

## 포항이남 제3기분지암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장

김인수\*

### Magnetic Anisotropy and Tectonic Stress Field of Tertiary Rocks in Pohang-Ulsan area, Korea.

In-Soo Kim\*

**Abstract:** Magnetic anisotropy of a total of 213 independently oriented Tertiary rock samples from Pohang-Ulsan area has been studied. The sampled strata comprise basalts, tuffs and black shale, and range in age from Eocene to Miocene. The previous palaeomagnetic studies indicate that their magnetic carrier minerals are titanomagnetites.

Among 23 sampled sites, 11 sites were found to preserve magnetic load foliation parallel to the bedding plane caused by the lithostatic load of the overlying strata. Other 4 sites showed magnetic lineation indicating the flow direction of lava and tuffs. The remaining 8 sites revealed the magnetic tectonic foliation nearly vertical to the bedding plane. This magnetic foliation is interpreted to be generated by tectonic compression which acted nearly horizontally during the solidification stage of the strata. The compression directions deduced from the tectonic foliation of the 8 sites can be grouped into internally very consistent two group: a N-S trending one and the other WNW-ESE trending one. It is interpreted that the former N-S compression was associated with the N-S spreading of the East Sea(Sea of Japan) and the dextral strike-slip movement of the Yangsan-Ulsan fault system. The latter WNW-ESE compression is interpreted to represent the folding and reverse faulting activity in the Korean and Tsushima straits during middle/late Miocene times.

#### 서 론

어떤 지역의 지질구조와 지구조운동상을 규명하기 위하여서는 여러가지의 접근방법이 있을 수 있겠으나 그 중에서도 세가지가 가장 대표적인 것이다. 첫째는 연구지역에 대한 정밀야외지질조사나 항공사진을 통하여 지층이나 절리 등 여러가지 선구조나 면구조의 주향경사, 습곡이나 단층의 방향 등을 측정하여서 종합적 해석을 도출해내는 거시적인 방법(macro-structural analysis)이 될 것이고 둘째는 암석시료를 채취한 후 박편을 통하여 미세구조 및 원래의 조암광물이나 이차생성 변성광물들의 쌍정과 배열, 파쇄상 등을 연구하는 미시적인 방법(petrofabric analysis)이 될 것이다. 전자의 방법은 가장 전통적인(classical) 방법으로써 여러 지질학자들에게 널리 알려져 있는 바이며 국내외에서 널리 쓰여지고 있다. 후자의 방법은 어떤 지역의 지질구조

는 표현 스케일에 제한을 받지 않고 미시적으로 부터 거시적으로 이르기까지 광범위하게 나타난다는(pervasive) 근본원리에 입각한 것으로써 (예를 들어서 Turner & Weiss 1963) 오스트리아의 미세지질구조학자 Sander(1930, 1948, 1950)를 중심으로 하여 유럽에서 발전된 것이다. 근년 이러한 방법은 유명한 Ramsay(1967) 및 Ramsay & Huber(1983, 1987)의 교과서에 의하여 널리 소개되고 있으며 우리나라에서도 이러한 접근방법을 통하여 광역적인 지질구조를 해석해 내려는 관심이 높아지고 여러사람들에 의한 여러지역으로부터의 연구결과들이 나타나고 있다. 이들에 반하여 본 연구에 이용된 세번째의 연구방법은 암석의 磁氣的 성질, 즉 대자율의 비등방성(magnetic susceptibility anisotropy)에 바탕을 둔 것으로써 그 접근방법이 앞서의 두 방법과는 근본적으로 다르다. 근년에 와서 암석의 자기비등방성을 정밀하게 측정할 수 있는 기자재가 개발되면서 (Collinson 1975, 1983 : Noltmier 1971) 이를 통하여 암석의 자기적 염리구조(magnetic foliation), 선구조(magnetic lineation) 등을 규명하고 연구지역에서의 古응력 장

\*부산대학교 지질학과(Dept. of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

(palaeostress-field), 古水流(palaeocurrent)의 방향을 판별해 내는 방법이 널리 적용되기 시작하였다. 그러나 우리나라에서는 아직 이러한 연구방법은 적용한 예가 없었기에 본 논문을 통하여 그 방법의 개요를 소개하고 실제로 이를 포항이남의 제3기분지에 적용하여서 그곳에서의 지구조적 응력장의 상황을 알아보기로 한다.

이러한 연구는 연구지역인 제3기분지의 발달사를 이해하는데 필요할 뿐만 아니라 나아가서는 동편의 동해와 서편의 울산단층을 포함한 양산단층계에서의 지구조운동에 대한 단서를 얻는데 중요한 것으로 판단된다.

### 연구방법의 기본원리 : 자기적 선구조와 엽리구조

암석시료에 작은 외부자기장  $\vec{H}$ 를 가할 때 그 암석은 유도 자기(induced magnetization)  $\vec{j}$ 를 가지게 되며 이  $\vec{j}$ 의 크기는  $\vec{H}$ 에 비례한다. 따라서 이러한 관계는  $\vec{j} = k\vec{H}$ 로 표시되며  $k$ 를 그 암석의 대자율(magnetic susceptibility)이라고 부른다. 이러한 암석의 대자율 값이 측정방향(즉 외부자기장을 가하는 방향)에 관계없이 동일한 크기일 때 우리는 이

암석이 자기적으로 등방성(magnetic isotropy)을 보인다고 말하며 그렇지 않은 경우에는 자기적 비등방성(magnetic anisotropy)을 보인다고 말한다. 통상, 암석에서 대자율의 값을 지배적으로 결정하는 광물은 자철석(엄격히 말하여 titanomagnetites)이며 (예를 들어서 Sharma, 1986) 자철석의 비등방성은 주로 그 결정입자의 모양(shape anisotropy)에 의하여 결정된다(Stacey & Banerjee 1974, Collinson 1983). 즉 널리 알려진 막대자석이나 자침의 예로부터 알 수 있는 바와 같이 장축방향이 단축방향보다도 높은 대자율을 보이기 때문에 그들은 장축의 방향으로 극성을 가지도록 제작되고 있는 것이다. 암석내에서 이러한 자철석입자들이 무질서(random)하게 배열 되어 있을 때 그 암석은 전체적으로 자기적 등방성을 보이게 된다(Fig. 1A). 그러나 이러한 자철석들이 규칙적인 배열을 가지게 되면 그 암석은 자기적 비등방성 즉 자기적 선구조(magnetic lineation)나 엽리구조(magnetic foliation)를 보이게 된다(Fig. 1B, C).

지질학적 견지에서 볼 때 자성 광물인 자철석이 무질서한 배열을 보이게 되는 전형적인 예로써는 정체된 상태의 물에서 퇴적된 퇴적암과 공기중에서 비교적 조용히 퇴적

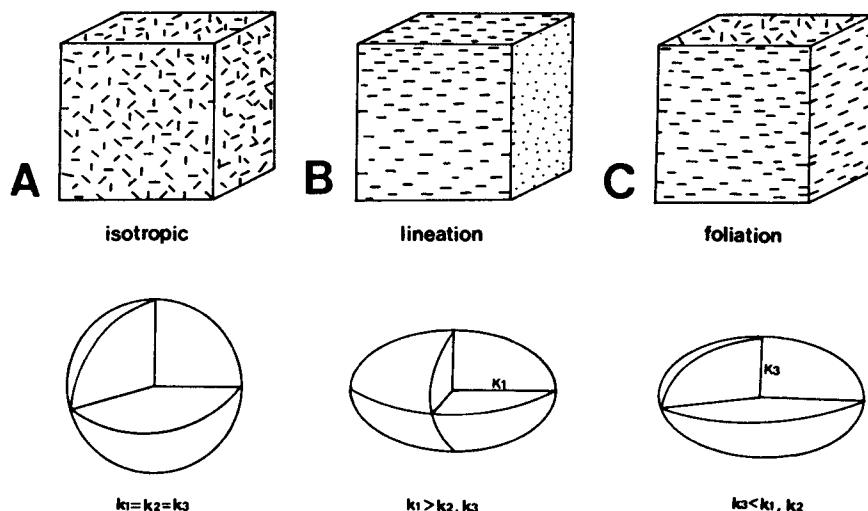


Fig. 1. Magnetic susceptibility isotropy and anisotropy.

