

아크 회로의 특성 분석 및 AFCI 설치로 인한 사회적 비용평가에 관한 연구

(Research on Characteristics of Arcing Circuit and Evaluation of Societal Cost caused by AFCI Installation)

박치현* · 배석명 · 임용배 · 김기현 · 최명일

(Chee-Hyun Park · Suk-Myeong Bae · Yong-Bae Lim · Gi-Hyun Kim · Myung-Il Choi)

요 약

전력사용이 증가함에 따라 전기설비에 의한 전기화재 발생이 증가하고 있다. 통계에 따르면 전기화재가 화재원인 중 가장 높은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 전기화재를 사전에 예방할 수 있는 조사 기법이 아직은 부족한 실정이다. 이 논문은 전기화재 원인과 아크차단기의 특성에 관하여 분석한다. 먼저 아크차단기와 기존의 배선용 차단기를 비교하고 전력의 수학적 분석을 통해 아크에 의한 위험성을 분석하고 회로의 단락에 의한 위험성과 비교한다. 또한 아크차단기 설치와 사회적 비용간의 관계에 대해 알아봄으로써 아크차단기의 필요성을 제기한다.

Abstract

As usage of electric power is increased, the electric fire accident occurrences are growing, too. According to statistics it can be known that electric fire occupies the most weight. However, the method that can detect electric fire accurately is not being developed yet. This paper analyzes the cause of electric fire and the characteristics of Arc Fault Circuit Interrupter(AFCI). First this paper compares AFCI with existing molded-csa circuit breaker and finds the hazards caused by arc through power calculation and compares with danger by short circuit. And we suggest the necessity of AFCI through studying relationship of AFCI installation and societal cost.

Key Words : AFCI, Electric Fire, Power, Societal Cost, Short Circuit

1. 서 론

전기적인 고장은 충전된 도체들 사이 또는 도체와 대지나 전기계통의 접지된 부분 사이에서의 절연강도 저하에 의한 비정상적인 상태로 정의할 수 있다. 특히 전선의 절연체와 같은 고체 절연에서의 고장은

* 주저자 : 전기안전연구원 연구원
Tel : 031-580-3059, Fax : 031-580-3052
E-mail : chpark1063@yahoo.co.kr
접수일자 : 2007년 7월 18일
1차심사 : 2007년 7월 23일
심사완료 : 2007년 8월 1일

과도한 기계적 인장이나, 절연체에 인가된 가혹한 서비스 환경, 노화, 코로나 현상 등에 의해 원인이 될 수 있다[1-2].

열악한 운전 환경과 습기, 작은 금속조각, 오염 등은 결합이 있는 충전된 도체와 다른 전위를 갖는 계통 사이의 절연체에 전기적인 도전 경로를 형성시킨다. 이렇게 형성된 도전경로는 계통에서 서로 다른 전위 사이에 완전한 단락 회로를 즉각 발생시키지 않고 고저항을 갖는 경우가 많다. 따라서 완전한 단락을 형성하기까지의 고장 전류는 제한되어 고장의 위치로부터 상부에 연결될 배선용차단기에 의해 검출되지 않는 경우가 많다. 그런 고장은 검출되기에 충분한 전류를 흐르지 못하게 하고 화재 위험을 발생시킬 수 있는 아크를 지속적으로 유지시켜, 치명적 물질·인적 피해를 유발시킨다[3]. 따라서 이러한 피해를 차단할 수 있는 시스템이 반드시 요구된다.

본 논문에서는 기존의 누전차단기 및 배선용 차단기와 아크차단기의 비교 및 회로가 단락된 경우와의 전력 비교와 아크차단기로 인한 사회적 비용 감소와 같은 사례를 통해 아크차단기의 필요성을 제기한다.

2. 본 론

2.1 아크의 특성

2.1.1 물리적 특성

아크는 절연 매질을 전기적으로 관통하는 지속적인 발광방전 현상으로, 보통 부분적인 전극의 승화를 동반한다. 일반적으로 공기에 의해 음극(cathode)과 양극(anode)이 분리되며, 아크의 중심온도는 5,000~15,000[°C] 정도이다. 높은 이온화 가스 압력은 아크의 영역에서 생성된다.

