834 大韓機械學會論文集 第15卷 第3號, pp. 834~842, 1991.

〈論 文〉

長纖維强化 高分子複合板의 프레스成形에 있어서 畫像處理에 의한 纖維의 配向에 관한 硏究

조선형* · 이동기** · 김이곤***

(1990년 1월 16일 접수)

A Study on Fiber Orientation by Image Processing during Press Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheet

Seon Hyung Jo, Dong Gi Lee and E Gon Kim

Key Words: Fiber Orientation(섬유배향), Image Processing(화상처리), Orientation Function (배향함수)

Abstract

Characteristics of fiber-reinforced plastic composite materials depend on the quantity and shape of fibers. During a molding process of composites, the separation of matrix and fiber is caused by the flow during the molding process. As a result, the product tends to be non-homogeneous and anisotropic. Hence, it is very important to clarify the relations between separations · orientation and molding conditions. So far, there is no study on the effect of molding conditions on fiber orientation. In this study, several methods to extract the edge line of bodies are introduced. The edge line and the distribution of fiber orientation of particular materials are extracted by means of image processing. The fiber orientation function under various molding conditions is studied to grasp the fiber orientation during press molding. Result shows that the main factor having effect on fiber orientation function is the compression ratio.

기 호 설 명

B	: 成形品 총길이의 1/2
C	: 交點數
$D(\theta)$	: 交叉直線갯수
$H_D(\dot{K})$	: 空間微分法의 纖維配向角 分布
h	: 成形後 두께
h_0	: 初期 두께
$\dot{h}$	: 壓縮速度
J	: 配向函數
ℓ	: 섬유길이
N	: 纖維갯수
$q(\theta)$	: 2次元 配向角分布
R_{cr}	: 壓縮比
$\bar{v}_m$	: 平均速度
W	: 金型의 幅
ΔH	: 水平方向의 差
ΔG	: 輪廓線의 크기
ΔV	: 垂直方向의 差
θ	: 輪廓線의 方向
σ_L	: 流動方向의 引張强度
σ_T	: 流動方向과 直角方向의 引張强度

* 정회원, 대유공업전문대학 기계설계과
** 정회원, 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과
*** 정회원, 국민대학교 공과대학 기계설계학과

1. 序 論

熱可塑性高分子材料(플라스틱)를 基地材料로 하고, 이것을 長纖維로 强化시킨 長纖維强化 플라스틱複合材料(스템퍼블시트)의 特性은, 纖維의 量과 形態에 의해서 支配된다. 이 材料를 프레스로 高溫壓縮流動成形을 하는 경우의 問題點은 成形時에 流動에 의해서 플라스틱과 纖維의 分離 및 纖維의 配向이 發生하여 成形品이 不均質하게 되고, 成形品의 强度나 特性에 變化가 생기는 것이다. 따라서 이 分離·配向을 成形條件이나 材料와 關聯시켜서 明確히 하고 또 分離·配向을 制御하는 것은 뛰어난 成形品을 얻는데 있어서 매우 重要하다.

成形品의 軟X線 寫眞濃度를 利用하여 物體의 輪廓線(edge)를 求하는 方法은 스테레오로지(stereology)에 屬하는 交點計數法과 差分法 및 템플리트를 使用하여 그 最大値로부터 物體의 輪廓을 抽出하는 空間微分法이 있다. 纖維개개를 識別할 수 있는 경우에는 交點計數法이 有用하나, 스템퍼블시트와 같이 纖維개개를 識別할 수 없는 경우에는 差分 오퍼레이터를 利用하여야 한다. 그러나 지금까지는 短纖維의 配向에 관한 硏究는 많이 있으나[1], 長纖維의 配向과 成形條件과를 聯關시켜 配向에 影響을 주는 因子에 대한 硏究는 거의 없으며, 矢口等[2]은 軟X線 寫眞의 濃度差를 利用한 物體의 輪廓線을 抽出하는데 있어서 Prewitt오퍼레이터를 利用하여 纖維의 配向을 測定하였다.

그러므로 本 硏究에서는 畫像處理에 利用되는 差分오퍼레이터中 Sobel오퍼레이터를 利用하여 成形品의 輪廓線抽出을 하여, 纖維配向角分布를 구하고, Prewitt 오퍼레이터의 경우와 比較한다. 또 프레스成形時 發生하는 長纖維의 2次元配向狀態를 把握하기 위하여 纖維配向函數에 미치는 各種 成形條件의 影響에 대한 結果를 報告한다.

2. 理 論

2.1 纖維配向角分布의 表示式

配向을 갖는 2次元 纖維集合體의 幾何學特性을 나타내는 因子로서는 纖維配向角分布 $q(\theta)$, 配向函數 J, 交點數 C, 配向主軸에 어느각도 θ'를 이루고 있는 走査線에 交叉하는 直線갯수 $D(\theta')$等이 있다.

