

반응표면분석법을 이용한 제진기의 목메임 방지 개선 및 레이크 최적화

선상원¹, 이원^{1*}, 홍석범²
¹송실대학교 기계공학과, ²하나산업

A Study on the Optimization of Anti-Jamming Trash Screen with Rake using by Response Surface Method

Sang-Won Seon¹, Won Yi^{1*}, Seok-Beom Hong²
¹Mechanical Engineering, Soongsil University, ²HANA Industry

요약 제진기는 배수펌프장, 하수처리장, 발전소 등 유입 수로 전단에 설치되어 부유 협잡물의 유입을 차단하는 장치이다. 제진기의 스크린 사이의 협잡물이 끼는 목메임 현상과 노끈류가 제거되지 못하여 물의 유입로의 감소 또는 제진기 파손을 유발하는 문제점이 발생하고 있다. 본 논문에서는 목메임과 노끈류 끼임으로 인한 파손이 주로 발생하는 에이프런을 제거하고 스크린을 확장하여 대체하였다. 그리고 스크린 사이 공간에 내측 레이크를 추가하여 목메임과 노끈류를 제거하도록 개선하는 확장형 레이크를 사용하는 방식으로 설계하였다. 기존의 제진기 레이크의 허용응력을 만족하는 내측 레이크를 설계하기 위하여 레이크 수직 길이와 보강단면의 두께 값을 변수로 하여 실험계획법에 따라 실험점을 결정하고, 구조해석 툴인 ANSYS static structural module과 통계분석 툴인 R software를 이용하여 반응표면분석법에 따른 형상 최적화를 진행하였다. 결정된 최적 설계점 레이크 길이 210.2mm와 보강단면 두께 2mm에서 반응표면분석법 결과와 구조해석의 결과의 상대 오차는 1.63% 이다. 파일럿 제진기를 실제 크기로 제작하여 실증 실험을 수행하였으며 97%이상 목메임과 노끈류를 제거가 가능함을 확인하였다.

Abstract A trash screen is installed in front of the inflow channel of a drainage pumping station, sewage treatment plant, and a power plant to block floating contaminants. The bottleneck phenomenon, which decreases the water inflow, causes damage to the damper as a result of clogging in between the screen if string type obstacles are not removed. In this paper, the apron was removed, and the screen was expanded, to prevent breakage of the bottleneck phenomenon and string type obstacles. This was designed using an extended rake by adding an inner rake in between the screen interspace to remove the bottleneck phenomenon and string type obstacles. To design the inner rake that satisfies the allowable stresses of the existing damper rake, the experiment points were determined according to the experimental design method using the inner rake vertical length and the thickness of the reinforced section as parameters. The use of the ANSYS static structural module and statistical analysis tool R software gives the optimized shape according to the response surface method. The relative error between the response surface analysis results and the simulation results was 1.63% of the determined optimal design-point rake length of 210.2 mm and the reinforcement section thickness of 2 mm. Through empirical experiments, a test rake was constructed to the actual size, and approximately 97% of the bottleneck phenomenon and string type obstacles could be removed.

Keywords : Trash Screen, Inner Rake, Structure Analysis, Anti-Jamming, Response Surface Method

*Corresponding Author : Won Yi(Soongsil Univ.)

email: yiwon@ssu.ac.kr

Received February 3, 2020

Accepted March 6, 2020

Revised February 25, 2020

Published March 31, 2020

1. 서론

산업폐기물 및 생활 쓰레기 등의 협잡물은 국지성 호우 및 게릴라성 폭우 발생 초기에 집중적으로 배수 처리장으로 유입된다. 협잡물이 배수펌프의 임펠러에 유입되는 경우 펌프의 고장 또는 파손을 유발하여 정상적인 배수가 불가능 하게 되어 주변 저지대 침수 등의 피해를 초래할 수 있다[1].

이를 예방하기 위해 사용되는 제진기는 수로 전단에 설치되어 협잡물을 제거하는 장치로 Fig. 1과 같고 프레임, 스크린, 에이프린, 레이크 및 체인 구동장치 등으로 구성되어 있다. 스크린은 수류에 의해 떠내려 오는 협잡물을 펌프로 유입되지 않도록 막아주며 이렇게 포집된 협잡물을 레이크를 통해 상단으로 인양하여 제거하는 장치이다.



