

# 관다효과를 이용한 전 가동 타의 양력성능 개선에 관한 연구

서대원<sup>1</sup>·이승희<sup>2,†</sup>  
인하대학교 정석물류통상연구원<sup>1</sup>  
인하대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>

## A Study to Improve the Lift Performance of a Full Spade Rudder with the Coanda Effect

Dae-Won Seo<sup>1</sup>·Seung-Hee Lee<sup>2,†</sup>  
Jungseok Research Institute of International Logistics and Trade, Inha University<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University<sup>2</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 shape of a conventional full spade rudder has been modified to implement the Coanda effect and consequential changes in the flow characteristics are carefully examined to show the significant enhancement in the lift performance. A preliminary numerical study has been done to identify the optimum configuration of the modified rudder sections. For the purpose, chord wise locations of the jet slit and the radii of the trailing edge were varied in several ways and the changes in the lift characteristics have been observed at the various angles of attack, particularly focusing on the usefulness of the Coanda effect upon delaying the stall or increase in the circulation. Making the most use of the results so attained, full spade rudder of a VLCC has been reformed to realize the Coanda effect. A series of model experiments and numerical simulations are performed to confirm the effectiveness of the Coanda effect in improving the performance of the modified rudder. It is found that considerable enhancement in the lift performance of the rudder is plausible at any rudder angle if an optimum jet momentum is provided.

**Keywords** : Coanda effect(관다효과), Stall control(실속제어), Circulation control(순환제어), Spade rudder(전 가동 타), High lift marine rudder(고 양력 타)

## 1. 서론

일반적으로 선박이 저속으로 운항하는 상태에서는 프로펠러 후류에서 작동하는 타의 경우에도 충분한 조종성능을 발휘하지 못하는 경우가 종종 보고된 바 있다. 이에 국제해사기구(IMO)에서는 초대형 유조선의 사고에 의한 해양오염을 방지하기 위하여 선박의 조종성능이 일정한 수준 이상이 될 것을 요구하고 있어서 고 양력을 얻을 수 있는 효율적인 타 장치개발을 위한 연구들이 현재까지도 활발하게 이루어지고 있다.

양력을 증가시키기 위한 연구는 주로 항공분야에서 활발하게 수행되어 왔으며, 그 중에는 관다효과를 이용하여 날개장치의 성능을 개선하기 위한 다양한 연구들도 포함되어 있다 (Joslin & Jones, 2006). 관다효과란 1910년경 루마니아의 Henry Coanda에 의해 발견된 현상으로 물체 표면에 접선방향으로 분사된 제트 유동이 물체표면에 밀착되어 흐르는 현상을 말한다 (Gale, 1998).

양력을 증가시키는 방법에는 Fig. 1과 같이 제트 분사를 이용하여 순환을 증가시키는 방법(Circulation Control)과 실속을 지연시키는 경계층 제어법(Boundary Layer Control), 다량의 유동을 분사시키는 흡입면 분사제어법(Upper Surface Blowing), 플랩 등과 같은 부가물을 이용하는 방법 등이 있다 (Keen, 2004). 이 중에서도 제트 분사를 이용한 순환제어법은 날개장치의 양력성능을 크게 개선시킬 수 있으며, 유동을 양력방향으로 분사하는 경우 (Jet thrust)보다 성능과 효율 측면에서 상당히 큰 이득이 있는 것으로 확인 된 바 있다 (Joslin & Jones, 2006).

조선분야에서 순환제어법을 선박 날개장치의 양력증가에 적용하기 위한 연구들은 상대적으로 많지 않지만, 날개장치에 적용하기 용이하고, 양력성능을 획기적으로 증가시킬 수 있어 국내 대학 위주로 꾸준히 연구되어 오고 있다 (Ahn, 2003; Seo, 2011).

국내 조선분야에서 관다효과를 날개 장치에 적용하기 위한 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다. Ahn and Kim (1999)과 Rhee,

et al. (2003)은 모형시험과 수치계산을 통해 주날개와 보조날개의 틈새에서 흡입면 방향으로 고속의 제트유동을 분사하면 보조날개의 흡입면에서 발생하는 역 압력 구배가 지연되어 날개장치의 성능이 증가함을 보였으며, Park and Lee (2000)는 날개의 뒷날에 곡면을 주고, 흡입면 뒷날의 곡면근처에서 접선방향으로 고속의 제트유동을 분사하면 날개장치의 양력성능이 증가함을 보인다. 또한 Ahn (2003)은 플랩 타 단면의 주 날개와 보조날개 틈새에 제트 유동을 분사하여 실속을 지연시키고, 부분적인 순환증가 효과를 통해 플랩 타의 양력성능을 개선하기 위한 연구를 수행한 바 있으며 Seo, et al. (2010)과 Seo and Lee (2011)는 선박용 혼-타와 안정기용 핀에 관다효과를 적용하기 위한 연구를 수행하여 다양한 날개장치의 양력성능 개선에 활용할 수 있음을 보였다.