Hearle等[3]은 2次元纖維集合體 中에서 Parallel laid型 일 때 纖維配向角分布 $q(\theta)$는

$$q(\theta)=a\pm b\cos^k\theta \tag{1}$$

로 나타내었으며, 여기서 θ는 配向角이며, a, b, k는 常數이다. 常數 b는 配向角 θ가 0°일때는 (+)의 값을 갖고, 90°일때는 (−)의 값을 갖는다.

Stein等[4]은 高分子材料의 配向狀態를 評價하는 方法으로서 2次元配向角分布에 대한 配向函數 J를

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

로 定義 하였다.

여기서

$$q(\theta)=\pi^{-1}\{((1-J)/(1+J))\cos^2\theta + ((1+J)/(1-J))\sin^2\theta\}^{-1} \tag{3}$$

이며, 配向이 等方性인 경우 $J=0$, x軸方向으로 完全히 配列되어 있는 경우는 $J=1$, y軸方向으로 完全히 配列되어 있는 경우는 $J=-1$이며, 여기서 J는 2次元纖維集合體의 配列의 程度를 나타내는 因子이다.

Kallmes[5]는 面積 a內에 纖維길이 ℓ인 纖維가 N개 存在하는 경우 즉 配向角分布가 等方性인 경우의 交點數 C는

$$C=(N\ell)^2/\pi a \tag{4}$$

로 나타내었다.

小森 等[6]은 任意의 配向角分布인 경우에 대하여 交點數를 求하고 그 中에서 2次元 纖維集合體에 대해서는

$$C=\{(N\ell)^2/2a\}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}\int_{-\pi/2}^{\pi/2}q(\theta)q(\theta')\cdot|\sin(\theta-\theta')|\,d\theta d\theta' \tag{5}$$

로 나타내었을 때

配向主軸에 대하여 θ'方向의 走査線과 交叉하는 直線갯수 $D(\theta')$는

$$D(\theta')=N\ell/a\int_{-\pi/2}^{\pi/2}q(\theta)|\sin(\theta-\theta')|\,d\theta = \{N\ell/a\}H(\theta') \tag{6}$$

로 나타내었다.

여기서

$$H(\theta')=\int_{-\pi/2}^{\pi/2}q(\theta)|\sin(\theta-\theta')|\,d\theta \tag{7}$$

이다.

식 (6)에서 $D(\theta')$를 이미지스캐너(image scanner)와 컴퓨터를 利用하여 軟X線 寫眞濃度情報를 測定하면 配向函數 J가 決定되고 이값으로 纖維配向角 分布를 求할 수 있다.

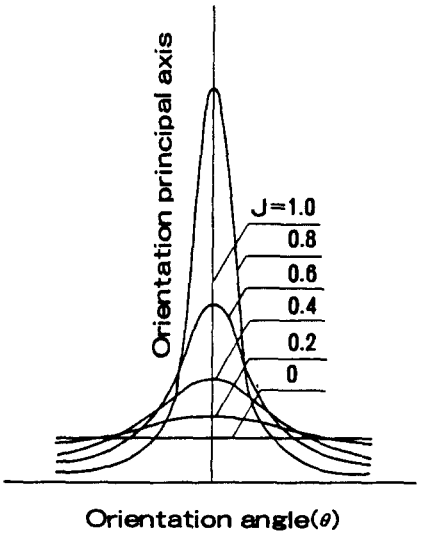


Fig. 1 Relationship between orientation angle(θ) and orientation principal axis

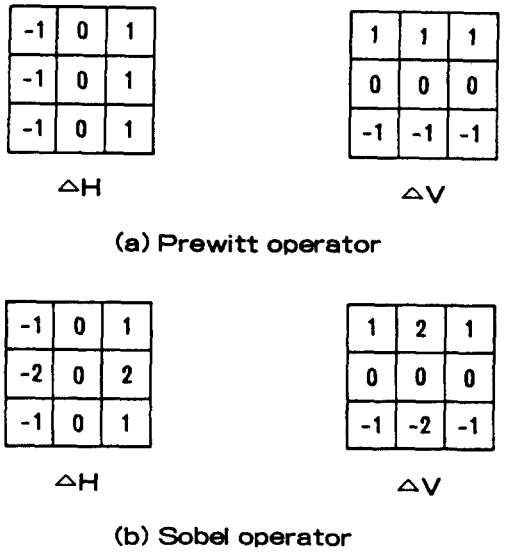


Fig. 2 Finite difference Prewitt and Sobel operator

Fig. 1은 配向角 θ와 纖維配向主軸과의 關係를 나타낸 것이다. 이 그림에서 纖維配向函數 $J=1$일 때 配向主軸과 一直線의 關係를, $J=0$일때는 配向主軸과 直角의 關係를 각각 나타내고 있다. 纖維配向角分布의 測定法으로서는, 個個의 纖維를 識別할 수 있을 때에는 交點計數法이 有用하며[7], 個個의 纖維를 識別할 수 없는 경우 즉, 纖維가 서로 强하게 엉켜져 있어 纖維를 識別할 수 없는 경우에는 成形品의 軟X線 寫眞濃度情報를 利用하여 纖維配向分布를 測定하는 방법이 있다[8].

