

초음파 물리(2023)

1. 초음파 물리

초음파란 인간이 감지할 수 있는 가청 주파수(20~20,000Hz)보다 높은 대역의 주파수의 소리로 의료용으로 사용하는 초음파의 주파수 대역은 1~30MHz이다.

※ 초음파 진단의 장단점

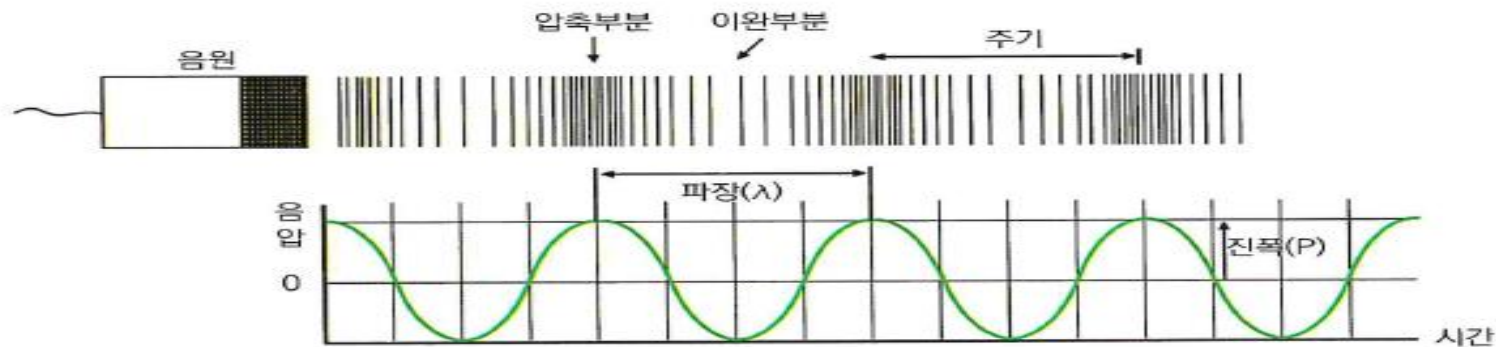
- ① 비침습적이며 환자에게 고통이 없다.
- ② 빔의 주사면과 주사방향 선택이 자유롭다.
- ③ 혈관이나 심장판막(heart valve) 등 움직이는 장기의 묘사가 뛰어나다.
- ④ 연부조직 구조와 움직이는 상에서 그 병소를 나타내는 데 우수하다.
- ⑤ 임상에서 쉽게 다룰 수 있고 그 결과를 즉시 알 수 있다.
- ⑥ 장치가 소형이고, 이동할 수 있다.
- ⑦ 체내 가스와 뼈에 대한 영향이 크다.

1. 초음파의 물리적 특성

1) 초음파의 특성

- ① 음파는 음원의 진동에 의하여 발생되며, 기계파, 압력파, 종파로 초음파는 매질을 통한 에너지의 전달이기 때문에 진공에서는 전달 불가능하다. 초음파의 전파 속도는 고체>액체>기체 순이다.
- ② 음향변수는 음파가 전파하면서 양적인 변화를 일으키는 요인으로 음압, 밀도, 온도, 입자운동 등이 있고 관련된 변수로는 주파수, 주기, 파장, 진폭, 강도, 전파속도 등이 있다.

2) 연속파 변수



(1) 주파수(frequency) : 1초당 발생하는 cycle의 수로, 단위는 [Hz, KHz, MHz]

$$\text{주파수}(f) = \frac{1}{\text{주기}(\mu s)} \quad (1\text{Hz}=1\text{cycle/sec}).$$

(2) 주기(period) : 1개의 cycle이 발생하는 데 걸리는 시간으로, 단위 : [sec, μs]

$$\text{주기}(T) = \frac{1}{\text{주파수}(\text{MHz})}$$

(3) 파장(wave length) : 한 cycle이 차지하는 공간의 길이로, 단위 : [m, mm]

$$\text{파장}(\lambda) = \frac{\text{전파속도}(\text{m/s})}{\text{주파수}(\text{MHz})}$$

(4) 진폭(amplitude) : 기저치를 기준으로 한 음향변수의 최대값으로 소리의 절대강도(I)는 파의 진폭에 영향을 받으며 진폭이 크면 강도가 높아진다.

