

3단 병렬 충·방전 방식을 적용한 고반복 펄스형 Nd:YAG 레이저 출력거울 반사율의 최적화

(The optimization of output coupler reflectivity of high repetitive pulsed Nd:YAG laser system adopted 3-mesh parallel sequential charge and discharge method.)

김 휘 영* 홍 수 열** 김 동 수***
(Whi-Young Kim) (Soo-Youl Hong) (Dong-Su Kim)

요 약

펄스형 YAG 레이저 시스템의 효율개선을 위해서는 공진기 및 레이저 전원장치의 최적화가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 공진기 출력거울의 반사율 최적화 및 기존의 전원보다 훨씬 컴팩하고, 경제적이며 가공목적에 따라 출력을 정밀하게 제어할 수 있는 새로운 방식의 레이저시스템을 설계 및 제작하였다. 그 결과 50[W]급의 펄스형 Nd:YAG 레이저 시스템에서는 출력거울의 반사율이 85%일 때 최대 출력을 나타내었다. 그리고 3단 병렬 충·방전 방식의 전원시스템은 3개의 콘덴서가 순차적으로 충·방전함으로써 1개의 콘덴가 충·방전하는 방식보다 더 많은 에너지를 플래쉬램프에 전달할 수 있어 더 높은 출력을 얻을수가 있었다. 실험을 통해 제시한 방법의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

The optimization of resonator and laser power supply has been considered to be significant for improving the efficiency of a pulsed Nd:YAG laser system. We have proposed a new method of 3-mesh parallel sequential charge and discharge circuit as a laser power supply; more compact than conventional power supply, competitive in price, easy to control the laser power density according to various material processing, and equipped with the optimum reflectivity of output coupler. In this study, we could find that the maximum laser output was obtained by using 35% of reflectivity in the case of 50 [W]-class. In addition, using the power supply of new method, it's possible to charge each capacitor bank with a higher energy within the given charging time adopted a new method mentioned above; namely, we can allow each capacitor to have much more charging time and storage energy. So, higher laser output was obtained than conventional power supply.

1. 서 론

가공용 레이저로는 CO₂, 루비, Nd:YAG, 아르곤 이온 레이저, DPSSL(Diode Pumped Solid State Laser) 등이 이용되고 있는데, 이중 펄스형 Nd:YAG 레이저는 CO₂ 레이저와 함께 레이저가공에 널리 사

용되는 고체 레이저로서 용접, 절단, 구멍뚫기, 열처리, 트리밍, 스크라이빙, 마킹, 리페어링 등의 정밀가공분야에서 많은 실용화가 이루어져왔다.[1-3]

* 종신회원 : 동주대학 컴퓨터정보통신계열 전임강사
** 정회원 : 동주대학 컴퓨터정보통신계열 조교수
*** 정회원 : 동주대학 컴퓨터정보통신계열 조교수

논문접수 : 2001. 3. 19.
심사완료 : 2001. 4. 7.

CO₂ 레이저의 경우, 외국산의 값비싼 광학부품을 구입해야 하며, 매질가스로 CO₂, N₂, He 등을 사용해야 하므로 취급 및 유지보수가 불편하다. 반면에 Nd:YAG 레이저는 광학부품의 국내조달이 쉽고, 열전도율이 높으며 기계적, 광학적으로 안정된 고체로드를 여기매질로 사용하므로 수명이 반영구적이고, 취급 및 유지보수가 편리하다. 특히 Nd:YAG 레이저는 CO₂ 레이저에 비하여 파장이 짧으므로 보다 작은 점으로 집광시킬 수 있으며, 램프에 의한 광 여기 방식이므로 광 출력의 제어가 용이하며, 광파이버에 의한 빔 전송이 가능하므로 산업기술 및 의료분야에의 적용이 더욱 더 확대되고 있다. 따라서 지속적인 레이저 시스템의 성능개선에 대한 연구를 계속하여 효율적인 시스템으로 완성해 가야할 것이다.[4, 6] 펄스형 Nd:YAG 레이저 시스템의 효율개선을 위해서는 공진기 및 레이저 전원장치의 최적화가 필수적이다. 페브리-페로 공진기인 경우에는 광을 증폭하기 위하여 2개의 반사거울(전반사거울, 출력거울)이 사용된다. 전반사거울인 경우는 반사율이 100%에 가까울수록 바람직하고, 출력거울인 경우는 최적의 출력을 얻기 위하여 반사율의 최적결합(optimum coupling)이 필요하다. 그리고 레이저빔의 주요한 특징은 높은 에너지 밀도에 있으며, 가공목적에 따라 에너지 밀도를 제어하는 것이 매우 중요하다. 에너지 밀도의 제어는 레이저 빔의 펄스화에 의한 동작시간 제어 및 펄스 반복율을 변화시키는 방법이 주로 사용된다.[7-10]

