論文

장섬유강화 플라스틱 복합재의 사출성형에 있어서 충전과정과 두께방향에 대한 섬유배향 분포측정

윤성운* · 박진국** · 조선형*** · 김이곤**

Measurement of the Fiber Orientation Distribution for Injection Mold Filling Stage and Thickness Direction of Long Fiber Reinforced Polymeric Composites

S. U. Yoon*, J. K. Park**, S. H. Jo*** and E. G. Kim**

ABSTRACT

It is very important to clarify the relations between fiber orientation · separation and injection molding conditions. So far, there is no study on the measurement of fiber orientation for injection mold filling stage and thickness direction of products using image processing. In this study, by using image processing technique, a method is achieved for quantitative visualization of fiber orientation of a product which expresses injection mold filling stage and thickness of long fiber reinforced polymeric composites. The intensity method is used for measuring the distribution. And the effects of fiber content, injection molding conditions on the orientation function are also discussed.

초 록

섬유의 배향 · 분리와 사출성형조건과의 관계를 명확히 하는 것은 중요하다. 아직까지 화상처리기법을 이용한 사출성형의 충전과정과 두께방향에 대한 섬유배향 측정에 관한 연구는 없는 실정이다. 본 연구에서 화상처리 기법을 이용하여 장섬유강화 복합재의 사출성형에 있어서 충전과정과 두께방향에 대한 섬유배향의 정량적 가시화에 대한 방법을 제시한다. 농도법을 이용하여 측정된 섬유배향함수 분포에 대한 섬유함유율과 사출성형조건의 영향에 대해서 고찰하였다.

1. 서 론

플라스틱재료의 성형법 중에서 사출성형은 가장 일반적이면서도 중요한 성형법으로서 알려져 있으며, 사출성형된 섬유강화 열가소성 플라스틱(FRTP)은 수지 단일체에 비하여 비강성, 비강도, 내열성 등의 기계적 강도와 생산성이 뛰어나기 때문에 고강도와 제품의 정밀성 및 경량화가 요구되는 자동차나 기타 산업용 부품 등의 구조부재로 널리 이용되고 있다.

섬유로 강화된 플라스틱 복합재에 대한 사출성형에 있어서 큰 문제점은 복합재내에 함유되어 있는 플라스틱과 섬유와의 유동속도 차이에 의해서 섬유와 모재와의 분리현상이 생기고, 강화재인 섬유의 배향이 발생된다[1,2]. 이러한 현상으로 인하여 성형품에는 싱크마크,

* 조선대학교 공과대학 기계공학과
** 국민대학교 공과대학 기계설계학과
*** 동서울대학 금형설계과

변형 및 잔류응력 등이 남게되며, 또한 웰드라인 생성 영역에 있어서 섬유의 배향에 의해 현저한 강도저하를 일으키기 때문에 섬유로 강화된 플라스틱 복합재를 사출성형하는 경우 이와같은 섬유배향을 예측 및 제어하는 것이 중요한 과제로 되어 있다.

섬유강화 복합재의 사출성형에 있어서 성형인자 및 섬유함유율, 섬유길이 등의 재료인자에 대한 분리 배향과의 관계 등을 명확히 하는 것은 설계의 관점에서 볼 때 구조물의 기계적인 물성을 향상시키기 위해 매우 중요하다.

특히 성형품의 두께방향에 대한 장섬유의 배향상태를 파악하는 것과 유동선단 형상을 서로 겹쳐 배향상태를 예측 제어하는 것은 유동장에 미치는 장섬유 배향상태의 영향을 알아볼 수 있는 중요한 데이터로 이용할 수 있다[3].

그러므로 본 연구에서는 캐비티내로의 충전과정중에 생기는 섬유의 배향상태에 대한 이론적인 해석과 실제의 성형품에 대한 섬유의 배향상태를 비교하는 연구의 일환으로, 먼저 복합재에 함유되어 있는 섬유함유율과 사출시간 등의 성형조건을 변화시켜서 사출하였을 때 각 충전공정 중에서 일어나는 섬유배향상태와 전단유동의 영향으로 생기는 두께방향의 섬유배향층 생성상태를 가시화해서 나타내고 이 상태에 미치는 섬유함유율의 영향 및 섬유배향 함수의 변화에 대해서 고찰하였다.

2. 섬유배향 이론

2.1 섬유배향함수[4]

섬유의 배향에서 성형품의 두께가 폭과 길이에 비해 매우 얇으면 섬유를 2차원 집합체로 취급할수 있다. 섬유배향은 $q \leqq \theta < \pi$의 범위 안에 있을 때 섬유배향각 $q(\theta)$는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(\theta) = \frac{1}{\pi}\left[\frac{(1-J)}{(1+J)}\cos^2\theta + \frac{(1+J)}{(1-J)}\sin^2\theta\right]^{-1} \quad (1)$$

여기서 J는 Stein[5]에 의해 정의된 2차원 섬유집합체에 대한 배향함수로 식 (2)와 같다.

$$J = 2\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\cos^2\theta\, q(\theta)\, d(\theta) - 1 \quad (2)$$

여기서, 배향이 등방성인 경우 J=0, x축 방향으로 완전히 배열되어 있는 경우는 J=1, y축 방향으로 완전히 배열되어 있는 경우는 J=-1이며 2차원섬유집합체의 배열의 정도를 나타내는 인자이다.

