선박 저항에 관련된 최근 연구동향(Ⅰ)

이 승 희
〈인하대학교 교수〉

〈목 차〉

Ⅰ. 서 론

선주가 요구하는 조건과 선박의 안전에 관련된 규정을 모두 만족시킨다고 하면 선형 설계의 궁극적인 목표는 최소의 동력으로 주어진 설계속도를 얻는 것이 될 것이다. 이를 위하여 우선 항행중인 선박이 받는 저항을 정확하게 예측할 수 있는 수단을 확보하여 최소의 저항을 받는 선형을 구할 수 있어야 하며, 그 다음으로는 최대의 효율을 얻을 수 있는 추진장치를 설계할 수 있어야 할 것이다. 물론 fin, nozzle, 또는 duct 등의 보조추진장치를 이용하여 추진효율을 개선하고자 하는 노력도 이루어지고 있으나 이러한 장치들의 설계에는 선박저항 계산에서와 마찬가지로 선체주위의 유동특성에 대한 충분한 정보를 가지고 있지 않으면 안 된다. 본 고에서는 수면상을 항주하는 선박주위의 유동해석을 위한 방법을 검토함으로써 선박저항의 특성과 그 계산법에 대하여 개략적으로 고찰하고자 한다.

항행중인 선박은 중력장과 물의 점성에 의하여 저항을 받게 된다. 이러한 저항은 이론적으로는 Navier-Stokes 방정식의 수학적인 엄밀해를 구함으로서 계산할 수 있다. 그러나 이 방정식은 비선형편미분방정식으로서 일부 특수하게 단순화된 문제를 제외하고는 그 이론해를 구할 수 없으므로, 복잡한 형상 주위의 유동해석은 전산기를 이용한 수치적 해석 방법에 의존하여야만 한다. 수치해석을 위하여 유체영역을 분할하여 얻어지게 되는 격자간격(grid spacing)은 주어진 특성길이(characteristic length)에 비하여 충분히 작아야 하며, 필요한 격자수를 N이라고 할 때 수치해를 구하기 위하여 요구되는 반복계산수(number of iterations)는 가장 효율적인 해석방법에 의하더라도 $N^2\log N$에 비례한다. 일반적으로 선박은 난류영역에서 운항되므로 난류의 특성길이를 충분히 고려하여 주어야 하며 또한, 수치적으로 경계조건을 적용하여야 하는 경계면(자유표면)이 고정되어 있지 않으므로 그 위치를 결정하여 주어야 하기 때문에 이 방정식의 수치해를 구하기 위하여 요구되는 연산수는 현금의 초고속전산기(super computer)를 이용할 지라도 비현실적으로 과도하게 커지게 된다. 방정식을 선형화하기 위한 연산, 경계조건의 불확실성에 따른 수치계산영역의 확대 등을 고려하면 이러

한 문제점은 더욱 커지게 된다. 따라서, 경계층 이론의 적용, Reynolds 방정식의 도입, 중력장에 의한 저항성분과 점성에 의한 저항성분의 분리 등과 같은 수단을 동원하여 연산수를 줄여줌으로써 계산시간을 현실적으로 가능한 수준으로 만들어 주어야만 한다.

이러한 이론적, 수치적인 방법 상의 어려움을 극복하기 위한 방법으로는 모형시험을 들 수 있다. 이 경우에 제기되는 최초의 의문은 과연 모형시험 결과로 부터 실선의 저항을 정확하게 예측할 수 있는가 하는 것이 될 것이다. 이 의문에 대한 해답을 얻기 위하여 차원해석(dismensional analysis)을 수행하여 보면, 선박의 저항 D는 Reynolds수 Rn과 Froude수 Fn의 함수임을 쉽게 알 수 있다. 즉, 선속을 U, 침수표면적을 S, 특성길이를 L, 그리고, 밀도, 동점성계수(kinematic viscosity), 중력가속도를 각각, ρ, ν, g라고 하면, 선박이 받는 저항계수 C_d는 표면장력으로 인한 영향이나 공기와의 상호작용을 무시할 때 $C_d = D/(0.5\rho SU^2) = func(Rn, Fn)$가 된다. 여기서 $Rn = UL/N_u$, $Fn = U/\sqrt{gL}$ 이며, 따라서 모형과 실선이 역학적으로 상사하기 위하여서는 모형선이나 실선일 때 Reynolds수와 Froude수가 동시에 일치되어야만 한다. 그러나 작은 모형선과 실선의 Reynolds수가 일치되는 상태에서 시험하기 위하여서는 아주 고속에서 시험하지 않으면 안된다는 문제점이 나타나지만 이를 차치하고 서라도 Froude수와 Reynolds수를 동시에 일치시킬 수 없음은 명백하기 때문에 소위 'Froude의 가정' 도입하지 않으면 안된다. 즉, 선박이 받는 전 저항계수 C_d는 선박의 침수표면적에 대응되는 평판의 마찰저항계수 C_f와 잉여저항계수 C_r로 분리할 수 있으며 이들중 C_f는 Rn, 그리고 C_r은 Fn만의 함수로 생각할 수 있다는 것이다. 또한 마찰저항계수 C_f가 Rn만의 함수라면 잉여저항계수 C_r은 C_d와 C_f의 차이므로 Rn와 Fn의 함수가 되어야 하지만 잉여저항에 포괄되어 있는 점성형상저항(viscous form drag or eddy resistance)은 유동박리현상(separation)이 일어나지 않는 한 상당히 큰 Reynolds수의 범위(대략 10^5보다 클 경우)에서는 거의 일정한 값을 갖기 때문에 Froude수만의 함수가 된다고 볼 수도 있다는 것이다. 그러나 형상저항은 선체표면상에 작용하는 비점성 유체에 의한 동압(hydrodynamic pressure)의 분포가 유체의 점성에 의하여 달라지기 때문에 발생하는 것이므로 Reynolds수의 영향을 완전히 배제할 수는 없을 것이다. 실제로 형상저항은 Reynolds수가 감소함에 따라 증가하기 때문에 Froude의 방법에 의하여 모형시험 결과로 부터 실선의 저항을 추청할 때에는 평판에 대한 마찰저항 곡선인 'Schoenherr 곡선' 대신에 Reynolds수에 따른 형상저항의 변화를 고려하여 주기 위하여 좀더 가파르게 수정된 'Hughes 곡선'이나 'ITTC 모형선-실선상관곡선' 등을 주로 이용하여 왔으며 현재에는 제15차 ITTC에서 제안된 '1978 ITTC 단추진기선의 성능추정 방법'이 대표적인 저항추정방법이 되고 있다.

