
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 33 卷 第 4 號 1996年 11月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 33, No. 4, November 1996

몽뚝한 물체에 작용하는 압력의 효율적인 계산법 개발과 조류중에서의 유연한 유벽의 변형

강관형*, 이정묵**

Development of an Efficient Calculation Method of Pressure Acting on a Bluff Body and the Deformation of Flexible Oil Fences in Currents

by

Kwan Hyoung Kang* and Choung Mook Lee**

요 약

임의의 형상을 갖는 몽뚝한 물체에 작용하는 압력을 효율적으로 계산할 수 있는 방법을 확립하여, 조류중 유벽의 보유 성능을 스커트의 변형을 고려해 예측할 수 있는 방법을 개발하였다. 물체 전면의 압력은 반류영역을 박리유선을 경계로한 가상의 강체로 놓고 포텐셜 유동을 해석하여 구하였고, 후면의 압력은 기존의 실험 결과를 바탕으로 결정하였다. 압력 계산 방법의 검증을 위해 몇 가지 몽뚝한 물체의 무한 수심에서의 압력 저항을 계산하여 기존의 실험 결과와 잘 일치한다는 것을 확인하였다. 유벽의 변형은 유동장과 연계되어 있어서 순차반복법을 통하여 구하였다. 여러 조류속도와 추의 질량에 대한 유벽의 변형된 형상과 홀수의 감소를 구하였다.

Abstract

An efficient calculation method of pressure acting on a bluff body is developed. The method is applied to assess the containment capability of an oil fence, considering skirt deformation in current. The pressure on the frontal side of the oil fence is determined by analyzing the potential flow, substituting the wake region as a rigid body which has its boundary at the closed separation streamlines. The pressure at the downstream side of the fence, the so called base pressure, is obtained from the existing experimental results. To verify the calculation method, pressure drag of some bluff bodies in an infinite-fluid medium is calculated, which shows good agreement with the experimental results. The deformed shape of the oil fence is obtained by solving, iteratively, the coupled equations governing the flow field and the deformation of the oil fence, respectively. The deformed shape and the decrease of draft of oil fences with different ballast mass in various current conditions are investigated.

접수일자 : 1995년 1월 15일, 재접수일자 : 1996년 9월 23일

* 포항공과대학교, 첨단유체공학연구소

** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

1. 서론

해상누유 사고가 발생했을 경우 누유확산 방지를 위해 기름을 가두어 두거나 또는 피해가 예상되는 해안 지역을 보호하기 위해 유벽(oil fence)을 사용한다. 유벽은 부력을 주는 부체(float)와 실질적으로 기름을 가두어 두기 위한 스커트(skirt), 그리고 수직벽의 형태를 유지하기 위한 추(ballast)로 구성된다 (Fig. 1 참조).

유벽의 설계시 고려할 점은 보유가 가능한 해상 조건(파랑상태, 조류속도 그리고 풍속)의 한계점의 전제, 그리고 운반 및 설치의 용이성 등을 들 수가 있으며 설계의 변수로는 스커트의 길이, 추의 무게, 유효 부력, 유벽의 형상 및 재질 등을 들 수가 있다. 설계변수와 성능과의 관계는 일반적으로 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 파랑중 유벽의 수면과의 상대운동은 재질이 유연하고, 접수면적이 크고, 그리고 단위 길이당 무게가 작을 수록 작다.

- 예인시 혹은 조류중에서 사용시 변형이 작기 위해서는 추의 무게가 커야한다.
- 신속한 설치와 운반의 용이성을 위해서는 무게가 작고 크기가 작아야한다
- 외력에 의한 파손을 방지하기 위해서는 충분한 강도를 갖고 기름이 잘 부착되지 않는 재질을 사용해야한다
- 예인시 혹은 조류중에서의 사용시 저항을 줄이기 위해서는 흘수(draft)가 가능한 작아야한다.

상기의 설계 요건들은 분명히 상반성을 지닐 수 있는 사항들인 만큼 이를 현명하게 절충한 최적설계가 이루어져야한다.

파랑중에서의 유벽의 성능에 대한 연구는 Lee & Kang[1,2]에 의해 수행된바 있다. 그러나 상기 연구의 결론에서는 적절한 추의 무게와 유효 흘수를 결정하기 위해서는 조류중에서의 유벽의 변형에 대한 해석이 필요함이 지적되었다.

Fig. 1은 일반적인 유벽의 형상과 구조를 보여주는 것인데 예인점을 접수면이나 스커트의 최하단에 두는 것이 일반적임을 주목하기 바란다. 그런데 (a)와 같이 예인점을 접수면에 두면 유벽은 예인점을 중심으로 부체와 스커트가 상반되는 회전운동을 할 수 있다[2]. 반면 (b)와 같이 예인점을 아래에 두게 되면 유벽이 변형하면서 발생한 압력장에 의하여 하향의 힘이 작용하여 유벽이 수면 아래로 가라앉는 경우가 발생할 수 있다[3,4]. 두 경우 모두 보유에는 상당한 제약조건으로 작용을 한다. 따라서 우선 조류중 유벽이 변형함에 따라 받게 되는 압력을 계산하는 방법이 확립되어 예인점의 결정 및 스커트 재질의 결정, 그리고 한계 예인속도 등을 결정할 수 있는 자료가 제공되어야한다.

