

자유표면과 벽근방에서 운동하는 물체들의 침가질량결수결정

래기훈

물속에서 운동하는 물체가 받는 가속도에 관계되는 힘과 모멘트는 침가질량에 의하여 결정된다. 물체의 침가질량은 헤쓰-스미스(Hess-Smith)방법이나 공학적인 계산방법으로 결정한다.[2] 이러한 계산법에서는 자유표면이나 벽경계의 영향을 고려할수 없다. 선행연구[3]에서는 Fluent의 동적그물방법을 리용하여 가속운동하는 물체에 작용하는 힘을 구하고 물체의 침가질량을 계산하였는데 한번의 계산에서 1개의 침가질량결수만 구할수 있으며 자유표면과 벽경계의 영향은 고려하지 못하였다.

논문에서는 물을 비압축성리상류체로 보고 2개의 물체가 운동하는 경우 침가질량을 결정하는 문제에 기초하여 자유표면과 벽경계가 존재하는 경우 물체의 침가질량을 결정하는 방법을 연구하였다.

1. 물체들의 운동에 의한 섭동운동속도포텐셜의 결정

물체들의 운동에 의한 물의 섭동운동속도포텐셜을 Φ_B , 파도의 속도포텐셜을 Φ_W , 반사파의 속도포텐셜을 Φ_R 라고 하면 물의 운동의 속도포텐셜은 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi(M, t) = \Phi_W(M, t) + \Phi_R(M, t) + \Phi_B(M, t) \quad (1)$$

일반적으로 바다상태는 우연적이지만 실천적으로는 어떤 바다상태를 가정하고 파도를 평가하여 Φ_W 를 주게 된다. 그러므로 $\Phi(M, t)$ 의 결정문제는 Φ_W 가 주어진 조건에서 Φ_R 와 Φ_B 를 구하는데 귀착된다. 자유표면에서 경계조건을 근사적으로

$$\frac{\partial^2 \Phi_W}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_W}{\partial z} = 0, \quad \Phi_R = \Phi_B = 0 \quad (2)$$

으로 놓으면 Φ_R 와 Φ_B 에 관한 문제는 다음과 같이 설정된다.

$$\left. \begin{array}{l} \nabla^2 \Phi_R = 0 \\ \Sigma: \frac{\partial \Phi_R}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_W}{\partial n} \\ \Sigma_0: \Phi_R = 0 \\ M \rightarrow \infty: \nabla \Phi_R \rightarrow 0 \end{array} \right\}, \quad \left. \begin{array}{l} \nabla^2 \Phi_B = 0 \\ \Sigma: \frac{\partial \Phi_B}{\partial n} = V \cdot n \\ \Sigma_0: \Phi_B = 0 \\ M \rightarrow \infty: \nabla \Phi_B \rightarrow 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

여기서 $V(M, t)$ 는 물체결면위의 점 M 의 운동속도이고 n 은 점 M 에서 물체결면의 외법선단위벡터이다. 그리고 Σ, Σ_0 은 각각 물체결면, 자유표면이다.

몇개의 물체가 운동하는 경우에 Φ_B 의 결정문제를 고찰하자.

일반성을 잃지 않으면서 물체가 2개(한 물체는 경계일수 있다.)인 경우를 고찰하자.

$$\Phi_B = v_{i1}\varphi_{i1} + v_{i2}\varphi_{i2}$$

로 놓자. 여기서 $v_{11}=V_{0ix}$, $v_{21}=V_{0iy}$, $v_{31}=V_{0iz}$, $v_{41}=\omega_{0ix}$, $v_{51}=\omega_{0iy}$, $v_{61}=\omega_{0iz}$ ($i=1, 2$) 이고 $V_{0i}(V_{0ix}, V_{0iy}, V_{0iz})$, $\omega_{0i}(\omega_{0ix}, \omega_{0iy}, \omega_{0iz})$ ($i=1, 2$) 는 각각 두 물체의 순간속도와 순간각속도들이다. 결국 φ_{i1} , φ_{i2} 에 관한 문제는 두 물체의 표면을 각각 Σ_1 , Σ_2 라고 하면