2.1.2 전기적 특성

아크고장 시 고주파 잡음이 전압과 전류에서 나타나고, 아크에 의한 전압 강하가 있다. 또한 아크에 의한 전압 때문에, 전압 차에 대한 보상 기능이 없는 회

로에서의 아킹전류는 동일 회로일 경우 정상상태의 전류보다 낮다. 그리고 아크전류의 상승 비율은 정상 전류에 대한 상승률보다 일반적으로 크고, 각각의 반주기에서 아킹전류는 전류가 영점 교차 전에 거의 소멸되고 영점 교차를 지난 후에는 다시 나타난다. 이렇게 영점교차 부분에서 그림 1과 같은 파형이 나타나는 것을 “shoulder”라고 한다. 일반적으로 전압의 파형은 방형파에 가까우며, 산발적으로 정상전류 사이에서 순간적으로 높게 나타나는 경우가 많다.

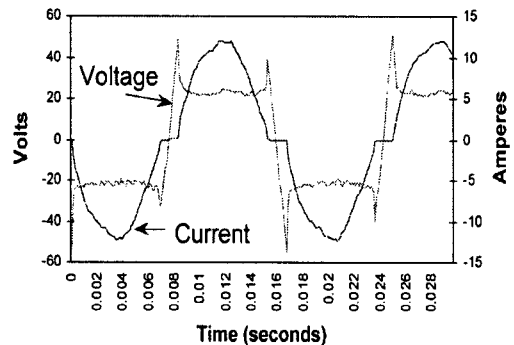


그림 1. 전형적인 아크고장에 의한 전류 및 전압 파형
Fig. 1. Current and Voltage shape due to typical arcing fault

2.2 전기화재 통계

최근 10년간 전기화재 발생현황은 표 1에서 나타난 바와 같이 발생건수는 1996년의 10,007건과 비교하여 2005년에는 약간 감소한 9,991건으로 나타났다[4]. 전기방호시설이 설치됨에도 불구하고 전기화재가 줄어들지 않는 이유는 산업의 발달로 인하여 전기의 사용량이 증가하기 때문이다. 설비가 사용 중에 물리적인 손상을 받거나 전기에 의한 또는 다른 원인에 의한 과열에 의해 아크고장이 발생할 수 있다.

또한 아크로 인한 화재도 매년 발생한 것으로 통계에 집계되었다. 표 1과 그림 2에서 보는 바와 같이 전체 화재 중 전기화재가 평균 33.4%의 비중을 차지하고 있는 것을 알 수 있고, 또한 표 2와 그림 3에서와 같이 화재 원인들 중에는 아크로 인한 것이 상당히 포함된다[5].

표 1. 최근 10년간 전기화재 통계
Table 1. Electrical fire statistics during recent 10years

구분 년도	총화재	전기 화재	점유율 [%]	인명피해 [명] 사망/부상	재산 피해 [백만원]
1996	28,665	10,007	34.9	105/327	51,321
1997	29,472	10,075	34.2	75/273	52,628
1998	32,664	10,897	33.4	88/362	57,647
1999	33,856	11,204	33.1	59/301	54,673
2000	34,844	11,796	33.9	73/389	58,985
2001	36,169	12,300	34	77/381	67,856
2002	32,966	11,202	34	87/375	57,958
2003	31,372	10,670	34	76/365	49,898
2004	32,737	10,450	31.9	30/329	45,042
2005	32,340	9,991	30.9	44/324	44,577

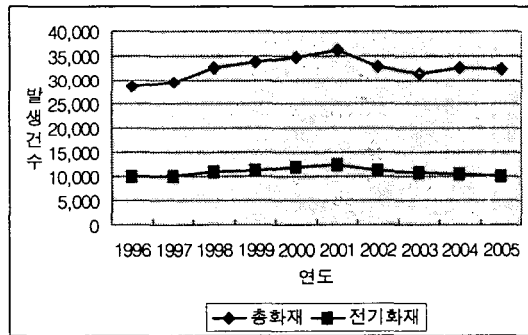


그림 2. 최근 10년간 전기화재 분포
Fig. 2. Electrical fire distribution during recent 10 years

