

'98 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

고준위 폐기물 심지층 처분시설의 구조적 안전성 요소 및 역학적 평가기준 고찰

Mechanical Criteria and Parameters for Stability Analysis for a High-Level Nuclear Waste Repository

권 상기, 최 종원, 강 철형

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

요 약

지하심부에 설치될 고준위 방사성 폐기물 저장시설의 안전성 해석시 필요한 암반의 물성, 불연속면의 영향, DRZ의 영향 등에 대해 고찰하였으며 처분시설의 개념설계단계에서 실시되는 컴퓨터를 이용한 구조적 안전성 해석결과를 평가하는데 필요한 역학적 판단기준들에 대해 정의하였다.

Abstract

Rock properties as well as the influence of discontinuities and DRZ, which should be considered for the analysis of structural stability of a high-level nuclear waste repository in deep deposit, were investigated. Also the mechanical criteria for assessing the results from computer simulations, which are carrying for the repository design, were defined.

I. 서론

방사성 폐기물 처분장의 설계시에는 방사성 핵종이 규정된 기간동안 일정 영역내에 잔류하도록 하기 위해 처분장이 위치하는 암반과 지하구조물의 거동이 수천년 이상 장기적인 관점에서 고려되어야한다. 지하심부에 저장시설을 건설할 경우 낮은 유속과 핵종에 오염된 지하수가 지표에 도달하는 시간이 길다는 장점이 있는 반면, 지하심부에서의 높은 응력으로

로 인해 처분장의 안전성을 확보하는데 어려움이 따른다. 즉, 공동의 굴착후 응력의 재분포 과정에서 응력이 암반의 강도를 초과하는 경우 균열이 발생하게 되고 이는 암반의 기계적 물성을 변화시킬 뿐아니라 암반의 수리전도도를 증가시킴으로써 핵종의 이동을 촉진시키는 문제를 야기한다. 방사성 폐기물을 처분하는 기간 동안 그리고 필요시 폐기물의 회수를 하는 동안 수직터널과 수평터널, 처분공들이 안전하게 유지되도록 설계하기 위해서는 암반의 물성과 심도에 따른 물성의 변화, 현지응력의 영향, 굴착에 따르는 암반의 물성변화 그리고 온도의 영향등을 파악하여야 한다. 이러한 심부 암반의 물성에 대한 이해는 공동의 설계 단계에서 실시되는 컴퓨터 시뮬레이션의 입력자료의 작성과 이를 통해 얻어진 결과를 해석하기 위해서도 필요하다. 본 연구에서는 화강암의 심도에 따른 물성 변화와 공동굴착에 따라 발생하는 DRZ (Disturbed Rock Zone) 의 영향등을 고찰하였으며, 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 비롯한 각종 해석방법에 의해 얻어진 결과들을 비교, 평가하기 위해 지하구조물의 역학적 안전성 관점에서의 평가기준들에 대해 소개하고자 한다.

II. 암반의 물성

지하구조물의 역학적 안전성을 평가하기 위해서는 암반의 물성, 불연속면의 영향, 온도의 영향, 지진의 영향들이 고려되어야한다. 본 연구에서는 현재 한국형 고준위 방사성 폐기물 처분장 모암중의 하나로 연구되고 있는 화강암의 물성을 중심으로 논의하고자 한다.

