

불균일 측벽두께 Jar의 곡률반경에 따른 CAE 해석

신남호^{1*}, 최석종²

CAE Analysis on the Radius Curvature of Ununiformed wall-thickness Jar

Nam-Ho Shin^{1*} and Seok-Jong Choi²

요 약 본 논문에서는 다양한 곡률반경의 연속에 의하여 살 두께 차가 큰 사출성형품이 불균일한 수축에 의한 변형 발생에 대하여 연구하였다. SAN 및 PMMA 재료의 Jar에 대한 균일냉각구조와 최적성형조건을 CAE해석에서 구하여 금형설계에 적용하고자 사출성형의 주요인자인 사출압력, 수지온도, 금형온도, 냉각조건 등을 Moldflow 프로그램에서 사출압력, 수지온도, 냉각속도 등에 의한 변형 및 불량현상을 분석하였고 이들을 극소화시킬 수 있는 냉각구조와 사이클 시간을 단축시킬 수 있는 사출성형조건을 제시하였다.

Abstract This paper is aimed to investigate the deformation caused by ununiform contraction of injection molding with highly big differences of thickness by the continuity of various curvature radius. By CAE analysis, the uniform cooling structure and optimum molding conditions are found for Jars made of SAN and PMMA materials and applied to the design of chill. In order to evaluate the molding pressure, resin temperature, molding temperature, cooling conditions, Moldflow program is applied. As results of experiments, the deformation and inferiority phenomena in Jars are analyzed for each factor and proposed the injection molding conditions to minimize the cooling structure and reduce the cycle time.

Key words : CAE, Jar Vessel, optimum molding condition, contraction deformation, non-continuity curvature

1. 서 론

합성수지재료가 개발 생산되어 일용품으로부터 산업기기 및 첨단기기부품까지 광범위하게 사용되고 있다. 이를 성형 가공하는 사출성형과정을 충전, 보압, 냉각으로 크게 분류하며, 충전과정은 Spencer와 Gilmore [1, 2]의 실험적 연구에 의하여 금형내 수지 유동상태에 관한 연구가 진행 되었고 [3, 4] 보압과정 중에는 점성모델과 수지의 압축성이, 냉각과정에서는 온도와 수축률에 따른 수지의 물성치 변화의 중요성을 언급하였으며, Sherbelis와 Field [5]는 충전과 보압단계에서 수지의 전단율과 온도 의존성에 관하여 연구하였다. 냉각과정 중

고화 층 두께변화해석에서 캐비티 입구의 고화 층 두께 과다계산의 단점을 보완하기 위하여 Richardson [6]은 원형관내의 유동과 평판내의 유동에 대하여 마찰열 발생을 고려하여 고화 층의 두께 및 온도분포의 계산을 위한 식을 제시하였으나 보압, 냉각과정에서 수지의 복잡한 거동으로 발생하는 수축현상에 대하여 이론적으로 충분하게 설명되지 못하고 있다. 웰드라인 부의 구조에 대한 고찰은 Malguarnera 등에 의하여 이루어졌다. 사출 성형제품의 요구된 품질은 압력, 온도, 게이트 개수, 고분자 재료의 특성, 성형성 등 복잡하고 다양한 변수 관계를 가지고 있어 다양한 지식과 오랜 경험이 요구되는 어려운 기술이다.

다양한 곡률반경의 연속에 의한 살 두께 차가 있는 성형제품은 고분자 재료의 특성에 의하여 고압 사출 성형시 충전, 보압과 균일한 냉각여부가 변형

¹공주대학교 기계자동차공학부

²(주)다인산업

*교신저자: 신남호(nbshin@kongju.ac.kr)

에 많은 영향을 주므로 현장전문가의 축적된 경험에 의하여 시행되고 반복적인 시행착오를 통하여 근접된 제품을 얻을 수 있었다. 그러나 비 정규화된 자료에 의존함으로써 금형설계의 신뢰성에 치명적인 오류를 발생시킬 수 있고, 제품품질을 저하시키는 문제가 발생한다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여서는 전문가들의 축적된 지식과 경험정보를 전산화 제공하고, CAE 프로그램을 활용하여 상호 보완적으로 설계할 수 있는 합리적인 설계시스템의 구축이 필요하다. 본 연구에서는 불균일 축벽두께 Jar용기 금형의 냉각구조를 최적화하여 면 수축의 변화를 최소화하며, 일정한 곡률을 가지는 제품을 성형할 수 있는 가능성을 평가하고 냉각방식 변화에 따른 냉각시간 단축효과를 위하여 유동해석을 실시하였다.

