

## 무 펀치 피어싱 공정에서 직벽 구현을 위한 최적화 해석

이상욱<sup>1\*</sup>, 엄태준<sup>1</sup>, 주영철<sup>1</sup>, 김국원<sup>1</sup>, 권계시<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>순천향대학교 기계공학과

## Optimization Analysis for Realization of Vertical Wall in the Punchless Piercing Process

Sang-Wook Lee<sup>1\*</sup>, Tai-Joon Um<sup>1</sup>, Youngcheol Joo<sup>1</sup>, Kug-Weon Kim<sup>1</sup>  
and Kye-Si Kwon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University

**요약** 본 논문에서는 무 펀치 피어싱 공정 (기존 피어싱 공정에서 펀치 대신 유압을 사용)을 통해 형성된 구멍에서 내부에 수직 벽을 형성시키는 데 중요한 역할을 하는 공정 인자를 찾기 위한 최적화 해석을 수행하였다. 최적화 기법으로는 다투치법을 사용하였다. 또한 수직 벽 형성을 해석하는데 있어서는 연성파괴이론 중 하나인 Lemaitre 손상이론을 차용하였다. 최적화 해석 결과 수직벽 형성에 가장 큰 영향을 주는 인자로서 '다이의 모서리 반경'이 선정되었다.

**Abstract** In this work, optimization analysis has been accomplished to find important process factors for realization of vertical wall around holes punched by the punchless piercing process. Taguchi method was used for optimization analysis. Lemaitre damage theory, one of the ductile fracture models, was also adopted to simulate numerically formation of vertical wall. From the results of analysis the most influencing factor that affects the vertical wall has been revealed to be 'Corner Radius of Die'.

**Key Words** : Punchless Piercing Process, Lemaitre Damage Theory, Taguchi Method

### 1. 서론

최근 마이크로 크기 이하의 기계 부품들에 대한 관심이 집중되면서 매우 얇은 박판에 구멍을 천공해야 할 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 구멍을 만드는 전통적인 방법으로 쓰이는 피어싱 공정에서는 펀치와 다이 간의 간극 (clearance)이 매우 중요한 공정 인자인데 통상 가공 판재 두께의 약 10% 정도가 추천되고 있다. 하지만 가공 판재의 두께가 마이크로 크기로 줄면, 추천 간극의 크기가 너무 작아져서 현실적으로 펀치 및 다이의 제작이 매우 어려울 뿐만 아니라 제작비용도 크게 상승한다. 이에 따라 펀치 대신 유압을 사용하여 피어싱 공정을 수행하는 무 펀치 피어싱 공정이 제안되었다[1, 2].

전통적 피어싱 공정에서 통상 바람직한 조건으로 요구되는 버 (burr)의 최소화 및 절단면의 수직화는 무 펀치 피어싱 공정에서도 똑 같이 요구된다. 그런데 무 펀치 피어싱 공정에서는 공정의 특성 상 버가 거의 발생하지 않는다[3]. 하지만 절단면을 수직에 가깝게 형성시키기는 쉽지 않다. 이에 따라 무 펀치 피어싱 공정에서 절단면을 수직에 가깝게 형성시키기 위한 최적화 해석이 필요하다.

본 논문에서는 무 펀치 피어싱 공정에서 절단면의 수직화에 대한 최적화 해석을 수행하기 위해서 첫째, 수직벽 형성에 영향을 줄 만한 공정 인자를 선정하였고, 둘째, 다투치 최적화 테이블을 활용하였으며, 셋째, 연성파괴이론 중 하나인 Lemaitre 손상이론을 상용 유한요소 코드인 ABAQUS에 삽입하여 최적화 테이블에 의한 여러 경우

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음.

