

고분자 패키징 용기 중량 절감을 위한 프리폼 설계에 관한 연구

김정순^{1*}

¹아주자동차대학 자동차계열

Study on Preform Design for Reducing Weight of PET Packaging Bottle

Kim Jeong Soon^{1*}

¹Dept.of Automobile development, Ajou motor college

요 약 본 연구에서는 성형해석 및 실험적 방법을 통하여 페트 용기의 두께 편차를 최소화하기 위한 프리폼 최적화 설계를 수행하였다. 사출성형과정을 정확하게 묘사하기 위하여 3차원 모델을 이용하여 충전, 보압 및 냉각해석을 통하여 최적의 프리폼 설계변수를 설정하였으며, 이 결과를 이용하여 블로우 성형해석을 수행하였다. 성형해석결과를 평가하기 위한 사출성형 및 블로우 성형실험을 수행하였으며, 실험결과와 해석결과는 정성적으로 일치하는 것을 확인하였다. 이러한 실험결과 데이터를 설계에 반영함으로써 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

지난 수십 년간, 블로우 성형은 매우 급격한 성장을 가져 왔으며, 최근 엔지니어링 플라스틱의 개발이나 다차원 블로우 성형법 등 새로운 성형법의 개발에 의해 포장, 용기뿐만 아니라 자동차 부품이나 산업자재 관계에 응용되고 있는 추세이다. 다양한 블로우 성형 기법 중 사출-연신 블로우(injection-stretch blowing) 성형은 강화된 물리적 상태량, 탄산 음료병과 같은 제품에 중요한 가스 불투과성 상태량을 요구하는 양방향 분자 배향을 가지는 병과 같은 증공 제품을 성형 하는데 적용되며, 성형의 상대적인 높은 가격과 설비 때문에 탄산음료병과 같은 큰

용량의 병을 제작하는데 가장 적합하다.

기존의 플라스틱 포장용기는 1-단계(stage) 사출-연신 블로우 성형공정을 통하여 성형 되고 있으나, 포장용기의 두께가 두꺼워져 원가상승 요인 및 불량요인으로 작용하고 있다. 그러나 프리폼 설계 및 2-단계(stage) 사출-연신 블로우 성형 공정으로 대체함으로써 고분자 원재료의 저감이 가능하고, 식품 포장용기가 요구하는 기존제품의 강도와 강성을 확보할 수 있는 얇은 박판의 포장용기 제조가 가능하다.

페트를 이용한 포장용기를 성형하는데 있어 가장 어려운 것은 연신율이 크게 되면 최종 두께 분포를 예측하는 것이 매우 어렵기 때문에 균일한 두께를 가질 수 있도록

*교신저자 : 김정순(jskim@motor.ac.kr)

접수일 09년 08월 04일

수정일 (1차 09년 12월 08일, 2차 09년 12월 24일)

개제확정일 10년 01월 20일

프리폼 형상을 최적화 하는 것이다. 지금까지는 시행착오에 의존하며, 생산비용의 증가 및 시간 소요가 요구되었다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해 효율적이고 경제적인 방법을 찾아야 한다.

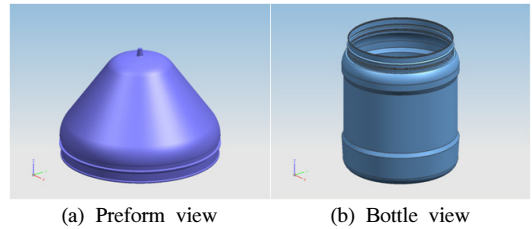
이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구자들은 블로우 성형 과정에 대한 수치적 묘사를 진행하였다. 열성형(Thermoforming)과 관련해 진행 중인 연구그룹 중 소수의 연구자에 의해 사출-연신 블로우 성형 과정의 묘사에 대한 연구를 진행하였다. 이들 가운데는 Schmidt et al[1]은 변형 거동을 뉴턴 유동(Newtonian flow)으로 가정하였으며, 타당성 있는 두께 분포를 구하였으나 계산된 플러저 힘은 측정된 결과와 맞지 않았다. Haessly과 Ryan[2][3]은 사출-블로우 성형과정의 자세한 실험적 연구를 진행 시켰으며, 그것을 묘사하는데 네오후크 구성방정식을 도입하였다. 그러나 재료의 변형된 모양을 정확히 묘사하는 데는 실패하였다. Hartwig[4]은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/STANDARD를 이용하여 연신 블로우 성형해석을 수행하였다.