그러나 이러한 노력에도 불구하고 마찰저항은 분명히 선체 주위의 파형, 또는 침하와 경사(trim & sinkage) 등에 수반되는 침수표면적의 변화에 따른 영향을 받을 것이며, 파형 그 자체는 또한 경계층(boundary layer)이나 후류(wake)의 영향을 피할 수 없을 것이기 때문에 모형시험수조에서 예측한 실선저항의 신뢰도를 향상시키기 위하여서는 치수효과를 감소시키기 위하여 모형시험수조를 대형화 한다거나 또는 각개의 시험수조들의 축적된 자료와 경험을 적극 활용하는 노력 외에도 모형선-실선 상관관계를 규명하기 위한 이론 및 수치적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

선박이 받는 저항을 예측하는데 쓰이는 이론적, 수치적, 또는 실험적인 방법들은 모두 상당한 가정을 전제로 하거나 축적된 경험을 토대로 하고 있다. Froude가 인식한 바와 같이 실험적인 방법은 저항해석을 위한 이론적인 수단을 제공하지 못한다는 단점을 지니고 있는 반면 이론적 또는 수치적인 방법들은 정확한 저항값을 주지 못한다는 약점을 가지고 있다. 따라서 모형시험수조를 대형화 함으로서 벽면 또는 치수 효과(wall or scale effects)를 감소시키고 더욱 정밀한 계측을 가능케 한다거나 계열

시험을 통하여 저항치에 영향을 미치는 주요인자들의 효과를 체계화 하려는 노력이 이루어지고 있다. 또한 최근의 급속한 전산기의 발전에 힘입어 수치모형시험수조(numerical towing tank)라는 개념이 도입되기에 이르렀다. 그러나 이들 모두 독자적으로는 한계점을 가지고 있으므로 선박의 저항을 정확히 예측하고 해석함으로써 선형 및 추진효율의 개선 등에 이용하려면 이론, 수치 및 실험적인 방법들이 서로 비교, 검토, 보완되지 않으면 안 될 것이다.

본 고에서는 선박저항을 추정하기 위한 실험적인 방법들에 대한 설명은 생략하고 주로 조파저항(wave resistance)과 점성저항(viscous resistance)의 특성과 이들을 계산하기 위한 방법의 이론적 배경과 수치해석적인 수단을 소개하려고 한다. 즉, 점성을 무시한 조파저항과 자유표면을 무시하여 계산되는 점성저항의 특성을 개략적으로 살펴 보고자 한다. 다만, 이 경우의 두 저항성분은 전술한 실험적 방법에서의 두 저항성분, 즉, 잉여저항과 마찰저항과는 정의상 완전히 동일하지 않으므로 실험결과와 비교할 때 이 점을 특히 유의하지 않으면 안 된다. 예를 들면, 전술한 바와 같은 침수표면적의 변화, 경계층과 자유표면의 상호작용 등으로 인한 저항성분들은 이론 또는 수치적인 접근에서 일반적으로 기본가정상 무시되고 있다.

Ⅱ. 조파저항(Wave Resistance)

Ⅱ.1 물리적 개념

항주하는 선박은 자유표면을 교란함으로써 파를 발생시키며 파가 발생하고 전파되어 나가는 데에는 중력장(gravitational field)의 존재가 전제조건이 되어야 하며 에너지(energy)가 지속적으로 공급되어야 한다. 이와 같이 파를 발생시키기 위하여 공급되어야 하는 에너지를 조파저항이라고 부른다. 다시 말하면, 조파저항은 자유표면상이나 그 아래에서 운동하는 물체가 자유표면을 이루고 있는 유체입자를 교란시킴으로써 평형을 파괴하고 중력장의 영향에 의하여 동요하면서 물체의 후방으로 전파되어 나가는 파계를 발생시킬 때 소요되는 에너지를 뜻한다. 이때 발생되는 파계의 특성은 물체주위의 유동장, 즉, 물체의 기하학적 형상과 운동등에 의하여 결정되며 대별하면 선수파와 선미파, 또는 그 각각이 다시 가로파계와 발산 파계로 구성된다. 조파저항을 이론적으로 계산하기 위한 구체적인 방법들은 Wehausen[1], Kostyukov[2], Lunde[3, 4, 5] 등에[주1] 상세히 열거되어 있어, 본 장에서는 이론식의 도출 등 수식의 사용을 가능한 한 피하고자 하므로 이론에 대한 상세한 내용은 이 문헌들과 그들이 인용하고 있는 참고문헌들을 참조하기 바란다.

Ⅱ.2 조파저항 선형이론(Linear Theories of Wave Resistance)

선박에 의한 파와 조파저항을 이론적으로 다룰 때에는 보통 고정되어 있는 선박에 먼 전방으로 부터 비점성, 비압축성, 비회전성인 유체가 균일한 속도로 흘러들어 오고 있다고 가정하고 표면장력은 무시한다. 이 경우 모든 유동현상은 질량보존의 법칙 즉, 연속방정식에 의하여 결정되므로 이러한 운동학적 조건들(kinematics)을 만족하는 속도 포텐시얼은 Laplace방정식의 해로써 표현될 수 있다. 따라서 자유표면조건(dynamic & kinematic conditions)과 선체표면에서의 경계조건, 그리고 기저면 및 방사경계조건(bottom & radiation conditions)들을 만족하는 Laplace 방정식의 해를 구한 후 Bernoulli 방정식을 이용하여 선체표면에 수직하게 작용하는 유체압력을 계산하고 이를 선체표면에 대하여 적분하면 엄밀한 의미에서의 정상(steady) 조파저항이 구하여 진다. 그러나 이 문제는 자유표면에서의 경계조건들이 비선형일 뿐만 아니라 적용되어야 할 정확한 위치조차 미리 알려져 있지 못하므로 이론해를 구하는 것은 매우 어렵게 된다.

