

고정밀 플라스틱 제품 성형을 위한 다수 캐비티 사출금형 및 성형 요소기술에 관한 연구

손종인¹ · 김철기² · 송병욱^{3,†}

LG이노텍, Lens내재화TASK, 책임연구원¹
인하대학교 금속재료공정공학과²
인천대학교 기계공학과^{3,†}

A study on multi-cavity injection mold and molding elemental technology for plastic product of high precision tolerance

Jong-In Son¹ · Chul-Ki Kim² · Byeong-Uk Song^{3,†}

LG Innotek, Lens internalization TASK, Professional¹

Program in Metals and Materials Process Engineering, Inha University²

Department of Mechanical Engineering, Incheon National University^{3,†}

(Received October 17, 2023 / Revised December 20, 2023 / Accepted December 31, 2023)

Abstract: As a representative method for mass production, a multi-cavity type mold capable of simultaneously molding products of the same shape can be applied. It has the advantage of improving the productivity from several times to several tens of times, but it may cause disadvantages which is the quality deviation with each cavity. This study, therefore, has tried to increase the cavity filling balance by using a melt flipper and a flow distance control part in the runner part of the mold. Along with this, the design and manufacturing of air vents during injection molding have been verified through experimental methods to achieve a higher level of multi-cavity filling balance and dimensional accuracy.

Key Words: Multi-cavity, Filling balance, Flow length adjustment, Melt flipper, Air vent

1. 서론

현대량생산을 위해 많은 제조기술이 활용되고 있는데 그 중 대표적인 기술로 응용된 고분자 재료를 원하는 모양으로 성형하는 사출성형 공법이 있다. 이 공법으로 재료를 성형하기 위해서는 금형을 이용하며 이론적으로 적절한 사출조건에서 공정의 적정 순환 시간을 거쳐 항상 동일한 품질의 제품을 대량으로 제조할 수 있다. 이때, 적게는 두 개에서 많게는 수십개의 동일한 형상 성형부를 금형 내부에 배치하면 그 수에 비례하여 생산성을 증가시킬 수 있다. 형상 성형부를 캐비티 (Cavity)라 하며 다수

캐비티(Multi-cavity)를 적용한 금형은 앞서 언급한 대량 생산의 장점을 가질 수 있지만 현실적으로는 다양한 요인에 의한 캐비티별 제품의 품질편차가 발생하는 단점이 함께 존재한다.

캐비티별 제품의 품질편차는 충전 시 발생하는 불균형(Runner imbalance)을 가장 큰 원인으로 들 수 있으며, 캐비티간의 균형충전에 대한 금형 및 성형 기술의 향상이 강력히 요구되고 있다.¹⁾ 이를 위해 충전 불균형을 방지하기 위해 응용된 폴리머 원재료가 주입되는 스프루(Spore)에서 캐비티 주입 전까지 캐비티별 러너(Runner) 길이를 동일하게 하거나, 원재료가 캐비티에 순차적으로 주입되는 금형인 경우 선 주입되는 캐비티와 후 주입되는 캐비티의 러너, 게이트 직경을 다르게 하는 등 다양한 기하균형 전략을 통해 캐비티별 충전 균형이 이루어지도록 설계할 수 있다^{2,3)}. 그러나 이와 같은 기하균형을 통

† 교신저자: mempisto8610@naver.com

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

해서도 고분자 재료의 유변학적 특성에 의해 불균형한 충전이 발생된다⁴⁾.

폴리머 원재료는 식 (1)과 같이 전단율(Shear rate)에 따라 점도가 바뀌며 점도 및 전단율은 러너 중심부를 기준으로 내부 위치별 온도 상태에 의해 다르게 된다.⁵⁾

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \gamma}{\tau^*}\right)^{(1-n)}} \quad (1)$$

여기서 η 는 용해된 수지의 점도, η_0 는 zero shear viscosity, γ 는 전단율(Shear rate), τ^* 는 critical stress level, n 은 보간을 위한 승수를 말한다.

$$\eta_0 = D_1 \left\{ \frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right\} \quad (2)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p$$

여기서 T 는 온도, T^* 는 유리전이 온도, p 는 압력, D_1, A_1, A_2, D_3 는 데이터를 피팅하는 하는 계수를 말한다.