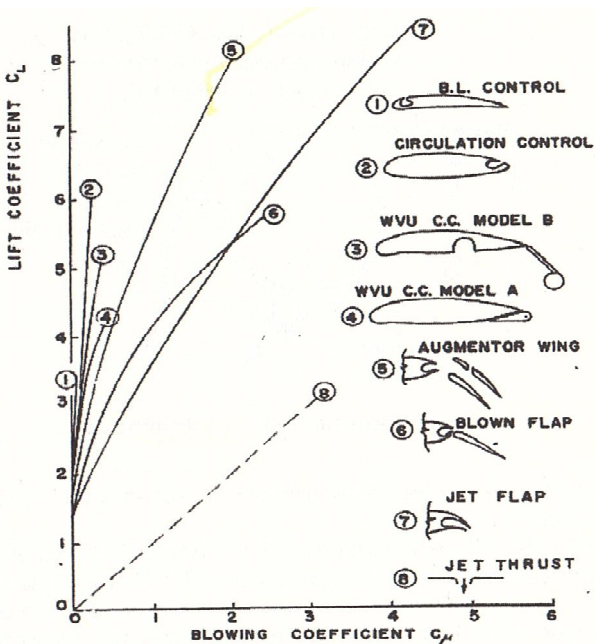


Fig. 1 Performance comparison of the powered high-lift systems (Joslin & Jones, 2006)

본 연구에서는 고 양력 관다 타의 설계를 위하여 관다효과에 의한 전 가동 타의 양력성능 변화와 이에 관련된 주요 변수들의 영향을 수치적인 방법을 이용하여 조사하였다. 또한 그 결과를 바탕으로 선정된 3차원 전 가동 타에 적합한 관다장치를 설계하고 모형시험을 통하여 타의 성능변화를 조사하였다.

## 2. 수치계산

### 2.1 지배방정식

지배방정식으로는 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하였으며 좌표축을  $x_i = (x, y, z)$ , 각 축 방향의 평균 속도성분을  $u_i = (u, v, w)$  라고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

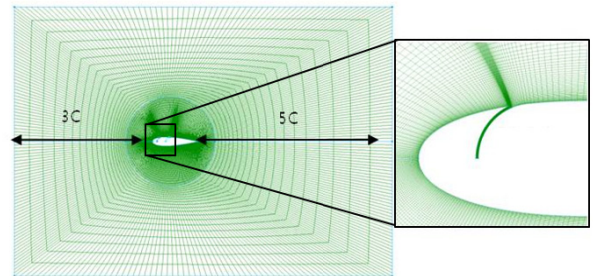
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & \quad - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \tag{2}$$

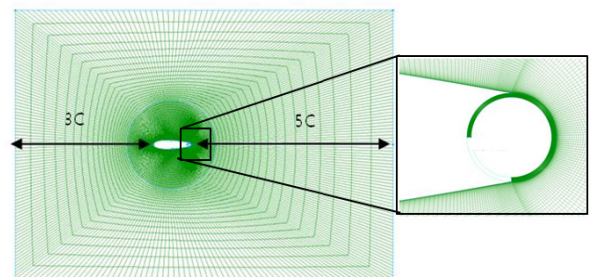
여기에서  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ 는 레이놀즈 응력,  $\mu$ 는 동역학적 점성계수,  $p$ 는 정압을 나타낸다.

### 2.2 계산 알고리즘

지배방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용한 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환하였으며 그 과정에서 확산항에는 중심 차분법, 시간에 대한 미분항에는 1차 음해법을 사용하였다. 입력방정식으로는 Rhin/Chow 방법을 수정한 FLUENT의 표준 방법을 사용하였으며, 속도-압력의 연성은 SIMPLE 방법을 사용하였다. 또한 완화계수 값으로 압력에 대해서는 0.3, 운동량에 대해서는 0.5, 난류에 대해서는 0.5를 주었다.



(a) Stall control type



(b) Circulation control type

Fig. 2 Grid systems for the two-dimensional Coanda sections

난류모형 및 격자의 밀집도는 제트유동과 유동이 지나가는 타 표면 부근 경계층의 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Seo, et al. (2008)의 연구 결과를 살펴보면, 다양한 난류모

형들 중에 RSTM (Reynolds Stress Turbulence Model) 모형을 사용하면서 첫 격자점의  $y^+$ 를 1 이하로 유지하였을 경우에 수치 계산 결과가 실험결과에 가장 잘 일치함을 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 RSTM 난류모형의 수치계산시에 첫 격자점의  $y^+$ 는 1 이하가 되도록 격자의 밀집도를 결정하였다. 계산영역은 Fig. 2와 같이 날개의 코드(C)를 기준으로  $-3 \leq x/C \leq 5$ ,  $-3 \leq y/C \leq 3$ 로 확장하였으며, 제트노즐의 높이 방향으로 25개의 격자를 분포시켰다. 총 격자수는 약 70,000개로 실속제어형 타 단면과 순환제어형 타 단면에 대해 동일하게 격자를 분포시켰다.

제트 분사량에 관한 무차원 수인 제트 모멘텀 계수는 식(3)과 같이 정의하였다.

$$C_j = \frac{\dot{m}_j V_j}{\frac{1}{2} \rho S V_\infty^2} \quad (3)$$

여기서  $\dot{m}_j$  은 질량유량(kg/s),  $V_j$ 는 슬릿을 통해 빠져나가는 제트유동의 평균유속이며,  $\rho$ ,  $V_\infty$ ,  $S$ 는 각각 유입류 밀도, 평균속도, 투영면적(코드와 스패의 곱)을 의미한다.

### 2.3 실속 제어형 전 가동 타 단면

본 연구에서는 제트 노즐의 위치 및 제트 모멘텀 변화가 전 가동 타 단면의 양력성능 특성에 미치는 영향을 수치적인 방법으로 조사하였다. 대상단면은 일반적인 선박용 타 단면에 주로 사용되는 NACA0020이고, Fig. 3과 같이 제트노즐의 코드방향 위치에 따른 날개의 성능변화를 조사하였다. 수치계산은 제트노즐의 위치( $D_{slit}$ )가 앞날에서 각각 0.2C, 0.4C, 0.6C 떨어진 경우에 대해서 수행하였다.

