

내 부 파

조용식 (한양대학교 공과대학 토목공학과 조교수)

손일수 (건일엔지니어링 사장)

1. 서론

안정한 성층유체(stably stratified fluids)내에서 밀도변화와 중력사이의 상호작용은 과학적으로 매우 흥미로운 현상을 야기시키는데 이중에서 가장 중요하며 또한 연구할만한 가치가 있는 것은 아마 유체내부에 생기는 파랑일 것이다. 이와 같은 파랑은 유체의 표면에 발생하는 표면파(surface wave)와는 상대적으로 유체내부에 형성되기 때문에 내부파(internal wave)라 불린다.

20세기 초에 노르웨이 fjord식 해안의 입구를 지나는 선박들은 동일한 동력으로 평소의 속도를 유지하지 못하고 속도가 작아지게 되는 경험을 하고는 했는데 선원들은 이를 "Dead Water" 현상이라고 불렀다. 해양학자 Ekman은 어느 특정한 속도에서 선박 동력의 일부는 내부파를 생성하는데 소모되기 때문에 선박이 평소의 속도를 유지할 수 없음을 밝혔다. 내부파는 일반적으로 서로 다른 밀도를 갖는 유체가 층을 형성할 때 발생한다. 내부파는 또한 원자력발전소와 화력발전소의 온배수에 의해서도 발생할 수 있으며, 대규모 하천에서 홍수로 인한 많은 양의 담수가 바다로 흘러들어 오는 경우에도 발생할 수 있다.

내부파는 강한 저항력으로 해저에서의 석유 시추를 위한 시추공 작업을 방해할 뿐만 아니라(Osborne 과 Burch, 1980), 군사적인 측면에서도 매우 중요하다. 예를 들어, 1963년 미국 Massachusetts주 해안에서 350km 떨어진 대서양에서 승선인원 129명을 포함한 미국의 핵잠수함 Thresher호의 실종도 내

부파에 의한 것으로 알려졌다(Thurman, 1988). 아울러, 내부파는 해양순환, 바다물의 염도분포 및 해저 생물분포 등과도 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.

내부파는 타일랜드의 Andaman Sea(Osborne과 Burch, 1980), 캐나다의 서부해안(Farmer와 Smith, 1980), 필리핀의 Sulu Sea(Liu 등, 1985), 미국의 뉴욕만(Liu, 1988) 등에서 발견되고 있으며, 국내에서는 최근 양쯔강의 홍수에 따른 담수의 유입으로 제주도 근처에서 내부파가 관측된 보고가 있다.

내부파는 미국을 비롯한 여러나라에서는 오랫동안 지구물리학, 해양공학 및 해안공학, 응용수학 및 환경유체역학분야에서 연구되어 왔으나 국내에서의 연구는 거의 없는 실정이다. 내부파에 관한 연구는 주로 수리모형실험과 이론적인 방법에 의해 주로 수행되어 왔으며, 최근에는 수치모형을 이용한 연구가 활발하게 진행중이다.

본 기사에서는 내부파의 특성, 특히 고립파(solitary wave)의 특성에 대하여 주로 기술한다. 다음 장에서는 내부파의 지배방정식을 기술하며, 3장에서는 내부파의 발생을 기술한다. 아울러, 내부파의 관측에 대해서도 간략히 언급한다. 마지막으로, 4장에서는 결론을 기술한다

2. 지배방정식

내부파를 해석하는 관점에서 일반적으로 미소진폭파이론(small amplitude wave theory)과 장파이론

(long wave theory)이 사용된다. 미소진폭파이론을 사용할 경우 파장에 비하여 진폭이 매우 작다는 가정을 이용하여 선형화된 방정식을 이용할 수 있으며, 일반적으로 무한한 수의 주기파를 해석하는 경우에 사용한다(Davies와 Acrivos, 1967). 반면에, 장파이론을 이용할 경우에는 수심에 비하여 파장이 매우 길다는 가정을 이용한 것으로 일반적으로 고립파로 해석한다.

