

생활폐기물 고품연료(RDF) 제조기술 경제성 평가

최연석*, 최항석, 김석준

An Economic Evaluation of MSW RDF Production Plant

Yeonseok Choi*, Hangseok Choi, Seockjoon Kim

Abstract

The waste treatment fee and energy production effect of Wonju city RDF plant, the first RDF manufacturing plant in Korea, were investigated in the study. All plant operation data, like total weight of received wastes, produced RDF and separated rejects in processes were fully recorded for mass balance calculation of the plant in 2009. Also all consumed oil and electricity were recorded for energy balance calculation. The results showed that the waste treatment fee not including the RDF sales price of 25,000 won/ton-RDF was 116,573 won/ton-MSW and it went down to 105,298 won when included the RDF price. Produced RDF was 40.2% of total received waste in weight. Three components analysis by mass balance calculation of total received waste showed that Wonju city's MSW was 32.4% of combustible, 37.5% of water and 30.1% of incombustible respectively. Energy effect was found that total amount of produced energy was about 4 times more than that of consumed energy.

Key words

MSW RDF(생활폐기물고형연료), RDF Yield(고형연료 생산수율), Input Energy(투입에너지), Output Energy(생산에너지), RDF Production Fee(고형연료 생산단가), Pelletizing Fee(성형 비용), Proximate Analysis(삼성분 분석)

(접수일 2011. 2. 1, 1차 수정일 2011. 2. 24, 게재확정일 2011. 2. 24)

* 한국기계연구원

■ E-mail : yschoi@kimm.re.kr ■ Tel : (042)868-7344 ■ Fax : (042)868-7284

1. 서론

지구 온난화방지를 위한 기후변화협약 준수 및 화석연료 가격상승 등에 대처하기 위해 세계적으로 다양한 종류의 신 재생에너지가 보급되고 있다. RDF(Refuse Derived Fuel; 폐기물고형연료)기술의 발상지인 유럽을 비롯해서 미국, 일본 등은 RDF를 포함한 각종 폐기물에너지의 보급에도 더욱 박차를 가하고 있다. 예를 들면, 유럽연합은 가연성 폐기물의 회수를 위하여 매립기준을 엄격하게 적용하는 유럽공동 폐기

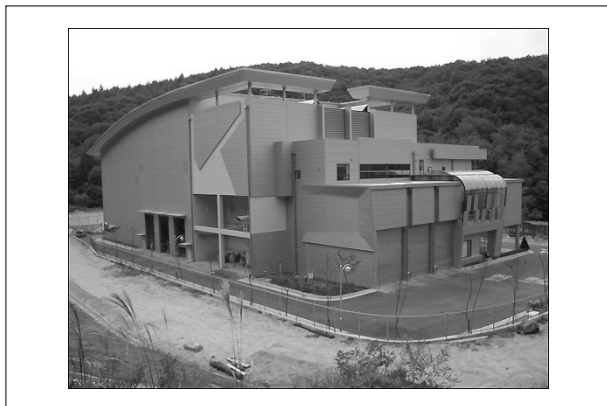
물매립 지침⁽¹⁾을 시행하고 있으며 RDF품질표준을 제정하는 작업이 진행되고 있다. 유럽의 여러 나라 사이에서 RDF가 연료제품으로 무역거래가 되고 있으며 이를 더욱 활성화하기 위하여 EU표준위원회에서 RDF품질규격 제정을 진행하고 있다^(2,3). 아울러 RDF의 종류와 사용방법에 따른 에너지회수효과, 지구온난화 억제효과 및 손익성 등을 평가하여 매립 및 소각방법과 비교하는 연구도 진행되었다⁽⁴⁾. 우리나라는 에너지자원의 대부분을 수입에 의존하고 있으며 에너지 다소비적인 산업 구조를 가진 나라이다. 이러한 현실을 감안하면 신재