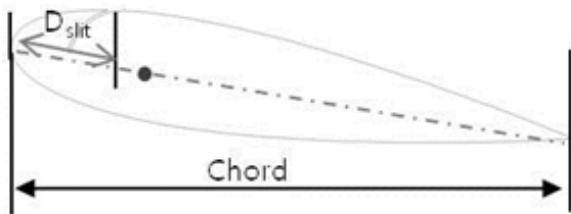


Fig. 3 Chord wise location of the jet nozzle (Stall control type)

제트노즐 위치에 따른 양력성능 변화를 Fig. 4에 보인다. 노즐 위치 0.2C, 0.4C, 0.6C 에서 제트 모멘텀 계수  $C_j = 0.1$ 로 제트유동을 분사하였을 때 모든 경우에서 실속현상이 지연되는 것을 볼 수 있다. 즉, 기존 날개단면에서는 받음각 20°에서 실속이 발생하는데 비하여 제트 유동을 분사하면 실속이 23°에서 35°까지 지연되었으며 특히 제트노즐의 위치가 0.2C인 경우에는 받음각 35° 부근까지도 양력이 꾸준히 증가하고 있어 양력성능이 약 110% 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 제트노즐이 앞날에 가까워질수록

실속 지연효과가 향상됨을 볼 수 있는데 그 이유는 받음각이 증가하면 유동박리점이 점차 흡입면의 앞날 가까운 곳에서 나타나므로 제트 노즐이 상류에 위치하여야 실속을 효과적으로 지연시킬 수 있기 때문이다. 또한 날카로운(cusped) 뒷날을 가진 NACA0020 단면의 경우에도 제트유동을 분사하면 받음각 0° 에서 양력계수가 0.45 정도로 증가하는데 노즐 위치에 따라 큰 차이가 나타나지 않는 것으로 보아 제한적이기는 하지만 대부분 관다효과에 의한 순환증가에 의한 것으로 보인다.

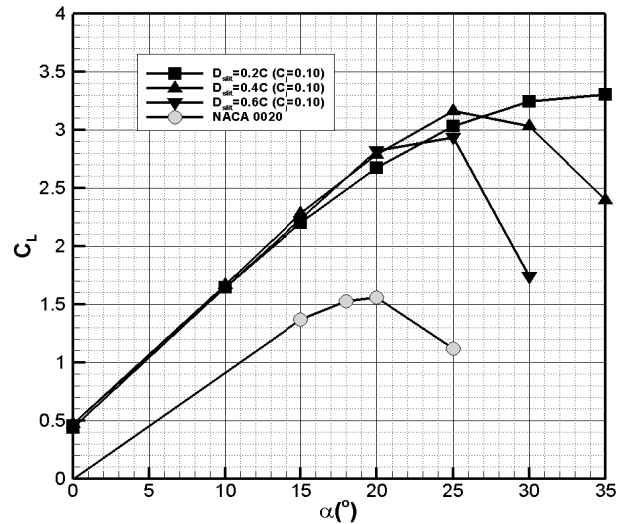


Fig. 4 Comparison of the lift performance at the various nozzle positions (NACA0020,  $C_f=0.1$ ,  $Rn=7.1 \times 10^5$ )

제트 노즐을 앞의 계산에서 가장 효과적으로 실속을 제어할 수 있었던 위치, 즉, 앞날에서 0.2C 떨어진 곳에 위치시키고, 제트 노즐이 경계층 내부에 놓이도록 그 높이를 0.005C로 정하여 제트 모멘텀의 크기에 따른 양력 특성 변화를 조사하였다. 수치계산은 받음각 10°와 20°, 제트 모멘텀 계수  $C_j = 0.0 \sim 0.35$ , 레이놀즈수는 코드 C를 기준으로  $7 \times 10^5$ 에서 수행하였으며, 주요 구간에서의 제트유동의 속도와 유량은 Table 1과 같다.

Table 1 Test cases

$C_j$	0	0.05	0.07	0.1	0.2	0.35
$V_\infty$ [m/s]	0.71					
$V_{jet}$ [m/s]	0	1.590	1.881	2.248	3.180	4.206
Flow rate [kg/s]	0	7.9	9.4	11.2	15.9	21.0
$[V_\infty / V_{jet}]^2$	0	5	7	10	20	35

수치계산 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 실속이 나타나는 받음각 20°일 때를 보면 제트 모멘텀 증가에 따라 양력도 증가하는데 대략  $C_j=0.07$ 을 지나면서 그 증가율이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은  $C_j \sim 0.07$ 까지는 앞날 가까운 곳에서 분사된 제트유동이 경계층 내부에 모멘텀을 공급하여 유동박리를 효과적으로 지연시키기 때문에 나타나는 것으로 보인다. 그러나

이미 실속이 충분히 제어된 이후이므로 그 이상 공급된 제트 모멘텀은 순환증가에 기여하여야 하는데 날카로운 꼬리를 가진 NACA0020 단면의 경우에는 순환증가 효과가 제한적이므로  $C_j$  증가에 따른 양력의 증가율이 감소하게 된다. 받음각이  $20^\circ$ 이고, 제트 모멘텀 계수가 0.1일 때 발생된 총 양력에서 받음각에 의한 양력 60%와 베르누이효과에 의한 증가분 7.5%를 제외하면 순환 증가에 의한 양력증가는 약 32.5% 인 것으로 나타났다.

실속이 일어나지 않는 받음각  $10^\circ$ 인 경우에는 공급된 제트 모멘텀은  $C_j < 0.07$ 인 구간에서 경계층 제어에 크게 기여하지 못하므로 받음각  $20^\circ$ 인 경우에 비하여 양력증가율이 상대적으로 낮아진다. 그러나 그 이상 모멘텀을 공급하면 역시 순환증가에 따른 양력 증가율을 보이고 있다.

