

직교배열에 의한 선삭과 회귀분석방법에 의한 Al-6061의 진원도 평가

장성민¹, 백시영^{2*}

¹조선이공대학 선박해양·기계과, ²순천향대학교 산학협력단

A Roundness Evaluation of Al-6061 Turning by Orthogonal Table and Multiple Linear Regression

Sung-Min Jang¹ and Si-Young Back^{2*}

¹Dept. of Naval Architecture & Mechanics, Chosun College of Science & Technology

²Industry Academy Cooperation Foundation, Soonchunhyang University

요 약 본 논문은 CNC 선반에서 Al-6061의 보링 선삭 후 진원도 오차 분석에 관한 것이다. 실험은 실험계획법을 기초로 하여 신호대 잡음비, 분산분석을 사용하여 진원도 오차에 관한 파라미터의 영향을 연구하였다. 그리고 다중선형회귀분석은 진원도 오차의 예측 가능한 수학적 모델을 유도하기 위해 적용되었다. 선삭 파라미터인 고정압, 벽두께, 절삭깊이 그리고 이송속도는 논문의 목적달성을 위해 적용되었고 그 결과를 고찰하였다.

Abstract This paper on analysis of roundness error after boring turning of Al-6061 materials with CNC lathe. Experiment applying turning parameters is based on experimental design method. A design and analysis of experiments is conducted to study the effects of these parameters on the roundness error using the S/N ratio and analysis of ANOVA. Multiple linear regression analysis is applied to compare experimental with predicted data in consideration of roundness error. To fixation pressure and the opening which are a turning parameter, the cutting depth and feed speed respected the objective attainment of dissertation and to be applied the result they investigated.

Key Words : Roundness error, Boring turning, CNC lathe, Experimental design method, Multi linear regression analysis

1. 서론

기계 산업분야에서의 공정 패러다임이 무인화 되어가고 있는 현재에 전문가시스템으로 공작기계를 운전하기 위해서는 실험적 방법에 의한 데이터의 축적이 기본이다. 부품의 기계가공 공정에서 품질향상을 위한 많은 노력들이 있어 왔다. 이와 같은 노력은 다양한 학술 연구결과로써 나타나고 있다. 고 능률 가공을 위한 주축 회전수의 최적화에 대한 연구[1], 가공 시 요소부품의 변형량 최소화를 위한 절삭 깊이에 대한 연구[2,3] 등이 활발히 진행되고 있다. 또한, 제품의 품위에 중요한 표면 거칠기를 고

려한 절삭속도와 이송량의 상호 특성변화에 대한 최적의 절삭조건을 예측을 위한 연구가 선행되었다[4].

중공축의 정밀도는 공작기계의 고정밀 운전을 위해 매우 중요하다. 특히 축의 진원도가 좋지 않을 경우에는 고정밀 운전이 매우 어려우므로 공작기계의 작동효율이 떨어질 수 있다. 이로 인한 손실은 요소부품간의 마찰을 발생시키고 마멸을 초래하여 결국 요소부품의 수명을 감소시켜 기계 안전성 및 모든 효율성을 악화시키므로 결과적으로 생산성 악화를 초래한다. 특히 고속 회전체에 적용되는 각 요소 부품의 진원도는 회전체의 품질 및 수명에 깊은 연관성을 갖는다. 그러므로 회전체의 경우 진원

*교신저자 : 백시영(beck@sch.ac.kr)

접수일 11년 10월 31일

수정일 11년 11월 28일

게재확정일 12년 01월 05일

도 정도를 향상시킬 수 있는 가공기술의 연구가 요구된다[5].

공작물에는 고정압에 의해 탄성변형과 소성변형이 모두 가해질 수 있으며 선삭 후 고정압을 해제 하였을 때 영구 변형이 발생하여 요소부품이 공차영역을 벗어나는 원인을 초래할 수 있다. 그러므로 중공축의 정밀가공을 위해서는 적절한 고정압의 설정이 요구된다[6,7].

