

Measurement of the Magnetization Loss in a HTS Tape

沈政煜* · 李喜俊** · 車貴守*** · 李志光§ · 韓松曄§§
 (Jung-Wook Sim · Hee-Joon Lee · Guee-Soo Cha · Ji-Kang Lee · Song-Yop Hahn)

Abstract - Evaluation of the AC losses in the HTS tapes which are used in electric power machines is one of the important topics in this field. This paper deals with the calculation and measurement of the magnetization loss in HTS tapes. Bean model is adopted for the theoretical calculation of the magnetization loss. Magnetization method is used for the measurement of the loss. Two types of the HTS tape model, multi-filamentary model and mono-filamentary model, are used to evaluate the magnetization loss in this paper. According to the results of the analysis, large discrepancy between the calculated and measured value is observed in multi-filamentary model. On the contrary, two values coincide well in mono-filamentary model. As a conclusion, mono-filamentary model is more useful than multi-filamentary model for the evaluation of the magnetization loss.

Key words : HTS tape, magnetization loss, magnetization method, Bean model

1. 서 론

대부분의 고온초전도 전력기기에서는 테이프선재를 사용하기 때문에 장선화가 용이한 BSCCO 선재가 주로 사용되고 있다. 초전도변압기, 초전도전류제한기, 초전도송전케이블 등의 고온초전도 전력기기에 사용되는 초전도선재에는 교류전류와 교류자장이 인가되기 때문에 교류손실이 발생한다. 교류손실의 주원인은 이송전류에 의한 자기자계손실과 외부자장에 의한 자화손실 및 결합손실이다. 초전도선재에서 발생하는 교류손실은 전력기기의 효율을 저감시킬 뿐만 아니라 온도상승의 원인이 되어 고온초전도선재의 안정성에도 나쁜 영향을 미치기 때문에 교류손실을 저감하기 위한 노력이 계속되어 왔다. 동시에 선재에서 발생하는 교류손실을 정확하게 측정하기 위해서도 많은 연구가 진행되어 왔다[1], [2].

교류손실의 측정에는 발생하는 손실의 크기와 종류에 따라 자화법, 열량법, 전기적인 방법 등이 선택적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 수평방향으로 인가되는 자계에 의해 고온초전도선재에서 발생하는 자화손실을 계산하고 이를 측정해서 두 결과를 비교했다. 자화손실의 계산에는 임계상태모델 중에서 보편적으로 이용되는 Bean모델을 사용했고 손실의 측정에는 외부자장을 인가할 때에 고온초전도선재의 자화정도를 측정하는 자화법을 사용했다.

2. 해석적인 자화손실 계산

초전도체에 자장이 인가되면 초전도체의 히스테리시스 특성에 의해서 손실이 발생하고 이를 자화손실 또는 히스테리시스손실이라고 부른다. 테이프형 초전도선재를 무한 평판으로 가정하고 Bean모델을 사용해서 평판에 인가되는 외부자장에 의한 자화손실을 계산한다.

그림 1과 같이 두께가 2a인 무한평판에 최대치가 B_m 인 외부자계가 y방향으로 인가되면 자속이 초전도체의 내부에 침투하게되고 이에 의해서 초전도체 내에서 자화손실이 발생한다.

외부자계가 초전도평판의 중심까지 침투하는 완전침투 자속밀도는 다음식과 같다.

$$B_p = \mu_0 J_c a \tag{1}$$

여기서 J_c 는 초전도체의 임계전류밀도이다.

