

트랜섬 선미 후방의 점성 유동장 Topology 관찰

김우전^{†*}, 박일룡^{**}

목포대학교 기계·선박해양공학부^{*}
한국해양연구원 해양운송시스템연구본부^{**}

Topological View of Viscous Flow behind Transom Stern

Wu-Joan Kim^{†*} and Il-Ryong Park^{**}

Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National Univ.^{*}
Marine Transportation Systems Laboratory, KRISO/KORDI^{**}

Abstract

Viscous flows behind transom stern are analyzed based on CFD simulation results. Stern wave pattern is often complicated due to the abrupt change of stern surface curvature and flow separation at transom. When a ship advances at high speed, whole transom stern is exposed out of water, resulting in the so-called 'dry transom'. However, in the moderate speed regime, stern wave development in conjunction of flow separation makes unstable wavy surface partially covering transom surface, i.e., the so-called 'wetted transom'. Transom wave formation is usually affecting the resistance characteristics of a ship, since the pressure contribution on transom surface as well as the wave-making resistance is changed. Flow modeling for 'wetted transom' is difficult, while the 'dry transom modeling' is often applied for the high-speed vessels. In the present study, CFD results from the RANS equation solver using a finite volume method with level-set treatment are utilized to assess the topology of transom flow pattern for a destroyer model (DTMB5415) and a container ship (KCS). It is found that transom flow patterns are quite different for the two ships, in conformity to the shape of submerged transom. Furthermore, the existence of free surface seems to alter the flow topology in case of KCS.

※Keywords: Viscous flow(점성유동), Transom stern(트랜섬 선미), CFD(계산유체역학), Flow Topology(유동 위상), Node(노드), Saddle(새들)

접수일: 2004년 11월 19일, 승인일: 2005년 5월 24일

†주저자, E-mail: kimwujoan@mokpo.ac.kr

Tel: 061-450-2766

1. 트랜섬 선미 후방유동의 특징

최근의 선박은 대부분 트랜섬 선미를 채택하고 있다. 이는 컨테이너 등의 화물 운송이나 해군의 작전능력의 관점에서 수면 위에 보다 많은 공간을 확보하는 것이 중요하며, 또한 건조의 측면에서도 유리하기 때문에 현대적인 선박은 대부분 트랜섬 선미를 채택하고 있다.

상선의 경우, 트랜섬 선미의 하단은 대부분 설계 수선(designed load waterline, DLWL) 근처에 위치하며, 정지 중에는 수면 위로 노출되어 있다 하더라도 항주 중에는 통상 선미를 따라서 상승하는 파도에 의해서 물 속에 잠기는 특징을 가지고 있다. 트랜섬 선미 끝단의 형태가 물의 흐름(유동)의 관점에서는 갑작스러운 곡률의 변화로 느껴지기 때문에 트랜섬 끝단에서 유동 박리(flow separation)가 발생하며, 이로 인하여 트랜섬 후방의 자유수면에서 발생하는 선미파의 모양이 매우 복잡하고 불안정한 형태를 보이는 것이 보통이다 (Yamano et al. 2000).

이러한 선미파의 특징은 선미의 형상과 물에 잠긴 깊이, 그리고 배의 전진속도 등의 몇 가지 변수에 따라 여러 가지의 형태로 나타난다. 배의 속도가 빨라지면 Fig. 1의 위 그림과 같이 유동이 선미의 끝단 곡률을 잘 따라가며, 트랜섬이 공기

중에 완전히 노출되는 이른 바, 'dry transom'을 형성하고, 선미 후방에 수탉의 꼬리(rooster tail)와 같은 형태의 삼각파가 생기지만, 속도가 낮으면, Fig. 1의 아래 그림처럼 선미 끝단이 물에 잠기는 소위 'wetted transom'을 형성하며, 그 후방에 불안정한 백파(white wave)가 나타난다.

이러한 트랜섬 후방의 파도는 선미파의 형성에 중요한 역할을 하기 때문에 조파저항에 영향을 끼치며, 또한 수면의 높이에 따라 배의 전진 방향으로 작용하는 트랜섬 끝단면에서의 압력 기여분이 크게 달라지므로 선박의 저항성능에 선미파의 형상과 높이가 매우 중요한 인자로 작용한다.

