대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 53, No. 1, pp. 62-68, February 2016
eISSN:2287-7355, http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2016.53.1.62

수정된 방사 에너지법과 단파장 영역 보정법을 이용한 파랑 중 부가저항 추정에 관한 연구

오승훈† · 양진호
현대중공업 선박연구소

A Study on Estimation of Added Resistance in Waves Using Modified Radiated Energy Method and Short Wave Correction Method

Seunghoon Oh† · Jinho Yang
Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.

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.

A simple calculation tool for added resistance in waves is developed to utilize for initial design or embedded module for navigation support system. In order to select an appropriate calculation method for added resistance in waves, three methods (drift method, integrated pressure method, radiated energy method) based on strip method are applied to Wigley I and KVLCC2. The methods for added resistance in waves give the underestimated results because it is difficult to consider nonlinear effects due to reflected wave. We apply asymptotic (Faltinsen's method) and empirical formula (NMRI's method) to improve the accuracy for short wave length region. In comparison with experimental results, the combination of radiated energy method and short wave correction method of NMRI is the most reasonable. However, a simple sum of results calculated by two methods gives rise to the overestimation of added resistance for short wave length region because added resistance of radiated energy method exits in total reflection region. To overcome this problem, modified radiated energy method is proposed using correction coefficient defined by reflection coefficient of NMRI's method. Finally, added resistance in regular waves is composed of added resistance of modified radiated energy method and that of short wave correction method of NMRI. Estimated added resistance in regular waves is validated by comparison with experimental results of other research groups.

Keywords : Added resistance in waves(파랑 중 부가저항), Strip method(스트립방법), Modified radiated energy method(수정된 방사에너지법), Short waves(단파), Empirical formula(실험식)

1. 서 론

최근 세계적으로 친환경과 에너지 절감에 대한 관심이 증가하고 있다. 국제해사기구(IMO)는 선박의 온실가스 배출량을 규제하기 위하여 에너지효율설계지수(EEDI), 에너지효율운항지수(EEOI)와 같은 관련규제를 제정하여 적용하고 있다. 이런 국제사회의 분위기에 발 맞추어, 조선 및 해운업계에서는 선박의 운항 효율을 향상시키기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 특히 선박의 파랑 중 부가저항 해석도 이러한 측면에서 재조명 되고 있다.

선박의 파랑 중 부가저항 해석은 전통적으로 포텐셜 이론을 기반한 연구가 대부분이며 이를 검증하거나 보완하기 위한 시험 (Gerritsma & Beukelman, 1972; Storm-Tejsen, et al., 1973)들이 활발히 수행되었다. 규칙파 중 부가 저항 추정법으로는 에너지와 운동량 보존식을 이용하는 Maruo (1963) 방법, 선체 표면의 압력을 적분하는 압력적분법 (Boese, 1970; Faltinsen, et al., 1980) 그리고 에너지보존을 이용한 방사 에너지법 (Gerritsma & Beukelman, 1972)이 있다. Maruo 방법의 경우 입사파의 파장 및 조우각에 상관없이 활용 가능하나 실용적인 관점에서 근사적인 코친함수(Kochin function)를 사용해야 한다. 방사 에너지법은 적용이 간편하고 선수 및 선수 사파 시험과 비교적 잘 일치하나 이론적 근거가 명확하지 않다 (Faltinsen, et al., 1980). 추가로 Maruo 방법을 간략화한 Maruo & Ishii (1976) 방법을 살펴보면 방사 에너지법과 유사한 형태를 보이며 두 방법간의 유사성을 확인 할 수 있다. 선체 표면의 압력을 직접 적분하는 방법의 경우 수식이 복잡하나 물리적 해석이 용이하다 (Faltinsen, et al.,

Received : 8 October 2015 | Revised : 8 January 2016 | Accepted : 20 January 2016
† Corresponding author : Seunghoon Oh, osh541@hhi.co.kr

1980). 앞서 언급한 방법을 이용하여 부가저항을 계산 할 경우, 운동이 거의 없는 단파장 영역에서 큰 오차를 발생하는 것은 널리 알려진 사실이다. 이를 보완하기 위하여 단파장 영역의 부가저항을 추정하는 방법이 지속적으로 연구되어 왔다 (Fujii & Takahashi, 1975; Faltinsen, et al., 1980; Kwon, 1987; Tsujimoto, et al., 2008; Kuroda, et al., 2008).

