

바람직한 선속 시운전결과 해석법 - ISO 15016법? / MARIN법(STA-JIP, STAP)?

권 영 중(울산대학교 조선해양공학부)

1. 서 론

시운전의 주요 목적들을 열거해 보면 다음과 같다.
즉,

- 선박 건조자와 선주와의 사이에 계약조건(속력, 기관, 동력, 연료소비율 등과 관련된)의 만족을 증명하기 위하여,
- 실선으로부터 미래의 선박설계 자료를 얻기 위하여,
- 선박의 항해자료(예컨대 추진기 회전수와 선박 속력과의 관계)를 얻기 위하여,
- 실선/모형선의 상관관계를 얻기 위하여.

해상의 바람 및 파도 등은 장소 및 시간에 따라 항상 변하고 있는 반면 시운전은 실제해상에서 수행되므로, 그 결과를 바람, 파도 등의 외력이 없는(Calm Weather) 상태의 값으로 환산해 주어야지만 비로소 상기한 목적이 달성될 것은 명약관화하다고 하겠다. 이를 위하여 여러 단체가 많은 시운전 결과 해석법을 제안하였다.

하지만 16회 국제수조회의[9]에서 지적된 바처럼 파도의 영향을 효과적으로 고려하기 위한 방법의 결핍으로 시운전 결과의 해석이 부정확하게 수행되고 있는 것이 사실이다. 파도의 영향(특히 파장이 선장보다 짧은 경우에 가장 큰 영향을 미치는 반사파의 영향: 이 영향 한 가지만으로도 시운전 속도가 1.5노트까지 차이가 났음이 ITTC에서 인정됨)의 중요성은 비단 1981년도 국제수조회의(ITTC)에서

뿐만 아니라 1978년의 ITTC[10]에서도 위원회 결론으로 강조된 바 있으며, 많은 연구자들이 그 필요성을 역설하고 있다[예컨대 Takahashi(1977), Laredo et al.(1977)]. 과거에 시운전결과 1노트의 계약속도가 미달되었다는 이유로 선박의 인도가 거부되었던 사례가 국내에서도 있었음을 감안할 때 1.5노트의 영향은 실로 무시할 수 없는 영향임에 틀림없다. 특별히 조선불황기에는 선주로부터 악의적인 문제 제기 까지 종종 발생됨으로 해석법의 개선이 절실하다고 하겠다.

이에 그 동안 많은 기관들이 나름 데로의 서로 다른 시운전해석법들을 제안하고 있으며, 최근에는 국제표준기구(ISO)도 8년 동안의 산고 끝에 전 세계 ISO 회원국의 의견을 수렴해서 선속시운전해석법의 표준가이드(ISO 15016)를 제정한 바 있으며, 이 가이드가 발표된 이후에도 네덜란드선박연구소(MARIN)가 1994년에 제안한 법(STAP) 이외에 또한 가지의 법(STA-JIP)을 제안하고 있다. 이들 법의 핵심 쟁점 요소 해석법에는 본 필자가 제안한 법 3가지([13],[27],[28])가 인용되고 있기도 하므로, 이들 선속시운전 해석법들의 주요 차이점을 간략히 살펴보고자 한다.

2. 선속시운전 결과 해석법의 기본 사항

불규칙적으로 시시각각 변하는 해상에서 수행되는 선속 시운전 결과를 Calm Sea 상태로 환산하기

위해서는 해상의 바람, 파랑 및 표면 조도 등의 영향에 따른 손실량을 신빙성 있게 구할 수 있어야 할 것이다. 이 들 중에서 바람, 파랑 및 표면 조도 영향 해석법의 기본 사항을 요약하면 아래와 같다. 이들 부가 저항에 따른 프로펠러효율 변화 값 및 속도 손실량 이나 동력증가량을 찾는 방법 등 좀 더 상세한 사항은 문헌[13] 및 문헌[44]를 참조하기 바란다.

2-1. 바람 부가저항

바람 부가저항(R_{wind}) 은 아래와 같이 표기된다.

$$R_{wind} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_a \cdot A \cdot V_r^2 \quad (1)$$

여기서, C는 저항계수, ρ_a 는 공기 밀도, A는 R_{wind} 를 위한 유효면적(통상 투영면적을 사용하지만 사풍경우가 문제임), V_r 는 바람과 선박의 상대 속도를 각각 의미한다. C를 위한 모든 방법들은 모형실험 자료에 기반을 둔 경험식들이다. 바람저항 산정법과 관련하여서는 아래와 같은 두 가지 관점에서의 오차가 발생할 수 있으므로 이의 개선 노력이 계속되고 있다. 하지만 아래에서 지적된 문제점에도 불구하고, 바람저항 산정법의 오차는 파랑부가저항법의 오차보다는 매우 작은 것으로 알려져 있으며, 풍속과 유효면적이 같은 경우는 여러 가지 방법의 결과상 차이가 최대 10% 이내인 것으로 알려져 있다 ([13],[34]).

[1] 기존 바람부가저항 산정법의 문제점

(1) 경계층(Boundary Layer)의 영향 고려 문제

: 고도에 따른 바람속도 변화 영향이다. 이를테면 같은 종류의 바람일지라도 경계층 영향 때문에 측정하는 높이에 따라서 풍속이 평균 16.5% 까지 차이가 날 수 있음을 표 1은 보여주고 있다. 바람부가저항이 상대속도의 제곱에 비례한다는 것을 감안할 때 이것은 대단히 큰 것임을 알 수 있다[식1 참조]. 따라서 시운전 때 풍속측정을 위한 풍속계(Anemometer)의 위치를 명기하도록 권장하고 있으

며, 기록이 없는 경우는 표준 고도로 합의되어 있는 해발 10 m로 간주된다. 고도와 풍속과의 관계는 식(2)와 식(3)의 두 가지 형태로 제안되어 있으며, 식(2)에서 지수 a 의 크기는 5-7등으로 아직 이론이 많은 실정이다. 한편 Isherwood[6]는 식(4)와 같은 공칭속도(Nominal Speed)의 사용을 제안하기도 했으며, Sheerer-Lynn 및 Todd는 도식적 형태(Graphic Form)의 사용을 제안한 바 있다.

$$\left(\frac{W_z}{W_h}\right) = \left(\frac{z}{h}\right)^a \quad (2)$$

$$\left(\frac{W_z}{W_h}\right) = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(h/z_0)} \quad (3)$$

$$(W_{nr})^2 = \frac{1}{h} \int_0^h (W_{rz})^2 dz \quad (4)$$

여기서, W_z 및 W_h 는 높이 z 및 h 에서의 풍속이며, z_0 는 높이파라미터(Height Parameter)이다.