본 연구에서는 계산유체역학(CFD) 기법을 활용하여 트랜섬 선미 근처에서의 자유수면을 포함한 점성 유동장을 계산하고, 유동의 topology를 해석함으로써 'wetted transom' 상태의 모델링을 위한 유동의 기본 특징을 파악하고자 하였다.

2. 점성 유동장 계산방법과 검증

자유수면을 포함한 점성유동장의 해석을 위해 WAVIS 코드(김우전 등 2000, Kim et al. 2002)와 level-set 방법(박일룡 등 2004)을 이용하여 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식의 해를 자유수면의 형상과 함께 구하였다. 자세한 내용은 참고문헌에 이미 정리되어 있기 때문에 여기서는 트랜섬 유동해석을 수행한 미국 해군의 항정 모형인 DTMB5415와 KRISO 3600TEU 컨테이너선(KCS)에 대한 선미 파형 계산결과를 실험값과 비교함으로써 그 정도에 대한 검증을 보이고자 한다.

트랜섬 후방의 유동은 박리를 동반하고 있기 때문에 난류 유동장 계산에서 흔히 사용되는 벽함수(wall function) 중에서 Prandtl type 일반 벽함수(White 1974)를 사용하는 경우에는 벽면에서의 마찰응력이 너무 작아져서 벽함수의 분모가 0이 되는 특이 현상(singular behavior)이 발생하여 수치 계산을 수행할 수 없다. 하지만 현재 공학적으로 가장 널리 사용되고 있는 Launder와 Spalding 벽함수 경우(Launder and Spalding 1974)에는 마찰응력 대신에 벽 근처에서의 난류의 운동에너지를

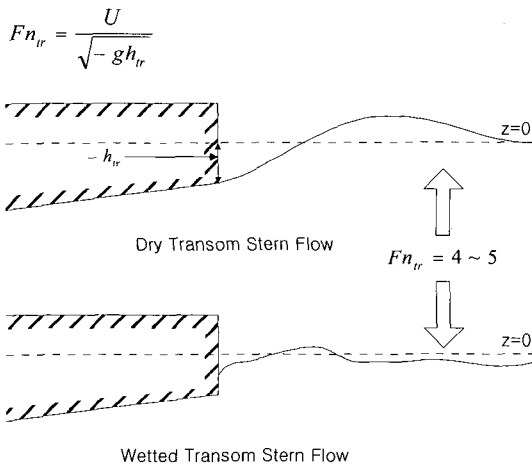


Fig. 1 Typical flow pattern behind a transom

사용하기 때문에 이러한 특이현상을 피할 수 있다.

박리를 동반하는 유동의 경우 벽함수의 유용성에 대한 의문이 제기 될 수 있으나, 본 연구는 전체적인 유동 현상에 주목하고 있으며, Launder 와 Spalding 벽함수를 사용하더라도 전체적인 유동 현상은 비교적 정확하게 계산 된다는 것이 WAVIS 코드의 사용을 통하여 얻어진 결론이다. 트랜섬 후방의 격자계 간격은 벽함수를 사용하는 경우에 통상적으로 사용되는 격자계의 간격을 유지 하였다.

