

DC 중첩형 CCRF 여기 헬륨-아연방전에서 자외선 250.199nm의 광이득 특성 연구

(A Study on the Optical Gain Characteristics of a UV Line 250.199nm from Helium-Zinc Discharge Excited by CCRF with Overlapped DC)

최상태*

(Sang Tae Choi)

Abstract

On 250.199nm uv-line, which has the potential to emit as a laser line, from a ccrf-excited He-Zn discharge with overlapped DC was carried out optimization of the discharge parameters and measurement of the optical gain. In this study the optical gain of the 250.199nm uv-line has been obtained 4% for the first time. At a rf-power of 400W with the frequency 13.56MHz the optimal He-pressure indicated 2kPa.

Key Words : CCRF-discharge, He-Zn Laser, UV-Laser, Optical Gain

1. 서 론

연속파 자외선레이저는 산업 및 의료기술장비 등의 발전에 특히 중요한 역할을 담당할 것으로 예상하고 있다. 그 활용가치는 점차 증대해 가고 있지만 현재까지 레이저의 개발은 성과가 만족스럽지 못하다.

강한 자외선 빔이 필요한 곳에는 어느 분야든 엑시머레이저가 사용되어 진다. 색소레이저의 펄핑, 동위 원소분리, 공기오염도 측정 등 다양하게 응용되고 있으며 산업적으로는 미세가공, 자외선 분광, 리소그래

피 등에 이용된다.

그러나 엑시머레이저는 레이저매질이 엑시머 상태로 있고, 들뜬준위에서는 6~10ns 정도로 평균수명이 짧기 때문에 원자를 들뜬준위에서 일정시간 유지시켜야 하는 연속적인 여기가 어렵다. 이 때문에 오름시간이 빠른 펄스여기가 일어나게 되고, 주로 짧은 펄스 증폭에 이용된다.

일반적으로 연속파 자외선레이저의 발전에는 금속(카드뮴, 아연, 셀레늄, 금, 은, 구리, 수은, 티타늄 등) 증기가 첨가된 희유가스가 매질로 사용된다. 기체레이저의 일종인 이러한 금속증기레이저는 원통형음극방전을 발전에 많이 사용하고 있다. 원통형음극방전에 의한 레이저방출은 적외선을 거쳐 가시광 뿐만 아니라 자외선까지도 그 발전영역이 넓다. 하지만 까다로운 제작기술과 짧은 레이저수명이 문제점으로 대두되고 있다.

* 주저자 : 경주대학교 에너지플랜트학과 교수

* Main author : Professor of department of energy plant at gyeongju university

Tel : 054-770-5180, Fax : 054-770-5364

E-mail : stchoi@gu.ac.kr

접수일자 : 2014년 2월 27일

1차심사 : 2014년 3월 4일

심사완료 : 2014년 5월 26일

원통형음극방전이나, 직류방전 여기에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있는 용량결합 고주파(CCRF, capacitively coupled radio frequency)방전을 사용한 헬륨-크립톤레이저와 헬륨-카드뮴레이저의 경우는 구리전극을 방전관 길이를 따라 외부에 간단히 배치하고 고주파를 인가하여 레이저플라즈마를 발생시킨다[1-2].

헬륨-카드뮴레이저는 가시광영역에서 청색과 오렌지, 적색의 레이저선을 발진시키고 있을 뿐만 아니라, 자외선영역에서 325nm의 파장으로 연속파를 방출하고 있다[3]. 헬륨-아연레이저는 몇 개의 강력한 선들을 가시광과 적외선영역에서 방출하고 있다[4]. 뿐만 아니라, 자외선영역의 천이들을 다수 가지고 있는데 이들은 레이저선으로 발진할 가능성을 보이고 있다.

본 논문에서는 직류방전이 중첩된 용량결합 고주파(CCRF) 여기 헬륨-아연방전에서 자외선 250.199nm의 광이득 특성을 살펴보고 레이저선으로의 발진의 가능성을 탐색해 보았다. 발진의 문턱을 넘기기 위해서는 제일 먼저 방전파라미터들이 최적화되어야 한다. 그리고 귀환광방식을 이용한 측정을 통해 자외선 250.199nm의 광이득 특성에 관한 연구를 하였다.

