

한국원자력연구소내 지하처분연구시설 건설에 따른 발파 영향

권상기¹⁾, 조원진¹⁾, 김득수²⁾

Blasting Impact by the Construction of an Underground Research Tunnel in KAERI

Sang-Ki Kwon, Won-Jin Cho and Deug-Su Kim

Abstract : The underground research tunnel, which is under construction in KAERI for the validation of HLW disposal system, is excavated in a granite rock by drill&blasting. In order not to disturb the operation at the research facilities including Hanara reactor by the blasting for the excavation of 6mx6m tunnel, a test blasting at the site was performed. Using the vibration equation derived from the test blasting, it was possible to predict the vibration at different locations at KAERI and to conclude that the blasting design would meet the design criteria at the major facilities in KAERI. The noise and vibration generated by the main blasting were continuously measured. In the case of vibration, the measured values were lower than the predicted one from the vibration equation. It is, therefore, concluded that the influence of blasting work for the construction of 280m long research tunnel on the major facilities in KAERI would be insignificant.

Key words : KURF, tunnel blasting, smooth blasting, vibration

초록 : 고준위폐기물 처분시스템의 거동 실증을 위해 한국원자력연구소내에 추진되고 있는 지하처분연구시설은 고성능 폭약을 이용한 발파 기법에 의해 지하 화강암반내에 건설된다. 6mx6m 크기의 터널을 굴착하기 위한 발파에 의한 진동 및 소음이 인접한 연구시설 및 하나로 원자로에 영향을 예측하기 위한 시험 발파가 실시되었다. 시험발파를 통해 얻어진 발파진동식을 이용한 원자력연구소내 주요시설에 대한 발파영향을 평가결과 설계기준에 비해 훨씬 낮은 것으로 파악되었다. 굴착 진행에 따른 소음, 진동값을 측정하였으며 진동값의 경우 발파진동식으로 추정된 값보다 더 낮게 나타났다. 따라서 원자력연구소내 지하에 280m 규모의 처분연구시설을 건설하기 위한 발파작업으로 연구소내 주요 시설에 미칠 영향은 미미할 것으로 판단된다.

핵심어 : KURF, 터널 발파, 스무스 블라스팅, 발파진동

1. 서 론

국내에서의 고준위폐기물 처분을 위한 연구개발은 원자력증강기 사업의 일환으로 1997년 부처 추진되어 오고 있으며 2000년 기준처분개념이 설정되었다. 국내 지질환경에 적합한 한국형 처분 시스템의 제안 및 이에 대한 종합안전성 평가가 2007년 2월 제시될 것이다. 제안된 고준위폐기물 처분시스템의 실증 및 처분 안전성 평가와 관련된 현장 실증 연구들을 수행하기 위해서 2003년부터

한국원자력연구소내에 소규모의 지하처분 연구시설이 추진되고 있다. 2000년 도출된 기준처분개념에 따르면 지하 처분장은 지하 수백미터의 결정질 암반에 위치하며 수직갱 또는 경사터널을 통해 지상과 연결되도록 된다. 처분용기가 거치되는 6mx7m 크기의 처분터널과 접근터널은 조절 발파 기법을 통해 굴착되어진다. 이러한 처분개념을 실증하기 위해 추진되는 지하연구시설은 결정질 암반에 위치시키고 처분개념과 유사한 터널 크기를 가지며 처분장에서 적용될 방법으로 굴착함으로써 향후 처분장에서의 적용에 활용될 수 있도록 할 필요가 있다. 또한 장기간의 연구기간이 소요되는 고준위 폐기물 처분연구의 특성상 현장 연구를 장기간 수행하는데 지장이 없는 암반 조건을 확보하

1) 한국원자력연구소
2) 벽산엔지니어링
접수일 : 2005년 12월 2일

는 것이 필요하다.

이러한 조건들을 고려한 설계를 위해서 다양한 사전 작업이 수행되었다. 2003년 기존의 부지조사 자료 및 문헌조사를 통해 시설의 기본개념을 설정하고 이의 구조 안정성을 평가하기 위한 3차원 구조안정성 해석이 실시되었으며 이를 통해 기본개념이 구조적 안정성을 유지할 수 있을 것으로 판단하였다(권상기 등 2004a). 2003년 하반기에서 2004년도 전반기에 걸쳐 지표지질조사, 물리탐사, 시추 작업이 실시되었으며 이에 대한 결과는 조원진 등(2004a)에 의해 정리되었으며 부지조사를 통해 얻어진 부지특성을 고려한 기본설계가 실시된 바 있다(조원진 등, 2004b). 시설의 시공을 위해 필요한 지반의 특성 조사를 위한 실험실 및 현장시험 결과를 정리하고 부지의 대포값을 산출하였으며 특히 처분관련 연구가 주로 수행될 연구모듈 구간에서의 암반물성을 추정하여 이를 실시설계에 반영하였다(권상기 등, 2004b). 연구용원자로인 하나로를 비롯한 연구시설이 밀집되어 있는 원자력 연구소내에 지하구조물을 발파를 통해 건설하고자 하는 경우 부지의 동적 특성을 파악하여 발파에 의해 발생 가능한 진동 및 소음을 예측 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 설계시 소음 및 진동이 주변 환경에 미칠 영향을 시험발파를 통해 평가하였으며 실제 굴착을 위한 발파 작업시에 측정된 소음, 진동 값을 분석하여 지하처분연구시설 부지의 진동특성을 평가하고자 하였다.

2. 지하처분연구시설의 현황

본 지하처분연구시설의 건설 프로젝트는 2003년에 착수되었으며 2005년 현재 100m 정도의 1단계 진입터널 건설이 완료되었다. 총 280m (진입터널 230m, 연구모듈 50m)에 달하는 지하연구시설은 2006년 완공되어 2007년부터 운영될 계획으로 있다. 2003년에서 2004년 초까지 실시된 부지조사 결과 및 원자력 연구소내 지하연구시설이라는 특성을 고려하여 2004년 도출된 지하처분연구시설 설계의 주요 내용은 다음과 같다.

- 지하처분연구터널의 심도가 100m 이상이 되도록 설계하는 것을 기본 방향으로 설정하였다(조원진 등, 2004b). 100m의 심도를 확보하기 위

해 평지에서 10% 하향경사 터널을 건설하는 경우 1km의 진입터널이 필요하며 이 경우 건설 및 유지비용이 과다할 것으로 판단되었다. 진입터널의 길이를 단축시키면서 최소 심도 요건을 만족시키기 위해 진입터널 끝 부분에 좌우 양쪽에 하나씩 배치되는 연구모듈을 산 정상부 아래에 위치하도록 함으로써 효과적으로 심도를 확보할 수 있도록 하였다. 터널을 따른 단면도는 그림 1과 같다.

- 연구시설이 연구소 부지내에 위치하도록 함으로써 민원발생이 없도록 해야 하며 또한 토지의 형질 변경과 그린벨트 훼손 허가와 관련된 업무의 원활한 진행을 위해 지하처분연구시설이 국가공업단지개발 계획선 내에 위치하도록 지하처분연구시설의 배치와 선형을 결정하였다.
- 연구모듈이 부지경계면 안쪽으로 충분한 거리를 확보할 수 있도록 진입터널의 길이를 230m로 하였으며 진입터널과 연구모듈의 크기는 기계식 굴착이 가능하도록 터널의 최종 크기를 6m×6m로 동일하게 설계하였다. 그림 2는 표준단면도를 보여주고 있다.
- 작업차량의 교행을 위한 8m 길이의 turning shelter는 약 80m 간격으로 2곳에 설치하도록 하였다.

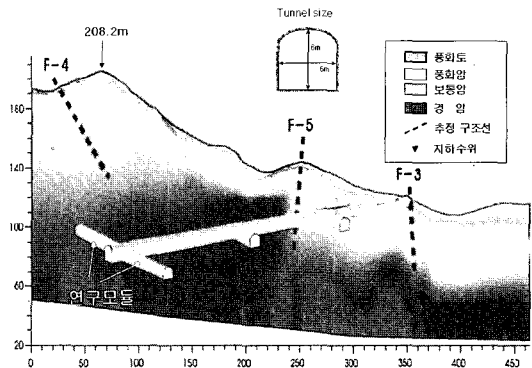


그림 1. 지하처분연구시설 개념도.

