한국산학기술학회논문지
Vol. 9, No. 5, pp. 1119-1124, 2008

페트용기 성형을 위한 프리폼 사출성형 및 블로우 성형의 실험 및 해석에 관한 연구

김정순[1*], 김종덕[2], 김옥래[2], 권창오[3]

Study on numerical analysis and experiment of the injection/ blow molding of a preform of PET Bottle

Jeong-Soon Kim[1*], Jong-Deok Kim[2], Ok-Rae Kim[2] and Chang-Oh Kwon[3]

요 약 본 연구는 성형해석 및 실험적 방법을 통하여 페트 용기의 두께 편차를 최소화하기 위한 프리폼 최적화 설계를 수행하였다. 사출성형과정을 정확하게 묘사하기 위하여 3차원 모델을 이용하여 충진, 보압 및 냉각해석을 통하여 최적의 프리폼 설계변수를 설정하였으며, 이 결과를 이용하여 블로우 성형해석을 수행하였다. 성형해석결과를 평가하기 위한 사출성형 및 블로우 성형 실험을 수행하였으며, 실험결과와 해석결과는 정성적으로 일치하는 것을 확인하였다. 이러한 실험결과 데이타를 설계에 반영함으로서 최적의 프리폼 형상을 얻을 수가 있었다.

Abstract This study presents the preform injection molding and the blow molding of the injection stretch-blow molding process for PET bottles. The numerical analysis of the injection molding and the blow molding of a preform is considered in this paper using CAE with a view to minimize the warpage and the thickness . In order to determine the design parameters and processing conditions in injection/blow molding, it is very important to establish the numerical model with physical phenomenon. In this study, a three dimensional model has been introduced for the purpose and flow simulations of filling, post-filling and cooling process are carried out. The simulations resulted in the warpage in good agreement with the measurements. Also, from the result of numerical analysis, we appropriately predicted the warpage, deformation and thickness distribution along the product walls.

Key Words : Preform, Injection molding, Blow molding, PET bottles

1. 서론

프리폼 사출 성형에서 발생되는 문제점을 해결하는 방법은 전통적으로 금형 설계자의 축적된 경험과 시행착오에 의존하였다. 이러한 경우 많은 시간과 비용이 필요하게 되며 또한 제품의 형상이 복잡해지고 요구되는 제품품질 수준이 높아질수록 따라 최적의 결과를 얻기가 어렵다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 실제 금형을 제작하기 전에 발생될 문제점들을 파악하기 위하여 사용되고 있는 방법으로 상용 해석 프로그램(SIMBLOW 등)을 이용하여 시행착오를 줄이고 짧은 시간에 금형을 제작할 수 있게 되었다.

이러한 과정을 이용하여 최적화를 수행하면 설계자의 작업량이 축소되며 더 좋은 결과를 더 빠른 시간에 도출할 수 있다

지난 수십년 간, 블로우 성형은 매우 급격한 성장을 가져 왔으며, 최근 엔지니어링 플라스틱의 개발이나 다차원 블로우 성형법 등 새로운 성형법의 개발에 의해 포장용기 뿐만 아니라 자동차 부품이나 산업자재 관계에 응용되고 있는 추세이다. 다양한 블로우 성형 기법 중 사출-연신 블로우(injection-stretch blowing) 성형은 강화된 물리적 상태량, 탄산음료병과 같은 제품에 중요한 가스 불투과성 상태량을 요구하는 양방향 분자배향을 가지는 병과 같은 중공 제품을

[1]아주자동차대학 자동차계열 교수
[2]한국생산기술연구원 정밀금형팀
[3]동아정밀공업(주) 부설연구소
*교신저자: 김정순(jskim@motor.ac.kr)
접수일 08년 09월 23일 수정일 08년 10월 15일 게재확정일 08년 10월 16일

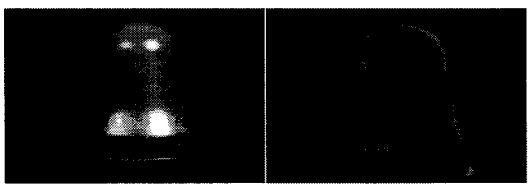
성형하는데 적용되며, 성형의 상대적인 높은 가격과 설비 때문에 탄산음료병과 같은 큰 용량의 병을 제작하는데 가장 적합하다. 그러나 페트 용기를 성형하는데 있어 가장 어려운 것은 연신율이 크게 되면 최종 두께 분포를 예측하는 것이 매우 어렵기 때문에 균일한 두께를 가질 수 있도록 프리폼 형상을 최적화 하는 것이다. 지금까지는 시행착오에 의존하며, 생산비용의 증가 및 시간 소요가 요구되었다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 효율적이고 경제적인 방법을 찾아야 한다.