본 연구에서는 초기 설계에서의 활용 또는 운항 보조 시스템에 탑제가 가능하도록 빠르고 비교적 정확한 스트립 이론을 이용하여 파랑 중 부가저항 계산모듈을 개발하였다. Desingularized indirect boundary integral method를 이용한 2차원 단면의 동유체력과 STF 방법(S-T-Fmethod, Salvesen, et al., 1970)을 이용하여 선박의 운동을 계산하였다. 파랑 중 부가저항 계산을 위하여 표류력 방법(Joosen, 1966), 압력 적분법(Boese, 1970) 및 방사 에너지법 (Gerritsma & Beukelman, 1972)에 대하여 검토하고 Wigley I과 KVLCC 2 선형의 파랑 중 부가저항을 계산하였다. 단파장 영역의 부가저항을 개선하기 위해 이론적 점근식 (Faltinsen, et al., 1980)과 경험식 (Tsujimoto, et al., 2008)을 검토하였다. 전반사 영역에서 발생되는 방사 에너지법의 모순을 개선하기 위해 보정계수를 도입하여 수정된 방사에너지법을 제안하였다. NMRI 단파장 영역 보정법 (Kuroda, et al., 2008)과 수정된 방사에너지법을 이용하여 부가저항을 계산하고 타기관에서 수행된 모형시험과 비교하여 정도를 검증하였다.

2. 규칙파 중 파랑중 부가저항 추정법

파랑 중 선박의 부가저항을 발생시키는 주된 요인은 입사파에 의한 선체의 운동과 반사파의 영향이다. 마찰에 의한 점성저항의 영향이 존재하나, 앞서 언급한 요인과 비교하여 그 양이 미소하므로 일반적으로 점성의 영향은 무시한다. 따라서 전통적으로 파랑 중 부가저항은 포텐셜이론에 기반한 연구들이 다수이다. Arribas (2007)는 실용적인 관점에서 적용이 간편한 방법들을 표류력 방법 (Joosen, 1966), 압력 적분법 (Boese, 1970) 및 방사에너지법 (Gerritsma & Beukelman, 1972) 총 3 가지로 분류하여 소개하였으며 본 연구에서도 동일한 분류에 따라 파랑 중 부가저항 추정법을 검토하였다.

2.1 표류력 방법

$$R_{aw} = \frac{1}{2}\frac{\omega_e^3}{g}\left[B_{33}\left|x_3\right|^2 + B_{55}\left|x_5\right|^2\right] \quad (1)$$

여기서

ω_e : encounter frequency

g : acceleration of gravity

표류력 방법은 선체를 둘러싼 검사체적의 에너지와 운동량의 보존을 이용하여 유도된다. 본 방법은 Maruo (1963)가 처음 유도 했고 Joosen (1966)이 slenderness parameter를 도입하여 식 (1)을 유도하였다. 여기서 x_3과 x_5는 상하동요의 종동요를 나타내며 B_{33}과 B_{55}는 상하동요의 종동요의 조파감쇠 계수를 나타낸다. 식 (1)을 살펴보면 선체 운동에 의한 방사파만 고려되고 산란효과는 무시됨을 알 수 있다. 파 주파수를 조우주파수로 수정함으로써 전진속도의 영향을 고려하고 있다.

2.2 압력 적분법

Boese (1970)는 선박 접수표면의 압력을 길이방향으로 적분함으로써 식 (2)를 유도하여 부가저항을 계산하였다.

$$R_{aw} = -\frac{\rho g}{2}\int_{WL}\overline{\zeta_r^2}\,N_1 dl - \frac{\rho\nabla}{2}\omega_e^2\,Re\left\{x_3 x_5^*\right\}$$

여기서 (2)

$$\zeta_r = -(x_3 - x\,x_5) + \alpha\cos(-kx\cos(\beta) - ky\sin(\beta))$$

α : incident wave amplitute

k : incident wave number

β : incident wave direction

ρ : water density

∇ : ship displacement

여기서 ζ_r은 상대파 진폭을 나타내며 입사파, 상하동요(x_3), 종동요(x_5) 그리고 선체 길이방향의 위치(x)의 조합을 통해 표현될 수 있다. 식 (2)를 살펴보면 우변의 첫 항은 단면의 평균 수평력 성분의 부가저항으로 수선면의 상대파 진폭을 수선면의 x방향의 수직벡터(N_1)로 선적분한 형태로 표현된다 (Journee, 2001). 그리고 우변의 둘째 항은 수직운동 성분에 기인한 부가저항으로 상하동요의 관성력과 종동요의 곱으로 나타낼 수 있다. 여기서 윗 첨자 *는 켤레복소수를 의미한다.