(A) The case of magnetic isotropy. The directional independence of magnetic susceptibility value can be represented by a susceptibility sphere. This isotropic property is due to the random orientation of magnetic minerals. Such a rock was deposited in a relatively calm medium and experienced no external stress thereafter. (B) The case of magnetic anisotropy represented by a prolate susceptibility ellipsoid. This lineation fabric is generated by lava or ash flow mechanism(=flow lineation). (C) The case of magnetic anisotropy represented by an oblate susceptibility ellipsoid. This foliation fabric is due to a tectonic stress(=tectonic foliation) or to the lithostatic pressure of overlying strata(=load foliation).

된 응회암의 경우가 된다. 이러한 암석들은 어느방향으로나 동일한 대자율값을 보이게 되며 따라서 자기적으로 동방성의 성격을 갖게 된다(Fig. 1A).

그러나 이러한 암석들이 퇴적될 당시 퇴적매체인 공기나 물, 혹은 현무암의 경우 lava의 흐름으로 인하여 자철석의 장축방향이 일정하게 배열된다면 자기적 비동방성이 나타나게 된다(Fig. 1B). 즉 이러한 암석의 경우에는 자철석입자들의 장축이 우세하게 정렬된 방향으로 가장 높은 대자율을 보이는 자기적 선구조(magnetic flow lineation)가 나타난다.

한편 앞서에서와 같이 정체된 매질 중에서 자기적으로 동방성을 가지며 쌓였던 암석이라 할지라도 자체지층 혹은 그 상위에서 누르는 지층의 충후가 두껍거나 구성광물의 비중이 높은 경우 하중에 의하여 충리면에 수직인 방향으로 압력( $P = \rho gh$ :  $P$ 는 압력,  $\rho$ 는 비중,  $g$ 는 중력상수,  $h$ 는 누르는 층의 두께)을 받게되면 결과적으로 충리면과 평행한 자기적 염리구조(magnetic load foliation)을 가지게 될 것이다(Fig. 1C). 내려누르는 지층의 평균 밀도가 3,000Kgm<sup>3</sup>, 평균두께가 10m라고 할때 이와같은 지층에 의한 하중은 약 0.3MPa(약 3기압)이 된다. 이러한 하중을 받은 암석의 경우에는 충리면에 수직한 방향으로 가장 낮은 대자율을 보이게 될 것이다.

마지막으로 어떠한 암석이 일정방향의 지구조적인 응력(tectonic stress)을 받게되는 경우 앞서와 유사하게 압력에 수직인 방향으로 자기적 염리구조(magnetic tectonic foliation)를 가지게 될 것이다. 따라서 이 경우에는 대자율이 가장 낮은 방향이 이러한 응력의 작용방향이다. 이러한 효과는 당초 자기적으로 동방성을 가진 암석에서 특히 예민하게 나타날 것으로 예상된다. 그러나 통상 지구조적인 응력의 크기는 지층하중에 의한 압력보다는 훨씬 크기때문에(통상적인 지구조적 응력의 크기는 약 10MPa, 즉 약 100기압 정도이다. Turcotte & Schubert 1982) 이러한 응력의 작용이전에 지층의 하중에 의해서 충리면에서 평행한 염리구조가 형성되었던 암석의 경우라 할지라도 이를 암도하는 새로운 방향, 다시말해서 지구조적 응력방향에 수직인 방향으로 염리구조가 생성되게 된다.

## 연구수행의 방법

### 시료채취 및 시편 제작

본 연구를 위한 시료는 포항시로부터 남으로 경상남북도의 경계에 이르는 경북 월성군 양남면 까지의 제 3기분지

로부터 채취된 것이다(Fig. 7 참조). 이 지역은 Tateiwa (1924)의 구룡포·연일·조양(감포)도폭이 망라하고 있는 곳으로써 지질시대는 Eocene-Miocene이다. 시료채취작업은 휴대용 착암기를 사용하여 직경 1인치의 착공시료(core sample)를 뚫었으며 시료의 정향과 지층의 주향경사측정을 위하여서는 지질조사용 compass를 사용하였다. 각 시료들은 해당지층에서 가능한 넓은 수직적 충서범위가 망라되도록 채취되었다. 이렇게 하여 이 지역내 23곳으로부터 각각 독립적으로 정향된 총 213개의 시료(core sample)를 채취하였다. 암종으로 볼때 이들 중 75개는 현무암질암, 137개는 응회질암, 1개는 퇴적암이다. 거의 모든 시료들은 지층면의 발달이 양호한 노두에서 채취된 것이다. 응회질암이나 퇴적암의 경우는 충리나 용결구조 혹은 흐름구조가 비교적 잘 발달하고 있어서 지층면의 식별이 용이했다. 현무암의 경우에는 氣孔의 집적면이나 장방형 사장석입자들의 정렬면이 충리면인 것으로 인지되었는데 이러한 면들은 대체적으로 주상절리에 수직한 방향을 이루고 있었다.

채취된 시료들은 실험실에서 높이/직경 비율이 약 0.9 되는 원통형시편으로 절단되었는데 본 연구에서와 같이 각 방향에 따른 절대적인 대자율 값의 차이보다는 자기비동방성타원체(magnetic anisotropy ellipsoid)축의 orientation이 주관심이 되는 경우에는 시편의 형태가 크게 문제되지는 않는다(Collinson 1983). 엄격한 견지에서 가장 이상적인 시편의 형태는 球形이 되겠으나, 보다 제작이 간단한 원통형 시편으로써도 형태에 의한 비동방성(shape anisotropy)이 초래됨이 없이 시편의 자기장이 충분히 central dipole field로 표현된다. 원통형시편의 이상적인 높이/직경비에 대해서는 0.85–0.95사이의 의견들이 많으나 이 값은 측정기기의 종류와도 관계가 있다. 본 연구에서 사용한 Digico type의 대자율 비동방성 측정기의 경우에는 약 0.90이 가장 이상적인 값으로 알려지고 있다(Sharma 1965, 1968 : Scriba & Heller 1978). 이렇게 하여 총 333개의 원통형시편을 제작하였으며 비록 극소수이기는 하나 시료채취시 혹은 시편제작시 파손으로 인하여 표준의 원통형에서 심히 벗어난 형태를 갖게된 그 밖의 시편들은 연구대상으로부터 제외되었다.

### 자기비동방성의 측정 및 대자율타원체의 主軸方向결정

자기비동방성의 측정을 위하여 사용된 기자재는 영국 Molspin사 제품인 Minisep 비동방성측정기였다. 이 기자재는 근본적으로 Digico magnetometer와 비슷한 구조를 가진 것이다. 다만 차이를 보이는 부분은 기자재의 측정부인

데 이 부분은 두 쌍의 서로 직교하는 Helmholtz coil로써 구성되어 있다. 한쌍의 coil은 약 10KHz 교류에 의하여 0.5mT 정도의 균질한 자기장  $\vec{H}$ 를 발생시키고 다른 한쌍은 이러한 자기장에 의해서 시편에 유도된 유도자기  $\vec{J}$ 를 측정하도록 되어 있다. 이렇게 작은 자기장에서는 시료의 형태에 따른 demagnetizing factor 효과가 무시된다. 이 coil set의 복판에서 원통형 시편이 약 7Hz의 속도로 회전함에 따라 pick-up coil에 회전속도의 2배가 되는 주파수를 갖는 sine파가 유도된다. 이 sine파는 소형 computer에 digital로 기록되고 Fourier analysis를 받음으로써 시편에 유도된  $\vec{J}$ 의 강도와 방향이 결정된다. 이때  $\vec{H}$ 는 알려진 값이므로 원하는  $k$  값을 얻을 수 있다. 잔류자기에 의해서 발생되는 signal은 시편의 회전주파수와 동일한 주파수를 가지므로 쉽게 filter-out 시킬 수 있다.

