

열화가중치와 웨이블함수를 이용한 케이블의 열화진단

김충배*, 김철운**

Degradation Diagnosis of Power Cables Using degradation point and Weibull Function

Choong Bae Kim*, Cheol Woon Kim**

요 약

본 논문은 현재 사용되고 있는 케이블의 진단을 위해서 열화가중치라는 새로운 접근법을 사용하였다. 케이블은 상시에 높은 온도로 운전된다는 점, 수분이 접촉할 확률이 크다는 점에서 신뢰성있고 효율적인 열화진단은 필수적이라고 할 수 있다. 종래의 연구는 수트리가 발생하는 절연층을 주 대상으로 삼았으나, 현대에 와서는 절연층뿐만 아니라, 내·외부 반도체층 또한 활발한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 최근에 국내에서 제안된 열화가중치법을 이용하여 케이블의 열화인자가 될 수 있는 부분에 대하여 특성분석을 수행한 다음, 열화가중치를 부여하여 케이블의 최종적인 상태를 파악해 보았다.

Abstract

Degradation diagnosis of XLPE insulated URD cables was accomplished through out new method, which was to be analyzed by non-electrical experiments and synthesized by degradation points. To supplement this method, It was also carried out using several electrical analyses. $\tan \delta$ had commonly a different tendency by means of temperature and frequency and also appeared higher at the outer part rather than inner part of insulator. PD-q increased generally in proportion to the applied voltage and showed regular patterns in relation to the thickness of insulator. Breakdown voltages were measured and breakdown lifetimes were predicted applying for Weibull distribution function.

* 전남대학교 대학원 전기공학과 박사과정

** 전남과학대학 방송영상학과 교수

논문접수:1999.9.27. 심사완료:1999.11.29

I. 서론

방송장비 및 OA기기에 사용되고 있는 케이블은 대부분 가교폴리에틸렌을 절연체로 채택하고 있는데, 가교폴리에틸렌 케이블은 다른 케이블에 비해 전기적, 기계적, 물리·화학적 특성이 우수하고 내열성이 뛰어나다. 그러나, 최근의 조사에서 대부분의 케이블은 설계수명(Expectation lifetime)이 30여년 정도임에도 불구하고 실제로는 이에 훨씬 못 미친다는 사실이 보고된 바 있다 [1].

외국의 경우에는 이미 케이블의 열화진단을 위해서 절연층, 반도체층 등 케이블의 열화나 사고의 원인이 될 수 있는 모든 부분에 대하여 물리·화학적 및 미세구조적 특성분석을 수행하고 적절한 열화인자에 열화가중치(Degradation point)를 부여함으로써 케이블의 성능을 종합적으로 판단하는 방법이 개발되어 활용 중에 있다 [2].

최근에 국내에서도 배전케이블의 성능을 종합적으로 분석하고 평가하려는 연구가 이루어지고 있으나, 아직까지 효율적이고 신뢰성 있는 케이블의 성능평가방법을 개발하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 우선적으로 열화가중치를 이용한 평가방법이 효율적으로 적용될 수 있는지를 알아보기 위해서 케이블의 성능에 영향을 줄 수 있는 항목들에 대하여 여러 가지 특성분석을 실시하였다. 그러나, 외국케이블과 국내케이블은 제작조건 및 사용환경이 다르기 때문에 특성분석에서 제외된 몇 가지 전기적 특성을 조사하고 비교해봄으로써 열화가중치에 의한 성능평가방법이 국내 지중케이블에 적용될 때의 문제점과 상호연관성을 분석하였다.

II. 시료의 제작 및 실험방법

시료로 사용된 케이블은 국내에서 생산된 CN/CV 케이블로서 절연체는 XLPE이고, 외피는 PVC이며, 내부·외부 반도체층으로 구성되어 있다. 케이블은 상호 비교를 위해서 사고경력이 없는 케이블(S1~S5)과 사고경력이 있는 케이블(F1~F7) 12종을 선택하였다(표 1).

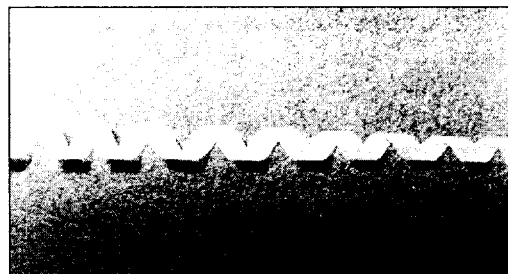
각각의 케이블은 특성분석을 위해서 그림 1의 (a), (b)와 같이 ribbon type과 coil type으로 가공하였다. 가공한 면은 SS-2000Cw로 연마하였다.

