

# 액체연료의 미립화 기술(1)

## Atomization Technology of Liquid Fuels

류 정 인  
J. I. Ryu



류 정 인  
• 1945년 3월 22일생  
• 자동차용 기관의 성능 및 배기가스  
• 정회원 충남대학교 기계공학과

계를 가진 것은 디젤기관의 연료분사장치이다. 그후 각종 버너나 항공기 엔진의 연료무화문제도 가해져, 1920년대 중엽까지 일련의 연구가 진행되었다. 그렇지만 이것이 기술개선이나 연구의 대상으로 학문화된 것은 비교적 최근이다.

이와같은 이유는 자유계면을 갖는 비정상유체의 운동을 취급하지 않으므로 일반적인 해석이 어렵고, 현상이 고속이고 순간적이므로 관찰이나 계측이 어렵고, 이론해석 결과가 그대로 설계기준에 적용이 어렵기 때문이다.

그러나 최근 공학이나 기술의 진보에 따라 점차 이 문제를 다루는 연구자가 많아지고 각종 측정 장치의 발달, 기술의 발달 및 컴퓨터 주변기기의 보급에 힘입어 미립화 현상의 본질적인 해명이 서서히 벗겨지게 될 것이다.

따라서 본 강좌는 지금까지 밝혀진 미립화 방법과 그 실용예를 언급하고 초음파 미립화 기구를 소개하고자 한다.

### 1. 序 論

액체를 미립화(또는 무화)하는 것은 일반 가정에 이용되고 있는 헤어 스프레이, 산수, 살충제 스프레이, 석유 팬 히터등 우리 생활 주변에서부터 열기계의 심장부에 있는 기화기, 연료분사 밸브 및 각종 burner 등이 있다. 또한 화학공업에서는 식품, 비료, 도료 등의 분말제조나 분무 건조 등에 이용되고, 금속공업에서는 용융금속의 분말제조, 분무냉각 등에, 전자공업에서는 자성 분말제조나 공기조화 등과 의치학 등에도 널리 이용되고 있다.

액체를 미립화하면 액체의 전 표면적이 크게 증가하여 기액접촉면적이 매우 넓게 되어 증발, 건조 및 용해 등의 반응속도나 전열속도 등이 촉진하게 된다.

액체연료의 미립화가 내연기관에 인연이 된 것은 1885~6년에 독일의 Daimler가 기화기를 발명한 때로 거슬러 올라가지만 직접적으로 관

### 2. 微粒化 方法과 그 實用例

앞에서도 언급한 바와 같이 액체를 미립화하는 목적은 체적당 표면적을 크게 하는 것이지만, 이용하는 분야에 따라 약간 다르다.

미립화하는 액의 형태에는 크게 액주, 액막, 적의 3종류가 있고 실제 미립화 기구에서는 이

가운데 어떤 것이 중심이 되지만 3종류 모두가 존재하는 것이 보통이다. 그러므로 미립화 방법의 분류는 보는 시각에 따라 분류방법이 다르나 여기서는 분열을 일으키는 에너지의 공급방법에 따라 아래와 같이 대별하고자 한다.

### 2.1 液自體에 의한 微粒化

가압된 액이 노즐 등에서 분출하여 외기와 상대속도에 의해서 미립화되는 것으로서, 압력분사식(pressure atomization type)이라 부르며 단순분무식, 선회분류식 및 충돌분류식이 있다.

이 방법에 대한 세부적인 내용은 본지 11(4)에 언급되어 있으므로 참고하시기 바랍니다.

### 2.2 補助手段에 의한 微粒化

액류에 보조수단을 사용하는 방법으로서 기류에 의한 미립화방법, 회전원판에 의한 방법, 회전분공에 의한 방법 및 정전기력에 의한 방법이 있다.

이들 방법에 대한 세부적인 내용은 본지 11(4)를 참조하여 주시기 바랍니다.

이상에서 소개한 미립화 방법 중에서 보조수단으로 진동을 이용하는 방법에 대하여 집중적으로 소개하고자 한다.

그 이유는 다른 방법에 비하여 비교적 분열이 용이하고 무화량이나 입경의 제어가 용이하고 부대 장비 및 용적이 작은 등 이점이 많기 때문이다.

진동에 의한 액체분무방법은 간단히 표현하면 음파의 성질을 이용하는 방법이다.

## 3. 音 波

### 3.1 音波의 種類

음파는 여러가지 매질(기체, 액체 및 고체)중을 전파하는 넓은 의미의 탄성파(응력이나 변형을 원상태로 돌아오게 하는 성질에 의해서 일어나는 파동)이다.