3. 부지 및 암반 특성

3.1 지질 특성

지하처분연구시설 부지의 암반은 주로 중립 내지 조립질 화강암으로 이루어졌으며 이들 사이에 안산암질 암맥이 관입상으로 분포하고 있으며 페그마타이트도 일부 분포하고 있다. 터널의 진행 방

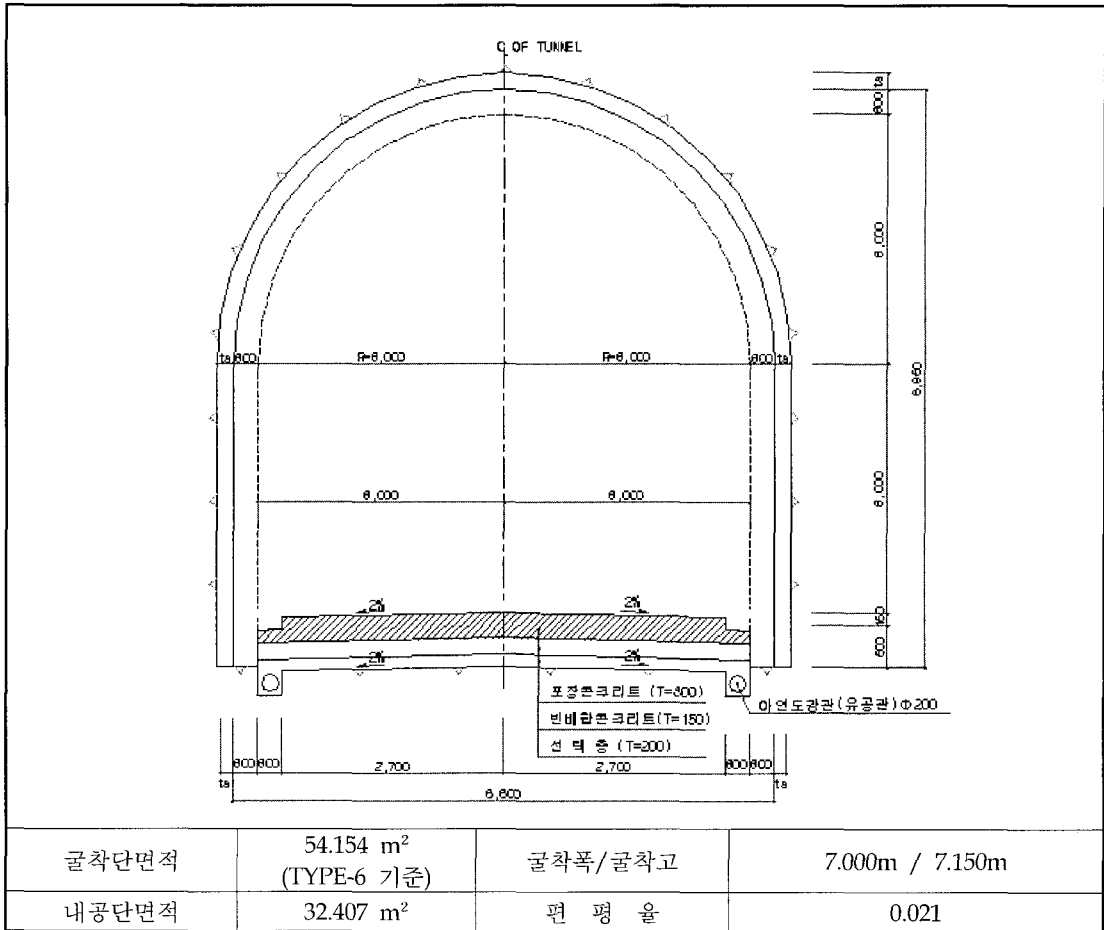


그림 2. 지하처분연구시설의 표준단면도.

향과 평행하게 10% 하향 경사진 수평공을 시추해서 암석 코어 및 시추공에서의 현장 시험을 실시하였다. 시추공 입구에서 67~72m 구간이 단층구간으로 파악되었으며 이는 터널의 굴착시에도 확인할 수 있었다. 본 지역의 지질구조선은 단층으로 의해 형성되거나 절리가 밀집되어 형성된 것으로 판단된다. 물리탐사 및 시추결과 이 지역의 풍화 잔류암층 및 풍화암이 두텁게 나타나며 이는 1996년 실시된 인접지역에서의 부지 조사 결과에서도 동일하게 나타났다(이영남 등, 1997). 그림 3은 터널 주변의 지형 및 터널 방향을 보여준다.

3.2. 암반 특성

시추공에서 회수된 NX 암석 코어를 이용한 실험실 실험을 통해 얻어진 탄성계수의 경우 수직

공과 경사공에서의 평균값은 26.5 GPa, 연구모들 구간에서는 30.4 GPa 로 약간 높게 나타난다. 동탄성계수의 평균값은 52 GPa 이며 연구모들이 위치하는 구간에서는 49.7 GPa 로 나타난다. 탄성계수, 동탄성계수, 포아송비의 경우 심도에 따른 영향은 나타나지 않았다(권상기 등, 2004b).

Point load 시험을 통해 추정되는 단축압축강도는 평균 69 MPa로 단축압축시험을 통해 얻어진 평균강도 70 MPa와 유사하게 나타난다. 연구모들이 위치할 구간의 경우 85 MPa 정도의 강도가 될 것으로 예상된다. 일반적인 화강암의 강도(100-150 MPa) 보다 낮은 값을 가지는 이유는 본 부지의 화강암이 풍화를 많이 받았으며 염리구조에서 알 수 있듯이 생성 후 변성작용을 받았기 때문으로 판단된다.

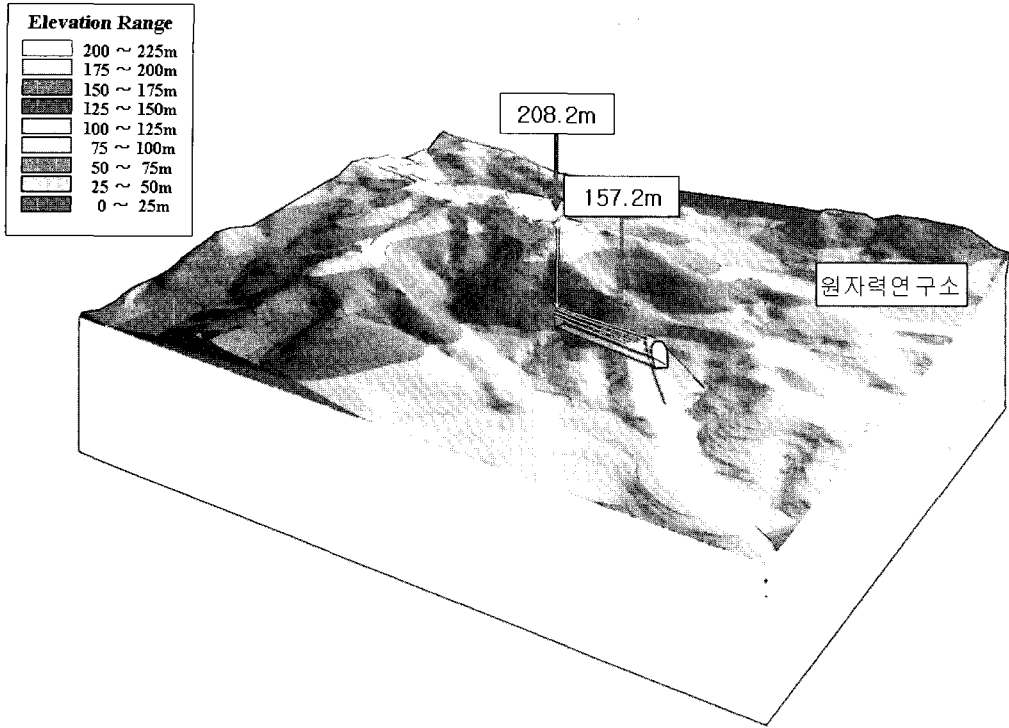


그림 3. 갱구부 위치도.

