

한국원자력연구소 내 지하처분 연구시설에서의 암반손상대 평가

이창수, 전석원 (서울대학교)
권상기, 조원진 (한국원자력연구소)
서영호, 박현익 (현대건설 기술개발원)
박연준 (수원대학교)

1. 서 론

원자력발전소의 증가와 더불어 지속적으로 누적되고 있는 고준위방사성폐기물을 영구히 처분하는 방법으로 심지층 처분이 세계적인 추세이다. 심지층 처분장은 고준위방사성폐기물을 생태계로부터 장기간 안전하게 격리시키기 위하여 대개 지하 300 m 내지 1000 m 깊이의 지하 심부에 건설된다. 발파에 의한 굴착으로 지하 심부에 처분장을 건설하게 되면 발파압의 영향과 응력 재분배로 인해 주변 암반은 손상을 입게 되고 암반의 초기 물성이 크게 변화하게 되는 구간이 발생하게 되는데 이를 암반손상대(Excavation Damaged Zone, EDZ)라 한다. 암반손상대의 범위는 굴착방법과 암종에 따라 다르지만 결정질 암석의 경우 발파에 의하여 일부 영역에서 비가역적인 변형이 일어난 영역으로 균열이 성장하고 새로운 균열이 발생하는 구간을 의미한다(Tsang et al., 2005). 실험적인 방법으로 추정된 암반손상대의 범위는 경우에 따라 차이가 나지만 2 m를 넘지 않는 것으로 보고되고 있다(Kruschwitz, S. & Yaramanci, U., 2004; Bossart et al., 2004; Hou, Z., 2003; Sato, et al., 2000). 암반손상대는 암반의 수리적, 역학적, 열적 특성을 변화시켜 처분장의 안정성에 영향을 미치기 때문에 방사성폐기물 처분장의 건설을 위한 설계과정에서 암반손상대의 영향을 평가, 분석하는 것은 매우 중요하다. 이에 따라 한국원자력연구소는 향후 국내에서 이뤄질 고준위 폐기물 처분을 대비하여 처분심도와 유사한 환경 속에서 직접적인 현지 실증시험을 수행하기 위해 연구소 부지 내에 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)을 건설하여 한국형 지하처분 시스템을 설계하고자 하였다. 2006년 7월에 완공예정인 KURT는 화강암반에 위치하며 조절발파기법을 이용하여 굴착되었다. KURT의 건설 중 암반손상대 연구를 위하여 총 120 m의 시추공이 천공되었으며 다양한 현장실험과 암석코어를 이용한 실내시험이 수행되었다. 본 연구에서는 발파 전후에 획득한 시추코어의 실내시험(일축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 탄성파 속도, 공극률, 비중, 압열인장강도, 삼축압축)을 실시하여 KURT 건설 시에 발파로 인해 발생한 암반손상대의 범위와 발파로 인한 초기 암반물성의 변화 정도를 살펴보았다. 또한 암반손상대의 발생으로 일어나게 되는 암반의 역학적인 거동의 변화를 $FLAC^{2D}$ 를 이용하여 모사하였으며 처분장의 안정성에 영향을 미치는 파라미터에 대한 민감도 분석과 분산분석을 실시하였다.

2. 본 론

2.1. KURT의 암반물성 시험결과

대전광역시 유성구 덕진동 일대의 한국원자력연구소 부지 내에 위치하고 있는 KURT는 총 180 m의 진입터널과 좌, 우로 30 m, 45 m의 연구터널 그리고 회차구간(turning shelter)으로 이루어져 있다. 그림 1은 KURT의 전체적인 모습을 나타내고 있다. KURT의 진입터널의 경우 마제형 단면으로 하향 10%의 경사로 N56W 방향으로 굴착되었고, 연구터널 역시 마제형 단면으로 자연배수를 위해 상향 2%의 경사로 굴착되었다.