(2) 사풍(Oblique Wind) 경우 발생하는 문제

상기 식(1)에서의 면적은 보통 투영면적을 사용하지만 사풍(Oblique Wind) 경우에 이렇게 하면 갑판 위 직립물체(Erection)들 사이의 바람에 따른 간섭효과 때문에 오차가 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 이를 유효하게 표시하려는 연구가 진행되고 있다. 이 분야의 연구는 특별히 독일의 B.Wagner가 많이 수행한 바 있다.

[2] 추천되는 바람부가저항 산정법

가용한 바람 부가저항 산정법들은 전부 모형실험 결과를 이용한 경험적인 방법이므로, 실제 사용하려는 선종과 유사한 선종의 모형실험 값을 이용한 방법을 찾아서 사용하면 더욱 더 정확할 것이다. 바람부가저항 산정법의 주요 발표자는 Shearer et al. (1960), Gould(1967), Wagner(1967,1968,1974), Tsuji et al. (1970), Wilson et al. (1970), Aage(1971), Isherwood(1972), van Berlekom(1974,1975,1978,1981), Townsin/Kwon(1983), Blendermann(1990,1991) 등을 들 수 있다. 또한 선종별로 제안되어 있는 바

표 1. 고도에 따른 풍속의 변화[Townsin, 1975]

Beaufort Number	Wind speed 10m above surface		Free stream wind speed	
	Mean [m/s]	Range[m/s]	Mean [m/s]	Range[m/s]
1	0.8	0.3-1.5	1.0	0.1-1.7
2	2.4	1.6-3.3	2.8	1.8-3.8
3	4.3	3.4-5.4	5.0	3.9-6.2
4	6.7	5.5-7.9	7.7	6.3-9.1
5	9.3	8.0-10.7	10.7	9.2-12.3
6	12.3	10.8-13.8	14.2	12.5-15.9
7	15.5	13.9-17.1	17.8	16.0-19.7
8	18.9	17.2-20.7	21.8	19.8-23.9
9	22.9	21.1-24.7	26.4	24.3-28.5

람부가저항 산정법의 예 54가지를 문헌[13]에서도 찾을 수 있다. 참고적으로 ISO(2002)에서 인용되고 있는 주요 바람 부가저항 산정법을 VLCC에 적용해 보았을 때 평균 차이는 7%인 것으로 나타났다 [46]. 물론 이 비교 때 상식 식(1)에서 A 및 V_r은 서로 같다고 가정하였다.

위에서 소개된 법 중에서 Isherwood[6]의 법은 제 15회 ITTC[10]에서 추천을 받은 바 있다. 또한 2002년에 최종 확정된 ISO15016[5]에서 바람 부가저항 산정법으로 Shearer(1960), Wagner[39],[40],[41],[42]), Beukelman[1], van Berlekom([34],[35],[36],[37]), Blendermann[2]법들이 예시되고 있다. 또한 Townsin/Kwon[28]법은 MARIN의 ‘STAP’에서 사용된 바 있다.

2-2. 파랑 부가저항

해양의 불규칙파에 기인된 부가저항을 직접적으로 구하여서 선속시운전해석 때 이용하는 법은 아직까지 제안되어 있지 못하므로, 일단 규칙파의 부가저항을 먼저 구하고, 이 결과와 선형화된 스펙트럼(Linear Spectrum) 법을 이용해서 구할 수밖에 없다. 파 만남진동수(Encounter Frequency, ω_e)로 표시한 선형화 스펙트럼식은 식(5)와 같이도 표기할 수 있다. 물론 이 식을 원진동수(Circular Frequency)로 표기할 경우는 입사파의 방향성 고려 항이 포함

되어야 할 것이다.

파랑 영향과 관련하여 특기할 사항은 규칙파의 부가저항 중에 짧은 파에서 영향이 큰 회절파 및 반사파의 부가저항(통칭해서 흔히 ‘반사파 부가저항’이라고 함) 추정상의 오차가 특별히 심각한 것으로 지적되고 있으며,

이 영향 한 가지만으로도 시운전 속도가 1.5노트까지 차이가 났음이 ITTC에서 인정된 바 있다[9]. 예를 들면 그림 1에서 λ/L<0.8이하 경우는 실험값이 모든 대표적 이론값들 보다 상당히 크게 나타나는 데, 이 오차가 바로 반사파부가저항의 영향으로 알려져 있다. 이 오차는 이론 산정 값에서 물체를 2차원 화하고, 선형화 하면서 무시하게 된 고차항의 영향으로 분석되고 있다. 또한 선속 시운전은 통상 λ/L<0.8 이하에서 수행되어야 하므로 시운전 때의 파랑 영향 대부분은 이 ‘반사파 부가저항’으로 알려져 있다.

$$R_{irreg} = 2 \int_0^{\infty} S(\omega_e) \cdot \frac{R_{reg}}{\zeta_a^2} \cdot d\omega_e \quad (5)$$

여기서,

- S(ω_e) : 스펙트럼 밀도함수(Spectrum Density Function),
- $\frac{R_{reg}}{\zeta_a^2}(\omega_e)$: 진폭응답함수(Response Amplitude Operator, RAO),
- ζ_a : 규칙파의 진폭(Amplitude)
- R_{reg} : 규칙파 부가저항(Added Resistance in Regular Waves),
- R_{irreg} : 불규칙파 부가저항(Added Resistance in Irregular Waves),
- ω_e : 파 만남진동수(Encounter Frequency).

