

석영의 파동소광 강도를 이용한 암석 변형의 정량화

정원석¹ · 나기창^{1,*} · 정상원²

¹충북대학교 지구환경과학과 지질과학전공, 충북 청주시 개신동 산 48번지, 361-763

²충북대학교 사범대학 과학교육학과, 충북 청주시 개신동 산 48번지, 361-763

Quantification of rock deformation using wavy extinction of quartz grain

Wonseok Cheong¹, Ki Chang Na^{1,*} and Sangwon Cheong²

¹Department of Earth & Environmental Sciences, College of Natural Science, Chungbuk National University, 48 Gaesin-dong, Cheongju, Chungbuk, Korea, 361-763

²Department of Sciences Education, College of Education, Chungbuk National University, 48 Gaesin-dong, Cheongju, Chungbuk, Korea, 361-763

요약: 석영의 파동소광은 암석의 변형정도를 나타낼 수 있는 좋은 지표로서 사용할 수 있다. 암석의 변형도를 결정하기 위해 석영의 파동소광 강도(IWE: Intensity of Wavy Extinction)를 편광현미경, 디지털 카메라, NIH Image(또는 Scion Image)로 측정하였다. 파동소광이 나타나는 석영입자의 한 부분이 편광현미경 상에서 최대 소광이 될 때 IWE를 측정하며, 이때 나타나는 파동소광이 나타나는 아입자경계에 수직방향으로 측정을 시도했다. 본 연구에 사용된 NIH Image는 파동소광을 보여주는 각 부분의 광도를 256단계의 흑백 농담변화로 나타낼 수 있다. 이를 이용하여 측정 길이에 대한 농담변화로 IWE를 구하였다. 이렇게 획득한 IWE를 5° 단위로 묶어 뒀수분포표로 처리하였으며, 자료의 분포특성상 히스토그램의 최빈값과 중간값 사이의 중간값을 그 암석의 대표 IWE로 정의하고, 이를 다시 5단계의 변형대(무변형, 저변형, 중변형, 고변형, 최고변형)와 변형 지수(D1, D2, D3, D4, D5)로 묶었다. 이 측정방법을 이용하여 경남 언양지역의 언양화강암과 양산단층과의 상관관계를 분석한 결과, 양산단층에서 멀어질수록 변형도가 낮아지는 결과를 얻었다.

핵심어: 파동소광, IWE, NIH Image, 언양화강암, 양산단층

Abstract: The wavy extinction of quartz grains can be used as a good indicator to show the degree of rock deformation. To determine degree of the rock deformation, intensity of wavy extinction (IWE) of quartz grains was measured by using polarizing microscope, digital camera, and NIH image (or Scion Image). In this experiment, the measurement was performed along the line perpendicular to the subgrain boundary of wavy extinction. IWE was measured when a quartz grain shows maximum extinction in polarizing microscope. NIH image was represented in terms of 256 gray-scale brightness, which was associated with intensity of the wavy extinction. IWE was determined by the degree of brightness versus the measuring length of a quartz grain. IWE was analysed in the distribution chart with the collection unit of 5°. Regarding the characteristics of data distribution, the median between the mode and the median of the histogram is defined as a representative value for the IWE, and this value is subdivided into the five levels of rock deformation zones (lowest- or non-, low-, medium-, high-, and highest deformation) with their respective indices (D1, D2, D3, D4, and D5). The correlation between the Eonyang Granite and the Yangsan Fault was investigated by using the indices. The results indicate that IWE values decreased away from the fault.

Key words: Wavy extinction, IWE, NIH Image, Eonyang Granite, Yangsan Fault

*Corresponding author: Tel. 82-43-261-2731, E-mail. petrona@chungbuk.ac.kr

서 론

암석의 변형작용은 외부에서 작용하는 응력의 결과로써 암석을 구성하는 광물의 물리, 화학적인 변화를 거쳐 궁극적으로 암석의 구조적인 변화를 동반한다. 이러한 암석의 변형작용은 작용하는 응력과 그에 반응하는 암석의 물리, 화학적인 조건에 따라 크게 연성 변형 또는 취성 변형으로 나뉜다. 지하 깊은 곳의 비교적 높은 봉압(confining pressure)과 높은 온도 조건에서 일어나는 변형작용의 경우에는 연성 변형작용을 수반하지만, 지하 얕은 곳의 환경에서의 암석은 취성 변형작용을 받아 단층각력암, 단층점토 등의 파쇄암(cataclasite)으로 구성된 파쇄대가 형성된다(Engelder, 1974; Sibson, 1977; Nicolas, 1987; Passchier and Trouw, 1996).

암석이 변형작용을 받는 경우 암석내의 광물은 파쇄되거나 미킹크(microkink), 구조적 쌍정(mechanical twinning)이 형성되기도 하며, 압력에 의하여 물질이 이동(pressure solution)하기도 하고, 또한 변형띠(deformation band), 재결정작용(recrystallization), 파동소광(wavy extinction) 등 변형작용이 발생한 깊이, 온도, 작용한 응력의 정도에 따라 여러 가지 미구조를 보여준다. 특히 취성 또는 취성-연성 변형작용의 경우 석영 입자는 결정격자내의 변형작용에 의해 파동소광을 잘 보여준다.