이제 물체의 운동에 의하여 발생되는 파의 파고가 상당히 작다고 가정하면 근사적으로 교란되지 않은 자유표면상에 경계조건을 적용시킬 수 있고 유기되는 교란속도 성분들은 물체

주1) Wigly[6], Sabuncu 등도 포함되나 영문으로 읽지 않음

의 진행속도에 비하여 작아지게 되어 그 제곱항 들을 무시할 수 있게 된다. 결국 선형화된 자유표면 경계조건을 사용할 수 있게 되므로 (linear wave theory) 전체의 문제가 선형화 되어 Laplace방정식의 해로 얻어지는 전체 속도 포텐시얼을 기본속도 포텐시얼과 교란 속도포텐시얼의 선형 중첩(linear superposition)으로 표현할 수 있게 된다.[주2] 여기에서 기본속도 포텐시얼은 이미 알고 있는 Laplace방정식의 해라고 하면 결국 Laplace방정식과 경계조건들을 만족하는 교란속도 포텐시얼을 구하는 문제가 된다.

만약 기본속도 포텐시얼로 물체의 무한전방에서의 균일한 유동에 대한 속도 포텐시얼을 선택하면 흔히 말하는 'Neumann-Kelvin problem'이 된다. 동시에 선체표면에서의 경계조건도 선체중심선면에서 만족되도록 단순화(선형화)시키면 Michell의 'Thin ship이론'이 된다. 그러나 기본 속도 포텐시얼로 무한유체영역에서의 이중체(double body)주위의 속도 포텐시얼을 택하기도 하는데 이러한 방법을 '저속이론(low speed or low Froude number theory)' 또는 '이중체 이론(double body theory)'이라고 한다.[주3]

제 4 절 부터는 이러한 이론을 해석하기 위한 방법들에 대하여 설명한다. 다만 이러한 선형이론은 물체의 형상이나 유체영역의 크기에 따라 큰 오차를 줄 수도 있기 때문에 주의하여야 한다. 예를 들면 길이에 비하여 폭이 큰 비대선(full ship)일수록, 같은 선박일지라도 더 좁은 운하를 지날수록 교란속도 성분들의 크기는 상대적으로 커지게 될 것이다.

Ⅱ.3 이동 충격 압력분포(Distribution of Moving Impulsive Pressures)

선박에 의하여 발생되는 파계에 대한 이론적인 연구는 1880년대에 Kelvin[8]이 자유표면에 국부적인 교란(wave elevation, impulsive pressure, moment등)을 주었을 때 발생하는 파계의 전파에 대한 소위, 'Caucy-Poisson 이론'을 더욱 발전시킴으로써 이루어졌다. Kelvin은 이동하는 일정한 세기의 충격압력이 무한유체영역의 자유표면 상에 주어졌을 때 형성되는 파의 생성에 관한 이차원 및 삼차원 문제들을 해석하였으며 유한수심에 대한 해는 Lamb[9], Wehausem & Laitone[10]등에서 발견할 수 있다.

그 후 Havelock[11, 15], Lunde[12] 등이 이를 더욱 발전시켜 자유표면상에 이동하는 더욱 복잡한 형태의 압력분포(moving pressure distribution)를 부가하여 무한유체영역 뿐만 아니라 제한유체영역인 경우에 대하여서도, 발생하는 파계와 조파저항을 계산하였다. 이때 얻어진 파형과 조파저항은 자유표면 상에 주어진 압력분포의 함수로 나타나게 된다. 문제점은 이 압력분포와 선형을 직접적으로 연관시킬 수 없다는 것이지만 선박에 의한 파형을 구하기 위한 근사적인 방법으로는 매우 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

Ⅱ.4 '얇은 배' 이론 (Thin Ship Theory)-Fourier 방법

Michell[13]은 1898년 선형과 조파저항을 직접 연관시킬 수 있는 최초의 근사적인 이론을 개발하여 무한수심에서의 폭이 좁은 선박(thin ship)에 대한 속도 포텐시얼을 구하여 조파저항을 계산하였다. 여기에서 '얇은 배', 즉, 'Thin ship'이라는 용어는 길이에 비하여 폭이 좁아서 선체표면과 선체중심선면(center plane)이 이루는 각이 작은 선박을 뜻한다.

Michell은 이 방법에서 Neumann-Kelvin 문제에서와 마찬가지로 자유표면 경계조건들을 선형화하였으며 선체가 얇다는 기본가정을 적용하여 선체표면 상에서의 경계조건이 선체중심선면에서 만족되도록 선형화 함으로써 단순한 수식선형의 조파저항을 비교적 용이하게 계

주2) 엄밀한 비선형문제의 해를 섭동법(perturbation)에 의하여 구할 수도 있다. 자유표면 경계조건을 섭동(perturb) 하였을 때 일차근사가 기본 속도 포텐시얼이며 이것을 이용한 처음 연산 결과가 선형화된 자유표면 경계조건이다. {Stoker [7] 참조}

주3) 이중체에 대한 속도 포텐시얼은 Rankine Source를 적절히 분포함으로써 계산할 수 있다.

산할 수 있도록 하여 주었다. 따라서 이 방법은 자유표면 경계조건만을 선형화한 Neumann-Kelvin 문제에 비하여 보다 일관된 1차근사(consistent 1st order)방법이라고 할 수 있다.

그는 속도 포텐시얼을 일반적인 Fourier적분으로 표시한 후 전술한 두 선형화 된 경계조건들을 만족하도록 적분계수들을 결정하는 소위 'Fourier 방법'을 이용하였다. 잘 알려진 바와 같이 이 경우 통상 선박의 후방뿐만 아니라 전방으로도 진행하는 파가 나타나기 때문에 적절한 방법으로 선택된 자유파(free wave)를 중첩시킴으로써 전방으로 진행하는 파를 상쇄시켜 주지 않으면 안 된다. Michell의 논문에서는 이에 대한 명확한 설명이 되어 있지 않으며 보다 체계적인 Michell공식의 도출은 Timman & Vossers[14]등에서 찾을 수 있다.