〈표 1〉 실험에 사용된 케이블의 주요 사항
〈Table. 1〉 Index of cables as specimen

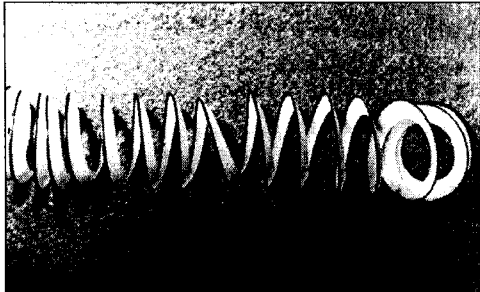
	제작 회사	설치 장소	제작년도	사용 기간	설치 방법
S1	--	--	-a	--	--
S2	--	--	--b	--	--
S3	A	옥내	1984	9년	덕트
S4	A	옥내	1987	8년 6개월	덕트
S5	A	옥내	1985	11년	덕트

	-c				
	제작 회사	설치 장소	제작년도	사용 기간	설치 방법
F1	--	--	--	--	--
F2	B	옥내	1990	5년 11개월	덕트
F3	A	옥외	1993	2년 2개월	만홀
F4	C	옥외	1985	10년 8개월	직매
F5	A	옥내	1984	12년 8개월	덕트
F6	A	옥외	1985	11년 2개월	직매
F7	D	옥내	1990	7년	덕트

※ a, b : 12년 정도 c : 2~3년 정도 추정



(a) 리본타입



(b) 코일타입
그림 1. 시료의 형태.
Fig. 1 Three types of specimens.

시료의 연면방전을 방지하기 위해서 전선을 입힌 후, 홈 부분과 도체 부분을 실리콘으로 몰드한 다음 각각의 전기적 시험을 수행하였다. 케이블의 두께방향 분포특성을 고찰하기 위해서 ribbon type 시료를 절연층 두께분포에 따라 나누었으며, 내부반도전층으로부터 외부반도전층까지의 평균 절연층 두께는 7(mm) 정도였다. 표 2는 각각의 실험 항목을 정리한 것이다. 각각의 실험들은 열화가중치를 적용하기 위한 물리·화학적 실험 및 미세구조분석과 빗금친 부분으로 표시된 전기적 특성 시험으로 분류된다. 물리·화학적 특성시험은 주로 ASTM의 고무 및 고분자의 분석을 기준으로 하였으며, 각각의 실험방법은 전력연구원 보고서 '배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축에 나온 방법을 참고로 하였다[1].

항목	목적	시험대상	비고
시각적 관찰	절연층 표면	절연층 표면	
X-ray	불순물 내부 결함	케이블 전체	-
햇오일테스트	보이드, 불순물	케이블 전체	실리콘 오일
수트리	수트리	절연층	메틸렌 블루
가교도	가교된 정도	절연층	자일렌
수축율	수축율	절연층	
체적고유저항	반도전층의 체적고유저항	반도전층	
μ -FTIR	화학적 결함	절연층	
ICP-AES	불순물 함유량	절연층과 반도전층	
DSC	열분석	절연층	RT ~ 200(°C)
유전손실	유전손실	절연층	LCR 미터
누설전류	누설전류	케이블 전체	직류 고전압
부분방전	방전량	케이블 전체	0 ~ 23(kV)
절연파괴시험	파괴수명	케이블 전체	웨이브 함수

<표 2> 실험방법과 목적
<Table. 2> Categories of experiments

$\tan \delta$ 는 리본타입 시료를 절연층의 내·외부 반도전층에서 각각 채취하여, 제작된 전극과 PLUKE사의 RLC Meter를 이용하여 측정하였다. 누설전류는 DC 23(kV)에서 1분과 7분치 값을 취하였고, 방전량과 절연파괴 시험은 100(V/sec)의 속도로 전압을 상승시켜 가면서 변위량을 X-Y 기록기로 기록하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1 열화가중치에 의한 케이블의 열화진단

최근에 전력연구원과 고려대에서 케이블의 성능평가를 위해 제안한 열화가중치를 기준으로 해서 본 실험에서 사용된 12종류의 케이블의 열화가중치를 예상하여 보았다 [1]. 제안된 열화가중치는 케이블의 사고나 열화를 일으킬 수 있는 여러 가지 인자들에 대하여 적당한 수치를 부여하고 이들을 종합하여 최종적으로 케이블의 열화와 수명을 판단할 수 있는 방법이다.