생에너지의 개발은 국가 최대 현안과제의 하나이다. 우리나라의 대체에너지 비율은 2009년 현재 2.5%이며 그 중에서 74.9%를 폐기물에너지가 공급하고 있다⁽⁵⁾. 그리고 2030년 국가신재생에너지 목표는 11%로 설정되어 있으며 이를 달성하기 위해서는 폐기물에너지가 2015년에도 53.8% 보급을 담당해야한다⁽⁶⁾. 그러나 종량제의 정착과 폐기물 재활용인식의 확산으로 생활폐기물 발생량이 점차 감소하는 추세에 있다⁽⁷⁾. 이러한 추세를 감안할 때 앞으로 신재생에너지 목표를 달성하기 위해서는 폐기물 에너지를 최대한 활용할 수 있는 방법이 필요하다. 최근에 RDF기술이 새로운 폐기물에너지 이용 기술로서 주목받고 있으며, 국가 폐기물처리 중심기술로 대두되고 있다. 본 연구에서는 RDF기술의 경제적 타당성을 살펴보기 위해서 실제 상업운전중인 RDF플랜트의 1년간 운전 자료를 취합하였고, 자료 분석을 통해서 폐기물 성상, 에너지 소모율 등을 파악하였다.

2. 대상시설 및 분석방법

2.1 대상 시설

Picture 1은 본 연구를 수행한 국내 최초의 RDF제조플랜트인 원주시 생활폐기물연료화 시설의 모습이다. 이 플랜트는 시간당 생활폐기물을 5톤씩 처리하고 있으며, 운전 시간은 하루에 16시간 가동을 하고 있다. 2006년부터 가동하여 정상적으로 가동되고 있으며, 연탄재 배출장치 보강 등 현지 폐기물



Picture 1. Wonju RDF manufacturing plant.

특성에 맞춘 부분적 설비개선이 이루어져서 플랜트 성능이 향상되었다. 생산된 RDF는 현재 시멘트회사, 제지회사 및 원주시청사 냉난방보일러 등에서 전량을 사용하고 있다.

Fig. 1은 동 플랜트에서 제조된 펠릿형 RDF의 모습이며, 지름 15mm이고 길이는 약 50mm 내외이다.

Fig. 2는 이 플랜트의 공정을 나타낸 것으로서 크게 폐기물 반입공정 - 투입공정 - 조대파쇄공정 - 건조공정 - 불연물 선별공정 - 분쇄공정 - 소석회 첨가공정 - 성형공정 - 반출공정으로 구성되어 있다. 폐기물 반입트럭에서 저장병커에 투입된 종량제봉투 폐기물은 크레인으로 조대파쇄기에 투입되고 20cm 전후 크기로 파쇄된 후 정량공급기를 거쳐서 건조기로 투입된다. 함수율 10%이하로 건조된 폐기물은 풍력



Fig. 1. RDF manufactured in Wonju plant.

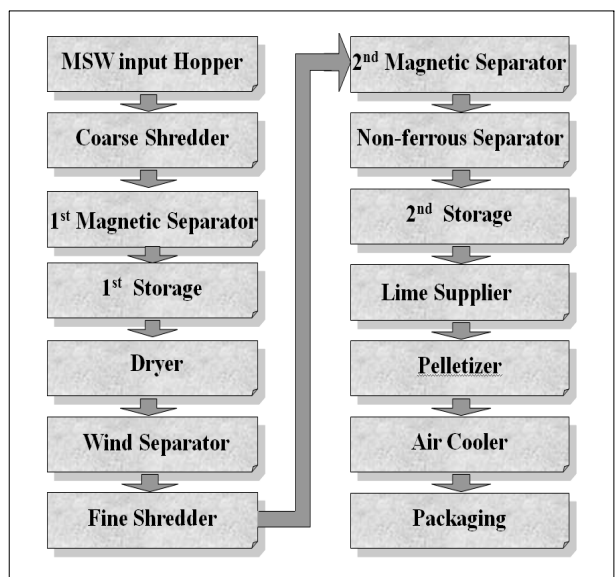


Fig. 2. Process of Wonju RDF manufacturing plant.

선별기로 이송되어 유리, 철 등의 불연물이 제거된 후 분쇄기로 이송되어 분쇄된다. 분쇄물은 자력선별 및 비철금속선별을 거친 후 1~2% 소석회가 첨가되고 성형기에서 펠릿형으로 성형된다. 펠릿RDF는 냉각기에서 냉각된 후 반출사일로를 거쳐서 계량 후 포장되어 반출된다.

