

전류변성기 비교기의 비오차 평가 기술

Evaluation Technique for Ratio Error of Current Transformer Comparator

金潤亨* · 韓相吉* · 鄭在甲[†] · 韓相玉**

(Yoon-Hyoung Kim · Sang-Gil Han · Jae-Kap Jung · Sang-Ok Han)

Abstract - We have developed an evaluation technique for ratio errors of current transformer (CT) comparator by using the precise standard capacitors. By applying this technique for equivalent circuit of CT comparator evaluation system, we can obtain the calculated and measured ratio errors in the CT comparator. Thus we can evaluate ratio errors of CT comparator by comparing the calculated and measured ratio errors. Because this method requires only the standard capacitors, it is simple and easy method to reliability and accuracy maintenance of CT comparator. The method was applied to CT comparator under test with the ratio error ranges of 0 ~ ±10 %. The ratio error of the CT comparator under test theoretically obtained in this method are consistent with that measured for same CT comparator under test by using wide ratio error CT within an estimated expanded uncertainty ($k = 2$) in the overall ratio error ranges.

Key Words : Current Transformer, CT Comparator, CT Test System, Ratio Error, Correction

1. 서 론

전류변성기(CT, current transformer)는 정상사용 상태에서 실질적으로 전류비가 권선비에 반비례하고, 방향이 적절하게 연결되어 2차 전류의 위상이 1차 전류에 비해 거의 영인 계기용 변성기이다. 전류변성기의 비오차와 위상오차는 정격 주파수에서 2차 부담이 정격 부담의 특정 범위에 있을 때 일정 수치를 초과할 수 없도록 규정되어 있다[1, 2]. 전류변성기는 오차 등급에 따라 0.1 급 ~ 3.0 급의 5개 등급으로 나뉘고 있으며 등급에 따라 허용되는 비오차는 ±0.1 % ~ ±3 % 이하로 규정하고 있다[1, 2]. 한편 전류변성기를 생산하는 중전기 업체나 교정시험기관에서는 전류변성기 비교측정시스템을 구축하여 전류변성기의 비오차 및 위상오차를 측정한다[3]. 전류변성기 비교측정시스템의 핵심장비인 전류변성기 비교기는 표준 전류변성기와 피측정 전류변성기의 2차측 전류를 비교하여 피측정 전류변성기의 비오차와 위상오차를 측정하기 위해 사용된다. 따라서 피측정 전류변성기의 오차 측정값은 전류변성기 비교기의 성능에 영향을 받게 된다. 따라서 피측정 전류변성기의 오차를 정확하게 측정하기 위해서는 전류변성기 비교기의 성능을 정확하게 평가하여야 한다.

본 논문에서 전류변성기 비교기의 비오차 정확도와 직선성을 평가하기 위한 새로운 기술을 개발하였다. 이 기술은

커패시터를 정확하게 알고 있는 표준커패시터를 이용하여 비오차 평가 시스템의 등가회로부터 계산된 비오차의 이론값과 실제 측정값을 비교하여 전류변성기 비교기의 비오차 정확도와 직선성을 평가하는 기술이다. 또한 본 기술의 유효성을 검증하기 위해 전류변성기 비오차 평가 시스템의 불확도를 분석하였고, 선행연구에서 개발한 광범위 비오차를 갖는 전류변성기를[4] 이용하여 동일한 전류변성기 비교기의 비오차를 평가한 결과와 서로 비교하였다. 마지막으로 전류변성기 비교기의 제조사에서 제공한 사양과 그 일치도를 비교하고 전류변성기 비교기의 성능을 재평가하였다.

2. 전류변성기의 비오차 평가 이론

전류변성기 비교기의 비오차 정확도를 평가하기 위해 교류 전압발생원과 전류변성기 비교기의 k_N 과 k_X 단자에 각각 표준커패시터 C_N 과 C_X 를 연결하여 그림 1과 같은 시스템을 구성한다. 그림 1에서 I_N , I_X , C_V 는 각각 다음과 같다.