2.3 저압차단기의 특성과 아크 회로의 발생 전력

2.3.1 배선용 차단기의 동작곡선과 아크 영역의 특성

그림 4는 과전류보호를 위한 전형적인 20[A]용 배선용차단기의 시간-전류특성 곡선으로, 이들 곡선의 조건에 만족되면 배선용 차단기는 해당 회로

표 2. 전기화재 원인 분포
Table 2. Cause of electrical fire

원인 년도	계	단락	과부하	Arc (Spark)	정전기	누전
1989	4,525	3,256	410	289	30	430
1990	5,249	3,571	478	381	102	565
1991	6,160	3,793	624	455	125	1,009
1992	6,422	3,822	855	569	66	895
1993	7,153	3,808	915	546	79	1,624
1994	8,619	5,856	795	435	35	1,345
1995	9,307	1,342	837	453	43	726
1996	10,007	6,995	601	275	27	789
1997	10,075	7,164	880	-	51	868
1998	10,897	8,240	793	-	28	792

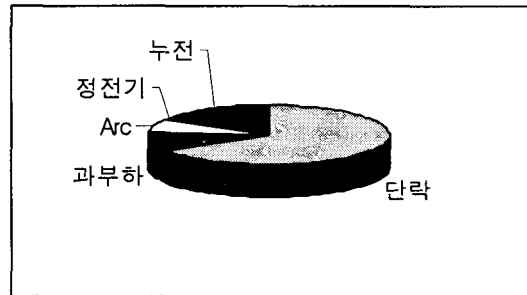


그림 3. 전기화재 원인 분포
Fig. 3. Cause of electrical fire

를 분리한다. 따라서 과전류 보호는 과전류 조건 같은 고장과 함께 아킹고장에 대해서도 회로를 보호할 수도 있다. 하지만 배선용차단기는 시간-전류의 조건이 1과 2로 표시된 영역에서는 회로를 분리하지 않는다.

그 곡선은 도체를 통해 흐르는 전류에 의한 줄열에 의해 발생하는 절연체의 열적 손상으로부터 배선을 보호하기 위한 것이지, 아킹의 영향으로부터 회로를 보호하기 위한 것은 아니기 때문이다.

영역 1은 배선용차단기와 같은 과전류 보호장치에

의해 검출되지 않는 단락회로 영역이다. 이 영역에서 아크로부터의 에너지는 짧은 시간에 인화성 물질이나 유기절연물질을 착화시키는데 충분하다. 이 정도의 전류는 배선용차단기의 동작곡선에서 정상상태의 범위에 속하기 때문이다. 이 범위에서의 아크는 병렬아크영역이다.

영역 2는 아크전류가 부하와 직렬상태일 때 갖는 낮은 에너지 영역이다. 물질의 착화는 아크발생 지속 시간이 길지 않는 한 영역 1에서보다는 적게 발생된다. 하지만 아킹은 절연체와 같은 물질을 가로지르는 아크 트랙킹에 의해 이 영역 정도의 전류가 유지될 수 있다.

아크 검출의 관점에서 두 영역 사이의 구별은 중요하다. 그림 4에서와 같이 영역 1의 병렬아크가 일반적으로 영역 2의 직렬아크보다 고장전류가 좀 더 높다[6].

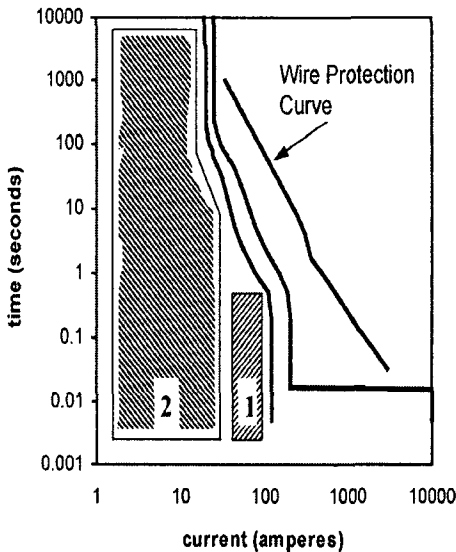


그림 4. 배선용차단기의 전류-시간 동작곡선
Fig. 4. Current-time curve of wiring circuit breaker

2.3.2 아크와 단락의 위험성

아크와 단락 시 전력을 계산함으로써 아크의 위험성을 모의실험을 통하여 보여준다.

