격자를 z 방향으로 대수적으로 쌓아 만들었다. 격자 수는  $\xi$ -,  $\eta$ -,  $\zeta$ -방향으로 각각 (75×35×30)개이며  $\eta$ 방향 최소 격자 간격은 0.001이다. 계산 영역은 다음과 같다.

$$-1.8 \leq x \leq 7.0, 0 \leq y \leq 2.0, 0 \leq z \leq 2.0$$

시간 간격은 0.001이고 t=1.0까지 유동을 정지 상태에서 가속시켜가며 계산하였다. 스트럿 주위에서의 유동은 비교적 빨리 수렴되어 t=20.0 정도에서 거의 수렴되었으나 스트럿 후방에서의 유동은 완전히 수렴하는 데 매우 오랜 시간이 걸렸다. 본 계산에서는 t=40.0까지 수행하여 모든 영역에서 유동이 수렴되었음을 확인하였다.

### 3.2 말굽 vortex의 생성 및 이동

본 절에서는 스트럿의 앞날 부근에서 말굽 보오텍스가 만들어져 후류로 흘러가는 모습을 계산결과로부터 간략히 살펴보고자 한다. 좀 더 상세한 유동에 대한 설명은 참고문헌[9,10]을 참조하기 바란다.

1본 연구에서는 모든 변수들의 값들은 스트럿의 길이, 외부 유입속도 및 유체의 밀도에 의해 무차원화된 값으로 나타내기로 한다. 따라서 2는 스트럿 길이의 2배를 나타냄

Fig.2는 스트럿 앞 중심대칭면에서의 유선을 보여주고 있다. 여기서 중심이  $x=-0.15, z=0.025$  부근에 위치한 시계방향의 주보오텍스(primary vortex)와 스트럿과 평판이 만나는 부근의 반시계 방향의 부보오텍스(secondary vortex) 등 서로 다른 방향을 가지는 두개의 보오텍스가 생성되어 있음을 알 수 있다. 주보오텍스는 x-방향으로 길이가 긴 형상을 가지며 평판에 매우 근접하여 위치하여 있는 데 크기가 비교적 커 쉽게 확인할 수 있다. 이에 반하여 부보오텍스의 경우는 크기가 작아 잘 보이지 않지만 세기(vorticity strength)는 주보오텍스보다 훨씬 크다. Fig.2의 유선은 두개의 보오텍스가 존재할 때의 유동 구조(flow topology)를 잘 보여주고 있다. 여기서 N과 S는 각각 nodal 점과 saddle 점을 나타내며 아랫 첨자 A와 S는 부착(attachment)점과 박리(separation)점을 나타낸다.

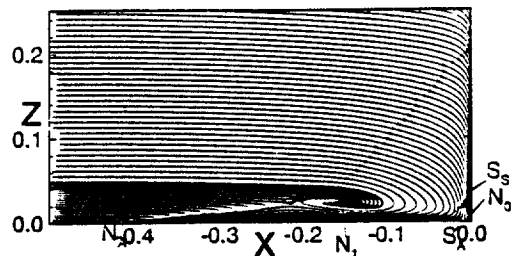


Fig.2 Streamlines at the plane of symmetry(upstream)

경계 유입류가 Fig.2에서 보듯이 스트럿 앞의 평판 근처에서 평판을 향하여 아래로 흐르게 되는 이유는 스트럿의 앞날에 유기되는 정체 압력(stagnation pressure)의 높이에 따른 구배에서 찾을 수 있다. 이러한 압력 구배는 유입류가 경계층류이므로 높이에 따라 유동의 총 압력(total pressure)가 다르기 때문에 생긴다고 생각할 수 있다. Fig.3은 스트럿 앞날에서의 압력 분포로 경계층 두께(0.158) 위에서는 일정한 값( $C_p=1.0$ )이나

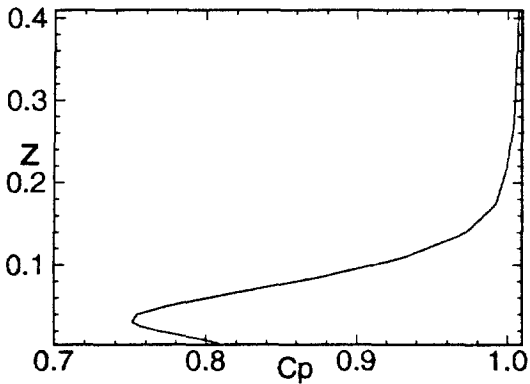


Fig. 3 Pressure distribution on the leading edge of the strut

평판 가까이 가면서 압력이 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 평판과 매우 가까운 곳에서는 압력이 다시 증가하게 되는 데 이는 부보오텍스가 근처에 존재하기 때문이다.

Fig.4는 스트럿 앞 평판 위에서의 압력 분포를 보여 주고 있다. 스트럿 앞에 커다란 압력 구배가 존재하며 이 압력 구배로 인하여 유동이 스트럿 앞에서 박리되고 있음을 알 수 있다.  $x = -0.1 \sim -0.15$  구간에서 약간의 압력 저하를 볼 수 있으며 이는 위에 있는 주보오텍스에 기인한다. 일반적으로 보오텍스가 존재하면 주위의 유동속도는 빨라지고 압력은 낮아진다.

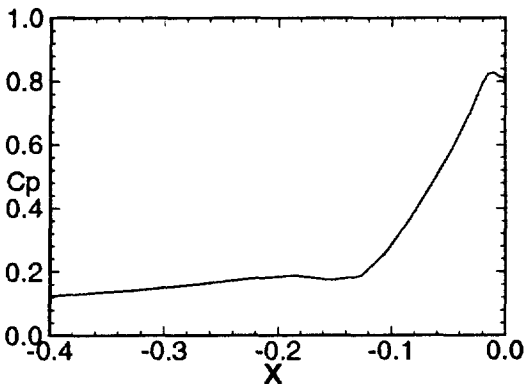
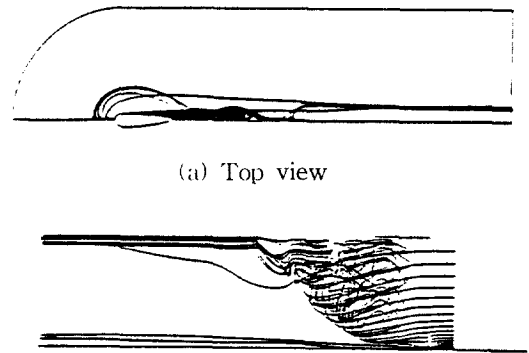
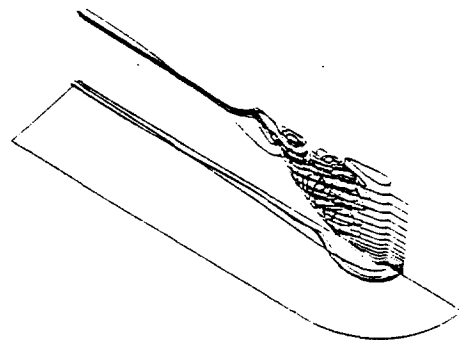