(5) 음파의 강도 : 음속의 면적에 대한 출력의 크기로, 음의 강도는 진폭의 제곱에 비례한다.

단위 : [W/m²]

$$\text{강도}(I) = \frac{P^2}{2\rho C} \quad \rho : \text{매질의 밀도}, C : \text{전파속도}$$

(6) 전파속도

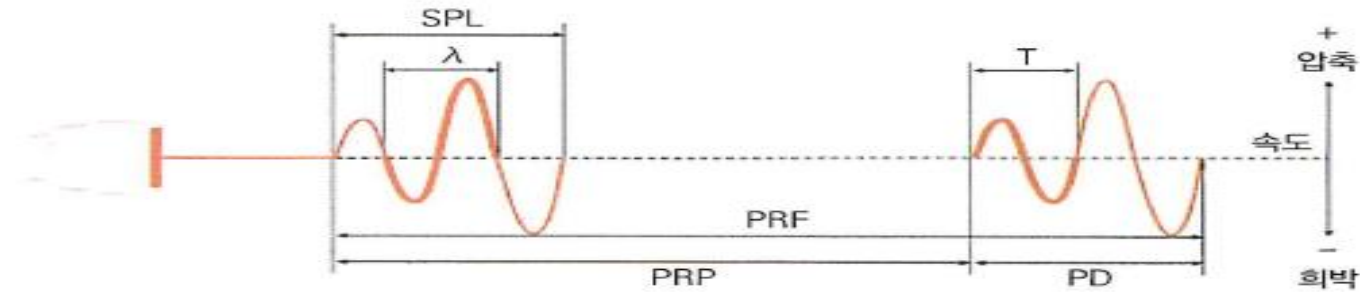
① 음파가 매질을 통과하는 속도로 매질의 특성에 따라 결정된다.

$$\text{전파속도}(c) = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad \text{m/sec}$$

② 전파속도는 매질의 경도에 비례하고 밀도에 반비례한다.

③ 전파속도는 고체 > 액체 > 기체 순이다.

3) 펄스파



영상 2. 펄스파

(1) 펄스반복 주파수(PRF) : 1초간에 발생하는 펄스의 수로, 단위 : [Hz, kHz, MHz]

$$PRF(kHz) = \frac{1}{PRP(ms)}$$

(2) 펄스반복주기(PRP) : 1개의 펄스의 시작부터 다음 펄스가 시작할 때까지의 시간으로, 단위 : [s, ms]

$$PRP(ms) = \frac{1}{PRF(kHz)}$$

(3) 펄스폭(pulse duration, PD): 1개의 펄스가 발생하는 데 필요한 시간으로, 단위 : [sec, ms]

$$PD(\mu s) = \text{펄스중의 cycle 수} \times \text{주기} = \frac{\text{펄스중의 cycle 수}}{\text{주파수(MHz)}}$$

(4) 공간펄스길이(SPL) : 1개의 펄스가 차지하는 공간의 거리로, 단위 : [m, mm]

$$SPL = \text{펄스중의 cycle 수} \times \text{파장} = \frac{\text{펄스중의 cycle 수} \times \text{전파속도}}{\text{주파수(MHz)}}$$

(5) 충격계수(duty factor, DF) : 실제로 음파가 작동하고 있는 시간의 백분율로, 펄스폭과 펄스반복주파수에 비례하고 펄스반복주기에 반비례한다. 연속파의 충격계수는 1이다. 단위 : [%]

$$DF = \frac{PD(s)}{PRP(s)}$$

4) 감약(약화, attenuation)

(1) 음의 감쇠

- ① 음파가 매질을 통과 할 때 진폭과 강도의 감약 현상을 말하며, 이것은 음의 흡수, 산란, 반사현상에 의해 일어난다.
- ② 음의 감쇠단위는 dB(dB : 비강도, W/m^2 : 음의 절대강도)이다.

$$dB : 10 \log \frac{I_2}{I_1}, dB = 20 \log \frac{A_2}{A_1} \quad (I : \text{강도}, A : \text{진폭})$$