Fig. 1에는 앞서 언급한 원인으로 발생하는 러너 불균형 및 캐비티 충전 불균형 상태를 도식화하였다. 이와 같은 원인의 불균형 충전을 저감하기 위하여 다양한 연구가 진행되었다. Beaumont 등은 전단 발열로 인해 발생된 낮은 점도의 수지 흐름 부위와 높은 점도의 고분자 재료 흐름 부위가 나타나는 다수 캐비티 금형에서 러너 분기점에서 발생하는 불균일한 수지유동을 저감하기 위해 금형 러너 분기점에 동일한 비율로 각 캐비티에 용융수지가 충전될 수 있도록 하는 멜트 플리퍼(Melt flipper)를 고안하여 캐비티별 충전 밸런스를 확보할 수 있도록 하였으며⁴⁾, 러너 코어핀, 버퍼, 러너 직경 가변 등을 이용하여 점도 차이에 의한 불균형 충전을 저감하고자 하였다⁶⁻⁸⁾.

멜트 플리퍼(Melt flipper) 등 다양한 방법을 적용한 다수 캐비티 금형은 미적용 금형에 비하여 캐비티 충전 균형을 높일 수 있는 효과를 보이지만 매우 작은 수준의 치수공차(Tolerance)가 요구되는 제품의 경우 다수 캐비티 금형을 적용할 경우 일부 캐비티는 불균일 유동을 저감하고자 하는 금형 구조로 조절할 수 없는 미세한 충전 불균일에 기인하여 제

품 치수가 기준범위를 만족하지 않는 경우가 발생하기도 한다. 이와 같은 이론적 배경에 따라 발생하는 불균일 충전 밸런스 확보를 위한 수치해석 방법을 활용한 이론적 금형설계 등에 관한 계산을 수행할 수 있지만 아직 물리적 현상에 대한 완벽한 모사는 현재 불가능한 수준이다⁹⁾.

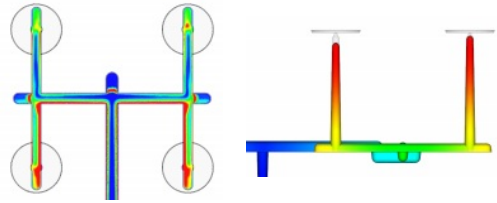


Fig. 1 CAE result of imbalanced cavity filling due to shear heating effect on transition layer between flow and frozen layer

이에 따라 본 연구에서는 기존 다수 캐비티 충전 불균일을 저감할 수 있는 방법을 응용하고 미세한 충전 균일도를 조절할 수 있는 방법과 더불어 생산성과 품질수준을 보다 높일 수 금형 설계 및 제작에 대한 연구를 수행하였으며, 에어벤트가 캐비티 충전 말단부의 성형정도에 미치는 영향을 확인하고 이를 통해 원하는 수준의 성형정밀도를 구현하기 위한 실험적 연구를 진행하였다.

2. 실험방법

본 연구 수행의 대상이 된 제품은 플라스틱 사출 성형을 통해 제작되며 이후 0.1mm 수준의 끼워맞춤 조립을 통해 제품이 완성되고 일정한 압력(1atm)이 가해지면 특정 방향으로 이동되는 제품이다.

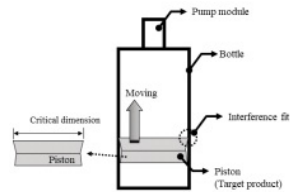


Fig. 2 Target product for injection molding balance research

Fig. 2는 연구대상 제품의 형상과 조립구조를 나타내고 있다. 연구대상인 피스톤 제품은 끼워맞춤

방식을 통해 용기 내부에 조립되고 펌프 모듈에서 내용물을 토출하면 용기의 내, 외부 압력차에 의해 내용물을 아래에서 위로 밀어주는 역할을 한다. 이때, 내용물이 피스톤 사이로 누액되지 않기 위해서는 끼워 맞춤 되는 피스톤 부분이 매우 정밀한 치수로 성형되어 피스톤과 용기 사이의 끼워 맞춤 수준을 일정하게 확보해야 한다. 이때, 피스톤 제품은 다수 캐비티 금형을 이용하여 성형 제조가 이루어지고 모든 캐비티의 성형품 치수가 매우 정밀한 수준에서 관리되면 생산성과 경제적 이득이 확보될 수 있다.