스커트의 변형을 구하기 위해서는 스커트의 변형된 형태에 따라 자유수면 주위의 유동장을 해석할 방법이 먼저 확립 되어야 한다. 그러나 유벽처럼 흐름을 막는 벽과 같은 형상의 물체(bluff body)의 후류 유동은 난류에 의한 영향이 지배적인 이유로 수치해석적인 방법으로도 신뢰할 만한 해석이 어

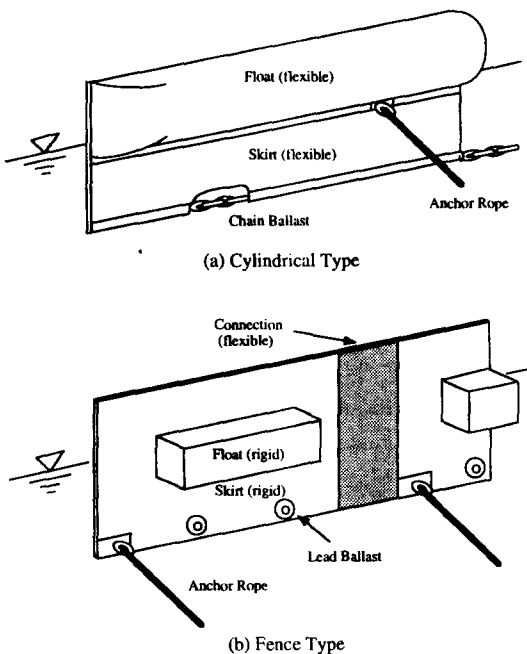


Fig. 1 Typical shapes of oil fences

렵다. 또한 변형된 형태를 구하기 위해서는 변형된 형태에 맞추어 유동장을 재해석하는 과정을 되풀이 해야하는데 많은 계산시간을 요하는 이유로 아직까지 수행된 예는 없는 듯하다.

전술한 바와 같이 유동장을 정확하게 해석하는 것은 용이한 일이 아니고 또한 가능하다 하더라도 설계용으로는 과다한 계산시간이 요구되기 때문에 본 연구에서는 이러한 점을 감안해서 보다 간단한 방법으로 빠른 시간 내에 주어진 재질과 유동조건 하에서 스킵트의 변형을 계산할 수 있는 방법을 개발하는데 목적을 두었다.

기존의 여러 실험결과에 의하면 뾰족한 형상의 물체 후면의 압력은 후면전체에서 거의 일정한 값을 나타내며, 박리점이 일정하면 압력계수가 Reynolds 수 (Re)에 그다지 영향을 받지 않는다. 이런 사실에 근거하여 유벽후면의 압력계수(배압계수(base pressure coefficient), $C_{p,b}$)는 유벽의 변형된 형상에 관계없이 일정하고 후면 전체에서 균일하다고 가정할 수 있다. 한편, 유벽 전면의 유동은 유벽 전면에서 큰 박리 현상이 일어나지 않는 한 포텐셜 유동이 지배적이라고 간주할 수 있다. 이러한 점에 착안해서, 유벽전면의 압력은 이상유동의 가정하에 후류의 반류영역(wake region)을 강체로 대체한 후 특이점 분포법을 이용해 구하였다.

유동 계산에 사용된 가정들의 타당성을 검증하기 위하여 압력저항이 지배적인 여러 형태의 물체의 무한 수심에서의 압력저항을 구해 기존의 측정치와 비교해본 바 매우 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 이때 압력저항은 일정한 값으로 놓은 후면압력과 특이점 분포법으로 구한 전면 압력의 차에 의해 물체에 가해지는 주유동 방향의 힘의 성분을 의미한다.

본 연구에서는 전술한 근사 방법을 토대로 여러 가지 조류조건과 추의 무게에 대하여 유연한 유벽의 변형된 형상과 흡수의 감소를 구하였다. 계산은 이차원 유벽에 대하여 이루어 졌으나 실제의 경우 직선형태로 설치된 유벽에 적용하는데 큰 무리가 없다고 판단된다.

2. 뾰족한 물체 (bluff body) 주위의 유동과 유벽 주위의 압력 분포

원주와 같은 이차원의 뾰족한 물체(bluff body)는 특성상 일정한 Re 이상에서는 유동박리가 발생하고 반류영역이 생긴다. 원주의 경우 $Re(Ud/\nu)$, U =자유유동 속도, d =원주 직경, ν =동점성 계수가 대략 100 이상에서는 유동박리에 의한 Karman 보텍스(vortex)가 생성된다. 그러나 물체의 후부에 분리판(splitter plate)을 달아서 보텍스 간의 상호간섭을 제약하면 박리점에서 출발하는 두 개의 박리유선(separation streamline)은 물체의 후부에서 재부착을 하게 되며 따라서 물체 후부에는 닫힌 반류영역(closed-wake zone)이 형성된다.