2.3 방사 에너지법

방사 에너지법은 규칙파를 받는 선박이 한 주기 동안 소산하는 에너지를 이동한 거리로 나누어 계산하는 방법이다. Gerritsma and Beukelman (1972)에 의하여 식 (3)과 같이 유도되었으며 계산이 간편하고 모형시험과 상관성 높은 결과를 보여주어 널리 사용되고 있다. 식 (3)에서 단면의 상대 수직속도(V_Z)는 단면의 입사파 수직 속도(α'_{w3}), 상하동요 속도($\dot{x}_3$), 종동요 속도($\dot{x}_5$), 종동요(x_5), 선박속도(U) 그리고 단면의 길이방향 위치(x)의 조합으로 표현될 수 있다. 여기서 단면의 입사파 수직속도는 단면의 평균흘수(D_m)에서 정의 된다. 그리고 a_{33}과 b_{33}은 단면의 수직 부가질량 계수와 수직 조파감쇠 계수를 나타낸다.

$$R_{aw} = \frac{Energy}{Distance} = \frac{\frac{\pi}{\omega_e}\int_L b_{33}' V_z V_z^* dx}{\left(U - \frac{c}{\cos(\beta)}\right) T_e}$$

$$= \frac{-k\cos(\beta)}{2\omega_e}\int_L \left(b_{33} - U\frac{da_{33}}{dx}\right) V_z V_z^* dx \quad (3)$$

여기서

U : ship speed

c : wave phase velocity

T_e: encounter period

$$b'_{33} = b_{33} - U\frac{da_{33}}{dx}$$

$$V_z = a'_{w3} - (\dot{x}_3 - x x_5 + U x_5)$$

$$a'_{w3} = i\omega_0 \alpha e^{kD_m} e^{-ikx\cos(\beta)}$$

3. 운동 및 파랑 중 부가저항 계산

3.1 운동해석

부가저항은 반사(reflection)와 선박의 운동 성분으로 구성되기 때문에 정확한 선박의 운동예측은 정확한 부가저항 예측으로 이어진다. 본 연구에서는 운동을 계산하기 위하여 STF방법 (Salvesen, et al., 1970)을 이용하였다. 본 방법은 Fig. 1과 같이 3차원 선박의 동유체력을 2차원 단면 문제로 근사하여 계산하는 스트립 방법이다. 스트립 방법은 고주파수 가정을 통해 유도 되기 때문에 조우주파수의 낮은 경우 3 차원 효과가 우세해지므로 이론적 한계가 있다. 하지만 L/B ≥ 2.5 (ITTC, 1987)와 F_n < 0.4까지 적용 가능하므로 대부분의 상선의 운동응답을 계산할 수 있다.

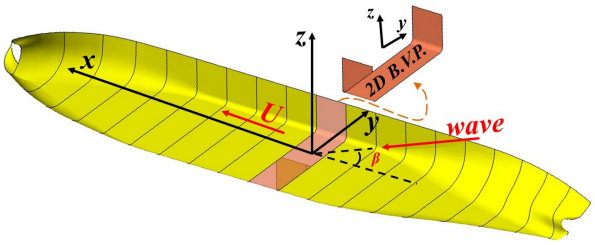

Fig. 1 Coordinate system for strip method

2차원 단면의 동유체력 계산을 위하여 desingularized indirect boundary integral method를 사용하였다. 특이점(source point)을 Fig. 2와 같이 유체면 외부에 배치하는 desingularized technique (Cao, et al., 1991)을 이용하여 계산의 효율 및 코드 작성의 편의를 향상 시켰다. 주파수에 따라 격자를 자동 생성하였고 대칭면을 기준으로 mirror source를 이용하였다. 계산 영역의 요소 수, 계산영역 및 요소 분포는 반복적인 수치시험을 수행하여 결정하였다.

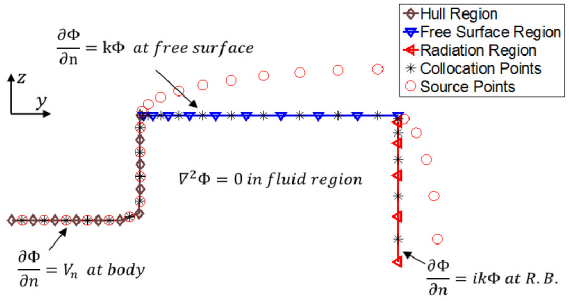

Fig. 2 Two dimensional boundary value problem

본 연구에서 Fig. 3과 같이 Wigley I 과 KVLCC 2 선형의 대한 계산을 수행하였다. 제원은 Table 1에 나타내었다.