본 연구에서는 블로우 성형시 페트 용기의 두께를 균일화하기 위하여 수지의 온도 및 특성을 고려한 균일한 두께의 프리폼 성능 향상을 최대화 할 수 있는 공정 기술 및 신뢰성을 향상시키는데 그 목적이 있다.

2. 프리폼 성형 해석 모델

2.1 사출성형 유한요소 모델 설정

본 연구에서 상용 프로그램을 이용하여 설계 인자와 사출 성형 조건이 성형품에 미치는 영향을 조사하기 위하여 크게 두 가지 영역을 이용하여 접근하였다. 상용 사출 해석 프로그램을 이용하여 사출 제품을 해석하기 위하여 CAD 프로그램인 UG를 사용하여 형상을 모델링하였다. 그러나 모델링한 제품 형상을 직접 사출 해석용 프로그램에 사용할 수 없기 때문에 UG NX 버전의 모델 파일을 중립 파일인 iges로 바꾸어 사출 성형 해석 프로그램의 모델 파일로 사용하였다. 사출 성형 해석 프로그램에서 사용할 수 있는 모델은 3차원 솔리드 모델, 표면만 인식하는 fusion 모델, 두께를 고려한 mid-surface 모델을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 형상 자체가 높이 방향으로 두께의 변화가 일정하기 않기 때문에 두께에 대한 유동 및 냉각 현상을 고려 하기 위하여 3차원 모델을 이용하여 해석을 수행하였다[그림 1 참조].



(a) Front view (b) section view

[그림 1] 프리폼 형상 모델링

사출 성형 및 설계 인자가 성형품에 미치는 영향을 파악하기 위하여 설계 인자 및 사출 성형 인자를 선정하고 이들 관계를 체계적으로 조사하기 위하여 컴퓨터 원용 수치 해석(CAE)를 이용한 계산을 수행 하였으며, 이 데이터를 분석함으로써 최적의 조건을 설정하였다. 이와 같은 작업으로 유도된 결과는 실제 금형을 제작하고 시험 사출을 통하여 비교함으로 신뢰성을 제공하고자 하였다.

사출 성형 해석에 사용된 유한 요소 모델은 그림 2와 같다. 프리폼에 사용된 유한 요소 모델은 3D 격자를 사용하였다. 프리폼 몸체 부분에서 스파이럴 모양의 냉각 채널을 사용하여 최대한 빨리 냉각이 이루어질 수 있도록 설계하였으며, 프리폼 안쪽 부분은 버블 형태의 냉각 채널로 구성하였다. 러너는 핫 러너를 이용하여 프리폼 아래부분에 1 점 핀포인트 게이트를 구성하여 설계 하였다.

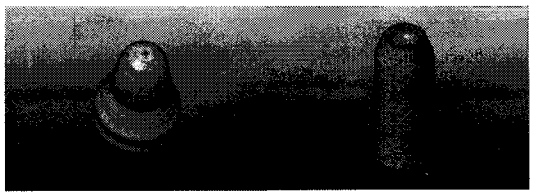
(a) 프리폼 (b) 냉각채널

[그림 2] 프리폼, 냉각채널 유한요소 모델링

2.2 블로우성형 유한요소 모델 설정

블로우 성형 해석에 사용된 일체형 용기는 탄산음료를 저장하는 용도로 사용되는 내압 페트 용기이다. 용기 형상은 축에 대해 대칭인 형상이므로 2차원 해석으로 충분이 가능하나, 해석의 정확성을 높이기 위하여 2.5 차원 해석을 수행하기 위하여 유한 요소 모델을 생성하였다.

프리폼 형상은 기존에 사용된 유사한 용기의 프리폼 외곽 형상을 이용하여 초기 프리폼 형상 설계에 적용하였다. 대부분의 프리폼 형상은 축에 대하여 대칭이므로 외곽 프로파일을 형성한 다음 축에 대하여 360도 회전하면서 격자를 생성하였다[그림 3 참조]. 또한 초기 프리폼의 두께는 일률적으로 동일하게 적용하였으며, 최적화를 통하여 용기가 균일한 두께를 가질 수 있도록 다시 설계하였다. 프리폼의 경계조건으로는 프리폼 전체가 균일하게 100℃로 가열이 된다고 가정하였으며, 용기의 목 부분은 블로우 성형기의 이송 장치에 고정되는 부분이므로 변위가 고정된다는 경계조건을 사용하였다.



