

캐나다 Underground Research Laboratory 건설을 위한 조절발파기법의 적용

권상기¹⁾, Gregory W. Kuzyk²⁾

Controlled Blasting Technique Applied to the Construction of the Canada Underground Research Laboratory

Sang-Ki Kwon and Gregory W. Kuzyk

Abstract : The Korean Atomic Energy Research Institute is currently planning the construction of an Underground Research Tunnel to carry out research and development related to the disposal of high-level wastes from nuclear reactors used to generate electrical power. This paper discusses the excavation methods used to construct the Canadian Underground Research Laboratory and their application in planning for the construction of a similar underground laboratory and eventually an underground repository for high-level wastes in Korea.

Key words : controlled blasting, long-round blasting, URL, repository

초 록 : 한국원자력연구소는 현재 국내 원전에서 발생하는 고준위폐기물의 처분과 관련된 연구개발을 위해 지하연구시설을 계획 중에 있다. 본 논문은 캐나다 URL 에서의 건설에 적용된 굴착기법과 향후 국내의 유사한 지하연구시설과 향후에 추진될 고준위폐기물 처분장에 대한 적용에 대해 논의하고자 한다.

핵심어 : 조절발파, 장공발파, URL, 처분장

1. 서 론

고준위 방사성 폐기물 처분장은 지하 심부의 암반에 건설하는 것이 현재 가장 안전하며 합리적인 방안으로 전세계적으로 받아들여지고 있다. 국내에는 현재 19기의 원자력발전소(경수로 15기, 중수로 4기)가 운영 중에 있으며 전기 생산량의 약 40%를 차지하고 있다. 한국원자력연구소에서는 원전 운영을 통해 발생하는 고준위폐기물의 연구 처분을 위한 중장기 연구개발을 수행하고 있다. 한국의 고준위폐기물 처분개념에 따르면 처분용기에 담겨진 사용후핵연료들은 지하 수 백 미터에 위치하는 결정질 암반에 처분되어진다. 방사선 붕괴열이 발생하는 36000톤에 달하는 사용후핵연료를 안전하게 처분을 위해서는 지하 4평방 킬로미

터의 면적이 필요하며 처분터널과 접근터널, 수직갱을 포함한 터널의 총 연장은 100km 이상이 될 것으로 예상된다. 지상과 지하를 연결하는 수직갱과 경사터널, 처분터널과 진입터널의 대부분은 발파기법에 의해 굴착될 것이다(강철형 등, 2000). 모든 사용후핵연료를 처분하기 위해서는 수 십년의 운영기간이 필요하며 따라서 처분터널의 굴착과 운영이 동시에 진행되어야 할 것이다. 처분장의 건설, 운영 기간 중 그리고 폐쇄 후의 처분장 역학적, 수리적 측면에서 암반의 안정성을 확보함으로써 방사성 핵종의 차폐 성능을 확보하기 위해서는 지하수와 핵종의 이동로를 제공할 수 있는 여굴을 최소화할 수 있으면서도 효과적인 발파 기법의 적용이 필요할 것이다.

캐나다에서는 22개의 중수형 원자로(CANDU) 중 17기가 운영되고 있으며 전체 전력의 약 17%를 생산하고 있다. 원자로에서 발생하는 CANDU형 사용후핵연료를 처분할 부지는 아직 정해지지

1) 한국원자력연구소

2) Atomic Energy of Canada Limited, Canada

접수일 : 2005년 5월 4일

않았으나 캐나다 순상지의 적당한 화강암반에 처분장을 건설하는 것이 우선적으로 고려되고 있다. 캐나다 순상지는 Fig. 1에서와 같이 수백만 평방킬로미터의 면적으로 캐나다 전체 국토의 상당 부분을 차지할 정도로 넓게 분포하고 있다. 캐나다에서 심지층 처분(deep geological disposal)방안이 채택된다면 처분장은 500-1000m 사이의 심도에 위치하게 될 것이다.

캐나다 원자력사(AECL)에 의해 건설된 지하연구시설(Underground Research Laboratory, URL)은 처분기술 개발 및 안전성 평가에 핵심적인 역할을 한다(Simmons and Soonawala, 1982). URL은 캐나다 Manitoba 주 Winnipeg시 북동 방향 110km에 위치하는 Lac du Bonnet 마을 인근의 지하 450m에 건설되어 있다. 이 지역의 암반은

캐나다 순상지에서 대표적으로 나타나는 입자가 거친 편마암질 화강암이다. URL에서는 다음 내용의 연구/개발 및 시연이 실시되었다.

- 지표 및 지하 지질 특성 규명
- 용질 이동, 지하수 화학, 미생물 관련 연구
- 온도 및 시간의존적 변형거동에 관한 분석 및 암반의 파괴 특성 연구
- 조절발파 기법 및 암반 손상 평가
- 점토질 물질과 콘크리트를 이용한 밀봉재의 개발 및 성능 평가

위와 같은 목적 달성을 위해 URL에서는 Table 1에서와 같은 33건의 실험이 실시되었으며 다양한 현장 실험을 위한 연구용 터널들이 건설, 운영되었

Table 1. URL program of experiments

<p><u>Solute Transport</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • in Highly Fractured Rock (HFR) • in Moderately Fractured Rock (MFR) • Quarried Block Radionuclide Migration Experiment (QBRME) • In Situ Diffusion Experiment • EDZ Solute Transport Test • Recharge Infiltration Experiment (RIEX) • URL Hydrogeological Monitoring • JAERI Rockmass Experiment <p><u>Materials and Sealing Studies</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Buffer/Container Experiment (BCE) • Isothermal Buffer-Rock-Concrete Plug Interaction Test (ITT) • Fracture Zone Grouting Experiment • High Pressure Grouting Simulator • Large Concrete Blocks • Light Backfill Placement Trials • Seal and interface evaluation / effect of salinity (SEAS) • Buffer-coupon long-term test (BCLT) • Dedicated microbial borehole and microbial studies • Concrete-rock interface study (CRIS) 	<p><u>Excavation Damage/Excavation Stability</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • In situ stress measurement program and stress characterization in deep boreholes and fractured rock • Room 209 Excavation Response Test • ANDRA Engineered Blast Feasibility Study • Mine-by Excavation Response Test • Room 209 Connected Permeability Test • Heated Failure Tests (HFT) • Blast Damage Assessment Study (BDA) • Mine-by Connected Permeability Test • Excavation Stability Study (ESS) • Thermal-Hydraulic Experiment (THE) • Thermal-Mechanical Stability Study (TMSS) <p><u>Multi-disciplinary</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • URL Characterization Program • Tunnel Sealing Experiment (TSX) • Composite Seal Experiment (CSE) • Engineering Design of Repository Sealing Systems (ENDRES)
--	---