\*교신저자: 이상욱(swlee@sch.ac.kr)

접수일 09년 08월 29일

수정일 (1차 09년 11월 24일, 2차 10년 01월 15일)

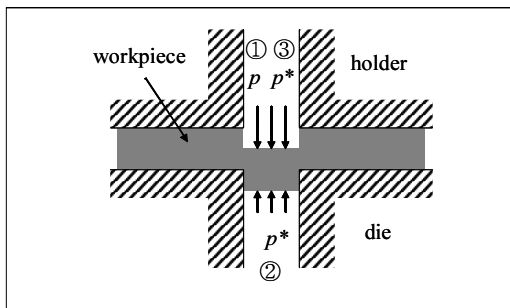
게재확정일 10년 01월 20일

에 대해 수치적으로 절단면 형성 해석을 수행하였다. 해석 결과를 분산분석 등의 통계기법을 통해 분석하여 수직벽 형성에 가장 영향력이 큰 공정 인자를 선정하였다.

## 2. 본론

### 2.1 무 펀치 피어싱 공정 개요

본 논문에서 사용한 무 펀치 피어싱 공정은 박판 위아래 면에 유압을 교번적으로 적용하는 교번식 무 펀치 피어싱 공정[2]이다. 공정의 개요를 그림 1에 나타내었다.

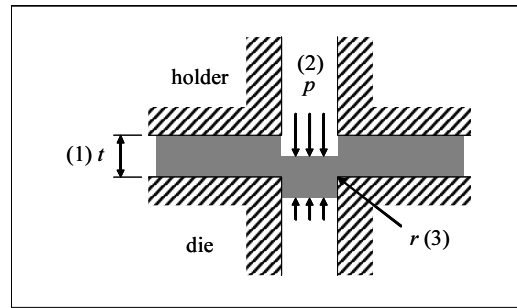


[그림 1] 교번식 무 펀치 피어싱 공정의 개략도[2]

공정의 순서는 ① 위 방향에서 아래로  $p$ 의 고압을 파단이 발생하지 않는 범위 내에서 적절한 시간 동안 가해준 후 ② 아래 방향에서 위쪽으로  $p^*$ 의 고압으로 역시 파단이 발생하지 않는 범위 내에서 가압한 후 ③ 최종적으로 다시 위쪽에서 아래로  $p^*$ 로 가압하여 구멍을 완성하는 것이다.

### 2.2 절단면의 수직도에 영향을 주는 인자 선정

박판 재료의 절단면에 영향을 줄 수 있는 공정 인자의 후보로 판재의 두께, 유체의 압력, 다이 모서리 반경, 홀터력, 박판과 다이 사이의 마찰계수 등 여러 가지를 고려할 수 있다. 이중에서 주요 공정 인자로서 세 가지를 선정하였다. 첫째, 판재 두께 ( $t$ ), 둘째, 유체의 압력 ( $p$ ), 셋째, 다이 모서리 반경 ( $r$ )이다. 그림 2에 주요 공정 인자를 표시하였다.  $p^*$ 는  $p$ 의 1.2배 값으로 설정하였다.



[그림 2] 선정된 세 가지 주요 공정 인자들

세 가지 인자와 각 인자별 세 가지 수준을 표 1에 정리하였다. 인자별 각 수준은 예비 해석을 통해서 결정하였다.

[표 1] 세 가지 공정 인자의 명칭과 그 수준

인자	수준		
	1	2	3
판재 두께 ( $t$ ), $\mu\text{m}$	4.8	5.0	5.2
유체 압력 ( $p$ ), MPa ( $p^*$ 는 $p$ 의 1.2배)	185	200	215
다이 모서리 반경 ( $r$ ), $\mu\text{m}$	0.8	0.9	1.0

### 2.3 다투치 최적화 적용

선정된 세 가지 공정 인자의 영향력을 평가하기 위하여 다투치 최적화 기법[4, 5]을 적용하였다. 다투치 최적화 기법은 직교 테이블을 이용하여 최소의 실험만으로 유용한 결과를 이끌어내는 방법으로 공학 분야에서 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 대표적 직교 테이블 중 하나인 L9를 사용하며 이것은 9번의 실험으로 인자의 주효과를 알아내는 데 많이 사용되는 것이다. L9 테이블 상에 세 가지 인자를 배치하여 해석 조합을 완성한 모양을 표 2에 나타내었다.