지구에서는 물체가 움직이면 반드시 탄성파가 생기며, 그것은 장애물로 되지 않으므로 동물은 그것을 이용해서 몸을 보호하고 획득물을 포집

하고, 또 자기 존재를 타에 파시한다거나 하여 음파는 동물의 생존에 큰 몫을 하고 있다. 특히 인간은 음파의 은혜를 무의식적으로 받으면서 음파를 잘 이용하고 있다.

대부분의 생물은 많으나 적으나 진동의 환경하에 있다. 자연계에는 모기부터 고래까지 여러 가지 생물이 초음파를 방사하며, 또 기계적으로 만들어진 jet기의 소음 등의 초음파가 있는 등 환경에 매우 많은 음파에 접하고 있다.

보통 음(sound)은 귀의 감각으로 나타난다. 그것은 공기중의 탄성파를 거쳐서 일어나므로 공기중의 탄성파를 음이라 한다. 음을 분류하면 감각으로 느끼는 것을 음, 탄성파를 음파라고 부른다.

음파에는 인간의 귀로 포착할 수 있는 가청음파(audible sonics, 주파수  $f \approx 25\text{Hz} \sim 15\text{KHz}$ )와 인간의 각기관에서 포착할 수 없는 불가청음파(inaudible sonics)가 있다. 보통 불가청음파는 매우 주파수가 낮은 초저음파(infra sonics,  $f \leq 25\text{KHz}$ )와 주파수가 높은 초음파(ultrasonics,  $f \geq 15\text{KHz}$ )로 나눈다. 또 초음파중  $f \geq 1000\text{MHz}$ 의 초음파를 과 초음파(hyper sonics)라 부른다.

가청음파와 초음파의 경계는 인간의 개인차, 음의 강도 및 연령차에 따라서 다르므로 정확하게 정할 수가 없다. 일반적인 경계는 그림 1.에 나타낸다.

초저음파는 지진이나 폭발같은 경우에 일어난다. 매우 저주파수 음파( $f \leq 25\text{Hz}$ )에서 그 전파속도는 가청음파와 같고 파장이 크므로 음압진폭은 대기압의 변동진폭(약  $500\mu\text{bar}$ )보다 작아 파동감쇄가 매우 작으므로 유전의 탐지등에 이용되고 있다.

과초음파( $f \geq 1000\text{MHz}$ )는 주파수가 매우 높고 파장은 매우 짧아, 광파에서 광양자(photon)에 상당하는 음입자(phonon)와 전자와의 충돌등의 상호작용에 영향이 있으므로 물성연구에 이용된다.

### 3.2 音波의 性質

3.2.1 音의 傳波速度, 波長 및 周波數  
큰 북을 두드리면 큰 북의 파가 진동해서 큰

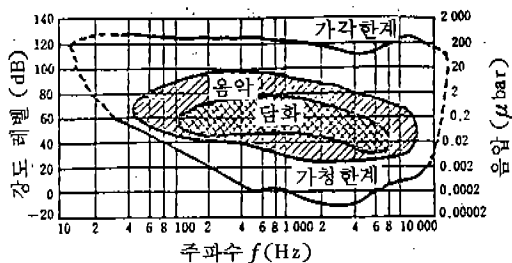


그림 1 귀로 느껴지는 음의 범위

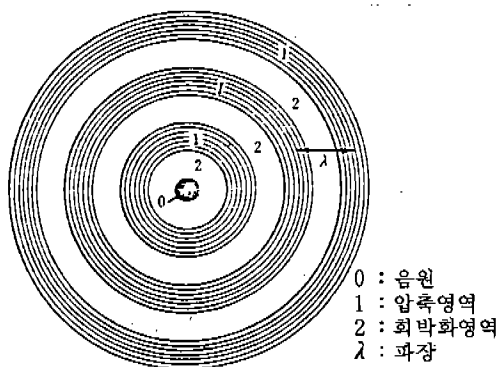


그림 2 구면파의 전파방법

기중에 음의 파를 만들면 이것이 귀의 감각에 닿아 음으로써 들리게 된다.

음파(sound wave)는 주기적인 팽창과 압축을 반복하는 음원에 의해서 매질중에 생긴 팽창 영역의 매질층 및 압축영역의 매질층으로 성립되는 소밀파(compressional wave)이고, 구 음원의 경우는 그림 2와 같은 구면파로 음파가 전해진다.

음파의 압축과 압축, 팽창과 팽창의 거리가 파장(음파의 길이)  $\lambda$ (m)이다. 1초 사이에 서로 반복되는 파장  $\lambda$ 의 수가 주파수(frequency) $f$ (Hz)이다.

