

선체이동에 따른 흐름분석 및 수질개선 효과 분석

이홍식*, 김진홍**, 이삼희***

1. 머리말

최근 들어 호수의 수질오염이 날로 악화되어 호수 수질개선 특별종합 대책 수립이 요구되고 있다. 이는 맑은 물 공급에 대한 지역 주민의 욕구이며, 수환경 보전이라는 보다 큰 생태계 회복 차원에서 적극 추진되어야 할 사항이다. 정부에서는 호수 수질개선 종합대책안을 발표하여 범정부적 차원에서 집중 투자를 하고 있으나, 투자된만큼 수질개선 효과는 나타나지 않고 있다. 한편 호수의 수질오염에 대한 종합대책을 세움과 동시에 수질개선 후의 친수활동 측면에서 관광선 활용 가능 타당성에 대한 분석을 검토하는 것이 요구되고 있다. 즉, 호수에 관광선을 운행시킴으로써 생기는 긍정적인 면과 부정적인 면을 검토하여 이들을 비교함으로써, 관광선 활용 가능 타당성을 분석할 필요가 있다. 긍정적인 면으로는 선체이동에 따른 수표면 교란에 의한 폭기효과를 고려할 수 있다. 그러나 수표면 교란에 의한 폭기효과는 정성적인 판단에 의해 그 효과가 미미하다고 알려져 있지만, 이를 정량적으로 조사한 결과는 없다.

본 연구에서는 선체이동에 따른 흐름분석 및 수표면 교란에 따른 폭기효과로 인한 호수의 수질개선 효과를 정량적으로 검토하는 것으로 하였다.

2. 선체 이동에 따른 흐름 현상

선체 이동에 따른 흐름은 대체적으로 선체 앞부분에서의 흐름, 선체 옆부분의 흐름 및 선체 후미에서의 흐름으로 구분할 수 있다. 이들 흐름은 그림 1에 나타나 있다. 그림 1을 보면 선체 앞과 옆부분의 흐름은 매끄러운 형태를 유지하면서 흐름의 분리 현상은 나타나지 않고, 따라서 수표면 교란도 발생하지 않고 있다. 이는 선체의 형상이 유선형의 곡면을 가지기 때문이다. 반면 선체 후미의 흐름은 분리 현상이 나타나면서 와류(vortex)가 발생되고 있다. 이는 선체 후미의 형상이 유선형이 아닌 불연속면의 형태를 가지기 때문이며, 선체 후미에 프로펠러가 부착되어 있기 때문이다.

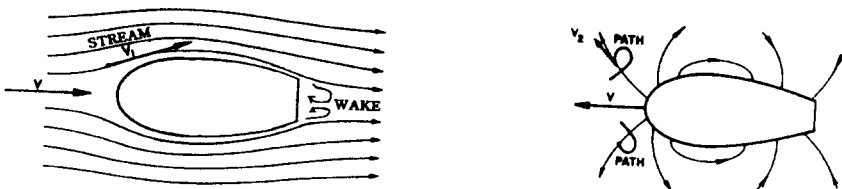


그림 1 선체 주위의 흐름

* 중앙대학교 토목공학과 교수, ** 중앙대학교 토목공학과 조교수
*** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

선체의 앞과 옆부분에서 발생할 수 있는 유체력으로는 마찰항력을 생각할 수 있다. 마찰항력은 선체가 일정 유속으로 흐르는 유체 속에 흐름방향과 나란히 놓여 있을 때 작용하는 유체력이다. 선체 후미의 흐름은 선체와 같은 방향으로 움직이며, 이와 같이 앞으로 이동하는 흐름을 반류(wake)라 한다. 선체의 속도 V 와 프로펠러의 전진속도 V_a 와의 차이를 반류속도(wake velocity)라 할 때 Froude는 이 반류속도를 전진속도 V_a 에 대한 비로 나타내었고, 그 비율을 식 (1)과 같이 반류비 W_f 로 정의하였다 (이귀주, 1998).

$$W_f = \frac{V - V_a}{V_a} \quad (1)$$

반류속도가 발생하는 원인으로서는 다음과 같은 세 가지 주요 원인을 들 수 있다 (이귀주, 1998).

