

플라스틱 파이프 압출시 금형 형상이 다이립 집적에 미치는 영향

서영성* · 최선웅**

(2000년 3월 8일 접수)

Influence of Die Geometry on Die-Lip Buildup in Plastic Extrusion

Y. S. Suh and S. W. Choi

Abstract

Extrusion die-lip buildup has direct and negative impact on the properties of the final product. At the present time there is no absolute method of die-lip prevention. However, a periodical shut down of extrusion line for the removal has been the general practice throughout the industry in concern. In this study the die-lip buildup was investigated with a particular attention paid to the influence of die exit geometry and dimensions on the stresses produced at the point of die exit. To demonstrate the relationship between the stress state and the magnitude of the die-lip buildup, a method of virtual manufacturing was performed, assuming elastic-plastic material behavior for the high-density polyethylene under investigation. The overall numerical results suggested that the longer the die-land and/or the smaller the areal reduction of the die would reduce the tendency for the die-lip formation. Similarly, having a fillet around the circumferential edge of the die exit would be favorable in decreasing the die-lip buildup.

Key Words : Die-Lip, Plastic Extrusion, Finite-Element Analysis, Elastic-Plastic

1. 서 론

플라스틱 재료의 압출에서 다이립(die-lip)이란 원치 않는 재료가 금형의 개구면(open face)에 쌓이는 것을

말한다. 예를 들어, Fig. 1 (a) 및 (b)에 각각 깨끗한 금형과 다이립이 집적된 금형으로부터 압출되는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE, High-Density Polyethylene) 파이프를 보인다⁽¹⁾.

* 한남대학교 기계공학과
** 한남대학교 고분자공학과

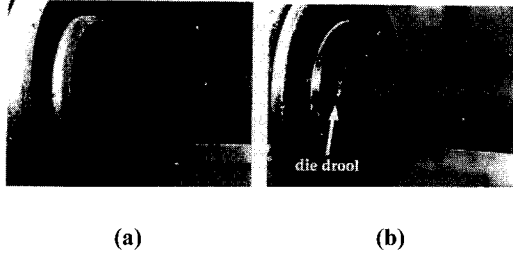


Fig. 1 Extrusion of high-density polyethylene from (a) a clean pipe die and (b) a pipe die with die-lip buildup (or die drool)⁽¹⁾

이와 같은 다이립은 제품의 미적인 질감과 기계적 성질을 떨어뜨리게 하며, 때로는 이를 정기적으로 제거하기 위하여 생산 공정 자체를 멈추게도 하여야하기 때문에 가능하면 이러한 다이립의 집적을 최소화 시켜 주어야 한다. 다이립의 최소화를 위하여 국외에서는 극히 제한적인 관련연구가 있지만 국내에서는 거의 연구된 바가 없다. Kurtz and Szaniszió⁽²⁾는 다이립의 생성 원인을 고분자의 낮은 분자량, 휘발성, 안료(pigment)가 골고루 퍼져있지 않을 경우, 압출 후 부푸는 효과, 즉, 다이 스웰(die-swell), 등으로 들었으며, Rakestraw and Waggoner⁽³⁾는 작은 금형 출구각을, Klein⁽⁴⁾은 짧은 랜드(land: 압출 단면적이 축소되는 부분)의 길이와 스크류에서의 압력 변동, Priester⁽⁵⁾는 혼합된 고분자간의 상이한 점성도와 압출 초기에 금형이 지지분한 경우를 들었다. 또한, Hinrichs⁽⁶⁾는 높은 용융온도를, Tsai and Su⁽⁷⁾는 열화온도에 가까운 가동환경을 그 이유로 들었다. 이러한 여러 원인에 대하여 다이립을 최소화하는 방법에 대한 연구도 일부 수행되었는데, 대체적으로 재료선택의 관점에서 접근한 것^(7,8)과 공구형상의 기하학적 조건을 고려하여 접근한^(3,9) 두 가지 방법으로 나뉜다. Gander and Giacomini⁽¹⁾은 다이립에 관한 국외 연구 결과를 잘 요약해 놓았다.

