

## 수치 해석에 의한 단독 타 유체력 계산

부경태<sup>†\*</sup>, 지용해\*, 김윤수\*, 신수철\*

삼성중공업 성능개발 2\*

### A Numerical Study of Hydrodynamic Forces Acting on Rudders

Kyungtae Boo<sup>†\*</sup>, Yonghae Ji\*, Yoonsoo Kim\* and soochul Shin\*

Samsung Heavy Industries Co., LTD Ship Performance 2\*

#### Abstract

In this study, flow around rudder is analyzed by utilizing the numerical calculation, and the rudder open water test is performed to validate the calculation. The aim of this study is to design the new rudder shape to improve manoeuvring performance. In first, flow around two-dimensional rudder section is analyzed to understand the characteristics of section profile. And the calculation for all-movable rudders is performed and compared with results of rudder open water test. It is hard to numerically predict the drag force because the value is sensitive to the turbulence modeling and grid spacing near the wall. However, the lift force is predicted well. And we can prove that concave profile of the rudder section produce more lift and torque than convex one as a experiment. However PANEL method that ignore viscous effect cannot distinguish the difference of them. So, we can look for the numerical tool to be developed the new rudder shape.

※Keywords: Rudder(타), Lift coefficient(양력 계수), Manoeuvring performance(조종 성능), rudder open water test(타 단독 실험)

#### 1. 서론

본 연구는 조종 성능이 불량한 tanker와 같은 저속선 및 LNGC를 대상으로 기존 대비 조종 성능을 향상시킬 수 있는 타를 개발하고자 시작하였

다. 지금까지의 대책으로 타 면적을 키워줌으로써 양력을 증가시키는 방안은 공간적으로 설치상의 한계가 있고 타가 받는 회전 모멘트의 증가로 steering gear의 용량 또한 증가되어야 한다. 그래서 본 연구에서는 타 면적이나 steering gear 용량의 증가 없이 양력을 증가시킬 수 있는 타 개발을 위해 수치적 방법을 사용하였다. 먼저 기존에 알려져 있는 여러 단면들에 대한 이차원 수치 해석을 통해 각 단면들의 특성을 파악한 후에, 3차

접수일: 2003년 11월 5일, 승인일: 2004년 3월 8일

† 주저자, E-mail: kyungtae.boo@samsung.com

Tel:042-865-4733

원 일체형 타의 경우로 확장하였다. 3차원 해석 결과는 Molland/Turnock(1991)의 실험 결과, Simonsen(2000)의 수치해 그리고 Brix(1993)의 실험식과의 비교를 통해 검증을 하였다. 그리고 전가동타(all-movable rudder)에 대한 타 단독 시험과 수치 실험을 병행하여 수행하고 그 결과를 비교함으로써 본 연구에서 제시된 수치적 방법의 새로운 타 설계를 위해 활용될 수 있음을 보였다.

2. 지배 방정식

상용 코드인 FLUENT를 이용하여 수행된 수치 해석은 Navier-Stokes식을 지배 방정식으로 하고, 난류 해석을 위하여 벽함수를 이용한 realizable  $k-\epsilon$ 식(Shih et al. 1995)을 사용하였다. 여기서 사용된 무차원된 변수는 아래와 같다.

$$Re = \frac{\rho u_{in} c}{\mu} \tag{1}$$

$$C_L = L / [\frac{1}{2} \rho u_{in}^2 A_R] \tag{2}$$

$$C_P = [P - P_\infty] / [\frac{1}{2} \rho u_{in}^2] \tag{3}$$

$$C_M = Q_R / [\frac{1}{2} \rho u_{in}^2 A_R c] \tag{4}$$

여기서  $P_\infty$ 는 출구 압력을  $L$ 은 양력을 뜻하며  $Q_R$ 은 타에 작용되는 회전 모멘트를 가리킨다. 입구 속도( $u_{in}$ ), 코드 길이( $c$ ) 그리고 타 높이와 코드 길이의 곱인 타 투영 단면적( $A_R$ )에 대하여 무차원을 하였으며 2차원일 경우에 타 높이는 단위 길이를 사용하였다. 그리고, 작동 유체의 밀도( $\rho$ )는  $998.2 \text{ kg/m}^3$ 이고 점도( $\mu$ )는  $1.003 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 이다.