2.2 空間微分法

寫眞의 濃度로 畵像처리를 함으로서 物體의 輪廓線을 檢出하는 方法으로서 1次微分, 2次微分等의 差分法(FDM)과 템플리트(template)를 使用하여 그 最大値로부터 求하는 方法이 있다. 그 中에서 輪廓線의 方向을 求할 必要가 있을 때에는 3×3의 마스크 處理를 利用한 差分필터를 利用하는 方法이 매우 有效하다. 또 差分오퍼레이터에는 Roberts, Prewitt, Sobel 오퍼레이터가 있는데[9], Roberts 오퍼레이터를 利用하면 誤差가 크기 때문에 檢討對象에서 除外하였다. Fig. 2의 (a)는 Prewitt 오퍼레이터 필터를, (b)는 Sobel 오퍼레이터 필터를 各各 나타내었다. 個個의 纖維를 識別할 수 없는 경우 즉, 纖維가 서로 强하게 엉켜져 있어서 纖維를 識別할 수 없는 경우이므로 成形品의 軟X線 寫眞濃度情報를 利用하여 纖維配向角分布를 測定하기로 한다. Fig. 2와 같이 水平, 垂直方向의 差分필터를 利用하므로서 中心畵像要素(以下 畵素라고 함)의 兩方向으로 ΔH, ΔV를 구한다. 이값을 根據로, 輪廓線의 方向 θ는

$$\theta=\tan^{-1}(\Delta V\times\Delta H^{-1})+\pi/2 \tag{8}$$

Prewitt 오퍼레이터 :

$$\begin{aligned}\Delta H=&\{f(x+1,\ y-1)+f(x+1,\ y)\\&+f(x+1,\ y+1)\}\\&-\{f(x-1,\ y-1)+f(x-1,\ y)\\&+f(x-1,\ y+1)\}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\Delta V=&\{f(x-1,\ y+1)+f(x,\ y+1)\\&+f(x+1,\ y+1)\}\\&-\{f(x-1,\ y-1)+f(x,\ y-1)\\&+f(x+1,\ y-1)\}\end{aligned} \tag{10}$$

Sobel 오퍼레이터 :

$$\begin{aligned}\Delta H=&\{f(x+1,\ y-1)+2f(x+1,\ y)\\&+f(x+1,\ y+1)\}\\&-\{f(x-1,\ y-1)+2f(x-1,\ y)\\&+f(x-1,\ y+1)\}\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}\Delta V=&\{f(x-1,\ y+1)+2f(x,\ y+1)\\&+f(x+1,\ y+1)\}\end{aligned}$$

$$-\{f(x-1,\ y-1)+2f(x,\ y-1)+f(x+1,\ y-1)\} \quad (12)$$

로 주워진다. 또 輪廓線의 크기 즉 濃度差는

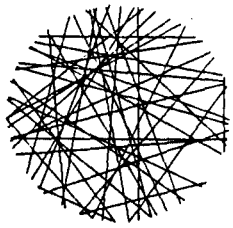
$$\Delta G=(|\Delta H|+|\Delta G|)/2 \quad (13)$$

로 나타낸다. 이 값이 어느 Threshold값(濾値)보다 큰 경우를 輪廓線으로 한다. 식 (8)에 의해 求해진 角度를 該當畫素의 配向主軸으로 한다.

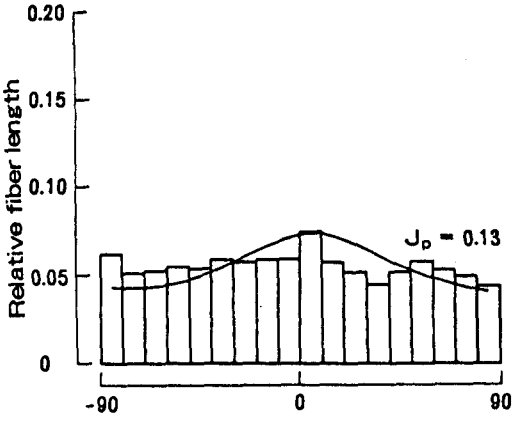
軟X線 寫眞으로부터 얻어진 濃度情報에서, 모든 畫素에 대하여 配向角 θ와 ΔG를 求하였을 때 纖維配向角分布를 다음 式과 같이 定義할 수 있다.

$$H_D(K)=N_\theta(k)/\sum_{i=0}^{n-1}N_\theta(i),$$
$$k=0, 1, 2, 3, \cdots\cdots,\ n-1 \quad (14)$$