3. 실험 및 결과분석

3.1. 멜트 플리퍼(Melt flipper) 실험장치 구성

다수 캐비티 사출성형 시 발생하는 캐비티 충전 불균형을 살펴보고 이를 저감하기 위한 방법을 실증하기 위해 Fig.3과 같이 8개의 캐비티로 구성된 금형을 제작하여 실험을 진행하였다. 해당 금형은 다수캐비티 불균형 유동을 저감하기 위한 방법으로 전단발열에 의한 유동 편차를 줄이기 위한 멜트 플리퍼(Melt flipper)를 러너 분기점에 구성하였다. 이와 동시에 멜트 플리퍼(Melt flipper)에서 조절될 수 없는 수준의 캐비티 밸런스 조절을 위해 유동거리 조절장치도 함께 구성하였다. 금형의 구조와 형상은 Fig. 3에 나타내었으며 사출성형 테스트 조건은 Table 1과 같다.

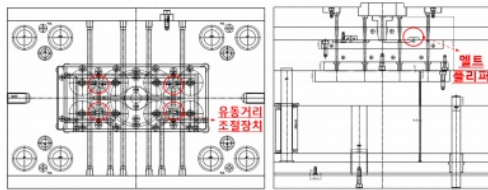


Fig. 3 Multi-cavities mold design

Table 1 Injection molding condition

Parameters	level
Flow rate[cm ³ /sec]	7.85
Metering[mm]	50
V/P Switch-over[mm]	18
Packing pressure[MPa]	25
Packing time[sec]	5
Material	PP(Grade: J-560S)

3.2. 유동거리 조절장치 실험장치 구성

유동거리 조절장치는 캐비티별 러너 분기점에서 멜트 플리퍼(Melt flipper)를 회전하여 분기점에서 캐비티까지의 유동거리를 조절하는 형태로 말단의 각 2개씩의 캐비티의 유동거리를 비례하여 조절할 수 있도록 하였다. 즉, 유동거리를 조절함으로써 2개의 캐비티 중 1개는 유동거리가 줄어들고 줄어든 거리만큼 다른 한 개 캐비티의 유동거리는 늘어난다. 이에 따라 8개의 캐비티를 조절하기 위해 2개의 캐비티가 한쌍으로 묶여 상호 조절되며 모두 4개의 유동거리 조절장치를 구성할 수 있었다.

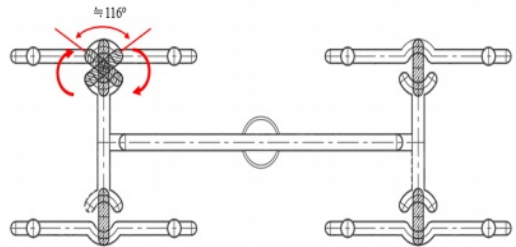


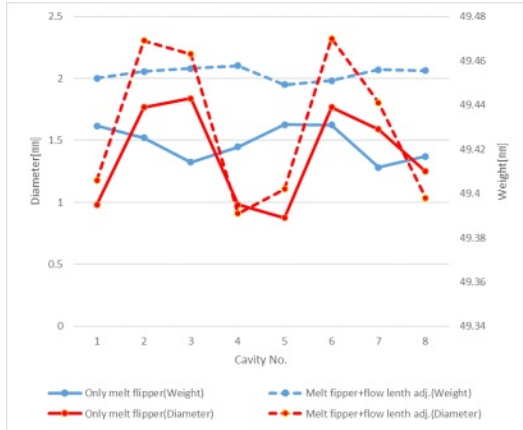
Fig. 4 Adjustment component for melt flow length of runner

Fig. 4는 피드계(Feed system)에서 유동거리 조절 장치의 위치와 동작범위를 나타내고 있다. 유동거리 조절장치는 약 116°의 작동 범위를 갖도록 설계되었으며 이에 따라 14.9mm 길이를 갖는 조절장치의 조정에 따라 최대 11.58mm의 유동거리 차이를 2개의 캐비티에 적용할 수 있다.

