

선체운동의 이론적 추정법에 대하여

염 덕 준*

1. 서 언

대양을 항해하는 선박은 수시로 변화하면서 때로는 광폭한 바다라는 자연환경속에서 운항하도록 설계되어진다. 이러한 환경속에서의 선박의 운동과 선체구조에 미치는 유체력의 정확한 추정은 매우 중요하며 특히 고속 정기 화물선이나 거대한 유조선 그리고 특수한 임무가 주어지는 작업선등에 있어서 더욱 그러하다. 선박에 있어서의 내항성의 역사를 간단히 살펴보면, Froude[1]와 Krylov[2]가 처음에 선박의 관성력(inertia force)와 복원력만을 고려하여 문제를 정의하였다. 이때 선체가 존재 하므로서 야기되는 유체동력학적 교란은 고려되지 않았고 단지 현재 Froude-Krylov의 힘으로 불리는 힘 즉, 입사파에 의해 형성되는 유체력의 적분항이 고려되었다. 선박 유체동력학 문제에 있어서 유체동력학적 교란이 처음 고려하기 시작된 것은 Michell[3]에 의해서였다. 그 후 Lewis[4], Haskind[5], Peters and Stoker[6], Newman[7], Ursell[8], Newman[9], Joosen[10], Newman과 Tuck[11] 그리고 Maruo[12] 등에 의해 thin ship theory, strip theory 그리고 slender body theory 등의 새로운 이론들의 기본적 개념이 전개되고 발전되었다.

Strip theory를 이용하여 처음으로 실용성있는 선체운동 이론이 발표된 것은 Korvin-Kroukovsky and Jacobs[13]에 의해서였다. 체계적인 이론적 근거 보다는 물리적인 직관에 근거하였다 하여 초기에는 인정받지 못하였지만 실험 결과와 비교적 좋은 일치율을 보여주고 있고 지금은 O.S.M. (Ordinary Strip Method)로서 널리 알려져 있다. Korvin-Kroukovsky와 Jacobs의 이론에 선체의 전진 속도의 영향을 체계적으로 고려함에 의해 수정, 발전된 선체운동 이론이 Tasai와 Takaki[14]와 Salvesen et al[15]에 의해 거의 동시에 전개됨으로서 선체운동의 추정정도가 비약적으로 향상되었다. 상기한 양자에 의해 발표된 방법은 다수의 선체운동관계 논문에서 각각 N.S.M. (New Strip

Method)와 S.T.F.M. (Salvesen-Tuck-Faltinsen Method)이라고 불린다. 제15차 ITTC 이후 수차례 국제적인 공동 연구로서 수행된 계산 결과들 간의 비교와 선체 모형 시험과의 비교를 통하여 전술한 strip method들의 추정정도가 確認되었다[16]~[18]. 그 결과 첫째, 사추파중에서의 선수요와 횡요에 대해서는 개량의 여지가 있지만 선체 운동 전반에 대해서는 실용상 충분한 정도로 추정이 가능하다는 점과 둘째, 사추파중에서의 파랑하중의 추정에 있어서 계산시간의 또는 실험 결과와의 차이가 크게 나타나고 있다는 점 등이 밝혀졌고, Maruo[20], Mizoguchi[21], Takezawa[22], Kobayashi[23], Shinkai[24] 등에 의해 strip method의 추정정도 향상을 위한 연구가 진행되어 실험치와의 비교에 있어서 좋은 결과를 보여주고 있다.

Strip method에 의한 선체운동 추정이 절대적인 가정에 의해 유효한 주파수 영역이 고주파수로 제한되는 제약을 해결하기 위해 Newman[25], Newman-Sclavounos[26], Troesch[27]와 Matsunaga와 Maruo[28] 등은 보다 넓은 주파수 영역에서 모순이 없고 전술한 바와 같은 strip method의 문제를 해결하기 위한 slender body theory를 개발, 발전시키고 있으며 또한 전자계산기의 능력 향상에 수반하여 선체표면을 많은 면요소로 분할하여 그 각 요소간의 간섭을 완전히 고려한 3차원 특이점 분포법도 개발되었다(Chang[29], Inglis와 Price[30][31], Kobayashi[33]).

