

일 초점 산소 버너의 초점 거리가 연료 혼합 및 연소에 미치는 영향

박권하* · 김주연¹

(원고접수일 : 2011년 6월 22일, 원고수정일 : 2011년 7월 29일, 심사완료일 : 2011년 8월 10일)

The Effect of Focal Length on Fuel Mixing And Combustion in One-focusing Oxygen Burner

Kweon-Ha Park* · Ju-Youn Kim¹

요 약 : 연소기에서의 배기저감과 효율향상을 위하여 순 산소 버너에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 일 초점 산소버너의 개념을 제시하며 연료인 메탄과 산화제인 산소의 혼합정도를 분석하기 위하여 연소를 제외한 유동혼합거동을 고찰하였으며, 연소를 포함했을 때의 연소특성을 분석하기 위하여 일 단계 반응을 고려한 연소 모델을 적용하여 연소거동을 분석하였다. 계산조건은 버너 노즐의 중심에 산소가 공급되고 그 주위로 메탄이 그리고 그 외곽으로 산소가 공급되는데 그 유량을 1:2:3이 되도록 하였으며, 초점거리를 100mm에서 500mm까지 4등분하여 유동과 연소를 계산하여 혼합의 정도와 온도 분포를 비교분석하였다. 계산결과 유동의 경우 초점거리가 짧을수록 긴 혼합유동을 보여주며, 화염의 경우 300mm일 때 가장 넓게 확산되었으며 화염의 길이도 가장 크게 나타났다.

주제어 : 순 산소 버너, 일 초점, 유동계산, 연료혼합, 화염

Abstract: An Oxy-fuel combustion has been studied in order to reduce exhaust emissions and fuel consumption. The flow and flame behaviors are analyzed with focal length variation in one-focussing oxygen burner introduced in this study. Oxygen is supplied into the center of the nozzle, methane fuel is into the outer nozzle of the center, and then oxygen is again supplied into the outer of the fuel nozzle. The test conditions are 5 focal lengths of 100mm to 500mm. The mixing behaviors and temperature distributions are analyzed. The result shows that the shorter the focal length is, the longer the mixing length becomes, and the flame width and length are the biggest in the case of 300mm.

Key words: Oxygen Burner, One focusing, CFD, Fuel mixing, Flame

1. 서 론

환경에 관한 관심이 증가하면서 지구온난화와 관련된 온실 가스배출에 대한 규제가 강화되고 있다. 온난화의 주원인은 화석연료를 사용하는 연소기에서 배출되는 이산화탄소이며, 이산화탄소의 배출을 저감하기 위하여 열효율향상에 의한 연료소비의 저감이 요구된다.

에너지 효율 향상에 의한 탄소저감기술로서 산소 연소기술에 대한 연구가 진행되고 있다[1-8]. 산소연

소는 탄화 수소계 연료와 산소가 반응하여 수증기와 이산화탄소만을 생성하기 때문에 고온의 질소가 배가스로 배출되지 않아 배가스중의 질소 배출 에너지 만큼의 에너지 절감효과가 있다. 또한 질소 산화물의 배출을 억제하고 고농도 CO_2 를 포집할 수 있는 장점이 있다. 산소 연소의 방법은 흡입공기 중에 산소를 부분적으로 공급하는 산소 부화방식과 산화제로 산소만을 사용하는 순 산소 연소 방식이 있다. 순 산소 연소 방식은 화염 크기가 감소하면서

* 교신저자(한국해양대학교 기계에너지시스템공학부, E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4367)

