大韓機械學會誌 第17卷 第1號 pp. 18~22, 1977

<解 說>

地球物理流體力學

玄 在 民*

1. 緖 論

機械工學徒들이 一般的으로 다루는 流體力學問題에는 人工的으로 제조된 物體, 例를 들면 流體機械, 船舶, 航空機等과 關聯된 것이 大部分이다. 그러나 流體力學問題中에는 自然的으로 形成되는 流體流動이 對象이 되는 경우도 많이 있다. 實際로 流體力學 硏究의 始初는 洪水조절, 관개시설등의 自然流動을 硏究하기爲해서 發達된 水力學이라고 알려져 있으며, 自然流動은 流體力學硏究의 重要한 分野라고 생각된다.

地球物理流體力學은 合理的인 流體力學의 知識을 地球에 存在하는 代表的인 流體系, 即 海洋과 大氣문제에 應用하는 學問이라고 볼 수 있다. 따라서 地球物理流體力學은 여러 學問의 綜合協力에 依하여 이루어지며, 特히 氣象學, 海洋學, 工學, 數學等과 密接한 相互연루관계에 있다. 오늘날 地球物理流體力學의 重點的인 硏究課題로서는 氣象問題, 海洋物理, 大氣 및 海洋汚染, 亂流流動, 亂流擴散, 回轉하고 있는 流體, 成層化된 流體 其他 環境工學等을 들 수 있다. 本稿에서는 地球物理流體力學을 機械工學徒들에게 槪括的으로 紹介하는 立場에서 主로 傳統的인 기계공학도들에게 익숙한 유체역학(以下 기계유체역학이라고 편의上 假稱하기로 한다)과 對比해서 地球物理流體力學의 特徵을 列擧하기로 한다.

2. 特 性 値

工學問題, 特히 流體力學문제에서는 규명하고자 하는 現象을 代表해 주는 物理量의 大綱의 크기를 파악하는 것이 문제해결의 시초가 되는 경우가 많다. 地球物理流體力學은 우선 對象으로 하는 自然現象의 特性値가 기계유체역학의 特性値와 크게 다르다는 것이 注目할 만하다. 쉽게 말해서 流體機械, 船舶, 항공기等의 幾何學的 諸元은 아무리 커 보아야 數十~數百m 內外가 될 것이다. 그러나 大洋의 크기는 數千 km, 大氣 및 海洋의 두께는 數 km이며, 本質的으로 地球物理流體力學의 特性길이(스케일)는 km 單位로 表示되는 것이 많다. 지구물리유체역학의 特性길이는 數 km에서 數萬 km에 이르고 있으며, 이렇게 特性길이가 기계유체역학의 特性길이보다 무척 크다는 點에서 地球物理流體力學의 一次的인 特徵을 發見할 수 있다. 또한 特性時間의 경우도 그러하다. 기계유체역학의 特性時間은 普通 秒單位로 나타나게 된다. 그러나 지구물리유체역학의 基本的인 特性時間의 하나인 地球의 自轉周期는 하루(24時間)이며, 氣候變化는 數個月~數年을 特性時間으로 가지고 있다. 다시 얘기하면 地球物理流體力學의 特性時間은 기계유체역학의 特性時間과는 階位(order)가 다른 點을 發見할 수 있다.

地球物理流體力學의 特性 物理量들이 이와같이 방대한 범위에 걸쳐 있다는 點이 기계유체역학에서 흔히 擧論되고 있지 않은 몇 가지 力學的 槪念이 地球物理流體力學에서는 빠질 수 없는 重要性을 가지고 있다는 點을 알 수 있다.

