

백령도와 보은 지역의 상부맨틀암석 내의 단사휘석의 지화학적 특징

Geochemical Characteristics of Clinopyroxenes in the Upper Mantle Rocks under the Baegryeong Island and the Boeun

길 영 우 (Young Woo Kil) · 이 석 훈 (Seok Hoon Lee)*

한국기초과학지원연구원 나노환경연구부

(Division of Nano Material and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-806, Korea)

요약 : 백령도와 보은 지역의 마이오세 알칼리현무암에 상부맨틀암석인 스피넬 페리도타이트가 포획되어 있다. 이들 포획체 내의 단사휘석의 모드 조성과 주성분원소, 미량원소, 희토류원소 조성은 백령도와 보은 지역의 상부맨틀의 평형 온도와 맨틀결핍, 맨틀부화와 같은 지화학적 과정들을 규명하는 매우 중요하다. 원생입상조직과 반상쇄설조직 사이의 전이 조직을 보이는 백령도와 보은 스피넬 페리도타이트의 평형온도는 15 kb 압력에서 각각 773~1188°C와 705~1106°C이다. 단사휘석의 Y, Yb 성분은 백령도와 보은 스피넬 페리도타이트가 각각 1~10%와 1~4%의 부분용융을 받았고, 단사휘석의 LREE 부화 패턴은 이들 지역 상부맨틀이 은폐 맨틀교대작용을 받았음을 지시한다.

주요어 : 백령도, 보은, 단사휘석, 스피넬 페리도타이트, 은폐 맨틀교대작용

ABSTRACT : Modal and chemical compositions of clinopyroxenes in spinel peridotites from the Baegryeong Island and the Boeun, enclosed in Miocene alkali basalt, are important for understanding the pre-eruptive temperature condition and chemical processes such as mantle depletion and enrichment. All spinel peridotites show transitional texture between protogranular and porphyroclastic textures. Temperature ranges of spinel peridotites from the Baegryeong Island and the Boeun at 15 kb are 773~1188°C and 705~1106°C, respectively. The spinel peridotites from the Baegryeong Island and the Boeun have undergone the 1~10% and 1~4% fractional melting, which were determined by using primitive mantle-normalized Y and Yb of clinopyroxenes. LREE enrichment patterns of clinopyroxene indicate that these rocks from both areas have undergone cryptic mantle metasomatism without new minerals.

Key words : baegryeong island, boeun, clinopyroxene, spinel peridotite, cryptic mantle metasomatism

*교신저자: shlee@kbsi.re.kr

서 언

알칼리현무암 혹은 킴벌라이트에 포획되어 빠른 속도로 지표에 노출된 상부맨틀 암석은 상부맨틀의 물리적, 화학적 특징을 알려 주는 도구로서 사용되어지고 있다(Maaløe and Aoki 1977; Bonatti *et al.* 1986; Nixon 1987; Witt and Seck 1987; Zipfel and Wörner, 1992). 포획되어 지표에 노출된 상부맨틀 암석은 전 세계적으로 널리 분포하고 있고, 우리나라에서도 신생대 알칼리현무암에 포획된 상부맨틀 암석이 백령도, 강원도 고성군 간성 일원, 충북 보은군 조곡리 일대와 제주도 등에서 발견된다(이문원, 1984; 김윤규 외, 1988; 윤성호 외, 1998; Choi, 2000; Choi *et al.*, 2001; 김규한 외, 2002; Choi *et al.*, 2002; Lee, 2002; 양경희, 2004) (그림 1).

우리나라에서 발견되는 상부맨틀 암석은 모두 스피넬 페리도타이트이고 감람석, 사방휘석, 단사휘석, 스피넬로 구성되어져 있다. 단사휘석의 M2-site는 감람석, 사방휘석의 M2-site와 스피넬의 octahedral site보다 크기 때문에, 단사휘석은 스피넬 페리도타이트를 구성하는 광물 중에서 희토류원소, Ti, Zr을 가장 많이 함유하고 있다. 이러한 원소들의 함량은 스피넬, 감람석, 사방휘석, 단사휘석 순으로 많아진다(Nagasawa *et al.*, 1980; Stosch, 1982). 이러한 이유에서 단사휘석의 지화학적 특징은 상부맨틀에서 일어나는 일련의 지화학적 과정을 밝히는데 중요하다.

이 연구를 위해 스피넬 페리도타이트를 채취한 지역은 백령도와 충북 보은이다(그림 1). 백령도는 지질 및 지구구조적으로 평남분지의 남서부에 해당한다. 이 지역은 중-신원생대 상원계의 변성퇴적암누층과 이를 관입한 맥암류, 신생대 진천현무암, 그리고 미고결층으로 구성되어져 있다(임순복 외, 1998). 스피넬 페리도타이트를 포획한 진천 현무암은 후기 마이오세(6.4~7.1 Ma)에 분출하였다(Kim *et al.*, 2004). 다른 연구 지역인 충남 보은은 경기육괴와 영남육괴 사이의 옥천대 내에 위치하고 있다(그림 1). 보은 스피넬 페리도타이트를 포획한 알칼리현무암은 옥천대 내에서 소규모(약 300 m)로 분포하고 있고, 연대는 11.1 Ma로 백령도 진천현무암과 같이 후기 마이오세에 해당한다(Kim *et al.*, 2004). 백령도와 보은 알칼리현무암에 포획된