시편이 자기적으로 비등방성인 경우 대자율  $k$ 는 second order의 대칭형 tensor가 된다. 원통형 시편을 서로 수직하는 세축으로 회전시킴으로써 이 anisotropy tensor  $k$ 를 구성하는 모든 요소들이 측정된다. 이 세 회전축의 방향은 시료의 원통축방향, 정향표시(orientation mark)방향 그리고 이들 두 방향과 수직인 방향이며 바로 이 세축이 시편의 대자율방향을 기술하는 기준좌표축이 된다. 측정이 완료된 후 얻어지는 anisotropy tensor  $k$ 는

$$\begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{pmatrix}$$

와 같은 matrix가 되며 이는 구조지질학에서의 stress 혹은 strain tensor와 똑같은 형태이다. 이들 경우에서와 마찬가지로 여기서도  $k_{xy}=k_{yx}$ ,  $k_{xz}=k_{zx}$ ,  $k_{yz}=k_{zy}$ 의 관계가 성립한다. 이 anisotropy tensor를 사용하여 유도자기장  $\vec{H}$ 와 유도자기  $\vec{J}$ 와의 관계를 표현하면  $\vec{J}_i = k_{ij} \vec{H}_j$  ( $i, j = x, y, z$ ,  $k_{ij} = k_{ji}$ )가 된다. 모든 대자율측정작업은 시료의 磁氣 세척작업이전에 실시되었다.

앞서에서 설명한 바와같이 우리의 목적은 주대자율축과 그들의 orientation을 결정하는 것이다. 이러한 과정은 구조지질학(Ramsay 1967, Suppe 1985, 등)이나 암석역학(Jaeger 1969, Jaeger & Cook 1979, Goodman 1989, 등)에서도 널리 사용되고 있는 것으로써 그들의 용어로 표현하면 어떤 매질의 한점에 작용하고 있는 응력의 상태는 서로 직교하는 세개의 수직응력(=주응력, principal stress)으로 대치할 수 있다는 것이다. 이것은 바로 널리 알려진 Anderson(1951)의 단층분류이론의 기반을 이루고 있는 것

이다. 이들 세개의 주응력은 크기 순서에 따라  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  ( $\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$ )으로 명명된다. 이러한 주응력축은  $3 \times 3$  diagonal matrix의 대각선 요소이므로 주응력축의 크기를 결정하는 작업은 수학적으로 matrix diagonalization의 문제와 같다. 그러나 우리의 경우에는 주응력축의 크기 뿐만 아니라 방향을 함께 결정하여야 하므로 고유벡터(eigenvector)와 고유치(eigenvalue)를 구하는 문제가 된다(예를 들어서 Boas 1983, Davis 1986 참조). 여기서 고유벡터는 각 주응력축의 방향, 고유치는 주응력축의 크기를 표현하는 것이다. 자기비등방성의 경우에는 구조지질학에서와 마찬가지로 서로 직교하는 세방향에서의 대자율이 측정되면 anisotropy tensor  $k$ 가 정의되고 고유벡터와 고유치에 의하여 해당시편에 대한 자기비등방타원체(magnetic anisotropy ellipsoid)의 모양과 세 주축의 orientation이 결정되게 된다. 이들 세 주축은 각각  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 로 표시되며 이들은 각각 대자율이 가장 높은 축, 중간축, 가장 낮은 축을 뜻한다( $k_1 > k_2 > k_3$ )(Fig. 1). 이 자기비등방타원체의 형태(따라서 세축의 상대적길이)가 자기적 선구조와 엽리구조를 결정하는 척도가 된다.

#### 해석작업의 수행

각 시편들에 대해서 서로 직교하는 세방향으로 대자율이 측정되고 자기비등방타원체의 세 主軸  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 의 크기와 방향이 결정되면 Fig. 2의 계통에 따라 해석작업이 수행된다. 우선의 의도는 각 시편들에서의 자기비등방성의 존재 여부 및 비등방성 정도의 크기를 판별하여 비등방성의 정도가 낮은 시편들을 제외시키려는 것이었다. 그러나 모든 시편들이 비등방성의 정도에 관계없이 노두마다에서 서로 일치되는 훌륭한 자기적 선구조 및 엽리구조를 보여주었다. 자기비등방성의 크기와 자기적 선구조 및 엽리구조의 발달정도를 가늠하기 위하여 사용되는 공식은 여러가지가 제안되고 있다(Hrouda 1982, Tarling 1983). 본 연구에서는 일단 이를 모두를 계산하였으나 어느 공식이 가장 합리적인가에 대해서는 연구자들간에 의견이 여러가지인 형편이므로 이들 중 가장 간단한 공식을 채택하기로 하였다. 즉, 자기비등방성의 정도를 가늠하기 위하여서는 Nagata (1961)의  $A = k_1 / k_3$  를, 선구조(L) 및 엽리구조(F)를 판단하는 기준으로써는 Balsley & Buddington(1958, 1960)의  $L = k_1 / k_2$ , 그리고 Stacey et al.(1960, 1961)의  $F = k_2 / k_3$ 을 이용하였다. 이들 공식은 Collinson(1983)과 Sharma(1986)에서도 인용되고 있는 것이다.

이와 같이 각 시편에 대하여  $A$ ,  $L$ ,  $F$ 가 계산된 후에는

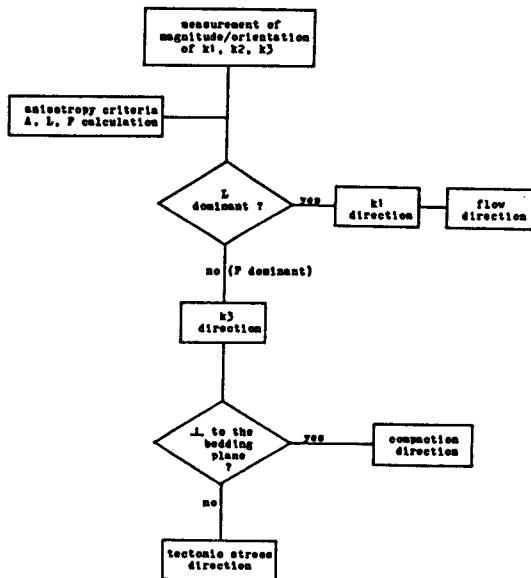


Fig. 2. Flow chart showing the working procedure. See text for more details.

자기적 선구조와 엽리구조중 어느것이 우세한지를 알아내기위하여 각 노두별로 구조지질학에서 이용되고 있는 Flinn diagram(Zingg 1935, Flinn 1962)과 유사한 diagram을 작성하였다(Fig. 3, 4, 5, 6). 이로부터 그 노두의 자기비동방성이 선구조적이라는 판정이 내리면  $k_1$ 방향이 흐름방향을 지시한다고 해석할 수 있다. 이에 반하여 만약 해당 노두의 자기비동방성이 엽리구조적이라는 판정이 내리면 이 구조는 지층이 형성될 당시의 수직하중에 의한 것이거나 혹은 보다 후의 지구조적인 응력의 작용에 의한 것으로 해석된다. 이 양자에 대한 판단은  $k_3$  방향이 지층면에 수직한지의 여부에 의하여 결정될 수 있다.

### 연구지역에의 적용

#### 층리면의 식별과 확인(=load foliation)

우선 본 연구의 기본가정이 올바른지를 검토해보는 것이 중요하다. 앞서에서 설명한 바와같이 본 연구에서의 기본 아이디어는 지층이 생성되기 시작한 이후 중력을 제외하고는 아무런 외력의 영향을 받지않는 경우에는 지층의 하중으로 인하여 층리면에 평행하게 자기적 엽리구조(=load foliation)가 생겨나며  $k_3$ 가 층리면에 수직으로 나타나게 된다는 것이다, 이에 반하여 지층이 생성될 당시에 지층구성

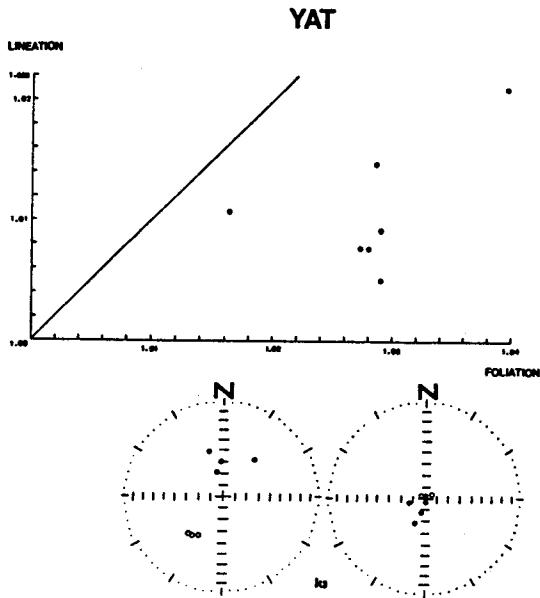


Fig. 3. A typical example of load foliation. The rock samples are andesitic tuffs from Yakjön near Pohang city. Lineation is calculated according to the formula  $L = k_1/k_2$  and foliation according to  $F = k_2/k_3$ . Lower left(lower right) equal area projection represents  $k_3$  directions of individual sample before(after) bedding correction. Black(white) dots represent positive (negative) inclination. Note that the  $k_3$  directions are nearly vertical to the bedding plane after the bedding correction.

