

과냉질소 냉각시스템 가압용 기체의 절연내력특성 분석

Analysis on the Dielectric Characteristics of Various Insulation Gases for Developing a Sub-cooled Liquid Nitrogen Cooling System

강형구^{1,*}, 고태국²

H Kang^{1,*}, and T. K. Ko²

Abstract: A sub-cooled liquid nitrogen cooling system is known as a most promising method to develop large scale superconducting apparatuses such as superconducting fault current limiters and superconducting cables [1]. Gaseous helium (GHe), gaseous nitrogen (GN₂) and sulfur hexafluoride (SF₆) are commonly used for designing an high voltage applied superconducting device as an injection gaseous medium [2, 3]. In this paper, the analysis on the dielectric characteristics of GHe, GN₂ and SF₆ are conducted by designing and manufacturing sphere-to-plane electrode systems. The AC withstand voltage experiments on the various gaseous insulation media are carried out and the results are analyzed by using finite element method (FEM) considering field utilization factors (ξ). It is found that the electric field intensity at sparkover (E_{MAX}) of insulation media exponentially decreases according to ξ increases. Also, the empirical expressions of the functional relations between E_{MAX} and ξ of insulation media are deduced by dielectric experiments and computational analyses. It is expected that the electrical insulation design of applied superconducting devices could be performed by using the deduced empirical formulae without dielectric experiments.

Key Words: electrical breakdown, field utilization factor, gas insulation, SF₆, sub-cooled LN₂ cooling system.

1. 서 론

최근 들어 전 세계적으로 2세대 초전도선체인 coated conductor (CC)에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 또한 이와 같은 연구의 결과로서 CC의 특성 향상에 관한 보고가 지속적으로 이루어지고 있다 [4]. 이러한 연구 결과는 CC를 이용한 초전도전력기기의 상용화가 임박했다는 것을 의미한다고 할 수 있을 것이다. 초전도한류기와 초전도변압기, 초전도케이블과 같은 초전도전력기기의 상용화 개발을 위해서는 이와

같은 CC의 가격 인하, 특성 향상과 더불어 효과적인 냉각시스템의 개발 역시 매우 중요하다. 현재 이와 같은 대용량급 초전도전력기기의 개발을 위해서 여러 가지 냉각시스템에 대한 연구가 이루어지고 있는데 그 중에서도 액체질소를 냉매로 사용하는 과냉질소 냉각시스템이 초전도전력기기의 대용량화를 가능하게 할 수 있는 가장 우수한 방안 중의 하나인 것으로 알려져 있다[1].

일반적으로 과냉질소 냉각시스템은 비응축기체인 기체헬륨이나 기체네온을 이용하여 시스템의 압력을 1기압 이상으로 가압하여 열전도특성과 전기절연내력특성을 향상시키는 방법으로 알려져 있다[2]. 그러나 비응축 기체인 기체헬륨이나 기체네온 역시 장시간 운전 시에는 액체질소에 응축된다는 사실이 알려져 있다. 또한, 비응축 기체인 기체헬륨과 기체네온의 절연내력특성은 일반적인 혼합기체나 기체질소에 비하여 대단히 낮으므로 최근 들어서는 액체질소와 같은 조성을 가지는 기체질소나 절연내력특성이 우수한 SF₆와 같은 기체를 시스템 내에 주입하여 과냉질소 냉각시스템을 구성하기도 한다[3]. 본 논문에서는 비응축 기체인 기체헬륨과 응축 기체인 기체질소, 그리고 SF₆에 대한 절연내력특성을 살펴봄으로서 대용량급 초전도전력기기 개발에 필요한 과냉질소 냉각시스템용 가압기체의 절연내력특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 절연내력실험 set-up