상기 식(5)에서 스펙트럼 밀도함수(Spectrum Density Function)는 ITTC 스펙트럼으로부터 구하는 것이 일반적으로 추천되지만, 이 스펙트럼법의 계수들은 실제 해역의 값으로부터 구할 것을 ITTC[9]가 아울러 요구하고 있다.

거론이 많이 되고 있는 해양파 스펙트럼에는 ITTC Standard(1969, 1981), Ochi et al.(1976), Chen(1976), Hogben(1978) 등이 있다. 이들 중 ‘완성된 바다(Fully Developed Sea 또는 Fully Arisen Sea)’경우의 Pierson-Moskowitz(1964) Spectrum을 이용한 ITTC 표준스펙트럼(Standard Spectrum)이 가장 쓸모가 있는 것으로 추천되고 있다(ITTC[9]). ISSC(국제선박 구조회의, 1979)에서도 Ochi, Chen, Hogben 등의 스펙트럼들을 비교 검토한 바 있으나, 이 세 가지 중 어느 한 가지도 그 사용을 추천하지는 않았다.

한편 파랑 생성 초기의 과도기적인 경우를 위해서는 ‘JONSWAP’ Spectrum이 이용된다. 이 경우는 대부분의 파랑에너지가 피크(Peak) 부근에 모여 있다고 가정하여서 좁은 범위(Narrow Band)의 파랑 진폭을 고려한다.

또한 식(5)의 스펙트럼법을 사용할 때 채택된 가정(“규칙파의 부가저항이 규칙 파 진폭의 제곱에 비례 한다”는 가정)으로부터 야기되는 오차가 크다는 사실을 잘 파악하고 이용하여야 할 것이다. 일반적으로는 $F_n \geq 0.25$ 인 경우에 특별히 오차가 클 수 있으며, 선박의 길이(L)에 대한 파랑의 상대적 길이(λ/L) 및 파장에 대한 상대적 파고(λ/H)에 따라서도 오차가 달라진다는 것이 밝혀졌다(Kwon[13], Sibul([21],[22],[23],[24])). 일반적으로 아래와 같은 경우에 이로 인한 오차가 적은 것으로 나타났으므로, 특별히 모형실험으로 파랑부가저항을 구할 때는 이 범위의 파랑 상태에서 실험하는 것이 요청된다[13].

- ① $0.7 \geq (NL) \geq 0.5$ 인 경우는 $20 < (\text{파장/파고}) < 60$
- ② $(NL) < 0.5$ 인 경우는 $30 < (\text{파장/파고}) < 40$

규칙파에서의 운동에 기인된 부가저항(R_{motion})산정법의 주요 제안자는 Havelock(1937), Haskind(1947, 1957), Newman(1965), Hanaoka(1956, 1957), Maruo(1957a, 1963), Joosen(1966), Wahab(1971), Boese(1970), Gerritsma(1972a, 1972b, 1978), Salvessen(1974), Faltinsen et al. (1981) 등이 있다. 이 법들의 특징들은 문헌[13]에서 좀 더 상세하게 분석하고 있다.

이들 방법 중에서 Maruo 법이 비교적 가장 많이 인용되고 있으며, 특이점 분포법의 변화를 주어서 Maruo 법의 개선을 시도하는 노력이 계속되고 있다[예, Wang(1965), Sibul(1967), Beck(1969), Loukakis(1970), Brown et al. (1973), Hosoda(1973)]. 또한 Gerritsma법도 이론적인 배경에는 모호성이 있으나 그 계산식의 단순성 때문에 역시 인기가 있다. 특별히 Maruo법[16]은 운동에 기인된 부가저항 산정법으로 ISO[5]가 추천하고 있는 법이다.

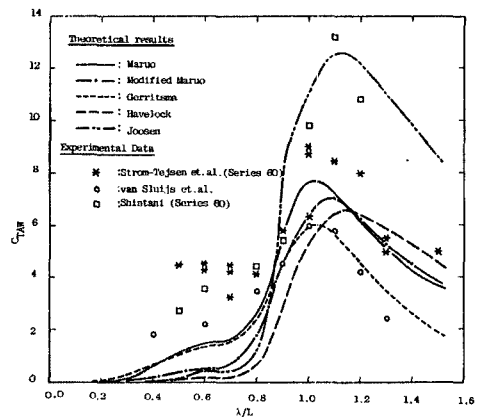


그림 1. 규칙파 부가저항 계수[13]

앞에서 언급된 바처럼 반사파부가저항은 선속시 운전 결과 해석 때 무시해서는 안 될 영향으로 지적되고 있다. 하지만 이 저항은 선형화 이론에서 무시되는 고차항의 영향에 속한 것이므로 이론적인 접근이 어려울 뿐만 아니라, 짧은 파도에서($\lambda/L < 0.8$) 두드러지게 나타나는 영향이고 이 영역에서는 불규칙파를 위한 선형화 스펙트럼법의 오차가 더욱 커

표 2. Fujii-Takahashi법과 Kwon법 비교[13]

	Fujii-Takahashi법[1975][4]	Kwon법[1982][13]
공통적 채택 사항	Geometric Optics가정 하에 Drift Force를 구하고 이를 수정함	좌동
Drift Force 구할 때 사용된 식	Head Sea에 관한 Havelock식('40) 사용: 수선면의 선수부 모양만 고려	Oblique Sea에 관한 Bessho식('58) 사용: 수선면 전체 모양 고려
Drift Force 구할 때 가정된 선형	홀수선면의 선수부 반쪽	전체 홀수선면: 홀수선면을 4차 다항식으로 수식화 함
Wave Scattering 보정 때 사용된 식	Wehausen-Laiton의 Reflection Coeff.식('60): 유한깊이의 Vertical Flat Barrier에 적용하는 식	Jones-Whitham의 Scattering Coeff.식('57): 임의의 형상에 적용하는 식
무한 홀수의 수정	별도의 수정이 없음(Reflection Coeff.에서 고려된 것으로 간주)	Smith효과(수심에 따른 유체입자 운동의 감쇄현상)를 이용해서 보정함.
선속에 관한 수정계수 도출 법	모형실험 결과 이용	모형실험 결과 및 Encounter Frequency식의 형태 이용