물질에서 현저한 흐름운동이 있었거나 지층이 쌓인 후에 하중보다도 강력한 지구조적 응력(tectonic stress)이 작용하게 된다면 흐름방향에 평행한 자기적인 선구조가 형성되거나 앞서의  $k_3$ 방향과 층리면이 상호수직이라는 관계가 무너지게 된다는 것이다.

이러한 기본 아이디어의 타당성을 검토하기 위하여 지층면의 발달 및 인식이 확실한 노두에서 채취된 시편들에서의  $k_3$ 방향을 Schmidt stereonet에 plot하였다. Fig. 3은 그 대표적인 예를 보여주는 것으로써 채취노두는 포항부근 약전의 안산암질 용회암이다. Fig. 3의 윗 그림은 Flinn diagram으로써 7개의 시편들 모두에서 엽리구조가 우세함을 보여주고 있다. 아래의 stereonet들은 이들의  $k_3$ 방향을 표시한 것으로써 좌측의 것은 각 시편들이 노두현장에 놓여있는 상태 그대로(in situ)의 방향을 보여주고 있으며 우측의 것은 현재 기울어진 상태인 지층을 원래의 수평상태로 복원한 후의 상황, 다시 말해서 지층경사보정(bedding

correction)을 실시한 후의 상태를 표현하고 있다. 우측의 streonet에 나타난 바와 같이 각 시편들의  $k_3$ 방향은 지층면과 수직을 이루고 있는데 이는 본 연구의 기본 가정이 옳다는 것을 말해주는 것이다. 한편  $k_1$ 과  $k_2$ 는 예상과 일치하게(Fig. 1C) 공히 거의 수평의 복각을 가지면서 서로 구분 할 수 없게 random으로 뒤섞인 분산된 방위각을 보여주었다.

본 연구의 대상이었던 23개소의 지점 중 약 절반인 11개의 지점에서 이와 같이 지층하중에의 층리면에 평행한 염리구조가 나타났다. 이를 중 한개소에서의 암질은 용결 응회암이었으며 나머지 곳에서의 암질은 현무암질 혹은 용회질암이었다.

#### 지구조적 응력의 작용방향(Tectonic foliation)

자기적 염리구조가 우세한 지역들 중 몇 곳에서는 이 염리구조가 지층면에 평행하지 않고 오히려 지층면에 수직에

가깝게 나타나고 있었다(=tectonic foliation). 이들 지역에서는 지층하중을 암도하는 지구조적 응력이 작용했던 것으로 해석되며 이러한 응력의 작용방향은  $k_3$ 방향으로부터 알아낼 수 있다.

Fig. 4는 이들 지역중 구룡포읍 부근의 현무암질 관입암의 예를 보이는 것이다. 이 관입암체는 지층경동이 거의 없고, 층리발달이 양호한 퇴적층을 관입하고 있는데 거의 수평의 주상절리를 보이고 있었다. Fig. 4에 나타나고 있는 바와같이 7개의 모든 시편들은 우세한 염리구조를 보이고 있으며  $k_3$ 방향이 경사보정여부에 관계없이 거의 수평으로 NS방향이다.

Fig. 5는 층리발달이 대단히 양호한 와읍리 부근의 역질 응회암으로 부터의 결과이다. 이 경우에서는 9개의 시편 중 8개가 우세한 염리구조를 보이고 있으며 응력의 작용방향은 낮은 경사로 WNW-ESE방향임이 나타나고 있다.

총 23개의 연구지점중 이와같은 지구조적 응력에 의한

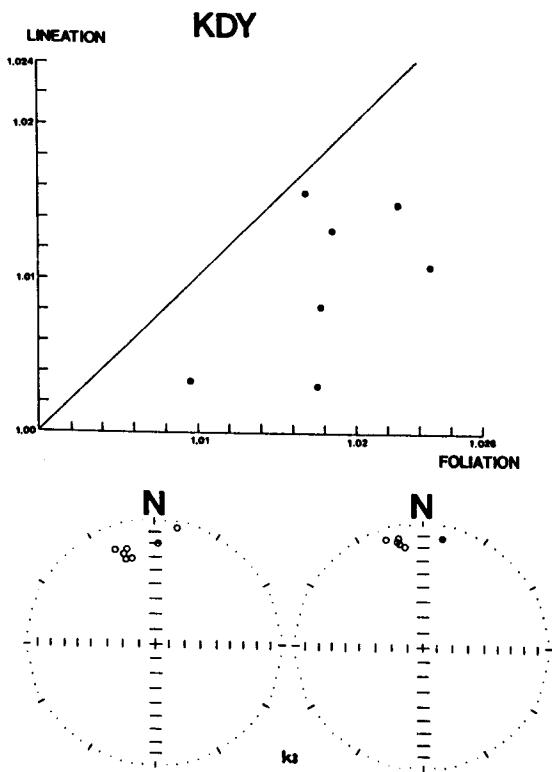


Fig. 4. A typical example of tectonic foliation caused by N-S stress. Basaltic dyke near Kuryongpo. All conventions are the same as in Fig. 3. Note the nearly horizontal  $k_3$  directions after the bedding correction.

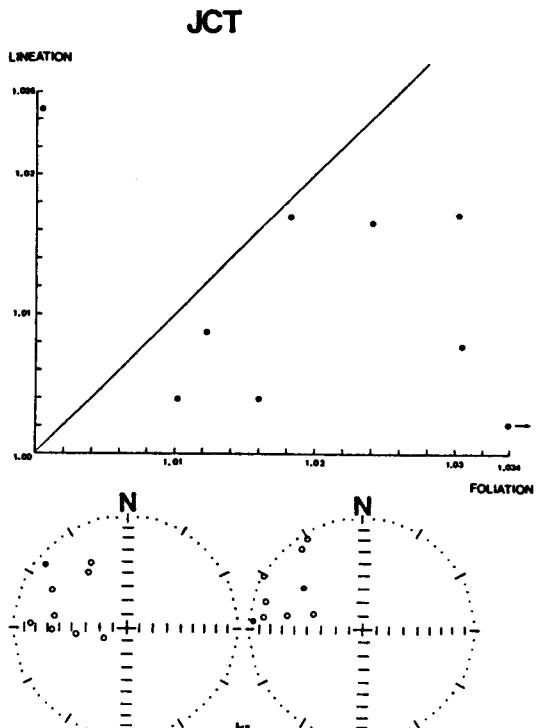


Fig. 5. A typical example of tectonic foliation caused by WNW-ESE stress. Conglomeratic tuffs from Jitong near Waupri. All conventions are the same as in the previous Figures. The  $k_3$  directions make low angle with the bedding plane.

엽리구조가 나타난 곳은 8개지점이다. 이들 지점에서 나타난 응력의 작용방향은 위에서 예시한 NS 또는 WNW-ESE 방향 양자중 하나에 속하고 있었으며 응력의 작용각도는 수평내지 최고 약 30°사이의 저경사이였다. 이들 8개소중 3개소의 암질은 현무암이었으며 나머지 4개소는 옹회암, 또 다른 1개소는 용결옹회암이었다(Tab. 1).