이와 같은 이전 연구들은 블로우 성형 시간에 따른 형상의 변화 및 두께변화에 대한 연구내용에만 국한되어 있다. 본 연구에서는 프리폼 설계변수 및 공정 변화에 따라 포장용기의 두께에 해석적인 방법을 이용하여 예측하고 실험을 실시하여 타당성을 검증하고자 한다. 검증된 결과를 토대로 설계 및 공정변수가 제품에 미치는 영향을 분석하고 균일한 두께를 가질 수 있도록 프리폼 설계 및 공정 변수를 최적화 하는데 논문연구의 목적이 있다.

2. 프리폼 블로우 성형 수치해석

2.1 해석모델 설정

본 연구에서 상용 블로우 성형해석 프로그램을 이용하여 설계 인자와 블로우 성형조건이 성형품에 미치는 영향을 계산해 보고자 한다. 블로우 성형제품을 해석하기 위하여 CAD 프로그램을 사용하여 형상을 모델링하였다. 그러나 모델링한 제품 형상을 사용할 수 없기 때문에 중립 파일인 iges로 바꾸어 사용하였다. 블로우 성형 해석 프로그램에서 사용할 수 있는 모델은 두께를 고려한 셸(shell) 모델만을 적용할 수가 있으며, 적용된 모델은 그림 1과 같다.



[그림 1] 형상 모델링

2.2 수치적 해석방법

해석적인 방법의 프리폼 형상 설계는 실제의 사출-연신 블로우 성형의 과정을 통하지 않고 초기의 프리폼 형상을 바탕으로 어떠한 블로우 성형이 이루어지는지를 예상하기 위한 수치적인 해석을 통한설계를 의미한다. 이러한 일련의 과정을 토대로 프리폼의 형상 설계를 가능하게 할 뿐만 아니라 블로우 성형 공정 조건을 최적화할 수가 있다. 이를 위해서는 블로우 성형해석에 적용되는 다양한 물성치나 공정조건의 정확도 및 수치 해석의 알고리즘 적용 방법에 따라 많은 영향을 받는다. 블로우 성형을 하기 위한 성형해석 프로그램은 다른 해석 프로그램에 비하여 보편화되어 있지 않다.

플라스틱 성형 소프트웨어 중 하나인 SIMBLOW는 대변형 문제에 대하여 극히 안정적인 유체 해석 기술을 기반으로 개발된 구조 해석 프로그램으로 프리폼 등의 성형 중간체의 금형 내 구속 팽창 시의 거동을 묘사하고, 두께나 온도 분포의 시간 변화를 예측할 수 있다는 장점을 지니고 있으며, 본 계산에 사용된 지배방정식과 constitutive 방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \nabla \cdot T + \rho g \quad (2)$$

$$\tau = 2\eta D \quad (3)$$

여기서

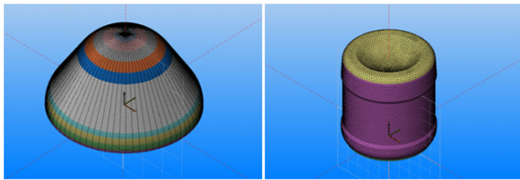
V : 속도	ρ : 밀도
g : 중력가속도	t : 시간
τ : 응력	η : viscosity
D : 변형률	

2.3 유한요소 모델, 경계조건 및 구속조건

블로우 성형 해석에 사용된 용기는 식용 저장하는 용도로 사용되는 주입구가 넓은 상압 페트 용기이다. 용기 형상은 축에 대해 대칭인 형상이므로 2차원 해석으로 충분이 가능하나, 해석의 정확성을 높이기 위하여 2.5 차원

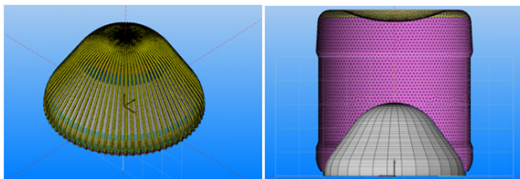
해석을 수행하기 위하여 유한 요소 모델을 생성하였다.

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 2 참조].



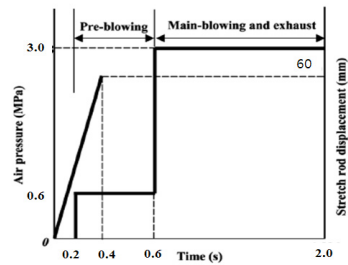
(a) Preform (b) Blow mold
[그림 2] 블로우 성형용 유한 요소 모델링

또한 초기 프리폼의 두께는 일률적으로 동일하게 적용하였으며, 최적화를 통하여(Try error 방식) 용기가 균일한 두께를 가질 수 있도록 다시 설계하였다. 프리폼의 경계조건으로는 프리폼 전체가 균일하게 100℃로 가열된다고 가정하였으며, 용기의 목 부분은(그림3 (a)에서 맨 아랫부분) 블로우 성형기의 이송 장치에 고정되는 부분이므로 변위가 고정된다는 구속조건을 사용하였다[그림 3 참조].