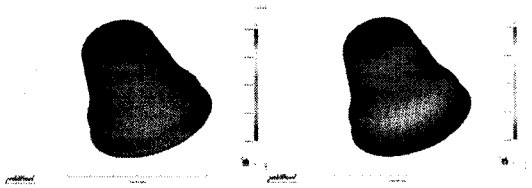
(a) Preform (b) Blow mold

[그림 3] 블로우 성형용 유한 요소 모델링

3. 사출 및 블로우 성형 해석 결과

3.1 사출성형 해석

현재 사출설계 및 공정에 대한 검증을 하기 위하여 사출성형프로그램을 이용하여 사출 해석을 수행해 보았다. 사용된 모델은 그림 2에 나타낸 프리폼을 사용하였다. 유한요소 모델은 프리폼 형상 특성상 높이 방향으로 두께가 변화하므로 현상을 잘 묘사 할 수 있는 3차원 유한요소모델을 사용하였으며, 사용된 격자수는 약 14만개이다. 러너는 핫러너, 게이트는 핀포인트를 이용하여 1점을 사용하였다. 사출성형해석에 사용된 수지는 SK 케미컬에서 생산되는 페트 수지를 사용하였으며, 사출시간 0.5 sec, 금형 온도 35℃, 용융 온도 290℃, 보압 시간 5sec 및 보압은 최고 사출압의 80%로 설정 하였다. 그림 4는 프리폼 형상을 충진하는 수지의 흐름을 나타낸 그림이며, 완전 충진까지는 약 0.53초 정도 시간이 소요 되었으며, 게이트에서 유동의 말단까지 수지가 균일하게 충진 되고 있는 것을 알 수가 있다.



(a) 0.20 sec (a) 0.53 sec

[그림 4] 프리폼 형상에서 충진과정 결과

그림 5는 프리폼 형상을 충진하는 수지의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 금형안으로 유입된 고온의 수지는 금형 벽면에 접촉된 동시에 거의 금형 온도까지 낮아지며, 중심부분에서는 고온을 유지하며 충진되는 유동 분포를 보여 주고 있다. 완전 충진후 고화된 수지와 금형의 벽면으로부터 금형냉각효과에 대해서도 영향을 받으며 서서히 냉각되고 있는 것을 보여 준다. 점성에 의해 발생된 마찰열은 고화층을 통하여 금형표면을 통하여 대기로 방출된다. 초기의 고화층은 얇으나 금형 밖으로 열전달에 의해 열이 방출되므로 수지의 온도는 낮아지게 되고 수지의 고화층의 두께는 두꺼워진다. 고화층이 가지는 열전도계수는 금형이 가지는 열전도계수보다 약 4% 밖에 되지 않기 때문에 열유동 차단 효과를 가져다 준다. 고화층은 열전달에 의한 열손실이 수지유동에 의한 마찰열과 같아지는 두께에 도달하게 되어 평형 상태를 이룬다. 사출시간이 길어지면 사출속도가 느려지고 유동에 의한 열유입이 적어지고 유로에서 발생되는 마찰열도 작아진다. 또한 금형으로의 열손실도 동시에 높아지고 고화층에 대한 열유입이 작아지므로 고화층의 두께는 두꺼워 진다. 그러므로 이는 보다 제한된 유동경로를 만들기 때문에 더 높은 사출압력이 요구된다.