#### 흐름구조의 방향(Flow lineation)

자기적인 선구조가 나타나는 지역에서는 암석생성시 용암이나 화산재의 심한 흐름이 있었던 것으로 해석되어 이에 따라서  $k_1$ 방향이 이들 흐름의 방향과 일치하게 (=flow lineation) 형성된다. Fig. 6은 이러한 장소의 한 예를 나타내

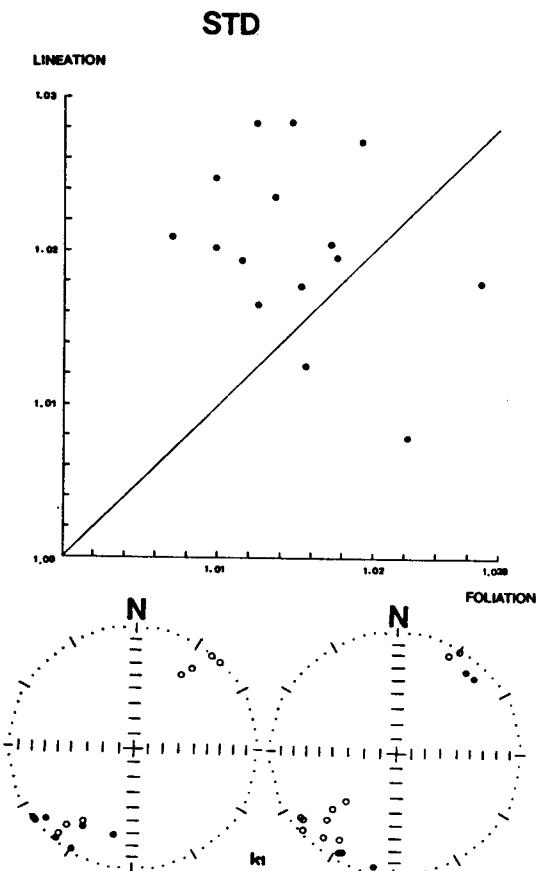


Fig. 6. A typical example of flow lineation. Acidic tuffs from Suküp in Yangnam. All conventions are the same as in the previous Figures except that the equal area projections represent  $k_1$  directions. The  $k_1$  directions are nearly parallel to the bedding plane.

는 그림으로써 양남면 석읍국민학교부근의 옹회암층의 예이다. Flinn diagram에서 볼 수 있는 바와 같이 15개의 시편 중 12개에서 선구조가 우세하게 나타나고 있다. Stereonet에 나타난 바와 같이 이 흐름의 방향은 거의 수평의 낮은 복각으로 NE-SW방향을 이루고 있다.

총 23개의 연구지점중에서 4개지점에서 이러한 선구조가 판별되었다(Tab. 1). Fig. 1B에 예시된 바를 따를 때 이론상 선구조가 발달된 노두에서는  $k_2$  방향과  $k_3$  방향이 서로 구분되지 않으며 또한 이들은  $k_1$  방향에 수직한 평면상에서 random의 방향각을 가지며 분포하게 된다. 실제로 선구조가 판별된 4개의 지점중 세곳에서는  $k_2$ ,  $k_3$ 방향이 이러한 산란된 분포를 보였다. 그러나 예시한 석읍옹회암의 경우에서는  $k_3$ 방향들이 WNW-ESE방향으로 집중된 엽리구조를 동시에 보이고 있었다. 또한 앞서의 엽리구조들에서의 예와는 달리 선구조를 보이는 노두들의 Flinn diagram에서는 상당한 비율의 시편들이 엽리구조영역에도 plot되고 있었다. 따라서 선구조의 발달은 엽리구조의 경우에 비교하여 보다 덜 뚜렷하며 덜 배타적이라고 표현하고자 한다. 한편 선구조방향과 잔류자기방향사이에는 아무런 상관관계가 발견되지 않았다.

#### 결과 및 토론

이상의 연구결과들은 Tab. 1과 Fig. 7에 종합정리되어 있다. 본 연구를 통하여 총 23개소의 연구지점 중 11개의 지점에서 지충하중에 의한 엽리구조(load foliation)를 판별해 내었으며 8개의 지점에서 지구조적 응력에 의한 엽리구조(tectonic foliation)를, 4개의 지점에서 흐름에 의한 선구조(flow lineation)를 판별해 내었다. 후자의 두 경우에 대해서는 그들의 평균방향값을 Tab. 1에 정리하였다. 이를 평균방향은 Fisher(1953)의 구면통계학적 계산법에 의한 것이다. 자기비등방성을 초래하기 위한 자성광물의 정렬효과는 잔류자기 vector의 경우에서 보다 비효율적이기 때문에 각 평균방향들이 보다 큰 편차값( $\alpha_{gg}$ )을 보이고 있다. 그러나 자기구조 특히 엽리구조의 평균방향들은 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 전 연구지역에 걸쳐서 일관성 있는 (internally consistent) 방향을 보이고 있다. 이는 연구지역이 연일분지, 장기분지, 어일분지, 하서분지등의 작은 여러분지들과 기반암노출지역등으로 조작조각 구성되어 있으나 작용하는 지구조적 응력의 패턴은 공통적이고 단순하다는 것을 말해준다. 또한 이러한 일치성은 앞서에서도 논의한 바 있는 시편형태에 의한 비등방성효과가 문제되지 않

Table. 1. Summary and Fisher(1953) statistics of the study results.

## 1) Tectonic foliation

Stratigraphic unit	Sample locality	Lithology	Number of Samples	Mean $k_3$ direction					
				before D( $^{\circ}$ )	bedding I( $^{\circ}$ )	correction $\alpha_{95}(^{\circ})$	after D( $^{\circ}$ )	bedding I( $^{\circ}$ )	correction $\alpha_{95}(^{\circ})$
Yönil basalt	SUB	basalt	12	359.6	8.3	20.1	1.3	11.8	20.1
	KDY	basalt	7	349.5	-21.6	10.8	353.0	-8.8	10.8
	YAB	basalt	10	296.4	22.8	13.1	301.0	31.0	13.1
Pömgokri Group	JCT	congr.tuff	9	290.9	-36.3	21.2	295.7	-10.4	21.2
Changgi Group	STD	acidic tuff	14	310.0	6.3	12.9	305.7	22.9	12.9
Hasöri Group	HOT	andes.tuff	7	312.1	37.5	19.0	316.6	1.3	19.0
Tertiary basement rocks	YTD	welded tuff	5	318.5	33.2	35.0	358.1	32.9	35.0
	KAT	andes.tuff	4	273.6	-16.0	13.0	311.9	-50.3	12.8

## 2) Flow lineation

Stratigraphic unit	Sample locality	Lithology	Number of Samples	Mean $k_1$ direction					
				before D( $^{\circ}$ )	bedding I( $^{\circ}$ )	correction $\alpha_{95}(^{\circ})$	after D( $^{\circ}$ )	bedding I( $^{\circ}$ )	correction $\alpha_{95}(^{\circ})$
Yönil basalt	IAB	basalt	8	1.3	-87.2	44.6	314.7	18.5	28.6
Pömgokri Group	JGT	acidic tuff	2	267.3	78.7	-	331.4	12.5	-
	JAT	acidic tuff	9	298.2	63.6	11.9	324.6	6.2	11.9
Changgi Group	STD	acidic tuff	15	36.8	-6.7	9.4	37.3	9.7	9.4

음을 말해주는 것이며 나아가서 본 연구에서의 기본가정이 정당하다는 것을 뜻하는 것이다.

본 연구에서의 기본가정은 흐름운동이나 압력작용으로 자성광물이 정렬되어 선구조나 염리구조가 생겨난다는 것 이었는데 이러한 자기적구조가 발생되기 위하여서는 일차적으로 암석을 구성하는 자성광물자체가 형태비등방성을 가져야 한다. 이러한 형태비등방성은 대자율이 높은 titanomagnetite계열광물들의 경우에서만이 현저하며 적철석이나 자류철석의 경우에는 무시될 정도에 불과하다(Collinson 1983). 따라서 자기비등방성연구는 주로 titanomagnetite계열광물들을 주 자성광물로 하는 암석의 경우에 효과적일 수 있다. 다른 광물들의 경우에는 그 형태가 결정축과 긴밀한 관계를 가지며 생성되어있어야 한다. 이미 보고된 이 지역 암석에 대한 고자기학적 연구결과(김인수, 강희철, 1989)에 의하면 이 지역 암석들은 titanomagnetite계열광물을 주 자성광물로 하고 있다.