3. 해석 모델과 경계 조건

타 단면은 Fig. 1에서와 같이 3가지 형상이 고려 되었다. MP73단면은 NACA단면과 같은 앞날 형상을 가지나 뒷부분이 오목하게 얇아졌고, MP71단면은 MP73단면처럼 뒷부분이 오목하나 앞날이 얇고 최대 두께의 위치가 뒤로 이동 되었

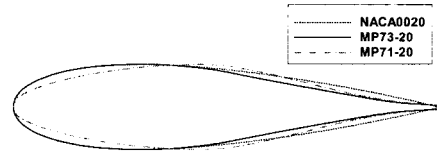


Fig.1 Rudder section

다. 모든 단면은 끝날 두께가 0이 아니며 MP단면들이 NACA단면에 비해 끝날 두께가 두배 정도 두껍다. 참고로 끝날 두께가 있는 경우 끝날 두께가 없는 경우에 비하여 실험적으로나 수치적으로 조금 더 큰 양력값이 보고되고 있다 (Söding 2000). 그리고 격자계는 C type 격자계를 구성하였고 2차원 해석의 경우 해석 영역은 코드 길이에 대해 앞으로 5배 뒤로 25배 그리고 대칭 조건이 사용되는 위,아래로는 5배의 범위를 잡았다. 경계 조건은 식(5),(6)과 같이 입구에는 속도값을 주었고 출구는 균일한 압력을 가정하였다 (부경태 등 2003(a)).

$$u_{in} = \frac{\mu}{\rho c} \times \text{Reynolds number} \tag{5}$$

$$P_{out} = P_\infty \tag{6}$$

4. 2차원 수치 해석

Fig. 2는 각 단면에 대해서 받음각이  $10^\circ$ 인 경우에 얻어진 무차원된 압력장을 비교한 것이다. 그림에서 압력면(pressure side)을 보면 MP단면들의 경우 뒷부분이 오목하여 형상의 기울기가 큰 부근에서 NACA단면에 비해 좀 더 큰 압력 변화가 발생하고 있다. 그리고 끝날 부근에서 NACA 단면은 단면 위, 아래의 압력 차이가 없는데 반하여 MP계열의 단면은 윗면이 0 ~ 0.1의 압력 분포를 가질 때 아래면은 그보다 고압인 0.2 근방의 압력 분포를 보이고 있어 양력이 발생함을 알 수 있다. 따라서 우리는 이 그림으로부터 MP단면들이 NACA단면에 비해 상대적으로 더 큰 양력이 발생되고 힘의 중심도 NACA단면보다 뒤에 위치할 것임을 예측할 수 있다.

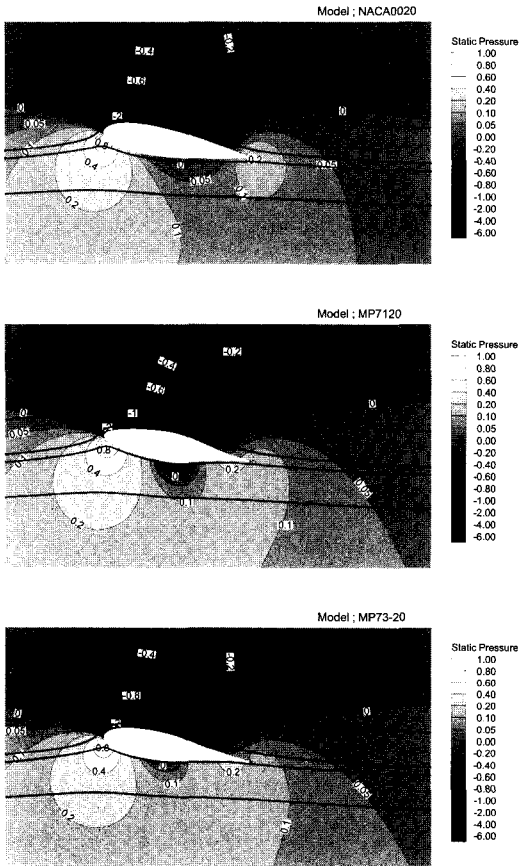
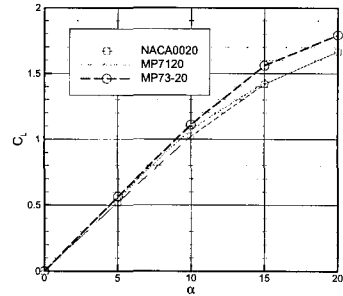


Fig. 2 The pressure distributions and streamline ( $Re=1 \times 10^8$ ,  $\alpha=10^\circ$ ).