2. 헬륨-아연레이저

2.1 여기시스템

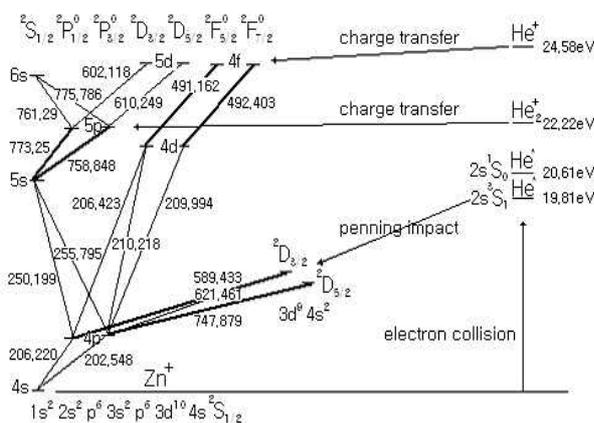


그림 1. 헬륨-아연레이저의 에너지준위도
Fig. 1. Energy level diagram of He-Zn laser

헬륨-아연레이저의 여기과정을 보여주고 있는 그림 1의 에너지준위도에는 레이저천이가 일어나는 중요 준위들이 표시되어 있다. 굵은 선으로 나타낸 천이들은 기존의 연구[4]에서 발진한 레이저선이다.

아연이온에 있어서 UV영역의 몇 개의 천이들은 잠재적으로 레이저선으로 발진이 가능하다. 그림 1의 천이들 중에서 206.423nm, 209.994nm, 210.218nm, 250.199nm, 255.795nm 등 5개의 선이다. 이들의 상준위는 적외선 758.848nm 혹은 773.25nm의 에너지준위와 비슷하므로, 이들 역시 헬륨분자이온과의 전하이동 충돌을 통해 여기될 수 있다.

2.2 레이저의 구조

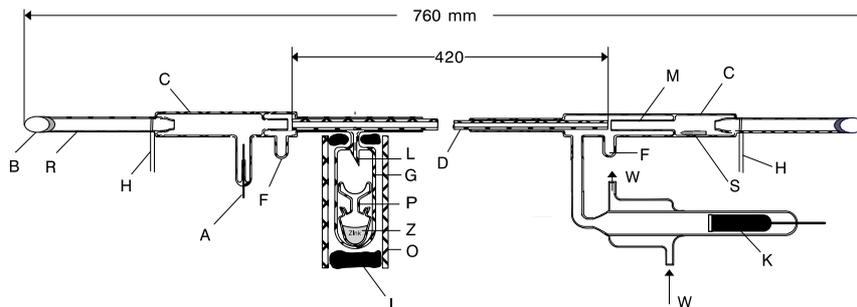
직류방전이 추가된 CCRF-여기 헬륨-아연레이저의 구조가 그림 2에 나타나 있다. 레이저튜브는 전체길이 760mm인 석영유리관으로 이루어져 있다. 방전관 내부는 아연이온의 충돌로 스퍼터링 효과가 나타나는데 [5] 방전관 내벽을 보호하기 위하여 Al₂O₃(외부직경 7mm, 내부직경 4mm)-세라믹관을 삽입하였다. 방전관의 양쪽에 길이로 부착된 두개의 구리전극(길이 400mm, 폭 4mm)은 레이저플라즈마에 RF-전력을 공급한다[6].

아연증기를 방전관 내부에 균일하게 분포시키기 위해 CCRF-방전에 추가하여 약한 직류방전을 연결시켰다. 오븐의 위치를 양극 쪽으로 더 많이 치우치게 하여 금속증기가 양극 쪽에서 방전내부로 유입되고 전기영동효과에 의해 음극 쪽으로 운반된다. 이 때 직류 전류값은 약 20~50mA 정도인데 아연원자들은 RF-방전에 의해 이미 이온화되어 있기 때문이다.

3. 광이득 측정시스템

광강도와 광이득 g₀을 측정하기 위해 그림 3과 같이 구성된 광이득 측정시스템[7]을 사용하였다. Czerny-Turner구조의 모노크로메이터(McPherson Instruments Typ 2051)가 분광학적으로 방사광을 분석하고 있다.