2. 적용이론

본 연구에서는 진원도 오차(μm)를 최소화한 중공축의 정밀가공을 위해 선삭공정 파라미터로써 고정압, 벽두께 그리고 절삭인자들 각각이 진원도에 미치는 영향을 분석하고 다중 회귀분석방법을 이용하여 이를 예측할 수 있는 수학적 모델을 구현하고자 한다. 실험은 최적화 기술을 위해 요구되는 대부분의 다른 방법보다 적은 노력으로 절삭 파라미터의 최적화에 체계적이고 효율적인 방법을 제공하는 것으로 알려진 다구찌 실험계획방법[8]을 선삭실험에 적용하였다. 이와 관련된 연구를 살펴보면 피삭재의 절삭조건 선정을 위한 연구[9,10] 등 다수의 논문에서 절삭 파라미터 분석 등을 위해 적용되었다.

진원도 오차를 최소화한 고정밀의 중공축을 생산하여 공작기계의 효율적이고 안전한 운전에 기여하는 것을 목적으로 하며, 실험에 대한 반응치인 진원도 오차는 그 최소화를 통하여 고품질을 실현할 수 있으므로 특성함수는 망소특성으로 하였다. 진원도 특성에 영향을 주는 파라미터를 선삭가공작업을 통해 획득된 데이터를 바탕으로 분산분석하여 그 영향을 정량적으로 분석하였다. 선삭가공 실험은 파라미터를 3수준으로 하고 $L_{27}(3^{13})$ 의 직교배열 조건에 따라 27번의 실험을 수행하였다.

3. 실험조건 및 방법

3.1 실험조건

[표 1] 인자와 수준에 따른 독립변수

[Table 1] Level of independent variables

Symbol	Cutting parameter	Unit	Level		
			1	2	3
A	Fixed pressure	bar	6	12	24
B	Wall thickness	mm	3	6	12
C	Depth of cut	mm	0.2	0.4	0.8
D	Feed rate	mm/rev	0.1	0.2	0.4

[표 2] 실험에 적용된 직교배열표 $L_{27}(3^{13})$

[Table 2] Orthogonal array table $L_{27}(3^{13})$ for experiment

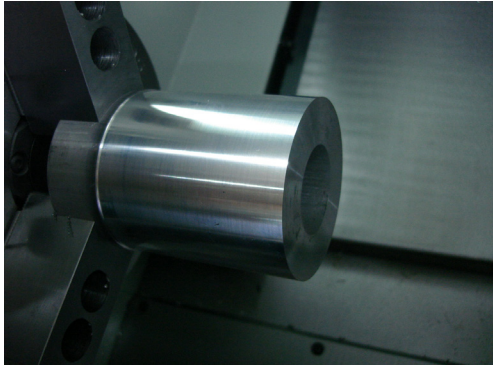
Test No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	진원도 (내경)	진원도 (외경)
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	30.7	8.1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	28	6.7
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	31.1	11.7
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	7.5	11.3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	10.2	8.5
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	6.2	5.7
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	6.5	8
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	6.1	6.7
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	5.5	5.2
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	71.9	6.8
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	74.8	7.8
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	62.5	6.9
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	15.1	5.6
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	14	7.6
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	16.9	8.4
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	7.2	6.6
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	5.6	4.9
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	8.7	5.5
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	143.3	12
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	123.9	10.8
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	126.7	21.4
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	24.1	9
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	22.7	5.6
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	26.2	8
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	8	6.2
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	9.8	6
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	8.9	5.2

특성치인 진원도에 영향을 미치는 인자로서 공작물을 고정하는 고정압, 중공 시편의 벽두께, 절삭력의 영향으로 중공축의 변형이 초래될 수 있으므로 절삭깊이, 이송속도를 대상으로 하였다. 소재는 $\varnothing 70 \times 100 \text{mm}$ 의 Al6061을 사용하였으며 절삭속도 200m/min으로 건식 절삭하였다. 그 밖에 각각의 인자들과 수준에 따른 조건인 독립변수는 표 1에 나타내었다. 실험은 직교배열표의 조건에 따라 수행되었으며 그 조건은 표 2와 같다.