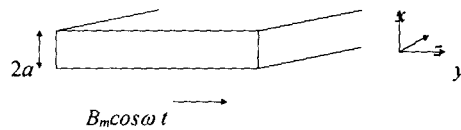


그림 1 무한 평판 모델
 Fig. 1 Slab model

외부에서 인가되는 자속밀도의 최대치 B_m 을 이용해서 인가자계와 완전침투자계의 비를 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = \frac{B_m}{B_p} = \frac{B_m}{\mu_0 J_c a} \tag{2}$$

*正會員: 順天鄉大 大學院 電氣工學科 博士課程

**正會員: 順天鄉大 大學院 電氣工學科 博士課程

***正會員: 順天鄉大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

§正會員: 又石大 工大 電氣工學科 專任講師 · 工博

§§正會員: 서울大 工大 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字: 1999년 1월 5일

最終完了: 1999년 3월 2일

한 주기당의 자화손실을 β 를 이용해서 완전침투가 발생하지 않는 경우($\beta < 1$)와 완전침투가 발생하는 경우($\beta > 1$)로 나누어서 표시하면 다음과 같다[3].

$$Q = \frac{2B_m^3}{3\mu_0^2 J_c a} = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \frac{\beta}{3} \text{ J/m}^3/\text{cycle}, \beta < 1 \quad (3)$$

$$Q = 2 a J_c B_m \left(1 - \frac{2}{3} \frac{\mu_0 J_c a}{B_m^2}\right) = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^3}\right) \text{ J/m}^3/\text{cycle}, \beta > 1 \quad (4)$$

또 위의 손실식을 손실계수 $\Gamma(\beta)$ 를 이용해서 표시하면 $\beta < 1$ 인 경우나 $\beta > 1$ 인 경우 모두 다음과 같다.

$$Q = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \Gamma(\beta) \quad (5)$$

여기서

$$\Gamma(\beta) = \frac{\beta}{3} \quad \beta < 1$$

$$= \frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^3} \quad \beta > 1 \quad (6)$$

3. 실험장치 구성 및 손실측정 방법

외부자계에 의해서 고온초전도선재에서 발생하는 자화손실을 측정하기 위한 실험장치의 구성은 그림 2와 같다. 초전도테이프에서 발생하는 자계를 측정하기 위해서 pick-up 코일을 초전도선재의 표면에 그림 3와 같은 방식으로 부착했다.

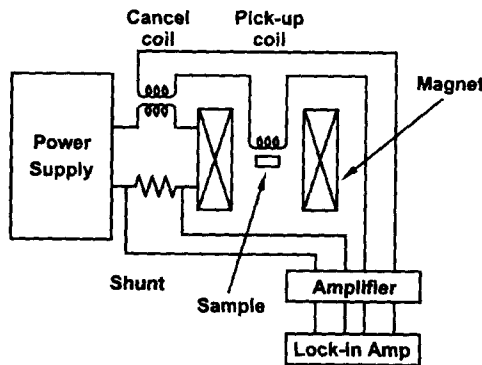


그림 2 측정장치 구성

Fig. 2 Structure of the measuring circuit

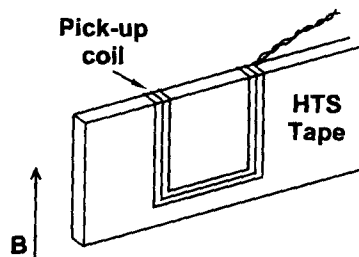


그림 3 초전도테이프에 부착된 Pick-up 코일

Fig. 3 Pick-up coil on the HTS tape

pick-up 코일에는 초전도체의 자화에 의해서 발생하는 전압성분 뿐만이 아니라 자화를 발생시키기 위해서 초전도체에 인가되는 외부자계에 의해서 유기되는 유도성전압도 발생한다. 이 유도성전압성분은 측정하고자 하는 전압성분보다 크기가 훨씬 크므로 정확한 측정을 위해서는 이를 자화에 의해서 발생하는 전압 정도로 줄여야 한다. 유도성전압성분을 줄이기 위해서 cancel 코일을 사용했고 pick-up 코일에서 발생하는 전압 중에서 손실을 발생시키는 성분만을 측정하기 위해서 Lock-in Amplifier를 사용했다. 초전도 테이프에 시변자장을 인가하기 위해서 상전도코일로 제작된 자석을 이용했다. 상전도코일에 의해서 발생하는 자장의 최대자속밀도는 0.1T 이다.