Fig.2 에는 DTMB5415 모형의 형상을 보이고

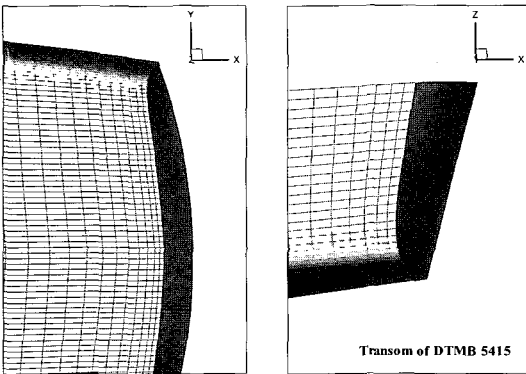


Fig. 2 Transom shape of DTMB5415

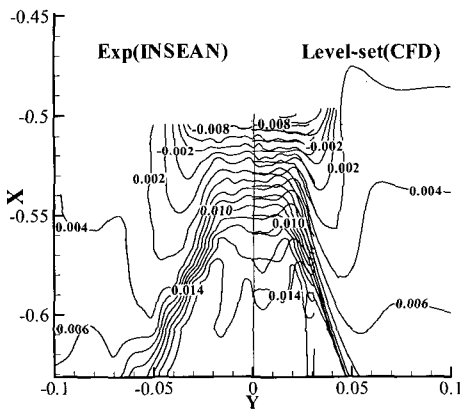


Fig. 3 Comparison of CFD results with experiment (INSEAN) for the transom wave pattern of the DTMB 5415 model ship

있으며, Fig. 3 에는 트랜섬 후방 선미파에 대한 계산결과를 INSEAN 의 실험값(Olivieri et al. 2001) 과 비교하였다.

현재 미국의 주력 구축함인 Aleighburke class 에 대한 유동연구 모형선인 DTMB5415 는 트랜섬 이 단순한 평면이 아니라 아래쪽 끝단이 후방으로 밀려나오며 중앙선 쪽이 부풀어 있는 형상을 가지고 있다. 모형선의 수선간 길이를 기준으로 한 Froude Number(Fn) 는 0.28 이며, 정수중 트랜섬 의 수면 깊이를 기준으로 한 transom Fn 는 4.04 이다.

Fig. 4 와 Fig. 5 는 KCS 의 형상과 선미파에 대한 계산결과와 실험값(Kim et al. 2001)을 보이고

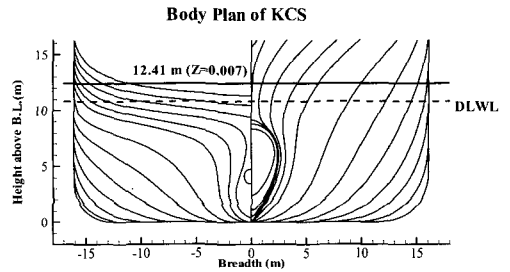


Fig. 4 Body plan of KRISO 3600TEU Container Ship(KCS)

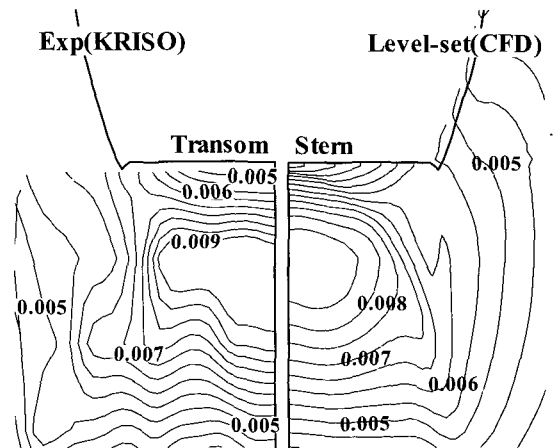


Fig. 5 Comparison of CFD results with experiment (KRISO) for the transom wave pattern of the KCS model ship

있다. KCS 의 경우, 정지상태에서는 트랜섬이 수면위로 노출되어 있으나, 항주중에 발생하는 선미 파가 트랜섬 끝단 위로 상승하여 트랜섬이 잠기는 형태이다. 그러므로 트랜섬 선미 끝단의 수면 깊이를 기준으로 하는 transom Fn는 정의하기 어렵다. 이러한 경우 최종 항주 상태에서의 수면 높이로부터 산정해야 하지만 이는 계측이나 수치계산의 결과로 얻어지기 때문에 미리 정량적인 값을 알 수 없다.