3.2 실험방법

잡음의 최소화를 위해 시편의 고정에 사용된 소프트 조(soft jaw)의 내면의 반지름은 시편의 외경과 동일하게 제조하여 면 접촉에 가까워지도록 하였다. 선삭실험에 사용된 공구는 보링 바이트(PGT090304-C05 NC3020계열)로 일반적으로 현장에서 사용되고 있는 것이다. 절삭 선단은 초경재질의 인서트 팁(insert tip) C20S-SCLPR 09를

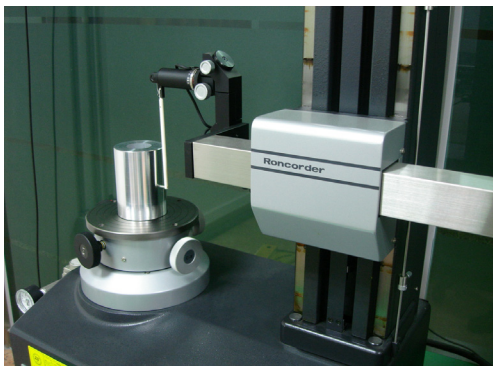
채택, 매 실험마다 인서트 팁을 교환하여 사용함으로 공구 마멸로 인한 잡음의 영향이 없도록 하였다. 또한 주축 일정제어 G96 기능을 사용하여 절삭속도를 일정하게 고정하였다. 그림 1은 CNC 선반의 척에 고정된 중공시편의 사진을 나타낸 것이다.



[그림 1] 척에 고정된 중공시편 사진
[Fig. 1] Photograph of hollow specimen

3.3 시편의 측정

직교배열표에 의한 선삭 후 진원도 측정은 KS 기준에 적합한 항온항습시설이 갖추어진 정밀 측정실에서 수행하였다. 그림 2는 정밀 측정실에서 중공시편의 선삭 후 진원도를 측정 중인 측정 장비를 나타내는 사진이다. 길이 방향 측정은 시편의 전체 길이 중 조(jaw)의 고정단 끝 부분을 0(zero), 자유단 끝 부분을 100mm로 구분하고 10mm지점부터 5mm 간격으로 95mm지점까지 일정 간격으로 측정하였다. 원주방향 측정은 5mm 길이의 일정 간격에 대하여 시편의 원주면 전체를 50포인트로 구분하여 측정하였다.



[그림 2] 진원도 측정 장비사진
[Fig. 2] Photograph of roundness measurement equipment

4. 실험결과 및 고찰

4.1 분산분석

직교배열에 의한 실험 후 선정된 제어인자들의 응답성 파악을 위해 분산분석(ANOVA)을 하였다. 그 결과를 표 3~4에 나타내었으며 각각의 인자들이 특성치인 진원도에 미치는 영향을 정량적으로 나타낸 결과를 그림 3에 도해하여 나타내었다. 그 결과 유압에 의한 고정압과 중공시편의 벽두께가 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 고정압의 경우 내경의 진원도에서 15.86%, 외경의 진원도에서 10%의 영향을 미쳤다. 특히 내경의 진원도에 대하여 벽두께는 79.64%의 기여도로 진원도에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 외경의 진원도에 대하여는 34.73%의 기여도를 나타내었다. 절삭 깊이의 영향은 외경의 진원도에서 2.75%의 기여도를 보였을 뿐 절삭 깊이와 이송속도는 내, 외경의 진원도에 미치는 영향은 1%미만으로 그 영향이 무시할 정도의 결과로 나타났다. 절삭 깊이와 이송속도는 정삭에 가까운 조건으로 실험되었기 때문인 것으로 사료된다. 진원도 오차를 최소화시키기 위한 최적 조건은 내경의 경우 A1B3C2D2이며 외경의 경우 A2B3C2D1의 조합인 것으로 분석되었다.