(a) Preform (b) Blow mold
[그림 3] 경계조건 및 구속조건

프리폼을 연신-블로우 성형 시 변형은 연신 붐에 의한 축 방향, 공기압에 의한 반경방향으로 일어나고, 공기압을 이용한 성형공정은 다시 2가지의 세부 공정으로 나누어진다(예비 블로우와 메인 블로우). 예비 블로우는 연신 붐이 축 방향으로 이동시 가열된 프리폼이 연신되는 과정 중에 연신 붐에 접촉을 막고, 1차적으로 병의 형상을 성형하는 공정으로 저압을 이용하여 블로잉 한다. 메인 블로우는 고압을 이용하여 최종적인 병의 형상을 성형하는 과정이다. 본 연구에서는 약 0.6초 동안 저압 블로잉 및 0.4초 동안 연신 붐이 축 방향으로 이동(60mm)하고, 2초 동안 30기압의 공기압을 이용하여 최종 형상을 성형하도록 공정 조건을 설정하였다.



[그림 4] 공정 조건 : 연신붐의 이동, 예비 블로우와 메인 블로우 공기압 및 시간

3. 블로우 성형 해석 결과 및 결론

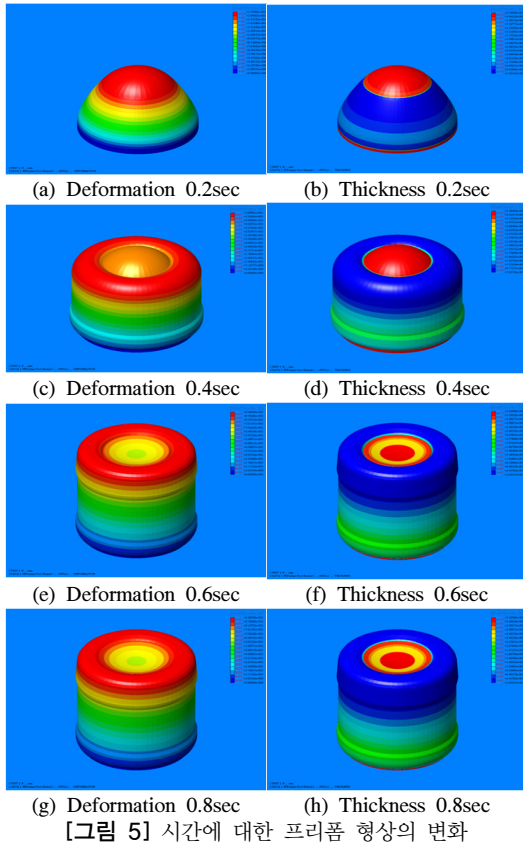
3.1 프리폼 형상 최적화

현재 프리폼 설계 및 공정에 대한 검증은 하기 위하여 블로우 성형프로그램을 이용하여 블로우 해석을 수행해 보았다. 사용된 모델은 그림 3에 나타난 프리폼을 사용하였다. 초기 설계단계에서는 높이에 따른 프리폼 두께를 3.5mm로 균일하게 설정하여 해석을 진행하였으며, 제품 최종 목표인 두께가 0.6 ~ 0.7mm 편차 안에 들어갈 수 있도록 최적화를 위하여 Try error 방식을 통해 설계를 변경하였으며, 해석에 적용된 블로우 공정 조건은 그림 4와 같다.

