

분광광도법 및 전기분석법을 이용한 절연유의 경년열화 진단에 관한 연구

(A Study on the Aging Diagnosis of Transformer oil by Spectrometric and Electroanalytical Methods)

김경렬* · 곽희로* · 윤영자** · 남궁미옥*** · 이동준****

(Kyung-Yol Kim · Hee-Ro Kwak · Young-Ja Yun, Mi-Ok NamGung · Dong-Zoon Lee)

요 약

본 연구에서는 주상변압기용 절연유를 대상으로 가속 열화 실험을 수행하면서 절연유의 전기적 특성값인 유전정접과 절연유내의 금속의 양과 절연지의 분해로 생성되는 푸루푸랄양을 조사 연구하였다. 유전정접은 절연유에 변압기 구성재료가 모두 포함된 경우에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 절연유의 산화에 촉매 작용을 하는 금속의 양을 측정된 결과, 구리의 양은 열화 시간이 지남에 따라서 증가하는 것을 볼 수 있었다. 유전정접과 구리측정값을 비교하여 볼때 구리측정값이 0.2(ppm) 이상 되면 요주의 범위에 속하는 것으로 볼 수 있다. 푸루푸랄의 양을 측정된 결과 열화 시간이 지남에 따라서 푸루푸랄의 양이 증가하는 경향을 보여주었다. 본 연구 결과로 볼 때 주상변압기 예방진단기초자료로 충분히 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract

The furfural, generated by decomposition of insulating paper, the amount of metal in insulating oil, and $\tan\delta$ (electrical properties of insulating oil) have been studied for the insulating oil in pole transformer with accelerated thermal aging test. It has been found that $\tan\delta$ is affected by adding components of the transformer. The examination of amount of metal, which exhibits catalytic behavior to oxidation of insulating oil, suggested that the amounts of copper increase with degradation time. A comparison between $\tan\delta$ and copper amount suggested that the amounts of copper for attention are above 0.2[ppm]. Finally, the examination of amount of furfural revealed that the amounts of furfural increase with degradation time. As a consequence, these results could be used for diagnosis of pole transformer.

*정회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수

**정회원 : 숭실대학교 화학과 교수

***정회원 : 숭실대학교 화학과 박사과정

****정회원 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정

접수일자 : 1997. 10. 8

1. 서 론

주변압기의 예방진단은 주로 부분방전법, 유중 개스분석법, 수분 및 역률 측정법 등이 사용되며 이중에서 유중개스분석법은 현재 활용되고 있는 중이다 [1~3]. 그러나 주상변압기의 절연유(광유 1종2호)는 주변압기의 절연유(광유 1종4호)와는 특성이 다르고, 밀폐방식도 다를 뿐만 아니라, 절연유의 열화 과정도 다르므로 국내에서 사용되는 주상변압기 절연유의 열화반응에 관한 연구가 필요하다.

변압기의 수명에 관계되는 것은 절연유, 절연지 등의 절연재료이다. 그 중에서 가장 많은 양을 차지하는 절연유는 크게 절연기능과 냉각기능으로 나눌 수 있다. 절연유는 운전중의 열, 유중에 잔류하는 산소와 수분 그 외 불순물에 의하여 열화되며 변압기의 과부하와도 직접적인 관련이 있기 때문에 변압기 전체에 대한 진단은 변압기 절연유의 검중에 의해서도 변압기 운전상태와 열화정도를 알 수 있다.

절연유의 열화로 생성되는 CO, H₂, CH₄, C₂H₂ 등과 같은 가연성 개스의 발생은 절연유내의 금속 중 구리의 총량에 비례한다고 보고되고 있다[4].

또한 변압기가 장시간 운전하고 있는 동안에 운전중의 열로 열화되며 절연지와 프레스보드 등의 셀룰로즈계 재료가 열화되면 기계적 강도가 저하되는데 절연지의 기계적 강도 저하는 변압기의 수명에 영향을 미친다[5]. 그러므로 프레스보드의 평균중합도도 변압기의 수명을 추정하는 방법중의 하나이다. 이 방법은 절연지를 수 그램(g)정도 채취한 후 절연지의 중합도를 측정하는데, 이것은 운전정지중의 수명 진단 방법이다.