그러므로 전체 유동장은 유벽전면의 비회전유동영역과 물체주변의 얇은 경계층, 그리고 유벽후부의 반류영역으로 구성된다. 그런데 반류영역의 속도는 자유유동 속도(free-stream velocity)에 비하여 매우 적어서 마치 유동이 없는 것과 같아진다. 이러한 영역을 소위 정수영역(dead-water zone)이라고 부른다. 따라서 반류영역의 압력은 정수압에 의한 변화를 제외하면 거의 일정하며 그 값은 박리유선에서의 값과 비슷하다.

일반적으로 박리점 부근의 포텐셜 유동의 속도는 자유유동 속도에 비해 크다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 반류영역의 압력은 Bernoulli 효과로 인해 주변압력(ambient pressure)에 비해 낮은 값을 갖게 된다. 이러한 낮은 압력에 의하여 많은 압력저항이 발생되며 뾰족한 물체에 있어 박리가 발생하게 되면 마찰저항은 압력저항에 비해 무시할 만큼 작다.¹⁾

원주와 같이 형상의 변형이 완만한(round) 물체의 경우는 박리점이 Re 에 따라 변하기 때문에 배압계수도 Re 에 따라 변하지만 뾰족한 끝(sharp edge)을 갖는 물체에서는 박리점이 Re 와는 상관없이 그 끝에 고정되는 이유로 배압계수 역시 Re 에 거의 영향을 받지 않는다.²⁾

¹⁾일반적으로 원주에 있어서 마찰저항은 압력저항의 약 3% 미만으로 알려져 있다.

또한 배압계수는 물체 전면의 형상에도 크게 영향을 받지 않는다. 이와 같은 사실은 실험을 통하여 입증된바 있다(Acrivos[6]). 그리고 뭉뚝한 물체에 있어 후면의 모양이 달라도 전면의 형상이 같으면 물체의 저항계수가 비슷하며, 전면의 형상이 같은 경우 저항계수가 후면의 형상에 대하여 5% 정도 밖에 변화가 없다는 점에서도 유추할 수가 있다(Hoerner[5]의 Chap. 3).

따라서 후면에 가해지는 압력은 실험에서 얻은 결과를 사용하여 구하고, 전면에 가해지는 압력은 반류영역을 박리유선을 경계로 하는 강체로 표현한 후 포텐셜 유동장을 해석해서 얻을 수 있다.

그러나 물체가 자유수면 근처에 있게 되면 후류 영역의 유동 양상은 무한 수심에서의 유동과는 다소 달라진다. 먼저 자유수면이 보텍스간의 간섭을 막는 분리판(splitter plate)의 역할을 한다. 기존의 연구에 의하면 분리판으로 후류영역의 보텍스간의 상호작용을 차단하면 이로 인해 보텍스의 세기가 감소해 모멘텀의 손실이 줄고, 후면의 압력은 분리판이 없는 경우보다 높아지는 특성을 보인다. Roshko[7]의 원주에 대한 실험결과에 의하면 $\alpha(Re) \sim 10^4$ 에서 후면에 분리판이 없는 경우의 배압계수가 -1.0인 반면 분리판을 설치한 경우의 배압계수는 약 -0.5 정도가 된다.

Fig. 2는 수직평판에 대한 기존의 실험결과 중에서 많이 인용되는 Good & Joubert[8]의 결과에서 도출한 박리유선이다. 앞서 언급한 바와 같이 닫힌 반류영역이 형성되는 것을 알 수 있고, 재부착이 대략 평판높이의 약 13배 위치에서 일어나며, 반류의 최고 두께가 평판높이의 약 2배 정도임을 알 수 있다. 이렇게 얻어진 박리유선을 타원형 곡선으로 표현해 본 결과 상당히 비슷한 모양을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 수직 평판 주위의 유선을 보여 주는 기존 실험 결과가 비교적 드문 이유로 많은 경우에 대하여 비교 할 수는 없었으나, 수치해석 결과[9]와 이론 해석 결과들[10,11]을²⁾

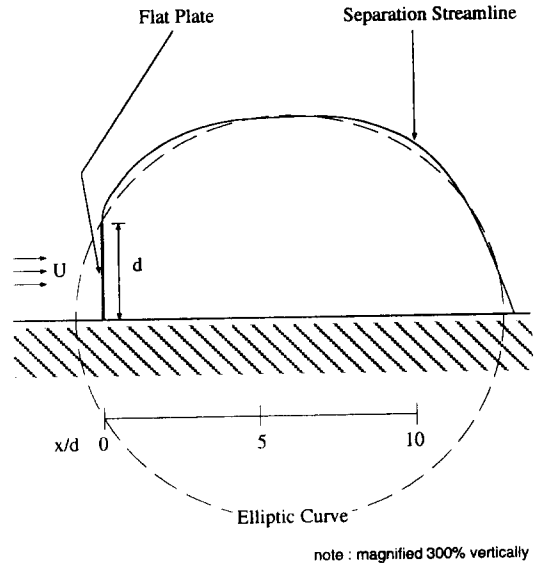


Fig. 2 Shape of separation streamline (Good & Joubert[8]). $Re=1.76 \times 10^5$
 : solid line, experimental result;
 dotted line, ellipse

참고로 할 때 반류영역을 타원형 곡선으로 표현해도 큰 차질은 없다고 판단된다.