2. 냉각이론

금형에서의 냉각은 용융수지가 금형 내에서 고화하여 제품이 금형으로부터 변형 없이 이형 될 수 있도록 하는 과정이며, 사출성형품의 품질은 성형 사이클마다 냉각회로에 의한 열평형조건에 따라 크게 달라지므로 금형표면온도를 균일하게 유지하는 것이 가장 이상적이다. 냉각시간은 배럴온도, 금형온도와 러너시스템을 조합한 성형품의 살 두께에 따라 크게 좌우된다. 냉각이 충분히 되면 성형품의 변형은 작으나 사이클 시간이 길어지고 성형품 이형이 좋지 않으며, 냉각시간이 짧으면 충분히 고화되지 않으므로 이형시 외력에 의해 치수가 불안정하거나 변형되어 캐비티 치수를 정확히 재현시키지 못한다. 냉각에 관련되는 설계인자로는 냉각수로의 형상, 위치, 크기, 냉각수의 온도 및 유량 등이 있다.

금형냉각에 필요한 냉각수 구멍설계는 열량이동을 고려하여야 한다. 수지에서 금형으로 이동하는 열량과 금형에서 냉각수로 들어가는 열량 사이에 등값의 경우가 성립하며 열량은 냉각수가 갖는 열량과도 동일하게 된다. 만약 수지의 결정 잠열 및 다른 부분으로부터 금형이 흡수하는 열량과 금형이 대기 중이나 사출성형기로 빼앗기는 열량이 없다고 가정하면 단위시간당 수지로부터 금형으로 이동하는 열량 Q는

$$Q = \frac{P_1}{H} C_P \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

P₁은 수지의 중량, H는 시간, C_P는 수지의 비열 금형에서 냉각수로 들어가는 열량 Q'는

$$Q' = mCp(T_{ow} - T_{iw}) \dots\dots\dots(2)$$

m은 냉각수량, ρ는 냉각수 밀도, C는 냉각수 비열, T_{ow}는 출구에서 냉각수 온도, T_{iw}는 입구에서의 냉각수 온도

$$Q'' = \pi d l \lambda (T_M - T_{wm}) \dots\dots\dots(3)$$

과 같이 표시되고, d는 냉각수 구멍의 직경, l은 냉각수 구멍의 길이, λ는 막 전달계수, T_M은 금형온도, T_{wm} 냉각수 평균온도이다. 여기서 Q=Q'=Q''이고, T_M-T_{iw}=T로 놓으면

$$l = \frac{2Qmcp}{\pi d \lambda (2Tmcp - Q)} \dots\dots\dots(4)$$

식(4)에서 냉각수 구멍의 길이를 구할 수 있다. 냉각수 구멍의 형상이 도중에 변화하면 막 전달계수가 변하고 압력변화가 발생하므로 주의하여야 한다. 한편 냉각은 Fourier의 열전달 방정식에 의해서 표현된다.

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \dots\dots(5)$$

성형품의 냉각은 주로 두께방향 z축으로 일어난다고 가정할 수 있으므로 식(5)은 다음과 같이 근사화가 될 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots\dots\dots(6)$$

전체적인 생산성을 향상시키기 위해서는 냉각시간을 최소화시킬 수 있는 열 교환 시스템을 가진 금형으로 언제나 캐비티 표면온도를 균일하게 유지하면서 면 수축, 휨, 외관의 표면광택 차이 등을 피할 수 있도록 설계되어야 한다.

3. 다층두께인 Jar용기의 유동 및 변형해석

본 연구는 다양한 곡률반경에 의한 불균일 측벽 두께 제품의 성형과정에서 발생하는 변형과 사이클 시간문제를 효율적으로 해결하기 위하여 3차원 모델링과 Moldflow 프로그램을 활용하여 냉각구조에 따른 유동, 냉각, 변형해석과 이상적인 냉각구조에 의한 수지 SAN, PMMA의 최적의 성형조건을 모색하고자 한다.