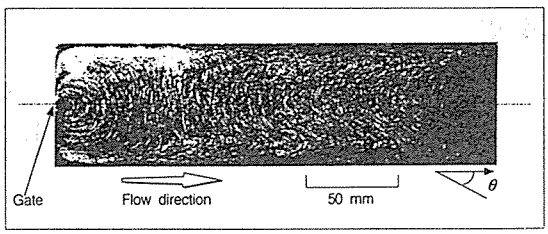

Fig. 1. Fiber orientation state of rectangular shaped part after injection molding

Fig. 1은 사출성형된 성형품의 섬유배향상태를 보여준다. 여기서는 무방향의 배향상태에 있는 섬유의 배향이 유동방향으로 배열되어지는 것을 관찰할수 있다. 이때 섬유배향각 θ는 유동방향에 대해서 시계방향과 반시계방향으로 측정된다.

2.2 섬유배향

섬유배향분포의 측정법으로서는 개개의 섬유을 구별할수 있을때에는 교점계수법이[6] 유용하며, 개개의 섬유를 구별할수 없는 경우 즉, 섬유가 서로 강하게 엉켜져 있어 섬유를 구별할수 없는 경우에는 성형품의 연 X선 사진농도정보를 이용하여 섬유배향분포를 측정하는 농도법[7]이 있다.

사진의 농도로 . ·처리를 함으로서 물체의 윤곽선을 검출하는 방법 : 1차미분, 2차미분등의 차분법(FDM)과 템플리트 mplate)를 이용하여 그 최대치로부터 구하는 방법이 있다. 그 중에서 윤곽선의 방향을 구할 필요가 있을 때에는 3×3의 마스크 처리를 이용한 차분필터를 이용하는 방법이 매우 유효하다. 차분오퍼레이터에는 Roberts, Prewitt, Sobel operator가 있는데, 그 중에서 Sobel operator가 다른 것들보다 오차가 적다[8].

사진의 농도차는 ΔH, ΔV 중심 화상요소의 수평과 수직방향 모두에 대해서 계산한다. 경계는 인접하는 화

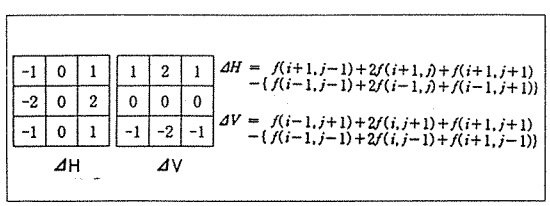

Fig. 2. Finite difference Sobel operator

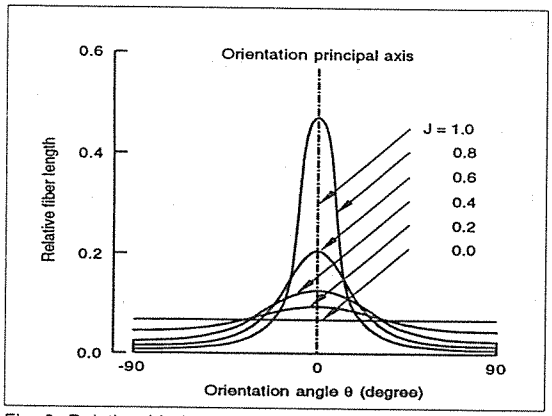

Fig. 3. Relationship between orientation angle and orientation principal axis

소사이의 농도차인 ΔG 에 의해서 검출되고 경계는 ΔG 의 값이 Threshold보다 클 때 결정된다.

$$\Delta G = (|\Delta H| + |\Delta V|)/2 \quad (3)$$

그리고, 물체의 윤곽선방향 θ는 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta V \times \Delta H^{-1}) + \pi/2 \quad (4)$$

식 (3)의 ΔG는 검출된 화소와 인접한 화소의 농도차를 지칭하는 것이고 연X선 사진으로부터 얻어진 농도정보에서 모든 화소에 대하여 배향각θ와 ΔG를 구하였을 때 섬유배향각 분포는 다음과 같이 얻어진다.

$$H_D(k) = N_\theta(k) / \sum_{i=0}^{n-1} N_\theta(i), \ (k=0, 1, 2, \ldots n-1) \quad (5)$$

여기서 n은 π의 분할수를 나타내고 $N_\theta(k)$의 범위는

$$N_\theta(k) = (2k-1) \cdot \pi/2n \ < \theta \leq \ (2k+1) \cdot \pi/2n \quad (6)$$

이며, 배향함수 J는 화상처리를 이용해서 측정되는 $N_\theta(k)$로 부터 계산된다.

Fig. 3은 배향주축과 배향각과의 상관관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 섬유 배향함수 J=1일 때 배향주축과 일직선의 관계를, J=0일 때는 배향주축과 직각의 관계를 나타내고 있다.

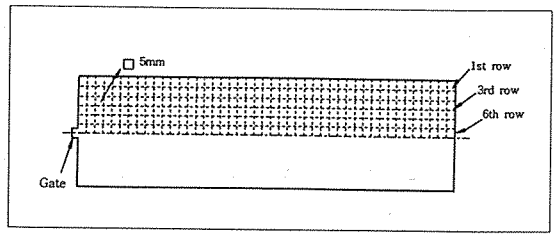

Fig. 4. Part for measuring fiber orientation function J

3. 실 험

사출성형품의 섬유배향함수 J를 측정하기 위해서 화상처리 영역은 5mm×5mm 이다. 섬유배향각 θ는 시편의 x축에 대해서 시계방향과 반시계방향의 전체 섬유에 대해서 측정하고, 농도정보는 이미지 스캐너에 의해서 측정한 후 처리되며, 농도를 가진 화소는 Threshold보다 농도가 높으면 섬유로 간주된다.

실험에 사용한 재료는 섬유강화 열가소성 필렛(모재: 폴리프로필렌, 강화재 : 장섬유강화플라스틱 콤파운드, 초기 섬유길이 : 10mm, 섬유함유율은 30, 50, 70wt%)이다. 장섬유플라스틱 콤파운드는 三井東壓化學(Mitsui Toatsu Chemical)에서 생산되는 제품이며, Table. 1에는 실험에 사용된 사출성형조건을 나타내었다.

