

## KURT 미소진동 모니터링

김경수<sup>1\*</sup> · 배대석<sup>1</sup> · 고용권<sup>1</sup> · 김종열<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원, <sup>2</sup>(주)소암건설터트

### Microseismic Monitoring for KAERI Underground Research Tunnel

Kyung-Su Kim<sup>1\*</sup>, Dae-Seok Bae<sup>1</sup>, Yong-Kwon Koh<sup>1</sup>, and Jung-Yul Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Atomic Energy Research Institute

<sup>2</sup>Soam Consultant Co., Ltd

KURT는 방사성폐기물 처분기술 개발을 위해 운영 중인 시설로서, 본 시설의 안전 운영을 위해 미소진동계측시스템을 구축하여 실시간으로 원격 감시관리 중에 있다. 본 시스템 구축 후 1년 간의 운영 결과, 총 14회의 진동 기록이 관측되었다. 이 중 2008년 10월 29일 공주시 남동 15 km 지점에서 발생한 규모 3.4의 지진을 제외하고는 대부분 극미소지진과 KURT 주변에서 인위적으로 발생한 진동들로 해석되었다. 현재까지의 모니터링 결과, KURT 벽면의 숏크리트 혹은 콘크리트 구조물 및 암반에서 단열의 생성·전파에 의해 발생한 고주파의 진동으로 추정되는 징후는 없는 것으로 판단된다. 미소진동계측시스템은 넓은 동작 범위의 특성을 가지며 현재 실시간으로 현장과 실내에서 감시관리 중에 있다. 본 시스템에 사용된 3 성분 수진기는 시추공에 매설하기 적당하도록 설계된 수진기로 진동 방향을 분석하여 미소진동의 진원지를 추적하는 데 적합하도록 하였다. 본 시스템에서 적용하는 계측기술은 지하공동 주변 암반의 균열현상과 낙반 등의 감시관리는 물론 모든 원자력 관련시설, 타 기간시설의 공학적 안전 진단에도 적용 가능하다.

**주요어** : 지하처분연구시설, 미소진동, 지진파, 단열발생 및 전파

The microseismic monitoring system with wide range of frequency has been operating in real time and it is remotely monitored at indoor and on-site for one year. This system was constructed and established in order to secure the safe and effective operation of the KAERI Underground Research Tunnel(KURT). For one year monitoring work, total 14 events were recorded in the vicinity of the KURT, and the majority of events are regarded as ultra-microseismic earthquake and artificial impacts around the tunnel. The major event is the magnitude 3.4 earthquake which was centered around Gongju city, Chungnam Province. It means that there is no significant evidence of high frequency microseismic event, which is associated with fracture initiation and/or propagation in the rock mass and shotcrete. Three components sensor was applied in order to analyze and define the direction of vibration as well as an epicenter of microseismic origin, and also properly designed and installed in a small borehole. This monitoring system is able to predict the location and timing of fracturing of rock mass and rock fall around an underground openings as well as analysis on safety of various kinds of engineering structures such as nuclear facilities and other structures.

**Key words** : KURT(KAERI Underground Research Tunnel), microseismic event, earthquake wave, fracture initiation and propagation

## 서 언

KURT (KAERI Underground Research Tunnel)는 방사성폐기물 지하연구시험시설로서 터널 입구로부터 50여

미터 까지 벽면은 콘크리트 라이닝으로 보강하였고, 나머지 구역의 대부분은 숏크리트로 처리하였다. 터널 내 일부 암반 등급이 양호한 구역은 처분관련 연구의 효율적인 수행을 위하여 원래의 암반을 그대로 노출시킨 상태로

\*Corresponding author: kskim@kaeri.re.kr

두었다 (한필수, 2005).

쏫크리트로 처리된 터널 내부 벽면은 계절적으로 우기와 건기를 반복하면서 지하수압과 터널 내부로 유입하는 지하수량에 의해 민감하게 영향을 받게 된다. 이와 더불어 습윤 및 건조 상태의 반복, 화학적 상호반응, 그리고 외부 진동 등에 의하여 쏫크리트의 열화과정이 진행될 것이다. 초기의 미세한 균열현상은 이와 같은 외부 영향으로 인하여 균열이 진행되고 결국에는 쏫크리트 물질이 파괴에 도달하게 될 것이다. 이 과정에서 초기 균열이 발생할 때, 그리고 균열이 확장 전파될 때 미소진동과 함께 초음파가 발생하므로 이들의 위치를 실시간으로 감시하면 터널 벽면의 취약 지점에 대한 집중적인 감시관리와 효율적인 시설의 유지관리가 가능하게 된다. 이러한 터널 벽면의 동적 거동에 대한 감시 기능은 방사성폐기물 처분장에도 동일하게 적용될 수 있다. 처분장 운영 중 및 폐쇄 후 단계에서 터널 벽면에서의 지하수 유입, 낙반, 붕괴 현상의 예측과 집중적인 감시가 가능하므로 안전성 측면에서 활용 가능하다.