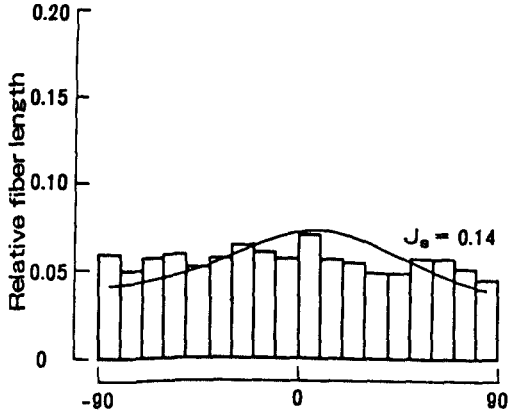
여기서 n은 $0\leq\theta<\pi$의 分割數이며, $N_\theta(k)$는 $(2k-1)\pi/2n\leq\theta\leq(2k+1)\pi/2n$의 範圍에 있다. 이와같은 式으로 測定한 $H_D(K)$로부터 纖維의 配向分布가 구하여진다. Prewitt 오퍼레이터와 Sobel 오퍼레이터를 比較하기 위하여 所定의 配向函數 J를 주고 플로터로 作圖한 시뮬레이션 그림에 대한 各各의 關係를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3(a)는 任意의 配向函數 $J=0.2$를 컴퓨터에 入力시켜 플로터로 作成한 시뮬레이션 그림이며 (b)는 (a)의 그림을 Prewitt 오퍼레이터로 (c)는 Sobei 오퍼레이터로 각각 測定한 配向函數 J와 그 配向分布圖이다. 마찬가지로 Fig. 4(b)와 (c)도 시뮬레이션 그림 $J=0.6$인 경우에 대한 Prewitt 오퍼레이터와 Sobel 오퍼레이터로 各各 計測한 配向函數 J와 그 配向分布圖이다. Fig. 3과 Fig. 4에서 시뮬레이션 J_0값과 各各의 오퍼레이터별로 그 값이 작게 計測되는 理由는 이미지스캐너로 부터 入力된 畫像을 測定할 때 시뮬레이션 假想纖維가 겹치기 때문에 差異가 생기는 것이다. Fig. 3과 Fig. 4의 막대그래프에서 가로軸은 走査線의 角度를 0°에서 180°까지 10°間隔으로 하여 시뮬레이션한 그림을 이미지스캐너로 읽은 결과를 나타내고, 세로軸의 相對纖維길이는 시뮬레이션 그림에서 假想纖維의 全體길이와 어느 角度를 이루고 있는 纖維 한개와의 比를 相對纖維길이로 하여 作圖한 그림이다. 寫眞濃度情報로 配向函數를 決定하는 方法 즉 差分필터에 의한 配向測定法에서는 利用하는 오퍼레이터에 따라서 測定된 J값에 差異가 發生한다. 따라서 Prewitt 오퍼레이터와 Sobel 오퍼레이터를 比較하였던바 Sobel 오퍼레이터를 利用하면 解析對象畫素의 濃度의 合을 求하는데 있어서 Prewitt 오퍼레이



(a) Orientation for J_0 = 0.2

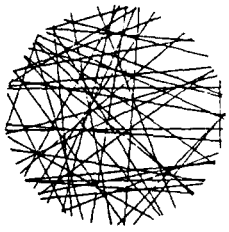


(b) Prewitt operator

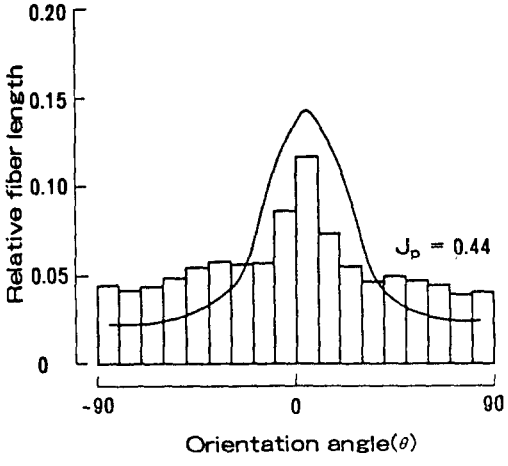


(c) Sobel operator

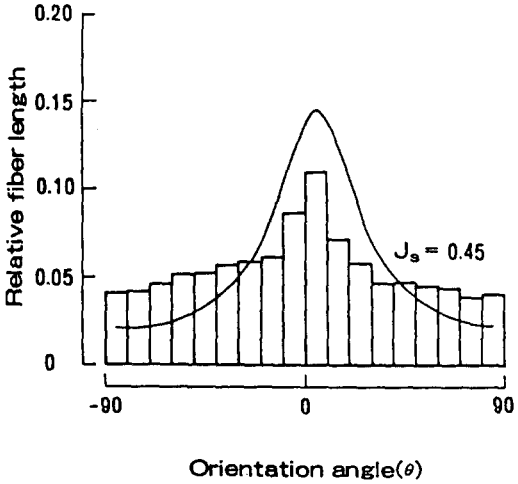
Fig. 3 Comparison between Prewitt and Sobel operator for $J_0=0.2$