Fig. 1. Trash screen

현재 사용 중인 대부분의 제진기는 원가 절감을 목적으로 수면 위에서 메인 스크린이 끝나며 에이프린으로 변경되는 방식을 이용하고 있다. 그러나 이러한 방식은 Fig. 2와 같이 목메임(스크린 사이에 협잡물이 끼는 현상)과 노끈류로 인하여 수평으로 배치된 레이크가 손상되는 근본적인 문제점이 있다[2-4].

이러한 문제를 해결하고자 스크린 전단에 환봉형 가이드 추가하는 방식은 스크린과 협잡물의 접촉 면적이 줄어들어 목메임이 감소하나 비용, 강도 및 간섭 등의 문제로 효율적이지 못한 실정이다. 문제점을 해결하는 한 가지 방법으로 스크린 사이까지 확장된 내측 레이크 방법이 있지만, 내측 레이크와 에이프린과의 간섭으로 인한

제약으로 개선에 대한 연구가 수행되지 않았으며 또한 내측 레이크의 방식 및 구조에 대한 최적화 및 안정성에 대한 연구가 수행되지 않았다.



Fig. 2. Failure rake caused by jamming

본 연구에서는 반응표면법을 이용하여 구조적 안정성이 확보된 레이크의 최적 형상을 도출하였으며 실증 실험을 통하여 레이크의 목메임 제거가 가능함을 확인하였다.

2. 제진기 형상 변경 및 구조해석

2.1 내측 레이크 설계 및 주스크린 확장

기존 제진기의 구조에서는 에이프린과 레이크의 유격으로 Fig. 3 과 같이 수플류 등의 접착력이 강한 협잡물이 인양 중에 레이크에서 낙하되어 에이프린에 부착되고 있다. 부착된 협잡물은 미관 및 악취 등의 문제가 빈번히 발생하여 제진기 작동 종료 후 추가 작업으로 제거하고 있는 실정이다. 또한 기존 제진기의 스크린과 에이프린 구조는 노끈류에 의한 파손과 Fig. 4와 같이 목메임이 발생한 협잡물을 레이크에 의해 상단으로 이송 시 에이프린과의 접촉으로 파손 발생이 우려된다.

이를 해결하고자 에이프린을 제거하고 Fig. 5와 같이 스크린을 확장한 구조로 변경하여 에이프린과 레이크의 간섭을 차단하였다. 추가된 스크린 사이의 공간을 내측 방향으로 레이크를 확장하였으며 확장된 내측 레이크를 이용하여 목메임 방지와 노끈류를 제거하는 방식이다.

이로 인하여 확장형 스크린 방식은 레이크 및 스크린 등의 변형 및 파손을 방지할 수 있으며, 내측 레이크를 이용하여 협잡물로 인한 목메임 방지 및 노끈류의 제거가 가능하며, 후단부에서 잔여물 제거부로 제거하는 방식이다. 레이크 자체의 파손을 예방할 수 있고 수로 막힘을 방지하여 배수성능 저하가 발생하지 않는 구조로 변경하였다.



