2006년 한국지하수토양환경학회 동계 워크샵
미래를 향한 토양관리제도 토론회

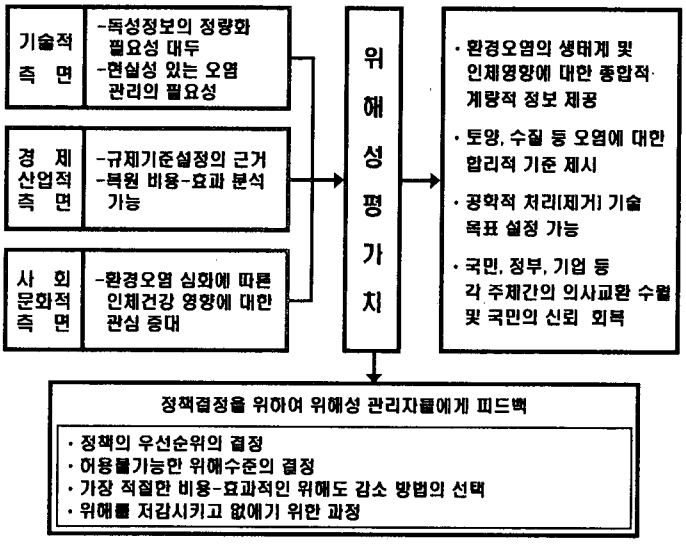
토양복원을 위한 위해성평가 적용방안

2006. 2. 24.

이 진 수

서울대학교 지구환경시스템공학부

위해성 평가의 필요성



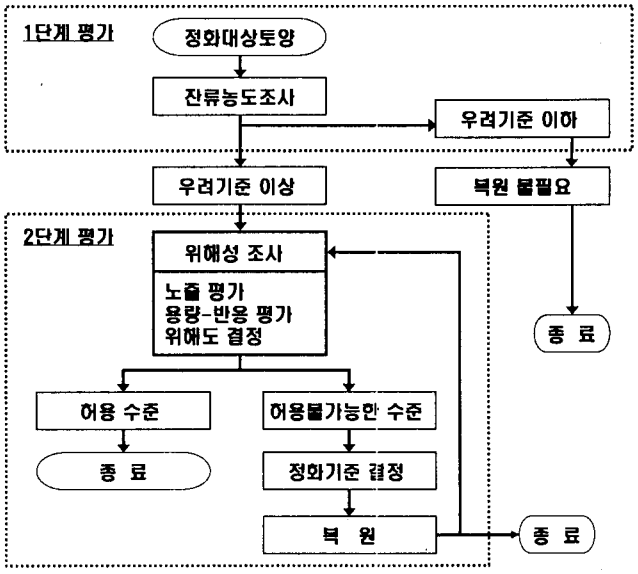
위해성 평가의 정의

- 위해성평가는 식품을 포함한 환경중 유해물질의 인체 또는 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 제시된 방법론
  이는 대상수용체를 인체로 하는 건강(인체)위해성평가 (human health risk assessment)와 생태계로 하는 생태계위해성평가 (ecological risk assessement)로 크게 대분

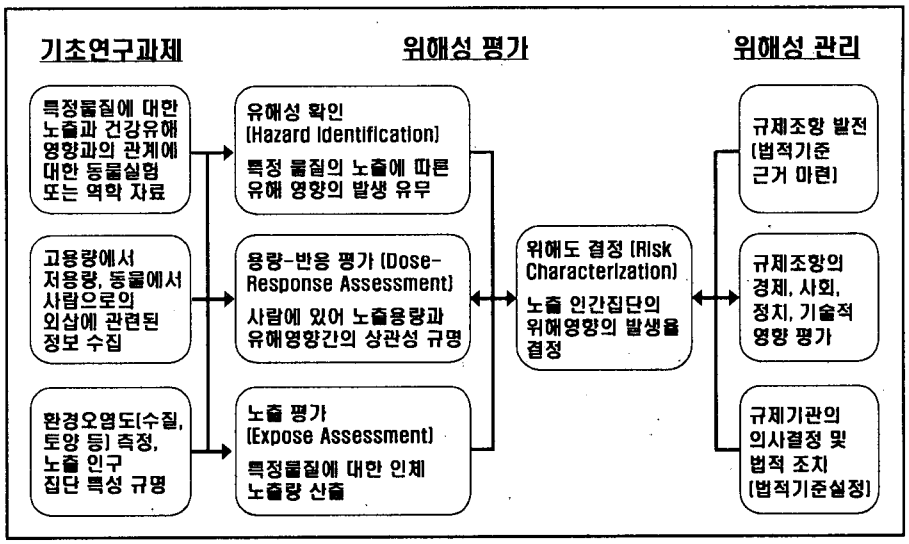
- 위해도 (Risk)
  위해물질의 특정농도나 용량에 노출된 개인 혹은 집단에게 유해한 결과가 발생할 확률(probability) 또는 가능성(likelihood)
  위해도 (Risk) = 유해성 (Hazard) X 노출량 (Exposure) (OECD의 정의)