미소진폭파이론에 의한 해석은 상대적으로 쉬우므로 본 기사에서는 장파이론을 이용하여 내부파를 해석하는 것을 간략히 소개한다. 먼저, 가장 간단한 예로써 그림 1.과 같은 두 개의 서로 다른 밀도를 갖는 유체로 구성된 성층화된 유체를 생각하자. 위층과 아래층의 유체는 각각 유속 v_1 과 v_2 로 이동하며, 각층의 수심은 h_1 과 h_2 로 주어지며, 전체수심은 $h = h_1 + h_2$ 로 정의된다. 또한, 각 층의 밀도는 ρ_1 과 ρ_2 로 표시된다. 그림 1.은 안정화된 성층구조를 갖는 흐름 영역으로 경계면에 의해 분리된 염수층과 담수층으로 구성된 것으로 생각할 수 있다.

Segur와 Hammack(1982)에 따르면 위층과 아래층 유체의 속도포텐셜(velocity potential)은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi_1 \sim (A \sinh ks + B \cosh ks)e^{ik(x-ct)} \quad (1)$$

$$\Phi_2 \sim D \cosh k(z + h_2)e^{ik(x-ct)} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 아래첨자 1과 2는 그림 1에 나타난 것과 같이 각각 성층화된 유체에서 위층과 아래층을 의미하며, A , B 및 D 는 경계조건으로 구해지는 상수이다. 또한, k 와 c 는 내부파의 파수(wavenumber)와 파속(phase velocity)를 의미한다.

파수와 파속은 다음과 같이 주어지는 선형분산방정식을 만족해야 한다.

$$\left(\frac{kc^3}{g}\right)^2 [1 + (1-\Delta)T_1T_2] - \frac{kc^2}{g} [T_1 + T_2] + \Delta T_1T_2 = 0 \quad (3)$$

식 (3)에서 다음과 같은 관계식이 사용되었다.

$$\Delta = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}, T_1 = \tanh kh_1, T_2 = \tanh kh_2$$

Boussinesq 근사, 즉 $\Delta \rightarrow 0$ 를 적용하면 식 (3)은 다음과 같이 두 개의 식으로 간략화된다. 먼저, 표면파에 관한 분산방정식은 다음과 같이 간략화된다.

$$c_s^2 = \frac{g}{k} \tanh k(h_1 + h_2) + O(\Delta) \quad (4)$$

또한, 내부파에 관한 분산방정식은 다음과 같이 된다.

$$c_i^2 = \frac{g\Delta}{k} \frac{T_1T_2}{T_1+T_2} [1 + O(\Delta)] \quad (5)$$

즉 $k(h_1 + h_2) \rightarrow 0$ 또는 $kh \rightarrow 0$ 이면 분산방정식은 더욱 간단하게 된다. 먼저, 표면파의 분산방정식은

$$c_s^2 = g(h_1 + h_2) \quad (6)$$

이 되며, 내부파에 관한 분산방정식은 다음과 같이 된다.

$$c_i^2 = \frac{g\Delta h_1 + h_2}{h_1 + h_2} \quad (7)$$

Segur와 Hammack(1982)는 섭동법(perturbation method)을 이용하여 다음과 같은 내부파에 대한 KdV(Korteweg-de Vries) 방정식을 유도하였다.

$$\frac{1}{c_i} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{3}{2} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) \xi \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{h_1 h_2}{6} \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^3} = 0 \quad (8)$$

식 (8)에서 ξ 는 자유수면변위 (free surface displacement)이며, 파속 c_i 는 식 (7)에 주어져 있다. 식 (8)은 $\Delta \ll 1$ 일 경우에만 유효하다. 참고로, KdV 방정식은 약 비선형(weakly nonlinear)과 약 분산성(weakly dispersive)을 나타내는 Boussinesq 방정식에 파랑의 진행방향으로 한 방향으로 한정하여 유도된 식이다.