위의 두 계산 결과에서 볼 수 있듯이 WAVIS 코드와 level-set 방법을 이용한 수치계산 결과는 정량적으로도 실험값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이런 수치 계산 결과는 실험에 비하여 상당히 자세한 유동정보를 제공하기 때문에 이를 바탕으로 유동박리를 포함하는 트랜섬 선미 후방의 복잡한 자유수면 유동에 대한 특징을 살펴보기로 하였다. 특히 두 선형이 트랜섬의 모양이 차이가 있을 뿐 아니라 트랜섬의 잠긴 깊이에 따른 transom Fn 또한 다르기 때문에 두 선형의 트랜섬 유동 형상정보를 해석함으로써 향후 트랜섬 유동 모델링을 위한 정보를 얻고자 하였다. 다음 절에는 두 선형에 대한 수치계산 결과를 바탕으로 트랜섬 유동의 topological rule을 살펴보았다.

3. 트랜섬 선미 유동장 해석

3.1 DTMB5415의 트랜섬 선미 유동장

DTMB5415 모형선의 Fn=0.28의 경우에 대한 트랜섬 선미 후방 자유수면 위에서의 유선을 도시하면, Fig. 6에 보인 바와 같이 선미 끝단에서 발생한 유동박리 현상으로 인하여 커다란 유동의 회전영역이 생겨나며, X=0.525 근처에서 좌우 유동장이 합쳐져 다시 갈라지는 Saddle point(S)가 형성되고, 중심선을 따라 트랜섬 쪽으로 역류하여 트랜섬 중앙에 Half Saddle point(S')가 생겨나는 것을 알 수 있다. 또한 트랜섬 양쪽 끝에서 발생한 유동박리로 인하여 Spiral node(N)가 양쪽에 각각 한 개 씩 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 이 경우에 두 개의 Node와 각각 한 개의 Saddle과 Half Saddle point가 형성되기 때문에 topological rule(Tobak and Peake 1982, Wang

1982)은 다음과 같다.

On the wavy surface of DTMB5415

$$N - (S + \frac{1}{2}S') = 1/2 \quad (1)$$

한편 선체 중심면에서의 유동은 Fig. 7과 같이 Z=0.0055에서 위에서 언급한 Saddle point가 형성되나, 이 경우에는 수면 위의 유동이 무시되기 때문에 Half Saddle point(S')의 형태가 된다. 박리로 인하여 역시 Spiral node(N)가 생겨나고, 수면을 따라 역류하여 트랜섬에 부딪히는 유동으로 Quarter Saddle point(S'')가 형성됨을 알 수 있다.

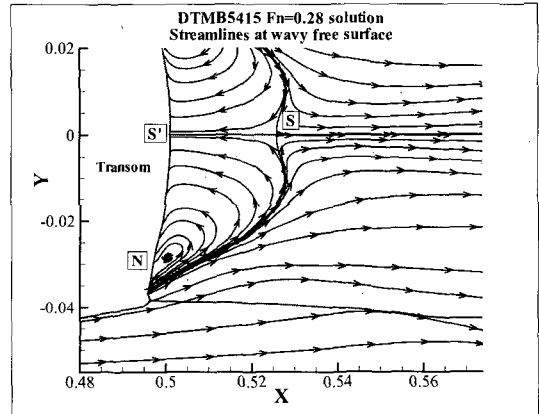


Fig. 6 Streamline pattern on wavy surface behind transom of DTMB5415 (Fn=0.28)

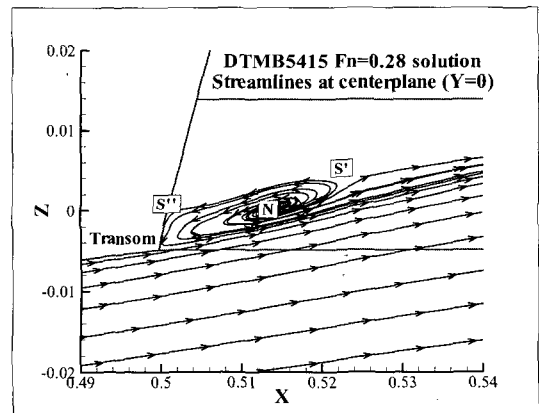


Fig. 7 Streamline pattern at centerplane behind transom of DTMB5415 (Fn=0.28)

선체 중심면에서의 유동 특이점 사이의 관계는 다음과 같이 생각할 수 있다.