2.1. 절연내력실험

절연내력실험에 사용된 AC 전원의 주파수는 60Hz이며, 1초 당 1kV의 전압을 상승시켰을 때의 절연파괴 전압값을 각 조건 당 12회씩 측정하여 기록하였다. 이와 같이 측정된 12회의 절연파괴전압 중에서 최대값과 최소값을 제외한 10개의 절연파괴전압값을 이용하여 Weibull 분포를 구하였다. 또한, Weibull 분포를 통하여 절연파괴가 발생할 확률이 50%가 되는 절연파괴전압값 ($V_{BD,50\%}$)을 계산하였다. 절연내력실험에는 직경이 다른 여러 종류의 구 대 평판 전극시스템을 이용하였으며, 전극 간의 간격을 조절함으로써 다양한 ξ 에 대한 실험을 수행하였다. 각 기체에서 사용된 구 전극의 직경과 전극 간의 간격을 다음의 표 1에 나타내었다. 실제로 초전도전력기기용 냉각시스템 내부에는 이와 같은 가압기체 외에도 액체질소에서 증발되는 기체질소가 함께 혼재하는 상태로 존재한다[2, 3]. 그러나 본 논문에서는 그 선행 연구로서 기체 절연매질로서의 절연내력특성을 알아보기로 순수한 기체헬륨과 SF₆의 절연내력특성에 대한 연구를 수행하였다.

2.2. 전극시스템

본 연구에서는 일반적으로 과냉질소 냉각시스템용

¹정 회 원 : 충주대학교 전기공학과 전임강사

²정 회 원 : 연세대학교 전기·전자공학부 교수

*교신저자 : kang@cjnu.ac.kr

원고접수 : 2011년 01월 18일

심사완료 : 2011년 03월 03일

게재확정 : 2011년 03월 04일

Table 1. Specifications of electrode systems according to gaseous insulation medium.

단위 기체	구 직경 (mm)	전극 간 간격 (mm)
He	20, 30, 50	25, 45, 65
N ₂	2, 6, 8, 15, 30, 40, 50	10, 30, 50, 60
SF ₆	2, 4, 6, 8, 15, 30, 40, 50	5, 10, 15, 30

Table 2. Specifications of sphere-to-plane electrode systems.

사 양	
전극 물질	스테인리스 스틸 (SS 316L)
구 전극 직경 (mm)	2, 4, 6, 8, 15, 30, 40, 50
평판 전극 (mm)	직경: 100, 두께: 10, 곡률반경: 5

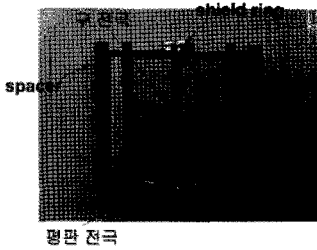


Fig. 1. Photo of sphere-to-plane electrode system.

가압기체로 사용되는 기체헬륨과 기체질소 그리고 SF₆의 AC전압에 대한 절연파괴전압을 측정하였으며, 그 결과를 ξ 란 개념을 이용하여 분석하였다. ξ 란 어떠한 시스템에서의 최대전계 (E_{MAX})에 대한 평균전계 (E_{mean})의 비로서 시스템의 전계 평등도를 나타내는 척도라고 할 수 있으며, 다음의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\xi = \frac{E_{mean}}{E_{MAX}} \quad (1)$$

기체헬륨의 절연내력특성을 측정하기 위한 실험에는 구 대 평판 전극이 사용되었으며, 위의 표 2에 실험에 사용된 전극시스템의 사양을 나타내었으며 그림 1에는 실제로 제작된 전극시스템의 모습을 나타내었다. 그림 1에서 spacer란 전극 간의 간격을 조절하기 위한 일정 두께를 가지는 부품이며, shield ring이란 전극과 고전압 연결부의 형상에 의한 전계집중 현상을 완화하기 위하여 알루미늄으로 제작된 구조물이다.

2.3. 전계해석

표 1과 표 2에 나타난 전극시스템의 각 조건에 해당하는 ξ 를 유한요소해석법을 이용하여 계산하고 결과를 다음의 표 3에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 ξ 는 구 전극의 직경이 클수록, 그리고 전극 간의 간격이 작을수록 높아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 그림 2에는 구 전극의 직경이 20mm이고 전극 간의 간격이 25mm인 구 대 평판 전극의 3차원 전계해석결과를 나타내었다. 그림에서 'O'와 'D'는 구 전극에서 평판 전극까지의 최단거리를 나타내는 점이다. 유한요소해석을 수행함에 있어서 전극시스템의 구 전극에는 AC 고전압을 인가하고 평판 전극은 접지하였다고 가정하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 'O'점에서 E_{MAX} 가 발생하였으며, 전자는 전위경도에 수직인 경로를 따라

Table 3. Field utilization factors according to specifications of electrode systems.