실험과 분석을 통하여 열화인자인 수트리와 보이드, 절연층과 반도전층의 불순물 여부, 수축율, 가교도, 반도전층의 체적고유저항, 산화유도시간, 화학구조결함 등을 측정하고 일정한 기준을 넘어서는 항목에 대해서 각각 가중치를 부여함으로써 최종적으로는 이를 종합하여 케이블의 열화정도를 판단하였다. 실험 결과, 사고케이블의 열화가중치가 건전케이블보다는 높게 나타났으며, 수트리에 의한 파괴가 주원인이었던 F1, F4, F6 시료의 경우는 가장 높은 수치를 나타냈다. 주목할 만한 사실은 S1과 S4의 경우는 비록 건전케이블이지만 열화가중치가 비교적 높게 나타났다는 것이다. 이는 오랜 사용기간 동안 경년열화의 정도가 심했던 것으로 생각된다. 본 실험에서 사용한 12종의 케이블에 대하여 열화가중치가 높은 순서대로 열거하면 다음과 같다.

$$S5, S3, S2 \leq F7, F2, S1 \leq F3, S4, F5 \leq F1, F6, F4$$

주의할 점은 열화가중치를 적용하기 위해 필요한 사고빈도 및 다른 몇 가지 Factor는 제외되었다는 것이다.

이런 점을 감안한다면 국내에 적용될 수 있는 열화가중치는 본 실험에서 예측된 결과보다는 더 높아질 것이다. 또한, 국내 케이블에 대하여 연구를 해본 결과, 외국에서는 중요시되지 않았던 반도체층의 성능에 관한 부분이나 제조 시에 발생하는 결함, 그리고 불순물에 관한 항목들은 국내 케이블의 경우에는 비교적 차지하는 비중이 크기 때문에 앞으로 이에 대한 연구와 자료의 축적을 통해서 국내 케이블에 맞는 열화가중치를 새로이 적용하는 것도 생각해 보아야 할 것이다.

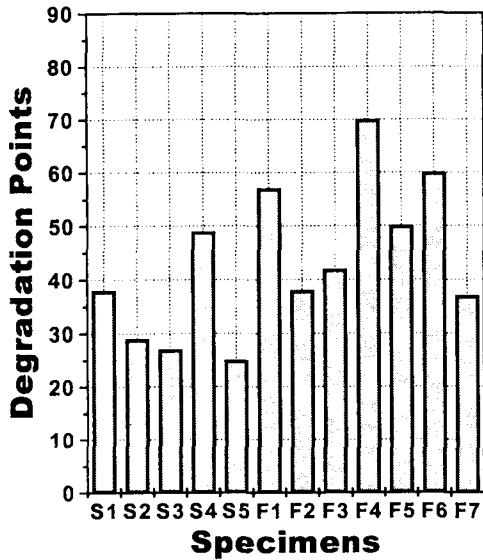


그림 2. 케이블의 열화가중치.
Fig. 2 Degradation points of each cable.