측정에 사용된 고온초전도 BSCCO2223테이프는 전체길이가 10cm이고 pick-up 코일이 부착된 길이는 5cm이다. 시료로 사용된 테이프는 단면의 폭과 두께가 각각 3.5mm, 0.23mm이고 61개의 필라멘트로 구성된 다심 선재이다. 표 1은 초전도테이프의 사양이다.

표 1 초전도테이프의 사양

Table 1 Specifications of the HTS tape

재질	BSCCO2223	필라멘트 수	61
테이프 폭	3.5mm	필라멘트 폭	0.015mm
테이프 두께	0.23mm	은 비율	2.66
필라멘트 영역 폭	2.84mm	필라멘트 영역 두께	0.187mm
트위스트 피치	no twist	필라멘트 영역의 은 비율	0.71

측정된 pick-up 코일의 전압으로부터 손실을 계산하는 과정은 다음과 같다. 초전도시료에서 발생하는 자화손실은 Poynting vector를 이용해서 표시할 수 있다.

$$W = -\frac{1}{V_s} \int_T \int_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} dt \quad (7)$$

위 식에서 T는 전기 \vec{E} 와 자기 \vec{H} 의 주기이고 S는 손실을 발생하는 시료의 표면적이다. \vec{E} 를 시료의 표면에 설치한 pick-up 코일의 전압 V를 이용해서 표시하면 다음과 같다[4].

$$W = \frac{h}{NV_s} \int_T V H dt \quad (8)$$

여기서 h : 시료의 폭

N : pick-up 코일의 권선수

V_s : 시료의 체적

이로부터 한 주기당 발생하는 자화손실을 자속밀도와 전압의 실효치를 이용해서 표시하면 다음과 같다.

$$W = \frac{h B_{rms} V_{rms} \cos \phi}{\mu_0 N V_s f} \text{ J/m}^3/\text{cycle} \quad (9)$$

여기서 $V_{rms} \cos \phi$: 손실을 발생시키는 전압성분

f : 주파수

4. 측정결과

측정결과와 식(9)로부터 사이클 당의 자화손실을 그리면 그림 4와 같다. 그림 4에서 외부자계의 세기가 0.09T일 때에 초전도선재에서 발생하는 자화손실은 1,200 J/m³/cycle이다. 이 결과와 임계상태모델을 이용해서 해석적으로 구한 손실을 비교한다.

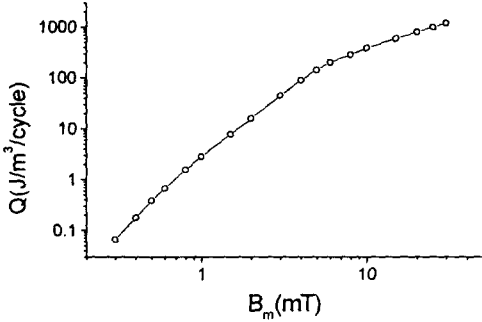


그림 4 외부자계를 변화시켰을 때의 자화손실
Fig. 4 Magnetization loss as a function of applied field

해석적으로 자화손실을 구할 경우에 초전도선재를 그림 5와 같이 두가지로 모델링할 수 있다.

- 1) 각각의 필라멘트를 하나의 슬랩 모델로 해석(다심모델)
- 2) 필라멘트 영역전체를 평판 모델로 해석(단심모델)

아래에 다심모델과 단심모델을 이용해서 해석해를 구하고 그 결과를 측정치와 비교한다.