2.2 분석 방법

첫째, RDF제조공정에서 폐기물의 물질수지 분석을 위하여 상기 RDF플랜트에 설치되어 있는 폐기물반입트럭 무게측정용 저울의 기록값과 반출되는 RDF무게 측정용 저울의 기록 및 선별공정에서 제거된 불연물의 무게 측정기록값을 이용하였다. 우선, 폐기물 무게 총량은 플랜트 입구에 설치된 트럭저울에서 폐기물을 반입하는 모든 트럭의 무게를 측정 후 트럭자체 무게를 빼는 방법으로 반입폐기물 무게를 구하며, 이 작업은 전체 반입트럭에 대해서 자동으로 수행된다. 다음으로, 생산된 RDF무게도 플랜트 반출부에 설치된 RDF포장용 저울에서 전량이 자동으로 측정된다. 마지막으로, 불연물 무게도 각 선별공정에서 제거된 불연물을 수거하여 인근의 매립장으로 반출할 때 트럭저울에서 무게를 전량 측정한다.

둘째, RDF제조공정 소요에너지 측정은 재생유와 전기 사용량 기록을 이용하였다. 재생유는 경유와 비슷한 성상을 가진 액체연료로서 건조공정과 건조배가스 탈취용 열분해로에서 사용된다. 그리고 전기에너지는 기계장치와 사무실을 포함한 플랜트 전체의 전기사용량이며, 공정용인 고압전기와 일반용인 저압전기로 나뉘어서 적산된다.

3. 분석결과 및 고찰

3.1 RDF제조공정 물질수지 분석

Table 1은 2009년 일년 동안의 동 플랜트 월별 운전실적을 나타낸 것으로서, 투입한 생활폐기물의 총량과 최종 생산된 RDF의 총량 및 RDF제조공정에서 선별된 깡통이나 유리 등 불연물의 총량이 나타나 있다. 표에 나타난 값을 분석해보면 RDF수율은 약 40.2%로 나타났으며, 불연물은 약 23.5%

로 나타났다. Table 1에 나타난 자료는 생활폐기물의 정확한 함수율을 산출하는데 매우 유용하게 이용할 수 있다. 즉, 투입된 폐기물 총량에서 생산된 RDF총량과 불연물 총량을 빼면 제거된 수분 량이 산출된다. 이것은 트럭으로 반입되는 폐기물 전량에 대한 측정값이므로 보통 폐기물성상 분석방법인 원추사분법에 의한 샘플조사보다 훨씬 많은 량에 대한 측정

Table 1. Operation data in Wonju RDF plant

month	MSW input (ton)	RDF output (ton)	non-combustible (ton)
1	1,219,750	529,48	361,64
2	1,378,860	554,88	400,40
3	1,547,280	618,71	433,25
4	1,545,940	671,40	389,85
5	1,635,410	654,15	352,35
6	1,568,380	627,54	313,29
7	1,742,550	697,03	293,66
8	1,202,870	479,57	260,51
9	1,588,670	635,48	386,92
10	1,155,920	462,38	280,15
11	1,251,150	500,39	318,02
12	1,667,520	667,12	330,19
total	17,504,30	7,044,13	4,120,23
	100%	40,2%	23,5%

Table 2. Mass balance analysis of Wonju city's MSW

month	water content (%)	non-combustible content (including ash) (%)	combustible content (%)
1	26,94	36,2	36,9
2	30,72	35,1	34,2
3	32,01	34,0	34,0
4	34,85	31,2	33,9
5	38,46	27,5	34,0
6	40,01	26,0	34,0
7	43,15	22,9	34,0
8	38,47	27,6	33,9
9	35,65	30,4	34,0
10	35,77	30,2	34,0
11	34,59	31,4	34,0
12	40,19	25,8	34,0
Avg.	35,9	29,9	34,2

