

개념 정리 노트

족보 2020-2025 (배옥남 교수님) + 중간고사 초안 · 주제별 개념, 기출 빈도, 연결 포인트, 예상 문제

★★★★ 최빈출 — 기출 문항 수 상위 30% 주제

★★★ 자주 출제 — 상위 30~70%

★★ 그 밖에 출제된 주제

★ 출제 없음 (자료 범위)

암기 주제마다 외울 포인트

연결 다른 단원과 이어지는 지점 (누르면 이동)

예상 나올 수 있는 객관식 · 서술형과 정답

기출 수는 중간 족보 PDF의 2025(23학번)·2024(22학번)·2023(21학번)·2022(20학번)·2021(19학번)·2020(18학번) 복기 문항과 중간고사 초안 문항(초안 OX·객·단·서)을 번호대로 센 값이며, 2024 1-5번(혈액·심장·신경독성, 타 교수님), 2020 1-7번(독성발현기전), Fenton 반응 문항(2021 51, 2020 41), 내용 없는 2024 39번은 제외했다.

목차

1. 간독성 3.2 표적장기별 독성 · 간 (2025 TF 1·26, 2021·2020 간 문항)

- | | | |
|-----|--------------------------------------|-----|
| 1-1 | 간의 구조와 기능 (lobule · zone · sinusoid) | ★★★ |
| 1-2 | 화학물질에 의한 간손상과 간기능 지표 | ★★★ |

2. 신장독성 신장 구조와 연관 · 그림 3-111 (학생 메모: 2025 TF 25·26, 객 34·36·37·38은 전학기 범위로 표시)

- | | | |
|-----|--------------------------------|-----|
| 2-1 | 신장의 구조와 신기능 지표 (GFR · BUN) | ★★★ |
| 2-2 | 부위별 신장독성 (사구체 · 근위세뇨관 · 원위세뇨관) | ★★★ |

3. 호흡기 · 피부 독성 p.452-454 피부 · 호흡기 (2025 TF 21은 '이전 범위' 메모)

- | | | |
|-----|---------------------------------|------|
| 3-1 | 호흡기 독성 (입자 크기 · paraquat · 폐기종) | ★★★★ |
| 3-2 | 피부 독성 (접촉성 피부염 · 광독성 · 자외선) | ★★★★ |

4. 화학발암 p.461-494 발암물질 분류 · 다단계 발암 · IARC

- | | | |
|-----|----------------------------------|-----|
| 4-1 | 발암물질 분류 (1차/2차 · 유전독성 역치) | ★★★ |
| 4-2 | IARC 발암성 분류 (1·2A·2B·3군, 4군은 폐지) | ★★★ |
| 4-3 | 다단계 발암과정 (개시 · 촉진 · 진행) | ★★★ |

5. 유해금속 p.497-509 납 · 수은 · 카드뮴 · 비소 · 크롬

- | | | |
|-----|------------------------------|------|
| 5-1 | 납 · 수은의 독성 | ★★★★ |
| 5-2 | 금속의 IARC 발암 분류 | ★★★ |
| 5-3 | 카드뮴 · 비소 독성과 metallothionein | ★★★★ |

6. 농약 p.510-528 살충제 · 제초제 · 잔류기준

- | | | |
|-----|---|------|
| 6-1 | 살충제 (유기인계 · carbamate · 유기염소계 · pyrethroid) | ★★★★ |
| 6-2 | 제초제와 다이옥신 (2,4,5-T · TCDD · 잔류기준) | ★★★ |

7. 유기오염물질 p.529-550 PCB · PAH · 유기용제 · 플라스틱 · 내분비계장애물질

7-1	PCB와 DL-PCB (AhR · 잔류성)	★★★★
7-2	PAH와 benzo[a]pyrene 대사활성화	★★★★
7-3	유기용제 독성 (benzene · methanol · toluene)	★★★★
7-4	플라스틱 관련 물질 (vinyl chloride · acrylamide · phthalate)	★★★
7-5	내분비계장애물질 기전 (유사·봉쇄·촉발)	★★★

8. 국내 건강문제 유해물질 p.552-559 멜라민 · 탈크 · 가습기살균제

8-1	멜라민·탈크·가습기살균제 (국내 건강피해)	★★★★
-----	-------------------------	------

9. 독성시험법 p.565-592 독성시험 · 유전독성 · 3R · AOP

9-1	독성시험 총론 (LD50 · 설치류 · 배태자 시험 · GLP)	★★★
9-2	유전독성시험 (Ames test · clastogen)	★★★
9-3	3R과 동물대체시험법	★★★
9-4	AOP (유해결과경로)	★★★

10. 위해성평가 p.593-607 4단계 · POD · RfD/HI · 발암 위해도

10-1	위해성평가 4단계와 법·제도	★★★
10-2	POD · critical effect · RfD · UF	★★★
10-3	비발암 위해성평가 (RfD · HI)	★★★
10-4	BMDL10 · MOE · 단위위해도	★★★
10-5	발암 위해성평가 (ADD · LADD · 개인초과발암위해도)	★★★

기출 빈도 순위

기출 수는 중간 족보 PDF의 2025(23학번)·2024(22학번)·2023(21학번)·2022(20학번)·2021(19학번)·2020(18학번) 복기 문항과 중간고사 초안 문항(초안 OX·객·단·서)을 번호대로 센 값이며, 2024 1-5번(혈액·심장·신경독성, 타 교수님), 2020 1-7번(독성발현기전), Fenton 반응 문항(2021 51, 2020 41), 내용 없는 2024 39번은 제외했다.

#	주제	중요도	문항	연도
1	6-1 살충제 (유기인계 · carbamate · 유기염소계 · pyrethroid)	★★★★	22	20 21 22 23 24 25
2	8-1 멜라민·탈크·가습기살균제 (국내 건강피해)	★★★★	18	20 21 22 23 24 25
3	3-1 호흡기 독성 (입자 크기 · paraquat · 폐기종)	★★★★	17	20 21 22 23 24 25
4	7-3 유기용제 독성 (benzene · methanol · toluene)	★★★★	15	20 21 22 23 24 25
5	5-3 카드뮴 · 비소 독성과 metallothionein	★★★★	14	20 21 22 23 24 25
6	7-1 PCB와 DL-PCB (AhR · 잔류성)	★★★★	14	20 21 22 23 24 25
7	7-2 PAH와 benzo[a]pyrene 대사활성화	★★★★	13	20 21 22 23 24 25
8	3-2 피부 독성 (접촉성 피부염 · 광독성 · 자외선)	★★★★	13	20 21 22 23 24 25
9	5-1 납 · 수은의 독성	★★★★	13	20 21 22 23 24 25
10	9-3 3R과 동물대체시험법	★★★☆☆	12	20 21 22 23 24 25
11	10-5 발암 위해성평가 (ADD · LADD · 개인초과발암위해도)	★★★☆☆	12	20 21 22 23 24 25
12	1-2 화학물질에 의한 간손상과 간기능 지표	★★★☆☆	11	20 21 22 23 24 25
13	10-1 위해성평가 4단계와 법·제도	★★★☆☆	11	20 21 22 23 24 25
14	4-1 발암물질 분류 (1차/2차 · 유전독성 역치)	★★★☆☆	10	20 21 22 23 24 25
15	6-2 제초제와 다이옥신 (2,4,5-T · TCDD · 잔류기준)	★★★☆☆	10	20 21 22 23 24 25
16	9-1 독성시험 총론 (LD50 · 설치류 · 배태자 시험 · GLP)	★★★☆☆	10	20 21 22 23 24 25
17	9-2 유전독성시험 (Ames test · clastogen)	★★★☆☆	10	20 21 22 23 24 25
18	2-2 부위별 신장독성 (사구체 · 근위세뇨관 · 원위세뇨관)	★★★☆☆	10	20 21 22 23 24 25
19	10-2 POD · critical effect · RfD · UF	★★★☆☆	10	20 21 22 23 24 25
20	1-1 간의 구조와 기능 (lobule · zone · sinusoid)	★★★☆☆	10	20 21 22 23 24 25
21	4-2 IARC 발암성 분류 (1·2A·2B·3군, 4군은 폐지)	★★★☆☆	9	20 21 22 23 24 25
22	10-4 BMDL10 · MOE · 단위위해도	★★★☆☆	9	20 21 22 23 24 25

23	10-3 비발암 위해성평가 (RfD · HI)	★☆☆	8	20	21	22	23	24	25
24	5-2 금속의 IARC 발암 분류	★☆☆	7	20	21	22	23	24	25
25	4-3 다단계 발암과정 (개시 · 촉진 · 진행)	★☆☆	7	20	21	22	23	24	25
26	7-5 내분비계장애물질 기전 (유사·봉쇄·촉발)	★☆☆	7	20	21	22	23	24	25
27	7-4 플라스틱 관련 물질 (vinyl chloride · acrylamide · phthalate)	★☆☆	6	20	21	22	23	24	25
28	2-1 신장의 구조와 신기능 지표 (GFR · BUN)	★☆☆	6	20	21	22	23	24	25
29	9-4 AOP (유해결과경로)	★☆☆	3	20	21	22	23	24	25

1-1 간의 구조와 기능 (lobule · zone · sinusoid)



중요도



기출

10 문항

출제 연도

2 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

21 8 · 21 12 · 21 13 · 21 14 · 21 15 · 21 16 · 20 9 · 20 10 · 20 11 · 20 12

개념

간의 해부학적 단위

- 간의 해부학적 단위 = 소엽 (lobule) → 영어명 그대로 출제
- 간 특이 혈관계 = sinusoid (동양혈관) — 문맥혈과 간동맥혈이 섞여 흐름
- Zone 1 = 문맥역(portal triad) 주변 → 산소·영양 풍부
- Zone 3 = 중심정맥 주변 → 산소 적고 CYP 많음 → 대사활성 독성에 취약

간을 이루는 세포

- Ito cell (stellate cell) = 비타민 A 저장 → T
- 활성화되면 콜라겐 생성 → 섬유화
- Kupffer cell = sinusoid 내 대식세포
- 간 = 지방·콜레스테롤 대사의 중추

시험 핵심 비교

간 소엽의 zone 비교

구분	Zone 1	Zone 3
위치	문맥역 주변	중심정맥 주변
산소	많음	적음
CYP	적음	많음
취약한 손상	직접 작용 독성	대사활성 독성 (CCI4 등)

암기

- lobule · sinusoid · Ito cell = 비타민 A
- Zone 1 = 문맥 쪽 / Zone 3 = 중심정맥 쪽 · CYP 많음

연결 포인트

1-2

화학물질에 의한 간손상과 간기능 지표

Zone 3에 CYP가 많아 CCl₄ 손상이 여기서 생김

[이동 →](#)

3-1

호흡기 독성 (입자 크기 · paraquat · 폐기종)

폐의 곤봉세포도 CYP로 대사활성 → 표적

[이동 →](#)

예상 문제

객관식

Q1. 간의 구조와 기능에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 간의 해부학적 단위는 lobule이다
- ② Ito cell은 비타민 A 저장에 중요하다
- ③ sinusoid는 간 특이 혈관계이다
- ④ Zone 1은 중심정맥 주변으로 CYP가 가장 많다
- ⑤ 간은 지방대사의 중추이다

정답 ④ CYP가 많은 중심정맥 주변은 Zone 3

서술형

Q2. 간 소엽의 Zone 1과 Zone 3의 위치와 특징을 비교하시오.