Fig.4 Pressure distribution on the plate along the line of symmetry (upstream)



(a) Top view

(b) Side view



(c) Perspective view

Fig.5 Trajectory of horseshoe vortices

Fig.5는 스트럿 주위의 3차원 유선의 모습을 보다 알기 쉽게 나타내기 위하여 시각을 달리하여 보여주고 있다. 이들 유선들은 스트럿 앞 중심대칭면의 여러 높이에 위치한 질량이 없는 입자들이 계산에서 얻어진 속도장에 의해 움직이는 궤적을 시간 적분에 의하여 구한 것이다. 이렇게 얻어진 각 입자들의 궤적들은 유동이 정상상태인 경우에는 유선(streamline)과 같다. 이 그림으로부터 주 말굽보오텍스와 부 말굽보오텍스의 궤적을 확실하게 볼 수 있다. 주 말굽보오텍스는 생성되자마자 바

로 중심 대칭면으로 부터 크게 벗어나 스트럿을 둘러싸면서 후류로 가게되나 후류에서는 오히려 약간 중심면 근처로 이동하여 거의 일정한  $v$  값(약 0.25)을 갖는다. 높이 방향으로도 스트럿을 따라서는 계속하여 상승하나 후류에서는 일정한 높이(약 0.2)를 갖는다. 이에 반하여 부 말굽보오텍스는 스트럿 면을 따라 상승하여 스트럿의 뒷날 근처에서는 박리되어 후류로 이동한다. 스트럿 앞에서 박리된 유동은 평판 가까이에서 주 말굽보오텍스보다 더 큰 반경의 원을 가지고 스트럿을 에워싸나 후류에서는 평판으로부터 떨어져 이동하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 바깥쪽으로부터의 유동이 들어가지 못하는 내부에는 평판 위쪽으로부터의 높은 에너지를 가진 유동이 채워지게 되며 이로 인하여 스트럿 주위에서 마찰 전단력이 커지게 된다[8]. 평판에서 멀리 떨어진 곳에서는 스트럿에서 박리된 유동과 스트럿의 뒷날에서 평판으로부터 솟아오르는 유동과 어우러져 매우 복잡한 유동을 보이고 있다(Fig.7). 이러한 스트럿 뒷날에서의 복잡한 유동은 주로 층류 영역에서 일어나며 난류에서는 오히려 일어나지 않는다[8].

### 3.3 저항증가 및 불균일 후류

Fig.6은 스트럿에 작용하는 단면 마찰항력 및 압력항력의  $z$ -방향의 분포를 보여 주고 있다. 그림에서  $C_{df(2D)}$  및  $C_{dp(2D)}$ 는 각각 높이  $z$ 에서의 스트럿 단면 주위의 마찰전단응력 및 압력의  $x$ -방

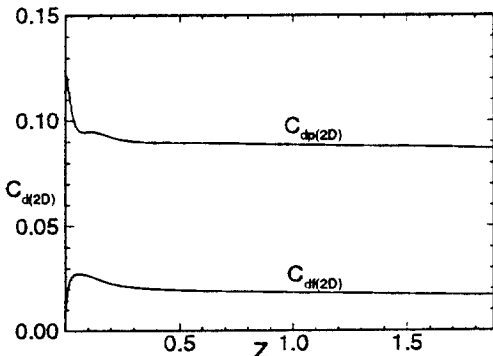


Fig.6 Spanwise distribution of sectional drag coefficients

향 성분을 적분하고 이를  $0.5\rho U^2 L$ 로 무차원화한 값이며 첨자 (2D)는 전체 스트럿에 작용하는 항력과 구별하여 2차원 단면에 대한 것임을 나타내기 위하여 붙인 것이다. 따라서  $C_{df(2D)}$  및  $C_{dp(2D)}$ 를  $z$ -방향으로 스트럿의 높이까지 적분하면 스트럿 전체에 작용하는 항력계수가 되며 평판의 영향이 무시할 만한 큰  $z$ 값을 갖는 곳에서의  $C_{df(2D)}$  및  $C_{dp(2D)}$ 는 평판이 없는 2차원 스트럿 단면의 항력계수를 나타낸다고 볼 수 있다. 즉 Fig.6은 평판이 스트럿에 부착됨으로써 스트럿에 작용하는 힘이 어떻게 영향 받는 가를 보여준다. 단면 마찰항력의  $z$ -방향 분포는 평판으로부터의 경계층의 속도분포에 크게 지배 받아 평판에서 0으로부터 시작하여 유입 경계층 두께(0.158)에 도달할 때까지 증가한다.  $z=0.06$ 근처에서 최대 단면 마찰 항력 계수를 보이는 것은 이 곳에서 스트럿의 유동 박리가 지연되기 때문으로 유동 박리의  $z$ -방향에 따른 변화는 Fig.7의  $\eta=2$ 에서의 속도 분포로부터 읽을 수 있다. 한편, 단면압력항력은 평판 근처에서 최대이고  $z$ 가 커짐에 따라 작아지고 있다. 즉 평

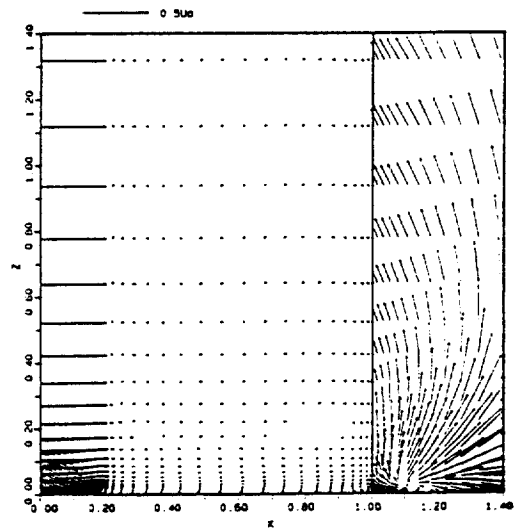


Fig.7 Velocity vectors on the plane of  $\eta=2$

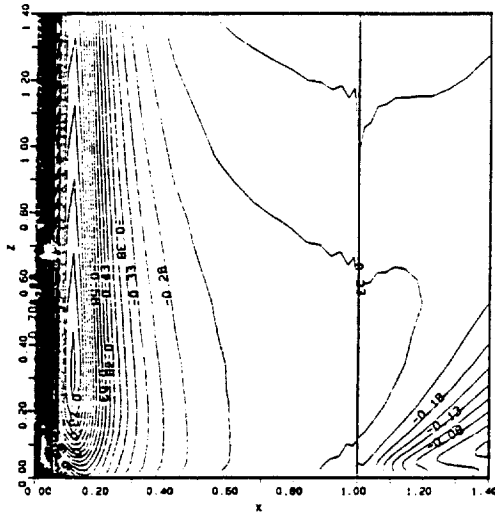


Fig.8 Pressure distribution on the plane of  $\eta=2$

판이 부착됨으로써 단면압력항력은 평판 근처에서 증가하는 데 이는 주로 스트럿 전반부에서의 압력 분포의 차이에 기인한다. Fig.8은  $\eta=2$ 에서의 압력분포를 보여 주고 있는데 평판 근처에서 x의 변화에 따른 압력 변화가 평판에서 떨어진 곳에 비하여 적은 것을 알 수 있다. 즉, 평판 근처에서는 스트럿 상에서 압력이 0이 되는 곳이 평판에서 떨어진 곳에 비하여 뒷 쪽에 위치하며 이에 따라 양의 압력을 갖는 부분이 상대적으로 증대되어 저항도 큰 값을 갖게 된다.