- 인체위해도 평가 (Human risk assessment)
  어떤 독성 물질이나 위험상황에 노출되어 나타날 수 있는 개인 혹은 집단의 건강 피해 확률을 추정하는 과학적인 과정
  즉, 사람이 환경적 위험에 노출되었을 경우 발생 가능한 영향을 정성 또는 정량적으로 추정하는 과정

위해성에 근거한 오염토양 복원전략



위해성 평가 과정



유해성 확인 (Hazard Identification)

- 위해성평가를 하기 위한 첫 단계로 유해물질의 물리적, 화학적 성질을 파악하고 이에 따른 물질의 환경적 이동 메카니즘 및 인체내 영향 메카니즘 등을 파악함으로써 물질이 가지고 있는 유해도를 규명하는 것

- 유해물질의 관련자료를 수집, 정보를 도출하는 과정과 노출조건, 환경중 거동특성, 인체내 대사기구, 규제현황 등을 파악하여 수집된 정보를 평가하는 과정으로 이루어짐

- 각각의 유해물질과 관련된 유해도 수준을 확인하기 위한 적절한 정보를 종합
  - 발암 효과 : 발암증거의 분명함에 따라 분류
  - 비발암 효과 : 여러가지 독성영향에 대한 정보를 토대로 하여 정성적 평가

노출 평가 (Exposure Assessment)

- 유해물질에 대한 노출경로, 노출수준, 노출빈도, 노출기간 등을 측정 또는 예측하여 인체노출량을 산출 또는 결정하는 과정
- 노출 (Exposure)
  접촉기간동안 축적된 환경매체 내에 존재하는 물질의 농도로 정량화되는 외부로부터의 생물학적, 화학적, 물리적 접촉
- 노출평가의 주요 단계
  - Exposure pathways and routes :
    접촉후 물질의 유기체내 침투경로의 규명 (섭취, 호흡, 피부접촉 등)
  - Exposure scenario : 노출발생과 관련한 상황을 설정
  - Receptor population analysis :
    인구집단 특성 파악, 인체노출 관련 변수조사
  - Exposure quantification :
    각 노출경로에 따른 노출량 (ADD, average daily dose or intake) 산출

용량-반응 평가 (Dose-Response Assessment)

- 노출용량과 나타나는 유해영향의 관계를 규명하는 과정이며, 주로 동물실험 연구결과 또는 역학연구결과를 토대로 함
- 용량-반응평가 단계는 환경오염물질에 대한 인체영향을 역치 (threshold) 존재의 유·무에 기본 가정을 두고 발암물질과 비발암물질로 나누어 평가
  - 발암물질의 용량-반응평가 : 발암물질의 용량-반응곡선은 역치를 전제하지 않음 (역치가 존재하지 않는다는 것은 아주 저농도에서도 유해한 반응이 발생할 가능성이 존재한다는 것을 의미).
    발암잠재력 (SF, slope factor) : 용량-반응 곡선에서 낮은 농도구간에서의 직선의 기울기
  - 비발암물질의 용량-반응평가 : 비발암 독성물질의 경우는 일정용량, 즉 역치 용량 이상에서 노출되어야 유해 영향이 관찰된다고 전제함.
    참고섭취량 (RfD, reference dose) : 만선인체노출시 유해영향이 일어나지 않을 것으로 예측되는 용량

위해도 결정 (Risk Characterization)

1. 비발암(독성)위해도 (Toxic risk)

- 독성위해도는 참고노출량 (RfD)과 비교함으로써 평가, 비발암성 노출로 정의
- 독성위해도는 Hazard Quotient (H.Q.) 지수로 표현
- H.Q. > 1 이면 독성위해도가 존재

$$H.Q. = \frac{\text{Intake or exposure (ADD)}}{\text{reference dose (RfD)}}$$

- 모든 노출경로에 따른 독성위해도는 Hazard Index (H.I.) 지수로 표현

H.I. = Σ HQs (sum of hazard quotients)

