

폴리에틸렌압출발포박막의 파괴특성해석

리영명, 조학철, 최영식

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《기초과학을 끊임없이 심화발전시키지 않고서는 첨단과학기술을 연구도입할수도 없고 새로운 높은 수준의 과학기술을 연구개발할수도 없습니다.》(《김정일선집》증보판 제22권 21페이지)

폴리에틸렌발포체는 가볍고 단열성, 완충성, 유연성, 압축성, 보온성, 소음방지성 등 특성들이 좋을뿐아니라 생산원가가 매우 높다. 현재 세계적으로 발포체의 특성을 개선하면서 원료소비를 최대로 줄이는 방향에서 가공기술을 발전시키고있다.[3, 4]

폴리에틸렌압출발포박막의 파괴특성을 개선하는것은 막의 응용에서 매우 중요한 문제로 제기된다.

우리는 파괴확률모형을 리용하여 폴리에틸렌발포막의 파괴특성을 해석하였다.

1. 발포막의 파괴특성해석모형과 풀이방법

우리는 발포막의 파괴과정을 해석하기 위하여 발포막을 3차원용수철살창으로 분할하고 막재료의 국부적인 파괴과정을 3차원용수철살창모형에서 용수철들을 선택적으로 제거하면서 고찰하였다.

3차원용수철살창의 파괴면은 그림 1과 같다.

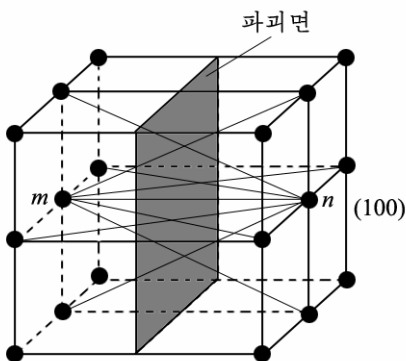


그림 1. 3차원용수철살창의 파괴면

용수철 m, n 이 다른 용수철들에 비해 특별히 큰 응력을 받을 때 용수철 m, n 을 제거하거나 용수철 m, n 에 수직인 면(파괴면)을 설정하고 이 면을 지나는 용수철들을 모두 제거하는 방식을 취하였다.

파괴면을 지나는 용수철조의 제거는 용수철들을 개별적으로 제거하는 방식으로 실현하였다. 제일 큰 응력을 받던 용수철 m, n 이 제거된 후 그 주위의 용수철들이 큰 응력을 받게 되어 제거되게 되는데 결국 이 과정을 파괴면을 지나는 용수철들의 동시제거로 실현할수 있다.

국부응력이 큰 부분에서의 파괴가 우선권을 가진다는 파괴확률리론[1, 2]에 기초하여 t 시각에 용수철 m, n 또는 파괴면의 파괴확률을 다음과 같이 설정하였다.

$$p_i(t) = \left(\frac{\sigma_i(t) - w}{w_0} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서 $\sigma_i(t)$ 는 t 시간에 i 째 용수철 또는 파괴면이 받는 응력, w 는 최소파괴응력, w_0 은 척도파라미터, β 는 파괴확률과 응력마당사이의 비선형성을 특징짓는 파라미터이다.

식 (1)에서 응력 $\sigma_i(t)$ 는 계가 경계를 통하여 축방향의 힘을 받은 후 평형상태에 도달하였을 때 살창마디점에 작용하는 힘들의 합이 령이라는데로부터 직접 구해진다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\sum_m [F_m \cdot P_{ij}^m]}{A} \quad (2)$$

여기서 F_m 은 살창표면 m 에 작용하는 힘, P_{ij}^m 은 살창표면 m 에 수직 또는 평행인 단위벡토르, A 는 표면 m 의 면적이다.

식 (2)로부터 평균시간간격에 의하여 파괴과정을 실현시킬수 있다. 평균시간간격은 다음과 같이 설정하였다.

$$\Delta t = \frac{1}{\sum_i p_i(t)} \quad (3)$$

평균시간간격은 막재료의 파괴가 계에 작용하는 응력이 어떤 한계값에 도달하여야 일어날수 있다는 조건으로부터 설정하였으며 응력이 클수록 평균시간간격 Δt 가 작아지게 된다. 식 (3)의 평균시간간격은 통계적시행결음으로 표시한 시간결음을 의미한다.

이로부터 우리는 파괴과정을 실현하는 알고리즘을 다음과 같이 구성하였다.

걸음 1 현실재료의 특성을 고려하여 막의 경계 혹은 내부에 균렬핵을 형성한다. 균렬핵은 우연적으로 선정한 적당한 개수의 파괴면에서 용수철들의 제거에 의하여 형성된다.

걸음 2 막의 경계에 상수변형을 주어 초기변형을 준다.

걸음 3 파괴면에 작용하는 응력을 계산한다.

걸음 4 파괴과정을 진행시키기 위한 평균시간간격 Δt 를 설정하고 이 시간간격에 의하여 변형 또는 파괴를 진행시킨다.

만일 $\Delta t > \Delta t_0$ 이면 $\varepsilon = \varepsilon + \Delta \varepsilon$ 으로 하고 걸음 3으로 간다. $\Delta t \leq \Delta t_0$ 이면 걸음 5로 간다. 여기서 Δt_0 은 초기시간간격이며 변형을 표시한다.