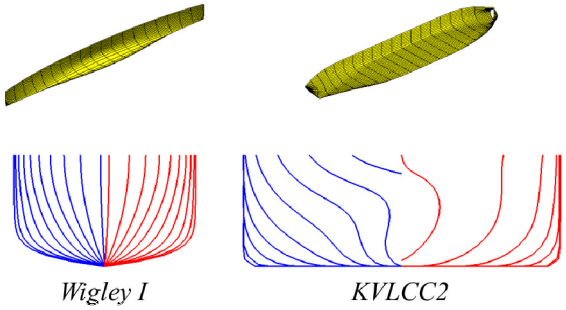

Fig. 3 Two hull-forms for computation

Table 1 Main dimension of test models

	Wigley I	KVLCC 2
F_n	0.2	0.142
L(m)	10.0	320.0
B(m)	1.0	58.0
T(m)	0.625	20.8
Cb	0.5606	0.8098

Figs. 4 ~ 7은 Wigley I 과 KVLCC 2 선형에 대하여 선수파중 상하동요와 종동요에 대한 운동응답의 계산 결과이다.

계산된 운동응답을 델프트 공대 (Journee, 1992), 오사카 대학(OU; Sadat-Hosseini, et al., 2013) 및 서울대학교(SNU; Park, et al., 2014)의 모형 시험 결과와 비교하였다.

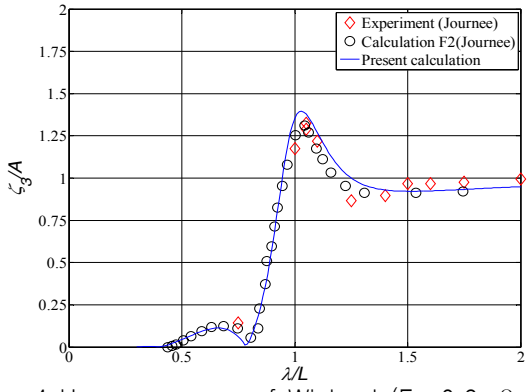

Fig. 4 Heave response of Wigley I (Fn=0.2, β=180)

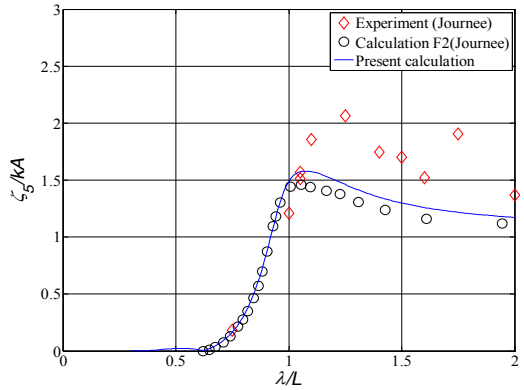

Fig. 5 Pitch response of Wigley I (Fn=0.2, β=180)

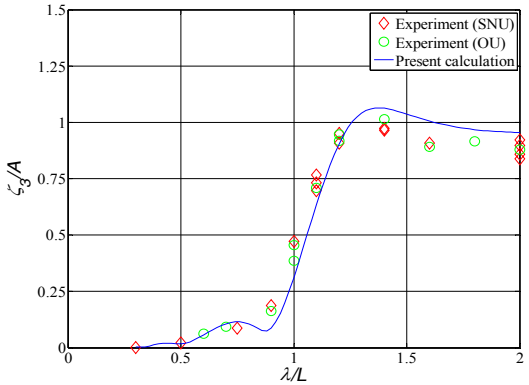

Fig. 6 Heave response of KVLCC 2 (Fn=0.142, β=180)

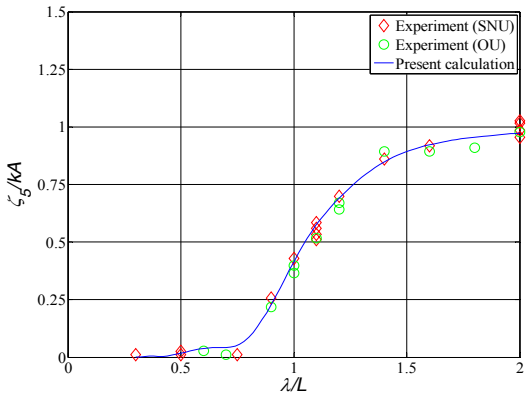

Fig. 7 Pitch response of KVLCC 2 (Fn=0.142, β=180)

Wigley 선형의 경우, 상하동요는Journee의 실험 및 계산(F2: modified strip method)에 상당히 유사한 결과를 보인다. 하지만 종동요는 Journee의 계산결과와 유사하나 실험과 다소 차이를 보이고 있다. 이는 스트립 방법의 한계로 생각된다. Wigley 선형과 비교하여 저속에서 계산이 수행된 KVLCC 2 선형의 경우, 상하동요와 종동요 모두 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3.2 파랑 중 부가저항 계산 및 검토

앞장에서 검토된 3가지 부가저항 추정법을 이용하여 Wigley I과 KVLCC 2 선형에 대하여 계산을 수행하여 Fig. 8과 9에 나타내었다. Wigley I의 경우, 압력 적분법(boese)과 방사 에너지법(G&B)은 모형시험에 근접한 결과를 보여주고 있다. 표류력 방법(joosen)의 경우, 부가저항의 최대값이 발생하는 파장은 유사하나 부가저항이 과대 추정되고 있다. 저속 비대선인 KVLCC 2의 경우, 세가지 방법들이 모두 차이를 보이고 있다. 우선 표류력 방법의 결과는 부가저항의 최대값이 발생하는 파장도 차이 날뿐만 아니라 부가저항 또한 큰 값이 예측되고 있다.