On the centerplane of DTMB5415

$$N-(S+\frac{1}{2}S'+\frac{1}{2}S'')=1/4 \quad (2)$$

자유수면의 효과를 배제하고 유동현상을 고찰해 보기 위해 자유수면을 대칭면으로 산정하여 수행한 계산결과를 Fig. 8 과 9 에 보이고 있다. 이 경우에 대칭조건을 자유수면상의 Saddle point(S)의 위치인 $Z=0.0055$ 에서 만족시켰다. 대칭조건이 주어진 자유수면에서의 유동 패턴은 자유수면 경계조건이 주어진 경우와 유사한 형태를 가지며, (3)식에 보인 바와 같이 (1)식과 동일한 topological rule 을 가진다. 이는 DTMB5415의 경우, 트랜섬의 형상이 사각형에 가깝고, 트랜섬이 초기부터 수면 하에 위치해 있다는 점을 생각해 볼 때, 유동패턴의 뚜렷한 차이를 발견하기는 어려웠다. 마찬가지로 선체 중심면에서의 유동 패턴 역시 Fig. 9 에서 보이고 있는 바와 같이 자유수면 경계조건이 주어진 경우와 크게 다르지 않음을 확인하였다.

On the symmetry plane of DTMB5415

$$N-(S+\frac{1}{2}S')=1/2 \quad (3)$$

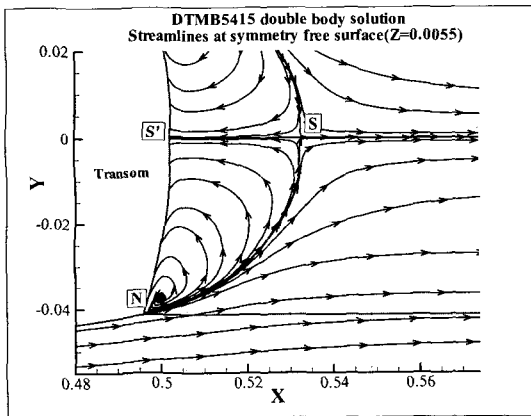


Fig. 8 Streamline pattern on symmetry plane behind transom of DTMB5415 (symmetry condition at $Z=0.0055$)

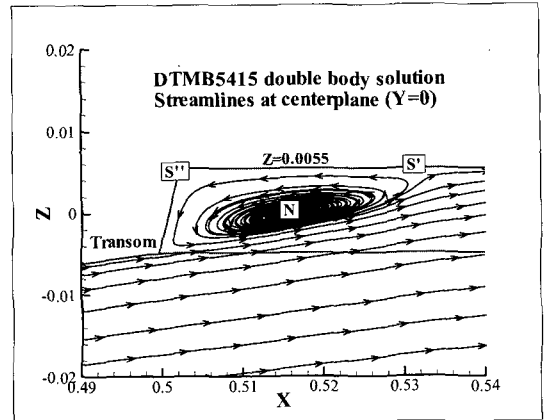


Fig. 9 Streamline pattern at centerplane behind transom of DTMB5415 (symmetry condition at $Z=0.0055$)

3.2 KCS의 트랜섬 선미 유동장

컨테이너선(KCS)의 경우에는 앞 절의 구축함 모형과는 달리 트랜섬의 형태가 원호에 가깝고, 트랜섬의 잠긴 모양이 마치 과일을 껍을 칼처럼 생겨서 유동 박리점이 불분명할 뿐만 아니라 박리 영역의 중심에 존재하는 Spiral node(N)를 찾기 어렵다. Fig. 10 에서는 $Fn=0.26$ 의 경우에 대한 자유수면위에서의 유동패턴을 보이고 있다. 수치 계산은 항주중의 자세변화를 고려하지 않았으며, 선미파의 상승으로 인하여 트랜섬의 일부가 잠기는 현상 때문에 발생한 트랜섬 선미 후방의 유동장을 도시하였다.