3. 强制 回轉하고 있는 流動

우리가 잘 알다시피 地球는 2π rad/24hr의 回轉周波數를 가지고 回轉하고 있다. 따라서 地球表面에 附着된 座標系는 非慣性座標系이며, 이 座標系에 依한 物理量은 相對測定値이며 絶對測定値가 아니다. 座標系가 回轉하고 있기 때문에 相對的인 力學量을 記述하고 있는 流體運動方程式에는 코리올리스(Coriolis)力 및 원심력이 附加的으로 등장하게 된다. 地球上의 어느 地點(例를 들어 北緯 37°에 위치한 서울)의 地表面에 附着된 直角座標系를 생각해 보자. 實際로 地球는 球形에 가까우므로 球形座標系를 使用하는 것이 더 엄밀한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 생각하는 地域의 크기가

* 正會員 : 韓國船舶海洋硏究所

地球의 半徑보다 매우 작은 범위에 局限되어 있다면, 우리는 이 地域을 거의 平坦하다고 보고 간단한 直角좌표계를 사용할 수 있다. 通常的으로 (x, y, z)은 各各(西→東, 南→北, 地表面에서 수직으로 上向하는 方向)의 座標를 나타내며, (u, v, w)는 相對速度벡터 $\vec{q}$의 (x, y, z)에 相應하는 成分을 나타낸다.

우선 連續方程式은

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0, \tag{1}$$

(1)式은 非壓縮流體의 연속방정식이다. 따라서 (1)式은 正確하게 말해서 海洋流動問題에는 적합하지만 大氣유동문제에는 合當하지 않은 것이 사실이다. 大氣문제의 特殊性에 따라 (1)式 代身에 공기의 압축성을 고려한 엄밀한 연속방정식이 요구될 때에는 勿論 (1)式에 附加的인 項들이 포함되어야 한다. 그러나 本稿에서는 簡單性을 위하여 일단 (1)式을 연속방정식으로 사용하기로 한다.

地球物理流體力學에서 의미를 가지는 大規模 流動문제에서는 水平方向의 특성길이 (L)와 수직방향의 特性길이 (D)가 크게 다른 것이 特色이다. 大氣의 두께는 數十 km, 海洋의 깊이는 數 km이나, 수평방향(地球面에 接線方向)의 特性길이는 數千 km에 이르는 것이 常例이다. 그러므로 (1)式에서 보는 바와 같이 수직방향의 속도성분 w는 수평방향의 속도성분(u, v)에 비해서 대단히 작다$(w/u\sim D/L\ll 1)$. 이와같이 지구물리유체역학 流動에 있어서는 수평方向의 속도성분이 支配的이라는 결론을 얻게 된다. 이것은 粘性경계층理論의 展開와 흡사한 性格을 띄고 있음을 發見할 수 있다.

앞서 표시한 대로 $\vec{q}$를 회전하는 좌표계에서 측정한 相對速度라고 하고, Φ를 重力 포텐샬, $\vec{\omega}$를 좌표계의 回轉벡터라고 하면, 非粘性流體운동方程式은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\underbrace{\frac{\partial \vec{q}}{\partial t}+\vec{q}\cdot\nabla\vec{q}}_{Ⓐ}=\underbrace{-\frac{1}{\rho}\nabla p}_{Ⓑ}\underbrace{-\nabla\Phi}_{Ⓒ}\underbrace{-\nabla\left(\frac{\omega^2 r^2}{2}\right)}_{Ⓓ}$$

