

# 사각형 판재성형 시 벽두께 증육을 위한 금형 및 공정 설계

김진호<sup>1</sup>, 홍석무<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>삼성전자 첨단기술연구소, <sup>2</sup>공주대학교 금형설계공학과

## Process and Die Design of Square Cup Drawing for Wall Thickening

Jinho Kim<sup>1</sup>, Seokmoo Hong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Samsung Advanced Technology Training Institute, Samsung Electronics,

<sup>2</sup>Department of Metal Mold Design Engineering, Kongju National University

**요약** 최근 스마트 폰, 모바일 PC 제품의 외관에 필요한 가벼운 금속제품으로 제조를 하기 위하여 알루미늄 압출 공정과 CNC 가공기법을 적용한 생산방식이 널리 사용되고 있다. 하지만, 알루미늄 압출법은 외관 디자인의 제약이 있으며, 특히 CNC 가공 프로세스가 상대적으로 높은 생산 비용 및 낮은 생산성으로 생산단가가 많이 높은 단점이 있다. 본 연구에서, 새로운 처리 방법을 순서 재료비를 대폭 감소시키고, 제조 속도를 향상시키기 위해 판재성형과 부피성형의 두가지 공정을 섞어 새로운 판단조 공정을 개발하였다. 새로운 판단조 공법(hybrid plate forging)이란 우선 일반적인 딥드로잉으로 중간 모양을 만든 후 원하는 벽 부위만 증육을 하는 방법을 의미한다. 이러한 판단조 공법을 활용하여 재료의 낭비와 제조 시간을 최소화하는 것이 가능하게 된다. 본 연구에서는 상용 유한 요소 프로그램 AFDEX-2D를 통해 판단조공정을 설계하였고 최적의 사용 가능한 소재의 두께와 초기 폭을 설계하였다. 최종적으로 실제 노트북 케이스 금형을 제작하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

**Abstract** Recently, thin and light-weight production technologies are needed in IT industry in accordance with increase of the smart phones and mobile PC products. In order to make light and high rigidity products, engineering plastic and aluminum materials are frequently used in products appearance and frame hat support structure. Especially aluminum extrusion and CNC Brick processes are widely used for high strength and high rigidity technology. But extrusion method has constraints to apply exterior design and CNC Brick process has relatively high production cost and low speed of manufacturing. In this research, a new process method is introduced in order to reduce material cost and to improve manufacturing speed dramatically. Plate forging process means basically that thickening of local wall area thickness after deform exterior shape by deep drawing and bending process. Therefore, it is possible to minimize the waste of material and the manufacturing time. In this study the process of plate forging is designed using finite element program AFDEX-2D and the thickness and the width of initial deformed blank. And it is verified as a sample which is a part of laptop developed through the proposed plate forging method.

**Keywords :** CNC Machining, Plate Forging, Finite element method, Optimum design, Preform design

### 1. Introduction

전통적인 금속 성형 공정으로 알려진 프레스 기법으로 모바일 제품의 케이스를 만들었을 때 몇 개의 부품을 조립해야 하고 각 부품들의 용접 또는 접합에 의한 강도

가 저하되는 단점이 있다. 이에 애플사는 2008년 Macbook Pro의 새로운 제품 생산에 Brick 공법을 사용하였다. 브릭공법이란 알루미늄 블록을 CNC 가공을 통해 깎은 후 레이저로 마감처리 함을 의미한다. 브릭 공정은 비록 단일 부품이기 때문에 복잡한 내부구조를 갖는

\*Corresponding Author: Seokmoo Hong(Kongju National University)

Tel: +82-41-521-9268 email: smhong@kongju.ac.kr

Received June 17, 2015

Revised August 21, 2015

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

이음새가 없는 하나의 알루미늄 덩어리로 만들어진다. 따라서 무게와 강도 측면에서 상당한 강점을 지닌다. 또한 디자인적인 측면에서 이음새가 없는 디자인(seamless design)을 구현할 수 있어 외관 차별화에 성공한 대표적인 사례이다. 이후 각 mobile 제품을 생산하는 HP, Dell, Samsung, LG 등은 알루미늄 가공 제품을 경쟁적으로 만들고 있다. 브릭 성형 공법의 단점으로는 생산 공정에 반드시 표면 가공이 수반되어야 하고, 대량의 CNC 장비의 투자가 필요하다. 따라서 상대적으로 생산 단가가 높고, 생산 속도가 느린 반면 조립과정이 줄어들고, 금형제작이 불필요하므로 생산 공정 전체를 보면 장점과 단점이 혼재한다.