3.1. 제품형상 및 냉각회로

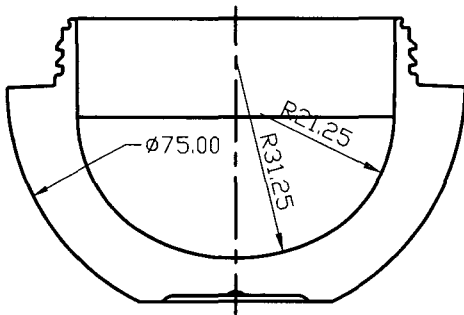
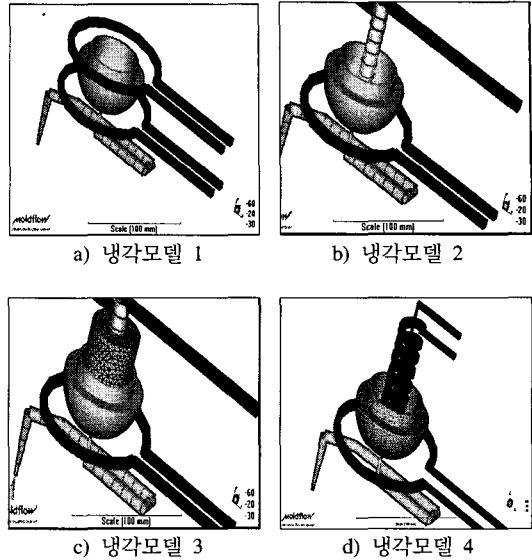


그림 1. Jar용기 단면도

[그림 1]은 불균일 측벽두께 Jar용기의 단면도이다. Jar용기 살 두께는 2.35mm부터 11.45mm까지 두께차가 다양하며, 제품외측은 동일 곡률반경, 내면은 직선과 곡률반경이 다른 2개의 곡선에 의하여 연속되어 있다. 2중 곡률반경의 연속에 의한 불균일 측벽두께 성형품의 두께 편차에 따른 수축으로 제품 내면의 곡률에 단차가 발생하여 코팅 후 불균일한 반사율이 나타나며, 두꺼운 제품두께에 의한 냉각시간 지연으로 생산성이 떨어지는 것이 예견된다. [그림 2]는 캐비티의 냉각채널에 따른 냉각모델을 도식한 것으로 각각 a)는 캐비티와 하코아의 외부에 원형 냉각회로를 설치한 것이고, b)는 캐비티 코아의 외부에 원형 냉각회로와 하코아에 버플식 냉각회로를 설치하였다. c)는 캐비티 코아의 외부에 원형 냉각회로와 하코아(Be-Cu)에 버플식 냉각회로를 설치하였으며, d)는 캐비티의 외측과 하코아 내측에 나선형 냉각회로로 구성하였다.



[그림 2] 냉각모델

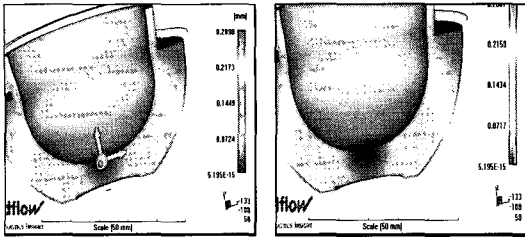
3.2 PMMA수지의 유동해석

3.2.1 해석조건 및 유동형태

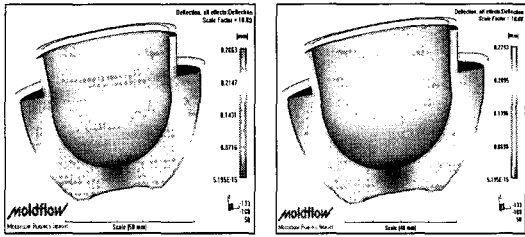
사용수지는 LG화학 IF850(PMMA)이며, 금형온도 45℃, 수지온도 240℃, Cycle time 120초, 사출시간 2.5초, 보압은 45Mpa의 성형조건에서 유동해석한 결과 어느 냉각회로를 사용하던지 캐비티 수지의 충전은 원활하게 이루어지며, 충전 중 문제점은 발견되지 않았으나 게이트 근처와 두께의 편차가 심한 제품의 목 부근에서 사출 속도의 변화에 의하여 표면에 Flow mark가 발생할 가능성이 있다.