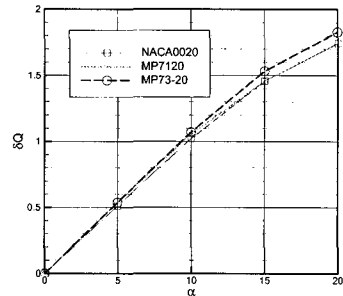
위 결과의 정량적인 비교를 위해 수치 해석을 통해 얻어진 양력과 단면의 위, 아래로 나뉘어지는 유량을 Fig. 3에서 도시하였다. 여기서 Fig. 3(b)의  $\delta Q$ 는 단면 위의 흡입면과 단면 아래에 압력면을 각각 지나는 유량의 차이를 식(7)에서와 같이 무차원한 것이다.

$$\delta Q = [Q_{upper} - Q_{lower}] / [u_{in} c] \quad (7)$$

Fig. 3에서 유량차와 양력간에 선형적인 관계가 나타난다. 이 그림에서 NACA단면에 비해 뒷날 형상이 오목해진 MP단면의 경우가 나뉘는 유량의 차이가 더 클 수 있다. 그 이유는 뒷면이 오목할 경우 단면을 따라 흘러오던 유동이 오목한



(a)



(b)

Fig. 3 Obtained results ;(a) Lift coefficients (b) Mass flux ( $Re=1 \times 10^8$ ).

뒷날 부근에서 정체되어 그 곳에서 고압 영역이 발생하고 이 곳이 유동 저항으로 작용하기 때문에 상대적으로 흡입면쪽으로 흘러가는 유량이 많기 때문으로 판단된다. 그래서 Fig. 2의 MP단면들의 압력 분포를 보면 압력면의 뒷날 부근에 0.2 값을 가지는 고압의 압력선이 나타나고 있다.

그리고 여기서 유량의 차이와 양력간의 선형성은 비점성 이론으로도 설명할 수 있다. 예를 들어 균일한 유속을 가지는 유동장 내에 반경이  $a$ 인 실린더가 있는 경우를 보자. 이 경우 시계 방향으로  $\Gamma$ (circulation)이 커지면 식(8)에서  $\Gamma$ 이 음의 방향으로 커지면서 양력 또한 위쪽으로 증가한다. 그리고 식(9)와 같이 각도에 따라 유선 분포가 얻어지는데 그 결과를 도시해보면 정체점은 압력면을 따라 아래쪽으로 이동되고 실린더 표면을 기준으로 실린더의 아래보다 위를 지나는  $\psi$ (stream function)가 더 빨리 증가한다. 따라서  $\psi$ 의 적분으로 얻어지는 유량 또한 더 많다 (White 1986).

$$L / \text{unit width} = -\rho u_{in} \Gamma \quad (8)$$

$$\psi = \psi_{uniform\ stream} + \psi_{doublet} + \psi_{vortex}$$

$$= u_{\infty} \sin \theta \left( r - \frac{a^2}{r} \right) - \frac{\Gamma}{2\pi} \ln \frac{r}{a} \quad (9)$$

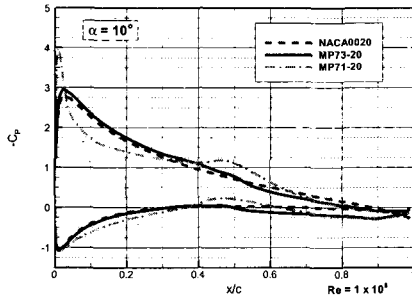


Fig. 4 The pressure distributions.