Fig. 3. Attached narrow trash on the trash screen

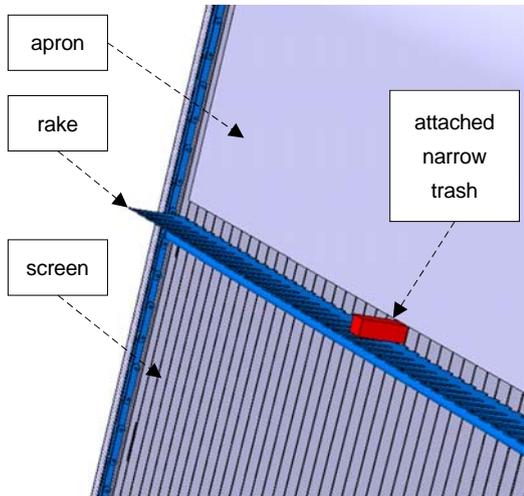


Fig. 4. Causes of failure in bottleneck phenomenon

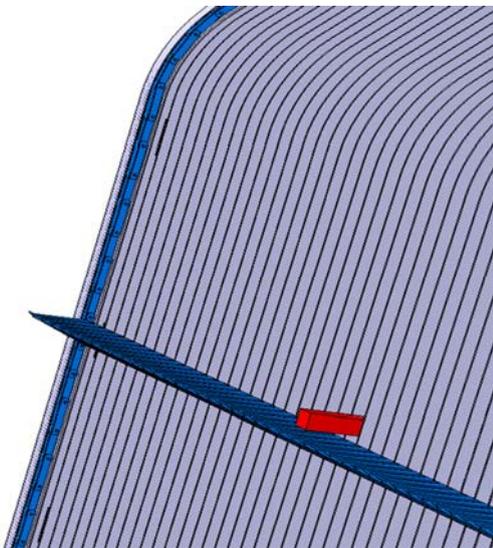


Fig. 5. Modified shape of extended screen

농림축산식품부 국가건설기준 『양배수장 부대설비 설계』에 따르면 스크린의 목폭은 펌프구경의 1/10 ~ 1/30으로 설계하는 것이 표준이다[5]. 스크린 목폭 이하의 협잡물은 유수와 함께 펌프로 이송되며 목폭 크기 이상의 협잡물은 외측 레이크와 확장된 내측 레이크를 이용하여 탈락을 방지하며 잔여물 제거부로 이송한다.

2.2 레이크의 경계조건

상용 프로그램인 ANSYS 구조해석 프로그램을 이용하여 형상 변경된 레이크에 대한 구조해석을 수행하였다. 폭 2000 mm 제진기 레이크와 동일하게 복수의 레이크가 붙어있는 구조로 모델링 하였으며 좌우측 끝단에 볼트로 고정되는 구조로 Fig. 6과 같다.

외측 레이크의 길이는 범용적으로 사용되는 300 mm를 사용하였으며 재질은 수중에서 부식 방지 목적으로 Stainless steel 304를 사용하였으며 물성치는 Table 1과 같다.

무게가 많이 나가는 협잡물을 인양하는 외측 레이크에 Fig. 7과 같이 하중과 -y축 방향의 자중을 적용하였다. 이후 레이크의 수직 길이와 레이크 보강단면의 두께를 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 독립변수로 설정하였으며 종속변수의 결과 값은 Von Mises stress로 설정하였다. 제진기는 폭 2m 로 최대 200 kg_f 이상의 중량물이 인양이 가능하도록 요구되고 있으며[6], 2개의 레이크로 구성된다. 제진기 레이크 한 개가 자중을 제외하고, 100 kg_f의 중량이 걸려도 파손이 일어나지 않도록 외측 레이크에 1,000 N의 부하를 경계조건으로 적용하였다.

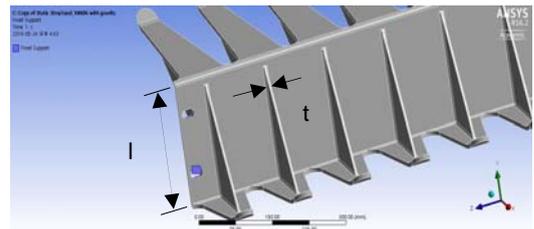


Fig. 6. Fixed position of the rake

Table 1. Stainless steel 304 mechanical properties

Property	Value	Unit
Density	8,000	kg/m ³
Young's Modulus	200	GPa
Poisson's Ratio	0.29	-
Shear Modulus	86	GPa
Yield Strength	215	MPa
Ultimate Strength	505	MPa

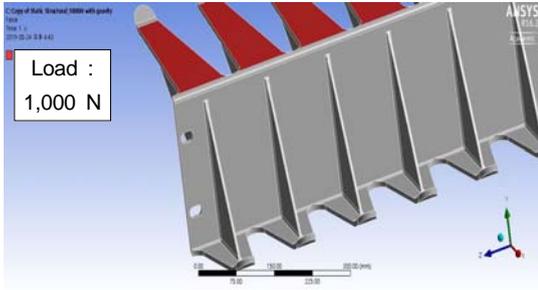


Fig. 7. Load condition of the rake

3. 레이크 형상 최적화

3.1 실험계획법(Design of experiment, DOE)