$$\underbrace{-2\vec{\omega}\times\vec{q}}_{Ⓔ} \tag{2}$$

回轉하고 있지 않은 경우에는 $(\vec{\omega}=0)$ Ⓓ, Ⓔ項이 없어지며 기계유체역학의 익숙한 운동방정식으로 귀결하게 된다. Ⓓ項은 원심력을 나타내며, 이것은 포텐샬의 그레디언트(gradient) 모습으로 表示되고 있기 때문에 Ⓒ項(重力포텐샬)에 넣어서 생각할 수 있다. 實際로 이 원심력項이 重力項에 미치는 영향은 極히 미소하기 때문에 $(|\vec{\omega}|\cong 2\pi/24\text{hr},\ r\cong 6400\text{ km})$ 우리는 흔히 Ⓒ, Ⓓ項을 通括해서 近似的으로 $-g\vec{k}$ ($g\cong 9.8\text{m/sec}^2$, $\vec{k}$는 z方向의 unit vector)로 쓰는 것이 보통이다. 그러나 Ⓔ項, $-2\vec{\omega}\times\vec{q}$은 코리올리스力을 나타내며 기계유체역학에서는 생소한 여러가지 유동현상을 發生시키는 원인이 된다. 코리올리스力은 $\vec{\omega}$와 $\vec{q}$의 벡터積이므로 速度 $\vec{q}$에는 언제나 수직이 된다. 그러므로 코리올리스力은 일(work)을 하지 않으며, 코리올리스力은 단순히 좌표계가 회전하기 때문에 나타나는 假想力이며 일을 수반하는 實際力이 아니라는 것이 自明하다. 코리올리스力의 相對的인 重要度를 알기 위해서 $|\vec{q}\cdot\nabla\vec{q}|$와 $|2\vec{\omega}\times\vec{q}|$의 次位對比를 해보자. 代表的인 速度를 U라고 하고 特性길이를 L이라 하면 $(f=|2\vec{\omega}|\cong 10^{-4}\text{sec}^{-1})$

$$\frac{|\vec{q}\cdot\nabla\vec{q}|}{|2\vec{\omega}\times\vec{q}|}\sim\frac{U}{fL}\equiv R_0 \tag{3}$$

(3)式의 無次元量 R_0를 Rossby 數라고 부르며 强制回轉하고 있는 유체유동에서 대단히 重要한 數이다. 다시 얘기해서 $R_0\gg 1$이면 코리올리스力은 Ⓐ項(慣性力)에 비해서 대단히 작고, 따라서 코리올리스力은 無視될 수 있다. 그러나 $R_0\lesssim 1$인 경우에는 코리올리스力은 無視될 수 없으며, $R_0\ll 1$인 경우에는 코리올리스力이 支配的인 힘으로 등장하게 된다. (3)式에서 알 수 있듯이 普通의 기계유체역학에서는 L(기계의 기하학적 諸元, 數十m 內外를 넘지 못한다)이 작기 때문에 $R_0\gg 1$인 경우에 해당하며, 따라서 지구가 회전하고 있다는 사실이(即 코리올리스力의 存在) 기계유체역학에서는 論議에 포함되지 않고 있는 것을 正當化시켜 준다. 그러나 反面 지구물리유체역학의 좋은 例로 싸이클론循環의 경우를 살펴보자. 이 流動에서는 $U\sim 10\text{m sec}^{-1}$, $f\sim 10^{-4}\text{ sec}^{-1}$, $L\sim 1000$ km, 即 $R_0\sim 10^{-1}$

上記한 바와 같이 $R_0\ll 1$인 경우에는 (2)式에서 Ⓐ項이 Ⓔ項에 비해서 매우 작기 때문에 Ⓐ項이 무시되어 버리며 (2)式의 右邊만이 남게 된다. 即 수직方向으로는

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}-g=0, \tag{4}$$

수평방향으로는

$$-\frac{1}{\rho}\nabla_h p=(2\vec{\omega}\times\vec{q})_h, \tag{5}$$

로 귀결하게 된다. (5)式에서 添字 h는 수평방향의 성분을 나타내고 있다.

(4)式은 낯익은 靜水壓平衡을 나타내고 있다. 即 $R_0\ll 1$인 지구물리유체유동에 있어서 수직방향으로는 靜水壓的(hydrostatic) 平衡이 이루어지고 있음을 의미한

다. (5)式은 수평방향으로는 壓力그레이디언트와 코리올리스力이 平衡을 유지하고 있음을 가르쳐 준다. (4)式의 관계를 地衡風的(Geostrophic)이라고 부르며 大規模 지구물리유체유동의 가장 기본적인 관계식을 表示하고 있다. 날마다 신문에 보도되는 初步的인 氣象圖의 等壓曲線에 (5)式을 적용해 보면 다음 날에 부는 바람의 대강의 방향과 속도(即 (5)式에서 $\vec{q}$를 구함)를 알아낼 수 있다는 有益한 결과를 얻을 수도 있다.