분석자료이고 따라서 매우 정확한 자료가 된다. 여기서 폐기물의 함수율을 더욱 정확하게 구하려면 RDF속의 함수율도 고려해야 되지만 원주플랜트에서 생산한 RDF의 수분이 Table 8에 나타난 바와 같이 4% 정도로 매우 적기 때문에 무시하였다. 이렇게 산출된 수분을 Table 2의 첫 번째 열에 나타내었다. 다음으로 불연물 총량은 Table 1의 불연물량과 생산된 RDF중의 회분량을 합한 후 투입폐기물량으로 나누어서 구하였다. RDF중의 회분량은 Table 8의 RDF회분율을 적용하였다. Table 2의 결과를 보면 생활폐기물의 평균 수분은 35.9%, 불연물은 29.9% 및 가연분은 34.2%로 나타났다. 그리고 여름철인 7월의 수분은 평균 43.1%로 매우 높으므로 RDF제조공정에 반드시 건조가 필요한 것으로 파악되었다. 참고로 2007년도 국내 대도시에 설치된 35개소 대형소각로에서 매월 1회씩 삼성분을 측정하여 환경부에 보고한 자료에 나타난 연평균 수분은 35.3%로서 원주시 폐기물의 수분과 비슷한 값을 보였으며, 다수의 경우는 여름철 수분이 40% 이상을 보였다⁽⁸⁾.

Fig. 3은 Table 2를 도식화한 것으로서 수분이 6~8월까지 높은 편인데 이것은 장마와 여름철 고함수 과일류의 영향으로 판단되며, 12월은 눈에 의해서 수분이 높은 것으로 판단된다.

3.2 RDF제조공정 에너지 분석

Table 3은 원주시 RDF플랜트에서 플랜트 운전시 사용한 건조용 연료 소요량과 플랜트 전체의 전기 사용량을 월별로

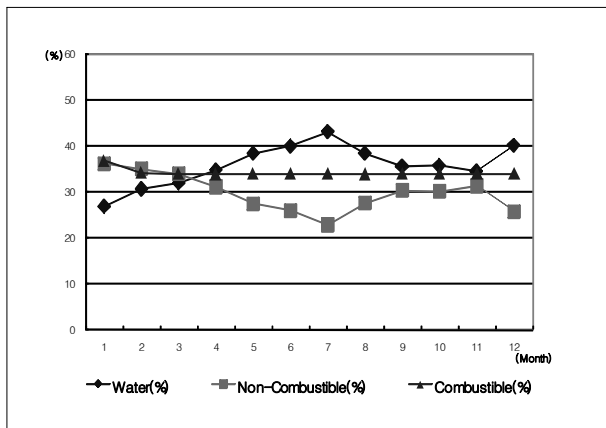


Fig. 3. Monthly trend of water, non-combustible (including Ash) and combustible contents in Wonju city's MSW.

나타낸 것이고, Table 4는 폐기물 1톤당 재생유 및 전기 소모량을 산출하고 에너지량으로 환산한 값을 정리한 것이다. 재생유 발열량은 1 리터당 10,000kcal를 적용하였고, 전기는 1kWh=860kcal에 발전효율 30%를 적용하여 계산한 결과는 폐기물 1톤당 총 소요에너지는 699,105kcal으로 파악되었다. Table 5는 연간 총 에너지소요량과 생산된 RDF가 보유하는 총 에너지량을 나타낸 것으로서 RDF생산에 사용된 에너지보다 2.8배의 에너지를 생산할 수 있는 것으로 나타났다. RDF 발열량은 최 등⁽⁹⁾ 이 분석한 값의 평균인 4,500kcal/kg을 적

Table 3. Energy consumption in Wonju RDF plant

month	Oil consumption (liter)	electric consume	
		high volt. ¹⁾ (kWh)	low volt. ²⁾ (kWh)
1	38,288	203,088	231
2	40,685	201,811	285
3	49,641	215,884	176
4	50,669	211,248	111
5	56,416	203,510	82
6	52,021	179,376	94
7	67,082	218,151	111
8	49,972	199,123	118
9	59,105	212,380	163
10	43,455	172,820	225
11	47,088	194,861	181
12	41,846	221,031	337
total	596,268	2,433,283	2,114

1) high voltage : for equipment
2) low voltage : for officer

Table 4. RDF production energy per 1 ton MSW

Oil	(Liter/ton-MSW)	33.8
	(kcal/ton-MSW)	303,832
Electricity	(kWh/ton-MSW)	138
	(kcal/ton-MSW)	395,273*
Total	(kcal/ton-MSW)	699,105

* Power generation efficiency of RDF was considered as 30%

Table 5. Energy benefit of RDF production

output energy (kcal)	34,536,237,000
input energy (kcal)	12,347,883,400
output/input ratio	2.8 (4.6)*

* Power generation efficiency was not considered.

