뇌혈류초음파의
도플러 효과와 임상적용

Transcranial Doppler (TCD) Ultrasonography

도플러 효과란?

정의 (Definition)

음파의 발생원과 관찰자 사이의 상대적 운동에 의해 관찰되는 주파수가 변화하는 현상

1842년 오스트리아 물리학자 Christian Doppler가 발견

일상 속 도플러 효과

다가오는 구급차 → 사이렌 음이 높아짐
멀어지는 구급차 → 사이렌 음이 낮아짐

초음파에서도 동일한 원리가 적용

의료 초음파에서의 도플러 효과

프로브에서 발사된 초음파가 이동하는 적혈구(RBC)에 반사되면, 혈류 속도와 방향에 따라 반사파의 주파수가 변화

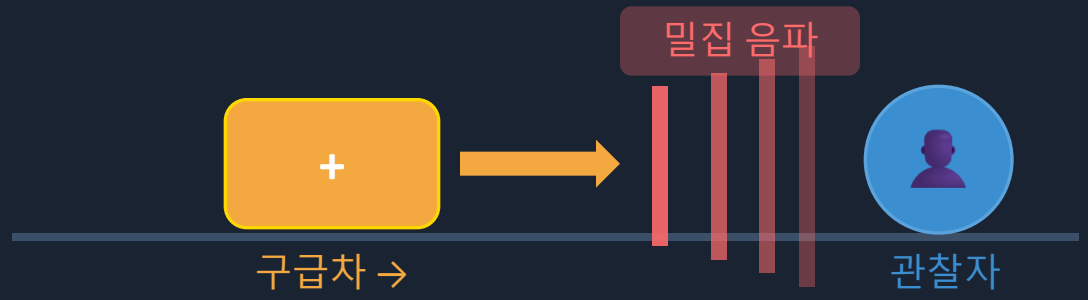
혈류가 프로브 방향으로 → 주파수 증가 (Positive shift) | 혈류가 프로브 반대 방향으로 → 주파수 감소 (Negative shift)

핵심 포인트

도플러 효과를 이용하면 비침습적으로 혈류의 속도와 방향을 실시간으로 측정 가능

도플러 효과 – 그림으로 보기

다가올 때 (접근)



음파 압축 → 주파수 ↑ 높아짐
사이렌이 더 높은 음으로 들림

멀어질 때 (후퇴)



음파 이완 → 주파수 ↓ 낮아짐
사이렌이 더 낮은 음으로 들림

핵심: 음원과 관찰자의 상대적 운동이 주파수를 변화시킨다
이 원리를 초음파에 적용하면 혈류의 속도와 방향을 측정할 수 있습니다

도플러 방정식

$$Fd = 2 \cdot Ft \cdot V \cdot \cos\theta / C$$

Fd
도플러 편이 주파수
(Doppler Shift Frequency)

Ft
송신 주파수
(Transmitted Frequency)

V
혈류 속도
(Blood Flow Velocity)

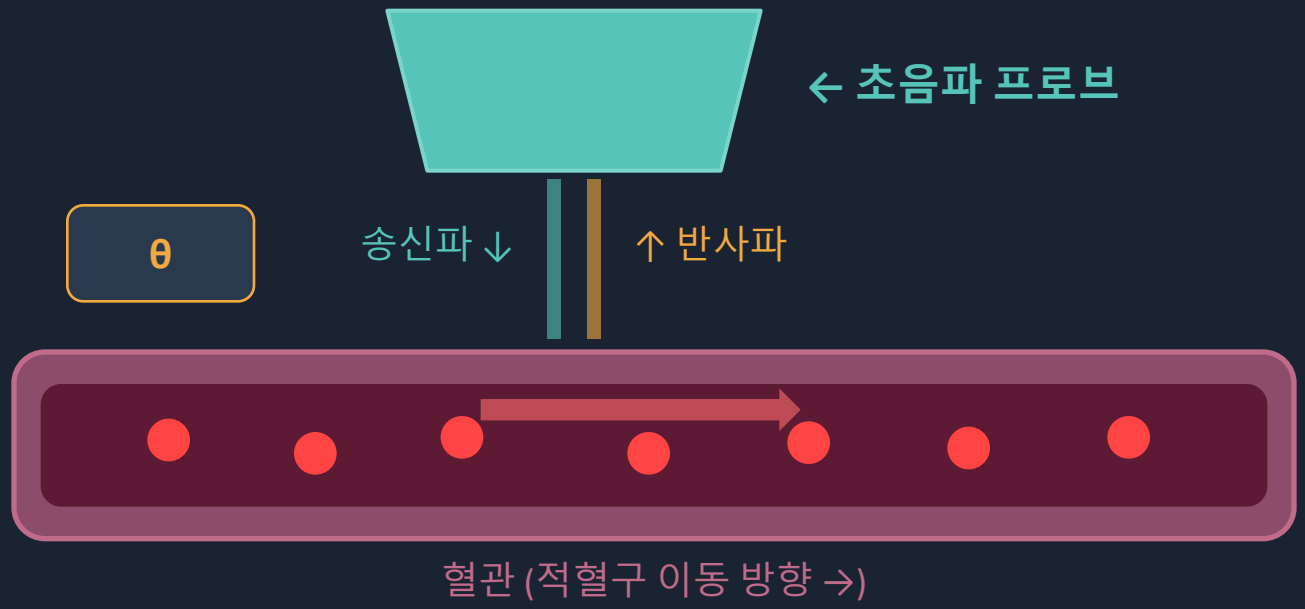
cos θ
도플러 입사각
(Insonation Angle)

