

Design and Analysis of Eddy-Current Braker for High-Speed Train

鄭壽鎭* · 姜道鉉** · 金東熙***
(Soo-Jin Jung · Do-Hyun Kang · Dong-Hee Kim)

Abstract - The brake systems of high-speed train are to be equipped with three different brake systems, such as regenerative brake with regenerative feedback in driving car, a pneumatic disc brake, and non-contact linear eddy-current brake(ECB). The regenerative brake and the pneumatic disc brake are acting on the wheels. Their achievable braking force depends on the adhesive coefficient, which is influenced by the weather condition and speed, between the wheel and rail. The linear eddy-current brake gets an economical solution in the high-speed train because of the independence of the adhesive coefficient, no maintenance needed, and the good control characteristics. The braking force and the normal force of ECB for korean high-speed train are analysed by the 2D FEM(Finite Element Method). Finally the normal force is compared with the experiential values to verify the analysis.

Key Words : High-speed train, Eddy-current braker, Braking force, Normal force, 2D FEM

1. 서 론

고속의 운송수단이 발달되고 있다. 고속전철의 경우 고속화됨에 따라 안정된 제동력의 확보가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 고속전철의 제동 시스템은 높은 신뢰성과 이용성을 가지고 가능한 마찰부분을 줄이면서 필요한 제동력을 얻고 또한, 제어성이 좋은 제동장치의 개발이 요구된다. 종래의 열차제동에는 운동에너지를 마찰열로 변환하는 마찰제동방식을 이용하였으나 고속화됨에 따라 마찰부분을 최소화하기 위한 전기제동방식 즉, 회생제동과 와전류 제동이 선진 고속전철(독일 ICE, 프랑스 TGV, 일본 JR-500)의 최신 열차제동으로 채택되고 있다^[1]. 특히 와전류 제동방식의 경우 속도가 높아짐에 따라 매우 크고 안정된 제동력을 확보할 수 있으며 비접촉 방식으로 레일과의 접촉계수의 변화에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 와전류 제동장치는 직류로 여자되는 전자석과 레일로 구성되며, 도전율을 가지고 있는 레일과 전자석의 상대운동에 의해 레일에 유도되어 흐르는 와전류가 제동력으로 작용하게 된다.^[1,2] 즉, 열차의 기계적인 운동에너지가 레일에 유기되어 흐르는 전기적인 에너지로 소모된다. 와전류 제동장치는 단 시간에 큰 제동력을 확보하기 위해 높은 전류를 인가시켜야

하므로 전자석과 레일의 온도상승을 초래하게 된다. 그러므로, 와전류 제동장치의 마그네트에 대한 열특성 검토와 열차가 레일을 지날 때 온도상승 예측이 요구된다.

본 논문에서는 한국형 고속전철의 비접촉 와전류 제동장치의 설계와 제동특성을 2D-FEM을 적용하여 과도특성 해석을 수행하였으며 제작된 시제품의 전자석을 실험하여 해석결과와 실험결과를 비교함으로써 설계 및 해석의 타당성을 검토하였다.

2. 와전류 제동장치의 설계

2.1 와전류 제동장치의 원리 및 기본사양

고속전철용 비접촉 와전류 제동장치는 차량에 탑재되어 레일과 7[mm]의 이격거리를 가지고 v 의 속도로 운전할 경우 레일에 유기되는 와전류에 의해서 제동력이 발생하므로 접촉계수의 영향을 받지 않게 되며 직접 제동력이 발생하게 된다. 본 논문에서 제안하는 와전류 제동장치에 의한 제동력 분담은 속도범위 50[km/h]~350[km/h]까지 약 150[kN]을 분담시킨다. 따라서 와전류 제동장치에서 분담 감속도는 $150[\text{kN}]/630[\text{ton}] = 0.24[\text{m}/\text{sec}^2]$ 가 되며, 제동장치 20기 장착시 제동장치 1기의 평균 제동력은 7.5[kN], 제동장치 1기당 흡인력(속도 50km/h 이상)은 30[kN]이상이 된다^[2]. 그림 1은 전자석 10개로 구성된 와전류 제동장치의 1기분 구조를 나타내고 있다.