석영의 파동소광은 격자내의 변위(dislocation)에 기인한 것으로 이러한 변위가 결정 내에 고루 분포하기 때문에 발생한다(Klein and Hurlbut, 1993; Passchier and Trouw, 1996; 田切·堀江, 1998). 결정 내에 고루 분포한 수많은 변위를 갖는 결정 격자는 미약하지만 휘게된 결과로써 균질하게 일률적으로 소광하지 않게 된다(Passchier and Trouw, 1996). 따라서 석영의 파동소광의 정도는 암석변형의 지표로서 이용할 수 있다(田切·堀江, 1998). 국내의 몇몇 연구에서 석영의 파동소광의 관찰을 보고(사공희와 좌용주, 1997; 강지훈, 1998)하고 있고, 옥천계 대향산규암에서 관찰되는 석영의 파동소광이 대향산규암 북서부로 갈수록 심하게 나타난다는 보고(임명혁 외, 1991)가 있지만 파동소광에 대한 정량적인 측정이 이루어진 예는 없다.

연구지역에 분포하는 언양화강암(Fig. 1)은 미약한 변형작용을 받았으며, 생성시기가 후기 백악기로 국내의 화강암 중 비교적 젊은편에 속하고(이윤종과 植田良未, 1976; 진명식 외, 1991), 또한 이를 변형시킨 주된 요소가 양산단층계에 포함되는 단층들로 알려져 있다(이윤종과 이인기, 1972). 양산단층계에 속하는 단층들은 연구지역의 대부분을 구성하는 언양화강암을 북

북동-남남서 방향으로 절단하고 있으며 주변에 파쇄대를 형성시키고 있다. 김종열(1993)은 양산단층 주변의 파쇄대를 고, 중, 저 파쇄대로 구분하였으며, 이러한 상이성은 단층이 형성될 당시의 응력의 방향, 응력의 크기에 따른 변형속도와 상대변위량, 변형을 받은 곳의 심도, 단층운동의 지역별 강도의 불균질성, 국지적인 재활성에 의한 파쇄작용의 중복성 등 여러 조건들과 연관된다.

이번 연구에서는 편광현미경상의 석영의 흑백사진을 공개프로그램인 NIH image 또는 Scion Image(Rasband, 1994; Björnerud and Boyer, 1996)를 이용하여, 언양화강암내 석영의 파동소광 강도(IWE: Intensity of Wavy Extinction)를 정량적으로 측정하고, 이를 이용하여 암석의 상대적인 변형정도를 산출하는데 목적이 있다.

언양 일대의 지질

언양화강암은 1:50,000 언양도폭 지질도(이윤종과 이인기, 1972)와 1:250,000 부산도폭 지질도(김동학 외, 1998)에서 언양읍을 지나는 양산단층의 서부에 주로 분포한다(Fig. 1). 이 화강암은 주로 담색이며, 유백색 내지 담홍색, 또는 담회색의 중립 내지 조립의 흑운모 화강암으로 마그마 분화작용의 차이로 그 주변부에는 반상화강암, 미문상화강암, 화강반암 및 화강섬록암 등의 다양한 암상을 형성하고 있다. 언양화강암의 주 구성광물은 석영, 장석, 흑운모 등이며, 그 외에 불투명 광물을 소량 함유하고 있다. 석영은 대체적으로 약한 파동소광을 보이고, 알카리 장석은 주로 미사장석이며 조장석도 드물게 관찰된다.

이 화강암과 양산단층으로 접하고 있는 진동층(Fig. 1)은 백악기 경상누층군의 하양층군의 상부층에 해당되며, 녹회색-흑회색의 사암, 실트암, 사질 셰일, 녹회색-흑회색 셰일로 주로 구성되어 있으며, 단층에 가까워 질수록 지층의 경사가 증가하는 양상을 보인다(김종열, 1993)

위의 진동층을 덮고 있는 주산안산암(Fig. 1)은 백악기 경상누층군의 유천층군에 속하는데, 조사지역 서부에 넓게 분포하며, 안산암질 반암과 안산암, 안산암내 협재된 응회암질 집괴암으로 구성되어 있다.

연구지역 언양화강암의 동쪽에는 북북동-남남서 방향의 양산단층이, 서쪽으로는 양산단층계의 하나인 모량단층이 양산단층과 평행하게 달리고 있다. 그 외에 이 두 단층사이에는 양산단층과 거의 평행한 1개의 단층과 그와 거의 수직한 북서-남동 방향의 1개의 단층이 존재한다. 양산단층의 운동에 관해서는 경사이동단