본 해설에서는 선체운동 추정에 실용적으로 많이 쓰이고 있는 strip method에 대해서 서술함과 동시에 제17차, 18차 ITTC Proceeding[18][19]으로부터 선형이론에 근거한 선체운동 추정에 대한 최근의 연구동향을 간략히 소개한다.

2. Strip Method

2.1. Strip method의 이해

입사파와의 조우하는 주파수가 ω_r 로 6자유도 운동을 하는 선박의 운동방정식은 다음식과 같이 쓸 수 있

다[14].

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\xi_k + B_{jk}\zeta_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, \quad j=1,6 \quad (1)$$

여기서 M_{jk} 는 선체의 질량과 관성모멘트를 나타내고 A_{jk} 는 부가질량계수와 부가관성모멘트를, B_{jk} 는 조파감쇠계수, C_{jk} 는 정적 복원력계수를 나타낸다. 파랑 강제력은 $F_j e^{i\omega t}$ 의 실수항으로 나타난다. $\xi_k, k=1,6$ 는 6자유도 운동을 나타내며 ζ_k 와 ξ_k 는 각각 선체운동의 속도와 가속도를 표시한다. 좌우대칭인 선박의 경우에는 (1)식의 미분방정식은 종동요-전후동요-상하동요 연성인 연립 미분방정식과 좌우동요-횡동요-선수동요 연성인 연립 미분방정식으로 분리된다. 동요의 진폭이 작고 입사파의 진폭이 파장에 비해서 작다는 가정하에서 좌편의 유체동력학 계수들은 6자유도 운동을 하면서 전진하는 선체에 작용하는 힘을 구함에 의해 얻어지며 우편의 계수들은 운동이 구속된 선체에 입사파에 의해 작용하는 파랑기진력에 의해 얻어진다.

우선, 평수층을 상하동요 하면서 전진하는 선체주위의 유체운동을 고려한다. 상하동요에 의한 수면의 교란을 수면으로부터 충분히 떨어진 위에서 보면 선체가 상하동요 하는 것에 의해 주위의 물을 배제하듯이 흡인하고 있다. 이것은 일정속도를 갖고 주기적으로 그 세기가 변하는 source에 의한 수면의 교란으로 간주할 수 있다. 여기서 만들어지는 파형은 측대칭의 진동파를 발생시키고 확산하면서 전진하여 새로운 파형을 형성하여 간다. 선체가 동일한 단면 형상을 갖고, 선장이 무한히 긴 것으로 하면 전체 단면에 걸쳐서 위상이 같고 크기도 같은 파가 발생하기 때문에 선체로부터 發生하는 波는 확실히 선체 횡단면에서 자른 2차원 평면의 것으로 된다. 여기서 선체의 길이가 유한하다고 해도 발생파의 파장이 선장에 비해 충분히 짧고, 선형의 길이 방향의 변화가 작을 때에는 선체 근방의 파의 모습은 선체 횡단면에서 자른 2차원 평면의 것으로 생각할 수 있으며 좌우대칭이 된다. 또 종동요에 대해서도 상하동요의 경우와 같이 고려할 수 있다. 다음에 선체의 좌우동요에 의한 수면의 교란을 충분히 떨어진 점에서 보면 한쪽의 선측에서는 물을 밀어내고 다른 한쪽의 선측에서는 물을 흡인하고 있다. 이것은 일정한 속도를 갖고 있으며 주기적으로 그 세기가 변하는 횡방향의 doublet에 의한 수면의 교란으로 간주할 수 있다. 여기서 생성된 파형은 좌우현에서 반대칭의 진동파를 발생하고 확산하면서 전진하여 새로운 파형을 형성하여 간다. 상하동요의 경우와 같이 발생된 파의

파장이 선장에 비해 충분히 짧고, 선형의 선체길이 방향의 변화가 작을 때에는 선체근방의 파의 모양은 선체 횡단면에서 자른 2차원 평면의 것으로 생각할 수가 있다. 또한, 선수동요나 횡동요에 대해서도 좌우동요와 동일하게 고려할 수 있다.