앞서 지적한 대로 속도벡터 $\vec{q}$의 수평성분이 큰 의미를 가지고 있음에 留意해 보자. 코리올리스力은 回轉벡터 $\vec{\omega}$와 속도벡터 $\vec{q}$의 벡터積이므로, $\vec{\omega}$의 수직성분이 $\vec{q}$의 수평성분과 큰 연관이 있음을 알 수 있다. 地球에 있어서는 $\vec{\omega}$가 地球回轉軸과 平行한 方向을 가진다. 그러므로 위도 $\theta°$인 地點에서는 $\vec{\omega}$를 지표면에 접선방향성분 $\omega_h(=|\omega|\sin\theta)$와 지표면에 수직방향성분 $\omega_v(=|\omega|\cos\theta)$로 分解할 수가 있다. 그러면 $\vec{q}$의 支配的인 성분이 수평방향이므로 ω_v가 우리의 관심을 끄는 支配的인 成分이 된다. 따라서 ω_v가 위도에 따라서 變하고 있다는 點이 (β-効果라고 부른다) 여러가지 흥미로운 현상을 발생시키게 된다. 만약 北半球에서 東으로 進行하는 유동이 있다고 할 때, 코리올리스力의 영향은 이 流動을 南쪽으로(低緯度지역으로) 휘게 하는 역할을 한다. 그러나 低練度지역에서는 ω_v의 크기가 작아져서 코리올리스力이 작아지며 다시 원상태로 돌리려는 경향이 나타나게 된다. 다시 말해서 ω_v가 위도에 따라 變하기 때문에 코리올리스力의 變化가 수반되며, 이것은 西에서 東으로 向하는 流動에 있어서는 一種의 復元力으로 간주될 수 있다. 이 復元力은 波動現象을 일으키게 되며, 이러한 β-効果에 의한 波動의 周期는 數日이 되는 것이 보통이다. 一例로 우리가 경험적으로 알고 있는 三寒四溫도 이러한 β-効果에 의한 波動現象으로 分析해 보면 興味로울 것이다. 以上 몇가지 基本的인 例를 논의했지만, 强制 回轉하고 있는 流動문제는 우리의 日常경험에 依한 推測과는 相反되는 여러가지 유동현상을 나타내 준다. 더 관심있는 독자들은 文獻 (1)을 參考하기 바란다.

4. 成層化된 流體

大氣와 海洋은 同質性流體가 아니고 密度가 수직방향으로 變하고 있는($\rho=\rho(z)$) 成層化된 유체(stratified fluid)이다. 大氣는 高空으로 올라 갈수록 희박해지며 (密度가 감소하며), 海水는 바닷속으로 들어 갈수록 무거워지고 있는 것은(密度가 증가하고 있는 것) 잘 알려진 사실이다. 成層化의 程度를 알기 위해서 스케일 하이트(Scale height) H를 다음과 같이 정의한다.

$$-\frac{1}{H}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial z} \tag{6}$$

即 H는 成層化된 유체에 있어서 密度變化量이 대단할(Significant) 정도에 이르는데 必要한 수직거리라고 할 수 있다.

이와 더불어 유체유동의 수직방향의 特性길이를 D라고 하면 D/H는 해석하고자 하는 유체유동에 있어서 成層性의 重要度를 나타내는 量이 된다. 一例로 標準大氣상태에서 $H\cong 8\text{km}$가 된다.

공기중을 움직이는 비행기의 유동문제에 있어서는 D가 數十 m에 지나지 않으므로 ($D/H\ll 1$) 항공역학에서는 大氣가 成層化되었다는 사실이 크게 문제視되지 않고 있다. 그러나 大氣의 重力波문제에 있어서는 D가 數km에 달하므로($D/H\sim 1$) 지구물리유체역학에서는 大氣의 成層性이 무엇보다도 重要한 意味를 가지게 된다.