본 연구에서는 설계변수에 따른 실험 및 시뮬레이션에서 주로 사용되고 있는 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 사용하여 설계점을 구성하고, 반응표면 분석법을 통해 분석을 하였다. 이 기법은 최소의 시뮬레이션 결과로부터 최적화 수행이 가능한 장점이 있다 [7-8]. 실험점 추출(sampling)식은 다음과 같다.

$$p = 2^k + 2k + n \quad (1)$$

여기서, p 는 실험점의 개수, k 는 설계변수(독립변수)의 수, n 은 중심점의 실험회수이다. 사용된 설계변수는 하중을 받는 레이크의 수직 길이와 레이크 보강단면의 두께로 $k=2$ 이다. 중심점의 실험회수는 3으로 결정하였으며, 이로부터 Table 2와 같이 총 11개의 실험점을 결정하였다.

Table 2. Parameters of DOE

case	x1(mm, length)	x2(mm, thickness)	y(MPa)
1	100	2	318.8
2	100	6	315.6
3	150	1.17	252.6
4	200	2	223.3
5	200	6	232.1
6	150	4	260.3
7	150	4	260.3
8	150	4	260.3
9	220.7	4	216.3
10	79.3	4	356.3
11	150	6.83	266.7

3.2 반응표면분석법(Response Surface Method)

반응표면분석법은 중심합성계획법을 통해 결정된 실험점들을 기준으로 회귀모형을 통해 결과를 추정하는 기법이다[9]. 반응표면의 회귀식은 일반적으로 다항식의 형태로 구성되며, 본 연구에서 회귀식은 2차 다항식의 형태로 다음과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1x_2 + \beta_4x_1^2 + \beta_5x_2^2 \quad (2)$$

여기서 y 는 반응표면 함수, x_1, x_2 는 설계변수, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 는 회귀계수들이다. 반응표면 회귀분석을 위해서는 통계 분석 툴인 R Studio를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 반응표면 분석법 및 구조해석 결과

기존 에이프런 제진기에서 확장형 제진기로 교체된 부분인 제진기 레이크에 대한 구조해석을 수행하였고 제진기 레이크의 반응표면분석법을 통한 결과이원분산분석표는 Table 3과 같다. 교호작용의 분석 값 P value의 경우 0.1743으로 유의수준 0.05보다 크기 때문에, 레이크의 두께와 길이의 두 변수 사이의 교호작용에 의한 효과는 없다고 판단된다.

Table 3. ANOVA for response of equivalent stress

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value
Linear	2	17846	8923	6.25E+02	1.0E-06
Interaction	1	35.7	35.7	2.50E+00	0.17438
Square	2	1049	524.8	3.68E+01	0.00102
Residuals	5	71.3	14.3		
Lack of fit	3	71.3	23.8	1.13E+14	8.8E-15
Pure error	2	0	0		

Fig. 8에서 Equivalent stress 결과 값들은 레이크의 보강단면의 두께는 얇아질수록 그리고 레이크의 수직 길이가 길어질수록 Equivalent stress가 낮아지는 것으로 나타났다. 레이크의 보강단면의 두께증가는 자중의 증가로 이어져 Fig. 9의 최대 응력이 발생하는 레이크의 연결부의 응력이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 10에 실선 영역 내부가 초기 설계 영역이었으나, 항복응력 범위를 만족시키면서 최소 부피를 가지는 설계점을 결정하였다.