모범답안

간 소엽에서 Zone 1은 문맥역 주변에 위치하여 산소와 영양이 풍부하다. Zone 3은 중심정맥 주변에 위치하여 산소가 적고 CYP 효소가 많다. 따라서 대사활성화가 필요한 간독성 물질(CCl₄ 등)의 손상은 주로 Zone 3에서 나타난다.

Zone 1 문맥역 · Zone 3 중심정맥 · CYP

1-2 화학물질에 의한 간손상과 간기능 지표



중요도



기출

11 문항

출제 연도

5 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 TF 1 · 25 TF 26 · 23 1 · 22 1 · 21 1 · 21 9 · 21 17 · 21 43 · 20 8 · 20 13 · 20 36

개념

간손상의 진행과 대표 물질

- 진행 순서 = 지방간 → 간섬유화 → 간경화 (족보의 '간경화→섬유화→지방간'은 F)
- CCl₄: Zone 3의 CYP2E1이 대사 → 반응성 라디칼 → 지질과산화 → 중심소엽 괴사
- 간독성시험은 독성시험 기준에 따라 설치류로 수행 → T

간기능 지표

- 담즙정체 시 혈청 ALP (alkaline phosphatase) 활성 증가
- 프로트롬빈 시간 (PT) = 간의 응고인자 합성능 지표 → '신장 측정에 유리'는 F
- Benzene의 주 표적은 간이 아니라 골수(조혈계) → 7-3

시험 핵심 비교

간독성 TF 단골 문장

문장	족보 판정
독성시험 기준에 따라 설치류로 간독성시험	T
간경화→간섬유화→지방간 순으로 진행	F (역순)
프로트롬빈 시간은 신장 측정에 유리	F (간기능 지표)
담즙정체 시 ALP 증가	T

암기

- 지방간 → 섬유화 → 경화 / 담즙정체 = ALP↑ / PT = 간

연결 포인트

1-1

간의 구조와 기능 (lobule · zone · sinusoid)

CCl₄가 Zone 3을 손상하는 이유 = CYP 분포

이동 →

7-3

유기용제 독성 (benzene · methanol · toluene)[이동 →](#)

Benzene은 간독성 물질이 아니라 골수독성

9-1

독성시험 총론 (LD50 · 설치류 · 배태자 시험 · GLP)[이동 →](#)

간독성시험 = 설치류 반복투여 시험

예상 문제**객관식****Q1. 간독성에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?**

- ① 독성시험 기준에 따라 설치류에 간독성시험을 수행한다
- ② 담즙정체 시 혈청 ALP 활성이 증가한다
- ③ 간손상은 간경화→간섬유화→지방간 순으로 진행된다
- ④ CCl₄는 CYP에 의해 대사활성화되어 간손상을 일으킨다
- ⑤ 프로트롬빈 시간은 간기능 평가 지표이다

정답 ③ 진행 순서는 지방간→섬유화→경화**서술형****Q2. CCl₄에 의한 간독성이 주로 나타나는 부위와 그 이유를 쓰시오.****모범답안**

CCl₄에 의한 간손상은 주로 중심정맥 주변인 Zone 3(중심소엽)에서 나타난다. Zone 3에는 CYP2E1이 많아 CCl₄가 반응성 라디칼로 대사활성화되기 때문이다. 생성된 라디칼이 지질과산화물을 일으켜 간세포 괴사를 유발한다.

Zone 3 · CYP2E1 · 라디칼 · 지질과산화

2-1

신장의 구조와 신기능 지표 (GFR · BUN)



중요도



기출

6 문항

출제 연도

3 / 6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 25 · 25 객 36 · 21 10 · 21 18 · 21 23 · 20 14

개념

신장이 독성에 취약한 이유

- 심박출량의 약 **20~25%**가 신장으로 → 화학물질 노출이 많음
- 요의 농축 → 세뇨관 내 물질 농도 상승
- 요 pH 변화 → 용해도 변화 → 결정 형성·**요로폐색** 가능

신기능 지표

- **GFR과 BUN은 반비례** → GFR↓ 이면 BUN↑ (죽보 T)
- Creatinine도 GFR 감소 시 상승
- 신장독성 관련 증상 = 단백뇨, 무뇨, 부종
- **지방간 (steatosis)** = 간 질환 → 신장독성과 관련 없음 (2025 객 36 답)

암기

- **GFR↓ ↔ BUN↑ (반비례)**
- 신장과 무관한 보기 = **steatosis(지방간)**

연결 포인트

2-2

부위별 신장독성 (사구체 · 근위세뇨관 · 원위세뇨관)

부위별 신장독성 · 그림 3-111

이동 →

8-1

멜라민·탈크·가습기살균제 (국내 건강피해)

멜라민+시아누르산 결정 → 세뇨관 폐색

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 신장기능과 가장 거리가 먼 것은?

- ① 단백뇨
- ② 무뇨
- ③ steatosis
- ④ 부종
- ⑤ BUN 상승

정답 ③ steatosis(지방간)는 간 질환

서술형 Q2. 신장이 화학물질 독성에 취약한 이유를 두 가지 이상 쓰시오.

모범답안

신장은 심박출량의 약 20~25%를 공급받아 혈중 화학물질에 많이 노출된다. 또한 요를 농축하는 과정에서 세뇨관 내 물질 농도가 높아지고, 요 pH 변화에 따라 용해도가 바뀌어 결정이 생기고 요로가 막힐 수 있다.

혈류 20~25% · 요 농축 · pH와 용해도

2-2 부위별 신장독성 (사구체 · 근위세뇨관 · 원위세뇨관)



중요도



기출

10 문항

출제 연도

3 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 객 33 · 25 객 34 · 25 객 37 · 25 객 38 · 21 20 · 21 24 · 21 44 · 20 17 · 20 37 · 20 #Daunorubicin

개념

부위별 대표 물질

- 근위세뇨관 = 카드뮴·수은·시스플라틴의 공통 작용부위 (2021 20, 2025 객 33)
- 사구체·혈관: ACE 저해제(angiotensin II 억제), cyclosporin(endothelin 유리) → 혈역학 변화로 GFR 감소
- Daunorubicin → 사구체 손상 → 신증후군 (2020)
- 원위세뇨관·집합관: 리튬 → ADH 작용 억제 → 다뇨 = 신성요붕증

그림 3-111 사구체여과율 감소의 주요 요인

- (B) 구심성 세동맥 수축 → 사구체 여과압 감소
- (C) 막힘 → 세뇨관 폐쇄 (괴사 세포 탈락·cast 형성)
- (D) 역류 → 손상된 세뇨관에서 여과액 누출
- 세뇨관 괴사로 GFR이 줄어드는 경우 = C·D 쪽 (cast = C)

시험 핵심 비교

신장 부위와 대표 독성

부위	대표 물질·질환
사구체/혈관	ACE 저해제, cyclosporin, daunorubicin
근위세뇨관	Cd, Hg, cisplatin
원위세뇨관/집합관	리튬 → 신성요붕증

암기

- Cd·Hg·cisplatin = 근위세뇨관
- 리튬 = 신성요붕증 (ADH 억제 → 다뇨)
- B 수축 · C 막힘(cast) · D 역류(누출)

연결 포인트

5-3

카드뮴 · 비소 독성과 metallothionein

Cd-MT가 근위세뇨관에서 분해되어 손상

이동 →

10-3

비발암 위해성평가 (RfD · HI)

시스플라틴 신장독성 ADI·HI 서술형

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. 카드뮴, 수은, 시스플라틴의 공통적인 신장 독성 작용부위는?

- ① 사구체
- ② 근위세뇨관
- ③ 헨레고리
- ④ 원위세뇨관
- ⑤ 집합관

정답

2

세 물질 모두 근위세뇨관 손상

서술형

Q2. 그림 3-111을 참고하여 사구체여과율이 감소하는 요인 세 가지를 설명하시오.

모범답안

첫째, 구심성 세동맥이 수축하면 사구체 여과 압력이 감소한다. 둘째, 괴사된 세뇨관 세포가 탈락하여 cast를 형성하면 세뇨관이 막혀 여과가 줄어든다. 셋째, 세뇨관 상피가 손상되면 여과액이 역류하여 누출된다.

구심성 세동맥 수축 · 막힘(cast) · 역류

3-1

호흡기 독성 (입자 크기 · paraquat · 폐기종)



중요도



기출

17 문항

출제 연도

5 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 14 · 25 TF 21 · 24 6 · 24 7 · 24 8 · 24 9 · 24 44 · 23 8 · 23 14 · 23 21 · 23 26 · 21 21 · 21 25 · 21 26 · 21 27 · 20 20 · 초안 OX 5

개념

입자 크기와 침착 부위

- 호흡기 입자 독성 결정 요소 = 입자 크기 (size)
- 작은 입자(약 1~5 μm 이하)가 폐포까지 도달 → '5 μm 이상이 폐포에서 확산'은 F
- 곰팡이 핀 고구마 독소 4-ipomeanol → 폐 곤봉세포(club cell)의 CYP가 대사활성화 → 폐손상 ("폐는 대사능력이 거의 없어 모화합물로 독성" = F, 2023 TF 8)

paraquat와 폐손상

- 경구 투여된 paraquat도 폐조직에 선택적으로 축적 → 폐손상 → T
- 기전 = redox cycling → 활성산소종(ROS) 생성 (glutathione계 소모)
- 폐기종(emphysema) = 폐포 벽 파괴로 기실이 확대되는 손상 (COPD 대표)
- elastin 분해·흡연·단백분해효소 불균형이 관여

시험 핵심 비교

호흡기 독성 핵심

항목	내용
독성 결정 요소	입자 크기(size)
폐포 도달	작은 입자(~1-5 μm 이하)
paraquat	폐 축적 → ROS → 폐손상
폐기종	폐포 확대·elastin 분해

암기

- 입자 작을수록 폐포 도달 / paraquat = 폐 축적·ROS
- 폐기종 = 기실 확대·elastin 분해

연결 포인트

6-2

제초제와 다이옥신 (2,4,5-T · TCDD · 잔류기준)

paraquat = 제초제, redox cycling 기전

이동 →

2-2

부위별 신장독성 (사구체 · 근위세뇨관 · 원위세뇨관)

장기별 표적독성 비교

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. 호흡기 독성에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 입자성 물질의 독성 유발 부위는 입자 크기가 결정한다
- ② 5 μm 이상의 큰 입자가 폐포까지 깊이 도달해 확산된다
- ③ 경구 투여된 paraquat도 폐에 축적되어 폐손상을 일으킨다
- ④ 폐기종은 폐포가 파괴되어 기실이 확대되는 손상이다
- ⑤ paraquat는 redox cycling으로 ROS를 생성한다

정답 ② 폐포까지 도달하는 것은 작은 입자

서술형

Q2. 경구로 섭취한 paraquat이 폐손상을 일으키는 기전을 설명하시오.

모범답안

Paraquat은 경구로 섭취해도 폐조직에 선택적으로 축적된다. 폐세포 내에서 산화-환원 반응을 반복하는 redox cycling을 통해 활성산소종을 대량 생성하고 glutathione을 소모시킨다. 생성된 활성산소종이 폐세포막을 손상시켜 폐섬유화·폐손상을 유발한다.