Table1. Injection molding conditions

Type	LFP-C
Glass fiber content (wt%)	30, 50, 70
Injection pressure (kg_f/cm^2)	1000
Holding pressure (kg_f/cm^2)	0
Cooling time (sec)	25
Mold temperature (℃)	70
Barrel temperature (℃)	250
Injection rate (cm^3/s)	70

Fig. 4는 직사각형의 형태를 가진 사출성형품의 섬유배향상태를 파악하기 위한 화상처리영역을 나타낸 그림이다. 성형품의 크기는 200mm×60mm×3mm이나 게이트를 중심으로 대칭이기 때문에 윗쪽 부분을 5mm×5mm의 영역에 대해서 섬유배향 해석을 하였다.

충전과정에서의 섬유배향은 short shot법에 의해 사출시간별로 사출하여 그 시편을 화상처리 하여 섬유배향을 측정하였다. Fig. 5는 성형품의 두께방향과 이에

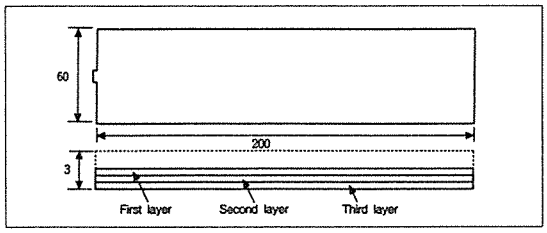

Fig. 5. Specimen for measuring fiber orientation function J

수직인 단면에 대해 배향상태를 파악하기 위한 시험편의 채취부분과 크기를 나타낸 그림이다. 게이트를 중심으로 상하 대칭이기 때문에 중심부의 윗부분인 1.5mm를 제거하고 남은 1.5mm에 대해서 두께 0.5mm인 얇은 시험편으로 하여 그 단면방향에서 촬영된 연 X선 사진을 화상처리 하였다.

4. 결과 및 고찰

섬유함유율이 30wt%, 70wt%인 성형품에 대해서 연 X선 사진을 각 사출시간별로 Fig. 6 (a), (b)에 나타내었다. 이 그림들에서 흰 부분은 모재인 폴리프로필렌을 나타내고 있으며, 검은 부분이 유리섬유이다. 섬유함유율이 30wt%인 경우에는 1.7sec, 70wt%인 경우에는 2.1sec에 금형내로의 충전이 완료된다. 이들 그림에서 게이트로 부터 사출된 복합재는 유동초기에 원형의 선단으로 형성되는 것은 30wt%나 70wt% 모두 같은 경향을 나타내고 있지만 동일한 사출시간인 경우, 복합재내의 섬유부분이 많은 70wt%인 성형품의 유동선단이 짧을 뿐만 아니라 유동선단의 모양도 원형보다는 거의 직선에 가까운 양상을 나타내게 되고, 이에 따라서 충전이 완료되는 시간도 길며 배향상태도 30wt%와는 상이한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 게이트로 부터의 거리변화에 따른 섬유배향 함수 J의 변화를 나타내었으며, 충전과정 중의 섬유배향 상태를 이 그림으로부터 정량적으로 알 수가 있다. 금형벽면과 접촉하는 첫번째 층은 30wt%, 70wt% 모두 벽면과의 마찰로 인하여 유동방향으로만 배향되어 있음을 알 수 있다. 그러나 게이트의 동일선상에 있는 층에 가까울수록 즉 6번 층에 가까울수록 유동선단이 진행됨에 따라서 섬유는 유동의 직각방향으로 배향되어 있음을 쉽게 알 수 있다. 이러한 경향은 동일한 유동장내의 섬유함유율이 많으면 유동중의 섬유끼리 간섭현상이 크기 때문에 70wt%인 경우의 배향함수 J값도 큰 변화의 폭을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 9 (a)와 (b)는 앞그림 Fig. 7, 8에서 구한 충전과정 중의 배향함수 J를 각도로 환산하여 가시적으로 나타낸 그림이다. 배향함수 J 의 표현에 있어서는 0인 경우에는 45°, 1인 경우에는 x축, -1인 경우에는 y축으로 배향되어 있는 것으로 나타내었다. Fig. 6의 연 X선 사진과 같이 바깥부는 금형벽면과의 마찰로 인하여 섬유는 유동방향으로 배향되지만 중심부는 유동방향과 거의 직각인 상태의 섬유배향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 특히 70wt%인 성형품인 경우에는 30wt%와는 달리 섬유끼리 심한 간섭현상으로 배향상태가 더욱 불규칙적으로 나타나고 있다. 이 그림으로부터 충전이 완료되어 가는 도중에 생기는 분수흐름의 효과를 포함한 섬유의 배향상태를 가시적으로 나타내주고 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 섬유함유율이 각각 50wt%, 70wt%인 성형품에 대해서 게이트로 부터의 거리에 따른 섬유배향 함수 J의 변화를 나타내었으며, 성형품 두께방향의 수직인 단면에 대해서 정량적으로 섬유배향 상태를 알 수 있는 그림이다. 이들 그림에서 두께방향의 중앙부분인 Fig. 10과 Fig. 11의 (a)에서 금형벽면에서 가까운 1, 2, 3열의 배향상태는 대부분 x축 방향으로의 배향상태를 나타내고 있지만, 게이트와 가까운 4, 5, 6열은 y축 방향으로만 많이 배향되어 있음을 알 수 있다. 그러나 두께방향에서 금형벽면에 모두 접해 있는 그림 (c)인 경우의 1, 2, 3열 및 4, 5, 6열의 배향상태는 x축으로 거의 배향되어 있음을 쉽게 알 수 있으며, 중간층인 (b)는 앞의 (a)와 (c)의 배향상태의 중간정도인 섬유배향 상태를 나타내고 있다. 이러한 경향은 동일한 유동장내의 섬유함유율이 많으면 섬유끼리의 간섭현상이 크고, 또 두께방향으로 벽면에 가까울수록 전단유동의 영향이 크기 때문에 섬유함유율이 70wt%인 경우의 배향함수 J값에 대한 변화가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 12 (a), (b)는 성형품의 연 X선 사진을, (c), (d)는 앞 그림 Fig. 10, 11에서 구한 배향함수 J를 각도로 환산하여 가시적으로 나타낸 그림이다. 이 사진에서 성형품의 가장 중앙부에 위치한 층에서는 유동방향의 직각으로 섬유가 배향되어 있으나 금형면에 접하면서 충전된 표층부는 동일한 유동장일지라도 전단유동에 영향을 지배적으로 받기 때문에 섬유의 배향은 대부분 유동방향으로 되어 있음을 쉽게 알 수 있다. 배향함수J의 표현에 있어서는 0인 경우에는 45°, 1인 경우에는