또한 Fig. 5에 나타난  $C_j$  증가에 따른 항력계수의 소폭 감소는 분사한 제트유동의 운동량에 기인한 것으로 항력계수는  $C_j$ 의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

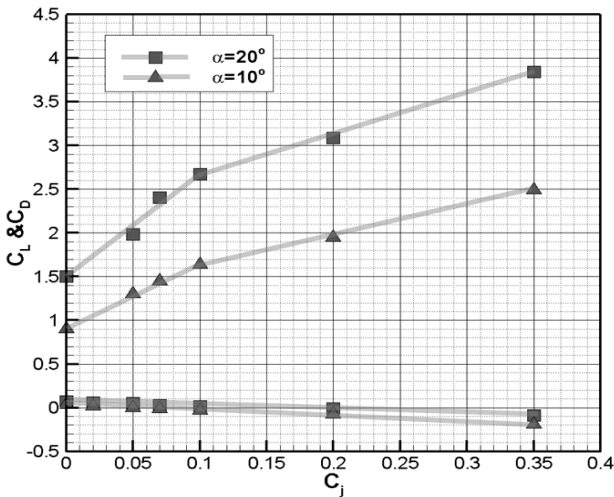


Fig. 5 Comparison of lift and drag coefficients at the various jet momentum coefficient  $C_j$  (NACA0020,  $Rr=7.1 \times 10^5$ ,  $D_{slit}=0.2C$ ,  $H_{slit}=0.005C$ )

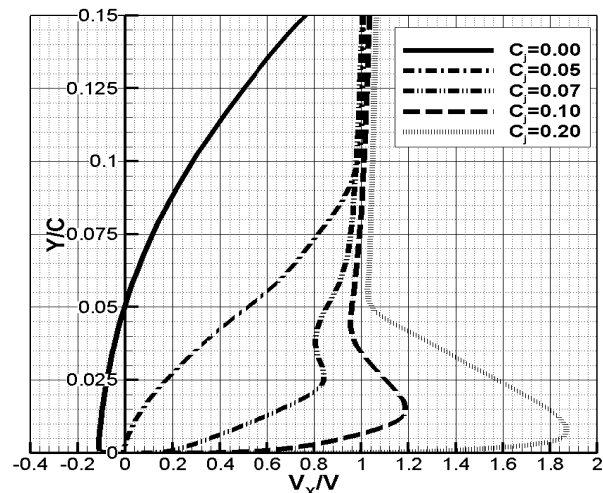


Fig. 6 Changes in the boundary layer velocity profiles with supply of jet momentum (NACA0020,  $x/c=0.95$ ,  $\alpha=20^\circ$ )

제트 모멘텀 공급에 따른 뒷날 근처에서의 경계층 유동 변화를 살펴보기 위해, 받음각  $20^\circ$ 일 때 흡입면 뒷날 부근( $x/c=0.95$ )에서의 속도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 제트 모멘텀을 공급하지 않았을 경우 흡입면 뒷날 부근 경계층 내부에는 역 압력구배에 따른 실속이 발생되었음을 확인할 수 있다. 그러나 제트 모멘텀을 공급하면  $C_j = 0.05 \sim 0.07$  사이에서 흡입면 뒷날 부근의 역 압력구배가 완전히 사라지며  $C_j$ 가 0.1 이상으로 증가하면, 경계층 내부 유속이 가속되는 것을 볼 수 있다.

### 2.4 순환제어형 전 가동 타 단면

순환제어(Circulation Control)는 곡률을 가지는 뒷날에 접선 방향으로 고속의 유동을 분사하여 날개 전체의 순환을 증가시킴으로써 결국은 양력을 증가시키는 방법이다. 선박용 타 장치에 쓰이는 전 가동 타에 순환제어법을 적용하기 위하여 Fig. 7과 같이 뒷날을 원형으로 변화시키고, 그 원주에 접선방향으로 제트유동을 분사할 수 있도록 노즐을 위치시켰다.

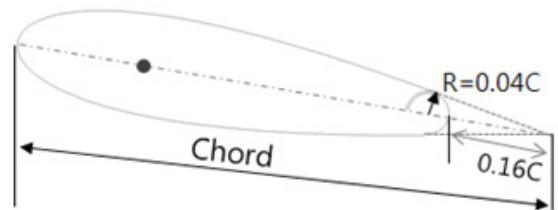


Fig. 7 Section of the spade rudder (circulation control type)

이러한 순환제어형 타 단면에서는 관다효과에 의하여 제트유동이 뒷날의 원주를 따라 박리되지 않고 상당한 거리를 흘러가게 되므로 날개주위의 순환을 증가시키게 된다.

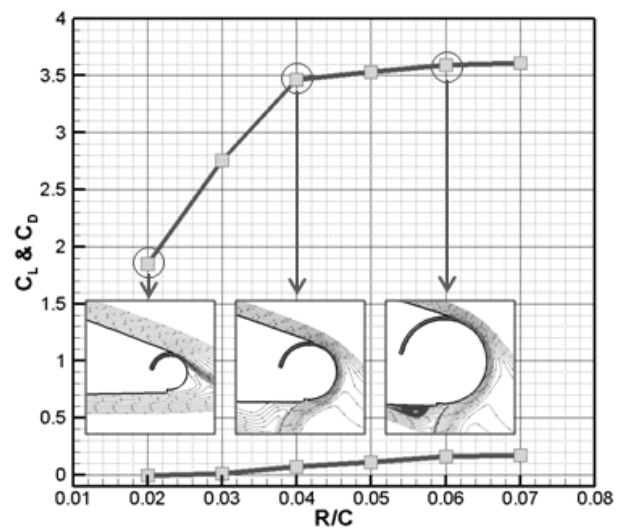


Fig. 8 Comparison of lift and drag coefficients at the various radii of the trailing edge (Modified,  $Rr=7.1 \times 10^5$ ,  $C_j=0.1$ ,  $\alpha=15^\circ$ )

따라서 원형 뒷날의 크기가 순환의 증가에 큰 영향을 미칠 것

이므로 그 크기에 따른 양력성능의 변화를 추가로 조사하였다. 날개의 뒷날 반경( $R$ )은 기준 단면의 코드( $C$ )로 무차원화 하여 0.02~0.07 구간에서 변화시켜가며 양·항력 특성의 변화를 조사하였다.