폐 축적 · redox cycling · 활성산소종(ROS)

3-2 피부 독성 (접촉성 피부염 · 광독성 · 자외선)



중요도



기출

13 문항

출제 연도

5 / 6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 15 · 25 TF 22 · 25 객 40 · 25 객 42 · 24 10 · 24 11 · 24 12 · 23 15 · 21 28 · 21 29 · 21 30 · 21 31 · 20 22

개념

피부 장벽과 접촉성 피부염

- 피부의 primary barrier로 수분 유지에 중요한 부분 = **각질층 (stratum corneum)**
- 자극성(1차) 접촉성 피부염** = 노출 **농도·시간에 비례**, 급성·가역적, 면역 무관 → T
- 알레르기성 접촉성 피부염** = 면역(지연형 과민반응) 매개 → 대표 증상 **skin sensitization**
- 랑게르한스 세포가 hapten 결합 항원을 인식 → T세포 활성화

광독성·광과민성과 자외선

- 광독성: 경구 흡수된 물질이 피부에서 **빛에 의해 변환**되어 독성 (항생제 등이 유발)
- 광알레르기 = 지연형 과민반응
- 피부 진피에 작용해 노화·착색 유발 = 족보 답 **UVB** (교과서: 진피·광노화는 주로 **UVA**)
- 화학물질 면역반응성 중증 피부독성 = **Stevens-Johnson syndrome**

시험 핵심 비교

자극성 vs 알레르기성 접촉성 피부염

구분	자극성(1차)	알레르기성
면역	무관	지연형 과민반응
농도·시간 비례	예	아니오(감작 후 소량도)
대표 증상	irritation	skin sensitization

암기

- 각질층 = 수분 장벽 / 자극성 = 농도·시간 비례 / 알레르기 = skin sensitization
- 진피 노화·착색: 족보 UVB (교과서 UVA)

연결 포인트

4-1

발암물질 분류 (1차/2차 · 유전독성 역치)

1차 발암물질은 노출(접촉) 부위에 직접 작용

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 접촉성 피부염에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 피부의 1차 장벽은 각질층(stratum corneum)이다
- ② 자극성 접촉성 피부염은 노출 농도·시간에 비례한다
- ③ 자극성 접촉성 피부염은 급성이고 가역적이다
- ④ 알레르기성 접촉성 피부염은 노출 농도·시간에 정확히 비례한다
- ⑤ 알레르기성 피부염에서 랑게르한스세포가 hapten 항원을 인식한다

정답 4 알레르기성은 면역 매개로 감작 후 소량에도 발현

서술형 Q2. 자극성(1차) 접촉성 피부염과 알레르기성 접촉성 피부염을 비교하십시오.**모범답안**

자극성 접촉성 피부염은 면역과 무관하며 노출된 화학물질의 농도와 시간에 비례하여 독성이 나타나고 급성·가역적이다. 알레르기성 접촉성 피부염은 지연형 과민반응이 관여하는 면역 매개 반응으로, 랑게르한스세포가 hapten 결합 항원을 인식하여 T세포를 활성화하고 감작된 후에는 소량 노출에도 발현된다.

자극성=농도·시간 비례·면역 무관 · 알레르기=지연형 과민반응·skin sensitization

4-1 발암물질 분류 (1차/2차 · 유전독성 역치)



중요도



기출

10 문항

출제 연도

5 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 TF 6 · 25 TF 7 · 25 TF 23 · 24 14 · 23 6 · 23 7 · 23 23 · 22 6 · 22 7 · 21 6

개념

1차 발암물질 vs 2차 발암물질

- 1차(직접) 발암물질 = 그 자체로 반응성, 불안정하여 노출 부위에 바로 작용
- 2차(간접) 발암물질 = **procarcinogen** → 대사활성화를 거쳐 발암 (모화합물이 활성체로)
- '2차 발암물질은 1차 발암물질이 대사활성을 거친 것'은 F (주어가 바뀜)

유전독성 발암과 역치

- 유전독성(genotoxic) 발암물질 = 무역치(non-threshold) → 역치 개념 적용 안 됨 → '적용된다'는 F
- 유전독성은 단일 시험으로 확인 어려움 → 여러 시험법 조합 (9-2와 연결)
- 1차 발암물질은 반응성이 커 접촉(노출) 부위에 바로 암 유발 → T (2025 TF 23은 "1군"으로 복기됐지만 같은 기준 족보 2023 TF 23은 "1차")

시험 핵심 비교

1차 vs 2차 발암물질

구분	1차(직접)	2차(간접)
활성화	불필요	대사활성화 필요
안정성	불안정	모화합물은 안정
작용	노출부위 직접	대사 후
예	alkylating agent	benzo[a]pyrene, nitrosamine

암기

- 1차=직접·불안정·노출부위 / 2차=procarcinogen·대사활성화
- 유전독성 발암 = 무역치

연결 포인트

4-3

다단계 발암과정 (개시 · 촉진 · 진행)

다단계 발암 initiator/promoter

이동 →

7-2

PAH와 benzo[a]pyrene 대사활성화

benzo[a]pyrene = 2차 발암물질(diol epoxide)

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. 발암물질에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 1차 발암물질은 불안정하여 노출 부위에 바로 작용한다
- ② 2차 발암물질은 대사활성화를 거쳐 발암성을 띤다
- ③ 유전독성 발암물질에는 역치(threshold) 개념이 적용된다
- ④ benzo[a]pyrene은 대표적인 2차 발암물질이다
- ⑤ 유전독성은 여러 시험법을 조합해 평가한다

정답

③ 유전독성 발암물질은 무역치로 간주

서술형

Q2. 1차 발암물질과 2차 발암물질의 차이를 설명하시오.

모범답안

1차(직접) 발암물질은 그 자체로 반응성이 높아 대사활성화 없이 노출 부위에서 직접 DNA에 작용한다. 2차(간접) 발암물질은 모화합물(procarcinogen) 상태에서는 비교적 안정하지만, 체내에서 CYP 등에 의해 대사활성화되어 반응성 대사체가 된 뒤 발암성을 나타낸다. benzo[a]pyrene이 대표적인 2차 발암물질이다.

1차=직접·노출부위 · 2차=procarcinogen·대사활성화

4-2 IARC 발암성 분류 (1·2A·2B·3군, 4군은 폐지)



중요도



기출

9 문항

출제 연도

5 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 4 · 25 TF 24 · 24 14 · 23 4 · 23 5 · 23 24 · 22 4 · 22 5 · 21 5

개념

IARC 군의 의미

- **1군** = 인체 발암성 있음 (충분한 근거)
- **2A군** = 발암 추정 / **2B군** = 발암 가능
- **3군** = 분류 불가 (발암성/비발암성 판정 불가) — '독성 없음'이 아님
- **4군은 없어짐** (족보 메모 '4군 없어짐', 2022 TF 4) → '발암성 없음이 증명되면 IARC 4군으로 분류' TF는 F

분류 = 근거의 강도 (주의)

- IARC 군은 **발암 근거의 강도** 분류이지 발암력(세기)이 아님 (2022 TF 5: "1군은 매우 낮은 농도에서도 발암" = F, 차이는 발암 기전의 확실성)
- '1군이 3군보다 cancer slope factor가 크다' → 족보 판정 **T** (2023 TF 5, 2024 31 ㄱ; 2021 5 'Group 1이 더 심함')
- (교과서: IARC 분류는 근거 강도를 나타내며 slope factor의 크기와 직접 대응하지 않음)
- 6가크롬: IARC 1군인데 '3군이라 독성 없다'는 서술은 F (2025 TF 24)

시험 핵심 비교

IARC 분류

군	의미
1	인체 발암성 있음
2A	발암 추정
2B	발암 가능
3	분류 불가
4	폐지됨 (과거 비발암성 추정)

암기

- $1 > 2A > 2B > 3$ (근거 강도, 4군 폐지) / 3군=분류 불가(≠안전)
- 족보: 1군이 3군보다 slope factor 큼 (T)

연결 포인트

5-2

금속의 IARC 발암 분류

금속 IARC 분류(무기납 2A, 카드뮴·비소 1군 등)

이동 →

10-5

발암 위험성평가 (ADD · LADD · 개인초과발암위해도)

발암 위험성평가 slope factor

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. IARC 발암성 분류에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 1군은 인체 발암성이 있는 물질이다
- ② 2A군은 발암 추정, 2B군은 발암 가능 물질이다
- ③ 3군은 분류 불가이며 독성이 전혀 없음을 뜻한다
- ④ 현재 IARC 분류에는 4군이 없다
- ⑤ 6가크롬은 IARC 1군 발암물질이다

정답 ③ 3군은 발암성 판정 불가일 뿐 안전하다는 뜻이 아님

서술형

Q2. IARC 1군, 2A·2B군, 3군의 의미를 각각 설명하시오.

모범답안

IARC 1군은 인체에 대한 발암성 근거가 충분한 인체 발암물질이다. 3군은 자료가 부족하거나 상충되어 인체 발암성을 분류할 수 없는 물질로, 안전하다는 의미는 아니다. 2A군은 발암 추정, 2B군은 발암 가능 물질이며, 예전의 4군(비발암 추정)은 현재 없어졌다. 이 분류는 발암 근거의 강도를 나타낸다.

1군 발암 · 2A 추정 · 2B 가능 · 3군 분류 불가 (4군 폐지)

4-3 다단계 발암과정 (개시 · 촉진 · 진행)



중요도



기출

7 문항

출제 연도

5 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 객 43 · 24 13 · 24 21 · 24 34 · 23 27 · 21 32 · 20 #표판별

개념

개시 → 촉진 → 진행

- **개시(initiation)** = initiator(발암물질)가 DNA에 비가역적 돌연변이 도입
- **촉진(promotion)** = promoter가 개시된 세포의 증식을 자극 (가역적, 역치 있음)
- **진행(progression)** = 악성화·전이능 획득 (비가역적)
- 그림 판별: initiator(X) 노출 후 promoter가 충분히·연속적으로 작용해야 cancer

그림 문제 읽는 법

- initiator 없이 promoter만 → no cancer
- promoter를 먼저 주고 initiator 나중 → no cancer (순서 중요)
- promoter 간격이 너무 멀어지면(단속적) → no cancer
- 개시 후 promoter 연속 작용 → cancer

시험 핵심 비교

다단계 발암

단계	특징
개시	비가역·돌연변이
촉진	가역·세포증식·역치 있음
진행	비가역·악성화·전이

암기

- 개시=비가역 돌연변이 / 촉진=가역·증식 / 진행=악성화
- 순서 틀리거나 promoter 단속적이면 no cancer

연결 포인트

4-1

발암물질 분류 (1차/2차 · 유전독성 역치)

initiator = 유전독성(무역치), promoter = 역치

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 다단계 발암과정에 대한 설명으로 옳은 것은?

- ① 촉진 단계는 비가역적이다
- ② 개시는 promoter에 의한 세포 증식이다
- ③ 개시 후 promoter가 연속적으로 작용해야 암이 발생한다
- ④ promoter만 반복 노출해도 암이 발생한다
- ⑤ 진행 단계는 역치가 있어 가역적이다

정답 3 개시(돌연변이) 후 촉진이 연속적으로 일어나야 발암

서술형 Q2. 다단계 발암과정의 개시·촉진·진행을 설명하시오.**모범답안**

개시는 발암물질(initiator)이 DNA에 비가역적 돌연변이를 일으키는 단계이다. 촉진은 promoter가 개시된 세포의 증식을 자극하는 단계로 가역적이고 역치가 있다. 진행은 세포가 악성 형질과 전이능을 획득하는 비가역적 단계이다. 암이 생기려면 개시 후 촉진이 충분히 연속적으로 작용해야 한다.