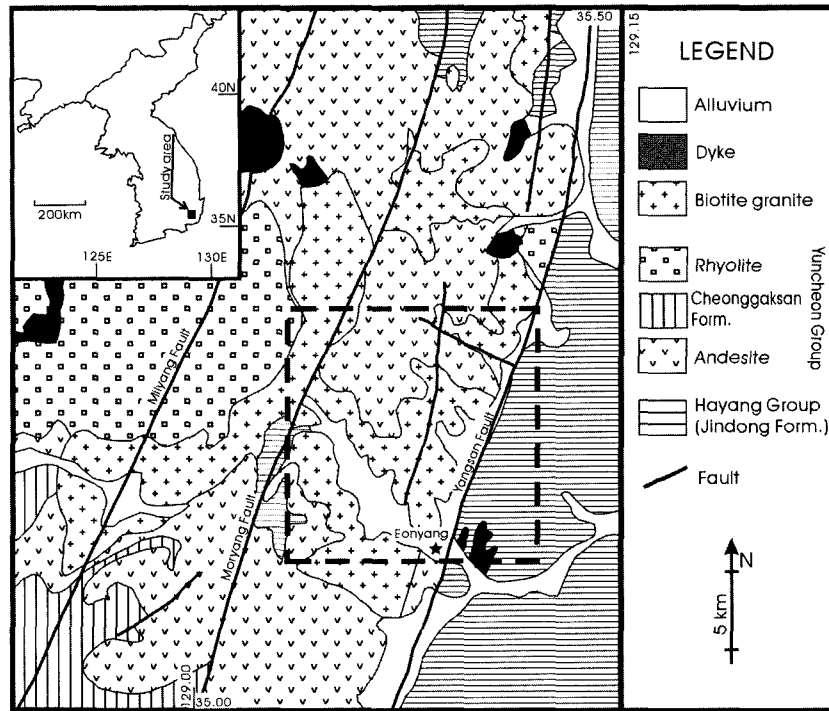


Fig. 1. The geologic map around the Eonyang area. Dashed rectangle is study area.

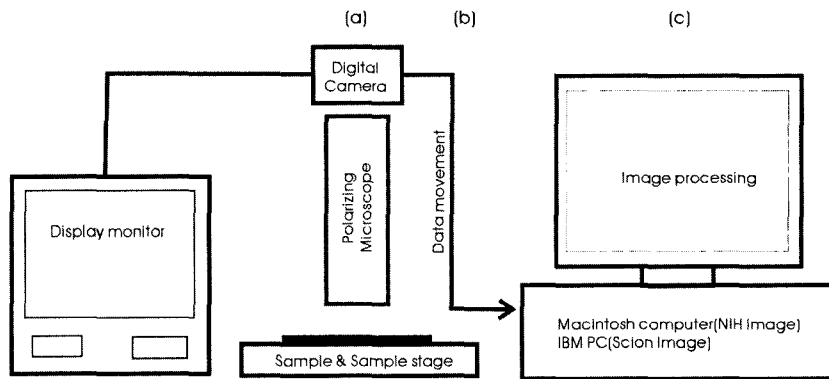


Fig. 2. Schematic diagram showing the procedure of the experimental system. (a) Photographing, (b) data movement, and (c) image processing.

충(이민성과 강필중, 1964), 회전단층(최현일 외, 1980), 주향이동단층(엄상호 외, 1983; Lee *et al.*, 1986), 수직 운동성분이 포함된 주향이동단층(경제복 외, 1999a, 1999b)등의 여러 연구 결과가 있다. 또한 김종렬(1993)은 양산단층은 불국사 변동의 산물로 부산에서 영해를 잇는 북북동 방향의 1개의 주단층으로 표현될 수 없는 여러 단층의 집합체이며, 천부의 저압 환경에서 단층이 형성되었음을 제안하였다.

연구 방법

측정장비 및 측정순서

측정 장비를 간략하게 도시하면 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 Nikon사의 LABOPHOT2-POL 편광현미경과 Coolpix990 디지털카메라, 그리고 IBM PC를 사용하였다.

측정순서는 다음과 같다. ① 시료의 채취 및 박편의

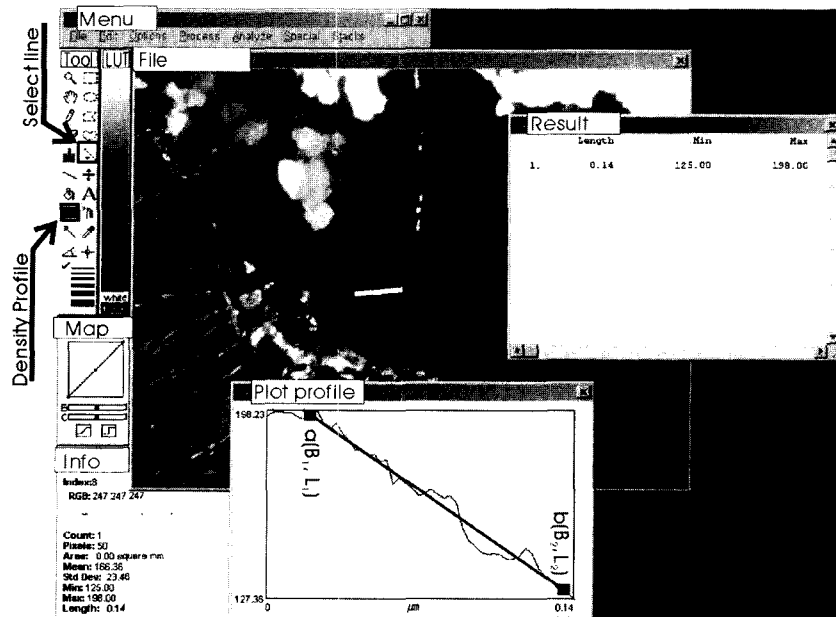


Fig. 3. The example of wavy extinction and measurement of IWE through Scion Image.