다음에는 파도 중에서 구속된 선체주위의 유체장의 문제에 대해서 고려해 본다. 이때 선체에 작용하는 유체력을 파랑강제력이라 하고 다음 2개의 성분으로 나눌 수가 있다. 우선, 입사하는 파의 입자의 운동에 의해 유체장의 압력이 변하고 그 크기는 수심 방향으로 지수 함수에 따라 감소한다. 선체가 없다고 가정하고 이 압력을 선체 표면에 대해 적분하여 얻은 힘을 Froude-Krylov의 힘이라고 부른다. 또 선체에 입사파가 부딪히던 파를 반사하게 되는데 이때 선체에 의해 교란된 반사파에 의해 선체에 작용하는 유체력을 diffraction force라고 한다. diffraction force에 대해서는 radiation 문제의 경우와 같고 반사파의 파장이 선체길이에 비해 충분히 짧고 선형의 길이 방향의 변화가 작을 때에는 이 반사파는 선체 근방에서는 선체 횡단면에서 자른 2차원 평면의 것으로 생각할 수 있다. 지금까지의 기술에서 나타난 것과 같이 2차원 물체가 동요할 때의 유체력과 파도가 선체 각 횡단면에 부딪힐 때의 유체력이 얻어지면 전체 선체의 동요 문제를 풀 수가 있다. 이와 같이하여 3차원 형상의 가늘고 긴 선체주위의 유체장을 선체 횡단면에서 자른 2차원 평면에 대한 유체장의 문제로 치환하는 방법에 의한 이론적 해법을 strip method라고 한다.

2.2. 2차원 단면에 작용하는 유체력

전절에서 설명된 바와 같이 strip method에 의해서 선체운동의 추정을 효과적으로 수행하기 위해서는 선체 횡단면의 동요에 의해 형성되는 유체장의 문제를 효과적으로 구할 필요가 있다. 가장 많이 사용되고 있는 2가지 방법은 다음과 같다.

1) Multi-Pole Expansion Method

Ursell[34]은 중심축이 정수면에 있는 원주의 동요에 대해서 그 유체력을 구하는 방법을 유도하였다. 그 후에 Tasai[35]는 아태식에 나타난 것처럼 좌우대칭인 선체 단면 형상을 원으로 사상하는 것에 의해 Ursell의 방법을 확장하였다.

$$w/R = \zeta + \sum_{n=1}^{n=N} a_{2n-1} \zeta^{-(2n-1)} \quad (2)$$

여기서, w : 선체횡단면의 복소좌표
 ζ : 원의 사상평면의 복소좌표
 R : 수축비

a_{2n-1} : 사상 계수

a_1 과 a_3 의 2개의 계수로서 얻어진 형상을 Lewis form 이라 하고 단면의 면적계수와 폭-흘수비를 주는 것에 의해서 a_1 과 a_3 를 결정할 수 있다. 이 형상은 선체 단면의 형상과 잘 닮아 있고, 유체력에 대한 계산 결과도 충분한 정도를 보여주기 때문에 strip method에서는 대체로 이 방법이 많이 쓰인다.

선수부의 대단히 큰 bulb형상과 선미 형상등 Lewis form으로의 근사가 곤란한 단면에 대해서는 적당한 방법으로 변형시켜 Lewis form을 알맞게 맞추는 것이 수행되기도 한다. 즉, 단면적이나 흘수 또는 폭중의 하나를 고정시키고 나머지는 변화를 준다. 실제 선체운동의 계산에 쓰일 때에는 파장과 선속의 변화에 따라 진술의 방법에 따라서 2차원 단면에서의 유체동력학적 계수들을 직접 계산하는 방법과 미리 적당한 단면 계수 및 파장에 대해 계산을 하여 보관해 두고 필요한 단면 및 파장에 대해 내삽법에 의해 유체동력학적 계수를 구하는 방법이 있다. 때때로 횡단면 형상의 큰 차이가 유체력 계산 결과에 큰 영향을 주는 경우에는 다음에 표시한 방법도 많이 이용되고 있다.

2) 특이점 분포법

횡단면 형상의 경계면에 많은 특이점을 분포시키고 각 점에서 선체 표면 경계조건을 만족하도록 특이점의 세기를 구한다. 이 방법을 이용하면 임의의 복잡한 횡단면 형상에 대하여도 정도가 높은 유체력을 구할 수가 있다. 그러나 이 방법에서는 irregular frequency라고 불리는 각속도에서 유체동력학적 계수들이 발산하는 것을 보여주고 있으며, Ursell[36], Ohmatsu[37], Ogilvie와 Shin[38] 등이 이 현상을 제거할 수 있는 방법들을 제시하였다.