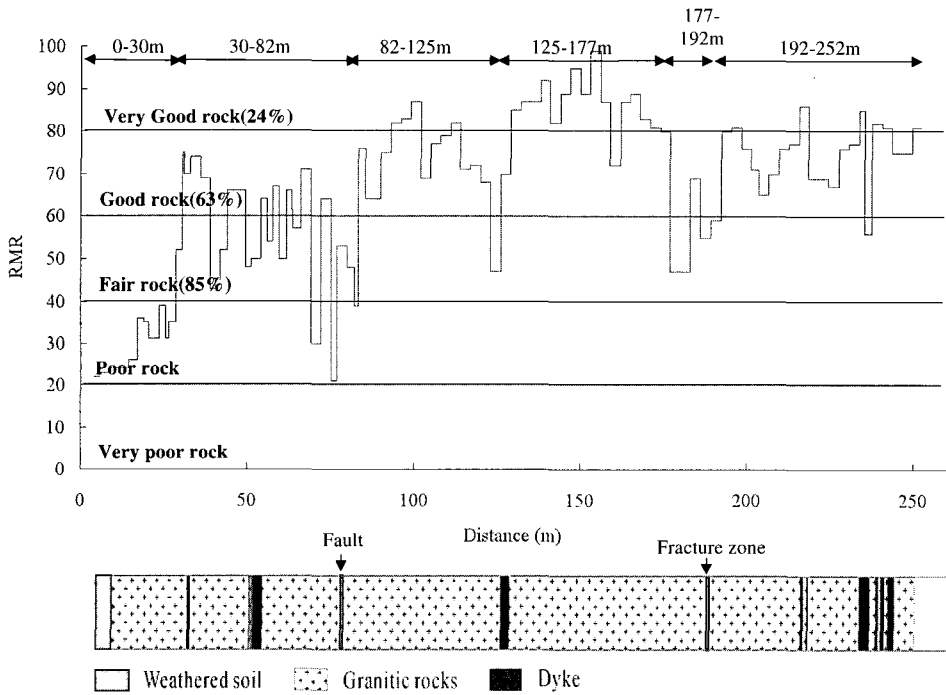


그림 4. 경사공에서의 RMR 변화.

그림 4는 경사시추공을 따라서 파악된 RMR (Rock Mass Rating) 변화를 표시한 것이다. 경사공에서의 RMR 값 변화와 풍화대 및 주요 구조선을 고려하여 6개 구간으로 나눌 수 있었다. 경사공 입구에서 30-82m 구간의 경우 절리가 많이 나타나기 때문에 RQD, RMR, Q 값이 특히 낮게 나타난다. 177-192m 구간은 절리의 평균간격이 2.8cm 로 특히 취약한 구간으로서 풍화구간을 제외한 경암부 중에서 가장 취약한 구간이 될 것으로 예상된다. 특히 이 구간에서는 시추공 천공시 지하수의 유입이 있었으며 투수시험에서도 투수계수가 다른 구간에 비해 다소 높게 나타났다(권상기, 2004b). 125-177m 구간의 경우 평균 절리 간격이 80cm 이며 RQD 값이 90 이상으로서 매우 좋은 암반으로 파악되었다. RMR 값이 80 이상이며 Q 값이 93 으로 나타나는 이 구간은 터널의 굴착후에도 대부분 노출이 가능할 것으로 판단되기 때문에 굴착기간이나 굴착후 연구에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 연구모듈이 위치하게 될 192-252m 구간도 양질의 암반으로 구성됨을 알 수 있다.

3.3 초기 응력 조건

수직공 50m-155m 사이에 위치하는 7개 지점에서의 수압파쇄 시험을 실시하여 현지응력을 측정하였다. 심도에 따른 주응력 및 축압계수는 표 1과 같다.

수직응력 σ_v 는 상재하중으로부터 추정하였으며 수평응력은 수압파쇄시험에 의해 얻어진 압력 매개 변수를 이용하여 계산하였다. 최대 수평응력대 수직응력의 비인 축압계수는 1.45-3.09 사이의 값을 가지는 것으로 나타나며 지표면에 가까울수록 축압계수가 커짐을 알 수 있다.

표 1. 심도에 따른 주응력 및 축압계수

Depth (m)	σ_v (MPa)	σ_h (MPa)	σ_H (MPa)	Kmin	Kmax	σ_T (MPa)
50.5	1.364	3.700	4.217	2.714	3.093	5.547
69.0	1.863	4.033	5.177	2.165	2.779	11.327
78.3	2.114	4.200	5.353	1.987	2.532	11.363
110.5	2.984	4.500	5.733	1.508	1.922	5.573
128.5	3.470	4.700	6.163	1.355	1.776	9.603
136.5	3.686	4.733	5.350	1.284	1.452	7.530
154.6	4.174	6.033	7.167	1.445	1.717	5.637

4. 발파 설계

4.1 발파설계시 고려사항

본 지하처분연구시설은 고준위처분 기술과 관련된 암반에서의 다양한 연구를 장기간 실시하기 위한 시설로 암반환경 및 지하수 환경을 가급적 손상시키지 않으면서 굴착하는 것이 필요하다. 또한 암반의 상태 확인 및 암반 절리면에서의 연구를 위해 견고한 암반 구간에서는 암반을 노출시켜두는 것이 유리하다. 따라서 발파 충격으로 터널 주변 암반에 손상이 발생하는 것을 최소화하고 여굴량을 줄임으로써 터널의 장단기적 안전성과 경제성을 향상시키도록 발파 설계를 실시하여야 한다. 이를 위해 지하처분연구시설의 발파설계에서는 다음 사항들을 고려하였다.

- Smooth Blasting 공법 채택
- 막장 발파후 조속히 초기 보강 실시
- 적정 사용 장비의 선정
- 정밀폭약 사용 및 적정량의 폭약량 사용

지하처분연구시설이 원자력연구소 부지 내에 건설되는 특수성 때문에 발파작업으로 인해 발생하는 소음 및 진동이 인접 연구시설에 미치는 영향을 최소화하도록 설계해야 할 필요가 있다. 발파에 의한 소음 진동을 추정하기 위해서는 정확한 암반계수와 진동추정식을 알아야 하며 이를 위해 본발파 이전 시험발파가 실시하여 부지의 동적 특성을 파악하도록 하였으며 터널 시공중에도 소음 및 진동 측정은 지속적으로 수행되도록 하였다.

시험발파가 실시되기 전 발파설계에서는 문헌조사를 통해 국내에서 사용되는 진동추정식 중 암반 상황에 적절하고 최근 국내에서 많이 적용되고 있는 일본 雜喉謙의 진동추정식을 사용하였다.

$$PPV = k \cdot W^n \cdot D^{-1.8} \quad (1)$$

여기서 k=100~200, n 은 W가 10 kg 이하일 때 1, W가 10 kg 이상일 때 0.85. 지하처분연구시설의 진입터널 구간을 발파 설계에 따라 굴착할 때 약 200m 이격된 수송용기 보관시설에서의 예상진동은 0.13 cm/sec 이하로 문화재의 허용 진동 0.20 cm/sec보다 낮게 예상되었다. 터널 부지에서 약 500m 이격되어 있는 하나로 원전의 경우, 0.02 cm/sec 이하의 미미한 진동이 예상되므로 발파로 인한 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다.

일반적으로 터널의 입구부에서는 소음 또는 비석에 의한 피해가 발생할 수 있기 때문에 방음벽의 설치를 설계에 반영하였다. 지하처분연구시설은 암반의 타입에 무관하게 전단면 굴착법으로 굴착된다. 각 타입별 발파설계 내용은 표 2와 같다.

표 2. 암반 타입에 따른 발파 설계

구 분	굴착단면적 (m2)	비장약량 (m3/kg)	천공경 (mm)	천공장 (m)	파쇄량 (m3)	비천공장 (m/m3)	발파효율 (%)
TYPE 1,2 전단면	34.91	0.96	45	3.7	122.18	2.67	94.6
TYPE 3 전단면	34.91	0.91	상동	2.1	69.89	2.47	95.2
TYPE 4 전단면	45.15	0.86	상동	1.6	67.73	2.24	93.7
TYPE 5 전단면	45.15	0.79	상동	1.3	54.19	2.28	92.3
TYPE 6 전단면	45.15	0.70	상동	1.1	45.15	2.31	90.9

암반의 상태가 양호한 type 1,2 의 경우 천공장과 비장약량, 파쇄량이 상대적으로 크게 설계되었다 (그림 5).