개시=비가역 돌연변이 · 촉진=가역·증식 · 진행=악성화

5-1 납·수은의 독성



중요도



기출

13 문항

출제 연도

5 / 6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 13 · 25 객 44 · 24 22 · 24 28 · 23 13 · 23 28 · 22 13 · 22 17 · 21 34 · 21 35 · 초안 OX 1 · 초안 OX 2 · 초안 객 Q1

개념

납(Pb)

- 소아에서 **연뇌증(lead encephalopathy)** 유발 (2025 객 44 □ = O)
- 혈중 납은 대부분 **적혈구에 결합**, 체내 분포는 유입경로와 무관, 성인은 약 **94%가 뼈에** 분포
- **ALAD · ferrochelatase** 저해 → heme 합성 감소 (초안 OX 1)
- 가장 흔한 노출경로는 흡입이 아니라 경구(음식)

수은(Hg)

- 무기수은이 미생물에 의해 **메틸수은(methylmercury)**으로 전환 → 먹이사슬 축적 → T
- 메틸수은 = 중추신경계 독성 → **미나마타병 (Minamata disease)**
- 이타이이타이병은 수은이 아니라 **카드뮴** → 관련 보기는 F

시험 핵심 비교

납·수은 핵심

금속	핵심
납	소아 연뇌증·적혈구 결합·뼈 94%·heme합성 저해
메틸수은	미나마타병·중추신경
이타이이타이	카드뮴(수은 아님)

암기

- 납=연뇌증·heme합성 저해·뼈 94% / 메틸수은=미나마타
- 이타이이타이 = 카드뮴

연결 포인트

5-2

금속의 IARC 발암 분류

금속 IARC 분류

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 납과 수은의 독성에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 납은 소아에서 연뇌증을 일으킨다
- ② 납은 혈중에서 대부분 적혈구에 결합한다
- ③ 성인에서 납은 약 94%가 뼈에 분포한다
- ④ 수은에 의해 이타이이타이병이 나타난다
- ⑤ 메틸수은은 미나마타병과 관련된다

정답 4 이타이이타이병은 카드뮴

서술형 Q2. 수은이 먹이사슬을 통해 축적되는 과정과 그로 인한 질환을 쓰시오.**모범답안**

환경 중 무기수은은 미생물에 의해 메틸수은으로 전환된다. 메틸수은은 지용성이 높아 수생 먹이사슬을 따라 생물농축되며, 상위 포식자인 어류에 고농도로 축적된다. 이를 섭취한 사람에서 중추신경계 독성이 나타나며 대표 질환이 미나마타병이다.

무기수은 → 메틸수은 · 생물농축 · 미나마타병

5-2 금속의 IARC 발암 분류



중요도



기출

7 문항

출제 연도

6 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 객 45 · 24 23 · 23 29 · 22 18 · 21 33 · 20 #유기납무기납 · 초안 객 Q14

개념

금속별 IARC 분류 (영어 선지로 출제)

- 무기납(inorganic lead) = 2A / 유기납(organic lead) = 3
- 카드뮴 = 1군 / 비소 = 1군 / 6가크롬·니켈·베릴륨 = 1군
- 메틸수은 = 2B / 금속수은·무기수은 = 3
- 3가크롬(Cr III) = 필수 미량원소, 발암성 1군 아님 ('크롬 3가 = 1'은 오답)

객관식 선지 패턴

- 옳은 짝: 무기납 2A, 카드뮴 1, 비소 1 (2025 객 45)
- 틀린 짝: 유기수은 1군(→ 2B), 크롬 3가 1군(→ 6가가 1군)

시험 핵심 비교

금속 IARC 분류

금속	IARC
카드뮴·비소·6가크롬·니켈·베릴륨	1
무기납	2A
메틸수은	2B
유기납·무기수은·금속수은	3

암기

- 카드뮴·비소·6가크롬·니켈·베릴륨 = 1군
- 무기납 2A · 메틸수은 2B · 유기납 3

연결 포인트

4-2

IARC 발암성 분류 (1·2A·2B·3군, 4군은 폐지)

IARC 군의 일반 의미

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 금속과 IARC 발암 분류의 연결로 옳지 않은 것은?

- ① 무기납 - 2A
- ② 카드뮴 - 1군
- ③ 비소 - 1군
- ④ 유기수은(메틸수은) - 1군
- ⑤ 6가크롬 - 1군

정답 4 메틸수은은 2B군

서술형 Q2. 6가크롬과 3가크롬의 발암성·생물학적 의미 차이를 쓰시오.

모범답안

6가크롬(Cr VI)은 세포 내로 잘 들어가 환원되는 과정에서 반응성 중간체를 만들어 유전독성과 발암성을 나타내며 IARC 1군이다. 반면 3가크롬(Cr III)은 세포막 투과성이 낮고 인체에 필요한 필수 미량원소로, 6가크롬과 같은 발암성을 갖지 않는다.

6가크롬=1군·세포 내 환원 · 3가크롬=필수 미량원소

5-3 카드뮴 · 비소 독성과 metallothionein



중요도



기출

14 문항

출제 연도

6 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 객 47 · 25 주 63 · 24 25 · 24 43 · 23 31 · 23 43 · 22 20 · 22 38 · 21 19 · 20 29 · 20 #MT주관식 · 초안 OX 3 · 초안 객 Q2 · 초안 단 Q1

개념

카드뮴(Cd)과 metallothionein (MT)

- MT = cysteine 풍부, -SH기로 중금속(Cd 등)을 결합해 **해독·항상성 유지**하는 저분자 단백질
- 간에서 **Cd-MT** 형성 → 신장 이동 → 사구체 여과 → 근위세뇨관 재흡수 → lysosome에서 MT 분해 → **Cd 유리** → **근위세뇨관 손상**
- 경구보다 **흡입(호흡)** 노출 시 카드뮴 흡수율이 더 높음 (2025 객 47 L = O)
- 카드뮴 만성독성 = 근위세뇨관 손상·골연화 → **이타이이타이병**

비소(As)

- 3가 비소(As III)는 단백질 **-SH기**에 결합해 효소 활성 억제
- 무기비소의 **메틸화가 항상 무독화는 아님** → MMA³⁺·DMA³⁺ 대사체는 오히려 독성 (초안 OX 3, 25 객 47 ㄱ = X)
- 비소는 혈액의 ferritin이 아니라 hemoglobin과 결합 (ferritin 결합 보기는 F)

시험 핵심 비교

Cd-MT 신장독성 경로

단계	내용
간	Cd-MT 형성
이동	신장으로
여과·재흡수	사구체 → 근위세뇨관
분해	lysosome에서 MT 분해 → Cd 유리
손상	근위세뇨관

암기

- MT = cysteine · -SH로 Cd 결합 / Cd-MT → 근위세뇨관 손상
- 비소 메틸화 ≠ 항상 무독화 (MMA³⁺·DMA³⁺ 독성)

연결 포인트

2-2

부위별 신장독성 (사구체 · 근위세뇨관 · 원위세뇨관)

근위세뇨관 = Cd·Hg·cisplatin 공통 부위

이동 →

5-1

납 · 수은의 독성

이타이이타이 = 카드뮴

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. 카드뮴·비스 독성에 대한 설명으로 옳은 것은?

- ① 비소 3가 대사체 MMA³⁺·DMA³⁺는 배설을 위한 무독화 형태이다
- ② 경구 투여보다 호흡 노출 시 카드뮴 흡수율이 높다
- ③ 비소는 혈액의 ferritin에 결합한다
- ④ 카드뮴 독성으로 손톱에 흰색 가로선이 관찰된다
- ⑤ 무기비스의 메틸화는 항상 무독화 과정이다

정답 ② 흡입 노출 시 카드뮴 흡수율이 더 높음

서술형

Q2. 카드뮴 만성노출에서 metallothionein(MT)이 신장독성에 관여하는 과정을 설명하시오.

모범답안

카드뮴은 간에서 cysteine이 풍부한 metallothionein과 결합해 Cd-MT를 형성한다. Cd-MT는 혈류를 따라 신장으로 이동하여 사구체에서 여과된 뒤 근위세뇨관에서 재흡수된다. 세뇨관 세포의 lysosome에서 MT가 분해되면서 유리된 카드뮴이 축적되어 근위세뇨관 세포를 손상시킨다.

간 Cd-MT · 신장 이동 · 근위세뇨관 재흡수 · lysosome 분해·Cd 유리

6-1

살충제 (유기인계 · carbamate · 유기염소계 · pyrethroid)



중요도



기출

22 문항

출제 연도

6 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 TF 19 · 25 TF 27 · 24 26 · 24 29 · 24 37 · 23 19 · 23 32 · 23 35 · 23 38 · 22 22 · 22 29 · 22 32 · 21 38 · 21 45 · 21 50 · 20 31 · 20 32 · 20 38 · 초안 OX 4 · 초안 OX 6 · 초안 객 Q3 · 초안 단 Q2

개념

AChE 저해 살충제

- 유기인계(organophosphate) = AChE의 Ser을 인산화 → 비가역적 저해 → 부교감 과활성
- aging(노화) = dealkylation으로 인산화 AChE가 안정화 → 재활성화 불가
- carbamate(메소밀 등) = AChE 가역적 저해 → '비가역적'은 F (2025 TF 27)
- 해독: 유기인계 = **atropine + 2-PAM** / carbamate(메소밀) = **atropine만** (2025 TF 19: 2-PAM 삭제 → F; 2022·2023 족보의 T 표시는 최신 2025 기준으로 대체)

유기염소계 · pyrethroid

- 유기염소계(DDT 등) = 급성독성 낮고 **만성독성·잔류성 높음**, 대사체 **DDE**도 지용성·잔류
- drin 계열 = epoxide 형성 → **독성 증가**(무독화 아님)
- **pyrethroid** = 제충국(국화과) 유래, Na⁺ channel의 닫힘을 지연 → 신경 흥분 지속
- 곤충 선택성: 마우스/곤충 LD50 비가 큰 **diazinon**이 곤충 선택성 높음(2024 37 그림 문항)

시험 핵심 비교

살충제 기전

종류	기전
유기인계	AChE 비가역 저해(+aging)
carbamate	AChE 가역 저해
유기염소계(DDT)	Na채널·만성·잔류
pyrethroid	Na채널 닫힘 지연

암기

- 유기인계=비가역+aging·해독 atropine+2-PAM / carbamate=가역·해독 atropine만
- DDT=만성·잔류·DDE / pyrethroid=제충국

연결 포인트

6-2

제초제와 다이옥신 (2,4,5-T · TCDD · 잔류기준)

제초제 2,4,5-T와 다이옥신

이동 →

3-1

호흡기 독성 (입자 크기 · paraquat · 폐기종)

paraquat(제초제) 폐독성

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. 살충제에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 유기인계는 AChE를 비가역적으로 저해한다
- ② carbamate계는 AChE를 가역적으로 저해한다
- ③ aging은 인산화 AChE가 안정화되어 재활성화가 어려워지는 현상이다
- ④ 유기염소계는 급성독성이 높고 잔류성이 낮다
- ⑤ pyrethroid는 제충국에서 유래한다

정답 4 유기염소계는 급성독성 낮고 만성·잔류성 높음

서술형

Q2. 유기인계 살충제가 AChE를 억제하는 과정과 aging의 의미를 설명하시오.

모범답안

유기인계 살충제는 AChE 활성부위의 serine 잔기를 인산화하여 acetylcholine 분해를 억제한다. 인산화된 AChE는 처음에는 느리게 재활성화될 수 있으나, dealkylation이 일어나 aging 상태가 되면 효소가 안정화되어 재활성화가 어려워진다. 이 때문에 2-PAM 해독은 aging 이전에 투여해야 효과적이다.