(2) 감쇠계수

- ① 단위 길이 당 음의 감소로, 단위는 dB/cm이고, 감쇠계수는 주파수에 비례하여 증가한다.
- ② 연부조직에서의 감쇠계수는 주파수와 동일하다.
감약(dB) = 감쇠계수(dB/cm) × 통과거리(cm)
연부조직에서 감약(dB) = 주파수(MHz) × 통과거리(cm)

5) 투과심도

반감두께는 조직 중에서 원래 음의 강도가 50%로 소실되는 두께로 주파수가 증가하면 음의 감쇠가 많아져 반감두께와 투과심도가 낮아지고 흡수는 주파수에 비례하며, 투과심도는 주파수에 반비례한다.

$$\text{투과심도(cm)} = \frac{3}{\text{감약계수(dB/cm)}}, \quad \text{연부조직에서의 투과심도(cm)} = \frac{3}{\text{주파수(MHz)}}$$

6) 음향 저항(impedance, 교류저항)

음에 대한 매질의 저항을 임피던스라 하고 단위는 $\text{kg/m}^2/\text{sec}[\text{rayl}]$ 이다. 두 개의 매질의 임피던스차가 클수록 반사율은 증가한다(반사율이 크면 전반사).

$$Z = \rho C \quad \rho : \text{매질의 밀도}, C : \text{전파속도}$$

표 1. 매질 사이의 반사율(R)

매질	반사율(%)
연부조직 - 공기	99.9
연부조직 - 뼈	43.0
지방 - 간	0.79
연부조직 - 지방	0.69

7) 반사와 굴절

두 개의 매질이 음파에 대한 저항이 다를 경우 그 경계면에서 반사가 일어나는데 두 매질의 임피던스에 의해서 반사계수를 알 수 있다.

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

- ① **수직입사** : 수직입사에서 반사파의 강도는 두 매질의 임피던스 차에 좌우되며 수직입사에서 두 매질의 임피던스가 같으면 반사파가 없고, 투과파는 입사파와 동일하다.
- ② **사입사** : 주파수의 변화는 없으나 파장과 진행방향이 변화한다. 음이 사입사될 때 반사, 굴절현상이 일어나며, 이때 반사각과 입사각은 동일하며 경계면에 사입사 되는 경우, 두 매질의 전파속도가 다를 경우 항상 굴절이 형성된다.

※ Snell's 법칙 : $\sin Q_2 = \frac{C_2}{C_1} \sin Q_1$

$$C_1 > C_2 \text{ 입사각} > \text{굴절각}, \quad C_1 = C_2 \text{ 입사각} = \text{굴절각}, \quad C_1 < C_2 \text{ 입사각} < \text{굴절각}$$

2. 초음파의 발생

1) 초음파의 발생원리

- ① **원리** : 진동자의 양 면에 교류전압을 가하면 압전결정은 전류의 극성에 따라 팽창과 수축이 일어나는데, 이것은 교류전압의 주파수에 비례하여 반복된다. 초음파를 발생시키는 압전결정은 전기적 에너지를 초음파로 전환시키고 반사음을 받아 다시 전기적 에너지로 전환시키는 역할을 한다.
- ② **압전효과** : 어떤 결정소자에 압력을 가했을 때 전압이 발생되고, 또 이들의 물질에 전압이 가해지면 용적의 변화를 일으키는 현상을 말한다. 압전물질에는 수정(Quartz), 로셀염, 티탄산바륨(BaTiO_3), 인공세라믹 PZT 등이 있다.
- ③ **초전효과** : 압전물질을 냉각시키거나 가열하면 결정의 한쪽 면에 + 전하, 다른 한쪽에는 - 전하가 발생하는 현상이다.
- ④ **큐리온도** : 결정체의 극성을 잃게 하는 온도로, 큐리온도 이상으로 가열하면 압전현상을 잃게 되므로 고열 소독은 금기이다.