더우기 매질중의 음의 전파속도를  $c$ (m/s)라 하면, 1초 사이에 음이  $\lambda f$ (m)가 진행되므로 다음식이 얻어진다.

$$c = \lambda \times f$$

주기  $T$ (s)는 주파수  $f$ 의 역수로 다음식으로 나타낸다.

$$T = 1/f$$

여러가지 매질중의 음의 전파속도(탄성파 속도)  $c$ (m/s)의 예를 표 1에 나타낸다.

표 1. 각종 매질속의 음의 전파속도

매질	온도(°C)	탄성파속도(m/s)
공기	0	331
공기	20	343
탄산가스	0	259
수소	0	1280
담수	17	1430
해수	17	1500
클로로플럼	20	1000
수은	20	1450
에칠알콜	20	1170
유리(평)	20	3760
강	20	5800
알루미늄	20	6400

### 3.2.2 音의 放射壓과 直進流

#### ① 音의 放射壓

연속적인 매질중을 음이 전파할때 매질입자가 평형위치에서 양방향으로 진동하여도 그 평형 위치는 변하지 않으나 음파는 매질중을 이동한다. 이것은 파가 심하게 움직이는 수면위에 출렁이는 나무잎과 같이 그 일이 상하로만 요동하고 파와 함께 이동하지 않는 것과 같다. 그러나 이와 같은 현상은 약한 음의 진동에서 일어나고 강한 음에서는 다르게 나타난다.

음의 강도가 어느 임계값을 넘어서면 매질입자가 강한 초음파 진동과 동시에 매질자체도 이동하게 된다. 이런 현상이 일어나는 것이 방사압(acoustic radiation pressure)이다. 이 현상을 이용하면 액체의 유희, 분산, 세정 및 무화 등이 보다 유효하게 일어난다. 강한 초음파의 음장에 물체를 둘때 물체는 압력을 받는다. 이 압력이 방사압이다.

방사압은 음의 특징인 압축과 팽창(진폭의 절대값은 동일)이 가변되는 음압과 혼동해서는 안된다. 방사압은 이 음압과 함께 존재하며 물체의

표면에 음의 전파방향으로 누르는 압력이 작용한다.

방사압은 음의 강도에 비례하므로 음의 강도 (sound intensity)의 측정에 이용된다. 방사압은 초음파의 입사방향과 직각으로 파장에 비해 매우 큰 판을 설치해 두면 입사파의 에너지 밀도  $e(N/m^2)$ , 판의 반사율  $R$ 일때  $P(N/m^2)$ 은 다음식으로 나타낸다.

$$P=e(1+R)$$

이 식에서 음을 완전히 흡수하는 판에서는  $P=e$ , 완전히 방사하는 판에서는  $P=2e$ 로 된다. 실제에는 매질중에 초음파가 흡수되고 파가 진행함에 따라 초음파의 강도가 감쇄되어 방사압도 감소한다.

그림 3은 방사압의 실험예를 나타낸다.

수조의 밑바닥에 티탄산바륨 진동자를 설치하고 윗쪽으로 초음파를 방사시켜 그 음장내에 유리공을 매달고 이것을 천칭의 한쪽 팔에 매달아 천칭을 평형시킨다. 초음파의 출력이 높이면 유리공이 뜨게 된다. 이것을 분동으로 평형시켜 방사압의 크기를 구한다.

②음의 直進性

초음파 진동이 생길때 매질중에 음의 직진류가 발생하여 매질의 흐름에 따라 초음파 세정, 유화, 분산 등 여러가지 반응이 촉진된다.

3.3 音壓 및 音壓레벨

액체 매질중에 한점(x, y, z)에 있어서 정압을  $P_0$ 라 하고 t에서 그 점에 음파가 도달한 때의 압력을 P라고 하면 그 점에 있어서 음파에 의한 압력변화 P는 아래식으로 표기된다.

$$P(t, x, y, z)=P_0+P$$

이 P를 그 점의 음압 또는 순간음압이라고 부른다.

음압 P는 보통의 압력단위  $P_0$ 로 나타낸다.