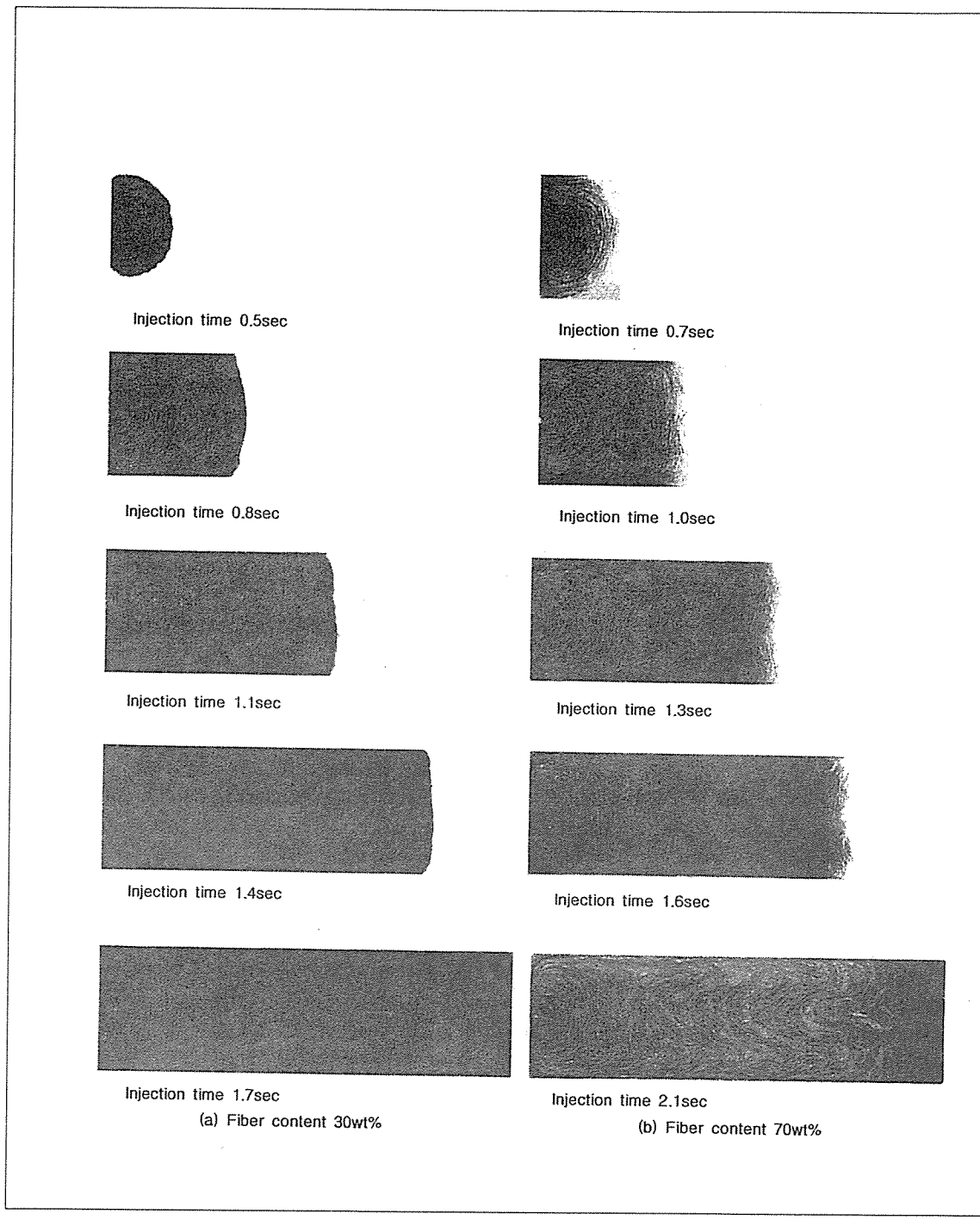

Fig. 6. Soft X-ray photography of injection molding products

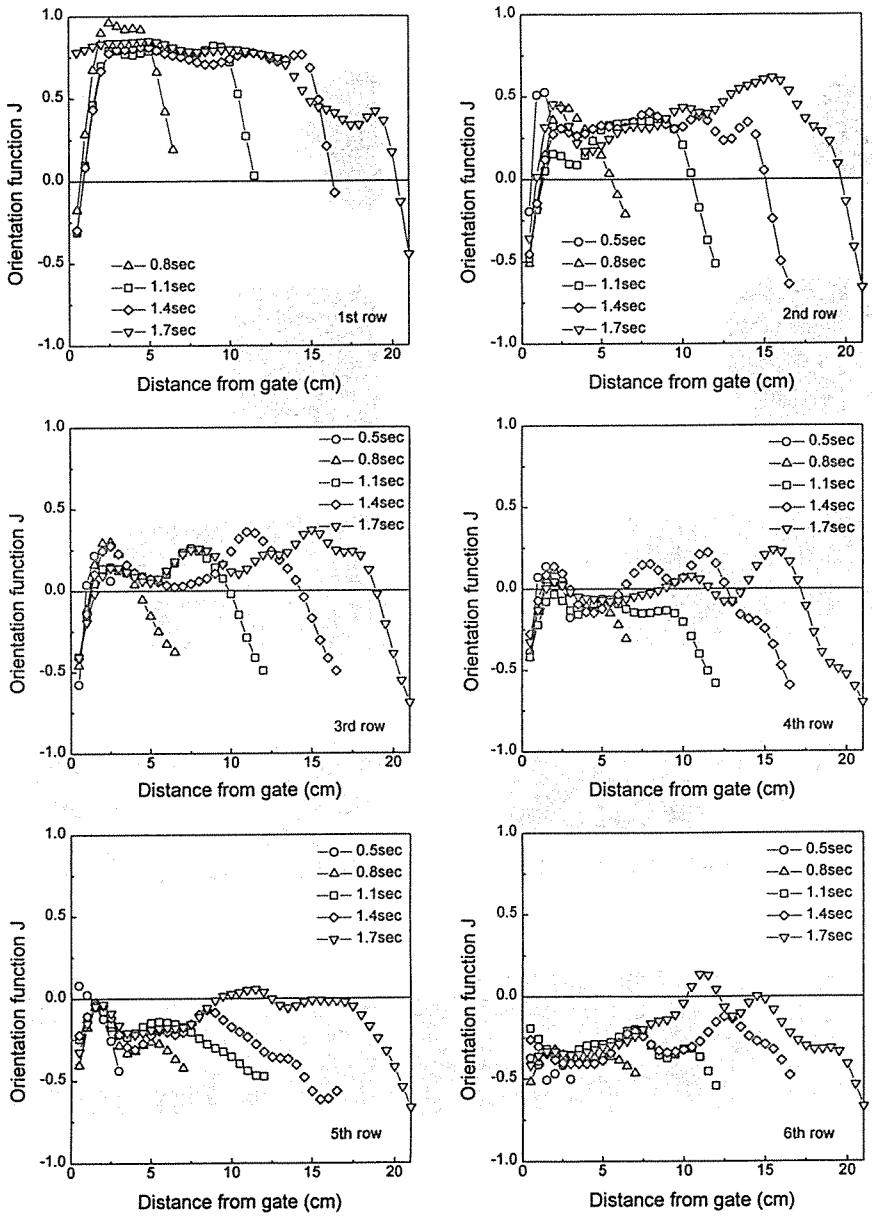