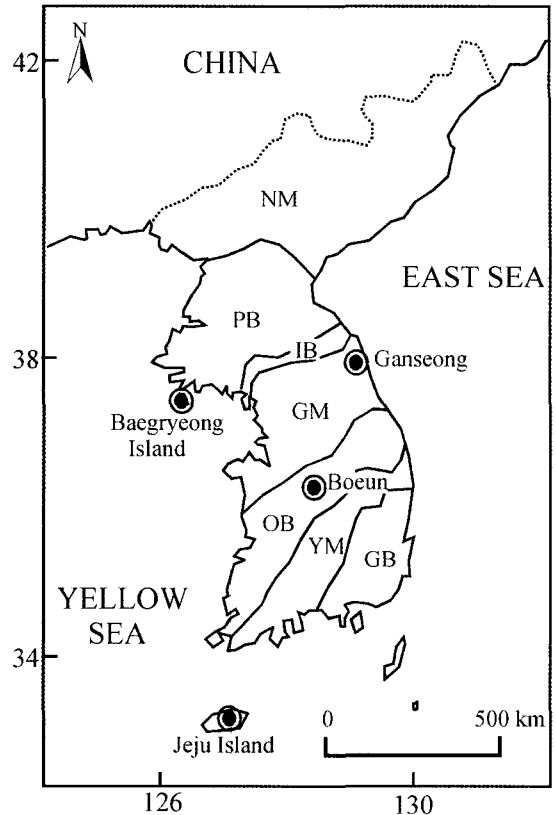


Fig. 1. Simplified tectonic map showing the sampling locations of Baegryeong Island and the Boeun mantle xenolith sites. NM = Nangrim massif, PB = Pyeongnam basin, IB = Imjingang belt, GM = Gyeonggi massif, OB = Ogcheon belt, YM = Yeongnam massif, and GB = Gyeongsang basin.

스피넬 페리도타이트는 장경이 최대 10 cm에 이른다.

이 연구의 목적은 백령도와 보은에 분포하는 마이오세 알칼리현무암에 포획된 스피넬 페리도타이트 내의 단사휘석의 주성분원소, 미량원소, 희토류원소를 분석하여, 이들 지역 상부맨틀의 지구화학적 과정들을 단사휘석을 통해 고찰하는데 있다.

암석기재 및 연구방법

모드 조성을 통하여 백령도와 보은 지역 스피넬 페리도타이트를 그림 2와 같이 분류하여 보았다. 5% 단사휘석의 양을 기준으로 스피넬 페리도타이트는 스피넬 레졸라이트와 스피넬

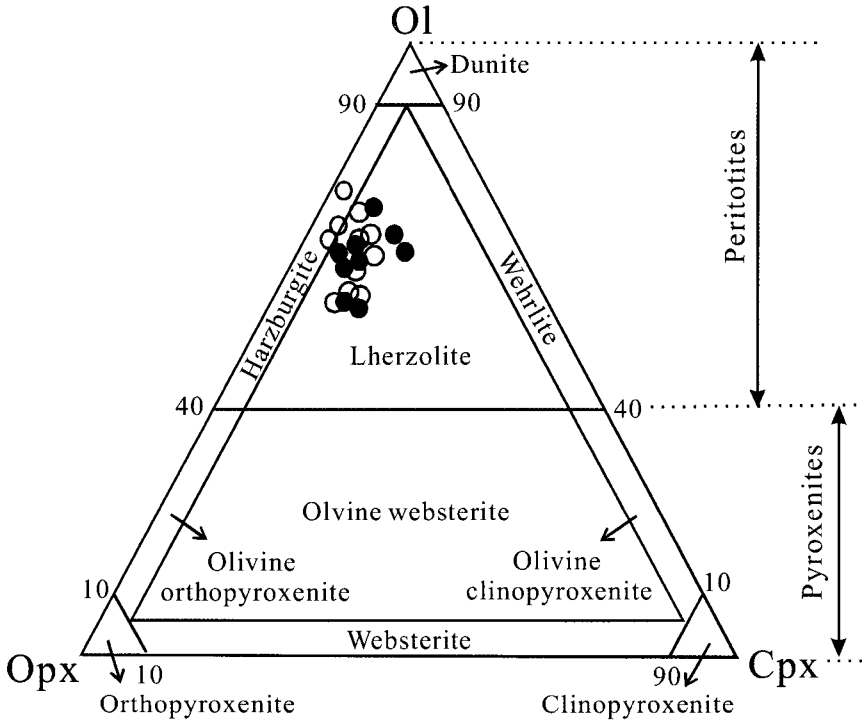


Fig. 2. Modal composition of spinel peridotites from the Baegryeong Island (open circle) and the Boeun (solid circle). Ol = olivine, Opx = orthopyroxene, and Cpx = clinopyroxene.

하프버자이트로 분류된다(Streckeisen, 1974). 보은 스피넬 페리도타이트는 단사휘석 함량이 7.0~16.8%로 모두 스피넬 레졸라이트로 분류되고, 백령도 스피넬 페리도타이트는 2.3~13.0%로 스피넬 레졸라이트와 하프버자이트로 분류된다(표 1, 그림 2).

스피넬 페리도타이트는 원생입상조직(proto-granular texture), 반상쇄설조직(porphyroclastic texture), 등립상조직(equigranular texture)으로 구분된다(Mercier and Nicolas, 1975; Harte, 1977). 원생입상조직에서는 조립의 입자들이 1 mm 이상의 크기로 나타나며, 다각형의 네오블라스트(neoblast)를 거의 함유하고 있지 않다. 등립상조직에서는 완전히 재결정된 세립 입자들이 1 mm 이하 크기로 나타나며, 대부분 네오블라스트로 구성되어 있다. 반상쇄설조직은 입자 크기와 네오블라스트 함량이 원생입상조직과 등립상조직의 중간이다. Mercier and Nicolas (1975)는 원생입상조직, 반상쇄설조직, 등립상조직 순으로 변형 정도가 증가한다고 하였다. 백령도와 보은 스피넬 페리도타이트는 원생입상조직과

반상쇄설조직 사이의 전이 조직을 보인다. 백령도와 보은 스피넬 페리도타이트 내의 타형의 단사휘석은 불규칙적인 크기를 가지고 있고, 크기가 모두 2 mm 이하이다. 단사휘석은 사방휘석과 용리구조(exsolution lamelle)를 보이기도 한다.

