

## MHz 대역의 저손실 Mn-Zn Ferrites 개발 동향

송 병 무

이수세라믹

### Development of Low Loss Mn-Zn Ferrites for MHz Application

Byung-Moo Song

ISU CERAMICS CO., LTD.

5-12 Bangye-Ri Munmark-Eup Wonju-Si Kangwon-do Korea

#### 1. 머리말

최근 전자산업의 비약적인 발전과 더불어 각종 전자 기기의 전원을 공급하는 전원부의 중요성이 크게 대두되고 있다. 특히 SMPS(switching mode power supply)로 불리는 전원공급기의 경우 컴퓨터, 정보통신기기, 가전기기의 전원으로 널리 사용되고 있다. 이러한 디지털 기기의 전원을 공급하는 전원공급기의 경우 전자 기기의 심장의 역할을 담당한다는 점에서 각종 전자 기기의 신뢰성, 성능의 고도화를 실현하는데 필수 불가결한 기초 기술이 되어 있다. 특히 미소전압 구동소자의 오동작 및 고장의 큰 원인이 불규칙한 전원에 상당 부분 기인한다는 점에서 볼 때 안정적인 고품질의 전원공급 기술이 매우 중요하다고 할 수 있다.

각종 디지털 전자기기에 사용되는 트랜스포머의 경우 일반적으로 Fig. 1에 나타난 바와 같이 Power MOSFET, 다수의 커패시터, 인덕터, 레지스터 그리고 페라이트 코아 등으로 구성되어 있다. 반도체 소자로 구성되어 있는 Power MOSFET의 경우는 고집적화 기술의 향상

에 의하여 1 MHz 대역까지 사용 가능한 IC가 개발되어 있으며, 커패시터, 인덕터, 레지스터의 경우는 multilayer 기술을 적용한 chip 화가 상당 부분 진행되어 있다. 그러나 페라이트 코아의 경우 상대적으로 다른 부품에 비하여 소형화가 뒤쳐져 있으므로 코아의 소형화가 전체 모듈의 소형화의 관건이 되고 있다.

페러데이 법칙에 따르면 작동 주파수를 60 Hz에서 100 kHz로 증가시킬 경우에는 증가되는 shape factor는 대략 1666배이며 이에 반비례하는 크기 감소를 이룰 수 있으므로 magnetic core의 소형 경량화는 작동 주파수를 어느 정도까지 증가시키느냐가 가장 중요한 문제이다. 현재 작동 주파수의 고주파화는 대략 300 kHz 영역까지 실용화 단계에 접어들고 있으며 가까운 장래에 수MHz의 작동주파수를 갖는 SMPS가 개발될 것으로 예측된다. 작동 주파수의 꾸준한 증가와 함께 이에 상응한 소프트 페라이트 코아의 재질 역시 지속적인 개발이 이루어져 왔다.

Mn-Zn ferrites는 높은 포화자속밀도와 비저항을 가지고 있는 대표적인 세라믹 연자성 재료로 대부분의 고주파 SMPS의 자심으로 사용되고 있다. Ni-Zn ferrites의 경우 높은 비저항 특성을 가지므로 상대적으로 높은 주파수 영역까지 사용이 가능하지만 투자율이 Mn-Zn ferrites의 1/10~1/100에 불과하므로 Mn-Zn ferrites계 코아보다 장점을 가지기 위해서는 최소한 구동 주파수가 5 MHz 이상이 되어야 한다는 조건을 가지게 된다. 그러나 이러한 환경에서는 Power MOSFET의 손실이 급증하게 되므로 Ni-Zn ferrites를 자심 재료로 적용하는 것은 상당한 제한이 있다.

Mn-Zn ferrites계 소프트 페라이트 코아는 높은 주파

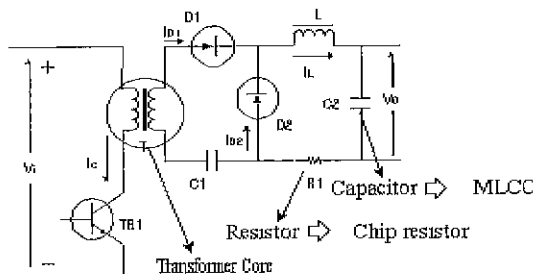


Fig. 1. Schematics of SMPS circuit (Flyback converter).