그림 4와 같이 음압 P의 함수로 음파의 양적 대소를 실제로 나타내기가 불편하여 목적에 따

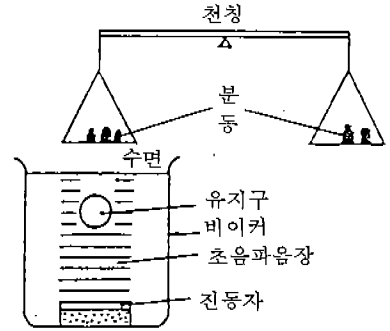


그림 3 방사압의 실험

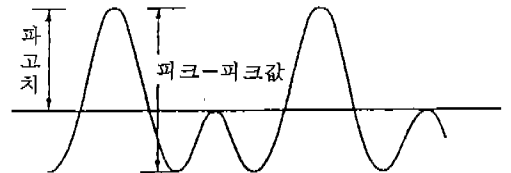


그림 4 음압의 변화

라서 음압(진폭)  $P(t)$ 의 최대치(peak value)  $P_m$ , 또는 정파 부의 절대치의 최대 높이로 사용된다. 가장 실용적으로 나타내는 음압은  $P(t)$ 의 주기를 T라 할때

$$P_0=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T P^2(t)dt}$$

로 정의되고 실효음압(effective sound pressure)이 이용된다. 또 평면정현음파를  $P(t, x)=P_m \sin(Wt-kx)$ 로 나타낼때 실효음압  $P_0$ 는 다음식으로 된다.

$$P_0=P_m\sqrt{2}$$

이 경우의 실효속도  $V_0$ 는 가장 큰 입자속도를  $V_m$ 이라 하면 다음식으로 나타낸다.

$$P_0=P_m\sqrt{2}$$

여기서 입자속도(Particle Velocity)는 음파에 따라서 매질의 미소부분이 진동하는 속도이므로

음의 전파속도  $c$ 와는 달라 그것과 구분한다.

보통 인간이 들을 수 있는 공기중의 음파는 음압이  $10^{-5} \sim 100 \text{Pa}$  정도이므로 이것을 사용이 편리한 음압레벨(sound pressure level) SPL(dB)로 다음과 같이 나타낸다.

$$SPL = 20 \text{Log}_{10} \frac{P_e}{P_0}$$

여기서, 공기중의 표준상태( $273^\circ\text{K}$   $101.3\text{KPa}$ )에 있어서 음파의 기준음압  $P_0$ 는 다음과 같다.

$$P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{Pa} = 2 \times 10^{-4} \mu\text{bar} = 2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2 = 2 \times 10^{-4} \text{dyne/cm}^2$$

이므로 이것이 인간이 듣는 음의 최소음압이라고 한다.

### 3.4 음의 高低와 強弱

#### 3.4.1 음의 높낮이와 強弱

음의 높음 또는 낮음은 음파의 주파수  $f$ 에 의하고, 음의 강함 또는 약함은 음파의 진폭에 의하여 결정된다.

그림 5는 시간에 대한 진폭을 나타낸 음의 파형이다. (a)에서 정현곡선 A, B는 진폭이 똑

같고, 주파수  $f$ 는 B가 A의 1.5배이므로 음의 강도는 같으나 B는 A보다 높은 음이다. 음의 고저는 음원의 주파수 또는 음파의 주파수에 비례하고, 매초 귀에 도달하는 소밀파에 비례한다. (b)에서는  $c$ 가 A와 같은 주파수이나 진폭이  $1/2$ 이므로 음의 높이가 같고 음의 강도는  $1/4$ 이다. (c)에서는 D는 정현파 외에 다른 복잡한 음파가 중복되어 있어 순음이 아니다.

초음파의 응용분야에서는 인간의 귀에 들리지 않는 주파수 범위의 음파를 이용하는 경우가 많고, 또 큰 출력의 초음파를 사용하여도 귀에는 장애가 없다. 가청음에서는  $10^{-4} \text{W/cm}^2$  정도의 음에서도 귀에 장애가 일어나지만 초음파에서는 그의 수만배 이상 큰 출력을 사용한다.

음의 강도(intensity of sound)  $I(\text{W/m}^2)$ 는 음의 진행방향에 수직인 단위면적을 고려하고, 이 면에서 작용하는 음압을  $P$ 라 한다. 이 면이  $\delta t$  시간에  $\delta x$ 만큼 변화했다면  $P\delta x$ 의 에너지가  $x$ 방향으로 흐르지만 그 시간적 일, 즉 음파의 출력(밀도)의 순간값은  $P\delta x/\delta t = PV$ 로 된다.

음압  $P$ 와 입자속도  $V$ 는 정현파적이므로 파고치를  $P_m, V_m$ 이 실효치를  $P, V$ 라 하면  $P, V$ 가 동일 위상에 있으나 음의 강도  $I(\text{W/m}^2)$ 는

$$I = \frac{1}{2} P_m V_m = \frac{P_m}{\sqrt{2}} \frac{V_m}{\sqrt{2}} = P V$$

로 된다.

