

옥천대에 대한 고자기 연구 : 태백지역에서의 태자율 비등방성과 지구조적 응력장

김성욱* · 최은경* · 정연규* · 김인수*

Palaeomagnetic Results from the Okchon Belt : Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and Tectonic Stress Field in the Taebaek Area

Sung-Wook Kim*, Eun-Kyeong Choi*, Yeon-Kyu Jung* and In-Soo Kim*

ABSTRACT : A study of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) was conducted on the Ordovician-Eocene strata in the Taebaek area. The study area is a northeastern part of the Okchon belt, sometimes called as Paegunsan Synclinal Area. A total of 600 independently oriented samples were collected from 60 sites covering the whole area. With a few exception of late Cretaceous-Eocene volcanic rocks, all the sampled strata are nonmetamorphosed sedimentary rocks, mainly sandstones. Among the 60 sites, 5 sites showed flow lineation lying on the bedding plane, 11 sites showed load foliation parallel to the bedding plane, and 21 sites showed tectonic foliation unrelated to the bedding plane. The tectonic foliations are defined by k_1 - k_2 (k_{max} - k_{int}) anisotropy plane, and are considered as a result of tectonic forces acted perpendicularly to the foliation plane in the geologic past. Regardless of sample-site locations, tectonic force directions defined by k_3 (k_{min}) axis perpendicular to the tectonic foliation are consistent among the strata of the same geologic age. In the course of geologic time, however, the tectonic force directions showed a clockwise rotation: approximately E-W in the Ordovician sites, NW-SE in the Permian sites, N-S in the Triassic sites, and lastly NE-SW in the late Cretaceous-Eocene sites. The pre-Permian directions showed better clustering in the in-situ (geographic) coordinates, while the younger directions become better clustered after the bedding-tilt correction. It is interpreted that the major tectonic structures of the Taebaek area were controlled by the above-mentioned tectonic forces: The Paegunsan Syncline and the Hambaeksan Fault must have been generated by the NW-SE force of late Permian-early Triassic time. It was then reactivated in the reverse (dextral) sense by the N-S force of Triassic time. The Osipchon Fault in the eastern part of the study area was either generated or reactivated by the NE-SW force of late Cretaceous-Eocene time. The Permo-Triassic NW-SE force should be an expression of the Songnim Disturbance in the Korean peninsula, which is in turn related with the SCB/NCB collision in China.

서론

어느 지역에서 古應力場의 분포상태를 파악하는 것은 지질구조 요소들의 成因과 그들의 시간적 先後關係를 규명하는 전형적인 연구방법이다. 그 중에서 암석의 磁氣의 성질, 즉 암석의 帶磁率 非等方性 (AMS: anisotropy of magnetic susceptibility)의 연구는 磁氣의 線構造나 葉理構造를 인식해내고 이로부터 古水流의 방향이나 高應력장의 작용방향을 알아내며, 또한 그들 응력의 시대적 先後關係를 구분해내는 간편하고도 효과적인 방법 중의 하나

이다 (Hrouda, 1982; 김인수, 1990; 도성재, 1991; 이준동 등, 1993; Tarling, Hrouda, 1993).

연구대상지역은 白雲山向斜지역으로도 불리워지는 강원도 태백시 일원 (Fig. 1)으로써 沃川非變成帶 (Kobayashi, 1953)의 대표적 지역이다 (지리적 중심좌표: 37° 12' N, 128° 55' E). 이 지역에는 두위봉형 하부고생대 퇴적암으로부터 백악기와 제3기의 화산암에 이르는 다양한 시대와 암종의 지층들이 분포하고 있으며 별다른 변성작용의 증거들이 없어, 시대에 따른 고응력장의 상황을 알아보기에 적합한 곳으로 여겨진다. 이러한 곳에서의 시발적 태자율 비등방성 연구는 해당지역의 지질구조해석에서 뿐만 아니라 한반도의 地體構造形成을 이해하는데 긴요한 단서를 제공할 것으로 믿어진다. 나아가서 이러한

* 부산대학교 지질학과 (Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

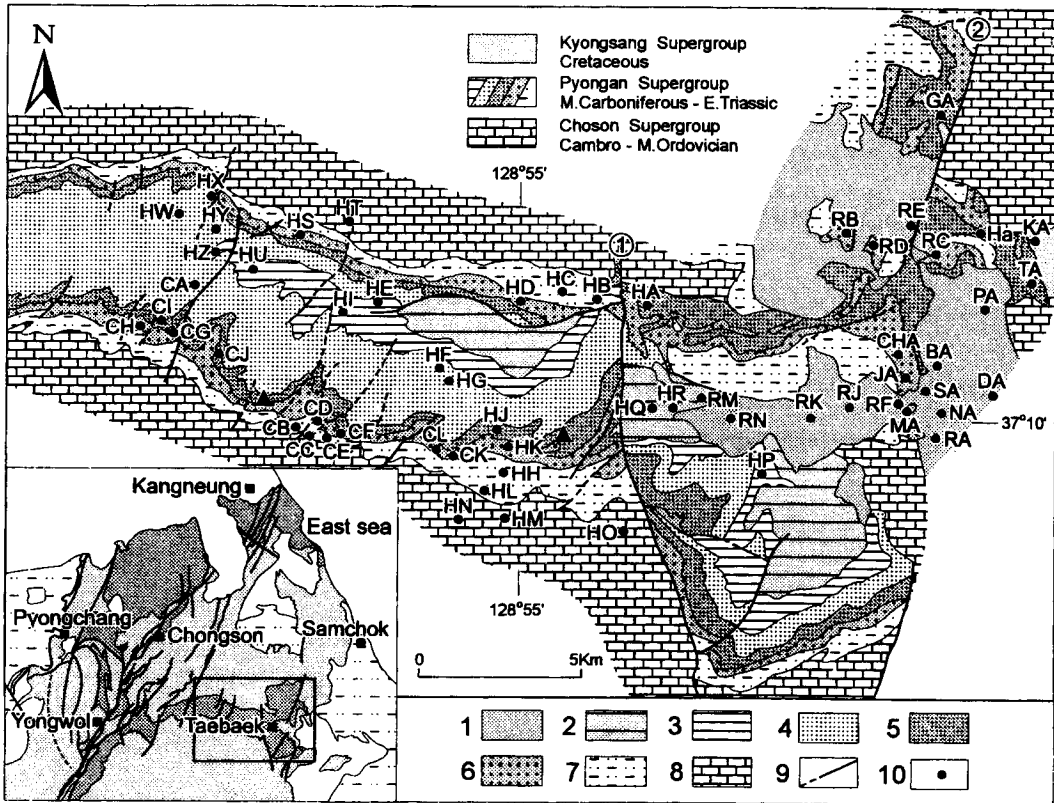


Fig. 1 Geologic and sample site map of the Taebaek area, compiled from various sources. 1; Late Cretaceous-Eocene volcanics and tuffaceous sandstones, 2; Triassic Tonggo Formation, 3; Permian Kohan Formation, 4; P Joggagriermian Tosagok Formation, 5; Peermian Hambaeksan Formation, 6; Permian Changsong and Carboniferous Kumchon Formation (formerly so-called Sadong Series together), 7; Carboniferous Manhang Formation, 8; Ordovician the Great Limestone, 9; Fault and inferred fault, 10; sample site, ①; Hambaeksan fault, ②; Osipchon fault.

