특 집

내부혼합기

김 진 국

1. 혼합기 구조

내부혼합기는 20세기초 고무산업의 발달과 더불어 발전해 왔고 현재 고무의 혼합에는 없어서는 안될 필수적인 기계로 자리잡고 있다. 혼합기 구조는 투입구(hopper), 램(ram), 로우터(rotor), 배출구(discharge door)로 구성되어 있고 두개의 로우터가 서로 다른방향(counter-rotating)으로 돌면서 혼합을 하는 회분식(batch type)이다(**그림 1**).

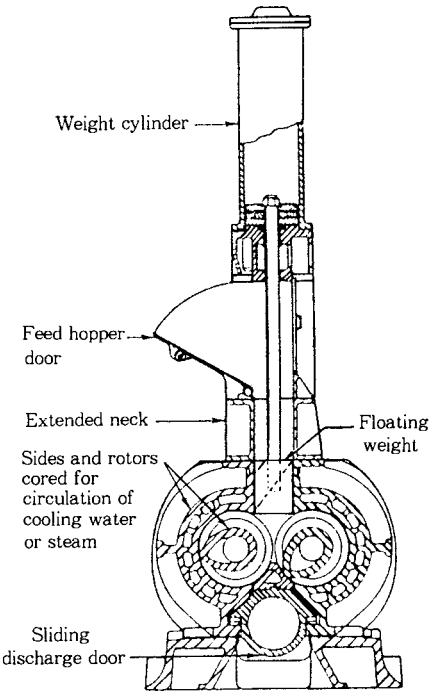
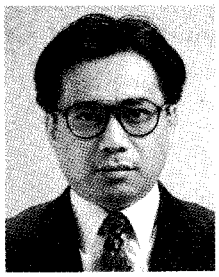


그림 1. Internal mixer.

2. 발달사

내부혼합기 시초는 1877년 Freyburger의[1] 독일 특허에서 찾아볼 수 있으며, 이것은 Werner and Pfleiderer 내부혼합기 기술의 기초가 되었다. 20세기에 들면서 타이어 산업 발달과 더불어 이에 대한 개발은 가속화되어 Pointon이[2] 1915년에 스크류 모양의 로우터를 개발하였다. 내부혼합기에 대한 제일 괄목할만한 개발은 1916년에 Banbury에[3] 의하여 이루어졌다(**그림 2**). Banbury가 개발한 혼합기는 내부혼합기의 대명사처럼 불리워져 왔으며, 이 Banbury[4] 혼합기는 계속하여 효율좋은 혼합기로 개발되어 사용되고 있다.

1960년대에 들어 새로운 모형의 로우터가 Tyson,[5] Matsuoka등에[6] 의하여 4날 모형(4 wing type)의 로우터가 개발되었다(**그림 3**). 이는 분산혼합이 Banbury혼합기보다 좋은 대신에 동력비가 많이 든다는 것이 단점으로 지적되고 있다. 이와같은 단점을 보완하기 위하여 1990년대에 김이[7] 분산혼합과 분배혼합을 효율적으로 하기위한 로우터를 고안하였다(**그림 4**). 이와 같이 로우터의 날개 (flight)모형과 수에 따라 발달이 되고 있는데



김진국

1971~1978 연세대학교 화학공학과(학사)
1978~1980 (주)선경
1979~1981 연세대학교 화학공학과(석사)
1981~1982 연세대학교 화학공학과 조교
1983~1989 아크론대학교 고분자공학과 (박사)
1989~현재 국립경상대학교 응용화학공학부 고분자공학과, 생산기술연구소 부교수

Internal Mixer

경상대학교 고분자공학과, 생산기술연구소(Jin Kuk Kim, Dept. of Polymer Science & Engineering, Research Institute of Industrial Technology, Gyeongsang National University, 900 Kaiwa-Dong, Chinju 660-701, Korea)