본 연구에서는 공진기 출력거울의 반사율을 최적화 시킨후, 기존의 전원보다 훨씬 컴팩트하고, 경제적이며 가공 목적에 따라 출력을 보다 정밀하게 제어할 수 있는 새로운 방식의 전원장치를 설계 및 제작하므로써 50[W]급 펄스형 YAG 레이저의 이상적인 모델을 제시하고자 한다.

2. 이론

2.1 공진기의 안정성 조건

공진기 공동(cavity)내에서 광축과 거의 일치하여 축상에 있는 광선은 두 거울에 의한 반사를 반복하게 된다. 그러나 왕복 횟수가 증가하게 되면 광선은

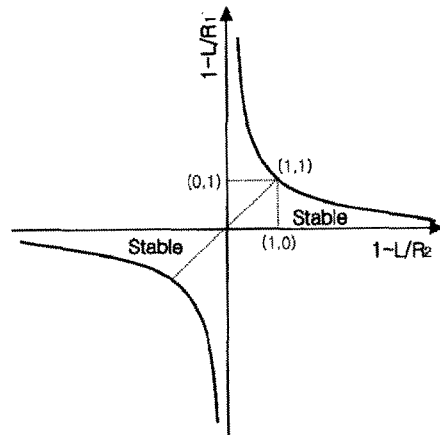
발산하여 손실이 커지게 된다. 반면에 광선이 광축에 접근해 있게 되면 공진기의 손실은 적게 된다. 이러한 관계를 고려하면 레이저 공진기의 안정성 조건을 다음과 같이 얻을 수 있다.[8]

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right)\left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1 \quad (1)$$

여기서, L : 공진기 길이(=0.3m),

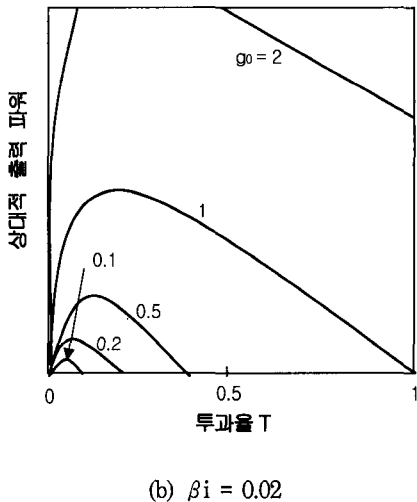
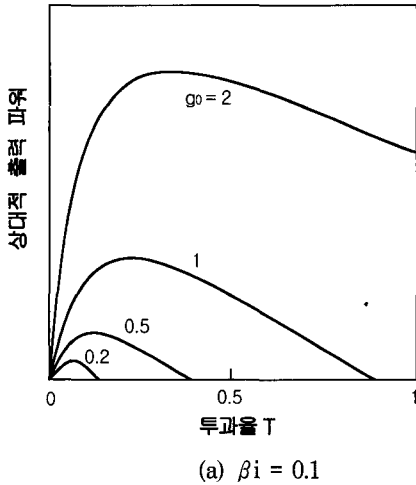
R₁, R₂ : 공진기 거울의 곡률 반경
(R₁=2m, R₂=∞)

본 연구에 사용된 단일 타원형 펄스형 Nd:YAG 레이저의 공진기는 이 값이 0.85로 안정성 조건을 만족한다.



[그림 1] 레이저 공진기의 안정도
[Fig. 1] Stable of laser cavity

2.2 출력저울의 반사율 최적화



[그림 2] 출력저울의 투과율 T와 레이저 출력의 상관관계
[Fig.2] Relation of laser output

페브리-페로 공진기에서 한쪽 거울은 대개 100% 반사율이 이상적이나 레이저 출력을 얻는 다른 한쪽 거울의 반사율은 최대출력을 얻기 위한 값을 정해야 한다. 출력 거울의 반사율이 1에 너무 가까워도 나오는 빛이 거의 없어 출력이 약하고, 0에 너무 가까워도 이득보다는 손실이 더 커서 레이저 출력이 없게 될 것이다. 따라서 최대 출력을 얻을 수 있는 출력거울의 반사율 최적 조건이 존재한다.