流體가 成層化되었다는 것은 重力과 연관되어서 나타나게 되는 경우가 대부분이다. 따라서 成層化된 유체에 있어서는 流體系의 安定性의 논의가 자주 등장하게 된다.

아주 쉬운 例로 우리는 대개 登山을 가서 불을 피워 본 경험이 있을 것이다. 注意해서 살펴 보면 해가 잘 비치는 맑은 날 낮에는 바람이 불지 않더라도 연기는 無秩序하게 공중으로 잘 퍼져 올라가며 쉽사리 擴散되는 것을 볼 수 있다. 그러나 저녁이나 밤에는 연기가 上空으로 활발하게 퍼져 올라가지 못하고 엷은 막처럼 지표면에 平行하게 깔리는 것을 목격할 수가 있다. 이것이 成層化된 유체의 安定性을 논하는 좋은 例이다. 쉽게 말해서(해가 비치는) 낮에는 지표면이 뜨겁고 대기는 不安定하게 成層化되어 있으나, 해가 떨어진 저녁이나 밤에는 地表가 식어서 大氣는 安定하게(무거운 공기가 가벼운 공기보다 아래에 位置하게) 成層化되어 있다고 설명할 수 있다.

理解를 돕기 위해서 수직좌표 z_1에 있는 미소한 공기덩어리(air parcel)을 想定하자. 이 공기덩어리가 위치해 있는 곳의 周圍공기의 壓力은 $p_1[=(z_1)]$, 周圍공기의 밀도는 $\rho_1[=\rho(z_1)]$으로 表示하자. 이 공기덩어리가 z_1에서 미소한 거리 Δz를 上向하여 z_2까지 이동되었다고 假定하면, z_2에서의 周圍공기 壓力은 $p_2[=p(z_2)]$가 된다. z_1에서 z_2로 이동하는 과정이 거의 斷熱的이었다고 가정하면 이 공기덩어리의 밀도 ρ_2'는 p_2에 相應해서

(γ=단열계수)

$$\rho_2'=\rho_1(p_2/p_1)^{1/\gamma} \qquad (7)$$

그러나 $p_2 \cong p_1 + \left.\frac{\partial p}{\partial z}\right|_{z=z1} \Delta z$,

따라서

$$\rho_2' \cong \rho_1\left(1+\frac{1}{p}\left.\frac{\partial p}{\partial z}\right|_{z1} \Delta z\right) \qquad (8)$$

한편 z_2에 있어서의 周圍공기의 密度 $\rho_2[=\rho(z_2)]$는

$$\rho_2 \cong \rho_1\left(1+\frac{1}{\rho}\left.\frac{\partial \rho}{\partial z}\right|_{z1} \triangle z\right) \qquad (9)$$

그러므로 (8)式과 (9)式의 差異는 z_2에서의 공기덩어리의 밀도와 周圍공기의 밀도를 나타내며 重力加速度 g와 결부되어 浮力을 일으키게 된다. 따라서 z 方向의 간단한 운동방정식을 얻게 된다.

$$\frac{d^2z}{dt^2}+N^2z=0 \qquad (10)$$

(10)式에서 $N^2 \equiv \left(-\frac{g}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}+\frac{g}{\gamma p}\frac{\partial p}{\partial z}\right)$이며 N을 Brunt-Väisälä frequency 라고 부르며 成層化된 流體의 基本的인 物理量의 하나이다. (10)式에서 $N^2>0$이면(N이 實數) 운동은 간단한 調和운동을 나타내며, $N^2<0$인 경우(N이 虛數) 운동은 時間에 따라 指數的으로 增加하는 不安定한 상태를 表示하게 된다. 普通의 大氣에서는 $(2\pi/N)$이 數～數十分이며, 깊은 海洋에서는 $(2\pi/N)$이 數十分～數時間이 된다. 以上에서 論議한 바와 같이 靜的安定性을 論하는데 있어서는 N^2의 부호가 重要하다. $N=0$을 만족시키는 溫度分布를 Adiabatic Lapse Rate 라고 부르며, 普通의 大氣에서는 約 $-10°C$/km 가 된다. 다시 말해서 大氣의 온도가 每 km 上空으로 올라갈 때 10°C 보다 더 급격한 率로 降下하면 $N^2<0$이며, 靜的不安定을 나타낸다. 해가 잘 비치는 대낮의 경우가 $N^2<0$에 해당하며, 굴뚝에서 나가는 연기는 활발하게 上空으로 퍼져 나간다. 그러나 대기온도가 每 km 上空으로 올라갈 때 10°C보다 더 작은 率로 降下하면 $N^2>0$이며 정적안정성을 보이게 된다.