본 연구에서는 다이립의 집적 원인을 압출시 금형 출구에서 압출물에 생성되는 응력의 관점에서 고찰하고자 하였다. 압출된 소재의 표면에 걸리는 인장 응력이 과도할 경우, 응력 완화를 위해 첨가제 또는 저분자량 물질들이 표면으로 이동하게되며 또한, 출구 부분의 다이 스웰(die-swell)로 인하여 소재가 금형 개구부에 집중적으로 접촉함으로써 재료가 분리되어 금형에 묻어남으로써 생성되는 다이 립 집적의 실험적 관찰을 바탕으로 하여, 플라스틱 파이프를 가상 압출(virtual extrusion)함으로써 금형 출구에서 응력의 생성과 다이립 집적의 관계를 고찰하였다. Fig. 2와 Fig. 3에서는 현장에서 얻은

다이립 물질의 IR 스펙트럼(spectrum)과 GPC 스펙트럼을 각각 보여 주고 있다. 저분자량의 폴리에틸렌으로 나타나 있으므로 압출에 사용되는 폴리에틸렌이 산화 또는 전단(shear)에 의해 분해된(Fig. 2) 후, 금형 표면에 집적된 것으로 판단된다. 이는 앞에서 언급한 다이립 집적 원인을 뒷받침하는 결과이기도 하다.

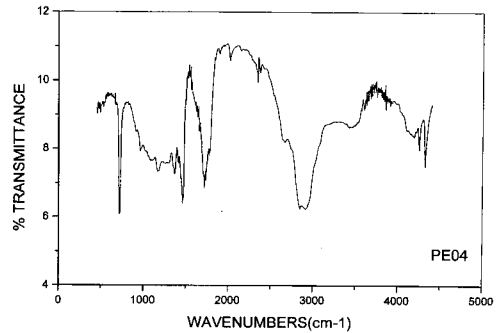


Fig. 2 IR spectrum for the die-lip material

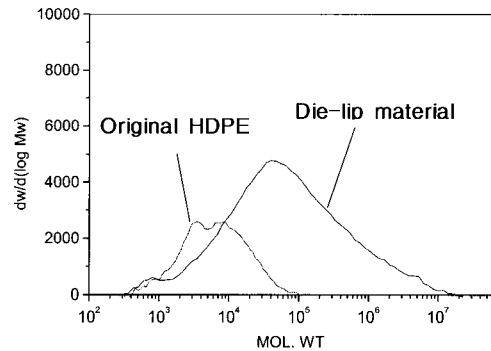


Fig. 3 GPC spectrum of HDPE and the die-lip material

2. 접근방법

모델링 대상으로서는 현재 현장에서 생산하고 있는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 파이프의 압출 공정을 선택하였다. 가상생산(virtual manufacturing)을 위한 유한요소해석은 ABAQUS v.5.8을 활용하였다. 압출 형상은 계산 시간을 줄이기 위하여 축대칭으로 모델링하였다. 압출 재료는 고밀도 폴리에틸렌이기 때문에 점탄성으로 가정하여야하나, 단순히 응력의 분포 경향 및 다이 형상에 따른 변화 경향만을 보기 위해서 계산의 편의상 탄소

성으로 가정하였다. 실제로 압출시 재료의 유동성이 크지 않아 이 가정은 비교적 합당하다고 보겠다. 참고문헌⁽¹⁰⁾과 산업체에서 제공한 고밀도 폴리에틸렌의 기계적 성질은 다음과 같다.

$$\text{탄성계수}(E) = 0.7 \text{ GN/m}^2 = 700 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{프와송비}(\nu) = 0.45$$

$$\text{항복응력}(\sigma_Y) = 25 \text{ MPa} = 25 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{밀도}(\rho) = 0.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 = 9.5 \times 10^{-10} \text{ N} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$$