유벽 후부의 반류가 닫힌 형태를 나타내는지, 그리고 반류의 형상이 기존의 무한 수중에서의 실험결과(주로 풍동실험을 의미함)와 유사성이 있는지를 조사하기 위하여 소형 회류수조의 수면에 수직 평판을 설치한 후 그 주변의 유동을 가시화 하였다. 실험에 사용된 추적 입자(tracer particle)는 비중 1.02, 직경 300~400 μ m의 폴리스티렌(polystyrene)이다. Fig. 3은 $Re(=Ud/\nu, d=유벽의 높이)=7500, Fr(U/\sqrt{ga}, g=중력가속도)=0.46$ 에서의 유벽 후류를 나타낸다.

Fig. 3을 통해 유벽 후부 유동이 닫힌 반류를 형성함과, 대략 흡수의 약 10배 후부에서 재부착하는 것을 알 수 있다. 또한 앞서 Good & Joubert[8]의 경우와 마찬가지로 박리유선이 타원

²⁾ Hoerner[5]에 의하면 평판의 배압계수(c_p)는 이차원의 경우 -1.13, 삼차원 경우는 -0.42 정도이다

³⁾ 비점성 유동 이론을 사용하여 Re 가 매우 클 경우의

뭉뚝한 물체의 후류를 와도를 분포시켜 모형화하고자 하는 많은 노력이 있었다. 그 중에서 Pullin[10]과 Turfus[11]의 결과를 통하여 수직 평판 분리유선이 타원으로 잘 근사가 됨을 확인하였다.

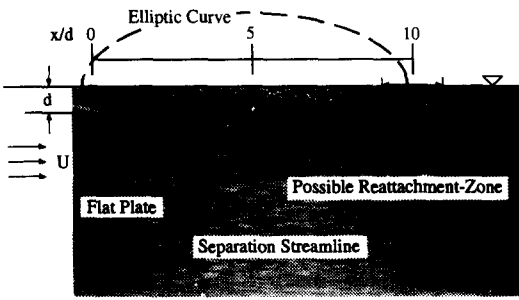


Fig. 3 Wake structure behind a vertical flat plate: $Re=7500, Fr=0.46$

형 곡선으로 잘 표현된다는 것을 알 수 있다. Suzuki[12]의 실험결과에 의하면 수면을 관통하는 평판에 있어서의 배압계수는 Fr 에 대하여 다음과 같은 관계를 보인다 ([12]의 식 (4.4)).

$$C_{p,b} = -0.106 Fr^2 - 0.691 \quad (1)$$

그런데 일반적으로 유벽 주위의 유동에 대한 Fr 는 0.2 미만이다. 따라서 Fr 에 의한 영향은 $O(10^{-3})$ 이므로 무시해도 큰 오차는 없다고 본다.

자유수면이 있을 경우의 전면의 유동에 대해서는 그간 선박의 선수에서의 유동과 관련하여 많은 연구가 이루어 졌다. 일례로 Dagan & Tulin[13]을 들 수가 있는데, 그들은 섭동법을 사용해서 Fr 가 작을 수록 선수에서의 유동이 수면을 반사면으로 대칭되는 영상과 합쳐진 물체의 무한 수심에서의 해석 결과와 같아진다는 것을 이론적으로 증명한 바 있다.³⁾

3. 해석방법

결국 문제는 유벽 전면의 압력을 반류영역의 영향을 고려하여 구하는데 있다. 우선 가장 손쉬운 방법으로는 반류영역의 존재를 무시하고 포텐셜

유동을 해석하는 방법이 있겠다. 잘 알려진 바와 같이 원주 주변의 압력분포를 포텐셜 유동으로 해석한 결과와 기존의 여러 실험결과가 박리가 일어나기 전부에서는 그런 대로 실측치와 유사한 값을 나타낸다. 그러나 이론으로 구한 압력은 실험으로 구한 값 보다 상당히 낮은 값을 나타낸다. 이것은 실제적으로는 유동이 반류영역의 영향으로 인해 물체 상단에서 덜 가속을 받고 또한 속도가 포텐셜 유동으로 해석한 것 보다 작기 때문이다.