평판이 스트럿에 부착됨으로써 유기되는 스트럿의 부가저항을 알아보기 위하여 Fig.6의 2차원 단면항력 곡선을 적분한 값과 평판이 없는 경우와 비교하였다. 평판의 효과가 큰 부분에 대한 비교를 위하여 평판으로부터  $z=0.3$ 까지의 스트럿에 작용하는 저항을 계산하였다. 평판이 없는 경우에 대한 값은 높이에 관계없이 일정한 단면 항력계수를 가지며 그 값은 Fig.6에서 평판으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 단면 항력계수 값을 사용하였다. Table 1에 마찰항력, 압력항력 및 전체 항력을 각기 비교하여 나타내었으며 전체 저항이 평판으로 인하여 7.5% 정도 증가한 것을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of the drag coefficients of the strut with plate and without plate

	$C_{dp}$	$C_{df}$	$C_d$
w/o plate	0.02700	0.00618	0.03318
w/ plate	0.02857 (105.8%)	0.00710 (114.9%)	0.03567 (107.5%)

\*\* Drags are for the strut of height  $0.3L$  and coefficients are nondimensionalized by  $0.5\rho U^2 L^2$

스트럿 후류에서의 유동의 불균일함을 살펴보기 위하여  $x=2.0$ 의 위치에서의 속도가 y 및 z 방향의 변화에 따라 변하는 모습을 살펴보기로 한다 (Figs.17-19). 속도 u의 경우는 평판에서 멀리 떨어진 곳( $z=0.2$ )에서는 중심면에서 속도가 떨어지고 y가 커지면서 외부유동의 속도로 회복하는 전형적인 2차원 날개의 후류 모습을 보이고 있다. 반면에 평판 근처에서는 중심대칭면에서 오히려 속도가 크고 y가 커지면서 속도가 떨어지다 다시 커지는 경향을 보이며 전반적으로 넓은 y의 범위에서 속도가 크게 변하고 있다. 속도 v는 평판에 극히 가까운 곳( $z=0.05$ )에서 다른 곳과 다른 경향의 y-방향의 변화를 보이고 있다. 속도 w는 중심면 근처에서 z의 위치에 따라 속도 변화가 크나 y가 커지면서 차이가 줄어든다. 여기서 주목할 만한 점은 평판 근처에서의 U의 속도분포에서  $y=0.25$ 를 중심으로 크게 변화하는 모습을 볼 수 있는데 이 위치로 말굽 보오텍스가 지나가고 있다는 점이다 (Fig.5 참조). 즉 스트럿 후류에서 볼 수 있는 유동의 불균일함과 말굽 보오텍스와 깊은 관계가 있음을 알 수 있다.

#### 4. Fillet이 Juncture Flow에 미치는 영향

전 장에서는 juncture flow의 특성과 juncture flow가 스트럿에 작용하는 항력 및 후류의 불균일



성에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 본 장에서는 스트럿과 평판이 만나는 접합부 주위에 fillet을 설치할 때 스트럿 주위의 유동이 어떤 영향을 받는지 수치계산을 통하여 살펴보기로 한다.

### 4.1 Fillet의 형상

fillet을 설치한다는 것은 결국 스트럿과 평판이 만나는 접합부의 형상을 변화시키는 것이다. 따라서 설치할 수 있는 곳은 스트럿을 fillet을 둘러싸고 있는 접합부 전체이다. 이 중 특히 juncture flow에 영향을 크게 끼치는 곳은 말굽 보오텍스가 생성되는 스트럿의 앞날 부근과 뒷날 보오텍스가 생성되는 스트럿의 뒷날 부근이다. 본 연구에서는 주로 말굽 보오텍스의 제어에 관심을 두고 스트럿 앞날 부근의 fillet에 관해서만 다루기로 한다.

fillet이 설치될 스트럿은 3장에서 다루었던 스트럿과 동일하며 fillet은 스트럿의 앞부분(타원), 즉 단면두께가 최대가 되는 곳까지 설치하기로 한다. 먼저 fillet의 형상과 크기를 결정할 매개변수에 대하여 정의하기로 한다. fillet의 크기는 Fig.9에 보인 바와 같은 fillet의 높이  $h_f$ 와 앞날에서 fillet의 폭  $b_f$ 을 사용하여 정의한다. 그림에서 볼 수 있듯이 fillet의 폭은 앞날에서 최대  $b_f$ 이고 뒷쪽으로 가면서 점점 줄어들어 스트럿의 단면두께가 최대가 되는 곳, 즉 fillet이 끝나는 곳에서 fillet의 폭

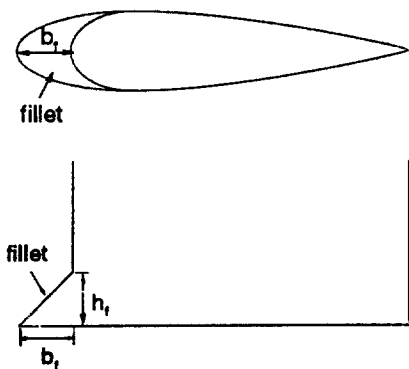


Fig.9 Parameters for fillet

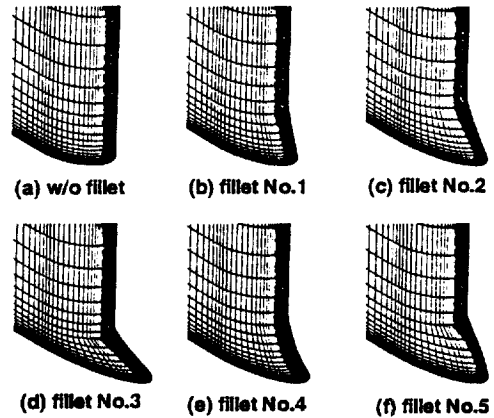


Fig.10 Perspective view of fillet forms

은 0이 된다. 반면에 fillet의 높이는  $h_f$ 로 일정하다. fillet의 형상을 결정하는 또하나의 매개변수로 fillet의 곡률반경을 생각할 수 있다. 즉, 앞날에서 fillet이 스트럿과 만나는 점과 fillet이 평판과 만나는 점을 연결하는 선에 대한 곡률반경을 매개변수로 사용한다.