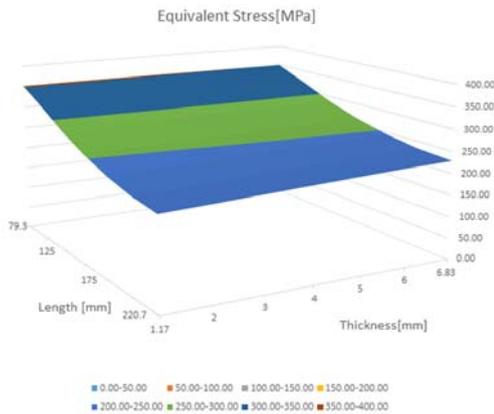


Fig. 8. Response surface of equivalent stress

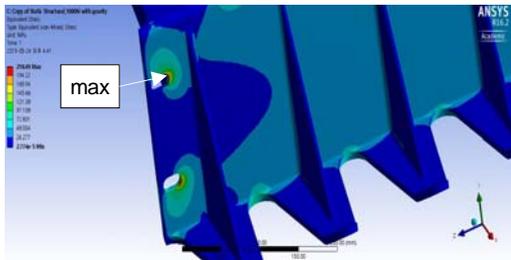


Fig. 9. Equivalent stress of static structural analysis

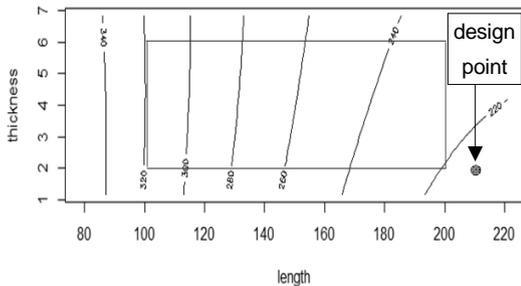


Fig. 10. Equivalent stress contour of length vs thickness

Table 4. Comparison results between RSM and Static structural analysis

Optimal model	x1 (mm)	x2 (mm)	y (MPa)	relative error(y)
RSM	210.2	2	215	1.63%
Static structural analysis	210.2	2	218.5	

레이크의 보강단면의 두께는 범위를 확장하여 수직 길이 210.2 mm, 보강단면의 두께 2 mm로 결정하였고,

Fig. 9의 수치해석에 나타난 것과 같이 존 제진기에서 변경된 확장형 레이크 구조의 최대 하중 조건에서 안정성을 확인하였다.

결정된 최적 설계점의 구조해석 결과와 반응표면분석법으로 구해진 결과이미 최소 두께이므로 레이크의 수직 길이를 설계는 Table 4와 같고, 두 방법 간의 상대 오차는 1.63% 이다.

4.2 목메임 제거 및 구조 안정성 시험

해석결과에 따라 제작된 레이크와 형상 변경된 제진기의 목메임 방지 및 노끈류 제거를 검증하기 위하여 Fig. 11과 같이 폭 7.4 m에 높이 6.6 m 크기로 시제품 제진기를 제작하였다. Fig. 12과 같이 내측 레이크가 연장되어 스크린 사이를 간섭 없이 목메임 방지와 노끈류 제거가 원활하도록 하였다.



Fig. 11. Prototype of trash screen (W 7.4m x H 6.6)



Fig. 12. Extended rake using the inner rake

목메임 및 노끈류 제거 실험은 Fig. 12의 노끈류와 같이 실제 발생하는 목메임 현상과 유사한 환경을 조성하여 실험을 준비하였으며 실험 방법은 스크린 사이에 비닐류, 스티로폼 및 목재류 등을 억지로 끼여 목메임 현상을 재연하고 또한 노끈류는 스크린 사이를 감는 방식으

로 기존 제진기로는 제거할 수 없는 조건으로 준비하였다.

총 20 개의 노끈류와 목메임이 발생한 협잡물을 3분 가동 후 제거되는 효율을 측정하였으며 총 5회 반복하여 97% 제거됨을 확인하였다. 목재류 등의 협잡물이 끼여도 제진기 보강대를 이용하여 이송 또는 파쇄 하여 잔여물 제거 컨베이어로 이송됨을 확인하였으며 레이크의 소성 변형이 없음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 제진기에서 발생하는 목메임을 방지하고 노끈류를 제거하기 위한 제진기 형상 변경 및 구조해석을 통한 레이크의 최적화를 수행하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 제진기의 목메임 방지 및 노끈류 제거하기 위하여 스크린 외측 부분의 협잡물을 제거하도록 설계된 레이크를 스크린 내부의 협잡물도 제거가 가능하도록 확장된 내측 레이크를 설계하였다.
- 2) 설계된 내측 레이크의 구조적 안정성을 확보하기 위하여 기본 레이크에 대하여 자중과 부하를 고려하여 구조해석을 수행하였다.
- 3) 내측 레이크의 수직 길이와 보강단면의 두께를 설계 변수로 하여 중심합성계획법을 통해 예측된 설계점들에 대한 구조해석을 수행한 후, 반응표면분석법을 통해 허용 항복응력을 만족하는 최소 부피 설계 값 수직 길이 210.2 mm, 보강단면의 두께 2 mm를 선정하였다.
- 4) 앞서 결정된 수직 길이와 보강단면 두께의 설계점에 대하여 반응표면분석법 결과와 구조해석의 결과를 비교한 결과, 1.63% 오차를 보이는 것을 확인하였다.
- 5) 설계 자료로부터 내측 레이크가 설치된 제진기를 제작하여, 목메임 방지 및 부하 시험을 통해 구조적 안정성이 확보하고, 총 5회 반복하여 97% 제거되는 효율을 검증하였다.