[표 2] 다투치 테이블 L9에 배치된 해석 조합

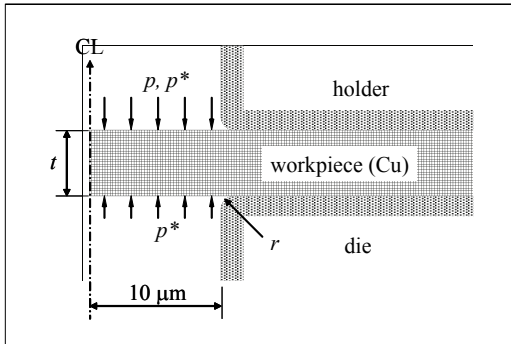
해석 Case	$t$	$p$	$r$
1	4.8	185	0.8
2	4.8	200	0.9
3	4.8	215	1.0
4	5.0	185	0.9
5	5.0	200	1.0
6	5.0	215	0.8
7	5.2	185	1.0
8	5.2	200	0.8
9	5.2	215	0.9

### 2.4 절단면 해석 모델링

아홉 가지 경우에 대해서 절단면 형성 과정을 유한요소 기법으로 해석을 수행하였다. 절단면이 발생하는 과정을 모사하기 위해서는 연성 파단 모델이 요구된다. 많은 연성 파단 모델이 그동안 개발되어왔고 이들에 대한 비교도 이루어진 바가 있다[6].

본 논문에서 채택한 연성 파단 모델은 Lemaitre 손상 이론[7]으로서 이를 유한요소 해석에 적용할 수 있도록 VUMAT[8]으로 코드화하여 ABAQUS에 연계시켰다. 자세한 수식 유도 과정은 참고문헌 3을 참고할 수 있다.

그림 3은 해석을 위한 유한요소 모델을 보여주고 있다. 직경 20  $\mu\text{m}$ 의 구멍을 가공하는 것으로 가정하였다. 축대칭임을 감안하여 2차원 모델을 구성하였다. 재료는 변형 가능한 축대칭 솔리드 요소 (CAX4R)로, 펀치와 충돌하는 변형이 되지 않는 강성 요소 (rigid tool)로 모델링 하였다. 사용된 요소 수는 3,750개, 절점 수는 3,926개이다.



[그림 3] 유한요소 해석 모델

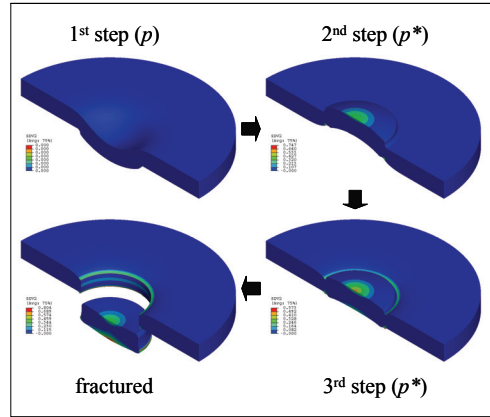
박판 재료는 99.9%의 구리이며 그 물성치는 표 3과 같다.  $E$ 는 영율,  $\nu$ 는 프와송비,  $K$ 는 강성계수,  $n$ 은 가공경화 지수,  $\epsilon_0$ 는 초기변형율,  $\epsilon_D$ 는 손상시작변형율,  $\epsilon_R$ 은 손상 파단변형율,  $D_C$ 는 파단임계손상치를 각각 나타낸다. 이들 중  $\epsilon_D$ ,  $\epsilon_R$ ,  $D_C$ 가 Lemaitre 손상이론과 관련된 파라미터들이다[7].

