

화력발전설비의 과열증기저감용 가변오리피스 분사 특성

김정식^{1*}, 김광희¹, 이종선²
¹(재)인천테크노파크 기술혁신본부
²대진대학교 컴퓨터응용기계설계공학과

The study on the variable orifice spray of the steam power plant desuperheater

Jeong-Sik Kim^{1*}, Kwang-Hee Kim¹ and Jong-Sun Lee²

¹Division of Technical Innovation, Incheon Technopark

²Computer Aided Mechanical Design Engineering, DaeJin University

요 약 최근 안정적 전력수급을 위하여 화력발전에 대한 중요성이 더해 가고 있다. 화력발전설비 중 과열증기저감기는 보일러에서 생산된 과열증기가 발전터빈을 손상하지 않도록 적당한 과열도를 유지시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 460mm 배관에 530℃, 1.36 MPa의 증기가 흐를 때, 국내에서 개발된 가변오리피스노즐로 150℃, 36.7 kg/s, 4.28 MPa의 냉각수를 분사하는 조건에서 성능해석을 수행하였다. 연구 결과, 증기관내 냉각수 온도가 446℃로 유지되고 분무된 액적 크기가 50 μ m 이하임을 확인하였다.

Abstract The steam power plant is becoming more important to supply a stable power lately. Desuperheater of the steam power plant facility plays a role in maintaining the proper superheat to avoid damage turbine power due to the superheated steam produced in the boiler. In this study, when the steam flows 530℃, 36.7 kg/s, 1.36 MPa in the 460mm pipe, variable orifice nozzle developed in Korea was carried out the performance analysis in coolant injection conditions of 150℃, 4.28 MPa. Findings, steam pipe coolant temperature was maintained at 446 ℃ and sprayed droplet size was verified by 50 μ m or less.

Key Words : Steam power plant, Coolant, Variable orifice nozzle, Desuperheater

1. 서론

1.1 과열증기저감기 개요

최근의 국내 전력수급 비상상황과 더불어 안정적 전력 확보를 위하여 기존 화석연료를 사용하는 화력발전소에 대한 중요성이 더해 가고 있다. 특히, 현재 국민 1인당 전력소모량이 연간 8,092 kWh 수준으로 1980년 대비 9배 증가하였으며, 예측보다 높은 전력수요로 공급여건이 악화되고 있다[1].

보통 화력발전은 단시간 내 최대출력을 낼 수 있어서 급격한 전기수요 증가에 효과적으로 대응할 수 있는 장점이 있으나, 막대한 화석연료를 사용하며 다량의 CO₂를

대기 중으로 배출하여 지구온난화의 원인이 되므로 친환경적 발전은 거리가 있는 것으로 인식되어왔다. 그럼에도 불구하고 관련기술의 꾸준한 진보를 통해 석탄가스화 및 연소 중 발생된 CO₂를 회수하는 기술을 적용하여 기존대비 CO₂ 배출을 90% 저감하고, 발전효율을 60% 이상까지 달성함으로써 친환경발전 방법으로 이미지 전환을 시도하고 있다[2].

화력발전과정 중 보일러에서 생산된 증기는 높은 과열도를 가지게 되는데, 이 상태로 발전터빈에 그대로 유입되면 열충격과 마모축진 등으로 터빈손상의 원인이 되므로 과열기(superheater) 사이에 과열증기저감기를 설치하여 냉각수를 분사함으로써 30℃ 정도의 과열도를 유지하

*Corresponding Author : Jeong-Sik Kim (Incheon Technopark)

Tel : +82-32-260-0810 email : tomato2004@itp.or.kr

Received September 24, 2012

Revised (1st October 12, 2012, 2nd October 26, 2012)