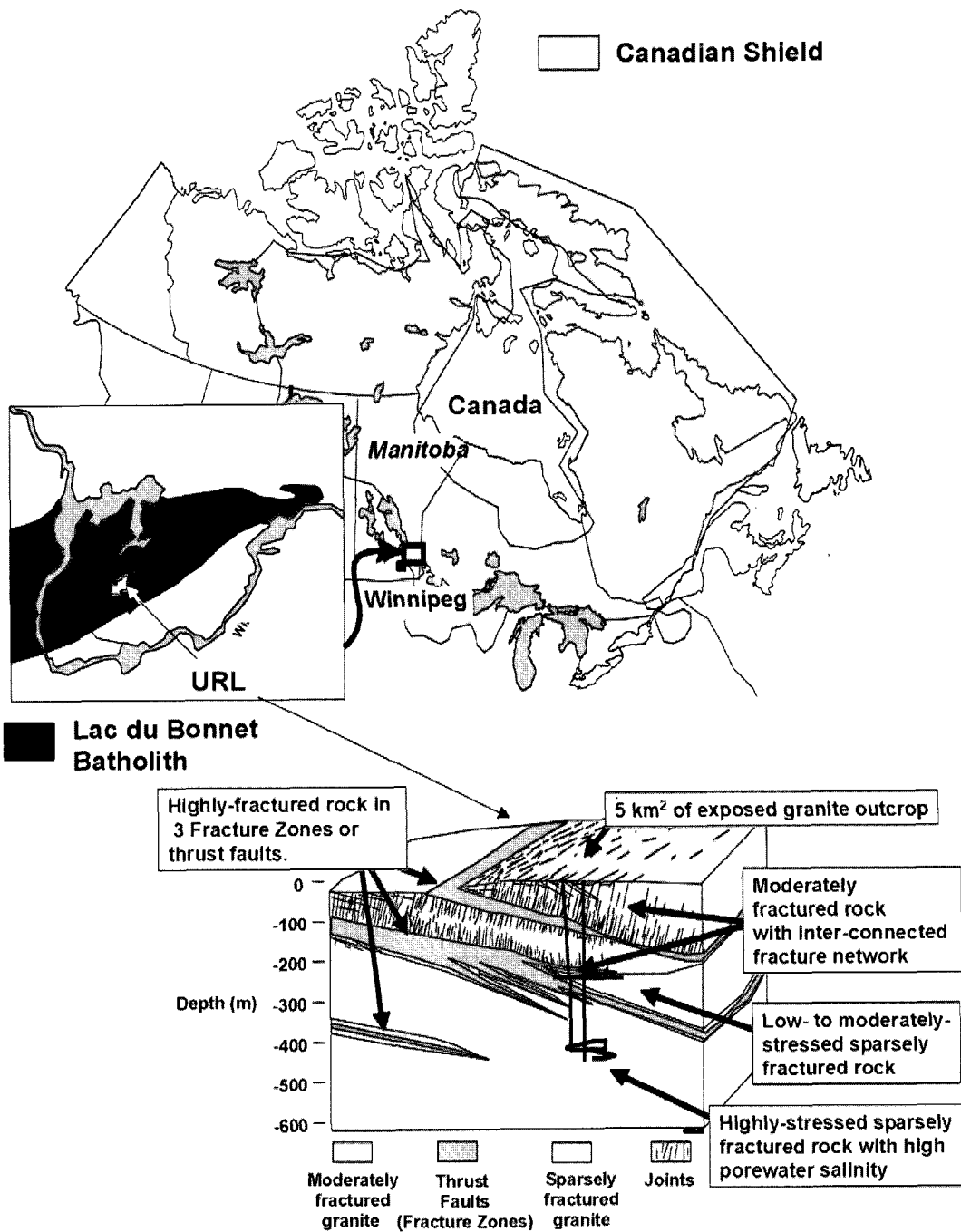


Fig. 1. The location of the URL within the Canadian Shield and the geologic setting of the URL.

다(Chandler, 2003). URL 에 있는 대부분의 터널과 수직갱은 발파 기법을 통해 굴착되었다. 터널의 경우, 초기 단계에서는 굴진장 2.4m 의 단계적 굴착법(pilot & slash method)이 사용되었으나 후기 굴착 단계에서는 굴진장 3m 이상의 전면 굴착법을 적용한 조절발파에 의해 터널 굴착이 이루어졌다. 특히 굴진장이 8m 이상이 되는 전면 발파 기법의 적용 가능성을 연구하기 위한 발파 작업이 실시되기도 했다. 그 밖에도 환기 터널의 굴착을 위한 raise boring 법, 터널의 연구 목적에 따라 기계식 굴착법이 적용되기도 했다. 암반의 손상 연구를 위한 터널의 굴착에 적용된 hydraulic rock splitting 법에서는 직경 44mm 의 시추공을 1m 깊이로 터널면을 따라서 천공한 후, 압력을 작용시켜 암석을 절단하였다(Onagi et al, 1992). 처분용기를 거처할 처분공의 굴착 기술 개발을 위한 직경 1.2m, 5m 깊이의 수직 처분공 굴착에는 워터젯(water jet) 기술이 이용되었다(Kjartanzon et al., 1989). 본 연구에서는 지하 심부 결정질 암반에 위치하는 캐나다 URL 에서의 발파 기술과 관련된 경험을 통해 향후 국내 처분장에서의 적용 방안에 대해 논하고자 한다.

2. 캐나다 URL 부지 특성

Fig. 1에서와 같이 URL 부지에는 여러 개의 저경사도 주향이동 단층 파쇄대가 위치하고 있다. URL 의 건설 전후에 실시된 지질 조사 결과 파쇄대(fracture zone)를 경계로 심도의 증가에 따라 암반의 균열은 감소하는 것으로 나타난다(Everitt et al., 1990). 이러한 지질 구조의 영향으로 인해 부지의 현지응력분포는 특징적 변화를 보여준다. 현지응력 측정을 위한 수압파쇄 시험이 수직갱의 굴착전인 1981년 80회에 걸쳐 실시되었다(Doe, 1989 ; Doe, 1989 ; Thompson and Chandler, 2001). 터널 굴착 후에는 overcoring 기법을 이용한 현지응력 측정이 1000회 이상 실시되었다. 시험 결과 Fig. 2에서 보듯이 지표에서 파쇄대가 위치한 270m 까지는 일정하게 증가하는 경향을 보이다가 파쇄대를 지나면서 수평 응력이 갑자기 증가하는 것으로 나타났다(Martin, 1989). 파쇄대 아래쪽의 균열이 거의 없는 암반에서는 최대 수평 응력이 45-60MPa로서 자중에 의한 수직 응력 보다 4-5.5 배 더 큰 것으로 나타났다. 균열이 거의 발견되

지 않는 420m 심도에서는 해수보다 염도가 약 3 배 높은 고염도의 공극수(pore water)가 유출되었다(Gascoyne, 2004). 이러한 부지 조건에 고려하여 URL 에서는 다음 5개의 시험 구간을 나누고 적합한 현장 시험을 실시하였다.