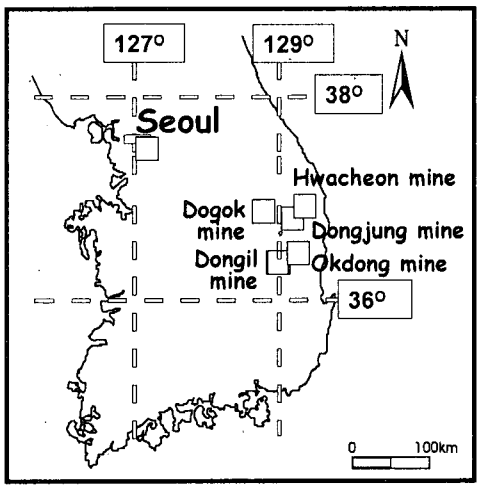
$H.I. = ADD_1/RfD_1 + ADD_2/RfD_2 + \cdots + ADD_i/RfD_i$

2. 발암위해도 (Carcinogenic risk)

- 발암물질의 위해도는 인간이 유해물질에 장기간 노출된 결과 발암 영향을 받을 초과 확률 (10의 (-)지수값)로 산출

Risk of cancer = ADD X SF (slope factor)

사례 연구 : 폐금속광산지역의 중금속 위해성 평가



Five abandoned metal mines

동일 (DI) : Au-Ag-Cu-Pb-Zn

옥동 (OD) : Cu-Pb-Zn

동정 (DJ) : Au-Ag-Pb-Zn

도곡 (DG) : Au-Ag-Cu

화천 (HC) : Au-Ag-Pb-Zn

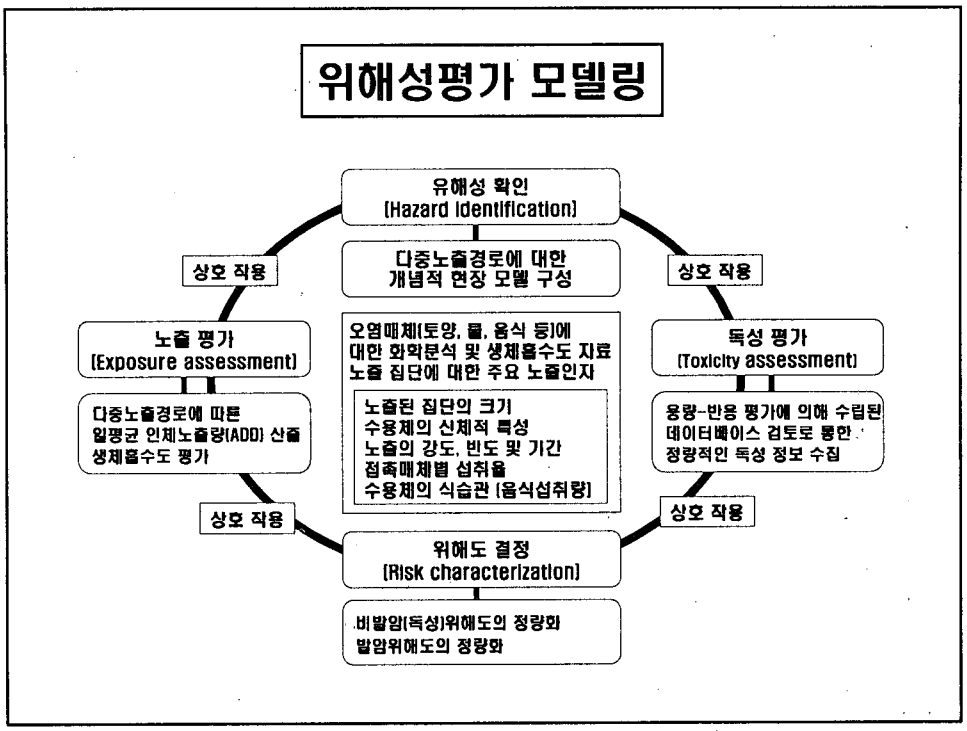
광미 및 토양내 중금속 함량

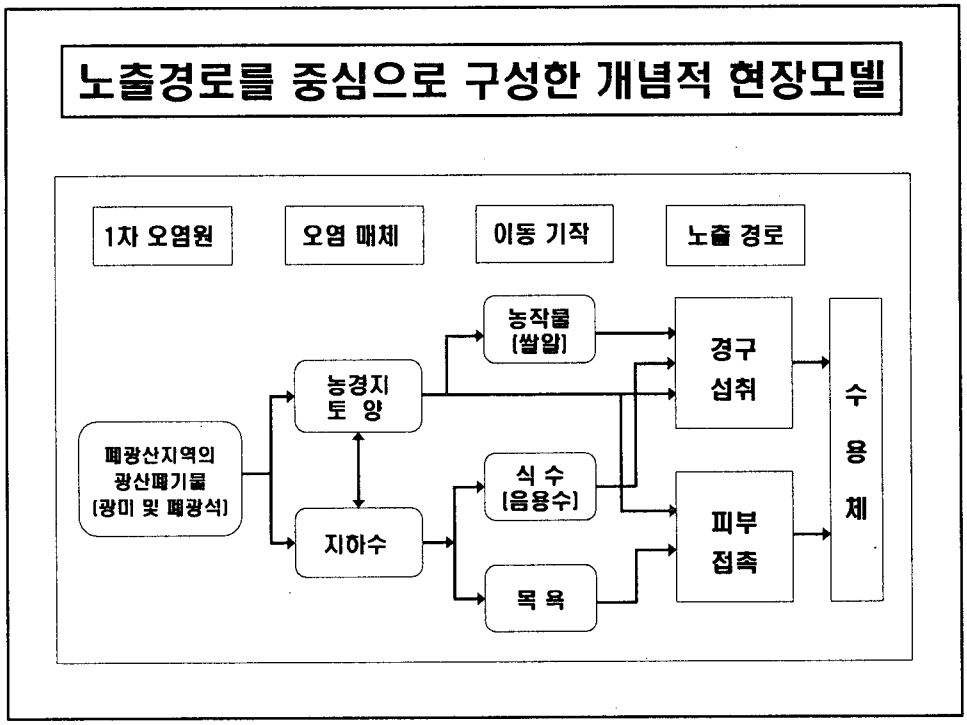
unit : mg/kg

광산	시료	As	Cd	Cu	Pb	Zn
동일광산 (DI)	광미	8720	5.9	3610	5850	630
	경작지 토양	36	2.3	124	33	75
옥동광산 (OD)	광미	72	53.6	910	1590	5720
	경작지 토양	14	3.5	57	44	104
동정광산 (DJ)	광미	3620	12.2	144	5140	3060
	경작지 토양	95	3.9	30	381	517
도곡광산 (DG)	광미	220	98.2	2550	4200	18020
	경작지 토양	8	3.0	37	52	137