Michell의 'Thin ship 이론'은 그 후 천수 또는 운하와 같이 제한된 유체영역에서의 조파저항 계산에 까지 확장되었으나 [10, 11, 16]그 기본적 개념들은 이미 Michell의 논문에 나타나 있었다. 또한 경계조건을 보다 엄밀히 적용하기 위하여 섭동방법을 이용하여 이차항까지 고려하였을 뿐 자유표면에서의 경계조건은 그대로 두었기 때문에 일관성이 깨어졌으며 이러한 방법이 실제의 값에 보다 접근된 계산치를 준다고는 보장할 수 없다[1]. 일관된 2차 얇은 배 이론은 Eggers[47]등에서 찾아 볼 수 있다.

Ⅱ.5 Wigly선형과 세장체(Wigly Hull Form & Slender Body)

Michell의 얇은 배 이론은 전술한 압력분포를 이용하는 방법보다 우수함에도 불구하고 약 30년 후에야 Wigly, Weinblum등에 의하여 주목을 받게 되었다. 그들은 '보다 실제의 선박에 가까운 수식선형(Wigly Hull Form)'에 Michell의 이론식을 적용시키고 실험 결과와 비교함으로써 이론식의 유용성과 한계를 검증하였다. Havelock 역시 초기의 이동하는 압력분포를 이용한 저항계산을 벗어나 Michell의 결과를 이용하기 시작 하였으나 Fourier 적분방법 대신 특이점분포를 이용한 Green함수 방법을 사용하였다[17].

선형을 표현하는 근사적인 방법으로는 '세장체(slender body)이론'[18, 19]을 생각할 수 있다. 이 방법에서는 선박의 폭뿐만 아니라 깊이도 길이에 비하여 매우 작기 때문에 선박은 얇은(thin) 물체이기 보다는 가늘고 긴(slender) 물체라고 가정한다. 이 경우 물체표면에서의 경계조건은 하나의 직선상에서 만족되면 되므로 얇은 배이론에 비하여 용이하면서도 실제선형에 좀더 가까운 결과를 줄 것 같이 보인다. 그럼에도 불구하고 1차 근사식은 Michell의 공식으로 부터 쉽게 추론될 수 있으며 2차 근사식은 아직 까지도 계산할 수 있는 정도에 이르지 못하였다[20]. 최근 이러한 세장체이론이 조파저항계산에 유용하게 이용될 수 있다는 주장도 있으나[21] 이 세장체 이론은 선체운동이론에 적용되어 보다 성공적으로 이용될 것임에 틀림없다.

Ⅱ.6 Green함수방법-저속이론(Method of Green Functions-Low Froude Number Theory)

이미 잠시 언급한 바와 같이 Havelock은 특이점분포에 의한 Green함수를 이용하여 Michell의 저항공식을 계산하였다. 이처럼 자유표면 근방에서 움직이고 있는 임의의 물체로 인한 파계와 조파저항은 소오쓰, 싱크, 다이폴 등으로 이루어진 특이점계를 써서 물체표면에서의 경계조건을 만족시킴으로써 계산할 수 있다. 이를 위하여는 자유표면 아래에서 일정한 속도를 가지고 이동하고 있는 단위세기의 단독 특이점으로 인한 속도 포텐시얼을 구하여야 하며 이 속도 포텐시얼은 특이점이 위치한 점을 제외한 모든 영역에서 Laplace방정식을 만족하는 동시에 방사조건, 기저면 경계조건, 자유표면 경계조건 등의 모든 경계조건 들을 만족하여야 한다. 이러한 조건들을 만족하는 독립된 특이점에 의한 속도 포텐시얼을 'Green함수'라고 부른다. 또한 이렇게 자유표면 경계조건을 만족하는, 즉, 자유표면에 파를 발생시키는 소오쓰(source)를 그렇지 못한 소오쓰, 즉, 일반적인 'Rankine 소오쓰'와 구분하여 'Kelvin 소오쓰'라고 부르기도 한다.

단순한(그러나 매우 유용한)물리적 현상에 대한 Green함수들은 이미 많은 연구자들의 공헌에 의하여 잘 정의되어 있다. 예를 들자면 무한수심 또는 유한수심의 자유표면 하에서 이동하는 소오쓰에 의한 Green함수 등이 있다.[주4)]

따라서 특이점을 적절히 분포시키고 Green 정리를 이용하면 특이점계에 의한 속도 포텐시얼은 어렵지 않게 구할 수 있다. 이 때 분포된 특이점들의 세기는 물체 표면에서의 경계조건을 만족시킬 때 나타나는 Fredholm의 제 2 종 적분방정식을 수치적인 방법으로 해석 함으로써 결정된다. 특이점의 세기가 알려지면 속도 포텐시얼이결정 되어 저항을 비롯한 모든 해가 얻어진다. 이와 같은 'Green 함수 방법'에 대한 상세한 내용은 Wehausen[1], Wehausen & Laitone[10], Lunde[3], Kostyukov[2]등을 비롯한 많은 문헌에서 자세히 다루어지고 있으므로 여기에서는 별도로 언급하지 않는다. 다만, 이 방법은 대개의 경우 Michell이 사용한 Fourier방법 등에 비하여 매우 간편하기 때문에 현재는 얇은 배 이론에서 조차 일반적으로 Green함수 방법이 이용되고 있다.