파가 2차원 물체에 부딪힐때의 유체력인 diffraction force는 위에 서술한 방법들을 이용하여 radiation 문제를 풀면 Haskind 관계로부터 쉽게 구할 수가 있다.

2.3. Strip method의 이용

Strip method에 의하여 선체 운동 및 파랑하중의 규칙 파중에서의 특성이 얻어진다면 이를 토대로 주어질 불규칙 파중에서의 선체 운동 및 하중의 단기 예측이 가능하게 된다. 이 단기 예측 결과와 선박의 항로에 따른 해상 상태의 장기 발생빈도 자료로부터 선체 응답의 장기 예측을 행할 수가 있다.

선체에 작용하는 종굽힘 moment, 전단력, 비틀림 moment 등 파랑하중은 선체구조 설계시 중요한 입력 자료이며, 선체 운동으로부터 임의의 점에 있어서의 수평 및 수직 가속도를 계산하여 탑재 화물의 안정성,

탑재 기기의 성능, 항해 한계 등을 검토할 수 있다. 또한 선체와 수면과의 상대 운동을 계산하여 건현 높이, 해수유입도, 상갑판 의장품 설치 강도, propeller racing과 항해 한계 검토에 사용한다.

상대 수위 변동으로부터 상대속도를 구하면 slamming 현상과 선수 흘수등의 검토에 이용될 수 있다. 선체 운동을 토대로 파랑중 저항 증가를 구하면 항해시 파도에 기인한 sea margine의 추정, 항로 선정, 운항 채산성 검토등에도 이용할 수 있다.

3. Strip Method에 대한 ITTC의 비교 연구

파랑중에서의 선체운동에 관한 이론적 계산법으로서 strip method는 현재 실용적으로 확립되어 있고 이 이론에 기초한 계산 program은 조선소를 비롯하여 대학 및 연구기관에서 개발되어, 선박 설계와 연구개발등 여러 용도로 널리 쓰이고 있다. 계산법으로는 O.S.M., N.S.M., S.T.F.M. 등 각각 조금씩 변형된 이론에 기초한 몇가지 법이 사용되어 왔다. 제15차와 제16차 ITTC 내항성 분과를 통하여 여러 회원 기관에서 사용되는 선체 운동 계산 program의 비교 연구가 수행되었으며[16][17], 제17차 ITTC에서는 다음에 서술되는 바처럼 계산 결과들중 가장 심각한 차이를 보여 주고 있는 사후파와 추파중의 파랑 하중에 대해 증점적인 비교 연구가 진행 되었다[18]. 첫째, 그림 1에서 보여 주는 것처럼 항파중의 종굽힘 moment 및 종 전단력은 거의 전 주파수 범위에서 계산치와 실험치의 일치도가 좋다. 그러나 그림 2에서 처럼 추파 및 사후파중에서는 계산치간의 차이가 크다. 이러한 차이의 주요 원인은 파랑강제력 중의 diffraction force 성분 추경에 대한 이론적 차이에 기인하는 것으로 알려져 있다. 또한 조우 주파수(ω_e)가 0가 되는 근처에서 발산하는 경향은 상하동요시의 2차원 단면의 부가 질량계수가 무한대가 되는 것으로부터 알 수 있으며 이 현상은 2차원 단면에서의 유체동력학적 계수를 사용하는 모든 strip method에 공통된 현상이다. 둘째, 횡굽힘 moment와 횡전단력은 전 주파수 범위에서 계산치와 실험치의 대응은 양호하지만 그림 3에 보여지는 것처럼 사후파($\mu=60^\circ$)중에서의 비틀림 moment에는 계산치간의 뚜렷한 차이가 있다.