- (1) 5 km² 의 노두를 가지는 지표면 : URL 건설에 따른 수두변화를 관측하기 위해 130개의 시추공 천공.
- (2) 파쇄대 주변의 highly fractured 암반 : URL 을 관통하는 파쇄대에서의 수리특성을 결정하기 위한 조사 및 역학적-수리적 커플링 연구와 같은 수치해석 도구를 이용한 용질 이동 예측 기법에 대한 실증이 실시되었다
- (3) 중간 정도의 파쇄 암반 : 미터당 1-5개 정도의 균열을 가지는 암반을 통해 용질 이동에 대한 연구가 수행되었다. 굴착에 따른 수리,역학적 거동 변화에 대한 연구가 모델링과 함께 이루어졌다.
- (4) 응력이 높지 않으며 절리가 적은 암반 : 공학적 방법의 성능 연구와 조절발파와 같은 굴착 기법에 관한 연구 및 단일 균열에 대한 연구를 통해 균열의 수리-역학적 거동에 대한 연구가 실시되었다.
- (5) 높은 응력과 지하수 염도가 높은 절리가 적은 암반 : URL 하부의 암반에 작용하는 응력은 천정과 바닥에 균열을 일으킬 수 있을 정도로 높으며 일부 구간의 경우, 연속적인 균열 발생 현상을 보여주었다. 굴착에 따른 암반의 거동 변화와 손상대를 최소화하는 굴착 설계에 관한 연구 및 손상된 암반에서의 밀봉 기술에 대한 연구가 실시되었다. 또한 높은 염도가 공학적 방법에 미치는 영향에 대한 시험이 있었다.

3. URL 건설

지하 암반에서의 방사성폐기물 처분 관련 다양한 연구를 위해 건설된 URL 은 443m 의 수직갱과 240m, 420m 심도에 건설된 터널들로 구성된다. 환기를 위해 직경 1.8m 의 수직갱이 raise boring 방법으로 굴착되었다. Fig. 3은 URL 의 지상 및 지하 시설을 보여주고 있다. URL 프로그램은 다음 3단계로 나누어 진행되었다.

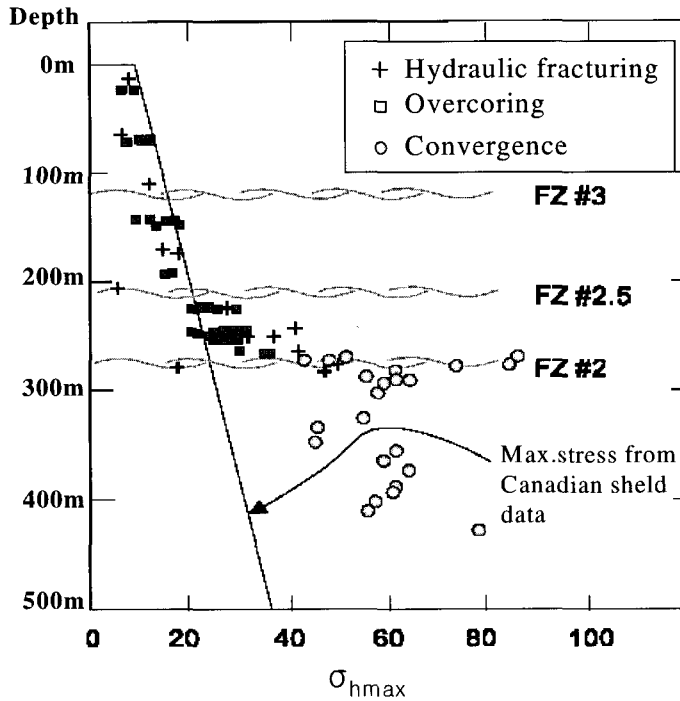


Fig. 2. In situ stress change with depth at the Canadian URL.

(1) 부지평가 단계

- A. 모니터링 시스템의 설치 : 1980 - 1984
- B. 모니터링 : 1981- 현재

(2) 건설단계

- A. 지상시설: 1982-1987
- B. 지하터널: 1983-1990

(3) 운영단계

- A. 1989-현재
- B. 현장시험을 실시하기 전의 암반 조사와 건설에 6년 정도가 소요

수직갱의 굴착을 위한 지상시설 및 수직갱 입구부의 의 설치는 1982-1983년에 실시되었으며 255m 심도의 1단계 수직갱 굴착은 1984년 5월에 시작되어 1985년에 끝났으며 이후 1987년까지 240m 심도의 터널들에 대한 굴착과 환기용 수직갱의 굴착이 실시되었다. 수직갱을 심도 443m까지 확장하기 위한 작업이 1987-1988년 사이에 이루어졌으며 420m 심도에서의 연구용 터널 건설 및 환기용 수직갱의 건설이 뒤따라 실시되었다.

3.1 수직갱의 건설

수직갱은 발파 기법으로 두 단계로 나뉘어 굴착되었다. 지표에서 255m까지는 2.8mx4.9m 크기의 직사각형의 형태로 굴착하였으며 이후 443m까지는 직경 4.6m의 원형으로 굴착되었다(Kuzyk et al, 1990). 직사각형 수직갱의 굴착은 전형적인 벤치식 발파에 의해 이루어졌는데 조절 발파 기법의 적용에 어려움이 있었으며 또한 사각형 형태를 가질 경우 모서리 부분에 응력 집중이 발생하면서 손상이 발생하는 문제도 있었다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 수직갱 255m-443m 구간은 전면 발파 기법을 이용하여 원형으로 굴착되었다(Fig. 4). 원형 수직갱의 발파에는 조절발파기법이 적용되었으며 이를 통해 벽면의 손상이 적고 안정성이 뛰어난 수직갱을 얻을 수 있었다(Hagan et al, 1989 ; Kuzyk and Versluis, 1989). 수직갱 굴착을 위한 발파공 천공은 두 대의 shaft sinking 점보 드릴을 이용하였으며 점보 드릴은 천공과 지반조사 활동을 위해 설계된 Galloway sinking stage에 장착하였다. 하루 3 교대 중 1교대는 지반조사, 나머지 2교대는 수직갱 굴착에 사용되었

