



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019 년 2 월
석사학위논문

탄소섬유 함유 PDMS 혼합액의 유동가시화 실험에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

박준엽

탄소섬유 함유 PDMS 혼합액의 유동가시화 실험에 관한 연구

Experimental study on flow visualization of carbon
fiber and PDMS mixture

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

박준엽

탄소섬유 함유 PDMS 혼합액의 유동가시화 실험에 관한 연구

지도교수 오 동 욱

이 논문을 공학석사 학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

박 준 업

박준엽의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조 홍 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 정 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 오 동 욱 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

Contents

Contents	i
List of Figures	V
List of Tables	VIII
Nomenclature	IX
ABSTRACT	X
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 기존 연구	3
제 3 절 연구 목적	13
제 2 장 복합소재 내부 비등방성 첨가제 정렬 이론	15
제 1 절 전단응력	15
제 2 절 전단변형율	17
제 3 절 전단담화	18
제 4 절 첨가제 정렬 이론	19
제 3 장 전산유체해석	21
제 1 절 오리피스 유로 모사 2D 해석	21
1. 해석 지배방정식	21
2. 2D 해석 모델	22
3. 해석 결과	23
제 2 절 전단응력 방향 분석	25
1. 2D 해석 모델	25

2. 해석 결과	25
제 4 장 이미지 프로세싱	27
제 1 절 이미지 프로세싱 준비	27
1. 이미지 전처리	27
2. 이미지 내 선분 분리	28
제 2 절 이미지 분석	30
1. 각도 분포 분석 방법	30
2. 각도 분포 계산 결과	32
가. 이미지 내 선분 각도	32
나. 이미지 내 선분 각도 분포	33
제 3 절 유동가시화 이미지 분석	36
1. 유동가시화 이미지	36
2. 이미지 분석 결과	37
제 5 장 3D 프린팅 금형 내부 유동가시화 실험 및 첨가제 정렬 분석	40
제 1 절 평행 및 직각 유로	40
1. 유동가시화 실험장치 및 방법	40
가. 유동가시화 금형	41
나. 디지털 현미경	43
다. LED 조명	45
라. 주사기 펌프	46
마. 유동가시화 혼합물	47
2. 평행 및 직각 유로 실험 결과	48

가. 평행 유로	48
나. 직각 유로	51
다. 3D 프린터 금형 내부 유동가시화 결과	52
제 6 장 꺾인 유로 내부 유동가시화 실험 및 분석	54
제 1 절 각도 변화 유로	54
1. 유동가시화 실험장치 및 방법	54
가. 유동가시화 금형	54
나. 주사기 펌프	56
2. 각도 변화 유로 실험 결과	56
가. 30° 각도 유로	56
나. 45° 각도 유로	58
다. 60° 각도 유로	60
라. 90° 각도 유로	62
제 7 장 오리피스 유로 내부 유동가시화 실험 및 분석 ...	65
제 1 절 오리피스 유로	65
1. 유동가시화 실험장치 및 방법	65
가. 유동가시화 금형	66
나. 초고속 카메라	67
다. 대물렌즈	68
라. 주사기 펌프	69
마. 유동가시화 혼합물	69
2. 오리피스 유로 실험 결과	70
가. 유로 내부 위치별 섬유 정렬	70

나. 섬유 정렬 분포	71
다. 섬유 정렬 각도 비교	74
라. 평균 섬유 정렬 각도 및 표준편차	79
제 2 절 두께 변화 오리피스 유로	82
1. 유동가시화 실험장치 및 방법	82
가. 유동가시화 금형	82
나. 대물렌즈	83
2. 두께 변화 오리피스 유로 실험 결과	84
제 8 장 결 론	87
제 9 장 참고문헌	90

List of Figures

Fig. 1.1 Thermal conductivity improvement by filler volume fraction - Weidenfeller(2004)	3
Fig. 1.2 Thermal conductivity improvement by additive concentration - Lee(2006)	4
Fig. 1.3 Storage modulus improvement by additive alignment - Thostenson(2002)	5
Fig. 1.4 Polyethylenebutylene-b-ethylene oxide(PEB-PEO) alignment at narrow channel - Trebbin(2013)	6
Fig. 1.5 Fiber structure image and thermal diffusivity comparison at (a, c) unidirectional sample (b, d) unaligned sample - Fujita(2017)	7
Fig. 1.6 Additive alignment analysis by specimen preparation - Creighton(2001)	8
Fig. 1.7 Additive alignment tendency in the parallel channel	13
Fig. 2.1 Definition of shear stress in fluid	15
Fig. 2.2 Shear thinning at the shear stress - shear rate graph	18
Fig. 2.3 Flowing ellipsoid particle at the coordinate system	19
Fig. 2.4 Streamline pass from orifice channel to expanding channel	20
Fig. 3.1 2D calculation model for fiber alignment	22
Fig. 3.2 Calculation result of fiber alignment at CFD	23
Fig. 3.3 2D model for calculation of shear stress direction	25
Fig. 3.4 Direction of shear stress distribution at the orifice channel	26
Fig. 4.1 Randomly aligned lines for examination of analysis code	27
Fig. 4.2 Flow chart of image processing of additives	28
Fig. 4.3 Calculation of the line center in the image	30
Fig. 4.4 A right angled triangle configuration of a line	31
Fig. 4.5 Result of image processing of a randomly aligned line	32
Fig. 4.6 Line image analysis result comparison between real and calculation line angle at (a) channel wall, (b) between channel wall and mid-channel and (c) mid-channel	33
Fig. 4.7 Line angle difference between real and analysis result	34
Fig. 4.8 Flow visualization image analysis process	36