제작: 만일 시료가 방향성이 있는 암석이라면, 박편 제작시 암석의 방향성을 고려하여 만들어야 한다. 일반적으로 엽리면에 발달되어 있는 시료들은 엽리면에 평행하게 만든 시료 보다 수직으로 만든 시료가 동일한 면적에 파동소광과 관련된 미구조를 보다 많이 관찰할 수 있기 때문에 엽리면에 수직으로 만드는 것이 좋다. 괴상인 시료가 대부분인 연약화강암은 방향에 관계없이 박편을 만들었다. ② 이미지의 획득: 제작된 박편을 편광현미경상에서 관찰하고 디지털 카메라를 이용하여 촬영한다. 촬영할 석영에 파동소광이 나타날 경우 그 입자의 한 부분이 최대 소광을 나타낼 때까지 제물대를 회전시킨다. 이러한 상태의 사진을 박편 전체의 석영에 적용시켜 찍는다. 이때 촬영해야 할 석영의 크기가 너무 작으면 파동소광 측정이 불가능하므로 입자의 크기가 최소 0.1 mm 이상 되는 것이 좋다. ③ 이미지의 이동: 획득한 사진화일을 컴퓨터로 옮긴다. ④ 이미지 처리 및 IWE의 측정: 컴퓨터에서 NIH image를 이용하여 IWE를 측정한다.

NIH Image를 이용한 파동소광강도의 정량 측정

NIH Image는 국가보건기구(NIH: National Institute of Health) 산하 NIMH(National Institute of Mental Health)의 연구부(RSB: Research Services Branch)에서 개발한 공개 소프트웨어로 임의의 영상 처리에 많이

사용하며, 특히 생명공학 분야에서 많이 사용한다.

NIH Image는 원래 맥킨토시(Machintosh)의 Mac OS에서 작동되도록 고안되었으나, 일반 IBM PC의 windows OS 사용자들은 NIH Image와 사용방법이 똑같은 Scion Image를 사용하면 된다. 그러나 Scion Image는 실행시 컴퓨터 시스템의 불안정 등과 같은 오류가 발생하기 때문에 본 연구에서는 IBM PC에서 공개 소프트웨어인 Basillisk(II)라는 에뮬레이터와 Mac OS 8.0을 실행한 후 NIH Image를 사용하였다.

NIH Image는 Mac OS 기반으로 만들어진 프로그램이기 때문에 확장자명이 TIFF인 파일로 변환시켜줘야만 컴퓨터 작업이 가능하다. 컴퓨터에 설치한 NIH Image를 실행시키면 Fig. 3과 같이 Menu, Tools, LUT (Look-up Table), Map, Info의 네 개의 바(bar)와 창(window)들이 화면상에 나타난다. Tool bar의 Select Line에서 스케일을 조절해준 후, Tool bar에서 Density Profile Tool을 클릭하고 석영입자의 광량변화가 최대가 되는 파동방향(현미경적 아입자 경계에 수직인 방향)에 측정선을 그린다. 아입자 경계에 수직으로 측정선을 그림과 동시에 Plot profile이라는 그래프 창이 뜬다. 이 Plot profile의 Y축(종축)은 광도를 0(최대광도)부터 255(최소광도)까지 256단계의 흑백의 농담변화로 나타내고, X축(횡축)은 사진상에 그린 측정선의 실제 길이를 나타낸다(Fig. 3).

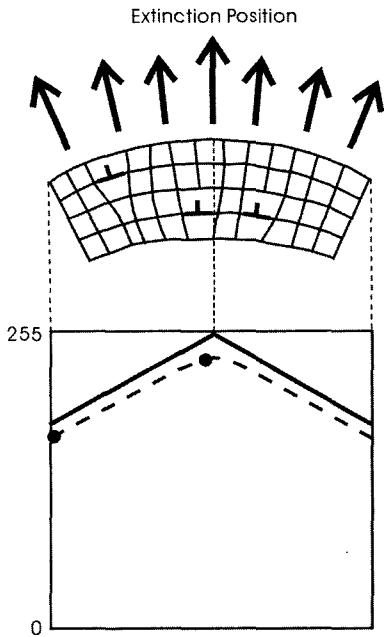


Fig. 4. Schematic diagram showing mechanism of wavy extinction. Lattice curvature (Nicolas and Poirier, 1976) and plot profile in NIH Image of lattice curvature. Thick and dotted lines in the plot profile indicate ideal and real extinction, respectively.