정상발전시 출력저울 최적 투과율 조건은 다음과 같이 얻을 수 있다.[9]

$$T_{opt} = -\beta_i + [g_0 \beta_i]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서, T_{opt} : 최대 출력을 얻을 수 있는 거울의 투과율

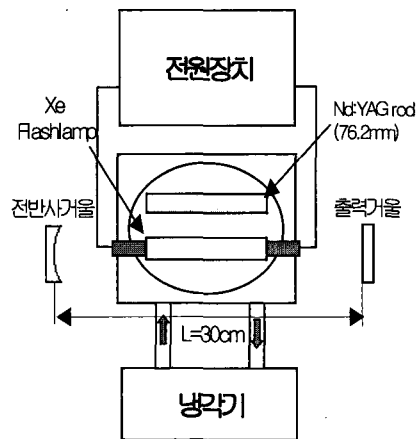
β_i : 투과율 T 이 외의 손실

g_0 : 공진기를 1회 왕복할 때의 소신호 이득

3. 실험장치

3.1 레이저 시스템

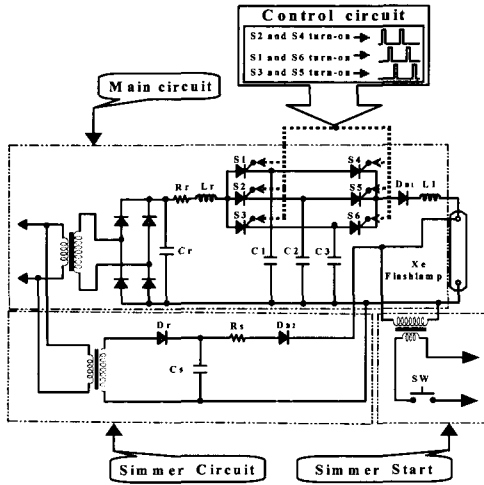
[그림 3]은 Nd:YAG 레이저 시스템의 구성도를 나타낸다. 레이저 시스템은 레이저 발전기와 냉각장치 및 전원장치 등으로 구성된다.



전반사거울(곡률반경 : 2m, 반사율 : 99.5%)
출력거울(곡률반경 : ∞ , 반사율 : 40%, 60%, 85%, 90%)
Nd:YAG 로드 (도핑율 : 1.1%, 길이 : 76.2mm, 반경 : 6mm)
Xe 플래쉬램프 : (방전길이 : 76.2mm, 반경 : 6mm)

[그림 3] 레이저 시스템도
[Fig.3] Diagram of laser system

레이저 공진기는 중앙에 단일타원형 구조의 레이저 헤드와 있고, 그 양가에 레이저 발진을 유도하기 위한 두 개의 거울, 즉 전반사경(반사율 99.5% 이상, 곡률반경 2m인 오목거울) 및 부분 반사경(반사율 40%, 60%, 85%, 90%의 평면거울)으로 구성된



□ 그림 4] 3단 병렬 순차 충전방식의 레이저 전원회로

[Fig.4] Laser system of 3-mesh charge · discharge

냉각장치는 냉각효율을 증대시키고자 수냉식을 사용하여 로드(rod), 램프, 레이저 헤드를 냉각시킴으로 안정된 레이저 동작을 유지하도록 하였다.

3.2 레이저 전원장치

[그림 4]는 3단 병렬 순차 충전방식의 전원회로를 나타낸다. 주 회로의 특징은 지정된 펄스 반복율이 150pps(pulse per second) 라면 실제로 각 콘덴서 C1, C2, C3는 반복율을 3개의 콘덴서가 3등분하여 동작하므로 단일 콘덴서가 펄스 반복율 150[pps]으로 구동될 때에 비해서 콘덴서에 더 많은 에너지가 저장된다. 즉, 각 콘덴서의 충전시간을 더 많이 확보할 수 있는 장점이 있다. 또한 각 콘덴서가 50[pps]로 동작하므로 상용 주파수(60Hz)용 콘덴서를

순차 충전방전함으로써 기존의 고주파 콘덴서를 사용하지 않고도 고효율을 얻을 수 있는 장점이 있다.

처음에 보조 시머전원에 의하여 1000V의 직류 바이어스 전압이 걸려있는 상태에서 시머시동기(피크전압 15kV, 펄스폭 5μs)로 시머점등을 시킨다. 시머점등이 유지된 상태에서 주전원에 충전된 에너지를 다음의 (1), (2), (3)의 순서로 Xe 플래시램프를 동작시킨다.