2) 공진주파수

초음파 탐촉자(probe)는 압전 결정체의 두께에 따라 결정되는 특정 고유주파수에 최대 감도를 갖도록 되어 있는데, 고유주파수를 탐촉자(probe)의 공진주파수라 한다.

$$\text{공진주파수(MHz)} = \frac{\text{전파속도}}{\text{파장}} = \frac{\text{전파속도(mm}/\mu\text{s)}}{2 \times \text{압전물질두께(mm)}}$$

3) 진동자의 Q-factor

표 2. 진동자의 Q-factor

Q-factor	음의 순수성	높은 Q factor	주파수 범위, 대역폭이 좁다. 송신효율이 좋다.
		낮은 Q factor	주파수 범위, 대역폭 넓다. 수신효율이 좋다.
	음의 지속시간	높은 Q factor	지속시간이 길다(Doppler mode). 송신기의 탐촉소자
		낮은 Q factor	지속시간이 짧다(scan mode). 수신기의 탐촉소자

4) 탐촉자의 구조

- ① **흡음층(damping layer, backing material)** : 후방음을 흡수하여 펄스중의 cycle 수를 감소시켜 거리분해능을 개선시킨다. 재질은 epoxy resin(에폭시수지)에 tungsten(W)과 rubber powder(고무가루)로 구성된다.
- ② **결합층(matching layer)**
 - ㉠ 피부와의 음향 임피던스차를 감소시킨다.결합층의 두께는 파장의 1/4 이어야 하고, 조직 내에서의 에너지 전달효율이 최대가 된다.

5) 초음파 음속의 집속

- ① 근거리 음장에서 분해능이 우수하며, 이 음장영역의 반사음에 의해 기록된다.
- ② 근거리 음장영역을 길게 하려면 주파수를 높이거나(파장을 짧게), 탐촉자의 직경을 크게 한다.

6) 분해능

표 3. 분해능

	정의	개선방법
축(거리) 분해능	음속의 진행방향에 있는 서로 다른 두 개의 작은 물체를 구별하는 능력	공간펄스길이를 짧게 한다(주파수를 높게, 펄스 중의 cycle수를 감소).
축 분해능	음속의 진행방향에 수직으로 있는 서로 다른 두 개의 작은 물체를 구별하는 능력	음속직경(음속의 폭)을 작게 한다.
단면두께 분해능	영상면에 수직으로 있는 서로 다른 두 개의 작은 물체를 구별하는 능력	음속의 두께를 얇게 한다.

3. 탐촉자(probe) 주사방법

1) 탐촉자(probe)의 종류

표 4. 탐촉자(더듬자, probe)의 종류

직선형 탐촉자 (linear probe)	직사각형의 초음파상을 나타내며 주로 표재성 장기에 이용된다.
부채꼴 탐촉자 (sector probe)	부채꼴 형태를 나타내는 영상으로 주로 심장에 이용된다.
볼록 탐촉자 (convex probe)	직선형과 부채꼴 탐촉자의 장점을 모은 것으로 주로 복부장기에 이용된다.
도플러 탐촉자 (Doppler probe)	스펙트럼 또는 색 표시로 나타내 주로 혈류 역학적 정보를 얻는다.
그 외 probe	천자용 probe, 수술용 probe, 체내용 probe, 내시경 probe

2) 초음파 영상 표시방법

- ① **A mode(진폭방식)** : 에코의 강도를 진폭(amplitude)의 파형 높이로 표시하는 방법으로 안과에서 막, 수정체 두께 측정 시 이용한다.
- ② **B mode(밝기방식)** : 반사파의 강도를 밝기(휘도, brightness)의 형태로 기록하여 초음파의 단면상으로 나타내는 방법으로 가장 흔하게 이용되는 해부학적 영상이다.
- ③ **M mode(운동방식)** : 움직이는(motion) 반사체를 시간적 변화로 표시하는 방법으로 심장의 운동 상태를 영상화 한다.
- ④ **D mode(도플러방식)** : 도플러(Doppler) 효과를 이용하여 혈류의 속도와 방향을 측정할 수 있는 검사로 펄스파나 연속파를 이용한다. 펄스파 도플러는 혈류 위치표시 능력이 우수하고, 연속파 도플러는 빠른 속도의 혈류를 진단하는데 유리하다.
- ⑤ **CFM(color flow mapping) mode** : 도플러 효과를 이용하여 혈류의 방향과 속도의 변화 등을 컬러 영상으로 나타내는 방법으로, 보통 프로브 방향으로 다가오는 혈류는 적색, 멀어지는 혈류는 청색으로 표시한다.