Accepted January 10, 2013

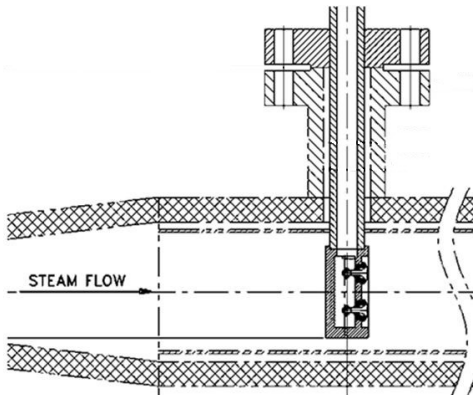
는 역할을 한다. 즉, 과열증기저감기 배관을 통과하는 500℃이상의 증기를 출구 온도를 기준으로 냉각수 유량 제어와 과열증기저감기 노즐을 통해 적절한 냉각수를 분사하여 증발잠열을 빼앗아 증기온도를 적정한 범위로 유지한다. 과열증기저감기의 냉각수 분사량이 너무 많으면, 무화되지 않고 액적형태로 증기배관에 직접 접촉되어 열 충격으로 증기배관을 손상시킬 우려가 있다[3]. 따라서 분사 후 신속하게 증발되기 위해 액적크기가 작고, 균일하게 분사되도록 노즐을 설계하는 것이 필수적이다.

보통 과열증기저감기의 최대허용 액적의 크기는 분무 노즐 형태에 따라 100~200µm이하로 하며, 장시간 고온 고압 환경에서 작동되므로 높은 신뢰성을 유지하도록 몸체는 마르텐사이트 계열의 STS420, 노즐 스프링은 인코넬718로 제작된다[4-5]. 현재 화력발전기의 과열증기저감기는 대부분 수입하여 사용하고 있으므로, 유지보수와 설비변경에 대한 기술 지원이 불가능하므로 화력발전 관련 과열증기저감기의 노즐설계기술 확보가 시급한 상황이다.

1.2 연구의 목적

기존 인젝터에 관련된 연구는 엔진용 인젝터의 분무특성에 관한 연구가 대부분이었고 화력발전용 노즐에 대한 연구는 많지 않았다[6-8].

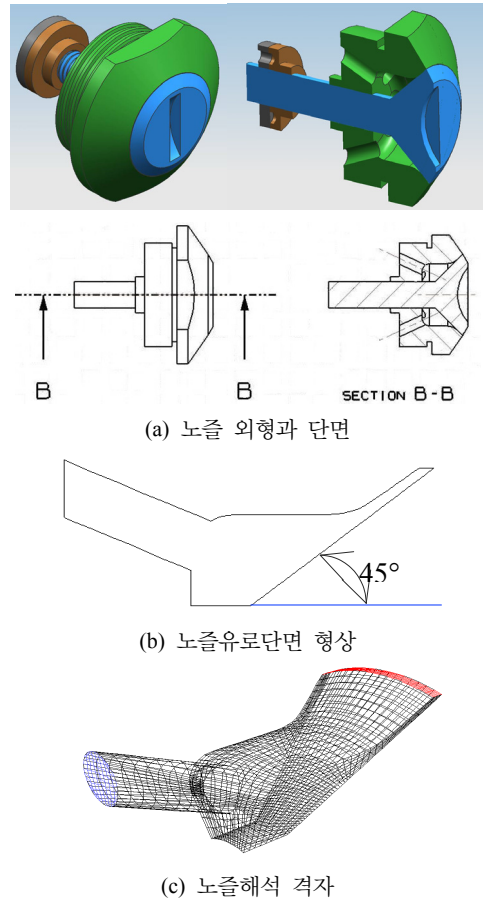
화력발전 설비의 과열증기저감기는 소모품으로, 노즐의 분사방식에 따라 멀티노즐 스프레이, 워터젯, 가변오리피스 방식 등 다양한 형태가 혼용되어 사용되고 있다. 그 가운데 가변오리피스 노즐은 적은 냉각수유량에도 분무화가 좋으며, 넓은 유량 범위에서 적용이 가능하고 간단한 구조로 동작신뢰성이 높고, 노즐부 수명이 비교적 길게 유지되므로 우선적으로 확보해야하는 기술로 판단된다[9].



[Fig. 1] Installation of desuperheater

그림 1은 증기배관에 증기유동 방향으로 노즐 2개로 이루어진 과열저감기가 설치된 모습으로 운전조건에 따라 노즐수를 결정하게 된다.