본 연구에서는 5가지의 서로 다른 fillet이 설치된 경우에 대한 유동을 수치계산하고 이들을 비교하기로 한다. Table 2에 이들 5가지 fillet에 대한 크기 및 형상에 대하여 정리하였으며 Fig.10에는 각 fillet의 입체적 모양을 fillet이 없는 경우와 함께 나타내었다. fillet의 크기를 유입류의 경계층 두께  $\delta$ 를 기준으로 표기하였는데 이는 앞날 부근에 fillet을 설치함으로써 제어하려고 하는 말굽 보오텍스의 크기 및 세기가  $\delta$ 와 밀접한 관계가 있기 때문이다. 또한 fillet의 높이  $h_f$ 가  $\delta$ 보다 큰 경우에는 효과가 감소되리라 생각되어  $h_f$ 는  $\delta$ 이하로 제한하였다. 곡률반경의 경우는 비교적 큰 값을 사용하였는데 이는 곡률반경이 작은 경우 격자의 skew가 매우 커져 계산이 어렵기 때문이다.

### 4.2 계산조건

Table 2 Particulars of fillet forms

	fillet No.1	fillet No.2	fillet No.3	fillet No.4	fillet No.5
$h_f$	$\delta$	$\delta$	$0.5\delta$	$\delta$	$\delta$
$b_f$	$0.5\delta$	$\delta$	$1.63\delta$	$\delta$	$\delta$
$h_f/b_f$	2.0	1.0	0.31	1.0	1.0
radius of curvature	flat ( $\infty$ )	flat ( $\infty$ )	flat ( $\infty$ )	concave ( $1.5\delta$ )	convex ( $-1.5\delta$ )

계산조건은 fillet이 설치됨에 따라 스트럿의 형상이 달라진 것을 제외하고는 앞의 fillet이 없는 경우에 대한 계산조건과 같다.

fillet이 있는 경우의 3차원 격자는  $z=0.0$  과  $z=h_f$ 의 위치에서의 스트럿 단면에 대한 2차원 격자를 각각 만들고 이를 대수적으로 혼합하여 만들었다. 시간간격은 0.001이다. 단, fillet No.3과 fillet No.4의 경우에는 fillet 앞부분에서의 grid의 skew가 매우 커 수치안정을 위하여 작은 시간간격 0.00025를 사용하였다.

### 4.3 Fillet이 유동에 미치는 영향

Fillet을 스트럿의 앞날 부근에 설치하는 기본 목적은 fillet이 없을 때 스트럿 앞에 유기되는 x-방향의 커다란 압력구배(Fig.4 참조)를 fillet에 의해 줄이고 이에 의해 생성되는 말굽 보오텍스의 세기를 줄이고자 하는 데 있다. 따라서 먼저 fillet에 의하여 스트럿 앞에서 평판과 스트럿의 앞날에서 압력분포가 어떻게 변하는 지 살펴보기로 한다. Fig.11은 스트럿 앞 중심대칭면에서 평판 및 fillet 위에서의 압력분포를 fillet이 없는 경우와 5가지 fillet에 대하여 비교하여 보여주고 있다. 여기서 x축에 대하여  $x=0$ 까지 나타내고 있기 때문에 각 그림은 평판과 fillet위에서의 압력분포를 나타내고 있음에 유의하여야만 한다. 즉, fillet이 없는 경우에는 평판 위에서만 압력분포를 나타내나 fillet이 있는 경우에는  $x$ 가  $-b_f$ 보다 큰 곳(Table 2 및 Fig.9 참조)에서는 fillet 위에서의 압력분포이

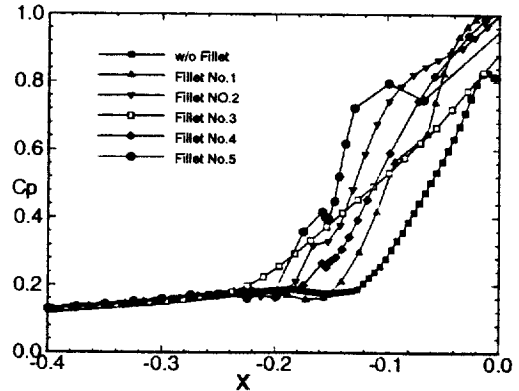


Fig.11 Pressure distribution on the plate and fillet along the line of symmetry (upstream)

다. 이 점을 고려하면 fillet 앞쪽 평판에서의 압력구배는 fillet No.5를 제외하고는 fillet이 없는 경우에 비하여 작아진 것을 알 수 있다. 그러나 fillet 부분까지 포함하여 생각하면 평판 위에서의 압력구배가 fillet 위로 옮겨가 fillet이 없는 경우에 비하여 압력구배가 그리 줄지 않았으나 fillet No.3의 경우는 크게 작아진 모습을 알 수 있다. 각 fillet을 비교하여 보면  $h_f/b_f$ 의 비가 작을수록 그리고 fillet의 곡률이 오목한 경우에 압력구배가 작은 것을 볼 수 있다.

Fig.12는 스트럿 앞날에서의 압력분포로 fillet 위에서의 압력분포도 포함되어 있다. 여기서 fillet 부분은  $z$ 가 Table 2에서의  $h_f$ 보다 작은 부분이다.  $z$ 방향의 압력구배가 평판 근처에서 fillet에 의해 크게 줄어들고 있음을 보여주고 있다. 특히 평판이 없는 경우에 볼 수 있었던 평판으로부터 극히 가까운 곳에서의 압력 역구배는 fillet No.5를 제외하고는 보이지 않는다. Fillet No.5의 경우에 fillet 윗쪽 부분( $z=0.1-0.2$ )에서는 또 다른 접합부유동이 생성되어 급격한 압력변화를 보이고 있으며 이 곳에서의 좀 더 자세한 유동을 얻기 위하여는 이 곳에 좀 더 세밀한 격자가 요구된다.