귀환광학부의 초퍼는 광경로를 주기적으로 개방 혹은 차단한다. 귀환광학부의 광경로가 개방되면 측정



DC-양극 A, Brewster창문 B, 응결방 C, Al₂O₃-내관 D, 퇴적물용기 F, 아연용기 G, 열코일 H, 절연재 I, DC-음극 K, 석영송곳 L, 철심유도관 M, 오븐 O, 엠플 P, 석영관 R, 철심 S, 냉각수 W, 아연 Z

그림 2. 레이저튜브의 구조
Fig. 2. Structure of laser tube

값 $M_2 = I_D + I_R \cdot t_R$ (t_R : 반사계수) 즉, 직사광(I_D)과 귀환광(I_R)의 합이 광검출기에 도달한다. 광경로를 차단하면 단지 $M_1 = I_D$ 즉, 직사광 만이 검출된다.

관계식이 최종적으로 계산된다.

$$\frac{u_R - u_D}{u_D} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (1)$$

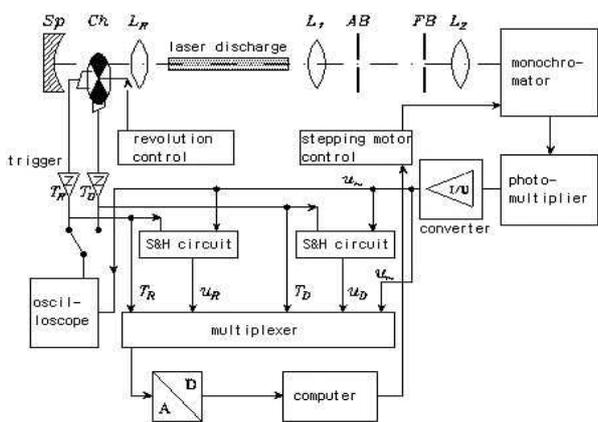


그림 3. 광이득 측정시스템의 구성도
Fig. 3. Schematic diagram of the optical gain measuring system

광전증배기에서 검출된 광신호는 전류값 i 로 변환되고, I/U 컨버터에서는 광전증배기의 출력전류를 전압 u 로 변환한다. 두 개의 트리거신호 T_R 과 T_D 를 통해 맞춰지는 두 개의 Sample&Hold 회로가 신호 u 를 받아서 출력 측의 전압 u_D 는 M_1 , u_R 은 M_2 로 처리한다. A/D 변환기는 트리거신호에 동기하는 상승기를 통과한 전압을 홀드상태의 디지털신호로 받아 컴퓨터로 보낸다. 신호로부터 광강도 측정값 M_1 , M_2 및 다음의

4. 이득 혹은 흡수를 나타내는 아연이온의 방사선

귀환광을 이용하여 측정되는 헬륨-아연방전내의 광이득 g_0 은 다음과 같다.

$$g_0 = \left(\frac{I_R}{I_D} - 1 \right) \sqrt{2} \quad (2)$$

이 식은 두 개의 측정값인 직사광(M_1), 귀환광(M_2)에 의해서

$$M_1 = I_D, \quad M_2 = I_D + t_R \cdot I_R \quad (3)$$

아래 식으로 변환된다.

$$g_0 = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} - 1 \right) \sqrt{2} \quad (4)$$

광강도 관계식 $(M_2 - M_1) / M_1 > t_R$ 일 때 즉, $g_0 > 0$ 이면 광이득을 나타낸다. $(M_2 - M_1) / M_1 < t_R$ 일 때 즉, $g_0 < 0$ 이면 광흡수를 의미한다. 그러므로 광강도 관계식 $(M_2 - M_1) / M_1$ 은 방사선이 이득인지 흡수인지를 구분하는 척도가 된다. DC중첩형 CCRF-여기에 의한 헬륨-아연방전에서 방출되는 몇 개의 아연이온선의 특성곡선이 그림 4에 표시되어 있다. 이것은 직류전류에 대한 각 선들의 광강도 관계식의 변화를 보여주고 있다.