본 연구에서는 브릭성형 공법의 단점인 C/T의 개선과 소재 비용의 낭비적인 측면을 획기적으로 감소시키기 위해서, 전통적인 박판 성형 프레스 공법과 브릭 성형 공법을 조화시킨 판단조 공법을 제안하고자 한다. 판단조 공법(plate forging)은 기본적으로 deep drawing, bending을 통해 외관 제품을 만든 이후, 원하는 부위만 단조 성형을 가해 두께를 증가시키는 방법을 의미한다. 따라서 초기소재는 일반적인 금속 판재를 사용하기 때문에 Brick공법에 비해 소재 사용률을 극대화 할 수 있으며, 가공 시간을 최대 50배 이상 단축시킬 수 있는 장점을 갖는다.

최근에 연구로는 링기어 플레이트 등에 유한요소해석을 통해 두께 증육 관련해서 조종두 등이 해석을 수행하여 성형속도 및 하중과의 관계 등을 정의하였다. Kim 등은 단단 프로그래시브 금형을 통해 두께에 변화를 주는 연구를 수행하였다[1]. Han 등은 모바일폰 소형부품에 국부 형상 증육에 대한 연구를 수행하였다[2]. Joen 등은 판단조 성형 기법에 대한 연구를 수행하였다[3]. 또한, You, Park 등은 유한요소해석을 이용한 단조 제품의 프리폼 설계에 대한 연구를 수행하였다[4,5]. 판단조 공정에서는 Mori 와 Wang 등이 유한요소해석을 통해 판단조 공정설계를 최적화하였다[6-10].

Fig. 2 에서는 브릭가공과 판단조 성형의 schematic diagram을 잘 보여주고 있다. 하지만, 얇은 박판의 wall의 두께를 증가시킬 때는, 세장비(aspect ratio)에 따른 버클링(buckling)이 발생할 수 있으며, 또한 crack, folding 등의 failure도 발생하기 쉽기 때문에, 이를 trial-and-error를 통해 개발하기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 2차원 단조해석을 통해 위에서 언급한 결함이 발생

하지 않는 성형성 평가 판단 기준을 만들고, 최적화 기법을 사용해 원소재 판재 두께 기준 최대로 벽두께 증육이 가능한 범위를 결정한다. 본 연구의 결과로는 이러한 프로세스를 거쳐 원하는 초기 소재 두께 대비 원하는 geometry가 결정되면 최대 두께를 결정할 수 있는 가이드를 제공하게 된다. 본 연구를 통해 가능한 제품으로는 mobile products의 metal housing이며, 해석을 노트북 케이스 실제 금형 제작을 하여 제안한 방법의 타당성 검증 완료하였다.



Fig. 1. Brick method of Apple's Macbook Pro (CNC machining and laser finishing)



Fig. 2. Comparison between Brick CNC and plate forging

## 2. Optimal conditions of FE simulation

### 2.1 Materials and FE model

본 연구를 통해서 얻고자 하는 제품은 노트북 케이스 또는 노트북의 key board cover 등으로 박형의 디자인 제품이지만, 고강성이 필요한 모바일 제품의 케이스를 목표로 한다. 일반적으로 제품의 강성을 높이기 위해서는 전체 두께를 증가시키거나, 사용 금속 판재의 탄성계수 또는 단면계수를 증가시키는 방법을 사용할 수 있다. 전체 두께를 증가시키는 경우, 재료비 상승 및 CNC 가공시간에 의해 생산성 저하의 원인이 된다. 제품의 강성을 높이기 위해 탄성계수가 높은 금속을 사용했을 경우, 상대적 밀도가 증가하여 모바일 제품의 무게가 증가하여 부적합 할 수 있다. 때문에 사용하는 금속 소재는 강성 및 성형성 그리고 가격을 고려하여, 알루미늄 5052 소재를 선택하였다. 본 연구를 통해 제품의 벽 두께를 증가시