수와 강한 magnetic field 하에서 작동하기 때문에 core loss가 현저하게 증대된다는 문제가 있다. 이러한 전력손실은 주파수에 비례하여 급격히 증가해. 상용 재질에 있어서 1 MHz의 전력손실은 100 kHz에 비하여 1000배 정도로 나타나게 된다. 특히 전력손실은 주유 열 형태로 나타나며 트랜스포머와 주위 소자의 온도를 증가시켜 SMPS의 성능을 급격히 열화(degradation) 시키게 된다. 따라서 고주파 영역에서 전력손실을 어느 정도 감소시킬 수 있는가 하는 점이 고주파 페라이트 자성재료 개발에 있어서 핵심 과제이다. 현재 Mn-Zn ferrites에서 발생하는 손실은 원인에 따라 크게 hysteresis loss, eddy current loss, residual loss로 구분할 수 있으며, 각 손실성분의 감소를 통하여 전체 전력손실을 낮추기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

## 2. Hysteresis loss

Hysteresis loss는 기본적으로 외부에서 인가된 자장에 의하여 domain의 이동이 진행되는 과정에서 발생하는 손실이다. 일반적인 자성 재료로 사용되는 Mn-Zn ferrites는 5~15  $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 grain으로 이루어진 다결정 구조를 가지고 있다. 하나의 grain은 magnetostatic energy를 낮추기 위하여  $10^{12}\sim 10^{15}$ 의 원자로 이루어진 domain 구조를 형성하고 있다.<sup>1)</sup> 외부의 자장이 인가될 경우 domain wall은 움직이며 자화를 이루게 된다. 페라이트 격자 내에 존재하는 개별적인 원자들의 spin은 domain wall에 따라 회전하게 되는데 이때 회전하는 위치와 원래에 위치간에 이방성에너지가 존재하므로 비가역적인 손실이 발생하게 된다. 또한 domain 이 이동하는 면에 대하여 2차 상(pore, impurity, point defect 등)이 존재할 경우 domain wall의 움직임은 방해받게 되며, 추가적인 손실이 발생한다. 이러한 현상은 B-H 곡선 (자기이력곡선)을 나타내는 원인이 되며, 이 곡선의 면적은 주기적인 외부 자기장에 대하여 에너지 손실로 나타난다.

기존에 수행된 연구에 따르면 hysteresis loss는 다음과 같은 인자에 의존하는 것으로 보고되고 있다.<sup>2)</sup>

- 1) The magnetocrystalline anisotropy  $k_1$
- 2) The magnetostriction  $\lambda$
- 3) The internal or external stress  $\sigma$
- 4) The volume fraction of inclusion  $v$
- 5) The saturation magnetization  $M_s$

낮은 hysteresis loss를 갖기 위해서는 작은  $k_1$ ,  $\lambda$ ,  $\sigma$ ,  $v$ 값은 가져야 하며,  $M_s$  값은 가능한 큰 값을 가져야 한다.

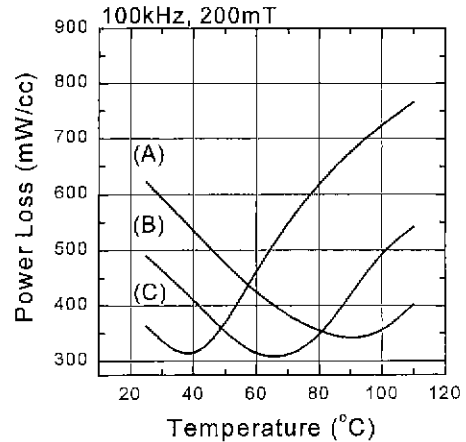


Fig. 2. The temperature dependence of power loss. (A)  $T_{\min}=90^{\circ}\text{C}$ , (B)  $T_{\min}=70^{\circ}\text{C}$ , (C)  $T_{\min}=40^{\circ}\text{C}$

야 한다. 이중 자기이방성상수  $k_1$ 은 조성 내에 과량 첨가되는 ferrous ion의 농도에 크게 의존하며,  $M_s$  값은 ZnO의 조성비에 의하여 크게 변화된다. 흥미로운 점은 자기이방성상수( $k_1$ )가 "0"이 되는 온도( $T_{\min}$ )가 조성에 따라 변화되며, 이 온도에서 hysteresis loss가 최소로 나타나게 된다<sup>3)</sup> 따라서 대부분의 저손실 Mn-Zn ferrite는 core의 동작온도에 자기이방성 상수가 "0"이 되도록 조성을 제어한다. 기존 design 되었던 SMPS의 경우 자체 발열에 의한 작동환경이 100°C인 제품이 주류를 이루었고 사용되는 페라이트 core의 조성도 이 온도영역에서 최소값을 갖도록 선택되었다.