압력 적분법은 상대운동이 큰 장파장영역에서 모형시험과 비교하여 약간 큰 값이 예측되지만 상대운동이 작은 단파장영역에서는 작은 부가저항이 예측되었다. 방사 에너지법은 모형시험과 비교하여 부가저항이 전체적으로 작으나 경향적으로 가장 유사하였다.

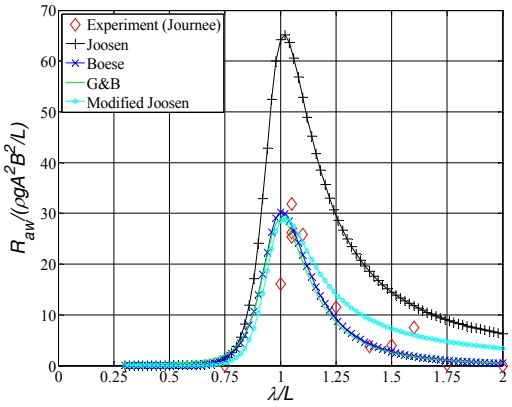

Fig. 8 Added resistance for Wigley I (Fn=0.2, β=180)

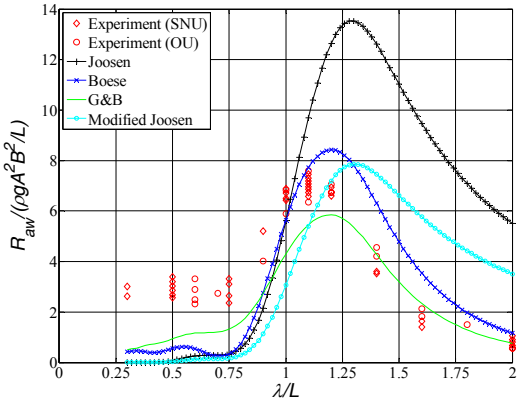

Fig. 9 Added resistance for KVLCC 2 (Fn=0.142, β =180)

2가지 선형의 결과를 종합해보면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 표류력 방법은 모든 선형에서 실험과 비교하여 부가저항이 2배 가까이 큰 값을 예측하였다. 수식의 형태가 유사한 방사 에너지법을 참고하여 표류력 방법의 수식을 식 (4)로 수정할 수 있다.

$$R_{aw} = \frac{\omega_e k}{2}\left[B_{33}\left|x_3\right|^2 + B_{55}\left|x_5\right|^2\right] \tag{4}$$

여기서

$$k = \frac{\omega_0^2}{g}$$

수정된 수식으로 계산한 결과(modified joosen)를 Fig. 8과 9에서 살펴보면 다른 추정법과 정량적으로 유사한 결과를 보인다. 이는 Joosen과 달리 단순히 조우주파수를 변경하는 것으로 부가저항에 대한 전진속도의 효과를 반영할 수 없음을 확인 할 수 있다. 압력 적분법은 상대운동이 적은 단파장 영역에서 부가저항이 급격히 줄어듦을 보인다. 실험과 비교할 때 장파장에서 다소 큰 값을 예측하고 있다. 방사 에너지법은 3 가지 방법 중 가장 적합한 방법으로 보인다. 하지만 저속 비대선의 경우 단파장 영역에서 모형시험과 여전히 큰 차이를 보이고 있다. 이는 많은 연구자들이 지적했듯 스트립 방법의 한계로 생각된다. 이를 보완하기 위하여 단파장 영역 보정에 대한 검토가 필요하다.

4. 단파장 영역 보정 및 부가저항 계산 정도 향상

단파장 영역에서 선박의 부가저항을 계산할 때, 선박의 운동이 거의 없고 선수부에서 반사되는 파를 고려해야 하기 때문에 스트립 방법으로 계산하기 어렵다. 이를 보완하기 위하여 많은 실험과 연구가 진행되었으며 이와 관련된 경험식이 발표되었다. 본 연구에서는 Faltisen, et al. (1980)의 이론적 접근식과 NMRI의 경험식(Tsujimoto, et al., 2008; Kuroda, et al., 2008)을 검토하고 파랑 중 부가저항 계산 보정에 적합한 방법을 선택하고자 한다.