4.2 천공패턴 및 장약량 산출식

심폐기 발파 기법으로는 진동 기준에 따라 지발당 장약량 조절이 용이하고 단공의 연암에서 천공패턴이 비교적 단순하고 시공이 용이한 SUPEX-CUT 이 선정되었다. 장약량의 경우, 발파 설계에서는 국내에서 흔히 쓰이는 몇가지 장약량 산출식에서 적절한 부분을 선택하여 적용하였다. 실제 장약량은 이 계산치의 ±5%내에서 결정되도록 설계되어 있다. 그러나 장약량 계산과정에서 정확한 현장 상황을 반영하기는 어려우므로 초기의 지질자료와 상이한 곳에서는 시험 발파를 통하여 설계한 장약량에 대한 확인 및 보완 작업을 받

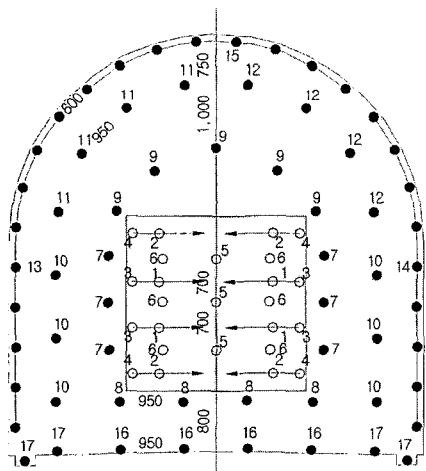


그림 5. 발파패턴(Type 1&2).

시 수행하도록 하였다. 암반 타입별 천공패턴은 표 3에 정리하였다.

5. 시험발파

5.1 시험발파 개요

터널 발파작업시 발생하는 소음,진동을 평가하여 현장 적용패턴의 적정성 여부를 검토, 인근의 주요 보안물건에 대한 영향을 최소화하기 위해 지하처분 연구시설 건설공사 현장에서 2005년 5월 27일 오전 10시 30분에 시험발파를 실시하였다. 폭약이 설치된 지점은 STA 0+092 지점이며 시험발파에 의한 소음 및 진동의 정도를 파악하기 위해 그림 6에서와 같이 현장내 5지점, 종합엔지니어링동, 수송용기시험시설, 하나로 원자로 인근에 각각 계측기를 설치하였다.

표 3. 타입별 발파공 천공패턴 (단위: m)

공 별	항 목	TYPE (천공장 H)				
		숏크리트구간 TYPE 1,2	숏크리트구간 TYPE 3	동상방지층구간 TYPE 4	동상방지층구간 TYPE 5	동상방지층구간 TYPE 6
		3.7m	2.1m	1.6m	1.3m	1.1m
Main V-hole	최소저항선	3.57	2.07	1.60	1.32	1.13
	공저간격	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	좌우 공간격	1.70	2.10	1.80	1.50	1.40
	상하 공간격	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Baby V-hole	최소저항선	2.13	-	-	-	-
	공저간격	0.60	-	-	-	-
	좌우 공간격	2.50	-	-	-	-
	상하 공간격	0.80	-	-	-	-
Sub V-hole	최소저항선	-	0.60	0.70	0.70	0.70
	공저간격	-	1.80	2.00	2.00	2.00
	좌우 공간격	-	2.90	2.90	2.90	2.60
	상하 공간격	-	0.80	0.80	0.80	0.80
심 발 수 평 중심공	실천공장	0.70	0.42	0.32	0.26	0.22
	최소 저항선	0.70	0.42	0.32	0.26	0.22
	상하 공간격	0.80	0.80	0.80	0.80	0.8
심 발 수 평 보조공	실천공장	1.42	-	-	-	-
	최소 저항선	0.80	-	-	-	-
	상하 공간격	0.80	-	-	-	-

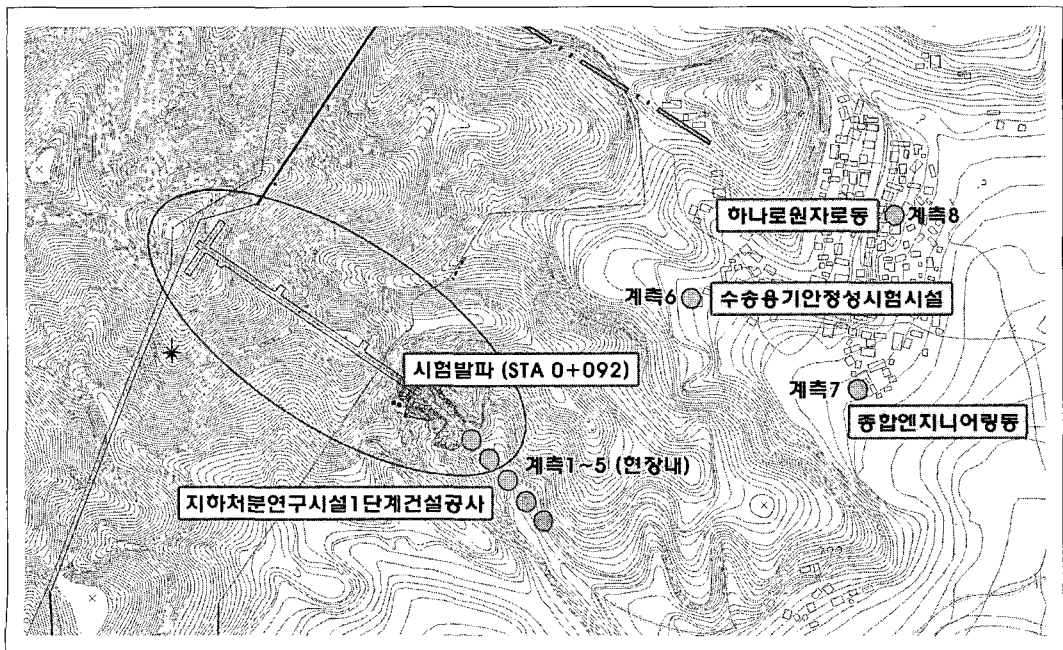


그림 6. 시험발파 위치 및 진동계측 위치.

5.2 시험발파 기준 및 조건

진동, 소음 기준

현장의 진동적용 기준치는 원자력연구소내 구조물, 실험실동, 원자로의 특수성을 감안하여 실시설계시 설계기준으로 설정한 0.2cm/sec 을 기준으로 설정하였다. 소음기준치는 소음진동 규제법을 참조로 하여 80dB(A)로 설정하였다.

국내 원자력 발전소 시설물의 내진설계 기준에 따르면 국내 원자력 발전소의 내진 설계값은 0.2g 이며, 이는 중력가속도 9.8m/s의 20% 크기를 뜻한다. 0.2g는 규모 6.5정도(진도 8에 해당)의 강진에 해당하며, 실제 원자력 발전소 내진설계를 할 때에는 내진설계값 0.2g의 지진이 원자로 건물 기초 바로 밑에서 일어나는 것을 보고 설계한다. 국내 원자력 발전소 시설물에 대한 적용기준인 0.2g는 196gal(196cm/sec²)과 같으며, 이는 기상청 자료에 대비시 진도 5등급이상의 강진에 대해 안전한 기준으로 이를 진동속도로 환산시 동 5등급 기준이 1.0~2.0cm/sec 이므로 본 URT 건설 현장에 대한 적용 기준치 0.2cm/sec는 안전기준의 10~20% 수준으로 매우 안전한 수준으로 적용된 기준임을 알 수 있다.

시험발파 조건

시험발파에서 사용된 폭약은 에멀전폭약(Emulite)이며 폭약을 기폭시키기 위해 비전기식뇌관(NONEL)을 사용하였다. 비전기식 뇌관의 순차적 기폭을 위해 Bunch connector와 전기뇌관을 추가로 사용하였다. 막장 우상부의 심발부에서 확대부에 걸치는 일부분이 썩기파괴가 형성되어 발파공 천공이 불가능하여,

썩기파괴가 형성된 부분은 발파공 천공을 실시하지 않았다. 그림 7 은 시험발파에 적용된 천공 배치도 및 각 발파공에서의 기폭 순서를 보여주는 뇌관 배치도를 보여주고 있다. 표 4에서 정리되어 있듯이 시험발파에 사용된 직경 32mm 의 Emulite 는 28kg이며 기폭을 위해 MS 비전기식 뇌관이 54개, LP 비전기식 뇌관이 38개 사용되었다. 각 발파공은 6개의 Bunch Connector 를 통해 기폭되었다. Smooth blasting 을 위해 주변공에는 직경 17mm 의 정밀폭약을 3.75kg 설치하였으며 최초 기폭용으로 1개의 전기뇌관이 사용되었다. 그림 8은 시험발파를 위해 Bunch connector 를 사용해서 발파공을 결선한 모습을 보여준다.