그러나 최근 high-end SMPS의 경우 저발열 system의 채용, 방열 design 적용, 냉각 기술 향상 등의 노력으로 제품의 작동 온도를 감소시키는 추세이다. 따라서 Fig 2에 나타낸 것처럼 페라이트 코어도 이러한 작동 환경에서 전력손실의 최소값을 갖도록 한 재질들이 개발되고 있다. 이러한 온도특성을 만족시키기 위해서는 구조성 제어 이외에 소성시 산소분압 제어가 필수적이며 특히 냉각과정의 oxygen activity에 크게 의존하므로 이에 관한 세심한 주의가 요구된다.<sup>4)</sup> 최근에는 Co 등의 첨가제를 통한 자기이방성 상수( $k_1$ )의 온도의존성과 절대값을 감소시키는 연구가 진행되고 있으며, 관련 제품들이 출시되고 있다.

## 3. Eddy current loss

Eddy current loss는 magnetization의 변화에 의하여

유도된 손실이다. 권선을 감은 코어가 외부 자장에 의하여 자화가 진행될 때 시편 내부에서는 외부자기장의 변화에 대하여 반대방향으로 발생한 기전력에 의하여 current가 발생되며 자기장의 부분적인 차폐가 발생된다. 반지름  $R_0$ 를 갖는 직선형 cylinder에 균일한 magnetization process를 가정하면, electric field (E)와 current density(i)는 식(1)과 같이 표시된다.<sup>5)</sup>

$$E(r) = -\pi r^2 \frac{dI}{dt} \quad i(r) = -\frac{r}{2\rho} \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

따라서 단위 부피 당 eddy current loss( $P_e$ )는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = \frac{1}{\pi R_0^2} \int_0^{R_0} 2\pi E(r)i(r)rdr \quad (2)$$

$$= \frac{1}{\pi R_0^2} \left(\frac{dI}{dt}\right)^2 \int_0^{R_0} r^3 dr = \frac{R_0^2}{8\rho} \left(\frac{dI}{dt}\right)^2$$

식 (2)에서 자속과 시간의 변화(dI/dt)는 일반적인 측정 조건에서  $B_m$ ,  $\rho$  과 frequency 로 나타낼 수 있으며, (3)의 식으로 유도된다.<sup>6)</sup>

$$P_e = \frac{\pi^2}{4} \times \frac{R_0^2 B_m^2 f^2}{\rho} \times 10^{-13} \text{ mW/cm}^3 \quad (3)$$

이상에서와 같이 eddy current loss는 frequency의 제곱에 비례하므로 사용주파수가 증가할수록 우세한 손실 성분으로 작용한다. Eddy current loss는 식(3)에 나타난 것처럼 재료적인 측면에서 시편의 비저항 값을 높여줌으로 고주파 대역에서의 전력손실 값을 효과적으로 감소시킬 수 있다. Mn-Zn ferrites의 경우 일반적으로 CaO, SiO<sub>2</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 등의 원소를 수백 ppm 수준으로 첨가하는 데 이러한 물질이 grain boundary 영역에서 고저항층을 형성하며 시편의 비저항 값을 증가시킨다.<sup>7-8)</sup>

또한 Ti와 같은 금속 4가 이온이 구조성상에 첨가될 경우 격자 내에 치환되어 ferrous ion과 effective charge에 의하여 결합하게 된다. 따라서 Ti 이온 주위에 위치한 ferrous ion이 전기 전도에 참여하지 못하기 때문에 grain 내부의 저항 값이 증가하게 되며 eddy current loss를 감소시키는 효과를 가져온다.<sup>9)</sup> 최근 Minakawa 등은 SnO<sub>2</sub>를 첨가하여 Mn-Zn ferrite의 전력손실 값을 크게 감소시켰다는 연구 결과를 발표하였는데<sup>10)</sup> 이와 같이 다양한 첨가제를 통한 eddy current loss 감소 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 소결공정 제어를