화천광산 (HC)	광미	72	12.4	34	580	1300
	경작지 토양	20	3.8	19	173	255

지하수 및 쌀알내 중금속 함량

시료	광산	As	Cd	Cu	Pb	Zn
쌀알 (mg/kg)	동일	0.15	0.30	6.9	2.2	39.8
	옥동	0.17	0.12	4.1	4.1	21.2
	화천	0.23	0.16	2.2	0.1	28.3
지하수 [식수로 사용] (mg/L)	동일	0.039	0.006	0.007	0.004	0.022
	옥동	0.038	0.006	0.024	0.035	0.098
	동정	0.009	0.002	0.030	0.041	0.215
	도곡	0.001	0.054	0.005	0.001	0.317
	화천	0.007	0.000	0.016	0.013	0.047


위해성평가 모델링
유해성 확인
(Hazard identification)
다중노출경로에 대한
개념적 현장 모델 구성
상호 작용
상호 작용
노출 평가
(Exposure assessment)
오염매체(토양, 물, 음식 등)에
대한 화학분석 및 생체흡수도 자료
노출 집단에 대한 주요 노출인자
독성 평가
(Toxicity assessment)
다중노출경로에 따른
일평균 인체노출량(ADD) 산출
생체흡수도 평가
노출된 집단의 크기
수용체의 신체적 특성
노출의 강도, 빈도 및 기간
접촉매체별 섭취율
수용체의 식습관 (음식섭취량)
용량-반응 평가에 의해 수립된
데이터베이스 검토로 통한
정량적인 독성 정보 수집
상호 작용
상호 작용
위해도 결정
(Risk characterization)
비발암(독성)위해도의 정량화
발암위해도의 정량화