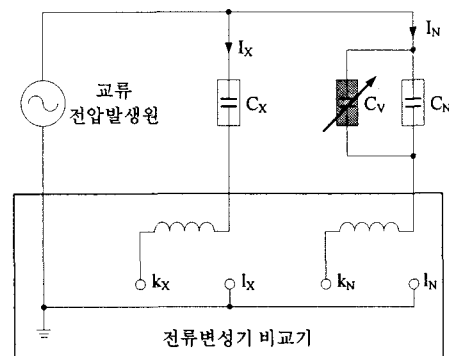


그림 1 전류변성기 비교기의 비오차 평가 시스템
Fig. 1 Evaluation system for ratio error of CT comparator

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 責任研究員 · 理博
E-mail: jkjung@kriss.re.kr

* 學生會員 : 忠南大學校 電氣工學科 碩士課程

** 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 6月 10日

最終完了 : 2008年 7月 7日

I_N : 전류변성기 비교기의 k_N 단자에 흐르는 전류
 I_X : 전류변성기 비교기의 k_X 단자에 흐르는 전류
 C_V : 임의의 비오차를 인가하기 위해 표준커패시터 C_N 에 병렬로 연결되는 커패시터

전류변성기 비교기에서 측정되는 비오차(α)는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{I_X - I_N}{I_N} \times 100 [\%] \quad (1)$$

그림 1과 같이 전류변성기 비교기의 k_N 과 k_X 단자에 동일한 교류 전압을 인가할 때 전류변성기 비교기 양단에 흐르는 전류는 커패시턴스에 비례한다. 식 (1)을 이용하여 그림 1에서 C_V 가 없을 때의 비오차(α_0)와 C_V 를 C_N 에 병렬로 연결했을 때의 비오차(α)는 각각 다음과 같다.

$$\alpha_0 = \frac{C_X - C_N}{C_N} \times 100 [\%] = \left(\frac{C_X}{C_N} - 1 \right) \times 100 [\%] \quad (2)$$

$$\alpha = \left(\frac{C_X - (C_N + C_V)}{C_N + C_V} \right) \times 100 [\%] = \left(\frac{C_X}{C_N + C_V} - 1 \right) \times 100 [\%] \quad (3)$$

식 (2)의 C_V 가 없을 때의 비오차(α_0)는 표준커패시터 C_N 과 C_X 의 커패시턴스 비, 측정 케이블의 선저항, 전류변성기 비교기의 입력임피던스에 의한 전류변성기 비교기의 비오차 평가시스템의 자체 비오차이다. 식 (3)의 C_V 를 C_N 에 병렬로 연결했을 때의 비오차(α)는 C_V 가 없을 때의 비오차(α_0)에 C_V 에 의해 임의로 인가되는 비오차가 더해진 비오차이다. 식 (2)와 식 (3)에 의해 C_V 를 C_N 에 병렬로 연결했을 때의 비오차(α)에서 C_V 가 없을 때의 비오차(α_0)를 빼어 다음과 같이 인가된 비오차의 이론값을 얻을 수 있다.

$$\alpha - \alpha_0 = - \frac{C_X C_V}{C_N (C_N + C_V)} \times 100 [\%] \quad (4)$$

이때 표준커패시터 C_N , C_X , C_V 의 커패시턴스는 정확하게 알고 있어야 한다. 식 (4)에서 C_V 에 의한 비오차의 범위는 음(-)의 영역이다.

전류변성기 비교기의 양(+)의 영역에 대한 비오차 정확도를 평가하기 위해 그림 1에서 k_N 단자와 k_X 단자의 위치를 바꾸면 C_V 가 없을 때의 비오차(α_0)와 C_V 를 C_N 에 병렬로 연결했을 때의 비오차(α)는 각각 다음과 같다.