* 準 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 碩士課程
 ** 正 會 員 : 韓國電氣研究員 Mechatronics그룹 工學博士
 *** 正 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 2002年 2月 26日
 最終完了 : 2002年 10月 4日

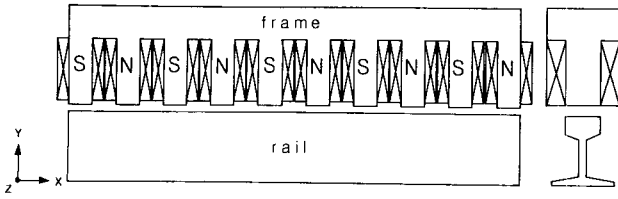


그림 1 와전류 제동장치의 구조
Fig. 1 Structure of the ECB

2.2 제동장치의 기본설계

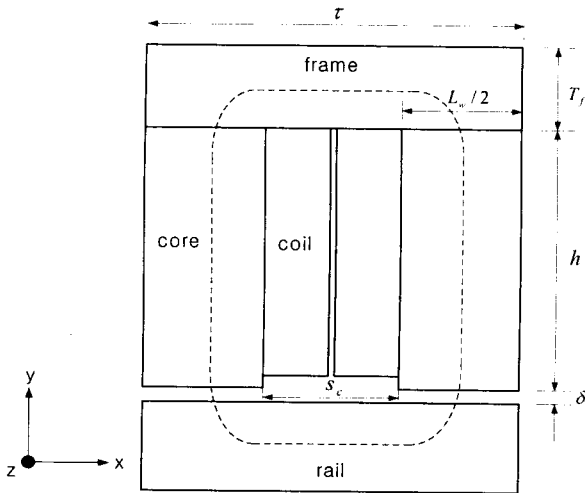


그림 2 와전류 제동장치 1극 설계모델
Fig. 2 1 pole design model

그림 2의 설계모델에서 공극, 철심, 레일에 필요한 기자력(NI)는 암페어의 법칙을 적용하였으며, 공극의 자기저항이 크므로 기자력이 공극에 소요된다고 가정하여 필요한 기자력(NI)를 산정하였다.

$$\int H \cdot dl = NI \tag{1}$$

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{NI}{2\delta} \tag{2}$$

여기서, H는 자계, B는 자속밀도, δ는 공극, 그리고 μ₀는 진공의 투자율이다.

2.3 해석방법 및 조건

전류 변화와 공극의 변화에 따른 제동력 및 흡인력 특성을 해석하기 위해 그림 2의 해석모델을 대상으로 2D-FEM을 적용하였다. 이 때 표 1의 해석조건을 이용하였다. 시간 변화에 따른 벡터 포텐셜 A의 자계는 전자계 방정식 (3)과 같다.^[3]

$$\begin{aligned} (\vec{V} \times \vec{B}) &\rightarrow (\vec{V} + \vec{B}) \\ \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) &= J_0 + \alpha (\vec{V} + \vec{B}) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, J₀는 공급되는 전류밀도, σ는 레일의 도전율, V는 레일 표면에서의 선 속도, μ는 투자율이다. 또한, 제동력은 와전류 제동장치가 동작할 때 속도의 함수이다. 따라서, 그림 2에서의 운동방정식은 식(4)와 같다.^[3]

$$-F_d(v) = m a = m \frac{dv}{dt} \tag{4}$$

여기서, F_d(v)는 2차원 유한요소 해석에 의한 제동력, m은 열차의 중량, a는 열차의 감속도이다.

표 1 와전류 제동장치의 해석조건

Table 1 Analysis condition of the ECB

파라메타	치수 및 재질	비고
턴 수	160[Turn]	
전류 변화	0~150[A]	정격 100[A]
공극 변화	3~9[mm]	정격 7[mm]
코일 재질	copper	
철심 재질	S20	
프레임 재질	S20	
레일 사양	UIC 60	
절연물	Epoxy, Fiber, Nomex	

2.4 극수의 결정

그림 2에 나타난 와전류 제동장치 전자석 1개의 치수사양을 대상으로 극 간격(τ)과 코일 창 폭(S_c)의 최적비(τ/S_c)를 산정하여 속도 350[km/h]에서 극 당, 단위 중량당 최대 제동력을 발생시키는 최적 극 수를 찾기 위해 8,10,12극 일때의 제동력을 2차원 유한요소 해석을 통하여 산정 하였다. 표 1에서 제동장치의 중량중 철심의 중량은 극수에 상관없이 모두 동일하나 전기적 입력이 같기 위해서는 1극당 저항이 달라야 하기 때문에 1극당 코일창 면적이나 기자력이 전체 극수에 따라 차이가 있다. 그러므로 표 2에 나타난 것과 같이 전체 질량이나 1극당 기자력이 다르게 나타난다.