3.2.2 변형의 형태

이 제품은 살 두께의 변화가 급격하여 수축율의 편차가 크게 발생되며 이는 변형 발생의 원인이 되며, 냉각방식을 변경하면 수축율의 편차가 다소 완화되고 변형이 감소하며 내측면 곡률의 변화도 최소화 할 수 있다. [그림 3]은 냉각에 대한 변형해석의 가시적 결과이다. 내측 바닥 면을 기준으로 변형된 크기를 비교하면 두께가 두꺼운 부분에서 [그림 3] a)는 최대 0.2898mm, b)는 최대 0.2867mm, c)는 최대 0.2863mm, d)는 최대 0.2793mm의 변형이 발생한다.



a) 모델 1의 변형상태 b) 모델 2의 변형상태



c) 모델 3의 변형상태 d) 모델 4의 변형상태

그림 3. 냉각모델 변형상태

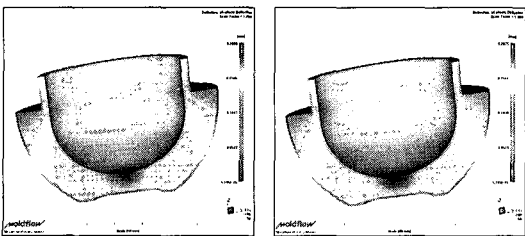
3.3 SAN수지의 유동해석

3.3.1 해석조건 및 유동형태

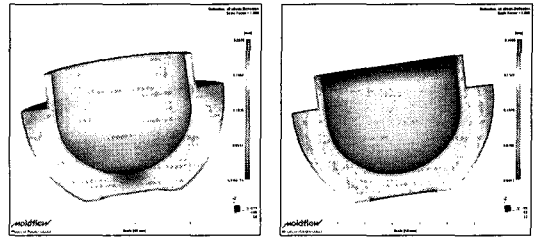
사용수지는 금호석유화학 SAN350, 금형온도 45℃, 수지온도 200℃, Cycle time 120초, 사출시간 2.5초, 보압 45Mpa의 성형조건에서 온도, 압력 등의 분포는 PMMA수지와 차이가 있었지만 충전 형태와 변형모습은 유사하였다. 성형불량은 관측되지 않았고 수축과 변형은 PMMA보다 작았다.

3.3.2 변형의 형태

[그림 4]의 a)~d)는 각각 냉각모델에 대한 변형 해석 결과이다. 내측 바닥면을 기준으로 변형 크기를 비교하면 두께가 두꺼운 부분에서 [그림 6] a)는 최대 0.2086mm, b)는 최대 0.2075mm, c)는 최대 0.2076mm, d)는 최대 0.1998mm의 변형이 발생한다.



a) 모델 1의 변형 b) 모델 2의 변형



c) 모델 3의 변형 d) 모델 4의 변형

그림 4. 냉각모델 변형

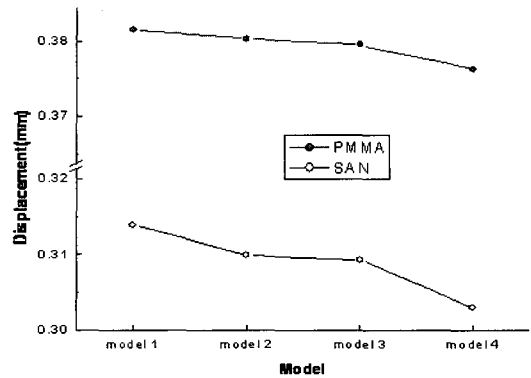


그림 5. 수지별 냉각모델에 의한 변형량

[그림 5]는 [그림 3, 4]의 각 수지에 대한 냉각 모델별의 변형량을 비교한 것으로, 변형의 형태는 SAN수지와 PMMA수지가 유사하게 냉각방식에 의한 영향이 있으며 SAN수지가 PMMA수지보다 전체적으로 변형이 작고 냉각모델 4에서 변형이 가장 작은 것으로 나타난다.

3.4 PMMA수지의 변형해석

3.4.1 금형온도에 따른 변형의 형태

사용수지는 PMMA(LG화학 IF850)이며 수지온도 200℃, Cycle time 110sec, 사출시간 2.5초, 보압 45 Mpa, 냉각모델 4를 적용하고, 금형온도를 45℃, 50℃, 55℃, 60℃, 70℃로 변화시켜 해석한 결과 [그림 6]과 같이 60℃의 금형온도를 유지하는 것이 가장 적은 변형량을 보이고 있다. 또한, 또한, 그림으로부터 얻어진 온도 상관관계는 3차원 다항식으로 곡선맞춤으로 그림에 나타난 것과 같다.