Fig. 4은 타 표면에서의 무차원된 압력값( $C_p$ )을 비교한 그림이다. MP73과 NACA 단면의 경우 앞날의 형상이 같음에도 불구하고 압력 분포가 차이가 나는 것은 MP73단면의 경우 앞에서 언급했듯이 압력면을 지나는 유량이 NACA단면보다 많아 압력 변화가 조금 더 커진 것이고, 양력을 발생시키는 두 면의 주요한 압력 차이는 뒷날에서 볼 수 있다. 그리고 받음각을 가지는 유동에서 모든 단면들은 정체점이 압력면에서 발생되는데 MP71단면의 경우는 앞날이 얇으므로 다른 단면들보다 매우 작은 회전 반경을 가지고 흡입면으로 유동이 돌아서 흘러가야 한다. 따라서 이때 회전 중심으로 반경에 역비례하는 원심력이 필요하고 이를 얻기 위하여 회전 중심의 압력이 낮아진다. 그래서 다른 단면들보다 압력이 앞날에서 크게 낮다. 그리고 가장 두꺼운 단면 위치가 다른 단면보다 뒤에 위치하여 이곳에서의 형상 기울기가 더욱 급해지므로, 유동이 이곳을 지날 때 속도 방향이 바뀌면서 발생하는 유동 가속도 더 크게 발생하므로 상이한 압력 분포를 보인다. 그리고 MP73단면의 경우처럼 뒷날에서 양력을 증가시키는 단면 위 아래의 압력 차이를 볼 수 있다.

Fig. 5는 받음각에 대한 양력 분포를 비교한 것이다. 익형의 경우 양력은 압력 차이에 의해 대부분이 발생되므로 PANEL법이 매우 유용하나 그림에서 단면 형상에 의한 차이는 PANEL법으로 보이지 않고 있다. 압력은 벽면에서 수직하게 경계층

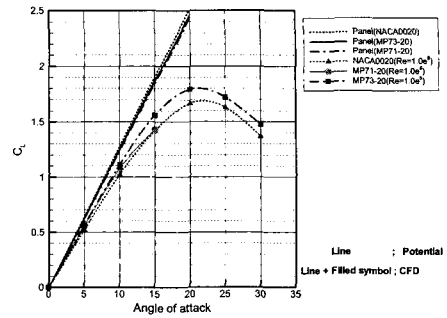


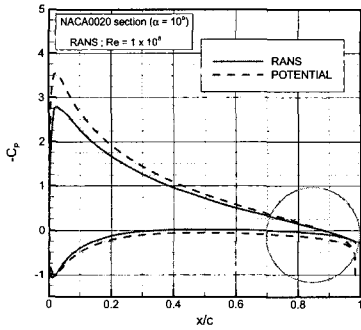
Fig. 5 Lift coefficients ( $Re=1 \times 10^8$ )

을 지나면서 변화가 없으므로 경계층을 무시하더라도 벽면 압력장을 높은 정확도를 가지고 예측할 수 있다. 따라서 수치 비용이 싸고 해석이 용이한 PANEL법으로 양력이 쉽고 더욱 정확하게 예측이 가능하다. 그러나 본 연구에서 언급한 단면들의 경우 정성 해석 결과는 MP73단면이 NACA단면에 비해 9~10%이상 양력이 크게 발생될 것을 예측하고 있고, 이 결과가 오히려 실험 결과와 잘 일치된다 (Söding, 2000). 그리고 MP73단면과 NACA단면을 각각 이용해 제작된 타를 가지고 수행한 타 단독 시험에서 MP73단면의 타가 9.5~12.3% 향상된 타 직압력의 향상을 보였고 조종성 구속 모형시험에서도 10/10 zigzag의 2nd overshoot각도가 약 10도 정도 향상된 결과를 얻었다(김운수 등 2003). 따라서 본 경우는 단면 형상의 미소한 변화가 벽면을 지나며 발달되는 압력장에 영향을 준 것으로 판단되며, 이러한 경우에는 점성을 무시한 PANEL법을 통해 그 차이를 구별할 수 없고 경계층이 고려된 RANS 해석이 필요하다고 말할 수 있다.

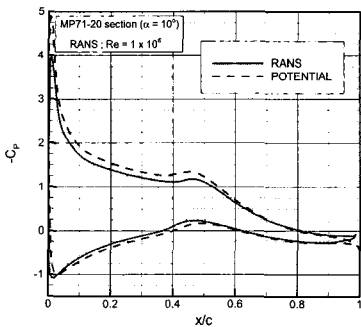
그리고 MP71단면의 경우도 받음각이 작을 경우 6%이상의 양력 증가가 나타나면서 MP73단면에 더 가까운 양력 값을 보이는데 받음각이 커지면 NACA단면과 유사해진다. MP71단면 또한 Fig. 1에서 보듯이 MP73단면 처럼 오목한 형상을 가지고 있으므로 양력이 크게 발생하지만 받음각이 증가되면 최대 두께의 위치가 좀 더 뒤에 존재해서 단면 경사가 심한 부근에서 유동이 다른 단면에 비해 빨리 불안정해지므로 NACA단면처럼 양력이 낮아진다. 왜냐하면 유동이 단면을 따라 흘러가면

서 일어나는 압력 회복 과정에서 유동이 불안정하면 역압력 구배(adverse pressure gradient)가 발생하여 더 이상 압력 회복이 이루어지지 못하고 균일한 분포를 보이며 양력도 작아지기 때문이다.