변형된 날개의 양력성능은 Fig. 8과 같이 뒷날 반경의 크기에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 뒷날 반경이 너무 작은 경우, 예를 들어  $R = 0.02C$  일 때에는 제트유동이 뒷날 부근의 급격한 곡률변화로 인하여 원주를 잘 따라가지 못하고 바로 박리되어 양력이 크게 증가하지 못함을 볼 수 있다. 그러나 뒷날 반경  $R$ 이 더욱 증가하면 원주를 따라 흐르는 제트유동의 거리, 즉, 제트유동의 회전각이 증가하여 양력도 급격히 증가하기 시작하며 그 증가율은 반경  $R$ 이 0.04C 이상이 되면 크게 낮아지기 시작하여 0.07C로 증가하여도 양력계수는 더 이상 증가하지 못하고 수렴하는 경향을 보인다.

제트 모멘텀 계수  $C_j$ 에 따른 순환제어형 타의 양력성능 변화를 조사하였다. 이 때 계산에서  $C_j$ 는 0.0~0.35 범위에서 이전과 마찬가지로 Table 1과 같이 다양하게 변화시켰으며 받음각은 10°와 20°, 뒷날반경  $R$ 은 0.04C, 제트노즐의 높이는 0.005C로 하였다. 그 결과를 Fig. 9에 보인다. 받음각 10°와 20°에서 모두 제트 모멘텀이 증가함에 따라 양력성능도 크게 증가하는 것으로 나타났으나 제트 모멘텀 계수  $C_j$ 가 0.1을 넘어서면 그 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 Seo (2011)에서와 마찬가지로  $C_j$ 가 0.1을 넘어서면 제트유동의 회전각이 수렴하기 때문이며 따라서  $C_j \leq 0.1$ 에서 제트유동에 의한 순환증가 효율이 가장 우수한 것으로 판단된다.

받음각이 20°이고, 제트 모멘텀 계수가 0.1일 때 발생된 총 양력은 받음각에 의한 양력증가분 41.5%와 순환에 의한 양력증가분 55.5%, 베르누이 효과에 의한 증가분 3%인 것으로 나타나 순환증가가 전체 양력을 크게 향상시킨 것으로 나타났다. 제트 모멘텀 공급에 따른 양력증가율(Fig. 9) 또한 실속제어형 타의 성능(Fig. 5)보다 상당히 우수한 것으로 나타났다.

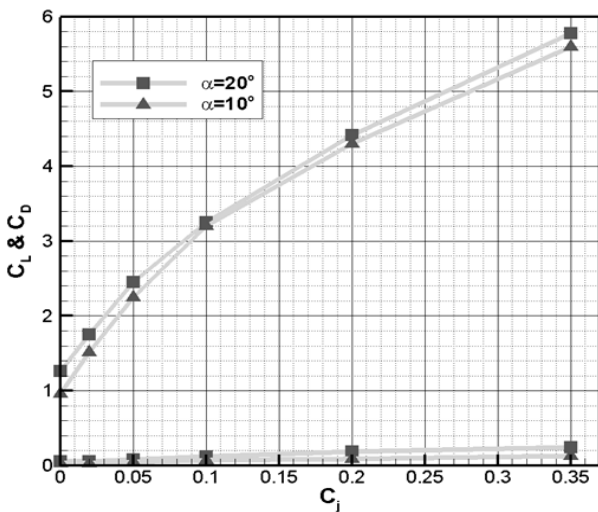


Fig. 9 Comparison of lift coefficients at the various jet momentum coefficients  $C_j$  (Modified,  $R=7.1 \times 10^5$ ,  $R=0.04C$ ,  $H_{slit}=0.005C$ )

제트 모멘텀 공급에 따른 뒷날 근처의 유속 변화를 살펴보기 위해, 받음각 10°일 때 흡입면 뒷날 부근(코드의 95% 위치)의 속도분포를 계산하여 Fig. 10에 보였다. 제트 모멘텀을 공급하지 않을 경우  $y/c < 0.05$ 인 경계층 영역의 유속분포는 점성의 영향을 크게 받고 있음을 볼 수 있다. 그러나 제트 모멘텀을 공급하면 당연히 경계층 내부의 유속도 증가하기 시작하는데 이 경우에는 실속제어형 타 단면과는 달리 경계층 외부에서도 유속이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 실속제어형 타 단면의 경우에는(Fig. 6) 제트유동을 공급하여도  $y/c > 0.05$ 인 영역에서는 속도분포가 크게 변하지 않았으나, 순환제어형 타 단면에서는(Fig. 10) 상대적으로 낮은 제트 모멘텀 계수에서도 유속이 크게 증가된 것으로 나타났다. 이러한 현상은 점성유동장에서 고속의 제트유동이 주위 유체까지 끌고 가는 현상(entrainment) 때문으로 보인다.