ABAQUS는 내연적-정적(implicit-static) 알고리즘을 채용한 ABAQUS/Standard 및 외연적-동적(explicit-dynamic) 알고리즘을 채택한 ABAQUS/Explicit으로 나누어서 출시하고 있는데, 전자는 준정적(quasi-static) 문제를 푸는데 있어서 해의 정확도가 후자에 비해 상대적으로 높으나, 급속성형과 같이 재료와 금형 간에 광범위한 접촉이 이루어지는 경우, 후자가 훨씬 더 안정적인 해를 얻을 수 있기 때문에, 본 연구에서는 주로 ABAQUS/Explicit을 사용하였다. 성형 속도는 실제 속도에 가까운 0.1m/s로, 마찰계수(μ)는 금형 표면과 소재 사이를 매우 미끄러운 것으로 가정하여 0.01로 하였다. Fig. 4는 산업체에서 제공한 압출 금형 도면이며, Fig. 5는 축대칭 유한요소로 모델링한 압출 재료 및 금형의 형상이다. Fig. 6에는 이를 3차원적으로 도시한 것을 수록하였다. 재료가 성형되도록 위에서부터 아래 방향으로 변위 경계 조건을 주었다. 압출물(extrudate)은 축대칭 요소인 CAX4, 금형은 강성요소인 RAX2로 모델링하였다.

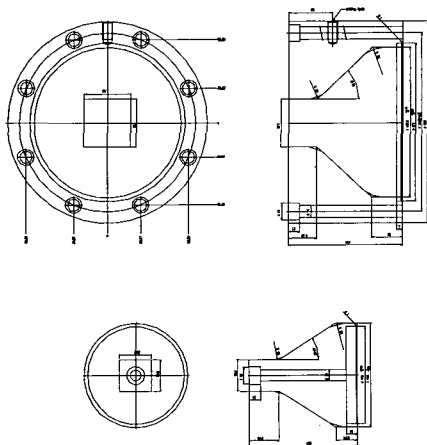


Fig. 4 Die drawing for extruding plastic pipe (Upper: Outside die Lower: Inside die)



Fig. 5 Axisymmetric finite-element model of the billet and the die for pipe extrusion

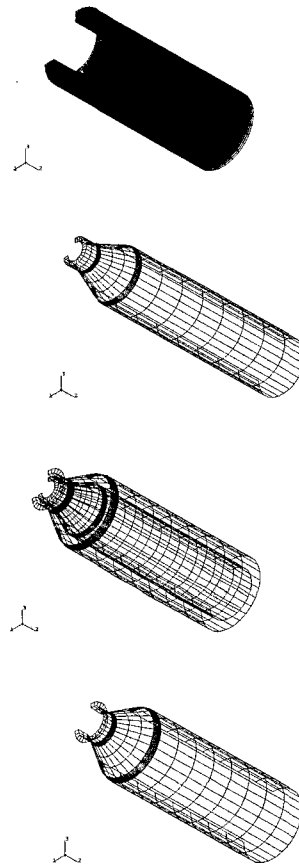


Fig. 6 Three dimensional modeling of axisymmetric model shown in Fig. 5 (Extrudate, Inside die, Outside die, and Inside and outside die assembly, from top to bottom)

3. 결 과

산업체에서 현재 생산에 사용하는 압출 금형의 경우 단면 감소비(area-reduction ratio)가 커서 압출 시뮬레이션 중 요소가 심히 변형되어 ABAQUS/Standard는 물론, ABAQUS/Explicit으로도 답을 얻을 수 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 ABAQUS/Explicit v.5.8 부터 제공되기 시작한 적응요소(adaptive mesh) 사양의 사용을 시도하였다. 적응요소는 성형 시뮬레이션 도중 유한요소가 심각하게 비틀어질 때, 이를 간파, 계산 도중 다시 요소를 생성시켜 안정된 답을 제공하는 기능으로서, ABAQUS에서는 이러한 적응요소를 효과적으로 사용할 수 있도록 ALE(Arbitrary Lagrange-Eulerian) 가정 하에 제공한다. 적응요소는 계산 도중 정기적으로 자동 생성되며, 자유표면을 용이하게 따라가며 경계조건을 쉽게 적용할 수 있는 Lagrange 가정의 장점과 요소가 변형되지 않는 Eulerian 가정의 장점을 살려 독립적으로 움직이며 계산한다. 그런데, 처음으로 채용된 ALE기반 적응요소의 정확성을 보장할 수 없어, 우선 ABAQUS/Standard에서도 계산이 가능하도록 단면 감소비가 작은 경우를 모델링하여 ABAQUS/Standard와 ABAQUS/Explicit의 적응요소를 사용한 결과를 비교해 보았다. 압출 변위는 200mm로 부여하였다. Fig. 7 (a), (b)에 각각 ABAQUS/Standard와 ABAQUS/Explicit에서의 결과, 즉, 금형 출구 지점에서 본 압출 소재의 유효 소성변형율($\overline{\epsilon^P}$)분포를 나타내었다. 파이프 안쪽 표면에 더욱 많은 소성변형이 집적된 것을 볼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 두 프로그램에서 예측된 변형 형상 및 변형율(strain) 분포가 매우 유사하였다. Fig. 8에는 von Mises응력(σ_M)의 분포를 비교하였으며 역시 매우 유사한 결과를 볼 수 있다. 이에 따라, 적응요소를 활용한 ABAQUS/Explicit으로도 ABAQUS/Standard와 거의 유사한 정확도를 낼 수 있다고 판정하였기 때문에 나머지 계산은 모두 ABAQUS/Explicit를 활용하였다.