그러나 완전한 형태의 Green함수를 3차원 물체표면에 분포한 후 적분방정식을 해석하는 방법은 Kajitani[23], Gadd[24] 등에 의하여 이용되었지만 수치계산에 많은 어려움을 겪고 있는 것으로 보인다. 따라서 완전한 Green함수 대신에 교란되지 않은 자유표면에 대한 Green 함수 즉, 이중체에 대한 속도 포텐시얼을 사용하여 수치계산을 간편하게 하기도 하는데 이러한 방법을 전술한 바와 같이 '이중체 또는 저속이론'이라고 부르며 이 경우에도 최종 속도 포텐시얼은 완전한 형태의 Green함수를 사용하여 계산된다. 저속이론은 Inui[25]가 처음 도입하였으며 이때 그는 이미 결정된 특이점 분포로 부터 유선을 추적하여 '역(inverse)'으로 선형을 찾아내었는데 이 방법은 '유선추적법(streamline-tracing method)'이라고 불리운다. 그 후 Breslin & Eng[26], Pin & Moore[27], Ogiwra, Maruo & Ikehata[28] 등에 의하여 역 또는 직접적인 방법으로서 이용되었다. 그러나 Kotik & Morgan[29]은 물체표면과 교란되지 않은 자유표면을 동시에 만족하는 특이점 분포는 무한히 많기 때문에 조파저항의 유일성(uniqueness)을 보장하여 주기 위하여는 수면상(waterplane area)에 추가로 다이폴들을 분포하여 주어야만 한다는 것을 지적한 바 있다.

Ⅱ.7 Panel Method

Green함수 방법을 이용하여 자유표면 하에서 운동하고 있는 물체의 형상을 표현하는 것은 특이점을 유체영역 내에 적절히 분포함으로써 근사적으로는 비교적 용이하게 성취할 수 있다. 즉, 가는 배(slender ship), 얇은 배(thin ship), 또는 넓은 배(flat ship)등과 같이 단순히 선이나 평면상에 분포한 특이점계를 가지고 선형을 근사적으로 표현할 수 있다. 또는 이들을 복합적으로 중첩시킴으로써 Pienoid[27] 나 Inuid[25]등과 같이 보다 실제에 가까운 선형을 표현할 수도 있다. 그러나 이러한 방법들은 선형화과정에서 선형이 하나의 선이나 평면으로 단순화 되었기 때문에 선체표면에서의 경계조건을 엄밀히 만족시켜 주지 못하고 있다. 또는, 몇개의 평면과 선상에 분포된 특이점계를 중첩시킨 경우일지라도 원하는 선체형상과 분포된 특이점계들의 세기를 정확히 연계시키지 못한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여는 특이점계를 선체표면 그 자체에 연속적으로 분포시키지 않으면 안 된다.

Hess & Smith[30]는 물체표면에 Rankine 소오쓰와 싱크들을 연속적으로 분포함으로써 무한유체 영역에서 운동하는 임의형상의 물체 주위의 포텐시얼 유동을 계산할 수 있는 전산 프로그램을 작성하였다. 이 방법을 이용하여 저

주4) 무한수심의 경우 Green함수에서 소오쓰의 포텐시얼을 제외한 나머지 부분, 즉, 부가된 경계조건 만족시키기 위하여 첨가된 부분을 'Kochin 함수'라고 부르며 유한수심 및 가속도를 가지고 있을 경우에 해당하는 함수는 Haskind[22]등에 의하여 계산되었다. 선체운동론에서 주로 사용되는 동요하는 경계면(oscillating boundary)에 대한 문제 역시 매우 중요하지만 본 고에서는 제외한다.

속이론(Low Speed Theory)에 필요한 기본 속도 포텐시얼을 구할 수 있다. Dawson[31]은 Hess & Smith의 방법을 확장하여 Rankine 소오쓰를 물체표면 뿐만 아니라 선형화 된 자유표면상에도 분포시켜 줌으로써 자유표면상 또는 하에서 운동하는 임의형상의 3차원 물체주위의 유동과 조파저항을 계산할 수 있게 하였다. 따라서 이러한 방법을 이용하면 저속일 경우 뿐만 아니라 고속인 경우에도 조파저항을 계산할 수 있을 것이다. 다만 이와 같이 물체표면에서의 경계조건이 정확하게 적용된 경우일 지라도 자유표면 경계조건이 선형화 되어 있다면 얻어진 결과는 엄밀히 말하면 1차 근사일 뿐이며 Michell등의 1차 이론보다 더 향상된 결과를 준다는 보장은 없음을 주의하여야 한다.

Ⅱ.8 고차 조파저항 이론(Higher Order Theory for Wave Resistance)

자유표면 근방에서 운동하고 있는 물체주위의 유동을 해석하려고 할 때 봉착하는 가장 어려운 문제는 물체표면과 자유표면에서의 경계조건을 동시에 엄밀하게 만족시키는 것이다. 즉, 자유표면 조건 뿐만 아니라, 만약 침하와 경사가 일어난다면, 경계조건이 만족되어야 할 물체의 경계면 위치조차도 알려져 있지 않다는 어려움이 있다. 따라서 대부분의 고차 이론에서는 그 중의 한 경계조건은 선형화 시키고 나머지 하나의 조건만을 보다 정확하게(exact or higher order) 만족시켜 주는 것이 관행이다. 이것은 수학적인 관점으로 보면 처음에는 한 경계조건만을 (거의)정확히 만족시키고 다른 한 조건은 단계적으로 정도를 향상시켜 나가는 방법(inconsistent approximation)의 첫단계라고 할 수 있다.

일반적으로 자유표면에서의 경계조건보다는 물체표면에서의 경계조건을 만족시켜 주는 것이 용이하기 때문에 대부분 물체표면 경계조건만을 보다 정확하게 만족시키려는 노력을 하여 왔다. 여기에는 이차의 얇은 배(second order thin ship)이론 등이 포함되나 이미 현재 주로 이용되고 있는 Neumann−Kelvin문제, 저속이론, 패널방법(panel method)등도 이 범주에 포함되므로 이러한 고전적인 방법들에 대하여 재론할 필요가 없을 것이다. 다만, 이러한 방법들이 과연 일관된 선형이론인(consistent linear approximation)얇은 배 이론보다 더 낳은 결과를 줄 수 있을 것인가 하는 문제에 대한 해답이 필요하다. 통상 이 점에 대하여는 '유체의 운동은 그 유체를 교란하는 물체의 거동에 더욱 민감하다.'라는 관점에서 정당화 되고 있으며 일부고차 이론의 결과들 역시 Michell 방법보다 실험치와 더 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으나[23, 24] 저속이론 등에서는 그렇지 못하며[32] 이 점을 명백히 하기 위하여는 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

전술한 두 경계조건들을 동시에 정확하게 적용하고자 할 때의 문제점들은 자유표면과 물체표면을 좌표평면과 일치시킴으로써 극복할 수 있다. Yim[35]은 새로운 좌표축을 추가로 도입하여 좌표평면을 자유표면과 일치시켰으며 Wehausen[36]은 두 경계면과 일치하는 Lagrangian좌표계를 도입하였으나 두 경우 모두 수치해는 얻지 못하였다.