앞 절의 경우와는 달리 $X=0.537$ 에서 Source 형태의 Node(N)가 생겨났으며, 이 Node에서 시작된 역류가 트랜섬의 끝단 가까이 중앙에서 Half Saddle point(S')를 형성하여 양쪽으로 갈라지고, 가운데 쪽으로 올라오는 유동과 합쳐지면서 양쪽에 각각 1 개씩의 Half Saddle point(S')를 형성함을 관찰할 수 있다.

Fig. 6 과 Fig. 10의 유동패턴 차이는 트랜섬 양쪽이 KCS의 경우(Fig. 10)에는 약간만 잠기면서 뚜렷한 박리 현상을 보이지 않고, 중앙부에서만 박리영역이 제대로 형성되는 이유에 기인하는 것으로 보인다. 이 경우에 대한 topological rule 은 한 개의 Node 와 세 개의 Half Saddle 이 형성되기 때문에 다음 (4)식으로 표현된다.

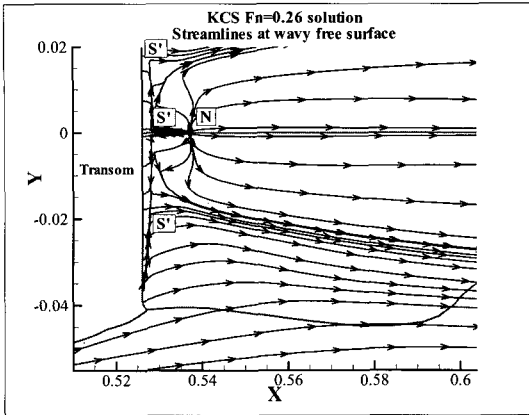


Fig. 10 Streamline pattern on wavy surface behind transom of KCS (Fn=0.26)

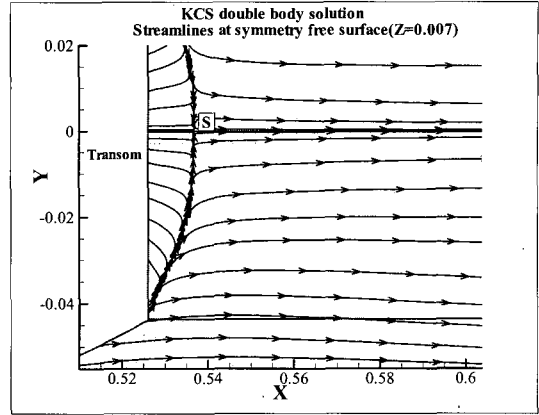


Fig. 12 Streamline pattern on symmetry plane behind transom of KCS (symmetry condition at Z=0.007)

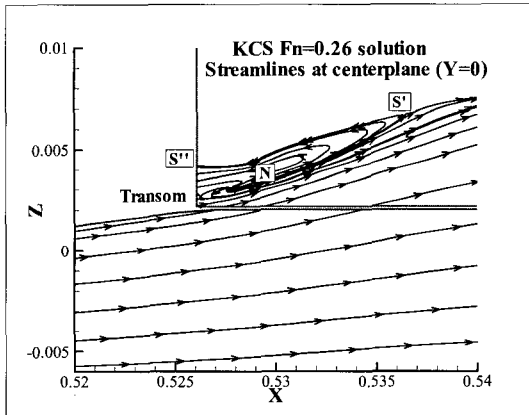


Fig. 11 Streamline pattern at centerplane behind transom of KCS (Fn=0.26)

On the wavy surface of KCS

$$N-(S+\frac{1}{2}S')=-1/2 \tag{4}$$

선체 중앙면에서의 유동패턴을 보면, Fig. 11 에서 보인 바와 같이 Z=0.007 에서 Fig. 10 의 Node 위치에 Half Saddle(S')이 뚜렷하다. 하지만, 역류가 트랜섬을 향하며 Spiral Node(N)가 박리에 의한 회전으로 인하여 형성되어야 하나, 박리 현상이 상대적으로 약하여 매우 희미하며, 트랜섬 끝면에서의 Quarter Saddle(S'')도 뚜렷하지 않다. 하지만 유동의 topology 를 고려한다면 Fig. 11 에 표시한대로 Spiral Node 와 Quarter Saddle 이 존

재한다고 보는 것이 옳을 것이다. 즉, Fig. 11 의 topological rule 은 앞 절과 같은 형태를 가지는 것으로 보인다.