다음 단계로서 생산현장의 실제 플라스틱 파이프 압출 공정을 시뮬레이션하여 본격적인 분석을 수행하였다. Fig. 9은 성공적으로 수행된 시뮬레이션 결과이다. 이를 금형 출구 부분으로 확대하여 Figs. 10, 11, 12에 각각 축 방향 응력(σ_2), 반경 방향 응력(σ_1), von Mises 응력(σ_M)의 분포를 수록하였다. 축 방향 응력의 경우를 관찰해보면 출구에서 나온 후 바깥쪽 표면에 인장, 안쪽 표면에 압축이 걸리는 패턴을 보여주고 있다. 특히 압출 직후의 응력 값이 최대임을 볼 수 있다. 반경 방향

응력은 안쪽이나 바깥쪽 표면 모두에 높은 인장 응력을 보여 주고 있다. 본 연구에서는 재료를 탄소성으로 가정하였지만 점탄성일 경우 이와 같은 응력의 패턴으로 인하여 인장 응력의 크기가 크고, 재료의 강성도가 낮을 경우, 재료의 분리가 일어나 다이립을 형성할 수 있는 원인을 제공할 수도 있을 것으로 예측된다. von Mises 응력의 경우를 보면 파이프의 내부에 최소 응력이, 바깥쪽에 최대 응력이 작용하는 것이 보인다. 이는 금형을 빠져 나오면서 접촉에 의한 응력의 영향을 보여준다. 또한 단면 감소율이 작았던 앞의 시뮬레이션 결과에서보다 응력의 절대값이 높은 것을 보인다.

전체적으로 보면, 압출소재의 변형량이 증가하고 응력의 절대값도 증가한 것을 알 수 있는데, 여기에 축 방향 응력(σ_2), 반경방향 응력(σ_1)의 인장 성분이 재료의 부푸는 효과, 즉, 스웰링(swelling)을 초래하여 다이립의 집적을 일으킬 수 있는 가능성이 높은 것으로 보인다.

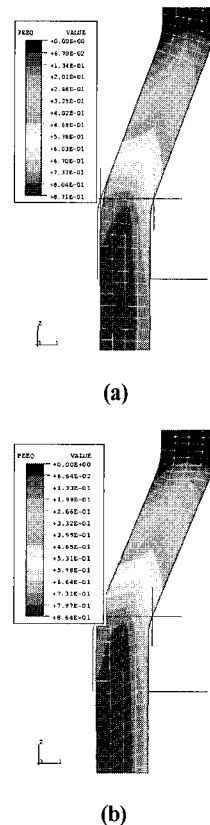


Fig. 7 Distribution of effective plastic strains($\overline{\epsilon^P}$) at the die outlet from (a) ABAQUS/Standard and (b) ABAQUS/Explicit

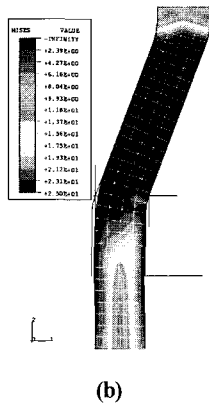
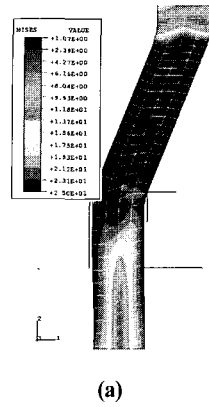


