

## 단계적 용해에 의한 연대측정법 연구

박계현

부경대학교 환경·해양대학 환경지질학과

### The Study of Age Determination Using Stepwise Dissolution Technique

Kye-Hun Park

Department Environmental Geosciences, Pukyong National University

**요약:** 최근 기존 연대측정법의 한계를 극복하여 절대연령 측정 대상을 획기적으로 넓힐 수 있는 방법으로 개발되고 있는 단계적 용해에 의한 연대측정법을 국내 시료에 적용하여 이 방법에 의한 연대측정의 성공가능성에 대해 평가하여 보았다. 대상 시료는 옥천변성대 대전 남부지역 창리층의 함우라늄 흑색 점판암, 영남 육괴 북동부의 선캠브리아 내덕리 화강암에서 분리한 전기석 및 옥방광산의 회중석 등을 선정하였다. 이들에 대한 단계적 용해를 위해 산의 종류와 시간을 달리하여 점차 그 세기를 늘려가며 납을 용출시켰으며, 각 단계에서 얻은 용액들에 대해 납 동위원소 비율과 함께 납과 우라늄 함량을 열이온화 질량분석기로 측정하였다. 그 결과 창리층 흑색 점판암과 내덕리 화강암으로부터는 상당한 Pb 동위원소 값의 분산을 얻을 수 있었으며 단계적 용해에 의한 Pb-Pb 연대측정이 성공적일 수 있음을 보여준다. 단계적 용해 과정에서 시료의 종류마다 우라늄과 납의 거동이 다르며 이는 구성 광물의 종류에 따라 우라늄과 납이 차지하는 결정 내에서의 위치에 지배되는 것으로 판단된다.

**핵심어:** 단계적 용해, 연대측정, 납, 우라늄, 열 이온화 질량분석기

**Abstract:** Recently developing method of age determination using stepwise dissolution technique to expand the applicability of absolute age determination significantly is evaluated whether it is applicable to the Korean samples. The materials selected for the study are uranium-bearing black slates from Changni Formation of Ogcheon metamorphic belt, tourmaline separated from Naedeongni granite of Yeongnam massif, garnet and ilmenite separated from ilmenite-bearing anorthositic rock of Yeongnam massif, scheelites from Ogbang mine, and magnetite separated from Gyemyeongsan Formation of Ogcheon metamorphic belt. For the stepwise dissolution, various acid steps with different normalities and different durations were applied to leach the samples. The leachate from each step was analyzed to determine the Pb isotopic composition and concentrations of Pb and U using thermal ionization mass spectrometer. The black slates from the Changni Formation and the tourmaline from the Naedeongni granite reveal significant variation of Pb isotopic composition, which reveals the potential of such stepwise dissolution technique as a dating method. The behaviors of uranium and lead during the each stage of step leaching are different, which seem to reflect the differences in positions within the crystal lattices depending upon mineral species.

**Key words:** stepwise dissolution, age determination, Pb, U, thermal ionization mass spectrometer

## 서 언

수 십억년 전에 만들어진 선캠브리아의 암석으로부터 수 만년 이내의 최근 암석이나 퇴적물들을 연구하

는 지질학의 여러 분야에서 연대자료는 매우 중요하다. 지질연대를 알아내는 방법 중에서 잘 알려진 시대에 나타나는 화석을 이용하는 방법은 광역적인 대비가 가능하기 때문에 매우 유용한 방법이다. 그러나 이 방

\*Corresponding author: Tel. 82-51-620-5241, E-mail. khpark@pknu.ac.kr

법은 화석이 산출되는 암층에 국한하여 적용될 수 있으며 나머지 대부분의 경우에는 절대연령 측정 방법에 의존할 수 밖에 없다. 절대연령 측정방법으로 개발된 것 중에서 현재 널리 적용되고 있는 것으로는 K-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd, U-Th-Pb 동위원소 계를 이용하는 전암 혹은 광물 연대측정 방법들이다. 그러나 절대연령 측정법의 적용성은 연구대상 시료의 종류와 조성 및 상태에 따라 매우 제한적이며, 성공적인 연대측정이 이루어지는 경우보다 오히려 그렇지 못한 경우가 더 많다.

Rb-Sr, Sm-Nd 연대측정법의 경우와 같이 여러 시료를 이용하여 등시선을 만들어 연대를 구하는 방법을 성공적으로 적용하기 위해서는 모-자 동위원소 비율이 상당한 범위에 걸쳐 있어야 한다. 이러한 방법을 이용하여 연대측정을 하기 위해서는 초기치가 같고 생성 이래 폐쇄계를 유지한 여러 개의 시료를 구해야 한다.

한편 K-Ar이나 Ar-Ar 연대측정의 경우에는 방사성 붕괴로 만들어지는 산물이 불활성 기체로 광물의 생성 시에 거의 포함되지 않았다고 가정할 수 있기 때문에 여러 개의 시료가 필요하지는 않다. 그러나 이 동위원소 계는 열변성작용이나 변질의 영향을 비교적 쉽게 받을 수 있으며, 적용이 가능한 암석이나 광물은 생성 이래 충분한 Ar을 만들기엔 충분한 만큼의 K를 함유한 것으로 제한된다. 저어콘의 U-Pb 연대측정은 비교적 정확하고 강력한 연대측정 방법이지만 저어콘이 없는 시료에는 적용할 수가 없다.

이와 같이 일반적으로 지질시료의 절대연령 측정에 널리 이용되고 있는 Rb-Sr, Sm-Nd, K-Ar, U-Th-Pb 동위원소 계를 이용한 연대측정 방법들은 해당 조건들을 만족하는 시료에 대해서만 적용이 가능하다. 따라서 비교적 이러한 조건을 잘 충족시키는 화성암과 일부 변성암을 제외한 많은 암석 및 광물들의 연대측정에는 적용하기가 곤란한 경우가 많다.

이러한 기존 연대측정법의 문제를 극복하기 위하여 새로운 연대측정의 방법을 개발하려는 노력이 지속되고 있으나 대부분의 경우 매우 국한된 활용성을 가진 것들이 대부분이다. 하지만 최근 자주 보고되고 있는 단계적 용해에 의한 Pb-Pb 연대측정법(Frei and Pettke, 1996; Berger and Braun, 1997; Erel *et al.*, 1997; Frei *et al.*, 1997; Dahl and Frei, 1998)의 경우 기존의 절대연령을 측정하는 방법으로는 연대측정이 불가능하거나 곤란한 많은 시료들로부터 성공적인 지질연대를 얻을 수 있는 방법으로 주목받고 있다.

이 연구에서는 이러한 단계적 용해에 의한 연대측정법이 국내의 암석 및 광상시료에 비교적 널리 적용할 수 있는 것으로 판단하여 그 적용가능성을 시험하였

다. 향후의 활용성을 고려하여 선별한 몇 가지 광물 및 암석에 대하여 산의 종류와 세기 및 시간을 달리하여 단계적으로 용해시키는 실험을 실시하였다. 각 단계에서 용출된 Pb의 동위원소 비율을 측정하여 연대측정의 가능성을 검토하였다. 아울러 연구가 많이 이루어지지 않아 아직 잘 알려지지 않고 있는 단계적 용해 실험의 각 단계에서의 우라늄과 Pb의 거동(예; DeWolf *et al.*, 1996)에 대해서도 동위원소 회석법에 의한 정밀한 정량적인 농도 자료를 구하여 비교분석하고 그 의미에 대해 논의하였다.

## 분석

### 단계적 용해에 의한 연대측정법의 개요

시료를 한꺼번에 용해시켜 그로부터 동위원소 비율의 측정 및 함량분석을 하는 기존의 방법과는 달리 단계적 용해에 의한 연대측정법은 시료를 여러 차례에 걸쳐 단계적으로 용해시키며 각 단계에서 부분적으로 용해된 성분들의 동위원소 조성을 이용하여 연대측정을 실시한다. 이러한 방법을 적용할 때 경우에 따라서는 각 단계별로 상당한 동위원소 조성의 변화를 나타낸다. 따라서 한 시료로부터 얻어진 여러 Pb 동위원소 값으로 연대측정이 가능하게 된다.

아직까지는 각 단계별로 다른 Pb 동위원소 값이 얻어지는 것에 대한 확실한 이론적 혹은 실험적 해석이 이루어지고 있지는 않으나 광물의 결정격자 위치마다 우라늄과 납이 분배되는 정도가 다르기 때문인 것으로 추정된다. 이와 같이 광물 내의 격자 위치마다 결합의 종류나 세기가 다를 것이며 이는 각 용해단계에서의 다른 거동으로 반영이 될 수 있다. 따라서 적합한 조건의 용해 단계를 적용하게 되면 보통 납의 함량이 많게 되거나 혹은 방사기원의 납이 대부분인 부분들을 선별적으로 추출해 낼 수도 있을 것이다. 이러한 최적의 단계적인 Pb의 용출 조건을 찾아내는 것이 이 방법의 성공여부에 가장 중요한 요소이다.

성공적인 실험을 위해서 일반적으로는 처음에는 약한 농도의 산을 적용하며 점차 산의 농도를 늘려 나간다. 또한 산의 종류 역시 약산으로부터 강산으로 변화시키며, 경우에 따라서는 각 단계의 시간과 실험 온도 조건을 적절히 조절한다.

이 방법은 전암으로 분석할 수 없는 시료에 적용할 수 있기 때문에 매우 강력한 연구수단이 될 수 있다. 현재까지 국외에서 성공한 광물의 종류를 살펴보면 전기석, 회중석, 각섬석, 석류석, 자철석 등등 여러 종류의 조암 광물과 광석광물들을 포함하고 있기 때문에 그 동안 연

대측정이 곤란하여 연구에 큰 제약이 되었던 여러 암석과 광상의 성인연구에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

**분석시료의 선정**

이 연구에서는 여러 가지 종류의 지질 시료에 대해 단계적 용해법에 의한 연대측정법을 적용하여보았다. 시료의 선정시 고려한 사항은 외국의 기존 연구에서 성공한 사례가 보고된 광물 등과 같이 성공가능성이 높다고 판단되는 것, 흔히 산출하는 광물로 성공적인 분석법 개발시 활용성이 높은 것, 혹은 연대자료를 구할 수 있을 경우 지질해석에 큰 도움이 될 수 있는 것 등이었다.