- ① S2, S4, 턴온 : C1에 충전된 에너지가 플래시램프로 방전 및 C2에 충전시작
- ② S1, S6 턴온 : C3에 충전된 에너지가 플래시램프로 방전 및 C1에 충전시작
- ③ S3, S5 턴온 : C2의 충전된 에너지가 플래시램프로 방전 및 C3에 충전시작

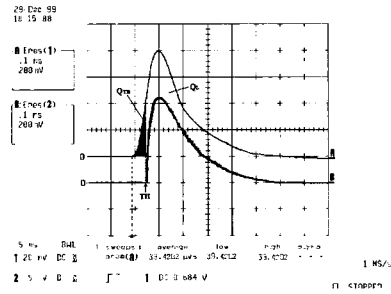
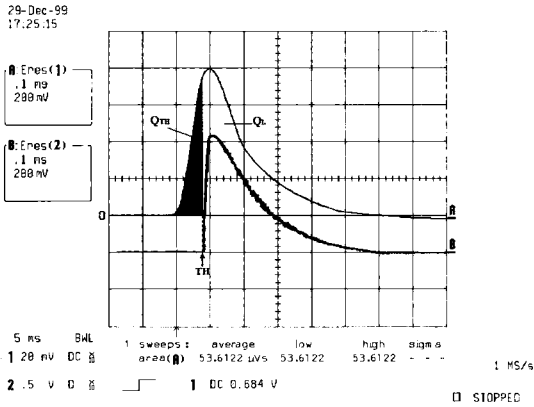
마이크로프로세서를 이용한 제어회로로 각 SCR 게이트 신호를 순차 제어함으로써 위의 ①, ②, ③ 순서로 순차 충전방전을 반복하게 된다. 3단 병렬 순차 충전방전 방식에서 각 콘덴서의 충전방전 순서는 몇 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 [First-Charge, Last-Discharge] 형식으로 순차적으로 충전방전을 실시하도록 제어부를 설계하였다.

4. 실험 결과 및 검토

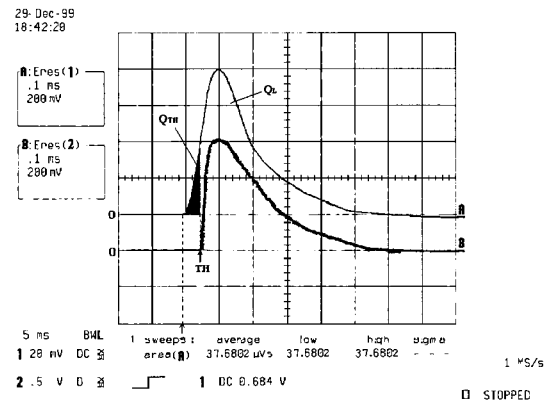
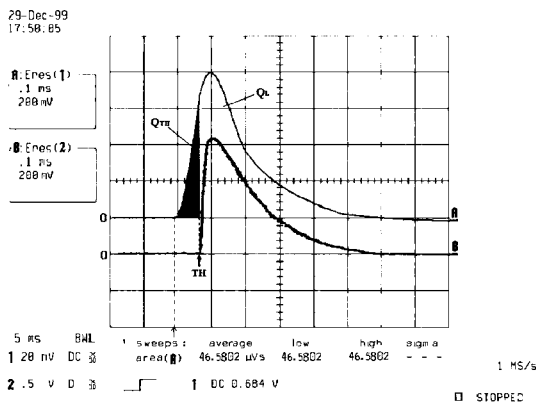
그림 (a), (b), (c), (d)는 콘덴서의 충전전압 1000[V]일 때, 각각 출력거울의 반사율 40%, 60%, 85%, 90%인 경우 플래시램프의 전류파형 및 레이저 빔 프로파일에 해당한다. QTH는 반전분포형성 후 발진시작점(Threshold) 전까지 소모되는 방전 전하량이며, QL은 실제 레이저 출력에 기여하는 방전 전하량이다. 레이저 출력빔의 프로파일은 편형 포토 다이오드(pin photo diode 모델명 : Antel ARS-1)를 이용하여 측정하였다.[10] [그림 5의] area(A)는 레이저 출력이 나오는 시점까지의 펄스 전류파형을 시간에 대한 적분한 값이므로 방전전하량을 의미한다.