Fig. 8 Distribution of von Mises stress(σ_M) at the die outlet from (a) ABAQUS/Standard and (b) ABAQUS/Explicit



Fig. 9 Virtually extruded plastic pipe

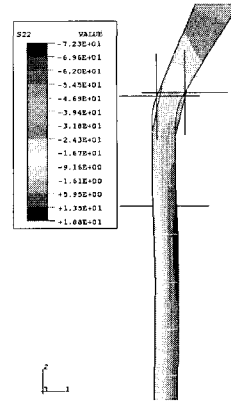


Fig. 10 Distribution of axial stress(σ_2) at the die outlet

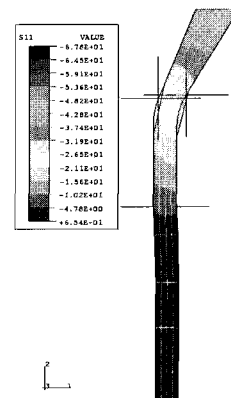


Fig. 11 Distribution of radial stress(σ_1) at the die outlet

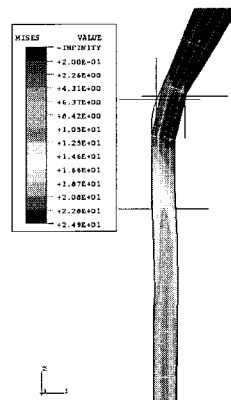


Fig. 12 Distribution of von Mises stress(σ_M) at the die outlet

따라서 생성된 응력의 관점에서만 본다면, 금형 출구 부분의 인장 응력을 줄임으로써 다이립의 집적을 다소 감소시킬 수 있을 것으로 보인다. 이를 검토하기 위하여, 이번에는 금형 랜드의 길이를 20mm만큼 늘려 압출시 소재에 걸리는 응력의 크기를 줄일 수 있는지 알아 보았다. 이렇게 한 이유는 금속 압출시 잔류응력의 크기를 줄이기 위하여 활용되는 아이어닝(ironing)의 효과를 간편히 적용하고, 아울러 길이가 짧은 금형에서는 다이립 집적의 가능성이 높다는 실험 결과의 보고 때문이기도 하였다⁽⁴⁾. Figs. 13-15에 변경된 금형으로부터 압출된 소재의 축 방향 응력(σ_2), 반경방향 응력(σ_1), von Mises 응력(σ_M)을 도시하였다. 전체적으로 금형 출구의 끝은 부분이 길어짐에 따라, 출구에서의 응력의 절대 크기가 감소한 것을 볼 수 있다. 좀 더 자세히 살펴보기 위해 Fig. 16에, 단면감소율이 크고 출구의 끝은 부분이 긴 경우와 짧은 경우, 그리고 단면감소율이 작고 출구 부분이 짧은 경우에 각각 축 방향 응력(σ_2)과 반경 방향의 응력(σ_1)을 비교하였다. 그림에서 보듯이, 단면 감소율이 커짐에 따라 축 방향 응력의 크기는 줄어들었으나 반경 방향 응력은 증가함을 볼 수 있으며, 이는 압출된 소재의 부푸는 효과에 직접적인 영향을 미칠 것으로 보인다. 높은 단면감소율의 압출 경우에는 금형의 끝은 부분의 길이가 길수록 축 방향 응력(σ_2)과 반경 방향의 응력(σ_1) 모두의 크기가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

마지막으로, 금형의 형상 특징에 의한 응력의 집중 효과의 가능성을 조사해 보았다. 시뮬레이션 결과를 출구 부분에 집중하여 확대 관측해 본 바, 안쪽 금형 표면과 소재간에는 공간이 있으나, 바깥쪽 금형과 소재간에는 공간이 없이 밀착이 되어 밀려 나가며, 금형을 빠져나가면서 반경 방향으로 소재가 부풀고(swelling) 있음을 관측하였다. 그러나 그 결과가 자동적응요소를 이용하여 계산된 것이라 요소의 크기가 조절이 안되어 금형에 소재가 침투한 것으로 보임으로 해서 정확한 예측이 어려우므로, Fig. 17에 보인 바와 같이 ABAQUS/Standard로 계산한, 단면 감소비가 작은 경우를 확대해 보았다. 앞의 경우와 마찬가지로, 안쪽 금형 표면과 소재는 분리되어 있으며, 바깥쪽 금형 표면과 소재는 밀착되어 소재가 압출되자마자, 부푸는 효과를 보여주고 있다. 이러한 현상은 소재가 단면감소율을 늘려 압출되도록 금형의 굴곡을 주는 과정에서 비롯되는 것으로 생각된다.