**창리층 흑색 점판암:** 옥천 변성대는 경기육괴와 영남 육괴의 사이에 자리잡고 있으며 생성 시기, 변성작용, 구조 등에 많은 연구가 진행되어 왔다(예, 조문섭 외, 1995; 강지훈과 류충렬, 1997; 박계현과 정창식, 1998; 오창환 외, 1999). 더욱이 최근에는 남중국과 북중국의 충돌대의 동쪽 연장선이 어디로 지나가느냐에 대한 학계의 관심이 높아지면서 옥천 변성대의 생성과 진화를 밝히는 것이 상당히 중요한 과제로 대두되고 있다(예, Cluzel, 1991; Yin and Nie, 1993; Ree et al., 1996). 그러나 아직도 옥천 변성대의 생성 및 변성 시기에 대해서는 여러 가지의 다른 연대들이 보고되고 있으며(Cliff et al., 1985; 권성택과 藍晶瑩, 1991; 민경원 외, 1995; Lee et al., 1998; 박계현과 정창식, 1998) 아직 해결해야할 과제로 남아있으며 생성시거나 변성시기를 알아내는 것이 시급한 실정이다.

한편 옥천 변성대는 과거 우라늄 광화작용에 대한 집중적인 조사가 이루어졌던 곳으로 흑색 셰일이나 점판암 등 일부 암석에는 상당량의 우라늄이 함유되어 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 사실은 짧은 기간 동안에도 상당량의 방사기원 납이 만들어질 수 있는 여건이 되기 때문에 Pb 동위원소를 이용하는 연대측정법을 적용할 수 있는 잠재력이 있다. 더욱이 단계적 용해에 의해 이러한 Pb 동위원소 값의 변화범위가 더욱 확대될 경우 성공적인 연대측정이 이루어질 수 있다고 판단되어 실험대상으로 선정하였다. 이 연구에서 사용한 시료는 옥천 변성대 대전 남부 지역의 창리층에서 채취한 시료이다. CH7과 CH8-2 시료는 모두 가이저 계수기가 민감하게 반응할 정도의 우라늄을 함유하고 있는 노두에서 채취하였다. CH7은 창리층에서 전형적으로 나타나는 흑색 점판암이며, CH8-2 시료는 무게가 매우 가볍게 느껴질 정도로 주로 탄질성분으로 이루어진 시료이다.

단계적 용해에 의한 Pb-Pb 연대측정 실험은 대개 단

일 광물에 대해 실시되고 있으나 이 암석의 경우 세립이고 더욱이 함우라늄 광물들은 매우 작은 입자로 함유되어 있기 때문에 전암 분말을 그대로 실험에 사용하기로 결정하였다.

**내덕리 화강암의 전기석:** Frei and Pettke(1996)은 전기석에 대해 단계적 용해법을 적용하여 성공적으로 Pb-Pb 연대를 구하였다. 또한 전기석은 많은 화강암질 암석과 페그마타이트 등에 포함되는 비교적 널리 산출되는 광물이기 때문에 이러한 연대측정법이 성공할 경우 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다. 이 연구에서는 우리 나라에 분포하는 전기석에도 이러한 단계적 용해법을 적용하여 연대측정이 가능한지 검증해보기로 하였다. 대상시료로는 최근 백립암상의 변성작용이 보고된 영남육괴 북동부 지역(권용완 외, 1999)의 내덕리 화강암으로부터 분리한 전기석을 선정하였다. 윤현수(1991)는 이 암체의 백운모로부터  $1761 \pm 36$  Ma의 K-Ar 연대를 보고하였으며, 박계현 외(1993)는  $1825 \pm 86$  Ma의 전암 Pb-Pb 연대를 보고한바 있다. 이 연구에서는 내덕리 화강암에서 분리한 전기석에서 단계적 용해 실험을 통하여 Pb-Pb 연대를 구할 수 있는지 여부 및 이 방법에 의한 연대를 기존의 연대자료와 비교하여 적절한 실험방법을 알아내고자 하였다.

**하동-산청 회장암:** 영남육괴 지리산 지역은 백립암상의 변성작용이 일어난 것으로 보고되었으며(송용선, 1999) 한반도 선캄브리아 기저지각의 진화를 밝히는데 매우 중요한 곳이다. Kwon and Jeong(1990)은 이 지역에 산출하는 하동-산청 회장암복합체 두 시료에 대하여  $1690 \pm 22$  Ma와  $1678 \pm 90$  Ma의 Sm-Nd 전암-광물 연대를 구하였으며 이 연대를 이 암체의 생성연대로 해석하였다. 그러나 이 연대측정에 사용된 광물들은 엄밀히 말하자면 원래의 회장암질 마그마로부터 정출된 광물들이 아니라 변성작용을 받아 만들어진 광물들이기 때문에 Kwon and Jeong(1990)이 구한 연대는 변성연대로 해석하여야 할 것이다. 회장암의 경우 전세계적으로 시생대와 원생대의 비교적 좁은 연대 범위에 국한되어 나타나는 암체이며 고지리 복원과 이를 통한 지구조 진화연구에 매우 중요한 암체이다. 그러나 저어콘이 잘 산출되지 않아 저어콘의 U-Pb 분석에 의한 연대측정이 어려우며, 경우에 따라서는 Kwon and Jeong(1990)이 적용한 것과 같이 Sm-Nd 연대측정법이 적합한 절대연령 측정수단이 될 수도 있으나 Sm/Nd 비율의 변화가 크지 않거나 원래 Nd 동위원소 비의 불균질성을 보이는 경우 마땅한 연대측정 수단이 없었다. 따라서 이 암체에 적용가능한 연대측정 방법을 개발하는 것은 큰 의미가 있다.

정지곤 외(1989)는 이 회장암체의 분포지역에서 티타늄 광체를 보고하였으며 이종만 외(1999)는 이 광체를 몇 가지 유형으로 나누고 회장암체와 동시기거나 혹은 회장암질 마그마의 분화 후기에 잔류용액으로부터 만들어져 회장암체를 관입한 것으로 해석하였다. 이 연구에서는 이러한 회장암체 내에 맥상으로 관입한 형태로 산출하는 함 티타늄 회장암질암으로부터 티탄철석과 석류석을 분리하여 실험에 사용하였다. 한편 이 광물들은 많은 화성암과 변성암 및 광상 등에서 산출되는 광물들로서 이 광물들에 대한 새로운 연대측정법이 성공한다면 많은 활용이 예상된다.

**기타 시료:** 이 외에서 다양한 광물들에 대한 실험을 통해 단계적 용해에 의한 연대측정법의 활용성을 알아보기 위해서 영남육괴 북동부 지역 옥방 광산의 회중석, 옥천변성대 계명산층의 자철석 등의 광물 시료를 대상으로 실험하였다. 자철석 역시 다양한 연령의 화성암과 변성암에서 흔히 발견되는 광물이며 회중석은 광석광물로서 많은 광상에서 산출되기 때문에 여러 암체와 광상의 직접적인 연대측정시 많은 활용성이 기대된다고 판단된다.

### 실험방법

이 연구에 쓰인 석류석, 전기석, 티탄철석, 자철석 및 회중석을 함유하고 있는 시료들은 모두 육안으로도 쉽게 해당 광물을 구분할 수 있는 형태로 산출하고 있다. 광물의 분리는 약 5 mm 두께의 암석 슬랩을 부수어 해당 광물이 많이 농집되어 있는 부분을 고른 다음 이것을 다시 잘게 부수어 탈이온수로 씻어낸 다음 건조시켜 최종적으로는 실체 현미경 아래서 수작업으로 다른 광물이나 변질된 부분 등의 불순물들을 골라내었다.

단계적 용해는 각 단계에서 빠져나오는 납의 동위원소 범위를 극대화하기 위해 약한 산으로부터 강한 산의 종류로 변화시켜가며 실험하였다. 가장 먼저 실험을 실시한 함티탄철석 회장암질암으로부터 분리한 석류석 및 티탄철석의 경우는 단계별로 1 N HBr로 15분, 4.5 N HBr로 30분, 7 N HNO<sub>3</sub>로 3시간동안 실온에서 수행하였다. 각 단계에서 산으로 처리된 용액은 원심분리를 이용하여 잔류분말을 가라앉힌 다음 용액을 분리하였다. 분리된 용액은 가열판 위에서 건조한 뒤 1 N HBr 용액을 더한 다음 Pb 동위원소를 분리하였다. 잔류물들은 다음 단계로 옮겨져 추가적인 산 처리를 수행하였다. 마지막으로 8시간 정도 150°C에 맞춘 가열판 위에서 HF+HClO<sub>4</sub>+HNO<sub>3</sub>의 혼합산을 이용하여 용해시키고 이로부터 역시 Pb를 분리하여 분석하였다.

다른 대부분의 시료에는 HBr을 1 N, 4.5 N, 9 N의 세 단계로 구분하여 적용한 다음에 HNO<sub>3</sub>를 3.5N과 7N의 두 단계로 적용하고, 그 다음에 HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>의 혼합산을 사용하였다. 창리층 시료의 경우에는 암석 내에 상당량의 탄산염 광물이 존재하기 때문에 HBr 단계들을 적용하기 전에 먼저 초산으로 용출실험을 하는 단계를 추가하였다.