직경 간격	2	4	6	8	15	20	30	40	50
5	0.2003	0.2945	0.4032	0.4754	0.5947	0.6185	0.7494	0.7629	0.7964
10	0.1016	0.1782	0.2146	0.3078	0.4748	0.4748	0.6373	0.6940	0.7324
15	0.0683	0.1257	0.1801	0.2298	0.3628	0.4106	0.5319	0.5833	0.5922
25	0.0419	0.0800	0.1131	0.1381	0.2578	0.3046	0.3941	0.4494	0.5111
30	0.0350	0.0685	0.0841	0.1261	0.2184	0.2184	0.3680	0.4353	0.4861
45	0.0249	0.0431	0.0639	0.0814	0.1591	0.1964	0.2707	0.3314	0.3840
50	0.0226	0.0403	0.0554	0.0813	0.1439	0.1439	0.2581	0.3225	0.3741
60	0.0193	0.0339	0.0488	0.0698	0.1245	0.1374	0.2290	0.2882	0.3422
65	0.0181	0.0315	0.0446	0.0446	0.1083	0.1288	0.2051	0.2581	0.3099

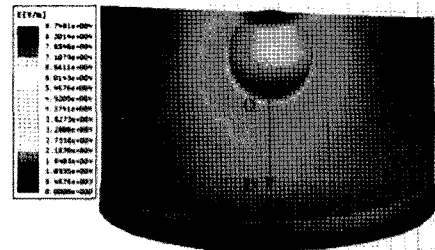


Fig. 2. FEM 3D simulation result of sphere-to-plane electrode system.

진행한다. 또한 E_{mean} 은 선분 OD 상 전계분포의 평균값으로 계산하였다.

3. 절연내력실험 결과분석

3.1. 절연내력실험 결과

1기압 하에서의 비응축기체인 기체헬륨의 AC 전압에 대한 절연파괴전압값을 다음의 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 절연파괴전압값은 구 전극의 직경이 클수록, 전극 간 간격이 클수록 지수함수적으로 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 기체질소의 AC 전압에 대한 절연파괴전압값을 그림 4와 같이 나타내었다. 기체질소에 대한 절연파괴전압 실험은 기체헬륨에 대한 실험에 비하여 비교적 많은 조건 하에서 수행되었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 기체질소의 AC 전압에 대한 절연파괴전압특성을 살펴보면 그림 3에서 나타난 기체헬륨의 결과에서 보는 바와 동일하게 전극 간 간격이 커질수록, 그리고 구 전극의 직경이 커질수록 절연파괴전압값이 지수함수적으로 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 마지막으로 그림 5에는 SF₆의 AC 전압에 대한 절연파괴전압값을 나타내었

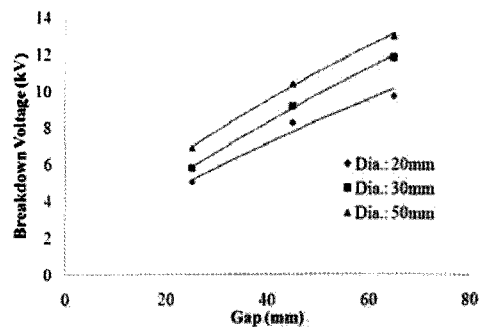


Fig. 3. AC breakdown voltage of GHe.

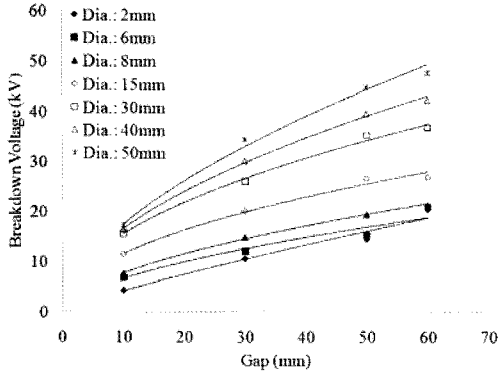


Fig. 4. AC breakdown voltage of GN₂.