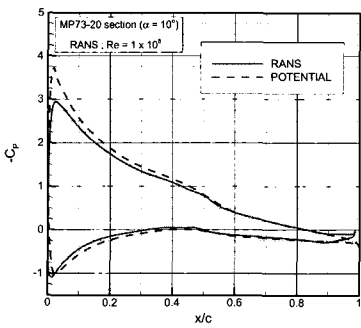
Fig. 6은 PANEL법과 점성 해석을 통해 각 각 얻어진 벽면의 압력장을 비교한 것이다. NACA단면



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Pressure coefficients: (a) NACA0020 (b)MP71-20 (c) MP73-20 section.

주위 압력 분포를 나타낸 Fig. 6(a)에서 원으로 표시된 뒷날 부근을 보면, 점성 해석의 경우 단면 위 아래의 압력 차이가 작은데 반하여 PANEL법은 크게 예측하고 있다.

지금까지의 모든 결과에서 점성을 고려한 해석이 Panel결과에 비해 작은 양력값을 보이는데 이는 Reynolds수의 영향 때문이다. Panel은 확산항을 무시하였으므로 Reynolds수가 매우 높다고 가정된 것과 같다. 그런데 Reynolds수가 증가되면 확산항보다는 대류항의 영향이 커지므로 타 표면을 따라 유동이 더욱 잘 흘러가고 따라서 압력 회복도 잘 일어나 양력도 증가하게 된다. 따라서 확산항을 고려하지 않은 PANEL이 RANS보다 더 큰 해를 제시하는 것이다. 그런데 실선의 경우 작동 유체가 물이고 해석 대상의 길이가 길어서 Reynolds수 또한 크므로 매우 좋은 답이 될 수 있다. 따라서 PANEL해석이 더욱 타당할 수 있으나 본 연구에서 보듯이 형상이 점성을 통해 유동장에 영향을 주고 이로 인해 양력이 달라질 수 있는 경우는 PANEL법으로 발견할 수 없고 점성 해석을 통해서 만이 확인할 수 있다. 덧붙여서 점성 유동 해석에서 Reynolds수가 증가함에 따라 양력 또한 증가하는데 두 단면에서 나타나는 양력의 차이는 그와 무관하게 일정한 비율로 나타난다. 따라서 Reynolds 수가 높은 유동을 점성을 고려하여 해석할 때 가장 좋은 답을 기대할 수 있을 것이다. 그러나 수치 비용과 난류 모델링의 한계 때문에 아직까지는 어려운 문제이다.

### 5. 3차원 수치 해석의 검증

3차원 수치 해석 결과를 검증하기 위해 Fig.7(a)와 같은 타에 대해 유동 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 단면은 NACA0020이 사용되었고 타 위는 대칭 조건을 사용하여 해석되었다. 격자계는 벽면에 벽함수를 쓰기 용이하도록 'prism mesh'를 사용하였고 내부는 비정렬 격자계를 이용하였다. 해석 영역은 앞으로 3배 위로 4배 그리고 대칭 조건이 사용되는 양 옆으로는 4배의 범위를 잡았다. 2차원 해석과는 달리 충분한 격자 해상도를 줄 수 없어 후류 영역이 짧아 졌다.

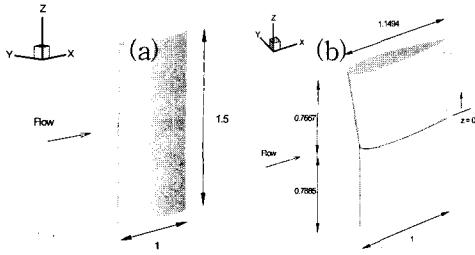


Fig. 7 Schematic diagram of the rudder.