Eggers[37]는 완전한 2차 이론으로서는 최초로 수치계산을 수행하였는데 수치계산이 용이하도록 수정된 Green함수 방법을 이용하였으며 Wehausen의 방법은 최근 Hong[38]에 의하여 수치계산이 이루어졌다. 그러나 이들 2차 이론 역시 파고가 매우 작다는 가정을 하고 있으므로 주어진 Froude수에 따라 선체는 충분히 얇거나(thin) 또는 깊이 잠수되어 있어야만 한다[39].

Guilloton[33]은 Michell의 방법으로 구한 속도장을 기본으로 하여 더 향상된 근사값을 줄 수 있는 새로운 속도장으로 사상(mapping)하는 방법을 사용하였는데 이것은 Michell방법에서 선체중심선면에 분포된 특이점들을 이용하여 선형을 구하는 일종의 유선추적법이라고 할 수 있다. 즉, Michell의 포텐시얼을 이용하여 등압선(isobar)을 구하며 이를 위하여 선체를 선수에서 선미 또는 그 반대방향으로 놓인 'Wedge'로 분할한다. Michell의 공식으로 조파저항을 계산하고 Guilloton의 변환에 의하여

실제의 선형으로 변환하는데 이때 조파저항 값은 변하지 않으나 자유표면과 물체표면에서의 경계조건은 더욱 정확하게 만족된다. 다만 얻어진 실제 선형이 계산하고자 하는 선형과 일치하지 않으면 일치할 때까지 선체중심선면의 특이점분포를 수정하여 주어야 한다. Emerson [34]의 계산에 의하면 이 방법은 침하와 경사가 일어나지 않는 구간에서는 실험치와 잘 일치하는 값을 주는 것으로 보인다. 한편 Gadd [48]는 Guilloton의 방법을 수정하여 얇은 배 대신 이중체 속도 포텐시얼을 사용하였다.

Ⅱ.9 조파저항과 점성

조파저항의 경우에도 물리적으로는 점성의 영향을 배제할 수는 없다. 무한수심의 경우에도 점성에 의한 에너지소산 때문에 시간이 경과하면 파고는 줄어들게 된다. 예를 들면 상온의 경우에 대략 L^2(파장(cm)) 초마다 파고는 1/e의 비율로 줄어든다. 파장이 1cm인 capillary wave의 경우 이에 소요되는 시간은 1초인 반면 파장이 10m인 경우에는 약 270시간이 필요하다. Wigly[40]등의 연구에 의하면 Froude 수가 큰 경우에는, 단순한 차원해석을 통하여도 쉽게 짐작할 수 있듯이, 점성의 영향은 거의 무시할 수 있다.

조파저항에 미치는 점성과 경계층에 의한 영향은 Wigly외에도 Havelock[41], Sretenskii [42], T.Y.Wu[43], Brard[44], Beck[45], Milgram[46] 등에 의하여 다루어졌으며 그 결론을 요약하면 반류(wake)는 파고를 감소시킴으로써 조파저항을 줄여주는 반면 경계층은 조파저항을 증가시키는 효과를 가지고 온다는 것이다. 실험결과와 비교하여 보면 이러한 점성의 영향은 주로 선수와 선미에서 발생한 가로파계간의 간섭에 의하여 나타나는 저항곡선 상의 산과 골(hump & hollows)을 완화시켜주는 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Ⅱ.10 최근 연구 동향

조파저항과 자유표면파에 대한 최근의 연구동향은 Symposia on Naval Hydrodynamics, International Conferences on Numerical Ship Hydrodynamics등과 같은 주요한 국제학술회의의 최근 proceedings에서 찾아 볼 수 있다. 또한 Proceeding of the Workshop on Ship Wave Computations(1979)에서는 Wigley Hull, Inuid 등의 몇가지 선형에 대한 조파저항이 유한요소법(finite element method)을 포함한 다양한 수치해석방법들에 의하여 계산되어 실험치와 더불어 서로 비교, 검토되어 있다. 그 외에 ITTC의 Resistance & Flow Committee의 보고서 등에서도 간략한 정보를 얻을 수 있다.

최근에 이르러서도 전술한 고전적인 조파저항 계산법들을 향상시키기 위한 연구가 계속되고 있다. Neumann-Kelvin문제는 Suzuki[49], Noblesse[50], Maruo et. al.[51] 등에 의하여 다루어졌으며 저속이론은 Brandsman & Hermans[52], Eggers[53] 등에 의하여 다루어졌다.(Ⅱ.6절 참조)

선박에 의한 자유표면파에 관한 문제는 Tulin[54], Maruo[55], Chung[56] 등이 Ray theory의 관점에서 다루고 있으며 Miloh & Dagan[57]은 비선형 자유표면 방정식을 weak problem으로 간주하여 해양파 문제에서 처럼 Fourier 공간에서 해석하고 있다.

완전한 비선형 자유표면문제는 Van Eseltine & Haussling[58]과 Coleman[59]에 의하여 유한차분법(finite difference method)을 이용한 3차원 준 무한 선체의 선미유동 해석에서 다루어졌다. Miyata et. al.[60]은 3차원 비선형 선수파 문제를 Marker & Cell(MAC) 방법으로 다루었으며 2차원의 경우 쇄파(wave breaking)문제까지 다루고 있으나 그 결과의 신빙성에는 아직도 의문이 남아 있다. 비선형 선수파문제는 그 밖에도 Patel et. al[61], Fry & Kim[62]등이 연구를 수행하였으며 선수부근에서는 Froude수 뿐만 아니라 Reynolds수와 Weber수 역시 고려되어야 한다는 것이 알려져 있다.