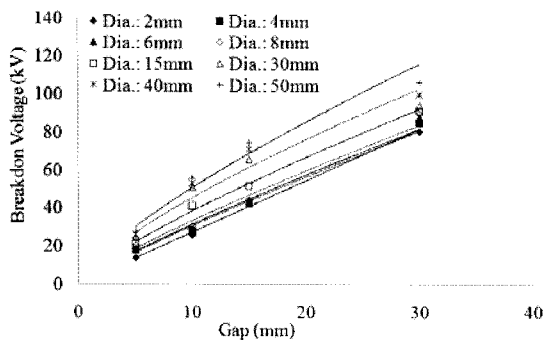


Fig. 5. AC breakdown voltage of SF₆.

다. SF₆의 AC 절연과과전압 역시 기체헬륨과 기체질소와 유사한 특성을 보였다. 본 연구에서는 절연내력 실험을 통하여 구한 세 가지 기체 절연매질의 절연과과전압값을 이용하여 절연과과 시 전극시스템에서의 최대전계값인 $E_{MAX,50\%}$ 와 ξ 간의 함수관계를 수식화하였다. 또한, 도출된 실험식을 이용하여 $V_{BD,50\%}$ 를 유도하였다.

3.2. 결과분석

본 연구에서는 기체헬륨과 기체질소, 그리고 SF₆ 세 가지 종류의 과냉질소 냉각시스템 가압용 기체에 대한 절연과과전압값을 AC 절연내력실험을 통하여 측정하였다. 또한, 측정된 $V_{BD,50\%}$ 와 유한요소해석을 통하여 계산된 1kV 입력 시 전극시스템의 최대전계인 $E_{MAX,1kV}$ 를 이용하여 $E_{MAX,50\%}$ 를 다음의 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

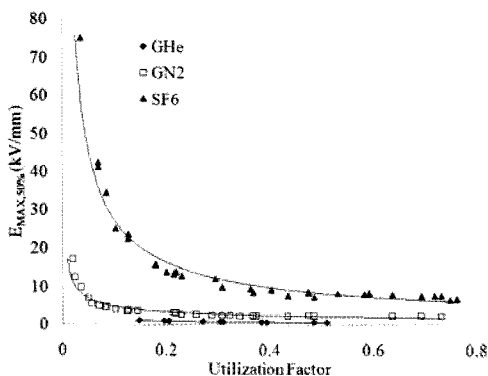


Fig. 6. Functional relations between $E_{MAX,50\%}$ and ξ according to gaseous insulation medium.

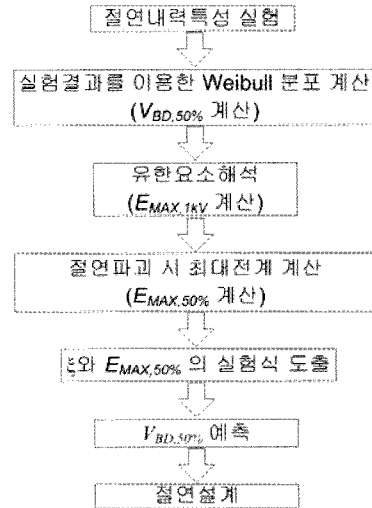


Fig. 7. Flow diagram of electrical insulation design considering ξ .

$$E_{MAX,50\%} = V_{BD,50\%} \times E_{MAX,1kV} \quad (2)$$

또한, 표 3에서 보는 바와 같이 계산된 각 전극 시스템의 조건에 대한 ξ 와 식 (2)를 통하여 계산된 $E_{MAX,50\%}$ 를 이용하여 실험식을 도출하였다. 세 가지 종류의 기체에 대한 ξ 와 $E_{MAX,50\%}$ 에 대한 관계를 아래의 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 기체의 종류와 관계없이 $E_{MAX,50\%}$ 는 ξ 와 함수관계를 가지는 것을 알 수 있었다. 절연과과전압과 마찬가지로 $E_{MAX,50\%}$ 의 크기 역시 SF₆, 기체질소, 그리고 기체헬륨 순이었다. 다음의 식 (3)~(5)에 기체헬륨과 기체질소, 그리고 SF₆가 가지는 각각의 ξ 에 대한 $E_{MAX,50\%}$ 의 함수를 수식화하여 나타내었다.