여기서,  $P$ 단위는 ( $\text{Pa}, \text{N/m}^2, \text{Kg/s}^2$ )이고,  $V$ 는 ( $\text{m/s}$ )이다.

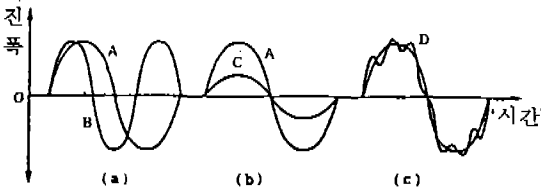


그림 5 음의 고저, 강약

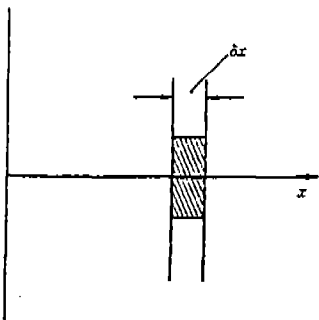


그림 6 평면 음파장

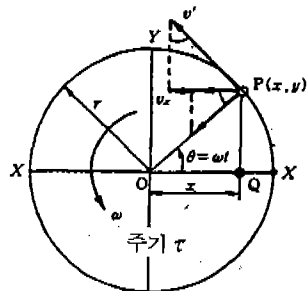


그림 7 단진동

지금 음의 속도  $c(m/s)$ 의 평면파에 대해서 매질입자가 진폭  $r(m)$ , 각속도  $\omega(m/s)$ 에서 시간  $t(s)$ 에 대한 정현 진동, 즉 그림 7과 같은 단진동을 한다면 그림의 사선부 질량은  $\rho\delta x(kg)$ 이므로서 나타낸다.(매질의 밀도를  $\rho(kg/m^3)$ 이라 함)

운동에너지  $E_k$ 는

$$E_k = 1/2(\text{질량})(\text{단진동의 원주속도})^2$$

$$= 1/2(\rho\delta x) (\omega r)^2$$

$$= 1/2\rho\delta x (2\pi fr)^2$$

$$= 2\pi^2 f^2 r^2 \rho\delta x [kg \cdot m^2 / sec^2] \text{이다.}$$

따라서 매질  $1m^3$ 내에 포함된 음의 에너지  $E$ 는 다음과 같다.

$$E = 2\pi^2 f^2 r^2 \rho [N \cdot m / m^3, W \cdot s / m^3]$$

더우기 1초간에 단면적  $1m^2$ 을 통과하는 에너지, 즉 음의 강도  $I$ 는 다음식으로 나타낸다.

$$I = (\text{매질의 단위 체적내에 포함된 음의 에너지}) \times (\text{음의 속도})$$

매질의 순간입자속도  $v$ 는  $dt$ 시간에 가도  $d\theta$ , 원주변위  $ds$ 만큼 변화하므로  $v = ds/dt = r d\theta/dt = r\omega = 2\pi fr$ 로 된다.

주기  $T$ 는

$$T = 2\pi/\omega = 1/f \text{이다. 따라서 음의 강도 } I \text{는}$$

$$I = (\pi^2 f^2 r^2 \rho) \times c$$

$$= 2\pi^2 \rho c (f \times r)^2$$

$$= (1/2) \rho c (2\pi f \times r)^2$$

$$= (1/2) \rho c (\omega r)^2$$

$$= (1/2) \rho c v^2 [W/m^2]$$

지금 순간 입자속도  $v$ 를 그 파고치  $v_m$ 으로 표시하면 음의 강도  $I$ 는

$$I = P_e V_e$$

$$= (1/2) \rho c v_m^2$$

$$= (1/2) \rho c (\sqrt{2} V_e)^2$$

$$= \rho c V_e^2$$

$$= P_e^2 / \rho c \text{으로 된다.}$$

음의 강도  $I$ 는 주파수  $f$ 의 2승과 진폭  $r$ 의 2승에 비례한다. 또한 실효음압  $P_e$ 와 실효입자속도  $V_e$ 의 비는  $\rho c$ 로 된다.

$$P_e / V_e = \rho c [(Pa \cdot s / m, Kg / cm^2 \cdot s)]$$

여기서  $P_e(Pa)$ ,  $V_e(m/s)$ ,  $\rho(Kg/m^3)$  및  $c(m/s)$ 이고  $\rho c(Pa \cdot s / m)$ 는 고유 음향 임피던스 또는 고유 음향 저항(specific acoustic impedance)라고 부르고  $\rho c$ 는 초음파에서 주요한 물리량이다.