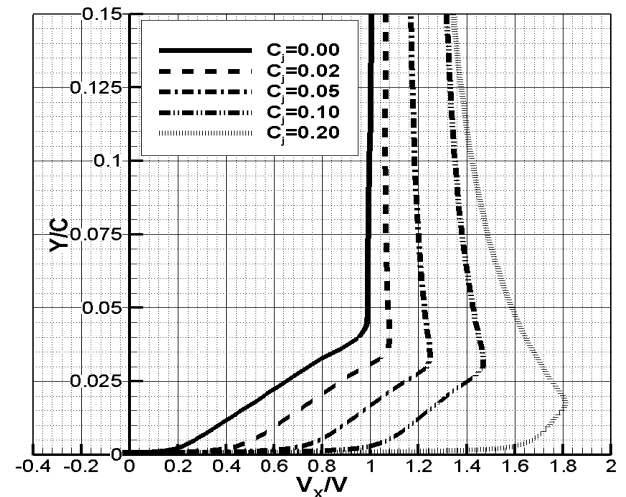


Fig. 10 Wake velocity profile (Modified,  $R=0.04C$ ,  $x/c=0.8$ ,  $\alpha=10^\circ$ )

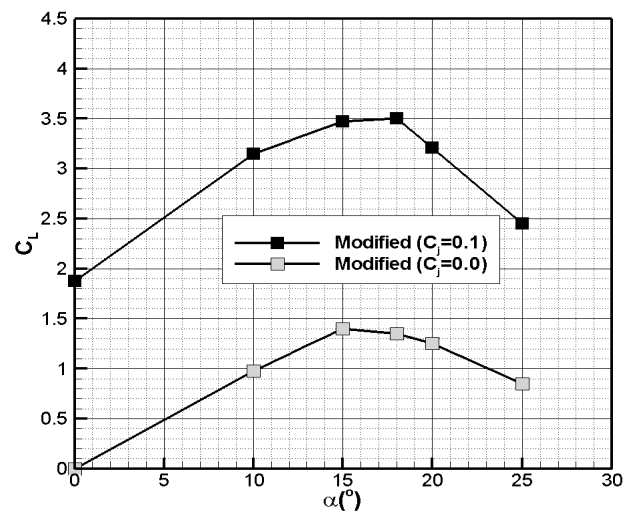


Fig. 11 Comparison of the lift coefficients at the various angles of attack (Modified,  $R=0.04C$ ,  $C_j=0.1$ ,  $R=7.1 \times 10^5$ )

순환제어법을 적용한 타 단면의 받음각에 따른 양력성능 변화

를 Fig. 11에 보인다. 제트를 분사하지 않은 경우 뒷날의 둥근 형상으로 인해 기준단면(NACA0020)보다 최대양력이 낮아지고, 실속도 더 낮은 받음각에서 나타난다. 그러나 제트를 분사하면 앞서 설명하였듯이 뒷날 원주를 따라 분사된 제트유동에 의해 날개 전체의 순환이 증가하여 모든 받음각에서 양력이 기준단면의 경우보다 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 이 경우 받음각 0°에서도 기준단면(NACA0020)의 최대양력 대비 약 125% 양력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 받음각을 고정하고 제트 모멘텀의 공급량만 제어하여도 날개장치의 양력성능을 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 모형시험

2차원 날개단면에 대한 수치계산 결과를 바탕으로 실속제어형 단면과 순환제어형 단면을 각각 3차원 전 가동 타에 적용하여, 양력성능의 개선 정도를 평가하기 위한 모형시험을 수행하였다.

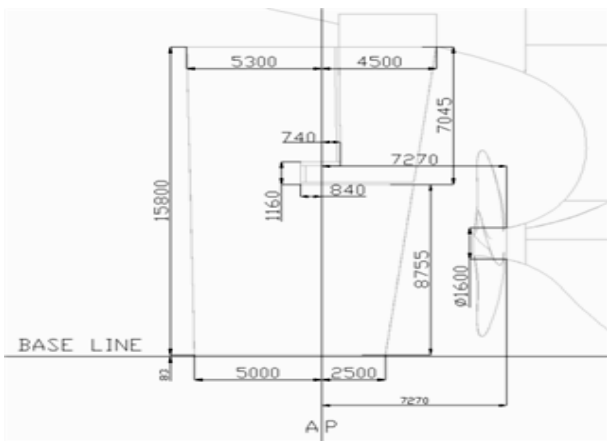


Fig. 12 Profile and arrangement of a horn type rudder under investigation

연구대상 타로는 Fig. 12에 보인 바와 같이 기존 VLCC의 혼타를 수정하여 전 가동 타로 변경한 형상을 사용하였다. 이 타의 평균 코드와 스패는 각각 5.6m 와 15.8m이다. 이 때 전체적인 형상은 기존 혼-타와 동일하게 유지하며, 뒷날에 원형 만곡부와 슬릿 등을 추가로 구성하였다.

#### 3.1 관다 타 설계

연구대상 전 가동 타의 모형은 축척 비 1/40로 3차원 프린터를 이용하여 UV레진 재질로 제작하였다. 기준 전가동 타 모형은 혼-타 모형의 틈새를 메워 사용하였으며, 관다장치가 부착된 전 가동 타는 뒷날 플래넘 및 노즐부를 별도로 제작하여 조합하는 방식을 취하였다. 모형의 평균코드는 및 스패는 Table 2와 같이 261mm, 395mm이며, 노즐의 높이는 0.5mm로 하였다. 날개단면에 대한 수치계산 결과를 바탕으로 실속제어형 관다 타에서는 Fig. 13과 같이 노즐의 위치를 앞날로부터 0.2C에 위치시켰으며,

순환제어형 관다 타의 경우에는 Fig. 14와 같이 관다효과를 극대화하기 위하여 뒷날 원형 만곡부의 반경을 0.048C로 정하였다.