$$\alpha_0 = \frac{C_N - C_X}{C_X} \times 100 [\%] = \left(\frac{C_N}{C_X} - 1 \right) \times 100 [\%] \quad (5)$$

$$\alpha = \left(\frac{(C_N + C_V) - C_X}{C_X} \right) \times 100 [\%] = \left(\frac{C_N + C_V}{C_X} - 1 \right) \times 100 [\%] \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에 의해 C_V 를 C_N 에 병렬로 연결했을 때의 비오차(α)에서 C_V 가 없을 때의 비오차(α_0)를 빼어 다음과 같이 인가된 비오차의 이론값을 얻을 수 있다.

$$\alpha - \alpha_0 = \frac{C_V}{C_X} \times 100 [\%] \quad (7)$$

따라서, 커패시턴스를 정확하게 알고 있는 표준커패시터 C_N , C_X , C_V 와 식 (4), (7)을 이용하여 전류변성기 비교기의 비오차 이론값을 구하고, 이 값을 전류변성기 비교기에서 측정되는 실험값과 비교하여 전류변성기 비교기의 비오차 정확도를 평가할 수 있다.

3. 전류변성기 비교기의 비오차 평가

본 연구에서 평가한 전류변성기 비교기는 0 ~ ±20 % 범위의 비오차를 측정할 수 있는 A사의 전류변성기 비교기이고, 본 연구에서의 비오차 평가 범위는 상용되고 있는 전류변성기 비교기의 가장 높은 등급인 3급을 고려하여 비오차 측정 범위 0 ~ ±10 %를 평가하였다. 평가 시스템의 전압 발생원으로는 California사의 1251 RP를 이용하여 일정한 전압을 인가하면서 실험하였다. 표준커패시터 C_N 과 C_X 는 커패시턴스를 정확하게 알고 있는 정격 10 uF의 동일한 커패시터를 사용하였다. 전류변성기 비교기의 0 ~ ±10 % 범위에 대해 임의의 비오차를 인가하기 위한 표준커패시터 C_V 의 커패시턴스는 표 1의 첫 번째 열에 정리하였다.

표 1 전류변성기 비교기의 비오차의 이론값, 측정값, 보정값, 상대오차.

Table 1 Calculated ratio error, measured ratio error, correction value, and relative error for CT comparator.

| 커패시턴스 [nF] | C_V 에 의한 비오차 [%] | | 보정값 [%] (C=A-B) | 측정값의 상대오차(D) [%] |
|------------|--------------------|---------|--------------------|------------------|
| | 이론값(A) | 측정값(B) | | |
| 1000.050 | -9.1594 | -9.1560 | -0.0034 | -0.04 |
| 499.932 | -4.7989 | -4.7993 | 0.0004 | 0.01 |
| 300.109 | -2.9372 | -2.9327 | -0.0045 | -0.15 |
| 199.941 | -1.9762 | -1.9760 | -0.0002 | -0.01 |
| 99.989 | -0.9982 | -0.9987 | 0.0005 | 0.05 |
| 9.9999 | -0.1007 | -0.1003 | -0.0004 | -0.40 |
| 1.0000 | -0.0101 | -0.0100 | 0.0000 | -0.49 |
| 1.0000 | 0.0101 | 0.0102 | -0.0001 | 0.60 |
| 9.9999 | 0.1011 | 0.1012 | -0.0001 | 0.14 |
| 99.989 | 1.0105 | 1.0115 | -0.0010 | 0.10 |
| 199.941 | 2.0207 | 2.0242 | -0.0035 | 0.17 |
| 300.109 | 3.0330 | 3.0375 | -0.0045 | 0.15 |
| 499.932 | 5.0525 | 5.0542 | -0.0017 | 0.03 |
| 1000.050 | 10.1069 | 10.1109 | -0.0039 | 0.04 |

그림 1의 전류변성기 비교기의 비오차 정확도 평가 시스템과 식 (4)와 식 (7)을 이용하여 음(-)의 영역과 양(+)의 영역에 대한 비오차의 이론값과 측정값을 표 1의 두 번째 열과 세 번째 열에 나타내었다. 표 1의 네 번째 열은 비오차의 이론값과 측정값의 차이로 전류변성기 비교기에서 측정되는 비오차에 대한 보정값을 나타낸다. 보정값은 비오차의 음(-)의 영역에서는 -0.0045 % ~ +0.0005 %이고, 비오차의 양(+)의 영역에서는 -0.0045 % ~ -0.0001 %이다. 표 1의 마지막 열은 측정값의 상대오차로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{측정값의 상대오차} = \frac{\text{측정값} - \text{이론값}}{\text{이론값}} \times 100 [\%] \quad (8)$$