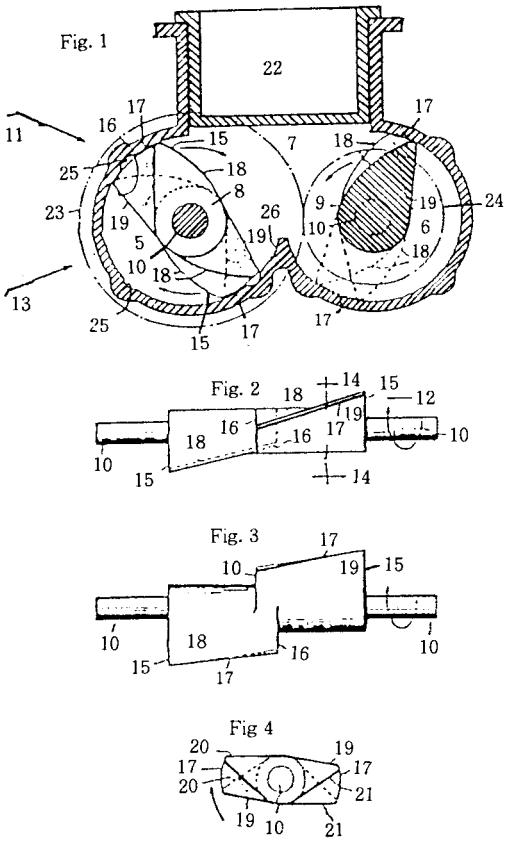


그림 2. Banbury's internal mixer design.[3]

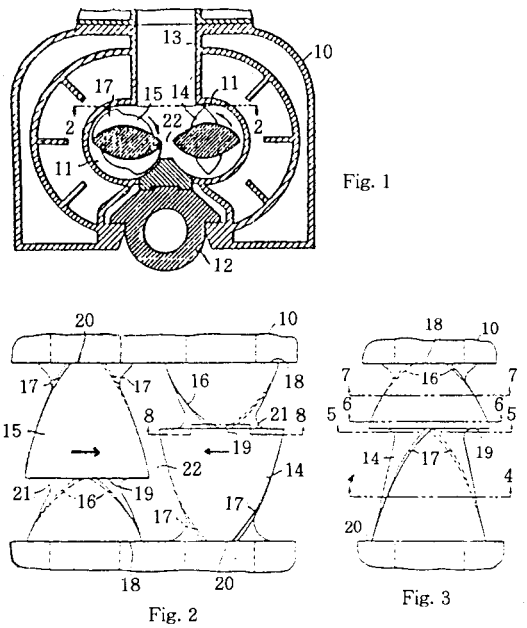
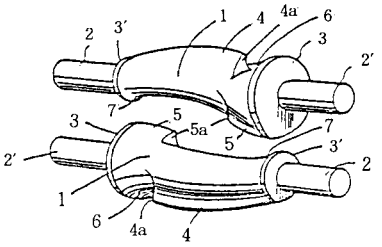


그림 3. 4 Wing type rotor mixer.[5]

제 1 도



제 2 도

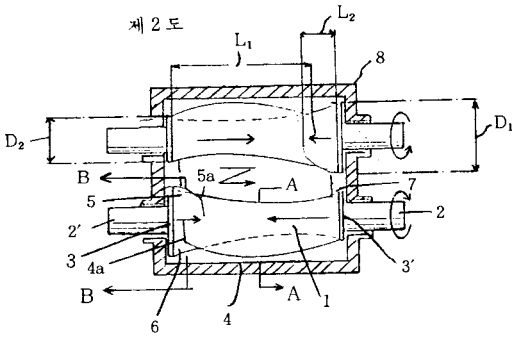


그림 4. Kim's internal mixer design.[7]

현재 산업계에서 2날 모형(two wing type)과 4날 모형(4 wing type)의 혼합기가 사용되고 있다.