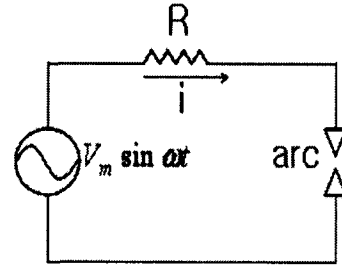


그림 5. 소스전압, 임피던스, 아크에 대한 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of source voltage, impedance and arc

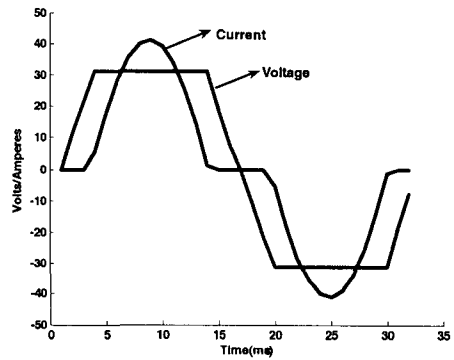


그림 6. 아크 전압 · 전류에 대한 모델링
Fig. 6. Modeling of arc voltage and current

그림 1의 실제 아크 전류 및 전압 파형을 그림 5와 같은 회로에 대해 그림 6과 같이 근사화하여 구한 아크전류 실효치와 아크에 의한 전력은 각각 식 (1), (2)와 같다[7].

아크전류 실효값 :

$$I = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{1}{2} + x^2 \right) \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} x \right) - \frac{3}{2} x \sqrt{1-x^2} \right]} \quad (1)$$

아크내의 전력 :

$$P = \frac{V_m^2}{R} \frac{2}{\pi} x \left[\sqrt{1-x^2} + x \left(\sin^{-1} x - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2)$$

여기서, $x = \frac{V_a}{V_m}$ 이다.

예를 들어 0.5[Ω]의 저항을 가진 회로에서의 110[V] 내의 아크를 고려한다. 아크 내 발생하는 전

압 V_a 는 70[V]이다. V_m 은 155[V]이고 x 는 0.452 이므로 식(1), (2)를 이용하면 아크에 의한 전력을 구할 수 있다.

전력은 $(155)^2/0.5 \times 0.1134 = 5449[W]$ 이다.

이제 아크가 발생한 지점에서 단락이 발생했다고 가정한다. 전류는 $110/0.5 = 220[A]$ 이다. 접촉부위에서의 저항은 압력, 접촉면적, 금속표면의 성질 및 기타 다른 여러 인자들에 의해 좌우된다. 대표적인 값은 $0.0005[\Omega]$ 이다. 단락회로에 있어서 전압은 $220 \times 0.0005 = 0.11[V]$ 이고 전력은 $220 \times 0.11 = 24.2[W]$ 가 된다.

위의 계산에서 알 수 있듯이 아크에 의한 전력은 단락 회로보다 수 백배 크다. 아크내의 전류는 아크 자체로 제한된다. 이 전류는 작기 때문에 방호장치가 빠르게 회로를 개방하는데 실패한다. 아크내의 전력은 매우 높고 작은 부분에 집중되기 때문에 방호장치가 회로를 개방하기 전에 오랜 시간동안 지속되어 상당한 손상을 줄 수 있다. 반면에 단락회로에 있어서 높은 전류가 발생하지만 전력은 매우 낮다. 더욱이 높은 전류 때문에 방호장치가 빠르게 동작할 것이고 전체 에너지는 아주 작다. 그림 6은 전원 전압에 따른 아크와 단락과의 전력을 비교한 그림이다. 그림에서 보듯 전압이 커질수록 아크에 의한 전력과 단락에 의한 전력의 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 분석을 통하여 아크에 의해서는 상당한 손상이 발생할 수 있고 단락회로에 의해서는

손상이 작다고 할 수 있으므로 아크로 인한 화재를 방지하기 위한 대책이 시급하다.

2.4 AFCI 설치로 인한 사회적 비용 평가

2000년 미국 소비자 제품 안전 위원회(Consumer Product Safety Commission, CPSC)의 보고 자료를 분석한 것이다[8].