Fig. 4.9 Fiber angle comparison between image processing and real at (a) upper channel wall, (b) mid-channel and (c) bottom channel wall	38
Fig. 5.1 Experimental device setup of flow visualization for 3D printed flow channels	40
Fig. 5.2 Experimental mold fabricated by 3d printing	41
Fig. 5.3 Mold combination of 3D printed blocks and transparent acrylic window	42
Fig. 5.4 Digital microscope (AM7515MZTL, Dino-light)	44
Fig. 5.5 LED light (Luxpad22, Nanguang Photo & Video Systems Co.)	45
Fig. 5.6 (a) PDMS sylgard 184 & (b) carbon fiber	47
Fig. 5.7 Fiber alignment at parallel channel in different channel thicknesses	48
Fig. 5.8 Flow velocity comparison at different locations in parallel channel	50
Fig. 5.9 Fiber alignment at perpendicular channel in different channel thicknesses	51
Fig. 5.10 Flow velocity comparison of different location in perpendicular ..	52
Fig. 6.1 Flow channel with channel angle change	55
Fig. 6.2 Mold combination of acrylic block and transparent acrylic window	55
Fig. 6.3 Flow visualization at the convex corner (channel angle=30°)	56
Fig. 6.4 Fiber angle displacement at the convex corner (channel angle=30°)	57
Fig. 6.5 Flow visualization at the convex corner (channel angle=45°)	58
Fig. 6.6 Fiber angle displacement at the convex corner (channel angle=45°)	59
Fig. 6.7 Flow visualization at the convex corner (channel angle=60°)	60
Fig. 6.8 Fiber angle displacement at the convex corner (channel angle=60°)	61
Fig. 6.9 Flow visualization at the convex corner (channel angle=90°)	62
Fig. 6.10 Fiber angle displacement at the convex corner (channel angle=90°)	63
Fig. 7.1 Experimental device setup of flow visualization for orifice channel	65

Fig. 7.2 Orifice channel mold and mold combination of orifice channel mold and transparent acrylic window	66
Fig. 7.3 High speed camera(Miro C110, Mitutoyo corp)	67
Fig. 7.4 2X magnification lens(M plan APO 2X, Mitutoyo corp)	68
Fig. 7.5 Sequential flow visualization images taken in 2 s interval for PDMS and carbon fiber Mixture flow inside the orifice channel	70
Fig. 7.6 Fiber alignment angle distribution depending on the location inside the flow channel	71
Fig. 7.7 Fiber alignment distribution at (a) $1.7 \text{ mm} \leq y \leq 2.0 \text{ mm}$, (b) $1.3 \text{ mm} \leq y < 1.7 \text{ mm}$ and (c) $1 \text{ mm} \leq y < 1.3 \text{ mm}$	73
Fig. 7.8 Fiber alignment angle of fiber 1	75
Fig. 7.9 Fiber alignment angle of fiber 2	76
Fig. 7.10 Fiber alignment angle of fiber 3	77
Fig. 7.11 Fiber alignment angle of fiber 4	78
Fig. 7.12 Analysis of fiber angles within $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ cells by (a) average value and (b) standard deviation value	79
Fig. 7.13 Distribution of analyzed fiber length	80
Fig. 7.14 Orifice channel mold depending on the thickness of the expanded channel	82
Fig. 7.15 5X magnification lens (M plan APO 5X, Mitutoyo corp)	83
Fig. 7.16 Fiber alignment angle by flow direction depending on the thickness of the expanded channel and fiber x location extraction at (a) 0.08 mm interval, (b) 0.16 mm interval and (c) 0.24 mm interval	85

List of Tables

Table 1.1 Existing research	9
Table 4.1 Image processing criteria	29
Table 5.1 Specification of experimental mold and material	43
Table 5.2 Specification of digital microscope	44
Table 5.3 Specification of LED light	45
Table 5.4 Specification of syringe pump and Re of flow channel	46
Table 5.5 Specification of PDMS, carbon fiber and mixture	48
Table 5.6 Fiber alignment by channel shape and thickness	53
Table 6.1 Fiber alignment and displacement at convex corner	64
Table 7.1 Specification of orifice channel mold	67
Table 7.2 Specification of high speed camera	68
Table 7.3 Specification of 2X magnification lens	69
Table 7.4 Specification of orifice channel mold	83
Table 7.5 Specification of 5X magnification lens	84
Table 7.6 Fiber alignment analysis depending on the thickness of the expanded channel	86

Nomenclature

θ	: Contained angle of fiber type additive [mm]
a	: Length of fiber type additive [mm]
a_1	: X location of additive in the image [mm]
a_2	: Y location of additive in the image [mm]
b	: Length difference between d_1 to d_2 in x direction [mm]
c	: Length difference between d_1 to d_2 in y direction [mm]
d_0	: Additive center location
d_1, d_2	: Additive edge location
dx	: Length of x direction [mm]
dy	: Length of y direction [mm]
F	: Force vector
I	: Unit diagram matrix
n	: Unit normal vector
p	: Pressure at cartesian coordinate [Pa]
∇U	: Velocity gradient [1/s]
u, v	: Velocity vector at cartesian coordinate [m/s]
t	: Periodic time [s]
$\dot{\gamma}t$: Total strain in periodic time
r_e	: Aspect ratio of ellipsoid particle
$\dot{\theta}, \dot{\phi}$: Angular velocity of ellipsoid particle [rad/s]
θ, ϕ	: Angle of ellipsoid particle [°]

Greeks

τ	: Shear stress [Pa]
λ	: Wave length [m]
μ	: Viscosity [kg/m · s]
ρ	: Density [kg/m ³]
γ	: Shear rate [1/s]

ABSTRACT

Experimental study on flow visualization of carbon fiber and PDMS mixture

Park Jun Yub

Advisor : Prof. Oh, Dong-Wook,
Department of Mechanical
Engineering, Graduate School of
Chosun University

Material property of polymer composite can be improved by the additive alignment inside the composite. In particular, when anisotropic additives are used in polymer composite, they tend to improve or decrease material property depending on the aligned direction. This additive alignment is accomplished by stirring the polymer composite, sonification and magnetic fields to sort the additives, or injection of polymer composites. This additive alignments is used as a way to improve the material property of polymer composite and in this study, research on the additive alignment of polymer composite inside the injection mold is performed.

Firstly, additive alignment in the orifice channel is calculated by computational fluid dynamics(CFD). Additive alignment, which occurs after passing through an orifice channel, was calculated and analyzed in different initial additive locations. The additive alignment by CFD showed different trends depending on the initial location of the additive. Also, additives located around the wall of the channel and on the center of the

channel showed different alignment. In addition, the shear stress direction that occurs after passing through the orifice channel was calculated and the shear stress direction showed a concentric shape similar to the additive alignment distribution observed in the actual orifice channel.

Based on these CFD results, a method was devised to analyze the additive in the image before conducting the flow visualization. For this purpose, the additive alignment angle analysis code was written and the validity was analyzed using an image consisting of random line and an actual flow visualization image. As a result of the analysis, the code can analyze the additive alignment in the images with smaller error and more faster speed compared to the Hough transform.