¹ 한국해양대학교 기계공학과 대학원

화염이 집중되어 고온화 되기 때문에 복사 열전달량이 증가하여 조업원료에 신속한 많은 열량을 공급할 수 있는 장점이 있는 반면 원료에 균일한 온도 전달이 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하면서 효율을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되고 있는데, [4]에서는 순 산소 연소에서 다양한 노즐 직경의 변화에 따른 화염 길이의 특징에 대한 연구를 수행하였고, [9]에서는 상호작용하는 부상화염의 특성에 관한 연구에서 부상화염의 상호작용 특성을 살펴보기 위해 노즐을 1개, 4개, 5개 사용하였으며 노즐의 배열도 3가지 형태로 하여 실험을 수행하였다. [10]에서는 층류제트 화염에서 노즐 직경에 따른 안정화 메커니즘과 화염형상에 관한 연구를 하였고, [11]에서는 부상화염에서 노즐직경과 연료유량에 따른 화염전파속도와 체적연소반응속도의 변화 특성에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 연료와 산소의 혼합을 강화하고 순 산소 연소의 수축된 화염형상을 제어하기 위하여 일 초점으로 연료와 산소가 분사되는 버너의 구조를 제시하며 초점거리에 따른 유동의 혼합 특성과 연소화염의 특성을 분석하고자 한다.

2. 수학적 모델 및 계산조건

2.1 수학적 모델

일 초점 유동에서 연료인 메탄과 산화제인 산소의 혼합정도를 분석하기 위하여 연소를 제외한 유동혼합거동을 고찰하였으며, 연소를 포함했을 때의 연소특성을 분석하기 위하여 일 단계 반응을 고려한 연소 모델을 적용하여 연소거동을 분석하였다.

유동계산에 적용된 질량, 모멘텀, 에너지 보존에 대한 전달 방정식은 다음과 같다.

연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{1}$$

모멘텀 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \tag{2}$$

여기서 응력텐서 τ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U \tag{3}$$

에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \tag{4}$$

여기서 h_{tot} 는 전 엔탈피를 나타내며 $h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2$ 이다. $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ 는 점성 일의 항이며 $U \cdot S_M$ 은 외부 모멘텀 생성항이다.

난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였으며 난류에너지와 소산율에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \epsilon) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_{\epsilon b}) \end{aligned} \tag{6}$$

연소가 포함된 계산에서는 연소에 의한 생성항을 포함하였으며, 전달방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial (\rho Y_I)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j Y_I)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T_{I,w} \frac{\partial Y_I}{\partial x_j} \right) + S_I \tag{7}$$

여기서 생성항 S_I 는 화학반응율에 의하여 계산된다. 화학반응식은 N_c 개의 화학종에 대하여 다음과 같이 표시된다.

$$\sum_{I=A,B,C,\dots}^{N_c} v'_{kI} I \Leftrightarrow \sum_{I=A,B,C,\dots}^{N_c} v''_{kI} I \tag{8}$$

여기서 v_{kI} 는 K단계에서 I화학종에 대한 이론계수이며, 연소생성율, S_I 는 모든 반응단계의 반응율을 포함하여 계산된다.

$$S_I = W_I \sum_{k=1}^K (v''_{kI} - v'_{kI}) R_k \tag{9}$$

여기서 R_k 는 K단계의 반응율을 나타낸다.

복사열전달의 열유량은 다음 식으로 주어진다.

$$q_{rv} = -\frac{1}{3(K_{av} - K_{sv}) - AK_{sv}} \nabla G_V \tag{10}$$

여기서 A는 선형비등방성계수이다.

2.2 계산 격자 및 조건

초점거리에 따른 유동 혼합과 연소 거동을 고찰하기 위하여 초점거리를 100mm에서 500mm까지 4등분하여 유동이 그 초점에 집중될 수 있도록 Figure 1과 같이 노즐 1,2,3의 출구 단면을 일 초점을 향하도록 하였다.

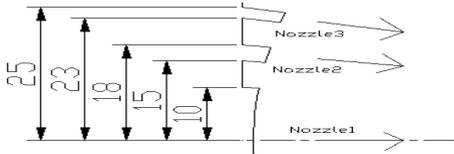


Figure 1: Nozzle design

계산격자의 생성은 UG와 ICEM을 이용하였으며 격자수는 165393으로 Figure 2와 같다.