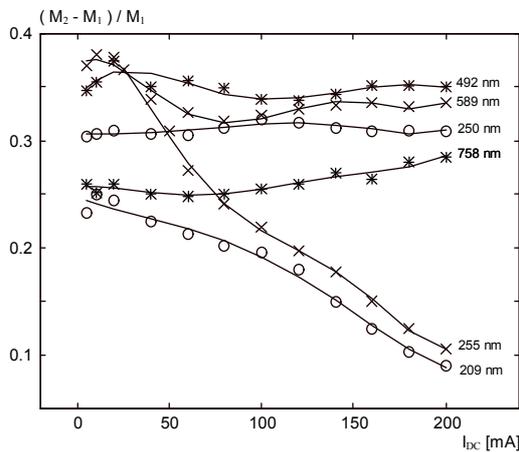


그림 4. 직류에 대한 광강도 관계식
Fig. 4. Intensity interaction formula to DC-current

실험에서는 서로 다른 펌핑프로세서를 가지고 있는 3개의 선(492.403nm, 589.433nm, 758.848nm)과 레이저선으로 발진의 가능성을 가지고 있는 자외선 영역의 3개의 선 (209.994nm, 250.199nm, 255.795nm)에 대하여 측정이 이루어졌다. 이때 레이저발진을 위한 방전과파미터의 최적값인 400W의 고주파전력이 인가되었으며 헬륨압력은 4kPa를 충전하였다[4].

활성영역 내의 금속증기의 분포는 방전에 인가되는 고주파전력에 영향을 받지 않고 제어되어질 수 있다. 직류전류를 높임으로써 아연증기 양광주는 방전모세관의 양극 쪽 끝에서 방전관 중앙부로 성장하였다. 직류 전류값을 충분히 높이면 아연증기의 분포가 방전구간의 전 영역으로 확산되었다. 약 30~40시간의 운전 후에는 모세관 벽의 작은 구멍에 금속의 퇴적물이 쌓인다. 이 퇴적물은 다른 영역보다도 아연용기 주위

에 더 많이 쌓이게 된다. 용기를 더 이상 가열하지 않아도 아연증기는 생성되고 전기영동의 효과로 방전내부로 분포된다.

고주파방전에 중첩되는 DC-방전의 전류를 점차 증가시키면서 광강도 측정값의 관계를 측정하였다. 아연증기 양광주의 길이가 증가함에 따라 자외선 209.994nm와 255.795nm에 대한 광강도 관계식은 급격히 저하되었다(그림 4). 이는 두 자외선이 방전내에서 흡수 특성을 나타냄을 뜻한다. 그 이유는 다음과 같다. 즉 아연이온의 $4p \ ^2P_{3/2}$ -상태를 가지는 두 분광선의 공통 하준위가 각 선의 상준위 보다 더 강하게 점유되기 때문이다.

양광주의 길이가 증가함에 따라 492.403nm와 589.433nm 두 레이저선의 광강도 관계식은 미약한 증가만을 보여주고 있고 758.848nm 레이저선은 현저하지 못하지만 의미있는 증가만을 보여주고 있다. 그 이유는 방전 내에서 광학적 손실이 발생한다는 것이다. 이러한 손실은 방전 내에서 빛을 산란시키는 작은 입자에 기인하는 것으로 추측할 수 있다. 산란을 일으키는 입자원은 CCRF He-Cd⁺-레이저에서 이미 관찰되어진바 있다[2]. 작은 입자들은 금속증기가 응집하면서 생성되는 것이 확실하다.

입자들은 레이저관 내부의 온도가 상대적으로 낮은 곳에서 특히 관찰된다. 이들은 방전을 변색시키고 또한 레이저가 발진에 이르면 레이저광을 산란시키는 요인이 된다. 이 입자들은 방전모세관벽의 스파트링 효과에 의해 생성되는 나노미터 크기의 Al₂O₃-입자들이 그 발단이 된다. 이들은 플라즈마 내부에서 음으로 대전되기 때문에 금속이온들을 끌어당긴다. 금속이온들은 입자표면에서 중화된다(양극성융합). 방전에서 나오는 여분의 산소에 의한 금속의 산화는 증기압력을 저하시키고 그로 인해 입자들을 견고하게 만드는 것으로 추측된다.

금속산화 입자는 Mie-scattering[8]을 야기시킨다. 빛의 파장과 비슷한 크기의 입자에 의한 산란을 Mie-산란이라고 하며, 이때 산란광의 세기는 파장에 반비례한다. 즉 Mie-산란은 입자직경에 대한 파장의 관계가 작아질수록 더 증가한다.