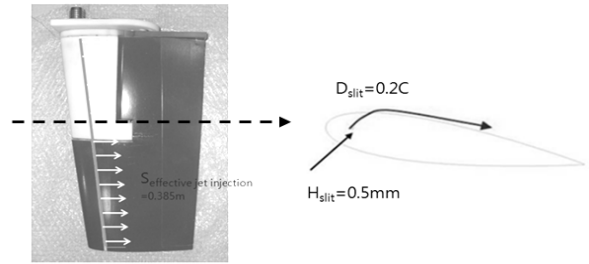


Fig. 13 Arrangement of a Coanda device on the rudder model (Stall control type)

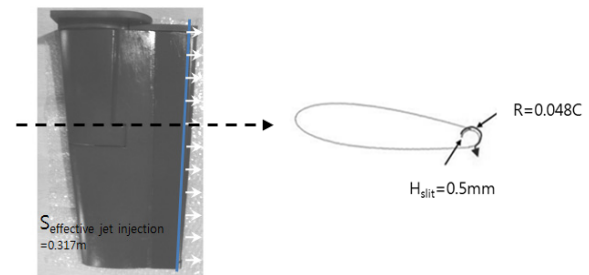


Fig. 14 Arrangement of a Coanda device on the rudder model (Circulation control type)

Table 2 Principal dimensions of the scale model

Scale	1 : 40
Mean chord	216mm
Span	395mm
$H_{slit}$	0.5mm
$C_j$	0.0~0.1

#### 3.2 모형시험 시스템

관다 타의 모형시험은 인하대학교의 회류수조에서 1/40 축척 모형을 이용하여 수행되었다. 모형시험을 통하여 타의 양항력 성능을 측정하기 위해 Fig. 15와 같이 실험 장치를 구성하였다.

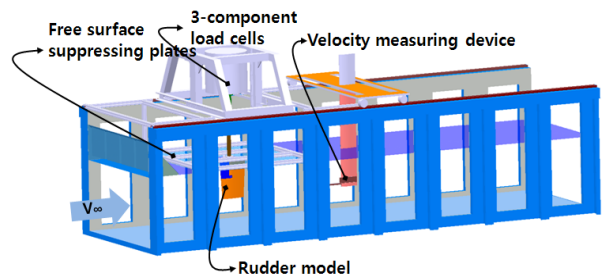


Fig. 15 Schematic diagram of the model test setup

먼저 자유수면 효과를 제거하기 위해 타 모형 주위에 자유수

면 막음판을 설치하였으며 모형 타에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하기 위해 타 모형의 상부에 3분력계를 부착하여 데이터를 취득할 수 있도록 구성하였다.

또한 관다 타의 모형에 제트유동을 공급하기 위하여 Fig. 16에 보인 바와 같이 펌프와 유량계를 이용하여 공급 시스템을 구축하였다. 이 시스템의 주요 구성은 인버터 내장용 부스터 펌프와 유량계 및 압력계, 압력수 저장탱크 등으로 이루어진다. 또한 회류수조 내부의 수위를 일정하게 유지하기 위하여 외부에서 제트유동을 공급받지 않고, 회류수조 계측 부의 후류에서 공급받아 펌프를 통하여 모형타의 노즐로 공급하게 하였다.

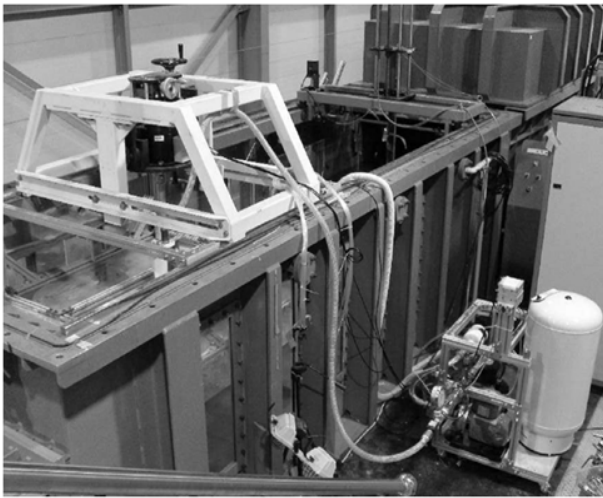


Fig. 16 Photograph of the jet injection system

### 3.3 모형시험 결과

실속제어형 관다 타와 순환제어형 관다 타의 양 항력성능을 측정하기 위하여 제트 모멘텀 계수 0.1과 0.2에서 받음각을 바꾸어 가며 모형시험을 수행하였다.

Fig. 17에 보인 모형시험 결과를 보면 실속제어형 타와 순환제어형 타의 양 항력성능은 기준 전 가동 타에 비하여 제트 모멘텀 계수가 0.1일 때에는 각각 37%와 55%가 증가하고, 제트 모멘텀 계수 0.2에서는 각각 57%와 92%가 증가한 것으로 나타났다.

실속제어형 관다 타의 경우 앞날을 통해 분사된 제트유동이 2차원 수치계산 결과와 같이 실속을 효과적으로 지연시켜 양력이 크게 상승할 것으로 기대하였다. 그러나 모형시험 결과 실속은 제트 모멘텀 계수 0.1에서는 23°에서 25°로 제트 모멘텀 계수 0.2에서는 23°에서 28°로 소폭 지연되는 것에 그쳤다. 이러한 이유는 흡입면에서 분사된 제트유동이 균일하지 못하고 끝단에서의 3차원 유동효과에 의하여 양력성능이 2차원 결과에 비하여 줄어든 것으로 판단된다.

순환제어형 관다 타는 2차원 수치계산 결과에서 기대한 것과 마찬가지로 낮은 받음각에서도 양력이 크게 발생하였으나 제트 모멘텀 계수  $C_j=0.1, 0.2$ 에서 모두 실속각이 기준 타 단면의 23°에서 17°로 오히려 낮아지는데, 이는 타 주위의 순환이 크게 증

가하면 앞날에서의 유입각(incidence angle)이 커져 상대적으로 낮은 받음각에서 실속현상이 나타나는 것으로 생각된다.