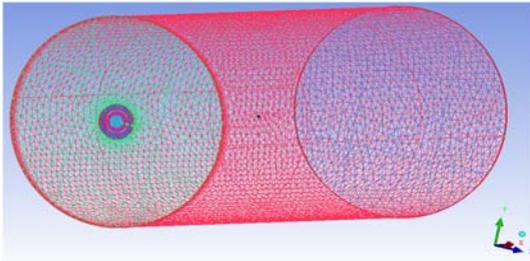


Figure 2: Grids of calculation domain

Table 1: Calculation condition

Items		Conditions
Focal length		100, 200, 300, 400, 500 [mm]
Inlet condition	Nozzle 1	50[m/s]
	Nozzle 2	100[m/s]
	Nozzle 3	150[m/s]
Initial mass fraction in chamber	Flow Calculation	CO ₂ 1.0
	Combustion	CO ₂ 0.367
	Calculation	H ₂ O 0.633

계산 조건은 Table 1과 같다. 노즐에서 공급되

는 유량은 메탄의 순산소분위기 연소의 이론산소연료비에 맞추어 결정되었으며 연소실내의 초기 질량분율 조건을 유동계산의 경우 CO₂를 1로 하였으며 연소의 경우는 완전연소후의 분율인 CO₂를 0.367, H₂O를 0.633으로 하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 유동해석

Figure 3은 초점거리가 100mm, 300mm, 500mm 일 때의 유동의 거동을 나타낸다. 초점 거리 100mm일 때 노즐의 각도가 제일 크기 때문에 초점을 향하는 유동의 각도가 제일 크고 300mm, 500mm로 갈수록 작아지는 것을 알 수가 있다.

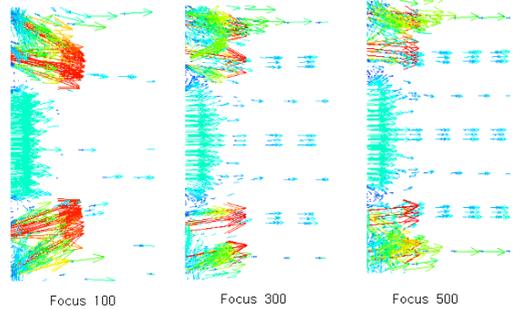


Figure 3: Behavior of Flow

Figure 4는 산소체적분율 변화를 초점거리 100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm일 때 비교한 것이다. 초점거리 100mm일 때는 다른 경우에

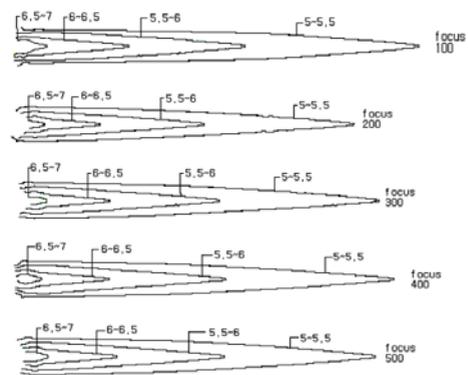


Figure 4: Contour of O₂ volume fraction

비하여 폭 방향은 줄어들고 길이 방향은 길게 분포됨을 보여준다. 200mm일 때는 100mm에 비해 길이와 폭이 줄어들며 300mm일 때는 다시 길이와 폭이 약간 증가한다. 하지만 400mm일 때는 길이는 약간 증가하고 폭은 변화가 없으며 500mm일 때는 길이가 다시 감소하고 폭은 변화가 거의 없다.