노출경로를 중심으로 구성한 개념적 현장모델
1차 오염원
오염 매체
이동 기작
노출 경로
폐광산지역의
광산폐기물
(광미 및 폐광석)
농경지
토 양
지하수
농작물
(쌀알)
식 수
(음용수)
목 욕
경구
섭취
피부
접촉
수
용
체

일평균 노출량 (섭취량) : Average Daily Dose

노출 경로	일평균노출량 (mg/kg-day)
토양 섭취	$ADD_s = \frac{C \times IRs \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365}$
음용수 섭취	$ADD_w = \frac{C \times IRw \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365}$
쌀알 섭취	$ADD_r = \frac{C \times IRr \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365}$
토양 피부 접촉	$ADD_{ds} = \frac{C \times SAs \times AF \times ABS \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365}$
목욕에 의한 피부 접촉	$ADD_{dw} = \frac{C \times SAw \times PC \times ET \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365}$

노출 요인 및 노출 변수

Factor/Parameter	Symbol	Units	Residential	Data sources
Exposure Duration	ED	years	30	US EPA, 1997
Exposure Frequency	EF	days/year	350	US EPA, 1997
Averaging Time	AT			
Carcinogens	ATc	years	76.5	KNSO, 2001
Non-carcinogens	ATnc	years	30	US EPA, 1997
Body Weight	BW	kg	60	MOCIE, 1997
Ingestion rate	IR			
Soil	IRs	kg/day	50×10^{-6}	US EPA, 1997
Rice (Farmer)	IRr	kg/day	0.374	KNSO, 2002
Drinking water	IRw	L/day	2.0	US EPA, 1997
Skin surface area	SA			
Skin surface area (forearms, hands)	SAs	cm^2	1960	US EPA, 1997
Skin surface area (whole body)	SAw	cm^2	16000	US EPA, 1997
Adherence factor	AF	mg/cm^2	0.5	US EPA, 1997
Absorption factor	ABS	-	0.01	US EPA, 1997
Skin permeability constant	PC	cm/hr	3×10^{-4}	US EPA, 1996
Exposure time for showering	ET	hr/day	0.333	US EPA, 1997

위해도 결정 : 비발암(독성) 위해도

노출경로별 As, Cd, Zn의 위험성몫 (HG) 및 위험성지수 (HI)

노출 경로 / 광산 / 중금속		Hazard Quotient (HQ)					HI	◀HI
		Soil ingestion	Water ingestion	Rice grain ingestion	Soil dermal contact	Water dermal contact		
동일광산	As	0.066	**4.155**	**2.989**	0.005	0.003	**7.2**	**10.5**
	Cd	0.001	0.384	**2.152**	0.000	0.000	**2.5**	
	Zn	0.000	0.002	0.793	0.000	0.000	0.8	
옥동광산	As	0.026	**4.049**	**3.387**	0.002	0.003	**7.5**	**9.0**
	Cd	0.002	0.384	0.717	0.000	0.000	**1.1**	
	Zn	0.000	0.010	0.422	0.000	0.000	0.4	
동정광산	As	0.174	0.959	NR	0.013	0.001	**1.1**	**1.2**
	Cd	0.002	0.128	NR	0.000	0.000	0.1	
	Zn	0.001	0.023	NR	0.000	0.000	0.0	
도곡광산	As	0.015	0.107	NR	0.001	0.000	0.1	**3.6**
	Cd	0.002	**3.452**	NR	0.000	0.003	**3.5**	
	Zn	0.000	0.034	NR	0.000	0.000	0.0	
화천광산	As	0.037	0.746	**4.582**	0.003	0.001	**5.4**	**7.0**
	Cd	0.002	0.000	0.956	0.000	0.000	**1.0**	
	Zn	0.000	0.005	0.564	0.000	0.000	0.6	

NR : 동정과 도곡광산 인근 지역에서는 벼농사가 이루어지지 않아 쌀 섭취에 의한 독성위해성은 없다고 판단됨.