Ser 인산화 · 비가역 · aging(dealkylation) · 2-PAM

6-2 제초제와 다이옥신 (2,4,5-T · TCDD · 잔류기준)



중요도



기출

10 문항

출제 연도

5 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 TF 16 · 25 TF 20 · 23 16 · 23 #TCDD · 22 21 · 22 23 · 21 37 · 20 30 · 초안 객 Q4 · 초안 객 Q5

개념

고엽제와 다이옥신

- 고엽제 성분 **2,4,5-T** 제조 과정의 불순물 = **2,3,7,8-TCDD(다이옥신)** → 사람에게 악영향
- 죽보 문장 '2,4-D의 불순물 TCDD로 고엽제 악영향' = **F** (2025 TF 20·2023 TF·2022 23 ㉓: 2,4-D → **2,4,5-T** 정정)
- 2,4,5-T 자체의 주 작용이 AChE 저해라는 서술은 **F** (초안 객 Q4)

잔류농약 기준

- 농약 독성이 확인돼도 **자동으로 잔류기준에서 퇴출되지 않음** → 2025 TF 16 = **F**
- 잔류허용기준(MRL)은 한 번 고시 후에도 재설정·보완됨 → '보완 안 된다'는 **F**
- 사용금지 후에도 모니터링 필요 (대사활성체 포함)

시험 핵심 비교

제초제·다이옥신 TF

문장	판정
TCDD는 2,4,5-T의 불순물로 고엽제 악영향	T
2,4-D의 불순물 TCDD로 고엽제 악영향 (죽보 문장)	F (2,4,5-T가 맞음)
농약 독성 확인되면 자동으로 잔류기준 퇴출	F
2,4,5-T의 주 기전은 AChE 저해	F

암기

- TCDD = 2,4,5-T 불순물(고엽제) / 잔류기준은 자동 퇴출 아님**

연결 포인트

6-1

살충제 (유기인계 · carbamate · 유기염소계 · pyrethroid)

살충제 vs 제초제

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 제초제와 잔류농약에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 2,3,7,8-TCDD는 2,4,5-T의 불순물로 고엽제 피해와 관련된다
- ② 농약의 독성이 확인되면 자동으로 잔류기준에서 퇴출된다
- ③ 잔류허용기준은 고시 후에도 보완될 수 있다
- ④ 사용금지된 농약도 모니터링이 필요하다
- ⑤ paraquat는 대표적 제초제이다

정답 2 독성 확인만으로 자동 퇴출되지 않고 별도 절차 필요

서술형 Q2. 고엽제가 인체에 악영향을 준 이유를 다이옥신과 관련하여 설명하시오.**모범답안**

고엽제의 주성분인 2,4,5-T를 제조하는 과정에서 불순물로 2,3,7,8-TCDD(다이옥신)가 생성된다. TCDD는 극미량으로도 aryl hydrocarbon receptor(AhR)에 결합하여 다양한 독성과 발암성을 나타낸다. 따라서 고엽제의 인체 피해는 2,4,5-T 자체보다 불순물인 TCDD에 기인한다.

2,4,5-T 불순물 · TCDD · AhR

7-1 PCB와 DL-PCB (AhR · 잔류성)



중요도



기출

14 문항

출제 연도

6 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 TF 29 · 25 주 59 · 24 16 · 23 25 · 23 #주관식DLPCB · 22 15 · 22 24 · 22 39 · 21 40 · 20 33 · 20 #DL-PCB · 초안 OX 7 · 초안 객 Q6 · 초안 단 Q3

개념

PCB의 성질

- 전기절연성 우수, 산·알칼리·열에 안정 → 과거 절연유로 사용
- 염소 수 증가 → 지용성·축적성 증가 ('낮아진다'는 F)
- 지방조직·피부에 분포, 환경 중 분해 어려운 **잔류성 유기오염물질(POPs)** = 스톡홀름 협약 규제(금지) 물질
- 건강영향: 생식·발생독성, 유증(油症) 사건; 급성독성에 국한된다는 서술은 F
- PCB 혼합물 **Aroclor**는 CYP를 유도 → T (2025 TF 29); "CYP를 억제한다" = F (2023 25·2022 15)

DL-PCB (dioxin-like PCB)

- ortho** 위치 염소가 없거나 1개뿐인 동족체 → 두 phenyl ring이 **동일 평면(coplanar)** 구조 (2025 주 59 답)
- 다이옥신과 구조 유사 → **AhR에 결합** → dioxin-like toxicity
- 그래서 DL-PCB라 부름

시험 핵심 비교

PCB 핵심

항목	내용
안정성	절연성·내열·내산
염소 수 ↑	지용성·축적성 ↑
DL-PCB	coplanar·AhR 결합
규제	스톡홀름 협약(POPs)

암기

- PCB: 염소 ↑ = 축적 ↑ · POPs(스톡홀름) / DL-PCB = coplanar·AhR

연결 포인트

6-2

제초제와 다이옥신 (2,4,5-T · TCDD · 잔류기준)

다이옥신(TCDD)도 AhR 결합

이동 →

7-2

PAH와 benzo[a]pyrene 대사활성화

PAH와 함께 유기오염물질

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. PCB에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 전기절연성이 우수하고 열에 안정하다
- ② 염소 수가 증가할수록 지용성과 축적성이 증가한다
- ③ 환경 중 분해가 어려운 잔류성 유기오염물질이다
- ④ 건강영향은 주로 급성독성에 국한된다
- ⑤ 일부 coplanar PCB는 AhR에 결합한다

정답 ④ PCB는 생식·발생독성 등 만성·장기 영향이 대표적

서술형

Q2. Dioxin-like PCB(DL-PCB)가 무엇이며 일부 PCB가 dioxin-like 독성을 보이는 이유를 설명하시오.

모범답안

PCB는 염소의 수와 치환 위치에 따라 다양한 congener가 존재한다. 이 중 ortho 위치 염소 치환이 적어 두 phenyl ring이 거의 동일 평면에 놓이는 coplanar PCB는 다이옥신과 구조적으로 유사하다. 이러한 PCB를 DL-PCB라 하며, 다이옥신처럼 aryl hydrocarbon receptor(AhR)에 결합하여 dioxin-like toxicity를 나타낸다.

coplanar · ortho 치환 적음 · AhR 결합

7-2

PAH와 benzo[a]pyrene 대사활성화



중요도



기출

13 문항

출제 연도

6 / 6년

연도별

[20](#) [21](#) [22](#) [23](#) [24](#) [25](#)

25 주 57 · 24 30 · 24 35 · 23 40 · 22 27 · 22 28 · 21 48 · 21 49 · 21 52 · 20 42 · 20 #styrene · 초안 OX 8 · 초안 단 Q9

개념

PAH와 벤조피렌

- PAH(다환방향족탄화수소) = 2개 이상 방향족 고리, 불완전 연소 산물(흡연·그을린 식품)
- 대표 물질 benzo[a]pyrene = 2차(간접) 발암물질
- chloracne(염소좌창) = 다이옥신·고농도 염소화합물 노출 시 피부 증상
- styrene-7,8-oxide = 변이원성 있는 styrene 대사체, 마우스·랫드 발암성 → IARC 2A (2020 주관식)

대사활성화 경로

- benzo[a]pyrene → CYP로 epoxide-dihydrodiol → 반응성 큰 diol-epoxide(BPDE)
- BPDE가 DNA와 공유결합(adduct) → 돌연변이·발암
- 유사 경로: CYP→hydroxylation→비효소적 반응→carbonium ion (나이트로사민 등)

시험 핵심 비교

benzo[a]pyrene 활성화

단계	생성물
CYP 산화	epoxide
가수분해	dihydrodiol
재산화	diol-epoxide(BPDE)
DNA 결합	adduct→발암

암기

- PAH = 불완전연소 / benzo[a]pyrene → CYP → diol-epoxide(BPDE) → DNA adduct

연결 포인트

4-1

발암물질 분류 (1차/2차 · 유전독성 역치)

2차 발암물질의 대표 예

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. benzo[a]pyrene의 발암 과정에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① PAH에 속하며 불완전 연소로 생성된다
- ② CYP에 의해 대사활성화된다
- ③ 최종 반응성 대사체는 diol-epoxide(BPDE)이다
- ④ BPDE가 DNA와 결합하여 돌연변이를 일으킨다
- ⑤ 활성화 없이 그 자체로 DNA에 직접 작용하는 1차 발암물질이다

정답 5 benzo[a]pyrene은 대사활성화가 필요한 2차 발암물질

서술형 Q2. benzo[a]pyrene이 발암성을 나타내는 대사활성화 과정을 설명하고 최종 반응성 대사체를 쓰시오.

모범답안

benzo[a]pyrene은 CYP에 의해 산화되어 epoxide와 dihydrodiol 중간체를 거쳐 반응성이 매우 큰 diol-epoxide(BPDE)를 형성한다. BPDE는 DNA와 공유결합하여 DNA adduct를 만들고 돌연변이를 일으켜 발암을 유발한다. 따라서 benzo[a]pyrene은 대사활성화가 필요한 2차 발암물질이다.

CYP · epoxide-dihydrodiol · diol-epoxide(BPDE) · DNA adduct

7-3 유기용제 독성 (benzene · methanol · toluene)



중요도

★★★★

기출

15 문항

출제 연도

6 / 6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 17 · 25 객 49 · 24 17 · 24 27 · 24 36 · 23 17 · 23 18 · 22 25 · 22 33 · 21 41 · 21 46 · 20 34 · 20 39 · 초안 OX 9 · 초안 객 Q7

개념

benzene (벤젠)

- 휘발성 강함 → **흡입**이 주 노출경로
- 급성: 중추신경 억제(졸음·두통)
- 만성: **골수·조혈계 독성** → 백혈구 감소·재생불량성 빈혈·**백혈병** (주 표적은 간 아님)
- IARC **1군** 발암물질 (2B 아님); '라디컬 생성 간독성 물질'이라는 서술은 F

methanol · toluene · ethylene glycol

- **methanol** → formaldehyde·**formic acid**로 대사 → **시각장애(실명)**, 대사체가 망막 손상
- 메탄올 중독 치료 = **ethanol** 투여(ADH 경쟁)
- **toluene** = 고농도 급성 시 중추신경 억제
- **ethylene glycol** → oxalic acid → 신장손상
- **tetrachloroethylene(PCE)** = 드라이클리닝 용제, 간·신독성·폐암·신장암 → IARC **2A** (2024 36, 2025 객 49)
- **disulfiram** = ALDH 저해제 → acetaldehyde 축적 (2021 46·2020 39·2022 33)

시험 핵심 비교

유기용제 독성

용제	주 독성
benzene	골수·백혈병(만성)
methanol	시각장애(formic acid)
toluene	중추신경 억제
ethylene glycol	신장손상(oxalate)

암기

- benzene = 골수·백혈병(1군) / methanol = 실명(formic acid)·ethanol로 치료

연결 포인트

1-2

화학물질에 의한 간손상과 간기능 지표

benzene은 간독성 아니라 골수독성

[이동 →](#)

7-4

플라스틱 관련 물질 (vinyl chloride · acrylamide · phthalate)

플라스틱 단량체와 함께 유기화합물

[이동 →](#)

예상 문제

객관식

Q1. 유기용제 독성에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① benzene은 만성노출에서 골수·조혈계 독성이 중요하다
- ② benzene의 주된 만성독성은 간독성이다
- ③ methanol은 formic acid로 대사되어 시각장애를 유발한다
- ④ toluene은 급성 고농도에서 중추신경을 억제한다
- ⑤ ethylene glycol은 신장손상을 유발한다

정답 ② benzene 만성독성은 골수독성(백혈병)이 핵심

서술형

Q2. methanol 중독의 기전과 치료 원리를 설명하시오.