To analyze the additive alignment in the flow channel, additive alignment from parallel and perpendicular channel was analyzed. For this purpose, a 3D printed mold was used and visualized depending on the thickness of the flow channel and the flow rate. Analysis using the

code showed that both parallel and perpendicular flow paths tend to increase the additive alignment as the flow rate increased and flow channel thickness decreased. Also, additives flowing in the parallel channel were aligned in a similar direction to the flow direction close to the channel wall by distribution of shear stress occurring within the flow channel. But in the center of the channel, additives show more random alignment. The additive alignment shown at the perpendicular channel showed similar additive alignment compared to the flow direction. But, the tendency of the additive flow is changed at the convex corner. Based on this result, the flow channel angle is changed and the additive alignment is analyzed.

Flow visualization images taken at the flow channel at the location of channel angle change were also analyzed. However, the additive alignment according to the channel angle did not significantly affect the alignment angles that flow within the polymer composite. But, the additive flow

tendency with channel angle change show at the flow rate was increased the flow rate in the convex region.

Based on these results, the orifice channel analyzed by CFD was flow visualized. Additive alignment, which occurs after passing orifice channel, has been visualized, showing additive alignment that is perpendicular to the flow direction at the center of channel, unlike previously studied parallel channel or angle change channel. At the channel wall regions, the alignment tended to be aligned similar to the flow direction. Also, as flow channel thickness gets, the higher the additive alignment angle. This additive alignment was caused by the extended shear stress generated by the orifice channel and have similar distribution with the shear stress direction analyzed by CFD and additive alignment that occurred after orifice pass. In addition, it has been confirmed that the additive alignment angle tends to gradually decrease along the flow. This reduction in additive alignment affected by the shear stress generated within the flow channel.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

산업 현장에서 각광받고 있는 신소재인 복합소재는 고분자 소재와 첨가제를 혼합하여 제작한다. 복합소재는 기반이 된 고분자 소재의 가벼운 무게, 높은 내식성, 간단한 사출 성형 가공, 낮은 가공단가 등 기존에 사용하던 금속 소재에 비하여 많은 장점을 갖는다. 뿐만 아니라 복합소재 내부에 혼합한 첨가제를 통하여 고분자 소재보다 기계적 강도와 같은 물리적인 성질이 크게 향상되므로 제품의 케이스나 외장 등에도 사용되고 있다. 연구자들은 이러한 복합소재의 성능을 더욱 향상시키기 위한 연구를 진행하였으며 복합소재의 물리적 성질을 향상시키는데 성공하였다. 연구자들이 복합소재 성능을 향상시키기 위해 진행한 연구로는 복합소재에 혼합되는 첨가제 농도를 증가시키거나 물리적 성질이 뛰어난 첨가제를 혼합하는 연구가 있다. 이러한 연구를 통하여 복합소재에 혼합하는 첨가제 농도가 증가할수록 복합소재 성능이 향상되는 것을 확인하였으며 첨가제의 물리적 성능이 뛰어나수록 제작되는 복합소재의 물리적 성질 또한 향상되는 것을 확인하였다. 이러한 연구 외에도 복합소재 내부에 혼합한 첨가제를 고르게 분산시키거나 일정한 방향으로 정렬시켜 물리적 성질을 향상시키는 연구, 혹은 복합소재를 화학적으로 처리하여 복합소재의 물리적 성질을 향상시키는 연구가 진행되었다.

이와 같은 연구를 통하여 복합소재의 물리적 성질을 기존의 소재보다 더욱 향상시킬 수 있다. 그러나 위 연구들을 통하여 복합소재 성능을 향상시키더라도 복합소재는 재료로 사용한 고분자 소재 특유의 낮은 열전도도로 인하여 열을 전달하는 물리적 성질이 금속 소재에 비하여 취약하게 나타난다. 이는 고분자 복합소재의 낮은 열전도도가 첨가제와 혼합하여도 기존 금속 소재에 비하여 1/100 배 이하 낮은 값을 나타내기 때문이다. 이러한 연유로 복합소재는 열교환 성능이 중요한 산업 현장이나 열교환기 등의 부품에는 내식성을 고려하는 해수처리 열펌프 등의 특수한 일부 경우를 제외하면 사용되지 않고 있다.

이러한 단점에도 불구하고 복합소재의 생산비용 및 우수한 내식성에 주목한 연구자들은 복합소재의 낮은 열전도도를 보완하기 위한 연구를 진행하였다. 연구자들은 복합소재의 낮은 열전도도를 보완하기 위하여 탄소섬유, 탄소나노튜브, graphite 등의 열전도도가 뛰어난 소재를 첨가제로 혼합하거나 혼합 농도를 조절하여 복합소재 열전달 성능을 향상시키는데 성공하였다. 이 밖에도 첨가제 정렬 상태를 인위적으로 조정하는 방법 또한 연구되었으며 특히 비등방성 첨가제를 사용하는 경우, 특정한 방향으로 복합소재 열전달 성능을 조절할 수 있음을 확인하였다. 이렇듯 복합소재의 열전달 성능은 다양한 방법을 통하여 보완할 수 있다.

그러나 기존에 진행된 비등방성 첨가제 정렬에 관한 연구는 이미 경화시킨 복합소재를 분석한 자료를 기반으로 진행한 연구이다. 이렇게 진행된 연구들은 물성 측정이나 복합소재 단면 관찰 등을 간접적인 방법을 통하여 복합소재 내부 첨가제 정렬이 어떻게 나타나는지 확인하였다. 때문에 기존 연구들로는 첨가제 정렬에 큰 영향을 미치는 복합소재 제조 중 첨가제 정렬이 어떻게 나타나는지 알 수 없다. 또한 비등방성 첨가제를 사용하는 경우, 첨가제 정렬 방향에 따라 복합소재 물성이 향상되거나 감소하게 된다. 이때 나타나는 복합소재의 물성은 첨가제를 정렬시키지 않았을 때보다 더욱 더 큰 향상 혹은 감소를 나타낸다. 따라서 복합소재 내부에 혼합된 첨가제가 복합소재 제조 중에 나타내는 첨가제 정렬 경향을 분석하고 어떤 요인이 복합소재 제조 중 첨가제 정렬에 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요하다.

제 2 절 기존 연구

복합소재에 대하여 연구한 기존 연구들은 복합소재의 물리적인 성질을 향상시키는 데에 주력하고 있다. 이러한 연구들은 첨가제 혼합 농도나 혼합하는 첨가제 종류를 변화시켜 복합소재 물성을 향상시키는 연구가 주를 이루고 있다.