연구가 인접지역으로 계속 확대된다면 한반도나 주변 지괴의 형성과 지층의 연령에 따른 응력장 방향의 대비자료로 활용될 수 있을 것이다.

연구수행에 사용한 지질도는 1:50,000 태백산지구 지질도 (태백산지구 지하자원조사단, 1962)와 1:25,000 삼척탄전 지질도 (서해길 등, 1979)이었다. 본 논문에 언급되는 지층명들은 이들의 표기를 따른 것이다.

일반지질

연구지역은 사일루리아-테본기를 제외한, 고생대 오도비스기에서 신생대 에오세 (원종관 외, 1992; 상기 지질도들에는 백악기말로 기재되어 있음)에 이르는 광범위한 시대의 퇴적암과 화산암으로 이루어져 있다 (Fig. 1). 이 지역의 대표적 地質構造는 E-W방향의 白雲山向斜구조인데 이로 인하여 동일한 고생대 지층이 남과 북에서 반복

되고 있다. 이 습곡구조는 N-S방향의 咸白山斷層 (Fig. 1, ①)에 의해서 동서로 양분되어 있는데, 백운산향사층을 중심으로 단순대칭되는 西部에 비하여, 東部는 다소 복잡한 지질구조를 이루고 있다. 東部에서의 향사구조는 보다 남쪽으로 연장되어 있고 축부분은 교란되어 정확한 방향이 정의되지 않는다.

연구지역 북동부인 도계일원에는 백악기의 퇴적층이 분포하며, NNE방향의 五十川斷層 (Fig. 1, ②)이 발달되어 있다. 이 단층은 연구지역 전역에 걸쳐서 발달된 N-S 내지 NE-SW방향의 소단층들을 대표하면서 백악기 지층을 포함한 주변의 모든 지질구조를 절단하고 있다.

연구방법

연구를 위한 시료는 태백일원 전역과 전시대의 지층을 망라하는 60개 site에서 총 600개가 채취되었다 (Table

Table 1. Sample sites and sample designations.

Age	Formation	Site	Lithology	No. of samples	Max. bulk susceptibility			
L. Cretaceous	Volcanic rocks	KA	Andesite	3	4190.9 (SI)			
		RE	Lithic tuff	10	232.5			
E. Tertiary		NA	Lithic tuff	8	160.8			
		DA	Green lithic tuff	10	142.0			
		RA	Green lithic tuff	4	1851.0			
		BA	Tuff	6	2280.8			
		RF	Rhyolite	7	267.7			
		Heungjon	PA	Tuffaceous sandstone	8	31.4		
			RJ	Tuffaceous sandstone	10	129.4		
	Joggagri		RK	Tuffaceous sandstone	6	147.0		
			RN	Light gray tuff	13	2429.1		
	Triassic	Tonggo	SA	Red shale	18	232.5		
			HQ	Sandstone	13	55.3		
HR			Sandstone, red shale	9	168.4			
Permian	Kohan	RM	Sandstone	17	106.8			
		HE	Sandstone, mudstone	12	384.5			
		HI	Sandstone, mudstone	7	400.9			
		HP	Mudstone	9	1759.3			
		HU	Mudstone	14	414.7			
	Tosagok		HZ	Quartzite	13	40.2		
			HF	Sandstone, mudstone	9	148.3		
			HG	Coarse sandstone	10	193.5		
			HV	Coarse sandstone	9	2.5		
			HW	Mudstone, black shale	10	638.4		
			HX	Coarse sandstone, shale	16	336.8		
			HY	Sandstone	6	491.3		
			CA	Red sandstone	19	368.2		
			Hambaeksan		HA	Coarse sandstone	7	30.2
					HJ	Light grey sandstone	11	33.9
	GA	Coarse sandstone			7	44.0		
	MA	Sandstone			5	531.6		
	TA	Sandstone			6	267.7		
	Ha	Coarse sandstone			6	204.7		
	CI	Coarse sandstone			9	5.0		
	Changsong		CJ	Coarse sandstone	7	69.1		
			HD	Dark gray sandstone	11	198.5		
			HK	Black shale	5	17.6		
			RB	Sandstone	8	747.7		
			RC	Sandstone	8	129.4		
			RD	Sandstone	3	11.3		
			CG	Mudstone	9	426.0		
CH			Black shale	8	591.9			
CL			Black shale	7	212.4			
Carboniferous	Kumchon	JA	Mudstone	6	18.8			
		CHA	Black shale, sandstone	11	228.7			
		CF	Mudstone	10	500.1			
		CK	Mudstone	12	359.4			
		HS	Sandstone, mudstone	11	358.1			
	Manhang		HB	Gray mudstone, shale	10	61.6		
			HC	Green sandstone	15	228.7		
			HH	Sandstone, mudstone	9	4342.9		

Table 1. Continued.

Age	Formation	Site	Lithology	No. of samples	Max. bulk susceptibility
Carboniferous	Manhang	HL	Light gray sandstone	14	42.7
		CB	Mudstone	6	491.3
		CC	Red sandstone	15	103.0
		CD	Red sandstone, mudstone	14	329.2
Ordovician	Great limestone	HM	Limestone, mudstone	11	13.8
		HN	Limestone, shale	17	517.7
		HO	Limestone	8	69.1
		HT	Limestone	11	42.7
Total		60 sites		600 samples	

1, Fig. 1). 대부분의 시료들은 휴대용 착암기를 이용하여 노두현장에서 코어시료 (core sample)로 착공 (coring)되었고 현장에서 定向 (orientation)되었다. 일부 시료들은 현장에서 정향된 암괴시료 (block sample)로 채취되었는데, 이들은 차후 실험실에서 착공하였다. 각 시료채취장소의 시료채취점들은 가능한 넓은 수직 층서범위를 포함하도록 하였다. 定向과 지층의 주향 경사 측정은 지질조사용 주향경사계를 이용하였는데 지층자세의 측정은 착공점 최근접 지층면에서 실시하였다.

야외에서 채취된 시료들은 실험실에서 직경 2.54 cm, 높이 2.3 cm의 圓柱形 시편 (specimen)으로 절단하였다. 대자를 비등방성 측정작업은 철근건물로부터 격리된 목조건물에서 영국 Molspin社의 Minisep 대자율 측정기를 사용하여 수행하였다. 모든 대자율 비등방성의 측정은 자기세척실험 이전에 이루어졌다.

암석시료에 외부자기장 H 를 가하면 유도자기 M 이 생성되며 이 유도자기의 크기는 외부자기장의 세기에 비례한다. 이는 $M=kH$ 의 관계식으로 표시되며 여기서 k 는 그 암석의 대자율 (volume magnetic susceptibility)이다. 암석의 대자율이 방향에 따라 다를 경우 그 암석은 磁氣的으로 非等方性 (magnetic anisotropy)을 띤다고 한다. 磁氣的으로 非等方性인 암석은 磁氣的의 線構造나 磁氣的의 葉理構造 혹은 이들 모두를 가지게 된다. 암석시료가 자기적으로 비등방성인 경우에는 대자율 k 는 대칭형 二次텐서 (tensor of second order)가 된다. 이 비등방성으로부터 고유벡터 (Eigenvector)와 고유값 (Eigenvalue)을 계산하면 각 시편에 대한 세 개의 주 대자율축의 방향과 크기, 그리고 대자율타원체의 모양이 결정된다. 이 세 主軸은 크기의 순서에 따라 k_1 , k_2 , k_3 로 표기되는데 $k_1 > k_2 = k_3$ 인 경우에는 磁氣的의 선구조 (magnetic lineation)를, $k_3 < k_1 = k_2$ 인 경우에는 磁氣的의 엽리구조 (magnetic foliation)를 갖는 것으로 판별된다. 이에 대한 보다 상세한 내용은 Wood-

cock (1977), Boas (1983), Davis (1986), 김인수 (1990) 등에 소개되어 있다.