모범답안

methanol은 alcohol dehydrogenase에 의해 formaldehyde를 거쳐 formic acid로 대사되며, 이 formic acid가 망막과 시신경을 손상시켜 시각장애·실명을 일으킨다. 치료는 ethanol을 투여하여 ADH 효소를 경쟁적으로 차지하게 함으로써 methanol이 독성 대사체로 전환되는 것을 늦추는 원리를 이용한다.

formic acid · 시각장애 · ethanol 경쟁(ADH)

7-4

플라스틱 관련 물질 (vinyl chloride · acrylamide · phthalate)



중요도



기출

6 문항

출제 연도

5 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 객 50 · 23 34 · 22 26 · 21 42 · 20 35 · 초안 객 Q8

개념

플라스틱 단량체·첨가제

- polymer 자체는 안정하지만 **monomer**에 의한 영향으로 유해할 수 있음
- vinyl chloride** = PVC 원료, 직업성 노출 시 **간 혈관육종(hepatic angiosarcoma)**, IARC 1군
- acrylamide** = 피부·점막·호흡기로 흡수, **신경독성**
- phthalate** = PVC 가소제, 내분비계장애물질(항안드로겐성) → '항콜린성 신경독성물질'은 **F**

시험 핵심 비교

플라스틱 물질

물질	핵심
vinyl chloride	PVC 원료·간 혈관육종·1군
acrylamide	신경독성
phthalate	가소제·내분비계장애(항안드로겐)

암기

- vinyl chloride=간 혈관육종 / acrylamide=신경독성 / phthalate=가소제·내분비장애(항콜린성 아님)**

연결 포인트

7-5

내분비계장애물질 기전 (유사·봉쇄·촉발)

phthalate = 내분비계장애물질 기전

이동 →

7-3

유기용제 독성 (benzene · methanol · toluene)

vinyl chloride도 유기화합물 발암

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 플라스틱 관련 물질에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① polymer는 안정하나 monomer에 의해 유해할 수 있다
- ② vinyl chloride는 PVC 원료이며 간 혈관육종과 관련된다
- ③ acrylamide는 신경독성을 나타낸다
- ④ phthalate는 PVC 가소제로 사용된다
- ⑤ phthalate는 대표적인 항콜린성 신경독성물질이다

정답 ⑤ phthalate는 내분비계장애물질(항안드로겐성)이지 항콜린성 신경독성물질이 아님

서술형 Q2. vinyl chloride의 용도와 대표 독성을 쓰시오.

모범답안

vinyl chloride는 PVC(폴리염화비닐)의 원료 단량체로 사용된다. 장기간 직업성으로 노출되면 간에 혈관육종(hepatic angiosarcoma)을 일으키는 것으로 알려져 IARC 1군 발암물질로 분류된다.

PVC 원료 · 간 혈관육종 · 1군

7-5 내분비계장애물질 기전 (유사·봉쇄·촉발)



중요도



기출

7 문항

출제 연도

3 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 객 46 · 24 24 · 23 30 · 초안 OX 10 · 초안 OX 11 · 초안 객 Q9 · 초안 단 Q4

개념

전통적 작용기전 3가지

- 유사작용(mimic) = 호르몬 수용체에 결합해 정상 호르몬처럼 작용
- 봉쇄작용(blocking) = 수용체에 결합해 정상 호르몬의 결합·작용 방해
- 촉발작용(triggering) = 정상과 다른 시기·정도로 호르몬 신호를 활성화

족보의 '촉발 기전' 정답 (주의)

- 2025 객 46: 촉발 기전 정답 = '호르몬 수용체 결합' (1번)
- (2023 30: 촉발 기전을 '운반체와 결합 방해'로 표기 — 두 해 답이 상충)
- 초안 단 Q4 모범답안: 촉발 = 정상과 다른 시기·정도로 호르몬 신호 활성화
- 수송물질(운반체)에 영향을 주는 것도 기전의 하나 (2024 24 답)

시험 핵심 비교

내분비계장애 기전

기전	의미
유사	수용체 결합→호르몬 흉내
봉쇄	수용체 결합→작용 방해
촉발	비정상 신호 활성화

암기

- 유사·봉쇄·촉발 / 2025 촉발=호르몬 수용체 결합(2023은 운반체 결합 방해)

연결 포인트

7-4

플라스틱 관련 물질 (vinyl chloride · acrylamide · phthalate)

phthalate = 내분비계장애물질

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 내분비계장애물질의 작용기전에 대한 설명으로 적절하지 않은 것은?

- ① 호르몬 수용체에 agonist/antagonist로 작용할 수 있다
- ② 호르몬의 합성·수송·대사 과정에 영향을 줄 수 있다
- ③ epigenetic 변화는 DNA 염기서열 자체를 바꾸는 돌연변이를 의미한다
- ④ 수용체 발현·신호전달에 영향을 줄 수 있다
- ⑤ 정상과 다른 시기에 호르몬 신호를 촉발할 수 있다

정답 3 epigenetic 변화는 염기서열 변화를 동반하지 않음

서술형 Q2. 내분비계장애물질이 내분비 기능을 교란하는 전통적 기전 세 가지를 쓰고 설명하십시오.

모범답안

첫째, 유사작용은 물질이 호르몬 수용체에 결합하여 정상 호르몬과 유사한 작용을 나타내는 것이다. 둘째, 봉쇄작용은 수용체에 결합하여 정상 호르몬의 결합·작용을 방해하는 것이다. 셋째, 촉발작용은 정상적인 생리 조건과 다른 시기나 정도로 호르몬 관련 신호를 활성화하여 비정상 반응을 유발하는 것이다.

유사(mimic) · 봉쇄(blocking) · 촉발(triggering)

8-1

멜라민·탈크·가습기살균제 (국내 건강피해)

★★★

중요도

★★★★

기출

18 문항

출제 연도

6 /6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 TF 12 · 25 객 54 · 24 18 · 24 19 · 24 33 · 23 12 · 23 37 · 23 39 · 22 12 · 22 31 · 22 34 · 21 11 · 21 22 · 20 40 · 초안 OX 12 · 초안 OX 13
· 초안 객 Q10 · 초안 서 Q3

개념

멜라민과 탈크

- 멜라민 + 시아누르산(cyanuric acid) 함께 노출 → 난용성 **melamine cyanurate 결정** → 세뇨관 폐색 → 신장독성 증가(단독보다 큼) → T
- 탈크(talc): 석면(asbestos) 포함 여부가 관건 — 석면 함유 탈크 = IARC 1군, 미함유 = 3군
- 탈크는 피부침투보다 **분말 흡입** 노출이 중요 (초안 객 Q10: '피부노출 전신독성이 주 위해'는 F)

가습기살균제

- 국내 원인 물질 = **PHMG**(폴리헥사메틸렌구아니딘), PGH, CMIT/MIT 등
- 주 노출경로 = **흡입(inhalation)**, 주 표적장기 = **폐(호흡기)**
- 경구·피부 독성이 낮아도 흡입 위해성이 낮다고 볼 수 없음 (초안 OX 13 = X)
- → 위해성평가에서 **노출경로**를 반드시 고려해야 하는 사례

시험 핵심 비교

국내 유해물질

물질	핵심
멜라민+시아누르산	세뇨관 결정→신장독성↑
탈크	석면 함유 시 1군
가습기살균제	PHMG·흡입·폐

암기

- 멜라민+시아누르산=결정·신장독성↑ / 탈크=석면 함유 여부 / 가습기=PHMG·흡입·폐

연결 포인트

2-1

신장의 구조와 신기능 지표 (GFR · BUN)

세뇨관 결정·요로폐색 = 신장독성

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 국내 건강피해 유해물질에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 멜라민과 시아누르산은 함께 노출되면 난용성 결정을 형성해 신장독성이 증가한다
- ② 석면을 포함한 탈크는 IARC 1군으로 분류된다
- ③ 탈크는 피부침투에 의한 전신독성이 주 위해요인이며 흡입 노출은 중요하지 않다
- ④ 가습기살균제의 주된 노출경로는 흡입이다
- ⑤ 가습기살균제 원인물질에는 PHMG가 있다

정답 3 탈크는 분말 흡입 노출이 중요

서술형 Q2. 가습기살균제 사례가 위해성평가에서 노출경로를 고려해야 하는 이유를 설명하시오.**모범답안**

가습기살균제는 제품 사용 시 성분이 에어로졸 형태로 공기 중에 방출되어 흡입을 통해 폐에 직접 노출된다. 화학물질의 독성은 노출경로에 따라 흡수·분포·표적조직이 달라지므로, 경구나 피부 독성이 낮게 나타났더라도 흡입 위해성이 낮다고 판단할 수 없다. 따라서 실제 사용조건에 맞는 흡입독성 자료로 위해성을 평가해야 한다.

흡입·폐 · 노출경로별 독성 차이 · 흡입독성 자료 필요

9-1

독성시험 총론 (LD50 · 설치류 · 배태자 시험 · GLP)



중요도



기출

10 문항

출제 연도

5 / 6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 3 · 25 TF 30 · 25 주 60 · 24 38 · 24 40 · 24 41 · 23 3 · 22 3 · 21 3 · 초안 OX 14

개념

급성독성과 시험 기준

- **LD50** = 반수치사량 → 작을수록 **급성독성 강함** (초안 OX 14: 'LD50 작을수록 급성독성 빠르게' = X, '강하게'가 맞음)
- 간독성시험 등은 독성시험 기준상 **설치류(랫드·마우스)** 사용
- **GLP (Good Laboratory Practice)** = 비임상 안전성시험의 신뢰성 확보를 위한 관리기준
- 설치류 발암성시험은 생후 **6주령** 성장기 동물 사용 ("생후 6개월"은 F, 2025 TF 30)

생식·발생 독성시험

- **배·태자 발생시험(최기형성)**: 설치류(랫드)·비설치류(토끼) 사용
- 투여기간 = 착상 후 기관형성기 = 통상 **GD6~GD15**(랫드) (2024 38 답 2번)
- 장기투여 발암성시험 투여기간 = 통상 **24~30개월** (2024 40)

시험 핵심 비교

독성시험 기본

항목	내용
LD50	작을수록 급성독성 강함
간독성시험	설치류
배태자시험 투여	GD6~GD15
발암성시험	24~30개월

암기

- **LD50 작을수록 급성독성 강함 / GLP=시험 신뢰성 기준**
- **배태자시험 GD6~15 · 발암성시험 24~30개월**

연결 포인트

9-2

유전독성시험 (Ames test · clastogen)

유전독성시험(Ames 등)

이동 →

9-3

3R과 동물대체시험법

3R·동물대체시험

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. 독성시험에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① LD50가 작을수록 급성독성이 강하다
- ② 간독성시험에는 보편적으로 설치류를 사용한다
- ③ GLP는 비임상 안전성시험의 신뢰성을 확보하기 위한 기준이다
- ④ 배·태자 발생시험의 투여기간은 통상 GD6~GD15이다
- ⑤ 장기 발암성시험의 투여기간은 보통 1주일이다

정답 ⑤ 발암성시험은 보통 24~30개월 장기 투여

서술형

Q2. LD50의 의미와 GLP의 목적을 각각 간단히 쓰시오.