절연지의 셀룰로즈분자는 열, 유중산소, 수분 등의 열화요인에 의하여 분해되면서 여러 종류의 퓨란화합물을 생성한다[5]. 이중 푸루푸랄의 양을 측정하게 되면 절연지의 수명을 예측할 수 있다. 절연지의 수명은 변압기의 수명에 직접 관여한다. 이 푸루푸랄측정 방법은 변압기 운전 중에도 가능한 측정법으로 변압기 운전 정지 중에 가능한 절연지의 중합도 측정 방법을 대신할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 주상변압기에 사용되는 절연유와

재생유의 유황 함유량을 조사하였고, 가속열화 반응을 수행하면서 기간별로 절연유를 채유하여 전기적 특성값(tanδ)과, 금속(Cu, Fe)의 양과, 유중의 푸루푸랄 양을 분석하였다. 여기서 나타난 실험결과와 분석을 통하여 기존의 변압기 예방진단으로 제시된 분석방법과 그 결과를 비교하여 실변압기 적용 가능성을 검토하고 예방진단의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험방법

주상변압기 내에서의 열화반응은 서서히 진행되므로 실험실 내에서 열화장치를 이용하여 가속열화실험을 하였다.

반응용기는 파이렉스 플라스크로 전체용량이 5 [ℓ]가 되도록 제작하였다. 반응용기 상부에 냉각기를 연결하고 공기중의 수분이 들어가지 않도록 건조제를 넣은 관을 연결하였다. 반응용기는 온도조절기가 부착된 맨틀을 사용하여 열화시켰다. 절연유의 열화조건으로는 주상변압기 내부 구성재료들의 중량비를 참고하여 열화실험을 수행하였다. 절연유는 광유 1종 2호를 사용하고 절연유와 변압기 구성재료들은 oil : paper : 철 : 동 = 1.4 : 0.04 : 0.8 : 0.3비에 따라 투입하였으며, 가속열화는 140[℃]에서 수행하면서 가속 열화 장치에서 채유한 시료와 주상변압기에서 사용한 절연유를 채유하여 분석하였다. 먼저 유황 함유량 측정은 Horiba사의 Model SLFA-800인 유황분석기를 사용하였고, 유전정접(tanδ)은 쉘링 브릿지를 이용한 일본 ANDO사의 TYPE TR-10C와 ANDO사의 LE-22형 oil electrode를 사용하여 시험온도를 50[℃]로 고정하고 측정주파수는 상용주파수, 시험전압은 1,000[V]로 하였다. 절연유내의 금속(Cu, Fe)양은 ICP-AES(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry)를 이용하여 분석하였다. 기기는 SHMAZDU 사의 ICP-1000를 사용하였다. 시료는 ASTM D2068-70법에 의한 산처리방법으로 전처리하여 사용하였다[6]. 절연유내의 푸루푸랄 함량 분석은 Gilson의 712

HPLC system controller software를 사용하여 Gilson 306 pump, Gilson 115 UV detector, Gilson 805 Manometric module, Gilson 811C Dynamic mixer, Gilson 506C interface와 7125 Rhedyne Injection valve가 부착된 것을 사용하였다. 기기구성은 그림 1과 같다[7].

컬럼은 Waters의 Nova-pak C18(4[μm], 3.9×150[mm])을 사용하였고 이동상은 H₂O : Methanol = 80 : 20으로 자외선 검출기는 280[nm] 파장에서 분석하였다[8].

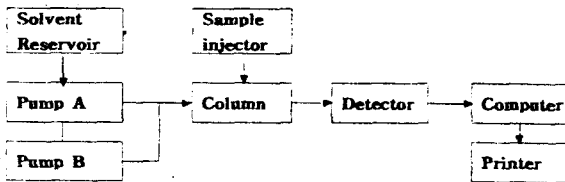


그림 1. HPLC 구성도
Fig. 2. Block diagram of HPLC

2.2 실험결과 및 고찰

(1) 유황함유량 측정

사용 중인 절연유는 대부분 금속들과 항상 접촉하게 된다. 절연유에 유황이 존재하면 구리와 같은 금속들과 접촉하였을 때 구리를 부식시키므로 절연유의 열화(劣化)를 가져오게 되며 전기적 특성을 저하시키게 되므로 국내에서 시판되는 절연유와 재생유의 유황함유량을 분석하였다.