1. 화강암의 물성

화강암은 석영과 장석을 주성분으로 하는 단단한 결정질 암석으로서 높은 강도와 낮은 공극률을 보인다. 화강암의 물성에 대해서는 스웨덴과 핀란드등에서 많은 연구가 있어왔다 (Heikkila and Hakala, 1998). 표 1 은 스웨덴에서 주로 intact 화강암 시험편을 이용하여 실험실 실험을 통해 얻어진 화강암 물성의 범위와 함께 현재 한국형 고준위 방사성 폐기물 처분장 연구를 위해 KAERI 에서 사용되고 있는 물성을 보여주고 있다. 실제 암반에는 단층, 절리 등 불연속면이 존재하기 때문에 intact 시험편에서 얻어진 물성을 해석에 이용할 경우 많은 오차를 보인다. 예를 들어 암석강도의 경우 현지암반의 강도는 실험실에서 측정된 값의 절반 정도이고 (Johansson et al., 1993), 암반의 변형계수 또한 실험실에서 얻어지는 변형계수와는 현저히 다른 값을 가진다. 따라서 보다 정확한 공동의 안전성 해석을 수행하기 위해서는 처분장 주변에 위치하게될 불연속면을 중요한 인자로서 고려하여야 한다. 특히 불연속면의 발생빈도와 틈간격은 수리전도도에 큰 영향을 미치기 때문에 near-field 의 해석에 중요하다. 표 2 는 화강암에 존재하는 불연속면의 물성치들을 보여주고 있다.

표 1. Intact 화강암의 물성

암석물성	단위	범위	KAERI 사용값
Young's modulus	GPa	40 - 75	60
Poisson's Ratio		0.2 - 0.3	0.25
마찰각		35° - 45°	38
밀도	kg/m ³	2600 - 2800	2700
단축압축강도	MPa	150 - 250	200
thermal conductivity	W/m °C	2.8 - 3.6	3.2
Specific heat	KJ/m ³	2000 - 2400	2200

표 2. 화강암내 불연속면의 물성

물성	단위	범위
Normal stiffness	GPa/m	100 - 3000
Shear stiffness	GPa/m	0.1 - 50
마찰각		20° - 40°
Cohesion	MPa	0.5 - 4.0
Joint roughness coefficient		2 - 15

2. 심부암반의 물성변화

고준위 방사성 폐기물 처분시설의 심도는 대략 500 m - 1000 m 로 고려되고 있는데, 이러한 심도에서의 암반은 지표면 부근에서의 암반물성과 현저히 다른 물성을 보여준다. 즉 심도가 증가함에 따라 균열의 발생빈도나 균열사이의 틈간격, 수리전도도 등에 변화를 보이게 된다. 따라서 지하 폐기물 처분장의 장기적인 거동을 보다 정확히 예측하기 위해서는 심도에 따른 암반물성의 변화를 고려하여야 한다.

가. 균열의 발생빈도와 틈간격 : 심도가 증가함에 따라 지압이 증가함으로써 일반적으로 균열의 발생빈도는 감소하는 경향을 보인다. 스웨덴의 경우 심도 500 m 화강암에서의 균열사이의 간격은 1- 10 m로 나타난다. 균열의 빈도와 함께 균열의 틈간격도 심도에 영향을 받게 된다. 즉 심도가 증가함에 따라 증가하는 지압의 영향으로 균열의 틈간격은 감소하게 된다. Bianchi and Snow (1968) 는 화강암에 설치되는 10여곳의 댐, 터널에서 심도에 따른 균열의 틈간격을 측정하여 다음 식으로 심도에 따른 균열의 틈간격을 수식화하였다.

$$t=0.2(1-\frac{Z}{20+Z}) \quad (1)$$

여기서 t 는 균열의 틈간격 (mm)을 Z 는 심도 (m)를 나타낸다. 즉 심도가 증가함에 따라 균열의 틈간격은 비선형적으로 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다.

나. 수리전도도의 변화: 심도가 증가함에 따라 균열의 빈도와 균열사이의 틈간격이 감소하게 되고 따라서 수리전도도는 감소하게 된다. 만약 균열의 틈간격이 10^{-5} m 에서 10^{-4} m 로 증가할 경우 이에 따른 수리전도도의 증가는 약 1000 배로 나타난다 (Pusch, 1994). 심도에 따른 수리전도도의 변화는 Barbreau (1985) 등에 의해 다음 식으로 표시되었다.

$$K=1.07 Z^{-3.95} \quad (2)$$

여기서 K 는 수리전도도 (m/s) 를, Z 는 심도 (m) 를 나타낸다.