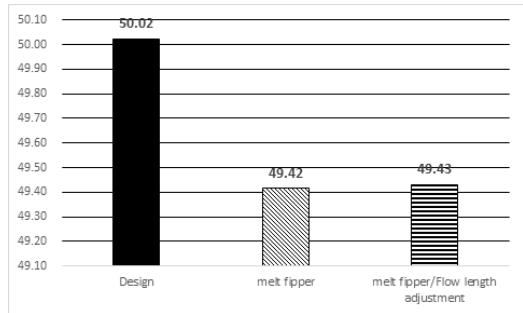
3.3. 캐비티별 유동 균형도 실험 결과

분기점에서 멜트 플리퍼(Melt flipper), 유동거리 조절장치를 통해 저감될 수 있는 캐비티별 불균형 유동은 실험을 통해 저감수준을 분석했다. Table 1 조건으로 성형된 캐비티 별 성형품의 중량과 직경을 측정하여 멜트 플리퍼(Melt flipper), 유동거리 조절장치의 영향도를 분석하였다. 멜트 플리퍼(Melt flipper), 유동거리 조절장치를 이용한 결과 멜트 플리퍼(Melt flipper)만 사용한 결과에 비해 유동거리 조절장치와 멜트 플리퍼(Melt flipper)를 동시에 사용한 경우 캐비티별 중량의 편차가 보다 감소하고 캐비티별 직경 형상은 두 경우 모두 유사한 경향과 편차를 보였다. 그 결과는 Fig.5와 같다. 캐비티 간 직경 형상에 대한 편차를 줄임과 동시에 평균 성형정

도도 설계치에 근접하도록 성형되기 위해서는 위 두 가지 방법 이외에 캐비티 편차에 영향을 미치는 다른 요인이 더 있음을 가정하였으며 이 가정 조건이 유동거리에 미치는 영향에 대해 실험적 고찰을 진행하였다



(a) Product weight and diameter respect to cavities between only melt flipper adjustment and melt flipper/flow length adjustment.



(b) Average diameter according to experiment condition

Fig. 5 Mold core design for experience of flow length comparison according to air vent depth

3.2 에어벤트에 따른 사출성형 유동거리 변화에 관한 실험적 분석

사출성형품은 금형의 캐비티에 용융된 수지가 충전되는 방식으로 제품이 완성된다. 이때, 용융된 수지가 충전되는 공간은 공기가 채우고 있었으며 금형이 닫힌 상태에서 용융된 수지는 캐비티 밖으로 이 공기를 밀어낸다. 이때, 닫힌 금형에 있던 공기는 금형의 에어벤트(Air vent)를 통해 외부로 배출된

다. 이때, 에어벤트의 폭, 깊이에 의한 크기에 따라 성형되는 정도의 차이가 발생할 수 있다고 가정된다.

이를 실험적으로 고찰하기 위해 아래와 같은 테스트 금형을 제작하였다. Fig. 6과 같은 형태로 에어벤트의 깊이를 다르게 조정할 수 있는 코어 블록을 제작하여 최종 목표로 하는 사출성형 정도인 유동거리(Flow length)를 측정하고 비교하였다. 유동거리를 비교하기 위한 부분은 두께 0.6mm, 폭 3mm의 형상을 가지며 유동거리 비교 부분과 접해 있는 에어벤트는 깊이 0.00mm ~ 0.03mm로 0.01mm 간격으로 에어벤트 가공 블록을 교체하여 실험하였다. 사출성형 조건과 수지는 동일하게 적용하였다.

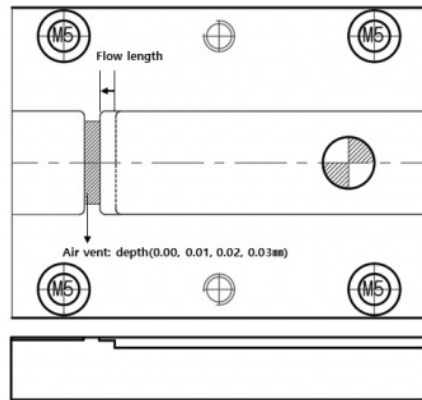


Fig. 6 Mold core design for experience of flow length comparison according to air vent depth