그 결과는 표 1과 같다.

표 1. 각종 절연유의 유황 함유량
Table 1. Sulfur content of insulating oils

절 연 유		유 황 함 유 량 [%]
국내산 신유	A	0.002
	B	0.000
	C	0.019
재 생 유	D	0.234

위 표에서 보듯이 신유는 재생유보다 유황 함유량이 낮게 나타났으며 C회사의 절연유는 유황 함유량이 0.019[%]로 A의 0.002[%]와 B회사의 0.000[%] 보다 많은 것으로 조사됐다. 그러나 M.

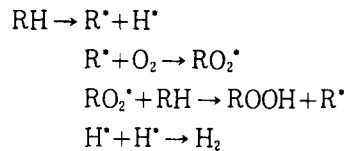
Tsuchie and T. Miyamoto[4]의 보고에 의하면 유황 함유량이 0.05~0.25[%] 범위로 조사된 것으로 보아 현재 국내산 절연유보다 일본산 절연유가 높은 유황의 함유량을 보인 것도 있다.

(2) 유전정접(tanδ)

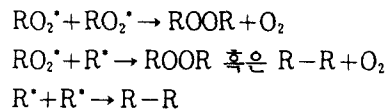
유전정접 측정값은 절연유의 열화 정도를 측정하는 주요한 지표중의 하나로 사용되고 있다. 그러므로 그림2에서 보여지듯이 경년에 따라 채유한 절연유의 유전정접은 신유가 0.0[%], 8년된 절연유가 4.0[%], 10년된 절연유는 4.5[%], 그리고 13년된 절연유는 6.8[%]이며 그 값은 경년에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

변압기 절연유와 같은 광유는 탄화수소로 구성되어 있고 그 조성에 따라 열화과정이 약간 다르지만 보통 다음과 같은 과정으로 열화한다.

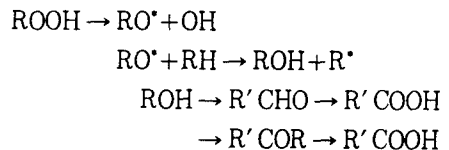
油의 분자를 RH로 표시하면



로 되고, RO₂^{*}, R^{*}는 다음과 같이 반응하기도 한다.



ROOH는 다음과 같은 반응을 거쳐 알코올, 알데히드, 케톤, 유기산 및 에스테르 등으로 분해되어 유용성 산화물과 불용성슬러지 생성에 원인이 된다.



이와같이 절연유가 열화하면 비누성슬러지가 생성되는데 슬러지는 다량의 수분을 함유하고 있으므로 유전정접이 증가하는 것으로 생각된다.

유전정접이 2~5[%]일 때 요주의로 판정되는 기준에 의하면 대략 8년 이상 경과한 주상변압기 절연

유가 이 범위에 속하는 것으로 생각된다.

절연유를 140[°C]에서 가속열화반응을 수행하면서 절연유만 사용한 경우와 주상변압기와 동일하게 절연유와 변압기구성재료를 모두 넣은 경우의 유전정접을 측정하여 그림 3에 수록 하였다.

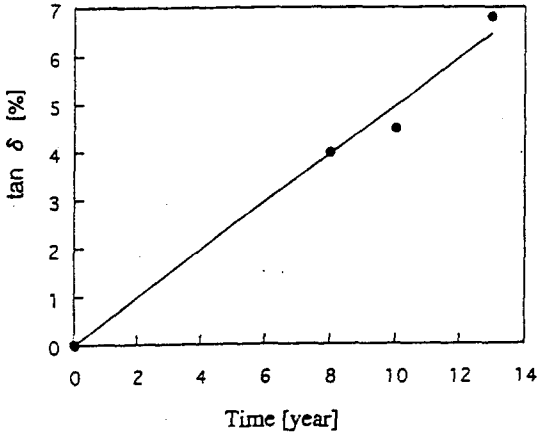


그림 2. 실변압기 절연유의 경년에 따른 tan δ 변화량
Fig. 2. Variation of tan δ values of oil in real transformer with time