본 연구에서는 국내 화력발전소 과열증기저감기 중 멀티노즐형이 적용되어 잦은 유지보수가 필요한 점을 개선하고자 가변오리피스 노즐로 대체하고 실제 운전조건에서의 성능예측을 통해 제품 신뢰성을 확보하고자 하였다.



[Fig. 2] Modeling data for Analysis

2. 해석 절차

2.1 가변오리피스 노즐의 구조

그림 2의 (a)는 노즐의 외형을 나타내는데 냉각수배관이 설정압력에 달하면 오리피스 뒤쪽에 있는 로크너트의 스프링을 밀어 직각 원뿔형 노즐플러그가 열리고 8개의 노즐유입부로 냉각수가 유입된다. (b)는 노즐을 통과하는 유로의 단면형상을 나타내는데 냉각수는 이를 통과하여

원통모양으로 증기배관내로 분사되는 구조이다. (c)는 해석에 사용된 격자 형태이며, 노즐의 주요 치수는 표 1에 표시하였다.

2.2 계산 조건

오리피스 과열증기저감기 노즐의 기본 설계가 적정함을 알아보기 위해 실제 화력발전소 운전 데이터 중 가장 열악한 운전 조건으로 판단되는 증기유량이 최소이면서 분사 유량이 최대인 경우를 표 2와 같이 설정하였다.

먼저, 수치해석은 해석하고자 하는 공간을 CAD 데이터화 한 다음 이를 작은 격자들로 분할한다. 각 격자들에 보존법칙을 적용하여 속도, 온도 등의 유동변수 값을 얻는데, 본 연구에서는 범용 CFD 패키지인 FLUENT Ver 6.3을 이용하여 증기배관내의 냉각수 거동 및 노즐의 유동 분포를 해석하였다.

[Table 1] Specifications of nozzle

Nozzle body			Nozzle plug		
End angle(°)	Tip dia(mm)	inner dia(mm)	diameter (mm)	Tip angle(°)	Tip dia (mm)
86	31	24	10	90	31

[Table 2] Operating condition of coolant and steam

Pipe diameter (cm)	Coolant			Steam		
	Pw (MPa)	Qw (kg/s)	Tw (°C)	Ps (MPa)	Qs (kg/s)	Ts (°C)
46.0	4.28	1.61	150.2	1.36	36.70	530.4

2.3 해석 방법

본 연구에서 유동해석을 위하여 질량보존과 운동방정식을 풀어야 하는데 FLUENT에서 제공하는 DPM (Discrete-Phase-Model) 기법을 이용하여 냉각수 분사 거동을 해석하였다[10].

유동은 비압축성 유동으로, 전 영역에 대하여 k-ε 모델을 사용한 난류해석으로 하였다.

노즐 내부의 유동해석을 통하여 냉각수의 양을 제어하는 노즐 플러그의 각도를 90°로 설정하고 노즐의 토출 분사 각도를 예측하였다.

해석격자는 그림 2 (c)와 같이 3차원으로 형상을 만들고 8개의 노즐 유입부를 대칭성을 고려하여 실제 형상의 1/16로 나누어 약 350,000개의 육면체 격자를 사용하였으며, 노즐입구에서 압력은 4.28 MPa로 하고 출구에서는 유동 증기의 압력인 1.36 MPa로 하였다.

3. 결과 고찰

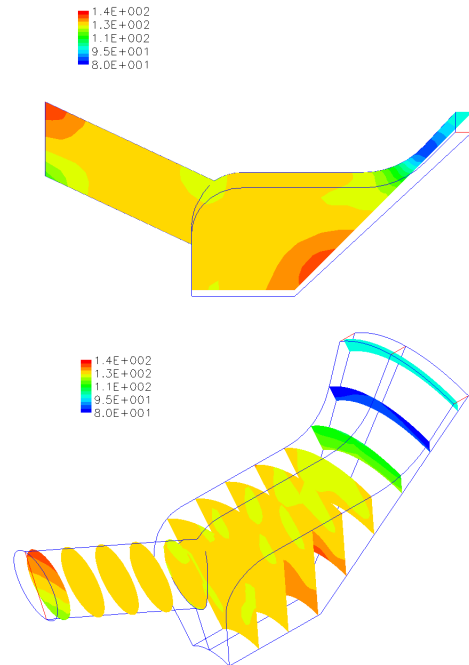
3.1 노즐내 압력분포

그림 3은 노즐 유입구 8개 가운데 1개의 유동공간에서의 내부 압력분포를 나타낸다. 입구에서 유입되는 압력이 높게 나타나고 노즐 내부에서는 유입되는 냉각수가 원통형상의 노즐 플러그에 최초로 충돌하는 면에서 압력이 높게 나타난다.