단사휘석 및 사방휘석의 주성분 원소를 분석하고자 한국기초과학지원연구원의 전자현미분석기(Cameca SX-50)를 이용하였다. 분석조건은 가속전압 15 kV, 빔 전류 15 nA, 빔 직경 2~3 μm 이고, 주성분원소는 20~40초, 미량원소는 40~100초의 시간을 두고 분석하였다. 단사휘석의 미량원소 및 희토류원소 분석은 한국기초과학지원연구원의 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer), ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)을 이용하였다. 미량원소 중에서 Sr, Ba, Zr은 ICP-AES을 이용하여 분석하였고, 그 외의 미량원소와 희토류원소에 대하여서는 ICP-MS을 이용하였다. 평형 온도를 계산하기 위해 사용된 사방휘석과 단사휘석의 Fe^{3+} 과 Fe^{2+} 는 Droop

Table 1. Modal composition of spinel peridotites from the Baegryeong Island and the Boeun. Ol = olivine, Opx = orthopyroxene, Cpx = clinopyroxene, Sp = spinel, Sp-lh = spinel lherzolite, and Sp-ha = spinel harzburgite

Location	Baegryeong Island										
Sample	BR-1	BR-2	BR-3	BR-4	BR-5	BR-7	BR-8	BR-9	BR-10	BR-11	BR-12
	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-ha	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-ha	Sp-ha
Ol	71.2	56.8	66.4	68.2	63.2	68.4	58.1	56.2	62.0	67.4	75.6
Opx	21.1	28.4	23.2	21.4	22.3	25.2	28.1	31.9	26.1	28.0	21.6
Cpx	6.6	10.9	8.3	9.9	11.6	4.8	13.0	9.9	10.8	4.0	2.3
Sp	1.1	3.9	2.1	0.5	2.9	1.6	0.8	2.1	1.2	0.6	0.5
Cpx/Opx	0.31	0.38	0.36	0.46	0.52	0.19	0.46	0.31	0.41	0.14	0.11

Location	Boeun									
Sample	JC-1	JC-2	JC-3	JC-4	JC-5	JC-6	JC-7	JC-8	JC-9	
	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	
Ol	71.8	63.8	61.3	64.5	56.4	65.1	55.5	63.9	61.1	
Opx	18.9	17.4	28.0	17.1	30.7	24.5	29.2	27.6	24.6	
Cpx	8.7	16.8	9.0	13.4	11.9	8.8	14.5	7.0	10.6	
Sp	0.6	1.9	1.8	5.0	1.0	1.7	0.8	1.5	3.8	
Cpx/Opx	0.46	0.96	0.32	0.78	0.39	0.36	0.50	0.25	0.43	

(1987)의 방법을 사용하여 계산하였다.

단사회석의 화학조성

단사회석의 주성분원소, 미량원소, 희토류원소 분석결과는 표 2, 표 3과 같다. 백령도 스피넬 페리도타이트 내의 단사회석은 좁은 범위의 Mg-Fe-Ca 성분을 가진다(En₄₇Fs₄Wo₄₄-En₅₂Fs₆Wo₆₈). 단사회석의 Mg-number[(Mg)/(Mg+Fe²⁺)]는 0.90~0.94이고, Cr-number[(Cr)/(Cr+Fe³⁺+Al)]는 0.13~0.16이다. 보은 스피넬 페리도타이트 내의 단사회석은 투회석으로 분류되고, 매우 좁은 범위의 Mg-Fe-Ca 성분을 가진다(En₄₆Fs₅Wo₄₈-En₄₈Fs₆Wo₄₈). 이 단사회석의 Mg-number, Cr-number는 각각 0.93~0.98과 0.08~0.12이다. 백령도, 보은 단사회석의 MgO 성분은 각각 14.55~15.05 wt%, 14.72~17.27 wt%이다. 두 지역의 단사회석에서는 MgO 성분이 감소하면서 Al₂O₃, TiO₂, Y의 성분은 증가하는 경향을 보인다(그림 3). 이러한 경향은 상부맨틀 기원의 스피넬 페리도타이트의 부분용융 정도의 차이에서 기인된다(Norman, 1998).

단사회석의 희토류원소를 Hofmann (1988)의

원시맨틀(primitive mantle) 값으로 표준화하여 보면, 백령도 스피넬 레졸라이트 내의 단사회석의 패턴은 스푼 모양(spooned-shaped)의 패턴을 보이고, 스피넬 하쯔버자이트 내의 단사회석은 LREE가 부화(LREE-enriched)된 패턴을 보인다(그림 4a). (La/Yb)_n 값은 스피넬 레졸라이트 내의 단사회석은 0.2~2.6으로 낮으나, 스피넬 하쯔버자이트 내의 단사회석은 11.5~18.1로 높다.

스피넬 레졸라이트만 산출되는 보은 지역의 단사회석의 희토류원소를 원시맨틀 값으로 표준화하여 보면, 백령도 스피넬 레졸라이트와 유사한 스푼 모양의 패턴을 보인다. 이 지역 단사회석의(La/Yb)_n 값은 0.33~3.02이다.

결과 및 토의

지온도계에 의한 온도 추정

경하에서 광물 상호간은 뚜렷한 경계를 이루고 있고, 구성 광물의 경계가 삼중점을 보인다. 또한 광물간의 반응연이 관찰되지 않고, 광물의 중심부와 주변부의 화학조성은 차이를 보이지 않는다. 그러므로 백령도, 보은 스피넬 페리도

Table 2. Representative major element analyses (wt%) of clinopyroxene and orthopyroxene in spinel peridotite xenoliths from the Baegryeong Island and the Boeun. Cpx = clinopyroxene and Opx = orthopyroxene