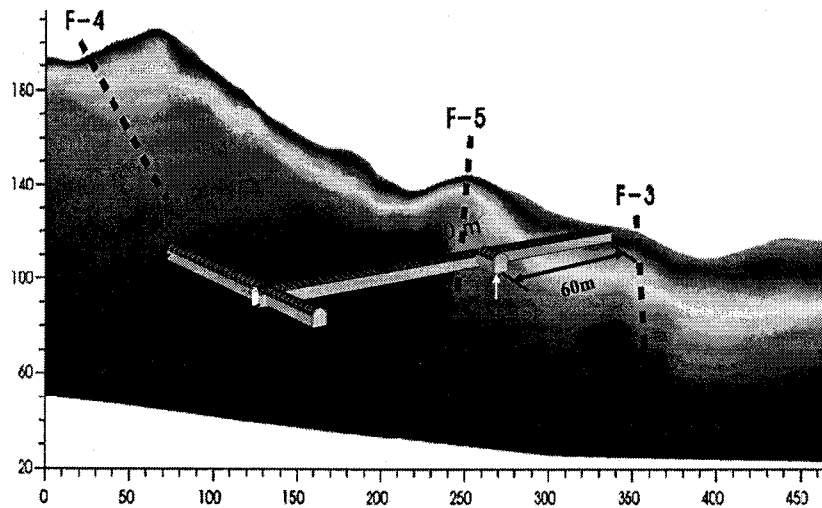


그림 1. KURT의 조감도

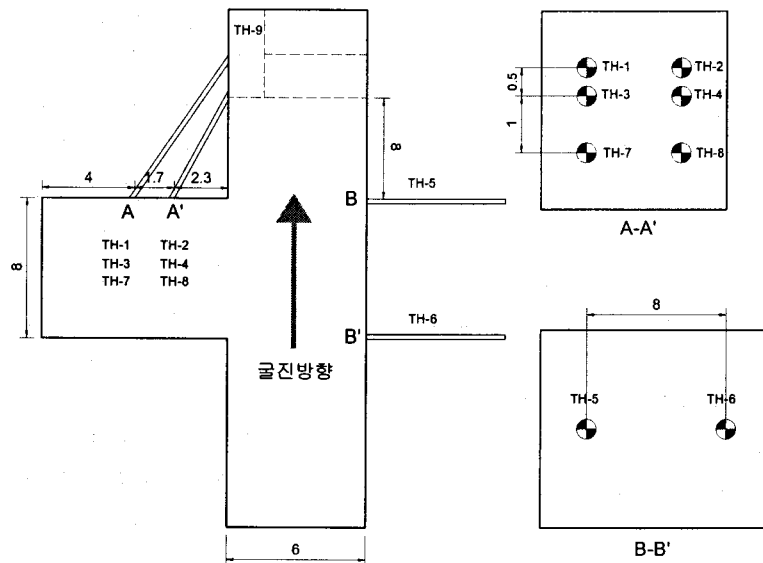


그림 2. 암석시료 채취장소 (단위: m)

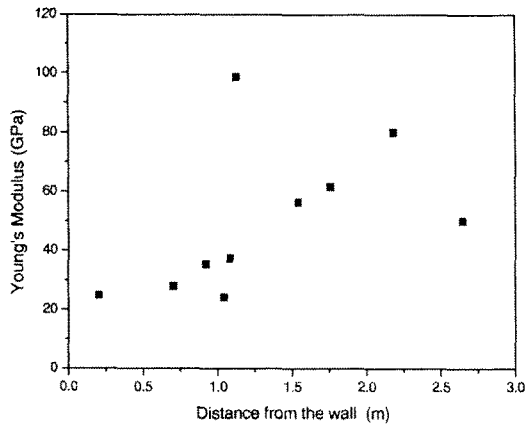
본 연구에서는 작업차량의 교행을 위해 만들어진 회차구간에서 시추한 암석 코어를 이용하여 암석의 기본 물성시험, 삼축압축시험 그리고 압열인장시험을 수행하였다. 기준이 되는 발파 전의 암석 물성에 대해서는 TH-3번 공에서 채취한 시료를 이용하여 2회 시험하였으며, 주된 관심인 발파 후의 암석 물성에 대해서는 TH-7번, TH-8번, TH-9번 공에서 채취한 시료를 이용하여 각각 5회, 3회, 2회의 시험을 실시하였다. 그림 2는 그림 1의 회차구간과 단면의 형상 및 시료 채취의 위치를 나타낸 것이다. 시추공은 터널의 입구로부터 60 m 떨어진 회차구간에 위치하고 있으며 굴진방향을 중심으로 TH-3번 공과 TH-7번 공은 우측으로 25°, TH-8번 공은 우측으로 18°, TH-9번 공은 좌측으로 10°의 경사를 주어 시추하였다. 실내암석시험의 결과는 표 1과 같고, 그림 3은 발파 후의 시험 결과를 벽면으로부터의 거리에 따라 나타낸 것이다.