키는 경우, 단면계수를 증가, 예를 들어 전체 1.5t 두께의 강성에서 최 외곽의 벽 부분의 두께를 3.0t으로 증가 시 단면계수가 증가되어 뒤틀림(twist) 강성이 증가된다. 즉, 전체 시스템의 두께는 감소시키면서도, 좌우 twist에 대한 저항을 향상시켜 강성 증가의 효과를 가져 올 수 있다. 이는 두께 감소를 통해 모바일 제품의 휴대성을 증가시키면서도, 기존 신뢰성을 보장할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서 제안된 방법은 형상을 만들어 내기 위한 드로잉 공정과 벽면의 두께를 부가하기 위한 단조 사이징 공정으로 구분된다. 기본적으로 판재성형(sheet metal forming)과 단조 성형(forging)공정의 조합으로 이루어지며, 이러한 공법을 판단조(plate forging)공정이라 한다. 판단조의 공정 설계를 위해 판재성형 드로잉(drawing) 해석을 이용하여 두께 결정을 하였고, 단조 해석을 통해 판단조 공정설계 및 사이징 금형의 설계 기초로 삼았다. 드로잉 및 단조 해석의 전체 공정도는 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 이차원 두께 결정의 경우, 단조 공정 중 소재의 결함 중 접힘(Folding)이 최소화 되는 두께 설계 변수로 최적화하였다. 결함이 최소화되며 최고

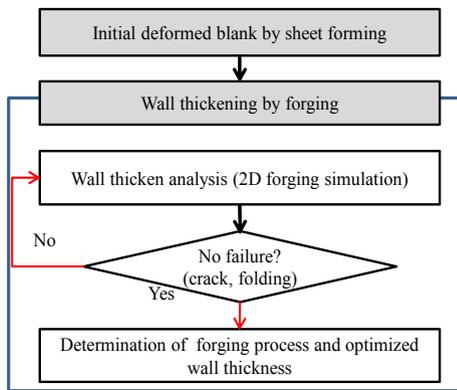


Fig. 3. Flow chart of the finite element analysis for plate forging process

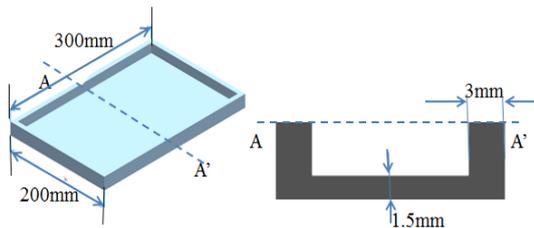


Fig. 4. (a) 3D view and (b) 2D section view of target product

의 두께를 결정한 후, 결정된 두 두께에 대해서 최고로 두꺼운 벽을 만들 수 있도록 제품을 설계하였다. 노트북 케이스의 단면에서 장변의 길이가 충분히 단변이 길보다 길기 때문에, 평면변형모드(Plane strain mode)로 가정하고, 2차원으로 모델링 및 해석을 수행하였다. 드로잉 공정에서는 곡률부분에 파단이 되지 않을 정도의 굽힘부 R을 결정하였고, 이는 최적화의 목적함수(Object function)으로 설정되었다. Fig. 4는 2단계 두께 결정을 위한 단조 개략도이며 소재는 알루미늄 (Al5052) 판재를 사용하였다. 원하는 베젤의 사이즈는 2.0~3.0mm이며, 높이는 8mm (노트북 케이스의 높이를 고려) 로 결정하였다.

## 2.2 Determination of thickness

얇은 박판의 wall의 두께를 증가시킬 때는, 세장비 (Aspect ratio)에 따른 버클링(Buckling)이 생기지 않도록 설계하고, crack, folding 등의 결함 예측(Failure prediction)을 위해 단조 전용 상용 소프트웨어인 AFDEX-2D(MFRC, Korea)를 이용하였다[11]. 해석에 사용된 재질은 table 1에 나타내었으며, 인장시험을 통해 해석에 필요한 재료상수(Material properties) 및 유동응력 (Flow stress)을 결정하였다. 유동응력은 식 (1)과 같이 Hollmon 모델에 따라 그 계수를 실험으로 결정하였다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 유동응력,  $K$ 는 강도계수,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률,  $n$ 은 가공경화지수이다.