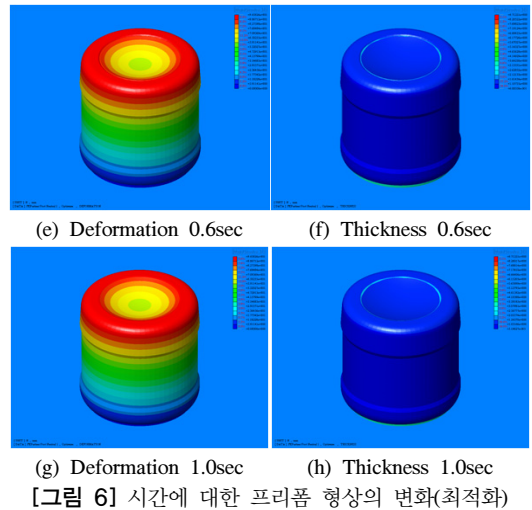
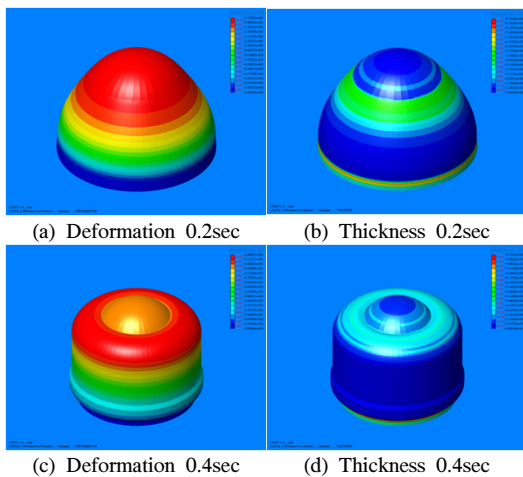
그림 5는 시간에 따른 성형과정을 나타낸 그림이다. 변형되는 형상은 연신붐이 축방향으로 이동됨에 따라 가열된 프리폼에 접촉이 된다. 접촉된 프리폼 부분에서는 열이 연신붐으로 전도되어 다른 부분보다 온도가 낮아져 변형이 일어나지 않는다(그림 5 (b), (d) 윗부분 참조). 연신붐이 시간에 따라 위쪽으로 이동됨에 따라 프리폼의 아래 부분부터 연신이 일어나기 시작한다.

일차적으로 축 방향으로 연신이 일어난 후 저압에 의해 이차적으로 반경 방향으로 연신이 진행이 된다. 반경 방향으로 성형이 진행되는 과정에서 금형에 의해 구속을 받게 되고 금형에 접촉된 프리폼은 온도가 낮아져 더 이상 변형이 일어나지 않는다. 그래서 변형 구간이 짧은 곳에서는 다른 부분들 보다 두께가 두꺼워진다(그림 5 (d), (f)의 하단 부분). 그리고 변형이 크게 일어나는 부분에서는 아랫부분보다 변형되는 길이가 길어지므로 두께는 얇아진다(그림 5 (d), (f)의 상단 부분). 이러한 원인들로 인하여 전체적인 벽면의 두께 불 균일, 중량의 증가 및 강도가 약해지는 원인이 된다. 이러한 문제점을 프리폼의 형상 및 두께 설계를 최적화함으로써 해결하고자 한다. 그림 6은 최적화 과정에서 시간에 따른 프리폼 변형 및 두께 분포를 보여 주는 그림이다. 먼저 최종적인 제품의

두께분포는 0.6mm ~ 0.7mm(현업 설계 스펙사항)의 편차에 들어올 수 있도록 제품의 바닥부는 제품을 지지할 수 있고 두께 편차가 1.3mm 이내 분포할 수 있도록 프리폼 두께를 조절하였다[표 1 참조:측정위치는 그림7의 숫자임].



[그림 5] 시간에 대한 프리폼 형상의 변화

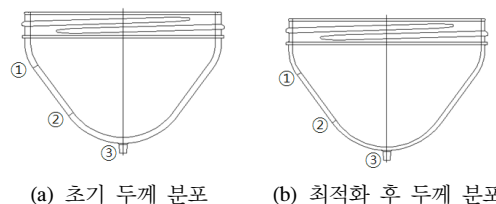


[그림 6] 시간에 대한 프리폼 형상의 변화(최적화)

4. 블로우 성형 실험

프리폼 설계를 위하여 상기에서 진행된 해석을 토대로 하여 적용하였다. 해석에서 도출된 결과와 현업에서 실제 적용되고 있는 설계 데이터를 조합하는 방향으로 진행하였다. 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 입, 출구쪽에 온도 센서를 장착하여 실시간으로 온도를 피드백하여 조절하였다. 이렇게 가열된 프리폼은 금형 안으로 삽입되고 일차적으로 연신봉에 의해 프리폼이 연신된 다음 저압의 공기압에 의해 성형되고 그 후 고압에 의해 완전한 용기 모양이 성형된다[그림 9 참조].