또한, 노즐 출구에서는 증기의 압력이 낮은 쪽으로 유출되는데, 빠르게 유입되는 냉각수가 충돌하는 플러그 벽면에 높은 압력을 나타내지만 유입부의 압력과 유사한 크기의 압력이므로 노즐의 구조적인 문제에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

3.2 속도분포

그림 4는 노즐 내부 속도 분포를 나타낸다. 유입된 냉각수가 노즐 유로로 균일한 속도로 흐르다가 플러그의 벽면에 충돌하면서 속도가 느려지는 것을 볼 수 있다. 플러그 면에 충돌한 냉각수노즐의 회전방향인 좌우로 퍼지면서 출구로 나가는 유동 패턴을 나타낸다.



[Fig. 3] Inner pressure distribution of nozzle

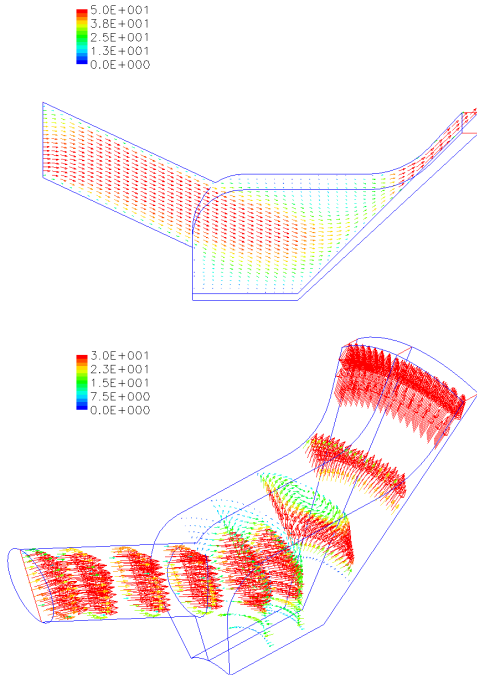
출구로 향하는 냉각수는 좁은 출구 유로에서 빠른 유속을 가지며 증기 주관로로 유출된다. 유입되는 유동이

노즐 내부에서 재순환되는 영역이 나타나지 않는 것으로 보아 노즐 내부의 유로는 냉각수가 지나가는데 큰 압력 손실이 없는 형상인 것으로 판단된다.

3.3 냉각수 액적 거동

냉각수가 최대 압력이고 증기가 최소 압력인 조건에서 분사된 냉각수 액적의 거동을 예측하기 위해, 노즐 개수가 각각 1개와 2개인 경우에 대한 해석을 수행하였다. 각각 유동조건은 같으며, 노즐이 2개인 경우는 냉각수 유량이 50:50으로 나누어 분사되는 것으로 가정하였다.

분사된 냉각수는 고온고압의 증기관에서 냉각수와 증기의 상대속도 차이로 인하여 더욱 작은액적으로 깨지고 (break-up현상) 고온, 고압의 조건에서 증발하여 모두 없어지게 된다.



[Fig. 4] Inner velocity distribution of nozzle

그림 5는 증기관 내 분사된 냉각수 액적의 크기별 분포의 일부를 나타낸다. 노즐 1개인 경우, 2개일 때보다 상대적으로 빠른 속도로 분사되어 액적이 잘 깨어지므로 액적의 직경도 작게 유지되는 것으로 판단된다. 또한 노즐 수에 상관없이 분사된 후 증기관을 10m 통과하여도 완전히 증발하지 않고 일부의 액적이 관벽면 부근에 남는 것으로 나타났다.