Fig. 7. Fiber orientation distribution for fiber content 30wt%

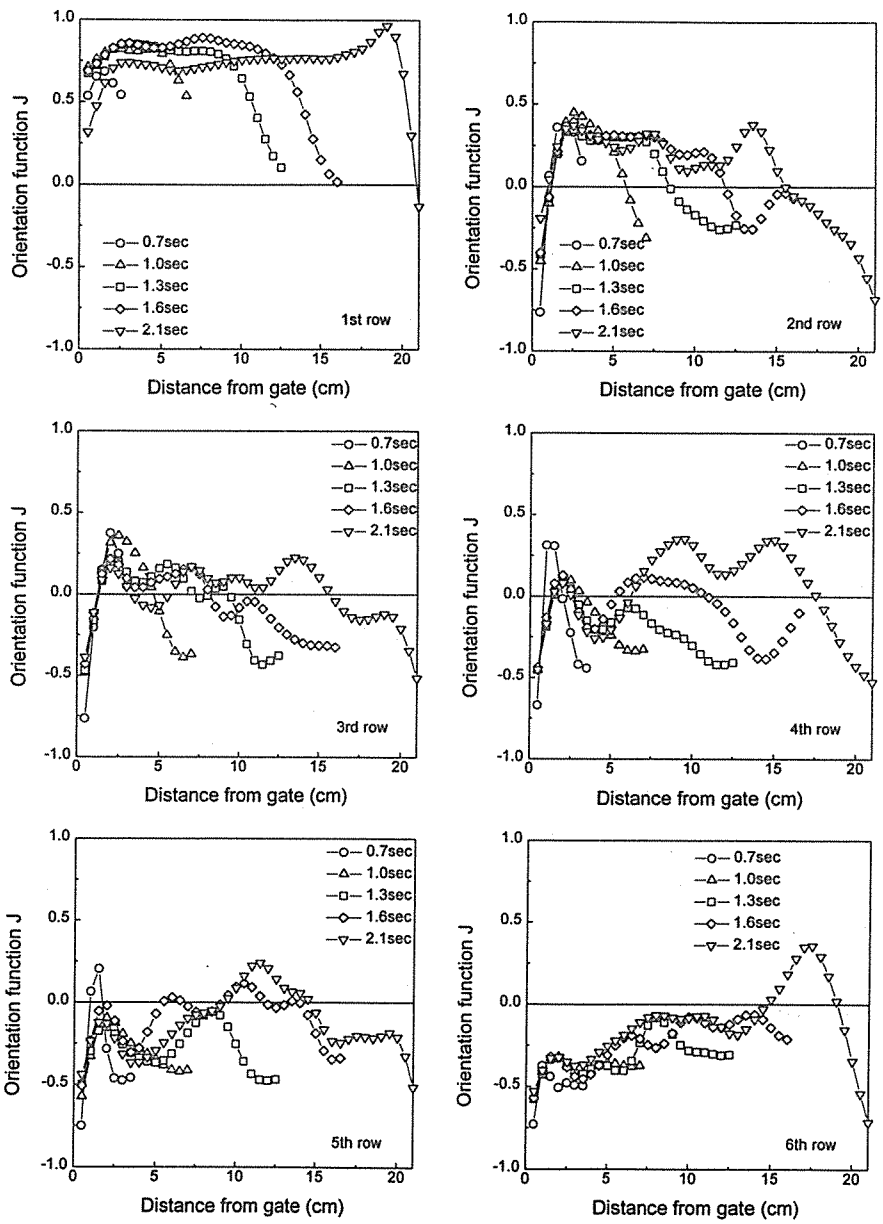

Fig. 8. Fiber orientation distribution for fiber content 70wt%