걸음 5 식 (1)의 파괴확률에 의하여 재료의 파괴과정을 실현한다.

먼저 식 (1)의 파괴확률을 0과 1사이의 값으로 표준화한다.

$$P_k(t) = \frac{p_k(t)}{\sum_i p_i(t)} \quad (4)$$

다음 표준화된 확률에 의하여 루적확률 $c_i(t)$ 를 계산한다.

$$c_i(t) = \sum_{k \leq i} p_k(t) \quad (5)$$

0과 1사이에서 평등분포하는 우연수 ξ 를 발생시키고 식 (5)를 만족시키는 i 째 용수철 또는 파괴면을 선택하고 용수철들을 제거하는 방법으로 재료의 국부파괴를 실현한다.

$$c_{i-1}(t) < \xi \leq c_i(t) \quad (6)$$

걸음 6 막이 2개의 파괴조각으로 갈라지거나 요구하는 파괴한계값에 도달하면 과정을 중지하고 아니면 걸음 3으로 간다.

2. 실험결과 및 고찰

우리는 발포막표면에 평행인 방향(X축방향)으로 체크기의 4%에 해당하는 변형을 경계에 주었다.

폴리에틸렌의 양그를을 $0.716 \times 10^3 \text{MPa}$ 로 주었고 뽑송비는 0.42로 주었다.

기공의 체적분률에 따르는 응력변화곡선은 그림 2와 같다.

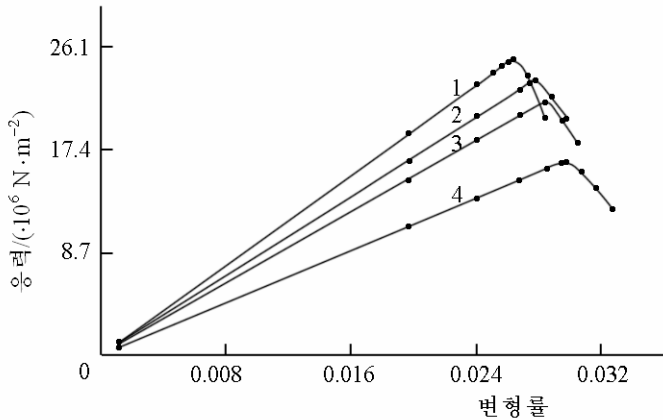


그림 2. 기공의 체적분률에 따르는 응력변화곡선
1—4는 기공의 체적분률이 각각 2.5, 5.0, 7.5, 10.0%인 경우

을 수 있게 한다. 파괴점 이후의 응력감소특성은 기공의 체적분률 즉 기공률이 클수록 완만해진다.

발포막의 파괴특성을 보다 구체적으로 해석하기 위하여 계에서 끊어진 총 결합수에 대한 폴리에틸렌상과 기포막의 끈어진 결합수의 비율을 파괴률로 정의하고 끊어진 총 결합수에 따르는 파괴률을 계산하였다.(표)

표에서 보는바와 같이 발포막의 파괴는 PE상과 기포막에서 동시에 일어나며 응력집중이 기포막표면에서 크다고 할지라도 응력분포에 비례하여 PE상에서도 일어난다는 것을 알 수 있다. 또한 기공률이 증가함에 따라 기포막의 파괴률은 증가하며

그림 2에서 보는바와 같이 발포막의 응력은 발포막의 기공의 체적분률에는 관계없이 변형률이 커짐에 따라 증가하다가 다시 감소하는 특성을 가진다. 이때 증가율은 기공의 체적분률이 작을수록 크다. 한편 응력—변형곡선의 극대값은 같은 변형률에 대하여 기공의 체적분률이 커짐에 따라 처음에는 서서히 감소하다가 7.5%이상에서는 급속히 감소한다. 이것은 폴리에틸렌 발포막의 당김세기를 보장하면서도 발포도를 높일 수 있는 한계값을 얻

표. PE상과 기포막에서 기공률에 따르는 파괴률

상	기공률/%			
	2.5	5.0	7.5	10.0
PE상	0.73	0.65	0.61	0.45
기포막	0.27	0.35	0.39	0.55

기공률이 7.5%이하에서는 급속히 증가한다.

맺는 말

폴리에틸렌발포막의 기포체적분률에 대한 응력—변형곡선의 변화특성을 고찰한 결과 폴리에틸렌발포막의 당김세기는 기공의 체적분률이 7.5%일 때 최대이고 이것이 한계값이라는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] W. A. Curtin et al.; Physical Review, B 55, 18, 12039, 1997.
- [2] G. A. Buxton et al.; Physical Review, B 69, 054101, 2004.
- [3] 刘本刚; 中国塑料, 25, 3, 70, 2011.
- [4] 杨为宁 等; 中国塑料, 26, 8, 81, 2012.

주체106(2017)년 3월 5일 원고접수

**Interpretation of Fracture Characteristics of
Polyethylene Extrusion Blister Sheets**

Ri Yong Myong, Jo Hak Chol and Choe Yong Sik

We studied the change of stress-strain curve on bubble volume fraction of polyethylene blister sheets. As the result, the tensile strength of polyethylene blister sheets is maximum when volume fraction of bubble is 7.5%, and this is the limit value.

Key words: polyethylene blister sheet, fracture characteristics