(a) Orientation for $J_0 = 0.6$



(b) Prewitt operator



(c) Sobel operator

Fig. 4 Comparison between Prewitt and Sobel operator for $J_0=0.6$

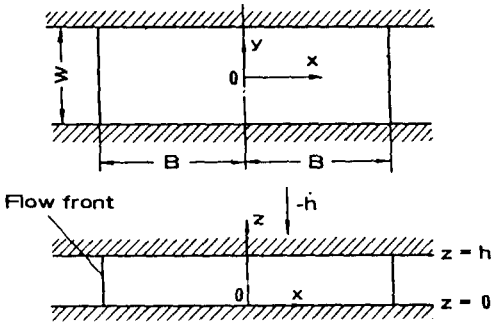


Fig. 5 Nomenclature for slab-shaped part compression molding

터를 利用하는 것보다 上下左右의 畵素에 대하여 2만큼 큰 加重値를 줄 수 있으므로 Prewitt 오퍼레이터보다 Sobel 오퍼레이터가 좀더 正確하다. 그래서 本 硏究에서는 Sobel 오퍼레이터를 利用하여 成形品의 纖維配向角 分布測定을 한다.

2.3 矩形板의 壓縮成形

纖維强化플라스틱複合材料를 Fig. 5와 같이 平行板사이에 끼우고 y方向의 흐름을 拘束하여 荷重 F_c를 加해 初期두께 h_0에서 h까지 壓縮하면, 材料는 成形中의 流動에 의해 纖維의 配向이 發生하므로, 成形條件 즉 프레스의 壓縮速度, 壓縮比, 金型의 溫度 等을 變化시켜서 成形品의 纖維配向角分布를 測定한다.

連續 및 運動量方程式을 使用하여 速度分布를 求하고, 平均速度를 아래와 같이 定義한다.

$$\bar{v}_m = \dot{h}x/h \tag{15}$$

그리고 初期두께 h_0를 h까지 壓縮한 경우의 壓縮比 R_{cr}은 다음과 같다.

$$R_{cr} = 1 - h/h_0 \tag{16}$$

3. 實 驗

實驗에 使用한 材料는 日本 出光石油化學(株) 製品인 스탬퍼블시트(母材 : 폴리프로필렌(PP), 强化材 : 유리長纖維매트, 纖維含有率 : 25wt%, 40wt%, 두께 h_0 : 3.8mm)이며, 長纖維가 서로 强하게 엉켜져 있다. 그리고 纖維 및 플라스틱의 密度는 各各 2.55g/cm³, 0.9g/cm³이다.

이것을 60mm(幅)×70mm(길이)×3.8mm(두께)의 直四角形板으로 切斷하여 試驗片으로 하였다.

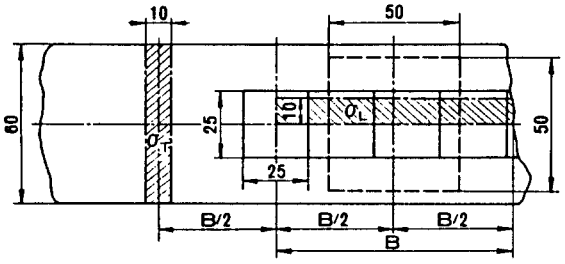


Fig. 6 Measurement area for orientation function J and specimen for the measurement of tensile strength σ_L and σ_T

또 金型캐비터의 치수는 400mm×60mm이고, 金型의 溫度는 180℃, 200℃이며 프레스의 壓縮速度는 14.4mm/sec, 21.6mm/sec, 86.5mm/sec 3種類이다. 加壓裝置는 30톤 油壓프레스를 使用하였으며 金型에는 熱傳對를 附着시키고 加熱은 棒 및 板히터를 利用하였다[10].

畵像處理에 利用한 이미지스캐너는 日本 세이코엡슨製 GT-4000V이며 解像度는 400×400畵素, 1畵素 1/8mm×1/8mm, 濃度階調 8비트(256)이다. 그리고 軟X線 發生裝置는 美國 베니트 CM205(醫療用)이며, 필름은 日本 후지社 製品(MI-NC醫療用 X-레이필름, 180mm×240mm)이다. Fig.6에는 纖維配向函數 J를 測定하기 위하여 形成品의 길이 $B/2$인 점($\bar{v}_m$에 해당하는 點)을 基準으로 하여 50mm×50mm의 領域을 畵像處理함으로써 配向函數 J를 測定하는 領域을 나타내었으며, 中心으로부터의 距離에 따른 纖維配向函數를 測定하기 위하여 成形品 中心에서 25mm×25mm의 領域을 흐름方向에 따라서 測定하였다. 그리고 材料의 流動方向의 引張强度 σ_L과 흐름의 直角方向 σ_T의 比와 纖維配向函數의 關係를 考察하기 위하여 Fig. 6의 斜線部分과 같이 引張强度試片을 採取하였다. 引張强度를 구하기 위한 試驗片 採取에 있어서 σ_T는 成形品의 길이 $B/2$인 點을 基準으로 세로軸 幅 10mm를 그리고 σ_L은 成形品 總 길이의 1/2인 點을 基準으로 가로 軸을 따라서 幅 10mm를 各各 採取하여 各 두께別로 引張實驗을 하였다.