Maruo & Ogiwara[63] 등은 경계요소법(Boundary element(integral) method)을 이용하여 비선형 자유표면파 문제를 다루었으며 Xia[64]는 Rankine 소오쓰 분포를 이용하여 사파문제에까지 적용하였다. 이 경계요소법은

점성을 고려하지 않는 경우 계산비용이나 정도에 있어서 유한차분법을 이용한 방법들 보다 우수한 것으로 보인다.(Ⅱ.8절 참조)

자유표면파에 대한 점성의 영향에 관한 최근 연구동향은 Hinatsu & Takeshi[65]와 Stern [66] 등에 잘 정리되어 있다. Wang[67]과 Doi et. al.[68]은 교차류를 무시한 경계층 방정식을 적분방법으로 해석하여 단순한 수식선형의 경우 산부근에서 조파저항이 현저히 줄어든다는 것을 확인하였다. 그러나 점성유동에 적합한 자유표면 경계조건에 대한 연구와 실선 scale Reynolds 수에서의 계산이 수행되면 시험수조에서 조파저항계수의 칫수효과를 규명하는데 도움이 될 것이다.(Ⅱ.9절 참조)

References.

1. Wehausen, J.V. : "The Wave Resistance of Ships", Academic Press, 1973
2. Kostyukov, A.A. : "Theory of Ship Wave Resistance", E.C.I., Iowa City, 1968.
3. Lunde, J.K. : "On The Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion", Trans. SNAME, Vol. 59, 1951.
4. Lunde, J.K. : "The Linearized Theory of Wave Resistance and its Application to Ship−Shaped Bodies in Motion on The Surface of a Deep Previously Undisturbed Fluid", SNAME Tech. Res. Bull., 1957
5. Lunde, J.K. : "Wave Resistance", Proc. 12th ITTC, Rome, 1969
6. Wigly, W.C.S.;"L'etat Actuel des Calculs de Resistance de Vagues", Bull. Ass. Tech. Mar. Aeronaut., Vol. 48, 1949
7. Kelvin, B.;"On Stationary Waves in Flowing Water Ⅲ.", Phil. Mag., Vol. 5−22, 1986
8. Stoker, J.J.;"Water Waves. The Mathematical Theory with Applications", Wiley, New York, 1957
9. Lamb, H.;"Hydrodynamics", Cambridge Univ. Press, 1932.
10. Wehausen, J.V. & Laiton, E.V.;"Surface Waves", Encyclopedia of Physics, Springer−Verlag, Berlin, 1969
11. Lunde, J.K.;"On the Linearized Theory of Wave Resistance for a Pressure Distribution Moving at Constant Speed of Advance on the Surface of Deep of Shallow Water, Norg. Tech. Univ., Ship Model Tank Mag., Vol. 8, 1951
12. Havelock, T.H.;"The Wave Making Porperties of Certain Travelling Pressure Disturibances", Proc. Roy. Soc. Ser. A., Vol. 89, 1914
13. Michell, J.K.;"The Wave Resistance of a Ship", Phil. Meg., Vol5−45, 1898
14. Timman, R. & Vossers, G., International Shipbuilding Progress, Vol. 2, No.6, PP. 96−102
15. Havelock, T.H.;"The Effect of Shallow Water on Wave Resistance", Proc. Roy. Soc. Ser. A., Vol. 100, 1922
16. Sretenskii, L.N.;"On the Wavemaking Resistance of a Ship Moving along in a Canal", Phil. Ma., Vol. 7−22, 1936
17. Havelock, T.H.;"Studies in Wave Resistance : The Effect of Parallel Middle Body", Roy. Soc. Ser. A., Vo. 108, 1925
18. Tuck, E.O.;"The Steady Motion of a Slender Body", Dissertation, Univ. of Cambridge, 1963
19. Ogivie, T.F.;"Singulat Perturbation Problem in Ship Hydrodynamics", 8th Symp. Naval Hydrodynamics, Pasadena, 1970
20. Newman, J.N.;"Application of Slender−Body Theory in Ship Hydrodynamics", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.2, 1970
21. Koch, P. & Noblesse, F., Proc. of the Workshop on Ship Wave Resistance, DTNSRDC, Bethesda, 1979, PP. 339∼353
22. Haskind, M.D.;"The Oscillation of a Ship in Still Water(Russian)", 1946, Translated in SNAME Res. Bull. 1−12, 1953
23. Kajitani, H.;"The Second Order Treatment of Ship Surface Condition of Wave Making Resistance of Ships", Jour. of Zosen Kiokai, Vol. 118, 1965
24. Gadd, G.E.;"Ship Wave Making in Theory and Practice", Trans. Inst. Nav. Arch., Vol. 111, 1969
25. Inui, T.;"Stydy on Wave Making Resistance of a Ship", JSNA, 60th Anniv. Ser. 2, 1957
26. Breslin, J.P. & Eng, K.;"Caculation of the Wave Resistance of a Ship Represented by Sources Distributed over the Hull Surface", Int. Sem. Theor. Wave Resist., Ann Arbor, 1963
27. Pien, P.C. & Moore, W.L.;"Theoretical & Experimental Study of Wave Making Resistance of Ships