미소진동 감지 및 해석을 이용한 균열 발생지점에 관한 연구 사례는 해외의 경우 많은 접근이 있었는데, 광산개발 시 굴착과정 전후에 발생하는 암석·암반 파열 (Young et al., 1992), 가행 광산 주변의 붕괴 지점 및 시각 결정 (Ellenberger et al., 2001), 가행 탄광갱도 내 구조물 및 암반의 파괴시 발생하는 미소진동 계측 및 감시관리 (Sivakumar et al., 2008) 등이 있었다. 국내의 경우에는 지하원유비축기지 건설 중 발파로 인해 유발되는 균열에 관계되는 미소진동 계측 (홍지수 외, 2006)이 있으나 이는 자연발생 미소진동 현상을 감시한 경우는 아니다.

본 논문은 KURT 내에서 이루어지는 방사성폐기물 처분안전성 확보와 관련한 연구를 원활히 수행하는데 필요한 시설의 안전 운영을 목적으로 설치된 미소진동계측시스템의 운영 결과에 관한 것이다. 현재 KURT에서 이루어지고 있는 실시간 모니터링 대상은 미소진동 뿐만 아니라 광섬유센서케이블을 이용한 터널 내 벽면의 지반변위 및 온도 변화 감시시스템도 운영되고 있다 (김경수 외 2009).

### 미소진동계측시스템 개요 및 원리

미소진동 모니터링은 암반 및 구조물의 균열과 파괴, 터널의 붕괴, 사면 붕괴, 단층의 움직임, 광산 내 필라 (pillar) 붕괴, 지진동 등의 발생 위치 및 규모의 특성 규명에 활용된다. 상기와 같은 붕괴 및 움직임에 의해

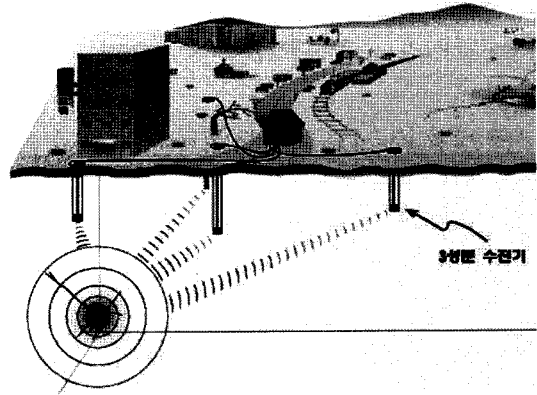


Fig. 1. Principles of the microseismic monitoring system.

발생되는 미소진동은 주변에 배열된 3성분 수진기에 도달하게 되고 각 수진기에 도달되는 주시(traveltime)를 이용하여 미소진동의 발생원 위치를 역산하게 된다. 이 원리는 일반적으로 지진이 발생하였을 때 그 진앙지를 산출하는 방식과 동일하다 (Fig. 1).

매질에 역학적 힘을 가하게 되면 매질의 진동을 유발하게 되며 이 발생원을 진원지라고 한다. 발생된 탄성파(진동)는 입자의 움직임 형태로 사방으로 전달되며 이때의 에너지는 매질의 물성에 따라서 감쇄하게 된다. 일반적으로 탄성파는 전달되는 과정에서 고주파수의 에너지를 잃게 되며 멀리 떨어진 진앙지에서 발생한 지진은 대부분 고주파수의 에너지가 소멸된 채로 5Hz 미만의 저주파수 탄성파로 전달되어 관측된다. 이에 비해서 각종 공사 등에서 유발하는 탄성파는 상대적으로 주파수가 높은 즉, 광대역 주파수 특성(10~1000 Hz)을 나타낸다.