동위원소 회석법에 의한 Pb와 U의 정량은 각 단계에서 약 1/10의 용액을 남겨두었다가 Pb 동위원소 조성 분석의 결과 상당한 변화가 관찰된 경우를 중심으로 수행하였다. 납은 음이온교환수지와 1 N HBr을 사용하여 다른 원소들로부터 분리하였으며 우라늄은 7 N HNO<sub>3</sub>를 사용하여 분리하였다. 납은 실리카겔-인산 혼합물을 이용하여 Re 단일 필라멘트에 얹어 분석하였으며, U 분석은 Re 삼중 필라멘트를 사용하였다. Pb 동위원소 비율측정 및 동위원소 회석법에 의한 U, Pb의 정량분석은 모두 한국기초과학지원연구원 동위원소 분석팀의 청정실험실과 열이온화 질량분석기(VG54-30)를 이용하여 수행하였다. Pb 동위원소 비율은 동일한 질량분석기로 측정된 NIST-981 값을 이용하여 질량분별에 대해 보정한 결과를 보고하였다. 질량분별 보정 값은 원자단위질량(amu)당 1.001151로 계산되었다. 이 연구에서 보정의 기준으로 삼은 NIST981의 값은 Thirlwall(2000)의 추천값을 사용하였다. 납의 바탕값은 전 암시료에 대한 일반적인 실험시 1.2 ng 이내의 수준이다. 이 실험에 수행한 각 단계별 바탕값은 이보다 적은 값으로써 정창식과 권성택(2001)의 값을 사용하여 각 단계별로 계산하여 필요시 측정된 Pb 동위원소 값을 보정하여 보고하였다. 동위원소 비율의 보정 계산에 사용된 바탕 Pb의 동위원소 조성은 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 18.323, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 15.57, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 38.209(오차 0.2%)이다. 우라늄의 바탕값은 0.1 ng의 수준이다.

### 결과 및 토의

분석된 시료들의 Pb 동위원소 비율과 Pb 및 U의 정량값은 Table 1~3과 같다. 단계적 용해에 의한 납 동위원소의 비율변화나 단계별로 용출되는 납과 우라늄의 양 등이 시료에 따라 매우 다르기 때문에 각 시료별로 Pb 동위원소의 분산도와 이에 따른 Pb-Pb 연대결과를 살펴보고 이에 대해 논의한다.

한편 이 연구에서와 같은 단계별 용해에 의한 Pb-Pb 연대측정이 성공하기 위해서는 광물이 만들어질 때 처음부터 들어간 보통 납과 그 이후에 우라늄과 토륨의 붕괴로 만들어진 납을 잘 구분하여 용출시키는 것이

**Table 1. The results of stepwise dissolution for the black slates from Changni Formation and the tourmaline separate from Naedeongni granite.**

Sample	Step*	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	Pb(ng)	%	U(ng)	%	<sup>208</sup> U/ <sup>204</sup> Pb
<b>Black slates from Changni Formation</b>									
CH 7	Acetic Acid	36.223 ± 0.459	16.610 ± 0.232	40.170 ± 0.404	10.1	2.2	500	9.3	4006
	1N HBr	40.709 ± 0.053	16.901 ± 0.024	40.914 ± 0.043	110	23.8	515	9.6	401
	4.5N HBr	38.956 ± 0.052	16.424 ± 0.024	39.107 ± 0.042	134	29.0	855	15.9	525
	9N HBr	43.371 ± 0.162	17.023 ± 0.071	40.532 ± 0.122	70.7	55.1	524	9.7	652
	3.5N HNO <sub>3</sub>	174.837 ± 1.702	23.652 ± 0.249	43.285 ± 0.354	31.6	6.9	807	15.0	5349
	7N HNO <sub>3</sub>	88.500 ± 0.541	19.262 ± 0.131	44.323 ± 0.227	33.8	7.3	818	15.2	3192
	Mixed Acid	72.288 ± 0.191	18.421 ± 0.055	45.039 ± 0.099	71.1	15.4	1356	25.2	2251
	Total				461	100	5375	100	
CH8-2	Acetic Acid	104.699 ± 0.263	20.113 ± 0.055	39.511 ± 0.082	85.7	1.6	7570	15.6	12575
	1N HBr	92.083 ± 0.029	19.450 ± 0.006	39.317 ± 0.011	1003	18.7	16941	34.9	2210
	4.5N HBr	80.192 ± 0.023	18.842 ± 0.006	39.233 ± 0.010	1117	20.8	17961	37.0	1930
	9N HBr	105.923 ± 0.040	20.161 ± 0.008	39.405 ± 0.013	1095	20.4	4007	48.3	525
	3.5N HNO <sub>3</sub>	57.206 ± 0.059	17.639 ± 0.019	38.986 ± 0.038	275	5.1	536	1.1	193
	7N HNO <sub>3</sub>	36.127 ± 0.041	16.569 ± 0.019	38.934 ± 0.043	1034	19.3	743	1.5	57.5
	Mixed Acid	34.419 ± 0.017	16.529 ± 0.008	39.053 ± 0.019	749	14.0	768	1.6	80.6
	Total				5359	100	48526	100	
<b>Toumaline from Naedeongni Granite</b>									
ND35-1	1N HBr	36.980 ± 0.039	17.449 ± 0.020	37.659 ± 0.033	155	16.4	149	13.3	77.5
	4.5N HBr	48.187 ± 0.088	18.834 ± 0.037	38.183 ± 0.056	127	13.4	111	9.9	79.5
	9N HBr	53.493 ± 0.148	19.424 ± 0.058	38.288 ± 0.086	105	11.1	149	13.3	138
	3.5N HNO <sub>3</sub>	61.952 ± 0.267	22.221 ± 0.094	39.536 ± 0.139	39.1	4.1	132	11.8	358
	7N HNO <sub>3</sub>	130.175 ± 1.678	27.569 ± 0.387	67.395 ± 0.779	19.6	2.1	145	13.0	1442
	Mixed Acid	37.702 ± 0.012	17.897 ± 0.006	40.948 ± 0.011	500	52.9	431	38.6	72.6
	Total				946	100	1117	100	

\*Mixed Acid=HF+HClO<sub>4</sub>+HNO<sub>3</sub>

중요하다. 이러한 구분이 잘 이루어지면 Pb 동위원소의 값 범위를 상당히 벌릴 수 있으며 연대측정이 보다 정밀하게 이루어질 수 있기 때문에 각 광물에 대하여 이러한 조건을 찾아내는 것이 필요하다. 이 연구에 사용된 시료를 각각에서 구한 단계별 Pb 동위원소 비율 변화 뿐만 아니라 Pb 및 U 함량의 변화를 살펴보는 것은 앞으로 유사한 암석이나 광물들에 대한 단계적 용해에 의한 Pb-Pb 연대측정을 할 경우 보다 더 적합한 조건을 찾아 적용하는데 중요한 기초자료가 될 수 있을 것이다.

**창리층의 흑색 점판암**

**Pb 동위원소 비율의 변화:** 창리층의 두 시료는 모두 용해 단계에 따라 Pb 동위원소 비율이 크게 변화한다 (Table 1). <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 비율이 CH7에서는 36.223~174.837이다. 이러한 값의 변화는 이전 연구(박계현 외, 1995)에서 같은 시료를 전암으로 분석하여 얻은

<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 비율이 48.764이었음과 비교하면 단계적 용해실험으로 매우 큰 변화를 얻을 수 있음을 알 수 있다. CH8에서는 34.419~105.923의 범위로 분석되었으며 두 시료가 보여주는 최소값은 비교적 유사하지만 최고값은 CH7이 훨씬 더 높게 나타났다. 그러나 각 단계별 값의 변화를 살펴보면 두 시료가 상당히 다른 양상을 보이고 있다. CH7의 경우에 초산 단계의 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 비율이 최소값을 보이며 3.5 N 질산 단계에서 최고값을 나타낸다. 다른 단계들에서는 38.956~88.500으로 이 두 값들 사이의 값을 보여주고 있다. 한편 CH8-2는 이와는 달리 처음의 초산 단계(104.699)와 중간의 9 N HBr 단계(105.923)에서 매우 높은 값을 보이며 최소값은 가장 마지막인 혼합산 단계에서 나타난다. 나머지 단계들에서는 36.127~92.083의 변화를 보인다. 두 암석이 이와 같은 차이를 나타내는 것은 전형적인 흑색 점판암인 CH7과 탄질성분이 대부분을 차지하는 CH8-2를 구성하고 있는 광물조성이 크게 다르며, 각 암석 내

**Table 2. Pb isotopic compositions of ilmenite-bearing anorthositic rock and charnockite from the Yeongnam massif.**

Sample	Mineral	Step	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	
<b>Ilmenite bearing anorthositic rock</b>						
ST19-1	Garnet	Bulk Analysis	17.258	15.607	36.631	
	Ilmenite	Bulk Analysis	17.217	15.606	36.514	
	Plagioclase	Bulk Analysis	16.153	15.507	35.693	
	Residue	Bulk Analysis	17.770	15.676	37.405	
ST19-2	Plagioclase	Bulk Analysis	16.183	15.503	35.729	
		Residue	Bulk Analysis	16.259	15.511	35.803
		Ilmenite	Bulk Analysis	16.598	15.549	36.290
			1N HBr	16.527	15.522	36.057
	7N HNO <sub>3</sub>		16.468	15.529	35.995	
	Garnet	Mixed Acid	16.735	15.547	37.175	
		Bulk Analysis	16.517	15.538	36.116	
		1N HBr	16.849	15.553	36.504	
		4.5N HBr	16.687	15.544	36.315	
		7N HNO <sub>3</sub>	16.842	15.552	36.495	
Mixed Acid		16.305	15.509	35.801		
<b>Charnockite</b>						
MS-2	Whole Rock	Bulk Analysis	21.452	16.048	90.856	
	Garnet	Bulk Analysis	16.293	15.545	43.752	

\*Mixed Acid=HF+HClO<sub>4</sub>+HNO<sub>3</sub>**Table 3. Pb isotopic compositions of scheelites from Ogbang Mine and magnetite from Gyeomyeongsan Formation.**

Sample	Step*	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
<b>Ogbang Scheelite</b>				
OBS-1	1N HBr	16.654	15.523	36.260
	4.5N HBr	16.530	15.524	36.086
	9N HBr	16.160	15.499	35.696
	3.5N HNO <sub>3</sub>	15.950	15.481	35.463
	7N HNO <sub>3</sub>	15.935	15.490	35.457
	Mixed Acid	15.860	15.493	35.433
OBQ-1	1N HBr	17.610	15.667	35.727
	4.5N HBr	17.596	15.666	35.670
	9N HBr	17.380	15.672	35.630
	3.5N HNO <sub>3</sub>	17.001	15.586	35.558
	7N HNO <sub>3</sub>	17.089	15.638	35.485
	Mixed Acid	16.799	15.605	35.449
<b>Gyeomyeongsan Formation magnetite</b>				
CJ-Mt	1N HBr	20.122	15.746	46.067
	4.5N HBr	20.491	15.757	47.751
	9N HBr	20.849	15.776	49.054
	3.5N HNO <sub>3</sub>	20.577	15.760	47.216
	7N HNO <sub>3</sub>	21.168	15.804	50.346

\*Mixed Acid = HF+HClO<sub>4</sub>+HNO<sub>3</sub>

에서 우라늄을 주로 포함하고 있는 광물 역시 다르기 때문인 것으로 해석된다. 단계별 동위원소 비율의 차

이는 뒤에 단계별 우라늄 및 납의 용출량 결과와 함께 다시 논의한다.