[표 3] 구리 박판의 물성치 [3]

$E$ (MPa)	$\nu$	$K$ (MPa)	$n$
98990	0.35	497.48	0.28
$\epsilon_0$	$\epsilon_D$	$\epsilon_R$	$D_C$
0.00316	0.35	1.07	0.85

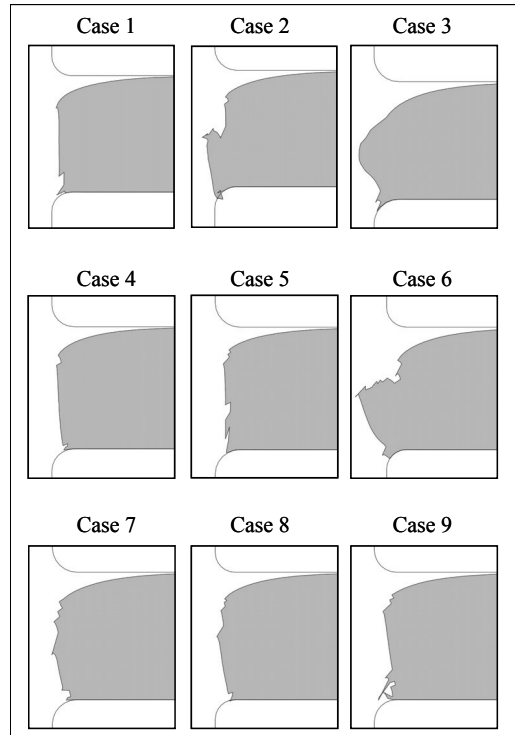
### 2.5 절단면 해석 결과

완전히 손상된 요소를 해석에서 제외시키는 방법을 이용하여 절단면을 구하였다. 절단이 진행되는 과정에 대한 해석 결과의 예를 그림 4에 3차원 보기 형태로 나타내었다.



[그림 4] 절단면 해석의 진행 과정의 예

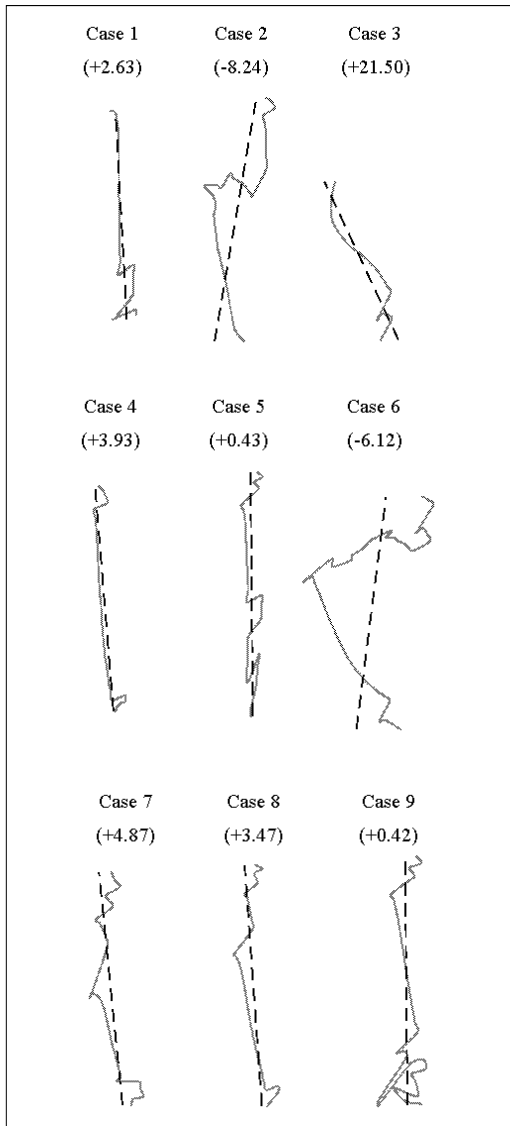
아홉 가지 조합 case에 대한 절단면 해석 결과의 최종 절단면 모양을 그림 5에 보였다.



[그림 5] 아홉 가지 case에 대한 절단면 모양

그림 5를 통해 공정 인자의 조합에 따라 절단면의 모양이 매우 다양하게 변하고 있음을 확인할 수 있다. 해석 조합 중에서 Case 1, 4, 5, 7, 8 및 9는 거의 수직에 가까운 절단면을 보여주고 있다.