표 1에 보인 바와 같이 상대오차는 비오차의 음(-)의 영역에서는 -0.4892 % ~ +0.0088 %이고, 비오차의 양(+)의 영역에서는 0.0332 % ~ 0.5952 %이다. 그림 2는 표 1에서의 전류변성기 비교기의 -10 %에서 +10 %까지의 비오차 측정 범위에 따른 이론값 및 측정값, 보정값을 나타낸 것이다.

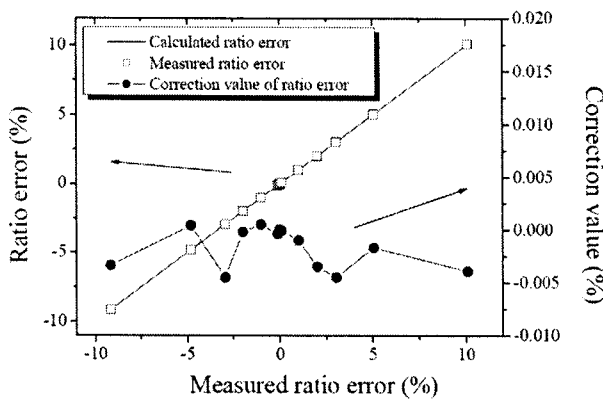


그림 2 비오차 측정 값에 따른 비오차의 이론값 및 측정값과 보정값.

Fig. 2 Calculated ratio error, measured ratio error, and correction value versus measured range of ratio error.

한편 제조사에서 제공하는 전류변성기 비교기의 보정값의 사양은 0.2 % 이하의 낮은 범위의 비오차에 대해서는 10 ppm인 절대값이고, 0.2 % 이상에서는 측정값의 0.5 %인 상대값으로 주어진다[6]. 이를 정리하여 표 2의 두 번째 열에 나타내었다.

표 2 전류변성기 비교기의 비오차 평가 결과의 비교.
Table 2 A comparison of evaluation results for ratio error of CT comparator.

| 비오차 범위 [%] | 제조사 | 평가 결과 |
|--------------|-----------------|-----------------|
| 0 ~ ± 0.2 | ±10 ppm | ±4 ppm |
| ± 0.2 ~ ± 20 | rdg* × (±)0.5 % | rdg × (±)0.17 % |

* rdg : 전류변성기 비교기의 측정값

한편 제조사에서 제공하는 사양과 본 연구 결과의 비교를 위해 0.2 % 이하에서는 절대값인 보정값을 취하였고, 0.2 % 이상에서는 상대값인 측정값의 상대오차를 취하였다. 표 1에서 이를 구분하기 위해 색칠하여 표시하였고, 표 2의 세 번째 열에 본 연구에서 평가한 결과를 정리하여 나타내었다. 표 2에 보인 바와 같이 표준편차값을 이용하여 전류변성기 비교기의 비오차를 평가한 결과 0.2 % 이하에서는 보정값이 최대 4 ppm의 절대값이고, 0.2 % 이상에서는 측정값의 상대오차가 0.17 %로 제조사에서 제공한 사양보다 좋게 나오고 있음을 확인할 수 있다.

4. 불확도 평가 및 유효성 검증

4.1 불확도 평가

표준편차값을 이용한 전류변성기 비교기의 비오차 정확도 평가의 불확도 평가를 위해 불확도 요인을 찾아 요인별 표준 불확도와 자유도를 구하고, 이로부터 합성 표준 불확도와 유효 자유도를 구한다. 유효 자유도와 신뢰수준에 따른 포함인자를 찾아 합성 표준 불확도에 곱하면 확장 불확도가 된다[5]. 여기서 포함인자는 2이므로 확장 불확도는 아래와 같이 표현된다.