**Table 4. Calculated ages for the analyzed Pb isotopic compositions of studied samples using Isoplot (Ludwig, 1994).**

Sample	Method*	Age ( ± 2σ)	MSWD
<b>Black slates from Changni Formation</b>			
CH7	Model 1	332 ± 560 Ma	134
	Model 1, exclude 4.5N HBr step	172 ± 44 Ma	1.32
	Model 2	256 ± 130 Ma	
	Model 2, exclude 4.5N HBr step	220 ± 37 Ma	
CH8-2	Model 1	237 ± 24 Ma	11.7
	Model 2	253 ± 32 Ma	
<b>Toumaline from Naedeongni Granite</b>			
ND35-1	Model 1	1593 ± 820 Ma	505
	Model 1, exclude 1N HBr step	1566 ± 200 Ma	21.6
	Model 2	1743 ± 84 Ma	
	Model 2, exclude 1N HBr step	1725 ± 77 Ma	
<b>Ilmenite bearing anorthositic rock</b>			
ST19-1	Model 2	1667 ± 640 Ma	
ST19-2	Model 2	1785 ± 660 Ma	
	Model 2, (ST19-1)+(ST19-2)	1676 ± 150 Ma	
<b>Charnockite</b>			
MS-2	Model 2	1577 ± 73 Ma	

\*Model 1 assumes that all scatter is due to analytical error, whereas Model 2 assumes normal distribution of errors and calculates with equally-weighted points.

**Pb-Pb 연대:** 이 연구에서는 Ludwig(1994)의 Isoplot 프로그램을 이용하여 Pb-Pb 연대를 계산하였다(Table 4). 경우에 따라 Isoplot 내의 모델 1과 모델 2를 이용한 결과를 비교하여 논의하였다. 모델 1은 각 값의 분석오차에 가중치를 두어 계산하는 방법이며, 모델 2는 가중치를 주지 않고 각 값을 똑같이 취급하여 연대를 구하는 방법이다. 보고된 연대의 오차는 모두 95% 신뢰수준(2σ)이다.

창리층의 두 시료들로부터 단계적 용출실험으로 구한 Pb 동위원소 분석자료들을 Fig. 1의  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  도형에 표시하였다. CH7의 경우 4.5 N HBr 단계의 값이 다른 단계들이 만드는 추세선에서 벗어남이 관찰된다. 그 이유는 분명하지 않지만 이 단계에서 잘 용해되는 어떤 광물상의 영향으로 추정된다. Table 4의 연대계산 결과를 살펴보면 CH7에 대한 연대는 모델에 따라서, 그리고 4.5 N HBr 단계의 제외 여부에 따라 상당히 달라짐을 알 수 있다. CH7의 경우 추세선에서 벗어나는 4.5 N HBr 단계를 제외하고 모델 1로 구한 연대는 172±44 Ma이며, 모델 2로 계산한 결과는 220±37 Ma이다. 4.5 N HBr 단계를 제외한 CH7의 자료들로부터 구한 회귀직선의 R<sup>2</sup>값이 0.9999로 매우 양호한 값을 보이며, 모델 2의 연대 계산 결과가 더 적은 오차값을 보이는 점, 그리고 모델 2가 불과 50미터

떨어져 있는 곳에서 채취한 CH8-2와 보다 유사한 연대를 나타내는 점등은 모델 2의 결과가 모델 1의 계산 결과보다 실제 연대를 더 잘 나타내고 있는 연대일 가능성을 시사한다. 그러나 이는 보다 정밀한 추가적인 연구를 통해 확인되어야 할 것이다.

CH8-2의 경우는 모델 1의 결과와 모델 2의 결과와 CH7처럼 큰 차이를 보이지 않는다(Table 4). 이 시료는 각 단계의 분석시료에 포함된 납의 함량이 대체적으로 높아 배경값 보정시 별 영향을 받지 않았다. 연대의 계산 결과 비교적 적은 오차를 보이는 모델 1의 계산에 의해 얻은 CH8-2의 237±24 Ma의 연대가 이 지역의 연대를 가장 잘 대표하는 것으로 판단된다.

단계적 용해로 얻은 Pb-Pb 연대의 의미를 알아보기 위해 옥천변성대로부터 구해진 기존의 연구자료들과 비교해 보았다. 우선 박계현과 정창식(1998)은 이 연구와 동일한 지역의 창리층에서 약 5 km 정도 지역에 걸쳐 분산되어있는 시료들을 분석하여 442±63(2σ)Ma의 Rb-Sr 전암연대를 구하였으며 이 시기를 퇴적 혹은 속성작용의 시기로 해석하였다. 이 연구에서 구한 Pb-Pb 연대는 이에 비해 매우 젊은 시기를 나타낸다. 단계적 용해실험은 한 시료로부터 다른 화학적 특성을 갖는 부분들을 선택적으로 추출하여 측정하는 것이기 때문에 광물연대와 유사한 특징을 갖고 있다고 볼 수 있다. 따

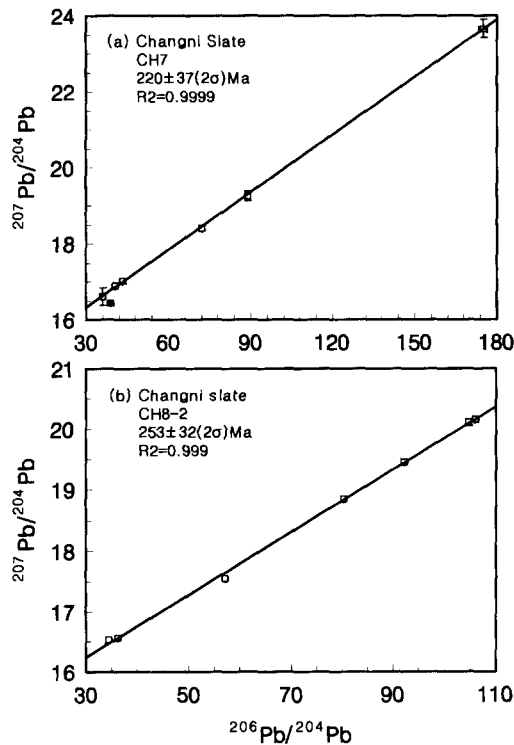


Fig. 1.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram for the leads leached during the stepwise dissolution of uranium-bearing black slates from Changni Formation of Ogcheon Metamorphic Belt. (a) Black slate CH7 shows wide range of variation in Pb isotopic compositions and forms nice linear trend except 4.5 N HBr step(solid square). The age shown on the diagram was calculated by Model 2 of Isoplot program(Ludwig, 1994). Model 1 age is  $172 \pm 44(2\sigma)\text{Ma}$  with  $\text{MSDW} = 1.32$ . 4.5 N HBr step was excluded from the calculations of age and regression line. (b) Coaly black slate CH8-2 also shows wide variation in Pb isotopic compositions with similar age. See the text for more discussion on the implications of these ages.

라서 창리층 시료의 연대는 생성연대가 아니라 Pb-Pb 계를 재평형 시킬 정도의 후기의 열적 사건을 나타낸다고 해석된다.

한편 옥천변성대의 암석에 대한 여러 연구자들의 분석자료들에서 공통적으로 집중되어 나타나는 2억년 부근연대와 일치한다. Cliff *et al.*(1985)은 충주 북동부 지역의 문주리, 서창리층 등으로부터 분리한 백운모로부터  $219 \pm 3\text{Ma}$ 의 Rb-Sr 연령을 구하여 이를 최고변성 작용의 시기로 해석하였다. 이민성(1988)은 문경지역 각섬암의  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대가 230 Ma라고 보고하였으며 이 시기는 옥천대 양쪽 지괴의 충돌시기를 나타낸다고 주

장하였다. 민경원 외(1995)는 충주지역의 이질편암으로부터 구한 203~209 Ma의 백운모 K-Ar 연대가 트라이아스기의 광역변성작용을 지지한다고 해석하였다.