따라서 계산결과와 신뢰도를 보다 높이기 위해서는 반류영역에 의한 배제 효과(displacement effect)를 적절히 고려해야 한다. 그간 여러 연구자들에 의해서 후류영역을 여러 가지 방법으로 고려한 후, 포텐셜 유동을 가정하여 전면의 압력을 구하고자 하는 노력이 이루어져 왔다 (예, Parkinson et al.[14]). 기존 연구에서는 주로 반류가 닫히지 않은 경우를 다루었는데 본 연구에서는 반류를 타원형 곡선으로 표현하여 닫힌 반류에 대한 압력장을 구하고자 한다. 앞서 실험결과에서 본 바와 같이 박리유선이 타원으로 잘 표현되는 것을 알 수 있었다. 일반적인 형상의 물체에 대하여 해석적인 해를 구할 수는 없으므로 본 연구에서는 패널법을 통해 수치해석적인 방법을 사용해 구하였다.

3.1 유동장

앞서 설명한 바와 같이 유벽의 변형을 구하기 위해서는 주어진 조건에서의 유벽주위 유동의 해석이 선행되어야 한다. 그런데 유벽 전면의 압력은 후류영역을 박리유선을 경계로 하는 강체로 표현하고 경계층에 의한 영향을 무시하면 전체유동을 패널법을 사용하여 구할 수 있다.

Fig. 4는 유벽에 있어서의 반류영역을 박리영역을 경계로하는 강체로 모형화하고 있음을 보여준다. 이때 물체의 외부유동은 포텐셜 유동으로 간주하고 아래와 같은 식을 만족하는 속도 포텐셜을 구한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

³⁾ 실험결과[12]에 의하면 높은 Fr 영역에서 점성의 영향으로 인하여 물체 전단의 수면근처에서 작은 닫힌 와류영역이 생기나 본 연구에서는 그 영향은 무시하였다.

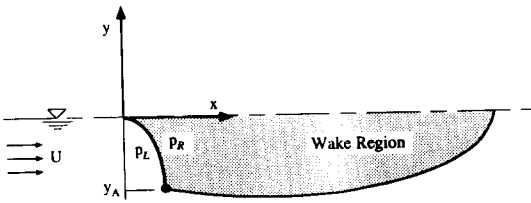


Fig. 4 Flow near an oil fence and modeling of the wake

또한 물체표면에서의 운동경계조건과 무한 거리에서의 소멸조건에 의해 아래와 같은 조건을 만족시켜야한다.

$$\begin{aligned} \text{물체의 표면상에서 } \mathbf{n} \cdot \nabla \phi &= 0, & (3) \\ \text{물체로부터 무한 원방에서 } \nabla \phi &\rightarrow \mathbf{U}. & (4) \end{aligned}$$

위에서 \mathbf{n} 은 물체 표면상에서의 단위 수직벡터이다. 수면에서는 일정압력 조건 대신 강체 벽의 조건을 적용한다. 즉,

$$y=0 \quad \text{에서} \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

이러한 조건은 실제 조건(일정압력 조건)과는 차이가 있으나 Fr가 작을 경우에는 그로 인한 차이가 그다지 크지 않다는 것은 앞서 거론한 바 있다 [13].

뭇뚱한 물체의 박리유선(separation streamline)의 형상에 대한 일반적인 이론은 아직 없는 듯하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 실험결과를 바탕으로 박리유선을 아래와 같은 타원형 곡선으로 단순화하여 표현하였다.

$$\frac{(x-x_A-6y_A)^2}{46y_A^2} + \frac{y^2}{4.6y_A^2} = 1 \quad (6)$$

위에서, (x_A, y_A) 는 유벽의 끝점(박리점)을 나타낸다.

3.2 유벽의 변형

정상상태의 유동에 의해 비닐천과 같이 자유변형하는 유벽의 변형은 다음과 같은 방정식으로 표현된다.

$$\frac{TX'(y)}{[1+X'(y)^2]^{3/2}} = \Delta p(y) = p_L - p_R \quad (7)$$

위에서 $X(y)$ 는 스킨트의 형상을 나타내고, X', X'' 은 각각 y 에 대한 일차, 이차 편미분, T 는 추에 의해 스킨트에 가해지는 장력(단위길이당 추의 무게), $\Delta p(y)$ 는 스킨트 양면에 걸리는 압력(p_L, p_R)의 차를 각각 나타낸다. 그런데 스킨트와 부체와의 접점에서의 변형은 없으므로 아래와 같은 조건이 성립하고

$$y=0 \quad \text{에서} \quad X = 0. \quad (8)$$

또한 유벽의 끝점에서 수평방향의 힘이 작용하지 않으면 다음과 같이 모멘트가 영인 조건이 추가된다.

$$y = y_A \quad \text{에서} \quad \frac{\partial X}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$\text{그리고} \quad \Delta p = 0.$$

문제의 특성상 유벽의 끝점(A)의 위치는 미리 알 수가 없다. 따라서 가정-보정 절차를 반복하며 유벽의 형상과 함께 구해져야 한다. 이때 유벽의 끝점의 위치를 구하기 위해서는 아래와 같은 유벽 스킨트의 길이방향의 비확장 조건을 추가로 부과해야 된다.

$$\int_0^{y_A} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial X}{\partial y}\right)^2} dy = d_c. \quad (10)$$

위에서 d_c 는 정수중에서의 유벽의 홀수이다.