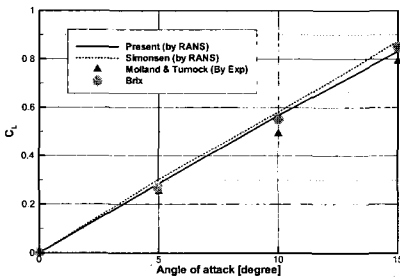


Fig. 8 Lift characteristics for  $\Delta=1.5$  and  $Re=0.4 \times 10^6$ .

Fig. 8은 비교 결과로서 수치 해석을 통해 얻어진 Simonsen(2000)보다 실험 결과를 더 잘 예측할 수 있음을 볼 수 있다. 여기서 Brix(1993)은 Potential 해석과 실험을 통해 얻어진 데이터를 통해 제안된 실험식(10)을 도식한 것이다.

$$C_L = \frac{2\pi\Delta(\Delta+1)}{(\Delta+2)^2} \sin\delta + C_q \sin\delta \sin\delta \cos\delta \quad (10)$$

여기서  $\Delta(=s/c)$ 는 타의 종횡비이며  $\delta$ 는 받음각을 나타낸다. 그리고  $C_q$ 는 끝날 형상과 관련된 저항상수로 여기서는 '1'을 사용하였다.

이 실험식은 형상에 대한 고려를 할 수 없으나 유동장 내에 'stall'이 발생되지 않는 받음각이 작은 영역에서 매우 정도 높은 양력값을 제공함을 알 수 있다. 그리고 실험값은 풍동에서 벽면에 타를 고정하고 얻어진 것인데, 그림에서 수치해가 실험보다 더 큰 경향을 보이는 이유가 실험의 경우 타가 설치된 벽면과 타 사이에 경계층이 발생하므로 이로 인한 양력의 손실 때문으로 판단된다.

다. 물론 이를 수치적으로 모사할 수 있으나 경계층의 발달 정도가 변수가 되므로 이를 해석하고 비교하는 것은 의미가 없다고 판단하였다.

### 6. 3차원 수치 해석의 적용

위 계산을 통해 현재 사용된 수치 방법에 대한 검증은 마치고, Fig. 7(b)의 타에 대해 2차원 해석에서 고려되었던 3가지 단면을 각각 가지는 일체형 타의 성능을 비교해 보았다.

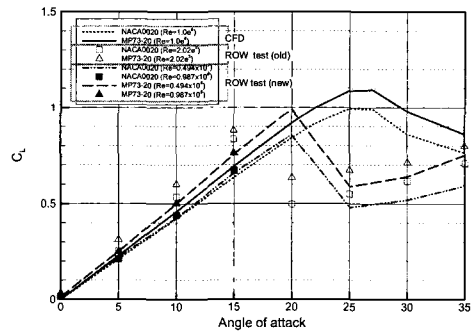


Fig. 9 Lift characteristics.

이 경우에는 타 위를 대칭 조건을 사용하지 않고 타 높이의 1배만큼 물속에 잠긴 경우가 고려되었다. 이와 같이 한 이유는 실험의 경우와 유동 조건을 일치시키기 위해서이다. 검증 해석과 같이 대칭 조건을 사용할 경우 각 단면의 양력 발생을 비교했을 때 대칭면에 해당하는 타 높이에서 양력이 가장 크게 발생할 것이다. 그러나 실재로는 타의 중앙에서 가장 큰 양력이 발생되고 타의 끝단에서는 모서리 효과로 오히려 양력 발생이 작을 것이기 때문이다. 그리고 타 단독 실험은 저속에서 이루어지므로 자유 표면 효과가 작을 것으로 예측하고 본 계산에서는 무시하였다.

Fig. 9는 수치 해석과 ROW실험 결과를 함께 도시한 것이다. 위 그림에서 'ROW test(old)'는 부경태 등 (2003(b))이 발표했었던 실험 결과이고 'ROW test(new)'는 Reynolds 효과를 확인하기 위해 새로이 수행되었던 실험에서 얻어진 결과이다. 두 경우에서 달라진 실험 조건은 두가지이다. 하나는 Reynolds수를 높이기 위해 타의 크기를 기

존보다 두배를 키웠고 또 하나는 타를 선체에 설치하기 위해 타 윗면에 붙는 'trunk'부분을 제거하였다. 그 결과 수치해와 실험해가 정량적으로 더욱 가까워 졌고 수치해와 실험해를 비교했을 때 받음각이 작은 경우 단면들 끼리의 비교가 가능함을 알 수 있다.