3. 불연속면의 영향

처분장의 인접한 곳에 위치한 단층은 지하수의 통로 역할을 할뿐만 아니라 공동주위의 응력분포에 큰 영향을 미치게 된다. 절리면은 암반의 수리전도도를 증가시키며 또한 암반의 열전도도에도 영향을 미친다. Franklin 과 Dusseault (1989) 의 연구에 따르면 절리면을 포함하는 암반의 열전도도는 intact 암석에 비해 약 3.5 - 2.5 W/m · K 감소하며 절리의 거칠기 (roughness) 가 증가함에 따라 그리고 절리면에 작용하는 수직응력이 감소함에 따라 열전도도는 감소하는 경향을 보인다.

4. 온도에 의한 화강암의 물성변화

고준위 폐기물에서 발생하는 열은 폐기물 처분 직후 부터 수백년 동안 증가하다가 수천년의 기간을 두고 서서히 감소하는 경향을 보이게 된다. 이러한 발생열에 의해 지하 처분장 주변의 온도가 증가하고 이는 역학적 물성변화와 열팽창의 효과를 가져온다. 암반에 열이 가해질 경우 팽창에 의해 처분장 주위에서 발생하는 열 응력은 20 - 30 MPa 정도로서 암석에 균열을 일으키게 되며 (Johansson et al., 1993), 이에 따라 암석의 강도, 탄성계수 등의 역학적 특성은 저하되고, 투수계수는 증가하게 된다. 또한 열의 발생은 물의 점성도를 낮추어 수리유동에 영향을 미치게 된다. 예를 들어 온도가 10 °C 에서 80 °C 로 상승할 경우, 물의 점성도는 1/4 로 감소하게 된다 (Johansson et al., 1993).

5. 시간에 따른 암반 물성의 변화

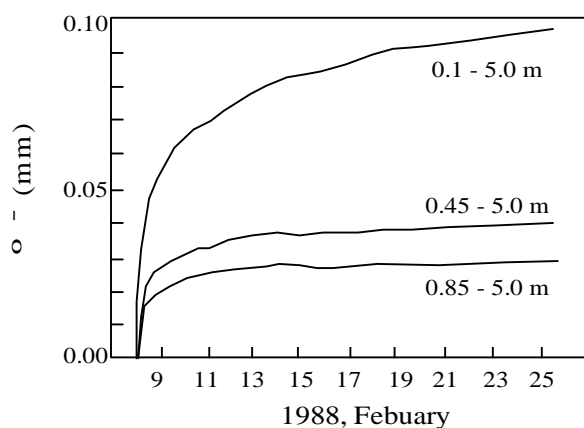
단단한 결정질 암반에서는 공동 굴착후 시간의 경과하면서 균열이 발생하게 된다. 이러한 시간 의존적인 균열의 발생에 의해 암반의 강도는 감소하게 된다. 이러한 시간에 따른 강도의 변화를 측정하기 위해 Schmidtke 와 Lajtai (1985) 는 화강암 URL 에서 장기간 재하실험을 실시하였다. 이 실험을 통해 하중을 가한 후 1년후에는 초기 강도의 약 25 % 가 감소하고, 10년 후에는 30 % 가 감소하며, 100년 후에는 35 % 의 감소가 있음을 보였다.

III. 처분시설 설계의 역학적 측면에서의 평가기준

고준위 폐기물 처분후 필요시 회수해야 하는 기간 (예, 폐기물 처분후 50년간) 동안 지하 처분장은 안전한 상태를 유지하여야 한다. 지하처분장의 안전성을 장기간 유지하기 위해서는 다음 요소들을 고려한 설계가 필요하다.