권선택 외(1998)는 연구지역에서 가까운 옥천대의 남부지역의 심성암체 들에 대한 U-Pb 스피인 연대를 구하였다. 그 결과를 보면 백록화강섬록암은  $227.6 \pm 2.0\text{Ma}$ , 청산화강암은  $221.3 \pm 1.9\text{Ma}$ , 그리고 보은화강암은  $177.5 \pm 1.5\text{Ma}$ 이다. 이러한 연대는 이 연구 및 앞에서 인용한 다른 연구자들이 옥천 변성대에서 구한 연구결과와 잘 일치하는 연대이며 이들의 관입이 광범위한 지열상승과 주변 암체들의 변성작용을 가져왔을 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 따라서 이 연구에서 구한 Pb-Pb 연대(CH7의 모델 2 연대인  $220 \pm 37\text{Ma}$ 와 CH8-2의 모델 1연대  $237 \pm 24\text{Ma}$ )는 백록화강섬록암과 청산화강암이 관입한 시기에 일어난 우라늄의 광화작용의 시기이거나 혹은 원래 U를 많이 포함하고 있던 암석들의 U-Pb 계가 재평형을 이루게 된 변성작용의 시기를 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 이 지역을 포함하여 옥천변성대 내의 우라늄은 특성의 화성암체 부근에 집중되어 나타나는 것이 아니고 이 지역을 포함하여 옥천대 내의 여러 지역에서 흑색 점판암 내에 국한되어 나타난다. 이는 퇴적 당시부터 이러한 암종들 내에는 우라늄이 많이 포함되어 있었던 것을 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 이 연대는 화성암의 관입에 의한 새로운 우라늄 광화작용 시기라기 보다는 변성작용의 시기로 해석하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 한편 CH7의 모델 1연대가 나타내는  $172 \pm 44\text{Ma}$ 의 연대는 보은화강암의 관입시기와 일치하며 따라서 이 심성암체가 관입한 시기에 함께 관입한 소규모 암체의 영향을 나타내는 것일 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 CH7의 연대에 대해서는 추가적인 야외조사와 연대 측정 연구를 통해 확인할 필요가 있다.

#### 단계별 Pb 동위원소 비율 및 U-Pb 농도변화 요인:

CH-7 시료: 앞에서 살펴본 대로 CH7과 CH8-2 시료는 각 단계별로 납 동위원소의 비율 변화의 양상이 같지 않다. 한편 납 함량의 변화를 전체 중 각 단계별로 빠져나온 비율로 살펴보면 CH7의 경우 전체 7단계 중에서 제일 처음의 초산단계에서는 2.2%의 아주 적은 양만 빠져나왔으며 이후 HBr 단계에서는 전체의 68% 이상이 용출되었다. 이 단계까지 빠져나온 납은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.223 \sim 43.371$ 로 전체적인 변화와 비교시에는 아주 적은 변화만 보인다고 할 수 있다. 이미 전체 납의 70% 이상이 빠져나간 뒤인 3.5 N  $\text{HNO}_3$  단계에서는 전체 납의 6.9%가 용출되었으며  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 174.837$ 로 가장 높은 값을 보여주고 있다. 따라서 이



전 단계까지는 대체적으로 보통 납이 많이 함유되어 있었으며 방사기원을 많이 함유하고 있는 광물상은 질산 단계에 들어와서 효과적으로 분해되기 시작한 것으로 추정된다.

그 다음 단계인 7 N HNO<sub>3</sub> 단계에서는 7.3%의 납이 용출되었으며 이 납은 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 88.500으로 직전 단계보다는 훨씬 낮으나 질산 이전 단계에 비해서는 월등히 높은 값을 보여준다. 따라서 이 단계의 납은 많은 양의 방사기원 납을 가진 이전 단계에서 완전히 분해되지 않은 광물로부터의 납과 보통 납을 보다 많이 가진 다른 광물들로부터 용출된 납의 혼합결과로 해석된다. 보통 납은 질산 단계 이전에서도 나타났으나 이 단계에서 용출된 납은 질산단계 이전에 분해되기 시작했던 광물들보다는 용해되기 어려운 광물들에 근원을 갖는 것들로 질산의 농도가 진행되고 산처리의 시간이 길어지면서 분해되기 시작한 광물들에서 용출된 것으로 판단된다.

마지막 단계인 혼합산 단계에서는 전체 납의 15.4%가 용출되었으며 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 72.288으로 7 N 질산 단계보다도 더 낮은 값을 보이나 역시 질산 이전 단계의 값들보다는 훨씬 높은 값이다. 다른 단계에서 잘 용해되지 않는 규산염 광물들의 대부분이 이 단계에서 분해되기 때문에 이 단계의 납은 여러 조암광물들로부터 유래한 납들이 혼합되어 있을 것이며 따라서 이 납에 대한 근원을 광물별로 엄밀히 논의하기는 어렵다. 그러나 질산 이전 단계에 비해서는 상당히 높은 값을 보이기 때문에 비교적 U/Pb 비율이 높은 부수광물들이 혼합산 단계에서 많이 용해된 때문으로 생각된다.

우라늄 용출량을 단계별로 살펴보면 납과는 상당히 다른 양상을 나타낸다. 가장 약한 초산 단계에서도 전체의 9.3%에 달하는 우라늄이 빠져 나왔다. 납의 경우는 HBr의 3 단계 동안에 68.2%가 용출되었으나 우라늄은 35.2%만 용출되었다. 반면에 질산의 두 단계 동안에는 납의 14.2%가 용출되었고 우라늄은 30.2%가 용출되었다. 혼합산 단계에서는 납의 15.4%가 용출되었던 것에 비해 우라늄은 25.2%가 용출되었다.

이러한 차이는 두 원소가 주로 포함되는 광물들의 종류가 상당히 다를 수 있음을 의미한다. 이를 <sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb 비율로 살펴보면 Pb 동위원소 비율의 변화와 상당히 연관되어 있음이 관찰된다. 즉 3.5 N 질산단계가 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb와 <sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb 비율이 가장 높으며 7 N 질산과 혼합산 단계가 그 다음으로 높은 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 및 <sup>238</sup>U/<sup>204</sup>Pb 비율 값을 갖는다. HBr 단계들에서는 두 가지 지표 모두 훨씬 낮은 값을 보여주고 있다. 하지만 초산 단계는 가장 낮은 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 비율을 가짐에도 불구하고 <sup>238</sup>U/

<sup>204</sup>Pb 비율은 7 N 질산 단계 다음으로 높아 이러한 경향성과 일치하지 않는다. 이는 초산단계에 포함된 U이 풍화나 변질의 영향을 가장 쉽게 받을 수 있는 부분에서 용출되었을 가능성을 시사한다.

CH8-2 시료: 이 시료는 CH7 시료와 상당히 다른 원소 거동을 보여준다. 우선 각 용해 단계별로 납의 용출 및 그 동위원소 조성을 살펴보면 초산 단계에서는 1.6%로 적은 양만이 용출된 것은 CH7과 상당히 비슷하다. 그러나 CH7은 초산 단계에서 용출된 납의 동위원소 조성이 가장 높은 보통 납의 함량을 나타냈었던 것과 달리 CH8-2에서는 이 단계의 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 값이 104.699로 9 N HBr 단계(105.923)와 함께 가장 높은 방사기원 납의 비율을 보여준다.

그 다음의 HBr의 세 단계에서는 각 단계별로 대체로 비슷한 정도(18.7~20.8%)로 총 60.0%의 납이 용출되었으며 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 값은 80.192~105.923으로 초산단계와 비슷하거나 조금 낮지만 상당량의 방사기원 납을 함유하고 있음을 나타낸다. 다음의 3.5 N 질산단계에서는 5.1%로 적은 양의 납만 용출되었으며 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 값도 57.206으로 훨씬 낮아져 이 단계에서는 보통 납의 비율이 상당히 높아졌음을 보여준다. 7 N 질산단계에서는 이보다 훨씬 많은 19.3%가 용출됨으로써 단계별 용출량 중 가장 많은 양을 기록하며 이는 CH7의 경우와는 상당히 다른 양상이다. 이 단계의 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 값은 36.127로 3.5 N 질산단계에 비해서도 훨씬 더 낮아졌음을 보여준다. 마지막의 혼합산 단계는 14.0%가 용출되었으며 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb는 가장 낮은 34.419이다.

한편 우라늄의 단계별 용출량 변화를 살펴보면 CH7과는 달리 CH8-2는 초산단계에서 상당히 많은 15.6%가 빠져나가고, HBr 단계에서는 무려 80.2%가 빠져나갔으며, 질산과 혼합산 단계에서 빠져나간 양은 합쳐서 4.2%에 불과하다. 한편 CH8-2 시료는 CH7과는 달리 U/Pb 비율과 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 사이에 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다.

이러한 납과 우라늄의 용출량 변화와 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 비율변화는 CH7과는 대조적이며 이는 CH7의 경우 규산염 광물들이 주구성 광물인데 비해 CH8-2는 탄질 성분이 대부분이기 때문에 야기된 현상으로 생각된다. 이러한 근본적인 성분 차이로부터 우라늄과 납을 주로 갖고 있는 광물종들이 CH7의 경우와는 상당히 다를 수도 있을 것으로 예상할 수 있으며 납과 우라늄이 잘 용출되는 부분이 상이함과 단계별 납 동위원소 조성이 크게 다른 것 역시 이러한 추론을 뒷받침한다. 하지만 CH8-2의 경우 U/Pb와 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 사이에 뚜렷한 연관성을 보이지 않는 것은 비교적 최근의 2차적인 우라늄

혹은 납의 이동을 시사한다. 특히 초산 단계의 경우 약 105인  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값에 비해 12,575의 매우 높은 U/Pb 비율을 보여주는 것은 다른 곳으로부터 용출되어 지하수 등을 통해 이동하던 우라늄이 2차적으로 축적된 현상으로 해석된다.

CH7과 CH8-2로부터 단계적 용해 실험에 의해 용출된 Pb, U의 양과 동위원소 결과를 종합해 보면 용출 실험시의 Pb와 U의 화학적 거동이 다르기 때문에 보다 정밀한 연대측정방법이 될 수 있는 U-Pb법은 적용하기 힘들 것으로 판단된다. 그러나 상당한 분산을 보이는 Pb 동위원소 값으로 볼 때 Pb-Pb법에 의한 연대측정은 유사한 시료에 대한 연대측정에 상당히 고무적이다. 특히 규산염 광물이 대부분인 일반적인 흑색점판암과 탄질성분을 많이 갖는 암석에 대한 단계적 용해에 의한 Pb-Pb 연대측정은 실험 방법을 다소 다르게 적용하는 것이 더욱 성공 가능성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

### 내덕리 화강암의 전기석

**Pb 동위원소 비율의 변화:** 내덕리 화강암에서 분리한 전기석에 대한  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  비율 역시 용해 단계에 따라 상당한 변화를 보인다(Table 1). 제일 처음 단계인 1 N HBr은 36.980으로 가장 낮은 결과를 보여준다. 다음의 4.5 N과 9 N HBr 단계에서는 점차 높아지는 48.187와 53.493의 값을 보이며, 3.5 N 질산 단계에서는 이보다 더 높은 61.952의 값을 나타낸다. 7 N 질산 단계에서는 가장 높은 130.175로 앞 단계의 값들보다 훨씬 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값을 보여준다. 마지막 단계인 혼합산 단계에서는 가장 처음의 1 N HBr 단계와 거의 같은 37.702의 값을 보여준다. 이러한 비율 변화는 전기석의 경우에 적절한 산의 선택과 산의 농도 및 시간 조절을 통해 상당한 Pb 동위원소 비율변화를 얻어낼 수 있음을 보여준다.