대자율 비등방성의 크기 및 자기적 선구조와 엽리구조의 발달정도를 표현하는 데는 여러 가지 공식들이 알려져 있고 있다 (Tarling, 1983; Tarling and Hrouda, 1993). 본 연구에서는 대자율타원체의 세 주축 k_1 , k_2 , k_3 ($k_1 > k_2 > k_3$)의 크기를 결정한 후, 비등방성의 정도 (degree of anisotropy)를 판단하기 위해서는 Jelinek (1981)의

$$P_j = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]}$$

여기서, $\eta_1 = \ln k_1$; $\eta_2 = \ln k_2$; $\eta_3 = \ln k_3$; $\eta_m = \frac{1}{3} \sqrt{\eta_1 \eta_2 \eta_3}$ 식을, 선구조와 엽리구조의 판별을 위해서는 Jelinek (1981)과 Hrouda (1982)의 대자율 타원체의 모양지수 (shape parameter) 식 $T = [2(\eta_2 - \eta_3) / (\eta_1 - \eta_3)] - 1$, ($-1 \leq T \leq 1$)을 사용하였다. 이 공식을 이용하여 각 시편별로 P_j 와 T 값을 계산한 후 T - P_j 다이아그램 (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982; Tarling, Hrouda, 1993)을 작성하여 자기비등방성의 정도와 우세한 자기적 구조가 쉽게 판단되도록 하였다. 이 논문에서는 소개를 생략하지만, 자기적 선구조 (L)와 엽리구조 (F)의 판단기준으로 사용되어온 (김인수, 1990; 이준동 등, 1993) Balsley, Buddington (1958, 1960)의 $L = k_1/k_2$ 식과 Stacey *et al.* (1960, 1961)의 $F = k_2/k_3$ 식, 그리고 Flinn 다이아그램 (Flinn, 1962)도 병용하여 해석의 참고 자료로 하였다. 그러나 T - P_j 다이아그램이 보다 높은 해상도를 보여 전통적으로 사용되어온 후자들을 대체하기로 하였다.

T - P_j 다이아그램에서 대자율타원체의 모양이 시가형 (prolate)이면 흐름에 의한 선구조 (flow lineation)가 우세한 것으로 해석할 수 있으며 흐름의 방향은 k_1 축 방향이 된다. 이에 대조되게 대자율타원체의 모양이 접시형 (oblate)이면 상부지층의 荷重이나 地構造의 應力에 의거한 엽리구조가 우세한 것이며 이 힘의 작용방향은

k_3 축 방향인 것으로 해석된다. 이때 k_3 축의 방향이 층리면에 수직하면 이 엽리구조는 지층하중에 의한 load foliation으로, 층리면과 무관한 경우에는 지구조적 응력작용에 의한 tectonic foliation으로 해석될 수 있다 (김인수, 1990).

끝으로 각 지층별의 자기적 선구조와 엽리구조의 방향에 고자기학에서 널리 쓰이는 褶曲檢査 (fold test)를 적용해보면 해당 비등방성구조가 지층 傾動의 以前에 형성된 것인지 以後에 형성된 것인지 판별해낼 수 있다.

대자율 비등방성 측정 결과와 해석

채취된 시편 모두에 대해서 대자율 非等方性 측정을 실시하였으며, 자기적 구조를 보이는 노두의 1~2개 시편에 대해서는 等溫殘溜磁氣 (IRM) 획득실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시편들의 대다수는 300 mT 이하 내지 900 mT 이내의 외부자기장에서 완전히 포화되어 주 磁性鐵物이 티탄자철석계열 (titanomagnetites)의 것임을 알 수 있었다 (Fig. 2).

지층하중에 의한 자기적 엽리구조

지층의 형성과 고화당시에 작용되는 상부지층의 荷重 ($p=\rho gh$)은 층리면에 평행한 磁氣的 葉理構造 (magnetic load foliation)를 생성시킨다. 이 경우 k_3 방향은 층리면에 수직이며 k_1 과 k_2 방향은 지층면상에서 규칙없이 분포될 것이다. 이에 반하여, 지층형성 당시에 강한 유체의 흐름이 있었거나 하중보다 강한 지구조적 응력이 작용하였다면 각

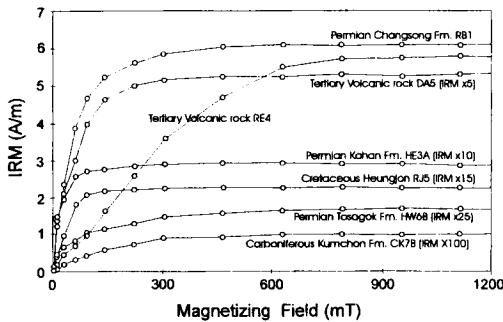


Fig. 2. IRM acquisition experiments with sedimentary samples. Note the saturation of IRM under 300 mT in most samples, indicating titanomagnetites as main magnetic mineral. Even though the samples RE4, HW6B and CK7B have somewhat higher coercivity, they are all saturated under 900 mT, suggesting again titanomagnetites as main magnetic mineral.

각 흐름방향에 평행한 자기적 선구조와 응력방향에 수직인 자기적 면구조를 발달시킬 것이다. 전자의 경우는 지층면상에 놓인 k_1 방향으로써, 후자의 경우는 층리면에 수직이 아닌 k_3 방향에 나타남으로써 인지되게 된다.

Fig. 3는 연구지역에서 층리면 발달이 두드러진 지점 (도사곡층내 이암과 세일의 호층대, 노두기호 HW) 으로부터 채취된 시편들의 k_3 축 방향을 等積投影圖 (equal-area net, Schmidt net)에 도시한 것이다. 한쌍의 등적투영도 중 좌측의 것은 노두 현장상태 그대로의 방향을 표시한 것이고 (before bedding-tilt correction, in geographic coordinates) 우측 投影圖는 지층을 수평으로 복원 (지층경사보정)한 상태로 투영한 것이다 (after bedding-tilt correction, in stratigraphic coordinates). 우측 投影圖에서 k_3 축 방향이 층리면과 거의 수직을 이루며, 아래의 T-P_j 다이어그램에서 oblate가 우세한 사실로부터 이 (지층면에 평행한) 엽리구조는 load foliation으로 해석

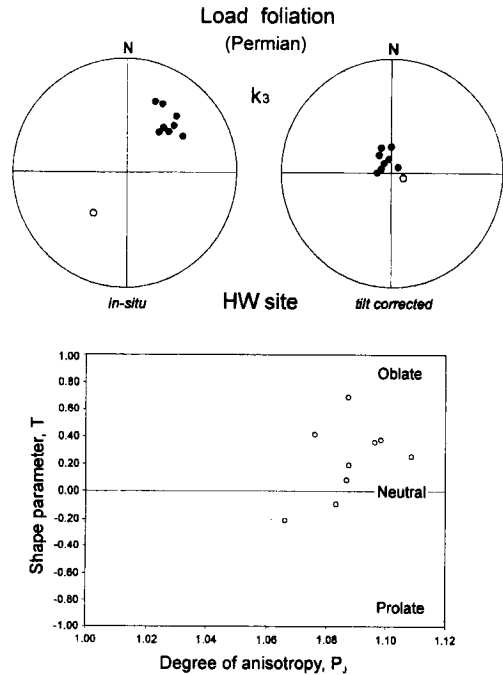


Fig. 3. Example of load foliation from a Permian black shale site of the Tosagok Formation. Upper left (right) equal-area plot (Schmidt net) represents the situation before (after) bedding-tilt correction. Black (white) dots represent positive (negative) inclination. The tilt-corrected k_3 directions (right above) are better clustered around an axis approximately perpendicular to the bedding plane, indicating a case of load foliation. Lower T-P_j diagram is a plot of shape parameter (T) vs. degree of anisotropy (P_j). Note that most data are plotted in the oblate (foliation) region.