서 실험값도 믿을 수가 없는 것으로 알려져 있다(그림 1, 그림 2, 그림 3 참조). 따라서 오랫동안 많은 학자들이 이의 연구 필요성을 강조하고 있음에도 불구하고(예 15회[10] 및 16회[9] ITTC), 별로 많지 않은 연구결과가 발표되어 있는 실정이다. 이의 연구에는 1975년의 Fujii-Takahashi법[4], 1981년의 Faltinsen et al법[3] 및 1982년의 Kwon법[13] 등이 있으며, 이 들 모두 8년 동안 전 세계 회원국의 의견수렴과 투표 끝에 2002년에야 확정된 ISO 15016[5]에 복수로 추천되고 있다. 또한 Kwon법[13]은 모든 사파(Oblique Waves)에 적용이 가능하지만 Fujii-Takahashi법 및 Faltinsen et al법은 맞파도(Head Waves) 내지는 횡파(Beam Waves)에만 적용이 가능하다는 것을 ISO 15016[5]은 아울러 지적하고 있다[3절 참조]. 하지만 최근에 MARIN[38]의 'STA-JIP'에서 자체적으로 개발했다는 실험적 방법과 Fujii-Takahashi법[4] 및 Faltinsen et al법[3] 등을 이용한 법을 아울러 제안하고 있으나 그 정확성은 아직 검증되지 않았다.

비교적 오랜 기간 동안 전 세계적으로 검증이 되고 ISO 15016의 공동 추천을 받고 있는 Fujii-Takahashi

법[1975], Faltinsen et al법[1981] 및 Kwon법[1982]의 특징적 차이점을 파악할 필요가 있다. 우선 이 들 법의 공통적 특성은 경계조건에 기하학적 광학(Geometric Optics)의 가정을 도입해서 단순화한 후에 보완을 해준 것이다. 이 중에서 Faltinsen et al[3]이 제안한 점근법(Asymptotic Theory)에서는 선체를 수직벽으로 이루어진 무한 홀수의 실린더로 가정함으로써, 홀수선면의 형상만을 고려하는 2차원적 문제로 반사파 저항을 구 하였다. 위의 3가지 법 중에서 비교적 가장 논리적 해석법에 가깝다. 하지만 그의 논문[3]에서도 보여 준 바처럼 실험값과의 비교에서 $C_b = 0.8$ 경우는 비교적 잘 일치하지만, $C_b = 0.6$ 경우 및 컨테이너선형(S-175)에서는 실측값과 너무 큰 오차를 나타내고 있다. 한편 Fujii-Takahashi법[4]은 실험값과 비교적 잘 일치하고 있으나, 그의 법은 수선면의 반쪽 앞부분의 형상만 고려하는 맞파도(Head Waves)경우만을 고려하고 있다는 단점이 있다. 이를 보완하여서 Kwon이 제안한 법[13]이 있으며, 표 2에서 이 들 법 간의 비교를 하였다. 상기 3가지 법의 좀 더 상세한 특성 분석은 문헌[13]을 참조하기 바란다.

2-3. 표면조도 영향 추정법

표면조도의 영향은 실제 해상의 바람 및 파랑 영향을 합친 것보다 3배 이상까지도 클 수 있다는 것이 밝혀져 있다[47]. 하지만 기존의 표면조도 영향 고려법이 문제가 될 정도로 부정확하다는 것이 많은 학자들에 의하여 지적되어 왔다[ITTC(1978, 1981), Swift[26]]. 그러나 시운전 경우는 표면을 깨끗하게 처리하면 이 영향은 쉽게 제거될 수 있다는 점에서 이의 심각성이 파랑이나 바람 보다는 덜하다.

이 영향 추정에는 ISO[5] 및 ITTC[7]가 추천한 Townsin-Dey법[32]을 이용할 수 있다. 표면조도 영향고려법과 관련하여서 2005년의 ITTC[7]가 인용한 방법들은 Townsin-Day[32], Townsin[29], Townsin Byrne, et al[30],[31], Walderhaug[43], Johansson[11], Musker-Lawkovicz[17], Lackenby[14] 등이 있다.

3. 최근에 거론되는 선속시운전 결과 해석법의 특성

그동안 많은 기관들이 서로 다른 시운전결과 해석법을 제안한 바 있다. 예를 들어 보면 아래와 같다.

국제수조회의(ITTC: '69, '81), 영국선박연구소(BSRA: '64, '77, '78), 덴마크선박연구소(DSRI: '64), 노르웨이 조선기술협회(NASTS: '71), 미국조선학회(SNAME: '73, '76, '89), 일본조선연구협회('72, '93), 네덜란드선박연구소(NSMB: '76/ MARIN: '94, '06), 국제표준기구(ISO: '02) 등을 들 수 있다.

하지만 이들 결과의 부정확성이 심각하다는 것이 오래 전부터 지적되어 왔다([9],[10]). 특히 문제점으로 지적되고 있는 것은 반사파 부가저항의 영향과 표면조도 영향고려법이다[예, 제 15회 및 제 16회 ITTC 성능분과위원회 결론]. 이로 인한 문제를 해소하기 위하여 국제표준기구(ISO)가 8년 동안의 산고 끝에 최근에 선속시운전해석법의 표준가이드(ISO 15016)를 확정된 바 있다. 이 법의 제정은 1994년에 착수해서 2002년 6월에 확정되기 까지 총 9년에 걸쳐 전 세계 ISO 회원국의 의견을 수렴해서 수정하고, 투표를 실시한 바 있다. 한편 포르투갈의