Xu(2001) 등은 복합소재의 첨가제 혼합 농도에 따라서 복합소재의 열전도도가 변화하는 것을 확인하였으며 Zhao(2010) 등은 그래핀을 첨가하였을 때 나타나는 복합소재 물성 향상을 실험적인 방법으로 연구하였다. Fu(2003) 등은 섬유형 첨가제 길이에 따른 복합소재 내부 첨가제 분포 및 물성에 대해 연구하였으며, Fiedler(2006) 등은 나노 크기의 첨가제를 혼합하는 경우 나타나는 복합소재 물성 향상에 대하여 연구하였다.

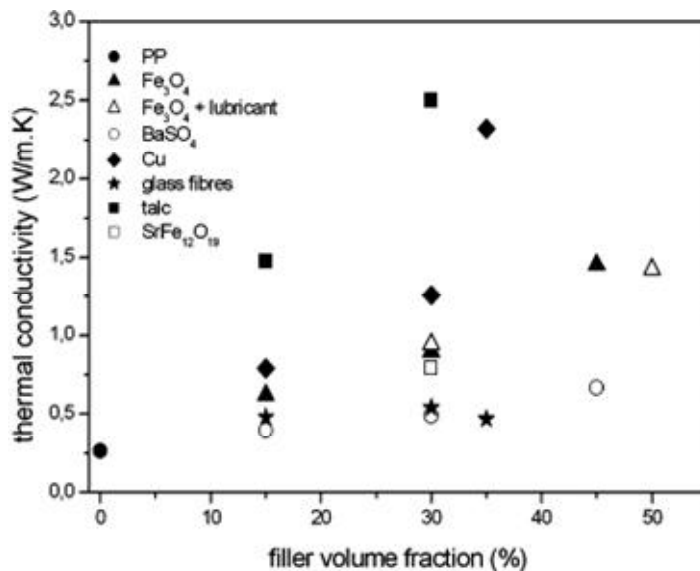


Fig. 1.1 Thermal conductivity improvement by filler volume fraction
- Weidenfeller(2004)

이 외에도 Weidenfeller (2004)은 Fig. 1.1과 같이 여러 가지 재료를 첨가제로 사용하는 경우 향상되는 복합소재 열전도도를 확인하였으며 첨가제 혼합 농도 향상에 따라 복합소재 열전도도가 향상됨을 확인하였다. 또한 Wong(1999) 등

은 여러 가지 재료를 첨가제로 사용하였을 때의 복합소재의 열전도도, 탄성계수 등의 물리적 성질이 향상됨을 확인하였다.

이러한 첨가제 길이, 농도 그리고 혼합농도 등을 조절하여 복합소재 물성을 향상시키는 연구 뿐만 아니라 첨가제 자체의 물성을 개선하여 복합소재의 물리적인 성질을 향상시키는 연구도 진행되었다. Mamunya(2002) 등은 복합소재에 혼합할 첨가제의 열전도도, 혼합 농도 등을 향상시켜 복합소재의 열전도도를 향상시키는 것에 관한 연구를 수행하였으며, Jiang(2014) 등은 첨가제로 사용하는 CNT의 길이 조절, 정렬 개선, 혼합농도 조절을 통하여 복합소재의 물성을 향상시키는 방법에 대하여 연구하였다.

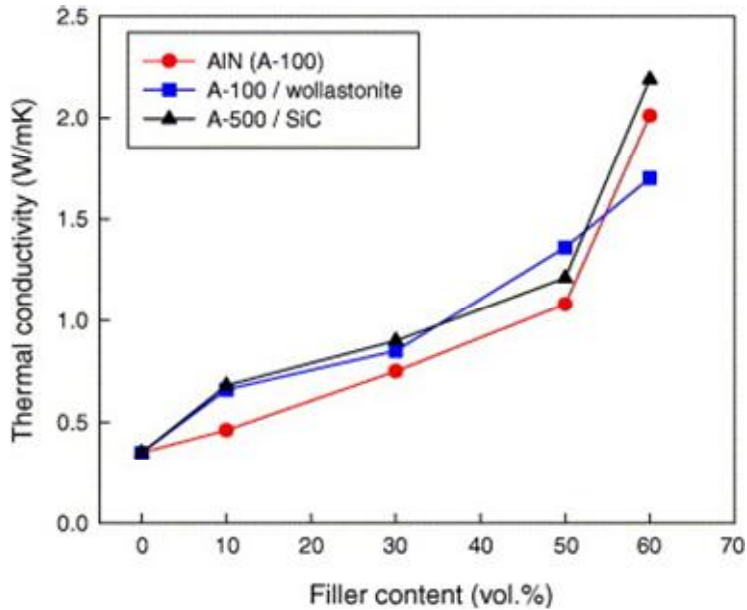


Fig. 1.2 Thermal conductivity improvement by additive concentration
- Lee(2006)

이 외에도 Lee(2006) 등은 일반적인 첨가제의 길이, 정렬, 혼합농도를 조정에서 더 나아가 첨가제 종류, 크기, 형태, 처리상태, 혼합농도 등의 첨가제 상태에 따른 복합소재 물성 향상에 대하여 연구하였으며 이와 같은 첨가제 처리를 통해 복합소재의 열전도도, 열확산효율 등의 물성이 개선됨을 확인하였다.

Moniruzzaman(2006) 등도 첨가제 처리를 통한 복합소재의 물리적 성질 개선 방법에 대하여 연구하였으며 첨가제 처리를 통하여 굽힘 강도 등의 물성이 개선됨을 확인하였다.

첨가제 자체의 물리적 성능을 향상이 복합소재 성능 향상과 연관됨을 확인한 연구자들은 첨가제의 정렬 상태나 소재 내부에 분포된 상태로 조정하여 복합소재의 물리적 성질을 개선하는 연구를 진행하였다.