KURT에 설치한 SUMO(SUMmit MONitoring) 시스템은 그 주파수 대역이 약 0.01~10,000 Hz의 넓은 범위를 감지할 수 있다. 이 시스템을 이용하여 미소진동에 의해

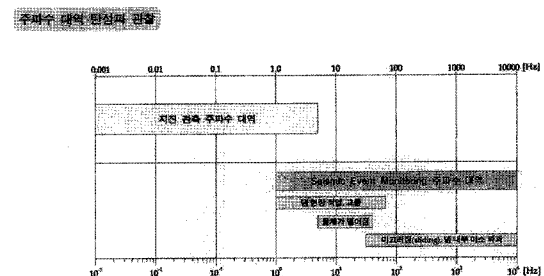


Fig. 2. Frequency range of the microseismic monitoring system, SUMO.

감지되는 주파수 중 지진 주파수 대역과 상호 대조하면 지진에 대한 감지는 물론, 공동 주변에서 발생하는 단열의 생성 및 전파, 터널 내 낙석 현상 시 발생하는 미소진동도 동시에 감시, 관측할 수 있다(Fig. 2).

### 미소진동 수신기 설치

KURT 감시관리시스템 중의 미세진동계측시스템은 독일 DMT사에서 개발한 SUMO시스템으로 24bit 아날로그-디지털 변환기(A/D converter)가 장착되어 미소진동 계측에 요구되는 넓은 동작 범위(dynamic range)를 가지고 있다(Fig. 3). 3성분 수신기는 시추공에 매설하기 적합하도록 설계되어 있어 진동 방향을 분석하고 그 진원지를 추적하는 데 적합하다. 이 시스템은 현재 현장에서 계측된

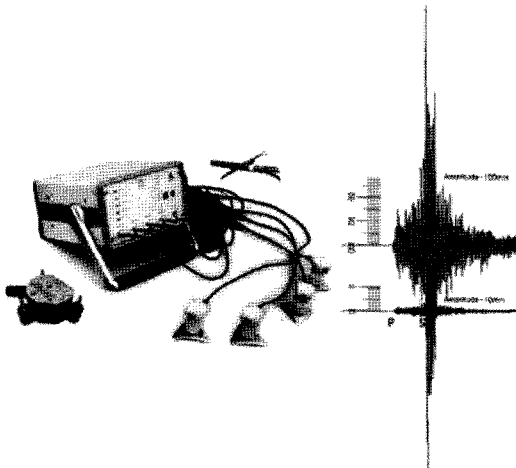


Fig. 3. Microseismic monitoring system (SUMO) and receivers.

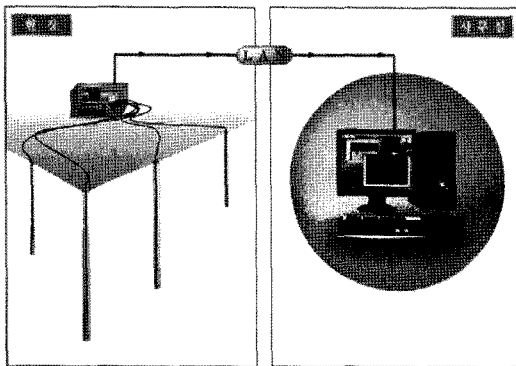


Fig. 4. Diagram of the remote microseismic monitoring system.

모든 미소진동 자료를 LAN을 이용하여 사무실에서 원격 감시할 수 있도록 시스템을 정비하고 있다(Fig. 4).

수신기는 KURT 터널 내부 좌우측 하단부에 심도 5m의 BX 규격의 시추공을 굴착한 후 총 10 개소에 매설하고 시멘트 몰타르로 그라우팅 하였다. A-B-C 및 H-I-J 단면의 경우 상·하단에 각각 3 개소 설치하였으며 D, E 및 F는 각각 1 개소 그리고 지점 G는 3성분(Gx, Gy, Gz) 수신기를 매설하였다(Table 1, Fig. 5).

### 미소진동계측 결과 및 해석

KURT에 설치된 미소진동계측시스템에서 2008. 1. 21~2009. 1. 9까지 관측된 진동의 총 발생 횟수는 14회에 달한다(Fig. 6). 이들 중 2008. 10. 29, 충남 공주시 남동쪽 15 km 지점에서 발생한 진도 3.4의 지진(Fig. 7a) 이외의 대부분의 진동은 소규모 미소지진과 터널 주변에서 자연 혹은 인위적인 충격에 의한 진동들이다. 지진에 의한 진동은 상당히 긴 시간 동안에 진동이 지속되고

Table 1. Transverse Mercator coordinate (X,Y) and elevation (Z) of the microseismic receivers.