매질음파에 의한 입자속도  $V(m/s)$  및 입자 가속도  $v(m/s)$ 를 단진동에서 검토해보면 단진동(simple harmonic motion)은 등속원운동의 직경에서 사영운동이다. 그림 7과 같이 직경  $r(m)$ 은 원주상의 점  $p(r, \theta)$  또는  $(x, y)$ 가 반시계 방향의 각속도  $\omega$ 로 등속원 운동을 한다. 초기 입상  $\theta_0$ 는 0일때  $t$ 시간에서는 매질의 변위  $y(m)$ 는

$$y = r \sin \theta$$

$$= r \sin(\omega t)$$

$$= r \sin(2\pi f t)$$

따라서 매질의 입자속도 및 입자가속도는

$$v = dy/dt$$

$$= r \omega \cos(\omega t)$$

$$= 2\pi f r \cos(\omega t)$$

$$\alpha = dy^2/dt^2$$

$$= -r\omega^2 \sin(\omega t)$$

$$= -r(2\pi f)^2 \sin(\omega t)$$

여기서 입자속도  $v$ 와 음의 속도  $c$ 는 다름에 주의하여야 한다. 따라서 최대입자속도  $v_m$  및 최대입자 가속도는  $a_m$ 는

$$v_m = r\omega$$

$$= 2\pi f r$$

$$a_m = | -r\omega^2 |$$

$$= r(2\pi f)^2$$

초음파에서는 주파수가 높게 되는 만큼 진동면의 진폭은 미소하게 되지만, 최대입자속도 및 가속도가 크게 된다. 이 특성을 이용하여 초음파는 여러가지에 응용되고 있다.

표 2 기체 및 액체중의 전파속도

매 질 (gas : latm)	온 도 (°C)	전 파 속 도 (m/s)	밀 도 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	고유 임피던스 pc
공 기	0	331	$1.23 \times 10^{-3}$	41
공 기	15	340	$1.21 \times 10^{-3}$	41
수 소	0	1262	$9 \times 10^{-5}$	11
산 소	20	328	$1.33 \times 10^{-3}$	43.6
수 증 기	100	405	$5.96 \times 10^{-4}$	24.1
청 수	0	1419	1.0	$1.41 \times 10^5$
해 수	0	1450	1.02	$1.48 \times 10^5$
해 수	15	1500	1.02	$1.53 \times 10^5$
델레핀유	17	1360	0.87	$1.18 \times 10^5$
석 유	17	1400	0.8	$1.12 \times 10^5$
수 은	17	1460	13.6	$1.98 \times 10^5$
그리세린	20	1450	1.26	$2.42 \times 10^5$

### 3.4.2 음의 강도 level

공기중의 음향에서 음압  $P_e$ 와 같이 귀에 들리는 음의 강도  $I$ 는  $10^{-12} \sim 1W/m^2$ 범위에 걸쳐 있으므로 편의상 음의 강도의 최소단위로 기준음의 강도  $I_0 = 10^{-12}(W/m^2)$ 에 대해 측정점의 음의 강도  $I (W/m^2)$ 를 음의 강도 level(sound intensity level)  $IL$ 로 나타낸다.

$$IL = 10 \log_{10}(I/I_0)$$

초음파에서  $I$ 는 수  $W/cm^2$ 로 부터 수십  $W/cm^2$  정도가 보통 사용되므로  $IL$ 로 가칭음보다 매우 높다.

### 4. 음압 level과 음의 强度 level의 관계

음압 level  $SPL(dB)$ 과 음의 강도 level  $IL(dB)$ 과의 관계는 기준  $P_0 = 2 \times 10^{-5}(Pa, N/m^2)$  및  $I_0 = 10^{-12}W/m^2$ 로서

$$SPL = 93.98 + 20 \text{Log} P_e$$

$$= 93.98 + 10 \text{Log} P_e^2$$

$$= 93.98 + 10 \text{Log}(\rho c I)$$

$=IL + 10\text{Log}(\rho c) - 26$ 인 관계가 성립한다.

일반적으로 음원의 단위시간에 방사하는 음의 Energy, 즉 음향출력(음의 강도)  $I$ 를  $SPL(dB)$ 로 표시하는 것이 편리하다.

### 5. 超音波의 反射, 透過 및 屈折

음파가 공기에서 물로, 물에서 철로 등과 같이 다른 매질의 경계에 입사하면 일부는 반사, 나머지는 굴절하여 투과한다. 그러나 이 장에서는 흡수나 분산은 없다고 하고 설명한다.