된다. 그림에는 생략되어 있지만 k_1 과 k_2 축의 방향들은 거의 수평의 복각으로써 분산된 방위각을 보이고 있었다.

연구지역내의 11개 sites (HC, HD, HS, HU, HW, HX, HY, NA, RA, RN, SA)에서 이와같은 지층하중에 의한 엽리구조 (load foliation)가 우세하게 나타났다. 이러한 엽리구조는 트라이아스기의 것을 제외한 모든 퇴적층에서 고르게 나타났다.

지구조적 응력에 의한 자기적 엽리구조

앞서의 예와는 대조적으로, 지층면에 거의 수직인 자기적 엽리구조가 연구지역내 여러 노두에서 관찰되었다. 이러한 엽리구조는 지층의 형성당시나 그 이후에 지층하중을 압도하는 지구조적 응력이 작용한 결과로 해석되는데 (tectonic foliation) k_3 축 방향은 이 지구조적 응력의 작용방향이 된다. 아래에 각 시대 지층별로 이 tectonic foliation의 예를 소개한다.

Fig. 4는 석탄기 만항층 (이암) (노두기호 CK)에서의 예이다. 시편들은 T-P₁ 다이어그램에서 대부분 oblate 영역에 표시되고, k_3 축의 방향은 지층경사 보정전 층리면에

평행한 방향으로 밀집되어 분포하는 반면, 보정후에는 분산되는 결과를 보여준다. 이는 지층의褶曲 (folding)이나 傾動 (tilting)이후에 k_3 축 방향으로 응력이 작용하였음을 지시한다. 응력의 작용방향은 NW-SE이었다.

Fig. 5는 페름기 도사곡층내의 자색사암 (노두기호 CA)에 대한 측정결과로서 역시 엽리구조가 우세함이 나타나고 있다. Fig. 4에서와 마찬가지로 지층경사보정후 k_3 축 방향들이 분산된다. 이 엽리구조 역시 지층의 습곡 및 경동이후에 응력이 작용한 결과로서 응력의 작용방향은 NW-SE이다. 한편, 페름기 지층 중 HZ지점 (Fig. 1) 한 곳에서는 다른 지점에서와는 달리 NE-SW방향의 응력이 나타났다 (Fig. 10).

Fig. 6은 트라이아스기 동고층내 사암 (노두기호 HR)에 대한 결과로서 역시 엽리구조가 지배하고 있다. 지층경사보정 이후 k_3 축의 방향은 층리면에 거의 평행한 면으로 집합된다. 이로부터 습곡이나 경동이전, 즉 지층이 수평일 당시에 상부층의 하중을 증가하는 수평적 외력이 작용하였음을 알 수 있다. 이 지구조적 응력의 작용방향은 N-S이었다.

Fig. 7은 제3기 에오세 응회암 (노두기호 RE)에 대한

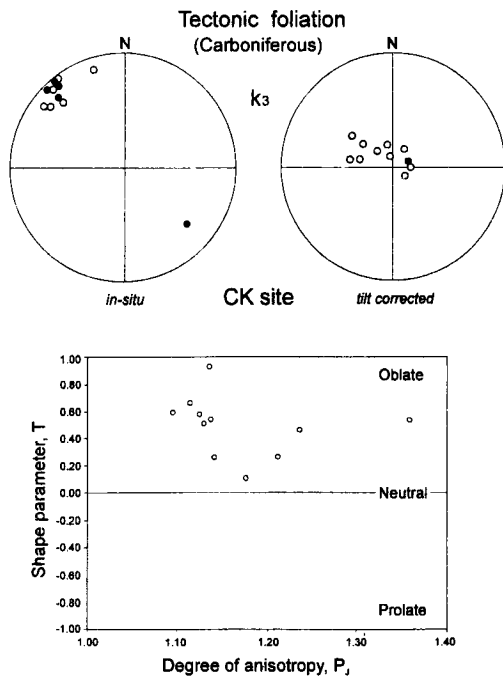


Fig. 4. Example of tectonic foliation from a Carboniferous mudstone site of the Kumchon Formation. Plot symbols and conventions are the same as in Fig. 3. Oblate (foliation) structures are dominant and the k_3 directions show better clustering before the bedding-tilt correction.

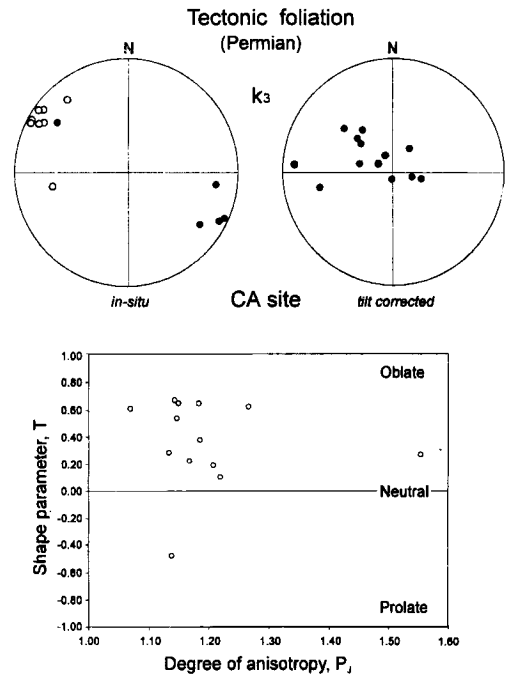


Fig. 5. Example of tectonic foliation from a Permian red sandstone site of the Tosagok Formation. Plot symbols and conventions are the same as in Fig. 3. Oblate (foliation) structures are dominant and the k_3 directions show better clustering before the bedding-tilt correction.

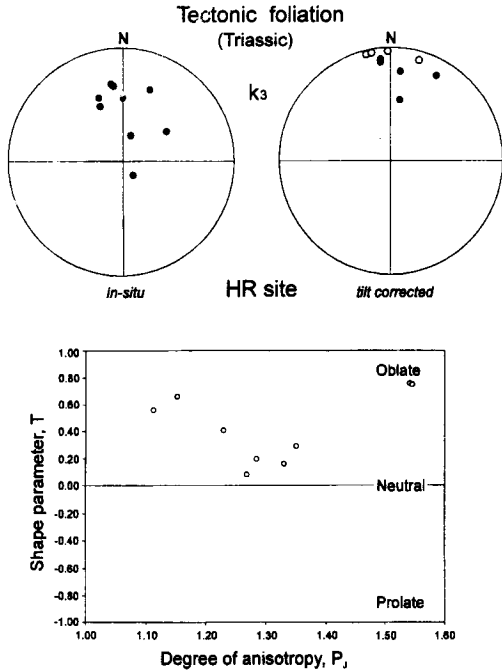


Fig. 6. Example of tectonic foliation from a Triassic red shale site of the Tonggo Formation. Plot symbols and conventions are the same as in Fig. 3. Oblate (foliation) structures are dominant and the k_3 directions show better clustering after the bedding-tilt correction.