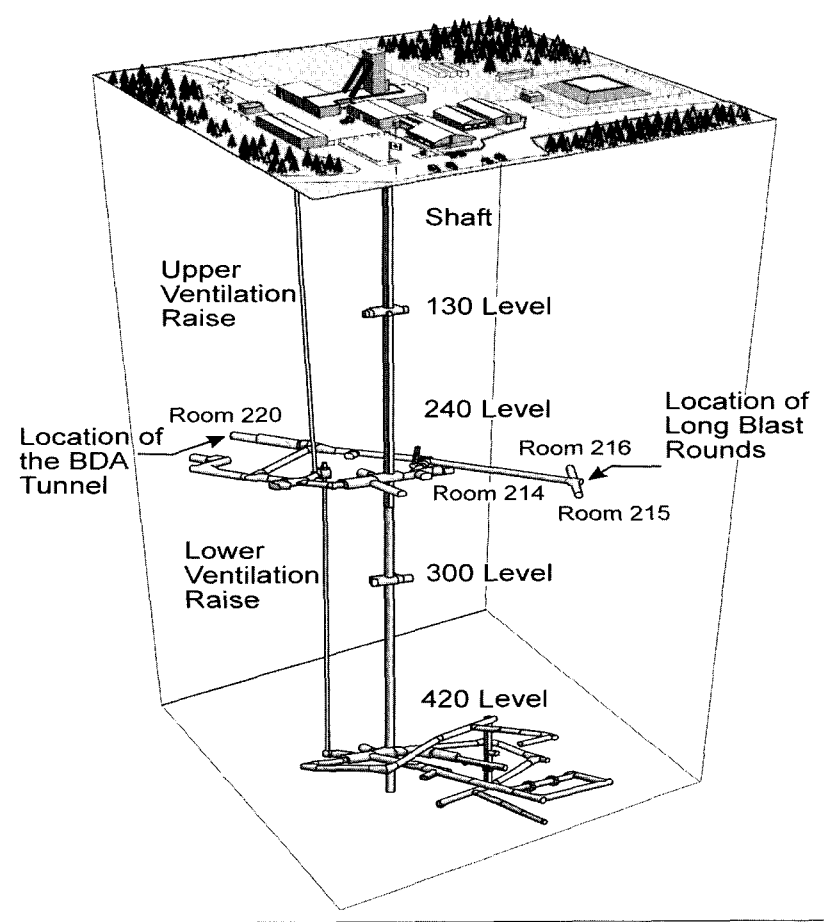


Fig. 3. Isometric view of the Canadian URL.

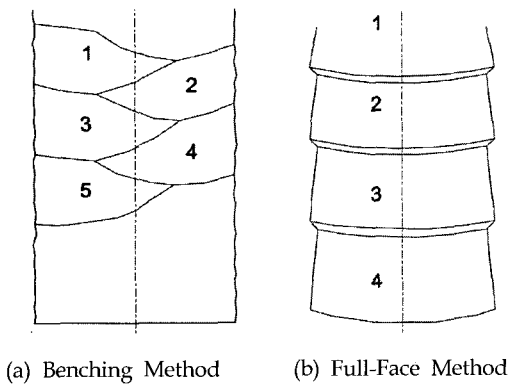


Fig. 4. Shaft excavation methods used at the Canadian URL.

으며 하루 1회 실시된 발파를 통해 3.7m 의 굴진 장을 얻었다.

Fig. 5는 전면 발파기법으로 수직갱을 원형으로 굴착하는 경우의 발파 설계도를 보여주고 있다 (Hagan et al, 1989). 그림에서 보듯이 4개의 원을 따라서 서로 다른 지연시간을 가지는 총 67개의 장약공과 6개의 cut 공이 천공되었다. 각 원에 천공된 발파공의 간격과 burden 이 수직갱 벽면 쪽으로 갈수록 작게 설계하였다. 주변장을 따라서 32개의 발파공을 450mm 간격으로 천공하고 25mm 직경의 75% Forcite 다이너마이트를 장약하였다.

Forcite는 고강도의 암모니아 젤라틴 계열의 다이너마이트이다.

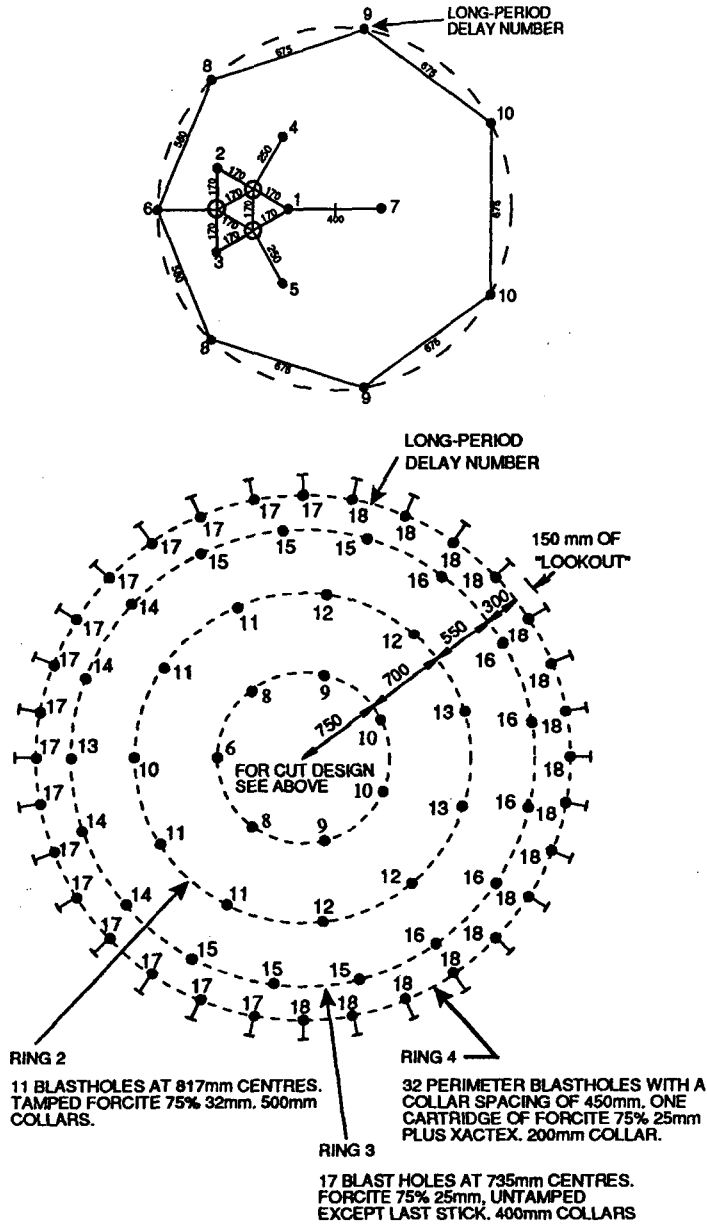


Fig. 5. Blast design for the excavation of circular shaft.