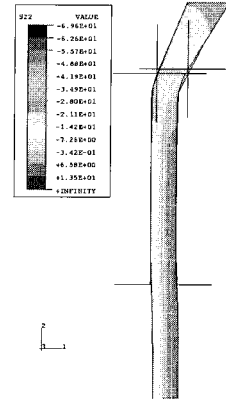


Fig. 13 Axial stress(σ_2) distribution at the outlet of longer land die

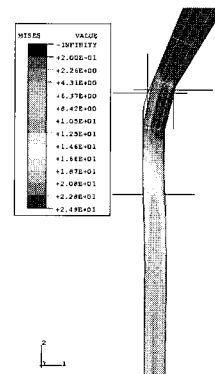


Fig. 14 Radial stress(σ_1) distribution at the outlet of longer land die

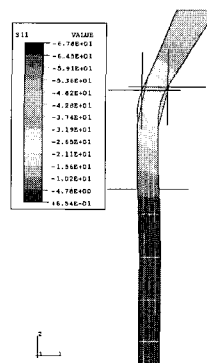


Fig. 15 von Mises stress(σ_M) distribution at the outlet of longer land die

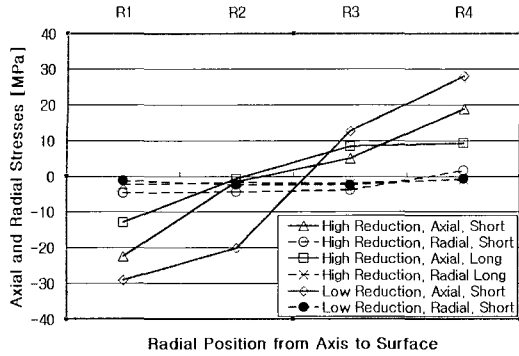


Fig. 16 Axial(σ_2) and radial(σ_1) stresses from the long and the short straight land with large areal reduction and from the short land with small areal reduction (Radius is increasing from R1 to R4.)

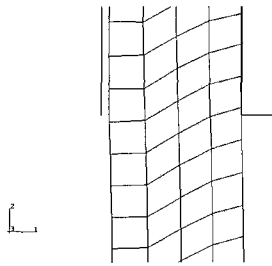


Fig. 17 Deformation behavior of extrudate zoomed at the outlet of the short land die with smaller areal reduction

Fig. 18에 단면 감소율이 높은 경우와 낮은 경우, 그리고 금형의 끝은 부분이 긴 경우와 짧은 경우, 금형 출구 부분에서의 반경 방향 변위를 비교하였다. 그림에서 보듯이 동일한 단면 감소율을 가지는 경우에는 금형의 길이에 상관없이 변위는 거의 동일함을 볼 수 있으나, 작은 단면 감소율의 압출에 비하면, 반경 방향의 변위가 월등 커서 부푸는 효과가 커짐을 예측할 수 있다. 결론적으로, 금형 랜드길이를 늘이면 응력의 크기는 줄어들지만, 압출소재의 반경이 늘어나는, 즉, 스웰링을 줄이는 데에는 별로 기여하지 않음을 파악하였다. 스웰링으로 말미암아 소재가 바깥쪽 금형에 높은 접촉력을 갖고 밀려 나가게 되면, 압출 소재의 인장 축 방향 응력과 함께 다이립 집적에 대한 가중효과를 일으킬 수 있다. 기구적으로 이를 피할 수 없다면 집중적인 접촉을 완화시키기 위하여 금형의 형상을 변경하는 것이 좋을 것으로 보