1. 변위와 변위 속도

화강암과 같이 강도가 높은 광물로 구성된 치밀한 암석의 경우에 일반적으로 파괴가 일어날 때까지 탄성적인 거동을 보인다고 가정된다. 하지만 Martin (1988) 은 화강암도 시간



의존적인 변형거동 (creep)을 한다는 것을 보였다. 그림 1 은 캐나다에서 화강암에 설치된 353 m 에 위치한 수직터널 측정된 시간 의존적인 변형거동을 보여주고 있다 Martin (1988). 이와 같이 공동주위 암반은 시간의 경과에 따라 점진적인 파괴와 함께 소성변형을 보이게 되는데 이들은 공동의 안전성 평가에 중요한 역할을 한다.

Creep 변형거동을 표현하기 위해 가장 널리 이용이 되는 식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_c = A \sigma^n \exp\left(-\frac{U}{RT}\right)$$

$$\dot{\epsilon} = A(\sigma_1 - \sigma_3)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

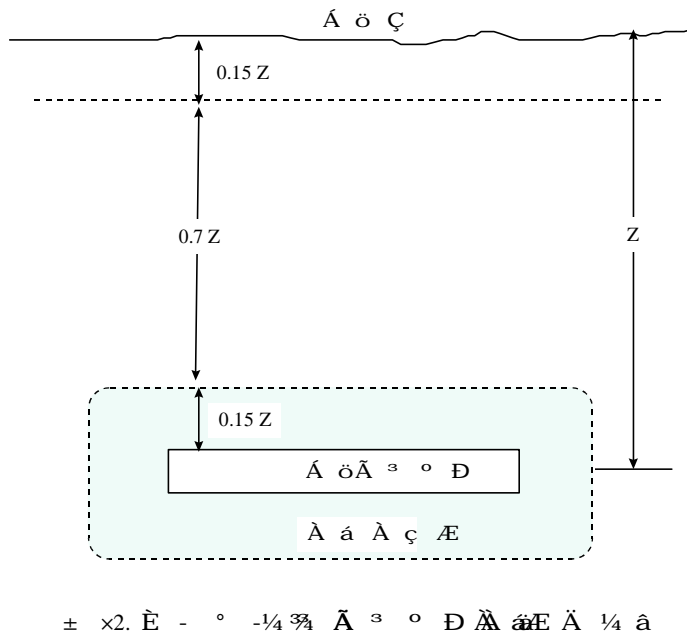
여기서 $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도 (/sec); A (MPa⁻ⁿ/sec) 와 n 은 물질의 고유 상수; σ_1 과 σ_3 는 주응력 (MPa); Q 는 activation energy (kJ/mol); R 은 가스상수 (8.314 J/mol/K); T 는 온도 (°K)를 나타낸다. 위 식에 따르면 적용응력이 클수록, 온도가 높을수록 2차 creep 의 변형률 속도가 증가함을 알 수 있다. Martin (1988) 은 시간 의존적인 변형거동이 암반 내에 존재하는 미소균열 (microcrack) 이 확장되거나 새로운 미소균열이 발생하는 개념으로 표현하고자 하였다. 이와는 별도로 응력이 강도보다 높은 곳에서 암석의 파괴가 일어난다고 보고 파괴가 발생하는 곳에서의 변형계수를 감소시킴으로써 암반의 시간 의존적인 거동을 표현하기도 한다 (Nishimatsu et al., 1989). 이러한 creep 변형은 지하구조물의 장기적인 안전성을 해치며 또한 수리전도도를 증가시키는 결과를 낳기 때문에 공동의 설계시 어느 정도 이상의 creep 변형이 발생하지 않도록 해야한다. 미국의 경우 응회암 (tuff) 층에 설치되는 방사성 폐기물 저장시설의 변위가 100년 동안 15 cm를 넘지 않아야 한다고 규정하고 있다 (Hardy and Bauer, 1993). 또한 변위속도가 클 경우 공동의 안전성에 손상이 될 수 있기 때문에 주요 터널의 경우 변위속도가 1 mm/year를 넘지 않도록 하고 기타 처분터널을 비롯한 기타 터널의 경우 변위속도가 3 mm/year를 넘지 않도록 설계를 하도록 하고 있다 (Hardy and Bauer, 1993).