제안으로 유럽표준위원회(CEN: European Committee for Standardization)가 1998년부터 현재까지 제정 중인 선박의 조종성 관련 법(DIN 1208)과 이미 국제표준기구(ISO)에서 제정되어 있는 ISO 15016(선속 시운전 해석법)을 통합해서 종합적인 규정인 ISO/FDIS 19019(International Organization for Standardization/Final Draft International Standard 19019)로 제정하는 작업이 현재 진행 중이다. 이 ISO/FDIS 19019 최종안에도 ISO가 이미 확정해 놓은 ISO 15016(선속 시운전 결과 해석법)은 그대로 인정해서 포함토록 되어있다. 이렇게 되면 'ISO 15016'은 ISO 와 CEN이 공동으로 인정함으로써 이 법의 공인성이 한층 더 강화될 전망이다. 특별히 ISO 15016을 이용한 선속시운전 결과 해석용 컴퓨터 프로그램(ST10)은 국내 10개 기관의 연구진이 협동하여서[책임연구원: 한국해양연구원(MOERI)의 김은찬] 최근에 개발한 바 있다([49],[50]). 한편 최근에 네덜란드선박연구소(MARIN)가 STAP(1994년) 및 STA-JIP[38] 등을 제안한 바 있다. 이 들 법에서 선속 시운전 결과해석 때 부정확성의 핵심 쟁점으로 강조되고 있는 반사파 부가저항([9],[10],[13],[18])과 관련하여서, 채택하고 있는 법들을 표 3.에 요약하였다. 아울러 특기할 사항은 ISO 15016에 발췌되어 있는 Bibliography 총 22개 중에 반사파 부가저항 관련 문헌만 무려 4가지가 포함되어 있다는 점이 이 문제의 중요성을 대변하고 있다고 하겠다. 이 표에 채택되어 있는 법들의 일반적인 특성 차이는 2-2절에 소개하였으며, 특별히 Fujii-Takahashi법[4]과 Kwon법[13]은 표 2에서 요약적으로 비교하였다.

또한 Kwon-Kim-Hwangbo[12] 또는 ISO15016의 추천을 받고 있는 Townsin-Kwon법[27]은 역시 ISO(2002)가 추천하고 있는 Maruo법(운동 부가 영향), Kwon법(반사파 부가저항), van Berlekom 법(바람 부가저항), ITTC 표준스펙트럼 등을 이용해서 미리 여러 가지 경우에 대하여 해양파 부가저항 및 바람부가저항을 구체적이고도 체계적으로 계산하고 이 결과를 이용해서 '(파랑부가저항)/(파랑

표 3. 최근의 선속시운전 해석법의 반사파/회절파 영향 산정법

	ISO 15016	STAP	STA-JIP
추천/인용 기관	국제표준기구(ISO) & 유럽표준위원회(CEN)	네덜란드선박연구소 (MARIN)	네덜란드선박연구소 (MARIN)
반사파/ 회절파 영향 산정법의 채택	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Faltinsen's formula[3] and Fujii-Takahashi's formula[4] only for the cases of head to beam waves ▶ Kwon's method[13] and Townsin-Kwon's method[27] for all directions of waves 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Townsin-Kwon's Approximate formulae[28] ▶ Model test result 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Model test result ▶ Faltinsen's formula[3] and Fujii-Takahashi's formula[4]

부가저항 + 바람부가저항' 비를 구해 놓음으로서 복잡한 과정 없이도 이들 값을 간단히 구할 수 있도록 한 표준계열을 표 또는 그림의 형태로 각각 제공하고 있다.

또한 표 3의 채용법 중에서 MARIN의 'STAP' 및 'STA-JIP'에 사용된 법에 관하여 좀 더 살펴보면 다음과 같다. 먼저 Townsin-Kwon's Approximate formulae[28]은 두 가지 선형($C_b = 0.62, 0.84$) 및 두 가지 선속($F_n = 0.25, 0.15$) 경우에 맞춘(Fitting) 약산식이므로 그 외의 경우에는 오차가 커질 수 있다는 단점이 있다. 또한 STA-JIP에서 채용하고 있는 Faltinsen's formula[3] 및 Fujii-Takahashi's formula[4]는 ISO에서 지적하고 있듯이 맞파도(head sea)에서 옆파도(beam sea) 경우에만 적용될 수 있도록 유도된 법이므로 그 외의 경우에는 오차가 커질 수 있음을 감안해야 할 것이다. 더욱이 Fujii-Takahashi 법[4] 및 Kwon법[13]의 주된 차이점을 설명하는 표 2를 참조할 때 Fujii-Takahashi 법은 옆파도 경우에도 사용할 수 없음을 알 수 있다. 아울러 이와 관련하여서 ISO 15016의 내용 원문을 소개하면 아래와 같다(단, 이 원문의 Bibliography번호 만은 본 원고의 참고문헌 번호로 변경하였다). 또한 STA-JIP의 중간 보고서에서는 Townsin-Kwon법도 아울러 비교를 하고 있었으나, 이 법의 적용 때 속도 고려법(절대속도/상대속도) 및 형상 끝부분 고

려 상의 오류 등이 있었음을 지적 받은 후 최종 보고서에서는 Townsin-Kwon법을 제외하고 있다.

『B.1.2 Response function of resistance due to waves

...(중략)...The method based on an assumption of a slender ship cannot take exact equation (B.1), Fujii-Takahashi's formula ([4] in the bibliography), Faltinsen's formula [3] and Kwon's formula [13] are recommended. These formulae can be used to calculate the response function of resistance increase due to diffraction in regular waves, ...(중략)...

Kwon's formula is applicable for all directions of waves. Fujii-Takahashi's formula and Faltinsen's formula, however, should be applied only for the cases of head to beam waves. ...(중략)...

B.2 Other prediction methods for resistance increase due to waves

...(중략)... One such typical method is modified Townsin-Kwon method ([27] in the bibliography).』

한편 반사파부가저항의 고려를 위하여 MARIN법 등에서 채용하고 있는 실험적 추정 법 또는 실선 자

료 이용법은 아래와 같은 원인에 따른 오차 때문에 상당한 부정확성을 예상하여야 할 것이다[13].