정렬구조가 생겨나기 위한 다음의 문제는 이러한 광물입자들의 회전 운동이다. 이러한 회전운동의 크기는 얼마나 되며 이를 위한 지구조적 용력(tectonic force)의 크기는 충분한 것일까? Fig. 1A와 같이 무질서한 배열을 가진 광물입자들이 Fig. 1C와 같이 배열되는 데는 최고 90°의 회전운동이 요구된다. 그러나 자기적 염리구조를 지시하는 F값의 최고치가 1.04정도임을 염두에 둘 때 회전운동량의 상한선

은 결국 약 4°미만이다. 이러한 정도의 회전운동은 앞서에서 인용한 100기압(10MPa)정도의 지구조적 용력으로써 충분히 야기될 수 있는 것이다. 나아가서 같은 염리구조의 형성시기가 암석의 생성후 완전고화가 이루어지기 이전이라면 자성광물들의 회전운동은 보다 쉽게 이루어질 수 있다. Tab. 1의 평균  $k_3$ 방향들은 지층경사를 보정하여 원래의 수평위치로 복원시켰을 때 더욱 서로 잘 일치된다. 따라서 이 지역의 자기적 염리구조(tectonic foliation)들은 지층이 생성되고 경동운동이 일어나기 이전에 이루어진 것으로 해석된다. 아마도 이러한 염리구조는 지층의 고화가 완료되기 이전에 형성되었을 것이다. 한편 자기적 선구조(Flow lineation)들은 지층의 생성과 동시에 형성되었음을 두말 할 필요가 없다. 따라서 본 연구지역에서의 지구조적 용력의 방향을 논의하기 위하여서는 모든 지층들을 원래의 수평위치로 복원시키고 그러한 상태에서의  $k_3$  및  $k_1$  방향을 선택하여야 할 것이다. Fig. 7은 바로 그렇게 도시된 것이다.

Fig. 7에 도시된 지구조적 용력의 방향은 두개의 그룹으로 나타나고 있다. 하나는 해안선에 가깝게 저경사의 N-S 방향의 압축력으로 나타나고 있으며 다른 하나는 보다 내륙쪽에서 역시 비교적 낮은 경사를 가지며 WNW-ESE방향의 압축력으로 나타나고 있다. 여기서 필자는 전자인 수평 N-S압축력이 동해의 남북확장운동에 의하여서 포항분지를 비롯한 한반도 제 3기분지 以東의 동해해양지각이 수평으

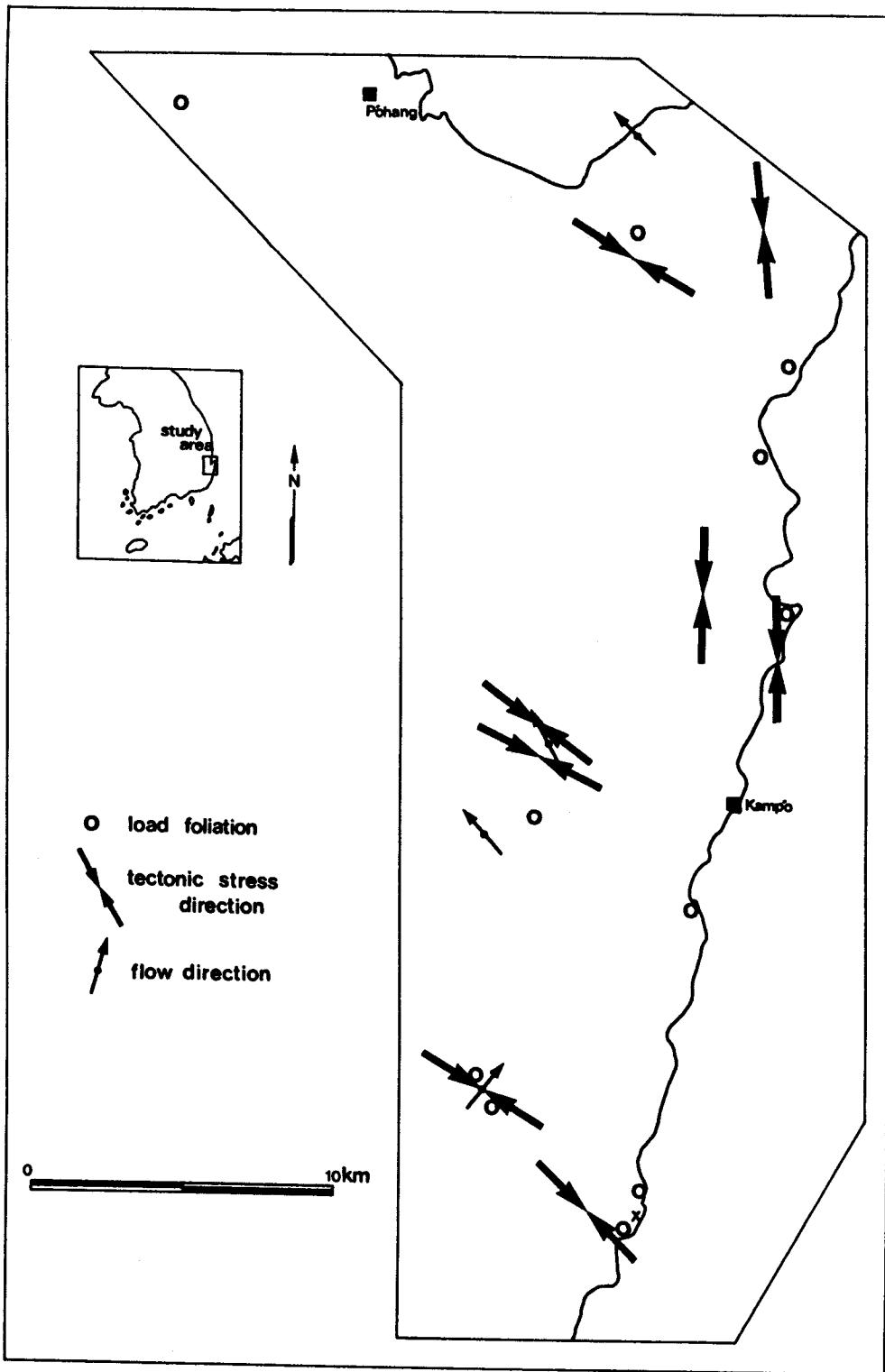


Fig. 7. Results of the study.

Thin arrow head indicates down-dip direction of magnetic flow lineation. One sample locality represented by cross mark showed no consistent anisotropy fabric.

로 남으로(동해전역을 포함하는 광범위한 시각으로는 보다 남동방향으로) 이동되는데 기인한 것으로 해석하고자 한다. 이러한 해석에 대한 자세한 근거는 본 보고의 한정된 지면으로써는 다루기 어려우므로 별도로 제시하기 위하여 접필중에 있다. 그러나 이에 대한 기본적 아이디어는 앞서에 발표된 바 있으며(김인수 1985)이 지역에서의 고자기학적 연구결과들(Kim, K.H. et al. 1986, Ling et al. 1988, 김인수. 강희철 1989, 등)은 이를 뒷받침하고 있다. 이러한 동해지각의 남향이동은 포항분지를 비롯한 여러 제 3기분지들을 pull-apart basin으로 열리게 하였으며 양산-울산단층계의 우향주향이동(dextral strike-slip)을 초래하였다. 이동우·박봉순(1982), 이동우(1983)는 포항분지에서의 절리계연구를 통하여 이 지역에서의 수직운동영향은 미약한 반면 주향이동성운동이 주도적이었으며 이는 양산 및 동해안 대단층의 형성과 유관한 것으로 결론지었다. 이는 본 연구에서 나타난 거의 지층면에 평행한 수평 N-S의  $k_3$ 방향이 의미하는 바와 일치되는 것이다. 본 연구지역내의 야외에서도 실제로 이러한 남북방향의 압축력에 의한 역단층 내지 소규모 thrust구조가 관찰되는데 유명한 금광동세일의 노출지역과, 영일군 동해면 중홍동 912도로변 그리고 포항-구룡포간 31번도로 희날재부근의 예를 들 수 있다. 이곳에서의 단층면 주향들은 대체로 동서방향으로써 이들 구조가 남북방향으로 작용하는 압축력의 산물임을 보이고 있다.