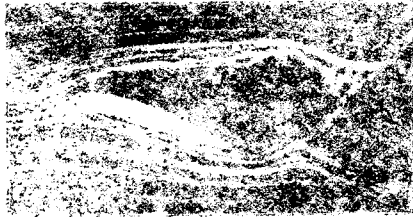


Fig. 10 Separation occurring on an airfoil at a high angle of attack. [ By Eastman and Albert, Photographs from the smoke tunnel.]

그러나  $25^\circ$  이후 다른 경향을 보이고 있는데, 실험 결과에서 이 범위는 'stall'이 일어나고 있기 때문에 판단된다. Jainszewska et al.(1999)이나 Jacobvs et al.(1937)은 받음각에 따라 변하는 양력 분포를 실험적으로 얻었는데 그 분포가 모두 본 논문에서처럼 어떠한 각에서 양력이 갑작스럽게 떨어지고 있다. 그들은 이 각도를 'stall angle'이라 하였는데, Jacobvs et al.(1937)은 이런 현상이 흡입면을 흐르는 유동이 역압력 구배를 견디지 못해 발생한 와류 때문으로 보고 있다. Fig.10는 'stall'에 의해 와류가 흡입면 전체에서 발생하고 있는 사진이다.

그렇지만 수치해석에서는 와류 영역이 임계 받음각을 지났을 때 뒷날 부근부터 자라나기 시작해서 받음각의 증가와 함께 흡입면을 따라 자라나고, 이 때문에 양력이 점진적으로 떨어진다. 그리고 실험과 같이 갑작스럽게 발생하는 'stall'현상은 본 해석에서 가정한 정상해석을 통해 볼수 없고 비정상 해석을 수행하더라도 해석이 어려울 것으로 예상된다. Jainszewska et al.(1999)은 실험을 통해 앞날 형상을 바꾸거나, 형상이 같더라도 거칠기만을 조절하더라도 이러한 'stall'현상을 지연시키거나 경향을 바꿔줄 수 있었다.

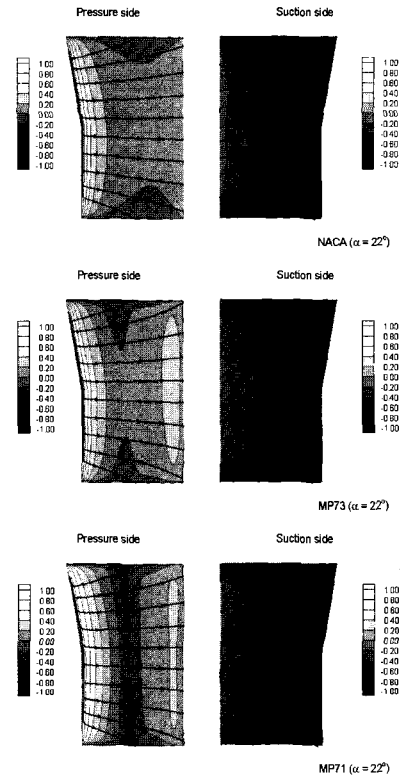


Fig. 11 The limited streamline and pressure distributions ( $Re=1 \times 10^6$ ,  $a=22^\circ$ ).

Fig. 11는 받음각이  $22^\circ$ 일 때의 타 표면의 유선과 압력 분포를 보인 것이다. 그림에서 MP71단면의 경우 와류가 빨리 발생하고 있음을 볼 수 있는데 이미 이차원 단면 해석에서 언급했듯이 단면 뒷모양이 MP73단면처럼 오목하기 때문에 양력이 NACA단면보다 크게 발생되나 최대 두께 위치가 뒤로 가 있는 영향으로 와류가 다른 단면보다 더 빨리 나타나 Fig. 5에서 다른 단면 보다 먼저 받음각에 대한 선형성이 없어지면서 양력이 떨어지게 된다. 그리고 그림에서 압력면에 원으로 표시한 영역은 뒷날을 오목하게 함으로써 발생하는 고압영역을 나타내는데 이 영역이 양력을 증가시키고 있다.