다음은 Figs.11-12에서 본 압력구배에 의하여 유기된 스트럿 앞의 중심대칭면에서의 각 fillet에

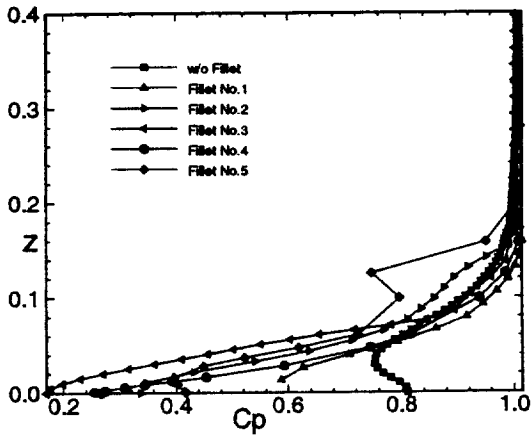


Fig.12 Pressure distribution on the fillet and leading edge of the strut

대한 유동을 속도벡터, 보오티시티 분포로 Fig.13에 나타내었다. Fillet이 없을 때의 결과(Fig.2)와 비교하면 주 보오티스의 위치가 fillet에 의해 x 방향으로 스트럿으로부터 멀어지는 쪽으로 z 방향으로 판 가까운 쪽으로 이동해 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은  $h_f/b_f$ 가 작을 수록 또는

fillet의 곡률이 볼록한 쪽보다는 오목한 쪽에서 더 크게 나타나고 있다. 주 보오티스의 세기는 fillet의 형상에 따라 큰 차이를 보이고 있지 않으나 fillet No.3의 경우에는 크게 약화되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 원래 fillet이 없을 때 주 보오티스가 생길 위치( $x=-0.15, z=0.0025$ )를 fillet이 차지하고 있기 때문이 아닌가 생각된다. 부 보오티스의 경우는 모든 경우에 잘 나타나지 않았는데 이의 존재여부에 대한 판단을 위하여는 좀 더 세밀한 격자를 이용한 계산이 필요하다고 생각된다. Fillet No.5의 경우에는 평판 부근 뿐만이 아니라 fillet과 스트럿이 만나는 곳에서도 juncture 유동과 유사한 모습을 보이고 있으나 이 곳에서의 압력구배가 작은 관계로 매우 미미하게 나타나고 있다.

Fig.14는 각 fillet에 대한  $z=0.001$ 의 수평단면에서의 속도벡터와 압력분포를 보여주고 있다. Fillet No.1, No.2, No.3에 대한 유동의 비교로부터 평판 근처에서의 유동이  $b_f$ 가 커짐에 따라 어떻게 영

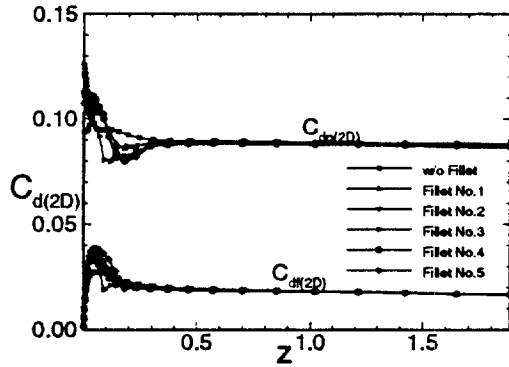


Fig.15 Spanwise distribution of sectional drag coefficients

향받는 지 알 수 있다. 압력분포를 보면  $b_f$ 가 길어질수록 스트럿 방향의 압력구배가 줄어들고 있음을 볼 수 있는데 이는 fillet으로 인하여 평판 근처에서 스트럿의 길이가 늘어났기 때문이다. 이와 관련되어 뒷날에서의 박리는  $b_f$ 가 길어질수록 지연되고 있음을 알 수 있다. 스트럿 앞쪽에서의 등압선의 일그러짐은 말굽 보오티스의 존재로 나타나는 것인데  $b_f$ 가 길어짐에 따라 일그러진 정도가 줄어들고 있어  $b_f$ 가 길어질수록 말굽 보오티스의 세기가 약화되고 있음을 알 수 있다. 스트럿 앞쪽에 존재하는 커다란 역류영역은 fillet의  $b_f$ 가 길어질수록 작아지는 것을 볼 수 있으나 fillet의 뒷쪽에서는 다시 커다란 속도로 회복되고 있다. 한편, fillet의 곡률 효과를 보기 위하여 fillet No.2, No.4, No.5의 유동을 비교하여 보면  $b_f$ 의 변화에 따른 유동 변화에 비하여는 큰 변화를 보이지 않고 있으나 볼록한 경우(fillet No.5)에 뒷날에서 박리가 빨리 일어나고 말굽 보오티스의 크기는 강하게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