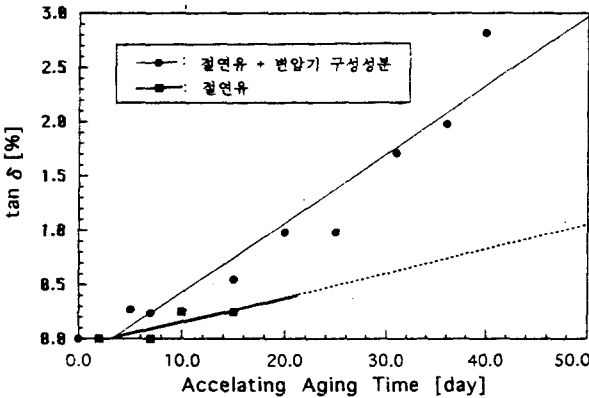


그림 3. 가속열화(140[°C])에 의한 절연유의 tan δ 변화량
Fig. 3. Variation of tan δ values of oil aged at 140[°C]

절연유만 열화시킨 경우보다 절연유와 변압기구성 재료 모두 포함된 것의 유전정접이 크게 나타났다. 이것은 변압기 구성재료중 철과 동이 열화기간동안 절연유 속에 이온의 생성으로 이온전도도가 증가하여 유전정접이 증가한 것으로 생각된다. 그러므로 절연유와 변압기구성재료 모두 함유된 절연유가 유전정접에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며,

140[°C]에서 40일 동안 열화시켰을 때, 유전정접이 요주의로 시작되는 것으로 볼 수 있다[9].

가속열화 시간에 따라 유전정접값은 지수함수로 증가하는 것으로 볼 수도 있으나 본실험의 범위에서는 그림3에 보인바와 같이 거의 직선으로 보는 것이 타당할 것으로 생각되어 직선으로 증가하는 것으로 보았다.

(3) 절연유 내의 금속(Cu, Fe)의 양

변압기에 사용되는 금속들이 절연유 열화에 미치는 영향에 관해서 많은 연구 보고가 있었다. 그중 구리와 구리화합물은 절연유의 산화에 크게 영향을 주는 촉매작용을 한다고 보고되어 있다[10]. 이러한 금속들을 측정하면 절연유의 열화 정도를 평가할 수 있을 것으로 보아 다음과 같이 140[°C]에서 절연유만 열화시킨 경우와 주상변압기 구성 재료를 포함하여 열화시킨 경우 구리와 철의 함량을 측정하여 표 2 및 표3과 그림4에 각각 수록하였다.

표 2. 가속열화(140[°C])에 의한 절연유의 ICP 실험(절연유만 열화)

Table 2. ICP test of oil aged at 140[°C] (oil only)

시 료	Cu[ppm]	Fe[ppm]
재생유	0.149	5.928
신 유	0.000	3.620
2 일	0.000	1.992
7 일	0.000	1.608
10 일	0.000	1.019
15 일	0.000	0.842

표 3. 가속열화(140[°C])에 의한 절연유의 ICP 실험(절연유+변압기 구성성분)

Table 3. ICP test of oil aged at 140[°C] (oil+transformer components)

시 료	Cu[ppm]	Fe[ppm]
신유	0.000	3.620
5 일	0.000	2.233
7 일	0.000	0.832
12일	0.000	1.227
15일	0.000	0.093
20일	0.000	1.747
25일	0.029	1.076
31일	0.043	0.822
36일	0.165	2.307
40일	0.200	1.020
50일	0.450	0.770

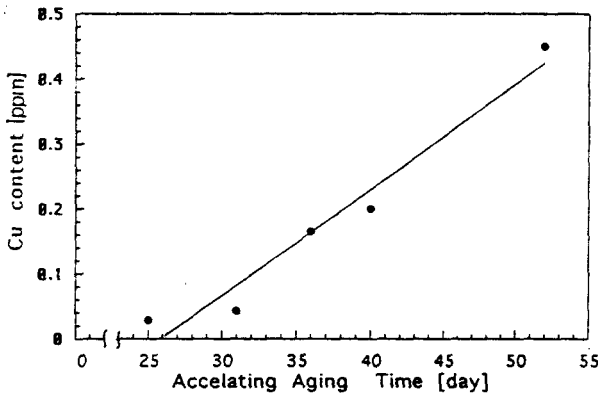


그림 4. 가속열화(140[°C]에 의한 절연유중 구리함량 변화 (절연유+변압기 구성성분)
 Fig. 4. Variation of copper content in oil aged at 140[°C] (oil+transformer components)