절단면의 수직도를 정량적으로 분석하기 위하여 절단면에 위치한 절점들의 좌표를 이용하여 최소자승법을 통해 절단면의 기울기를 추정해 보았다. 그림 6에 그 결과를 표시하였다. 기울기는 수직선을 중심으로 벗어난 각도로 표기하였는데 반시계 방향을 양의 값으로 간주하였다.



[그림 6] 최소자승법을 이용한 절단면의 수직도 계산

정량적 분석 결과로는 case 5와 case 9가 가장 수직에

가까운 결과를 내고 있음을 파악할 수 있다.

## 2.6 인자의 영향도 평가

절단면의 수직도에 미치는 공정 인자들의 영향력을 파악하기 위하여 아홉 가지 case의 기울기 값을 대상으로 통계처리용 소프트웨어를 이용하여 분산분석을 실시하였다. 그 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에서  $F$ 는  $F$  확률 분포를,  $Pr > F$ 는  $F$ 값보다 높을 확률을 의미한다.

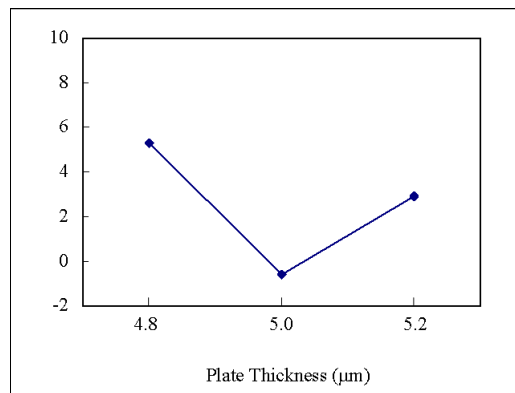
[표 4] 공정 인자들의 수직도에 관한 분산분석 결과

Source of Variation	DOF	Sum of Squares	Mean Square	$F$	$Pr > F$
$t$	2	52.6	26.3	0.21	0.829
$p$	2	74.8	37.4	0.29	0.773
$r$	2	186.2	93.1	0.73	0.577
Error	2	254.2	127.1		
Total	8	567.9			

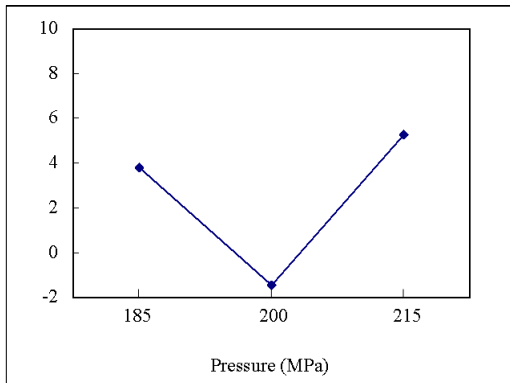
분산분석 결과에 따르면 세 가지 공정 인자 중 수직도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 ‘다이 모서리 반경 ( $r$ )’으로 나타났다. 그 다음으로는 ‘유체 압력 ( $p$ )’이다.

Error항의 값이 상대적으로 크게 나타난 이유는 수직도를 구하는데 있어서 최소자승법을 사용함으로써 공정 인자가 간접적으로만 기울기 값에 영향을 끼치기 때문인 것으로 판단된다. 이를 보완하기 위한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

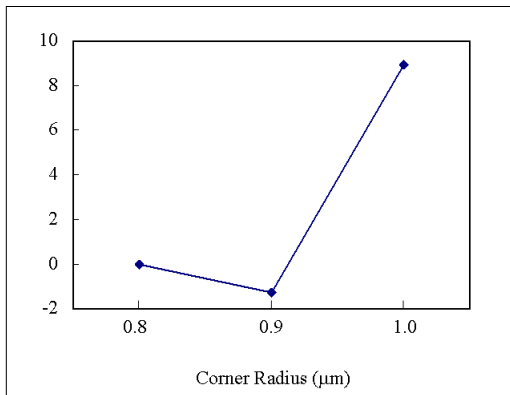
공정 인자별 세 가지 수준에 따른 평균치 변화를 그림 7, 8 및 9에 나타내었다.