4.1 Faltisen의 단파장 보정식

Faltinsen, et al. (1980)은 선체를 수선면에서 수직벽을 갖는 무한 흘수의 실린더로 가정함으로써 흘수선면 형상만을 고려하는 2차원 문제로 치환하여 아래와 같은 점근수식 (5)를 유도하였다. 수선 적분 구간은 Fig. 10과 같이 파에 직접 노출된 구간이다.

$$R_{awR} = \frac{1}{2}\rho g \alpha^2 \int_{WL} [\sin^2(\theta-\beta) + \frac{2\omega_0 U}{g}(1+\cos(\theta)\cos(\theta-\beta))]\sin(\theta)\,dl \quad (5)$$

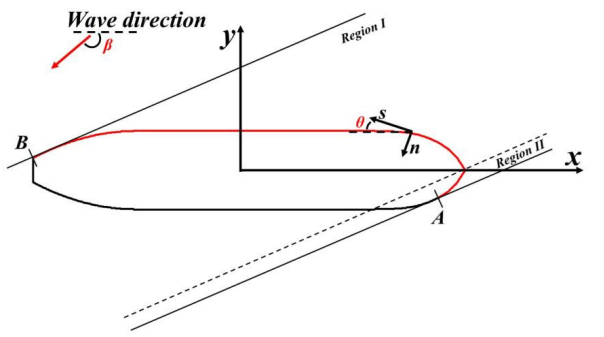

Fig. 10 Coordinate system for the added resistance in short waves

4.2 NMRI의 단파장 보정식

최근 일본의 NMRI(National Maritime Research Institute)에서는 실험을 통해 얻어진 계수를 적용하여 단파장 영역의 부가저항 정도를 높이는 연구가 진행된 바 있다 (Tsujimoto, et al., 2008; Kuroda, et al., 2008).

$$R_{awR} = \frac{1}{2}\rho g (\alpha C_R)^2 B B_f (1 + C_u F_n) \quad (6)$$

여기서

$$B_f = \frac{1}{B}\left[\int_I \sin^2(\theta-\beta) \cdot \sin(\theta)\,dl + \int_{II} \sin^2(\theta+\beta) \cdot \sin(\theta)\,dl\right]$$

$$C_R = \frac{\pi I_1\left(\frac{\omega_e^2 d}{g}\right)}{\sqrt{\pi^2 I_1^2\left(\frac{\omega_e^2 d}{g}\right) + K_1^2\left(\frac{\omega_e^2 d}{g}\right)}}$$

$$C_u = \begin{cases} -310 B_f + 68 & \text{for } B_f < \frac{58}{310} \\ 10 & \text{for } B_f \geq \frac{58}{310} \end{cases}$$

식의 기본 형태는 Fujii and Takahashi (1975)의 식과 동일하며 보정계수를 통하여 보완하였다. 수식은 식 (6)과 같다.

4.3 단파장 영역의 보정식의 계산 및 검토

두 가지 보정식을 이용하여 KVLCC 2 선형의 단파장 영역의 부가저항을 계산하고 이를 타 기관의 모형시험 결과와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다.

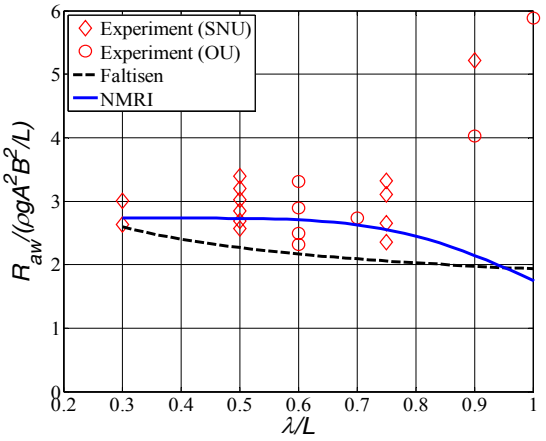

Fig. 11 Added resistance in short waves for KVLCC 2 (Fn=0.142, β=180)

선형 특성상 비대선이므로 두 보정식 모두 모형시험과 유사한 결과를 보여주고 있고 특히 NMRI의 단파장 보정식이 모형시험에

더욱 가까운 결과를 보여주고 있다. Yang, et al. (2015)에 의해 수행된 단파장 보정식의 정확도 평가에 의하면 NMRI 수식은 얇은 선형과 뭉툭한 선형 모두 실험과 유사한 결과를 보인다고 서술하였다. 따라서 파랑 중 부가저항 계산 모듈에 적합한 보정법은 NMRI의 단파장 보정식으로 사료된다.