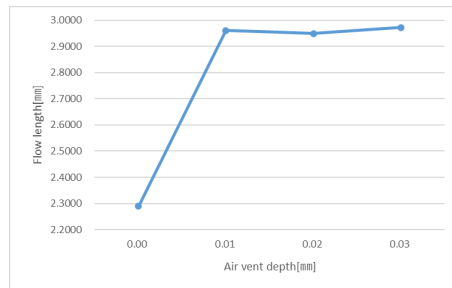


Fig. 7 Flow length result according to air vent depth

에어벤트 미적용 및 적용 상태에 따라 약 0.6mm 이상의 유동거리 차이를 보였다. 에어벤트 깊이에 따른 유동거리 측정 구간은 길이가 결과는 Fig. 7의 그래프에 표기하였으며 Fig. 8은 이때 생성된 충전 말

단부의 모습을 사진으로 나타내었다. 이에 따른 결과는 멜트 플리퍼(Melt flipper), 유동거리 조절 장치 등을 통해 조절된 캐비티별 유동 밸런스가 최종적으로는 에어벤트 유무에 따른 영향에 의해서도 약 0.6mm 수준의 유동거리 차이가 발생할 수 있다. 높은 수준의 캐비티 별 충전 밸런스 확보를 위해서는 피드계에서 발생한 진단발열 기반 충전 불균형 조절을 위한 유동 거리 조절뿐만 아니라 캐비티 내부 유동 저항을 저감할 수 있는 충분한 에어벤트 확보가 필요하다.

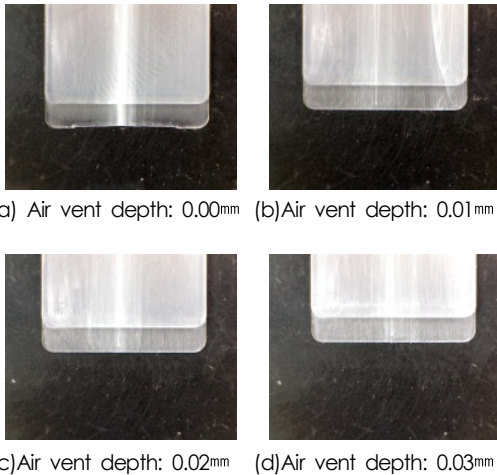


Fig. 8 Flow states comparison at end of flow according to air vent depth

3.3 적용 수지별 유동 밸런스 제어 효과 분석

캐비티별 충전 밸런스 확보를 위해 연구된 결과는 다양한 종류의 고분자 수지를 이용한 사출성형 결과에 동일한 효과를 가져야 하며 이를 실증적으로 확인하기 위한 실험이 필요하다. 이를 확인하기 위하여 온도, 속도, 압력에 따라 서로 다른 수준의 점도를 가지는 고분자 수지를 선택하여 이에 대하여 멜트 플리퍼(Melt flipper), 유동거리 조절 장치, 에어 벤트를 모두 적용한 경우와 비교하여 보았다.

이에 PP, ABS, PETG 3가지 종류의 고분자 수지를 에어벤트가 적용된 8 캐비티의 금형을 이용하여 멜트 플리퍼(Melt flipper), 유동거리 조절장치(가변코어)의 적용 유, 무에 따라 생성되는 밸런스 제어 정도를 확인하는 실험을 진행하였다. 충전 밸런스는 러너 분기점을 기준으로 내, 외측 제품의 중량을 측정하여 목표가 되는 기준 중량과의 편차 비율을 충

전밸런스도(Degree of filling balance, DOF) 비율로 나타냈다. 충전 밸런스도를 구하는 방법은 식(3)과 같다.

$$DOF(\%) = 1 - \frac{W_H - W_C}{W_H} \quad (3)$$

다양한 고분자 수지를 적용한 경우에도 멜트 플리퍼(Melt flipper)와 유동거리 조절 장치를 적용한 충전 밸런스 확보 방안을 이용하여 8-cavity 사출금형에서 98% 이상의 다수 캐비티 충전 밸런스 확보가 가능함을 확인할 수 있었다.