Table 1. Material properties of Al 5052 from tensile test.

$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$\nu$ [-]	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	K [MPa]	n [-]
2.6	69	0.3	185.29	235.83	210	0.13

Fig. 5에서는 드로잉된 균일 두께의 사각 소재를 벽부분만 증육하는 단조 개략도를 보여주고 있다. 본 공정을 수행하기 위해서 사이징 펀치(Sizing punch), 다이(Die), 홀더(Holder)로 구성된 다이 세트가 구성되었고, 소재는 사전에 해석이 수행된 드로잉된 변형소재(Deformed

blank)이다. 설계 모델은 길이 방향의 긴 단면을 가지며 좌우 대칭형상을 가지고 있기 때문에 평면변형(plain strain) 조건을 사용하였으며, 1/2 대칭(symmetry) 조건을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 버클링 및 결합의 정확한 예측을 위해 초기 요소망은 초기 요소망은 0.2mm 균일한 격자 크기를 가지는 2차원 4절점 요소망을 사용하였으며, 초기에 5000개의 요소망이 사용되었다. 금형과 접촉되는 면적 또는 과도 변형이 발생하는 부위는 리메싱(remeshing)이 되어 촘촘한 밀도의 요소망이 사용되었으며, 리메싱 후 사용된 최소 요소망의 크기는 대략 0.05mm 정도이다.

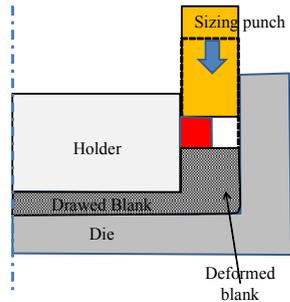


Fig. 5. 2D forging process to determine blank thickness (1/2 symmetric model)

본 공정을 통하여 세장비에 의해서 생기는 좌굴(Buckling)로 인해서 Fig. 6처럼 접힘 결함이 발생되어 질 수 있다. 이러한 결함은 외관상 문제를 발생하기 때문에 이와 같은 접힘 결함이 발생하지 않는 범위 내에서 가능한 최대 벽 두께가 얼마인지를 CAE해석을 수행하였다. Fig. 7은 초기소재의 두께와 벽 증육 간의 관계를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 보이는 바와 같이 초기 판재 두께가 두꺼울수록 벽두께 증육도 쉬워지지만, 일정한 범위에서 선형적인 증가를 보이다가 접힘 결함으로 더 이상 소재 두께와 벽 증육이 비례하지 않는 구간이 생기는 것을 알 수 있었다. Fig. 8에서는 알루미늄 케이스 단면에서 두께별 벽두께 증가가능 정도를 결정할 수 있는 가이드라인을 제시하였다. 즉, 알루미늄 소재 두께 1.5t의 경우 최대 2.1mm까지는 두께 증가가 가능하며, 그 이상의 두께 증가에서는 소재 접힘(folding)이나 플래시(flash) 등 결함이 발생함을 의미한다. 원하는 벽 두께 3mm를 위해서는 최소의 초기 소재의 두께는 2mm가 필요하다. 따라서 제시한 하이브리드 판단조 기법을 이용하여 구할 수 있는 초기소재 대비 벽두께 비율은

150%이다. 최종적으로 Fig. 8에서 보여지는바와 같이 단조 공정 중 접힘 및 균열이 발생하지 않는 두께에 대하여 유한요소해석을 통해 각 두께와 폭에 대한 비율별로 설계 가이드를 제시하였다.