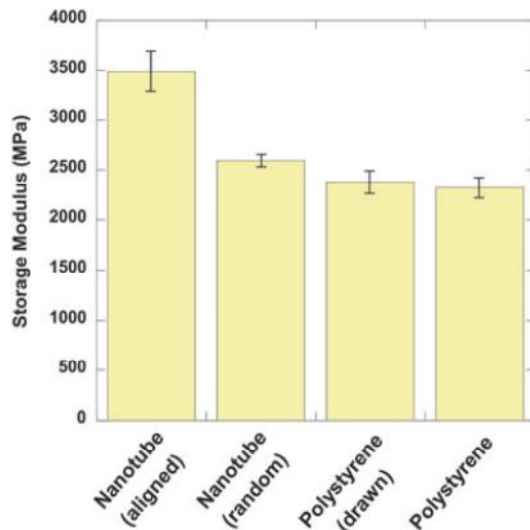


Fig. 1.3 Storage modulus improvement by additive alignment
- Thostenson(2002)

Thostenson(2002) 등은 복합소재 내부에 혼합된 첨가제를 정렬하였을 때 나타나는 인장강도, 굽힘강도 등의 기계적 물성을 향상에 대하여 연구하였으며, Choi(2003) 등은 자기장을 사용한 첨가제 정렬을 통해 복합소재의 전기전도도, 열전도도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. Choy(1992) 등이 섬유 첨가제가 혼합된 복합소재를 사출 성형할 경우 복합소재가 사출된 방향으로 복합소재 탄성계수와 열전도도가 향상되는 것을 보였으며, Toil(1993) 등은 실험적인 방법을 통하여 복합소재 제조 시 나타나는 섬유 정렬과 복합소재 물성 향상 여부를 정리하였으며, Cooper(2002) 등은 복합소재에 혼합한 CNT를 소재 내부에서 분산시키는 경우 복합소재의 강도가 향상되는 것을 확인하였다. Sandler(1999) 등은

복합소재 내부에 포함된 섬유형 첨가제 분산 방법에 대하여 연구하였으며, Villmow(2008) 등은 두 개의 스크류 인젝터를 사용할 시 나타나는 첨가제 분산 현상에 대하여 연구하였다. Isaza M(2018) 등은 복합소재 성능 향상을 위하여 복합소재 내부에 첨가제를 분산 및 정렬하는 방법에 대하여 연구하였다.

이와 같은 첨가제 정렬에 의한 복합소재 성능향상 원인을 분석하기 위하여 연구자들은 첨가제 정렬 상태 분석 방법을 개발하였다. Advani(1987) 등은 텐서를 사용하여 첨가제 정렬 상태를 분석하였으며, Allan(1996) 등은 소재 내부에서 첨가제가 정렬된 방향을 추적하여 소재의 물성이 첨가제가 정렬된 방향으로 향상된다는 사실을 확인하였다.

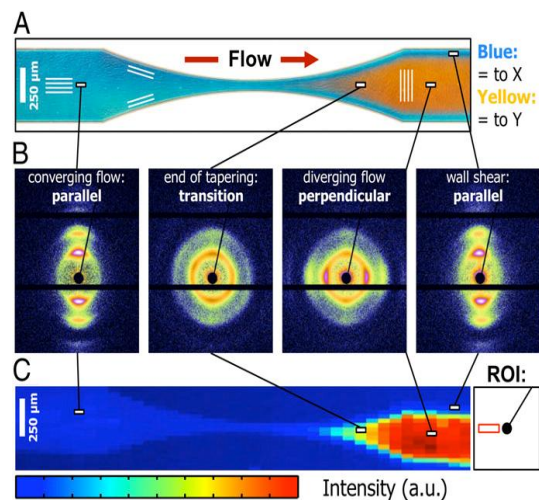


Fig. 1.4 Polyethylenebutylene-b-ethylene oxide(PEB-PEO) alignment at narrow channel - Trebbin(2013)

또한 Trebbin(2013) 등은 X선을 사용하여 유로를 통과하는 복합소재 내부 첨가제 정렬 경향을 분석하였다. 특히, Trebbin 등은 유로의 형태가 다양하게 변화하는 경우 나타나는 첨가제 정렬 경향을 분석하였으며 유로가 확장되는 형상인 오리피스를 통과하는 경우, 복합소재 내부 첨가제가 유동방향과 수직한 방향으로 정렬된다는 것을 확인하였다. 이외에도 Papathanasiou(1997)에 의하여 복

합소재 주입 및 유동 조건 그리고 금형 형상 등에 따른 첨가제 정렬 경향이 정리되었다.

복합소재 성능향상에 대하여 연구하던 일부 학자들은 등방성 첨가제뿐만 아니라 비등방성 첨가제를 사용한 복합소재 성능 향상에 대한 연구도 진행하였다. Gusev(2002) 등은 자체적으로 만든 수치해석 방법으로 섬유형 첨가제 정렬에 따른 복합소재 물성을 연구하였으며 Kuribara(2015) 등은 섬유 형태의 비등방성 첨가제를 사용하여 첨가제를 정렬하는 경우 복합소재 물성에서 비등방성이 나타나는 것을 확인하였다. Kimura(2002) 등은 복합소재의 비등방적 물리적 성질 향상을 자기장으로 첨가제를 정렬시킨 복합소재를 사용하여 연구하였으며 Amitay-Sadovsky(1999) 등은 비등방성 첨가제를 사용한 경우에 향상되는 복합소재의 Knoop 경도, 인장강도 등을 연구하였다.

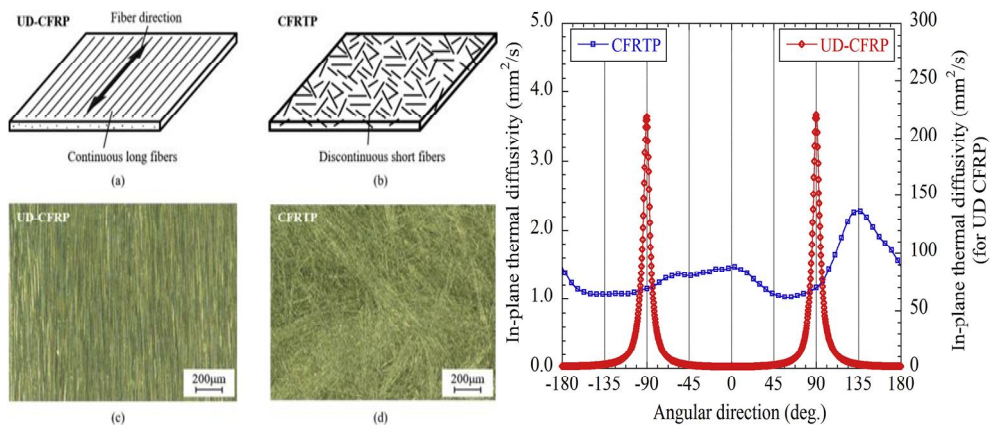


Fig. 1.5 Fiber structure image and thermal diffusivity comparison at (a, c) unidirectional sample (b, d) unaligned sample - Fujita(2017)

Nagano(2001), Ishizaki(2015) 등은 비등방성 첨가제를 정렬시킨 복합소재를 열확산율 측정을 통하여 분석하였으며 Fujita(2017) 등은 복합소재 내부 첨가제 정렬을 Fig. 1.5와 같이 첨가제 정렬 샘플과 비정렬 샘플 간 열확산율 측정을 통하여 분석하는 기술에 대한 연구를 진행하였다.