Figure 5는 초점거리가 100mm에서 500mm까지 변화할 때 산소 체적분율이 5~5.5, 5.5~6, 6~6.5, 6.5~7인 경우의 산소분포길이를 나타낸다. 분율이 6.5~7인 경우 분포 길이가 거의 유사함을 보여주지만, 6~6.5의 경우는 100mm 일때 가장 큰 값을 나타내고 200mm일 때 줄어든 후 조금씩 증가되는 것을 알 수 있다. 분율이 5~5.5의 경우는 이러한 현상이 두드러져서 100mm일 때 매우 큰 값을 나타내고 200mm에서 크게 감소하여 300mm일 때 다시 증가한다.

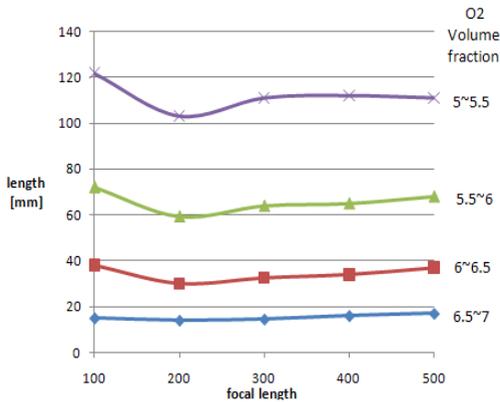


Figure 5: Length variation with focal length variation

Figure 6은 초점거리가 100mm에서 500mm까지 변화할 때 산소 체적분율이 5~5.5, 5.5~6, 6~6.5, 6.5~7 인 경우의 산소분포 폭을 나타낸다. 분율이 6.7~7인 경우는 100mm일 때 가장 값이 크고 200mm에서 300mm으로 가면서 감소하다 400mm에서 500mm으로 가면서 다시 증가되는 것을 알 수 있다. 분율이 6~6.5인 경우는 100mm에서 감소하여 200mm일 때 값이 가장 작아지다 300부터 서서히 증가하다 400mm과 500mm에서 일정해진다. 5.5~6인 경우는 100mm과 200mm은 일정하지만 300mm

으로 가면서 값이 가장 높아지며 400mm에서 500mm으로 가면서 감소한다. 5~5.5의 경우는 100mm일 때 값이 가장 작으며 200mm에서 300mm으로 가면서 서서히 증가하다 400mm에서 값이 큰 폭으로 높아 졌다가 500mm으로 가면서 다시 감소하는 것을 알 수 있다.

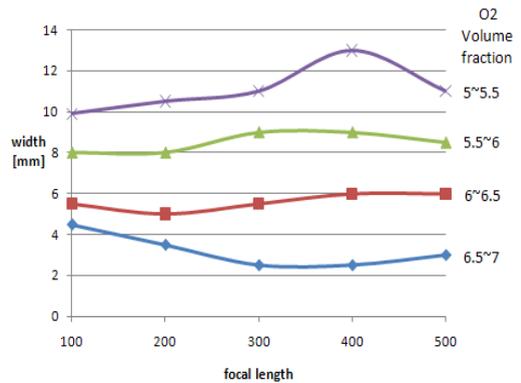


Figure 6: Width variation with focal length variation

이상의 분석 결과 유동혼합 특성은 초점 거리가 매우 가까운 100mm의 경우 산소와 메탄이 좁고 길게 혼합되며 300mm 이상의 경우 길이는 약간 줄어든 반면 폭 방향으로 넓게 확산됨을 알 수 있다.