추파중에서의 종파랑하중 결과가 심하게 분산되어 나타나는 것에 대한 해결을 위하여 Mizoguchi[21]는 모형시험을 행하여 각각 파주파수와 조우주파수를 기준으로 한 계산 결과와 비교하였다. 그 결과 파랑강제

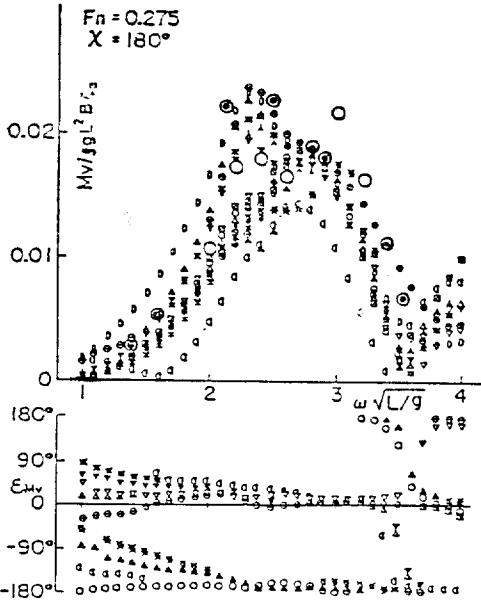


Fig. 1 Vertical bending mt. at midship[17]

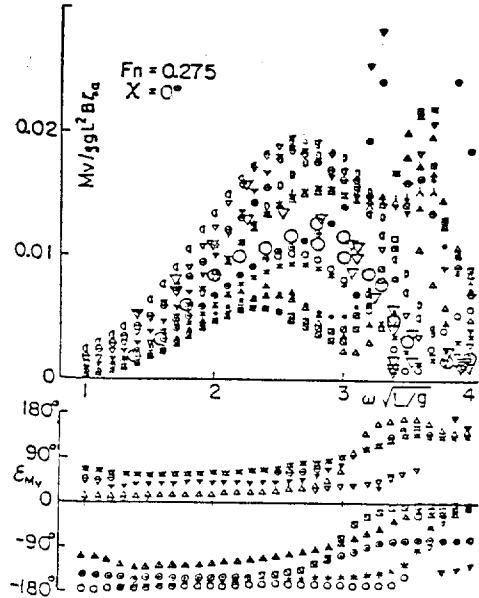


Fig. 2 Vertical bending mt. at midship[17]

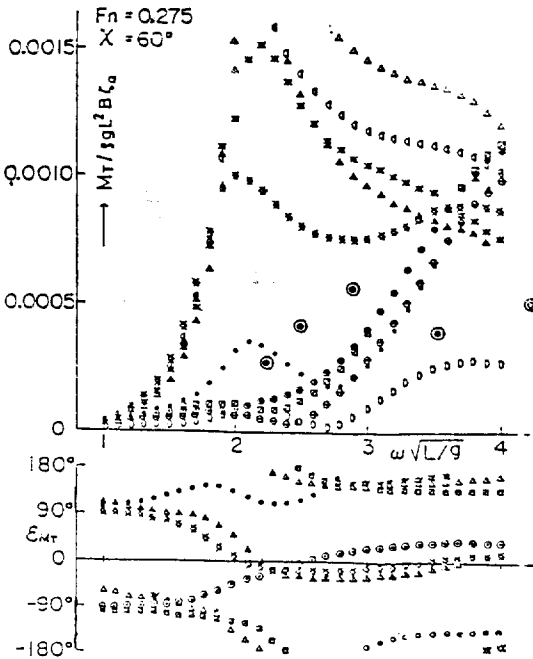


Fig. 3 Torsional mt. at midship[17]

력을 strip method로 계산하는데 있어서, 상하요 및 종요의 강제력에 대해서는 파주파수, 좌우요 및 선수요에 대해서는 조우 주파수의 부가 질량과 조파감쇄 계수를 이용하면 좋다고 하였다. 이 방법에 의하면 진폭