표 2 극수에 따른 설계변수

Table 2 Design Variable according to number of pole

항 목	8 극	10 극	12 극	
치 수 [mm]	S _c	47.64	38.12	31.76
	h	140	140	140
	L _w	91.805	73.44	61.2
극 간격 τ [mm]	231.25	185	154.16	
총 질량 [kg] (코일 + 철심)	189.2	176	167.1	
1극당 기자력 [AT]	32412.8	28227.1	25122.8	
코일저항 [Ω] (여자전류 동일)	1.8649			
소비전력 [kW]	17.18			
단, 여자전류와 제동장치의 전체 저항은 동일.				

그림 3에서 전기적 입력이 동일할 경우 극수에 대한 제동력이 8극일 때 가장 크게 나타나며, 그림 4에서 각각의 제동력을 제동장치의 중량으로 나눈 단위중량당 제동력이 10극

에서 가장 큰 값을 나타낸다. 따라서, 본 논문에서는 단위중량당 제동력이 크게 나타나는 10극으로 결정하였다.

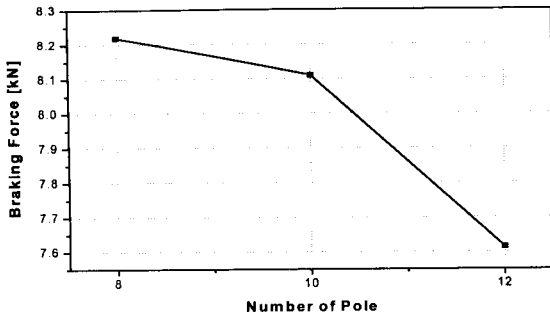


그림 3 극 수 변화에 따른 제동력 변화 (350 [km/h])
Fig. 3 Braking force according to number of pole (350 [km/h])

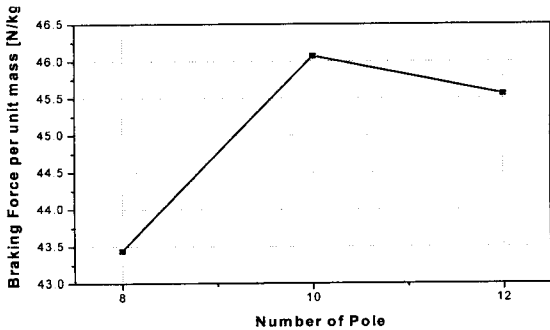


그림 4 극 수 변화에 따른 단위중량당 제동력 변화 (350 [km/h])
Fig. 4 Braking force per mass unit according to number of pole (350 [km/h])

2.5 권선 창의 설계

결정된 최적 극수를 바탕으로 코일의 창 면적을 동일하게 둔 후 코일의 폭과 높이를 변경시켰을 때 단위중량당 제동력을 최대 발생시키는 창 면적을 찾기 위해 표 3의 경우에 대하여 제동력을 해석하였다. 각 경우에 대한 10극 제동장치가 발생하는 결과를 그림 5에 나타내었으며, 각 Type에서 S_c 가 증가할수록 제동력은 감소함을 알 수 있다. 이는 S_c 가 증가하면 자속을 발생시키는 단면적이 감소하기 때문에 제동력이 줄어드는 것으로 해석된다.