4. 結果 및 考察

纖維配向角 分布를 測定하기 위한 스템퍼블시트는 矩形板의 1次元흐름 壓縮으로 하였다. Fig. 7(a)에 成形前(40wt%)의 軟X線 寫眞을, Fig. 7(b)에 그 寫眞에 對해서 測定한 配向角 分布를 나타내었다. X線의 區別은 X線 發生裝置로부터 X線을 發生시킬때 最大 K_{VP}(Kilo voltage peak)가 150以上의 X線을 하드 X-레이 그 以下인 경우를 소프트 X-레이 라고 한다. 壓縮比 0.605(40wt%)인 경우에 對해서, Fig. 8(a)에 成形品의 軟X線 寫眞을 나타내었으며 Fig. 8(b)에는 이 寫眞에 對하여 畵像處理를 하여 얻은 纖維配向角 分布圖이다. Fig. 7(a)와 比較해 흐름方向으로 纖維가 配向하고 있는 狀態를 觀察할 수 있다. Fig. 9는 纖維

(a)

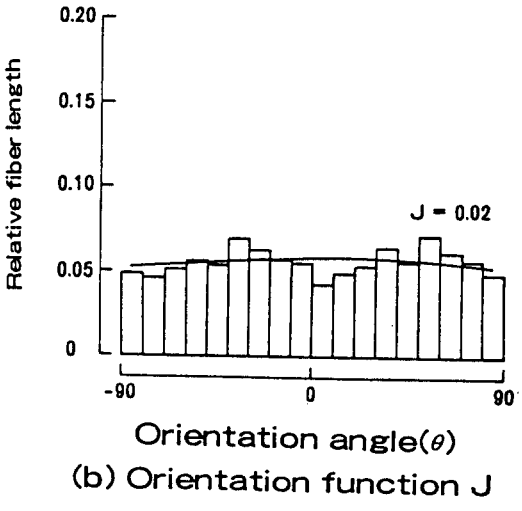


Fig. 7 Soft X-ray photograph and orientation function J before molding

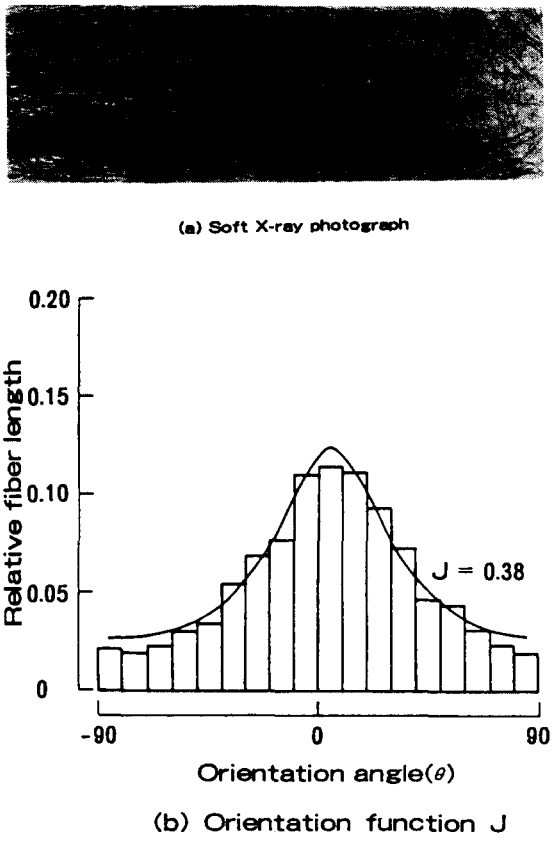


Fig. 8 Soft X-ray photograph and orientation function J after molding

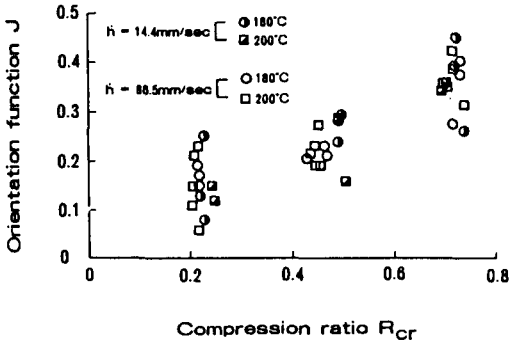


Fig. 9 Effect of compression ratio R_{cr} on fiber orientation function J (fiber content 25wt%)