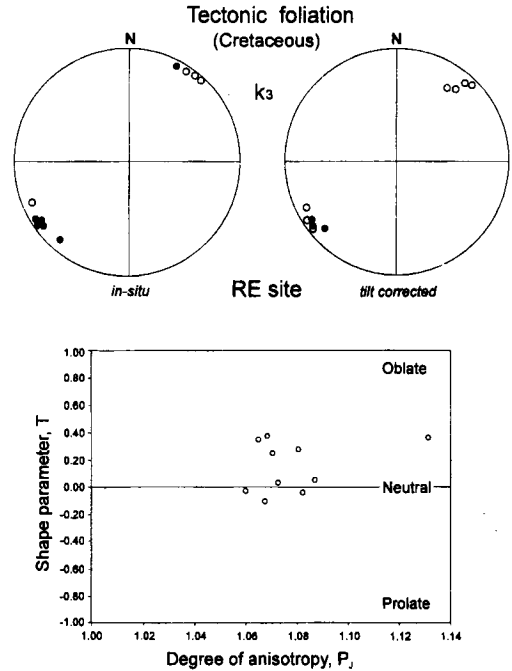


Fig. 7. Example of tectonic foliation from a late Cretaceous volcanics (lithic tuff) site. Plot symbols and conventions are the same as in Fig. 3. Note that oblate (foliation) structures are predominant and that anisotropy degree is lower than those of the geologically older samples in the previous figures. The effect of bedding-tilt correction is not discernible.

결과로서 엽리구조가 우세하게 나타나고 있다. 지층경사 보정 여부에 관계 없이 k_3 축의 방향은 층리면과 평행하며, 그 방향은 NE-SW이다.

연구지역에서 지구조적 응력에 의한 엽리구조가 나타나는 곳은 모두 21개 지점이었다 (Fig. 10). 이들 지점에서 응력의 작용각도는 대체로 층리면에 평행하며, 작용방향은 시대에 따라 E-W (오도비스기 지층)에서 NW-SE (석탄-페름기 지층), N-S (트라이아스기 지층), NE-SW (백악기-에오세 지층)의 방향으로 체계적으로 변화되고 있음이 드러났다 (Fig. 10, 11).

Fig. 8은 지구조적 응력에 의한 엽리구조가 우세한 21개 site의 연구 결과에서 대자율 비등방성의 정도 (degree of anisotropy, P_j)와 형태지수 (shape parameter, T)를 분리하여 나타낸 것이다. P_j 그래프에서 볼 수 있는 것은 오도비스기-트라이아스기 지층에 비해 후기 백악기-제3기에 들어서면서 비등방성의 정도가 상당히 낮아지고 있는 사실이다. 이렇게 낮은 값 ($P_j < 1.10$)은 변형정도가 극미한 암석에서 나타나는 결과인 바 (Hroudá, 1982), 新期의 응력은 트라이아스기 이전의 것에 비하여 미미한 정도에 불과하였음을 보여주는 것이다.

고수류나 화산암의 흐름에 의한 자기적 선구조

磁氣的 線構造 (magnetic lineation)는 사층리의 발달이 양호한 지층과 유문암 지역에 국한되어 나타났다. 앞

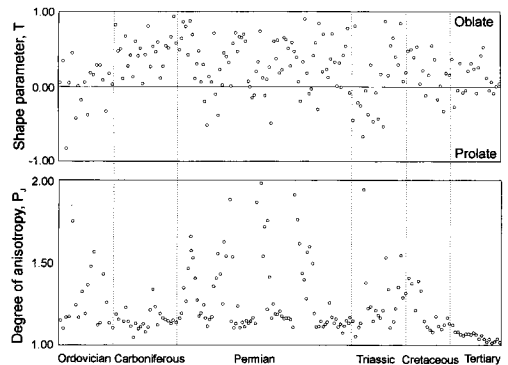


Fig. 8. Difference of anisotropy degree and shape parameter according to the geologic age of samples. Note that anisotropy degree becomes lowered in the post-Cretaceous samples, which suggests absence of any strong tectonism.

토 의

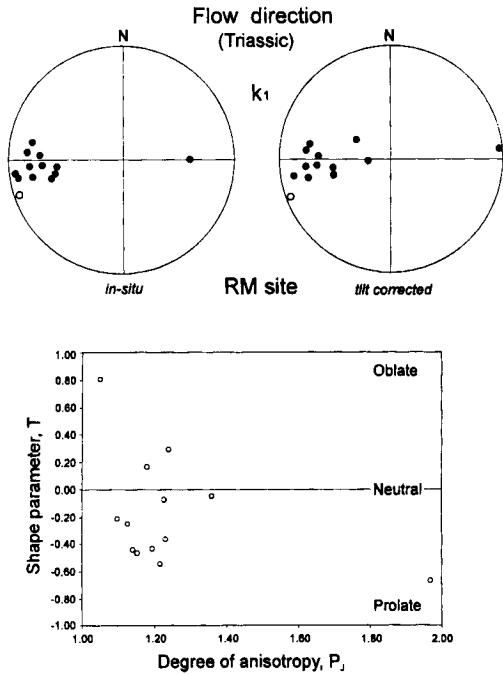


Fig. 9. Example of flow lineation from a Triassic sandstone site of the Tonggo Formation. Plot symbols and conventions are the same as in Fig. 3. Prolate (lineation) structures are dominant and the effect of bedding-tilt correction is not discernible.

서 논의하였던 바 이것은 流動作用에 의한 당당한 결과로써 k_1 축 방향이 흐름의 방향을 지시한다. Fig. 9는 트라이아스기 동고층 사암의 예 (노두기호 RM)이다. T-P₁ 다이어그램에서 13개의 시편중 10개가 선구조를 지시하는 영역 (prolate)에 圖示되고 있다. 등적투영도는 지층경사보정의 여부에 관계 없이 E-W가 흐름의 방향임을 보이고 있다. 비록 모든 시대 지층들로부터 선구조를 발견해낼 수는 없었으나, 연구지역 3개 지점에서의 선구조 방향은 이 지역의 퇴적구조 연구로부터 밝혀진 (김항목, 1976) 古水流방향과 잘 일치하고 있었다.

이론적으로 선구조 (k_1 축 방향)가 발달된 노두에서는 k_2 축과 k_3 축 방향들이 서로 구분되지 않은 채 산란되어 분포한다. 이러한 현상은 이번의 연구에서도 확인할 수 있었다. 또한, 엽리구조가 우세한 노두의 경우에 반하여 선구조가 우세한 노두에서는 일부 시편들이 엽리구조의 영역에 도시되기도 한다. 이러한 사실들은 자기적 선구조의 발달이 엽리구조의 발달보다 덜 뚜렷하며 덜 배타적이라는 기존의 견해 (김인수, 1990)를 지지한다. Fig. 9에 예시한 RM노두의 경우도 선구조 이외에 k_3 축이 N-S방향으로 집중된 엽리구조를 동시에 보이고 있었다.