사출 성형 실험은 프리폼 전용 사출기를 사용하여 적용해 보았으며, 적용된 프리폼 형상은 아래와 같다[그림 7 참조]



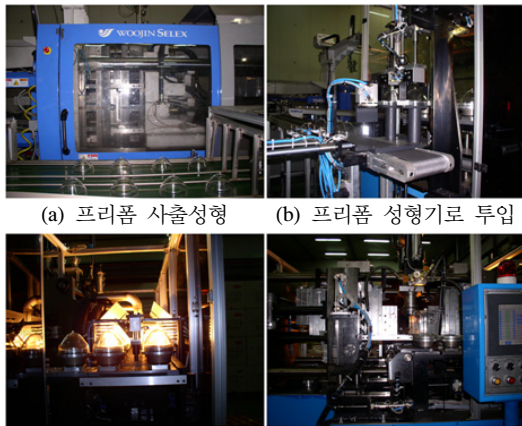
(a) 초기 두께 분포 (b) 최적화 후 두께 분포

[그림 7] 설계변경 전후 프리폼 두께 분포

[표 1] 프리폼 두께 설계치

측정위치	수정전	수정후
1	3.50	2.35
2	3.50	2.70
3	3.50	1.85

사출성형된 프리폼에서 발생하는 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 하였으며, 양품의 프리폼을 이용하여 블로우성형 실험을 수행하였다. 그림8은 최종제품을 얻기 위하여 실험과정을 보여주는 그림이다. 프리폼 사출성형과정, 사출된 프리폼을 블로우 성형기로 이송, 이송된 프리폼을 적외선 램프로 가열 및 블로우 성형하는 과정을 보여주는 그림이다(그림 8 (a), (b), (c) 및 (d) 참조).



(a) 프리폼 사출성형 (b) 프리폼 성형기로 투입
(c) 프리폼 가열 (d) 블로우 성형
[그림 8] 프리폼 사출성형 및 블로우 성형

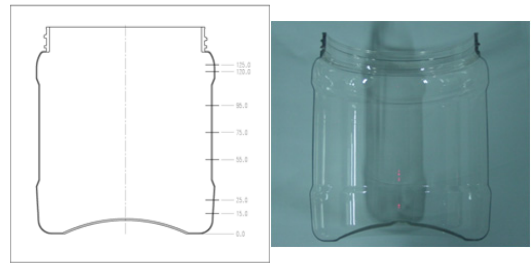


(a) 샘플링 제품 높이측정 (b) 샘플링 제품 중량측정
[그림 9] 샘플링 제품 측정결과

[표 2] 페트용기 높이 및 중량 측정

시편	실측 높이(155 ± 1.5)	실측 중량(92 ± 1.0)
1	156.17	92.19
2	154.95	92.12
3	154.50	92.85

그림 9는 샘플링된 프리폼을 이용하여 블로우 성형 실험 수행 과정으로 이전의 블로우 성형해석에 나타난 결과와 현업에서 사용하고 있는 공정을 바탕으로 실험을 수행하였으며, 성형된 용기를 나타낸 그림이다. 블로우 성형 후 제품에 양부를 판단할 수 있는 제품의 높이와 중량 측정을 하였다. 샘플링된 용기 모두 요구 스펙사항을 만족함을 알 수가 있었다. 그림 10은 스펙사항을 만족하는 용기를 사용하여 용기두께를 높이 방향에 따라 측정한 그림으로 용기의 두께는 중간부에서는 두껍게 그리고 하단부로 갈수록 두께가 얇아지는 경향을 보여주고 있다(약 0.15mm의 편차, 표.3 참조). 이것은 성형결과와 유사한 경향을 보여 주고 있다.



[그림 10] 페트용기 두께분포

[표 3] 샘플링된 프리폼 두께 편차 측정표

측정위치	목표두께 (mm)	용기높이 (mm)	실측두께 (mm)	치수편차 (mm)
1	0.60	15.0	0.55	-0.05
2	0.60	25.0	0.61	0.01
3	0.60	55.0	0.68	0.08
4	0.60	75.0	0.73	0.13
5	0.60	95.0	0.58	-0.02
6	0.60	120.0	0.58	-0.02
7	0.60	125.0	0.68	0.08

5. 결론

본 논문에서는 페트 용기의 두께 균일화를 위하여 사출-연신 블로우 해석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 수형 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 해석 시 경계 조건들이 차이로 인하여 발생되었다고 생각된다.
- (2) 블로우 해석을 통하여 연신분포 결과를 이용한 결과 프리폼의 두께 분포를 최적두께를 0.6mm~0.70mm(현업 설계 스펙 사항)로 보았을 때 0.55~0.73mm의 두께 분포로 프리폼 설계 최적화에 활용할 수가 있었다.
- (3) 본 연구에서 진행된 방법은 두께 분포 등을 적절히 예측함으로써, 블로우 성형 시 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 MAKINOUCI " 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)

[종신회원]



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

<관심분야>

금형설계/제작, CAD/CAM, 생산관리