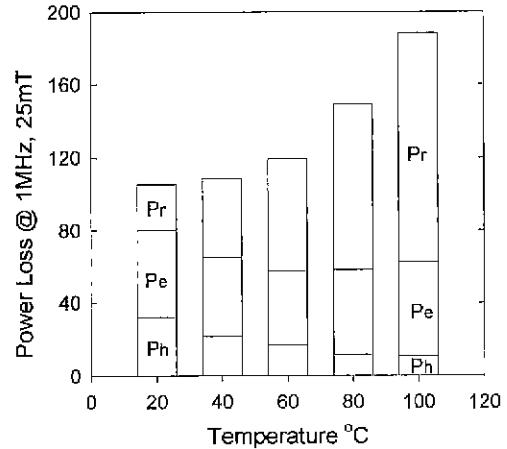


Fig. 3. Loss contribution at various temperature under 1 MHz, 25 mT condition, Ph, Pe and Pr represent hysteresis, eddy current and residual loss.

통하여 grain size를 감소시킬 경우 eddy current loss를 효과적으로 억제할 수 있다.<sup>11-12)</sup>

#### 4. Residual loss

Residual loss는 전체 전력손실 중에 hysteresis loss와 eddy current loss를 제외한 나머지 잔여손실을 지칭한다. 이러한 명칭에서와 같이 residual loss는 정확한 해석이 확립되지 않은 상태이다. Mn-Zn ferrites의 사용주파수가 100 kHz 미만의 환경에서는 residual loss의 존재가 매우 미미하나 Fig. 3에 나타난 것과 같이 MHz 대역으로 사용주파수가 증가함에 따라 그 중요성이 매우 커지고 있다.<sup>13-14)</sup>

Residual loss의 원인에 대하여 여러 가지 설명이 진행되고 있으나, 현 시점에서는 Mn-Zn ferrites의 magnetic resonance 현상이 가장 유력한 원인으로 제시되고 있다.<sup>15)</sup> Mn-Zn ferrites의 resonance 현상은 domain wall resonance와 rotation resonance 현상에 의하여 나타난다. 이러한 resonance 현상을 구체적으로 domain wall의 움직임에서 살펴보면 다음과 같다. 인가된 외부자장에 대한 Mn-Zn ferrites의 자화는 기본적으로 domain wall의 이동에 의하여 진행된다. 그러나 domain wall의 이동속도는 유한하기 때문에 만약 인가되는 자장의 방위가 고속으로 변화된다면 domain wall은 더 이상 자장의 변화에 대응하지 못하게 된다. 즉 domain wall의 이동속도보다 자장의 방위가 더 빨리 변

화된다면, 인가되는 자장 H와 유도되는 자화 B사이 에 위상 차를 가지게 되며, resonance 현상과 이에 동반한 에너지 손실을 나타낸다. 일반적으로 Mn-Zn ferrites의 resonance frequency는 수 MHz 정도이나 실제 Fig. 4에 나타난 것과 같이 온도조건에 따라 500 kHz 대역에서부터 dispersion 된 값을 나타낸다.<sup>16)</sup>

이러한 손실을 감소시키기 위해서는 기본적으로 페라이트 코어가 높은 resonance frequency를 갖도록 하여야 한다. Guyot과 Cagan에 의하면 resonance frequency는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>17)</sup>

$$f_r = \frac{16E_w}{\beta \pi D^2} \quad (4)$$

- $E_w$  : the wall energy
- $D$  : the average grain diameter
- $\beta$  : the damping coefficient

식(1.4)에 따르면 sample의 grain size가 작고 높은 wall energy를 가질 경우 높은 resonance frequency 값을 갖는다. 그러나 wall energy가 큰 값을 갖는 경우 시험의 투자율이 감소하게 되므로 자기적 특성이 저하된다. 따라서 고주파대역에서 자기적 특성을 향상시키기 위해서는 높은 투자율과 resonance frequency가 동시에 충족되어야 하며, 이러한 관계는 식 (5)에서와