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \dots} \quad (9)$$

표준편차값을 이용한 전류변성기 비교기의 비오차 평가의 불확도 요인을 정리하여 표 3에 나타내었다.

표 3 표준편차값을 이용한 전류변성기 비교기 비오차 평가의 불확도 총괄표.

Table 3 Uncertainty budget of ratio error evaluation for CT comparator using standard capacitors.

| 명목 비오차 [%] | 불확도 요인 | | | 합성 표준 불확도, (u_c) [%] | 확장 불확도, U [%] | 상대 확장 불확도, U_R |
|------------|-------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------|------------------|
| | 반복 측정 (u_A) [%] | 비교기 분해능 (u_B) [%] | 표준편차값 (u_{B3}) [%] | | | |
| 10.1069 | 0.0050 | 0.0029 | 0.0012 | 0.0059 | 0.0119 | 0.12 |
| 5.0525 | 0.0017 | 0.0029 | 0.0005 | 0.0034 | 0.0068 | 0.13 |
| 3.0330 | 0.0017 | 0.0029 | 0.0003 | 0.0033 | 0.0067 | 0.22 |
| 2.0207 | 0.0017 | 0.0029 | 0.0002 | 0.0034 | 0.0067 | 0.33 |
| 1.0105 | 0.0009 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0009 | 0.0018 | 0.18 |
| 0.1011 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0000 | 0.0004 | 0.0007 | 0.69 |
| 0.0101 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 | 0.87 |
| -0.0101 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0002 | 1.85 |
| -0.1007 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0000 | 0.0004 | 0.0008 | 0.75 |
| -0.9982 | 0.0002 | 0.0003 | -0.0001 | 0.0004 | 0.0008 | 0.08 |
| -1.9762 | 0.0016 | 0.0029 | -0.0002 | 0.0033 | 0.0066 | 0.34 |
| -2.9372 | 0.0017 | 0.0029 | -0.0003 | 0.0034 | 0.0068 | 0.23 |
| -4.7989 | 0.0031 | 0.0029 | -0.0005 | 0.0043 | 0.0086 | 0.18 |
| -9.1594 | 0.0046 | 0.0029 | -0.0011 | 0.0056 | 0.0111 | 0.12 |

표 3에서 A형 불확도 u_A 는 3회 반복측정에서 나타나는 반복측정에 의한 불확도이고, B형 불확도 u_{B1} , u_{B2} 는 각각 전류변성기 비교기의 분해능과 표준커패시터의 측정값에 대한 불확도이다. 마지막 열에 나타난 상대확장불확도(U_R)는 명목비오차에 대한 확장불확도의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{상대확장불확도}(U_R) = \frac{\text{확장불확도}}{\text{명목비오차}} \times 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

표 3에서 보인 바와 같이 불확도 평균 결과가 0.2 % 이하에서는 절대불확도 0.0001 ~ 0.0008 %이고, 0.2 % 이상에서는 상대불확도 0.0771 ~ 0.3353 %로 계산된다.

4.2 기술의 유효성 검증

한편, 본 기술의 유효성을 검증하기 위해 선행연구에서 개발된 광범위 비오차를 갖는 전류변성기(WRE CT, Wide Ratio Error CT)를[4] 이용하여 동일한 전류변성기 비교기에 대한 비오차를 평가하였다. 두 가지 방법으로 측정된 전류변성기 비교기 비오차의 보정값과 확장불확도를 비교하여 그림 3에 나타내었다.

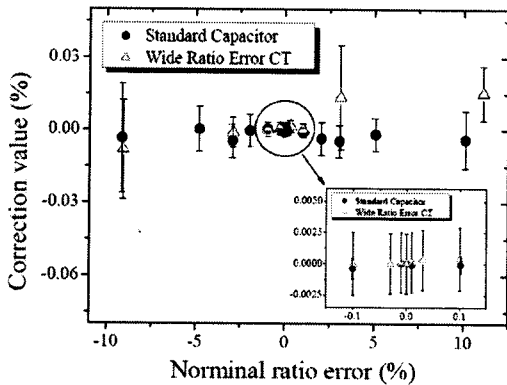


그림 3 표준커패시터와 광범위 비오차를 갖는 전류변성기를 이용하여 얻은 전류변성기 비교기의 보정값의 비교.
Fig. 3 A comparison of correction value of CT comparator obtained using standard capacitor and WRE CT.