[1] 모형실험 결과를 이용할 경우의 오차 원인

(1) 실제 해상조건에서 나타나고 있는 불규칙성의 고려 과정에서 발생하는 오차

: 예컨대 예인수조(Towing Tank)에서의 불규칙과 실험결과를 해양과 경우로 확장해서 적용하는 방법이 없다. 따라서 해양파의 부가저항을 구하기 위해서는 선형화된 스펙트럼법과 규칙파의 결과를 이용해서 구할 수밖에 없는데, 이때 가정되는 바 “부가저항이 규칙파 진폭에 비례 한다”는 가정[식5 참조]으로 부터 야기되는 오차가 상당히 커서 모형실험 자료에 근거를 둔 방법도 문제가 될 정도로 부정확함이 밝혀졌다. 예를 들면 반사파 부가저항 측면에서 모형실험값과 Kwon법의 결과를 비교하고 있는 그림 2에서 볼 때 규칙파의 부가저항(R_{AWR})은 모형실험값(○표)과 계산된 값(실선)이 비교적 잘 일치하는 반면에, “부가저항이 규칙파 진폭에 비례 한

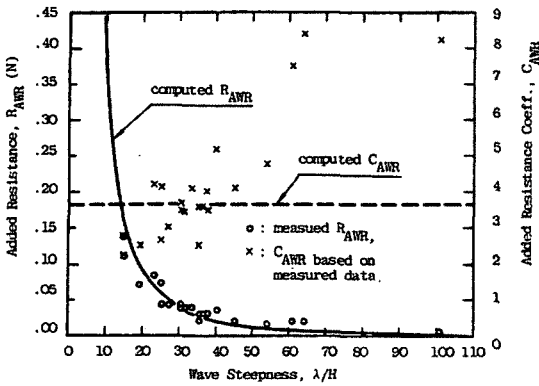


그림 2. 반사파 부가저항($\lambda/L=0.23$)[13]

다”는 가정 하에 모형선 자료로부터 환산된 모형선의 규칙파부가저항계수(C_{AWR} : ×표) 측면에서는 계산된 값(점선)과 대단히 큰 차이가 남을 보여주고 있다.

(2) 실선/모형선의 축척비(Scale Effect)로 인한 오

차가 크다. 예를 들면 모형실험 때 마찰저항을 좌우하는 레이놀드수를 무시하고 실험할 수밖에 없는 관계로 역학적 상사성이 성립되지 않는다는 점에서 야기되는 오차가 크게 발생한다.

- (3) 파도 중에서 부하(Load)의 변화에 따른 추진계수(Propulsion Factor) 및 하중 변화에 따른 프로펠러성능 변화 추정 때 발생 되는 오차가 크다.
- (4) 다음과 같은 이유로 측정 자료가 부정확할 수 있다.

- 즉, - 측정 장치의 오차
- 실험과정 및 조건에 따른 오차

이상의 (1)항에서 지적된 원인에 의한 오차가 크며[그림2], 이에 더하여 (2)-(4)항의 원인에 의한 오차만으로도 실험 결과 값이 두 배 이상 차가 날 수 있음을 알 수 있다[그림 1]. 그림 1에서 *표는 미해군연구소(NSRDC)의 실험 결과[25]이며, ○표는 네델란드선박연구소(NSMB)의 실험 결과[18]이고, □표는 Shintani의 실험 결과[20]이다. 이 그림에서 특별히 $\lambda/L \leq 1.0$ 경우는 각 실험값들 간에 오차가 매우 큼을 알 수 있는데, 선속 시운전 때의 λ/L 은 통상 0.8이하이며, 운항 중인 선박경우도 선박의 대형화 경향 때문에 λ/L 1.0인 경우가 대부분인 것으로 나타나 있다[13]. 더욱이 $\lambda/L \leq 0.4$ 에서는 반사파 부

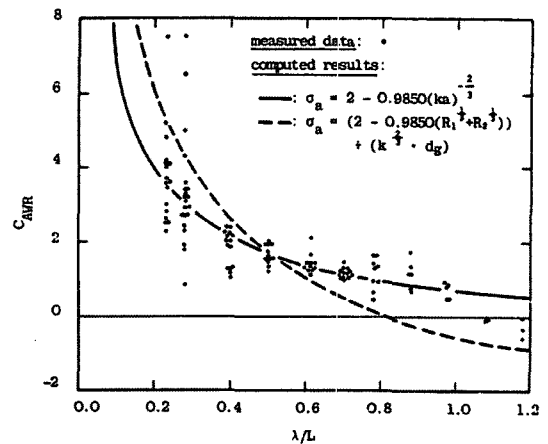


그림 3. 반사파부가저항 [13]

가저항의 모형실험 값이 최대 900% 까지 차이가 날 수 있음이 밝혀져 있다[13]. 예를 들면 반사파 부가저항을 위한 모형실험 결과와 이론 결과 값을 비교하는 그림 3에서 볼 때 같은 조건에서의 측정 값들 사이에 오차가 최대 9배 이상 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 그림에서 \cdot 표가 모형실험값을 나타낸다. 또한 λ 와 L 은 파도의 길이와 선박의 길이를 각각 의미하며, C_{TAW} 및 C_{AWR} 는 규칙파의 전체 부가저항계수 및 반사파부가저항계수를 각각 의미한다.

[2] 실선의 자료를 분석하여 구하는 법의 부정확성 원인

▶ 다음과 같은 이유로 실선의 자료가 부정확할 수 있다.

즉,

- 실선자료의 대부분은 육안으로 관측된 것이며 따라서 관측에 의한 오차가 발생된다.
- 측정 장치에 의한 자료는 대부분 시운전 자료이므로, 실선의 자료들이 편중되어 있으므로(예, 기상 상태의 온화함) 이 자료들로부터 일반해(모든 기상조건, 선형, 선속, 동력 경우에 응용할 수 있는 일반 해)를 얻는 것은 불가능하다.
- 측정 장치를 이용해서 자료를 취득한 경우도 측정 장치상의 오차가 발생한다.

▶ 실선의 자료를 분석하여 경험식을 구하는 과정에서 또 다른 오차가 발생한다.