$$E_{MAX,50\%,He} = 0.3699 \times \xi^{-0.53} \quad (3)$$

$$E_{MAX,50\%,N_2} = 1.4846 \times \xi^{-0.512} \quad (4)$$

$$E_{MAX,50\%,SF_6} = 4.9722 \times \xi^{-0.74} \quad (5)$$

위와 같은 식으로부터 1기압 조건 하에서 기체별 $E_{MAX,50\%}$ 의 크기를 구할 수 있다. 또한, 식 (2)를 이용하면 어떤 전극시스템에서의 ξ 를 계산함으로써 절연과과전압값을 추정할 수 있게 된다. 다음의 그림 7에는 절연내력특성 실험으로부터 절연과과전압값을 계산하는 과정을 간단하게 도시화하여 나타내었다.

4. 논 의

본 연구를 통하여 과냉질소 냉각시스템 가압용으로 사용되는 세 가지 기체의 AC 절연내력특성은 모두 ξ 에 대하여 함수관계를 갖는다는 사실을 알 수 있었다. 즉, ξ 가 작은 경우에는 $E_{MAX,50\%}$ 의 크기가 지수함수적으로 커지고 ξ 가 커질수록 $E_{MAX,50\%}$ 가 포화되는 특성을 보이며 작아진다는 사실이 밝혀졌다. 특히 기체헬륨은 ξ 가 0.15 이상이고 0.51 이하인 범위에서 $E_{MAX,50\%}$ 가 1kV/mm 이하로 그 값이 매우 작은 특성을 보였다. 그림 6의 결과에서 보는 바와 같이 ξ 가 커질수록 모든 기체 절연매질의 $E_{MAX,50\%}$ 가 작아지므로

기체헬륨의 $E_{MAX,50\%}$ 는 ξ 의 크기와 무관하게 전 영역에서 $E_{MAX,50\%}$ 가 1kV/mm 이하가 될 것으로 판단된다. 기체질소는 ξ 이 0.0193일 때 $E_{MAX,50\%}$ 값은 17.15kV/mm 이고 ξ 이 0.73인 경우에는 2.35kV/mm로 기체헬륨에 비하여 ξ 의 전 영역에서 $E_{MAX,50\%}$ 값이 수 배 이상 큰 특성을 보였다. 또한, SF₆는 ξ 이 0.035일 때의 $E_{MAX,50\%}$ 값이 74.97kV/mm로 매우 큰 특성을 가지고 있었으며 ξ 이 0.7629인 경우에도 6.84kV/mm로 기체헬륨에 비하여 수배에서 수십 배 이상 큰 특성을 보였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 종류와 관계없이 모든 기체 절연매질은 ξ 가 0.4 이상이 되는 영역에서는 $E_{MAX,50\%}$ 의 값이 더 이상 작아지지 않고 거의 일정한 상수가 되는 특징을 나타냈다. ξ 가 0.4 이상인 범위에서의 $E_{MAX,50\%}$ 값은 기체헬륨과 기체질소, 그리고 SF₆가 대략적으로 각각 0.5kV/mm, 2.4kV/mm, 7.6kV/mm로서 SF₆의 절연내력특성이 가장 우수하였다. 결국 기체헬륨은 이미 알려진 바와 같이 장시간 운전 시에 액체질소에 응축되어 액체질소의 절연내력특성을 저하시킬 뿐만 아니라 ξ 의 변화에 따라 $E_{MAX,50\%}$ 역시 1kV/mm 이하로 매우 작으므로 고전압 초전도전력기기를 개발하기 위한 과냉질소 냉각시스템용 가압기체로 이용되기 어렵다는 사실을 알 수 있었다. 또한, 기체질소와 SF₆의 절연내력특성은 비교적 양호하다는 사실을 확인하였다. 그러나 실제 초전도전력기기 개발에 이용되기 위해서 기체질소의 경우에는 액체질소와 동일한 성분이므로 응축된 기체가 액체 냉매의 특성을 변화시키지 않는다는 장점이 있지만 장시간 운전 시에 가압기체의 응축량 조절과 함께 시스템의 압력을 일정하게 유지할 수 있는 기술적 문제를 해결해야 할 것이다. 마지막으로 SF₆는 액체질소와 다른 조성을 가지는 기체이므로 장시간 운전 시에 응축된 SF₆에 의한 액체질소의 특성변화와 더불어 액체질소에 응축될 SF₆의 경제성 평가에 관한 연구가 반드시 선행되어야 할 것이다.