C
조직 내 음속
(~1540 m/s)

2
왕복 경로 보정
(Round-trip Factor)

TCD에서는 cosθ ≈ 0°으로 가정 (cos 0° = 1) → 각도 보정 없이 직접 혈류 속도 계산 가능

초음파에서의 도플러 원리



프로브 쪽으로 혈류
주파수 ↑ (Positive Shift)

프로브 반대로 혈류
주파수 ↓ (Negative Shift)

$$\Delta f = (2 \times f_0 \times V \times \cos\theta) / C$$

Δf
주파수 변화량

f_0
송신 주파수

V
혈류 속도

cosθ
입사각 보정

C
음속(1540m/s)

도플러 초음파의 종류

CW Doppler
연속파 도플러

- 송신/수신 소자 분리 연속 작동
- 깊이 선택 불가 (Range ambiguity)
- 매우 높은 속도 측정 가능
- Aliasing 없음

PW Doppler
펄스파 도플러

- 하나의 소자가 송신/수신 교대
- Sample Volume으로 깊이 선택 가능
- TCD에서 주로 사용
- Aliasing 발생 가능 (Nyquist)

Color Doppler
컬러 도플러

- 혈류 방향을 색상으로 표시
- Red: 프로브 방향 접근
- Blue: 프로브에서 멀어짐
- 실시간 혈류 방향 시각화

Power Doppler
파워 도플러

- 도플러 신호의 강도 (amplitude) 표시
- 각도 의존성 낮음
- 저속 혈류 감지에 우수
- 방향 정보 제공 불가

TCD 검사 기본 원리

TCD (Transcranial Doppler)란?

- 두개골을 통해 뇌혈관의 혈류를 측정하는 비침습적 검사
- Pulsed Wave (PW) Doppler 방식 사용
- Willis 환의 주요 혈관 평가 가능

왜 저주파 프로브를 사용하는가?

- 두개골 = 강한 초음파 감쇠 장벽
- 저주파(2 MHz)는 투과력이 우수
- 고주파는 해상도 ↑ 이나 투과력 ↓
- 뼈를 통과해야 하므로 2 MHz 최적

실시간 모니터링

혈류 변화를 즉시 관찰 가능

비침습적

방사선 노출 없이
반복 검사 가능

정량적 측정

혈류 속도를 수치로 제공

Bedside 검사

이동이 어려운 환자에 적합

음향창과 프로브 위치

1

측두창 (Temporal Window)

가장 많이 사용되는 음향창

위치: 귀 상방 관자놀이 부위 **혈관:** MCA, ACA, PCA, ICA 말단부

2

안와창 (Orbital Window)

안구를 통해 접근 (출력 감소 필수)

위치: 닫힌 눈꺼풀 위 **혈관:** Ophthalmic A., ICA Siphon

3

후두하창 (Suboccipital Window)

대공(Foramen Magnum)을 통해 접근

위치: 뒷목 정중선, 머리를 앞으로 숙인 상태 **혈관:** Basilar A., Vertebral A.

4

하악하창 (Submandibular Window)

하악골 아래에서 접근

위치: 턱 아래, 하악각 후방 **혈관:** Distal ICA (extracranial)

주요 혈관별 검사 파라미터

혈관	음향창	깊이 (mm)	혈류 방향	MFV 정상값 (cm/s)
MCA	측두창	45 - 65	Toward (↑)	55 ± 12
ACA	측두창	60 - 80	Away (↓)	50 ± 11
PCA (P1)	측두창	60 - 70	Toward (↑)	39 ± 10
PCA (P2)	측두창	60 - 70	Away (↓)	40 ± 10
ICA Terminal	측두창	55 - 65	Toward (↑)	39 ± 9
VA	후두하창	60 - 85	Away (↓)	38 ± 10
BA	후두하창	80 - 120	Away (↓)	41 ± 10
OA	안와창	40 - 60	Toward (↑)	21 ± 5

도플러 파형 해석

PSV
Peak Systolic Velocity

수축기 최고 혈류 속도

심장 수축기에 측정되는 최대 혈류 속도

EDV
End Diastolic Velocity

이완기말 혈류 속도

심장 이완기 말에 측정되는 최소 혈류 속도

MFV
Mean Flow Velocity

평균 혈류 속도

MFV = (PSV + 2 x EDV) / 3

PI Pulsatility Index

박동성 지수

PI = (PSV - EDV) / MFV

원위부 저항 반영

RI Resistivity Index

저항성 지수

RI = (PSV - EDV) / PSV

정상: 0.5 - 0.7

임상 적용 및 요약

혈관 연축 감지
Vasospasm Detection

- SAH 후 혈관연축 모니터링
- MFV > 120 cm/s: 경도 연축
- MFV > 200 cm/s: 중증 연축
- Lindegaard Ratio 활용

색전 감지
Emboli Detection (HITS)

- 미세색전 신호 실시간 감지
- High Intensity Transient Signal
- 심방세동, 경동맥 협착 평가
- 수술 중 모니터링 활용

뇌사 판정
Brain Death Confirmation

- 뇌혈류 정지 확인 보조 검사
- Reverberating flow pattern
- Small systolic spike
- 양측 ICA + BA에서 확인

⭐ 핵심 요약

✓ 도플러 효과: 이동하는 적혈구에 반사된 초음파의 주파수 변화를 이용하여 혈류 속도와 방향을 측정
✓ TCD: 2 MHz PW 도플러를 사용하여 두개골을 통해 뇌혈관 혈류를 비침습적으로 평가
✓ PSV, EDV, MFV, PI, RI 등의 지표로 혈류 상태를 정량적으로 평가