구름이 많이 낀 날씨거나, 저녁이 이 경우에 해당하며 굴뚝에서 나오는 연기는 가느다란 막을 形成하며 수평방향으로 깔리게 된다. 極端的인 경우에 上空으로 올라 갈수록 대기온도가 증가하면(所謂 inversion 이라고 부른다) $N^2>0$이며 심한 정적안전성을 나타내게 된다. 이런 날씨에는 연탄개스가 上空으로 빨리지 못하고 집 안주위에 깔리게 되며, 연탄개스 中毒의 위험이 큰 밤이 된다.

靜的安定에 있어서의 N의 役割을 극히 개략적으로 설명했다. 그러나 流動이 全體的으로 있는 경우에는 流動의 成層化된 性質을 표시하는 Brunt-Väisälä frequency N과 流動의 velocity shear dU/dz의 比가 이 成層化된 流體系의 安定性의 尺度가 되며 Richardson 數라고 부른다.

앞서 지적한 대로 $N^2>0$의 安定하게 成層化된 유체의 경우, 復元力이 있으며, 따라서 波動을 일으킬 수 있는 要因이 된다. 단일 수평방향과 時間에 對해서도 波動的인 관계를 가진다고 假定하면 ($\sim\exp[i(mx+ny-\sigma t)]$), 成層化된 三次元유체유동의 可能한 해답은 수평방향으로 進行하는(propagate) 內部波(internal wave)가 될 수 있다. 우리가 흔히 보는 表面水波(surface gravity waves)도 공기와 물을 밀도가 크게 다른 두개의 部分流體로 이루어진 流體系로 생각한다면, 결국 水面波도 물과 공기의 接觸面에서 發生하는 內部波의 特殊한 例라고 설명할 수 있다. 물론 普通의 水面波는 물과 공기의 접촉面에서 N이 무한대가 되는 內部波이며, 波動分散式은 간단한 수식으로 표시된다. 一般的으로 流體全域에 걸쳐서 N이 變化하는 경우에는 內部波의 分散관계는 간단한 方法으로는 풀리지 않는다. 결국 수치해석이나 다른 복잡한 解析을 通해서 近似式을 얻어야 하며 理論 流體力學의 課題로 남아 있다. 우리가 알다시피 同質流體內部에서는 重力波를 유출해 낼 수 없다 그러나 大氣나 해양의 경우에는 重力內部波가 생기며, 이것은 기계유체역학에서는 자주 취급되지 않고 있는 分野라고 생각된다. 成層化된 유체에 관한 知識은 地球物理流體力學의 骨格을 이루며, 많은 문제를 成功的으로 설명하고 있다. 큰 山脈의 後面에서 생기는 공기유동, 大都市上空의 스모그 現象, 河口에 가까운 바다에서의 低速船舶이 느끼는 抵抗의 증가, 海洋탐사 쏘나의 反射率, 大氣해양오염의 擴散, Seiche 등은 成層化된 유체 유동연구의 좋은 例라고 볼 수 있다.