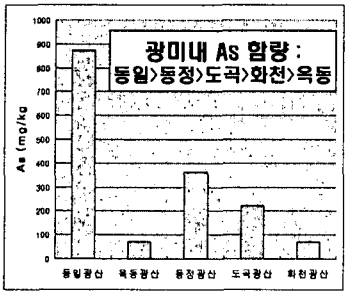
위해도 결정 : 발암 위해도

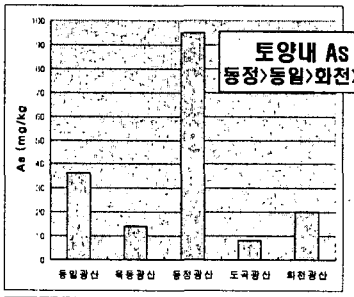
노출경로별 As의 발암위해도

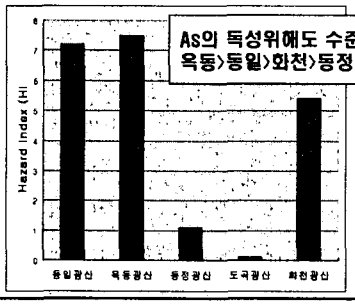
노출경로 / 광산	Soil ingestion	Water ingestion	Rice grain ingestion	Soil dermal contact	Water dermal contact
동일광산	1.2×10^{-5}	7.3×10^{-4}	5.2×10^{-4}	2.3×10^{-6}	5.9×10^{-7}
옥동광산	4.5×10^{-6}	7.1×10^{-4}	6.0×10^{-4}	8.8×10^{-7}	5.7×10^{-7}
동정광산	3.1×10^{-5}	1.7×10^{-4}	NR	6.0×10^{-6}	1.4×10^{-7}
도곡광산	2.6×10^{-6}	1.9×10^{-5}	NR	5.1×10^{-7}	1.5×10^{-8}
화천광산	6.5×10^{-6}	1.3×10^{-4}	8.1×10^{-4}	1.3×10^{-6}	1.1×10^{-7}

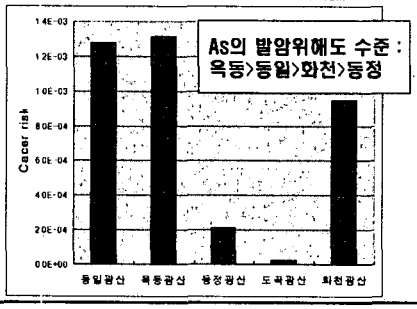
NR : 동정과 도곡광산 인근 지역에서는 벼농사가 이루어지지 않아 쌀 섭취에 의한 발암위해성은 없다고 판단됨.

광산별 As의 위해도 수준

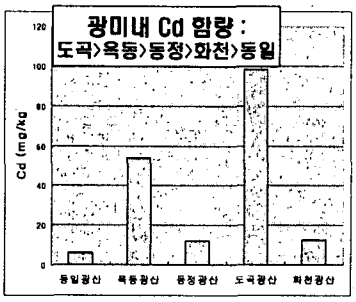


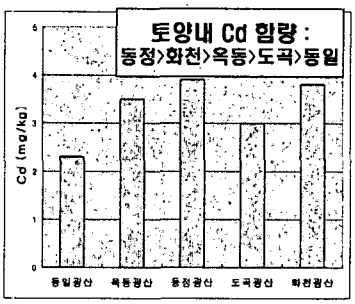


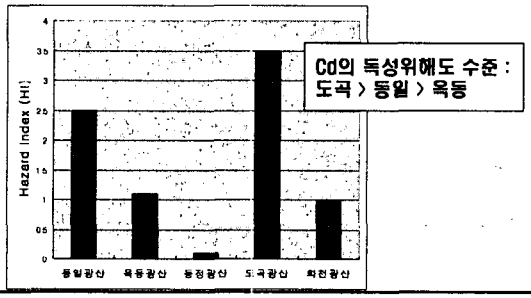




광산별 Cd의 위해도 수준







위해성평가의 활용방안

■ 오염지역의 특수성을 고려하여 오염물질의 위해성 여부를 판단하고, 그 결과에 의거하여 오염지역의 정화 실시 여부 및 수준을 결정
- 위해성에 근거한 합리적, 과학적, 경제적 정화기준의 마련이 가능
- 위해성에 근거한 정화기준은 실질적인 수용체의 건강보호가 가능

■ 위해성 평가를 통해 각 오염지역의 노출경로별, 오염물질별 정화수준을 산정
- 위해영향이 있는 오염물질을 구별할 수 있으며, 선택적인 제거 기술의 적용으로 정화 비용을 절감
- 오염물질의 노출 방지를 위한 노출 경로의 차단 방법 모색

■ 표준화된 위해성 평가 기법의 정립은 막대한 경비가 소요되는 환경복원사업의 정책 결정에 있어서 가이드라인으로 활용
- 많은 복구 대상 지역(토양)들의 상대적 위해성을 평가함으로써 정화의 우선순위 결정에 이용 (예 : 폐금속광산지역의 광해복구사업)