이 값으로부터 반전분포형성을 위해 소모된 방전 전하량과 실제 레이저 출력에 기여한 방전전하량의 경향성을 파악할 수 있다. 그림 (d)가 발진시작점이 가장 먼저 도달하여 손실부분(QTH)이 가장 작지만

이득 포화가 그림 (c)보다 먼저 일어나기 때문에 실제로 레이저 출력에 기여하는 부분(QL)은 그림 (c)가 가장 많다. 따라서 출력거울 반사율 85%를 사용한 그림 (c)가 가장 높은 출력을 나타내게 된다.



(c) 85%

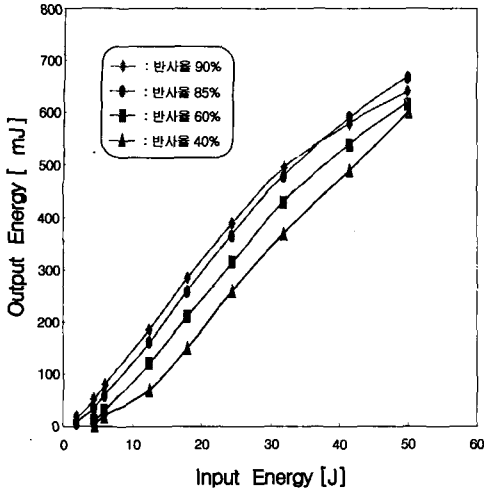


파형 A : 플래시램프 전류파형

파형 B : 레이저 빔 프로파일

[그림 5] 충전전압 1000[V]일 때 출력거울의 반사율에 따른 플래시램프의 전류파형 및 레이저 빔 프로파일

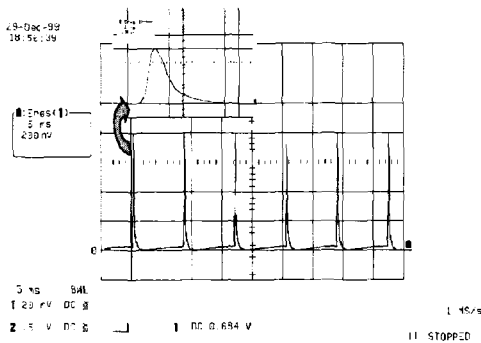
[Fig. 5] Laser current waveform and laser beam profile



〔그림 6〕 반사율에 따른 레이저 출력특성
[Fig.6] reflective of Laser output

〔그림 6〕은 출력거울의 반사율에 따른 레이저 출력 특성을 나타낸다. 85%의 반사율을 가진 출력거울로 공진기를 구성한 경우가 다른 경우(반사율 40%, 60%, 90%)보다 QL이 많으므로 높은 효율을 나타낸다.

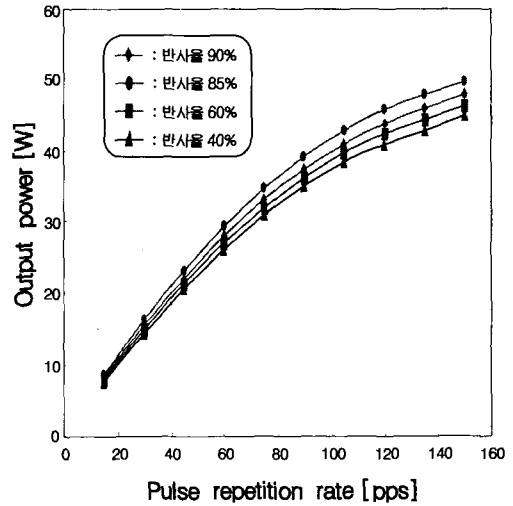
〔그림 7〕은 출력경의 반사율 85%, 콘덴서 충전 전압1000[V], 펄스반복율 120[Hz]일 때, 플래쉬램프의 전류파형을 나타낸다. 부족제동(underdamping)이 거의 없는 안정된 동작하므로 램프에 손상을 입히지 않고, 안정된 출력특성을 보인다.



〔그림 7〕 펄스반복율 120pps일 때 플래쉬램프의 전류파형

[Fig. 7] Flashlamp current waveform 120pps

〔그림 8〕은 콘덴서 충전전압 1000[V]일 때, 펄스반복율에 따른 레이저 출력특성을 나타낸다. 출력경의 반사율 85%일 때 최대출력 약 50[W]를 얻었다. 최대 입력 에너지가 약 5[kW] 이하인 50[W]급 펄스형 Nd:YAG 레이저에서는 출력거울의 반사율이 85%가 최적이라는 것을 나타낸다.