**Pb-Pb 연대:** 내덕리 화강암으로부터 분리한 전기석에 대한 단계별 용출실험 결과 Pb 동위원소 비율이 상당한 범위에 걸친 변화를 보인다(Fig. 2). 이러한 변화를 연대로 계산할 경우 Ludwig(1994)의 모델 1에 의하면  $1593 \pm 820$  Ma, 모델 2에 의하면  $1743 \pm 84$  Ma의 Pb-Pb 연대가 계산된다. 한편 다른 단계들이 형성하는 추세선에서 약간 벗어나는 1 N HBr 단계를 제외하고 계산하면 모델 1로는  $1566 \pm 200$  Ma, 모델 2로는  $1725 \pm 77$  Ma가 구해진다. 이 시료는 창리층의 CH7시료와 마찬가지로 모델 1의 오차가 모델 2의 오차보다 크게 나타나며 그 정도가 더 크다. 이 시료 회귀직선의 R2 값이 0.9989로 매우 양호한 값을 보이기 때문에 모델

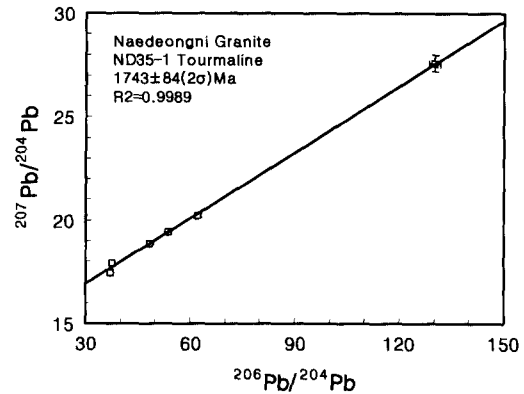


Fig. 2.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram for the leads leached during the stepwise dissolution of the tourmaline separated from Naedeongni Granite. The age shown on the diagram was calculated by Model 2 of Isoplot program(Ludwig, 1994). Model 1 age is  $1593 \pm 820(2\sigma)$ Ma with MSDW = 505. If 1 N HBr step is excluded, this age becomes  $1566 \pm 200(2\sigma)$ Ma with MSDW = 21.6.

2의 값이 이 시료의 연대를 더 잘 나타낸다고 생각한다. 이 시료와 CH7이 이러한 현상을 보이는 것은 연대 계산에 중요한 방사기원 납의 함량이 큰 단계의 오차값이 크기 때문이며, 이는 이 단계들의 납 함량이 낮기 때문에 배경값 보정에 크게 영향을 받기 때문이다. 따라서 납의 함량이 낮은 시료에 대한 앞으로의 실험에서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 실험자체의 배경값을 더 낮추거나 배경값에 대한 보다 정밀한 측정 및 오차 한계의 축소를 이루어야 보다 정밀한 연대측정을 할 수 있다.

내덕리 화강암에서 계산된 연대는 동일 암체에서 구한 윤현수(1991)의 백운모 K-Ar 연대  $1761 \pm 36$  Ma 및 박계현 외(1993)가 전암으로 구한 Pb-Pb 연대  $1825 \pm 172(2\sigma)$ Ma와 대체로 일치한다고 볼 수 있다. 같은 Pb-Pb 법으로 연대를 구한 박계현 외(1993)가 전암 4시료로부터 21.061~27.345에 불과한  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  비율변화를 얻을 수 있었던 반면에 이 연구에서는 전기석 1 시료로부터 36.980~130.175의 매우 큰 변화를 얻을 수 있었으며 이는 더욱 정밀한 연대측정을 할 수 있는 가능성을 보여준다.

전기석은 일반적으로 화강암 및 페그마타이트 등에 흔히 산출되는 광물이다. 따라서 넓은 화학조성의 변화를 보이지 않아 전암 연대측정이 곤란하거나 불확실한 성공가능성 때문에 전암시료의 분석이 꺼려지는 경우 여러 전암시료의 분석 없이 전기석에 대한 Pb 동위원소 분석만으로도 연대를 성공적으로 구할 수 있는

가능성이 높다고 판단된다. 전기석의 단계적 용출법으로 얻을 수 있는 Pb-Pb 연대측정 방법의 폐쇄온도에 대해서는 아직 잘 연구되지 않고 있으나 전기석이 다른 광물에 비해 잘 용해되지 않는 등 비교적 화학적으로 강한 광물이기 때문에 흑운모의 K-Ar 계에 대한 폐쇄온도보다는 높은 폐쇄온도를 가질 것으로 추정된다. 따라서 비교적 폐쇄온도가 높은 각섬석이나 백운모가 산출되지 않고 흑운모만 있는 화강암질 암체의 경우에는 낮은 열변성작용에도 쉽게 K-Ar 연대가 교란될 수 있기 때문에 이러한 교란이 염려되는 경우에는 보다 정확한 연대측정을 위해 전기석에 대한 단계적 용출에 의한 Pb-Pb 연대측정이 더 바람직한 연대측정 수단이 될 수 있는 가능성이 있다. 이러한 폐쇄온도와 관련된 자료는 기존의 연대측정으로 이미 연대를 알고 있는 시료에 전기석에 대한 단계적 용해 Pb-Pb 연대측정을 시도함으로써 평가해 볼 수 있을 것이다.

**단계별 Pb 동위원소 비율 및 U-Pb 농도변화 요인:**

연대를 구하는 데 필수적인 동위원소 비율의 변화를 최대한 크게 하기 위해서는 각 단계에서 구한 비율변화에 대해 심도 있는 고찰을 해볼 필요가 있다. 앞에서 논의한 창리층 시료처럼 전암으로 처리한 경우에는 암석을 이루는 각 구성광물들마다 여러 종류의 산에 대한 반응이 다르기 때문에 동위원소 비율 변화의 요인이 각 단계에서 분해되는 특정 광물종들에 의해 주로 지배되는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 이 시료의 경우와 같이 단일 광물종인 경우에는 해석이 보다 어렵게 된다. 각 단계에서 다른 동위원소 조성을 보이는 것은 보통 납과 방사기원 납이 차지하는 결정 내에서의 위치가 상당히 다르기 때문으로 해석된다.

이 시료의 경우 점차 HBr 단계들에서는 산의 농도가 높아지면서 용출되어 나오는 납의 양이 단계별로 16.4%에서 11.1%로 점차 줄어드는 경향을 보인다. 그 다음의 질산 단계로 가면 용출되는 납의 양이 더욱 현저하게 줄어들며 4.1%가 용출된 3.5 N 질산 단계보다 7 N 질산 단계에서는 나오는 양이 더욱 적다(2.1%). 한편 마지막 혼합산 단계에서는 전체 납의 약 절반 가량이 용출되어 나오는 것으로 나타난다(52.9%).

한편 우라늄의 경우는 대부분의 단계에서 용출되는 양이 큰 차이가 없으며(9.9%~13.3%) 다만 마지막의 혼합산 단계에서 다른 단계들에 비해 약 3~4배 정도에 해당하는 양(38.6%)이 용출되는 것으로 나타난다.

실험 단계별 납 용출량과 동위원소 비율을 종합해 볼 때 HBr 세 단계와 3.5 N 질산 단계에서 전체 납의 45.1%가 빠져나가고 난 뒤에 7 N 질산단계에서 2.0%에 불과한 납이 용출되었고 이 부분이 가장 높은 방사

기원의 납 성분을 보인 것은 주목할만한 현상이다. 또한 혼합산 단계에서 역시 전체 납의 52.9%가 빠져나가며 이 부분은 높은 보통 납 성분 비율을 가짐도 중요하다고 생각한다. 만약 이 실험에서 수행한 것보다 질산 단계를 조금 더 세분하여 실험한다면 방사기원 납의 함량이 보다 더 많은 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값을 얻어 낼 가능성도 있다고 판단된다.

한편  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  역시 단계별로 상당한 변화(37.659~67.395)를 보임에 주목할 필요가 있다. 이는 전기석의 경우 U-Pb 체계 뿐만 아니라 Th-Pb 역시 연대측정에 사용될 수 있는 잠재력을 검토해볼 필요성이 있음을 나타낸다. 또한 전기석 내에 함유된 미세한 U, Th 함유광물의 용해를 통해 일어나는 변화일 가능성도 있다. 특히 7 N 질산 단계에서 상당히 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  및  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값을 나타내는 것으로 보아 진한 질산에 잘 용해되는 광물상일 가능성이 있다.