- ① 선체의 마찰 항력 때문에 물이 선체를 뒤따르게 되며, 선체 후미에서는 주위의 물에 대하여 앞쪽으로 움직이는 반류가 된다.
- ② 선체 옆을 지난 유선들은 선체 후미 근처에서 오물어들이기 때문에 그 곳에서의 압력이 상승한다. 물의 상대속도가 선체 후미 근처에서는 배의 속도보다 낮아지므로 반류현상이 나타난다.
- ③ 선체는 물의 표면에 파형을 일으키는데, 이 때 물의 입자들은 각각 궤도 위를 회전하게 되므로, 파정에서는 앞쪽으로 움직이고 파저에서는 뒤쪽으로 움직이게 된다. 따라서 프로펠러 근처에 그 파형의 파정이 오느냐 파저가 오느냐에 따라 물의 입자들의 운동이 양(+의 반류 성분이 될 수도, 음(-)의 성분이 될 수도 있다.

선체 후미 주위의 유동에서 프로펠러가 회전하게 되면 프로펠러의 상부 수면 가까운 곳에 박리를 생기게 하거나 박리를 증가시키게 된다. 이 박리 현상은 선체 후미 주위의 유동을 비대칭이 되게 함으로써 프로펠러에 의해 전달되는 추력(trust)과 토크(torque)의 값을 변화시키는 불안정 현상의 원인이 되기도 한다. 선체가 하천 또는 호수에 진입하면 선체 이동에 따른 파(wave)가 형성되고, 파고(wave height)가 증가되며 이는 수표면 교란을 가져온다. 이 같은 파고의 증가로 말미암아 선체의 이동시 선체의 표면을 따라 수위가 감소하게 되고, 따라서 선체가 정수 중에 있을 때보다 호수 바닥으로 잠기게 된다. 이 같은 현상을 선체의 잠김(sink, squat)이라 한다. Sorensen(1992)은 선체역학 연구에서 식 (2)와 같은 조건에서 잠김 현상이 나타난다고 하였다.

$$V^2/gd > 0.7 \quad (2)$$

여기서, V 는 선체의 이동 속도이고, g 는 중력가속도이며, d 는 수심을 나타낸다. 잠김량에 영향을 미치는 요인으로는 다음과 같은 것들이 있다(Sorensen, 1992).

- ① 선체와 호수(하천) 바닥까지의 거리
- ② 선체의 균형성
- ③ 호수(하천)의 단면적
- ④ 인접 선체와의 상황, 즉 선체 이동시 단독 이동 또는 인접 선체의 추월
- ⑤ 하천의 경우 하천 중앙선으로부터 놓이는 선체의 위치
- ⑥ 선체의 규격 및 형상

선체의 이동시 잠김량을 결정하는 방법으로 2가지가 있다. 한 가지는 David Taylor Model Basin (1948)과 Schijf (1949)에 의한 방법이고, 다른 한 방법은 Sogreah 실험실의 Dickson(1960)이 개발한 방법이다. Sogreah 실험실에서 개발한 도식적 해법은 그림 2에 나타나 있다(Dickson,1960). 그림 3의 결과는 수리모형실험 결과로부터 얻어진 것이다. 잠김량을 계산하는 다른 방법으로서 Schijf는 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같은 잠김량 공식을 개발하였다. 즉,

$$F = \left[\frac{2d(1-d-s)^2}{1-(1-d-s)^2} \right]^{1/2} = \frac{V}{\sqrt{gh_1}} \quad (3)$$

여기서, F 는 Froude number이고, h_1 은 선체 이동 전의 교란되지 않은 수심이며, d 는 무차원 squat으로 $d = (h_1 - h_2)/h_1$ 으로 표시된다. h_2 는 선체에 의해 점유되는 흐름의 수심이며, s 는 흐름의 단면적에 대한 선체의 단면적을 나타낸다. V 는 흐름에 대한 선체의 속도이며, g 는 중력가속도이다. 식 (3)을 s 의

여러 값에 대해 도시화 한 것이 그림 3이다(Schijf, 1949). 그림 3에는 Schijf의 한계속도가 점선으로 표시되어 있다. 여기서 한계속도란 선체가 그 이상으로 속도를 발휘해도 저항의 증가와 프로펠러의 효율 저하로 인해 속도 증가가 나타나지 않음을 뜻한다.