5.3 시험발파 결과

시험발파 측정 결과

시험발파에 의해 형성된 발파면에 대한 조사 결과 상부(좌측) 굴착선부에 일부, 미굴이 발생하였으나 미굴량이 적고 전반적으로 양호한 결과를 보였으며, 굴진장은 1-1.2m 이며 파쇄암의 크기는 평균 10-30cm 정도로 집적형태도 양호한 결과를 얻었다(그림 9). 진동, 소음의 측정결과는 표 5에 정리하였다. 표 5에서 N/T (No Triggered) 는 소음, 진동이 검출되지 않았음을 뜻한다. 이는 발파에 의해 생성된 지반진동이 Sensor 지점에 이르러 완전 소멸되거나 진동계측기에 설정된 Trigger Level 이하의 미약한 진동으로 감쇄하여 진동계측기의 기록/저장 작동을 유발시키지 못함으로써 해당 발파조건에 대하여 검측이 이루어지지 않았기 때문이다.

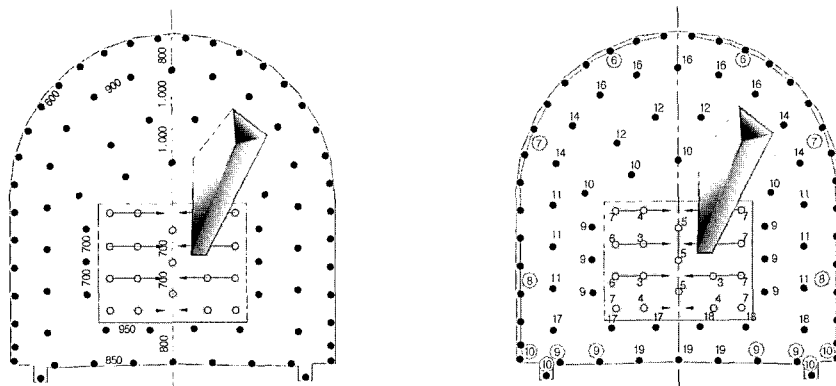


그림 7. 시험발파 제원.



그림 8. 시험발파를 위한 결선.

표 4. 시험발파에 사용된 장약 제원

구 분	뇌관 번호	공수	공당장약량(ea)		계 수량 (ea)	장약량 (kg)	지발당장약량(ea)		계	
			EM	정밀폭약			EM	정밀폭약	수량 (ea)	장약량 (kg)
			φ32mm	φ17mm			φ32mm	φ17mm		
십 발 공	M-V	MS3	3	3	6	0.48	9		9	1.44
		MS4	3	3	6	0.48	9		9	1.44
	수평	MS5	3	1	2	0.16	3		3	0.48
	S-V	MS6	2	3	6	0.48	6		6	0.96
		MS7	6	3	6	0.48	18		18	2.88
확 장 공	주변공	MS9	6	2.5	5	0.40	15		15	2.40
		MS10	4	2.5	5	0.40	10		10	1.60
		MS12	3	2.5	5	0.40	7.5		7.5	1.20
		MS17	2	2.5	5	0.40	5		5	0.80
		MS18	2	2.5	5	0.40	5		5	0.80
	외 곽 보 조 공	MS11	6	1.5	3	0.28	9		9	1.44
		MS14	4	1.5	3	0.28	6		6	0.96
		MS16	5	1.5	3	0.28	7.5		7.5	1.20
		MS17	1	1.5	3	0.28	1.5		1.5	0.24
		MS18	1	1.5	3	0.28	1.5		1.5	0.24
외 곽 공	LP6	10	1	2	0.285	10	10	20	2.85	
	LP7	10	1	2	0.285	10	10	20	2.85	
	LP8	8	1	2	0.285	8	8	16	2.28	
	LP8	2	0.5	1.5	0.285	1	2	3	0.41	
바 닥 공	MS19	3	3	3	0.48	9		9	1.44	
	LP9	4	3	3	0.48	12		12	1.92	
	LP10	4	3	3	0.48	12		12	1.92	

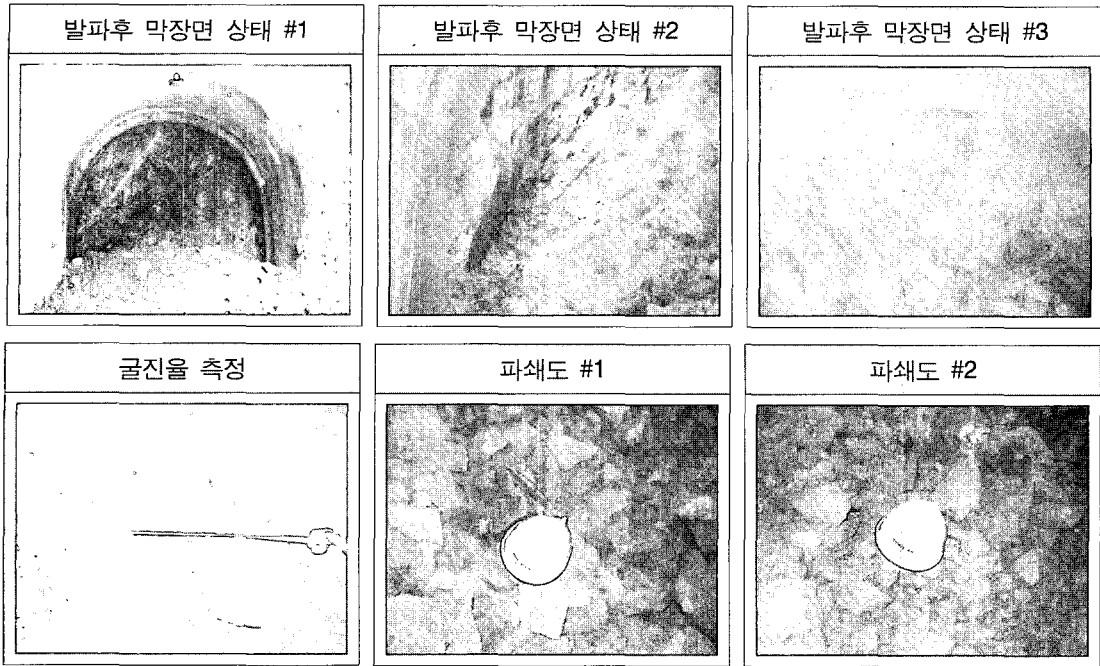


그림 9. 시험발파에 의한 암반 파쇄 결과.

표 5. 진동, 소음 측정결과

PMT(A04122884)		PMT(A04122885)		VMS-200S(V2E240191)		Blastmate(2070)	
계측 #1 (현장내)		계측 #2 (현장내)		계측 #3 (현장내)		계측 #4 (현장내)	
진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))	진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))	진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))	진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))
0.477	136.6	0.383	136.6	0.188	135.3	0.139	137.7

Blastmate(1643)		Blastmate(2485)		Blastmate(1706)		Blastmate(2331)	
계측 #5 (현장내)		계측 #6 (수용용기동)		계측 #7 (종합ENG동)		계측 #8 (하나로동)	
진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))	진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))	진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))	진동 (cm/sec)	소음 (dB(L))
0.093	125.3	0.051	54.2	N/T	N/T	N/T	N/T

가장 인접한 거리에 위치하고 있는 수용용기 시험시설에서 측정된 진동 DATA 최대값은 0.051cm/sec이며, 이는 진동허용기준치인 0.2 cm/sec의 25%에 해당되는 수치이다. 종합엔지니어링동, 하나로원자로동의 경우 계측지점이 발파 지점으로부터 원거리에 위치, 전파된 진동 속도의 크기가 Trigger Level 이하(진동측정기 최저설정레벨 0.013cm/sec이하)로서 계측기록이 되지 않았다.