항력성능에서는 실속제어형 관다 타가 순환제어형 관다 타에 비해 우수한 것으로 나타났다. 실속제어형 관다 타의 경우 제트 모멘텀에 의한 추력 발생으로 항력이 약간 감소되었으나, 순환제어형 타에서는 제트유동이 뒷날 곡면을 따라 큰 각도로 회전한 후 박리되기 때문에 오히려 항력은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 순환제어형 타는 저속에서 높은 양력을 얻기 위해 사용되기 때문에 실제 사용시 부정적인 영향은 크지 않을 것이다.

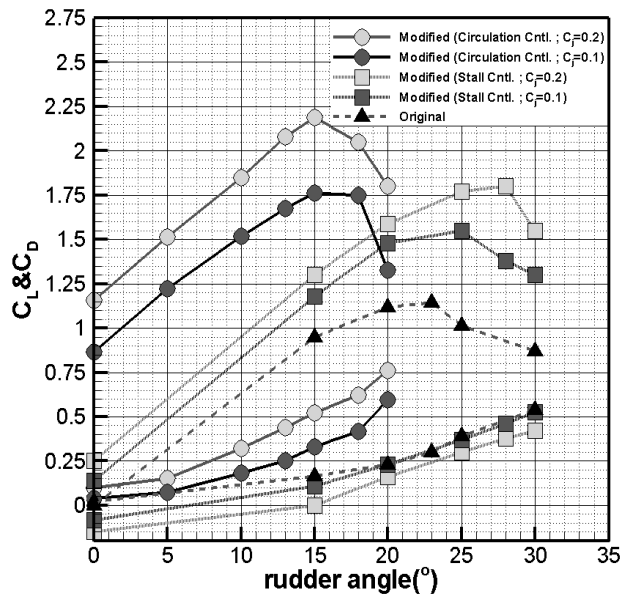


Fig. 17 Lift and drag coefficients of stall and circulation control rudders (model test,  $Re=3.9 \times 10^5$ )

## 4. 결론

본 연구에서는 고 양력 전 가동 관다 타를 설계하고 그 성능을 모형시험을 통하여 확인하였다.

그 과정에서 3차원 전 가동 타에 적합한 관다장치를 설계하기 위하여, 타의 양 항력성능에 관련된 주요 변수들의 영향을 수치적인 방법을 이용하여 조사하고, 그 결과를 바탕으로 설계된 전 가동 관다 타의 양 항력 특성을 모형시험을 통해 조사한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

수치해석 결과 2차원 날개 단면의 경우에는 실속제어형 관다 타 단면과 순환제어형 관다 타 단면 모두 양력이 크게 증가하여, 최대양력이 기준 타 단면(NACA0020) 대비 각각 약 110%와 125% 증가하였다. 2차원 실속제어형 타 단면에서는 제트노즐의 위치( $D_{slit}$ )가 0.2C에 위치하였을 때 실속을 가장 효과적으로 지연시킬 수 있는 것으로 나타났으며 순환제어형 타 단면의 경우에는 뒷날의 반경이 0.04C 이상이 되어야 순환과 양력이 효과적으로 증가하는 것으로 나타났다.

3차원 관다 타의 모형시험 결과 실속제어형 관다 타와 순환제

어형 관다 타의 양력성능은 제트 모멘텀 계수 0.1에서 기준 전 가동 타에 비해 각각 37%와 55%, 제트 모멘텀 계수 0.2에서는 57%와 92% 증가하는 것으로 나타났다. 실속제어형 관다 타의 경우에는 실속을 약 5°정도 지연시키는 효과가 있었으나 순환제어형 타의 경우에는 실속각은 오히려 기준 타의 23°에서 17°로 감소하는 경향을 보인다. 그러나 실속각 보다 더 낮은 타각에서 기준 타 최대 타력의 2배 이상 증가된 타력을 얻을 수 있으므로 고 양력 타의 실용화에 오히려 유리할 것으로 판단된다.

앞으로 관다 타의 실선 적용 가능성을 검토하기 위하여 실선 스케일에서의 수치계산, 구동부 및 스티어링 기어 설계, 펌프 용량 등의 산정 등과 같은 상세한 검토가 필요할 것으로 보인다.

## 후 기

이 논문은 인하대학교와 한국연구재단 (2007-0055774)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참 고 문 헌

Ahn, H.S. & Kim, H., 1999. Experimental Study on the Effects of Water Jetting on a Flapped Rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(1), pp.22-29.

Ahn, H.S., 2003. *An experimental study of the Coanda effect on flapped control surfaces*. Ph.D. Seoul: Seoul National University.

Gale, M.C., 1998. *Stop Abusing Bernoulli! -How Airplanes Really Fly*. Regenerative Press.

Joslin, R. & Jones, G., 2006. *Application of Circulation Control Technologies*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.

Keen, E.B., 2004. *A conceptual design methodology for predicting the aerodynamics of upper surface blowing on airfoils and wings*. Master thesis. Virginia Polytechnic Institute & State University.

Park, J.J. & Lee, S.H., 2000. A Numerical Study on a Circulation Control Foil using Coanda Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(2), pp.70-76.

Rhee, S.H. et al., 2003. Analysis of a Jet-controlled High-lift Hydrofoil with a Flap. *Journal of the Ocean Engineering*, 30(16), pp.2117-2136.

Seo, D.W. Kim, J.H. Kim, H. & Lee, S.H., 2008. Influence of Jet Nozzle Arrangement on the Performance of a Coanda Foil. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), pp.569-578.

Seo, D.W. Oh, J.K. & Lee, S.-H., 2010. A Study for Improvement of Lift Performance of a Horn-type Rudder with the Coanda Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp.543-552.

Seo, D.W. & Lee, S.-H., 2011. A Numerical Study for Design of a Fixed Type Fin Stabilizer Utilizing the Coanda Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.113-120.

Seo, D.W., 2011. *A study on the performance of a high lift marine rudder implementing the Coanda effect*. Ph.D. Incheon: Inha University.