상기 두가지 방법과 실제 계측에 의한 비교로부터 얻어진 결과는, s 가 0.08보다 작을 경우 Sogreah 방법을 이용하는 것이 좋고, s 가 0.08보다 클 경우 (3)식을 이용하는 것이 좋은 것으로 판명되었다(Sorensen, 1992). 이들 결과를 이용하여 여러 수로에서 측정된 값과 계산치를 비교 분석한 것이 그림 4에 나타나 있다. 그림 4를 이용하여 수로 중심부를 선체가 이동할 때 잠김량을 결정할 수 있다.

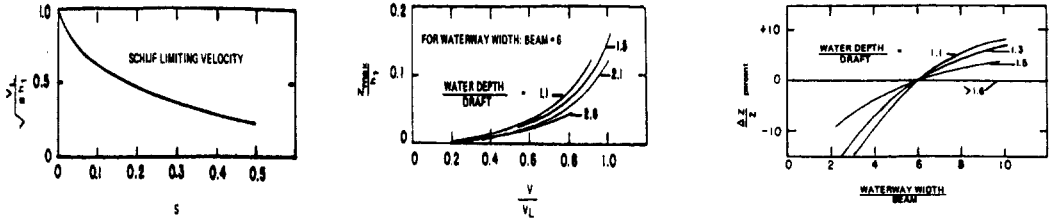


그림 2 Sogreah 실험실에서 개발한 잠김량 산정 도표

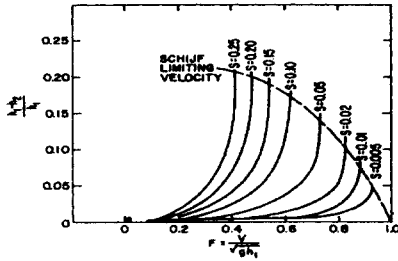


그림 3 Froude 수에 대한 무차원 잠김량을 나타내는 도표

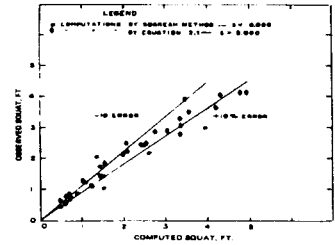


그림 4 계산치와 실측치와의 비교

3. 수리모형 실험

선체 이동에 따른 수리 현상을 조사, 측정하고 수질개선 효과를 분석하기 위해 선체 모형을 제작하여 수리모형 실험을 하였다. 제작된 모형은 폭이 60cm, 높이 60cm, 길이가 20m인 수로 내에 설치하였다. 이 수로는 구배 조절이 가능한 가변경사 수로로서 흐름 상태에 따라 구배를 조절시켜 등류에 가깝게 할 수 있다. 흐름의 관찰은 수로의 측벽이 투명 유리로 제작, 설치되어 있어 관찰이 가능하며, 수위는 point gauge로 측정하고, 유속은 2방향 디지털 유속계를 사용하여 측정하였다.

수리 실험은 다음과 같은 2가지 상황을 설정하였다. 즉,

- ① 흐름이 유지된 상태에서 선체를 정지시키고 프로펠러를 작동시켜 선체 주위의 흐름을 분석한다.
- ② 흐름을 정지시키고 선체의 프로펠러를 작동시켜 선체 이동에 따른 선체 주위의 흐름을 분석한다.

본 연구에서는 이들 ①상황 하에서 수리실험을 실시하였다. 그림 5는 ①의 조건에서 실시한 선체 주위에서의 흐름 상태의 평면도와 단면도를 나타내고 있다. 흐름은 선체 앞부분을 지나면서 약간의 수표면 교란이 발생하고 있으나, 교란의 크기와 범위는 그리 크지 않다. 그러나 선체의 후미에서는 선체 형상의 불연속 및 프로펠러의 추진으로 인해 흐름의 분리와 와류, 순환류 및 반류 현상이 나타나고 있으며, 이로 인해 수표면의 교란이 발생되고 있다. 그림 5에는 수표면 교란 범위 및 프로펠러의 추진에

따른 후류 현상이 나타나 있다.

표 1은 선체의 이동 속도에 따른 수표면 교란의 폭과 교란의 길이 및 교란의 깊이를 나타내고 있다. 실험에 사용된 선체의 폭은 0.1m, 길이는 0.2m이다.