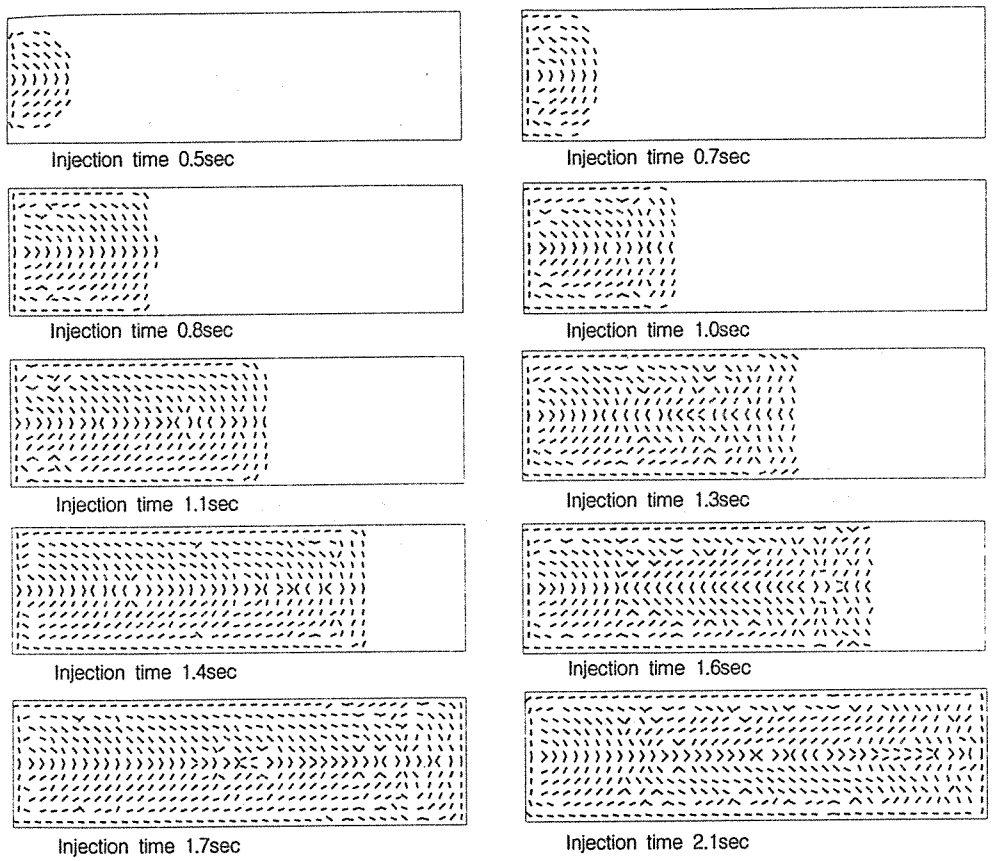

Fig. 9. Distribution of fiber orientation for long fiber polymeric composites on injection molding