3.2 Level 건설

URL의 240m, 420m level에 만들어진 대부분의 터널들은 발파 기법을 통해 굴착되었다. 발파 기법을 적용한 이유는 단단한 화강암질 암반에서의 굴착 시 발파기법이 유연하면서도 비용 측면에서 효과적이기 때문이라는 점 외에도 캐나다의 지하 처분장이 발파기법에 의해 만들어질 것이라는

점도 고려되었다

URL에서는 터널 벽면의 손상을 최소화하기 위해 조절발파 기법을 적용한 굴착이 실시되었다 (Kuzyk et al, 1986). URL에 건설된 대부분의 터널은 폭 3.5m 높이 3.6m 정도의 비교적 작은 크기를 가진다. URL 건설의 초기 단계에서는 Fig. 6.a에 묘사된 단계별 굴착에 의한 터널 굴착이 실시

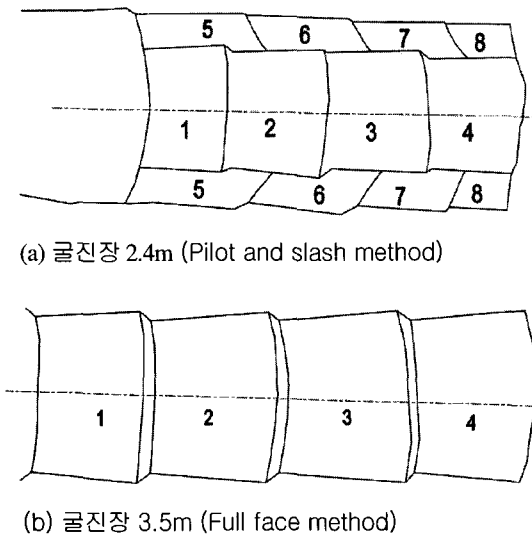


Fig. 6. Tunnel excavation for level development at URL.

되었는데 이때의 굴진장은 약 2.4m였다. 단계별 굴착법을 적용하는 경우 암반 손상의 최소화라는 측면에서는 매우 효과적이며 성공적인 결과를 얻을 수 있었지만 굴착이 2단계로 실시되어야 하는 번거로움이 있었다. 굴착을 보다 신속하고 원활하게 실시하기 위해 Fig. 6.b의 전면 발파에 의한 굴착이 시도되었으며 굴진장은 3.5m로 늘릴 수 있었다. 전면 발파의 경우, 발파에 의한 암반 손상 측면에서는 단계적 굴착법에 비해 효과적이지 않았지만 조절 발파 기법을 적용하지 않은 경우에 비해서는 뛰어난 발파 결과를 얻을 수 있었다.

URL에 굴착된 대부분의 터널은 크기가 3.5m x 3.3m 정도로 비교적 작으며 발파공의 천공은 1 boom 점보 드릴을 이용하여 실시되었다. 심도 240m에 건설된 터널들은 터널 면에서의 응력 집중에 의한 파괴를 막기 위해 곡면을 가지도록 설계되었다. 효과적인 발파를 위해 burn-cut을 이용한 조절발파가 실시되었다.

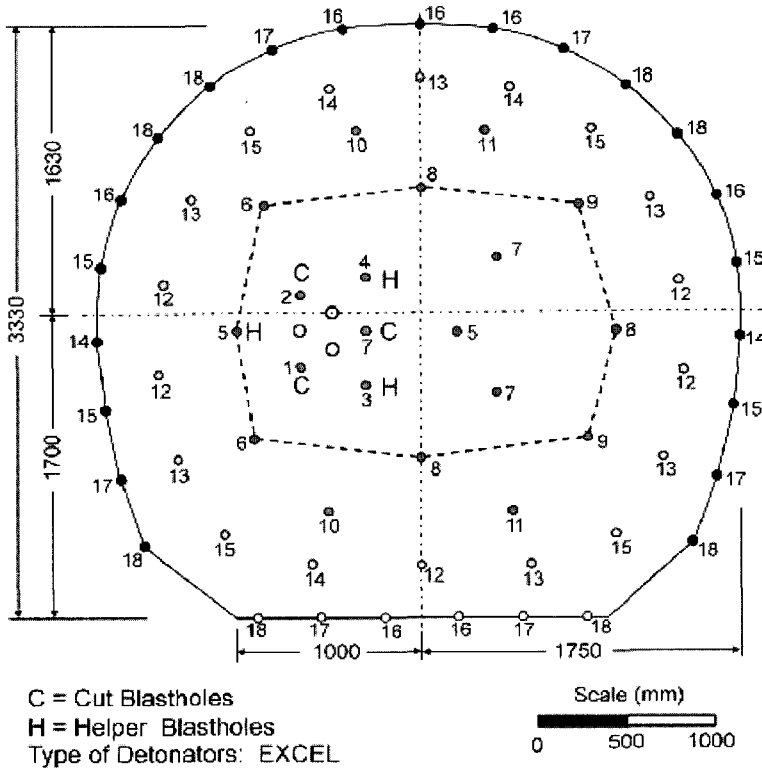
Burn-cut 발파에서는 발파공의 성격에 따라 4 종류의 장약이 실시되었다. 매 발파 round에서는 65개의 발파공이 천공되며 이들의 직경은 38mm이다. 터널 중앙부에 직경 89~100mm로 확공된 3개의 relief공은 적어도 300mm 이상 더 깊게 천공함으로써 주변의 cut공과 relief공 사이의 암반이 깨끗하게 마무리 될 수 있도록 하였다.