파동소광 강도(IWE)는 길이 변화에 따른 광도의 변화량으로 구한다. 따라서 Fig. 4의 Plot profile에서 굽은 실선으로 나타낸 것처럼 이론상 파동소광을 하는 석영에서, 완전소광을 하는 부분은 광도가 255를 지시해야 하므로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$IWE = \frac{\text{완전 소광 부분의 광도}(255) - \text{불완전 소광 부분의 광도}}{\text{길이의 변화량}} \quad (1)$$

그러나 식 (1)과 같이 구할 경우 최대값과 최소값의 차이가 다양하게 나타난다. 따라서 최대값, 최소값에 한계(0°~90°)를 주기 위해 식 (1)을 다음과 같이 고친다.

$$IWE = \tan^{-1} \left(\frac{\text{완전 소광 부분의 광도}(255) - \text{불완전 소광 부분의 광도}}{\text{길이의 변화량}} \right) \quad (2)$$

그러나 Fig. 4의 Plot profile에서 점선으로 나타낸 것처럼 완전소광을 하는 부분이라도 완벽한 255를 나타내는 경우가 거의 없기 때문에 Plot profile에서 파동소광에 의한 연속적인 변화가 나타나는 부분의 최대광량과 최소광량, 그리고 그에 대한 길이의 변화량을 모두 측정하여 파동소광 강도를 구한다. 따라서 Fig. 3에 도시되어 있는 것처럼 이 연속적인 변화와 접치는 임의의 직선 ab를 그린 후 a점과 b점의 X축 좌표(L₁, L₂)와 Y축 좌표(B₁, B₂)를 각각 구하여 아래의 공식에 대입하면 (3) 식이 된다.

$$IWE = \frac{\tan^{-1}(B_1 - B_2)}{(L_1 - L_2)} \quad (3)$$

따라서 파동소광 강도는 직선 ab의 경사각이기도 하며, 이는 기울기의 음수, 양수 관계없이 경사각의 절대 크기에 비례한다. 여기서 L의 측정단위는 μm이다.

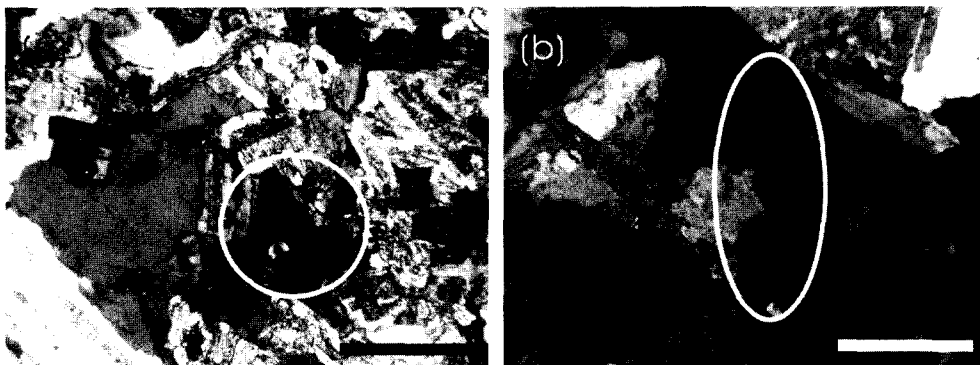


Fig. 5. Photomicrograph of thin section from sample number (a) U1 and (b) U5 in the Eonyang Granite (see Fig. 7 for sample location). White ellipse in each figure indicates portion of wavy extinction in a quartz grain (Scale bar : 0.5 mm).