Fig. 12은 각 단면에 작용하는 회전 모멘트를 비교한 것이다. 그림에서 Reynolds수가 낮아 대류항보다 확산항의 영향이 커서 유동이 벽면을 상대적으로 잘 따라 흘러가지 못하거나

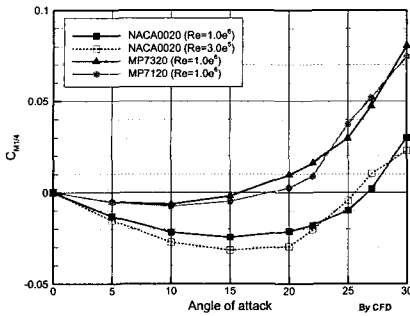


Fig. 12 Angular moment characteristics.

MP71단면처럼 흡입면에서의 유동 안정성이 떨어지는 경우가 다른 경우들보다 와류의 발생이 빨라 다른 경향의 모멘트 분포를 보인다. 그리고 NACA 단면에 비해 고양력을 내는 MP계열의 단면들은 받음각이 작을 경우에는 모멘트의 절대 크기를 비교했을 때 NACA 단면에 비해 상대적으로 작다. 왜냐하면 양력은 크지만 힘의 중심이 타의 회전 중심에 더 가깝기 때문이다. 그러나 받음각이 커질 경우 이미 NACA에 비해 뒤로 이동되어 있는 모멘트 중심이 더욱 뒤로 이동하면서 더욱 큰 양력과 함께 모멘트가 훨씬 증가함을 알 수 있다.

### 7. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 아래와 같다.

(1) 기존에 많이 사용되는 NACA단면에 비해 타 뒷날이 가늘어진 MP73단면이 10%이상의 높은 양력을 얻을 수 있으나 받음각이 커질수록 회전 모멘트 또한 훨씬 증가되어 steering gear의 용량 또한 매우 커야 한다. 따라서 MP73단면이 조종 성능은 좋을 수 있으나 steering gear의 용량도 함께 커야 하므로 실선에 적용하기에 무리가 있다.

(2) 전가동타 주위 유동에 대한 점성을 고려한 수치 해석을 통해 유체력에 대한 정량적인 결과를 기대할 수 있고 이를 통해 조종성을 고려한 새로운 타 개발에 활용이 기대된다. 그러나 PANEL법

의 경우 싼 수치 비용으로 더욱 정확한 결과를 기대할 수 있지만 본 해석에서 고려하였던 단면들의 경우에는 그들간의 차이를 구별하지 못하였다. 그 이유는 양력을 발생시키는 타 표면 압력이 점성에 의해 영향을 받기 때문이다.

### 참 고 문 헌

- 김윤수, 지용해, 부경태, 2003, “고양력타가 조종 성능에 미치는 영향,” 대한조선학회 추계학술대회논문집, pp. 412-416.
- 부경태, 지용해, 김윤수, 신수철, 2003, “조정 성능 예측을 위한 러더 주위 유동 해석,” 대한조선학회 추계학술대회논문집, pp. 318-323.
- 부경태, 한재문, 송인행, 신수철, 2003, “FLUENT 코드를 이용한 타 단면의 점성 유동 해석,” 대한조선학회 논문집 제40권, 제4호, pp. 30-36.
- Brix, J. ed. 1993, Maneuvering Technical Manual, Seehafan Verlag Gmbh, Hamburg.
- Jacovbs, Eastman N Sherman and Albert, 1937, “Airfoil Section Characteristics as Affected by Variations of the Reynolds Number,” NACA Report 586, pp. 227-267.
- Janiszewska, J.M., Ramsay, R.R., Lee, J.D. and Gregorek, G.M., 1999, “Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the L303 Airfoil,” A National Laboratory of the U.S. Department of Energy Managed by Midwest Research Institute
- Molland, A.F. and Turnock, S.R., 1991, Wind Tunnel Investigation of the Influence of Propeller Loading on Ship Rudder Performance, Ship Science Report No. 46, Univ. of Southampton.
- Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., 1995, “A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation,” Computers Fluids, 24(3), pp. 227-238.
- Simonsen, C.D., 2000, “Rudder, Propeller



and Hull Interactionb by RANS.” Department of Naval Architecture & Off shore Engineering Thicnical Univ. of Denmark, pp. 115-132.

- Söding, H., 2000, “Limits of Potential Theory in Rudder Flow Predictions” Twenty-Second Symposium on Naval Hydrodynamics., pp. 622-637.
- White, F.M., 1986. Viscous Fluid Flow McGraw-Hill, Inc., Univ of Rhode Island.



< 부 경 태 >



< 지 용 해 >



< 김 윤 수 >



< 신 수 철 >