그림 6은 분사된 냉각수의 거리에 따른 입자의 직경을

나타낸다. 초기에 분사되는 직경은 노즐 개수에 따라 30~50 μm 이며, 노즐 1개인 경우의 입자가 2개인 경우보다 직경이 작은 것으로 나타났다. 분사 후 6m 이후에서 액적의 직경변동이 심한 것이 보이는데 이는 액적이 급격히 증발하여 소멸되면서 나타나는 현상으로 보인다.

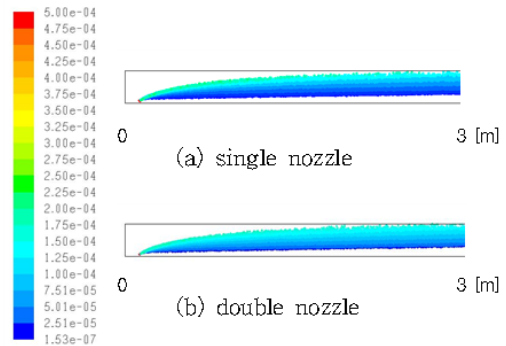
그림 7은 증기관 거리에 따라 증기관 내 분무 반경을 나타내는데, 노즐이 1개인 경우가 2개인 경우보다 분사 반경이 크게 나타난다.

이와 같이 노즐이 1개인 경우가 2개인 경우보다, 분사 액적 직경이 작고, 분사 반경이 큰 것은 냉각수 공급 유량이 같아서 노즐 1개일 때의 유량이 2개일 때보다 2배의 유량이 통과하기 때문으로 생각된다. 또한, 증기관의 반경이 230mm인 것을 고려하면 노즐이 1개인 경우와 2개인 경우 모두 분사 후 10m 지점에서 액적이 증기관에 충돌할 가능성이 있지만, 액적의 직경이 일반적인 액적 허용크기인 100 μm 보다 작은 50 μm 이하이므로 증기관벽 충돌로 인한 열충격 손상은 거의 없을 것으로 판단된다.

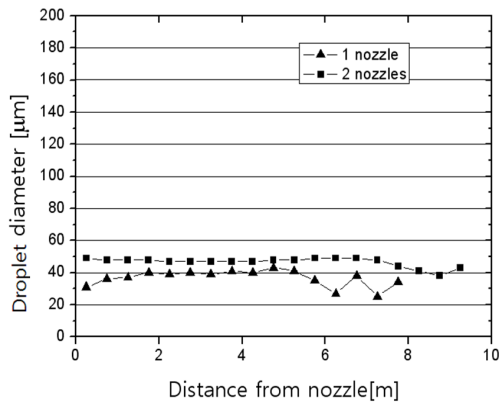
3.4 냉각수 온도변화

그림 8은 분사된 냉각수의 온도분포를 나타낸다. 분사된 액적의 증발 온도는 약 150 $^{\circ}\text{C}$ 이고, 이 이상이 되면 액적 표면에서 증발이 생기면서 액적의 무게가 감소하게 된다.

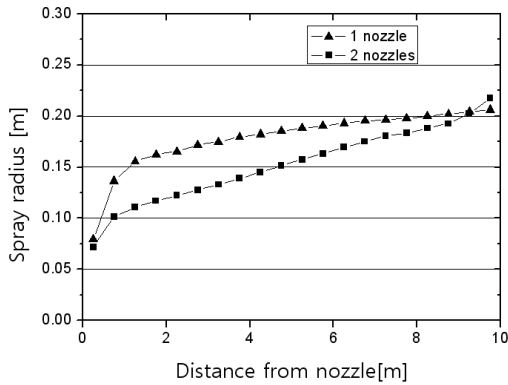
노즐이 1개인 경우에 분사된 액적이 증발을 하면서 약 446 $^{\circ}\text{C}$ 까지 올라가고, 노즐이 2개인 경우는 이보다 낮은 441 $^{\circ}\text{C}$ 정도를 나타내는데 물에서 증기로 상변화가 진행 중이므로 일정한 온도를 유지하였다. 분무된 냉각수의 온도차는 노즐 수에 따라 액적 직경과 분무반경이 다르고, 증기관에서 증기유속과 분사 액적 속도차로 액적이 불규칙하게 깨어지면서 증발하는 복잡한 과정에서 생긴 결과로 생각된다.