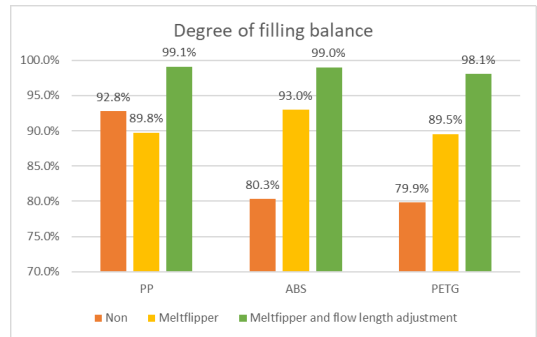


Fig. 9 Balance rate according to polymer material

4. 결론

사출성형 방법을 이용한 생산공정 적용 시 높은 생산성과 품질수준을 만족하기 위해서는 다수 캐비티의 충전 밸런스 충족이 가장 선행 시 되어야 할 부분이며 이를 위한 방법으로 고분자의 유변학적 특성을 고려한 기존 멜트 플리퍼(Melt flipper)를 적용함과 동시에 각 캐비티 별 유동거리를 미세하게 조정할 수 있는 금형 구조를 적용함으로써 다수 캐비티의 충전 밸런스 확보를 도모할 수 있었다.

이외에도 에어벤트에 따른 유동거리 변화를 고찰 하였으며 적절한 수준의 에어벤트를 균일하게 적용 하였을 경우 보다 높은 수준의 캐비티별 밸런스 확보가 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) Jang, M.K., Jo, I.K., Lee, O.S., and Jeong, Y.D., “A Closed-Loop-control System for Filling Balance in the Hot Runner Mold with Multi-Cavities”, Proc. Kor. Soc. D. M. Conf., Vol.9:1 pp.23-26, 2015.
- 2) Han, S.R., “Verification of gate balancing equation using injection molding analysis”, Proc. Kor. Soc. D. M. Conf. Vol.12:3 pp.55-59, 2018.
- 3) Alam, K. and Kamal, M.R., “A Robust optimization of injection molding runner balancing”, Computers & Chemical Engineering, Vol.29 pp.1934-1944, 2005.
- 4) John, P.B., “Runner and Gating Design Handbook Tools for Successful Injection Molding 3rd Edition”, Hanser, 2020.
- 5) Jung, T.S., Jang, J.H., and Kim, J.S., “A Study on the Filling Pattern Imbalance by Width of Gate in the Thin Plate Injectio Molding”, Proc. Kor. Soc. D. M. Conf., Vol.11:1 pp.14-18, 2017.
- 6) Jeong, Y.D., and Jang, M.K., “A New Runner System Melt-Buffer for Filling Balance in Injection Mold”, Proceeding of mold machining symposium, pp.101-107, 2008.
- 7) Jeong, Y.D., “Development of Runner System for Filling Balance in Multi Cavity Injection Mold”, Proceeding of mold machining symposium, pp.13-16, 2005.
- 8) Park, H.P., Cha, B.S., Kang, J.G., and Rhee, B.O., “The study on the filling balance of LDPE/ABS/PA66 resin using variable-runner system”, Proceeding of KSME Annual Meeting, pp.1-6, 2006.
- 9) Zhang, H., Fang, F., Gilchrist, M.D., and Zhang, N., “Precision replication of micro features using micro injection moulding: Process simulation and validation”, Journal of Manufacturing Process, Vol.177 pp.236-248, 2019.

저자 소개

손종인 (Jong-In Son)



- 2023년 8월 인천대학교 기계공학과(공학박사)
- 2009년~2013년: 한국생산기술연구원, 금형성형연구그룹, 연구원
- 2018년~2021년; (주)연우, 금형기술센터, 차장
- 2021년~현재: LG이노텍, Lens 내재화TASK, 책임연구원

< 관심분야 >

사출금형, 사출성형, CAE, 제조기술

김철기 (Chul-Ki Kim)

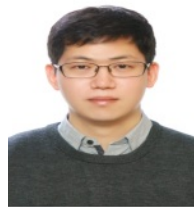


- 2020년 2월 인하대학교 기계공학과(공학석사)
- 2015년~현재 : (주)HK연우 금형기술센터 선행파트
- 2022년 3월~ 현재 인하대학교 금속재료공정공학과 박사과정

< 관심분야 >

금형설계 및 제작, 사출 공정

송병욱 (Byeong-Uk Song)



- 2013년 2월: 인천대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재: 인천대학교 기계공학과 박사과정

< 관심분야 >

사출금형, 마이크로 절삭가공