References

- [1] T. J. Lho, "A study on design and structural strength analysis for the rake of rotary screeners", *Journal of*

the Korea Academia-Industrial cooperation society, Vol.18, No.1, pp.210-215, Jan 2017.

DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.1.210>

- [2] S. M. Yun, Y.S. Kim, H. J. Shin, S. C. Ko, "A Numerical Study for Optimum Design of Dust Separator Screen Based on Coanda Effect", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp.177~185, Dec 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.6.177>
- [3] D. W. Park, "The Dynamic Safety Analysis of the Rotary Circulating Type Automatic Screener using the Auxiliary Elastic Member", *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers*, The Korean Society of Mechanical Engineers, Republic of Korea, pp. 2634-2639, Dec 2013.
- [4] Y. Y. Kim, J. I. Lee, G. B. Kwon, I. H. Cha, "A Study on Development of Fixed Screen Cleaner of Paldang 2 Intake Pump Station", *Proceedings of Korea Society for Fluid Machinery*, Korean Society for Fluid Machinery, Republic of Korea, pp. 601-606, Dec 2008.
- [5] Korea Rural Community Corporation, KDS 67 30 30 : 2018, Korean Society of Agricultural Engineer, Korean Design Standard, Republic of Korea, pp. 28.
- [6] K. K. Jung, M. B. Chan, "Development of Self-Controlled Screen for Effective Operation and Management in Canal, Ministry of Agriculture", *Food and Rural Affairs*, Republic of Korea, pp. 103-104, Oct. 2004.
- [7] Ibrahim, H. M., Yusoff, W. M. W., Hamid, A. A., Illias, R. M., Hassan, O., Omar, O., "Optimization of medium for the production of β -cyclodextrin glucanotransferase using Central Composite Design (CCD)", *Process Biochemistry*, Vol.40, No.2, pp. 753-758, Feb. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.01.042>
- [8] S. Sugashini, K. M. Meera Sheriffa Begum, "Optimization using central composite design (CCD) for the biosorption of Cr (VI) ions by cross linked chitosan carbonized rice husk (CCACR)", *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol.15, No.2, pp. 293-302, Jan. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0512-3>
- [9] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, L. A. Escaleira, "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry", *Talanta*, Vol.76, No.5, pp. 965-977, May 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>

선 상 원(Sang-Won Seon)

[정회원]



- 2013년 2월 : 숭실대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2013년 10월 ~ 2016년 11월 : 국가핵융합연구소 연구원
- 2016년 12월 ~ 현재 : 숭실대학교 박사과정

<관심분야>

구조해석, 충돌해석

이 원(Won Yi)

[정회원]



- 1985년 3월 : NIHON UNIV. 기계공학과 (한국학박사)
- 1987년 9월 ~ 현재 : 숭실대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

재료 및 설계, 비파괴

홍 석 범(Seok-Beom Hong)

[정회원]



- 1993년 2월 : 충북대학교 경영학과 (경영학사)
- 2003년 2월 ~ 2011년 10월 : (주)엠에스테크
- 2012년 9월 ~ 2016년 6월 : 동진 에코텍
- 2016년 11월 ~ 현재 : 하나산업

<관심분야>

수처리 장비