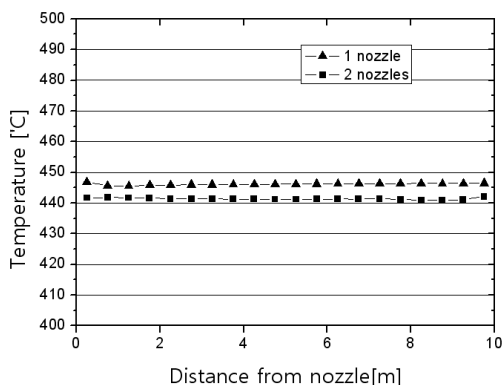
[Fig. 5] Distribution of sprayed coolant particle size[m]



[Fig. 6] Comparison of sprayed coolant particle diameter



[Fig. 7] Comparison of spray radius



[Fig. 8] Coolant temperature in the steam pipe

4. 결론

본 연구에서는 화력발전 설비에서 530℃, 1.36 MPa의

증기가 흐를 때, 과열증기저감기로 개발된 가변오리피스 노즐로 150℃, 36.7 kg/s, 4.28 MPa의 냉각수를 분사하는 성능해석을 통해 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 직경 460mm 증기관에서 냉각수는 분사 노즐이 1개인 경우가 2개인 경우보다 액적 크기가 작으며, 초기 분무 반경이 커서 무화에 유리하지만, 노즐 2개인 냉각수온도가 5℃ 정도 낮았다.
- 2) 본 분무조건에서 노즐에서 분무된 후 증기관을 10m 정도 통과하면, 액적의 직경이 50μm이하로 유지되므로 액적의 증기관 접촉으로 인한 열충격 손상은 없을 것으로 판단된다.
- 3) 증기관의 직경과 액적의 크기, 증발에 소요되는 증기관 길이를 고려하여 과열증기저감기에 설치되는 노즐수를 결정하는 것이 바람직하다.

References

- [1] Ministry of Knowledge Economy, "The 5th Basic Plan of Long-Term Electricity Supply", pp. 11-20, 2010.
- [2] Nikkei, "Mononukuri", pp. 63-70, August, 2009.
- [3] JSME, "Thermodynamics", pp. 147-156, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2003.
- [4] Scott. A. Wambeke, "Avoid desuperheater problems with quality equipment, proper installation, tight process", Combined Cycle, Fourth Quarter, pp. 13-17, 2004.
- [5] Sanjay. V. Sherikar, Peter. Borzsony, " Designing HRSG desuperheaters for performance and reliability", Power, pp. 2-4, March, 2006.
- [6] Kyung-Min Yoom, Sung-Young Park, "Experimental Study on the Spray Characteristics of a Fuel Injector for a Non-Road Small Engine", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 5, pp. 2005-2010, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.5.2005>
- [7] Sang-In Lee, Sung-Young Park, "Experimental Study on Spray Characteristics of Gasoline Direct Injection Multi-hole Injector", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 5, pp. 2055-2060, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.5.2054>
- [8] Sung-won Lee, Sang-In Lee, Sung-Young Park, "Experimental Study on the Wall-Wetting Formation and Spray Characteristics of Gasoline Engine Injector", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation

Society, Vol. 11, No. 3, pp. 815-820, 2010.

[9] Kristin. Donahue, "Desuperheater selection and optimization",
Chemical Engineering, pp. 51-55, August, 2001.

[10] Fluent, User Guide, Version 6.3, Fluent. Inc, 2006.

김 정 식(Jeong-Sik Kim)

[정회원]



- 2002년 3월 : 일본 큐슈대학 대학원 총합이공학연구과(공학박사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : (재)인천테크노파크 기술혁신본부 선임연구원

<관심분야>

열전달촉진, 에너지효율향상, 공정혁신

김 광 희(Kwang-Hee Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 국민대학교 대학원 기계설계공학과 (공학박사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : (재)인천테크노파크 기술혁신본부 본부장

<관심분야>

CAD/CAM/CAE, 정밀가공, 최적설계

이 종 선(Jong-Sun Lee)

[종신회원]



- 1982년 2월 : 국민대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1984년 2월 : 국민대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 국민대학교 기계설계학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과 교수

<관심분야>

최적설계, 생산공학