On the centerplane of KCS

$$N-(S+\frac{1}{2}S'+\frac{1}{2}S'')=1/4 \tag{5}$$

한편, 자유수면 조건 대신에 대칭조건을 Fig. 11 의 Half Saddle point 의 위치인 Z=0.007 에 적용하였다. 이 경우의 계산 결과를 보면, Fig. 12 와 같이 하나의 유동 수렴선이 존재하는 것을 볼 수 있고 그 중앙에 Saddle point(S) 하나만이 관찰되는데, 이는 양쪽에서 생겨나야 하는 유동박리 영역이 매우 작아 뚜렷한 Spiral Node(N)를 보여주지 못하고 유동 박리영역의 경계를 따라 수렴선(line of convergence)이 형성되기 때문이다. Fig. 12 의 유동현상은 자유수면이 존재하는 경우인 Fig. 10 의 유동현상과는 확실히 구분되며, 박리로 인한 Spiral Node 의 흔적은 뚜렷하지 않지만 Fig. 6 이나 Fig. 8 과 비슷하다고 할 수 있다. 이는 상대적으로 트랜섬의 잠긴 영역의 깊이가 Fig. 10 의 경우보다 약간 깊기 때문으로 생각된다.

On the symmetry plane of KCS

$$N-(S+\frac{1}{2}S')=-1 \tag{6}$$

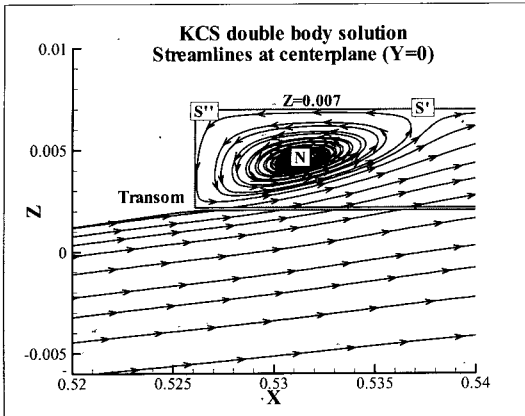


Fig. 13 Streamline pattern at centerplane behind transom of KCS (symmetry condition at $Z=0.007$)

Fig. 13에서는 선체 중심면에서의 유선을 보이고 있다. 선체 중심면에서의 트랜섬의 수면아래 깊이가 충분하기 때문에 Fig. 9의 형태와 별반 차이를 보이지 않는다.

KCS의 계산의 결과에서 수면에 대칭 조건을 부여한 경우와 자유수면 경계조건을 부여한 경우의 유동 형상이 다르게 나타나는 이유는 먼저 대칭 조건이 주어진 경우, 수면에 경사가 없기 때문에 박리 영역이 구(球)의 일부분을 초승달 모양으로 잘라낸 형상의 특이성 박리(singular separation), 또는 2차원적인 박리 현상처럼 나타난다. 하지만 자유수면 경계조건이 주어진 경우에는 수면의 경사로 인하여 선미 끝단의 잠긴 부분이 상대적으로 작게 되고 이로 인하여 박리의 형태가 정상적 박리(ordinary separation), 또는 3차원적인 박리 현상을 보인다.

이러한 유동 특성의 차이는 선미 후방의 유동 현상에 기인하는 저항 성분의 변화로 나타날 것이며, 이를 미리 고려한 선미 끝단 설계가 이루어질 수 있다면 저항성능 개선에도 크게 활용될 수 있다고 생각된다.

또한 DTMB5415의 선미 유동의 경우와 KCS의 경우의 차이는 잠긴 트랜섬의 모양이 크게 차이가 나는데, 트랜섬의 폭과 깊이의 비와 트랜섬의 양끝 현측에서의 각도 등의 차이에 기인한다고 할 수 있겠다. 이는 transom F_n 와 더불어 트랜섬

선미 후방의 유동 형상을 결정하는 설계 인자로 작용한다고 생각된다.