", Int. Sem. Theor. Wave Resist., Ann Arbor, 1963
28. Ogiwara, S., Maruo H., & Ikehata, M.;"On the Method for Calculating the Approximate Solution of Source Distribution over the Hull Surface", JSNA, Vol. 126, 1969
29. Kotik, J. & Morgan, R.;"The Uniqueness Problem for Wave Resistance Calculated from Singularity Distribution which are Exact at Zero Froude Number", JSR, Vol. 13, 1969
30. Hess, J.L. & Smith, A.M.O.;"Calculation of Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three-Dimensional Bodies", JSR, Vol. 8, 1964
31. Dawson, C.W.'"A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems", Proc. of the 2nd Inter. Conf. on Numerical Ship Hydro., Univ. of Califonia, Berkeley, 1977
32. Gadd, G.E.;"An Ppproach to the Design of Low Resistance Hull Forms", 6th Symp. Naval Hydrodynamics, Washington D. C., 1966
33. Guilloton, R.;"L'etude Theorique du Bateau en Fluide Parfait", Bull. Ass. Tech. Mar. Aeronaut. Vol. 64, 1964
34. Emerson, A.;"The Calculation of Ship Resistance' An Application of Guilloton's Methdo", Trans. Inst. Naval. Arch., Vol. 109, 1967
35. Yim, B.'"Higer Order Wave Theory of Ships", JSR, Vol. 12, 1968
36. Wehausen, j.v.;"Use of Lagrangian Coordinates for Ship Wave Resistance(1st & 2nd Order Thin Ship Theory)", JSR, Vol. 13, 1969
37. Eggers, K.W.H.;"An Evaluation of the Wave Flow around Ship Forms with Application to 2nd Order Wave Resistance Calculations", SIT, Davidson Lab., SIT-DL-70-1423, 1970
38. Hong, Y.S.;"Numerical Calculation of 2nd Order Wave Resistance using Lagrangian Coordinates", Proc. of the Wofkshop on Ship Wave Resistance, DTNSRDC, Bethesda, 1979, PP. 339-353
39. Ogilvie, T.F.,;"Singular Perturbation Problems in Ship Hydrodynamics", 8th Symp. Naval Hydrod., Pasadena, 1970
40. Wigley, W.C.S.;"A Note on Wave Resistance in a Viscous Fluid", Schiffstechnik, Vol. 14, 1967
41. Havelock, T.H.;"Wave Resistance : Some Cases of Unsymmetrical Forms", Proc. Roy. Soc. Ser. A 110, 1926
42. Sretenskii, L.N .;"Sur la Resistance due aux Vagues d'un Fluide Visqueux", Proc. Symp. Behaviour Ships Seaway, Wageningen, 1957
43. Wu, T.Y.;"Interaction between Ship Waves and Boundary Layer", Int. Sem. Theor. Wave Resist., Ann Arbor, 1968
44. Brard, R;"Viscosity, Wake, and Ship Waves", JSR, Vol. 14, 1970
45. Beck, R.F.;"The Wave Resistance of a Thin Ship with a Rotational Wake", JSR, Vol. 15, 1971
46. Milgram, J.H.;"The Effect of a Wake on the Wave Resistance of a ship", JSR, Vol. 13, 1969
47. Eggers, K.W.H.;"Second Order Wave Resistance & Related Topics", Proc. of the Workshop on Ship Wave Resistance, DTNSRDC, Bethesda, 1979
48. Gadd, G.E.;"Contribution to Workshop on Ship Wave Resistance Computation", of the Workshop on Ship Wave Resistance, DTNSRDC, Bethesda, 1979
49. Suzuki, K.;'Boundary Integral Equation Method for the Linear Wave Resistance Problem", 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrod., 1985
50. Noblesse, F.;"Numerical Study of a Slender-Ship Theory of Wave Resistance", JSR, Vol.29, No.2, 1985
51. Maruo, H., et. al.;"Computation of Ship Wave Pattern by the Slender Body Approximation", JSNA Vol.154, 1983
52. Brandsman, F.J. & Hermans, A.J.;"A Quasi-Linear Free Surface Condition in Slow Ship Theory", Schiffstechnik, Bd.32(1), 1985
53. Eggers, K.;"A Comment on Free Surface Conditions for Slow Theory and Rqy Tracing", schiffstechnik, Bd.32(1), 1985
54. Tulin, M.;"Surface Waves From the Ray Point of View", 15th Symp. Naval Hydrod., 1984
55. Maruo, H.;"Problems in Ray Theory for Ship Waves", schiffstechnik, Bd.32(4), 1985
56. Chung, Y,K,;"Ray Theory and Kelvin Wave", JSR, Vol. 28, No,3, 1984
57. Miloh, T. & Dagan, G.;"A Study of Nonlinear Wave Resistance Using Integral Equation in Fourier Space", JFM, Vol. 159, 1985
58. Van Eseltine, R.T. & Haussling, H. J.;"Flow about Transom Sterns", 3rd Int. Conf. Num. Ship Hydrod., 1985
59. Coleman, R. M.;"Nonlinear Flow about a Three

Dimensional Transom Stern", 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrod., 1985

60. Miyata, H., Nishimura, S., & Kajitani, H.;"Finite Difference Simulation of Non-Breaking 3-d Bow Waves and Breaking 2-d Bow Waves", 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrod., 1985
61. Patel, V. C., et. al.;"Free Surface Boundary Layer and the Origin of Bow Vortices", 2nd Int. Sym. Ship Viscous Resis., Goethenberg, 1985
62. Fry, D.J. & Kim, Y.H.;"Bow Flow Field of Surface Ships", 15th Symp. Naval Hydrod., 1984
63. Maruo, H. & Ogiwara, S.;"A Method of Computation for Steady Ship Waves with Nonlinear Free Surface Conditions", 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrod., 1985
64. Xia, F.;"Numerical Calculations of Ship Flows, with Special Emphasis on the Free Surface Potential Flow", Ph.D Thesis, Chalmers Univ. Tech., 1986
65. Hinatsu, M. & Takeshi, H.;"A Calculation Method for Resistance Prediction Including Viscid-Inviscid Interaction", 2nd Int. Symp. Ship Viscous Resist., 1985
66. Stern, F.;"Influence of Waves on the Boundary Layer of a Surface Piercing Body", 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrod., 1985
67. Wang, H.T.;"Calculation of Viscous Effects on Ship Wave Resistance Using Various Simplified Boundary Layer Approaches", 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrod., 1985
68. Doi, Y.,Kajitani, H. & Kitamura, T.;"Effects of Boundary Layer and Wake on Characteristics of Stern Waves", JSNA, Vol. 159, 1986