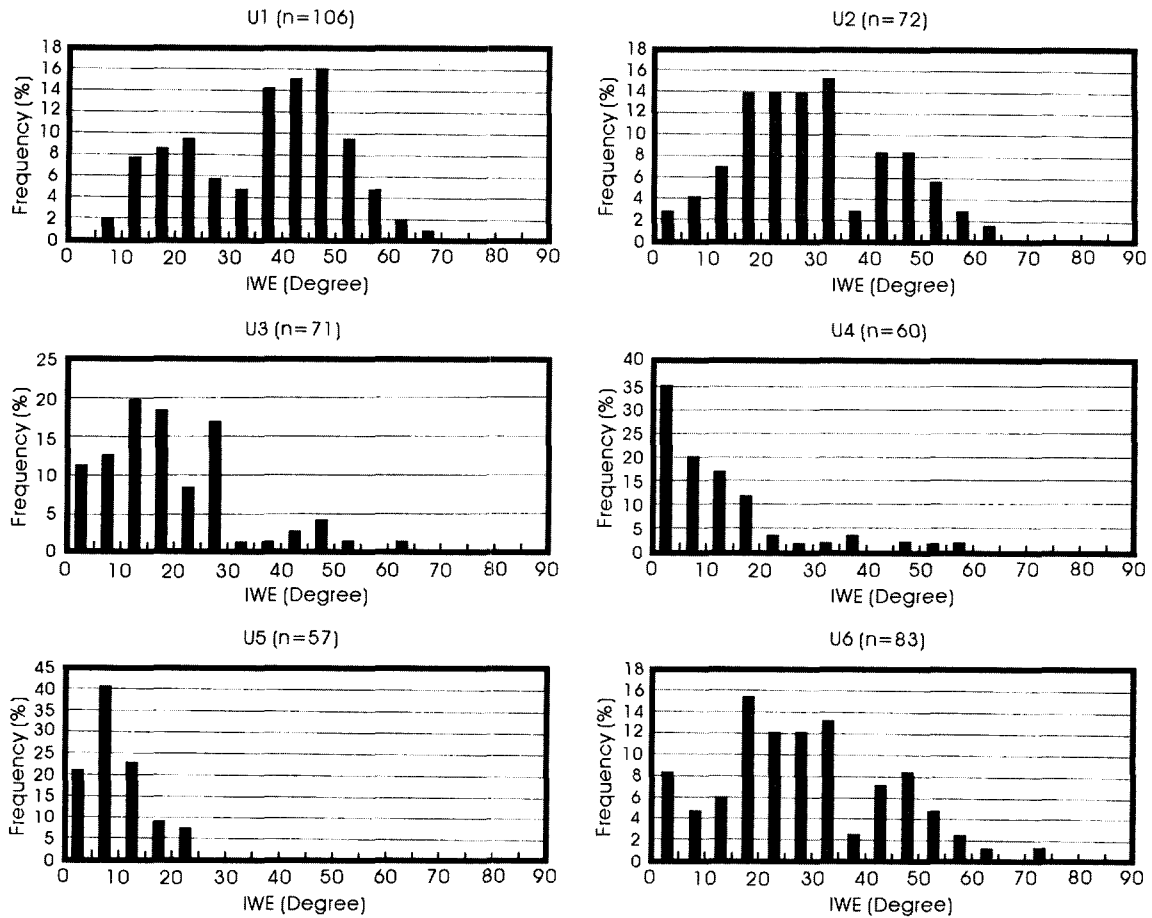


Fig. 6. IWE histograms of each sample, U1, U2, U3, U4, U5, and U6 collected from the Eonyang area.

암석의 파동소광 강도 결정

일반적으로 편광현미경에서 석영의 파동소광을 관찰할 경우 NIH image를 이용하여 측정하기 전까지는 서로 다른 시료에서 나타나는 파동소광의 강도는 파동소광 강도가 많이 차이가 나더라도 일부에서 비슷하게 보인다. 언양화강암의 예로 양산단층에 가까운 U1에서의 일부 석영의 파동소광(Fig. 5a)과 U5에서의 파동소광(Fig. 5b)이 일어나는 정도는 사진에서 볼 때 서로 비슷하게 보이거나 NIH image를 이용하여 IWE를 측정하여 보면 실제로 두 시료는 많은 차이가 나타난다.

파동소광 강도 측정은 일반적으로 하나의 입자에서 여러 번 측정하고, 한 박편에서 50개 이상의 측정치를 구한다. 이 측정치를 0° 이상 5° 미만, 5° 이상 10° 미만과 같이 5° 단위로 묶어 0°부터 90°까지 18단계로 만들고 이것에 따른 돛수분포표를 만든 후 이를 다시 히스

토그램으로 나타내었다(Fig. 6). 이것들로부터 파동소광 강도의 확률 분포 경향을 파악할 수 있으며, IWE 대표값을 결정하여 이것을 그 시료의 IWE로 사용하였다.

파동소광 강도의 대표값 중 기본적으로 평균(average), 중간(median), 최빈(mode)값 등과 같은 대표값을 이용해서 어떤 암석이 더 많이 변형되었는지를 상대적으로 비교하는 것은 가능하며, 또한 그 값들을 암석변형 정도의 척도로 삼을 수 있다. 그러나 그 값을 구하기 위해서 평균과 중간값을 이용한 경우에 히스토그램상의 외도가 심할 경우 등을 제외하고 45° 주변에 모이려는 특성을 보여주기 때문에 적절치 못하다. 따라서 대표값을 표현하기에는 히스토그램의 X축에 고루 위치할 수 있는 최빈값이 유리하다. 그러나 최빈값 역시 히스토그램이 불규칙한 경향을 나타내거나 첨도가 매우 낮은 경우에는 대표값으로서의 신뢰도가 떨어지는 경향

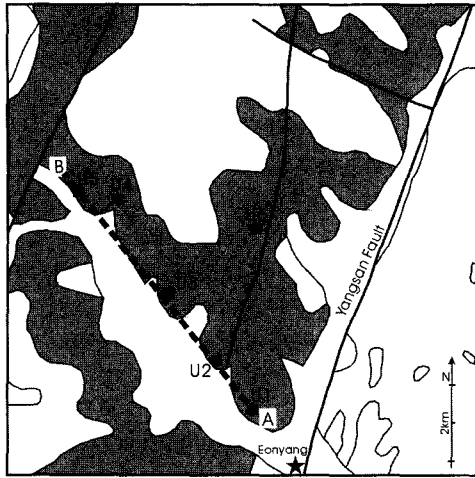


Fig. 7. Map of sample location in Eonyang area (see Fig. 1 for geologic map). The gray color is the Eonyang Granite.

이 있기 때문에 데이터의 중간값과 히스토그램상에 나타나는 최빈값사이의 중간값을 그 암석의 IWE로 정하였다. 공식에서 IWE가 90°인 값이 나올 수 없으므로 IWE 값이 포함되어있는 히스토그램상의 계수 영역의 최소값을 대표값으로 했다. 즉, IWE는 0° 이상 85° 이하의 영역에서 5° 단위로 총 18단계가 나올 수 있다. 예를 들어 Fig 6의 U1 히스토그램을 보면, 본 표본의 총 106개의 데이터의 중간값은 37.88이며, 최빈값은 47.5이다. 따라서 최빈값과 중간값의 중간값은 41.31이며, 이것이 포함되어 있는 계수범위는 40°~45° 사이이므로 이 표본의 IWE는 40이 된다.