(a) 0.20 sec (a) 0.53 sec

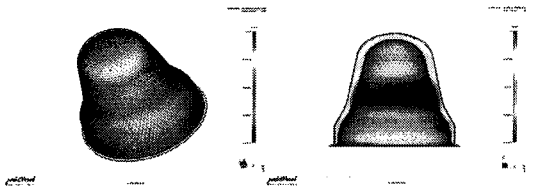
[그림 5] 프리폼 형상에서 용융수지의 온도변화

그림 6는 수지의 수축률을 나타낸 그림이다. 수축은 수지의 밀도가 냉각으로 인하여 온도가 변화할 때 발생된다. 성형품이 만들어지는 동안 전체적인 수축 차이와 제품 두께 방향으로의 수축 차이에 의하여 성형품의 내부에서 응력이 발생된다. 이는 외부에서 작용하는 응력과 비슷하므로, 성형중에 발생하는 내부응력이 성형품의 형상을 변형 시킬 정도로 크면 금형으로 취출될 때 휨이 발생하거나 약한 외부의 충격에 대해서도 파손될 위험이 있다. 게이트 부근에서의 수축률은 수지의 온도가 높고, 캐비티의 압력이 높기 때문에 냉각에 의한 수축량을 보압과정에서 수축량 만큼 보상하기 때문에 수축률이 작다. 성형품의 중간부에서는 두께가 다른 부분에 비해서 상대적으로 많이 두꺼운 형상이고, 낮은 압력과 보압 과정 중 수축된 양 만큼 수지를 충진하기 전에 고화되기 때문에 상대적으로 게이트 부근에서 보다 큰 수축을 보여 주고 있다.

[그림 6] 프리폼 형상에서 수지의 수축율

그림 7은 프리폼에서 발생하는 변형량을 나타내는 그림이다. 이러한 변형량의 차이는 내부의 잔류응력의 형태

로 나타나고, 이러한 잔류응력은 제품의 휨을 유발 시키는 원인이 되므로 성형 공정에서 발생되는 수축률의 차이를 되도록 적게 하는 것이 휨을 발생시키는 원인을 줄일 수가 있다. 특히 이러한 프리폼 형상에서는 좌우 두께 편차에 의해 최종 제품인 PET용기 두께의 균일화에 큰 영향을 미치므로 사출성형시 이러한 불량을 미리 방지할 수 있도록 설계에 반영되어야 한다.

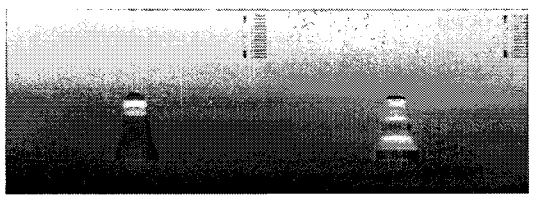


(a) 전체 형상 (b) Section 단면도

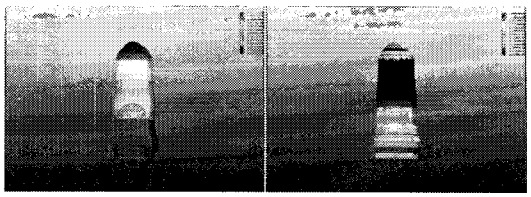
[그림 7] 프리폼 변형량 분포

3.2 블로우성형 해석

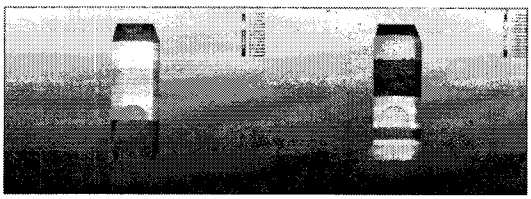
2-stage 성형기에서는 프리폼을 공급받아 성형기의 가열부를 지나면서 가열된다. 그러나 이러한 구간을 지나면서 적외선 램프에서 발산되는 열에 의해 부분적으로 균일하게 가열되지만 전체적으로 볼 때 어느 정도 온도 구배를 가지게 된다. 두꺼운 부분에서는 높은 온도로 얇은 부분에는 낮은 온도로 가열하여 전체적으로 균일한 두께 분포를 가질 수 있도록 조절한다. 이렇게 가열된 프리폼은 금형 안으로 삽입되고 일차적으로 연신봉에 의해 프리폼이 연신된 다음 저압의 공기압에 의해 성형되고 그 후 고압에 의해 완전한 용기 모양이 성형된다. 이러한 과정을 blow 성형 전용 해석 프로그램인 SIMBLOW를 이용하여 해석 하였다. 성형 공정에서는 약 0.4초 동안 연신봉에 의해 프리폼이 연신되고 0.2초 동안 저압인 6기압에 의해 블로우 성형되고, 30기압을 4.4초 동안 유지함으로써 용기가 블로우 성형되는 과정을 해석하였다. 이러한 공정은 용기의 모양에 따라 성형 조건은 조금씩 다르지만 본 연구에서 적용되는 유사한 용기의 성형 과정을 모델로 적용하였다.