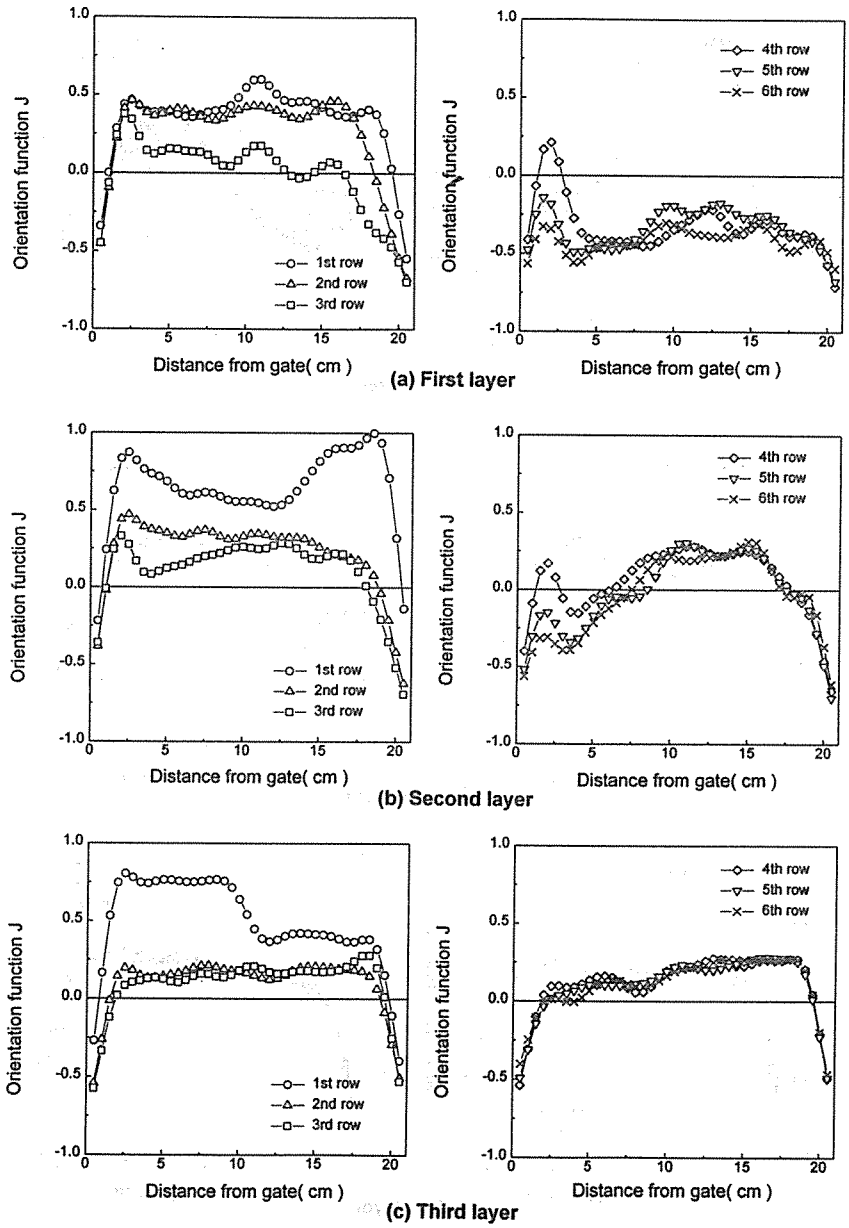

Fig. 10. Fiber orientation distribution for fiber content 50wt% for thickness direction

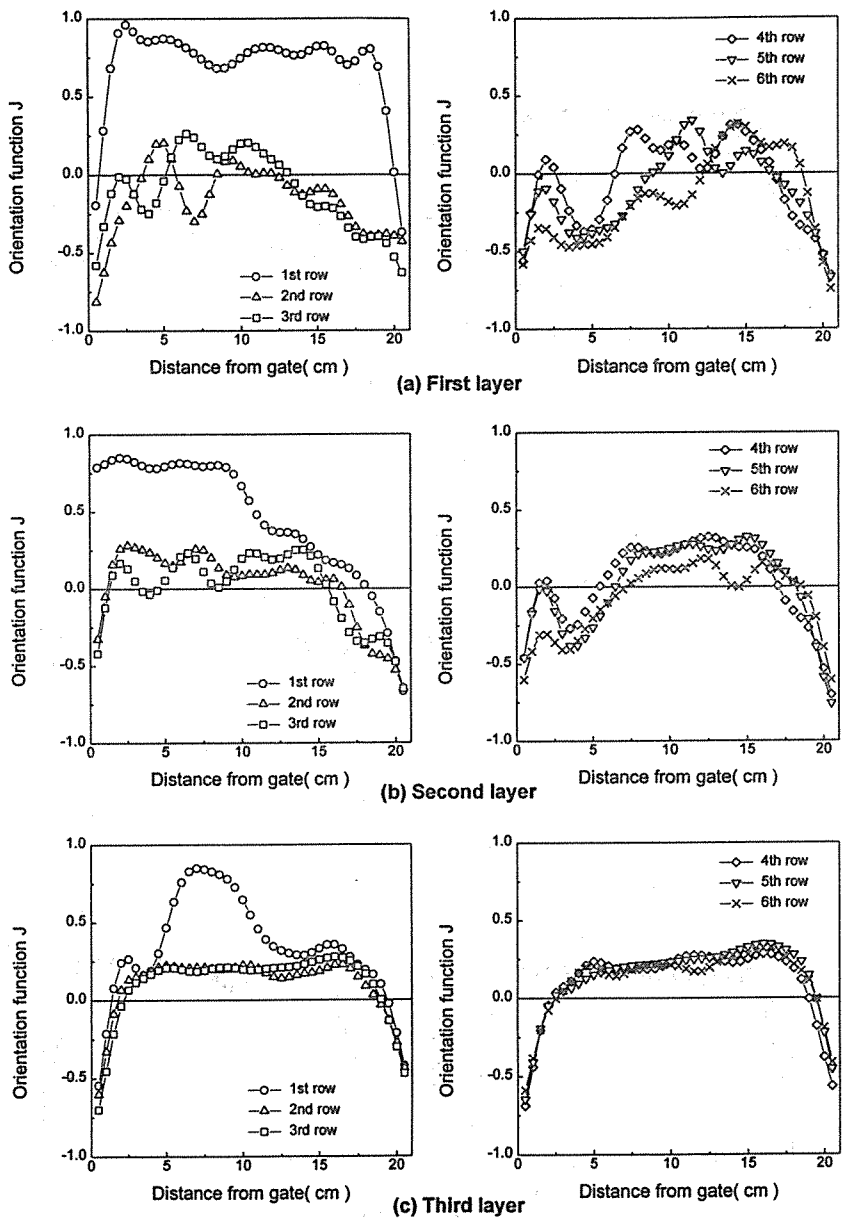

Fig. 11. Fiber orientation distribution for fiber content 70wt% for thickness direction