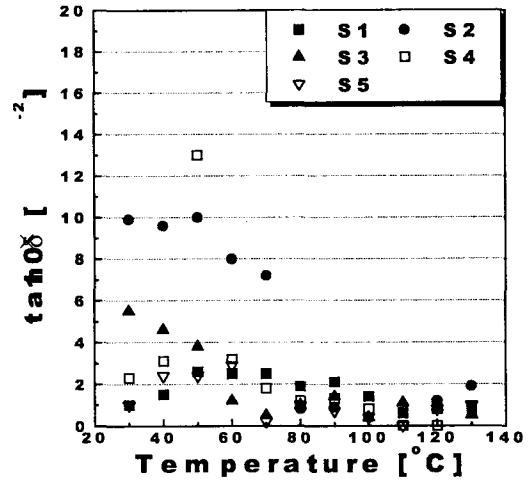
3.2 전기적 특성 결과 및 고찰

지금까지의 결과를 바탕으로 몇 가지 전기적인 특성 실험을 실시하였다. 열화가중치에 의한 특성분석은 물리·화학적, 또는 구조적인 분석이 주를 이루고 있으므로 케이블의 열화에 관한 정보를 완벽하게 포함하고 있지 않다. 따라서 고분자의 물성이 전기적인 특성과 어떻게 연결되어 있는지에 대한 연구도 이루어져야 하며, 더 나아가서는 열화가중치에 의한 절연성능평가가 국내 케이블에 효과적으로 응용되기 위해서는 이러한 비전기적 특성과 전기적 특성을 종합하여 최종적인 판정을 하는 것이 효과적이다.

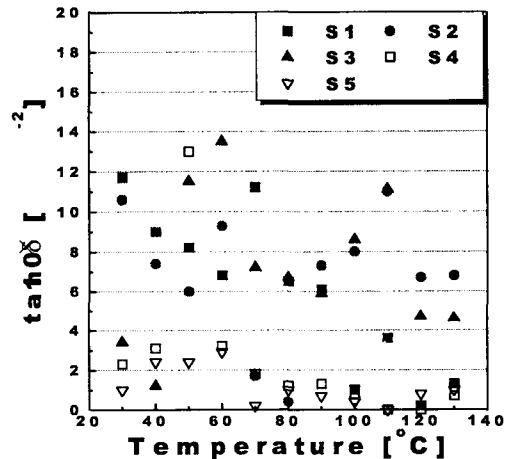
3.2.1 tanδ에 의한 절연층의 성능 분석

케이블의 절연층에 사용되는 고분자는 tanδ가 낮고, 주위환경에 의해 크게 변화하지 않는다는 특징이 있다. 그러나, 장시간 사용으로 인해 열화된 고분자는 tanδ 값이 커지는 것이 보통이다[3].

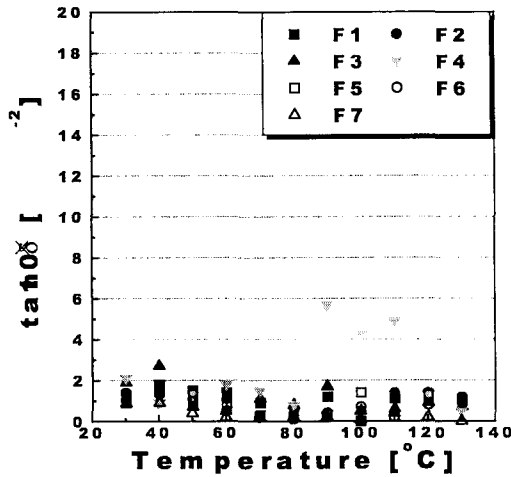
본 실험에서는 절연층의 내부반도체층쪽과 외부반도체층쪽에서 채취한 ribbon type 시료에 전극을 입힌 후, 온도와 주파수에 따른 tanδ를 측정하였다.



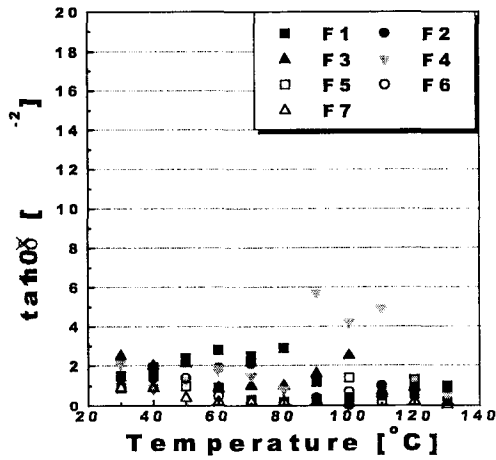
(a) 내도층 절연층



(b) 외도층 절연층



(c) 내도층 절연층



(d) 외도층 절연층

그림 3. 온도변화에 따른 $\tan \delta$ (1kHz).
Fig. 3 Tan δ with temperature (1kHz).

측정 결과, 그림 3에서 보는 바와 같이 F1~F7의 $\tan \delta$ 는 F4를 제외하면 절연층의 내부반도전층쪽과 외부 반도전층쪽 모두 온도에 관계없이 약 0.03 이하의 값으로 안정한 특성을 보이고 있다. 오히려 건전상인 S1~S5의 경우는 사고케이블의 절연층에 비해서 약간 나쁜 특성을 보이는 것으로 나타났다(4).