하지만 지금까지의 계산 결과를 바탕으로 실제 설계에 활용할 수 있는 설계 변수와 선미유동 및 저항 특성과의 관계를 규명하는 것은 선부른 감이 있으며, 본 연구를 통하여 파악된 설계 변수의 변환을 통하여 다양한 트랜섬 선미 형상을 생성한 후 체계적인 수치계산과 실험을 통하여 구체적으로 활용할 수 있는 데이터를 제공하는 연구가 계속 되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

트랜섬 선미 후방에서 생기는 유동박리와 선미 파의 형성에 기인한 유동패턴에 대하여 고찰해 보았다. 계산유체역학(CFD) 기법을 활용하여 얻어진 유동정보를 바탕으로 자유수면과 선체 중심면에서 유동의 topological rule을 파악하고자 하였다.

상선이나 항정의 통상적인 운항상태에 해당하는 중간정도의 F_n 에서 발생하는 컨테이너선(KCS)과 구축함 모형(DTMB5415)의 'wetted transom' 상황과 자유수면의 효과가 무시된 대칭조건 상황에서의 유동결과를 각각 비교하였다.

DTMB5415의 경우에는 정지상태의 transom F_n 가 4 정도로 큰 편이며, 트랜섬의 형태 또한 상자형에 가깝기 때문에 확실한 유동박리의 흔적이 자유수면에 남아 있다. 하지만, KCS의 경우에는 트랜섬이 칼 모양이고, 정수중 노출되어 있는 트랜섬이 항주중 발생하는 선미파의 상승으로 인하여 약간 잠겨서 트랜섬 효과가 나타나기 때문에 자유수면에서 나타나는 유선의 형태가 확연히 달랐다. 이러한 차이는 우선 트랜섬이 잠기는 깊이에 관계되는 것은 물론, 트랜섬 선미의 잠긴 형상에 따라서 크게 달라진다고 생각된다.

수치계산 결과를 바탕으로 트랜섬 후방 자유수면 유동의 topological rule을 파악한 결과, 본 연구에서 살펴본 모든 경우에 선체 중심선에서는 2차원적인 유동 박리가 확연히 드러나며 같은 topological rule을 가지고 있으나, 자유수면에서는 트랜섬의 깊이와 형태에 따라서, 그리고 자유수면의 존재에 따라서 확연히 다른 모양을 가짐을

확인 하였다.

후 기

이 논문내용의 일부는 2003 년도 한국학술진흥 재단의 지원(KRF-2003-003-D00566)에 의하여 수행된 연구의 결과임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 김우전, 김도현, 반석호, 2000, “유한체적법을 이용한 상선주위의 난류유동 계산에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 4 호, pp. 19-30.
- 박일룡, 김진, 반석호, 2004, “Level-Set 법을 이용한 일반상선의 저항성능 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 63-73.
- Kim, W.J., Van, S.H. and Kim, D.H., 2001, “Measurement of flows around modern commercial ship models,” Experiments in Fluids, Vol. 31, No. 5, pp. 567-578.
- Kim, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2002, “Computational study on turbulent flows around modern tanker hull forms,” Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 38, No. 4, pp. 377-406.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows,"

- Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289.
- Olivieri, A., Pistani, F., Avanzini, G., Stern, F. and Penna, R., 2001, Tank experiments of resistance, sinkage and trim, boundary layer, wake and free surface flow around a naval combatant INSEAN 2340 Model, IIHR Report, No. 421.
- Tobak, M. and Peake, S.J., 1982, "Topology of three-dimensional separated flows," Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 14, pp. 61-85.
- Wang, K.C., 1982, "New developments about open separation," AE&EM TR-82-02.
- White, F.M., 1974, Viscous fluid flow, McGraw Hill.
- Yamano, T., Ikebuchi, T. and Funeno, I., 2000, "On forward-oriented wave breaking just behind a transom stern," J. SNAJ, Vol. 187, pp. 25-32.



< 김 우 전 >



< 박 일 룡 >