발파 후의 탄성계수 결과 값을 살펴보면 벽면으로부터의 거리가 1.1 m인 지점에서부터 탄성계수의 값이 변화하고 있으며(그림 3(a) 참조), 발파 후 0~1 m 구간의 평균 탄성계수는 발파 후 1~3 m 구간의 주변 암반 탄성계수보다 약 50% 정도 작게 나타났다. 일축압축강도의 결과를 살펴보면 암석 시료에 포함된 불연속면으로 인한 분산(1.7 m에서의 결과 값이 조금 낮게 나타남)외에 탄성계수의 경우와 비슷하게 1.1 m 지점에서부터 강도가 증가하는 것으로 나타났다(그림 3(b) 참조). 일축압축강도의 경우 발파 후 0~1 m 구간의 평균 일축압축강도와 주변 암반의 일축압축강도와 비교했을 때 약 35% 감소한 것으로 나타났다. 탄성과 속도의 경우는 그림 3 (c)에서 알 수 있듯이 P파의 속도 변화가 S파의 속도 변화보다 더 크게 일어나고 있으며, 앞의 두 경우와 마찬가지로 1.1 m 부근에서 탄성과속도가 급격히 변화하는 것으로 나타났다. 발파 후 P파 속도는 약 23% 감소하였고 S파 속도는 약 12% 감소하였다. 공극률, 인장강도, 점착력은 모두 앞의 경우와 마찬가지로 1.1 m 부근에서 물성 변화를 보이고 있으며 공극률은 발파 후에 210% 정도로 크게 증가하였고 인장강도와 점착력은 각각 약 40%와 28%가 감소하였다. 삼축압축시험에서는 봉압을 5 MPa, 10 MPa, 그리고 15 MPa로 가하여 시험을 수행하였으며, 그 결과값은 표 1에 정리된 바와 같다. 발파 후 삼축압축시험에서의 최대응력 값은 주변 암반의 강도에 비해 각각 32%(봉압 5 MPa), 29%(봉압 10 MPa), 그리고 27%(봉압 15 MPa) 감소하였다. 앞에서는 1.1 m 부근에서 암석의 물성이 크게 변화하는 것을 살펴볼 수 있었지만 마찰각, 비중, 포아송비의 결과에서는 발파 후의 물성변화는 거의 없었으며, 이러한 물성들은 발파에 의한 물성변화가 크지 않는 것으로 여겨지나 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

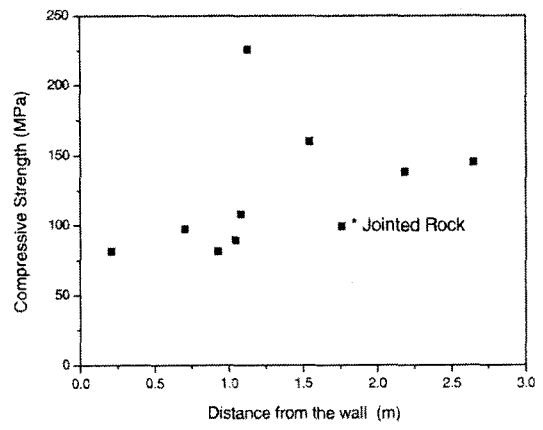
표 1에 나타나 있는 발파 전의 탄성계수 값을 발파 후의 벽면으로부터 거리 1 m 이후의 결과값과 비교하면 비슷한 값을 가진 것으로 나타났으며, 발파 전의 탄성계수의 값이 거리에 따라 큰 변화가 없는 것으로 보아 암반손상대의 범위가 1.1~1.5 m 정도인 것으로 보인다. 암반손상대의 범위를 1.1~1.5 m 정도로 보는 것은 암석물성의 변화가 1.1 m에서 크게 나타나지만 1.1 m에서의 시험 결과값이 1.5 m 지점 이후의 다른 값들과 비교했을 때, 큰 차이를 보였고 1.1~1.5 m 구간에서의 시험 값의 큰 차이를 발견할 수 없기 때문이다. 일축압축강도, 탄성과속도, 공극률, 인장강도, 점착력의 발파 후 결과 역시 1.1 m 에서 물성 변화가 크게 나타나고 있지만, 발파 전의 결과 또한 벽면으로부터의 거리에 따라 다소 변화가 있는 것으로 나타났다. 이로부터 본 시험의 경우 벽면으로부터의 거리 1.1 ~ 1.5 m에서 암석 물성변화의 차이가 크므로 이 구간에서 손상영역의 경계가 있는 것으로 판단되나, 기타 지질학적 요인에 의한 차이인지를 확인하기 위한 현미경 관찰 등의 추가 연구가 필요하다.