5. 渦度(Vorticity)

非粘性流體에 있어서는 Kelvin의 法則을 따라 처음부터 유동에 渦度가 없다면 流動全體에 걸쳐서 非와동운동(irrotational)이 되는 것은 잘 알려져 있다. 그러므로 기계유체역학에서는 점성경계층을 제외하고는 대개 非와동운동으로 해석하는 것이 보통이다. 그러나 地球物理流體力學에서는 비록 非粘性유체라고 할지라도 一般的으로 渦動流動(rotational)임에 注意하여야 한다.

渦度(Vorticity) $\vec{\zeta}$의 次元이 sec^{-1}이다. 次元이 sec^{-1}을 가지는 다른 物理量으로써는 回轉하고 있는 유체의

回轉率(ω), 成層化된 流體에 있어서 Brunt-Väisälä frequency (N), 그리고 粘性유동의 경우에는 Velocity shear (dU/dz)를 들 수 있다. 쉽게 생각해서 위에 적은 세가지 流動에 있어서 모두 渦度와 같은 次元을 가지는 物理量이 존재한다는 것을 알 수 있고, 따라서 엄격한 해석을 거치지 않더라도 위에 적은 세가지 유동은 渦動流動의 범주에 속한다는 것을 類推할 수 있다. 즉 上記한 세가지 sec^{-1}의 次元을 가지는 物理量은 모두 渦度를 生成시키는 原因이 되고 있음에 注目할 必要가 있다. 따라서 地球物理流體力學문제에 있어서는 上記한 세가지 要因이 모두 存在하고 있으며, 渦度方程式은 문제해결의 열쇠가 되는 경우가 많다.

재미있는 點은 非粘性流體일 경우, 回轉하는 流動과 成層化된 流動사이에는 큰 상사성(Analogy)이 있다는 것이다. 實驗이나 理論에 있어서 이 두가지 流動을 獨立的으로 연구해야 할 경우에 이 相似性을 利用하여 쉽게 解析이 가능할 때가 많다. 그러나 粘性流動과의 相似性은 그다지 容易하게 成立되지는 않는것 같다. 그 理由는 아마 粘性流動의 支配미분방정식은 二階이지만, 非粘性下에서의 유체운동은 (回轉하는 유체유동이거나 成層化된 유체유동을 막론하고) 一階미분方程式의 支配를 받고 있기 때문인 것으로 생각한다.

만약 粘性과 强制回轉유동이 同時에 존재한다면 기계유체역학에서 보는 粘性경계층은 크게 修正되어야 한다 (所謂 Ekman Layer라고 함). 또한 粘性은 成層性에 의해 左右되는 流體안정성에 큰 영향을 끼치며 더 깊은 고려가 필요하게 된다.

실제 지구의 유체유동은 上記한 要素들이 相互연관하에 존재하는 복합적인 力學문제를 형성한다. 特히 粘性영향은 亂流이며, 亂流의 本質을 이해하려는 노력은 오늘날 지구물리유체力學의 第一位의 과제로 남아 있다고 볼 수 있다.

6. 結 語

極히 개괄적으로 지구물리유체역학의 특징을 소개했다. 主로 强制回轉하고 있는 유체유동, 成層化된 流體流動과 더불어 Vorticity의 의미를 얘기했다.

이 方面에 깊은 흥미를 느끼는 學徒를 위해서 몇가지 代表的인 문헌을 아래에 列擧했다.

單 行 本

(1) Greenspan, H. P. (1968): The theory of rotating fluids, Cambridge U. Press.

(2) Batchelor, G. (1970): An introduction to fluid dynamics, Cambridge U. Press

(3) Yih, C. S. (1965): Dynamics of nonhomogeneous fluids, Macmillan Co.

(4) Phillips, O. M. (1966): Dynamics of the upper ocean, Cambridge U. Press

地球物理流體力學을 전문적으로 다루는 學術誌

Journal of Atmospheric Sciences(美國)

Journal of Physical Oceanography(美國)

Geophysical Fluid Dynamics(美國)

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society(英國)

Tellus(스웨덴)

Journal of Meteorological Society of Japan(日本)

Journal of Oceanographical Society of Japan(日本)