Cut공의 위치는 순차적으로 기폭되는 발파공에서 야기될 수 있는 기폭공조(sympathetic detonation: 앞의 발파공 기폭에 의해 예정보다 빨리 기폭되는 현상)나 폭압에 의한 고밀화(dynamic pressure desensitization: 앞의 발파공 기폭에 의해 발생한 충격파에 의해 폭약의 밀도 증가로 발생함으로써 적기에 기폭되지 못하는 현상) 효과를 최소화시킬 수 있도록 설정하였다 (Mohanty and Joyce, 1994; Kuzyk et al., 1994). Relief공 주변에 3개의 cut공과 2개의 helper공이 설치된다. 터널 중심부에 설치되는 production공에는 Amex II 폭약을 장약하였다. Cut공과 Production공에는 공기압을 이용하여 collar 길이 250-300mm까지 ANFO를 장약하였다. Production공 외곽에는 18개의 cushion공을 천공하고 Lomex III 폭약을 장약하였다. 충격 에너지를 감소시켜 암반에 미치는 영향을 줄여야 하는 Cushion 발파공 또는 주변장 발파공에서는 충격 에너지가 낮은 폭약을 사용하여 가스의 팽창 에너지에 의해 암반 파쇄가 일어나도록 함으로써 성공적인 발파 작업을 수행할 수 있었다.

터널 바닥부에는 6개의 lift공을 천공하고 25mm 직경의 Forcite 75%를 장약하였다. 발파충격에 의한 여굴을 방지하기 위해 터널 주변장을 따라서 21개의 perimeter 발파공을 조밀하게 천공하였다. Fig. 7은 URL에서 적용된 전형적인 전면 조절 발파 설계도를 보여주고 있다. 순차적인 기폭을 위해 0-18까지의 시간 지연을 가지는 shock tube 뇌관이 사용되었으며 ANFO, Lomex, Primaflex를 장약한 발파공 바닥에는 NG 계열의 폭약을 primer로 설치하였다. Fig. 8은 발파 설계에 따라 발파공을 천공하는 모습을 보여주고 있으며 Fig. 9는 천공된 발파공에 폭약을 장약하기 위해 준비하는 모습이다.

3.3 장공 발파 기법의 개발

굴진장이 8m 이상인 장공을 이용한 조절 발파 기술에 대한 연구가 240m level에서 실시되었다. 이는 한번 발파로 터널의 크기보다 2배 이상인 굴진장을 얻는다는 것을 의미한다. Fig. 10은 심도 240m에 건설된 Room 215와 Room 216의 굴착시 굴진장을 2.78m에서부터 최대 8.7m까지 1m씩 변화시키면서 굴착한 예를 보여준다(Kuzyk et al., 1994; Kuzyk et al., 2003). 이 곳의 암석은



Blasthole Type	Number	Loading
○ Relief Hole	3	100 mm Reamed Hole Amex II. Collars of 250 mm for Cut 300 mm for Easers 300 mm for Production
● Production	20	
○ Lifter	6	Forcite 75% (F25 x 200), 200 mm Collar Lomex III, 400 mm Collar (1 x F25 Primer) Prima-flex (2 x F25 Primer), Stemmed
○ Cushion	18	
● Perimeter	21	
	68	

Fig. 7. Typical tunnel blast design at URL.

Norwegian Geotechnical Institute (NGI) 의 Q 값은 50-250 사이로 "Very good"으로 분류된다. 장공 발파 시험이 실시된 터널은 암반 안정성 측면에서 가장 취약한 최대 주응력 방향에 수직인 방향으로 놓이도록 하였다. 시험 구간의 최대 주응력은 26MPa 이며 중간 주응력은 17MPa, 최소 주응력은 13MPa으로 측정되었다. 탄성계수는 55GPa, 포아송비는 0.18, 비중은 2.67, 압축강도는 200MPa, 인장강도는 11.1MPa 이다.

총 6회의 장공 발파를 통해 일반적인 굴진장보다 긴 굴진장을 가질 때의 장,단점을 평가하고자

하였다. 장공의 발파 설계의 경우 대부분 3.5m 굴진장에 사용한 것과 동일하게 설계하였다. 다만, 지반 조건에 따라 발파공 시추 패턴과 장약 구성은 조금씩 조정하였다. Fig. 7의 일반적인 발파 설계와 마찬가지로 장공 발파에서도 0-18 까지의 지연 시간을 가지는 shock tube 뇌관을 사용하였다. Production 공에는 Amex II, cushion 공에는 Lomex III를 장약하였으며, 발파공 끝에는 primer로 니트로글리세린 계열의 폭약을 설치하였다. 주변장 발파공에서는 도폭선인 11mm 직경의 Prima-flex (PETN/TNT= 50/50)를 사용하였다

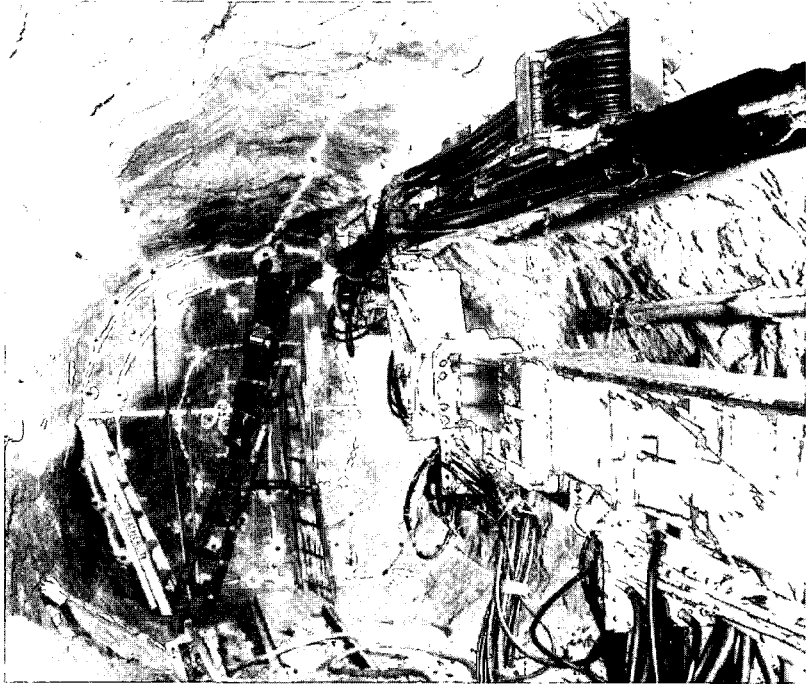


Fig. 8. Single boom electric-hydraulic jumbo setup.



Fig. 9. Mining crews loading full-face blast round on the 420 Level of the URL.

(Kuzyk et al., 1996). 발파공의 길이가 5m 이상인 경우, 발파공의 직경을 51mm로 천공함으로써 장공 천공을 위한 연장 시추가 가능하도록 하였다. Fig. 11은 8.63m의 굴진장을 가지는 경우의 발파 후 터널 벽면의 모습을 보이고 있는데 긴 굴진장 발파의 모든 경우에서 Fig. 10과 비슷한 결과를 얻

을 수 있었다. 발파공의 길이를 8.63m인 경우 발파에 의한 굴진 길이는 평균 8.54m로 터널 중앙부의 경우 bootleg이 전혀 없이 완전한 발파가 이루어지는 것으로 나타났다.