Location	Baegryeong Island									
Sample	BR-1		BR-2		BR-3		BR-4		BR-5	
	Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh	
Mineral	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx
SiO ₂	52.59	55.01	51.75	54.76	52.62	54.76	51.95	55.33	52.13	54.63
TiO ₂	0.45	0.10	0.51	0.12	0.23	0.07	0.45	0.14	0.57	0.07
Al ₂ O ₃	6.00	3.88	6.50	4.26	5.83	4.03	5.86	3.77	6.11	4.25
Cr ₂ O ₃	1.03	0.38	0.69	0.28	0.79	0.33	0.99	0.24	0.63	0.29
FeO	2.35	5.65	2.62	6.38	2.84	6.39	2.53	5.84	2.63	6.86
MnO	0.09	0.13	0.12	0.20	0.10	0.15	0.05	0.15	0.12	0.14
MgO	15.22	33.42	14.72	33.09	15.25	32.80	15.21	33.80	14.85	32.74
CaO	20.33	0.62	20.70	0.54	20.64	0.53	21.34	0.47	20.91	0.51
Na ₂ O	1.74	0.10	1.72	0.08	1.55	0.07	1.58	0.04	1.60	0.07
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Total	99.78	99.44	99.37	99.87	99.37	99.87	99.37	99.87	99.37	99.87

Location	Baegryeong Island									
Sample	BR-7		BR-8		BR-9		BR-10		BR-11	
	Sp-hz		Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh		Sp-hz	
Mineral	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx
SiO ₂	53.47	56.36	51.99	54.35	52.14	54.63	52.10	54.70	53.49	56.11
TiO ₂	0.11	0.01	0.45	0.08	0.53	0.13	0.51	0.09	0.05	0.09
Al ₂ O ₃	2.20	1.77	6.16	4.32	6.24	4.21	6.46	3.96	2.14	3.09
Cr ₂ O ₃	0.92	0.35	0.46	0.22	0.69	0.33	0.65	0.27	1.71	0.41
FeO	1.84	5.40	3.00	6.96	2.59	6.27	2.53	6.41	2.72	5.77
MnO	0.16	0.18	0.13	0.14	0.09	0.15	0.12	0.16	0.07	0.16
MgO	16.83	34.64	15.22	32.43	15.24	32.65	14.86	32.73	17.27	33.84
CaO	23.37	0.45	20.94	0.57	20.58	0.54	20.55	0.50	20.55	0.45
Na ₂ O	0.60	0.01	1.49	0.07	1.66	0.07	1.80	0.06	1.00	0.21
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.03
Total	99.37	99.87	99.37	99.87	99.37	99.87	99.37	99.87	99.37	99.87

타이트가 모마그마에 포획되기 전에 평행 상태에 놓여져 있었다는 것을 알 수 있다. 단사휘석과 사방휘석의 주성분원소들을 이용하여 이들 지역의 상부맨틀의 온도를 추정하여 보았다. 온도 추정에 사용된 지온계는 Wood and Banno (1973), Bertrand and Mercier (1985), Brey and Köhler (1990)의 단사휘석-사방휘석 지온도계이다. 계산된 온도는 표 4와 같다. 스피넬 페리도타이트에 적용할 수 있는 유일한 지압계는 Kö-

hler and Brey (1990)의 지압계이나, 이 지압계는 온도의 영향을 많이 받을 뿐만 아니라, ppm 단위의 감람석 내의 Ca 성분을 정확하게 측정하여야 하는 어려움으로 인하여 지압계로 사용할 수 없음이 제시되고 있다(O'Reilly *et al.*, 1997; Kil and Wendlandt, 2004). 그러므로 평형 온도는 스피넬 페리도타이트 안정압력의 중간 값인 15 kb에 해당하는 압력을 가정하여 계산되었다(표 4). 위의 단사휘석-사방휘석 지온도

Continued.

Location	Baegryeong Island				Boeun					
Sample	BR-12		JC-1		JC-2		JC-3		JC-4	
	Sp-hz		Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh	
Mineral	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx
SiO ₂	52.56	55.91	51.29	54.58	51.44	54.79	51.57	54.57	51.24	54.52
TiO ₂	0.49	0.21	0.61	0.13	0.58	0.16	0.59	0.12	0.53	0.14
Al ₂ O ₃	4.23	2.95	6.77	4.64	7.01	4.49	6.74	4.64	6.91	4.23
Cr ₂ O ₃	1.63	0.80	0.76	0.40	0.69	0.33	0.61	0.32	0.92	0.34
FeO	2.47	4.74	2.48	6.26	2.71	6.30	2.72	6.78	2.82	6.75
MnO	0.00	0.10	0.11	0.20	0.07	0.14	0.02	0.17	0.09	0.23
MgO	16.65	34.51	14.65	32.98	14.94	32.99	14.79	32.87	14.67	33.37
CaO	19.53	1.03	21.04	0.51	20.11	0.68	20.43	0.63	20.27	0.59
Na ₂ O	1.34	0.12	1.74	0.07	1.86	0.11	1.76	0.11	1.67	0.09
K ₂ O	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Total	99.37	99.87	99.45	99.80	99.41	99.98	99.23	100.22	99.14	100.25

Location	Boeun									
Sample	JC-5		JC-6		JC-7		JC-8		JC-9	
	Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh		Sp-lh	
Mineral	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx
SiO ₂	51.45	54.77	51.40	55.55	51.62	54.57	51.43	54.12	51.51	54.52
TiO ₂	0.56	0.18	0.50	0.11	0.33	0.06	0.66	0.20	0.63	0.07
Al ₂ O ₃	7.03	4.70	5.43	3.77	6.28	4.56	7.05	4.82	6.86	4.39
Cr ₂ O ₃	0.72	0.28	0.87	0.34	0.90	0.40	0.78	0.41	0.68	0.29
FeO	3.06	6.62	2.19	6.43	2.56	6.58	2.64	6.13	2.91	6.83
MnO	0.02	0.07	0.13	0.18	0.11	0.17	0.00	0.13	0.08	0.18
MgO	14.91	32.91	15.05	33.71	14.91	33.08	14.55	32.03	14.86	33.03
CaO	19.70	0.70	22.49	0.47	21.08	0.62	20.42	1.52	20.43	0.53
Na ₂ O	1.79	0.21	1.22	0.05	1.56	0.07	2.03	0.21	1.70	0.09
K ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00
Total	99.26	100.45	99.27	100.62	99.38	100.15	99.59	99.59	99.67	99.95

계들을 이용하여 얻은 백령도 스피넬 페리도타이트의 평균 온도는 773~1188℃이고, 보은 스피넬 페리도타이트의 평균 온도는 705~1106℃이다. 백령도 스피넬 페리도타이트의 평균 평형 온도(1078℃)는 보은 스피넬 페리도타이트의 평균 평형 온도(1000℃)보다 78℃ 정도 높다.