표 1. 암석의 실내시험 결과

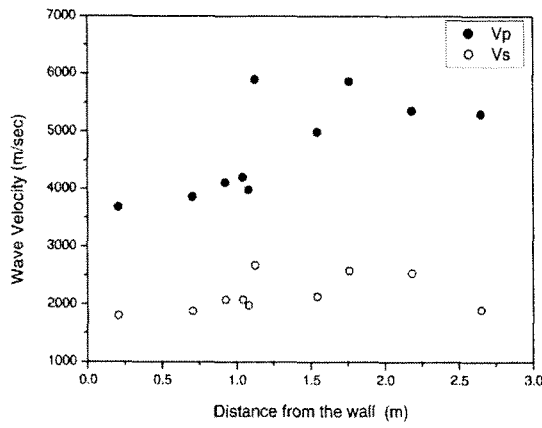
	벽면거리(m)	굴착 전			굴착 후		
일축압축강도(MPa)	0 ~ 1	101			89.6		
	1 ~ 2	-			136		
	2 ~ 3	134			142		
탄성파속도 (m/s)	파의 종류	P파	S파		P파	S파	
	0 ~ 1	4170	1730		3880	1920	
	1 ~ 2	-	-		4990	2290	
	2 ~ 3	5360	2080		5330	2220	
탄성계수(GPa)	0 ~ 1	57.5			29.3		
	1 ~ 2	-			55.6		
	2 ~ 3	61.1			65.0		
포아송비	0 ~ 1	0.28			0.26		
	1 ~ 2	-			0.28		
	2 ~ 3	0.26			0.26		
비중	0 ~ 1	2.62			2.59		
	1 ~ 2	-			2.72		
	2 ~ 3	2.76			2.67		
공극률(%)	0 ~ 1	1.09			2.52		
	1 ~ 2	-			1.13		
	2 ~ 3	0.13			0.25		
삼축압축시험에서의 최대응력(MPa)	봉압 (MPa)	5	10	15	5	10	15
	0 ~ 1	159	218	274	130	171	215
	1 ~ 2	-	-	-	195	246	297
	2 ~ 3	199	258	320	194	235	284
내부마찰각(°)	0 ~ 1	58			53		
	1 ~ 2	-			56		
	2 ~ 3	59			55		
점착력(MPa)	0 ~ 1	15.7			15.7		
	1 ~ 2	-			22.8		
	2 ~ 3	20.6			24.5		
압열인장강도(MPa)	0 ~ 1	7.85			7.52		
	1 ~ 2	-			13.2		
	2 ~ 3	17.7			9.81		