Channel No.	X	Y	Z
A	232509.033	324887.915	87.075
B	232510.523	324887.313	71.449
C	232504.695	324870.790	72.087
D	232404.840	324915.230	62.315
E	232416.034	324936.646	61.914
F	232410.870	324964.522	61.663
Gx, Gy, Gz	232445.102	324902.934	65.716
H	232488.321	324898.889	84.516
I	232489.609	324898.639	70.230
J	232484.662	324881.473	70.159

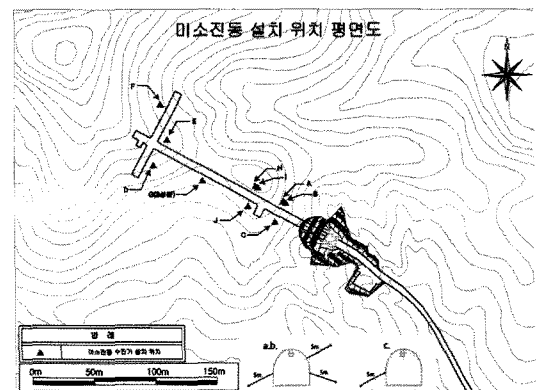


Fig. 5. Location of the microseismic receivers in KURT.

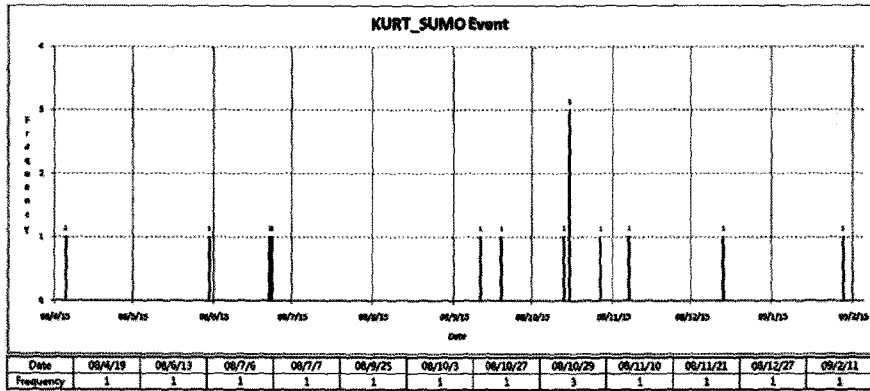
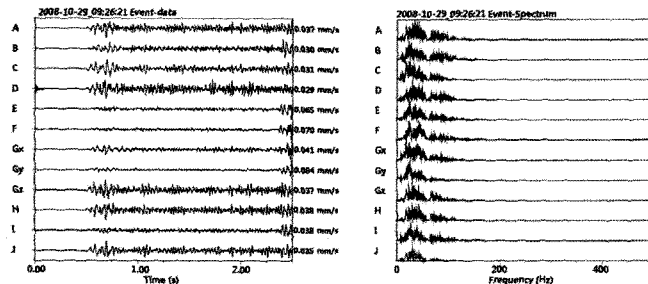
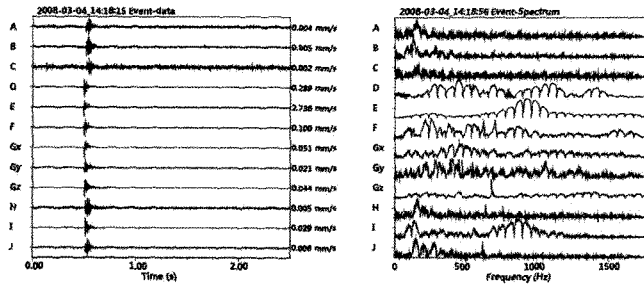


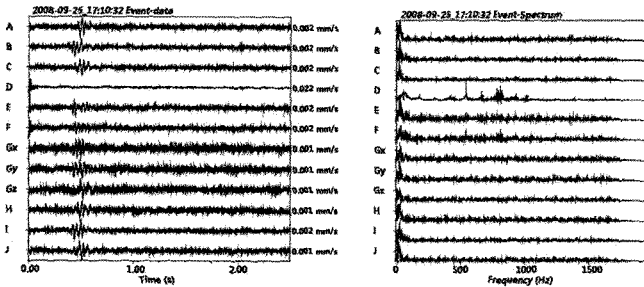
Fig. 6. Number of the microseismic events monitored in KURT during Jan. 21, 2008 to Jan. 9, 2009.