철의 측정값은 재생유에서는 5.298[ppm], 신유는 3.620[ppm]이고 15일 열화시킨 후에는 0.842[ppm]으로 신유일 때 더 많은 철의 양이 검출된 것으로 보아, 이는 절연유의 운반에 철제 드럼통이 사용되므로 열화되기 전 철이 미리 포함되어 있는 것으로 생각되며, 열화시간이 경과됨에 따라 철의 양이 감소되는 이유를 아직 밝힐 수 있는 근거를 찾지 못하였지만 금속으로 환원되지 않았나 생각된다.

표 2에 나타난 바와같이 가속열화시간이 경과함에 따라 철의 양이 감소함에도 불구하고 그림 2 및 그림 3에서는 가속열화시간이 경과함에 따라 유전정전값이 증가하는 이유는 가속열화에 의해 생성되는 다른 열화물질의 영향이 더 크기 때문으로 생각된다. 철의 함유량 분석은 일관성이 없이 작아졌다가 많아졌다를 반복하는데 이에 대한 납득될만한 설명이 부족하므로 계속 연구조사하여 밝히고자 한다.

주상변압기 구성성분과 동일한 재료들을 포함한 경우에는 열화 기간이 25일이 되면서 부터 구리가 검출되기 시작하여 기간이 경과할수록 증가되는 결과를 나타내었다. 신유와 재생유를 비교할 때 신유에는 구리가 존재하지 않았으나, 재생유에는 많은 양의 구리가 들어있는 것으로 보아 사용한 절연유를 재생할 때 용해된 구리가 완전하게 제거되지 못하였으며 따라서 재생유에서의 구리 함유량은 140[°C]

로 30일 이상 열화시킨 절연유의 값과 비슷하게 나타났다.

절연유에는 산화를 촉진하는 금속과 산화에 영향을 미치지 않는 금속이 존재하며 그 중 구리와 구리 화합물은 절연유에 금속 촉매 작용을 하여 절연유의 산화에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 구리의 양을 측정하면 절연유의 열화진단의 판정에 유용하게 활용될 수 있는 것으로 생각된다.

(4) 절연유내의 푸루푸랄의 양

140[°C]에서 절연유만 열화시킨 경우에는 푸루푸랄이 검출되지 않았으며 주상변압기 구성 성분과 동일한 재료들을 모두 포함하여 열화시킨 경우에 추출한 푸루푸랄의 양을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 절연재료와 변압기구성재료가 모두 포함된 경우에는 열화 시간이 길어질수록 푸루푸랄의 양이 증가하는 경향을 보여 주었다.

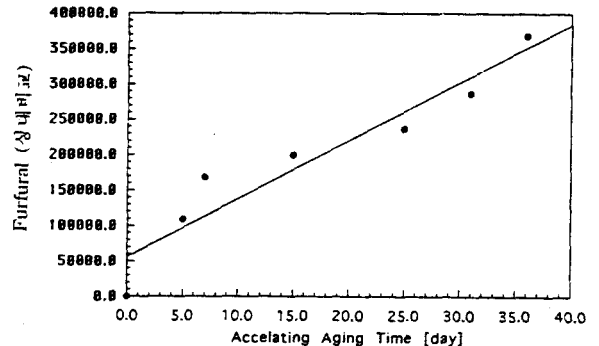


그림 5. 가속열화(140[°C]에 의한 절연유중 Furfural양 변화 (절연유+변압기 구성성분)
 Fig. 5. Variation of Furfural content in oil aged at 140[°C] (oil+transformer components)

푸루푸랄은 절연지의 분해로 생성된다고 보고된 것으로 보아 열화 기간이 경과함에 따라 절연유만 열화시킨 경우에는 푸루푸랄이 검출되지 않았으나 절연지가 포함된 절연유를 열화시킨 경우에는 검출된 것으로 생각된다. 절연지의 중합도를 분석한 보고에 의하면 열화기간이 길어질수록 중합도는 감소하는 것으로 나타났다[11]. 따라서 푸루푸랄의 양을 측정하여 간접적으로 절연지의 중합도를 알 수 있으므로 절연유내의 푸루푸랄의 양을 분석하여 주상변압기의 예방진단을 할 수 있을 것으로 생각된다.