일반적으로 초전도전력기기를 비롯한 모든 고전압 전력기기의 절연설계를 수행함에 있어서 절연매질이 기체인 경우에는 시스템의 절연 안정성 향상을 위하여 절연과피의 기준이 되는 전극시스템의 최대전계인 E_{MAX} 값을 최소화할 뿐만 아니라 시스템의 ξ 를 최대한 높게 설계하고 있다. 이와 같이 절연설계의 안정성 향상을 위하여 앞서 설명한 바와 같이 shield ring과 같은 도구를 이용하여 전극시스템 내의 E_{MAX} 를 완화하고 ξ 를 높여주는 방법을 사용하기도 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 고전압 초전도전력기기에 주로 사용되고 있는 과냉질소 냉각시스템용 가압기체의 절연내력특성 분석에 관한 연구를 수행하였다. 기체 절연매질의 절연내력특성을 분석하기 위하여 유한요소해석과 AC 절연내력특성 실험을 수행한 결과, 기체 절연매질은 종류와 관계없이 1기압 압력 하에서 ξ 에 따라 $E_{MAX,50\%}$ 가 변화한다는 사실을 확인할 수 있었으며, 그 특성을 각 기체별로 함수화하여 실험식화하였다. 연구결과, 대용량급 초전도전력기기를 개발하기 위해서는 현재 과냉질소 냉각시스템용 가압기체로 주로 사용되고 있는 기체 중에서 기체헬륨보다는 기체질소나 SF₆가 적합할 것으로 판단된다. 또한, 상용화급의 고신뢰성, 고안정성의 대용량 초전도전력기기를 개발하기 위해서는 기체질소와 SF₆의 응축속도에 따른 경제성과 응축량에 따른 냉매인 액체질소의 특성변화에 대한 연구가 반드시 선행되어야 할 것으로 판단된다. 추후 입

필스 뇌전압과 더불어 압력변화에 따른 기체 절연매질의 절연내력특성 변화에 관한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2010T100100377) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] Hyoungku Kang, Chanjoo Lee, Tae Kuk Ko, and Bok-Yeol Seok, "Electrical Breakdown Characteristics of Super-conducting Magnet System in Sub-Cooled Liquid Nitrogen," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 1509-1512, 2007.
- [2] Hyoungku Kang, Jin Bae Na, Yoon Do Chung, Min Cheol Ahn, Duck Kweon Bae, and Tae Kuk Ko, "Study on the Breakdown Voltage Characterization of Insulation Gases for Developing a High Voltage Superconducting Apparatus," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp. 1646-1649, 2010.
- [3] Yeon Suk Choi, Ho-Myung Chang, and Steven W. Van Sciver, "Performance of Extended Surface from a Cryocooler for Subcooling Liquid Nitrogen by Natural Convection," Cryogenics, Vol. 46, pp. 396-402, 2006.
- [4] Yasuo Nishikori, Soji Kojima, and Teruya Kouno, "A Study of the Field Utilization Factor and the Maximum Electric Field at Sparkover of the standard Sphere Gaps," Electrical Engineering in Japan, Vol. 139, No. 4, pp. 399-404, 2002.

저 자 소 개



강형구(姜亨求)

1973년 8월 4일생, 1997년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 2005년 연세대 대학원 전기·전자공학과 졸업 (공학박사), 2005~2009년 현대중공업 선임연구원, 현재 충주대 전기공학과 전임강사.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대 전기·전자공학부 정교수.