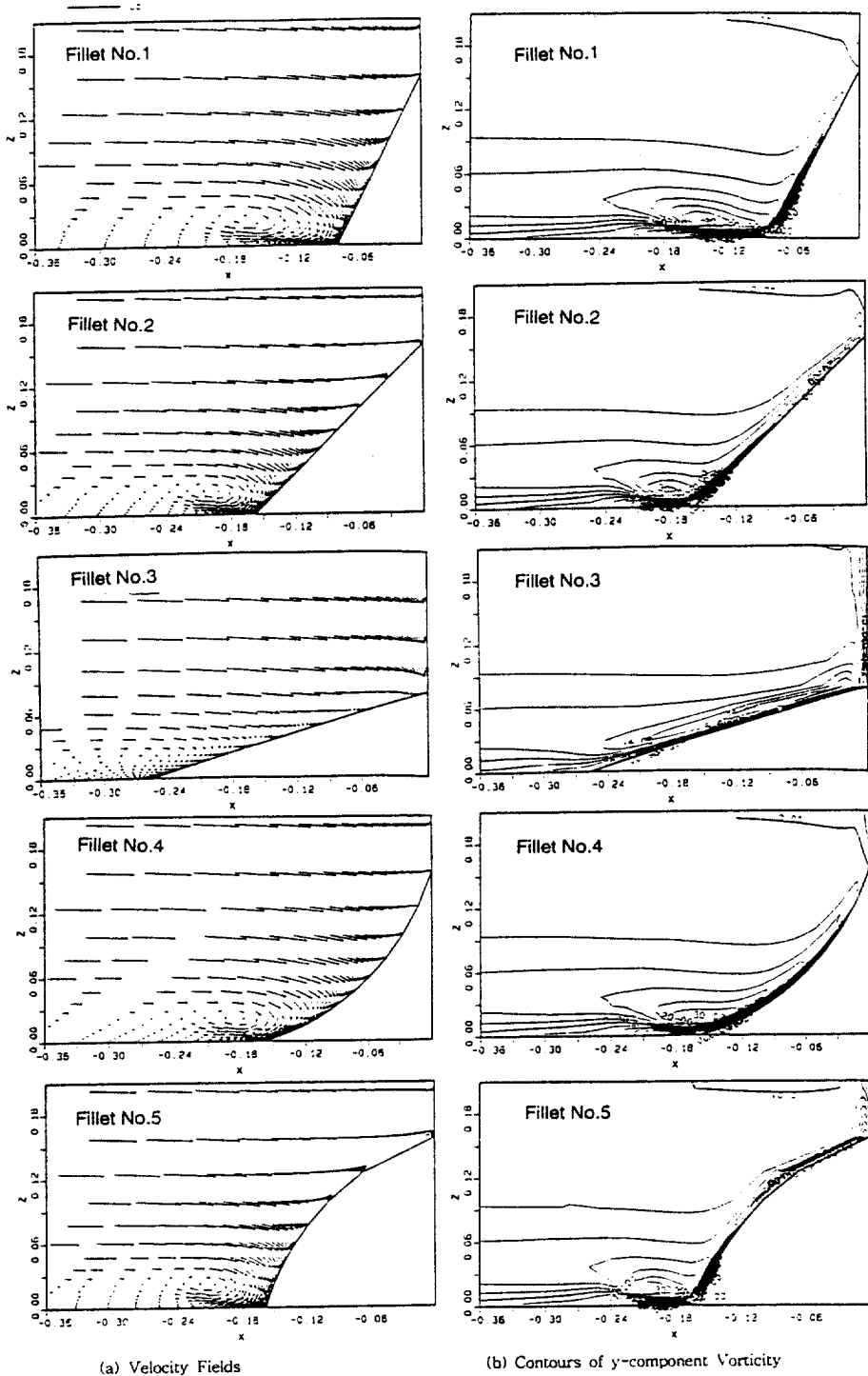


Fig. 13 Flows on the plane of symmetry (upstream)

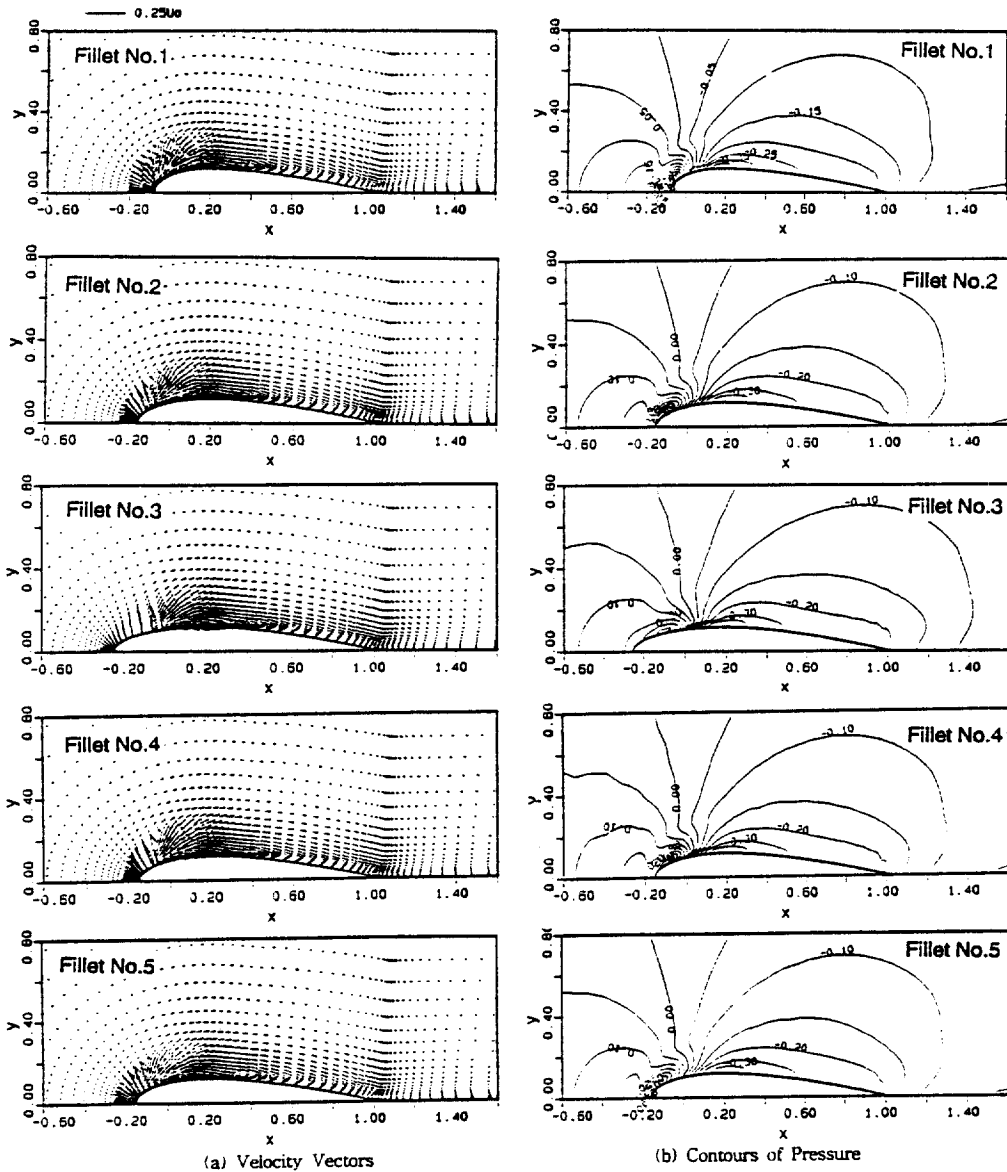


Fig.14 Flows on the Plane of  $z=0.001$

#### 4.4 Fillet이 저항 특성에 미치는 영향

Fig.15는 각 fillet에 대하여 스트럿에 작용하는 단면 마찰항력 및 압력항력의  $z$ -방향의 분포를 보여주고 있다. 여기서  $C_{df(2D)}$  및  $C_{dp(2D)}$ 는 3.4절에서의 정의와 같다. 즉 높이가  $z$ 에서의 스트럿 단

면 주위의 마찰 전단응력 및 압력의  $x$ -방향 성분을 적분하여 얻고 이를  $0.5\rho U^2 L$ 로 무차원화한 값이다. 모든 fillet에 대하여 평균 가까운 곳에서 마찰항력이 증가한 것을 볼 수 있는데 이는 fillet으로 인한 면적의 증가에 기인한다. 압력항력은

fillet에 의하여 평판 근처에서 fillet이 없는 경우 (Fig.6참조)에 비하여 크게 감소한 것을 볼 수 있으며 특히  $h_f/b_f$ 가 작아질수록 압력항력이 더욱 감소하고 있다. 한편, fillet의 곡률에 관하여는 블록한 쪽이 오히려 작은 압력항력을 보여주고 있다.

Fillet이 스트럿에 부착됨으로써 스트럿에 걸리는 저항이 어떻게 변하는지 알아보기 위하여 각 fillet에 대한 저항을 fillet이 없는 경우와 비교하였다. 평판의 효과가 큰 부분에 대한 비교를 위하여 평판으로부터  $z=0.3$ 까지의 스트럿에 걸리는 저항을 계산하였다. Table 3에  $0.5\rho U^2 L^2$ 로 무차원화한 마찰항력, 압력항력 및 전체 항력을 각기 비교하여 나타내었다. 마찰저항의 경우는 앞서 설명하였듯이 fillet에 의한 침수면적의 증가로 fillet이 없을 때보다 증가하는 경향을 보인다. 단, fillet No.3과 fillet No.4는 오히려 fillet이 없을 때보다 작은 마찰저항을 나타내고 있는 데 이는 fillet No.3과

fillet이 없을 때보다 작은 값을 주고 있다. 전체저항은  $h_f/b_f$ 가 작을수록, fillet의 곡률이 오펝한 쪽이 작다. 특히 fillet No.3의 경우는 전체저항의 감소가 현저하여 fillet이 없는 경우의 저항보다 7% 작은 값을 주고 있다.