3.결론

본 연구에서 주상변압기용 절연유를 대상으로 가속 열화 실험을 수행하면서 유전정접값과 금속의 양 및 푸루푸랄양을 조사, 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 유전정접값은 절연유만 열화시켰을때보다 절연유에 변압기 구성재료를 포함시켜 열화시켰을 때 더 크게 나타났다.

2) 변압기 구성재료를 포함한 절연유는 열화시간에 따라 구리함량이 거의 직선적으로 증가 하였다. 그리고 유전정접의 판정기준과 비교할 때 구리의 함량이 0.2(ppm) 이상 되면 요구의로 판정 가능할 것으로 생각된다.

3) 열에 의해 절연지가 열화되어 생성되는 푸루푸랄의 양을 측정 한 결과 열화 시간이 지남에 따라서 푸루푸랄의 양이 증가하는 경향을 보여주었다. 기존의 절연지의 중합도 측정으로 절연지의 수명을 예측하여 변압기의 이상 여부를 판단하던 방법 대신 절연유의 푸루푸랄양을 측정하여 변압기의 이상여부를 예방 진단할 수 있을 것이다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음. 과제관리번호 : 96-040

참고 문헌

- [1] "변압기 유중가스 상시 감시 시스템의 운영 연구." 한국 전력공사기술연구원, (1994).
- [2] 권동진, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예방진단에 관한 연구." 박사학위 논문, 5-11, (1995).
- [3] 곽희로 등, "전력용 변압기 절연유의 비파괴진단 시험법 비교 연구." 대한전기학회지, 제40권 제8호, 799~807, (1991).
- [4] M. Tsuchie and T. Miyamoto, "Phenomenon of Solution on Copper in Insulating Oil" T.IEE Japan, Vol. 113-A, No. 1, (1993).
- [5] D. H. Shroff, et al., "A Review of Paper Aging in Power Transformers", Proc. IEE Vol. 132, pp.312~319, (1985).
- [6] "재생절연유의 경년열화 연구", 한국전력공사 기술연구원, (1987).
- [7] "기기분석의 원리", 탐구당, (1996).
- [8] J. Unsworth, et.al. "Degradation of Electrical Insulat-

ing Paper Monitored with HPLC". IEEE Trans. Electr. Insul, Vol.25,737, (1990).

- [9] 月岡淑郎外, "絶縁油の劣化と壽命" 日本 電気評論, pp.18~21, (1978).
- [10] 전력연구, 제4호, pp.205~213, (1986)
- [11] Takeshi Harigae, et al., "Diagnosis of Aging Deterioration of Oil Filled Transformers by Detection of Furfural Dissolved in Insulating Oil.", T. IEE Japan, Vol. 112-A No.6, (1992).

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 경 렬(金曠烈)

132년 12월30일생. 1955년 서울대 공대 전기공학과 졸. 1980년 명지대 전기공학과 졸(석사). 현재 숭실대 전기공학과 교수.



곽 희 로(郭熙魯)

1942년 3월1일생. 1967년 서울공대 전기공학과 졸. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸(박사). 1986년 미국 M.I.T Visiting Scientist, 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수, 당학회 부회장.



윤 영 자(尹英子)

1939년 7월22일생. 1963년 이화여대 화학과 졸. 1974년 성신여대 대학원 가정과 졸(석사). 1979년 고려대 화학과 졸(박사). 현재 숭실대학교 화학과 교수.



남궁 미옥(南宮漢玉)

1963년 8월14일생. 1991년 숭실대 대학원 화학과 졸(석사). 현재 동 대학원 화학과 박사과정.



이 동 준(李東俊)

1971년 12월27일생. 1997년 숭실대 공대 전기공학과 졸(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.