조사위원회 의원들은 1990년부터 1998년까지 9년에 걸쳐 배전계통을 포함하여 평균 41,500건의 화재가 발생했다고 보고했다. 이 화재들은 매해 평균 326명의 사망, 1,481명의 부상, 6억4천6백만 달러의 재산상 손실을 가져왔다. 여기서 분석을 위하여 CPSC의 부상 비용 모델을 사용하여 사망자 1명이 5백만 달러에 상당하고 화재 관련 부상이 56,000달러라고 가정한다. 이러한 모델을 이용하여 전기화재의 사회적 비용은 매해 약 23억6천만 달러에 달할 것으로 예상된다.

이 분석 내용에서 사회적 비용(Societal Cost)이라는 전기화재에 관련된 소비자 사망, 부상, 재산손실로 인해 사회가 부담해야 하는 비용으로 한정한다.

2.4.1 주택 노화에 의한 비용

1990년 CPSC의 조사결과에 의하면 주거시설 전기화재의 85[%]가 20년 이상된 집에 대한 것으로 나타났다. 1999년 Annual Housing Survey에 따르면 1990년부터 1998년 기간동안 약 9천8백7십만 가구가 있었고 이 중 약 7천만 가구가 20년 이상된 것으로 나타났다. 20년 미만된 집에 대해서 사회적 비용은 매년 3억5천4백만 달러에 달하는 것으로 조사되었다. 20년 미만인 집이 2천8백7십만 호가 있으므로 사회적 비용의 기대치는 매년 한 가구당 12.33달러이다.

20년 이상된 집에 대해 사회적 비용은 매년 이십억 천만 달러에 달한다. 따라서 20년 이상의 7천만 가구에 대한 사회적 비용 기대치는 매년 한 가구당 28.66달러이다.

2.4.2 AFCI의 수명에 따른 경제적 효과

CPSC 기술진은 AFCI가 40년 정도 서비스가 가능하다고 보고 있다. 이에 근거하여 이 논문에서

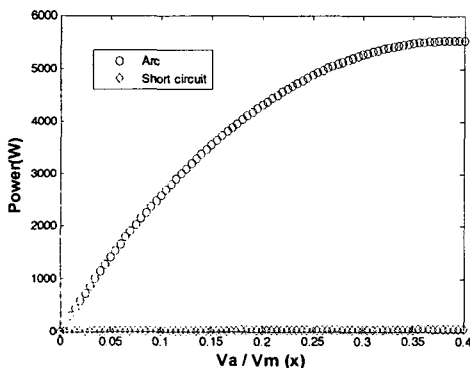


그림 7. 아크 대 단락 회로의 전력
Fig. 7. Power of arc and short circuit

는 AFCI가 30년에서 40년 지속될 것이라고 가정한다.

표 3은 몇몇 상황에 따른 AFCI 설치 시 사회적 비용에 대하여 나타낸다. 20년 이상된 주거시설에 화재가 집중되므로 표 4에서 사회적 비용 감소분이 20년 후 설치시 가장 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 오래된 주택일수록 화재의 위험성이 더 크므로 오래된 집에 AFCI를 설치하면 화재를 그만큼 더 예방할 수 있기 때문이다. 그러나 사회적 비용 감소분이 시간에 따른 사회적 비용 증가분보다 크지 않으므로 사회적 비용은 AFCI 설치년수에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

표 3. AFCI 설치에 따른 사회적 비용
Table 3. Societal cost according to AFCI installation

(단위: 달러)

	AFCI 설치에 따른 사회적 비용	
	30년 사용	40년 사용
건축시 설치	324	425
10년 후 설치	429	530
20년 후 설치	572	673

표 4. AFCI 설치에 따른 사회적 비용 감소분
Table 4. Societal cost reduction according to AFCI installation

(단위: 달러)

	AFCI설치 시 사회적 비용 감소분	
	30년 사용	40년 사용
건축시 설치	203	394
10년 후 설치	267	452
20년 후 설치	287	473

표 4는 AFCI 설치에 따른 사회적 비용 감소분이다. Engineering Sciences 기술진에 의하면 AFCI 기능이 없는 차단기와 비교해서 AFCI가 있는 차단기가 한 가구당 150달러에서 200달러 정도 가격이