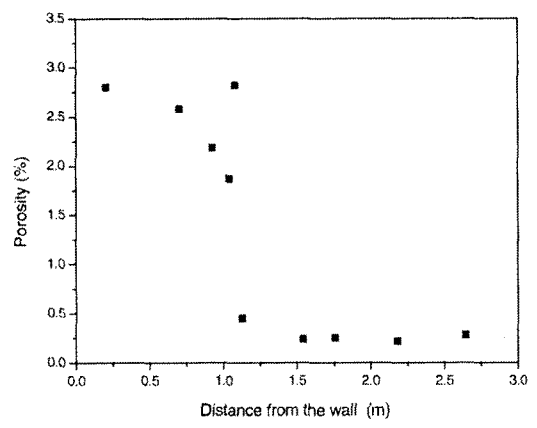
(a) 탄성계수



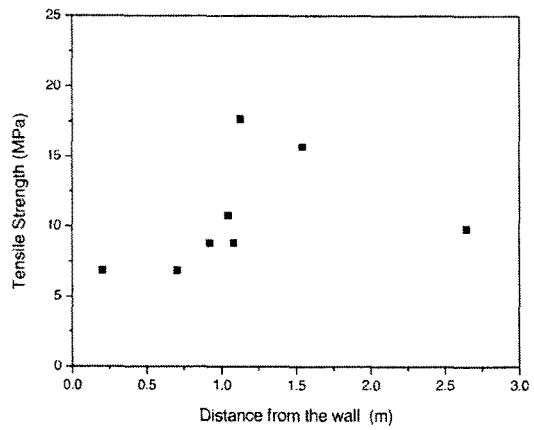
(b) 일축압축강도



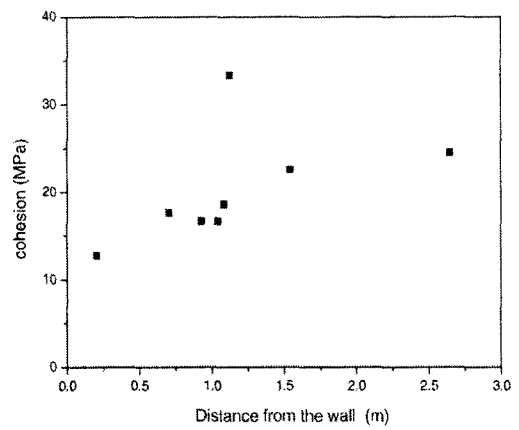
(c) 탄성파속도



(d) 공극률



(e) 압열인장강도



(f) 점착력

그림 3. 발파 후 암석 실내시험 결과

2.2. 암반손상대영향 평가

발파에 의해 변화된 암반의 물성이 터널 주변 암반의 역학적 거동에 어떠한 변화를 일으키는지에 대해 알아보기 위해 2차원 상용 코드인 *FLAC^{2D}* Ver 4.00을 사용하여 모사해 보았다. 모델링에 사용된 터널의 형상은 KURT와 같은 마제형 터널이며, 터널 중심이 지하 100 m에 위치하도록 하였다. 경계 조건으로는 상하, 좌우방향으로 변위를 고정시켰으며 자중에 의한 응력이 주어지도록 하였다. 화강암 반은 등방성 균질 암반으로 가정을 하였으며 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 암반손상대의 범위, 탄성계수, 포아송비, 밀도, 인장강도, 점착력, 내부마찰각을 입력변수로 사용하였으며 사용된 값은 표 2와 같다.

표 2. 암반손상대의 영향 평가 입력변수

입력변수	Case 1		Case 2	
	암반손상대	암반	암반손상대	암반
암반손상대 범위 (m)	1	-	1.5	-
탄성계수 (GPa)	29.3	57.7	41.4	62.1
인장강도 (MPa)	7.50	12.6	10.0	12.8
점착력 (MPa)	15.7	23.1	19.3	23.5
내부마찰각 (°)	53.0	55.8	53.8	57.5
밀도 (kg/m ³)	2590	2680	2640	2670

암반손상대의 범위는 터널벽면으로부터 암반내부로의 깊이를 의미하며 1 m와 1.5 m 두 가지로 나누어 해석을 수행하였고, 탄성계수, 포아송비, 밀도, 인장강도, 점착력, 내부 마찰각의 경우는 실내 암석시험의 결과값 중 절리(joint)가 존재하는 데이터를 제외한 나머지 값들의 평균값을 사용하였다. Case 1에서 암반손상대의 물성값은 실내시험의 결과 중 0~1 m 사이의 결과값의 평균값이고, 암반의 물성값은 1~3 m 사이의 평균값이다. 또한 Case 2에서 암반손상대의 물성값은 0~1.5 m 사이의 평균값이고 암반의 물성값은 1.5~3 m 사이의 평균값이다. KURT에서 수행한 수압파쇄시험의 결과 측압비는 $K = 22.607 \cdot Z^{0.5882}$ 으로 나타났고 심도는 100 m를 가정하여 측압비는 1.5를 사용하였다(권상기, 2005). *FLAC^{2D}*를 사용하여 세 지점(천정부, 측벽부, 바닥부)의 변위, 응력, 그리고 안전계수를 구하였으며 그 결과를 표 3에 나타내었으며, 괄호 안의 숫자는 변화 정도를 백분율(%)로 나타낸 것이다.

암반손상대의 영향을 무시한 경우를 기준으로 하고 암반손상대의 영향으로 암반 물성이 달라진 Case 1과 Case 2를 비교하여 살펴보면, 암반손상대의 영향이 있는 Case 1, Case 2에서 변위가 약 19~55% 정도 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 암반손상대의 영향으로 최대주응력은 약 4~22% 정도 감소하였고, 최소주응력은 6~22% 정도 감소하였음을 알 수 있다. 안전계수에 대해서는 Case 2의 경우 천정부의 안전계수가 1% 정도 증가하지만 나머지 대해서는 3~16% 정도 감소하였다. 안전계수의 크기는 암반손상대를 고려한 경우에도 모두 1이 넘는 것으로 나타났다.