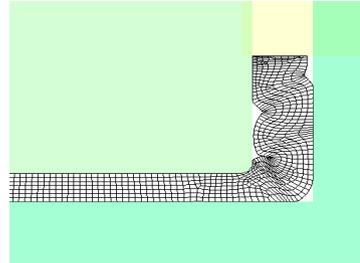


Fig. 6. Folding defect during forging simulation

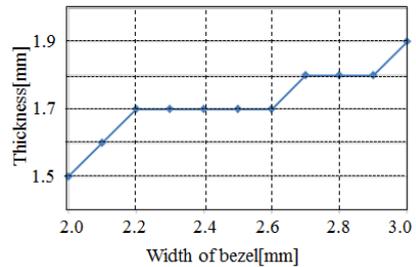


Fig. 7. Relationship between sheet thickness and ability of wall thickening

Width [mm]	Thickness [mm]					
	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
2.0	O	⊙	⊙			
2.1	△	O	⊙			
2.2	X	△	O	⊙		
2.3	X	△	O	⊙		
2.4	X	△	O	⊙		
2.5	X	△	O	⊙		
2.6	X	△	O	⊙		
2.7	X	X	△	O	⊙	
2.8	X	X	△	O	⊙	
2.9	X	X	△	O	O	⊙
3.0	X	X	X	△	O	O

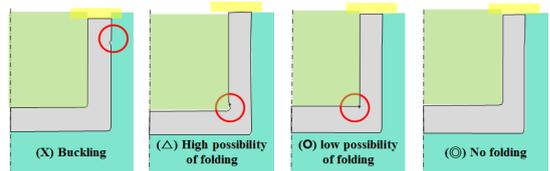


Fig. 8. A guide for determination of thickness by forging process considering failure criterion

### 3. Experiment

해석결과를 기초로 실제 테스트를 위해 bending 금형 및 1차 sizing 금형을 제작하였다. 테스트 소재인 Al 5052 판재의 벽두께 증육(Wall thickening)을 만들기 위한 bending 금형 1set, wall sizing을 위한 sizing 금형 1set을 제작하였으며, 그 형상은 Fig. 4에서 나타내었다. Bending을 위해 사용된 Al5052 sheet의 초기 블랭크 사이즈는 50mm × 150mm 폭과 너비를 가지며, 두께는 1.5mm 소재를 사용하였다. 양산공정이라면 드로잉 후 트리밍 작업을 통해 벽높이를 낮추는 공정을 하겠지만, 본 연구에서는 bending 공정 후 최적 벽높이를 고려하여 16mm 높이로 와이어가공을 커팅 하였다. 와이어 커팅 작업 후 테스트 소재의 wall 두께를 1.5mm에서 2.0mm로 성형하기 위한 sizing 공정을 수행하였다. Fig. 9에서는 벽두께 사이징 전과 후에 단면을 보여주고 있다. 정확한 두께 측정을 위해서 단면은 3D 스캐너인 ATOS Tripple(GOM mbH, Germany)를 사용하여 스캐닝된 데이터에서 단면차이를 확인하였다. 실제 테스트 결과에서 얻은 판단조 sample을 scanning하여 얻은 data와 모델링상의 sample data를 비교분석한 결과, 실제 sample의 평탄도 및 치수 정밀도는 의도한 대로 두께 증육과 모서리 부분에 90도의 직각 면을 구현할 수 있음을 확인할 수 있었다.