(a) Magnitude 3.4 earthquake event occurred at Oct. 29, 2008 and centered 15 km southeast of Gongju City.



(b) The induced seismic events during the geophysical survey to identify the fracture zone.



(c) The natural seismic events

Fig. 7. Microseismic and frequency data monitored in KURT.

있으며 그의 주파수 특성도 탄성파에 의한 것보다 낮은 100 Hz 이하의 주파수 대역을 보이고 있는 특징을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 지진의 진앙지가 비교적 가까운 거리에서 취득된 자료의 특성을 나타내는 것으로 해석된다.

한편, KURT 주변에서 단일대 조사를 목적으로 이루어진 탄성파탐사에 의한 진동 특성을 살펴 보면, 매우 짧은 시간 동안 진동하며 주파수는 0~1,500 Hz에 달하는, 상당히 넓은 범위의 주파수 대역을 보인다(Fig. 7b). 자연적으로 발생한 진동 특성은 대체로 강도가 약하고 저주파 특성을 나타내어 단열이 발생되거나 단열이 전파되는 등의 압박거동으로 인한 신호로 간주하기는 곤란하다 (Fig. 7c). 또한 각 수진기에 도달된 진동속도 (swing velocity)의 범위가 0.001~0.002 mm/s인 것을 감안할 때 대부분 잠음 수준으로 판단되어 터널 주변에서 균열현상이나 낙석 혹은 붕괴현상의 징후를 지시하지는 않는다. 일반적으로 지하공동 주변에서 발생하는 단열 발생이나 전파, 소규모 낙석이나 붕괴, 현장 시험에서 취급되는 중장비의 낙하 또는 충격 등에 의한 진동이 수진기에 도달될 때의 주파수 특성은 600 Hz 내외이고 진동속도는 0.05~0.5 mm/s의 범위로 나타난다. KURT 내에 설치된 미소진동계측시스템에서 현재까지 계측된 총 14개의 진동 중에서 순수하게 KURT 내에서 발생한 진동으로 판단되는 것은 단지 2 개에 불과하였으며 나머지는 소규모 지진에 의한 진동으로 판단된다.

### 토의 및 결론

미소진동을 유발하는 원인은 지진, 암석의 균열생성 및 파열, 낙석, 발파, 열차 등의 동적 진동, 사면붕괴 현상 등에 의하여 발생한다. 탄성과 발생원은 항상 P 및 S 파를 발생하며, 이들은 입자의 움직임이나 전달 속도 측면에서 크게 그 특성이 차별된다. 만약 진원지 규명이 주요 현안 이면 진원지 주변 최소 4 개 지점에서 탄성파의 도달 특성은 관찰하여야 한다. 계측을 통하여 얻어지는 파형은

일반적으로 짧은 시간의 진동특성을 가지며, 파형의 도달 주시는 진원지 규명에 유용하다(seismic monitoring). 또한, 탄성파는 진행되는 과정에서 마주치게 되는 구조물(교량, 댐, 고층건물 등)을 구성하는 부재의 진동을 유발하게 된다. 이에 대하여 반응하는 부재의 진동특성과 크기는 곧바로 부재가 갖는 고유주파수와 연관되므로 구조물의 안전에 영향을 미친다. 이러한 파형의 진동특성은 구조물 안전 진단을 위한 진동분석(vibration analysis)에 활용된다. 참고로 독일에서 각 구조물별 구조에 영향을 미치는 진동에 대한 실험 및 이론 계산을 통해 얻어진 진동의 허용기준치를 법제화하여 진동속도로 나타내고 있다 (Table 2).

KURT에서 계측된 진동파의 대부분은 진폭이 대단히 적은 것으로 미루어 볼 때 지반 변위에 문제를 유발시킬 정도의 단열 형성이 아닌 터널 내외부에서 발생한 미소진동으로 판단된다. 이들의 진원지를 파악하기 위해서는 모든 수진기에서 초동 주시를 발체할 수 있어야 하나 진폭이 좀 더 크게 나타나는 경우에 가능하게 될 것이다. 이러한 미소진동의 실시간 감시관리가 가능해진 근본적인 배경은 컴퓨터 기억장치의 성능 향상과 특정 진동 발생 시 실시간의 대규모 자료 관리가 원활해졌기 때문이다. 최근 미소진동 해석에 대한 연구사례 (Sivakumar et al., 2008)에서 사용한 계측시스템도 본 시스템과 같은 풍부하고 고품질의 자료 관리 능력에는 미치지 못하는 수준이다.