모범답안

LD50은 실험동물의 50%를 사망시키는 용량(반수치사량)으로, 값이 작을수록 급성독성이 강함을 의미하는 급성독성 비교 지표이다. GLP(Good Laboratory Practice)는 비임상 안전성시험의 계획·수행·기록·보고 전 과정을 표준화하여 시험 자료의 신뢰성과 재현성을 확보하기 위한 관리기준이다.

LD50=반수치사량·작을수록 강함 · GLP=시험 신뢰성 관리기준

9-2 유전독성시험 (Ames test · clastogen)



중요도

★★★

기출

10 문항

출제 연도

4 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

25 객 51 · 24 20 · 24 37 · 24 42 · 23 36 · 22 30 · 초안 OX 15 · 초안 OX 16 · 초안 객 Q11 · 초안 객 Q12

개념

유전독성시험의 원칙

- 유전독성은 단일 시험으로 확인 어려움 → 서로 다른 원리의 여러 시험법 조합 (T)
- Ames test = 살모넬라/대장균의 복귀돌연변이(back mutation) 이용 유전자 돌연변이 시험
- 살모넬라 시험에서 지표 = 히스티딘(histidine) 요구성이 없어지는 복귀변이
- 대사활성 반영 위해 S9 분획 첨가 (대사활성화 배제가 아님)

관련 용어

- clastogen = 염색체 절단(구조 이상)을 일으키는 물질
- 니트로소화제(nitrosating agent): 니트로소늄 이온·삼산화이질소·아질산염 (디메틸아민은 아님, 2024 20)

시험 핵심 비교

유전독성시험

항목	내용
원칙	여러 시험법 조합
Ames test	복귀돌연변이·histidine
S9	대사활성 반영
clastogen	염색체 절단

암기

- 유전독성=여러 시험 조합 / Ames=복귀돌연변이·histidine·S9 / clastogen=염색체 절단

연결 포인트

4-1

발암물질 분류 (1차/2차 · 유전독성 역치)

유전독성 발암물질 = 무역치

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. Ames test에 대한 설명으로 옳은 것은?

- ① 포유류 세포에서 염색체 이상을 평가하는 시험이다
- ② S9은 시험물질의 대사활성화를 배제하기 위해 사용한다
- ③ 살모넬라균의 histidine 요구성 복귀돌연변이를 이용한다
- ④ 단일 시험만으로 유전독성을 충분히 확인할 수 있다
- ⑤ clastogen은 유전자 점돌연변이만 일으킨다

정답 3 Ames test는 histidine 요구성 균주의 복귀돌연변이 집락을 평가

서술형 Q2. Ames test의 원리를 설명하시오.**모범답안**

Ames test는 히스티딘 합성능을 잃어 히스티딘이 있어야만 자라는 살모넬라 변이 균주를 이용한다. 시험물질이 돌연변이 원이면 복귀돌연변이가 일어나 히스티딘 없이도 자라는 균이 생기므로, 영양원이 결핍된 배지에서 형성되는 집락 수로 유전자 돌연변이 유발 가능성을 평가한다. 대사활성화가 필요한 물질을 반영하기 위해 S9 분획을 함께 사용한다.

복귀돌연변이 · histidine 요구성 · 집락 수 · S9

9-3 3R과 동물대체시험법



중요도



기출

12 문항

출제 연도

5 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 주 61 · 24 46 · 23 2 · 23 46 · 23 #서울motivation · 22 2 · 22 41 · 22 45 · 21 2 · 21 56 · 초안 객 Q15 · 초안 서 Q4

개념

3R 원칙

- **Replacement(대체)** = 가능한 경우 동물 대신 in vitro·세포 기반 등 비동물시험으로 대체
- **Reduction(감소)** = 과학적으로 타당한 결과를 얻는 범위에서 사용 동물 수 최소화
- **Refinement(개선)** = 실험동물의 통증·고통·스트레스를 최소화하도록 방법 개선
- (초안 객 Q15 함정: Refinement를 '수 감소'로 설명하면 오답 — 수 감소는 Reduction)

동물대체시험 필요 이유

- 동물복지·윤리적 측면에서 동물 사용·고통 감소
- 종간 차이 보완, **인체 예측성** 향상, 시간·비용 절감, 많은 물질 신속 평가
- 동물시험은 **축소** 추세 ("동물시험이 확대되는 추세" = F, 2023·2022·2021 TF 2)

시험 핵심 비교

3R

원칙	의미
Replacement	대체(비동물시험)
Reduction	사용 수 최소화
Refinement	고통 최소화·방법 개선

암기

- Replacement=대체 / Reduction=수 감소 / Refinement=고통 개선

연결 포인트

9-1

독성시험 총론 (LD50 · 설치류 · 배태자 시험 · GLP)

동물 독성시험의 한계 보완

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 동물실험의 3R 원칙과 의미의 연결로 옳지 않은 것은?

- ① Replacement - 동물 대신 비동물시험으로 대체
- ② Reduction - 사용하는 실험동물 수를 최소화
- ③ Refinement - 실험동물의 통증·고통을 최소화
- ④ Refinement - 필요한 최소한의 수만 남기고 동물 수를 감소
- ⑤ Replacement - in vitro 시험 등으로 동물시험을 대체

정답 4 동물 수 감소는 Reduction에 해당

서술형 Q2. 동물실험의 3R 원칙을 쓰고, 동물대체시험법이 필요한 이유 두 가지를 쓰시오.**모범답안**

3R은 Replacement(대체), Reduction(감소), Refinement(개선)이다. Replacement는 가능한 경우 살아 있는 동물 대신 비동물시험으로 대체하는 것, Reduction은 타당한 결과를 얻는 범위에서 사용 동물 수를 최소화하는 것, Refinement는 동물의 통증·스트레스를 최소화하도록 방법을 개선하는 것이다. 동물대체시험법이 필요한 이유는 첫째 동물복지·윤리적 측면에서 동물 사용과 고통을 줄이기 위함이고, 둘째 종간 차이를 보완해 인체 예측성이 높은 시험으로 독성평가의 효율과 정확성을 높이기 위함이다.

Replacement·Reduction·Refinement · 동물복지 · 인체 예측성

9-4

AOP (유해결과경로)



중요도



기출

3 문항

출제 연도

1 / 6년

연도별

20 21 22 23 24 25

24 #Aop · 초안 OX 17 · 초안 단 Q8

개념

AOP (Adverse Outcome Pathway)

- 하나의 시험법이 아니라 분자 수준 사건부터 개체 유해결과까지 이어지는 생물학적 과정을 정리한 체계
- MIE (Molecular Initiating Event) → KE (Key Event) → AO (Adverse Outcome) 순서
- 대체시험 자료를 연결·통합해 독성 예측에 활용

시험 핵심 비교

AOP 구성

단계	의미
MIE	분자 개시 사건
KE	핵심 사건(들)
AO	유해결과

암기

- AOP: MIE → KE → AO

연결 포인트

9-3

3R과 동물대체시험법

동물대체시험 통합 활용

이동 →

7-2

PAH와 benzo[a]pyrene 대사활성화

MIE 예: BPDE-DNA 결합

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. AOP에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① MIE는 분자 수준의 개시 사건이다
- ② KE는 중간 핵심 사건이다
- ③ AO는 개체 수준의 유해결과이다
- ④ 순서는 MIE→KE→AO이다
- ⑤ AOP는 하나의 특정 독성시험법을 가리킨다

정답 5 AOP는 단일 시험법이 아니라 생물학적 과정을 정리한 체계

서술형 Q2. AOP에서 MIE, KE, AO가 각각 무엇이며 올바른 순서를 쓰시오.

모범답안

MIE(Molecular Initiating Event)는 화학물질이 생체분자와 상호작용하는 최초의 분자 수준 개시 사건이다. KE(Key Event)는 그 뒤에 이어지는 세포·조직 수준의 핵심 중간 사건이다. AO(Adverse Outcome)는 개체 수준에서 나타나는 최종 유해결과이다. 순서는 MIE → KE → AO이다.

MIE → KE → AO

10-1

위해성평가 4단계와 법·제도



중요도



기출

11 문항

출제 연도

4 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 11 · 24 47 · 23 9 · 23 11 · 23 47 · 23 48 · 22 9 · 22 11 · 초안 OX 18 · 초안 OX 19 · 초안 서 Q3

개념

위해성평가 4단계

- 유해성확인 → 용량-반응평가 → 노출평가 → 위해도 결정
- 위해성(risk)은 유해성(hazard)만이 아니라 실제 **노출(exposure)** 수준에 의해 결정됨 → 'exposure와 무관'은 F (초안 OX 18)
- **통합위해성평가** = 동일·관련 건강영향을 주는 여러 물질·경로의 위해를 종합 평가(위해지수 합산)
- 세포·동물실험 결과가 인구집단 역학조사보다 중요하다 = F (2023·2022 TF 9)

법·제도

- **화평법(화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률, K-REACH)**: 제조·수입량에 따라 자료 제출 범위 차등 → T
- **Biomonitoring(생체모니터링)** = 체내 물질·대사체를 측정해 노출량을 추정하는 방법

시험 핵심 비교

위해성평가 4단계

단계	내용
유해성확인	hazard 확인
용량-반응평가	POD 선정
노출평가	노출량 추정
위해도 결정	risk 판정

암기

- 4단계: 유해성확인→용량반응→노출평가→위해도결정 / $\text{risk} = \text{hazard} \times \text{exposure}$
- 화평법=제조·수입량별 자료 차등

연결 포인트

10-2

POD · critical effect · RfD · UF

용량-반응평가의 POD·RfD

이동 →

8-1

멜라민·탈크·가습기살균제 (국내 건강피해)

가습기살균제 = 노출평가 중요성

이동 →

예상 문제

객관식

Q1. 위해성평가에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 위해성평가는 유해성확인, 용량-반응평가, 노출평가, 위해도 결정의 4단계로 구성된다
- ② 위해성(risk)은 유해성에만 의해 결정되고 노출 수준과는 무관하다
- ③ 통합위해성평가는 관련 건강영향을 주는 여러 물질의 위해를 종합한다
- ④ 화평법은 제조·수입량에 따라 자료 제출 범위를 다르게 한다
- ⑤ biomonitoring으로 체내 노출량을 추정할 수 있다

정답 ② 위해성은 유해성과 노출 수준을 함께 고려해 결정됨

서술형

Q2. 통합위해성평가가 무엇인지 간단히 서술하시오.

모범답안

통합위해성평가는 인체 적용 제품에 존재하는 위해요소가 다양한 매체와 경로를 통하여 인체에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 것이다. 특히 동일하거나 관련된 건강영향을 일으키는 여러 화학물질의 위해지수를 합산하여 총 위해를 산출함으로써 단일 물질 평가의 한계를 보완한다.