4. 초음파 영상장치

1) 증폭기(전치증폭기, preamplifier)

약화된 반사파 신호를 배제하거나 증폭한다.

2) 초음파 진단 장치의 조정

수신기의 단계 : 증폭-보상-압축-복조-제파

① 게인(gain, 증폭, 획득)

㉞ 수신된 전기신호를 증폭시킨다(전반적인 휘도 조절).

$$\textcircled{㉞} \text{ gain} = \frac{\text{출력전력}}{\text{입력전력}}$$

② TGC(time gain compensation) = STC, DGC(부분적 휘도 조절).

근거리에서의 에코를 억제하고 원거리에서의 에코를 상승시키는 회로이다.

③ 동적범위(운동범위, dynamic range)

㉞ 장치시스템에 의해 처리되거나 표시될 수 있는 신호의 크기 범위[dB]이다.

㉞ 동적범위가 좁으면 대조도 상승(영상이 거칠어진다)

㉞ 동적범위가 넓으면 대조도 저하(정상조직 간의 구별이 어렵다)

④ 가장자리증강(edge enhancement) : 경계부분의 대조도 조절

5. 초음파 영상

1) 계면영상

두 장기 사이의 임피던스 차가 큰 경우 뚜렷한 두 장기 사이의 영상을 말한다.

2) 반사음의 강도(장기의 밝기)

이자(pancreas) > 간 실질(parenchyma) > 지라(spleen) > 콩팥 겉질(cortex) > 콩팥속질(medulla)

3) 물혹(cystic), 고체(solid), 반고체 종괴(semisolid mass)의 감별

① 물혹(낭종, cystic mass) : 내부 에코가 없다. 후방음향증강이 있다.

② 고체 종괴(solid mass) : 내부 에코가 있다.

6. 초음파 인공음영

표 5. 초음파 인공음영

종 류	내 용
후방(음향)음영	공기, 돌, 석회화, 뼈에 의해 초음파가 전반사되어 후면에서 그림자가 발생한다.
후방음향증강	액체는 감쇠가 약해 그 뒤에 주위조직보다 반사음이 증가되어 나타나는 현상이다.
다중반사	탐촉자와 반사체 사이의 왕복반사에 의해 정수배 거리에 동일한 형태의 반사체음영이 발생한다.
거울면 현상	가로막을 경계로 진짜 반사체와 동일한 거리에 거짓 반사체가 표시된다. 확인방법은 다른 각도에서 주사한다.
굴절에 의한 인공음영	음이 굴절되어 반사음이 수신될 수 없거나 수신되더라도 반사체의 깊이는 왜곡되는 현상이다.
결엽에 의한 인공음영	강도가 약한 결엽에 의해 반사체가 표시되는 현상으로 쓸개 또는 방광 내에 약한 휘도로 표시된다.
혜성꼬리 징후 (comet-tail sign)	쓸개 샘(선)종(adenoma) 또는 용종의 석회화 사이에서 내부 다중반사가 일어나 혜성 꼬리 같은 에코가 나타나는 현상이다.
여운음영 (ring down artifact)	소화관 내의 가스 기포에서 내부 다중반사가 일어나 그 뒤에 밝고 긴 음영이 나타나는 현상이다.
렌즈효과(lens effect)	복직근과 지방의 전파속도 차이로 초음파 빔이 굴절되어 위창자간막동맥과 배대동맥이 이중으로 보이는 현상이다.

7. Doppler 초음파

Doppler 효과란 음원과 수신기 사이에 움직임이 있으면, 음파의 주파수가 변화하는 현상이다. 즉 관측자가 정지해 있을 경우, 음원이 관측자 쪽으로 움직이면 주파수가 증가하고 음원이 관측자에서 멀어지면 주파수가 감소된다. 음원과 관측자가 정지해 있다면 주파수는 일정하다.