은 물론 위상도 실험치와의 일치가 좋은 것을 표시하였다. Takezawa등[22]은 Mizoguchi[21]의 방법을 종파랑 하중의 파강제력 성분의 계산에 사용하고, radiation 성분에는 Maruo등[20]이 제안한 3차원 수정법을 이용하면 더욱 실험치와의 일치도가 좋아지는 것을 확인하였다. 사파중에서의 횡파랑하중의 정도 높은 추정을 위해서는 Kobayashi[23]와 Shinkai[24]는 횡요는 중요와 달리 경사각이 크고, 선체 고정 좌표로서 예측되는 선체 횡방향 전단력 및 횡굽힘 moment는 선체 중량과 부력의 정적인 힘의 횡방향 성분이 무시될 수 없기 때문에 이들의 성분이 횡방향 전단력 및 횡굽힘 moment에 가산되어야 한다는 것과 비틀림 moment 계산에 있어서 선체 각단면의 GM값이 선장 방향으로 변화하는 것을 고려 하여야 한다는 것을 제창하고 있으며, 상기의 사항을 고려함에 의해서 실험 결과와 매우 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

4. 3차원 계산법

전절에서 기술한 것과 같이 사후파중에서의 파랑하중과 그외 횡요 및 사후파중에서의 선수요를 빼면 선박의 파랑중의 선체운동 및 파랑하중은 strip method에 의해 대략적인 추정이 가능하다. 그러나 선체 주위의 유체 유동을 횡단면내에서의 2차원 유동으로 가정하고 있는 strip method로서의 선체 형상의 3차원성과 전진

속도의 영향을 합리적으로 반영할 수가 없다. 이러한 단점들을 개선하기 위한 3차원적 해법은 크게 나누어서 세장선 이론과 3차원 특이점 분포법으로 구분할 수 있다.

전절에서 기술한 대로 strip method가 고주파 영역에서 유효한 이론인 것에 대하여 Newman과 Sclavounos는 관심있는 대부분의 주파수 영역에서 유효한 Unified slender body method를 제창하였다. 이 이론의 체계적인 이론적 배경은 Newman[25]에 기술되어 있으며 Newman과 Sclavounos[26]에 radiation 문제, Sclavounos[39]에 diffraction문제가 취급되었다. 또한 Sclavounos[40][41]는 $Fn=0.20$ 과 0.25 에서 2가지 실용 선형에 대하여 상하요 부가질량 계수, 감쇄계수 그리고 파랑 강제력을 구하고 strip method의 결과 및 실험 결과를 비교하였다. 그 결과 파랑하중의 추정 정도가 높은 것으로 나타났으나 선체 운동은 S.T.F.M.에 비해 개선도에 있어서 그다지 좋지 않은 것을 보여 주고 있다. Maruo와 Tokura[20]에 의해 도입된 Interpolation method는 Matsunaga와 Maruo[28]에 의해 전진 속도가 있는 경우 strip method보다 비교적 넓은 주파수 영역에서 유효한 Interpolation slender body method로 확장 되었다. Yeung과 Kim[43]은 matched asymptotic expansion의 이론을 기초로 전진속도가 있는 경우 radiation 문제에 대하여 새로운 세장선 이론을 제창하였다. 이 이론은 선속이 영이 되면 Newman의 Unified method가 되고 선속이 유한이고 고주파수 극한에 있어서는 Yeung과 Kim[42]의 formulation에 일치하는 것을 보여주고 있다. 그러나 아직 수치 계산 결과가 없다.

문제를 직접 푸는 방법으로 물체 표면에 특이점을 분포하는 방법이 있는데 최근의 대용량, 고속의 전자 계산기의 출현에 따라 많은 발전이 기대되고 있다. Chang[29]은 처음으로 3차원 특이점 분포법을 이용하여 선체 운동을 계산하였다. 이 방법은 물론 전통적인 strip method가 가지고 있는 높은 Froude No. 영역이나 저주파수 영역에서의 문제점을 해결할 수 있다. 그러나 많은 계산시간을 요하므로 선체 운동을 계산하는 통상적인 방법으로는 적합치 않다는 점이다. 또한 2차원 특이점 분포법에서와 마찬가지로 irregular frequency가 존재하는 문제가 있다. Chang[29] 이후 Inglis와 Price[30][31], Kobayashi[33] 그리고 Guevel과 Bougis[44]에 의하여 연구, 발전되었다. Kobayashi[33]는 3차원 특이점 분포법에 의한 반물수형 타원체에 대한 계산과 시험으로부터 중운동에 있어서의 물체 형성

의 3차원성 및 전진속도의 영향을 검토하였고 strip method에 비해 실험 결과와의 일치도가 뛰어난 결과를 얻었다. Inglis와 Price[32]는 또한 3차원 특이점 분포법에서의 irregular frequency 문제의 중요성을 보여 주었다.