#### 4.5 Fillet이 후류에 미치는 영향

Fillet에 의하여 나타나는 스트럿의 후류의 변화는 fillet No.3를 제외하고는 그다지 크지 않아 속도벡터로는 구별하기 어려웠다. Fig.16은 fillet이 없는 경우와 fillet No.3에 대하여  $x=1.5$ 의 위치에서의 속도벡터를 비교하여 보여주고 있다. Fillet에 의하여 보오텍스가 현저히 줄어든 것을 알 수 있다.

Figs.17-19는 스트럿의 후류에서의 유동의 불균일 정도를 비교하기 쉽도록  $x=2.0$ 의 위치에서의 속도가  $y$  및  $z$  방향의 변화에 따라 변하는 모습을

Table 3 Effects of the fillets on the drag coefficients of the strut

	$C_{dp}$	$C_c$	$C_d$
w/o fillet	0.02857	0.00710	0.03567
Fillet No.1	0.02830	0.00744	0.03574
Fillet No.2	0.02740	0.00763	0.03503
Fillet No.3	0.02641	0.00675	0.03316
Fillet No.4	0.02771	0.00691	0.03462
Fillet No.5	0.02709	0.00795	0.03504

\*\* Drags are for the strut of height 0.3L and coefficients are nondimensionalized by  $0.5\rho U^2 L^2$

fillet No.4의 경우 fillet 위에서의 속도가 매우 작고 앞쪽에서 오히려 역류가 존재하기 때문이다. 반대로 압력저항은 fillet에 의해 감소되고 있는데  $h_f/b_f$ 가 작을 수록, fillet의 곡률은 블록한 쪽이 작게 나타나고 있다. 마찰저항과 압력저항을 더한 전체저항은 fillet No.1을 제외하고는 모두

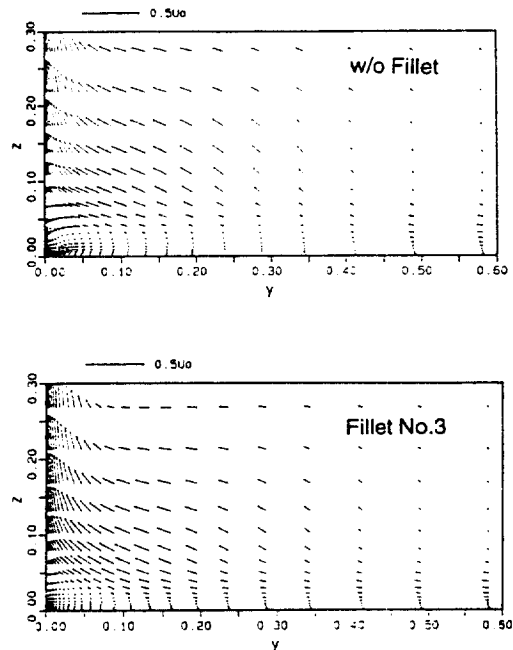


Fig.16 Cross flow vectors on the plane of  $x=1.5$

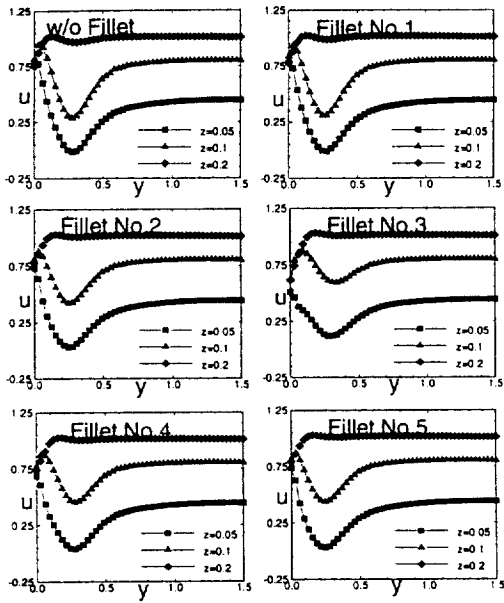


Fig.17 Distributions of velocity u at x=2.0

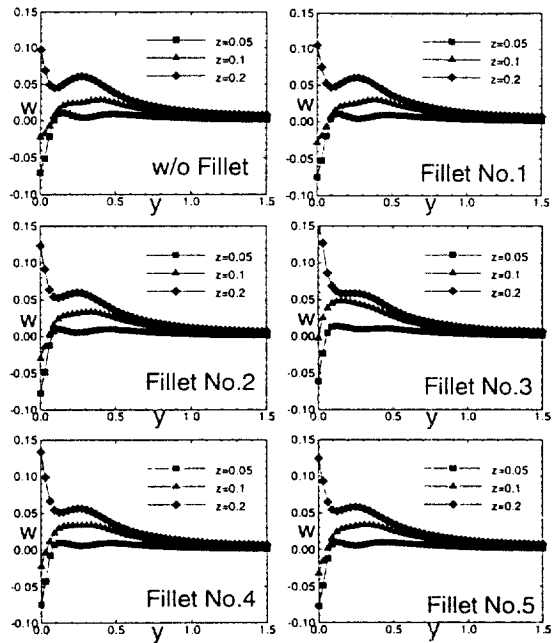


Fig.19 Distributions of velocity w at x=2.0

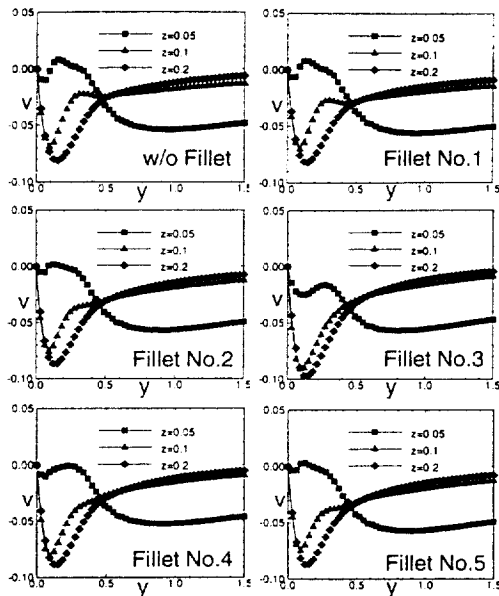


Fig.18 Distributions of velocity v at x=2.0

있다. Fillet의 영향은 주보여주고 로 속도 u에서 크게 나타나고 속도 v의 경우도 약간 나타나나 속도 w의 경우는 상대적으로 작게 나타난다. 위치로 보면 평판 근처의 유동이 fillet의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 보면 fillet No.3이 가장 균일한 후류를 만들어내고 있음을 알 수 있다