(a) Deformation 0.1sec (b) Thickness 0.1sec



(c) Deformation 0.5sec (d) Thickness 0.5sec

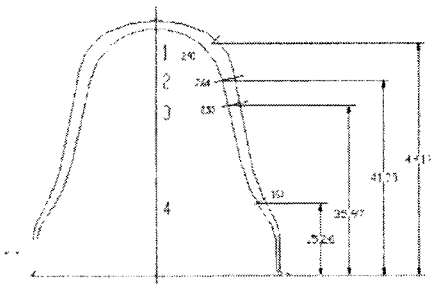


(e) Deformation 0.6sec (f) Thickness 0.6sec

[그림 8] 시간에 대한 프로폼 블로우 성형 형상

4. 사출 및 블로우 성형 실험

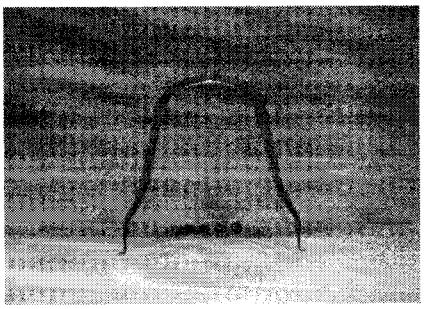
프리폼 사출 금형의 설계를 위하여 상기에서 진행된 해석을 토대로 하여 적용하였다. 해석에서 도출된 결과와 지원 업체의 실제 적용되고 있는 설계 데이터를 조합하는 방향으로 진행되었으며 지원 업체의 요구를 충분히 반영하여 설계 및 제작하였다. 사출 성형 실험은 프리폼 전용 사출기를 사용하여 2개의 타입 대하여 적용해 보았으며, 적용된 프리폼 형상은 아래와 같다[그림 9 참조]



[그림 9] 프리폼 두께 분포

사출성형된 프리폼에서 발생되는 불균일한 두께편차는 블로우 성형시 최종제품인 페트 용기의 두께 불균일을 가져오기 때문에 사출성형제품에서 이러한 문제점을 해결해야 최종제품에서 양품을 얻을 수가 있다. 그래서 사출성형으로 제작된 프리폼의 양측 두께를 측정하여 프리폼의 편육여부를 확인 할 수가 있다. 그림12는 사출성

형된 최종 프리폼의 두께분포를 나타낸 것이고, 표1은 샘플링된 프리폼 두께 편차 측정치이다.. 두께편차 실험은 사출성형으로 제작된 프리폼의 양측 두께를 측정하여 두께편차 여부를 확인한 결과 치수편차 4.7% 이내로 매우 양호한 제품을 얻을 수 있었다.

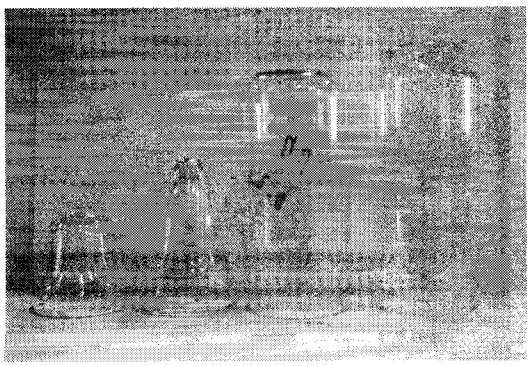


[그림 10] 시사출 프리폼

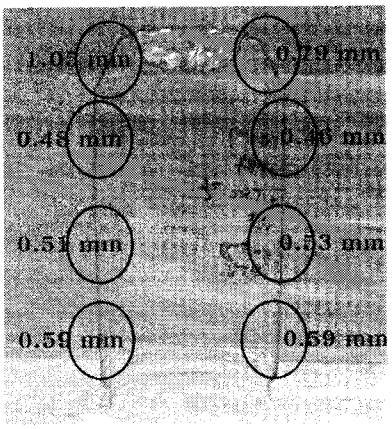
[표 1] 샘플링된 프리폼 두께 편차 측정표

측정위치	도면치수	실측치수(좌)	실측치수(우)	치수편차
1	2.90	2.96	3.01	2.0/3.7%
2	2.64	2.65	2.68	0.3/1.1%
3	2.50	2.45	2.61	2.0/4.4%
4	1.67	1.68	1.75	0.5/4.7%

그림 11은 샘플링된 프리폼을 이용하여 시간에 따른 블로우 성형과정을 나타낸 그림으로 블로우 성형과정은 해석에 나타난 성형과정과 유사한 결과를 보여 주고 있으며, 성형품의 양측 두께편차도 거의 균일한 양호한 제품을 성형할 수가 있었다.