이와 같은 실험적, 물성측정을 통한 간접적인 첨가제 정렬 분석이 아니라 첨가제의 정렬을 수치해석적인 방법으로 분석하는 방법도 연구되었다. 복합소재

내부에서 유동하는 첨가제가 타원 형태인 경우 Jeffery(1922)가 세운 입자유동식을 사용하면 분석할 수 있다. 또한 이 입자유동식은 Junk(2007) 등의 연구를 통해 일반적인 형태의 입자를 분석할 수 있게 되었다. 이외에도 Folgar(1984) 등이 유체 내부에 섬유가 무수히 많은 상태에서의 섬유 거동을 모델링 하였으며 Ayres(2006) 등은 Fast Fourier transform과 실험적인 연구를 통해 복합소재 내부 섬유 정렬에 대해 연구하였다.

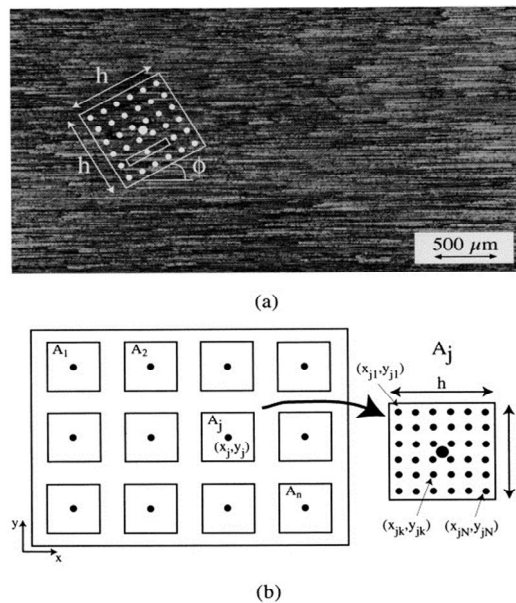


Fig. 1.6 Additive alignment analysis by specimen preparation
 - Creighton(2001)

이러한 수치해석적인 방법뿐만 아니라 복합소재의 이미지를 사용하여 첨가제 정렬을 분석하는 방법도 연구되었다. Yurgartis(1987)는 이미지 내부에 위치한 첨가제 정렬을 분석하는 방법에 대하여 연구하였으며 Creighton(2001) 등은 복합소재의 비등방성을 이미지를 사용하여 측정하는 방법에 대해 연구하였다. 또한 Kratmann(2009) 등은 Fourier transform misalignment analysis(FTMA)란 방법을 사용하여 이미지 내부에 존재하는 섬유형 첨가제의 정렬을 측정하였다. 이와 같은 복합소재 물성 향상에 대한 기존 연구는 Table 1.1로 정리하였다.

Table 1.1 Existing research

Subject	Lead author	Summary
Material property improvement	Xu, Y. (2001)	Thermal conductivity change by aluminum nitride concentration
	Zhao, X. (2010)	Tensile strength and Young' s modulus enhancement by graphene
	Fu, S. Y. (2003)	Thermal conductivity improvement by carbon fiber length
	Fiedler, B. (2006)	Fracture toughness improvement by CNT
	Weidenfeller, B. (2004)	Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity enhancement by standard filler(magnetite, barite, talc, copper, strontium ferrite and glass fiber)
	Wong, C. P. (1999)	Thermal conductivity, elastic modulus and thermal expansion coefficient enhancement by ceramic fillers(silica, alumina, aluminum nitride)
Additive process	Mamunya, Y. P. (2002)	Electrical and thermal conductivity enhancement by metal powder distribution(copper, nickel)
	Jiang, Q. (2014)	Tensile strength, thermal resistance, electrical conductivity and thermal conductivity enhancement by CNT length, alignment and mixture concentration
	Lee, G. W. (2006)	Thermal conductivity enhancement by hybrid filler(aluminum nitride, wollastonite, silicon carbide, boron nitride)
	Moniruzzaman, M. (2006)	Flexural modulus and flexural strength enhancement by SWNT dispersion

Table 1.1 Existing research

Subject	Lead author	Summary
Additive alignment & dispersion	Thostenson, E. T. (2002)	Tensile modulus, yield strength, ultimate strength and elastic modulus improvement by CNT dispersion and concentration
	Choi, E. S. (2003)	Electrical and thermal conductivity improvement by CNT alignment
	Choy, C. L. (1992)	Elastic modulus, thermal diffusivity and thermal conductivity improvement by carbon fiber aligned direction
	Toll, S. (1993)	Fiber alignment and distribution by fiber length
	Cooper, C. A. (2002)	Knoop hardness and tensile modulus improvement by CNT distribution and alignment
	Sandler, J. (1999)	Electrical conductivity improvement by CNT distribution
	Villmow, T. (2008)	CNT dispersion analysis by twin-screw extrusion
	Isaza M, C. A. (2018)	CNT dispersion and alignment analysis by Elastic modulus and hardness change
Additive alignment analysis	Advani, S. G. (1987)	Short fiber orientation analysis by tensor
	Allan, P. S. (1996)	Tensile strength, Young' s modulus and flexure strength change by carbon fiber alinged direction
	Trebbin, M. (2013)	PI-PEO and PEB-PEO alignment analysis at flow channel using X-ray
	Papathansasiou, T. D. (1997)	Fiber type additive alignment organized by injection molding process and flow condition

Table 1.1 Existing research

Subject	Lead author	Summary
Anisotropic additive	Gusev, A. (2002)	Stiffness and thermal expansion change by glass and carbon fiber alignment using numerical method
	Kuribara, M. (2015)	Thermal diffusivity and anisotropic distribution analysis by carbon fiber alignment
	Kimura, T. (2002)	CNT alignment using magnetic field analysis by electrical conductivity and dynamic modulus
	Amitay-sadovsky, E. (1999)	Knoop hardness and Young's modulus improvement by carbon fiber
	Nagano, H. (2001)	Anisotropic thermal diffusivity of graphene measurement by thermal diffusivity
	Ishizaki, T. (2015)	Thermal diffusivity measurement by Anisotropic carbon fiber alignment
	Fujita, R. (2017)	Evaluation of carbon fiber alignment by thermal diffusivity measurement
Numerical analysis	Jeffery, G. B. (1922)	Predict single ellipsoid particle motion in fluid
	Junk, M. (2007)	Improved Jeffery solution of normal particle in fluid
	Folgar, F. (1984)	Numerical method for numerous fiber motion in fluid
	Ayres, C. (2006)	Anisotropic fiber type additive alignment measurement by failure stress and strain using fast Fourier transform
Image analysis	Yurgatis, S. W. (1987)	Analysis carbon fiber alignment in the image using numerical method