전기석의 화학조성은 여러 원소들의 복잡한 치환관계 때문에 복잡하며 납과 우라늄과 같은 미량성분이 결정격자내 어떤 부분을 치환해 들어가는지 혹은 이러한 단계별 원소 거동의 차이가 전기석 내에 포함된 일부 미량성분 광물들 때문인지는 잘 알려져 있지 않다. 그러나 이 실험에서와 같은 단계적 용출법은 전기석 내에서의 미량성분 치환관계를 밝히는 데 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

**합티탄철석 회장암질암의 석류석과 티탄철석**

**Pb 동위원소 비율 변화:** 지리산지역 합티탄철석 회장암질암의 2시료 중 ST19-1에서 분리한 석류석, 티탄철석 및 나머지 부분, 그리고 ST19-2 시료에서 분리한 사장석, 티탄철석, 석류석 및 나머지 부분에 대해 단계적 용해 실험을 실시하지 않고 전체로 Pb 동위원소 조성을 분석하였다. 이와 함께 ST19-2 시료에서 분리한 티탄철석과 석류석을 분리하여 단계적 용해실험을 수행하였다. 결과를 살펴보면 사장석을 제외하고는 ST19-1의 광물들이 ST19-2보다 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값을 보여준다(Table 2, Fig. 3). 단계적 용해 실험을 한 ST19-2의 석류석의 경우는 4단계에 걸친  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  비율이 16.305~16.849로 앞의 예들처럼 매우 넓은 변화는 아니지만 상당한 단계별 변화를 보여준다. 같은 시료의 티탄철석 경우는 석류석의 변화범위보다는 좁은 16.468~16.735의 변화를 보여준다. 석류석과 티탄철석 모두 단계별 납 동위원소 변화에 뚜렷한 경향성을 나타내지는 않고 있기 때문에 이 광물들에 들어 있는 우라늄과 납의 결정격자내 위치나 방사기원 납을 많이 갖는 부분을 선별적으로 용해시킬 수 있는 방법을 찾

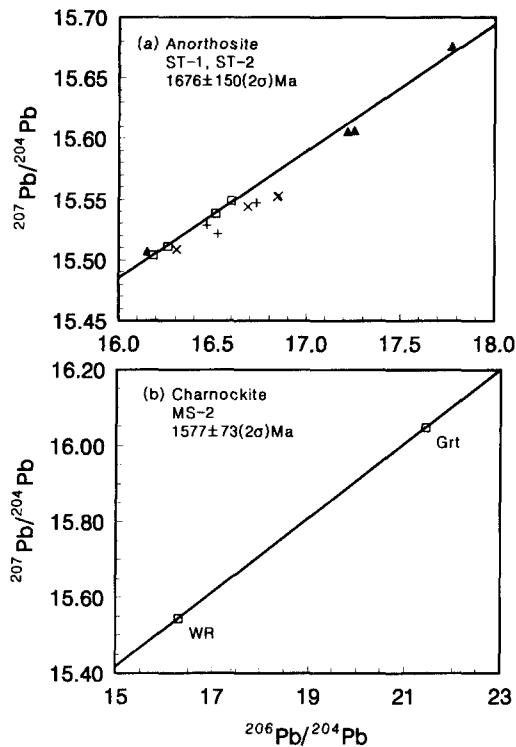


Fig. 3. (a)  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram for the ilmenite-bearing anorthositic rock of Yeongnam massif. Solid triangles and open squares are mineral separates from ST19-1 and ST-2 respectively. Stepwise leachates from ilmenite(+) and garnet(x) of ST19-2 are also shown. (b) The same diagram for whole rock and garnet from the massive charnockite of Yeongnam massif.

아내기 위해서는 추가적인 연구가 더 필요하다.

**Pb-Pb 연대:** 연대는 단계적 용해실험을 하지 않은 시료들로부터 계산하였다(Table 5, Fig. 3). ST19-1로만 구한 값은  $1667 \pm 640$  Ma, ST19-2로만 구한 값은  $1785 \pm 660$  Ma이며, 두 시료를 함께 계산하면  $1676 \pm 150$  Ma이다. 이 시료들이 보이는 납 동위원소의 값이 크게 변화하지 않기 때문에 비교적 큰 오차가 계산된다. Kwon and Jeong(1990)은 하동-산청 화강암 복합체로부터  $1678 \pm 90$  Ma와  $1690 \pm 220$  Ma의 연대를 보고한바 있다. 한편 박계현 외(2000)가 같은 시료로부터 구한  $1792 \pm 45$  Ma의 Sm-Nd 광물연대와 비교하면 다소 낮은 연대를 나타낸다. 한편 차노카이트의 전암과 석류석으로 구한 Pb-Pb 연대 역시  $1577 \pm 73$  Ma로 같은 시료에서 박계현 외(2000)가 구한 전암-석류석 Sm-Nd 연대인  $1820 \pm 22$  Ma 보다는 뚜렷이 낮은 값을 보인다. 이는 광물 분리 시료들로부터 구한 Pb-Pb 연대는 Sm-Nd 연대에

비해 낮은 폐쇄온도를 나타낼 가능성을 강하게 시사한다.

석류석과 티탄철석으로부터 단계적용해를 통해 구한 납 동위원소 조성은 광물분리 시료들이 만드는 전체적인 납 동위원소 변화 범위의 3분의 1 이상에 해당하는 비교적 넓은 범위에 걸쳐있으며 이는 고무적인 현상으로 받아들여진다. 따라서 석류석이나 티탄철석 역시 단계적 용해에 의한 Pb-Pb 연대측정에 상당한 잠재력이 있다고 판단된다. 그러나 Fig. 3에서 보는 바와 같이 단계적 용해실험으로 얻은 자료들은 광물분리 시료들이 보이는 추세선으로부터 아래쪽으로 벗어난 곳에 놓인다. 이는 석류석이나 티탄철석 내의 Pb-Pb 시스템이 후기의 변성작용등에 교란 받았을 가능성, 즉 더 낮은 폐쇄온도를 갖고있을 가능성을 내포한다.

이 연구에서는 ST-1 시료의 잔류광물부분을 전체로 분석하였으나 분석결과 이 부분이 가장 높은 방사기원 납의 성분을 갖고 있는 것으로 나타났다. 이는 우라늄을 많이 함유하여  $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  비율이 높은 부수 광물들이 이 부분에 상당량 포함되어 있기 때문으로 판단되며 따라서 이 부분에 대하여 단계적 용해실험을 실시하였다면 더욱 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값을 얻었을 수도 있었을 것으로 추정된다. 따라서 단계적 용해법을 수행하기 전에 박편관찰을 통한 시료관찰에 좀 더 많은 시간을 할애한다면 더욱 바람직한 결과를 가져올 수 있을 것으로 판단한다.

#### 옥방광산의 회중석

옥방광산 회중석의 경우는 두 시료가 각각  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.860\sim 16.654$ 와  $16.799\sim 17.610$ 으로 비슷한 정도의 분산을 보여준다(Table 3). 특징적인 현상은 두 시료에서 모두 1N HBr 단계가 가장 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값을 보이며 단계가 거듭될수록 점차 낮은 값으로 변화하며 가장 낮은 값은 최종 단계인 혼합산 단계에서 나타난다는 것이다. 이는 회중석 내에서 우라늄과 납이 여러 종류의 산에 의해 상당히 예측 가능한 방식으로 용출된다고 말할 수 있다. 가장 처음 단계인 1N HBr에 가장 방사기원 납의 성분이 많이 포함된 것으로 보아 더 낮은 농도의 HBr을 사용하거나 이 단계의 시간을 이 실험에서 보다 단축시킬 경우 더욱 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값을 얻을 수도 있을 것으로 예상할 수 있다. 이 연구에서 분석한 회중석의 값들은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  도형에서 비교적 큰 분산을 보여주기 때문에 연대로 계산하지는 않았다. 그러나 외국에서의 성공사례와 앞에서 살펴본 것과 같이 여러 단계에 걸쳐  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 이 분산되는 것을 감안할 때 회중석에 대한 직접적인 연대측정도 시도해볼만한 가치가 있다고 생각된다.

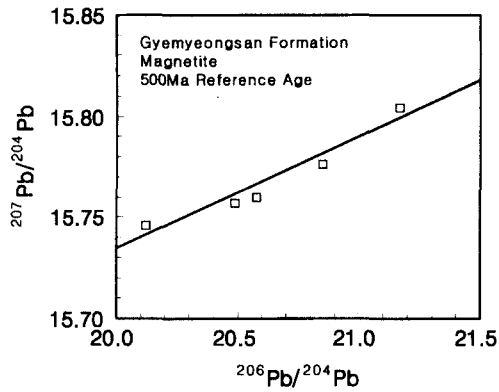


Fig. 4.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram for the leads leached during the stepwise dissolution of the magnetite separated from Gyeomeongsan Formation of Ogcheon Metamorphic Belt. 500 Ma reference isochron is also shown for the comparison.

**계명산층의 자철석**

계명산 층의 자철석 경우는  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 20.122\sim 21.168$ 의 변화를 보여준다(Table 3, Fig. 4). 이 자철석 시료의 경우는 앞에서 논의한 회중석 시료와는 반대로 대체로 산의 세기가 증가할수록 방사기원의 납 비율이 보다 더 높아짐을 보여준다. 즉, 가장 낮은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  값이 가장 처음 단계인 1N HBr 단계에서 나타나며 중간 값들을 거쳐 가장 높은 값이 이 시료에 대한 제일 마지막 단계인 7N 질산 단계에서 구해졌다. 따라서 자철석에 대한 단계적 용해법으로 Pb-Pb 연대측정이 성공하기 위해서는 비교적 산의 세기가 약한 단계들의 시간을 이 실험에서 보다 길게하여 보통 납 성분이 많이 포함된 납을 보다 많이 용출시켜 후기로 갈수록 방사기원 납의 비율이 더욱 높아지게 만들 필요가 있다고 판단된다.

옥천변성대가 차지하는 한반도 지구조 진화연구에서의 위치를 감안할 때 옥천변성대에 대한 연대측정 및 해석은 많은 추가적인 연구가 필요하다고 생각한다. 한편 자철석을 이용한 Pb-Pb 연대측정은 생성시기를 잘 모르고 있는 여러 철광상들이나 자철석을 함유하고 있는 다른 종류의 광상 혹은 화성암체들에 널리 적용할 수 있기 때문에 추가적인 연구가 지속될 필요가 있다고 판단된다.