식 (7)에서 (10)은 일종의 자유경계 문제이며 이를 통하여 주어진 하중에 의한 유벽의 변형된 형상을 구할 수 있다. 주어진 압력 분포에 대한 변형은 사차계도 Runge-Kutta 방법을 사용하여 구하였다.

3.3 연계된 문제의 해석

유동장과 유벽의 변형이 상호 연계되어 있는 반면 어느 한 쪽을 먼저 알 수는 없으므로 순차반복법을 사용하여 그 변형된 형태와 압력을 동시에 구해나간다. 즉, 먼저 유벽의 형태를 가정하고 여기에 따른 유동장을 해석하여 압력을 구한다. 이렇게 구한 압력을 사용하여 다시 변형된 형태를 구하고 다시 압력을 구하는 과정을 반복하는 것이다. 이렇게 구한 값들이 전 단계에서의 값들과 차이가 없을 때의 결과를 수렴해로 간주한다.

4. 결과 및 토의

본 방법에 의해 얻어진 전면 압력계수의 타당성을 검토하기 위하여 무한 수심에서의 수직평판에 대한 압력을 계산하여 기존의 Fage & Johansen[15]의 실험결과와 비교하였다 (Fig. 5).

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 이상유체의 가정하에 얻은 계산치는 실험치와 많은 차이를 보이고 있다. 그런데, 반류를 앞서 기술한 바와 같이 타원형 곡선으로 표현해 고려한 경우는 대체적으로 측정치와 잘 일치하고 있다. 평판의 끝 부분에서는 측정치보다 약간 낮은 압력을 나타내는데,

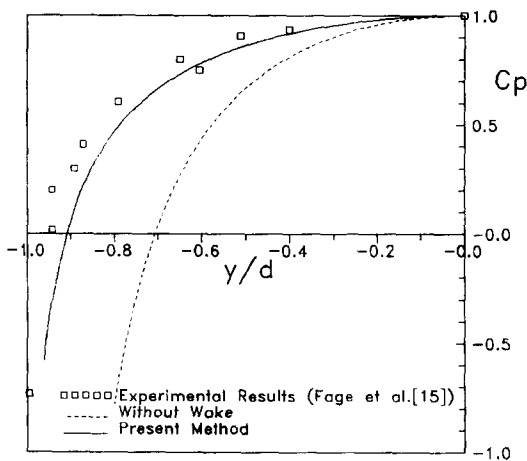


Fig. 5 Pressure distribution on the forward side of a vertical flat plate

이것은 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 반류 영역을 타원형 곡선으로 나타낼 경우 평판 끝 부근의 반류 두께가 다소 얇게 표현되었기 때문일 것이다. 그러나 총 유체력에 비해 그 차이가 매우 적으므로 스커트의 변형에는 그다지 영향을 미치지 않을 것이다.

한편, Table 1에는 무한 수중에서 압력저항이 지배적인 여러 형태의 저항계수를 구해 기존의 실험결과[5]와 비교해 보았다. 이때 배압계수는 실험조건에 따라 -1.38 ~ -1.13의 값을 갖는데, 저항계수 비교의 일관성을 위하여 Hoerner[5]가 추천한 -1.13을 사용하였다. 열린 또는 닫힌 반원주와 같이 전면의 형상의 변화가 비교적 완만해서 박리점이 Re에 따라 변하는 경우를 제외하고, 박리점이 고정된 여러 형태의 물체에 대해서는 실험치에 비해 약 10% 정도 작으나 상당히 유사한 결과를 얻을 수가 있었다. 실험치 보다 작게 나타나는 이유는 앞서 Fig. 5의 경우와 마찬가지로 물체의 박리점 근처의 반류형태와 관련이 있는 것으로 여겨진다.

Table 1 Drag coefficient of bluff bodies

Shape						
C_D	Hoerner[5]	1.20	1.16	1.55	1.55	1.98
	Present	1.40	1.40	1.47	1.47	1.81
Shape						
C_D	Hoerner[5]	2.00	2.30	2.20	2.05	
	Present	1.81	2.13	2.10	1.81	

Fig. 6은 변형된 유벽의 형태에 대해서 압력을 보정해 가면서 수렴해를 구해나가는 과정을 나타낸다. 배압계수는 Suzuki[12]의 결과를 바탕으로 -0.691을 사용하였다. 일반적으로 수렴해는 5-10번의 시행착오 과정을 거치면 구해진다.