표 3. 암반손상대 영향 평가 결과

		최대주응력(MPa)	최소주응력(MPa)	변위(mm)	안전계수
천정부	기준	8.77 (0)	3.61×10^{-2} (0)	0.12 (0)	3.92 (0)
	Case 1	6.88 (-21.6)	2.82×10^{-2} (-22.0)	0.18 (54.6)	3.73 (-5.0)
	Case 2	7.70 (-12.2)	3.17×10^{-2} (-12.4)	0.15 (32.3)	3.96 (1.0)
측벽부	기준	2.71 (0)	7.93×10^{-2} (0)	0.32 (0)	10.52 (0)
	Case 1	2.21 (-18.5)	6.86×10^{-2} (-13.5)	0.43 (34.1)	9.69 (-8.0)
	Case 2	2.51 (-7.3)	7.49×10^{-2} (-5.6)	0.38 (18.9)	10.21 (-3.0)
바닥부	기준	4.14 (0)	7.53×10^{-2} (0)	0.22 (0)	6.97 (0)
	Case 1	3.73 (-9.8)	6.70×10^{-2} (-11.0)	0.30 (34.8)	5.87 (-15.8)
	Case 2	3.97 (-4.2)	5.97×10^{-2} (-20.7)	0.27 (20.2)	6.56 (-5.9)

2.3. 역학적 민감도 분석

처분장의 건설과 운영기간 동안 역학적 안정성에 영향을 주는 중요 파라미터들을 선정하기 위해 실험계획법의 하나인 부분인자설계(fractional factorial design)법을 사용하여 민감도 분석과 분산분석을 실시하였다. 인자설계(factorial design)는 파라미터의 효과와 파라미터간 상호작용의 효과를 포함한 모든 효과를 추정할 수 있어 많은 분야에서 사용되고 있는 실험계획법이지만 파라미터 수가 증가함에 따라 실험횟수가 기하급수적으로 늘어나는 단점이 있다. 표 4에서와 같이 변수가 7개이며 2수준 실험의 경우에 시행되어야 할 실험의 총 수는 2^7 이 되어 128번을 수행하여야 한다. 이렇게 많은 실험을 할 경우 실험을 수행하는 시간과 결과를 해석하는 데 시간을 많이 소요하게 되므로 의미가 적은 고차의 상호작용을 희생시켜 실험의 횟수를 줄이는 부분인자설계를 이용하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 2^k 인자설계로 1/4 부분인자설계를 사용하여 2^{7-2} 으로 128회 수행에서 32회 수행의 횟수를 크게 줄였으며, 사용된 변수와 입력값은 표 4와 같다.

표 4. 민감도 분석 입력변수

입력변수	암반물성	암반손상대 물성		
		하한값	평균값	상한값
A. 암반손상대 범위 (m)	-	0.5	1.0	1.5
B. 탄성계수 (GPa)	62.11	15.53	31.06	46.58
C. 인장강도 (MPa)	12.75	3.19	6.38	9.56
D. 점착력 (MPa)	23.54	5.88	11.77	17.65
E. 내부마찰각 (°)	58	48	53	58
F. 밀도 (kg/m ³)	2,700	2,500	2,600	2,700
G. 측압비	-	1	1.5	2

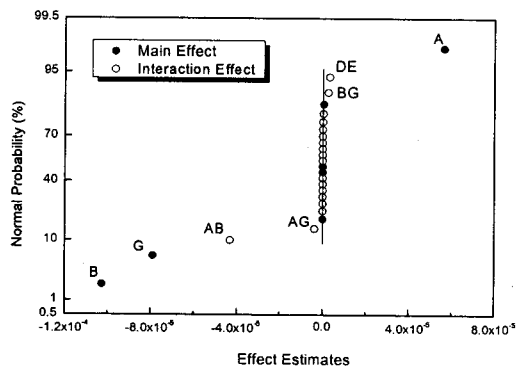
사용된 암반의 물성은 1.5 m 이후의 물성값의 평균값이며, 암반손상대의 물성은 암반물성의 50%를 기준으로 $\pm 25\%$ 의 값을 사용하였다. 암반손상대의 범위, 내부마찰각, 밀도 그리고 측압비의 경우는 현실적으로 50%의 값은 너무 동떨어진 값이기에 물성시험 결과를 근거로 현실적인 값을 입력변수로

정하였다. 암반의 역학적 안정성에 대한 암반 물성의 민감도 분석을 수행하기 위해서 상용 통계프로그램인 NCSS를 이용하였다. 암반의 역학적 안정성에 대한 암반물성의 주 영향(main effect)과 상호작용 영향(interaction effect)을 정규확률지에 도시하면 그림 4~6과 같다. 변수들의 영향값(effect estimates)이 양(+)인 경우 해당 변수가 증가함에 따라 결과값(변위, 응력)도 증가, 반대로 음(-)인 경우 결과값이 감소함을 의미한다. 특히 그림 4~6에 도시된 직선과 멀리 떨어진 변수일수록 변위와 응력에 더 큰 영향을 미치는 변수이다. 민감도 분석과 더불어 분산 분석을 실시하였으며, 분산 분석 결과를 바탕으로 유의수준 0.05에서 영향을 미치는 변수와 변수들간의 상호작용을 분석하여 영향성이 큰 순서로 나타내면 표 5와 같다.