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{iJ} &= 0 \\ \nabla\varphi_{iJ}|_{\infty} &= 0 \end{aligned} \right\} (i=\overline{1, 6}), \quad \left. \frac{\partial\varphi_{iJ}}{\partial n} \right|_{\Sigma_J} = n_{iJ} \quad (i=\overline{1, 3})$$

$$\left. \frac{\partial\varphi_{iJ}}{\partial n} \right|_{\Sigma_J} = (\mathbf{r} \times \mathbf{n}_J)_{i-3} \quad (i=\overline{4, 6}, J=1, 2)$$

$$\left. \frac{\partial\varphi_{i1}}{\partial n} \right|_{\Sigma_2} = 0, \quad \left. \frac{\partial\varphi_{i2}}{\partial n} \right|_{\Sigma_1} = 0, \quad \varphi_{i1}|_{\Sigma_0} = \varphi_{i2}|_{\Sigma_0} = 0 \quad (i=\overline{1, 6})$$
(4)

으로 설정된다. 이와 같이 물의 운동의 속도포텐셜은 문제 (3)과 (4)를 풀어 결정할수 있다.

2. 첨가질량결수, 물체에 작용하는 파도에 의한 힘과 모멘트

속도포텐셜 φ_{i1} , φ_{i2} 에 의하여 첨가질량결수들은 다음과 같이 결정된다.[2]

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{1ij} &= \rho \iint_{\Sigma_1} \varphi_{i1} \frac{\partial\varphi_{j1}}{\partial n} d\sigma, & \lambda_{2ij} &= \rho \iint_{\Sigma_2} \varphi_{i2} \frac{\partial\varphi_{j2}}{\partial n} d\sigma \\ \lambda_{12ij} &= \rho \iint_{\Sigma_1} \varphi_{i2} \frac{\partial\varphi_{j1}}{\partial n} d\sigma, & \lambda_{21ij} &= \rho \iint_{\Sigma_2} \varphi_{i1} \frac{\partial\varphi_{j2}}{\partial n} d\sigma \end{aligned} \right\} (i, j=\overline{1, 6}) \quad (5)$$

여기서 λ_{1ij} , λ_{2ij} 는 매 물체의 첨가질량결수이고 λ_{12ij} , λ_{21ij} 는 호상작용에 의한 매 물체의 첨가질량결수이다.

Φ_W , Φ_R , Φ_B 가 결정되었을 때 매 물체에 작용하는 파도에 의한 힘과 모멘트는 선행 연구[1]에서 제시된 방법에 따라 계산할수 있다.

3. 자유표면과 벽근방에서 운동하는 물체의 첨가질량결수계산실례

속도포텐셜을 결정하는 문제는 조화방정식의 풀이를 구하는 문제로 된다. 조화방정식의 풀이는 Fluent에 있는 리용자정의스칼라(UDS)방정식

$$\frac{\partial\rho\varphi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \varphi_k - \Gamma_k \frac{\partial\varphi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\varphi_k} \quad (6)$$

에 의하여 구할수 있다. 사실 $u_i \equiv 0$, $S_{\varphi_k} \equiv 0$, $\Gamma_k = 1$ 이면 이 방정식은 조화방정식 $-\Delta\varphi_k = 0$ 으로 되며 Fluent6.3에서는 φ_k 를 50개 동시에 설정하여 수치풀이할수 있다. 또한 강체벽 혹은 자유표면에서 경계조건들은 리용자정의함수(UDF)의 마크로 DEFINE_PROFILE를 리용하여 작성하고 Visual C++ 6.0으로 번역하여 실현할수 있다. 식 (5)–(7)의 곡면적분들은 UDF의 마크로 DEFINE_ADJUST를 리용하여 Σ_1 혹은 Σ_2 에 따라 계산할수 있다.[1]

자유표면의 영향을 고려할 때에는 두번째 물체가 없는 경우로 되며 부동인 강체벽(바닥)이 있는 경우에는 $V_{02} = \omega_{02} = \mathbf{0}$ 으로 놓으면 된다.

계산은 회전타원체가 무한류체속에서, 자유표면밑에서, 강체벽면우에서 운동하는 경우에 대하여 진행하였다. 첨가질량결수는 식

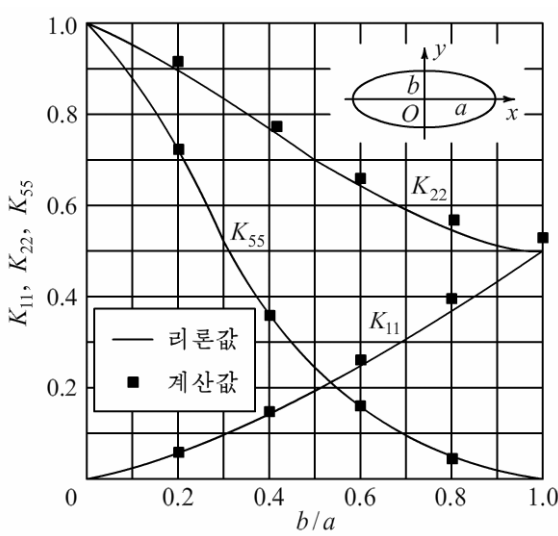


그림 1. 무한류체속에서 회전타원체의 첨가질량결수
 a 와 b 는 타원체의 긴반경과 짧은반경이다.