2. 현지응력

현지응력의 분포는 공동의 거동에 중요한 영향을 미치기 때문에 공동을 안전하게 설계하기 위해서는 현지응력을 정확하게 파악하는 것이 필요하다. 지하 암반에 인공구조물이 만들어지면 기존의 평형상태에 있던 응력은 재분포되며 응력의 재분포시 특정 지점에 과도한 응력이 집중되는 경우 암석은 파괴된다. 암반의 파괴는 암석파괴를 발생시키는 응력에 따라 압축, 인장, 전단파괴로 나눌 수 있다. 만약 터널 축방향으로 수직인 면에 작용하는 최대 최소 주응력의 비가 3 이상일 경우 인장력이 발생하게 는데 (Pusch, 1994), 암석의 인장강도는 압축강도나 전단강도에 비해 매우 낮기 때문에 낮은 인장력의 발생에 의해서도 공동 주위의 암반은 파괴된다. 공동 굴착후 최대주응력이 압축강도보다 높을 경우 압축력에 의해 깨어지는 암석편이 터널 표면에서 떨어져 나오게 되거나 경우에 따라 암석이 폭발적으로 붕괴되는 rock burst가 발생하기도 한다. 또한 최대주응력과 최소주응력의 차이에 비례하는 전단응력이 전단강도이상일 때는 전단파괴가 발생하게 된다. 이와 같이 공동의 안전성을 평가하기 위해서는 암석의 강도와 공동 굴착후 발생하는 응력을 고려하여야한다. 스웨덴의 기준을 따를 경우 그림 2 에서와 같이 지하처분장과 지표면 사이에 위치하는 70%의 암반에서 암석강도에 대한 응력의 비가 1 이하로 유지되도록 해야한다 (Scott, 1983). 또한 공동에서부터 1.5 m 에 위치하는 암반에서는 응력이 암석강도의 절반이하로 유지되도록 해야하며 (Dames 와 Moore), Pillar 의 안전성을 확보하기 위해서는 pillar에서도 응력이 암석강도의 절반이하로 유지되도록 해야한다 (Scott, 1983).

3. 지진

지진에 의해서 지하공동의 안전성은 손상을 받을 수 있기 때문에 지하공동의 설계시 지진 파의 영향을 고려하여야한다. 지진에 의해 터널에 생기는 손상은 불연속면을 따라 발생하



는 변위와 인장, 압축응력의 증가에 의한 손상으로 나눌 수 있다 (Emery 와 Joshi, 1980).

Dowding 과 Rozen 은 지진파의 최대가속도가 0.2 g 보다 낮은 경우에 지하 공동에 손상이 생기지 않고 최대가속도가 0.2 g에서 0.4 g 사이의 지진파의 경우 국부적인 손상만이 발생하여야 한다는 기준을 제시하였다. 여기서 g 는 중력 가속도를 나타내고, 국부적인 손상이란 새로운 균열의 발생과 소규모 암석의 낙하를 의미한다.

4. 손상대 (DRZ)