〔그림 8〕 펄스반복율에 따른 레이저 출력특성

[Fig.8] Character of pulse repetition Laser output

5. 결론

본 연구에서는 공진기 출력거울의 최적화 및 기존의 시스템보다 훨씬 콤팩트하고, 경제적이며 출력을 보다 정밀하게 제어할 수 있는 새로운 방식의 장치를 설계 및 제작하여 50[W]급 펄스형 YAG 레이저 출력 특성에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 평균출력 50[W]급 고반복 펄스형 YAG 레이저에서 실제 레이저 출력에 기여하는 성분(QL)이 가장 많은 최적의 출력거울 반사율은 85%였다.
- ② 최대 펄스반복율 150[pps]까지 고반복 SCR을 사용한 3단 병렬 순차 충·방전 방식을 적용하여 구동 전류파형의 안정된 동작특성을 확인하였다.
- ③ 3단 병렬 순차 충·방전 방식의 도입으로 기존의 고가의 수입 고주파 콘덴서 대신에 저가의 60Hz용 국내산 콘덴서를 사용할 수 있게 되어 장치의 경제성을 확보할 수 있었다.
- ④ 3개의 콘덴서를 순차 충·방전함으로써 하나의 콘덴서가 방전할 때 다른 2개의 콘덴서는 충전을 시작하므로 많은 에너지가 콘덴서에 저장된다. 따라서 플래쉬램프에 많은 에너지를 전달할 수 있어 높은 출력을 낼 수 있었다.

※ 참고문헌

- [1] Kenichi Iga et al., "Fundamentals Laser Optics", Plenum Press, New York and London, pp. 13-15 (1994).
- [2] Yasutomo Fujimori, "Laser Material Processing in Electric Industries", Proceeding of Lamp '92, Nagaoka, pp. 981-986, (1992).
- [3] Albright. C. "Laser Welding, Machining and Materials Processing", IFS Publication, pp.8-12, (1996).
- [4] 田辛敏治 外 7人, "レザ-ハソドブック", 朝倉書店, pp. 691-703, (1982).
- [5] Orazio Svelto, "Principles of Lasers", Plenum Press, New York, Chap. 9, (1982).
- [6] A. L. Petrov et al. "New Advances in Industry Application of YAG Pulse Lasers", Proceeding of Lamp '92, Nagaoka, pp. 993-997, (1992).
- [7] Hee-Je Kim, Eun-Soo Kim, Dong-Hoon Lee, The development of a high repetitive and high power Nd:YAG laser by using a zero-current switching resonant converter Optics & Laser Technology 30, pp. 199-203, (1998).
- [8] W. Koechner, "Solid-State Laser Engineering", Springer-Verlag, New York, Heidelberg, pp.118-126, 195-201, (1995).
- [9] 前田三男著, "量子エレクトロニクス", 昭晃堂, pp. 82-83, (1889).
- [10] Whi-Young Kim " 펄스형 Nd:YAG laser 의 출력과 효율향상을 위한 동작특성 연구, 박사학위 논문, 2001. 2

김휘영



1989 부경대학교 전자공학과
졸업 (공학사)
1992 동아대학교 전자공학과
졸업 (공학석사)
2001 부산대학교 전기공학과
졸업 (공학박사)
2000.2~현재 동주대학
컴퓨터정보통신계열 전임강사
관심분야 : Laser설계 및
광통신응용시스템 개발,
시스템프로그래밍

김동수



1985년 부산대학교 계산통계학과
1987년 부산대학교 대학원
계산통계학과(이학석사)
1993년 부산대학교 대학원
전자계산학과 (박사수료)
1991년~현재 동주대학
컴퓨터정보 통신계열 조교수
관심분야 : 운영체제, 병렬처리,
프로그래밍 언어,
비주얼 프로그래밍

홍수열



1985.2. 경상대학교
전산통계학과 졸업 (이학사)
1994.2 숭실대학교
컴퓨터공학과 졸업(공학석사)
1985.1~1992.6 대우전자(주)
컴퓨터개발부 근무
1992.7~1994.2 대우통신(주)
S/W연구실 근무
1994.3~현재 동주대학
컴퓨터정보통신계열 조교수
관심분야 : 비주얼프로그래밍,
정보보완, 컴퓨터그래픽스,
MIS