수용용기 시험시설에서 측정된 소음 DATA 최대값은 54.2 dB(A)이며, 이는 과업 현장 소음허용기준치인 80 dB(A)의 68%에 해당되는 수치이다. 표 6-7는 계측된 진동치와 소음을 나타내고 있다. 시험발파는 비산석 및 소음 방호를 위해 갯문 설치 후 실시되었으며, 따라서 원거리 비산석이 발생하지 않았으며, 파쇄암석은 터널내부에 고르게 집적되었다.

표 6. 진동 계측 결과분석

계측 위치	허용 진동치(cm/sec)	계측 진동치(cm/sec)
수송용기 시험시설	0.2	0.051
종합엔지니어링동		N/T(0.013cm/sec이하)
하나로원자로동		N/T(0.013cm/sec이하)

표 7. 소음 계측 결과분석

계측 위치	허용 소음치 dB(A)	계측 소음치 dB(A)
수송용기 시험시설	80	54.2
종합엔지니어링동		N/T
하나로원자로동		N/T

표 8. 측정데이터의 발파영역별 진동치

구분	계측 #1	계측 #2	계측 #3	계측 #4	계측 #5	계측 #6
	진동 (cm/sec)	진동 (cm/sec)	진동 (cm/sec)	진동 (cm/sec)	진동 (cm/sec)	진동 (cm/sec)
심발영역	0.404	0.302	0.177	0.136	0.079	0.032
확대영역	0.246	0.148	0.154	0.091	0.069	0.038
굴착선전열영역	0.256	0.097	0.164	0.101	0.064	0.024
굴착선영역	0.467	0.363	0.154	0.132	0.087	0.044
바닥영역	0.368	0.263	0.154	0.083	0.069	0.020

표 9. 발파영역별 지발당 화약량의 산출

구분	발파영역	지발당 화약량(kg/delay)
1	심발영역	2.80
2	확대영역	2.40
3	굴착선전열영역	1.20
4	굴착선영역	2.85
5	바닥영역	1.92

진동 추정식의 산정

측정된 진동 자료를 이용하여 단순 회귀분석을 통한 진동상수 산출하였다.

50%, 95% 신뢰도를 갖는 추정식은 다음과 같다.

$$50\% \text{신뢰도 } V = 51.91 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.45} \quad (2)$$

자승근 진동추정식 결정을 위한 거리에 따른 진동치는 그림 10과 같으며 회귀분석을 통해 결정된

$$95\% \text{신뢰도 } V = 83.24 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.45} \quad (3)$$

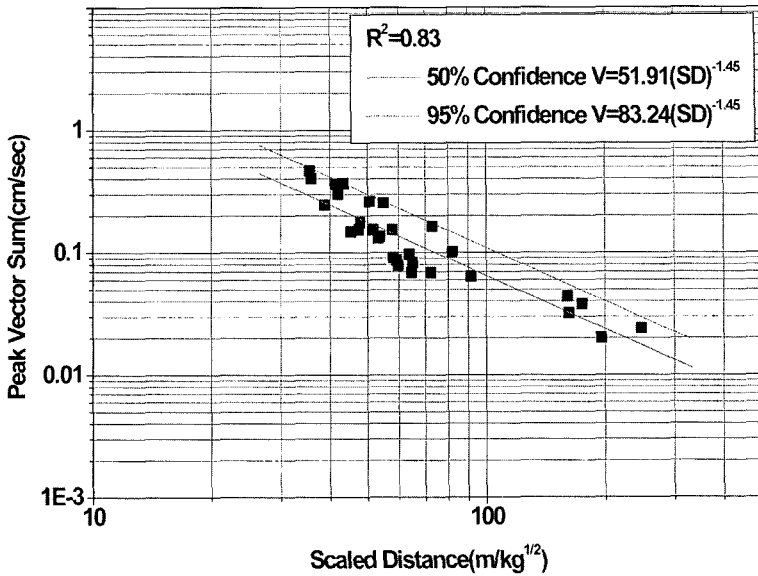


그림 10. 자승근 진동 추정식의 도출.

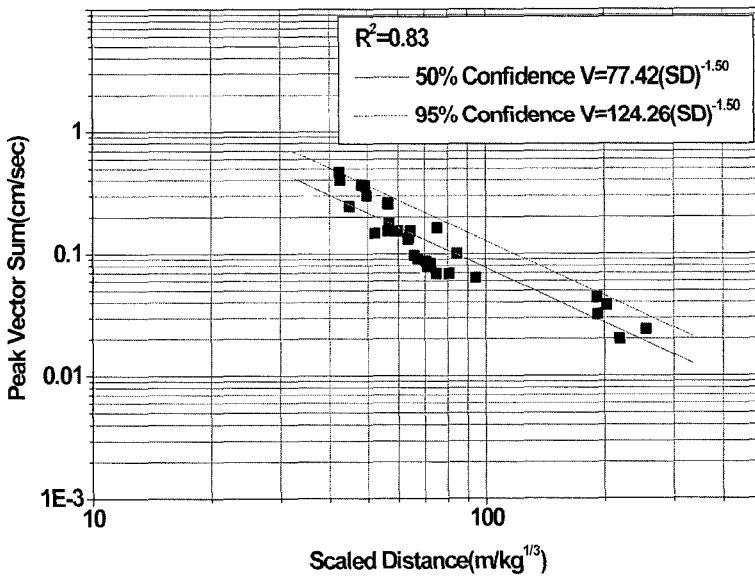


그림 11. 삼승근 진동 추정식의 도출.

삼승근 진동추정식은 그림 11에서 구해지며 50%, 95% 신뢰도의 추정식은 다음과 같다.

50%신뢰도 $V = 77.42 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.50}$ (4)

95%신뢰도 $V = 124.26 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.50}$ (5)

거리별 진동속도의 산출

발파현장의 산출 진동추정식을 이용하여 거리에 따른 진동속도를 예측할 수 있다. 자승근 진동추정식은 원거리에서 삼승근 진동추정식에 비해 안전율이 높으며, 터널 건설 현장은 주요보안물건이 최소 270m 이상 이격되어 있으므로 자승근 진동

추정식을 이용하여 거리별 진동속도를 예측하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 95%신뢰도를 가지는 자승근 진동추정식을 이용하여 지발당 장약량을 변화시켜 가면서 거리별 진동속도를 예측하여 그림 12에 나타내었다.

5.3 발파영향 검토

구간별 발파설계

시험발파를 통해 얻어진 진동추정식을 이용하여 발파설계에 따라 터널건설이 이루어지는 경우에 대한 주요 지점에서의 발파진동을 예측할 수 있다. 터널 건설 현장의 발파패턴 적용 계획은 그림 13과 같다.

터널 입구에서 140-170m에 해당하는 STA 0+210 ~ 0+238의 경우 Type-1에 해당하는 양질의 암반

이 나타나며 이곳에서 발파에서는 총 장약량은 117kg, 지발당 최대 장약량은 9kg으로 가정한다. 주변장에 설치되는 정밀 폭약은 26kg이 사용된다. 터널 입구부의 경우 Type-6의 약한 암반이 나타나며 이곳에서는 총장약량 31kg, 지발당 장약량은 2.25kg 정도로 사용함으로써 발파에 의한 암반손상이 과다하게 발생하지 않도록 한다. 각 구간별 발파 패턴의 제원은 표 10에 정리되어 있다.