암석내에 자기적인 선구조와 엽리구조가 발달되기 위해서는 암석을 구성하는 자성광물체가 형태비등방성 (shape anisotropy)을 가져야 한다. 형태비등방성에 의한 대자율 비등방성은 대자율이 높은 티탄자철석계열광물 (titanomagnetites)의 경우에 현저하며 적철석이나 자류철석의 경우에는 무시될 정도로 불과하다 (Collinson, 1983; 등). Fig. 2의 等殘溜磁氣 (IRM) 획득실험결과에 의하면 연구지역 대다수 시편들에서의 주 磁性鐵物은 티탄자철석계열의 것임이 확실하다.

한편 동일 노두임에도 불구하고 主軸 k_1, k_2, k_3 축의 방향성이 시편에 따라 다른 경우가 있었는데, 이러한 노두의 대다수 시편들은 극히 미미한 대자율을 가지고 있었다. 이렇게 대자율이 작으면서 주축 방향이 시편별로 상이한 노두들은 해석에서 제외하였다.

연구지역의 대자율 비등방성 결과를 살펴보면 11개 지점에서 하중에 의한 자기적 엽리구조 (load foliation)가 나타났으며 각각 21개 지점과 5개의 지점에서 지구조적 응력에 의한 자기적 엽리구조 (tectonic foliation)와 자기적 선구조 (flow lineation)가 판별되었다. 이 각지점의 대자율 주축 평균방향들은 Fisher (1953)의 球面統計學의 방법에 의거 계산되었는데 그 결과는 Table 2, Fig. 10, Fig. 11에 정리되어 있다. 이들 중, 폐름기 HZ지점의 자료는 인접 다른 지점과 현저하게 다른 방향을 보여서 시대별 전체 평균의 산출에서 제외하였다.

각 지질시대별의 엽리구조의 평균 방향들은 Fig. 10과 Table 2에 나타난 바와 같이 시료의 채취위치에 관계없이 일관된 방향을 보여주고 있는데, 이로부터 특정 지질시대에 작용하였던 지구조적 응력의 방향이 연구지역의 지체구조구의 구분에 관계없이 광역적으로 일정하였음을 알 수 있다. 한가지 아쉬운 점은 엽리구조가 나타나는 오도비스기 노두가 1개 지점 뿐인 것인데, 이 시대의 고응력장을 보다 명확히 밝히기 위해서는 차후에 더 많은 오도비스기 지점에 대한 후속연구가 있어야 할 것이다.

석탄기와 폐름기 지층의 경우 k_3 축 방향들이 지층경사보정전의 현장 (in-situ)상태에서 보정이후의 경우보다 더 잘 일치된다. 따라서 이 지층들의 엽리구조는 지층의 褶曲이나 傾動이후에 작용한 압축력에 의거한 것임을 알 수 있다. 그러나 트라이아스기 지층의 경우에는 지층경사보정후, 즉 지층을 수평상태로 복원하였을 때의 k_3 축 방향들이 보다 잘 일치된다. 따라서 석탄기-폐름기 지층에 작용한 압축력은 폐름기말 내지 트라이아스기 초 사이, 혹은 트라이아스기 지층 생성과 거의 동시기에 작용한 것으로

Table 2. Summary of the study results and Firsher statistics
1) Tectonic foliation (Mean k_1 direction)

Age	Formation	Site	n	Before bedding-tilt correction				After bedding-tilt correction			
				D (°)	I (°)	α_{95} (°)	k	D (°)	I (°)	α_{95} (°)	k
E. Tertiary	Volcanic rocks	Ba	6	34.8	6.3	7.4	59.3				
		KA	3	65.9	-17.3	4.4	333.9	65.4	-16.1	4.4	334.1
		RE	10	226.5	2.6	8.1	29.9	228.7	7.6	8.1	30.2
L. Cretaceous	Heungion	RJ	10	211.7	-10.7	12.9	11.8	213.0	-9.1	12.7	12.1
		RK	5	54.7	15.2	14.1	19.6	54.4	15.1	14.5	18.8
		Mean	34	46.5	10.6	11.6	29.1	50.3	12.2	11.9	34.5
Triassic	Tonggo	HR	9	3.0	47.7	12.9	14.7	1.5	-0.7	12.6	15.4
		RM	13	176.4	-9.3	7.7	25.7	177.2	-8.5	7.1	29.7
		Mean	22	179.1	-28.5	33.4	8.8	179.3	-4.6	7.6	169.2
Permian	Kohan	HE	10	330.3	-7.1	15.8	7.9	319.6	-39.6	16.9	6.9
		HI	7	333.5	-12.5	13.3	15.9	323.9	-39.8	15.1	8.7
		HZ	10	232.0	-21.7	16.1	7.6	231.5	-56.5	16.1	7.6
	Tiosagok	CA	13	298.2	-13.9	6.3	38.5	311.2	34.8	29.3	1.8
		Hambaeksan	GA	5	313.4	7.8	11.8	35.0	304.6	42.6	14.0
	Changsong	MA	4	322.3	12.7	18.0	13.9	318.5	17.8	16.7	17.6
		RB	8	115.7	31.5	5.9	71.0	89.7	55.1	6.2	63.6
		RC	8	117.8	-13.5	9.6	30.5	119.8	42.5	10.2	26.2
		CG	9	331.2	-26.6	10.1	21.3	338.7	-54.6	28.0	2.8
		CH	7	336.1	-29.6	6.9	59.6	326.6	-69.3	7.4	51.7
	Mean	71	317.8	-13.2	12.7	13.6	313.4	-26.0	24.7	3.6	
Carboniferous	Kumchon	CK	11	318.2	-7.8	8.5	24.7	319.9	-78.8	19.8	4.6
		HH	8	101.7	23.0	7.2	48.9	107.5	-10.4	6.5	58.6
	Manhang	CB	6	13.55	21.1	8.0	60.8	114.2	30.9	17.5	12.8
		Mean	25	308.9	-17.7	15.9	26.0	296.1	-39.7	35.1	5.3
Ordovician	Great Ls.	HN	17	286.0	-25.8	16.2	5.0	271.5	-12.9	12.5	8.3

2) Flow lineation (Mean k_1 direction)

Age	Formation	Site	n	Before bedding-tilt correction				After bedding-tilt correction			
				D(°)	I(°)	α_{95} (°)	k	D(°)	I(°)	α_{95} (°)	k
Tertiary	Volcanic rocks	DA	12	326.7	13.1	11.3	12.7	323.5	10.8	11.8	11.1
		RF	7	318.5	30.5	3.7	206.2	260.4	23.3	3.7	205.0
Triassic	Tonggo	RM	13	261.3	26.6	8.0	22.1	265.5	31.3	10.1	15.7
Carboniferous	Kumchon	JA	7	204.0	-18.7	11.6	24.4	215.9	-4.0	12.9	19.8
Ordovician	Great Ls.	HT	9	343.4	17.2	20.9	5.6	318.1	24.9	14.3	11.4

해석되어야 할 것이다. 태백지역과 문경지역에서의 고자기 연구 (김인수, 임아연, 1993; 김인수 등, 1995a, b)에 따르면 태백지역은 남중국지괴의 일원이었고 문경-영월-단양지역은 북중국지괴의 일원이었다고 한다. 이들 연구에서는 남-북중국지괴가 서로 접하게 되는 시기를 꽤름기에서 트라이아스기에 이르는 기간으로 보았으며 두 지괴의 충돌이 한반도에서는 松林變動이라고 하였다. 본 연구에 의한 자료는 이러한 견해와 잘 부합되고 있다. 따라서

송림변동시의 주된 지괴충돌방향은 NW-SE이다.