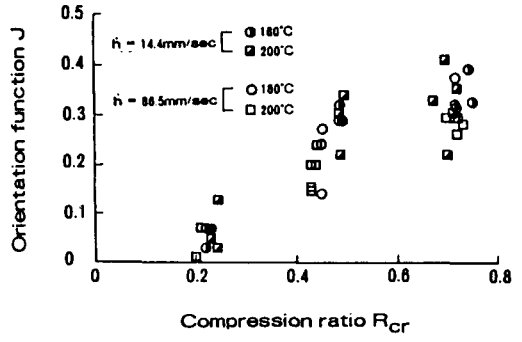


Fig. 10 Effect of compression ratio R_{cr} on fiber orientation function J (fiber content 40wt%)

含有率 25wt%인 경우, 纖維의 配向函數와 壓縮比의 關係이다. 壓縮速度는 14.4mm/sec, 86.5mm/sec이며 金型의 溫度는 各各 180℃, 200℃이다.

Fig. 10은 纖維含有率 40wt%인 경우, 纖維의 配向函數와 壓縮比의 關係이다. 壓縮速度는 14.4 mm/sec, 86.5mm/sec이며 金型의 溫度는 앞의 경우와 마찬가지이다. Fig. 9와 Fig. 10에서 알 수 있듯이 纖維의 配向函數는 壓縮比의 增加와 더불어 增加하고 있음을 알 수 있다. 複合材料 自體가 갖고 있는 不均質性 때문에 그에 대한 실험데이터는 많은 變化를 나타나게 되므로 Fig. 9와 Fig. 10에서 成形溫度에 따라서 偏差가 있다고 생각된다. 纖維의 配向函數 J에 미치는 平均速度 $\bar{v}_m$의 影響을 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 成形條件은 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이

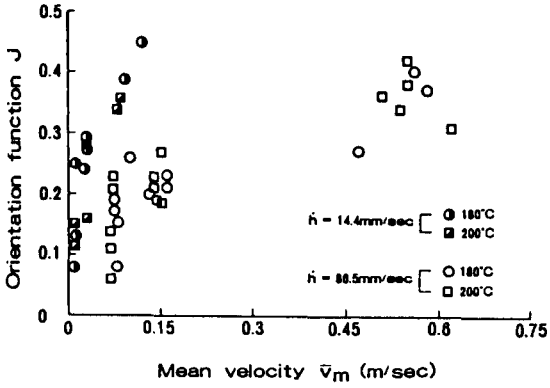


Fig. 11 Effect of mean velocity $\bar{v}_m$ on fiber orientation function J (fiber content 25 wt%)

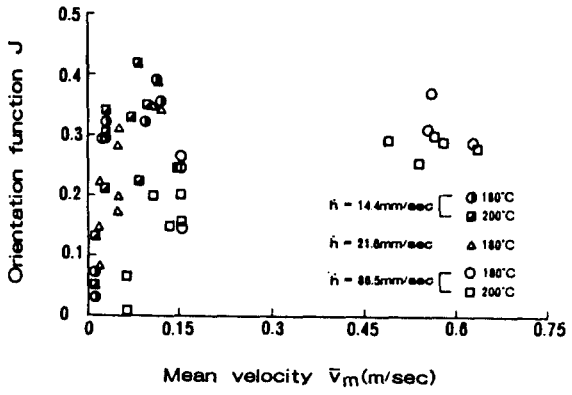


Fig. 12 Effect of mean velocity $\bar{v}_m$ on fiber orientation function J(fiber content 40wt%)

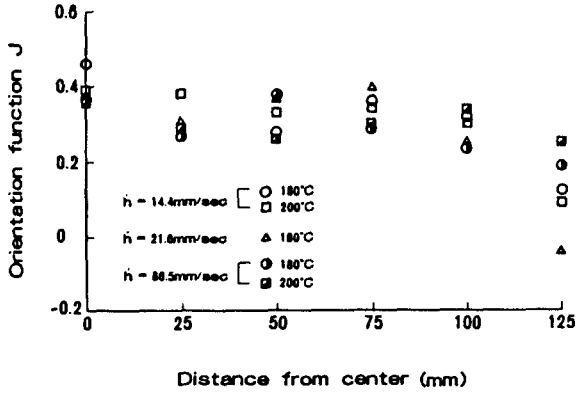


Fig. 13 Relationship between fiber orientation function J and distance from center(fiber content 40wt%)

同一壓縮速度에서는 平均速度 $\bar{v}_m$가 빠르면 纖維의 配向이 잘 되어 配向函數 J가 增加함을 알 수 있다. Fig. 9~Fig. 12로부터 長纖維의 配向은 成形中의 速度에 依存하는 것이 아니라, 壓縮比 즉 變位에 存在함을 알 수 있다. 短纖維의 配向은 流動場에 影響을 받는 것과 對照的이다. 中心으로부터의 距離에 따른 配向函數의 影響을 纖維含有率 40 wt%인 경우(壓縮比 0.747)에 대해서 Fig. 13에 나타내었다. 이 그림에서 配向函數는 成形品의 끝부분을 除外하고는 一定하며, 끝 部分은 fountain flow의 影響 때문에 配向函數 J가 작아졌음을 알 수 있다. Fig. 14는 25wt%의 경우의 纖維配向函數