표 3 설계변수 b, S_c 의 정의

Table 3 Definition of design variable b, S_c

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
b [mm]	120.1	114.5	108	101.7	83.3
S_c [mm]	38.12	40	42.5	45	55
τ [mm]	185				
전류 [A]	96				
기자력 [AT]	28,200				
출력 [kW]	20				

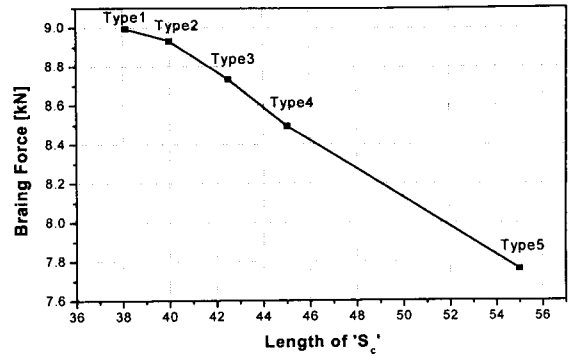


그림 5 각 Type에 대한 제동력 곡선 (10극, 350 [km/h])
Fig. 5 Each type V.S. braking curve (10극, 350 [km/h])

표 4의 제동장치 무게를 고려하여 열차속도가 350[km/h] 일 때 단위 중량당 제동력의 변화를 해석하여 그림 6에 나타내었다. 각 Type에 대한 단위중량당 제동력은 코일 및 절연물로 구성된 코일 창 부분의 단위체적당 중량이 철심의 중량보다 적으므로 S_c 의 증가에 따라 증가하고 있다. 이는 제동장치의 중량이 S_c 의 증가에 따라 감소하기 때문으로 해석된다. 제동장치는 열차속도 350[km/h]에서 7.5[kN]의 제동력을 요구하므로 이 조건을 만족하면서 단위중량당 제동력도 만족시켜야 한다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 조건들에 적절하게 부합되는 Type3로 결정하였다.

표 4 각 Type별 제동장치의 중량

Table 4 Weight of the ECB according to types

Type	무게 [kgf]	비고
Type 1	151.1	코일부 무게는 동일.
Type 2	145.8	
Type 3	139.6	코아밀도=7,850[kg/m ³]
Type 4	133.8	코일밀도=8,954[kg/m ³]
Type 5	116.5	

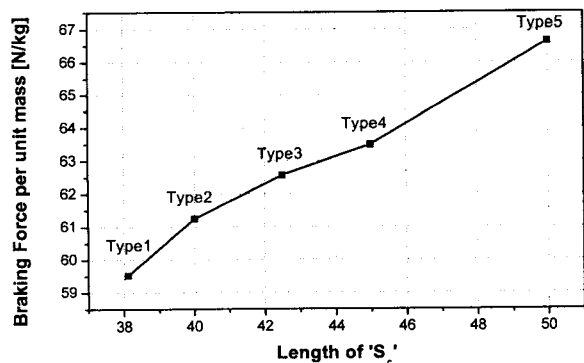


그림 6 각 Type에 대한 단위중량당 제동력 곡선 (10극, 350[km/h])

Fig. 6 Braking curve according to each type per mass unit (10극, 350[km/h])

2.6 권선의 결정

설계된 와전류 제동장치 1극분의 권선장 단면적을 대상으로 전류밀도를 만족하는 권선을 KS규격에 의거하여 평각동선 2[mm]×4.5[mm]로 결정하였다.

2.7 제동장치 설계결과

그림 2의 모델에서 결정된 설계치수 및 와전류 제동장치 1기분에 대한 설계결과를 표 5에 나타내었으며, 전자석 1극의 길이는 183[mm]로 설계되었으나 부착 여유를 고려하여 10극 1기분의 길이를 1,850[mm]로 결정하였다.

표 5 와전류 제동장치 설계결과
Table 5 Design result of the ECB

항 목		설 계 값
기자력	NI	32,000 [AT]
1기분 제동장치 길이	L	1,850 [mm]
극 수	P	10 [극]
자속밀도	B	1.5 [T]
코어의 축 방향 길이	L_c	65 [mm]
코어의 폭	L_w	116[mm]
공극	δ	7 [mm]
전자석의 높이	h	117 [mm]
프레임 두께	T_f	40 [mm]
코일 턴 수	t	160 [turn]
코일 저항	R	1.62 [Ω]
점적율	k	0.6

3. 제동장치의 흡인력 및 제동력 해석

3.1 등가 해석 모델링

설계된 와전류 제동장치는 FEM 해석 프로그램(flux-2d, emf)을 이용하여 전류의 변화와 공극의 변화에 따른 해석을 수행하여 흡인력 및 제동력 특성을 검토하였다. 그림 7은 설계된 와전류 제동장치 1기분의 기본 모델을 나타내며 그림 2에서 결정된 치수를 대상으로 해석을 수행하였다.