트라이아스기와 백악기말 지층의 경우, k_3 축의 방향들이 지층경사 보정의 이후에 보다 잘 일치된다. 이것은 해당지층에서 습곡이나 경동 이전에 압축력이 작용하였음을 뜻한다. 엽리구조를 가지는 백악기 지층은 백악기말 퇴적층인 홍전층과 그 이후의 유문암과 기타 화산암류들이다. 이 화산암의 K-Ar 방사능연령은 56.03 Ma로 보고되고 있어 (원종관 등, 1992) 신생대 고제3기인 에오세에

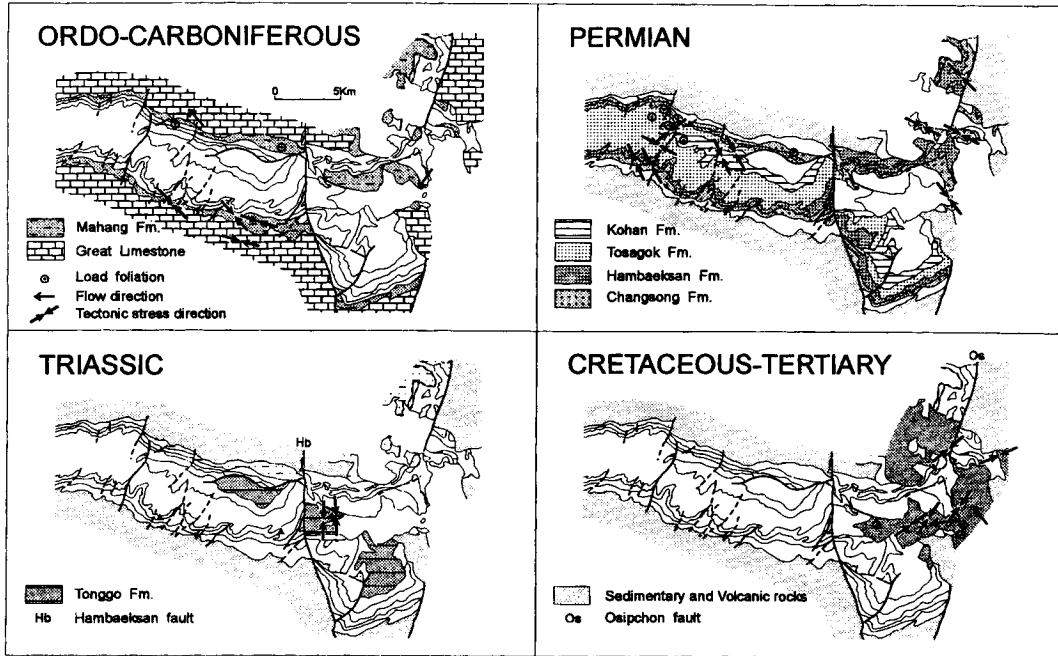


Fig. 10. Summary map of the site-mean tectonic stress and flow lineation directions assorted by the geologic age-groups of the host formations. Tectonic stress directions are defined by k_3 direction perpendicular to the tectonic foliation plane. Note the consistency of the site-mean tectonic stress directions within each age-group regardless of the location of sample sites. For numerical values, refer to Table 2.

은 이 구조를 형성시킨 압축력이 백악기말에서 고제3기에 이르기까지 지속되었음을 의미한다. 그러나 이 압축력은 암석의 변형을 수반하는 지층의 경동이나 습곡을 초래하

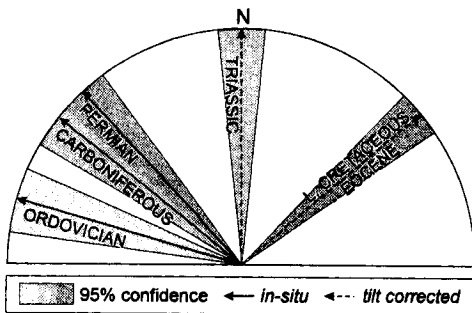


Fig. 11. Summary diagram showing a clockwise rotation of tectonic stress field direction in the course of geologic time. Pre-Triassic site-mean directions show better clustering before the bedding-tilt correction, whereas Triassic and later directions are better clustered after the bedding-tilt correction. It is concluded, therefore, that the most powerful tectonic force was acting in the late Permian-early Triassic in NW-SE direction. Taking consideration of palaeomagnetic results from neighbouring Triassic areas, it is also concluded that the stress field was related with the Songnim Disturbance and SCB/NCB collision episode.

지는 못하였던 것이다 (Fig. 8 참조). 그렇다면 보다 훗날에 지층을 습곡시키거나 경동시킨 응력에 대한 설명이 필요한데 이는 간단하지가 않다. 이는 상기 압축력이 바로 그 응력이었는데 지층의 변형 (습곡이나 경동의 발생)이 일어남으로써 그 영향력이 해소 (release)되어 버려 더 이상의 효력이 발휘되지 못하였던 것으로 해석될 수도 있겠고, 사실상 보다 훗날에 지층의 습곡과 경동을 초래시킨 다른 강한 압축력이 있었는데 지층이 이미 충분히 고화되었던 관계로 그 영향력이 기록되지 못하였던 것으로 해석될 수도 있겠다 (이 응력이 더욱 강했다라면 변성구조로써 그 흔적을 남겼을 터이지만). 다른 극단으로써는 압축력이 아닌 장력에 의한 지각확장 (extension)이나 중력작용 (gravity sliding)으로 지층의 습곡이나 경동이 발생되었을 가능성도 상정할 수가 있겠는데, 이 경우에는 압축력에 의한 자기적 엽리구조의 생성을 생각할 수 없음이 당연하다.

전 시대를 망라하여 조망해 볼 때 (Fig. 11), 연구지역인 삼척탄전지역에 작용하였던 지구조적 압축력의 방향은 오도비스기의 지층에 기록된 E-W의 방향으로부터 시간이 흐름에 따라 점차 시계방향으로 회전되어 석탄기와 페름기의 지층에서의 NW-SE방향과 트라이아스기 지층

의 N-S방향을 거쳐 백악기말 내지 에오세 지층에 기록된 NE-SW방향으로 변전되어있음이 나타난다. 이상의 지구 조직 응력 (압축력)의 방향을 연구지역의 지질구조에 연관시켜 볼 때 (Fig. 10), 이 지역의 주된 지질구조인 白雲山向斜와 咸白山斷層은 페름기말 내지 트라이아스초기에 작용한 NW-SE방향 압축력의 영향을 강하게 받았고 (咸白山斷層은 페름기까지의 지층을 절단하는 반면 그 이후의 동고층은 절단하지 않음), 그 직후 N-S방향의 압축력으로 咸白山斷層이 역방향 (우향이동)으로 재활성되었으며, 백악기말 내지 초기 신생대 동안에는 NE-SW방향의 압축력으로 주향이동성 五十川斷層이 생성 또는 재활성되었던 것으로 추정된다.

결론

태백지역 오도비스기로부터 에오세에 이르는 지층들에 대해서 대자율 비등방성 (AMS: anisotropy of magnetic susceptibility) 연구를 실시하였다. 60개 장소에서 채취된 총 600개 시료들의 대부분은 고생대와 트라이아스기의 쇄설성 퇴적암이었는데 백악기와 에오세의 지층은 유문암과 응회질 사암이었다.