[그림 11] 시간에 따른 페트용기 블로우 성형과정



[그림 12] 페트용기 두께분포

5. 결 론

본 논문에서는 페트 용기의 두께 균일화를 위하여 사출성형 해석 및 사출-연신 블로우 해석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 수행 방법의 타당성을 실험 결과와 비교하였다.

(1) 해석을 통한 예측 결과가 실험 결과와 비교했을 때 정성적으로는 비슷한 경향을 보여 주었으나 정량적으로는 약간의 오차를 보였다. 이러한 원인은 재료의 물성, 실험 및 해석시 경계 조건들이 차이로 인하여 발생되었다고 생각된다.

(2) 블로우 해석을 통하여 연신분포 결과를 이용한 결과 프리폼의 두께 분포를 최적두께를 0.50mm로 보았을 때 0.46~0.59mm의 두께 분포로 프리폼 설계 최적화에 활용할 수가 있었다.

(3) 본 연구에서 진행된 방법은 휨, 변형, 두께 분포 등을 적절히 예측함으로써, 사출 및 블로우 성형시 공정에 대한 기본 자료를 제공함으로써 설계자의 작업량과 생산비용을 절감할 수 있었다.

참고문헌

[1] F. M. Schmidt, J. F. Agassant, and M. Bellet, *Simul. Mater. Proc. Numiform 92,* 383(1992)

[2] W. P. Haessly and M. E. Ryan, *J. Polym. Eng. Sci. 33,* 1279(1993)

[3] W. P. Haessly and M. E. Ryan, *ANTEC ' 89,* 934(1989)

[4] K. Hartwig and W. Michaeli, *Simul. Mater. Proc. Numiform 95,* 1029(1995)

[5] J. P. MCEVOY, C. G. ARMSTRONG, and R. J. CRAWFORD "Simulation of the Stretch Blow Molding Process of PET Bottles" *Advancds in Polymer Technology, Vol.17, NO.4, 339-352, 1998*

[6] Z. J. Yang, E. Harkin-Jones, G. H. Menary, C. G. Armstrong "Coupled temperature-displacement modelling of injection stretch-blow moulding of PET bottles using Backley model" *Journal of Materical Processing Technology 153-154 (2004) 20-27*

[7] SONG WANG and AKITAKE MAKINOUCHI "Three-Dimensional Viscoplastic FEM Simulation of a Stretch Blow Molding Process" *Advancds in Polymer Technology, Vol.17, No. 3, 189-202, 1998*

[8] Z. J. YANG, E. HARKIN-JONES, G.H. MENARY, and C. G. ARMSTRONG "A Non-Isothermal Finite Element Model for Injection Stretch-Blow Molding of PET Bottles With Parametric Studies" *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, JULY 2004, VOL.44, NO.7, pp.1379-1390*

김 정 순(Jeong-Soon Kim) [정회원]

- 1983년 2월 : 충남대학교 기계공학교육과(공학사)
- 1993년 2월 : 충남대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1997년 3월~2008년 9월 현재 : 아주자동차대학자동차계열 교수

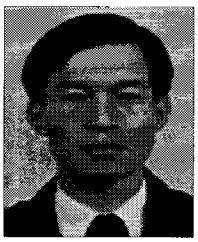
<관심분야>
금형설계/제작, CAD/CAM, 생산관리

김 종 덕(Jong-Deok Kim) [정회원]

- 1981년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계설계학과(공학사)
- 1997년7월~2002년7월:한국생산기술연구원 해외사무소 수석연구원/소장(유럽)
- 2002년8월~현재 : 한국생산기술연구원 정밀금형팀 수석연구원/팀장

<관심분야>
금형설계/제작, CAD/CAM

김 옥 래(Ok-Rae Kim) [정회원]



- 2003년 2월 : 서울산업대학교 기계공학과(공학사)
- 2008년10월 현재 : 인천대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중
- 2008년 10 현재 : 한국생산기술연구원 정밀금형팀 연구원

<관심분야>
금형설계/제작, CAD/CAM

권 창 오(Chang-Oh Kwon) [정회원]

- 1992년 2월 : 영남대학교 기계공학교육과(공학사)
- 2000년 2월 : 영남대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 2008년 10월 현재 : 동아정밀공업(주)부설연구소장

<관심분야>
금형설계/제작, CAD/CAM