3.2 연소해석

Figure 7은 전체 온도 분포의 변화를 초점 거리

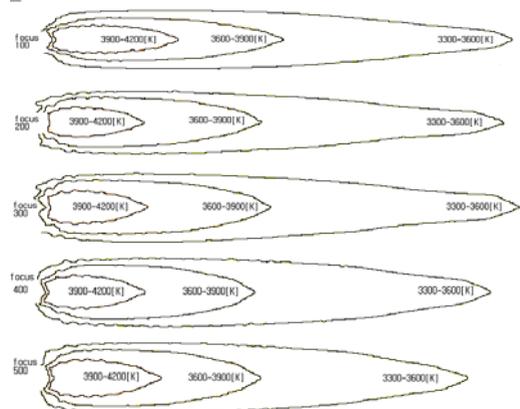


Figure 7: Total temperature in burner

100mm, 200mm, 300mm, 400mm, 500mm일 때 비교한 것이다. 초점 거리가 100mm일 때는 길이는 길고 폭이 좁아지며 200mm일 때는 길이는 변화가 없지만 폭이 넓어진다. 하지만 300mm일 때 길이와 폭이 가장 길고 넓다. 400mm일 때는 길이는 짧아지고 폭은 변화가 없으며 500mm가 되면서 길이가 가장 짧으며 폭의 변화는 없다.

Figure 8은 초점거리가 100mm에서 500mm까지 변화할 때 전체 온도 분포도가 3300~3600K, 3600~3900K, 3900~4200K 인 경우의 길이를 나타낸다. 온도가 높은 3900~4200K일 때는 100mm인 경우에 가장 길게 나타나며 200mm일때 감소하다 300mm에서 증가하며 400mm일 때 감소하고 500mm일 때 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 온도가 3600~3900K 구간과 3300~3600K인 구간은 비슷한 경향을 보이는데 100mm에서 200mm가 되면서 길이가 감소하다가 둘 다 300mm인 경우에 가장 높게 나타내며, 400mm, 500mm 구간은 감소함을 보여준다.

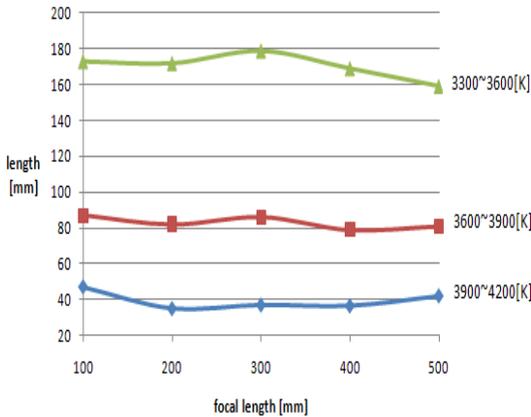


Figure 8: Length variation of temperature distribution

Figure 9는 초점거리가 100mm에서 500mm까지 변화할 때 전체 온도 분포도가 3300~3600K, 3600~3900K, 3900~4200K 인 경우의 폭을 나타낸다. 온도가 높은 3900~4200K인 경우는 100mm일 때 폭이 가장 좁으며 200mm, 300mm로 가면서 넓어지며, 400mm일 때 다시 좁아지다가 500mm일 때 가장 높게 나타난다. 하지만 3300~3600K, 3600~

3900K 구간은 비슷한 경향을 보여주는데, 초점거리가 100mm일 때 가장 폭이 좁으며 200mm로 가면서 점점 넓어지다 300mm일 때 폭이 가장 넓어지며 400mm일때 다시 폭이 좁아지다 500mm일 때 약간 넓어지는 경향을 볼 수 있다.

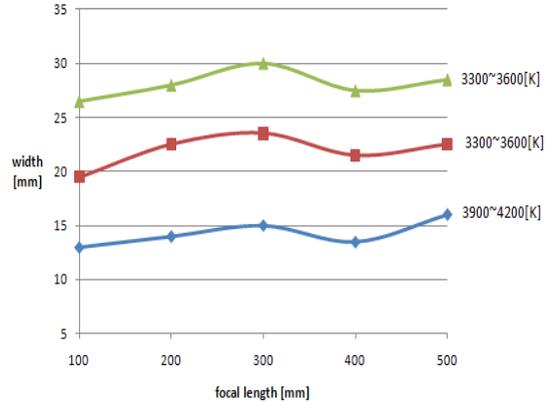


Figure 9: Width variation of temperature distribution

이상의 분석 결과 연소시 전체 온도 분포의 특성은 초점거리가 가까운 100mm일때 길이가 길며 폭이 좁은 화염이 생성됨을 알 수 있고, 초점거리가 300mm일 때 길이는 100mm일 때와 유사하였지만 폭 방향으로 넓은 화염이 생성됨을 알 수 있다. 300mm 이상이 되면 길이 방향과 폭 방향 모두 감소된다.