그림 8에 초음파가 매질 I에서 매질 II로 입사할때, 경계면에 일부는 반사, 나머지는 굴절이나 투과한다. 이때의 입사각  $\theta_i$ , 반사각  $\theta_r$  및 굴절각  $\theta_t$ 사이에는 빛의 경우와 똑같은 관계가 일어난다.

$$\theta_i = \theta_r$$

$$\text{Sin } \theta_t = \text{Sin } \theta_i = C_1/C_2$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $C$ 는 음속이다.

지금 매질 I는 공기, 매질 II는 물인 경우  $\theta_i$ 를 점차로 크게 해서  $\theta_i = 90^\circ$  되는 경우 투과파가 되지않고 전반사로 된다. 이때  $\theta_i = \theta_c$ 라고 하면  $\text{Sin } \theta_c = C_1/C_2$ 에 의해서  $\theta_c = \text{Sin}^{-1}(C_1/C_2)$ 로 된다.  $\theta_c$ 를 임계각이라 부른다.

따라서 매질 I, II중의 음속  $C_1, C_2$ 가 나타나면 반사파나 투과파의 방향이 구해진다.

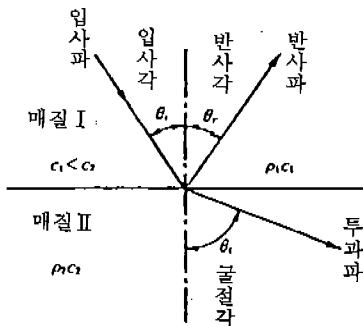


그림 8 경계면에 있어서의 반사와 굴절

초음파와 종파(longitudinal wave)의 입계각은 초음파가 공기중에서 수중으로 입사할때 약  $13.5^\circ$  이고 수중에서 강철에 입사할때는 약  $14.5^\circ$ 이다.

기체나 액체중에서는 종파만이 일어나지만 고체탄성체중에서는 강성때문에 횡파(transverse wave)도 생긴다. 종파는 음파의 진행방향에 평행하게 매질입자가 진동하는 소밀파이지만 횡파는 음파의 진행방향에 직각방향으로 입자가 진동한다. 일반적으로 횡파의 음속은 종파음속의 약  $1/2$ 이다.

반사파나 투과파의 강도를 나타내는 반사율  $R$ 이나 투과율  $T$ 는 실효음압  $P$ , 실효입자속도  $V$  및 고유음향 Impedance,  $Z = \rho c$ 에 의해 나타난다.

그림 9와 같이 입사파가 임계면에 직각인 경우 음압반사율  $R_p$ , 음압투과율  $T_p$ , 음의 강도반사율  $R_I$  및 음의 강도투과율  $T_I$ 는 다음과 같이 된다.

$$R_p = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

$$= (\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1) / (\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1)$$

$$T_p = 2Z_2 / (Z_2 + Z_1)$$

$$= 2\rho_2 C_2 / (\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1)$$

$$R_I = (\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1)^2 / (\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2)^2$$

$$T_I = 4Z_1 Z_2 / (Z_2 + Z_1)^2$$

$$= 4\rho_1 \rho_2 C_1 C_2 / (\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2)^2$$

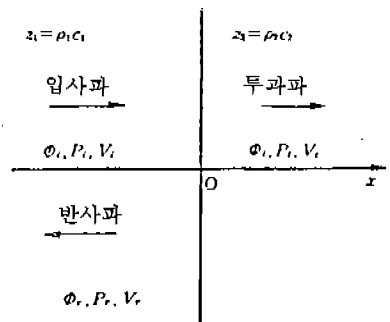


그림 9 다른 매질 경계면에서 수직입사



표 3 매질 경계의 음파 반사율

재 료 또 는 매 질	진* 파 속 도 c (m/s)	밀 도 ρ (g/cm <sup>3</sup> )	음 향** 저 항 밀 도 ρc×10 <sup>6</sup>	에너지 반사율(%) (평면파 법선 입사)													
				공 기	기 름	물	백 라 이 트	폴 리 스 틸 렌	유 수	납	황 동	구 리	마 그 네 슘	니 켈	강 철	알 루 미 늄	
알 루 미	6220	2.65	1.65	100	74	71	41	49	1	1	4	15	18	8	25	22	0
강	5810	7.8	4.53	100	89	88	73	77	33	15	9	0.8	0.2	44	0.2	0	
니	5600	8.9	4.98	100	90	89	75	79	37	18	12	2	0.9	47	0		
마 그 네	5330	1.74	0.927	100	57	53	19	27	2	13	20	37	40	0			
구 리	4620	8.93	4.13	100	88	87	71	75	29	12	7	0.2	0				
황 동	4430	8.5	3.77	100	87	86	68	73	26	11	5	0					
납	2130	11.4	2.43	100	81	79	55	61	11	1	0						
수 은	1460	13.6	1.99	100	77	75	48	55	6	0							
유 리	4900-5900	2.5-5.9	1.23	100	66	63	30	38	0								
폴 리 스 틸 렌	2670	1.1	0.294	100	15	12	1	0									
베 이 크 라 이 트	2590	1.4	0.363	100	23	19	0										
물	1430	1.00	0.143	100	0.3	0											
기름(변압기유)	1390	0.92	0.128	100	0												
공 기	331	0.00126	0.000042	0													