발파패턴별 진동 영향권 검토

각 발파 타임을 적용할 경우 거리에 따라서 추정되는 발파 진동은 그림 14에 정리되어 있다. 200m 거리에서 P-1 발파 타입에 의해서 발생될 것으로 추정되는 진동은 0.189cm/sec로 나타났다. 터널 입구에서 100미터 정도 떨어진 STA-168에서 P-2 타입으로 발파가 있을 경우, 최대의 발파진동이 나타날 것으로 예상되며 이때 수송용기시험시

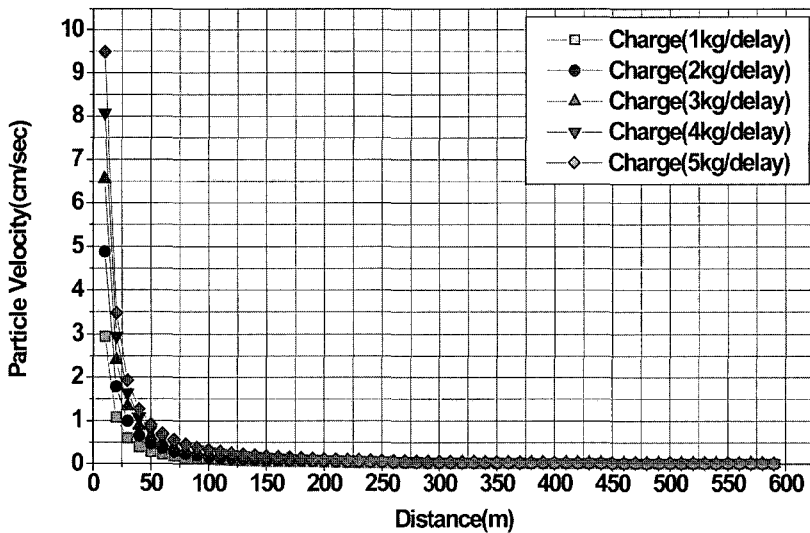


그림 12. 거리에 따른 진동속도.

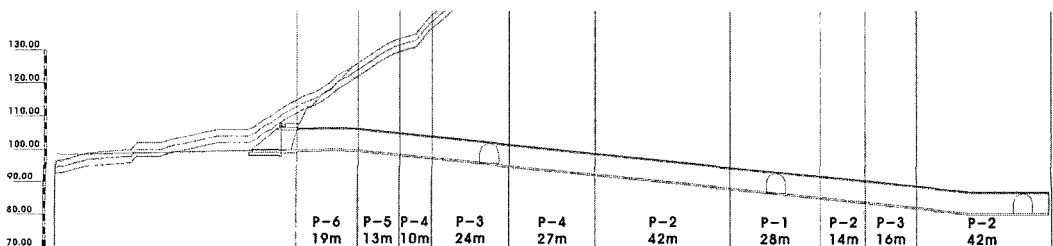


그림 13. 지하차분연구시설 구간별 발파 패턴.

설에서 0.092cm/sec의 최대 진동이 예상되지만 발파 도입을 알 수 있다. 파 설계 기준인 0.2cm/sec 에 비해서는 절반 정

표 10. 발파패턴 및 제원

패턴	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
주폭약(kg)	91.25	91.25	47.88	42.81	32.50	26.75
정밀폭약(kg)	26.10	26.10	15.65	15.08	10.05	5.025
총장약량(kg)	117.35	117.35	63.53	57.89	42.55	31.78
지발당 장약량(kg)	9.00	9.00	4.73	4.25	3.25	2.25

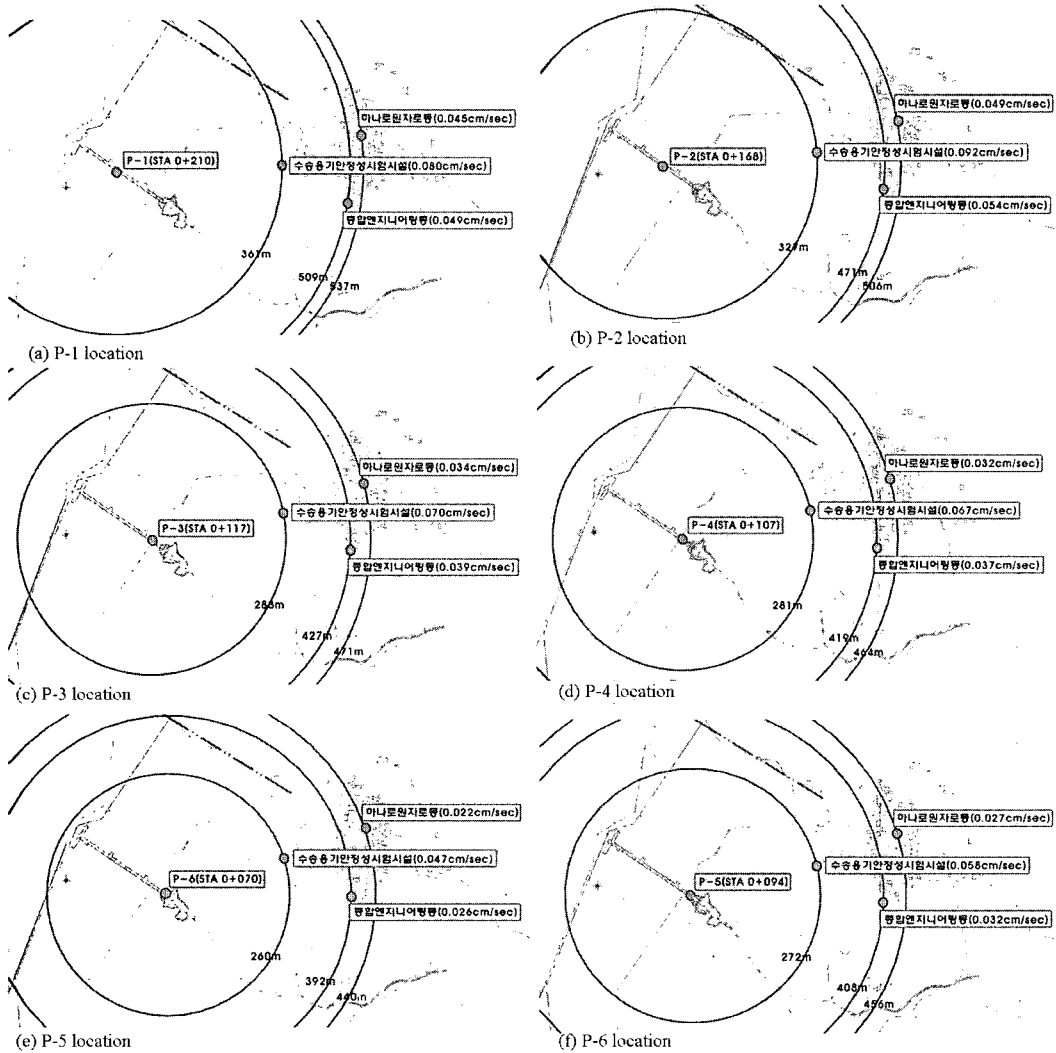


그림 14. 발파진동의 영향권검토.

6. 본발파

천공시 안전성확보를 위하여 점보 드릴을 사용하여 발파공 천공작업을 수행하였다. 2boom 점보로 길이는 13m, 폭은 2.5m, 총중량은 26톤이다. 버력의 크기는 버력저리 능력을 결정하는데 크게 작용되어 상대적으로 굴착경비 결정에 중요하며, 또한 버력의 이용을 위해서도 그 크기를 파악하는 것이 필요하다. 그러나 버력의 크기는 지반조건, 절리, 균열 등 지질 구조적인 여건, 발파법, 천공수, 천공장, 장약량 등 제 여건에 따라 크게 좌우되어 단정적으로 기술하기는 극히 곤란하므로 터널 굴착 초기에 시험발파를 통하여 그 크기를 측정하고 이를 토대로 목적하는 크기를 결정하는 방법이 일반적으로 이용되고 있다. 그림 15는 발파에 의해 파쇄된 버력을 보여주며 발파장소 주변에 쌓인 버력은 페이로더를 사용해서 15톤 덤프트럭에 실은뒤 원자력연구소 부지내에 임시로 마련된 버력 보관장으로 운반하였다.

지하처분연구시설의 1단계 건설을 위한 하루 한 차례의 발파에 의해 발생하는 소음과 진동은 터널 입구에서 200미터 정도 떨어진 지점에서 측정하였다. 그림 16은 측정지점에서의 시간에 따른 소음 진동 측정값의 변화를 보여준다. 터널이 굴진됨에 따라 암질이 단단해지기 때문에 사용되는 폭약의 양도 늘어나고 이로 인해 측정되는 소음과 진동값은 시간에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 1단계 후반기의 발파작업에서 측정된 진동값은 0.05cm/sec 정도로 이는 진동기준치인 0.2cm/sec 에 비해 미미함을 알 수 있다. 즉 본 터널에서의 발파에 의해 발생하는 지반진동은 민감한 구조물이 200m 안에 있더라도 큰 영향이 없는 정도로 파악되었다. 소음의 경우 85dB 정도로 약간 높게 나타났는데 이는 측정 지점이 터널 진입방향의 전면에 위치함으로써 발파소음이 직접적으로 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다. 원자력연구소 시설의 경우 터널 진입 방향의 측면에 있으며 또한 언덕이 중간에 위치하고 있기 때문에 연구소의 작업자들이 느끼



그림 15. 발파에 의해 파쇄된 암석.