3. 흐름거동 분석

내부혼합기의 혼합현상을 규명하기 위하여는 혼합기속에서의 고분자 흐름거동을 파악하여야 한다. 내부혼합기에서의 흐름분석은 혼합기속에서의 흐름의 복잡성 때문에 정확히 파악되지 않다가 1970년대에 들어와 Freakley가[8,9] 압력변환기를 사용하여 압력측정방법으로 흐름거동을 파악하고자 하였으며 1970년대말 내부혼합기의 흐름을 직접 관찰할 수 있는 flow visualization technique를 사용하여 흐름분석을 하여 활발하게 진행되었다. 1980년대에 아크론 대학(University of Akron) 연구진은[10] flow visualization technique (**그림 5**)을 사용하여 혼합기 안에서 **그림 6**과 같이 순환 흐름을 하는 것을 관찰하여 3차원적인 해석을 시도하였다. 이와 같은 혼합기의 흐름을 분석하기 위하여 김은[11] 혼합기의 구조를 전단율이 높은 지역으로 로우터 쳄버벽 사이와 전단율이 낮은 지역으로서 로우터와 로우터 사이의 2지역으로 나누어서 흐름현상을 해석하였다. 로우터와 쳄버 벽사이의 흐름은 hydrodynamic lubrication theory를 사용하여 속도해를 구하여 풀이하였다. 그러나 로우터와 로우터 사이 흐름은 이동흐름(transfer flow)을 고려하여야 하

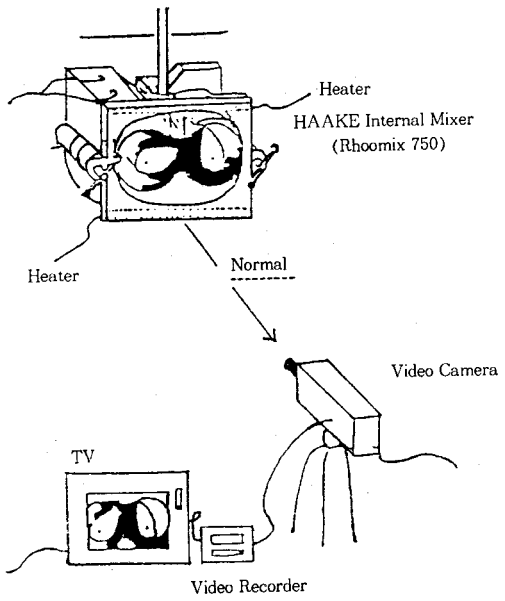


그림 5. Flow visualization in an internal mixer.

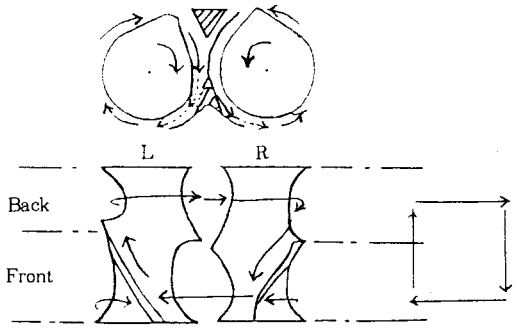


그림 6. Schematic of circulation flow motions in an internal mixer.[10]

기 때문에 3차원적인 흐름으로 로우터와 챔버사이의 흐름보다는 분석이 힘들다. 두 로우터간의 이동흐름은 두 로우터 사이의 압력차에 기인한다는 가정하에 다음 식으로 제시하였다.

$$V_{TR}=\frac{K}{\eta}\Delta P_{RL} \qquad (1)$$

여기서 V_{TR}은 로우터와 로우터 사이를 이동하는 흐름의 속도이고 ΔP_{RL}는 오른쪽 로우터와 왼쪽 로우터의 압력 차이를 의미하며 K는 혼합기 구조에 따른 상수, η는 점도를 의미한다. 그러므로 ΔP_{RL}에 의하여 이동흐름방향이 결정되며 속도장의 크기도 결정된다. **그림 7**과 **8**에 컴퓨터모의실험 결과 혼합기에서의 압력 분포도와 혼합기속의 흐름거동을 나타내었다.