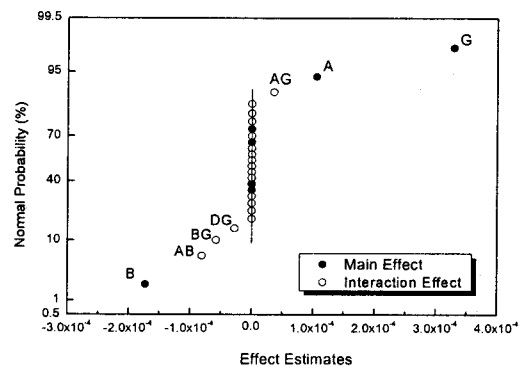
변위에 대한 민감도와 분산분석 결과를 살펴보면, 세 지점 모두 암반손상대의 범위(A)가 증가함에 따라 변위가 증가하는 반면 탄성계수(B)가 증가하면 변위는 감소하는 것으로 나타났다. 측압비(G)의 경우 천정부와 바닥부에서는 측압비(G)가 증가하면 변위는 감소하는 것으로 나타났고, 측벽부에서는 측압비(G)가 증가함에 따라 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 민감도 분석과 분산 분석의 결과를 살펴보면 변위에 크게 영향을 미치는 변수는 탄성계수(B), 측압비(G), 암반손상대의 범위(A)인 것으로 판단된다.

표 5. 분산분석 결과

	천정부	측벽부	바닥부
변위	B> G> A» AB» AG> DE> BG»	G> B» A> AB> BG» AG> DE»	B» A> AB» G»
최대 주응력	G» B» BG> A»	G» B> A» BG> AB»	G» B> BG» A»
최소 주응력	G» B» BG> A»	G» B» BG> A»	B> G» A> BG» F»