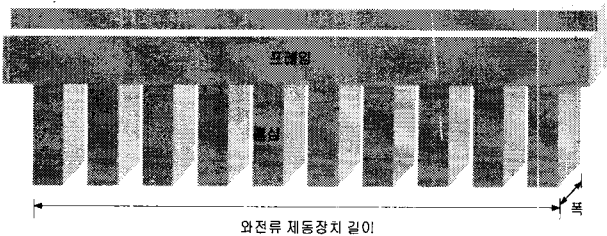


그림 7 와전류 제동장치의 기본 모델
Fig. 7 Basic model of the ECB

3.2 흡인력 및 제동력 해석

그림 2에 나타난 등가 해석모델을 대상으로 정격전류를 인가한 경우 최대속도 350[km/h]에서의 자속형상을 그림 8

에 나타내었으며, 속도 변화에 따라 발생하는 제동력 및 흡인력을 해석하여 그림 9와 10에 나타내었다. 해석결과 정격공극 7[mm]와 8[mm]에서 고속전철에 요구되는 제동력과 흡인력이 만족함을 알 수 있다.

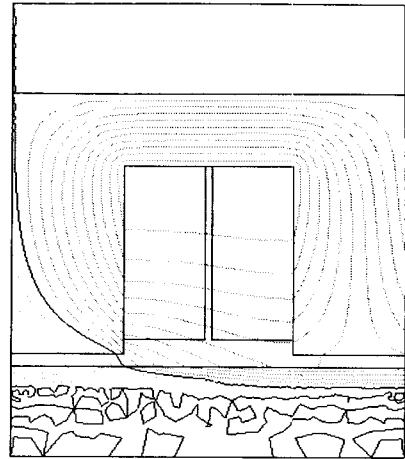


그림 8 제동장치의 자계분포
Fig. 8 Flux distribution of the ECB

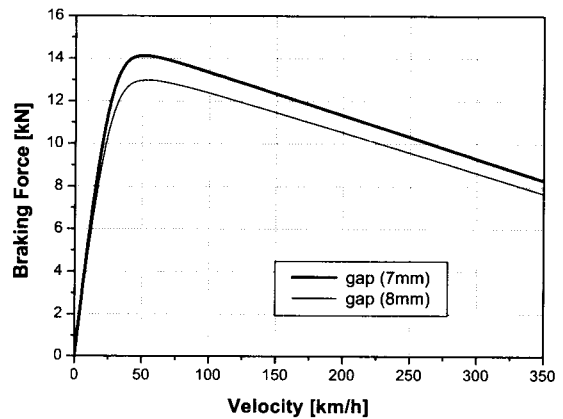


그림 9 속도변화에 따른 제동장치 제동력
Fig. 9 Braking force of the ECB according to velocity

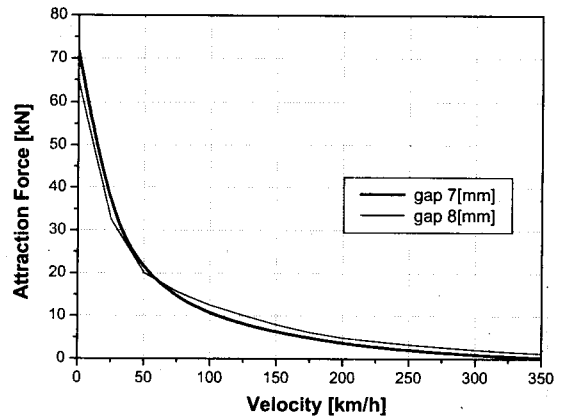


그림 10 속도 변화에 따른 제동장치 흡인력
Fig. 10 Attraction force of the ECB according to velocity

3.3 제동장치 실험

설계된 제동장치 마그네트 폭이 55[mm]로 제작됨에 따라 마그네트폭 65[mm]와 55[mm]에 대한 해석과 55[mm]의 실험을 수행하였다. 와전류 제동장치의 실험중 제동력은 열차의 속도와 비슷한 환경을 갖는 플라이 휠의 제작 관계로 실험이 불가능하였다. 또한, 제동장치의 공극 불균형으로 평균 공극을 8[mm]로 흡인력 실험을 수행 해석값과 실험값을 비교하였다. 그림 11은 실제 제작된 와전류 제동장치의 1기분(10극) 시제품을 나타내며, 그림 12에 해석 및 실험결과를 나타내고있다.