같이 나타낼 수 있다.<sup>17)</sup>

$$f_r(\mu_s - 1) = \frac{3(4\pi M_s)^2}{4 \pi^2 \beta D} \quad (5)$$

이상에서 살펴본 바와 같이 고주파 대역에서 낮은 residual loss를 갖기 위해서는 작은 size의 grain과 높은 포화자속 밀도가 요구됨을 알 수 있다. 따라서 미세 구조 측면에서는 소결공정을 통한 grain size 제어와 높은 소결 밀도가 요구된다. 실험적인 결과에 의하면 residual loss를 최소화시키기 위해서는 3 μm 이하의 grain size와 4.8 g/cm<sup>3</sup> 이상의 밀도를 동시에 만족시켜야 한다. 이러한 특성은 일반적인 소성 방법을 통하여 구현하기에는 매우 어려우며, 소성 분위기를 고려한 schedule 제어가 필수적이다. 이러한 미세구조는 초기 분말의 특성제어를 통하여 구현이 가능한데, 분말자체의 size를 sub-micron 이하로 감소시켜 반응성을 극대화하는 시도가 진행되고 있다. 이러한 분말은 일반적인 solid state reaction을 통하여서는 어렵기 때문에 수열 합성법, 알콜 탈수법 등의 특수한 합성 공정이 사용된다. 그러나 이러한 방법은 아직까지 양산성이 충분히 검증되어 있지 못한 상태이다. Ruthner는 co-spray roasting을 이용하여 sub-micron 규모로 페라이트 분말을 합성하는 방법을 제시하는 등<sup>18)</sup> Mn-Zn ferrites의 본체 특성을 향상시키고자하는 시도가 다각도로 진행되고 있다.

### 5. 국내의 개발 동향

외국의 경우 통신용 장비를 중심으로 고주파 대역의 페라이트 수요가 꾸준히 증가되고 있다. 각 maker에서도 이에 대응하는 제질을 출시하고 있으며 (Table 1) 전자자기적 특성을 더욱 개선하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 경박단소화를 위한 planar type의 제품과 vehicle application을 target으로 한 제품 개발이 다양하게 이루어지고 있다. 고효율화 측면에서 36~42 DC volt가 자동차의 새로운 전원 규격으로 채택될 것으로 보이며 이 경우 표준전원인 12V용 DC-DC

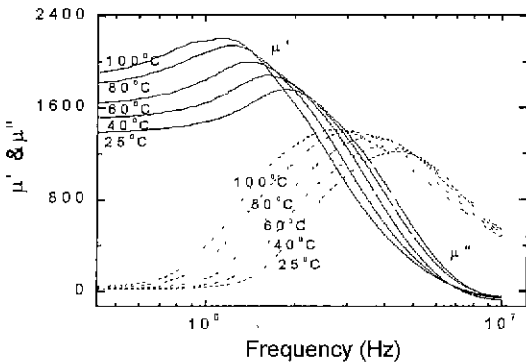


Fig. 4. Frequency spectrum of real part of permeability (μ' : solid line) and imaginary part of permeability (μ'' : dashed line).

Table 1. 업체별 고주파 페라이트 생산 모델

Maker	PHILIPS	TDK	EPCOS	FDK	HITACHI	MAGNETICS	TOKIN	KAWATETSU	
재질 code	100~500 kHz	3F3	PC50	N49	7H10	ML14D	K	B40	MB3
	500 kHz~1 MHz	3F4	PC50	N59	7H20	ML12D	N/A	N/A	N/A

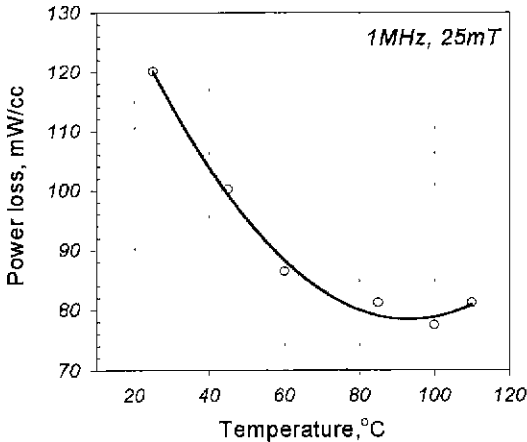


Fig. 5. The temperature dependence of power loss at 1 MHz 25 mT condition.

converter의 수요가 늘어날 것으로 보인다. 이 system은 600 kHz~1 MHz의 사용주파수를 갖는 재질이 트랜스포머의 main core로 사용되므로 이에 관한 시장이 급격히 증가될 것으로 예측된다.