맨틀결핍작용

스피넬 페리도타이트 내의 단사회석의 화학 조성과 모드조성은 스피넬 페리도타이트가 부

분용융을 받았다는 증거로 사용된다. 부분용융 정도가 증가할수록 스피넬 페리도타이트 내의 단사회석의 양과 단사회석/사방회석의 비는 줄어든다(Wilson, 1989). 보은 스피넬 페리도타이트는 백령도 스피넬 페리도타이트 보다 단사회석의 함량이 많고, 단사회석/사방회석의 비가 높다(그림 3d). 이것은 보은 지역의 상부맨틀의 부분용융 정도가 백령도 지역 상부맨틀보다 적었다는 것을 의미한다.

그림 3a, 3b, 3c에서 백령도, 보은 스피넬 페리도타이트 내의 단사회석 MgO는 Al₂O₃, TiO₂,

Table 3. Representative trace and rare earth element analyses (ppm) of clinopyroxenes in spinel peridotites from the Baegryeong Island and the Boeun

Location	Baegryeong Island						
	Clinopyroxene in spinel peridotite xenoliths						
Sample	BR-2	BR-3	BR-5	BR-7	BR-8	BR-9	BR-11
	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-ha	Sp-lh	Sp-lh	Sp-ha
Rb	0.21	0.32	0.21	1.25	0.26	0.16	3.29
Sr	32.0	92.7	53.3	206.6	24.5	34.8	217.5
Y	18.2	17.3	21.2	5.9	20.2	18.4	11.7
Zr	15.0	29.9	15.1	21.3	15.6	23.0	19.6
Nb	0.31	1.20	0.90	2.37	0.29	0.42	4.44
Ba	0.3	11.25	0.7	4.9	2.3	0.8	19.1
La	0.68	7.24	2.68	15.00	0.75	1.01	10.35
Ce	1.93	16.16	4.22	26.84	1.81	2.58	30.57
Pr	0.41	2.10	0.53	3.00	0.39	0.54	4.79
Nd	2.63	8.83	3.02	10.61	2.68	3.48	22.64
Sm	1.29	2.03	1.55	1.98	1.39	1.57	6.01
Eu	0.57	0.71	0.66	0.58	0.59	0.62	1.89
Gd	2.30	2.45	2.67	1.53	2.41	2.50	5.37
Tb	0.43	0.44	0.52	0.21	0.49	0.47	0.71
Dy	3.10	2.98	3.68	1.17	3.50	3.19	3.21
Ho	0.71	0.66	0.83	0.23	0.78	0.73	0.49
Er	2.15	2.01	2.49	0.64	2.39	2.17	1.01
Tm	0.31	0.29	0.36	0.09	0.35	0.31	0.11
Yb	1.93	1.88	2.31	0.56	2.15	1.94	0.61

Location	Boeun						
	Clinopyroxene in spinel peridotite xenoliths						
Sample	JC-1	JC-2	JC-3	JC-4	JC-5	JC-6	JC-7
	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh
Rb	0.99	0.34	0.38	0.30	0.88	0.44	1.24
Sr	62.6	52.8	61.5	56.1	156.9	53.5	143.6
Y	23.0	18.0	19.8	22.0	16.5	19.5	17.8
Zr	37.5	36.2	33.0	32.3	30.8	29.6	61.8
Nb	0.47	0.16	0.39	0.40	0.68	0.54	3.13
Ba	1.39	0.60	1.75	2.43	4.72	2.35	33.59
La	1.62	0.94	1.18	1.77	7.72	1.37	6.86
Ce	5.07	3.32	3.99	3.77	14.24	4.15	16.33
Pr	1.03	0.67	0.78	0.89	1.68	0.79	2.22
Nd	5.86	3.95	4.47	4.92	6.52	4.31	9.59
Sm	2.33	1.62	1.84	2.01	1.79	1.72	2.53
Eu	0.88	0.68	0.74	0.79	0.64	0.69	0.90
Gd	3.22	2.43	2.77	3.05	2.32	2.64	2.93
Tb	0.61	0.47	0.51	0.58	0.43	0.50	0.51
Dy	4.08	3.21	3.46	3.86	2.90	3.40	3.29
Ho	0.90	0.71	0.78	0.86	0.64	0.76	0.71
Er	2.72	2.14	2.30	2.55	1.91	2.27	2.06
Tm	0.39	0.31	0.33	0.37	0.26	0.32	0.30
Yb	2.43	1.91	2.09	2.23	1.73	2.02	1.84