도플러 변위(Doppler shift)는 입사하는 음속의 주파수와 되돌아오는 반향의 주파수의 차이를 말한다.

$$f_d = f_r - f_0 = \frac{2f_0 V \cos\theta}{C}$$

f_d : doppler shift, f_r : 반사파 주파수, f_0 : 입사주파수, V : 혈류속도, C : 음의 속도

- ① 혈류의 방향이 초음파 입사방향과 정반대일 때 $\cos\theta(0^\circ)$ 는 +1(최대 도플러변위)
- ② 혈류의 방향과 초음파의 입사방향이 같을 때 $\cos\theta(180^\circ)$ 는 -1(최저 도플러변위)
- ③ 혈류의 방향이 초음파 방향과 직각일 때 $\cos\theta(90^\circ)$ 는 0(도플러 변위가 없음)
- ㉔ θ (음속과 혈류방향의 각)가 작으면 vector는 크고, 도플러변위는 증가
- ㉕ $\theta = 90^\circ$ 이면 영상을 형성할 수 없다.
- ㉖ θ 가 $30^\circ \sim 60^\circ$ 일 때가 가장 적당하다.

(1) 연속파 도플러

- ① 송신부와 수신부가 구분된 탐촉자를 이용한다.
- ② 심장과 같이 빠른 혈류를 측정하는데 유용하다.
- ③ 속도분포의 정밀도가 높다.
- ④ 위치 정보를 제공할 수 없다.

(2) 펄스파 도플러

- ① 하나의 탐촉자가 송수신을 겸한다.
- ② 특정 깊이의 혈류 검출이 가능하다.
- ③ 속도분포의 정밀도가 낮다.
- ④ 매우 빠른 혈류의 검출이 어렵다(반접현상 발생).

(3) 둘러겹침(반접현상, aliasing) 허상(artifact)

- ① 최대 도플러 시프트 주파수가 펄스반복주파수(PRF)의 1/2을 초과할 때(혈류 속도가 빠를 때) 발생한다.
- ② 개선 방법
 - ㉠ PRF가 도플러 신호 주파수보다 2배 이상 되게 한다.
 - ㉡ base line을 조절한다.
 - ㉢ $\cos\theta$ 를 증가시킨다.
 - ㉣ 저주파수의 탐촉자를 이용한다.
 - ㉤ 속도의 범위를 넓힌다.

8. 초음파장비의 정도관리

(1) 불응지역(dead zone; 사각지역)

탐촉자의 전면으로부터 가장 인접한 영역으로 표적물을 확인할 수 없는 거리를 말한다.

(2) 수직거리정확도(vertical distance accuracy)

수직거리정확도는 구조물의 수직의 직선성, 깊이보정, 깊이에 따른 정확성 측정을 위해 사용한다.

(3) 수평거리 정확도(horizontal distance accuracy)

수평거리 측정은 구조물의 크기와 체적을 정확하게 나타내기 위해 사용된다. 표적간 거리가 정상치보다 $\pm 5\%$ 이상이면 보정이 필요하다.

(4) 축방향 분해능(거리분해능, axial resolution)

거리분해능은 초음파의 진행방향으로 나란히 인접한 서로 다른 두 개의 반사체를 식별할 수 있는 능력을 의미한다. 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0 mm 간격으로 놓여 있으며 보통 1.0 mm까지 분리되면 해상도가 높은 장비이다.

(5) 측방향 분해능(lateral resolution)

측방향 분해능은 초음파의 진행방향에 좌우로 나란히 위치한 반사체를 식별할 수 있는 능력을 의미하며, 표적물이 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mm 간격으로 놓여 있고 1.0 mm까지 분리되면 해상도가 높은 초음파 장비이다.

(6) 초점영역(focus zone)

초점 영역은 초점에서 강도가 가장 높고 분해능이 좋아서 최고의 진단정보를 얻을 수 있다. 예를 들어 초점을 표적물의 7번째에 위치시키고 5번째와 9번째 표적물의 최대 폭을 측정하여 집속이 되는지를 살펴보고 판단한다.

(7) 최대투과심도(maximum depth penetration)

최대투과심도는 특정 깊이에 위치한 작은 물체의 약한 에코를 검출하는 능력을 말한다. 최대투과심도는 민감도라고도 한다.

9. 생물학적 효과

1) 초음파에 의한 생체작용

- ① 조직의 온도 상승
- ② 진공부 형성
- ③ 공동화 현상

2) 안전권고

미국초음파의학회(AIUM) : 100 mW/cm^2 SPTA 강도 이하에서는 영향이 없다.