5. 결 언

이상에서, 선체운동의 계산에 주로 쓰이고 있는 strip method에 대하여 소개하고 최근에 ITTC 내항성 분과에서 수행된 국제 비교 연구의 결과를 간략히 소개 하였다. 그리고 선체운동의 3차원 계산법과 최근의 성과에 대하여 소개하였다. 본고의 독자들의 선체 운동 이론에 대한 인지도나 사용 목적의 광범위함에 비추어 비교적 많은 독자에게 이해될 수 있도록 서술되도록 하였으며 본고에서 택한 주제는 선형이론에 주요점을 두고 소개 되었다.

그러나 선박의 운동 및 파랑하중의 보다 정확한 추정을 위하여 매우 중요하며 최근 많은 연구가 진행되고 있는 분야인 비선형 현상, 즉 대각도 횡요시의 비선형 유체력, 대 파고시의 선체 운동 및 파랑하중의 비선형성, slamming에 의한 충격력 등에 대해서 추후에 소개가 되어야 할 것으로 본다.

참 고 문 헌

- [1] Froude, W., "On the rolling of ship", Inst. Naval Archit. Trans. 2, 1861.
- [2] Krylov, A., "A new method of the pitching motion of ships on waves, and of the stresses produced by this motion", Inst. Naval Archit., Trans. 65, 1896.
- [3] Michell, J.H., "The wave resistance of a ship", Philos. Mag. [5], 45, 1898.
- [4] Lewis, F.M., "The inertia of water surrounding a vibrating ship", Soc. Naval Archit. Marine Eng., Trans. 37, 1929.
- [5] Haskind, M.D., "The hydrodynamic method of ship oscillations in rolling and pitching", Prikl. Mat. Mekh. 10, 1946.
- [6] Peters, A.S. and Stoker, J.J., "The motion of a ship, as a floating rigid body, in a seaway", Commun. Pure Appl. Math. 10, 1957.
- [7] Newman, J.N., "A linearized method for the