그림 3에 보인 바와 같이 표준커패시터를 이용한 방법과 WRE CT를 이용한 방법에 대한 전류변성기 비교기의 비오차 평가 결과가 모든 범위의 비오차 범위에 대해 확장불확도 내에서 잘 일치하고 있다. 따라서 본 기술을 이용한 측정방법의 유효성이 검증되었다.

5. 결 론

본 논문에서 커패시턴스를 정확하게 알고 있는 커패시터를 이용하여 전류변성기 비교기에 임의의 비오차를 인가하고, 비오차의 이론값과 측정값을 비교하여 전류변성기 비교기의 비오차를 평가하는 기술을 개발하였다. 본 기술을 비오차 측정 범위 0 ~ ±20 %를 가지고 있는 전류변성기 비교기에 대해 0 ~ ±10 %의 비오차 측정 범위에 적용하였다. 또한 측정기술의 유효성을 검증하기 위해 동일한 전류변성기 비교기의 비오차를 WRE CT를 이용하여 평가한 결과와 서로 비교하였다. 두 가지 방법으로 전류변성기 비교기 평가한 결과를 비교한 결과 서로의 불확도 내에서 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발한 기술의 유효성을 증명할 수 있었다.

한편 전류변성기 비교기의 비오차 평가 결과를 ±0.2 % 이하의 비오차 범위와, ±0.2 ~ ±10 %의 비오차 범위로 나누어 평가하여 제조사에서 제공하는 전류변성기 비교기의 사양과 비교하였는데, 전류변성기 비교기의 비오차가 제조사에서 제공하고 있는 성능보다 좋게 나옴을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 전류변성기 비교기의 비오차 평가 방법은 표준커패시터를 이용하는 비교적 간단한 방법이다. 또한 산업현장에서 바로 적용할 수 있다는 장점을 활용하여 전류변성기 비교기의 상시 자체 평가가 가능하고, 이로 인해 전류변성기 비교기의 성능의 신뢰성 유지와 교정 비용절감 등의 효과가 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국표준협회 “계기용 변성기(표준용 및 일반 계기용)”, KS C 1706, 1982.
- [2] 한국표준협회 “계기용 변성기-제1부:변류기”, KS C IEC 60044-1, 2003.
- [3] Jae Kap Jung, Sung Won Kwon, Sang Hwa Lee, Jeon Hong Kang, “Calibration of Current Transformer”, KRISS, C-13-2-0100-2006(E), 2006.
- [4] 권성원, 정재갑, 김문석, 김명수, “광범위 비오차 표준 전류변성기의 개발 및 그 응용”, 대한전기학회지, 55C, 302-7, 2006.
- [5] 한국표준협회 “측정 결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침”, KS A 3000, 2005.
- [6] Tettex, “Automatic instrument transformer test set Type 2767”, Haefely Test AG - instrument transformer measurement, 2007. (www.tettex.com)

저 자 소 개



김 윤 형 (金潤亨)

1981년 10월 15일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 042-821-7604

Fax : 042-821-8895

E-mail : yoonhyoung@cnu.ac.kr



정 재 갑 (鄭在甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업(박사). 2001년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 책임연구원.

Tel : 042-868-5759

Fax : 042-868-5018

E-mail : jkjung@kriss.re.kr



한 상 길 (韓相吉)

1981년 11월 23일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 042-821-7604

Fax : 042-821-8895

E-mail : sanggilhan@cnu.ac.kr



한 상 옥 (韓相玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기) 졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5655

Fax : 042-821-8895

E-mail : sohan@cnu.ac.kr