4. 선속 시운전 때 신빙성 제고를 위한 기타의 고려 점

앞 절에서 지적된 바와 같이 선속시운전 결과 해석법과 관련하여서 현재 가장 핵심적인 쟁점으로 부각되어 있는 것은 규칙파의 반사파(회절파 포함) 영향 고려법이므로[9],[10],[13],[18], 시운전 해석법의 선택 때 이 영향 고려법의 선택에 가장 신경을 써야할 것이다. 이 점 이외의 영향 고려

법 경우는 아래의 사항들만 신경쓰면 별로 논쟁의 대상이 되고 있지 않은 것들이다. 이들을 요약하면 아래와 같다.

▶ 시운전 때 신빙성을 높이기 위해서는 일반적으로 기상조건이 너무 나쁘지 않은 상태에서 시행해야 한다. ISO의 표준은 이 경우 최대 파고 3m 미만(대략 BN=7 미만)을 권장하고 있다. BN가 7 이상인 경우는 프로펠러 레이싱(Propeller Emergence for Racing) 현상까지 발생되어서 선속 손실량이 두 배 이상 차이가 날 수 있음을 Aerssen-van Sluys(1972)가 실선으로부터 측정 한 바 있다[28].

▶ 풍속계(Anemometer)의 위치가 표준높이인 해발 10m가 아닌 경우는 설치위치를 표시하고, 높이에 따른 풍속의 보정을 해준대상의 [1]-(1)절 내용 참조. 이의 오차를 줄이기 위해서 가능한 한 높은 위치(Free Stream Wind Speed 높이)에 풍속계를 설치하는 것이 바람직하다[표 1 참조].

▶ 조류(Current)의 영향 고려를 포함한 신빙성을 높이기 위하여 왕복운항 횡수를 4번(총 8회 운전)하는 것이 권장되고 있다.

▶ 수심이 영향을 미칠 수 있으므로 가능한 한 깊은 지역에서 시운전을 실시하되, 부득이 한 경우는 통상 Lackenby법[15]으로 보정해주고 있다(ISO 15016의 Annex F).

▶ 표면조도의 영향이 다른 어떤 영향보다 클 수 있으므로[47], 시운전 때 프로펠러를 비롯하여 선체에 부착되어 있는 이끼 및 조개 등을 깨끗이 닦아 주는 것이 중요하다.

▶ 배수량, 수온, 타 등의 측면에서 선박의 시운전 상태와 모형시험 상태의 차이를 보정해서 비교할 필요가 있으며, 이의 보정 법은 일반적으로 아래와 같이 ISO 15016[5]을 사용하면 별 문제가 없을 것이다.

① 배수량 및 트림 차 보정 법: ISO 15016의 Annex E,

- ② 수온 차 및 소금 함량(동점성계수차) 보정 법:
ISO 15016의 Annex D,
- ③ 코스유지를 위한 저항(Rudder Resistance:
Effects of Steering & Drift)
: ISO 15016의 Annex C.

참고문헌

[1] Beukelman, W. and Buitenhek, M.(1974), "Full scale measurements and Predicted Seakeeping Performance of the Container-ship Atlantic Crown", I.S.P., Vol. 21, No. 243.

[2] Blendermann, W.(1990,1991), "Wind Forces and Moments in Dimensionless Form", App. I to "Maneuvering Technical Manual", Schiff & Hafen, Vol. 3, 1990 and Vol. 4, 1991.

[3] Faltinsen, O.M., Minsaas, K.J., Liapis, N. and Skjoldal, S.O.(1981), "Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway", Proc. 13th Symposium on Naval Hydrodynamic", Tokyo.

[4] Fujii, H. and Takahashi, T.(1975), "Experimental Study on the Resistance Increase of a Large Full Ship in Regular Oblique Waves", J.SNAJ, Vol. 137.

[5] ISO(2002), "Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data", International Organization for Standardization, ISO/DIS 15016 pp 1-45.

[6] Isherwood, R.M.(1972), "Wind Resistance of Merchant Ships", TRINA, Vol. 115.

[7] ITTC(2005), "Power Margins", Report of the Special Committee on Powering Performance Prediction, 24th ITTC, pp 629-638.

[8] ITTC(1990), "Hull Roughness", Report of the Performance Committees, 19th ITTC, pp 262-265.

[9] ITTC(1981), "Seakeeping and Powering Performance Committees, ITTC Proceedings, pp 129-247(16th).

[10] ITTC(1978), "Seakeeping and Powering Performance Committees, ITTC Proceedings, pp 375-380(15th).

[11] Johansson, L.E.(1985), "The Local Effect of Hull Roughness on Skin Friction. Calculations Based on Floating Element Data and Three dimensional Boundary Layer Theory", Trans. RINA, Vol. 127.

[12] Kwon, Y.J, Kim, E.C. and Hwangbo, S.M.(2000), "Estimating the Effect of Wind and Waves on Ship Speed Performance," The Naval Architect, Sept., RINA, U.K., pp 96-104.

[13] Kwon, Y.J.(1982), "The Effect of Weather, Particularly Short Sea Waves, on Ship Speed Performance", Ph.D. Thesis(Supervisor: R.L.Townsin), University of Newcastle upon Tyne, U.K., pp 1-332.

[14] Lackenby, L.H.(1962), "The Resistance of Ships with Special Reference to Skin Friction and Hull surface Conditions", Trans. the Institution of Mechanical Engineers, London, England.

[15] Lackenby, H.(1963), "The Effect of Shallow Water on Ship Speed", Shipbuilder, 70, No.627.

[16] Maruo, H.(1960), "On the Increase of the Resistance of a Ship in Rough Seas," J.S.N.A.J., Vol.108, pp5.

[17] Musker, A.J. and Lewkovicz, A.K.(1978), "The Effect of Ship Hull; Roughness on the Development of Turbulent Boundary Layers", Proc. of the International Symposium on Ship Viscous Resistance, SSPA, Sweden.

[18] Nakamura, S. and Fuji, H.(1977), "Norminal Speed Loss of Ships in Waves", PRADS-Intern. Symp. Practical Design in Shipbldg., Tokyo, October.

[19] Shearer, K.D.A. and Lynn, W.M.(1960), "Wind Tunnel Tests on Models of Merchant Ships", Trans. NECI, Vol. 76.