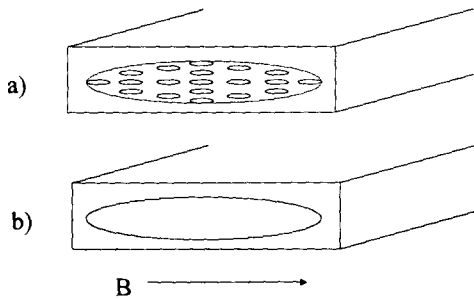


그림 5 초전도테이프 모델 a) 다심모델 b) 단심모델
Fig. 5 Two models of the HTS tape

- a) multi-filamentary model
- b) mono-filamentary model

해석해를 구하는 데 사용되는 완전침투자장의 세기를 알기 위해서 임계전류를 측정해야 한다. 실험에 사용된 초전도 테이프선재에 정전류원을 사용해서 전류를 증가시키면서 초전도 선재에 발생하는 전압을 측정하는 결과는 그림 6과 같다. 선재에 흐르는 전류가 30A에 도달할 때까지는 선재에 거의 전압이 발생하지 않으나 30A를 넘으면 전압이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 임계전류를 결정할 때에 많이 사용하는 1 μV/cm 기준을 사용할 경우에 이 선재의 임계전류는 40A이다. 전류를 천천히 증가시

키는 것부터 시작해서 최대 20A/sec까지 전류를 증가시키는 속도를 달리하면서 임계전류를 측정하는 결과도 그림 6과 차이가 없어서 전류의 증가속도와 임계전류 사이에 직접적인 관계는 없는 것으로 밝혀졌다.

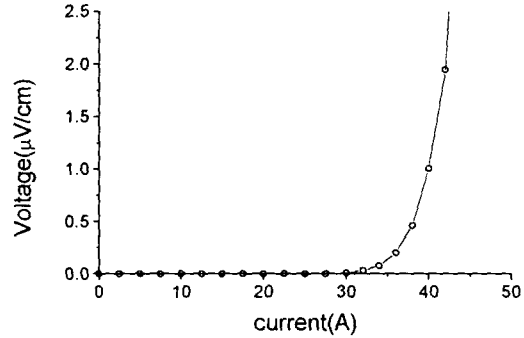


그림 6 초전도선재에서 전류변화에 따른 발생전압
Fig. 6 Voltage in the HTS tape

4.1 다심 모델

이 모델에서는 선재를 구성하는 각각의 필라멘트를 독립된 평판으로 보고 각 평판에서 발생하는 손실을 계산한다. 평판의 두께는 타원형으로 되어있는 필라멘트의 폭으로 잡는다.

실험에 사용된 선재의 필라멘트 총 면적은 0.22mm²이므로 임계전류의 측정치를 이용해서 선재의 임계전류밀도를 구하면 1.83×10⁴A/cm²가 된다. 위에서 측정된 임계전류밀도와 식(1)을 이용해서 완전침투자장의 세기 B_p를 계산하면 1.72mT가 된다. 대부분의 초전도전력기에서 사용되는 초전도선재에 인가되는 자장의 세기는 이 값보다 훨씬 크므로 초전도선재는 완전침투상태에서 사용됨을 알 수 있다.

식(3), (4)와 위에서 구한 J_c를 이용해서 해석적인 방법으로 손실을 구한 것과 측정치를 비교하면 그림 7과 같다. 초전도선재에 가해지는 외부자장의 세기를 0.09T까지 변화시키면서 손실을 측정하는 결과와 계산결과를 비교하면 외부자장의 세기가 낮은 영역에서는 계산값이 측정치보다 크고, 외부자장의 세기가 커지면 측정값이 계산값보다 크다. 또한 측정값과 계산값이 차이도 상당히 커서 외부자장이 0.09T인 경우에 측정값이 이 계산값의 4배에 달한다.

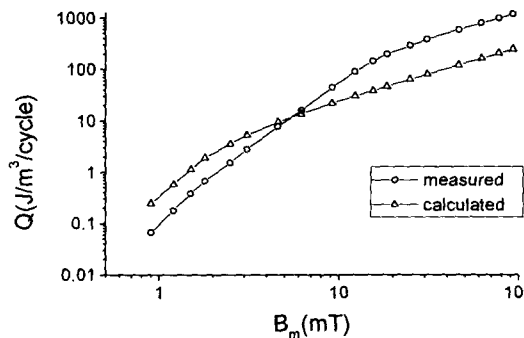


그림 7 자화손실 측정치와 계산치(다심모델)의 비교
Fig. 7 Measured and calculated magnetization loss (multi-filamentary model)