인다. 즉, 금형 출구가 현재와 같이 직각으로 날카롭게 형성되어 있는 경우, 인장 응력을 가지고 있는 소재의 표면에 응력 집중효과를 가하여, 소재표면에서 재료가 분리되는, 즉, 벗겨지는(peeling) 효과와 집중된 응력을 완화시키기 위하여 표면으로 이동하는 첨가제나 저분자량 물질이 다이립의 원인이 될 수 있으므로, 이를 경감시키기 위해서는 금형의 출구 바깥 원둘레에 필렛(fillet)을 주는 것이 바람직할 것이다. 현장에서, 실제로도 다이립이 안쪽에서는 거의 없고, 주로 바깥쪽에만 집적되는 것으로 보고되었다. 필렛 반경의 정확한 크기는 재료를 점탄성(viscoelastic)으로 고려, 정확한 측정치에 근거한 가상실험을 수행함으로써 제시할 수 있을 것으로 본다. 추가로, 만일 단면감소율이 크지 않게 금형을 설계할 수 있다면 스웰링의 크기가 줄어들어 다이립의 집적도 줄어들 것으로 본다.

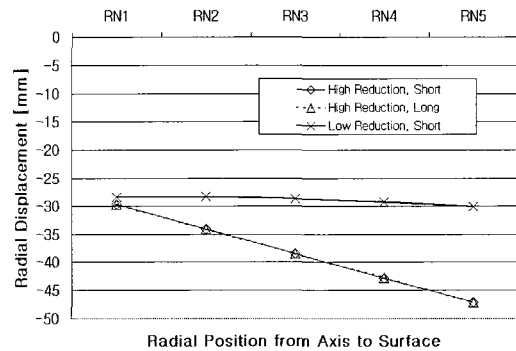


Fig. 18 Radial displacement from the short land with low areal reduction, the long land with high areal reduction, and the short land with low areal reduction (Radius is increasing from R1 to R4.)

4. 결론

플라스틱 파이프의 가상 압출(virtual extrusion)을 통해서 압출의 기구(mechanism)와 응력 생성으로 인한 다이립의 집적과의 관계를 살펴보았다. 다이립의 집적을 경감하기 위하여 다음과 같이 결론을 요약할 수 있다.

- (1) 금형 출구를 좀 더 길게 한다.
 - (2) 금형 개구면 외경 원둘레를 따라 필렛을 설치한다.
 - (3) 금형의 단면감소율을 가능하면 작게 설계한다.
- 본 계산에서는 자동 적응요소를 이용하였기 때문에, 출

구부분에서의 유한요소를 임의로 작게 할 수 없어 금형 개구면에서의, 응력 집중으로 인한 재료 분리를 보이지 못했다. 본 연구에서는 점탄소성을 가정한 정확한 시뮬레이션 목적이 아닌, 정성적인(qualitative) 결과를 예측하는 것을 목적으로 하였기 때문에 응력 생성과 압출기구의 확인을 통한 다이립 생성 저지 연구에 대한 또 하나의 방향을 제시한 것으로 충분하다고 보았다. 차후, 정확한 소재실험 결과를 바탕으로 한 점탄소성으로 재료 거동을 가정한다면, 보다 신뢰성 있는 다이립 감소에 관한 조사를 할 수 있을 것으로 본다.

후 기

본 연구는 1999년도 한남대학교 교비 학술 연구비에서 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) J. D. Gander and A.J. Giacomini, 1997, "Review of Die Lip Buildup in Plastics Extrusion," Polymer Engineering & Science, Volume 37, Issue 7, p. 1113.
- (2) S. J. Kurtz and S. R. Szaniszió, 1991, U. S. Patent 5,008,056.
- (3) J. A. Rakestraw and M. G. Waggoner, 1995, U. S. Patent 5,458,836
- (4) I. Klein, 1981, Plastics World, p. 112.
- (5) D. E. Priester and G. R. Chapman, 1995, Polyolefins IX, SPE RETEC
- (6) D. Hinrichs, 1976, U. S. Patent 3,933,958.
- (7) Dupont Company, Technical Information, Wilmington, Delaware
- (8) C. M. Chan, 1985, Intern. Polym. Proc., 3, p. 200.
- (9) T. Ohhata, H. Tasaki, T. Yamaguchi, M. Shiina, M. Fukuda, and H. Ikeshita, 1996, U.S. Patent 5,460,760.
- (10) M. F. Ashby and D. R. H. Jones, 1996, "Engineering Materials 1," 2nd ed., Butterworth Heinemann.