에너지 반사율

$$R_0 = \left( \frac{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2$$

(주) 경계면 및 매질의 폭이 파장에 비례하여 충분히 클때

\* 단위: dyne/kine/cm<sup>2</sup>

\* 파장에 비례하여 작은 분

$$C = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\sigma}{1-\sigma 2\sigma^2}$$

E: young의 계수  
σ: 포아송 비

즉, 양 매질의 경계면에 있어서 반사율  $R_{F,1}$ 나 투과율  $T_{F,1}$ 는 양매질의 고유음향 Impedance,  $Z = \rho c$ 의 값으로 결정된다.

표 3은 대기압, 0° C에서 여러가지의 매질음향 Impedance와 조합된 매질의 경계면에서 직각으로 초음파가 입사할때의 반사율을 나타낸다.

표에서 공기와 물의 경계면이나 공기와 다른 매질의 경계면에서 초음파가 직각 입사할때 완전반사(반사율 100%), 물과 강의 경계면의 경우는 반사율이 88%, 12%는 투과율이다.

일반적으로 초음파는 고체에서 고체, 액체에서 액체, 또는 기체에서 기체로 동일한 상은 잘 통과한다. 상이 다른 액체에서 고체, 또는 고체에서 액체등은 통과가 매우 어렵다.

이 특성을 이용하여 초음파는 각방면에 널리 이용되고 있다. 예를들면 해중에 pulse파를 방사하면 그것이 수중의 어군이나 해저 및 다른 선박에 닿아 반사되어 되돌아 오는 시간을 전기적

으로 처리하여 이것을 braun관에 반영, 기록하여 어군을 바다깊이에서의 탐지 및 다른 선박과의 거리측정등에 이용된다. 또 금속에서는 초음파를 방사시켜 금속중의 결함이나 두께등을 탐지하기도 하고 공기중에서는 온도나 풍속을 측정하는등 일상생활면에 이르기까지 이용면이 매우 광범위하다.

초음파분무의 경우에는 고체에서 액체로 초음파가 쉽게 통과하므로 초음파의 음압이나 강도가 큰 Energy를 이용하면 액면에 Capillary과나 액내에 Cavitation을 일으켜 주파수에 알맞게 분열하여 주어진 입경을 얻을 수 있다.

### 6. 定常波

평면음파가 넓은 평면벽의 경계에 직각으로 입사하면 입사파와 반사파가 겹쳐지므로 진행하지 않는 음파가 된다. 이것을 정상파(standing

wave)라고 부른다. 이와 달리 보통파와 같이 진행하는 파를 진행파(progressive wave)라고 부른다.

수중에서 초음파 진동자로부터 방사하는 음의 방향이 수직으로 되게 음향반사판을 설치하고 진동자와 반사판사이의 거리를 바꾸면 거리에 따라 초음파의 강약이 얻어진다. 이 세기가 강할때가 공진(resonance)이다. 완전반사면의 표면에서는 진동하지 않고 진폭도 0이므로 압력은 최대이다.

이와같은 초음파의 진행방향에 대한 진폭변화와 압력변화를 진동면과 반사판과의 거리에 따라 다음을 그림 10에 나타낸다.

그림에서 정상파의 진폭최대의 점을 진폭변화에서 배(loop), 진폭 0의 점을 절(node)이라고 부른다.

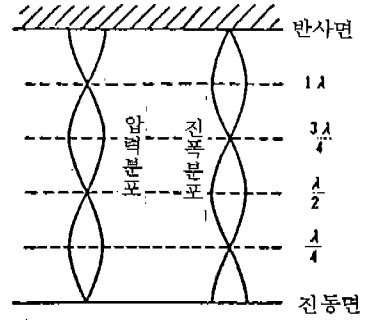


그림 10 반사파에 의한 정상파가 나오는 때의 진폭과 압력의 분포