표 1 선체의 이동 속도에 따른 수표면 교란의 범위

| RN | 선체 이동 속도(m/s) | 수표면 교란 폭(m) | 수표면 교란 길이(m) | 수표면 교란 깊이(m) | 비 고 |
|----|------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----|
| 1 | 0.20 | 0.110 | 0.240 | 0.306 | |
| 2 | 0.30 | 0.112 | 0.244 | 0.333 | |
| 3 | 0.40 | 0.115 | 0.254 | 0.333 | |
| 4 | 0.50 | 0.113 | 0.242 | 0.336 | |
| 5 | 0.60 | 0.114 | 0.262 | 0.351 | |
| 6 | 0.70 | 0.117 | 0.258 | 0.345 | |
| 7 | 0.80 | 0.125 | 0.267 | 0.363 | |
| 8 | 0.90 | 0.120 | 0.280 | 0.360 | |
| 9 | 1.00 | 0.130 | 0.290 | 0.375 | |

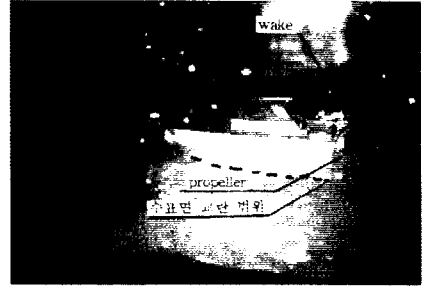


그림 5 선체 주위의 흐름(단면도)

표 1을 보면 수표면 교란의 범위는 선체의 이동 속도에 비례하여 증가됨을 알 수 있다. 그림 6, 7 및 8은 표 1을 무차원으로 나타낸 것으로서, 선체의 이동 속도에 따른 수표면 교란의 폭과 길이 및 깊이가 표시되어 있다. 여기서 V 는 선체의 이동 속도이며, V_{max} 은 실험에서 행한 선체의 최대 이동 속도이다. B_s 는 수표면 교란의 폭이고 B_w 는 선체의 폭이며, L_s 는 수표면 교란의 길이이고 L_w 는 선체의 길이이고, H_s 는 수표면 교란의 깊이이고 H_w 는 선체의 프로펠러의 깊이를 나타낸다. 이들 그림을 보면 수표면 교란의 폭과 길이 및 깊이는 대체적으로 선체의 이동 속도에 비례함을 알 수 있다.

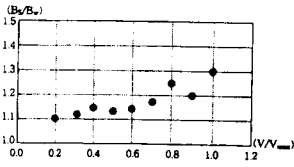


그림 6 선체의 이동속도와 수표면 교란폭과의 상관성

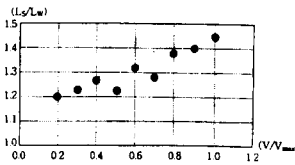


그림 7 선체의 이동속도와 수표면 교란길이와의 상관성

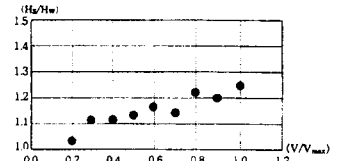


그림 8 선체의 이동 속도와 수표면 교란 깊이와의 상관성

수표면 교란의 폭은 선체 폭의 1.1~1.3배에 걸쳐 영향을 미쳤고, 수표면 교란의 길이는 선체 길이의 1.2~1.5배에 걸쳐 영향을 미쳤으며, 수표면 교란의 깊이는 프로펠러의 깊이의 약 1.1배에 해당하였다. 그림 9 및 10은 수표면 교란의 깊이와 교란의 폭 및 길이와의 상관성을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 수표면 교란의 깊이는 교란의 폭보다는 길이에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 그러나 비례 상관성은 그리 크지 않다. 이는 수표면 교란의 깊이는 프로펠러가 위치하는 깊이에 상관성이 있지만 선체의 이동 속도와 큰 상관성이 없다는 것을 의미하는 것으로서, 선체의 이동 속도를 크게 한다고 해서 반드시 수표면 교란 범위가 증가되지 않는다는 것을 의미한다. 즉, 선체의 이동 속도를 크게 함으로써 얻어지는 호수의 수질개선 효과는 별로 크지 않다는 뜻이 된다. 상기 결과를 보면 선체의 이동 속도를 크게 하여도 수표면 교란 깊이는 프로펠러가 놓이는 깊이의 약 1.1배 정도에 그치며, 따라서 호수 심층부까지 교란 범위가 미치지 않으므로 호수의 수질 개선을 기대할 수 없다.