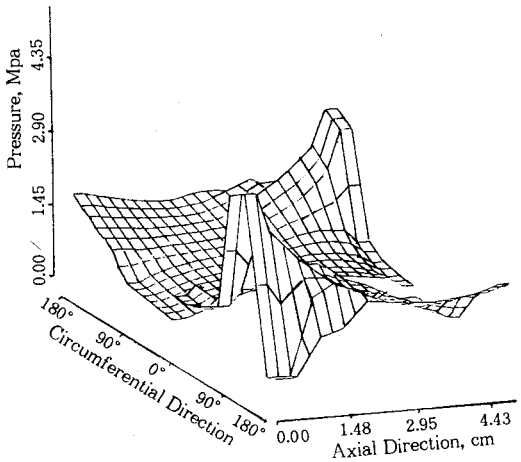


그림 7. Pressure distribution in an internal mixer.[11]

이상과 같은 흐름해석은 혼합기에 재료가 전부 채워져 있을 때의 흐름거동을 해석한 것으로서 실제공정과는 다르다. 김은[12] 실제공정에서의 흐름해석에 접근하기 위하여 압력분포도를 계산하여 void 지역은 압력이 낮은 곳으로 부터 시작된다고 실험과 비교하여 보고하였다(**그림 9**).

4. 혼합현상 분석

내부 혼합기에서의 혼합현상에 관한 본격적 연구는 1950년대말 Bergen에[13] 의하여 이루어졌다. Bergen은 Danckwerts의 이론적 모델을 기초로 이론을 전개시켰다. 같은 시기에 Bollen과 Colwell은[14] 내부 혼합기를 높은 전단응력 지역 (tip region)과 낮은 전단응력 지역으로 나누어서 모델을 세웠고 1960년대에 들어와서 White와 Tokita가[15] 고무의 유변학적 면을 고려하여 서술하였다. 1970년대에 들어와서 Zloczower와 Tadmor가[16] Colwell과 Bollen의 분산혼합모델을 계승, 더욱 더 개발하여 내부 혼합기의 혼합현상에 대한 모델을 제시하였다. 그들의 모델은 1980년대에 와서 혼합에 관한 연구는 더욱 더 활발해져서 Shiga와 Furuta가[17] 분산모델에 대한 Onion 모델을 제시하였다. 1980년 말에 아크론 대학 연구진이 내부 혼합기 안에서의 혼합현상을 파악하려면 흐름현상을 정확히 파악하여야 한다는 생각에서 앞에서 설명한 flow visualization technique을 통하여 흐름에 관한 연구를 하여 흐름에 기초를 두고 혼합현상을 규명하고자 하였다. 그래서 내부 혼합기 안에서의 혼합현상을 1개의 로우터를 가지고 설명한 종래의 모델로서는 해석할 수 없다는 판단하에 앞의 흐름해석 부분에서 소개한 2개의 로우터계의 모델을 제시한 바 있다. 이 모델을 사용하여 유