Fig. 7은 실제로 사용되고 있는 유벽 가운데 정수중 흡수가 0.5m인 유벽에 대해 추의 무게를 8kg/m로 고정시키고 유속을 변화시켰을 때의

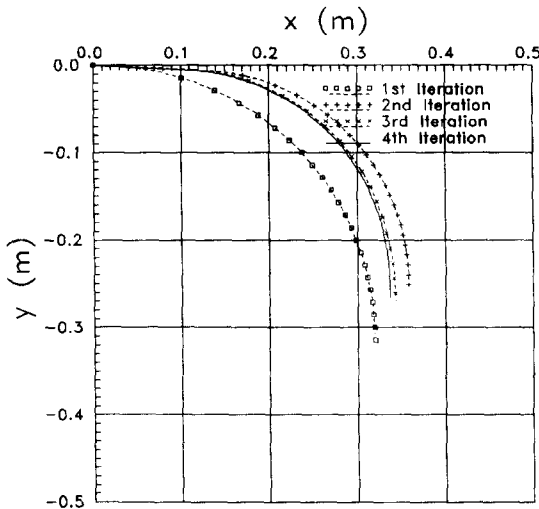


Fig. 6 Iteration procedures

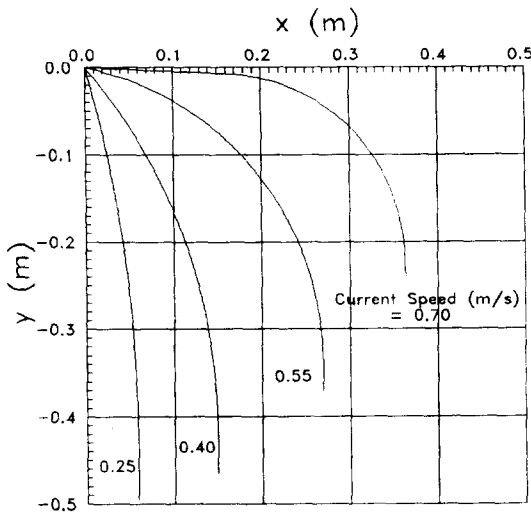


Fig. 7 Deformation of an oil fence with current speed

결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유속이 0.4m/s까지는 그다지 유효 흡수의 변화가 없는 반면 점차 흡수의 감소를 가져와 유속이 0.7m/s에서는 약 50%의 흡수감소가 유발됨을 알 수 있고, 그 이상의 유속에서는 실질적으로 기능을 발휘하지 못할 정도로 흡수가 감소하게

된다.

Fig. 8은 앞서와 같은 유벽에 대해 유속을 고정시키고 추의 무게를 변화시켰을 때의 결과이다. 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 추의 무게가 줄어들면서 흡수의 감소도 커짐을 알 수 있다.

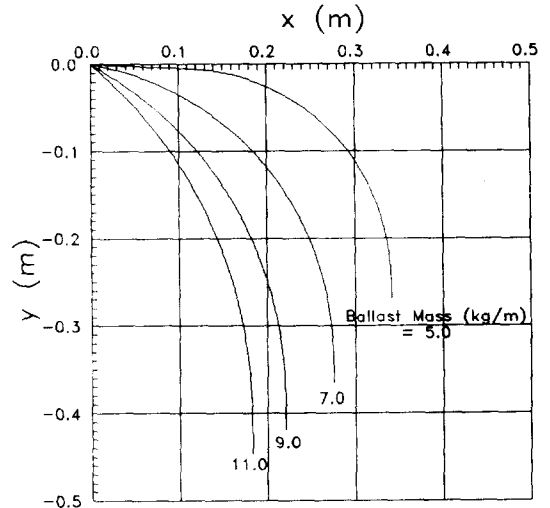


Fig. 8 Deformation of an oil fence with ballast mass

5. 결론

임의의 형상을 갖는 이차원의 몽뚝한 물체에 작용하는 압력을 반류영역을 강체로 대체하여 효율적으로 계산하는 방법을 확립하였다. 또한 이러한 압력 계산법과 박막의 변형방정식을 연계하여 조류중 유벽의 변형을 해석하는 방법을 개발하였다.

가시화와 기존의 실험결과를 통해 Fr가 작을 경우 몽뚝한 반물체(semi-submerged body)의 반류구조가 수면을 반사면으로 대칭되는 영상과 합쳐진 물체를 무한 수심에 분리판을 후면에 달아서 두었을 경우의 반류구조와 유사함을 알 수 있었다. 또한 후부의 박리유선이 타원형 곡선 형태로 잘 표시될 수 있음을 알 수 있었다. 본 방법을 이용하여 수직 평판 주위의 압력 분포를 계산하여 기존의 실험결과와 비교해본 바 상당히 잘 일치함을 확인하였다. 또한 여러 형상의 물체의 압력저항을

계산한 후 기존 실험치와 비교하여 10% 이하의 오차로 저항 계수를 구할 수 있음을 확인하였다. 한편 물체 전면의 압력을 보다 정확히 구하기 위해서는 물체 끝 부근의 반류 영역의 크기가 개선되어야 함을 알 수 있었다.

실제 사용되고 있는 유벽의 조류중 변형을 계산해 본 결과 조류속도가 증가하거나 추의 무게가 감소함에 따라서 변형이 심해지고 이로 인해 상당한 흡수의 감소가 야기될 수 있음을 알 수 있었다.

효과적인 보유를 위해서는 흡수가 가능한 커야 한다는 것이 통념이다. 그러나 이러한 결과를 통해서 흡수를 증가시켜도 변형에 의하여 크게 효과를 나타내지 못하고 유체저항만 증가시키는 결과를 초래할 수도 있다는 것을 알 수 있다. 유벽의 변형은 결국 유체의 압력저항에 의한 것으로 볼 수 있다. 따라서 변형을 줄이기 위해서는 유벽의 형상 개선을 통해 저항을 줄이려는 노력이 병행되어야 한다.