[표 3] 분산분석표(내경)

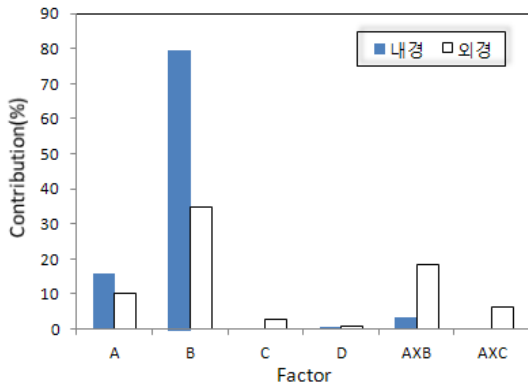
[Table 3] Analysis of variable(Inner diameter)

Source	Sum of Squares	DOF	Mean Square	F ₀	F (0.05)	P (%)
A	341.35	2	170.673	218.328	4.10	15.86
B	1714.1	2	857.053	1096.36	4.10	79.64
C	0.0919	2	0.04594	0.05877	4.10	0.01
D	10.67	2	5.33481	6.82442	4.10	0.50
A×B	72.318	4	18.0795	23.1277	3.48	3.36
A×C	5.8427	4	1.46068	1.86853	3.48	0.27
error	7.8172	10	0.78172			0.36
Total	2,152.2	26				100.0

[표 4] 분산분석표(외경)

[Table 4] Analysis of variable(Outer diameter)

Source	Sum of Squares	DOF	Mean Square	F ₀	F (0.05)	P (%)
A	21.38	2	10.69	1.87	4.10	10.00
B	74.21	2	37.10	6.48	4.10	34.73
C	5.88	2	2.94	0.513	4.10	2.75
D	2.13	2	1.06	0.186	4.10	0.99
A×B	39.07	4	9.76	1.706	3.48	18.28
A×C	13.74	4	3.43	0.599	3.48	6.43
error	57.25	10	5.72			26.79
Total	213.66	26				100.0



[그림 3] 진원도에 미치는 인자의 기여도
[Fig. 3] Contribution of factor

4.2 진원도 모델

중공시편의 직교배열에 의한 선삭 후 다중회귀분석방법을 이용한 진원도 오차의 예측이 가능한 수학적 모델을 유도하여 중공축의 진원도 품질과 생산성 향상에 기여할 수 있도록 하였다. 따라서 직교배열에 의한 실험조건과 그 결과를 이용하였다. 다중회귀분석에 의해 도출된 결과 식은 적용된 인자와 인자들에 관한 수준을 적용하였을 때 진원도 오차의 결과를 예상할 수 있다. 이때 예상되는 진원도를 R 이라하고 고정압 P , 벽두께 T , 절삭 깊이 D , 이송속도 F 라 하고 α , a , b , c , d 를 상수라 하면 내, 외경 진원도와 제어인자 각각의 독립변수들과의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \alpha P^a T^b D^c F^d \quad (2)$$

선삭실험에 적용된 제어인자 3수준의 계산의 단순화를 위해 통계적으로 코딩 후, 변환된 식은 식(3)과 같다.

$$X_n = \frac{2(\ln F - \ln F_{\min})}{\ln F_{\max} - \ln F_{\min}} + 1 \quad (3)$$

변환 식을 이용하면 각각의 제어인자들에 대한 각각의 수준을 구할 수 있다. 이때 n 은 실험에 적용된 제어인자의 수준을 의미하고 F 는 실험에 적용한 각각의 제어인자를 의미한다. 그리고 $F_{\max}$, $F_{\min}$ 는 각 수준별 제어인자의 최대, 최소값을 의미한다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 식 (4)을 구할 수 있다.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 \quad (4)$$