4. 결 론

일 초점 산소버너의 유동과 연소에 미치는 초점거리의 영향을 분석한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 유동혼합 특성은 초점 거리가 매우 가까운 100mm의 경우 산소와 메탄이 좁고 길게 혼합되며 300mm 이상의 경우 길이는 약간 줄어든 반면 폭 방향으로 넓게 확산된다.

2) 연소화염에서 온도 분포의 특성은 초점거리가 가까운 100mm일 때 길이가 길며 폭이 좁은 화염이 생성됨을 알 수 있고, 초점거리가 300mm일 때 길이는 100mm 일 때에 비해 약간 감소되지만 폭 방향으로 넓은 화염이 생성된다.

참고문헌

[1] K. Y. Ahn, D. K. Lee and J. H. Park, "Oxy-fuel combustion technology," News & Information for Chemical Engineers, vol. 27, no. 2, pp.155- 159, 2009.

[2] J. Ahn, H. J. Kim and K. S. Choi, "Combustion characteristics of oxy-fuel burners for CO₂ capturing boilers," Journal of Thermal Science and Technology, vol. 4, no. 3, pp. 408-413, 2009.

[3] J. I. Seo, Y. T. Guahk, S. H. Bae, J. G. Hong, U. D. Lee and H. D. Shin, "Experimental study on the oxygen combustion characteristics with CO₂ feeding," Journal of Korean Society of Combustion, vol. 10, pp. 26-34, 2005.

[4] H. K. Kim and Y. M. Kim, "Flame length characteristic for varying nozzle diameter to develop oxy-fuel combustor," Trans. of the KSME(B), vol. 29, no. 7, pp. 861-867, 2005.

[5] J. C. Sautet, T. Boushaki, L. Salentey and B. Labegorre, "Oxy-combustion properties of interacting seperated jets," Combustion Science and Technology , vol. 178, pp. 2075-2096, 2006.

[6] T. Boushaki, J. C. Sautet, L. Salentey, B. Labegorre, "The behavior of lifted oxy-fuels in burners with separated jets," International Communications in Heat and mass Transfer, vol. 34, pp. 8-18, 2007.

[7] H. J. Kim, W. Choi, S. H. Bae and H. D. Shin, "Characteristics of a multi-jet burner in oxy-liquefied petroleum gas (LPG) flames," Energy and Fuels, vol. 23, pp. 1456-1463, 2009.

[8] 노동순, 고창복, 이은경, "순산소 연소가열시스템 개발", 한국에너지기술연구원 보고서, 2008.

[9] 이승, 이병준, "상호작용하는 부상화염의 특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제 25권 제4호, pp. 461-466, 2001.

[10] 김태권, 김경호, 하지수, "충류제트 화염의 노즐직경에 따른 안정화 메커니즘과 화염형상에 관한 연구", 한국마린엔지니어링 학회지, 제35

권 제2호, pp. 204-215, 2011.

[11] 하지수, 김태권, "부상화염에서 노즐직경과 연료유량에 따른 화염전파속도와 체적연소반응속도의 변화 특성에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권 제2호, pp. 250-258, 2010.

저 자 소 개



박권하(朴權夏)

1995년 UMIST(맨체스터대학) 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1995 - 1998년 한국기계연구원 엔진환경연구부 선임연구원, 1998 - 현재 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부(교수), 관심분야: 내연기관



김주연(金周連)

2011년 한국해양대학교 기계정보공학부(공학사), 2011 - 현재 한국해양대학교 대학원 기계공학과 석사 과정, 관심분야: 내연기관