후류에서의 불균일 정도를 좀 더 정량적으로 비교하기 위하여 유속의 표준편차를 x=2.0위치의 단면에서 구하고 이를 Table 4에 정리하였다. 여기서 표준편차는 같은 높이의 위치에서의 유속에 대하여 구하였으며 다음 식을 사용하였다.

$$q_{rms} = \left[ \int_0^{1.5} (q_m - q)^2 dy \right]^{0.5},$$

$$q_m = \left[ \int_0^{1.5} u dy \right] / 1.5$$

Table 4에 의하면 속도 u의 경우는 fillet에 의하여 표준편차가 크게 감소하나 속도 v와 w는 크게 변하지 않거나 약간 커지는 경향을 보인다. 특

Table 4 Variance of the flow velocity on the plane of  $x=2.0$

	$u_{rms} (*100)$			$u_{rms} (*100)$			$u_{rms} (*100)$		
	$z=0.05$	$z=0.1$	$z=0.2$	$z=0.05$	$z=0.1$	$z=0.2$	$z=0.05$	$z=0.1$	$z=0.2$
w/o fillet	15.15	15.11	3.29	2.02	1.31	2.19	1.02	0.99	2.03
Fillet No.1	14.61	14.44	2.81	2.07	1.29	2.16	1.05	1.01	2.06
Fillet No.2	13.26	11.06	3.05	1.95	1.55	2.31	1.02	1.12	2.24
Fillet No.3	10.11	6.34	5.20	1.35	2.24	2.75	0.78	1.50	2.71
Fillet No.4	12.82	10.16	3.62	1.77	1.82	2.45	0.94	1.11	2.28
Fillet No.5	13.12	10.61	2.96	1.96	1.54	2.31	1.02	1.14	2.23

히 평판 근처에서의 표준편차는 fillet에 의해 크게 감소되어 있는 것을 볼 수 있는데 이는 fillet에 의하여 제어할 말굽 보오텍스의 위치가 평판 가까이 있기 때문이다. 평판 가까이에서는  $h_f/b_f$ 가 작아질수록 그리고 fillet의 곡률이 오목한 쪽이 표준편차가 감소하는 경향을 보이거나 평판에서 떨어진 곳은 오히려 커지는 경향을 보인다.

### 5. 결 언

본 연구에서는 평판과 스트럿이 만나는 접합부 주위의 유동, 즉 juncture flow를 제어하기 위하여 fillet을 설치하고 이 fillet이 스트럿에 작용하는 힘 및 스트럿 후류에 어떠한 영향을 미치는지 수치계산을 통하여 살펴보았다.

먼저 juncture flow에 대한 이해를 위하여 fillet이 없는 경우의 유동을 자세히 검토하였다. 이를 토대로 넓이-폭 비 및 곡률이 서로 다른 5가지 형상의 fillet을 고안하고 이에 대한 유동의 수치계산을 수행하였다. 계산결과는  $h_f/b_f$ 가 작을수록 그리고 곡률이 오목한 쪽이 말굽 보오텍스의 세기를 줄이고 이에 따라 스트럿에 걸리는 저항도 줄고 후류특성도 균일하게 되는 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 fillet이 없을 때 생성되는 말굽 보

오텍스의 위치가 평판과 매우 가까운 곳에 있기 때문이라 생각된다. 따라서 fillet의 형상은 말굽보 오텍스의 크기 및 위치에 맞추어 고안하는 것이 가장 효율적이라 판단되나 확실한 결론을 내리기 위하여는 좀 더 다양한 경우에 대한 자료의 축적이 필요할 것으로 생각된다. 그러나 본 연구결과로부터 fillet을 설치함으로써 juncture flow를 충분히 제어할 수 있는 가능성은 확인하였다고 할 수 있다.

앞으로의 연구로 난류로의 계산 확장이 필요하고, 좀 더 신뢰성 있는 계산을 위하여 격자의 skew가 큰 경우에 대한 오차분석등이 뒷받침되어야 할 것으로 보여진다. 끝으로 수치계산을 뒷받침할 실험적 연구가 매우 흥미있을 것으로 생각된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술처 기본연구 개발사업과 관련하여 수행된 연구 결과의 일부임을 밝혀둔다.

### 참 고 문 헌

- [1] Kubendran, L. R., Bar-Sever, A. and Harvey, W. D., "Flow Control in a Wing/Fuselage-Type Juncture", AIAA Paper 88-0614, 1988.
- [2] Sung, C. H. and Lin, C. W., "Numerical Investigation on the Effect of Fairing on the Vortex Flows around Airfoil/Flat-Plate Junctures", AIAA Paper 88-0615, 1988.
- [3] Devenport, W. J., Agarwal, N. K., Dewitz, M. B., Simpson, R. L. and Poddar, K., "Effects of a Fillet on the Flow Past a Wing-Body Junction", AIAA J., Vol.28, 1990.
- [4] Dickinson S. C., "An Experimental Investigation of Appendage-Flat Plate Junction Flow", DTNSRDC Report DTNSRDC-86/052, 1986.
- [5] Devenport, W. J. and Simpson, R. L., "Some Time-Dependent Features of Turbulent Appendage-Body Juncture Flows", 16th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1986.
- [6] Devenport, W. J. and Simpson, R. L. "The



- Turbulence Flow Structure Near an Appendage-Body Junction", 17th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1988.
- [7] Devenport, W. J. and Simpson, R. L. "The Flow Past a Wing-Body Junction - An Experimental Evaluation of Turbulence Models", 18th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1990.
- [8] Kim, S. Y., "A Study on the Flow around a Strut Mounted on the Strut", Ph. D Thesis, Hiroshima University, 1993.
- [9] 김선영, 이창민, "Fillet 형상이 Juncture Flow에 미치는 영향에 관한 연구", 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 보고서, UCE550-1808.D, 1994.
- [10] 김선영, "스트럿과 평판이 만나는 접합부 주위의 유동", 선박해양기술, 제19호, 1994.
- [11] Mori K. and Kim, S. Y., "A Study on the Flow Structure around a Strut Mounted on a Plate ", HULL FORM 92' : Workshop on Hull Form Design and Flow Phenomena, at Inha Univ., 1992.
- [12] Baker, C. J., "The Laminar Horseshoe Vortex", J. of Fluid Mechanics, Vol. 95, 1979.
- [13] Hunt, J. C. R., Abell, C. J., Peterka, J. A. and Woo, H., "Kinematical Studies of the Flows around Free or Surface-Mounted Obstacles; Applying Topology to Flow Visualization", J. of Fluid Mechanics, Vol.86, Pt. 1, 1978.