- motion of a thin ship in regular waves", *J. Ship Research*, Vol. 25, No. 1, 1961.
- [8] Ursell, F., "Slender oscillating ships at zero forward speed", *J. Fluid Mech.*, 19, 1962.
- [9] Newman, J.N., "A slender body method for ship oscillations in waves", *J. Fluid Mech.*, 18, 1964.
- [10] Joosen, W.P.A., "Oscillating slender ships at forward speed", Publ. No. 268, Neth. Ship Model Basin, Wageningen, 1964.
- [11] Newman, J.N. and Tuck, E.O., "Current progress in the slender-body method of ship motions", *Proc. Symp. Naval Hydrodyn.*, 5th ACR-112, Washington, 1964.
- [12] Maruo, H., "Application of the slender body method to the longitudinal motion of ships among waves", Bull. Fac. Eng., Yokohama Natl. Univ. 136, 1967.
- [13] Korvin-Kroukovsky, B.V. and Jacobs, W.R., "Pitching and heaving motions of a ship in regular waves", Soc. Naval Archit. Marine Eng., Trans., 65, 1957.
- [14] Tasai, F. and Tagaki, M., "Theory and calculation of ship responses in regular wave", Soc. Naval Archit. Japan, Tokyo, 1969.
- [15] Salvesen, N., Tuck, E.O. and Faltinsen, O., "Ship motions and sealoading", Soc. Naval Archit. Marine Eng., Trans. 78, 1970.
- [16] ITTC Seakeeping Committee Report, Proceedings, 15th ITTC, 1978.
- [17] ITTC Seakeeping Committee Report, Proceedings, 16th ITTC, 1981.
- [18] ITTC Seakeeping Committee Report, Proceedings, 17th ITTC, 1984.
- [19] ITTC Seakeeping Committee Report, Proceedings, 18th ITTC, 1987.
- [20] Maruo, H. and Tokura, J., "Prediction of hydrodynamic forces and moments acting on ships in heaving and pitching oscillations by means of an improvement of the slender ship method", *J. Soc. Naval Archit.*, Japan, 143, 1978.
- [21] Mizoguchi, S., "Exciting forces on a high speed container ship in regular oblique waves-frequency selections for calculating exciting forces by the strip method", *Trans. Soc. Naval Archit.*, West Japan, 1982.
- [22] Takezawa, S. et al., "A study on longitudinal motions and bending moment of a container ship in following sea", 船論, 150, Japan, 1981.
- [23] 小林顯太郎, "船體固定座標系での横波浪荷重の近似計算について", 佐友重機械技報, Vol. 30, No. 90, 日本, 1982.
- [24] 新開明二, 福田淳一, "波郎中の船體に誘起される水平方向と剪断力曲ガメント計算法について", 九大工學集報, 第55卷, 第2號, 1982.
- [25] Newman, J.N., "The method of ship motions", Adv. Appl. Mech., 18, 1978.
- [26] Newman, J.N. and Sclavounos, P., "The unified method of ship motions", *13th Symp. Naval Hydrodyn. Proc.*, Office Naval Res., 1980.
- [27] Troesch, A.W., "Sway, roll and yaw motion coefficients based on forward-soeed slender-body method", *J. Ship Res.*, Vol. 25, No. 1. 1981.
- [28] Matsunaga, K. and Maruo H., "On the Radiation Problem of slender ships with forward velocity", Soc. Naval Archit., Japan, Vol. 150, 1981.
- [29] Chang, M.S., "Computations of three dimensional ship motions with forward speed", *Proc. 2nd Int. Conf. on Num. Ship Hydrodyn.*, Berkeley, Sep. 1977.
- [30] Inglis, R.B. and Price, W.G., "The influence of speed dependent boundary conditions in three-dimensional ship motion problems", Inter. Shipbuilding Prog., Vol. 2, No. 318, 1981.
- [31] Inglis, R.B. and Price, W.G., "A three-dimensional ship motion method: comparison between theoretical predictions and experimental data of the hydrodynamic coefficients with forward speed", *Trans. Roy. Inst. Naval Archit.*, Vol. 124, 1982.
- [32] Inglis, R.B. and Price, W.G., "Irregular frequencies in three-dimensional source distribution techniques", Inter. Shipbuilding Prog. Vol. 28, No. 319, 1981.
- [33] Kobayashi, M., "On the hydrodynamic forces and moments acting on the three dimensional

- body with a constant forward speed", Soc. Naval Archit., Japan, Vol. 150, 1981.
- [34] Ursell, F., "On the heaving motion of cylinder on the surface of a fluid", *Quart. J. Mech. Appl. Math.*, 2-2, 1949.
- [35] Tasai, F., "On the damping force and added mass on ships heaving and pitching", *J. Soc. Naval Archit. Japan*, 105, 1959.
- [36] Ursell, F., "Short surface waves due to an oscillating immersed body", *Proc. Roy. Soc. of London*, Ser. A. 220, 1953.
- [37] Ohmatsu, S., "On the irregular frequencies in the method of oscillating bodies in a free surface", *Ship Res. Inst.* 48, 1975.
- [38] Ogilvie, T.F. and Shin, Y.S., "Integral-equation solutions for time dependent free surface problem", *J. Soc. Naval Archit. Japan*, 1978.
- [39] Sclavounos, P.D., "The diffraction of free-surface waves by a slender ship", PL. D. Thesis, MIT, 1981.
- [40] Sclavounos, P.D., "The unified slender body method of ship motion in waves", *15th ONT, Symp. Naval Hydrodyn. Proc.*, Office Naval Res., Hamburg, 1984.
- [41] Sclavounos, P.D., "The diffraction of free-surface waves by a slender ship", *J. Ship Res.*, Vol. 28, No. 1, 1984.
- [42] Yeung R.W. and Kim, S.H., "Radiation forces on ships with forward speed", 3rd Intern. Conf. on Num. Ship Hydrodyn., Paris, 1981.
- [43] Yeung R.W. and Kim, S.H., "A new development in the method of oscillating and translating slender ships", 15th CNR, Hamburg, 1984.
- [44] Guevel, P. and Bougis, J., "Ship motions with forward speed in infinite depth", *Inter. Shipbuilding Prog.*, Vol. 29, No. 322, 1982.