TOPICS

유체 안의 운반성질과 흡음

초음파가 유체를 지날 때 음파 에너지의 일부는 흡수되며, 진행 거리가 늘어남에 따라 음파의 진폭은 줄어들게 된다. 이러한 감쇄(attenuation) 현상은 대개 유체의 점성과 열전도도와 같은 유체의 운반성질에 기인한다. 다시 말하면, 유체가 점성이 없고 음파로 인한 유체 내 지엽적인 흡(발)열이 없으며, 압력과 온도(또는 밀도) 등과 같은 국부적 열역학적 변수들(local thermodynamic parameters)로 유체입자의 상태 기술이 가능한 경우에, 유체 내에서의 압력과 밀도의 변화는 가역적으로 진행된다. 하지만 이중의 한가지라도 만족되지 않을 경우에 압력-밀도의 순환은 비가역적으로 일어나게 되며 음파 에너지의 일부가 유체의 열에너지로 전환되며, 대개 음파의 흡수나 분산을 일으킨다.

일반적으로 전단점성도(η), 벌크점성도(η_p))와 열전도도(λ)로 인한 효과만으로도 관찰된 음파의 흡수와 분산을 설명하기에 충분하지만, polyatomic 유체의 경우에 내부자유도로 인해 음파의 흡수현상은 복잡해지게 된다. 음파에 의해서 병진운동과 내부자유도 사이의 에너지평형분포가 교란됨으로써 발생되는 열적 완화와 분자들의 공간상의 구조 배열의 교란으로 인한 구조적 완화가 음파의 흡수를 야기하며, highly associated 유체의 경우에는 후자가 특히 중요한 역할을 하게된다. 아직도 이 분야에 대한 이론 및 실험적인 연구의 여지가 많이 남아있는 것이 사실이며, 이러한 연구는 유체의 동력학적인 구조에 대한 이해의 증진에도 중요한 역할을 한다.

예를 들면, Newtonian 유체의 경우에 변형 텐서(stress tensor)$\mathbf{P}(\mathbf{r},t)$는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{P}(\mathbf{r},t) = [P(\mathbf{r},t) + (2\eta/3 - \eta_b)\nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r},t)]\,\mathbf{I} - \eta[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^t]$$

여기서 $P(\mathbf{r},t)$는 국부적 유체역학 압력이며 $\mathbf{I}$는 단위 텐서, 위첨자 t는 전치(transpose)를 나타낸다. 진폭이 작은 음파의 경우에, 국부적 유체역학 변수의(여기선 밀도와 온도) 변화가 평균값에서 크게 벗어나지 않음을 가정한다. 즉,

$$\rho(\mathbf{r},t) = \rho + \delta\rho(\mathbf{r},t),\ \delta\rho(\mathbf{r},t) \ll \rho, \quad T(\mathbf{r},t) = T + \delta T(\mathbf{r},t),\ \delta T(\mathbf{r},t) \ll T,$$

그리고 열에너지 밀도(Q)가 Fourier 법칙, 즉 $Q(\mathbf{r},t) = -\lambda\nabla T(\mathbf{r},t)$으로 기술되면 선형화된 Navier-Stokes 유체역학 방정식과 열역학적 관계식으로부터 전파밀도요동(propagating density fluctuations)에 관한 식을 얻을 수 있으며, 이로부터 다음과 같은 개략적인 음감쇄계수(α)를 얻을 수 있다.

$$\alpha = 2\pi^2 f^2/(\rho C_s^3)[(\gamma - 1)\lambda/c_p + (4\eta/3 + \eta_b)].$$

위의 식에서 f는 주파수, γ는 두 비열의 비, 즉 c_v/c_p이며, 여기서 단열음속 C_s은 $\gamma(\partial P/\partial\rho)_T$로 주어진다. 따라서, 유체의 점성, 열전도도와 같은 운반 성질의 값들이 증가하면서 그 유체의 흡음 정도가 증가함을 쉽게 알 수 있다. 실질적으로 위의 식은 유체의 흡음 실험으로부터 결정한 α값과 독립적으로 측정된 물질의 점도 η와 열전도성 λ로부터 나머지 하나인 미지의 η_b를 결정하는 하나의 방법으로 응용되기도 한다. 간략하게 유체의

동력학적 구조와 연관해서 밀도요동의 스펙트럼은 중앙의 $\omega=0$에 위치한 하나의 Rayleigh 선과 $\omega=\pm C_s k$에 두 개의 Brillouin 선들의 전형적인 구성을 가지며, 후자는 전파 모드를 그리고 중앙에 위치한 전자는 점차적으로 감쇠해지는 열적 모드를 나타낸다.

한편 음의 파장이 입자들 간의 간격과 비슷한 경우에는 위에서 언급한 전파밀도요동이 유체분자들에 의해서 지지되는지 여부가 의문시된다. 즉, 유체역학적인 접근방법의 유효성 범위가 어떻게 되는지에 대한 질문이 생기게 된다. 반면에 고주파에서는 유체가 외부에서 가해진 변형률과 같은 교란에 대해 점성적 흐름보다는 오히려 고체와 같이 탄성적으로 대응하게 된다. 다시 말하면, 외부응력의 주기가 물질의 '완화시간' 보다 짧을 경우에 유체분자의 움직임은 효과적으로 동결되는 대신 전단응력에 대해서 탄성변형이 일어나게 된다. 따라서 탄성적 대응은 변형시간이 분자들이 새로운 평형위치를 되찾기 위해 필요한 시간과 비슷해 질 때 명확해진다. 이에 관련된 이론을 통칭 viscoelastic theory라고 부른다. 예를 들면, 주파수에 따라 달라지는 전단점성도의 경우에 점단성은 다음과 같다고 가정한다.

$$\eta(\omega) = G_\infty/(-i\omega + G_\infty/\eta)$$

여기서 G_∞는 고주파에서의 전단 탄성모듈러스의 극한값을 나타내며, $\omega\tau_M=\eta/G_\infty$는 Maxwell 완화시간이이며 액체의 경우에 대략 10^{-13} sec의 크기를 가진다. $\omega\tau_M \ll 1$은 점성적 전단에 해당되며 $\omega\tau_M \gg 1$은 탄성적 전단에 해당한다. 물론 점성적 대응에서 탄성적 대응으로 바뀌는 영역에서는 두 가지 특성(점탄성)을 모두 보인다. 이와 유사한 방법으로 운반성질에 주파수 의존성을 부여하여 현상론적으로 일반화시킨 유체역학 방정식을 이용한 접근방법으로 유체역학(small k, ω) 영역과 속도론(large k, ω) 영역을 연결시키려는 시도들과 더불어, 물질의 동력학적인 특성과 관련시키는 연구들이 고분자를 비롯한 여러 계의 연구 분야에서 활발하게 수행되고 있다.

〈맥길 대학교 화학과 나균일(krah@maxwell.chem.mcgill.ca)〉