Fig. 7에 나타난 WNW-ESE방향의 압축력은 N-S방향의 압축력과 위치적으로 구별되어 나타나고 있다. 그러나 층서상으로 볼 때는 후자가 나타나는 지층에서 전자도 함께 나타나고 있으므로(Tab. 1)이 두 응력이 작용했던 시기는 거의 중첩적인 것으로 보인다. 동해지각이 남으로 이동하는 효과는 연구지역 북부의 해안근처에서 보다 우세하게 나타나고 있으나 연구지역 남부내륙쪽에서는 WNW-ESE 압축력의 효과가 보다 압도적으로 표현되었다. 대국적으로 볼 때 본 제 3기분지 즉 동해연안의 한반도 동남부는 이 두 방향의 응력장영향에 있었다. 따라서 제 3기분지들이 열리면서 여기에 퇴적된 지층들은 총체적으로 대략 북서방향에서 오는 압축력을 받았으며 이로부터 경동된 지층들은 야외에서 관찰되는 바와 같이 북동의 주향을 가지고 있다. 이러한 두 방향 응력의 작용하에서 양산-울산단층계는 단순한 우향주향이동운동에 그치지 않고 transpression을 받은 주향이동 단층으로써 작용하였다. 일반적으로 이같은 지역에서는 국지적이나 광역적인 지괴의 승강운동, 습곡, thrust, nappe 현상 또는 국지적 부정합 등이 나타날 수 있

다(Dennis 1972, Reading 1980, Maill 1984). 이러한 현상들이 잘못 해석되면 수직운동이 우세한 dip-slip지역으로 오해되는 수가 있다. 실제로 김종열(1988)은 양산단층지역에서의 야외관찰을 통하여 지괴의 승강, 단층선에 접근할 수록 경사가 급해지는 지층의 습곡구조, thrust성의 곡면단층 등을 기재한 바 있다. 이들 모든 구조들은 양산단층이 transpressional 주향이동단층임을 보이고 있는 것이다. 특히 그가 관찰한 후자의 두 구조는 transpression을 받은 주향이동 단층지역에서 전형적으로 나타나는 flower structure(일명 palm-tree structure)(Lowell 1972, Sheriff & Geldart 1983, Bibble & Christie-Blick 1985, Ramsay & Huber, 1987, Lemiszki & Brown 1988)인 것으로 해석이 된다. 그러나 그는 상기와 같은 구조들의 관찰로부터 양산단층지대가 주로 지괴의 승강운동에 의하여 지배되었던 소위 모자이크형 block faulting지대라고 결론지었다.

본 연구를 통하여 드러난 N-S방향의 압축력은 동해의 남북확장을 표현하는 반면 WNW-ESE방향의 압축력은 대한해협과 Tsushima해협을 가로지르며 압축하는 힘을 표현하는 것이다. Ito & Tokieda(1986)는 남서 Honshu 와 북 Kyushu에서 관찰되는 약  $50^{\circ}$ ~ $76^{\circ}$ 시계방향으로 편기된 백악기 말 내지 Paleogene 암석들의 잔류자기방향이 WNW-ESE방향으로 작용하는 수평압축력에 의하여 설명된다고 주장하였다. Minami(1979)는 Sanin-Tsushima 해역의 석유시추 및 탄성파탐사자료를 통하여 중기 Miocene까지의 퇴적층이 NNE방향의 습곡축을 가지며 습곡되어 있으며 Tsushima섬의 西邊해역에서는 Taishu group지층들이 NNE주향을 가지면서 한반도쪽으로 thrust되어 있음을 밝혔다. 이러한 구조들은 중기 Miocene말 내지 후기 Miocene초에 WNW-ESE방향으로 작용했던 압축력에 의한 것이다. 한반도 울진-포항분지 해역에 대한 Huntect Ltd. (1968)의 탄성파탐사자료에 의하면 이 지역의 Miocene으로 추정되는 2,000m/sec의 지층도 동시기의 압력에 의하여 습곡 및 역단층작용을 받았다. Chough & Barg(1987)은 Miocene초기-중기동안 침강하던 울릉분지의 남쪽해역이 Miocene말 경에는 대략 NW방향의 압축력을 받아 상승하게 되었음을 보였다. 이러한 방향의 압축력은 오늘날에도 그 잔력이 남아서 작용하고 있는 것 같다. Inoue (1960)는 1883-1908년 사이 및 1948-1958년 사이의 측지자료를 이용하여 북 Kyushu, Sanin, Tsushima 지역에서의 삼각측량점의 수평이동방향이 대략 NW방향이라는 결론을 내렸다. 또한 Lensen(1960)은 지진과 단층면 해석법(fault plane solution)과 활성단층이동방향의 연구를 통하여 상기 일본지역과 한

반도 남부지역의 주 수평압축력의 축 방향이 대략 WNW-ESE방향임을 제시한 바 있다. 이들 여러 독립적인 연구결과들을 본 연구에서 나타난 WNW-ESE방향의 압축력과 잘 일치하고 있다. Fig. 7에서 이들 압축력이 연구 지역남부의 대한해협 가까이에서 나타나고 있음을 우연한 일이 아닐 것이다.

## 요약 및 결론

포항-울산간 제 3기분지내의 23개소로부터 총 213의 시료를 채취하여 암석의 대자율 비등성을 연구하였다. 채취된 시료들을 암종별로 구분하면 75개는 현무암질암, 137는 응회질암, 1개는 퇴적암이다. 이들 중 11개소에서는 하중에 의한 지층면에 평행한 자기적 엽리구조(magnetic load foliation)가 나타났으며 4개소에서는 지층생성당시 용암이나 화산재의 흐름현상에 의한 자기적 선구조(magnetic flow lineation)가 드러났다. 한편 나머지 8개로소부터는 지층면에 거의 수직한 자기적 엽리구조(magnetic tectonic foliation)가 판별되었는데 이로부터 이러한 엽리구조를 야기시킨 지구조적 응력(tectonic force)의 작용방향을 구하였다. 이들 응력의 작용방향은 연구지역의 북부 해안지역에서는 NS방향, 남부의 보다 내륙지역에서는 WNW-ESE방향의 방위각을 가지며 모두가 거의 수평인 압축력으로 나타나고 있다. 이들 중 전자는 동해의 남북화장으로부터 야기된 우향전단력(dextral shear)을 표현하는 것이며 후자는 중기 Miocene 말 내지 후기 Miocene 초 동안 대한해협 및 Tsushima 해협에서 해저지층을 습곡시키고 thrust 시켰던 WNW-ESE방향의 압축력을 표현하는 것으로 파악된다.

본 연구의 또 하나의 다른 의의는 암석의 자기비등방성 연구가 지구조운동을 야기시킨 과거의 응력장을 알아내는 신속하고 간편한 새로운 수단으로써 활용될 수 있음을 보인데이 있다. 이러한 연구의 성공가능성은 연구대상암석을 구성하는 자성광물이 강한 형태비등방성을 지닌 티탄자철석 계열의 광물(titanomagnetites)인 경우에 높아진다.

또한 지구조적 응력에 의한 자성광물의 정렬은 암석의 고화가 완료되기 이전에 효과적으로 이루어질 수 있으므로 자기비등방성구조의 형성연령은 해당암석의 연령과 거의 일치한다. 따라서 본 연구에서 드러난 지구조적 응력의 방향은 지층의 형성시기인 Eocene내지 Miocene동안의 상황을 반영하고 있는 것이다. 연구대상지역과 남서일본 그리고 이들사이의 해저부터의 여러가지 지질학적 지식들을 고려한다면 NS방향의 압축력은 중기 Miocene이전의 상황을

그리고 WNW-ESE 방향의 압축력은 중기 Miocene이후의 상황을 나타내는 것으로 해석된다.