측정된 값과 계산된 값을 이용해서 손실계수를 그리면 그림 8과 같다. 측정된 값으로부터 손실계수를 구할 때에는

$$\Gamma = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \quad (10)$$

의 관계를 이용했다. 그림 8에서 측정값으로부터 구한 손실계수는 16mT에서 최대가 되고, 계산값으로부터 구한 손실계수는 2.3mT에서 최대가 된다. 그 이상의 자계에서는 급격히 감소해서 100mT에서는 최대치의 1/5 ~ 1/10 이하로 감소하는 것을 볼 수 있다.

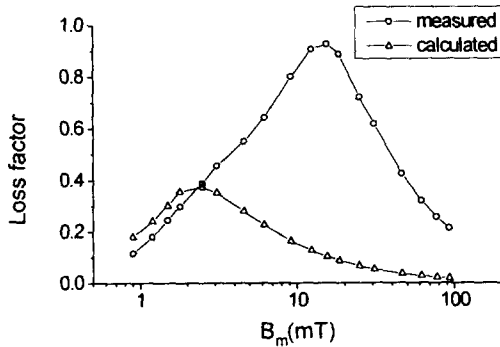


그림 8 손실계수(다심모델)
Fig. 8 Loss factor(multi-filamentary model)

다심모델의 경우에 해석값과 측정값 사이에 비교적 큰 차이가 발생할 뿐만 아니라 자장의 세기에 따라서 해석값이 크기도 하고 측정값이 크기도 하는 등의 문제가 발생해서 새로운 해석방법이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4.2 단심모델

단심모델에서는 필라멘트 영역 전체를 하나의 초전도평판으로 생각하고 평판의 두께를 필라멘트 영역의 두께인 0.187mm로 잡는다. 이 경우에 임계전류 측정치를 이용해서 선재의 임계전류밀도를 구하면 $7.5 \times 10^3 \text{A/cm}^2$ 이 된다.

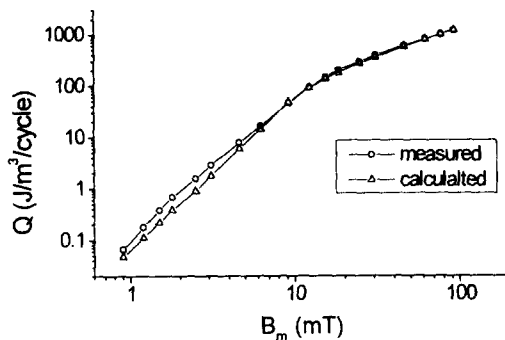


그림 9 자화손실 측정치와 계산치(단심모델)의 비교

a) 측정값 b) 계산값

Fig. 9 Measured and calculated magnetization loss (mono-filamentary model)

a) measured b) calculated

이 모델의 경우에 완전침투자장의 세기 B_p 를 계산하면 8.9mT가 되어 다심모델의 경우 보다는 증가하나 초전도전력기기에 사용되는 초전도선재에 인가되는 자장의 세기보다 훨씬 적으므로 이 모델에서도 초전도선재는 완전침투상태임을 알 수 있다.

측정된 손실값과 계산된 손실값을 비교하면 그림 9와 같다. 초전도선재에 가해지는 외부자장의 세기를 다심모델에서와 마찬가지로 0.09T까지 변화시키면서 손실을 측정했다. 측정결과와 계산결과를 비교하면 외부자장의 세기가 낮은 영역에서는 측정값이 약간 크지만 외부자장의 세기가 10mT 이상인 영역에서는 이론적인 계산값과 측정값이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

측정된 값과 계산된 값을 이용해서 손실계수를 그리면 그림 10과 같다. 손실계수는 계산값에서는 12mT, 측정값에서는 16mT에서 최대가 된다. 다심모델에서와는 달리 단심모델에서는 측정된 값과 계산된 값을 이용해서 구한 손실계수가 비교적 일치하는 것을 볼 수 있다.