4.4 수정된 방사 에너지법과 단파장 영역 보정

NMRI의 단파장 보정식의 특성을 파악하기 위해 반사계수(CR)의 제곱항을 Fig. 12와 같이 나타내었다. 반사계수(CR)가 1이되면, 입사파의 전반사(total reflection)를 의미하며 선체 상대운동에 대한 부가저항은 존재하지 않아야 한다. 하지만 Fig. 12에서 알 수 있듯, 전반사 영역에서의 방사에너지법의 부가저항이 존재하며 NMRI의 단파장 보정식을 단순히 더하여 적용하기에는 물리적으로 모순된다. 따라서 NMRI의 단파장 보정식을 적용하기 위해 단파장 영역에서 발생되는 모순된 부가저항을 방사에너지법에서 제거하여야 한다. 방사에너지법의 경우, 선체 단면의 상대 수직속도를 이용하여 부가저항을 계산하며 단면의 상대 수직속도(V_Z)는 단면의 입사파 수직 속도(α'_{w3}), 상하동요 속도(x_3), 종동요 속도(x_5) 그리고 종동요(x_5)의 조합으로 표현 된다. 단파장 영역에서 선체의 상하동요와 종동요는 거의 없으므로 단파장 영역에서 발생되는 모순된 부가저항은 입사파의 수직속도(α'_{w3})의 영향임을 알 수 있다. 그러므로 단면의 입사파 수직속도를 보정하여 단파장 영역에서 발생되는 모순된 부가저항을 개선할 수 있다. 단면의 입사파 수직속도를 보정하기 위해 반사계수(C_R)을 이용하여 정의된 보정계수(C_D)를 식 (7)과 같이 도입하였다.

$$C_D = 1 - C_R = 1 - \frac{\pi I_1\left(\frac{\omega_e^2 d}{g}\right)}{\sqrt{\pi^2 I_1^2\left(\frac{\omega_e^2 d}{g}\right) + K_1^2\left(\frac{\omega_e^2 d}{g}\right)}} \qquad (7)$$

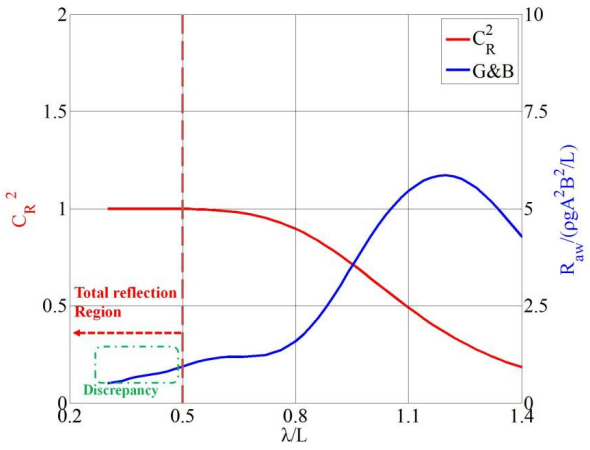

Fig. 12 Discrepancy of radiation energy method

입사 파의 진폭 반사계수(C_R)를 단순히 곱한 식 (6)과 같이, 보정계수(C_D)를 입사 파의 진폭에 곱하는 방식으로 입사 파 수직속도를 보정하여 상대 수직속도를 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$V_z = \alpha'_{Mw3} - (\dot{x}_3 - x\dot{x}_5 + Ux_5) \qquad (8)$$

여기서

$$\alpha'_{Mw3} = i\omega_0 (C_D \alpha) e^{kD_m} e^{-ikx\cos(\beta)}$$

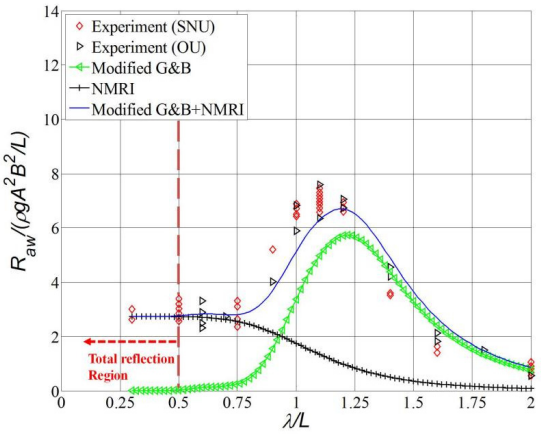

Fig. 13 Comparison of added resistance for KVLCC 2 (F_n=0.142, β=180)