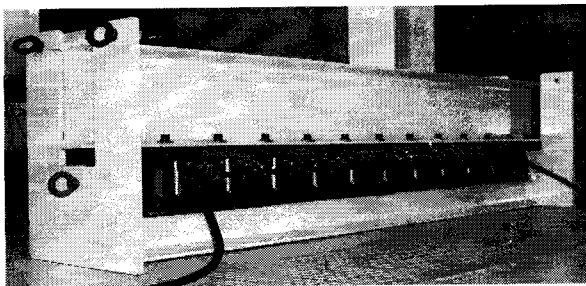


그림 11 제작된 와전류 제동장치의 시제품
Fig. 11 Prototype of the ECB

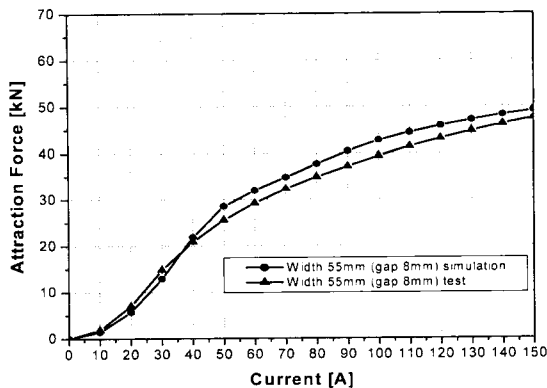


그림 12 제동력 해석 및 실험결과
Fig. 12 Analysis and test result of braking force

4. 결 론

본 논문에서는 고속전철용 와전류 제동장치의 설계와 2차원 유한요소법을 이용하여 특성을 해석하였으며 시제품을 제작하여 실험을 수행한 결과에 대해 기술하였다.

열차가 정지한 경우 흡인력 해석은 실험결과와 약 5~10[%] 정도의 오차가 발생하였다. 이는 제동장치의 공극 불균일 및 볼트세질 등의 제작오차로 사료된다. 제동력 해석 결과 정격공극 7[mm]인 경우 열차의 속도가 350[Km/h]에서 제동력이 8[kN]이상으로 요구되는 설계값을 만족하였으며, 공극 8[mm]의 경우에도 요구되는 제동력 7.5[kN]이 만족됨을 알 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 제시한 와전류 제동장치 설계의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 강도현, 김용주, 박수태 “고속전철 제동장치 개념설계에 관한 연구” 대한전기학회 학계학술대회 논문집 7.21-23. 1998.
- [2] 강도현, 박수태, 홍정표, 강경호 “고속전철 추진 Simulator용 와전류 제동장치 설계”, 대한전기학회 학계학술대회 논문집 7.20 22. 1998
- [3] K.H.Ha, J.P.Hong, G.T.Kim, J.Lee, D.H.Kang, “A study of the design for touch free linear eddy current brake”, IEEE, Trans. on Magnetics. vol.35, 1999
- [4] P.J.Wang and S.J.Chiueh, “Analysis of eddy-current brakes for high speed railway”, IEEE, Trans. on Magnetics, vol.34, pp.1237-1239, 1998
- [5] J. Lee, Y. D. Chun, “The performance of eddy current brake for the high speed trains”, IEEE, proceedings of CEFC'98, pp.203, 1998

저 자 소 개



정수진 (鄭壽鎭)

1974년 9월 25일생. 2002년 영남대 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 055-280-1484, Fax : 055-280-1547
E-mail : jsj1105@hanmail.net



강도현 (姜道鉉)

1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 졸업(박사). 1989년~현재 한국전기연구원 책임연구원(산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹장)
Tel : 0551-280 1480, Fax : 0551-280 1547
e-mail : dhkang@keri.re.kr



김동희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 현재 영남대 공대 전기·전자공학부 교수.

Tel : 053-850-2488
E-mail : dohkim@yucc.yeungnam.ac.kr