KURT에 설치된 미소진동계측시스템의 운영을 통하여 최근 1년 간 총 14회의 진동이 관측되었으며, 이 중 공주시 남동쪽 15 km 지점에서 발생한 규모 3.4의 지진 이외에는 대부분 극미소지진과 KURT 주변에서 인위적으로 발생한 진동인 것으로 판단된다. 현재까지 계측결과, 특히 숏크리트, 콘크리트 구조물 및 암반에서 발생할 수 있는 단열의 생성 혹은 전파에 의한 고주파의 진동으로 추정되는 징후는 없는 것으로 판단된다.

미소진동계측시스템은 넓은 동작 범위의 특성을 가지며, 현재 실시간으로 현장과 실내에서 감시관리 중에 있다. 본 시스템에 사용된 3 성분 수진기는 시추공에 매설하기

**Table 2.** A guidelines of swing velocity for architectural structures (German Standard DIN4150-3:1999-02).

구 분	Swing velocity의 허용기준치 (mm/s)			
	주파수 대역			전주파수대역 최대치
	1~10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz	
공장지역 구조물	20	20 - 40	40 - 50	40
주거지역 구조물	5	5 - 15	15 - 20	15
진동에 민감한 구조물 (동상, 교회, 문화재, 병원 등)	3	3 - 8	8 - 10	8

적당하도록 설계된 시추공용 수진기로 진동 방향을 분석하여 미소진동의 진원지를 추적하는 데 적합하도록 하였다. 이와 같이 본 시스템은 지하공동 주변 암반의 균열현상과 낙반 등의 감시관리는 물론 모든 원자력관련 시설을 포함한 타 기간시설의 공학적 안전진단에도 적용 가능하다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구기반확충사업-연구시설/장비구축운영분야 지원 (과제번호: 2008-03796)으로 수행되었으며, 원자력연구개발 중장기계획사업과제인 KURT 시설지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 김경수, 배대석, 고용권, 김종열, 2009, 광섬유센서케이블을 이용한 지하연구시설의 지반변위 및 온도변화 감시시스템 구축, 대한지질공학회지, 19(1), pp.63-70.
- 한필수, 2005, 지하처분연구시설 확보 및 활용계획, KAERI/TR-2969/2005, 한국원자력연구원.
- 홍지수, 이진무, 2006, 과지압 암반 내 대규모 지하 유류비축기지 미세탄성파 계측, 대한지질공학회 2006년도 학술발표대회논문집, pp.155-164.
- Ellenberger, J. L., Heasley, K. A., Swanson P. L. S., and Mercier, J., 2001, Three Dimensional Microseismic Monitoring of a Utah Longwall, Rockmechanics in the National Interest, Elsworth, Tinucci & Heasley (eds). pp.1321-1326.
- Sivakumar, C., Srinivasan C., and Willy, Y. A., 2008, Real Time Microseismic Monitoring to Study Geomechanics of Underground Structures, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), pp.1-6.
- Young, R. P., Maxwell, S. C., Urbancic T. I., and Feignier, B., 1992, Mining-induced Microseismicity: Monitoring and Applications of Imaging and Source Mechanism Techniques, PAGEOPH(Pure and Applied Geophysics), Vol. 139, No.3/4.

---

2009년 3월 20일 원고접수, 2009년 5월 30일 게재승인

#### 김경수

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부  
대전광역시 유성구 덕진동 150-1번지  
TEL: 042-868-2365  
FAX: 042-868-2064  
e-mail: kskim@kaeri.re.kr

#### 배대석

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부  
대전광역시 유성구 덕진동 150-1번지  
TEL: 042-868-2030  
FAX: 042-868-2064  
e-mail: ndsbae@kaeri.re.kr

#### 고용권

한국원자력연구원 방사성폐기물기술개발부  
대전광역시 유성구 덕진동 150-1번지  
TEL: 042-868-8159  
FAX: 042-868-2064  
e-mail: nykkoh@kaeri.re.kr

#### 김종열

(주)소암컨설팅트  
대전광역시 유성구 관평동 테크노벨리 760번지  
TEL: 042-863-2830  
FAX: 042-863-2834  
e-mail: soamkij@empal.com