[그림 7] ‘판재 두께 ( $t$ )’ 인자의 세 가지 수준에 따른 평균치 변화



[그림 8] ‘유체 압력 (p)’ 인자의 세 가지 수준에 따른 평균치 변화



[그림 9] ‘다이 모서리 반경 (r)’ 인자의 세 가지 수준에 따른 평균치 변화

세 가지 공정 인자 중 ‘다이 모서리 반경 (r)’ 인자의 평균치 변화가 가장 크다는 것을 위의 세 가지 평균치 변화도를 통해 다시 한 번 확인할 수 있다.

평균치 변화 그림을 통해 절단면의 수직도를 높이는 최적의 조합을 추정한 결과 ‘판재 두께’ 5.0 mm, ‘유체 압력’ 200 MPa, ‘다이 모서리 반경’ 0.8 mm로 나타났다.

### 3. 결론

순수 구리 박판에 대해 무 펀치 피어싱 공정을 적용하여 만들어지는 구멍에서 절단면의 수직도를 최적화하기 위한 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 절단면의 수직도에 영향을 주는 주요 인자로 ‘판재 두께’, ‘유체 압력’ 및 ‘다이 모서리 반경’을 선정하였다.

- (2) 세 인자에 세 가지 수준을 부과하여 다꾸치 최적화 기법을 적용하였다. 적용 결과 절단면의 수직도에 영향을 크게 주는 인자의 순서는 ‘다이 모서리 반경’ > ‘유체 압력’ > ‘판재 두께’ 순으로 나타났다.
- (3) 절단면의 수직도를 높이는 최적 조합은 ‘판재 두께’ 5.0 mm, ‘유체 압력’ 200 MPa, ‘다이 모서리 반경’ 0.8 mm로 나타났다.
- (4) Lemaitre 손상 이론을 ABAQUS에 도입하고 요소 제거기법을 함께 사용하여 절단면에서 파단의 전파과정을 성공적으로 전산 모사하였다.
- (5) 도출된 최적화 결과는 잉크젯용 노즐 등과 같은 초박판 미세 구멍 가공의 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

### 참고문헌

- [1] M. Murata, Y. Uede, H. Suzuki, “Punchless punching of thin sheet metal by ultra high pressure gas for circular hole”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 48, pp. 59-68, 1995.
- [2] 이상욱, 엄태준, 주영철, 김국원, 권계시, “무 펀치 피어싱 공정에서 교번식 고압 적용을 통한 구멍 내 직벽 구현 해석”, *한국산학기술학회논문지*, 제10권, 제5호, pp. 929-934, 2009.
- [3] S. W. Lee, F. Pourboghrat, “Finite element simulation of the punchless piercing process with Lemaitre damage model”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, pp. 1756-1768, 2005.
- [4] G. Taguchi and S. Konishi, “Orthogonal Arrays and Linear Graphs”, ASI Press, 1987.
- [5] 이세정, 김민웅, 이재원, 이상욱, “중공 박판의 기계적 프레스 결합에 관한 해석”, *한국산학기술학회논문지*, 제10권, 제7호, pp. 1453-1458, 2009.
- [6] R. Hambli, M. Reszka, “Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, No. 7, pp. 1349-1361, 2002.
- [7] J. Lemaitre, “A continuous damage mechanics model for ductile fracture”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 83-89, 1985.
- [8] “ABAQUS User’s Manual Ver. 6.5”, ABAQUS Inc, 2004.

**이 상 욱(Sang-Wook Lee)**

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

소성가공, 전산역학, 연료전지 등

**김 국 원(Kug-Weon Kim)**

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

정밀가공, 전산역학, 제품설계 등

**엄 태 준(Tai-Joon Um)**

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1979년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1989년 8월 : 오클라호마주립대 기계공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

유압공학, 자동제어, 최적설계 등

**권 계 시(Kye-Si Kwon)**

[정회원]



- 1992년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 조교수

<관심분야>

잉크젯, 진동 등

**주 영 철(Youngcheol Joo)**

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1993년 5월 : UCLA 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

열전달, MEMS, 내연기관 등