높은 것으로 조사되었다. 이에 따라 AFCI 설치시 한 가구당 175달러가 추가로 소요된다고 가정한다. 사회적 비용 감소분이 오래된 집에 AFCI를 설치할수록 증가하고 기존 시스템 대신 AFCI를 사용할 때 드는 비용인 175달러보다 AFCI를 설치함으로써 얻어지는 사회적 비용 감소분이 더 많은 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

배선용차단기와 누전차단기가 대부분의 가정에 보급되었음에도 불구하고, 전기에 의한 화재는 좀처럼 감소되지 않고 있다. 이에 대한 원인은 아크고장에서 찾을 수 있다. 기존의 누전차단기나 배선용 차단기로는 아크로 인한 화재를 막을 수 없음을 전류-시간 특성 곡선에 의해 확인할 수 있었다.

앞에서 검토한 바와 같이 아크고장에 의해 흐르는 단락 전류는 배선용차단기에 의해서는 보호되지 않는다. 이는 아크고장 시 흐르는 전류가 정상상태의 전류보다 오히려 적거나 약간 많이 흐르는 정도로 차단기의 동작범위의 관점에서는 정상상태에 있기 때문이다.

또한 아크발생회로와 단락회로 발생시 발생 전력을 비교함으로써 아크의 위험성을 모의실험을 통해 알 수 있었다. 아크발생시 전력은 단락시 전력보다 수백배 크다.

미국의 전기화재통계분석을 통하여 아크차단기 설치시 아크차단기 미설치시보다 사회적 비용이 더 적은 것을 볼 수 있었다.

국내는 공칭전압으로 220[V]를 사용하기 때문에 주변국에 비해서 전기화재에 대한 위험도가 높고 발생활 또한 높다. 따라서 이를 저감시키기 위한 아크분석 알고리즘의 다양한 개발이 요구되고 귀찮은 트러블이 발생되지 않는 아크고장회로차단기의 도입이 필요하다고 판단된다.

References

- [1] George D. Gregory, etc., "More about Arc-Fault Circuit Interrupter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, 1006-1011, 2004.
- [2] Pete Theisen, etc., "Enhancing Aircraft Electrical System Safety and Uptime", The 8th Joint NASA/FAA/DoD Conference on Aging Aircraft, 1-14, 2005.
- [3] Tammy Gammon, etc., "Conventional and Current-Dependent Methods for Predicting RMS Arc Currents in Building Systems", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Conference, 75-82, 2001.
- [4] 산업자원부, "전기화재 통계분석," 2006.
- [5] 행정자치부, "화재통계연보".
- [6] George D. Gregory, etc., "The Arc-Fault Circuit Interrupter: An Emerging Product", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, 928-933, 1998.
- [7] 홍성호, "아크에 의한 전기화재 위험성 분석", 산업과학 기술연구소 논문집 Vol.14, No. 2, 85-92, 2000.
- [8] Consumer Product Safety Commission, "AFCI Replacements", 2003.

배석명 (裵錫銘)

1956년 10월 22일생. 1984년 창원기능대학교 전기기과 졸업. 1981~1997년 한국전기안전공사 근무. 현재 전기안전연구원 IT기술개발센터 센터장.

임용배 (林庸培)

1967년 11월 16일생. 1994년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1998년 홍익대학교 전기제어공학과 졸업(석사). 2007년 홍익대학교 전기정보제어공학과 졸업(박사). 1994~1996년 동아트랜스공업(주) 재직. 1996년~현재 전기안전연구원 파트장.

김기연 (金基鉉)

1971년 5월 1일생. 1997년 숭실대학교 전기공학과, 2000년 8월 졸업(석사). 2006년 동 대학원 박사 수료. 2000년 6월~2003년 6월 한국전기연구원 재직. 2006년 전기안전 기술사 취득. 2003년 7월~현재 전기안전연구원 IT기술개발센터 근무.

최명일 (崔明日)

1975년 5월 30일생. 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동대학원 석사 졸업. 2001~2002년 한국전기연구원 근무. 2003년~전기안전연구원 IT기술개발센터 근무.

◆ 저자소개 ◆

박치현 (朴治現)

1973년 1월 22일생. 2000년 고려대학교 전기전자전파 공학부 졸업. 2003년 동대학원 석사졸업. 2003~2005년 LG이노텍 근무. 2006년~전기안전연구원 IT기술개발센터 근무.