수정된 상대 수직속도로 계산된 방사에너지법을 수정된 방사에너지법(modified G&B)이라 정의하고 계산된 부가저항을 Fig. 13에 나타내었다. 수정된 방사 에너지법의 부가저항을 살펴보면 단파장 영역에서 발생되는 모순된 부가저항 성분이 제거됨을 확인할 수 있다. 수정된 방사에너지법을 NMRI의 단파장 보정식을 이용해서 보정하였고 최종적으로 계산된 파랑 중 부가저항은 Fig. 13의 "Modified G&B + NMRI"이다. 타 기관의 모형시험을 통해 본 연구에서 제안된 방법이 정량적, 정성적으로 잘 일치함을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 초기 설계 또는 운항 보조 시스템 탑재에 활용 가능한 계산모듈 확보를 위해 스트립 방법을 이용하여 파랑 중 부가저항 계산모듈을 개발하였다. 스트립 이론을 이용한 파랑 중 부가저항 추정법과 단파장 영역의 이론적 점근식과 경험식을 검토하였다. 검토된 방법 중 방사 에너지법과 NMRI의 단파장 보정식이 가장 적합한 방법으로 판단된다. 전반사 영역에서 발생되는 방사 에너지법의 모순을 해결하기 위해 수정된 방사에너지법을 제안하였다. 수정된 방사 에너지법과 NMRI의 단파장 보정식을 이용하여 최종적인 파랑 중 부가저항을 추정하였고 타 기관의 모형시험과 잘 일치함을 확인하였다.

References

Arribas, F.P., 2007. Some Methods to Obtain the Added Resistance of a Ship Advancing in Waves. *Ocean Engineering*, 34, pp.946-955.

Boese, P., 1970. Eine einfache Methode zur Berechnung der Wiederstandserhohung eines Schiffes in Seegang. *Journal Schiffstechnik-Ship Technology Research*, 17(86).

Cao, Y. Schultz, W. & Beck, R.F., 1991. Three-dimensional Desingularized Boundary Integral Methods for Potential Problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids,* 12, pp.785-803.

Faltinsen, O.M. Minsaas, K.J. Liapis, N. & Skjørdal, S.O., 1980. Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway. *Proceeding of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 6-10 October 1980, pp.505-529.

Fujii, H. & Takahashi, T., 1975. Experimental study on the resistance increase of a ship in regular oblique waves. *Proceeding of the 14th ITTC*, Ottawa, September 1975, pp.351-360.

Gerritsma, J. & Beukelman, W., 1972. Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship. *International Shipbuilding Progress*, 19(217), pp.285-293.

ITTC Seakeeping Commitee, 1987. Report of the seakeeping commitee. *Proceefings of 18th International Towing Tank Conference ITTC,* Siciety if Naval Architects of Japan, Kobe, 1 October 1987, pp.401-468.

Joosen, W.P.A., 1966. Added Resistance in Waves. *In Proceedings of 28th International Towing Tank Conference*, 1, pp.401-468.

Journee, J.M.J., 1992. *Experiments and calculations on four Wigley hull forms, report 0909-DUT-92*. Delft: Delft University of Technology.

Journee, J.M.J., 2001. *Theoretical Manual of SEAWAY*. Delft University of Technology: Delft.

Kuroda, M. Tsujimoto, M. Fujiwara, T. Ohmatsu, S. & Takagi, K., 2008. Investigation on Components of Added Resistance in Short Waves. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 8, pp.171-176.

Kwon, Y.J., 1987. A Research on the Added Resistance Due to Wave Reflection. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 24(1), pp.35-41.

Maruo, H., 1963. Resistance in Waves. *Researches on Seakeeping Qualities of Ships in Japan. The Society of Naval Architecture of Japan, 60th Anniversary Series*, 8, pp.67-102.

Maruo, H. & Ishii, T., 1976, Calculation of Added Resistance in Head Sea Waves by Means of a Simplified Formula. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 140, pp.136-141.

Park, D.M. Seo, M.G. Lee, J. Yang K.K. & Kim, Y., 2014. Systematic Experimental and Numerical Analyses on Added Resistance in Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(6), pp.459-473.

Sadat-Hosseini, H. Wu, P.C. Carrica, P.M. Kim, H. Toda, Y. & Stern, F., 2013. CFD Verification and Validation of Added Resistance and Motions of KVLCC 2 with Fixed and Free Surge in Short and Long Head Waves. *Ocean Engineering*, 59, pp.240-273.

Salvesen, N., Tuck, E.O., & Faltisen, O. 1970. Ship Motions and Sea Loads. *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, 78, pp.250-287.

Storm-Tejsen, J. Yeh, H.Y.H. & Moran, D.D., 1973. Added Resistance in Waves. *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, 81, pp.109-143.

Tsujimoto, M. Shibata, K. Kuroda, M. & Takagi, K., 2008. A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 8, pp.177-184.

Yang, K.K. Seo, M.G. & Kim, Y., 2015. Analysis of Added Resistance in Short Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(4), pp.338-348.

오 승 훈 양 진 호