공동의 굴착으로 인해 발생

하는 균열이나 파괴면의 영향으로 암반의 물리적, 화학적 물성이 변화된 영역을 Disturbed Rock Zone (DRZ) 이라 한다. 발파에 의해 공동이 굴착되는 경우 발파공 주위에서 발생하는 압력은 10 GPa 이상으로서 이 폭발압에 의해 발파공 주위에는 방사상의 균열이 발생하고 기존의 균열들이 팽창되면서 손상대를 만들게 된다. DRZ 의 크기는 현지응력과 암반 물성, 채굴법, 그리고 공동의 형태에 의해 결정된다. Tunnel Boring Machine (TBM) 을 이용한 기계식 채굴법의 경우 DRZ 의 크기는 발파에 의한 DRZ 보다 훨씬 작게 나타난다. 처분공의 경우 직경이 작고 보아링으로 굴착되기 때문에 DRZ 는 매우 작게 나타난다. 스웨덴의 VLH 개념에 따라 보아링으로 굴착되는 처분공의 경우 예상되는 손상대는 처분공 주위 약 30 cm 로 보고되고 있다 (Pusch, 1994). 일반적으로 공동의 바닥면에 위치하는 발파공에는 공동천장에서보다 많은 폭약을 설치하기 때문에 공동의 바닥을 따라 DRZ는 크게 형성된다 (Tolppanen, et al., 1995).

현무암층에 설치된 터널의 경우 DRZ는 터널벽면으로 부터 약 1 m - 1.5 m 에 위치하며 이 영역에서의 암반물성은 손상되지 않은 암반과 전혀 다른 물성을 보이게 된다. Pusch (1994) 에 따르면 DRZ 암반의 탄성계수는 손상되지 않은 암반에 비해 약 1/10 정도이며 암반의 공극률은 약 1 % - 5 % 로 나타난다. 또한 DRZ 에서의 수리전도도는 약 100 - 10000 배 높게 나타난다. 이와 같이 DRZ 의 발생은, 파쇄된 암석편이 낙하되어 인명이나 장비에 손상을 줄 뿐아니라 암반의 물성, 수리전도도 등에 지대한 영향을 미치기 때문에 DRZ 를 가급적 줄여주는 것이 유리하다.

작업자와 기기의 안전을 위해서는 주요 터널에서는 낙석 가능성 전혀 없어야 하며 기타 터널에서는 연간 300 m 구간 내에서 낙석의 무게가 5 톤 이하로 유지되어야 한다. 또한 각 낙석의 무게는 2 톤 이하여야 한다 (Hardy and Bauer, 1993). 이와 같이 DRZ 의 존재는 공동의 거동과 안전성, 핵종의 이동, 온도의 분포 등에 큰 영향을 미치기 때문에 방사성 폐기물 처분장의 평가에 반드시 포함되어야 한다.

5. 지표면 변위

공동의 굴착후 발생하는 지반침하하는 지하수의 유동을 변화시킬 뿐만 아니라 지표구조물에 손상을 입히기 때문에 설계단계에서 이를 고려하여야한다. 고준위 폐기물 처분장의 경우 고준위 폐기물에서 발생하는 열에 의해 암반은 팽창하게 되고 이에 따라 지표면이 상승하는 효과가 발생하게 된다. 열팽창에 의해 지표면은 수 cm 상승하게된다 (Johansson et al., 1993). 따라서 최대 지반침하하는 공동굴착후 암반에서의 온도가 최대치에 도달하기 전에 일어날 것으로 예상된다. 스웨덴의 경우 지표면의 수직변위가 3 m 를 초과하지 않도록 규정하고 있다 (Scott, 1983).

IV. 결론

본 연구에서는 지하 심부에 위치하게될 고준위 방사성 폐기물 처분장을 안전하게 설계하기 위해 고려되어야할, 암반의 물성, 현지 응력, 심도와 온도의 영향, 그리고 손상대의 영향 등을 고찰하였으며 또한 심지층처분장의 역학적 안전성을 평가하기 위한 기준들에 대해 논하였다. 이를 통한 결론은 다음과 같다.

- . 심도에 따른 물성변화를 고려한 해석이 필요하다. 즉 심도가 증가함에 따라 응력뿐 아니라 암반의 물성도 변화하기 때문에 공동설계의 적합성을 평가하기 위한 해석에서는 이러한 암반물성의 심도에 따른 변화를 고려하여야 한다.