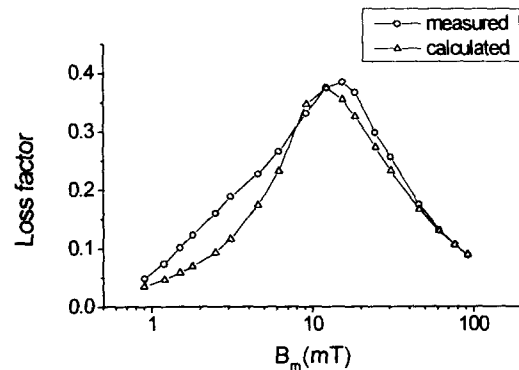


그림 10 손실계수(단심모델)
Fig. 10 Loss factor(mono-filamentary model)

두 모델을 사용한 해석결과로부터 현재 많이 사용하고 있는 필라멘트의 수가 수십 개인 다심선재의 자화손실은 필라멘트 영역 전체를 하나의 필라멘트로 생각하는 단심모델을 사용해서 해석하는 것이 더 정확하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 은으로 제작된 초전도선재의 피복재와 모재에서 발생하는 결합손실은 고려하지 않았다. 선재에 수직방향으로 외부자장이 인가될 때에는 큰 결합손실이 발생하나, 선재에 평행한 방향으로 외부자장이 인가될 때에는 수직방향으로 인가되는 경우에 발생하는 결합손실에 비해서 대략 1/(선재의 폭/선재의 두께)³ 만큼의 결합손실이 발생한다[5]. 본 실험에 사용된 선재의 폭은 두께에 비해서 15배 이상이고 선재에 평행한 방향으로 자장을 인가했기 때문에 발생하는 결합손실이 대단히 작아서 고려하지 않아도 계산값에는 거의 영향을 미치지 않는다.

5. 결 론

비교적 세기가 센 교류자장이 인가되는 전력기기에 사용되는 초전도선재에서는 교류손실을 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 고온초전도선재에서 발생하는 자화손실을 평판모델을 이용해서 계산하고 이를 자화법

을 이용해서 측정해서 두 결과를 비교했다. 측정결과를 해석하기 위해서 다심모델과 단심모델의 두가지 모델을 도입해서 두 모델에 대해서 이론적인 계산치와 측정치를 비교했다.

다심모델의 경우는 측정치와 계산치 사이에 상당히 큰 차이가 있었으나 단심모델의 경우는 두 값이 비교적 잘 맞는 것으로 밝혀져서 앞으로 고온초전도선재에서 발생하는 자화손실을 산정할 때에는 단심모델을 사용하는 것이 바람직하다는 것이 밝혀졌다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] K. Sato et. al., "HTS large scale application using BSCCO conductor," IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, pp.345-350, 1997

[2] A. M. Campbell, "AC losses in high Tc superconductor," IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol.5, No. 2, pp.682-687, 1995
[3] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford, UK 1983
[4] K. Miyamoto et. al., "Measurement and FEM analysis of magnetization loss in HTS tapes," Applied Superconductivity Conference 98, Palm Springs, USA, Sep., 1998
[5] Guesoo Cha et. al., "Numerical computation of the coupling loss in a HTSC wire due to transverse and longitudinal magnetic field," Applied Superconductivity Conference 98, Palm Springs, USA, Sep., 1998

저자 소개



심정욱(沈政煜)

1970년 10월 19일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



이지광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 우석대 전기공학과 전임강사



이희준(李喜俊)

1969년 5월 15일생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



한송엽(韓松擘)

1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 서울대 전기공학과 전임강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공학) 1995년 당 학회 회장. 1995년~1996년 서울대 공과대학 학장. 현재 서울대 공과대학 전기공학부 교수



차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987년 순천향대 조교수. 1991년 영국 Bath대학 방문교수, 현재 순천향대 공대 전기공학과 교수

Tel : (0418) 530-1334

E-mail : gsoocha@asan.sch.ac.kr)