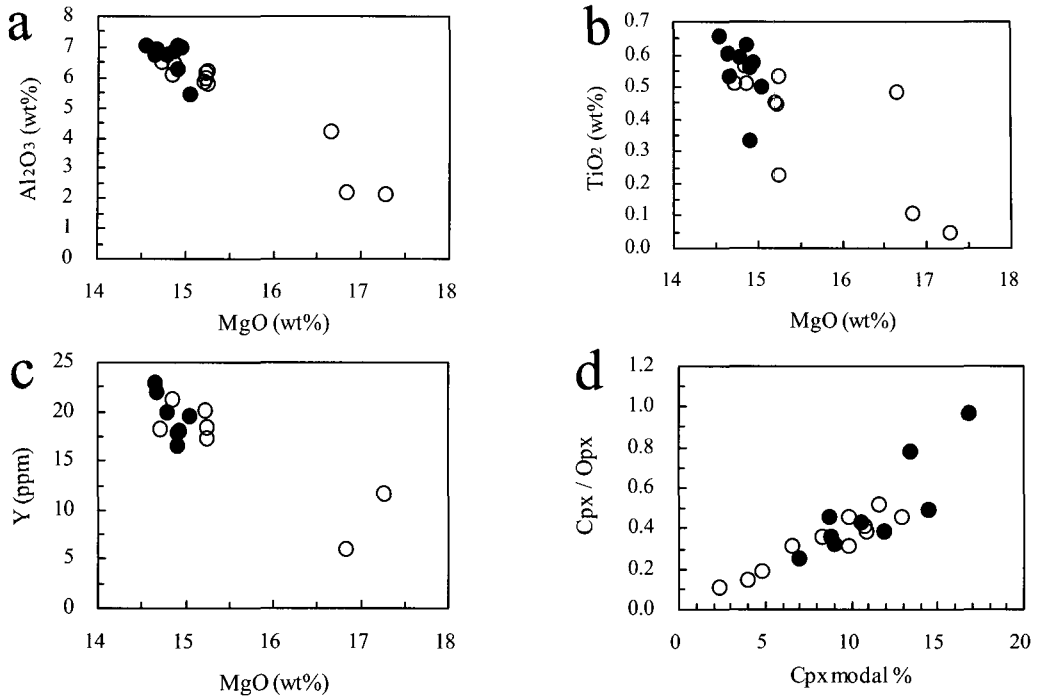


Fig. 3. (a)~(c) MgO vs. Al₂O₃, TiO₂, and Y contents of clinopyroxenes and (d) clinopyroxene (Cpx) modal percentage vs. Cpx/Opax ratio in the spinel peridotites from the Baegryeong Island (open circle) and the Boeun (solid circle). Cpx = clinopyroxene and Opax = orthopyroxene.

Y의 증가에 따라 감소한다. 단사회석 내의 이들 원소들의 변화는 백령도, 보은 지역의 상부 맨틀이 부분용융을 경험하였다는 것을 지시한다. 보은 스피넬 페리도타이트 내의 단사회석은 백령도 스피넬 페리도타이트 내의 단사회석에 비하여 상대적으로 MgO 성분은 낮고 Al₂O₃, TiO₂, Y 성분은 높다. 이러한 경향 또한 부분용융 정도가 보은 지역 상부맨틀에서 상대적으로 적었음을 의미한다(그림 3).

백령도와 보은 지역 상부맨틀의 부분용융 정도를 계산하기 위하여 그림 5와 같이 맨틀교대작용에 영향을 가장 적게 받는 원소인 Y와 Yb를 이용하였다. Hofmann (1988)의 원시맨틀 값으로 표준화한 Y, Yb 값은 분별용융(fractional melting)과 배치용융(batch melting)이 적용되었다(그림 5). 일반적으로 알칼리현무암은 맨틀이 20% 이하로 부분용융되어 형성되어진다(Wilson, 1989). 그러나 배치용융 모델로 계산된 백령도 상부맨틀의 부분용융 정도가 1~30%로 매우 높다(그림 5a). 그러므로 백령도, 보은 지역 상부맨틀은 배치용융 모델보다는 분별용융 모델

에 적용하여 부분용융 정도가 계산되어야 한다. 그림 5b에서와 같이 분별용융 모델을 백령도, 보은 지역 스피넬 페리도타이트에 적용하여 본 결과, 부분용융 정도가 백령도 지역 상부맨틀은 1~10%이고, 보은 지역 상부맨틀은 1~4%이다(그림 5b).

맨틀교대작용

맨틀교대작용이란 불호정성 원소인 K, Rb, Sr, Ba, LREE, Ti, Nb, Zr, P, U, Th 같은 원소들이 맨틀암석에 부화된 현상이다(Bailey, 1970; Dawson, 1984). 맨틀 교대작용은 각섬석, 금운모와 같은 함수 광물이나 저어콘, 인회석과 같은 광물들이 새로이 형성되는 특성 교대작용(patent metasomatism)과 새로운 광물들을 포함하지 않으나, 불호정성 원소들이 부화된 은폐 교대작용(cryptic metasomatism)으로 구분한다(Dawson, 1984). 맨틀교대작용은 매체는 LREE가 부화된 규산염 용융체(silicate melt), 카보나타이트 용융체(carbonatite melt), 혹은 H₂O-CO₂ 유체(fluid)이다

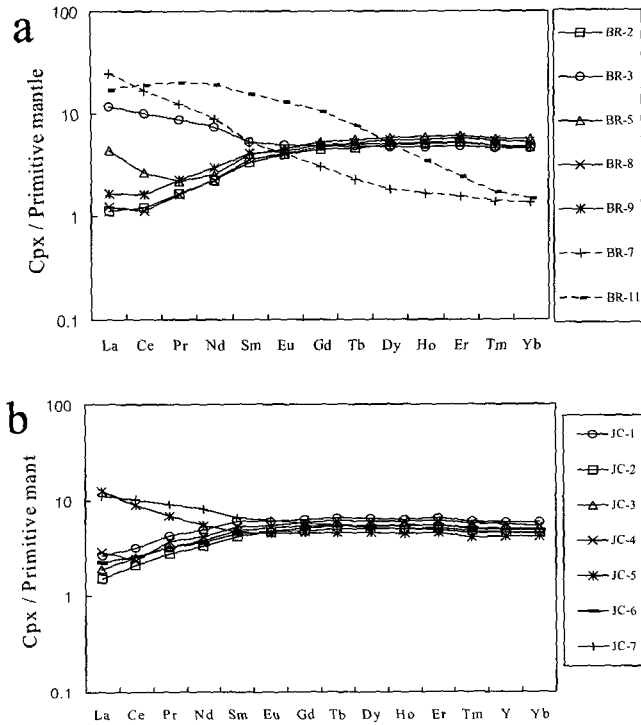


Fig. 4. Primitive mantle-normalized REE patterns of clinopyroxenes from (a) the Baegryeong Island and (b) Boeun. Primitive mantle values are from Hofmann (1988). Solid lines and dotted lines indicate spinel lherzolites and spinel harzburgites, respectively.