Table 1.1 Existing research

Subject	Lead author	Summary
Image analysis	Creighton, C. J. (2001)	Analysis carbon fiber alignment in the image by novel method
	Kratmann, K. K. (2009)	Analysis carbon fiber alignment in the image by Fourier transform misalignment analysis(FTMA)

제 3 절 연구 목적

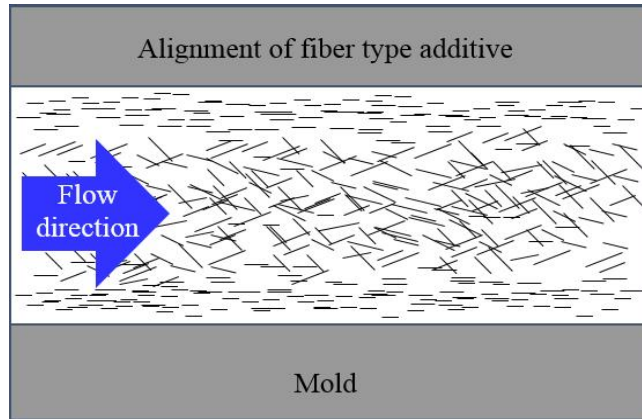


Fig. 1.7 Additive alignment tendency in the parallel channel

기존의 연구들은 복합소재에 혼합되는 첨가제의 농도, 종류 혹은 첨가제 정렬 상태 등을 조정하여 복합소재 물성을 향상하는데 주력하고 있다. 특히 비등방성 첨가제 정렬에 관한 경우, 복합소재 물성이나 소재 단면을 분석하여 첨가제 정렬 상태에 따른 복합소재 성능을 분석하였다. 그러나 이러한 비등방성 첨가제 연구들은 이미 경화된 상태의 복합소재를 분석한 연구이며 복합소재 제조 중 나타나는 첨가제 정렬을 분석한 것은 아니다. 또한 비등방성 첨가제 정렬은 정렬 방향에 따라서 첨가제를 정렬하지 않은 경우보다 복합소재 물성이 향상 혹은 감소하게 된다. 따라서 첨가제 정렬에 큰 영향을 미치는 복합소재 제조 중 발생하는 첨가제 정렬에 대한 분석과 비등방성 첨가제 정렬을 발생시키는 원인에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 복합소재 제조 중 발생하는 비등방성 첨가제 정렬을 Polydimethylsiloxane(PDMS)와 탄소섬유 혼합물로 모사한 전산유체해석과 유동 가시화 실험을 통하여 분석하였다. 본 연구의 첨가제 정렬 분석을 위한 전단응력, 전단담화 등과 같은 이론적인 지식은 2장에서 소개하였다. 오리피스 유로에서 나타나는 섬유형 첨가제 정렬을 전산유체해석으로 분석하는 과정과 결과 그리고 오리피스 유로 통과 후 발생하는 유체 전단응력 방향 분포에 대해서는 3장에서 소개하였다.

실험을 통하여 획득한 이미지 내부 섬유 정렬 분석 방법은 4장에서 설명하였다. 자체적으로 작성한 각도 분석 코드를 사용하여 이미지 내부에서 나타나는 섬유형 첨가제의 정렬 각도, 이미지 내부 섬유 위치 등을 계산하였으며 이러한 각도 분석 코드의 타당성은 임의 선분, 실제 섬유 분석 결과와 비교하여 검증하였다.

유동가시화 실험에서 획득한 이미지 내부 섬유 정렬을 분석한 결과는 5장, 6장, 7장으로 정리하였다. 5장에서는 3D 프린터로 출력한 평행 금형의 유동가시화 실험 결과를 유로 두께와 유동속도에 따라서 정리하였으며 이때 나타나는 섬유 정렬 경향과 유동 경향에 대하여 정리하였다. 6장에서는 유로의 각도가 변화하는 금형에서 촬영한 섬유 정렬 경향을 유로 각도가 굽어지는 쪽에서 정리하였으며 이때 나타나는 섬유 유동 경향도 정리하였다. 7장에서는 오리피스를 통과한 후 발생하는 섬유 정렬 경향을 유로 위치에 따라 분석하였으며 유동가시화 실험 결과와 3장의 전산유체해석 결과를 비교하여 전산유체해석으로 섬유 정렬 경향을 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 오리피스 통과 후 확장 유로 두께와 유동 길이에 따른 섬유 정렬 경향을 분석하였다.

본 연구에서 진행한 실험과 분석에 대한 결론은 8장에서 정리하였다. 이와 같은 연구를 통하여 유로 형상에 따른 비등방성 첨가제 정렬에 대한 기초적인 데이터를 제공하며 사용자가 원하는 방향으로 물성 향상이 조정된 복합소재를 제조하는 방법에 대한 기초 지식을 제공할 것으로 기대한다. 또한 이를 통하여 복합소재의 낮은 열전달 성능을 보완하고 기존에 복합소재가 사용되지 못했던 열전달 성능이 중요한 산업 현장이나 열교환기 등의 제품에 복합소재를 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

제 2 장 복합소재 내부 비등방성 첨가제 정렬 이론

제 1 절 전단응력(Shear stress)

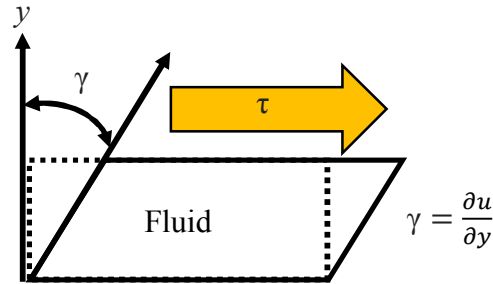


Fig. 2.1 Definition of shear stress in fluid

전단응력이란 어떤 물체에 작용하는 힘벡터가 평행한 방향으로 작용할 때 발생하는 응력이다. 전단응력은 힘벡터가 영향을 미칠 수 있다면 고체, 유체 상태를 가리지 않고 작용한다. 고체에 작용하는 전단응력은 외부에서 작용하는 힘벡터에 의한 현상이며 유체에 작용하는 전단응력은 유체에 영향을 미치는 속도의 구배에 의한 현상이다. 유체 전단응력의 경우 뉴턴 유체를 층류에서 유동시킬 때 나타나는 모든 전단응력은 유체의 변형률에 비례하며 이때의 비례상수는 점도 μ 로 나타난다. 그러나 비뉴턴 유체를 유동시킬 때 나타나는 점도는 유체 변형률에 비례하지 않으므로 속도차이로 인해 발생한 전단응력이 유체에 비선형적인 영향을 미치게 된다.