그러한 방법으로는 우선 기존의 유벽에 적절한 부착물을 달아서 유벽 주위의 압력을 조절하는 방법이 있다. 예를 들어 유벽 하단의 추를 적절히 설계된 익형으로 대치함으로써 하향의 유체력을 유발시켜 스킵트에 작용하는 장력을 증가시키고, 또한 스킵트 끝에서의 박리를 조절해 반류영역의 와류 강도를 낮추어 후부의 압력을 높여 변형을 줄이는 방법을 고려해 볼 수 있을 것이다.

한편 Koenig & Roshko[16]의 연구 결과에 의하면 축대칭 물체에 있어 일정한 거리의 후부에 다른 하나의 물체를 설치하면 특정 거리에 있어서 저항이 매우 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 유벽의 설치에 적용하여 유벽의 일정한 후부에 다른 하나의 유벽을 추가로 설치해 그 간격을 적절히 조절, 변형을 효과적으로 줄이면서 전면의 유벽에서 유출된 기름도 두 유벽사이에 어느 정도는 가둘 수가 있어 변형방지와 방제효율을 동시에 높일 수도 있을 것이다.

또한 보다 정확한 변형 형태를 예측하고 유벽하단으로 유출된 기름의 거동을 예측하기 위해서는 추후에 자유수면 근처에서의 반물체의 반류 구조에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학재단지원의 첨단유체공학연구센터 (AFERC) 과제중의 일부로 수행되었다. 본 과제 수행과 관련된 여러 지원에 사의를 표한다. 또한 실험을 도와준 김형범씨 에게도 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, C.M. and Kang, K.H., "Investigations on containment-capability and dynamic response of an oil fence in waves," Annual Report of Advanced Fluids Engineering Research Center, No. AFR-93-FGH, pp. 1-42, 1994.
- [2] Lee, C.M. and Kang, K.H., "Development of optimum oil fences in currents and waves," Annual Report of Advanced Fluids Engineering Research Center, No. AFR-94-FGH, pp. 7-41, 1995.
- [3] Tsukino, Y., Sugawara, K. and Tsuchida, F., "Oil containment performance of oil booms of type A and B," Technical Report of Institute of Ocean Environmental Technology, vol. 1, no. 1, pp. 35-55, 1981. (in Japanese)
- [4] Sloan, S.L., Pol, D.F. and Nordvik, A.B., Phase 2 : At Sea Towing Tests of Fire Resistant Oil Containment Booms, Marine Spill Response Corporation, Technical Report Series 95-001, 1995.
- [5] Hoerner, S.F., Fluid-Dynamic Drag, published by the author, Midland Park, New Jersey, 1968.
- [6] Acrivos, A., Leal, L.G., Snowden D.D. and Pan, F., "Further experiments on steady separated flows past bluff objects," J. Fluid Mech. vol. 34, pp. 25-48, 1968.
- [7] Roshko, A., "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number," J. Fluid Mech., vol. 10, pp. 345-356, 1961.
- [8] Good, M.C. and Joubert, P.N., "The form drag of two-dimensional bluff-plates immersed in turbulent boundary layers," J. Fluid Mech., vol. 31, pp. 547-582, 1968.

- [9] Durst, F. and Rastogi, A.K., "Turbulent flow over two-dimensional fences," In *Turbulent Shear Flows 2*, (Ed. Bradbury et al.), Springer-Verlag, pp. 218-231, 1980.
- [10] Pullin, D.I., "A constant-vorticity Riabouchinsky free-streamline flow," *Quart. J. Mech. Appl. Math.*, vol. 37, pp. 619-631, 1984.
- [11] Turfus, C., "Prandtl-Batchelor flow past a flat plate at normal incidence in a channel-inviscid analysis," *J. Fluid Mech.*, vol. 249, pp. 59-72, 1993.
- [12] Suzuki, K., "On the drag of two-dimensional bluff bodies semi-submerged in a surface flow," *J. Society of Naval Architects of Japan*, vol. 137, pp. 22-35, 1975. (in Japanese)
- [13] Dagan, G. and Tulin, M.P., "Two-dimensional free-surface gravity flow past blunt bodies," *J. Fluid Mech.*, vol. 51, pp. 529-543, 1972.
- [14] Parkinson, G.V. and Jandall, T., "A wake source model for bluff potential flow," *J. Fluid Mech.*, vol. 40, pp. 577-594, 1970.
- [15] Fage, A. and Johansen, F.C., "On the flow of air behind an inclined flat plate of infinite span," *Proc. Roy. Soc. A*, vol. 116, pp. 170-197, 1927.
- [16] Koenig, K. and Roshko, A., "An experimental study of geometrical effects on the drag and flow field of two bluff bodies separated by a gap," *J. Fluid Mech.*, vol. 156, pp. 167-204, 1985.