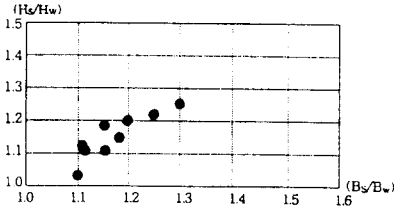


그림 9 수표면 교란의 깊이와 폭과의 상관성

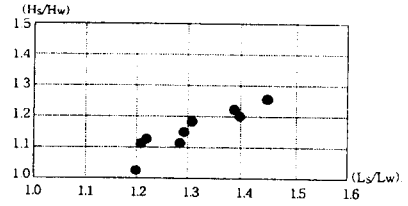


그림 10 수표면 교란의 깊이와 길이와의 상관성

호수의 수질 개선 효과를 얻기 위해서는 배의 홀수(draft)를 크게 하고 프로펠러의 설치 위치를 깊게 하여야 한다. 그러나 배의 홀수와 프로펠러의 설치 깊이는 제한적이며, 따라서 프로펠러를 추진함으로써 얻어지는 호수의 수질 개선은 기대하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

한편 수표면의 교란으로 인한 공기혼입(air entrainment)은 크게 나타나지 않고 있다. 저수지 표층의 수질개선은 공기혼입이 발생하여야만 가능하다. 공기혼입은 프로펠러의 추진에 의해 발생된다. 만약 프로펠러가 수표면 가까운 곳에 위치하면 공기혼입이 활발히 일어나고 따라서 저수지 표층의 수질 개선은 증가될 것이다. 그러나 저수지 표층만의 수질개선으로는 저수지 전체의 수질 개선에 도움이 되지 않는다. 반면에 프로펠러가 호수 깊은 곳에 위치하면 수표면으로부터 공기혼입이 일어나지 못하므로 수질개선 효과는 발휘되지 않는다. 결국 프로펠러의 추진에 따른 호수의 수질개선 효과는 기대할 수 없다는 결론에 이르게 된다.

4. 선체 이동에 따른 잠김량 결정

선체 이동에 의한 잠김량은 수표면 교란의 깊이를 산정할 때 고려되어야 한다. 잠김량에 대한 계산 방법은 Schijf의 공식 또는 그림 3을 이용하여 구한다.

$$F = \left[\frac{2d(1-d-s)^2}{1-(1-d-s)^2} \right]^{1/2} = \frac{V}{\sqrt{gh_1}} \quad (4)$$

여기서는 도표를 이용하여 구하는 것으로 한다. 예를 들어 호수의 평균 수심을 14m라고 하면,

$$F = \frac{V}{\sqrt{gh_1}} = \frac{1.0 \sim 2.0}{\sqrt{9.81 \times 14}} = 0.14 \sim 0.17 \quad s = A_s/A_w \cong 0.01$$

주어진 F와 s 값에 의해서 도표로부터, $d = (h_1 - h_2)/h_1 = 0.01 \sim 0.02$,

$$\therefore h_2 = 13.86 \sim 13.72(m), \quad 14 - h_2 = 0.14 \sim 0.28(m)$$

상기 결과를 보면 선체 이동에 따른 선체의 잠김량은 호수의 수심이 크고, 단면적이 넓으며, 선체의 이동 속도가 작을수록 작아짐을 알 수 있다. 따라서 평균수심 14m 호수의 경우 선체이동에 따른 잠김량은 0.14~0.28(m)로서 호수 전 수심의 1~2%에 해당되는 아주 작은 값임을 알 수 있다. 이는 호수의 단면적이 매우 커서 상대적으로 선체 단면적 비율이 작기 때문이며, 더욱이 호수의 수심이 하천의 수심에 비해 상대적으로 큰 반면 선체의 이동 속도는 그리 크지 않기 때문이다.