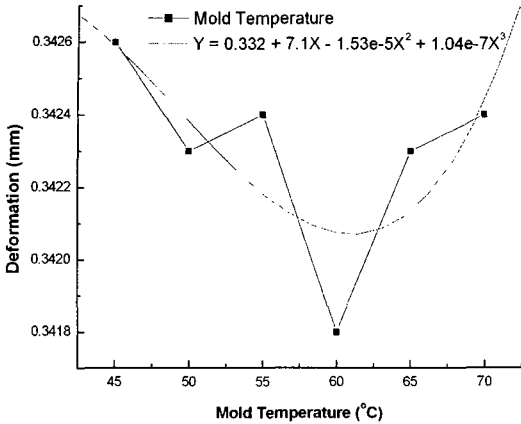


그림 6. 금형온도에 의한 변형량

3.4.2 수지온도에 따른 변형의 형태

3.4.1의 해석조건에서 금형온도 60°C와 수지온도 180°C, 200°C, 230°C, 250°C, 270°C의 각각의 경우에 대하여 사이클 시간을 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140초로 변경 해석결과 [그림 7]과 같이 수지온도가 낮을수록 변형량은 적으며, 사이클 타임에는 크게 영향력을 받지 않고 있다.

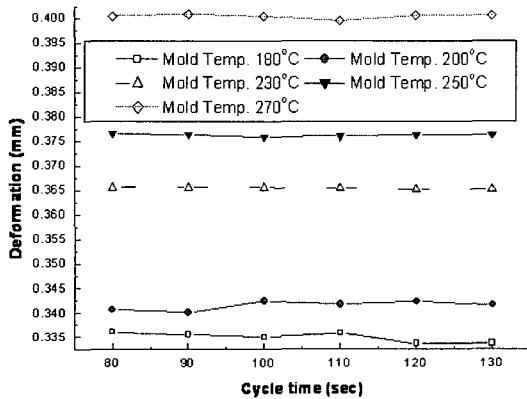


그림 7. 수지온도별 사이클 타임에 의한 변형량

3.5 SAN수지의 변형해석

3.5.1 금형온도에 따른 변형의 형태

사용수지는 금호석유화학 SAN350이다, 적용된 설정조건은 수지온도 220°C, 사이클 타임 110초, 사출시간 2.5초, 보압 45Mpa, 냉각모델 1~4의 해석조건에서 금형온도를 35°, 40°, 45°, 50°,

55°, 60°로 변화시켜 해석한 결과는 [그림 8]과 같다. 그림으로부터 40°C의 금형온도를 유지하는 것이 가장 적은 변형량을 보이고 있다.

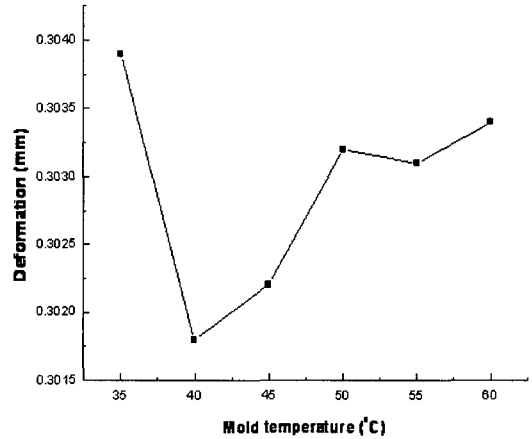
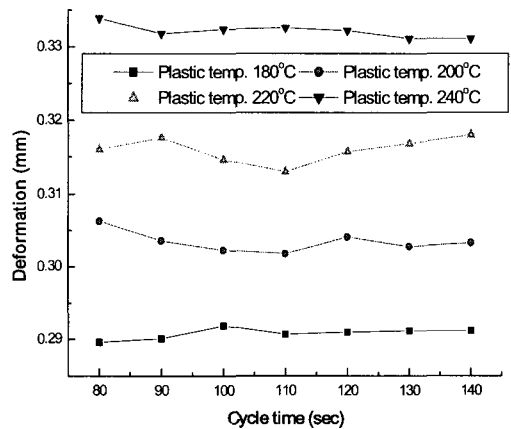