## 사사

본 연구의 기초는 한국과학재단의 1988년도 기초일반연구지원(관리번호 881-0502-004-1)으로부터 이루어 졌으며 이에 후속되어 부산대학교 지질학과에 지급된 1989년도 문교부 기초과학육성연구비의 지원에 의하여 연구가 완성되었다. 야외조사와 시료채취를 위하여 부산대학교 지질학과의 신종주군을 비롯하여 임진경, 김재화, 이해정 등 여러 학생들이 적극적으로 협력해주었다. 필자는 한국과학재단과 문교부 그리고 이들 학생들에게 심심한 사의를 표하는 바이며 특히 끝까지 자료처리와 제도를 위하여 성심을 다해준 임진경양에게는 깊은 감사를 보낸다

## 참고문헌

- 김인수(1985) 한반도 및 동아시아의 지질구조발달과 판구조이론(II) : 한반도의 지체구조발달과 동해의 형성. 자연과학논문집, 제 40집, 부산대학교, 311-325.
- 김인수. 강희철(1989) 어일분지일대에 분포하는 제 3기층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25, 273-293.
- 김종열(1989) 양산단층의 산상 및 운동사에 관한 연구. 부산대학교 이학박사학위논문.
- 이동우. 박봉순(1982) 포항분지의 고응력장. 지질학회지, 18, 238.
- 이동우(1983) 포항분지의 절리계와 고응력장의 해석. 고려대학교 이학석사학위논문.
- Anderson, E. M. (1951) The Dynamics of Faulting. Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Balsley, J. R. & Buddington, A. F. (1958) Iron-titanium oxide minerals, rocks and areo-magnetic anomalies of the Adirondack area, New York. Econ. Geol., 53, 777-805.
- Balsley, J. R. & Buddington, A. F. (1960) Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. Amer. J. Sci., 258A, 6-20.
- Biddle, K. T. & Christie-Blick, N. (1985) Glossary-Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. In: Biddle, K. T. & Christie-Blick, N., Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Spec. Publ., 37, 375-386.
- Boas, M. L. (1983) Mathematical Methods in the Physical Sciences, 2nd ed. John Wiley & Sons.
- Chough, S. K. & Barg, E. (1987) Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea(Sea of Japan). Geology, 15, 45-48.

- Collinson, D. W. (1975) Instruments and techniques in paleomagnetism and rock magnetism. *Rew. Geophys. Space Phys.*, 13, 659-686.
- Collinson, D. W. (1983) Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism. Chapman & Hall.
- Davis, J. C. (1986) Statistics and Data Analysis in Geology, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- Dennis, J. G. (1972) Structural Geology. Ronald Press, New York.
- Fisher, R. A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London*. A217, 295-305.
- Flinn, D. (1962) On folding during three-dimensional progressive deformation. *Quart. J. geol. Soc. London*, 118, 385-433.
- Goodman, R. E. (1989) Introduction to Rock Mechanics, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- Hrouda, F. (1982) Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, 5, 37-82.
- Huntec Ltd. (1968) Report on the offshore geophysical survey in the Pohang area, Republic of Korea. ESCAP / CCOP Tech. Bull., 1, 1-12.
- Inoue, E. (1960) Land deformation in Japan. *Surv. Inst. (Japan)* Bull., 6, 73-134.
- Ito, H. & Tokieda, K. (1986) Tilting movements of the Japanese Islands inferred from Cretaceous and early Tertiary paleomagnetic data. *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 361-386.
- Jaeger, J. C. (1969) Elasticity, Fracture and Flow, 3rd ed. Chapman & Hall.
- Jaeger, J. C. & Cook, N. G. W. (1979) Fundamentals of Rock Mechanics, 3rd ed., Chapman & Hall.
- Kim, K. H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. & Lee, M. W. (1986) Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks from Guryongpo area, Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, 19, 231-237.
- Lemiszki, P. J. & Brown, L. D. (1988) Variable crustal structure of strike-slip fault zones as observed on deep seismic reflection profiles. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 665-676.
- Lensen, G. J. (1960) Principal horizontal directions as an aid to the study of crustal deformation. *Publ. Dom. Obs. Ottawa*, 24, 389-397.
- Ling, H. Y., Ingle, J. C. & Kim, B. K. (1988) Miocene siliceous biostratigraphy and magnetostratigraphy from the Pohang area, Korea. *J. Paleont. Soc. Korea*, 4, 1-5.
- Lowell, J. D. (1972) Spitzbergen Tertiary orogenic belt and the Spitzbergen fracture zone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 3091-3102.
- Miall, A. D. (1984) Principles of Sedimentary Basin Analysis. Springer-Verlag.
- Minami, A. (1975) Distribution and characteristics of the sedimentary basin offshore San-in to Tsushima island. *J. Japanese Ass. Petrol. Tech.*, 44, 321-328.
- Nagata, T. (1961) Rock Magnetism, 2nd ed., Maruzen, Tokyo.
- Noltimier, H. C. (1971) Determining magnetic anisotropy of rocks with a spinner magnetometer giving in-phase and quadrature data output. *J. Geophys. Res.*, 76, 4849-4854.
- Ramsay, J. G. (1967) Folding and Fracturing of Rocks. McGraw-Hill.
- Ramsay, J. G. & Huber, M. I. (1983) The Techniques of Modern Structural Geology. Vol. 1: Strain Analysis. Academic.
- Ramsay, J. G. & Huber, M. I. (1987) The Techniques of Modern Structural Geology. Vol 2: Folds and Fractures. Academic.
- Reading, H. G. (1980) Characteristics and recognition of strike-slip fault systems. *Spec. Publ. int. Ass. Sediment.*, 4, 7-26.
- Sander, B. (1930) Gefügekunde der Gesteine. Springer, Berlin, Vienna.
- Sander, B. (1948) Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper, Pt. I. Springer, Berlin, Vienna.
- Sander, B. (1950) Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper, Pt. II. Springer, Berlin, Vienna.
- Scriba, H. & Heller, F. (1978) Measurements of anisotropy of magnetic susceptibility using inductive magnetometers. *J. Geophys.*, 44, 341-352.
- Sharma, P. V. (1965) On the point dipole representation of a uniformly magnetized cylinder. *Helv. Phys. Acta*, 38, 234-240.
- Sharma, P. V. (1968) Choice of configuration for measurement of magnetic moment of rock specimen with a fluxgate unit. *Geoexploration*, 6, 101-108.
- Sharma, P. V. (1986) Geophysical Methods in Geology, 2nd ed. Elsevier.
- Sheriff, R. E. & Geldart, L. P. (1983) Exploration Seismology, Vol. 2: Data-processing and Interpretation. Cambridge Univ. Press.
- Stacey, F. D., Joplin, G. & Lindsay, J. (1960) Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from S. E. Australia. *Geofiz. Pura Appl.*, 47, 30-40.
- Stacey, F. d. Lovering, J. F. & Parry, L. G. (1961) Thermo-magnetic properties, natural magnetic moments, and magnetic anisotropies of some chondritic meteorites. *J. Geophys. Res.*, 96, 1523-1534.
- Stacey, F. D. & Banerjee, S. K. (1974) The Physical Principles of Rock Magnetism. Elsevier.
- Suppe, J. (1985) Principles of Structural Geology. Prentice-Hall.
- Tarling, D. H. (1983) Palaeomagnetism: Principles and Applica-

- tions in Geology, Geophysics and Archaeology. Chapman & Hall.
- Tateiwa, I. (1924) Geological Atlas of Chosen, No. 2. Ennichi(Yō-ni), Kyuryuho(Kurongp'o) and Choyo(Kamp'o) sheets. Geol. Surv. Chosen(Korea).
- Turcotte, D. L. & Schubert, G. (1982) Geodynamics : Application of Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley & Sons.
- Turner, F. J. & Weiss, L. E. (1963) Structural Analysis of Metamorphic Tectonites. McGraw-Hill.
- Zingg, T. (1935) Beitrag zur Schotteranalyse. Schweiz. Min. Petro. Mitt., 15, 39-140.