는 소음의 정도는 훨씬 낮았을 것으로 판단된다. 하지만 보다 명확한 판단을 위해서 향후 2단계 건설 작업에서는 연구소 내에 소음,진동 측정기를 설치해서 비교 검토하는 작업이 필요할 것으로 보인다.

그림 17은 시험발파를 통해 구해진 자승근과 삼승근 추정식을 이용하여 측정 지점에서의 발파 진

동을 추정한 것과 실측된 진동을 비교하여 보여준다. 실측된 값이 추정식을 이용한 값보다 훨씬 낮게 나타남을 알 수 있다. 시험발파가 실시된 터널 입구부의 경우 실측값과 추정값이 비교적 유사하지만 터널 굴진에 따라 그 차이가 커지고 있는 것으로 나타난다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

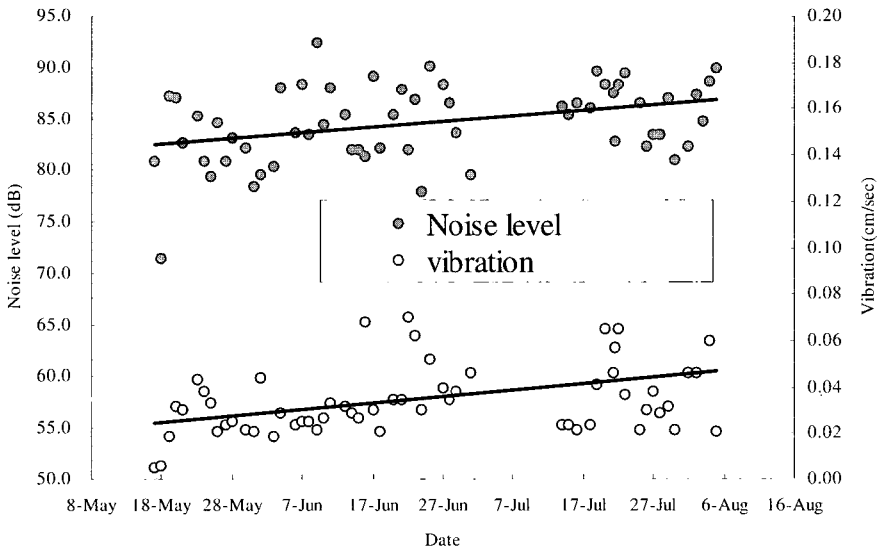


그림 16. 굴착 진행에 따른 발파,진동 변화.

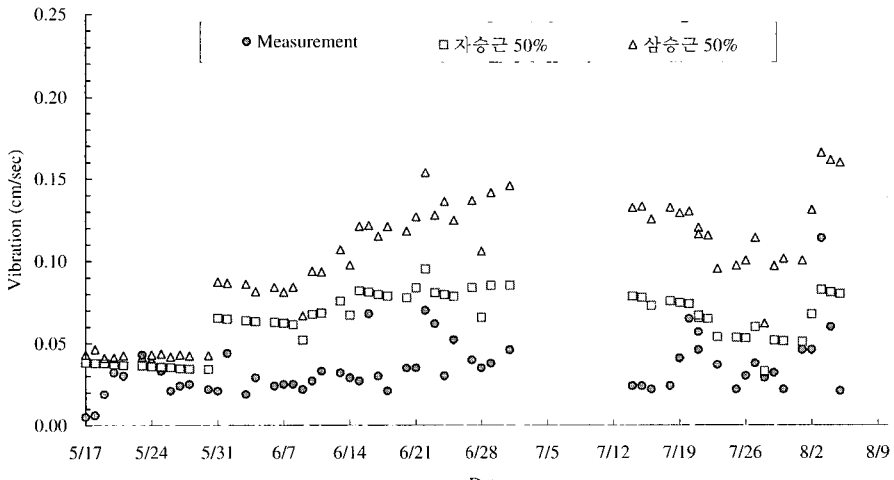


그림 17. 터널 굴진에 따른 발파진동 예측치와 측정치의 비교.

7. 결 론

2005년 현재 건설이 추진되고 있는 한국원자력 연구소내의 지하처분연구시설은 고준위폐기물 처분시스템의 실증을 위한 시설로 고성능 폭약을 이용한 발파 기법에 의해 지하 암반내에 건설된다. 한번의 발파로 6mx6m 크기의 터널을 굴착하기 위해 수십 kg 에 달하는 폭약이 순간적으로 기폭 되는데 이때 발생하는 발파진동 및 소음이 인접한 연구시설 및 하나로 원자로에 영향을 미치지 않도록 발파 설계를 해야 하며 발파설계의 타당성을 실증하기 위한 시험 발파가 실시되었다. 시험 발파를 통해 다음과 같은 진동 추정식을 도출할 수 있었다.

$$\text{자승근 50\% 신뢰도 } V = 51.91 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.45}$$

$$\text{자승근 95\% 신뢰도 } V = 83.24 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.45}$$

$$\text{삼승근 50\% 신뢰도 } V = 77.42 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.50}$$

$$\text{삼승근 95\% 신뢰도 } V = 124.26 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.50}$$

시험발파를 통해 얻어진 발파진동식을 이용하여 건설 현장에 인접한 연구시설에서 예상되는 발파진동을 추정해본 결과, 발파설계에 따라 터널 굴착작업이 실시될 경우 원자력연구소내 주요시설에 미칠 영향은 설계기준 0.2cm/sec에 비해 훨씬 낮은 것으로 분석되었다. 이러한 과정을 통해 결정

된 발파설계에 따라 100m 의 진입터널 구간을 성공적으로 건설할 수 있었다. 터널 건설을 위한 굴착의 진행에 따른 발파진동 및 소음에 대해서도 계속적으로 측정하였다. 측정결과에 대한 분석결과, 시험발파를 통해 얻어진 추정식이 예측하는 지반 진동보다 더 낮은 지반 진동이 측정되었다.

본 연구는 연구용으로 건설되는 지하암반내 구조물에 대한 발파기법의 적용 타당성을 실증적으로 보여줌으로써 앞으로 추진될 대규모 지하처분 연구시설의 설계 및 건설에도 도움을 줄 것으로 예상된다. 또한 향후 발파기법에 의해 지하 심부 암반에 건설될 것으로 예상되는 고준위 방사성폐기물 처분장의 설계 및 건설 작업의 효율성 및 신뢰성 확보를 위한 기술적 경험 축적에 의의가 있을 것이다.

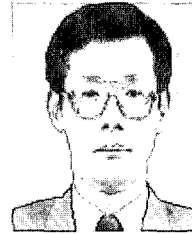
참고문헌

1. 권상기, 김경수, 박정화, 조원진, 2004a, 원자력 연구소내 처분지하연구시설에 대한 3차원 구조 안정성 해석, KAERI/TR-2688/2004.
2. 권상기, 박정화, 조원진, 2004b, 원자력연구소내 처분지하연구시설 부지의 지반 특성, KAERI/TR-2805/2004.
3. 조원진, 박정화, 권상기, 2004a, 소규모 지하처분연구시설 부지조사 및 평가, KAERI/TR-2751/2004.
4. 조원진, 박정화, 권상기, 2004b, 소규모 지하처분연구시설 기본설계, KAERI/TR-2769/2004.



권 상 기

1987 서울대학교 자원공학과 학사
1989 서울대학교 자원공학과 석사
1996 University of Missouri-Rolla, Mining Eng. 박사
현재 한국원자력연구소 선임연구원



조 원 진

1979 고려대학교 화학공학과 학사
1984 한국과학기술원 핵공학과 석사
1990 한국과학기술원 핵공학과 박사
현재 한국원자력연구소 방사성폐기물처분연구부



김 득 수

인하대학교 자원공학과 학사
중앙대학교 토목공학과 석사
현재 벽산엔지니어링(주) 지반사업부 부장