결과 및 고찰

연양화강암의 시료는 양산단층에서 가장 가까운 연양읍으로부터 연양화강암을 따라 북서 방향으로 5개와 연양읍의 북쪽에 1개의 시료를 채취했으며(Fig. 7) 각각의 시료를 분석하였다(Fig. 6, Table 1). 시료 분석결과 U1부터 U5까지 연결하는 가상의 직선 AB에 각 시료를 위치시켜 각각의 IWE를 도시하여 보면, 양산단층에서 멀어질수록 파동소광의 강도가 낮아지는 경향이 나타나며, 모량단층에 의한 변형은 적은 것으로 사료된다. 또한 U6번 시료를 직선 AB선상에 투영했을 경우 양산단층으로부터 비슷한 위치에 있는 U3번 시료와 비슷한 파동소광의 강도가 나타나며, U6근처에 있는 단층 역시 변형에 큰 영향을 주지는 못한 것으로 사료된다(Fig. 8, Table 1).

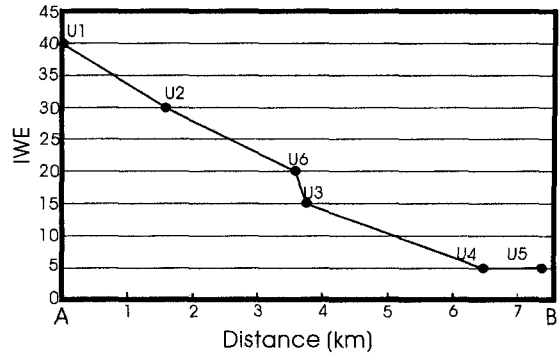


Fig. 8. Plot showing relation between distance and IWE along a line of AB in Fig. 7.

Table 1. IWE values measured from the Eonyang Granite.

Sample Number	IWE (degree)
U1	40
U2	30
U3	15
U4	5
U5	5
U6	20

본 연구에서는 파동소광의 강도를 편광현미경관찰을 이용하여 암석의 변형도와 변형대(deformed zones)를 세부적으로 나누고 그에 따른 변형지수(deformation indices)로 암석의 변형을 정량화 하였다. 우선 IWE의 크기에 따라 최저(lowest), 저(low), 중(medium), 고(high), 최고(highest)의 다섯 개의 변형대로 구분하고, 이것을 표기의 편리함을 위해 각각 D1~D5의 변형지수로 나타내었다. 이 구분은 파동소광의 강도가 70° 이상인 지역은 거의 키크에 가까운 파동소광이 나타날 것으로 예측되어 최고 변형대로 묶었으며, IWE가 10° 이하의 암석들은 파동소광이 약하게 보이거나 거의 인지되지 않으므로 최소변형대라고 구분하였다. 이 두 변형대를 제외한 나머지 변형대의 구분은 거의 등간격으로 나누어 지정해 주었다(Table 2). 이것에 따라서 연양 화강암체에서는 중~최저 변형대(D3~D1)를 지시하는 세 개의 변형대로 나눌 수 있었으며, U1과 U2(D3), U3와 U6(D2), 그리고 U4와 U5(D1)가 각각 같은 변형대로 구분되었다(Fig. 9).

연양화강암의 변형도는 비교적 낮게 나타나는데, 그 이유는 본 연구지역에서 양산단층과 가까운 지역은 충격층이 발달하여 양산단층과 가까운 시료를 획득하지 못해서 즉, 채취한 시료 중 양산단층으로부터 가장 가

Table 2. Classification of rock deformation by IWE value range.

IWE	Degree of deformation (D)	
	Deformation zone	Index
0-10	Lowest (or Non)	D1
15-25	Low	D2
30-45	Medium	D3
50-65	High	D4
70-85	Highest	D5

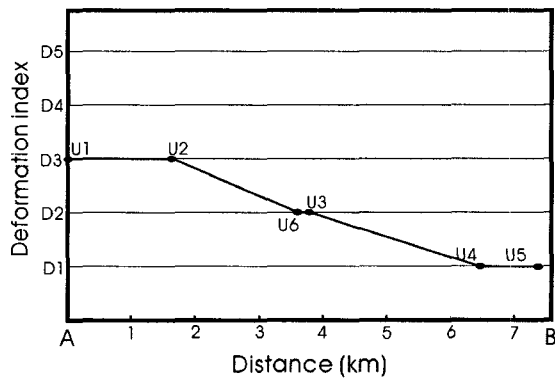


Fig. 9. Plot showing relation between distance and deformation index along a line of AB in Fig. 7.

까운 시료(U1)도 그 단층으로부터 약 1.5 km 가량 떨어져 있기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 양산단층과 관련된 좀더 정확한 정보를 얻기 위해 양산단층 인근의 표품에서 고변형을 받은 화강암을 찾아서 데이터를 얻는 것이 바람직할 것이다.