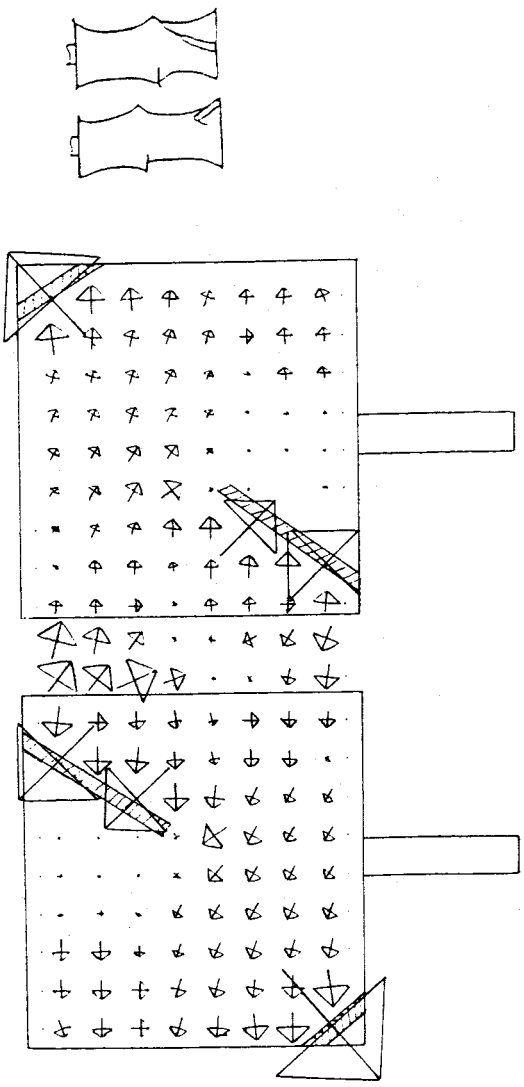
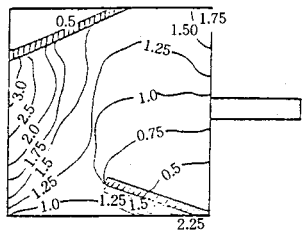


그림 8. Circulation flow behavior in an internal mixer.[11]

동현상을 네 가지 종류의 흐름으로 나누어서 각각의 유량 분율로서 분배 혼합(distributive mixing)과 분산 혼합(dispersive mixing)을 설명하였다. 그 흐름은 다음과 같이 구분된다(**그림 10** 참조).

1. 로우터 주위를 도는 흐름
2. 로우터의 축을 따라 흐르는 흐름
3. 로우터와 로우터 사이를 흐르는 흐름
4. 로우터 날개를 흐르는 흐름

여기서 흐름 2와 흐름 3은 분배혼합에 관련되는 흐름으로 규정하였고 로우터날 사이를 흐르는 흐름 4는 전단율이 높은 지역에서 일어나기 때문에 분산 혼합에 관계한다고 규정하였다. 그리고 또한 혼합기 안에서 순환운동의 유동현상이 관찰되어서 혼합기 안을 1회전하는 시간을



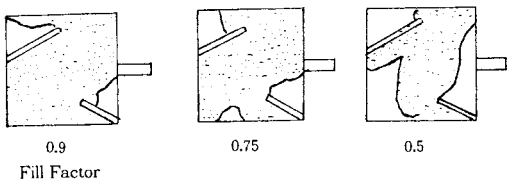


그림 9. Computed isobars on double flighted rotors from theory together with displays of cured rubber from experiments.

$$F_C = \frac{Q_C}{Q}$$

$$F_L = \frac{Q_L}{Q}$$

$$F_D = \frac{Q_D}{Q}$$

$$F_{TR} = \frac{Q_{tr}}{Q}$$

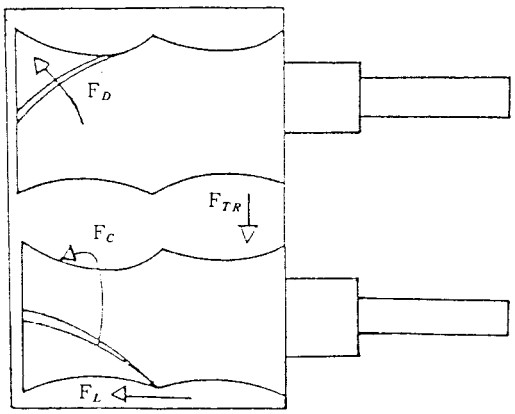


그림 10. Definition of fractional funtions.

순환시간(circulation time)으로 규정하여 분배혼합(distributive mixing)현상을 설명하였다. 이는 체류시간의 개념이지만 내부 혼합기가 회분식 기기이기 때문에 압출기와 같은 연속식 기기에서의 체류시간과는 구별된다. 혼합기에서의 순환 시간, t_c, 정의를 식으로서 다음과 같이 규정하였다.