(Kil and Wendlandt, 2004).

경하에서 관찰된 백령도, 보은 스피넬 페리도타이트는 새로운 함수 광물을 포함하고 있지 않다. 그러나 단사휘석의 희토류원소들을 원시 맨틀 값으로 표준화한 결과 LREE가 부화되었다(그림 4). 그러므로 이들 지역 내의 상부맨틀은 새로운 광물을 포함하지 않는 은폐 교대작용(cryptic metasomatism)을 받았다. 이러한 은폐 교대작용은 제주도 상부맨틀 암석에서도 보고되었다(Choi *et al.*, 2002).

백령도 스피넬 레졸라이트와 보은 스피넬 레졸라이트내의 단사휘석에서 LREE의 부화 정도는 비슷하나, 백령도 스피넬 하프버자이트내의 단사휘석은 스피넬 레졸라이트내의 단사휘석보다 LREE 부화 정도가 크다(그림 4a). Menzies and Hawkesworth (1987)는 유체의 이동학적인 제한성 때문에 맨틀교대작용의 중요 매체가 용

융체(melt)라고 언급하였다. 또한 카보나타이트와 관련된 암석들이 백령도, 보은 지역에서 관찰되지 않는 것은, 연구지역 상부맨틀에서 일어나는 맨틀 교대작용의 매체가 LREE가 부화된 규산염 용융체일 가능성이 매우 높다.

결론

- 1) 백령도 스피넬 페리도타이트는 스피넬 레졸라이트와 스피넬 하프버자이트로 분류되고, 보은 스피넬 페리도타이트는 단사휘석 함량이 5% 이상의 스피넬 레졸라이트로 분류된다.
- 2) 입자 크기와 네오블라스트 함량에 따른 조직 분류에서, 백령도, 보은 스피넬 페리도타이트는 원생입상조직과 반상쇄설조직 사이의 전이 조직을 보인다.
- 3) 단사휘석-사방휘석 지온도계를 이용하여

Table 4. P-T data for spinel peridotites from the Baegryeong Island and the Boeun. T_{WB} = Wood and Banno (1973), T_{BM} = Bertrand and Mercier (1985), and T_{BK} = Brey and Köhler (1990). Sp-lh = spinel lherzolite, and Sp-ha = spinel harzburgite

Location	Baegryeong Island										
	BR-1	BR-2	BR-3	BR-4	BR-5	BR-7	BR-8	BR-9	BR-10	BR-11	BR-12
Sample	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-ha	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-ha	Sp-ha
T_{WB} (°C) at 15 kb	1072	1038	1056	1043	1019	986	1053	1056	1034	1150	1188
T_{BM} (°C) at 15 kb	1260	1239	1243	1217	1221	1010	1230	1251	1251	1240	1287
T_{BK} (°C) at 15 kb	991	915	971	868	910	773	937	953	924	1061	1136

Location	Boeun								
	JC-1	JC-2	JC-3	JC-4	JC-5	JC-6	JC-7	JC-8	JC-9
Sample	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh	Sp-lh
T_{WB} (°C) at 15 kb	1027	1082	1056	1077	1106	967	1048	1064	1072
T_{BM} (°C) at 15 kb	952	1070	1071	1106	1149	827	1015	987	1089
T_{BK} (°C) at 15 kb	847	969	941	986	1030	705	897	902	968

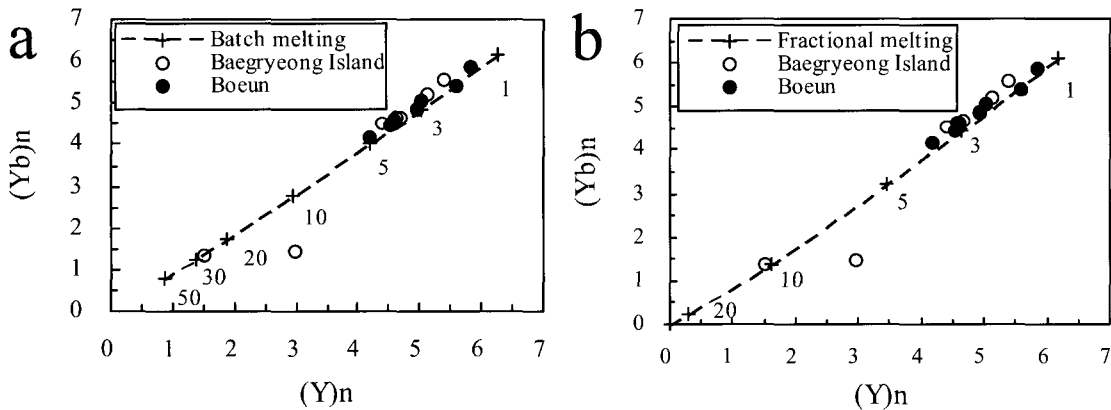


Fig. 5. Comparison of partial melting models of clinopyroxene in spinel peridotites from the Baegryeong Island (open circle) and the Boeun (solid circle). (a) batch melting (between 1 to 50%) and (b) fractional melting (between 1 to 20%) for (Y)n and (Yb)n contents in clinopyroxene from the Baegryeong Island and the Boeun spinel peridotites. The Baegryeong Island and Boeun spinel peridotites have undergone 1~10% and 1~4% fractional melting, respectively. Primitive mantle values are from Hofmann (1988).

얻은 백령도 스피넬 페리도타이트의 평형 온도는 15 kb 압력 하에서 773~1188°C이고, 보은 스피넬 페리도타이트의 평형온도는 705~1106°C이다.

4) 단사회석의 모드조성과 화학조성을 이용하여 얻은 백령도 상부맨틀의 부분용융 정도는 1~10%이고, 보은 상부맨틀의 부분용융 정도는

1~4%이다. 또한 백령도, 보은 지역 상부맨틀은 새로운 광물을 포함하지 않고, 단지 LREE가 부화된 은폐 맨틀교대작용을 받았다.