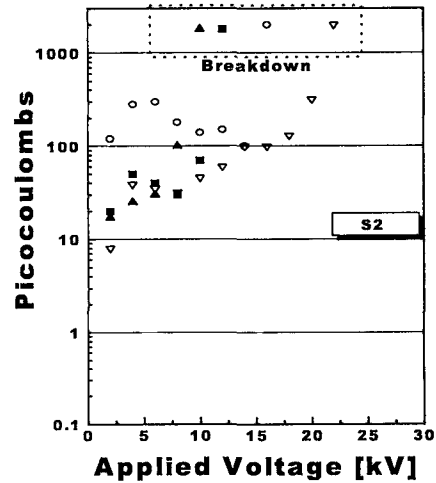
그러나, $\tan \delta$ 는 그림 3과 같이 큰 차이를 나타내고 있지 않으며 이를 열화진단에 적용하기 위해서는 더욱 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 여기서 특이

한 것은 열화가중치에 의한 평가에서는 나쁜 특성을 보이지 않았던 S2의 경우 $\tan \delta$ 값이 다른 케이블에 비해 높게 나타났다.

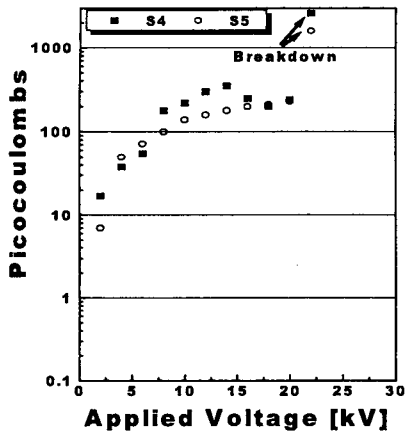
3.2.2 부분방전 특성과 열화와의 관계

XLPE는 가교반응을 위하여 첨가된 DCP (Decumyl peroxide)의 분해에 의하여 micro-void가 발생하는 것으로 알려져 있는데, 그 밀도는 약 30,000(개/cm) 정도로 LDPE의 경우(3,000(개/cm))와 비교하면 상당히 많다(5).

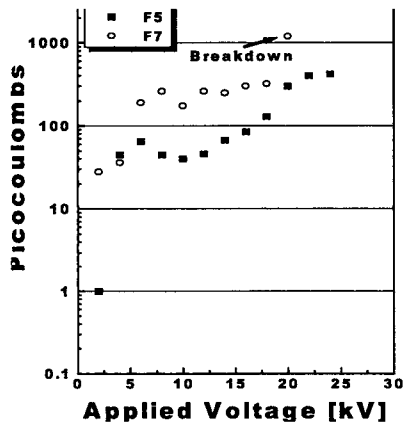
절연층의 두께에 따른 방전량의 변화를 관찰하기 위해서 일정전압을 일정속도로 인가한 다음 변화량을 측정하였다. 일반적으로 방전패턴은 저전압에서는 방전의 형태가 나타나지 않다가, 5(kV) 이상에서 수십(pC) 정도의 방전량을 나타내고, 15(kV) 이상에서는 방전량이 수백(pC) 정도를 계속 유지하다가 절연파괴에 이른다(6)(7). 절연층이 얇아질수록 이러한 형태는 전압이 낮은 쪽으로 전이하고, 절연파괴까지의 전압도 낮아지는 현상을 보인다.



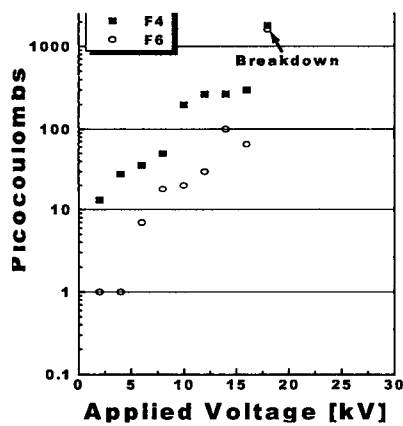
(a) S2



(b) S4와 S5



(c) F5와 F7



(d) F4와 F6

그림 4. 부분방전량 분포 (1[mm]).

Fig. 4 Partial discharge distribution (1[mm]).