$$\lambda_{11} = K_{11} \frac{4}{3} \pi \rho a b^2$$

$$\lambda_{22} = K_{22} \frac{4}{3} \pi \rho a b^2$$

$$\lambda_{55} = K_{55} \frac{4}{15} \pi \rho a b^2 (a^2 + b^2)$$

$$K_{22} = K_{33}, \quad K_{44} = 0, \quad K_{55} = K_{66}$$

에 따라 K_{ij} 를 계산하여 평가하였다.

그림 1은 무한류체속에서 회전타원체의 첨가질량결수를 보여주었다.

표 1에는 자유표면으로부터의 거리와 밀경계벽면으로부터의 거리에 따르는 첨가질량결수들의 수치계산값을 제시하였다. 그림과 표에서 h 는 경계벽면 혹은 자유표면으로부터 회전타원체중심까지의 거리이고

표 1. 자유표면으로부터의 거리와 밀경계벽면으로부터의 거리에 따르는 첨가질량결수들의 수치계산값

h/b	b/a	자유표면의 영향을 받는 경우					밀경계벽면의 영향을 받는 경우				
		K_{11}	K_{22}	K_{33}	K_{55}	K_{66}	K_{11}	K_{22}	K_{33}	K_{55}	K_{66}
3	0.2	0.061	0.936	0.937	0.731	0.730	0.061	0.936	0.937	0.731	0.730
2	0.2	0.055	0.889	0.897	0.710	0.707	0.066	0.958	0.944	0.719	0.730
3	1	0.555	0.556	0.555	0	0	0.555	0.556	0.555	0	0
2	1	0.523	0.541	0.523	0	0	0.565	0.565	0.565	0	0
1.5	1	0.501	0.513	0.501	0	0	0.587	0.596	0.587	0	0

논문에서 제기한 방법으로 계산한 값과 선행연구[2]에서의 결과와의 상대편차는 1~5% 정도이다.

다음으로 강체벽면으로부터의 거리에 따르는 원추와 원기둥결합체의 첨가질량결수를 동적그물을 리용하여 계산하였다.(그림 2) 계산에서 R 는 단위길이로 취하였다. 표 2에 H/R 에 따르는 첨가질량

표 2. H/R 에 따르는 첨가질량결수

H/R	λ_{11}	λ_{22}	λ_{66}	λ_{35}
0	171	237	995	145
1	326	224	887	133
3	296	220	866	130
6	290	219	861	129
10	286	219	860	129

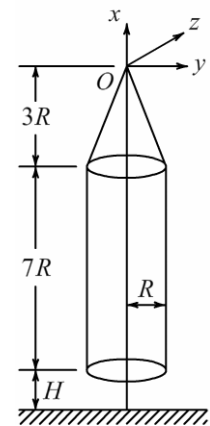


그림 2. 원추원기둥 결합체

결수들을 제시하였다.

계산결과는 물체가 경계로부터 $H/R=3$ 이상 떨어져있을 때에는 경계의 영향을 고려하지 않아도 된다는것을 보여준다. 이 방법을 곡면벽근방에서 운동하는 물체, 운동하는 물체에서 발사되는 물체의 첨가질량결수들을 결정하는 문제에 적용할수 있다.

맺는 말

계산결과는 제기된 방법이 자유표면과나 벽경계의 영향을 고려하여 첨가질량결수들과 물체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하는데서 효과적인 방법이라는것을 보여준다. 그러므로 유한구역에서 운동하는 경우에도 자유표면의 존재를 고려하여 힘과 모멘트를 결정할수 있다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 58, 11, 17, 주체101(2012).
- [2] J. L. Hess et al.; Journal of Ship Research, 8, 2, 22, 1964.
- [3] 马烨 等; 计算机仿真, 24, 5, 75, 2007.

주체106(2017)년 8월 10일 원고접수

A Study for Calculating Added Mass Coefficient of Underwater Vehicle under Free Surface and Wall

Thae Ki Hun

The motions of the water are assumed to be potential ones. The added mass coefficient of underwater vehicle with free surface and wall is determined by using numerical calculation of Laplace equation of velocity potential.

Key words: added mass, numerical calculation