발파의 영향을 평가하는 또 다른 인자인 파쇄도 또한 뛰어난 것으로 나타났다. 발파 후 파쇄된 암

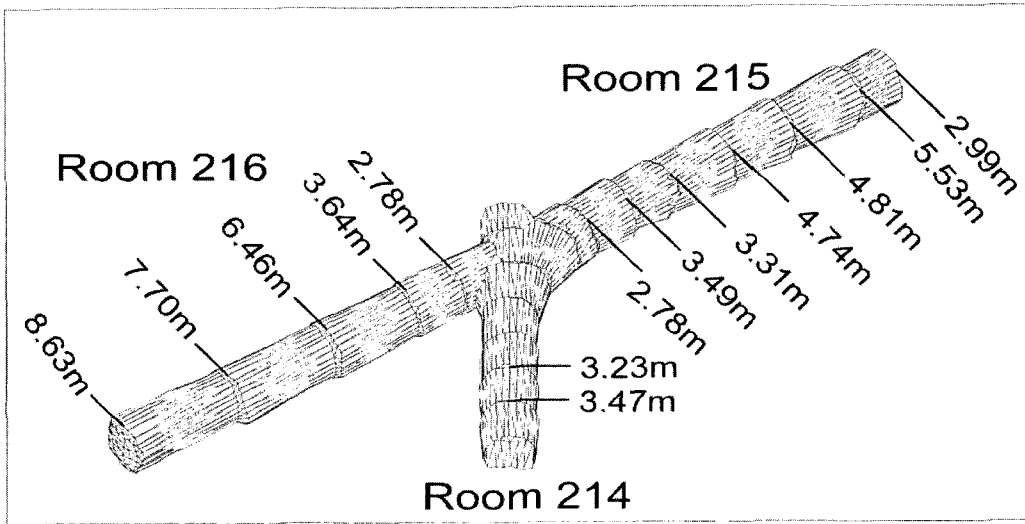


Fig. 10. Schematic showing surveyed length of the long blast rounds.

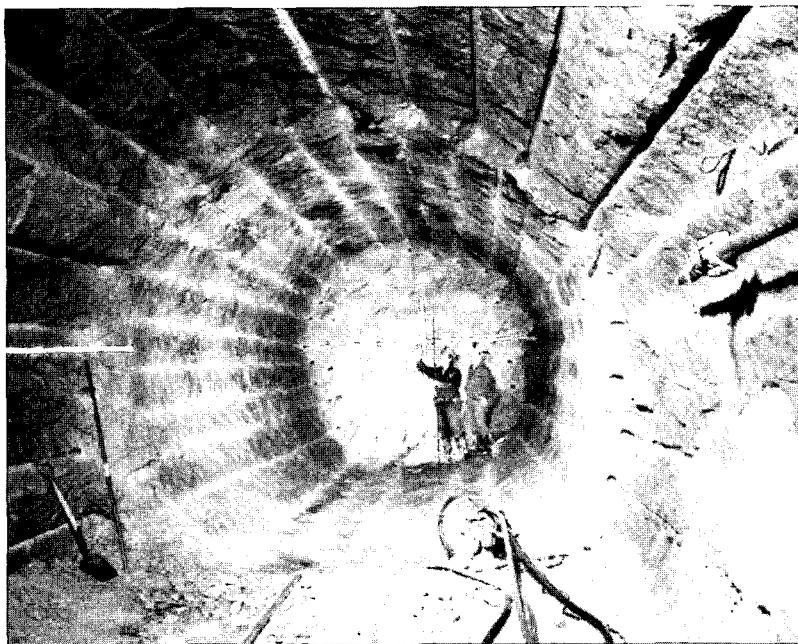


Fig. 11. Blast result with 8.54 metres advance in room 216.

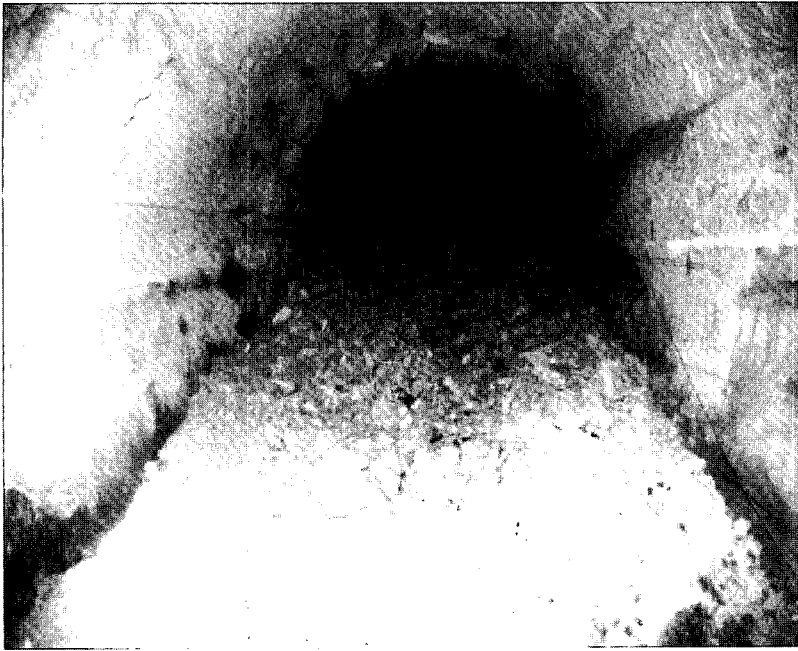


Fig. 12. Typical fragmentation.

석의 양상은 Fig. 12에서 볼 수 있다. 굴진장이 긴 경우 발파 후 암석은 발파면에서 최대 20m에 이르는 거리까지 쌓여졌다. 버력의 크기는 일정하였으며 400mm를 넘는 암석편도 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다.

이와 같이 URL의 터널 굴착시 조절발파 기법을 적용함으로써 bootleg을 최소화하면서도 깨끗한 터널 벽면을 얻을 수 있었다. 터널 벽면이나 천정부에서 발파 후 생기는 느슨한 암석의 제거도 최소화할 수 있었다. 따라서 암반보강이나 낙반 방지를 위한 벽면처리도 필요하지 않았다. 굴진장을 8m까지 늘리는 경우에도 발파 충격에 의한 여굴이나 bootleg 측면, 파쇄암의 특성 측면에서 성공적인 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 장공 발파 기법의 현장 적용을 위해서는 이 기법의 지원할 수 있는 장비의 보완이 필요하다. 장공 천공과 장공에서의 장약을 위한 장비 보완이 요구되며 특히 굴진장이 길어짐에 따라 작은 직경의 긴 발파공 천공하는데 따르는 천공 정확도의 저하를 막을 수 있는 정확한 시추 방법의 개발이 필요할 것이다.