250.199nm의 선은 그림 4에서 보이듯이 크진 않지

만 이득을 나타내고 있다. 만약 산란에 의한 손실을 현저히 줄일 수 있다면 레이저선으로 발전할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 지금까지 자외선 250.199nm는 레이저선으로 발전하지 않았다. 그 이유는 산란 손실이 너무 높기 때문으로 추측할 수 있다.

5. 자외선 250.199nm에 대한 최적화

5.1 광강도 및 직류전류의 최적화

자외선 250.199nm 선이 레이저 발전의 문턱을 넘기기 위해서는 제일 먼저 방전변수들에 대한 최적화 실험을 하여야 한다. 헬륨압력을 단계적으로 증가시키면서 직류전류의 변화에 따른 최대 광강도를 측정하였다. 고주파전력은 400W를 인가하였다. 그림 5는 헬륨압력에 대한 광강도와 직류전류의 관계를 보여주고 있다. 측정치의 곡선을 보면, 직류전류의 최적값과 자연방출 광강도는 헬륨압력에 비례해서 증가하고 있다. 따라서 헬륨압력을 더 높이면 광출력의 지속적인 증가가 예상된다.

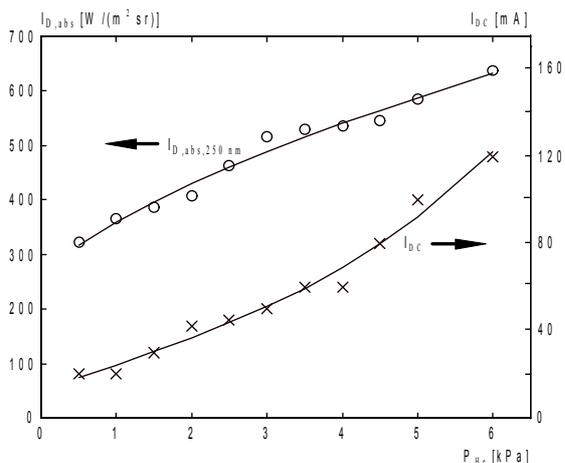


그림 5. 헬륨압력에 대한 광강도와 직류전류
Fig. 5. Intensity and DC-current to He-pressure

5.2 광이득 특성

그림 6은 헬륨압력에 대한 광이득의 변화를 나타내고 있다. 광이득 g_0 의 측정에서 헬륨압력의 최적값은

뚜렷하게 2kPa을 나타내고 있다. 이때 측정된 최대이득은 약 4%이다. 2kPa 이상의 헬륨압력에서는 광이득은 내려간다. 압력을 계속 더 높이면 광출력곡선은 상승하지만 흡수 특성이 더욱 강하게 나타나고 있다.

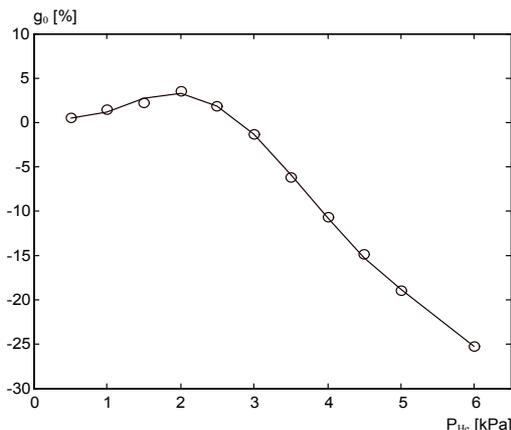


그림 6. 헬륨압력에 대한 광이득
Fig. 6. Optical gain to He-pressure

에너지준위의 점유밀도가 상승하더라도 증가하는 헬륨압력에서는 250.199nm 선의 상, 하준위 사이에 상태밀도반전이 더 이상 유지되지 않는 것이 명백하다. 에너지준위도(그림 1)를 보면 250.199nm 선의 상준위($5s \ ^2S_{1/2}$)는 758.848nm 및 773.25nm 레이저선의 하준위와 동일하다. 한편, 250.199nm 선의 하준위($4p \ ^2P_{1/2}$)는 589.433nm 레이저선의 하준위와 동일하다.