트라이아스기 동고층을 제외한 모든 지층에서 층리면 에 평행한 磁氣的 葉理構造가 인지되었는데 이는 퇴적당시 상부지층의 荷重에 기인한 것으로 해석된다 (=load foliation). 이 상부지층 하중에 의한 엽리구조는 퇴적암에서 널리 관찰되는 일반적인 현상이라고 생각되는데 사층리의 발달이 두드러진 동고층의 경우에는 예외이었다.

시대가 다양한 5개의 지점에서 磁氣的 線構造가 관찰되었는데 이들은 퇴적이나 화산분출시의 입자의 흐름에 기인한 것으로 해석된다 (=flow lineation). 이로부터 유추된 흐름의 방향은 선행 古水流 연구에 의하여 밝혀진 방향과 잘 일치하였다.

다른 21개 지점에서는 층리면에 수직인 磁氣的 葉理構造가 관찰되었는데 이들은 지층에 작용하였던 地構造的 應力 (압축력)의 결과라고 해석된다 (=tectonic foliation). 이들 엽리구조에 의거한 응력의 작용방향은 한 지질시대내에서는 시료채취 場所나 소속 地體構造區에 관계없이 없이 일관된 방향을 보여주었다. 반면에 전 지질시대에 걸쳐 조망해보면 오도비스기 지층에서는 E-W 방향, 석탄기와 페름기 지층에서는 NW-SE방향, 트라이아스기 지층에서는 N-S방향, 그리고 백악기-에오세 지층에서는 NE-SW방향의 압축력이 나타나 시간의 흐름에 따라 응력장의 방향이 시계방향으로 회전되어있음을 보여주었다.

페름기이전 지층들의 경우에는 노두평균의 응력 작용 방향 (NW-SE 방향)이 지층경사 보정의 이전 (즉, 현장 상태에서)에 더욱 잘 군집되었는데 이는 압축력의 작용시기가 지층의 褶曲이나 傾動의 이후임을 말하는 것이다. 이 사실과 태백 및 문경지역에서 실시된 기존의 잔류자기 연구결과 (김인수, 임아연, 1993; 김인수 등, 1995a, b)를 종합하여 볼 때, 이 NW-SE방향의 압축력은 페름기 내지 트라이아스기에 작용하였던 南-北 中國地塊의 衝突에 연관된 松林變動의 일환인 것으로 파악된다.

트라이아스기 이후의 지층들에서 인지되는 N-S 내지 NE-SW의 압축력방향은 지층경사 보정 이후 (즉, 지층들을 수평으로 복원한 이후)에 더 잘 군집된다. 따라서 이 압축력은 지층의 생성과 동시기 내지 지층의 습곡이나 경동의 직전까지에 작용한 힘이라고 결론지을 수 있다.

위와 같은 시대별 응력장의 방향을 삼척탄전지역내 주요 지체구조들과 연관시켜보면 白雲山向斜와 咸白山斷層은 페름기말 내지 트라이아스기초에 작용된 NW-SE방향의 압축력의 영향을 강하게 받았으며, 그 직후 N-S방향의 압축력으로 咸白山斷層이 역방향인 우향 주향이동단층으로 재활성되었고, 백악기말-초기 신생대동안에는 NE-SW방향의 압축력으로 우향 주향이동성 五十川斷層이 생성 혹은 재활성되었던 것으로 해석된다.

사사

“이 논문은 1997년도 부산대학교 기초과학연구소 간접연구경비 지원에 의하여 부산대학교 기초과학연구소에서 연구수행되었음 (RIBS-PNU-97-511)”을 밝히며 이에 대해 감사하는 바이다.

참고문헌

김인수 (1990) 포항이남 제3기 분지암석의 자기 비등방성과 지구조직 응력장. 광산지질, 23권, p. 59-71.
 김인수, 임아연 (1993) 태백지역의 캄브리아-트라이아스기 퇴적암에 대한 고자기 연구. 지질학회지, 29권, p. 415-436.
 김인수, 김정필, 민경덕 (1995a) 문경지역 대동누층군에 대한 고자기 연구 (I): 특성잔류자기의 추출. 지질학회지, 31권, p. 362-381.
 김인수, 민경덕, 전희영 (1995b) 문경지역 대동누층군에 대한 고자기 연구 (II): 지구조직, 층서적 의미. 지질학회지, 31권, p. 382-392.
 김항목 (1976) 강원도 삼척탄전의 고수류 및 퇴적학적 연구. 서울대학교 이학박사학위논문.
 도성재 (1991) 대자율 이방성과 이의 지질학적 응용. 광산지질, 24권, p. 71-79.
 서해길, 김동숙, 박석환, 임순복, 조민조, 배두중 (1979) 삼척탄전 지질도 (1:25,000). 자원개발연구소.

- 원종관, 노진환, 이문원 (1992) 통리분지에서의 백악기 화산 활동. 대한지질학회 제47차 정기학술발표회 발표논문 요약. 지질학회지, 28권, p. 512.
- 이준동, 김인수, 윤선, 상기남, 김영화 (1993) 연양지역을 중심으로한 양산단층에 관한 연구 -특히 파쇄작용과 자기 비등방성을 중심으로-. 지질학회지, 29권, p. 128-144.
- 태백산지구 지하자원 조사단 (1962) 태백산지구지질도 (1: 50,000). 국립지질조사소.
- Balseley, J.R. and Buddington, A.F. (1958) Iron-titanium oxide minerals, rocks and areo-magnetic anomalies of the Adirondack area, New York. *Econ. Geol.*, v. 53, p. 777-805.
- Balseley, J.R. and Buddington, A.F. (1960) Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. *Amer. J. Sci.*, v. 258A, p. 6-20.
- Boas, M.L. (1983) *Mathematical Methods in the Physical Sciences*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 793 p.
- Collinson, D.W. (1983) *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation*. Chapman & Hall, London, 503 p.
- Davis, J.C. (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 646 p.
- Fisher, R.A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London*. v. A217, p. 295-305.
- Flinn, D. (1962) On folding during three-dimensional progressive deformation. *Quart. J. Geol. Soc. London*, v. 118, p. 385-433.
- Hrouda, F. (1982) Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, v. 5, p. 37-82.
- Kobayashi, T. (1953) Geology of South Korea-with special reference to the limestone plateau of Kogendo. The Cambro-Ordovician formations and faunas of South Chosen (Korea). *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sci. II*, v. 8, p. 145-293.
- Lee, D.S. (ed.) (1987) *Geology of Korea*. Geol. Soc. Korea, Kyohak-Sa Publ. Co. Seoul, 514p.
- McElhinny, M.W. (1964) Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 8, p. 338-340.
- Nagata, T. (1961) *Rock Magnetism*, 2nd ed., Maruzen, Tokyo, 350 p.
- Stacey, F.D., Joplin, G. and Lindsay, J. (1960) Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from S.E. Australia. *Geofiz. Pura Appl.*, v. 47, p. 30-40.
- Stacey, F.D., Lovering, J.F. and Parry, L.G. (1961) Thermomagnetic properties natural magnetic moments, and magnetic anisotropies of some chondritic meteorites. *J. Geophys. Res.*, v. 96, p. 1523-1534.
- Tarling, D.H. (1983) *Palaeomagnetism: Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology*. Chapman & Hall, London, 379 p.
- Tarling, D.H. and Hrouda, F. (1993) *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall., London, 217 p.
- Woodcock, N.H. (1977) Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 88, p. 1231-1236.