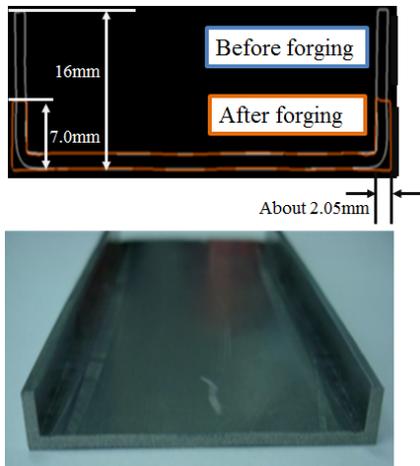


Fig. 9. wall thickened final shape and measurement of dimension

### 4. Conclusion

본 연구를 통해 전통 단조 기법이 아닌, 박판 성형 후 부분 단조를 통해 모바일 제품의 wall thickness 를 증가시킬 수 있는 공법이 개발되었다. 박판금속소재의 경우, 벽 부분의 두께를 증가시킬 때, 크랙, 접힘 또는 버클링 등의 결함이 발생될 수 있고, 이는 2차원 단조 해석을 이용하여 결함을 생기지 않는 범위 내 최대 두께 증가를 가져올 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에 사용된 초기 두께 1.5t의 경우 1차 단조를 통해 최대 1.9t, 즉 26%의 벽두께 증대가 가능하였고, 2차 단조 공정을 통해 최대 3.0mm까지 벽 두께가 가능함을 해석적으로 제시하였다. 해석으로 제안된 단조 공정을 실제 금형 제작을 통해 검증되었고, Fig. 9에서 제작된 샘플과 측정된 결과를 보여주고 있으며, 해석결과와 측정 결과는 정확히 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서, 제안한 plate forging 공법을 활용하여 알루미늄 CNC 절삭 가공 공정 시 문제가 되는 가공비와 C/T의 감소가 가능할 것으로 판단되며, plate forging공법을 활용하여 금속 외관 제품의 가공 시 원가 절감 및 수율의 향상이 기대된다.

### References

- [1] B. Y. Jun, R. H. Park, M. S. Joun, S. H. Choi, J. Y. Sung, C. C. Kim S. H. Jeong, "Development of an Enclosed Die Forging Die Set and its Application to Precision Forging", Trans. Materials Processing, pp. 143~147, 2005.
- [2] C. D. Cho, Y. J. Kim, "Study of forming properties for an edge thickening model using finite element method", Trans. Materials Processing, Vol. 21, No. 4, pp. 234~239, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2012.21.4.234>
- [3] M. C. Lee, W. J. Chung, M. S. John, "Rigid-plastic finite element analysis of a cold plate forging process using tetrahedral elements", Trans. Materials Processing, Vol. 19, No. 2, pp. 244~247, 2010.
- [4] H. Y. You, "A Study on the Forming Conditions of a Forging Piston by using the Finite Element Simulation and the Taguchi Method", J. of the KAIS, Vol. 13, No. 5, pp. 1990-1995, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/kais.2012.13.5.1990>
- [5] S. Park, "Preform Design of a Forged Punch by

Approximate Optimization", J. of the KAIS, Vol. 15, No. 7, pp. 4057-4064, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/kais.2014.15.7.4057>

- [6] C. J. Tan, K. Mori, Y. Abe. "Forming of tailor blanks having local thickening for control of wall thickness of stamped products. Journal of materials processing technology", Vol. 202, pp. 443-449, 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.014>
- [7] K. Mori, S. Nishijima, C. J. Tan. "Two-stage cold stamping of magnesium alloy cups having small corner radius", International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 49, pp. 767-772, 2009.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.04.005>
- [8] K. Mori, Y. Abe, K. Osakada, S. Hiramatsu. "Plate forging of tailored blanks having local thickening for deep drawing of square cups", Journal of Materials Processing Technology. Vol. 211, pp. 1569-1574, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.010>
- [9] X. Y. Wang, M. L. Guo, J. C. Luo, K. Ouyang, J. C. Xia., "Stamping-forging hybrid forming of double layer cup with different wall thickness", Materials Research Innovations, Vol. 15, No. 1, pp. 435-438, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/143307511X12858957675516>
- [10] X. Y. Wang, K. Ouyang, J. C. Xia, G. A. Hu., "FEM analysis of drawing-thickening technology in stamping-forging hybrid process", Forging & stamping technology". Vol. 34, No. 4, pp. 73-78, 2009.
- [11] AFDEX-2D User's Manual, Version 9.0, *Metal Forming Research Center*, Korea. 2014.

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (석사)
- 2007년 3월 : Technische Universität München(Germany), Department of Mechanical Engineering (박사)
- 2007년 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성 전자 GTC, 수석연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 공주대 금형설계공학과 교수

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조, 하이드로포밍, 유한요소해석, 최적 설계

김 진 호(Jinho Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 영남대학교 기계공학과(학사)
- 2009년 2월 : 금오공과대학교 기계공학과(석사)
- 2014년 8월 : 금오공과대학교 기계공학과(박사)
- 1993년 12월 ~ 현재 : 삼성전자 무선사업부 차장

<관심분야>

금형기술, 기계가공, CAD/CAM