**결 론**

단계적 용해에 의한 연대측정법은 여러 가지 종류의 광물들에 적용할 수 있으며 기존의 다른 연대측정법의

적용이 곤란한 많은 경우에 이 방법을 이용하여 성공적인 지질연대를 구하는 것이 가능할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 실험법은 또한 각 단계별로 용출되는 납의 동위원소 조성과의 양을 종합하여 해석하면 우라늄과 납이 각 광물 안에 분포하는 양상을 파악할 수 있는 단서를 제공할 수 있다고 판단된다. 방사기원 납과 보통 납이 결정 내에 분포하는 양상을 보다 명확히 파악할 수 있다면 이러한 단계적 용해에 의한 납 동위원소 분석 및 연대측정에 큰 도움을 줄 수 있을 것이며 따라서 이 방법에 의한 연대측정의 성공확률과 적용가능한 광물종의 수를 훨씬 더 넓게 늘려줄 수 있기 때문에 이러한 종류의 실험이 계속 수행되는 것이 바람직하다.

창리층의 경우 매우 넓은 범위에 걸친 Pb 동위원소 값을 얻을 수 있었으며 이는 다른 방법으로 연대측정이 곤란한 흑색 점판암이나 탄질암에 대한 연대측정이 성공적으로 수행될 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 창리층의 흑색 점판암 중 탄질물을 다량 함유하고 있는 시료로부터 단계적 용해법으로 구한  $237 \pm 24(2\sigma)$  Ma의 연대는 당시의 심성암체를 관입과 연관되었을 것으로 추정되는 변성연대로 해석하였다. 옥천대의 경우 국내 지질학자들 사이에 아직 변성시기에 대해 일치된 견해를 갖고 있지 못하며, 자주 거론되는 2억년 부근의 연대는 중국의 초고압 대륙 충돌대 형성 및 한반도로의 연장 문제를 감안할 때 매우 중요하기 때문에 이러한 방법을 통한 연대측정 시도가 기대된다.

내덕리 화강암의 전기석 역시 상당한 범위에 걸친 Pb 동위원소 값 변화를 구할 수 있었으며 전기석을 이용한 연대측정에 매우 고무적인 현상이다. 이 밖에도 석류석, 티탄철석, 회중석, 자철석 등에 대한 실험을 통해 단계적 용해가 기존의 전체적 분석법에 비해 훨씬 넓은 범위의 Pb 동위원소 변화를 얻을 수 있는 방법임이 확인되었다. 따라서 추가적인 연구를 통해 기존의 방법으로는 연대측정이 곤란한 시료들에 대한 단계적 용해 연대측정법을 개발할 필요가 있다고 판단된다.

회강암질암과 차노카이트의 광물분리시료들에 대한 Pb-Pb 연대는 동일 시료에 대한 Sm-Nd 연대보다 낮은 연대를 나타내며 따라서 더 낮은 폐쇄온도를 갖고 있을 가능성을 나타낸다. 한편 석류석에 대한 단계적 용해는 이보다 더욱 낮은 기온기를 갖고 변화하기 때문에 석류석으로부터 단계적 용해로 얻을 수 있는 Pb-Pb 연대는 더욱 낮은 폐쇄온도를 갖고 있을 것으로 추정된다.

한편 단계적 용해실험은 각 단계별로 용출된 Pb와 U, 그리고 Pb 동위원소를 살펴봄으로써 광물 격자 내

에서 이 원소들의 화학적 거동을 연구할 수 있는 수단이 될 수 있다고 판단된다. 이러한 실험을 통해 효과적인 연대측정법을 개발할 수 있는 기초적 자료를 마련할 수 있을 뿐만 아니라 광물의 생성과 분해에 대한 연구에 일조할 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문을 읽고 건설적인 비평을 해주신 이승구, 정창식, 사공희 박사께 감사드립니다. 이 연구의 수행중 분석에 많은 도움을 준 이호선 석사와 김동연 석사에게도 감사드립니다. 또한 이 연구에 사용된 회중석 시료를 제공하여준 박맹연 교수께도 감사드립니다. 이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-99-003-D00186)에 의하여 지원되었다.

## 참고문헌

- 강지훈, 류충렬, 1997, 충주 계명산지역 옥천변성대의 화성 활동과 지질구조. *암석학회지*, 6, 151-165.
- 권성택, 藍晶瑩, 1991, 옥천 각섬암의 Sm-Nd 동위원소연 구: 예비보고서. *광산지질*, 24, 277-285.
- 권성택, 박성현, 정창식, 1998, 한반도 옥천대 중하부 화강 암체에 대한 U-Pb 스피노와 인회석 연대. 제7차 한국암석 학회 정기총회 및 학술발표회 요약집, 21.
- 권용완, 신의철, 오창환, 김형식, 강지훈, 1999, 풍기지역 소 백산편마암복합체의 백립암상 변성작용-북부 소백산육괴 의 지각진화와 환경지질. *암석학회지*, 8, 183-202.
- 김동연, 박계현, 송용선, 2000, 지리산 지역 차노카이트 (Charnockite)의 생성시기와 기원 및 회강암과의 성인적 관계. 2000년도 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발 표회 논문집, 85.
- 민경원, 조문섭, 권성택, 김인준, 長尾敏介, 中村榮二, 1995, 충주지역에 분포하는 변성암류의 K-Ar의 연대: 원생대 말기(675 Ma)의 옥천대 변성작용. *지질학회지*, 31, 315-327.
- 박계현, 정창식, 1998, 옥천변성대 변성퇴적암의 스트론튬 동위원소 조성 및 연대. *지질학회지*, 34, 81-93.
- 박계현, 정창식, 이석훈, 1995, 옥천변성대에 분포하는 변 성퇴적암의 동위원소 지구화학. 기초과학지원연구소 미 발간 연구보고서, 54p.
- 박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산지역의 고기 화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. *지질 학회지*, 29, 387-395.
- 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. *암석학회지*, 8, 34-45.
- 오창환, 권용완, 김성원, 1999, 청주-미원지역 중부 옥천변 성대의 변성진화과정. *암석학회지*, 8, 106-124.
- 윤현수, 1991, 상동지역 선크브리아 화강암류의 K-Ar 백운 모 연령측정. *광산지질*, 24, 21-25.
- 이민성, 1988, 옥천대의 각섬암의 화학조성과 그 성인(요약 분). *지질학회지*, 24, 518-519.
- 이종만, 정지곤, 김원사, 1999, 하동지역 회강암질암의 진 화 및 합타타늄광체의 성인적 관련성에 대한 예비연구. *지질학회지*, 35, 321-336.
- 정지곤, 김원사, D.H. Watkinson, 1989, 하동지역에 분포한 회강암질암의 구조와 티타늄광체의 산출상태. *지질학회 지*, 25, 98-111.
- 정창식, 권성택, 2001, Rb-Sr, Sm-Nd, Pb 동위원소계의 분 석을 위한 실험실 화학 바다값 측정. *지질학회지*, 37, 143-146.
- 조문섭, 김인준, 김현철, 민경원, 안중호, 長尾敏介, 1995, 중평-덕평 지역 중부 옥천변성대에 분포하는 이질 편암 의 K-Ar 흑운모 연대. *암석학회지*, 4, 178-185.
- Berger, M. and Braun, I., 1997, Pb-Pb dating of apatite by a stepwise dissolution technique. *Chemical Geology*, 142, 23-40.
- Cliff, R.A., Jones, G., Choi, W.C., and Lee, T.J., 1985, Strontium isotopic equilibration during metamorphism of tillites from the Ogcheon Belt, South Korea. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 90, 346-352.
- Cluzel, D., 1991, Late Palaeozoic to early Mesozoic intra-plate orogeny in the Ogcheon Belt (South Korea): A new insight on the Paleozoic buildup of East Asia. *Tectonics*, 19, 1130-1151.
- Dahl, P. S. and Frei, R., 1998, Step-leach Pb-Pb dating of inclusion-bearing garnet and staurolite, with implicaions for Early Proterozoic tectonism in the Black Hills collisional orogen, South Dakota, United States. *Geology*, 26, 111-114.
- DeWolf, C. P., Zeissler, C. J., Halliday, A. N., Mezger, K., and Essene, E. J., 1996, The role of inclusions in U-Pb and Sm-Nd garnet geochronology: Stepwise dissolution experiments and trace uranium mapping by fission track analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 121-134.
- Erel, Y., Harlavan, Y., Stein, M., and Blum, J. D., 1997, U-Pb dating of Fe-rich phases using a sequential leaching method. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 1697-1703.
- Frei, R. and Pettke, M., 1996, Mono-sample Pb-Pb dating of pyrrhotite and tourmaline: Proterozoic vs. Archean intracratonic gold mineralization, in Zimbabwe. *Geology*, 24, 823-826.
- Frei, R., Villa, I. M., Nagler, Th. F., and Kramers, J. D., Przybylowicz, W. J., Prozesky, V. M., Hofmann, B. A., and Kamber, B. S., 1997, Single mineral dating by Pb-Pb step-leaching method: Assessing the mechanisms. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 393-414.
- Kim, J. H., 1990, Middle Paleozoic isotopic ages of the Ogcheon Group in Korea and their significance. In *Tectonics of Circum-Pacific continental margins* (eds. Aubou din and Bourgois), 181-191.
- Kwon, S.-T. and Jeong, J. G., 1990, Preliminary Sr-Nd iso-

- tope study of the Hadong-Sanchung anorthositic rocks in Korea: Implication for their origin and for the Precambrian tectonics. *J. Geol. Soc. Korea*, 26, 341-349.
- Lee, K.-S., Chang, H.-W., and Park, K.-H., 1998, Neoproterozoic bimodal volcanism in the central Ogcheon belt, Korea: Age and tectonic implication. *Precambrian Res.*, 89, 47-57.
- Ludwig, K.R., 1994, ISOPLOT-a plotting and regression program for radiogenic isotope data, version 2.71. USGS Open File Rep., 91, 445.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in south Korea: The Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Thirlwall, M.F., 2000, Inter-laboratory and other errors in Pb isotope analyses investigated using a  $^{207}\text{Pb}$ - $^{204}\text{Pb}$  double spike. *Chemical Geology*, 163, 299-322.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam Fault Systems, Eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.
- 
- (2001년 2월 25일 접수, 2001년 10월 19일 게재승인)**