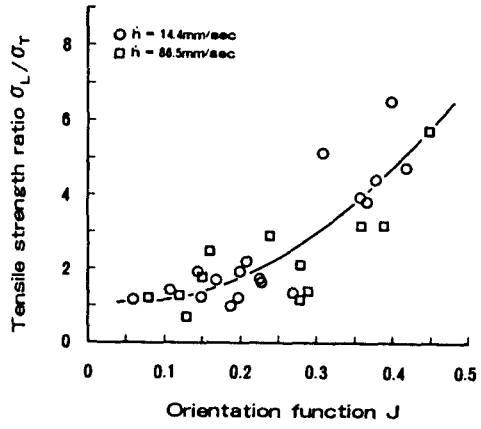


Fig. 14 Relationship between fiber orientation function J and tensile strength ratio σ_L/σ_T (fiber content 25wt%)

와 成形品의 引張强度와의 關係이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 材料의 흐름方向의 引張强度 σ_L과 흐름方向과 直角方向의 引張强度 σ_T의 關係에서는 앞의 實驗條件에서 幅方向을 拘束하여 高溫壓縮成形을 하였기 때문에 纖維는 길이方向으로만 母材와 같이 흐르기 때문에 當然히 σ_L쪽이 σ_T보다 크게된다. 배향함수 J가 0인 경우는 거시적으로 등방성이므로 σ_L/σ_T은 1이 된다. x축을 배향함수 J, y축을(σ_L/σ_T)로 취하였을 경우 최소자승법으로 커브피팅하였을때 다음과 같이 2차함수로 정량적으로 표시할 수 있다. 즉

$$(\sigma_L/\sigma_T)=29.9J^2-3.14J+1.19 \qquad (17)$$

이 그림에서 배향함수가 크면 클수록 (σ_L/σ_T)이 증가함을 알 수 있다.

5. 結 論

長纖維强化플라스틱複合材料의 프레스成形을 할 때 發生하는 纖維의 配向을 위와 같은 理論과 實驗結果로부터 다음과 같은 決果를 얻었다.

(1) 畵像處理를 하여 長纖維强化플라스틱 複合板의 纖維配向을 測定하기 위한 差分法의 오퍼레이터는 Prewitt 오퍼레이터를 利用하는 것보다 Sobel 오퍼레이터를 利用하는 것이 좀 더 正確한 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

(2) 纖維의 配向程度를 나타내는 配向函數 J는 纖維含有率, 壓縮速度, 成形溫度에는 影響을 받지

않고, 壓縮比 즉 成形品의 變位에 支配的인 影響을 받고 있으며, 壓縮比가 크면 클수록 配向函數 f가 增加하였다.

참 고 문 헌

(1) Lovrich, M. L., Tucker III, C. L., 1985, "Automated Measurement of Fiber Orientation in Short Fiber Composites", ANTEC, pp. 1119~1122.

(2) 矢口 仁, 北條英典, 鬼海英夫, 玉川規一, 越本 勝, 1988, "長纖維集合體の纖維影濃度情報を用いた纖維配向角分布の測定", 第39回 日本塑性加工連合講演會 論文集, No.233.

(3) Hearle, J.W.S., Ozsanlav, V., 1979, "The Determination of Fibre Orientation and Curl", J. Text. Inst., 11, pp. 487~498.

(4) Stein, R.S., Stidham, S.N., 1964, "A Theory of Orientation Correlations in Crystalline Polymeric Solids", J. Appl. Phys., 35, 1, pp. 42~46.

(5) Kallmes, O., Corte, H., 1960, "The Structure of Paper Ⅷ. Structure of Idealized Nonrandom Networks", Tappi., 47, 11, pp. 694~703.

(6) 山田國廣, 堀川 明, 1984, "2次元纖維集合體の確率幾何", 纖維學會誌, 37, 12, pp. 51~64.

(7) Dehoff, R.T., 1968, "Quantitative Microscopy", McGraw-Hill, New York.

(8) 矢口 仁, 北條英典, 鬼海英夫, 玉川規一, 越本 勝, 1988, "纖維充てん複合材料成形品の纖維配向角分布の表示とその簡易測定", 第39回 日本塑性加工連合講演會論文集, No. 232.

(9) 水島二郎, 宮內新, 齊藤善雄, 1986, "ペソコン畵像處理", 哲學出版, pp. 1~21.

(10) 조수근, 김석호, 김이곤, 1988, "장섬유강화플라스틱복합판의 압축성형에 관한 연구(제2보, 섬유함유율 분포에 관한 실험)", 1988년도 대한기계학회 춘계학술대회초록집, pp. 660~663.