사 사

본 논문에 대해 비평과 아낌없는 조언을 해 주신

윤성효 교수님과 익명의 심사위원님, 화학분석에 도움을 주신 한국기초과학지원연구원의 신헌선 박사님과, 류종식 연구원, 임소현님께 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김규환, Nagao Keisuke, 장형숙, Sumino Hirochika, 정정인 (2002) 백령도에 분포하는 알칼리 현무암과 맨틀 포획암의 Nd-Sr과 영축기체 동위원소. *자원환경지질*, 35, 523-532.
- 김윤규, 이대성, 송윤구, 김선익 (1988) 보은지역 조곡리 현무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. *지질학회지*, 24, 57-66.
- 양경희 (2004) 제주도의 하부지각/상부맨틀 기원의 포획암에 포획된 유체포유물: 예비연구. *암석학회지*, 13, 34-45.
- 윤성효, 고정선, 안지영 (1998) 제주도 동부 알칼리 현무암내 스피넬-레졸라이트 포획체의 연구. *자원환경지질*, 31, 447-458.
- 이문원 (1984) 제주화산암류에 포획된 mafic 포획암. *지질학회지*, 20, 306-313.
- 임순복, 최현일, 김복철, 김정찬 (1998) 분지별 퇴적 시스템 연구(I) - 원생대 백령층군 및 태안층. *한국자원연구소 보고서*, 116p.
- Bailey, D.K. (1970) Volatile flux, heat focusing and the generation of magma. *Geol. J. Spec. Issue No 2*, 177-186.
- Bertrand, P. and Mercier, J.C.C. (1985) The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 76, 109-122.
- Bonatti, E., Ottonello, G., and Hamlyn, P.R. (1986) Peridotites from Island of Zabargad (St. John) Red Sea: Petrology and geochemistry. *J. Geophys. Res.*, 91, 599-631.
- Brey, G.P. and Köhler, T. (1990) Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.*, 31, 1353-1378.
- Choi, S-H. (2000) Oxidation state of mantle xenoliths from Jeju-do, South Korea. *Geosci. J.*, 4, 211-220.
- Choi, S-H., Jwa, Y-J., and Lee, H-Y. (2001) Geothermal gradient of the upper mantle beneath Jeju Island, Korea: Evidence from mantle xenoliths. *Island Arc*, 10, 175-193.
- Choi, S-H., Lee, J-I., Park C-H., and Moutte, J. (2002) Geochemistry of peridotite xenoliths in alkali basalts from Jeju Island, Korea. *Island Arc*, 11, 221-235.
- Dawson, J. B. (1984) Contrasting types of upper mantle metasomatism? In: Kornprobst, J. (eds.), *Kimberlites II*, pp. Elsevier, Amsterdam, 289-294.
- Droop, G.T.R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineral. Mag.*, 51, 431-435.
- Harte, B. (1977) Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallization textures in olivine-bearing xenolith. *J. Geo.*, 85, 279-288.
- Hofmann, A. W. (1988) Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90, 297-314.
- Kil, Y. and Wendlandt, R.F. (2004) Pressure and temperature evolution of upper mantle under the Rio Grande Rift. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148, 265-280.
- Kim, K.H., Nagao, K., Tanaka, T., Sumino, H., Nakamura, T., Okuno, M., Ishitsuka, Y., Jin, B.L., and Song, J.H. (2004) He-Ar and Nd-Sr isotopic compositions of ultramafic xenoliths and host alkali basalts from the Korean peninsula. Abstract of annual meeting of the Korea Society of Economic and Environmental Geology, 125.
- Köhler, T.P. and Brey, G.P. (1990) Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 54, 2375-2388.
- Lee, H.Y. (2002) Petrology of Spinel lherzolite from South Korea: Implication of P/T Estimate. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 23, 38-51.
- Maaløe, S. and Aoki, K. (1977) The major element composition of upper mantle estimated from the composition of lherzolites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 63, 161-173.
- Menzies, M.A. and Hawkesworth, C.J. (1987) *Mantle metasomatism*. Academic Press, London, 472p.
- Mercier, J.C. and Nicolas, A. (1975) Texture and fabrics of upper mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *J. Petrol.*, 16, 454-487.
- Nagasawa, H., Schreiber, H.D., and Morris, R.V. (1980) Experimental mineral/liquid partition coefficients of the rare earth elements (REE), Sc and Sr for perovskite, spinel and melilite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 46, 431-437.
- Nixon, P.H. (1987) *Mantle xenoliths*. Wiley and Sons, New York, 844p.
- Norman, M.D. (1998) Melting and metasomatism in the continental lithosphere: laser ablation ICP-MS analysis of minerals in spinel lherzolites from eastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 130, 240-255.

- O'Reilly, S.Y., Chen, D., Griffin, W.L., and Ryan, C.G. (1997) Minor elements in olivine from spinel lherzolite xenoliths: implications for thermobarometry. *Mineral. Mag.*, 61, 257-269.
- Stosch, H.G. (1982) Rare earth element partitioning between minerals from anhydrous spinel peridotite xenoliths. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 46, 793-811.
- Streckeisen, A. (1974) To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci. Rev.*, 12, 1-33.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, 466p.
- Witt-Eickchen, G. and Seck, H.A. (1987) Temperature of sheared mantle xenoliths from the West Eifel, West Germany: evidence for mantle diapirism beneath the Rhenish massif. *J. Petrol.*, 28, 475-493.
- Wood, B. J. and Banno, S. (1973) Garnet- orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42, 109-124.
- Zipfel, J. and Wörner, G. (1992) Four- and five-phase peridotites from a continental rift system: evidence for upper mantle uplift and cooling at the Ross Sea margin (Antarctica). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 111, 24-36.
-
- 2005년 3월 14일 원고접수, 2005년 3월 22일 게재승인.