여러 물질·경로 종합 · 위해지수 합산

10-2 POD · critical effect · RfD · UF



중요도



기출

10 문항

출제 연도

3 / 6년

연도별

20 21

22

23

24

25

25 TF 28 · 25 주 64 · 24 49 · 22 8 · 22 37 · 초안 OX 20 · 초안 OX 21 · 초안 객 Q13 · 초안 단 Q5 · 초안 서 Q1

개념

NOAEL · LOAEL · POD · critical effect

- **NOAEL** = 독성을 나타내지 않는 **최대 용량**, **LOAEL** = 독성이 나타나는 최소 용량
- **POD(point of departure)** = 위해성평가 출발점 → NOAEL·LOAEL·BMDL 사용 가능
- **critical effect** = 여러 유해영향 중 **가장 낮은 용량**에서 나타나는 adverse effect → 위해성평가의 기준

RfD와 불확실성계수

- **RfD = POD ÷ (UF × MF)** → 평생 노출해도 비발암 유해영향 가능성이 낮은 일일용량
- UF(불확실성계수): 중간 ×10, 종내 ×10, 만성자료 부족 등 추가 → **UF 커질수록 RfD 작아짐** (초안 OX 21: 'UF 커질수록 RfD 커진다' = X)
- **ADI = LOAEL(또는 NOAEL) ÷ (UF×MF)**

시험 핵심 비교

RfD 산출

요소	내용
POD	NOAEL/LOAEL/BMDL
critical effect	최저용량 유해영향
RfD	$POD / (UF \times MF)$
UF ↑	RfD ↓

암기

- **POD=출발점 / critical effect=최저용량 영향 / RfD=POD÷(UF×MF) · UF ↑ → RfD ↓**

연결 포인트

10-3

비발암 위해성평가 (RfD · HI)

RfD·HI로 비발암 위해 판정

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. RfD와 POD에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① POD는 위해성평가의 출발점으로 NOAEL·LOAEL·BMDL이 쓰일 수 있다
- ② critical effect는 가장 낮은 용량에서 나타난 유해영향이다
- ③ RfD는 POD를 불확실성계수로 나누어 산출한다
- ④ 다른 조건이 같다면 UF가 커질수록 RfD도 커진다
- ⑤ NOAEL은 독성을 나타내지 않는 최대 용량이다

정답 4 $RfD = POD / (UF \times MF)$ 이므로 UF가 커지면 RfD는 작아짐

서술형 Q2. critical effect의 의미와 위해성평가에서의 활용을 설명하십시오.**모범답안**

critical effect는 한 물질의 여러 독성영향 중 가장 낮은 용량에서 관찰되는 adverse effect를 말한다. 가장 민감한 영향을 기준으로 삼으면 다른 영향들도 함께 예방할 수 있으므로, 이 critical effect의 NOAEL이나 BMDL을 POD로 선택하여 RfD 등 안전 기준값을 산출하는 데 활용한다.

최저용량 유해영향 · 가장 민감 · POD 선택

10-3 비발암 위해성평가 (RfD · HI)



중요도



기출

8 문항

출제 연도

3 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 서 6 · 24 55 · 24 56 · 24 58 · 23 58 · 초안 OX 22 · 초안 OX 23 · 초안 서 Q1

개념

HI (위해지수)

- $HI = \text{인체노출량(MDI)} \div \text{RfD(또는 ADI)}$
- $HI > 1 \rightarrow$ 비발암 건강영향 위해 우려 있음 / $HI < 1 \rightarrow$ 우려 낮음
- $HI > 1$ 이라고 해서 건강장해가 반드시 발생한다는 뜻은 아님(추가 검토 필요) (초안 OX 22 = X)

시스플라틴·ADI 서술형 흐름

- 그래프에서 NOAEL·LOAEL 읽기 $\rightarrow$ POD 선택(NOAEL 우선)
- UF 구성(종간 $\times 10$, 종내 $\times 10$, 만성자료 등) $\rightarrow$ 총 UF
- $RfD(ADI) = POD \div UF \rightarrow HI = \text{노출량} \div RfD$ 계산 후 해석
- $ADI = LOAEL / (UF \times MF)$ 형태로도 출제(2025 서술 ADI 구하기)

시험 핵심 비교

비발암 위해 판정

HI	해석
$HI > 1$	위해 우려 있음
$HI < 1$	위해 우려 낮음
$HI = \text{노출량} / RfD$	—

암기

- $HI = \text{노출량} / RfD$ · $HI > 1$ 우려(반드시 발병 아님)

연결 포인트

10-2

POD · critical effect · RfD · UF

RfD·UF 산출

이동 $\rightarrow$

예상 문제

객관식 Q1. 비발암 위해성평가의 HI에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① HI는 인체노출량을 RfD로 나눈 값이다
- ② HI가 1을 초과하면 위해 우려가 있다
- ③ HI가 1보다 작으면 위해 우려가 낮다
- ④ HI가 1을 초과하면 건강장해가 반드시 발생한다
- ⑤ HI 계산에는 ADI도 기준값으로 쓸 수 있다

정답 4 HI>1은 우려를 뜻하지 반드시 발병을 의미하지 않음

서술형 Q2. NOAEL 20 mg/kg/day, 총 UF 500, 인체노출량 0.08 mg/kg/day일 때 RfD와 HI를 구하고 해석 하시오.

모범답안

$RfD = NOAEL \div UF = 20 \div 500 = 0.04 \text{ mg/kg/day}$ 이다. $HI = \text{인체노출량} \div RfD = 0.08 \div 0.04 = 2$ 이다. HI가 1보다 크므로 현재 노출조건에서 비발암성 건강영향에 대한 위해 우려가 있을 수 있다. 다만 $HI > 1$ 이 건강장해가 반드시 발생한다는 뜻은 아니며 추가 검토가 필요함을 의미한다.

$RfD=0.04 \cdot HI=2 \cdot HI>1$ 우려(반드시 발병 아님)

10-4 BMDL10 · MOE · 단위위해도



중요도



기출

9 문항

출제 연도

4 /6년

연도별

20

21

22

23

24

25

25 TF 10 · 24 31 · 23 10 · 23 41 · 23 #단답MOE · 22 35 · 22 36 · 초안 단 Q6 · 초안 단 Q7

개념

BMD·BMDL10과 MOE

- **BMD** = 대조군 대비 일정 반응을 내는 용량, **BMD10** = 10% 유해반응 용량
- **BMDL10** = BMD10의 신뢰구간 하한값 → POD로 사용
- **MOE(margin of exposure) = BMDL10(POD) ÷ 인체노출량** (2024 31 ≡ '노출인자로 나눈 것'은 족보에서 '노출량'으로 정정)
- 예: BMDL10 20, 노출량 0.2 → MOE = 100

단위위해도(unit risk)

- 단위위해도 = 발암력(slope factor)과 비슷한 개념이고 단위를 농도로 바꾼 것 → T (반복 출제)
- 개인초과발암위해도 = 단위위해도 × 현오염도수준 → 단위위해도 = 위해도 / 농도

시험 핵심 비교

BMDL·MOE·단위위해도

용어	의미/식
BMDL10	BMD10 신뢰하한·POD
MOE	BMDL10/노출량
단위위해도	slope factor를 농도 단위로

암기

- $MOE = BMDL10 / \text{노출량}$ / 단위위해도 = slope factor의 농도 단위판

연결 포인트

10-2

POD · critical effect · RfD · UF

BMDL = POD의 한 종류

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 다음 중 옳지 않은 것은?

- ① BMD10은 대조군 대비 10% 유해반응을 내는 용량이다
- ② BMDL10은 BMD10의 신뢰구간 하한값이다
- ③ MOE는 BMDL10을 인체노출량으로 나눈 값이다
- ④ 단위위해도는 발암력과 비슷한 개념으로 단위를 농도로 바꾼 것이다
- ⑤ 유전독성 발암물질은 역치가 있어 MOE 대신 RfD를 쓴다

정답 5 유전독성 발암물질은 무역치로 간주하여 MOE·단위위해도 같은 접근을 사용

서술형 Q2. BMDL10의 의미를 설명하고, BMDL10이 20 mg/kg/day, 인체노출량이 0.2 mg/kg/day일 때 MOE를 구하시오.

모범답안

BMD는 용량-반응 곡선에서 대조군 대비 일정 수준의 유해반응을 나타내는 용량이고, BMD10은 10%의 유해반응을 내는 용량이다. BMDL10은 이 BMD10의 신뢰구간 하한값으로 POD로 사용된다. $MOE = BMDL10 \div \text{인체노출량} = 20 \div 0.2 = 100$ 이다.

BMD10 신뢰하한 · $MOE = BMDL10 / \text{노출량} = 100$

10-5

발암 위해성평가 (ADD · LADD · 개인초과발암위해도)

★★★

중요도

★★★

기출

12 문항

출제 연도

4 / 6년

연도별

20 21

22

23

24

25

25 서 1 · 25 서 2 · 25 서 3 · 25 서 4 · 25 서 5 · 24 52 · 24 53 · 24 57 · 23 57 · 22 42 · 초안 OX 24 · 초안 서 Q2

개념

노출량 산출

- **ADD(일일평균노출량)** = (농도 × 섭취량 × 흡수율) ÷ (체중 × 노출기간 중 평균)
- **LADD(평생일일평균노출량)** = ADD × (노출기간 ÷ 평균수명)
- 예: 농도 5µg/L, 2L/day, 50kg, 35년/70년 → ADD 2×10^{-4} , LADD 1×10^{-4} mg/kg/day

개인초과발암위해도(ECR)

- **ECR = LADD × cancer slope factor(발암잠재력)**
- 예: LADD 1×10^{-4} × slope factor 0.1 → **ECR = 1×10^{-5}**
- 해석: 평생 노출 시 약 10만 명당 1명 추가 암 발생 확률(확률적 위해, 반드시 1명 발병 아님)
- 유전독성 발암은 무역치 → RfD가 아닌 slope factor·단위위해도로 평가

시험 핵심 비교

발암 위해도 산출

단계	식
ADD	농도×섭취량/(체중)
LADD	ADD×(노출기간/수명)
ECR	LADD×slope factor

암기

- **LADD=ADD×(노출기간/수명) / ECR=LADD×slope factor**
- **ECR 1×10^{-5} = 10만명당 1명 추가(확률)**

연결 포인트

7-2

PAH와 benzo[a]pyrene 대사활성화

벤조피렌 = 발암 위해도 서술형 소재

이동 →

예상 문제

객관식 Q1. 발암 위해성평가에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① ADD는 농도·섭취량 등을 체중으로 나누어 구한다
- ② LADD는 ADD에 노출기간/평균수명을 곱해 구한다
- ③ 개인초과발암위해도는 LADD에 cancer slope factor를 곱해 구한다
- ④ ECR 1×10^{-5} 은 10만 명당 반드시 1명이 암에 걸린다는 뜻이다
- ⑤ 유전독성 발암물질은 무역치로 간주하여 slope factor로 평가한다

정답 4 ECR은 확률적 추가 위해도이지 반드시 1명 발병을 뜻하지 않음

서술형 Q2. 음용수 benzo[a]pyrene 농도 $5 \mu\text{g/L}$, 섭취 2L/day , 체중 50kg , 노출 35년, 수명 70년, slope factor $0.1 (\text{mg/kg/day})^{-1}$ 일 때 ADD·LADD·개인초과발암위해도를 구하고 그 의미를 해석하시오.

모범답안

ADD = $(5 \mu\text{g/L} \times 2\text{L/day}) \div 50\text{kg} = 0.2 \mu\text{g/kg/day} = 2 \times 10^{-4} \text{ mg/kg/day}$ 이다. LADD = $\text{ADD} \times (35/70) = 1 \times 10^{-4} \text{ mg/kg/day}$ 이다. 개인초과발암위해도 = $\text{LADD} \times \text{slope factor} = 1 \times 10^{-4} \times 0.1 = 1 \times 10^{-5}$ 이다. 이는 해당 조건으로 평생 노출될 때 약 10만 명당 1명의 추가 암 발생 위험에 해당한다는 뜻으로, 10만 명 중 반드시 1명이 발병한다는 의미가 아니라 노출로 더해지는 확률적 발암위해도를 나타낸다.

ADD = 2×10^{-4} · LADD = 1×10^{-4} · ECR = 1×10^{-5} · 10만명당 1명 추가(확률)