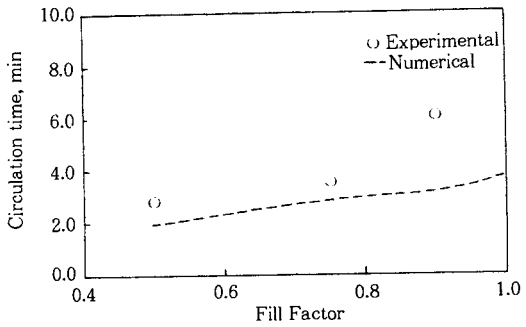


그림 11. Infuluence of fill factor on circulation time.

$$t_c = \frac{W}{V_L} + \frac{W}{V_R} + 2\frac{H}{V_{TR}} \qquad (2)$$

여기서 V_L과 V_R은 각각 왼쪽 로우터와 오른쪽 로우터에서의 유속을 의미하고 V_{TR}는 두 로우터간의 이동흐름속도를 의미하고 이는 식 (1)에서 구하였다. 또한 W는 혼합기 길이, H는 로우터와 로우터간의 간격이다.

김은 혼합기 부피와 시료의 양의 분율이 혼합에 미치는 영향을 시료양의 분율을 0.5 0.75 0.9로 변화하면서 관찰하여 연구보고하였는데 순환시간의 실험치와 컴퓨터모의실험 결과를 비교하여 나타낸 결과 분율 0.5인 경우가 순환시간이 빠르게 나타나 분배혼합이 잘 이루어진다는 결론을 얻었다(**그림 11**). 그러나 광학현미경 및 전자현미경으로 시료의 양을 변화하면서 카본블렉의 분산상태를 관찰하여 본 결과 0.9일 경우가 0.5인 경우보다 분산상태가 좋게 관찰되어 분산과 분배혼합상태를 동시에 고려하여 가공조건을 정하여야 한다고 보고하였다. 실제 카본블렉을 고무에 혼합하는 공정에서는 0.7-0.8의 분율을 가장 많이 사용하고 있다.

참 고 문 헌

1. H. Hermann, in Kuststoffc-Ein Werkstofe Hacht Karriere (1985).
2. J. E. Pointon, U. S. Pat. 1, 128, 410 (1915).
3. F. H. Banbury,U.S.Pat. 1, 200, 070 (1916).
4. F. H. Banbury, U. S. Pat. 1, 689, 990.
5. O. Z. Tyson, U. S. Pat. 3, 230, 581 (1965).
6. J. T. Matsuoka, U. S. Pat. 3, 403, 849 (1967).
7. 김진국, 한국실용신안, 069228 (1993).
8. P. K. Freakley and W. Idris, *Rubber Chem. Tech.*, **52**, 134 (1978).
9. P. K. Freakley and S. R. Patel, *Rubber Chem. Tech.*, **58**, 751 (1984).
10. K. Min and J. L. White, *Rubber Chem. Tech.*, **60**, 361 (1987).
11. J. K. Kim, Ph. D. Dissertation, U. of Akron (1989).
12. J. K. Kim and J. L. White, *Nihon Reorogi Gakkaishi*, **7**, 203 (1989).
13. J. T. Bergen, G. F. Carrier, and J. A. Krumhans, *SPE ANTEC Tech. Paper*, 987 (1958).
14. W. R. Bollen and R. E. Colwell, *SPE. J.*, 14(8), 24 (1958).
15. J. L. White and N. Tokita, *J. Appl. Polm. Sci.*, 12, 1589 (1968).
16. I. M. Zloczower and Z. Tadmor, *Rubber Chem. Tech.*, **57**, 53.
17. S. Shiga and M.Furuta, *Nippon Gomu Gakkaishi*, **55**, 491 (1982).