- . 현재 방사성 폐기물 처분장의 컴퓨터 시뮬레이션에서는 암반을 탄성체로 가정한 해석이 가장 널리 이용되고 있다. 하지만 실제 암반에서는 공동주위에 발생하는 DRZ 의 영향과 불연속면을 따른 변위 등으로 인해 그림 1 에서 보는 것과 같이, 암반은 시간 의존적인 거동을 보이게 된다. 따라서 방사성 폐기물 처분장의 장기적인 안정성을 보다 정확히 예측하기 위해서는 공동주위 DRZ의 영향을 고려한 해석이 필요하다.

- . 지하구조물의 역학적 안전성 평가시 필요한 평가기준 들은 표 3 에 정리하였다.

표 3. 지하구조물의 역학적 안전성 평가시 필요한 평가기준

항목	평가 기준
내공변위	100년 동안 15 cm 이하
내공변위 속도	주요 터널 : 1 mm/년 기타터널 : 3 mm/년
낙석	< 총 5 톤/300 m/년 < 최대 2 톤
응력 / 강도	. 저장소와 지표면 사이 70% 의 암반에서 1 이하. . 공동에서부터 1.5 m 에 위치하는 암반에서는 0.5 이하. . Pillar 에서는 0.5 이하.
지진	. 0.2 g 이하에서 손상없음 . 0.2 - 0.4 g 에서 소규모 손상
지표면 변위	< 3 m

이 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- Barbreau, A., Brereton, N.R. and Peaudecerf, P. 1985, A study of the characteristics of very deep granite: Test in underground laboratories and using boreholes, Radioactive waste management and disposal, Cambridge Univ. Press, New York, pp523-533.
- Bianchi, L. and Snow, D.T. 1968, Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures, *Annals of Arid Zone*, 8, (2), 231-245.
- Emery, J.J. and Joshi, V.H. 1980, Seismic response of underground openings, 13th Canadian Rock Mechanics Symp., Underground rock engineering, Toronto, Ontario, 177-180.
- Franklin, J.A. and Dusseault, M.B. 1989, *Rock Engineering*, McGraw-Hill Pub. Co. New York.
- Hardy, M.P. and Bauer, S.J. 1993, Radioactive waste repository design, *Compressive rock engineering*, 465-499.
- Heikkila, E. and Hakala, M. 1998, Laboratory testing of Kivetty granite in borehole KI-KR10, Working Report 98-21e, Finland.
- Johansson, E. et al., 1993, Rock mass behaviour around a nuclear waste repository in hard crystalline rock - overview based on numerical modelling, Work Report, TEKA-93-02.
- Martin, C.D. 1988, Shaft excavation response in a highly stressed rock mass. Proceedings of the OECD workshop on excavation response in deep radioactive waste repositories-Implications for Engineering design and Safety Performance, Winnipeg, pp331-340.
- Martin, C.D. 1989, Failure observations and in situ stress domains at the underground research laboratory, *Rock at great depth*, A.A.Balkema, Rotterdam, vol 2, 719-726.
- Nishimatsu, Y., Okubo, S. and Fukui, K. 1989, computer modelling of the convergence of mine roadway at great depth, *Rock at great depth*, A.A.Balkema, Rotterdam, vol 2, 605-612.
- Pusch, R. 1994, *Waste disposal in rock*, Elsevier, Amsterdam.
- Saini, G.S. and Dube, A.K. 1989, Severe tunnel problems in young Himalayan rocks for deep underground opening, *Rock at great depth*, A.A.Balkema, Rotterdam, vol 2, 677-685.
- Schidtko, R.H. and Lajtai, E.Z. 1985, Technical note: The long-term strength of Lac du Bonnet granite. *Int. J. of Rock Mech. and Mining Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22, No. 6, 461-465.
- Scott, J.A. 1983, Limits on the thermal energy release from radioactive wastes in a mined geologic repository, Technical report ONI-4.
- Tolppanen, P. et al., 1995, Rock mechanical analysis of in situ stress/strength ration at the TVO investigation sites Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Co., Report YJT-95-11.