국내의 고주파 소프트 페라이트 수요는 외국의 경우만큼 큰 규모를 가지고 있지 않으나 300 kHz의 동작주파수를 갖는 DC-DC 트랜스포머가 이미 시장을 형성하고 있으며 500 kHz 제품이 시장 형성 초기 단계에 있다. 국내 코어 업체의 경우 1 MHz 용은 본격적인 양산이 이루어지고 있지는 않지만 관련 기술에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으며, Fig. 5에 나타낸 것과 같이 우수한 특성을 갖는 시제품이 출시되고 있다. 특히 상당히 빠른 시점인 1992년도부터 향후 10년 뒤의 페라이트 코어의 기술 방향을 예측하여 선도기술과제(G7프로젝트)의 일환으로 "MHz 대역의 페라이트 코어 및 공정기술 개발" 연구가 산학 협동으로 꾸준히 진행되어 이에 관한 know-how가 상당 부분 축적된 것으로 평가된다.

## 6. 결 론

고주파 대역에서 낮은 전력손실 특성을 갖는 Mn-Zn ferrites 코어를 개발하기 위해서는 조성 및 첨가제의 거동에 대한 정확한 이해와 고도의 공정제어기술이 요구된다. 따라서 각기 세부적인 조성조건 및 공정조건에 대

한 체계적인 data base가 필요하며, 아울러 전자기적 특성에 있어서도 페라이트의 고주파 mechanism에 대한 상세한 이해가 요구된다. 본문에서 논의한 것과 같이 고주파 대역에서 발생하는 손실기구는 사용 주파수에 따라 서로 다른 mechanism에 기인한다. 따라서 하나의 재질이 모든 주파수 대역에서 우수한 특성을 나타낼 수 없으므로 사용 조건에 최적화된 재질이 개발되어야 할 것이다. 특히 MHz 대역에서 사용되는 경우에는 residual loss 대한 효과적인 대책이 강구되어야 할 것이며, core의 형상 역시 이에 상응하는 형태로 설계되어야 할 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. W F Brown, J. Appl. Phys., v. 11, pp.160 (1940)
2. T. G. W. Stijntjes and J. J. Roelofsma, Advances in Ceramics (ICF-4), pp.493 (1984).
3. K. Ishino and Y. Narumiya, Ceramics Bulletin, v. 66, (10), 1469 (1987).
4. J J Suh, M. S. Shin, B. M. Song and Y. H. Han, IEEE Trans. on Mag., v.35, (5), pp.3448 (1999).
5. S. Chikazumi, Physics of Ferromagnetism (2nd ed), pp.553 (1997).
6. Y. Yamada and E. Otsuki, IEICE Trans. Commun. v E75, pp.1192 (1992).
7. 서정주, 신명승, 한영호, 한국요업학회지 v. 22(9), pp.1033 (1995)
8. 서정주, 신명승, 한영호, 한국재료학회지 v. 5(8), pp.1027 (1995).
9. 박종원, 한영호, 이상효, 한국자기학회지 v. 35(5), pp.3448 (1999).
10. T. Minakawa, N Sato and T. Nomura, J. Magn Soc Jpn., v 20, pp 497 (1996).
11. J J Suh, Y. H. Choi, M. S. Shin and Y. H Han, J. Magn. Soc. Jpn., v. 22, pp.314S (1998)
12. Y. H. Han, J. J. Suh, M. S. Shin and S. K. Han, J. Phys. IV C1, pp. 111 (1997)
13. D. Stoppels, JMMM, v. 160, pp.323 (1996).
14. S. Yamada, et al, IEEE Trans. on Mag., v. 31, n. 6, pp.4062 (1995).
15. R. Lebourgeois, et al, J. Phys. IV C1, pp.105 (1997).
16. J. J. Suh, B. M. Song and Y. H. Han, Proceeding of ICF-8 (2000)
17. M. Guyot, V. Cagan, JMMM, v. 27, pp.202 (1982)
18. M.J. Ruthner, J. Phys. IV C1, pp.53 (1997).