Table 6. Energy cost in Wonju RDF plant

Item	Cost (won/year)	Cost (won/ton-MSW)
Oil	515,535,313	29,452
High Volt Electricity	249,604,350	14,260
Low Volt Electricity	1,248,510	74
Total	587,168,170	43,785

Table 7. Pelletizing cost in RDF production

Item	Electricity	unit
(1) pelletizing process	26.2	kWh/ton-MSW
(2) Total process	138.0	kWh/ton-MSW
(1)÷(2)	19	%
(3) Pelletizing Cost	2,723	Won/ton-MSW
(4) Total Cost	105,298	Won/ton-MSW
(3)÷(4)	2.36	%

용하였다.

Table 6은 원주 RDF플랜트에서 2009년도에 지출한 연료비 및 전기료를 나타낸 것으로서, 생활폐기물 1톤당 43,785원의 에너지 비용이 지출된 것으로 나타났다.

RDF플랜트 전체 운영비는 Table 6의 에너지 비용과 인건비를 합한 값으로서 생활폐기물 1톤당 약 10만원 정도가 소요되는 것으로 나타났다. 이 비용은 폐열을 이용하지 못하는 중소지자체 소각로 운영비의 약 2/3정도로써 매우 경제적이다. 현재 생산된 RDF는 25,000원/톤 판매를 하고 있으므로 판매이익을 감안하면 운영비는 약 9만원정도가 된다. 성형RDF는 장기간 보관성과 사용성이 우수하고 품질도 안정적이므로 수요처가 증가하고 있으므로 RDF판매가격이 인상될 것이고 따라서 향후 RDF 경제성은 더욱 좋아질 것으로 판단된다.

Table 7은 RDF를 펠릿모양으로 성형하는 공정에 필요한 전기에너지를 나타낸 것으로서 총 전기소모량의 19%를 차지하며, 이것은 전체 플랜트 소요에너지의 5.4%에 해당한다. 성형공정에 필요한 비용은 폐기물 1톤당 2,723원 정도로 부담이 적은 것으로 나타났다.

3.3 RDF물성 분석

원주시 RDF에 대한 삼성분 및 공업분석을 실시하였다. Table 8은 계절별 RDF특성을 분석하여 정리한 것이다. 염소

Table 8. Properties of Won-Ju city's RDF

	LHV (kcal/kg, D.B.)	chlorine (wt.%)	water (%)	Ash (%)
spring	4,460	1.48	3.9	18.9
summer	4,542	1.42	3.5	16.0
Fall	5,078	1.1	4.7	14.7
Winter	5,068	1.15	3.4	16.0

는 1.1~1.5% 정도로 나타났고, 저위발열량은 4,460~5,080 kcal/kg 정도로서 봄/여름이 가을/겨울보다 낮게 나타났다. 수분은 4% 정도로 나타났는데 건조 후에 수분은 약 10%이지만 풍력선별공정에서 강한 공기유동과 성형공정에서의 마찰열에 의해서 수분이 추가로 증발되었기 때문이다. 회분은 15~19%정도로 높게 나타났다.

3.4 RDF제조공정 개선 효과

RDF제조공정은 전반적으로 큰 문제가 없이 잘 운전되고 있는 것으로 나타났다. 2008년에는 회분 함량이 20~25% 범위로 기준을 초과하는 경우도 다수 있었는데⁽¹⁰⁾, 2009년은 5%정도 감소한 것으로 나타났다. 이것은 겨울철에 혼입되는 연탄재를 제거하기 위해서 건조물 배출스크류 및 분쇄기 후단 배출부에 설치한 철망식 토사 배출장치의 효과 때문으로 나타났다. 향 후 타 지자체에서 RDF제조시설을 검토하는 경우에 연탄재에 대한 대비를 반드시 해야 할 필요가 있다. 그리고 분쇄물 이송덕트의 곡간부분에 마모가 심하게 발생하는데 향 후에는 직관으로 설계할 필요가 있다.