각각의 조건에 적용된 인자와의 관련성의 명확한 분석을 위해 직교배열에 의한 실험 후 다중회귀분석방법을 이용하여 각각의 인자와 진원도 오차와의 복합적인 관계를 통계적 방법으로 분석하였다. 3개 수준을 갖는 인자들을 통계적으로 코딩 후 변환하여 내, 외경 진원도 오차에 관한 1차 모델은 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\ln R = 2.9352 + 0.5002X_1 - 1.0974X_2 - 0.0064X_3 + 0.0747X_4 \quad (\text{내경})$$

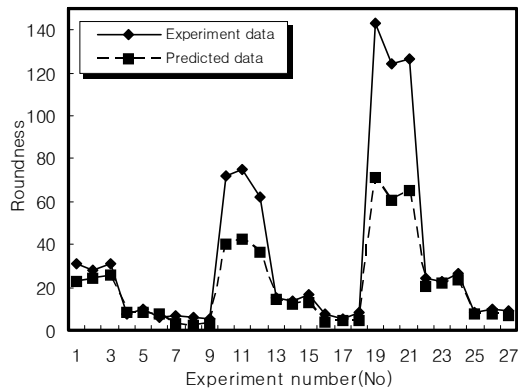
$$\ln R = 2.0202 + 0.0446X_1 - 0.2338X_2 - 0.0125X_3 + 0.0395X_4 \quad (\text{외경})$$

실험에 적용된 4인자들을 대상으로 특성치인 진원도 오차에 대한 통계적 회귀분석 식은 다음과 같은 결과를 갖는다.

$$R = 44.301P^{0.722}T^{-1.583}D^{-0.009}F^{0.108} \quad (\text{내경})$$

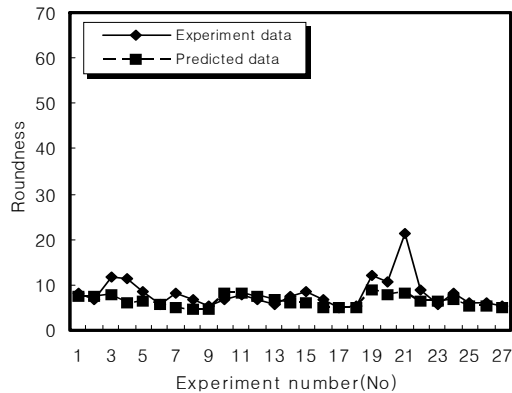
$$R = 10.538P^{0.064}T^{-0.337}D^{-0.018}F^{0.057} \quad (\text{외경})$$

그림 4와 5는 직교배열에 의한 선삭 후 획득된 진원도와 회귀분석 결과 식에 의해 예측되는 진원도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림 4는 내경에 관한 진원도 결과이다. 실험 No.9~11과 19~21에서 실험 데이터와 회귀분석에 의한 예측 데이터의 차이가 크게 나타났다. 이것은 시편의 벽두께가 3mm인 경우에 대한 데이터로 벽두께가 얇을수록 내경가공에서 가공성이 좋지 않은 일반적인 경향에 따라 진원도 오차가 크게 발생하였기 때문이다. 그림 5는 외경에 관한 진원도 결과이다. 실험 No.21에서 실험 데이터와 회귀분석에 의한 예측 데이터의 차이가 크게 발생한 것도 벽두께가 3mm의 시편에 해당하는 데이터로 가공성이 좋지 못한 일반적 경향과 부합하기 때문인데, 이것은 내경 가공 시 구조적으로 보링 바이트의 돌출길이가 길어 가공시에 발생하는 채터현상 등 제어하지 못한 다양한 변수들에 의한 영향으로 사료되며 반대로 외경가공에서는 바이트의 돌출길이가 짧아 이에 대한 영향이 상대적으로 작으므로 진원도가 내경에 비교하여 양호하게 나타났다. 벽두께가 3mm 이하로 얇은 경우 회귀분석 결과에 의한 내경의 진원도 예측은 다소 신뢰하기 어렵다는 것을 실험결과 나타났으며 향후 대책을 고려해야 할 것으로 사료된다.