Segur와 Hammack는 다음과 같은 좌표변환을 식 (8)에 적용하여 전형적인 KdV 방정식을 유도하

었다.

$$x = \frac{x - ct}{(h_1 + h_2)^{1/2}}, \tau = \frac{1}{6} \left(\frac{gD}{h_1 + h_2} \right)^{1/2} t,$$

$$f = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) \xi \quad (9)$$

식 (9)로 주어진 관계식을 식 (8)에 대입하면 다음과 같이 단순화된 KdV 방정식을 유도할 수 있다.

$$f_\tau + 6ff_\tau = f_{\text{xxx}} = 0 \quad (10)$$

일반적으로 KdV 방정식은 두 개의 정확해를 갖는데 하나는 단일파로 존재하는 고립파이며, 다른 하나는 주기파로 존재하는 크노이드파(cnoidal wave)이다. Herman(1992)은 Andaman Sea에서 관측된 내부 고립파(internal solitary wave)의 지배방정식 또한 식 (10)임을 증명하였다.

3. 내부파의 발생

안정한 성층유체에서 내부파의 생성은 많은 학자들에 의해 연구되었다(Bell, 1975; Thorpe, 1975; Garrett과 Munk, 1979; Lansing과 Maxworthy, 1984). 특히, Thorpe(1975) 및 Garrett과 Munk(1979)는 심해에서의 내부파 생성에 관해 연구하였다. 내부파는 발생요인에 따라 크게 표면발생(surface generation), 내부발생(interior generation) 및 바닥발생(bottom generation)으로 구분된다. 내부파의 발생에 관한 물리적 특성은 매우 어려운 과제이며, 또한 수학적으로 매우 복잡하므로 본 기사에서는 간략히 서술한다.

내부파는 일정한 속도를 가지고 자유수면을 지나는

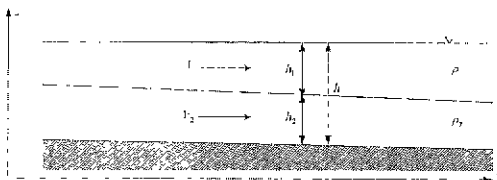


그림 1. 성층화된 유체시스템

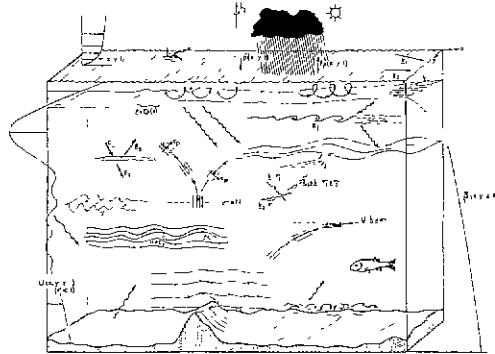


그림 2. 내부파에 영향을 주는 모든 과정 (Thorpe, 1975)

이를테면 선박과 같은운동압력장(travelling pressure field)과 같은 외부작용에 의해 발생된다 Ekman이 해석한 “Dead Water” 현상도 성층유체 내에서 천천히 움직이는 물체에 의해 발생한 내부파가 선박의 진행을 방해하는 일종의 항력 역할을 하는 것이다. 내부파는 물론 바다에서만 발생하는 것은 아니고 대규모 산악지형을 통과하는 바람 등에 의해서 대기중에서도 발생하는 것으로 알려졌다(Baines, 1987).

Lansing과 Maxworthy(1984)는 용기부분을 통과하는 조류에 의해 발생하는 내부파에 대하여 연구하였다. 특히, 조류가 흐를 때 해저 용기부분의 뒤쪽에서 lee wave가 발생하며, 이는 밀도의 성층화, 바닥 형상과 형태, 조류흐름방향 및 크기와 관련 있음을 조사하였다. 지진으로 발생한 내부 지진해일(internalsunami)은 Hammack(1980)과 Segur와 Hammack(1982) 등에 의해 연구되었다.

그림 2.는 Thorpe(1975)에 의해 처음 발표된 그림으로 내부파에 영향을 주는 각종 변수를 도시한 것으로 내부파의 생성과정을 비교적 상세하고 쉽게 설명하고 있다. 비록, 각 기호에 대한 설명은 없더라도 독자들이 쉽게 이해할 수 있을 것이다.

심해에서 내부파의 상세한 움직임을 이해하기 위해서는 내부파에 관한 현장 조사와 관측 기술이 매우 중요하다. 특히, 내부파에 대한 정확한 지식과 정보는 심해에서의 석유생산과 군사적인 측면, 즉 잠수함

의 안전한 운항 등과 매우 밀접한 관계가 있으므로 보다 정확한 관측이 요구된다. 최근에는 넓은 범위에서 내부파의 특성을 관측할 수 있는 다양한 센서들이 있으며, 관측 장비에 관한 보다 상세한 사항은 최근의 내부파와 관련된 최근의 연구를 참조할 수 있다.