4. 결론

국내 최초의 상용RDF제조시설인 원주시 생활폐기물연료화 시설에서 2009년 일년간 플랜트 운영자료를 수집하여 분석하였다. 운영자료는 투입 폐기량, RDF생산량, 불연물 선별량 등의 물질수지 자료와 건조 및 탈취용 연료 사용량, 전기사용량을 수집하였다. 수집 자료를 이용해서 반입되는 폐기물 전량에 관한 물질수지분석을 하였으며, 사용된 연료 및 전기량을 에너지로 환산한 후 투입된 에너지와 생산된 에너지량을 비교하였다. 아울러 생산된 RDF의 특성을 분석하였

다. 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. RDF플랜트에서 투입된 폐기물량, 생산된 RDF량, 불연물 선별량 및 RDF자체의 회분 자료를 활용하여 물질수지를 분석하면 투입된 폐기물 전량에 관한 측정자료이므로 일반적 방법인 샘플채취 방법보다 훨씬 정확도가 높은 수분 및 가연분 함량을 구할 수 있다.
2. 원주시 생활폐기물의 분석결과는 가연분 34.2%, 수분 35.9% 및 회분을 포함한 불연물 총량은 29.9%로 나타났으며, 여름철은 수분이 43% 정도로 높아서 건조공정이 필수적이 었다.
3. 생산된 RDF는 평균발열량이 약 4,780kcal/kg이었고 연 중 발열량 편차는 약 ±6% 정도였으며, 수분은 4%로 매우 적었다. 회분은 15~19% 범위였고, 염소는 1.1~1.5% 정도 로 함유되어 있었다.
4. RDF제조과정에서 사용되는 총 에너지는 연료 및 전기를 합해서 생활폐기물 1톤당 699,105kcal 정도가 사용되었고, 생산된 에너지는 사용된 에너지 량의 2.8배로 나타났다.
5. RDF를 생산하는데 드는 에너지비용은 연료비 및 전기료 를 합해서 생활폐기물 1톤당 약 43,785원으로 나타났고, 인건비 등을 합한 전체 운영비는 폐기물 1톤당 약 10만원이 었으며, RDF판매비용을 고려하면 약 9만원으로 나타났다.
6. 성형공정에 드는 전기에너지는 플랜트 전체 전기사용량 의 약 19%이며, 비용으로는 생활폐기물 1톤당 2,723원이 소요되는 것으로 나타났고 이것은 전체 운영비의 2.38% 정도를 차지하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 신재생에너지기술개발사 업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] J. Fischer, "The Directive on the Landfill of Waste(99/31/EC)", The Council of the European Union Report, pp. 5-6, 1991.
- [2] European Committee for Standardization, "Solid Recovered Fuels", CEN/TR (Technical Report) 14745, pp. 55-62, 2003.
- [3] European Committee for Standardization, "Solid recovered fuels-Specification and classes", prCEN/TS 15359 final draft, pp. 12-14, 2005.
- [4] Kronnberger R., "Waste to Recovered Fuel Cost-Benefit Analysis", GUA, pp. 38-58, 2001.
- [5] 에너지관리공단 신재생에너지센터, 2009년 신재생에너지보 급통계, pp. 3-9, 2010.
- [6] 지식경제부, 제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본 계획, pp. 10-14, 2008.
- [7] 환경부, 환경백서, 2006, pp. 643-647, 2006.
- [8] 환경부, '07년도 생활폐기물 자원회수시설 운영현황(EXEL 파일), 전국 생활폐기물 자원회수시설 운영협의회, 2008.
- [9] 최연석, 김병길, 노남선, 2009, "실증규모 체인스토커 RDF전 용보일러 개발", 한국신재생에너지학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 813-816, 2009.
- [10] 최연석, 최항석, 김석준, 정두수, 구자공, 2009, "생활폐기물 고형연료(RDF) 제조플랜트 운전실적 분석", 한국폐기물학회 지 26권 6호, pp. 548-553, 2009.

최연석



1984년 부산대학교 화학기계공학과 공학사
1992년 부산대학교 화학공학과 공학석사
2002년 부산대학교 화학공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부 책임연구원
(E-mail : yschoi@kimm.re.kr)

최항석



1994년 연세대학교 기계공학과 공학사
1997년 포항공과대학교 기계공학과 공학석사
2004년 Kyoto대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부 선임연구원
(E-mail : hschoi@kimm.re.kr)

김석준



1976년 서울대학교 기계공학과 공학사
1985년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사
1993년 한국과학기술원 기계공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부 책임연구원
(E-mail : sjkim@kimm.re.kr)