그림 4는 1[mm] 두께의 절연층에 대하여 방전량을 분석한 것이다. 낮은 전압에서도 방전량이 많으며, 특히 S2의 경우는 S4나 S5보다 방전량도 많고 절연파괴전압도 낮다. 일반적으로 파괴는 20[kV] 부근에서 일어나지만, S2는 이보다 낮은 전압에서 파괴가 일어났다.

IV. 결 론

본 실험에서는 특성분석을 통해 케이블의 성능을 평가해 보고 새롭게 제작한 시료를 사용하여 몇 가지 전기적 특성 시험을 수행하였다. 열화가중치를 이용한 케이블의 성능평가 결과, 건전케이블의 20[%]와 사고케이블의 70[%]가 열화가중치의 기준인 45(point)를 넘었다. 이러한 결과는 열화가 심각하거나 성능이 약화된 사고케이블의 열화가중치가 건전케이블에 비해 높게 나타남으로서 케이블의 절연성능평가에 열화가중치를 이용한 방법이 어느 정도 효과적으로 적용될 수 있다는 것을 확인시켜 주었다. 실험 결과, 열화가 심각하게 진행되었던 F1, F6, F4 케이블과 건전케이블일지라도 오랜 사용기간에 의해 경년열화된 S1, S4 케이블의 경우 대부분 열화가중치가 높게 나타났다.

열화가중치에 의한 케이블의 성능평가 결과의 타당성을 입증하기 위해서 $\tan \delta$ 등의 전기적 특성을 조사한 결과, 열화상태에 따라 다소간의 차이를 나타냈으나, 뚜렷하게 큰 차이를 발견할 수는 없었다. 다만, 부분방전량 실험에서는 절연층의 두께와 인가전압에 따라 비교적 일정한 패턴을 보였으며 열화가 심할수록 방전량은 커지고 방전개시전압은 낮아졌는데, 이를 이용하면 XLPE 케이블의 열화진단에 큰 도움이 될 것이다.

케이블에 대한 성능평가는 필연적으로 이루어져야 한다. 이를 위해서는 신뢰성 있는 진단 및 성능평가 방법이 개발되어야 하겠지만, 무엇보다도 이에 대한 끊임없는 연구와 데이터의 축적이 먼저 선행되어야만 할 것이다.

[9] Daniel C. Harris, "Quantitative Chemical Analysis -Third Edition-", W. H. Freeman, , pp. 65-70., 1993.

참고문헌

[1] "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축", 전력연구원, TR.95 YJ 16. L.199787, 1997. 10.

[2] S. K. Aggarwal, "Literature Review of Environmental Qualification of Safety Related Electric Cables", Division of Engineering Technology Office of Nuclear Regulatory Research, NUREG/CR-6384 BNL-NUREG -52480, 제1권.

[3] 서광석, "지중 배전 전력케이블용 절연재료의 개발동향", 전기학회 논문지, 제 46권, pp. 34-39, 1997. 4.

[4] Lim Jang-seob, "Aging Recognition of Partial Discharge Patterns Using Neural Network and Semi-Fractal Dimension", Proceedings of the 5th ICPADM, 제1권, pp. 290-293, 1997.

[5] Richard L. Nailen et al "Online Monitoring of Insulation Resistance", Electrical Apparatus, 1991. 5.

[6] J. S. Lim, "Development of an Adaptive Neuro-Fuzzy Technique Based PD-Model for The Insulation Condition Monitoring and Diagnosis : Practical Aspects and Economic Consideration", CIGRE G15-108, 1998.

[7] G. Gulski, F.H. Kreuger, "Computer-aided analysis of discharge patterns," J. phys. D : Appl. phys. 23, pp. 1569-1575, 1990.

[8] J. Phillips, "Morphology-Electrical Property Relations in Polymers", IEEE Trans. Insulation, 제13권, pp. 69-81, 1998. 4.

저자소개



김 충 배
 1996년 전남대학교 공과대학 전기공학과 (공학사)
 1999년 전남대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
 1999년 현재 전남대학교 대학원 전기공학과 박사과정 재학중.



김 철 운
 1977년 전남대학교 공과대학 전기공학과 (공학사)
 1992년 조선대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1997년 전남대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1992년-1998년 전남과학대학 사무자동화과 교수
 1999년 현재 전남과학대학 방송영상학과 교수