5. 결론

내부파는 해수면에서 많은 에너지의 유입으로 야기되는 파랑보다 적은 에너지의 유입으로도 더 큰 파고를 갖는 파랑을 만들 수 있다. 이는 내부파가 자유수면과 대기 사이에 존재하는 밀도차보다 더 작은 밀도차를 가진 접촉면을 따라 이동하기 때문이다. 내부파는 일반적으로 장파의 형태로 이동하는 것으로 믿어진다

내부파에 대해서는 앞으로 연구할 과제가 많이 남아 있으며, 특히, 내부파의 존재, 발생과 전파과정에 대한 해석은 오랫동안 연구가 진행되어 왔음에도 불

구하고, 발생과정은 아직 물리 및 수학적으로 더 상세한 연구를 필요로 한다. 심해에서 내부파의 전파과정은 미소진폭파이론 또는 장파이론으로 해석할 수 있으며, 장파의 형태를 갖는 내부파의 지배방정식은 KdV-type 식이다. 최근의 몇몇의 연구에서 보여주듯이 수리모형실험과 수치해석은 내부파를 해석하는 매우 효율적인 수단으로 사용될 수 있다. 다만, 수리모형실험 자료와 수치해석 결과를 검증하기 수단으로 신뢰할만한 현장 조사와 관측 자료를 얻는 것 또한 중요하다.

내부파는 해수순환, 염도분포, 해양생태 및 해양환경 변화 등에 같이 다양한 범위에 영향을 끼치는 것은 물론 군사적인 목적으로 이용이 가능하기 때문에 이에 대한 연구는 매우 중요하다. 비록, 현재까지는 국내에서의 내부파에 관한 연구는 거의 없었으나 앞으로는 좀 더 활발하고 우수한 연구가 진행되기를 바란다. 🌐

〈참고 문헌〉

- Bell, T H. (1975). "Topographically generated internal waves in the deep ocean," *Journal of Geophysical Research*, Vol 80, pp. 320-327
- Baines, P.G. (1987) "Upstream blocking and airflow over mountains," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol 19, pp 75-97.
- Davis, R E. and Acrivos, A. (1967) "Solitary internal waves in deep water," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 29, pp. 593-607.
- Farmer, D.M. and Smith, J.D. (1980) "Tidal interaction of stratified flow with a sill in Knight Inlet," *Deep Sea Research*. Vol. 27, pp. 239-254.
- Garrett, C. and Munk, W (1979). "Internal waves in the ocean," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 11, pp 339-369.
- Hammack, J.L (1980). "Baroclinic tsunami generation " *Journal of Physical Oceanography*, Vol 10, pp. 1455-1467
- Herman, R. (1992). "Solitary waves," *American Scientist*, Vol 80, pp 350-361.
- Koop, C G. and Butler, G (1981). "Internal solitary waves in a two fluid system," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 112, pp 225-251.
- Lansing, F.S. and Maxworthy, T (1984). "On the generation and evolution of internal gravity waves," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 145, pp. 127-149.
- Liu, A.K. (1988). "Analysis of nonlinear internal waves in the New York Bight " *Journal of Geophysical Research*. Vol 93, pp 12317-123291.
- Liu, A K , Holbrook, J R and Apel, J R. (1985) "Nonlinear internal wave evolution in the Sulu Sea," *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 15, pp. 1613-1624.
- Osborne, A.R and Burch, T.L. (1980). "Internal solitons in the Andaman Sea," *Science*, Vol 208, pp. 451-460

Segur, H. and Hammack, J.L. (1982). "Soliton models of long internal waves." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 118, pp. 285-304.

Thorpe, S.A.(1975). "The excitation, dissipation, and interaction of internal waves in the deep

ocean," *Journal of Geophysical Research*, Vol 80, pp. 328-338.

Thurman, H.V. (1988). *Introductory Oceanography*, 5th edition, pp.515, Merrill Publishing Company.