한편 Sogreah 실험실에서 개발된 방법에 의해 잠김량을 계산하면,

① $s = 0.01, h = 14, F = 0.14 \sim 0.17$ 그림 2를 이용하여, $V_L/\sqrt{gh_1} = 0.9$

② $V_L = 0.9 \times \sqrt{9.81 \times 14} = 10.55, V = 1.0 \sim 2.0, V/V_L = 0.09 \sim 0.19$ 그림 2를 이용하여,

$$z_{\max}/h_1 \cong 0, \quad z_{\max} \cong 0$$

상기 방법에 의하면 선체 이동에 따른 잠김량은 0에 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서 상기 2가

자 방법에 의한 결과를 분석해 보면, 수심이 깊은 호수에서의 선체이동에 따른 잠김량은 그 값을 근사적으로 무시해도 큰 차이는 없다는 것을 알 수 있다.

수리 실험에 의한 잠김량은 다음과 같은 과정을 거쳐 결정하였다. 즉,

- ① 먼저 선체가 없는 상태에서 흐름을 유지시켜 수위를 읽는다. ② 수로 측벽에 해당 수위를 표시한다.
- ③ 흐름의 유속을 변화시키면서 상기 두 과정을 반복한다. ④ 선체를 흐름이 유지된 상태에서 설치한다.
- ⑤ 선체의 깊이(수위)를 측정하여 ①에서 구한 수위와의 차이를 구한다.
- ⑥ 흐름의 유속을 변화시키면서 ⑤의 과정을 반복한다.

그림 11은 상기 과정에 의해 측정된 실험치와 이론적 방법에 의해 계산된 값들을 비교한 것이다. 이 그림을 보면 비교된 값들은 Froude수가 작은 범위에서는 비교적 일치된 경향을 보이나, Froude수가 커질수록 일치하지 않고 있다. 즉, 선체의 이동 속도가 클수록 비교된 값들은 큰 편차를 보이는데, 이는 선체의 이동 속도가 커질수록 수표면 교란에 따른 흐름의 불안정성 때문인 것으로 판단된다. 그림 12는 계산치와 측정치의 상관성을 나타내고 있다. 그림 12에서 알 수 있듯이 잠김량이 작을수록 이들 상관성은 커지고 잠김량이 클수록 상관성이 작아짐을 알 수 있는데, 이는 선체의 이동 속도가 클수록 수표면 교란에 따른 흐름의 불안정성이 가속되어 계산치와 측정치와의 편차가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이들 상관성은 $\pm 10\%$ 의 오차의 범위를 벗어나지 않는다.

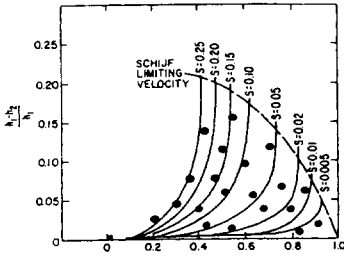


그림 11 실험치와 계산치와의 비교

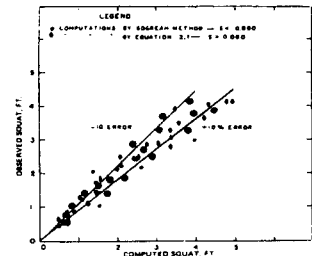


그림 12 실험치와 계산치와의 상관성

5 맺음말

수표면 교란의 깊이는 프로펠러가 위치하는 깊이에 상관성이 있지만 선체의 이동 속도와 큰 상관성이 없으며, 이는 선체의 이동 속도를 크게 한다고 해서 반드시 수표면 교란 범위가 증가되지 않는다. 선체의 이동 속도를 크게 하여도 수표면 교란 깊이는 프로펠러가 놓이는 깊이의 약 1.1배 정도에 그치며, 따라서 호수 심층부까지 교란 범위가 미치지 않으므로 호수의 수질 개선을 기대할 수 없다.

참고문헌

1. 이귀주. 실험 유체역학. 광주 : 도서출판 정자나무, 1998.
2. Sorensen, R. J. *Port Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1992.
3. U.S. Navy. *The Performance of Model Ships in Restricted Channels in Relation to the Design of a Ship Canal*. Report 601 on David Taylor Model Basin, 1948.
4. Schijf, M.J.B. *Ship Waves*. Proceedings of 18th congress of PIANCs, 1949.
5. Dickson, Capt. A.F. *Navigation of tankers through channels*. PIANC Bulletin, 1960.