자외선 250.199nm의 상태밀도반전 및 광이득을 높이기 위해서는 광공진기를 최적으로 구성할 필요가 있다. 가시광의 반사를 억제하고 적외선과 자외선 파장에 대해서는 동시에 높은 반사 효율을 가지는 특수한 레이저 공진기의 구성을 모색하여야 한다. 반사거울의 적절한 선택을 통하여 광공진기가 589.433nm 선의 발전을 억제시키면 자외선 250.199nm 하준위를 점유하는 아연이온들의 밀도가 줄어들게 된다. 즉 레이저 발전에 필요한 상, 하준위 간의 지속적인 상태밀도반전을 유지할 수 있다. 또한 자외선 250.199nm의 광이득이 증가하게 된다. 결론적으로 최적의 파장선택형 광공진기로부터 두 개의 적외선(758.848nm 및 773.25nm)과 더불어 자외선 250.199nm가 동시에 레이저선으로 발전할 것으로 예상된다.

6. 결 론

본 연구에서는 직류방전이 중첩된 CCRF 헬륨-아연 방전에서 향후 레이저선으로 발전가능성을 가지고 있는 자외선 영역의 방사선에 대하여 방전파라미터의 최적화 및 광이득 측정이 이루어졌다. 현재까지 연속 파 자외선레이저인 헬륨-카드뮴레이저의 325nm 이외에 처음으로 헬륨-아연 방전의 자외선 250.199nm의 선이 헬륨압력 2kPa에서 4%의 이득특성을 보이는 것을 본 연구에서 확인하였다.

지금까지 자외선 250.199nm는 레이저선으로 발전하지 않았다. 그 이유 중 하나는 산란 손실이 너무 높기 때문에 추측할 수 있다. 자외선 250.199nm를 레이저선으로 발전을 유도하기 위해서는 다양한 시도를 해 보아야 한다. 그림 4에서 보듯이 250.199nm 자외선은 작지만 이득특성을 나타내고 있다. 만약 산란에 의한 손실을 줄이고 공진기거울을 적절히 선택하여 최적의 광공진기를 구성한다면 250.199nm 자외선은 레이저선으로 발전할 수 있을 것이다.

향후에는 자외선 250.199nm의 레이저발진을 위한 연구가 필요하다. 가시광의 반사를 억제하고 적외선과 자외선 파장에 대해서는 높은 반사 효율을 가지는 특수한 공진기거울의 선정이 중요하며, 아울러 스파터링 효과를 고려한 레이저튜브의 개발에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

References

- [1] N. Reich, J. Mentel, G. Jacob, J. Mizeraczyk, "A cw HeKr+-laser with transverse radio frequency excitation", Appl. Phys. Letters, 64(4), 397, 1994.
- [2] N. Reich, J. Mentel, J. Mizeraczyk, "cw radio-frequency excited white-light He-Cd+ laser", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 31, No. 11, pp. 1902-1909, 1995.
- [3] A. Fuke, Y. Tokita, K. Masuda, "Characteristics of 325-nm cw oscillation of a hollow cathode He-Cd+ laser", Jap. J. Appl. Phys. Vol. 28, No. 10, L1836, 1989.
- [4] S. T. Choi, "Output characteristic of zinc vapour laser with capacitively coupled radio frequency excitation", J. KIIEE, Vol. 22, No. 1, pp. 33-39, 2008.
- [5] B. Chapman, "Glow discharge processes", John Wiley & Sons, Ins. New York, 394-396, 1980.
- [6] S. T. Choi, "Capacitively coupled radio frequency discharge system for excitation of gas laser", J. KIIEE, Vol. 20, No. 1, 19-26, 2006.
- [7] S. T. Choi, "Optical gain measuring system in the laser discharge using feedback light", J. KIIEE, Vol. 25, No. 7, 9-14, 2011.
- [8] E. Hecht, "Optics", Addison-Wesley, 3. edition, pp. 87-91, New York, Madrid, Amsterdam, 1998.

◇ 저자소개 ◇



최상태(崔相泰)

1957년 8월 8일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 독일 Ruhr Bochum 대학교 전기공학부 석사과정 졸업(Dipl. Ing.). 1997년 동 대학원 박사과정 졸업(Dr. Ing.). 1998년~현재 경주대학교 에너지플랜트학과 교수.