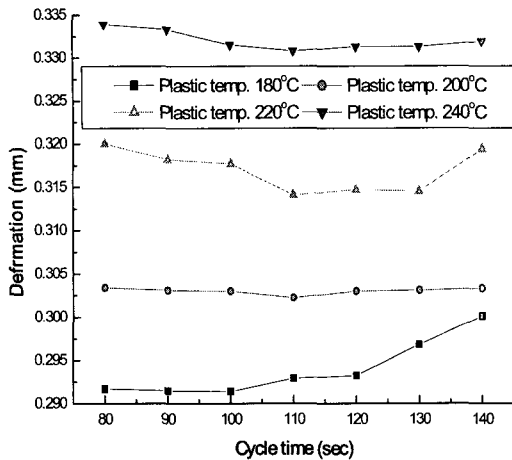
그림 8. 금형온도에 의한 변형량

3.5.2 수지온도에 따른 변형의 형태

3.5.1의 조건 중 금형온도 40°C, 45°C에서 수지온도 180°C, 200°C, 220°C, 240°C의 각각의 경우에 대하여 사이클 시간을 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140초로 변경시킨 결과 그림과 같이 수지온도가 낮을수록 변형량은 적으며, 사이클 타임에는 크게 영향력을 받지 않고 있다.



a) 금형 40°C



b) 금형 45°C

그림 9. 수지온도와 사이클 의한 변형량

4. 결론

본 연구로부터 Jar용기 제품의 다양한 곡률반경에 의한 다층 두께인 성형품에서 살의 두께차가 3mm 이상에서는 냉각방식에 따라 생산성뿐만 아니라 품질에도 큰 영향을 주고 있다. 어떠한(냉각모델 1, 2, 3, 4) 냉각회로를 사용하던지 캐비티에 수지의 충전은 원활하게 이루어진다. 충전 중 문제점은 발견되지 않았으나 게이트 근처와 두께의 편차가 심한 제품의 목 부근에서 사출속도의 변화에 의하여 표면에 Flow mark가 발생할 가능성이 있으며 결과는 다음과 같다.

- (1) 사출압력은 게이트 통과시 최대 29MPa 까지 증가하며, 캐비티 충전 시에는 약 24MPa이 작용한다. 그러나 보압과정에서 수축을 최소화하기 위해서는 보다 높은 압력이 요구된다.
- (2) 냉각모델에 따른 변형량은 모델 1, 2, 3에 비하여 모델 4가 가장 작은 것으로 나타난다.
- (3) SAN 350 수지는 성형조건에 따라 온도, 압력 등의 분포는 PMMA수지와 차이가 있었지만 충전 형태와 변형된 모습은 유사하며, 수축과 변형은 PMMA보다 작았다.
- (4) 수지온도가 낮을수록 변형량은 작아지나, 사이클 타임에는 크게 영향력을 받지 않고 있다
- (5) 캐비티 외측을 급속 냉각시키면 내부의 과도한

체적수축으로 인하여 void와 불연속 곡률이 나타난다. 따라서 내측은 최대한 빨리 냉각시켜, 수축을 최소화함으로 가능한 연속 곡률을 유지시키고, 반면에 외측은 금형온도가 낮은 상태에서 충분한 충전이 가능한 금형 온도관리가 요구된다.

참고문헌

- [1] Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., "Some Flow Phenomena in the Injection Molding of Polystyrene", Journal Collid Science, Vol.6, pp. 118-132, 1950.
- [2] Spencer, R. S. and Gilmore, G. D., "Equation of State for High polymers", Journal of Applied Physics, Vol.21, pp. 525-526, 1950.
- [3] Kamal, M. R. and Keing, S., "The Injection Molding of Thermoplastic, Part I: Theoretical Models", Polymer Engineering and Science, Vol.12, No.4, pp. 294-301, 1972.
- [4] Kamal, M. R. and Keing, S., "The Injection Molding of Thermoplastic, Part II: Experimental Test of the Model", polymer Engineering and Science, Vol.12, No.4, pp. 302-308, 1972
- [5] Sherbelis, G, and Friedl, C., "the Importance of Low Temperature Viscosity to CAE Injection Molding Simulation", SPE ANTEC, pp. 954-957, 1992.
- [6] Richardson, S. M., "Injection Moulding of Thermoplastics : Freezing During Mould Filling", Rheologica Acta, Vol.22, No.2, pp. 223-236, 1993.

신 남 호(Nam-Ho Shin)

[정회원]



- 1971년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 1980년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1977년 4월 : 천안공업대학 금형과 교수
- 2005년 3월 : 공주대학교 기계자동차공학부(금형설계전공) 교수

<관심분야>

금형설계, 제품개발, 플라스틱 CAE

최 석 중(Seok-Jong Choi)

[정회원]



- 나주대학교 (학사)
- 1992년 4월 : 청송통상 이사
- 1998년 10월 : (주)다인산업 대표

<관심분야>

금형설계, 제품개발, 생산자동화, 나노상품개발