4. 결 론

고준위폐기물 처분장의 건설이나 처분 연구를 위해 반드시 운영되어야 할 지하연구시설의 건설을 위해 발파 기술의 개발은 필수적이다. 장기간의 연구 및 운영의 안정성, 처분장의 핵종 이동을 차단하는 성능 확보를 위해서는 발파에 의한 터널 벽면의 손상을 최소화하여야 한다. 따라서 지하 암반 내에 설치되는 처분장이나 지하연구시설은 조절발파 기법을 적용한 굴착이 실시되어야 하며 이를 위한 효과적인 발파 기법의 개발이 요구된다. 캐나다 URL에서의 적용된 조절 발파를 이용한 굴착 기법은 적용성 측면에서 뛰어나고 할 수 있다. 특히 조절 발파 기법을 적용한 전면 장공 발파 기술은 처분장의 운영과 건설이 동시에 조화롭게 진행되어야 하는 대규모 지하 처분장에서 효과적인 발파 기법이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 캐나다 URL에서 실시된 수직갱과 터널에서의 전면 굴착법과 장공을 이용한 조절발파 기법에 대해 살펴보았다. 적합한 발파

설계를 통해 굴진장을 늘리면서 전면 굴착이 가능함을 알 수 있었으며 특히 굴진장을 8m 까지 늘리는 경우에도 발파 충격에 의한 여굴은 발생하지 않음을 알 수 있었다. Bootleg 의 존재나 암석 파쇄도에서도 뛰어난 결과를 얻은 것으로 나타났다. 이러한 발파기술은 지하 처분장의 건설 시, 처분터널의 안전하면서도 효과적인 건설이 가능함을 보여준다.

지하 암반에 작용하는 현지 응력이나 암반의 물성에도 영향을 받기 때문에 URL 에서 성공적으로 적용한 발파 기술을 국내에서 그대로 적용할 경우 성공을 보장하기는 어려울 것이다. 따라서 캐나다 URL 에서의 경험을 고려하여 향후 국내 조건에 적합한 조절 발파 기술의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강철형 등, 2000, Preliminary conceptual design and performance assessment of a deep geological repository for high-level waste in the republic of Korea, KAERI-SANDIA final report.
2. Chandler, N.A. 2003, Twenty Years of Underground Research at Canada's URL, In proceedings of WM'03, Tucson, Arizona, 2003 March 23-27.
3. Doe, T.W., 1987, Hydraulic fracturing stress measurements in the shaft probe hole at the Underground Research Laboratory, Manitoba, Golder Associates Inc. report to Battelle Memorial Institute, Office of Waste Technology Development.
4. Doe, T.W., 1989, Hydraulic fracturing stress measurements in horizontal holes at the 240- and 420-m Levels of the Underground Research Laboratory, Golder Associates Inc. report to AECL.
5. Everitt, R.A., A. Brown, C.C. Davison, M. Gascoyne and C.D. Martin, 1990, Regional and Local Settings of the Underground Research Laboratory, In Proceedings of the International Symposium on Unique Underground Structures, Denver, CO.

6. Gascoyne, M., 2004, Hydrogeochemistry, groundwater ages and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, Southeastern Manitoba, Applied Geochemistry.
7. Hagan, T.N., G.W. Kuzyk, J.K. Mercer and J.L. Gilby, 1989, The Design, Implementation and Monitoring of Full-Face Blast Rounds to Extend a Shaft at AECL's Underground Research Laboratory, In Proceedings of Shaft Engineering Conference, IMM, London, England.
8. Kjartanson, B.H., M.N.Gray, R.J.Puchala, and B.M.Hawrylewicz, 1989, Excavating large-diameter boreholes and shafts in granite with high pressure water jetting, In proceedings of the IMM Shaft Engineering International Conference, Harrogate, England.
9. Kuzyk, G.W., P.A. Lang, and G. LeBell, 1986, Blast Design and Quality Control at the Second Level of AECL's Underground Research Laboratory, In Proceedings of International Symposium on Large Rock Caverns, Helsinki, Finland.
10. Kuzyk, G.W., and W.S. Versluis, 1989, Full-Face Shaft Sinking at AECL's Underground Research Laboratory, In Proceedings of the Society of Mining Engineers Annual Meeting, Las Vegas, Nevada.
11. Kuzyk, G.W., J.R. Morris and A.E. Ball, 1990, Shaft Extension Design at the Underground Research Laboratory, In Proceedings of the 12th CIM District Four Meeting in Thunder Bay, Ontario.
12. Kuzyk, G.W., D.P. Onagi, S.W. Keith and G.R. Karklin,1994, The Development of Long Blast Rounds at AECL's Underground Research Laboratory, In Proceedings of the 12 Annual Canadian Tunnelling Conference, Vancouver, British Columbia.
13. Kuzyk, G.W., B. Mohonty and D.P. Onagi, 2003, Innovative Blasting Techniques for Excavation of Long Blast Rounds, European Federation of Explosives Engineers 2nd

- World Conference on Explosives and Blasting, Prague, Czech Republic.
14. Martin, C.D., 1989, Characterizing In Situ Stress Domains at the Underground Research Laboratory, In Proceedings of 42nd Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg, Manitoba.
 15. Mohanty, B. and D. K. Joyce, 1994, Explosive initiation practice and its effect on energy release in commercial explosives - Part II, In Proceedings of the 10th Symp. On Explosives and Blasting Res., Intl. Soc. of Explosives Engineers, pp. 149-161.
 16. Onagi, D.P., S.G. Keith and G.W. Kuzyk, 1992, Non-explosive excavation technique developed for the excavation of AECL's Mine-by Experiment test tunnel at the Underground Research Laboratory, Presented at the Annual Tunnelling Association of Canada Meeting, Banff, Alberta.
 17. Simmons, G.R., and N.M. Soonawala, 1982, The Underground Research Laboratory Experimental Program, Atomic Energy of Canada Limited Technical Record TR-153.
 18. Thompson, P.M., and N.A. Chandler, 2001, Hydraulic fracturing in situ stress determinations in Borehole 405-047-OC1, Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report No 06819-REP-01200-10066-R00.



권 상 기

1987 서울대학교 자원공학과 학사

1989 서울대학교 자원공학과 석사

1996 University of Missouri-Rolla, Mining
Eng. 박사

현재 한국원자력연구소 선임연구원