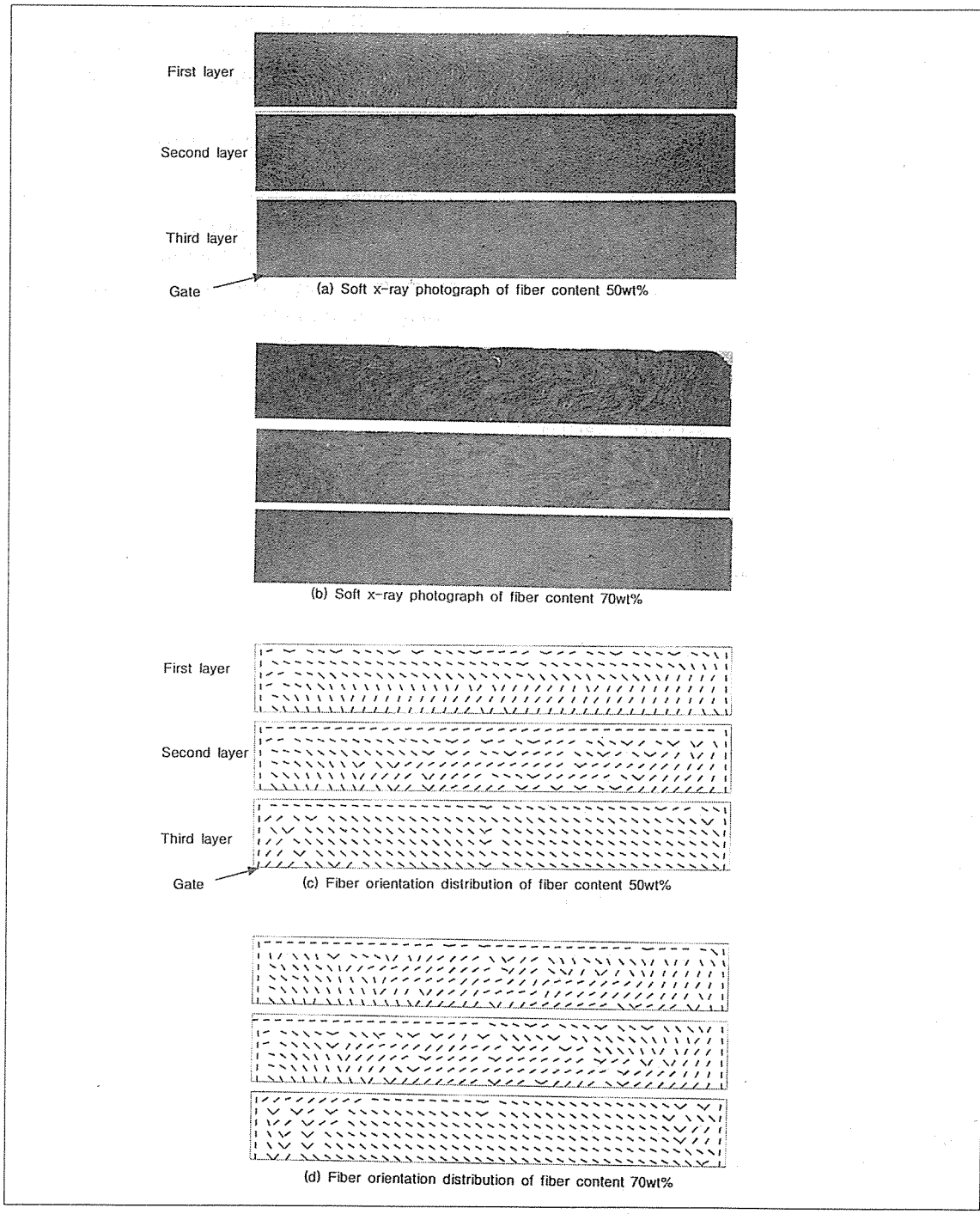

Fig. 12. Soft x-ray photograph and fiber orientation distribution of injection molded specimen for thickness direction

x축, -1인 경우에는 y축으로 배향되어 있는 것으로 나타내었다. Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 금형벽면과의 마찰로 인하여 섬유는 유동방향으로 배향되지만 중심부는 유동방향과 거의 직각인 상태의 섬유배향을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 특히 70wt%인 성형품인 경우에는 50wt%와는 달리 심한 섬유끼리의 간섭현상으로 배향상태가 더욱 불규칙적으로 나타나고 있다.

5. 결 론

장섬유로 강화된 플라스틱 복합재를 사출하는 경우에 있어서 금형내로의 충전과정중 섬유의 배향상태를 정량적으로 가시화할 수 있는 해석기법을 확립하였으며, 성형품의 두께방향과 수직한 단면들의 섬유배향상태를 고찰한 결과 동일한 유동장일지라도 중앙부와 표층부의 섬유배향상태가 상이한 것을 가시적으로 나타내었다.

이들 결과를 이용하여 이론적인 배향모델과의 비교는 물론 평면전단 흐름에 대한 수치모사 시스템과의 연계해석과 이 모델의 타당성 검증이 필요하므로 현재 진행중에 있다.

참 고 문 헌

1. Hojo, H., Kim, E. G., Tamakawa, K. and Nagatsuka, C., "Separation of Matrix and Fibers during Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastics", Proceeings of the 3rd Japan -U.S. Conference on Composite Materials, Tokyo, 1986, pp. 605~612.

2. Hojo, H., Kim, E. G., Yaguchi, H. and Onodera, T., "Simulatin of Compression Molding with Matrix - Fibre - Reinforced Thermoplastic", International Polymer Processing, Vol. 3, Issue 1, 1988, pp. 54~61.

3. Hieber, C. A., Socha, L. S., Shen, S. F., Wang, K. K. and Isayev, A. I, "Filling Thin Cavities of Variable Gap Thickness : A Numerical and Experimental Investigation", Polymer Engineering Science, Vol. 23, 1983, pp. 20~26.

4. 山田國廣, 堀 川 明, "2次元 纖維集合體の確率幾何", 纖維機械學會誌, 第37卷, 第12號, 1984, pp. 51~64.

5. Stein, R. S. and Stidham, S. N., "A Theory of Orientation Correlations in Crystalline Polymeric Solids", Journal of Applied Physics, Vol. 35, No. 1, 1964, pp. 42~46.

6. Dehoff, R. T., "Quantitative Microscopy", McGraw-Hill, New York.

7. Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G. and Kim, E. G., "Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermo-plastics using Image Processing", International Polymer Processing, Vol. 10, 1995, pp. 262~269.

8. 水島二郎, 宮內新, 濟 善雄 "パソコン畵像處理", 1986, pp. 1~21.