이러한 괴상인 언양화강암을 조사함으로써 양산단층과 거리에 따른 암석내의 상대적인 변형도가 나타나기 때문에 파동소광 강도는 암석의 취성변형정도를 나타내는 좋은 지시자가 된다고 생각된다. 따라서 석영의 파동소광 강도 측정은 앞으로 어떤 지역의 지질 구조 연구시 암석의 상대적인 변형도를 연구하고자 할 때 간단하면서도 저렴한 보조적인 수단으로 유용하게 사용될 수 있으며, 좀더 복잡한 구조가 나타나는 청산화강암에 응용할 계획이다.

결 론

본 연구는 편광현미경, 영상분석장치 및 NIH Image를 이용하여 석영의 파동소광 강도를 측정하고 이를 이용하여 암석의 변형도를 산출하였다. 언양화강암에

서 산출된 암석의 변형도를 이용하여 양산단층과 언양화강암의 관계를 알아본 결과 석영의 파동소광 강도는 양산단층에서 멀어질수록 작아짐을 알 수 있었다. 여기서 산출된 파동소광 강도를 최저, 저, 중, 고, 최고의 다섯 등급으로 나누고 이에 대해 각각 D1~D5까지의 변형지수로 나타냄으로써 암석의 변형도를 정의하였다.

이에 따르면 조사지역의 언양화강암은 비교적 낮은 변형도인 중~저 변형대(D3~D1)가 분포한다. 본 연구 지역에 고변형대가 존재하지 않는 이유는 양산단층과 가까운 지역은 층적층이 발달하여 단층에서 가장 가까운 시료가 단층으로부터 1.5 km 떨어져 있을 만큼 단층 인접부의 시료를 획득하지 못했기 때문이라고 생각된다.

참고문헌

- 강지훈, 1998, 변형된 청산 화강암의 압쇄암화작용시의 변형온도(변형된 청산화강암의 구조해석). 암석학회지, 7, 53-68.
- 경재복, 한수형, 조현주, 김지수, 1999a, 양산단층 남부 상천리 일대의 천부 전기비 저항 및 VLF 탐사. 지질공학회지, 9, 59-68.
- 경재복, 이기화, 岡田篤正, 渡 満久, 鈴木康弘, 竹村惠二, 1999b, 양산단층대 남부 상천리 일대의 트레치조사에 의한 단층특성 규명. 지구과학회지, 20, 101-110.
- 김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 부산 지질도폭(1:250,000) 및 설명서. 과학기 술처, 1-61.
- 김종렬, 1993, 양산단층의 단층계와 파쇄대. 지구과학회지, 14, 281-299.
- 사공희, 좌용주, 1997, 청산 일대에 분포하는 화강암류의 광물조성과 주성분원소 지구화학. 암석학회지, 6, 185-209.
- 임상호, 최현일, 손진담, 오재호, 광영훈, 신성천, 윤혜수, 1983, 경상분지의 경상누층 군의 지질 및 지화학적 연구. 연구특보-36, 자원개발연구소, 27.
- 이민성, 강필중, 1964, 한국지질도(1:50,000) 양산도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 24.
- 이윤중, 이인기, 1972, 언양도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 1-22.
- 이윤중, 植田良夫, 1976, 한국 경상남도 언양도폭 및 북서부 울산도폭 지역산 화강 암질암의 K-Ar 연대. 광산지질, 9, 127-134.
- 임명혁, 김영업, 장태우, 1991, 충주지역 대항산 규암층 주변일대의 변형량 분석 및 변형작용사. 지질학회지, 27, 191-199.
- 진명식, 김성재, 신성천, 1991, 한국 동남부 지역 화강암류의 횡선트래 및 K-Ar 연 령: 화성활동사와 지체구조적 의미. 한국동력자원연구소 연구보고서, 57-98.
- 최현일, 오재호, 신성천, 양문열, 1980, 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적 연구. 연구 특보-20, 자원 개발

- 연구소, 1-33.
- 田切美智雄, 堀江典子, 1998, 石英の波動消光と變形. 岩礦, 93, 323-329.
- Björnerud, M.G. and Boyer, B., 1996, Image analysis in structural geology using NIH Image. In Structural Geology and Personal Computer, Declan G.D.P. ed., Pergamon, 105-121
- Engelder, J.T., 1974, Cataclasis and generation of fault gouge. Geol. Soc. Am. Bulletin, 85, 1515-1522.
- Klein, C. and Hurlbut, C.S.Jr., 1993, Manual of Mineralogy. 21st ed., John Wiley & Sons, Inc., 162-164.
- Lee, K.H., Kim, Y.H. and Chang, T.W., 1986, Seismicity of the Korean Peninsula (II): seismicity of the northern part of the Yangsan fault. Jour. Geol. Soc. Korea, 22, 347-365.
- Nicolas, A. and Poirier, J.P., 1976, Crystalline Plasticity and Solid state Flow in Metamorphic Rocks. John Wiley & Sons, Inc., 444.
- Nicolas, A., 1987, Principles of rock deformation. D. Reidel Pub. Co., Holland, 208.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, Microtectonics. Springer-Verlag, 289 p.
- Rasband, W., 1994, NIH Image User Guide. The National Institutes of Health, Washington(Unpublished).
- Sibson, R.H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms. Jour. Geol. Soc. London, 133, 191-213.
-
- (2002년 1월 4일 접수, 2002년 6월 24일 채택)