(a) 천정부



(b) 측벽부

그림 4. 변위 민감도

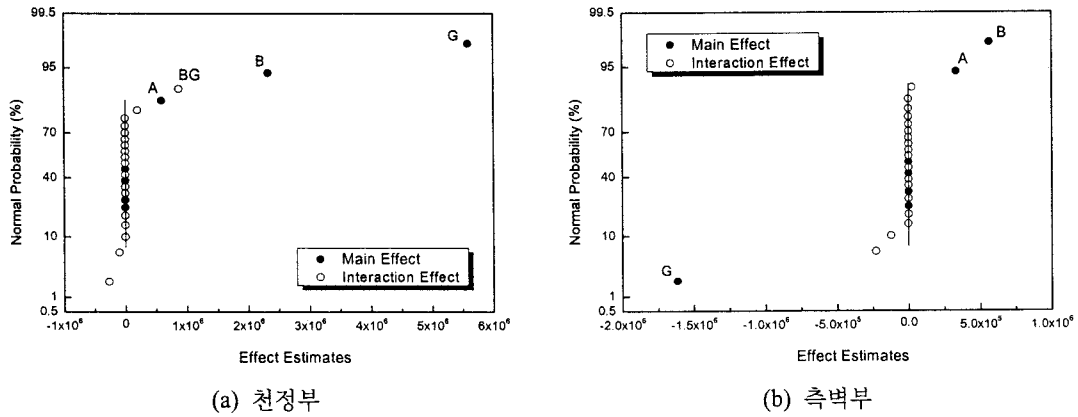


그림 5. 최대주응력 민감도

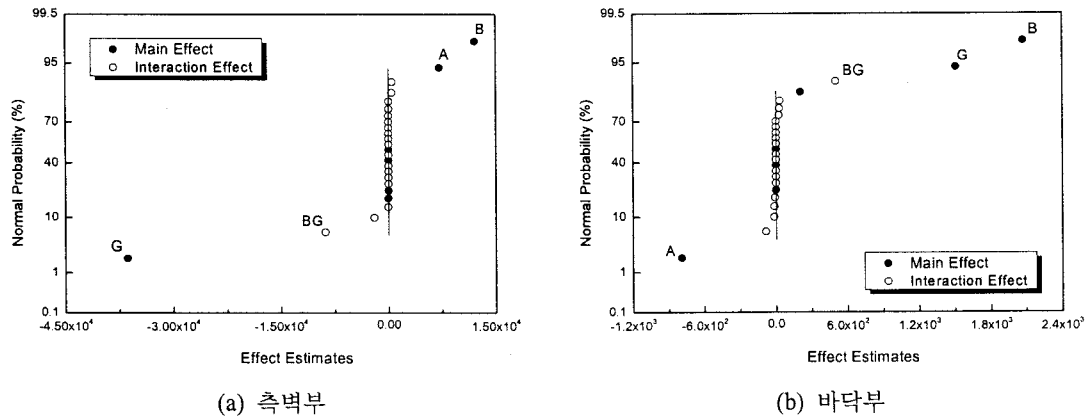


그림 6. 최소주응력 민감도

응력에 대한 민감도와 분산분석 결과를 살펴보면 최대주응력의 경우 암반손상대의 범위(A)와 탄성계수(B)가 증가함에 따라 세 지점에서 모두 최대주응력이 증가하였다. 최소주응력의 경우 천정부와 측벽부에서는 암반손상대의 범위(A)가 증가하면서 최소주응력은 증가하지만 바닥부에서는 감소하는 것으로 나타났고 탄성계수(B)의 값이 증가함에 따라 최소주응력이 세 지점 모두에서 증가하는 것으로 나타났다. 최대주응력과 최소주응력 모두 천정부와 바닥부에서는 측압비(G)가 증가함에 따라 최대주응력과 최소주응력이 증가했지만 측벽부에서는 측압비(G)가 증가함에 따라 감소했다. 측압비가 증가하면 작용하는 측압이 커져 응력값이 모두 증가할 것으로 예상되었지만 측벽부 지점에서는 응력값이 작아지는 것으로 나타났다.

3. 결론

본 연구에서 수행한 실내암석시험의 결과값을 살펴보면 벽면으로부터의 거리 1.1~1.5 m 지점에서 암반물성이 적게는 12%에서 많게는 50%까지 변화하는 것으로 나타났다. 이것은 발파에 의한 굴착으로 KURT의 주변암반이 손상되었을 가능성을 의미하며 암반손상대의 경계가 1.1~1.5 m 정도에 위치하는 것으로 추정될 수 있다. 또한 암반손상대의 형성이 KURT의 주변 암반에 미치는 역학적인

영향성 평가의 결과는 변위가 19~55% 정도 증가하였고, 응력의 경우 4%~22% 정도 감소하였으며 안전계수의 경우 3~16% 정도 감소하였다. 이러한 해석 결과를 바탕으로, 암반손상대의 형성은 궁극적으로 암반 구조물의 역학적 안정성에 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또한 역학적 안정성에 영향을 미칠 것으로 예상되는 파라미터들을 민감도 분석과 분산분석을 실시한 본 결과, 축압비(G), 탄성계수(B), 암반손상대의 범위(A)가 역학적 안정성에 크게 영향을 줄 수 있는 파라미터들로 나타났으며, 그 중 축압비(G)가 가장 큰 영향을 미치는 파라미터인 것으로 나타났다.

4. 감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소의 중장기 과제인 “처분시스템거동실증연구”의 지원에 의해 수행되었으며, 연구를 지원하여 주신 한국원자력연구소에 감사드리는 바입니다.

■ 참고문헌 ■

- 권상기, 조원진, 2005, 원자력연구소 내 지하처분연구시설의 지반 거동예측, 기술보고서, 한국원자력연구소.
- 박정화, 권상기, 최종원, 강철형, 2001, 심지층 처분장의 터널 구조 안정성에 대한 역학적 민감도 분석, 기술보고서, 한국원자력연구소.
- 이희근, 1999, 암석역학, 서울대학교 출판부, 69-78, 189-197.
- 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
- Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, A., Trick, T., Mayor, J.C., 2002, Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology*, 66, 19-38.
- Bossart, P., Trick, T., Meier, P.M., Mayor, J.C., 2004, Structural and hydrogeological characterization of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland), *Applied Clay Science*, 26, 429-448.
- Hou, Z., 2003, Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 725-738.
- Kruschwitz, S., Yaramanci, U., 2004, Detection and characterization of the disturbed rock zone in claystone with the resistivity method, *Journal of Applied Geophysics*, 57, 63-79.
- Sato, T., Kikuchi, T., Sugihara, K., 2000, In-situ experiment on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, Central Japan, *Engineering Geology*, 56, 97-108.
- Tsang, C.F., Beriner, F., Davies, C., 2005, Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays – in the context of radioactive waste disposal, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 109-125.