[20] Shintani, A.(1973), "Influence of Ship from Particulars on Resistance Increase in Regular Waves", Journ. Kansai Soc. Naval Arch. Japan, No. 139, March.

[21] Sibul, O.J.(1959), "Ship Resistance in Uniform Waves as a Function of Wave Steepness and Beam of the Ship", Univ. of California, I.E.R. Report Series 61, Issue 18.

[22] Sibul, O.J.(1961), "Ship Resistance and Motions in Uniform Waves as a Function of block Coefficient", Univ. of California, I.E.R. Report Series 61, Issue 19.

[23] Sibul, O.J.(1964), "Ship Resistance in Uniform Waves", Univ. of California, Berkeley, Report N.A. 64-1, January.

[24] Sibul, O.J.(1971), "Constant Thrust vs. Constant Velocity Method for Resistance in Waves", Univ. of California, Berkeley, Report N.A. 71-1, June.

[25] Strom-Tejsten, J. et al.(1973), "Added Resistance in Waves", Trans. SNAME, Vol.

[26] Swift Peter M.(1975), "An Approach to the Rational Selection of the Power Service Margin", Doctorial Dissertation, University of Michigan, U.S.A., pp 1-144.

[27] Townsin, R.L. and Kwon, Y.J. et al.(1993), "Estimating the Influence of Weather on Ship Performance", Tran. RINA, Vol.135, pp 191-209.

[28] Townsin, R.L. and Kwon, Y.J.(1983), "Approximate Formulae for the Speed Loss Due to Added Resistance in Wind and Waves", Tran. RINA, Vol.125, pp 199-207.

[29] Townsin, R.L.(1987), "Developments in the Calculation of Rough Underwater Surface Power Penalties", 25th

- Anniversary Symposium, CETENA, Genoa, Italy.
- [30] Townsin, R.L., Byrne, D., Svensen, T.E. and Milne, A.(1986), "Fuel Economy due to Improvements in Ship Hull Roughness 1976-1986", I.S.P. Vol. 33.
- [31] Townsin, R.L., Byrne, D., Svensen, T.E. and Milne, A.(1981), "Estimating the Technical and Economic Penalties of Hull and Propeller Roughness", Trans. SNAME.
- [32] Townsin, R.L. and Dey, S.K.(1990), "The correlation of Roughness Drag with Surface Characteristics", Marine Roughness and Drag Workshop, London.
- [33] Townsin, R.L. and Svensen, T.(1980), "Monitoring Speed and Power for Fuel Economy", Symposium Shipboard Energy Conservation '80, SNAME, September.
- [34] van Berlekom, W.B.(1981), "Wind Forces on Modern Ship Forms - Effect on Performance", Trans. NECIS, Vol.97, U.K., pp 123-134.
- [35] van Berlekom, W.B.(1978), "Involuntary Speed Loss at Sea", 1st W.G.E.M.T., Advanced Ship Design Tech., Univ. of Newcastle upon Tyne.
- [36] van Berlekom, W.B.(1975), "Wind Resistance of Surface Ships", Report of performance Committee, Appendix 8, 14th I.T.T.C.
- [37] van Berlekom, W.B., Tragardh, P. and Dellhag, A.(1974, 1975), "Large Tankers Wind Coefficients and Speed Loss Due to Wind and Sea", RINA Spring Meetings, Paper No. 9(1974), Trans. NECIS, Vol. 117(1975).
- [38] van der Hout(2006), "Sea Trial Analysis JIP", MARIN Report No. 18200-9-TM.
- [39] Wagner, B.(1974), "Zur Frage des Effective Zusatzwiderstandes durch den Wind auf der Grundlage von Modellversuchen fur Unter - und Oberwasserschiffe", Schiff und Hafen Heft 3.
- [40] Wagner, B.(1968a), "Wind Tunnel Tests with Ship Models-Coaster 600DWT, Refrigerated Cargo Ship, Tanker 50,000DWT", Hamburg University Institute fur Schiffbau, Report 188.
- [41] Wagner, B.(1968b), "Wind Tunnel Tests with Ship Models-Ferries, Passenger Ship, Hydrofoil, Tugs and Stern Trawlers", Hamburg University Institute fur Schiffbau, Report 189.
- [42] Wagner, B.(1967), "Windkrafte an Oberwasser-schiffen", Jahrbuch der Schiffbau hnsichen Gesellschaft, 61.
- [43] Walderhaug, H.(1986), "Paint Roughness Effects on Skin Friction", I.S.P., Vol. 33, No. 382.
- [44] 권영중(2006), "선박설계학", 동명사.
- [45] 권영중, 김대영(2005), "선속 손실량 산정을 위한 약산식 개발 연구", 한국해양공학회지 제19권, 제2호, pp 90-93.
- [46] 권영중(2004), "씨마진 산정법의 개선에 관한 연구(I)", 한국해양공학회지 제18권, 제3호, pp 40-43.
- [47] 권영중(2003), "선박의 속력성능에 관한 연구", 한국해양공학회지 제17권, 제2호, pp 67-71.
- [48] 권영중(1987), "반사파의 부가저항에 관한 연구", 대한조선학회지 제24권, 제1호, pp 35-41.
- [49] 김은찬, 윤현세, 홍사영, 최우락, "Evaluation and Computer Program on the Speed Trial Analysis Method of the Ongoing Work in ISO/TC8". 8th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures. p525-532, Shanghai, 2001.
- [50] 김은찬, 신우행, 유성선, 심현상, 임효관, 이순갑, 염덕준, 최영달, "ISO 표준 속력시운전 해석법의 전산화", 대한조선학회 2002년 춘계학술대회, p123-127, 2002.4.18. 

권영중 | 울산대학교 조선해양공학부



- 1943년생
 - 1982년 영국 뉴카슬대학교 박사
 - 현 재: 대한조선학회 선박설계연구회 고문, 한국선급 특수선기술분과 위원장
 - 관심분야: 선박설계 및 성능분석학
 - 연 락 처: 052-259-2153
 - E-Mail : yjkwon@ulsan.ac.kr
-
-