[그림 4] 실험과 예측 진원도와의 비교(내경)

[Fig. 4] Comparison of experimental vs. predicted roundness(inner diameter)



[그림 5] 실험과 예측 진원도와의 비교(외경)

[Fig. 5] Comparison of experimental vs. predicted roundness(outer diameter)

5. 결 론

선반에서 보링 후 중공축의 진원도 오차에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 직교배열에 의한 실험 후 분산분석 하였고 진원도 예측모델을 유도하기 위해 회귀분석방법을 이용하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) S/N비와 분산분석을 통하여 내, 외경의 진원도 오차에 영향을 미치는 인자의 기여도가 고정압의 경우 내경의 진원도에서 15.86%, 외경의 진원도에서 10%이다. 벽두께의 경우 내경의 진원도에서 79.64%, 외경의 진원도에서 34.73%이다.
- (2) 진원도 오차에 영향을 미치는 절삭깊이의 기여도

는 외경의 진원도에서 2.75%이다. 절삭깊이와 이송속도는 내, 외경의 진원도에 미치는 기여도가 1%미만으로 무시할 정도이다. 이 같은 결과는 절삭깊이와 이송속도가 정삭에 가까운 조건으로 실험되었기 때문인 것으로 사료된다.

- (3) 직교배열과 회귀분석방법을 이용한 진원도 오차의 모델 예측이 가능함을 보였다. 그러나 벽두께 3mm 이하로 얇은 경우 에 내경의 진원도 예측은 다소 신뢰하기 어렵다.

References

- [1] J. W. Cho, et al., "Spindle Speed Optimization for High-Efficiency Machining in Turning Process", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 138-145, 2009.
- [2] S. M. Son, et al., "Study on the minimizing of cutting depth in submicro machining", Proceeding of the KSMTE Spring Conference, pp. 376~381, 2003.
- [3] K. W. Kim, "Study on the Critical Depth of Cut in Ultra-precision Machining", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 126-133, 2002.
- [4] Y. H. Ahn, et al., "The Effect of Various Cutting Conditions on the Surface Roughness of SM45C Materials," Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 482-486, 1997.
- [5] M. M. Yoon, et al., "Study on the Roundness Characteristics of Round Shape Machining," Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 1134-1137, 2005.
- [6] Y. S. Jeon, et al., "Influence of fixed pressure on the machining accuracy of inner diameter of hollow shaft," Transactions of the KSMTE, Vol. 19, No. 3, pp. 381-387, 2010.
- [7] S. S. Lee, et al., "Influence of Chucking Forces upon the Accuracy of Circular Hole in Boring Process on the Turning" Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 58-64, 2008.
- [8] W. H. Yang, et al., "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 84, Issues 1-3, pp. 122-129, 1998.
- [9] H. N. Kim, et al., "A Study on the Effective Cutting

Conditions of Cage Motor Rotor Considering Production Rate(I)," Journal of the KIIS, Vol. 10, No. 1, pp. 9-19, 1995.

- [10] D. H. Hyun, et al., "A Study of the Optimazation the Cutting Condition Selecting System for the Rationality of Mould Manufacture," Journal of the KIIS, Vol. 8, No. 4, pp. 73-81, 1993.

장 성 민(Sung-Min Jang)

[정회원]



- 2000년 2월 : 숭실대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2010년 2월 : (주) 정일기계 연구소장
- 2012년 1월 ~ 현재 : 조선이공대학 선박해양·기계과 교수

<관심분야>

정밀가공, 구조설계, ASME, AWS, 실험계획법

백 시 영(Si-Young Back)

[정회원]



- 2008년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2005년 3월 : (주) 라라전자 생산부장 및 책임연구원
- 2010년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 산학협력교수

<관심분야>

초정밀가공, 세라믹복합재료가공, 초음파접합, 구조해석