특히, 비뉴턴 유체가 유동하는 경우에 작용하는 전단응력은 비뉴턴 유체와 고체 면이 맞닿은 부분에서 발생하는 속도차이로 인하여 발생하게 된다. 이러한 유동 속도차이는 유체와 고체 면이 맞닿은 면에서 가장 강하게 나타나며 고체 면에서 멀어질수록 약해지는데 이때 나타나는 속도차이가 비뉴턴 유체인 복합소재 내부에서 유동하는 첨가제 정렬에 영향을 미치게 된다.

따라서, 본 연구에서는 첨가제 정렬원인을 분석하기 위하여 2차원 평면상에서 발생하는 전단응력 방향을 식(2-1)을 사용하여 계산하였다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial y_i} \right) \quad (2-1)$$

식(2-1)의 τ 는 전단응력, μ 는 유체 마찰계수, v 는 유로 내부에서 나타나는 i, j 방향 속도벡터, x 는 유로 내부의 x 방향 속도벡터 위치, y 는 유로 내부의 y 방향 속도벡터 위치이다. 식(2-1)을 사용하여 계산한 2차원 평면상의 전단응력은 직교 좌표계의 축방향을 기준으로 분할하여 식(2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (2-2)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x_y} + \frac{\partial v_y}{\partial y_x} \right)$$

식(2-2)의 τ_{xx}, τ_{yy} 는 2차원 평면상에서 발생하는 전단응력을 각각 x, y 축방향으로 분할한 전단응력이며 τ_{xy}, τ_{yx} 는 직교좌표계의 축방향과 대각선 방향으로 분할하여 나타낸 것이다. 이와 같이 식(2-1), 식(2-2)를 사용하는 경우 유체 내부에서 발생하는 2차원 평면상의 전단응력 방향을 계산할 수 있다.

제 2 절 전단변형률(Shear rate)

전단변형률이란 어떤 물체가 전단응력을 받았을 때 변형되는 정도를 의미하며 Fig. 2.1의 γ 로 표현된다. 유체의 전단변형률은 유체에 작용하는 전단응력으로 인하여 유체가 얼마나 변형되었는지를 나타내는 정도이며 유체의 속도 경계층에서 나타나는 속도차이가 클수록 더 크게 나타난다. 또한 뉴턴 유체를 유동시키는 경우에는 전단변형률에 의한 점도 변화가 발생하지 않지만 분자량이 큰 비뉴턴 유체를 유동시키는 경우에는 전단담화(Shear thinning) 혹은 전단탁화(Shear thickening)가 나타날 수 있다. 이러한 유체의 전단변형률은 분자량이 큰 유체를 빠르게 유동시키는 경우가 느리게 유동시키는 경우보다 크게 나타난다.

제 3 절 전단담화(Shear thinning)

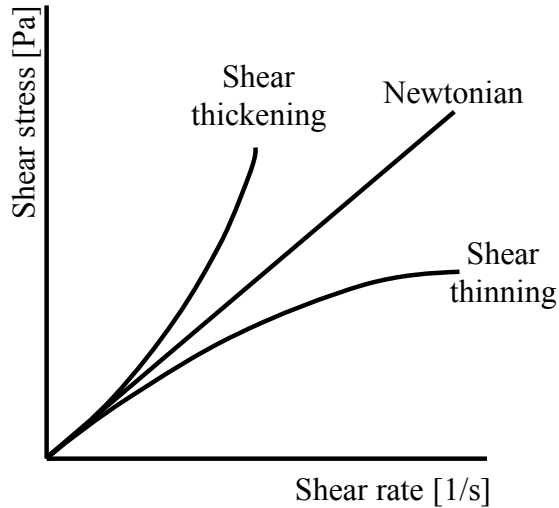


Fig. 2.2 Shear thinning at the shear stress - shear rate graph

전단담화란 비뉴턴 유체의 전단변형률이 증가할수록 점도가 감소하는 현상을 말하며 전단박화 혹은 소가소성으로도 불린다. 이는 일반적인 뉴턴 유체의 점도가 일정하게 유지되는 것과는 전혀 다른 현상이다. 이러한 전단담화의 원인은 확실하게 분석되지 않았으나 유체에서 발생한 전단이 입자를 확산시키는 브라운 운동보다 우세한 경우에 나타는 것으로 보인다. 이와 같은 전단담화 현상은 분자량이 큰 중합체 등의 유체에서 관찰할 수 있으며 시간에 의존하지 않는 성질로 고려된다. 이러한 전단담화와 유사한 현상으로는 비뉴턴 유체의 전단변형률이 증가할수록 점도가 증가하는 전단탁화가 있다.

제 4 절 첨가제 정렬 이론

복합소재 내부에서 유동하는 단일 타원형 첨가제의 움직임은 Jeffery 식을 사용하여 모사할 수 있으며 다음의 식(2-3), 식(2-4)로 나타낼 수 있다. [참고문헌]표기

$$\dot{\theta} = \left(\frac{r_e^2 - 1}{r_e^2 + 1} \right) \frac{\dot{\gamma}}{4} \sin 2\theta \sin 2\phi \quad (2-3)$$

$$\dot{\phi} = \left(\frac{-\dot{\gamma}}{r_e^2 + 1} \right) r_e^2 (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi) \quad (2-4)$$

식(2-3)과 식(2-4)는 Fig. 2.3에 도시한 임의의 타원형 입자가 나타내는 각속도를 나타내는 식이다. $\dot{\theta}$ 와 $\dot{\phi}$ 는 타원형 입자가 유동 중 나타내는 각속도, θ 와 ϕ 는 타원형 입자가 유동 중 나타내는 각도, r_e 는 타원형 입자의 신장비, $\dot{\gamma}$ 는 입자가 나타내는 전단변형률이다. 이와 같은 Jeffery 식을 통하여 유체 내부에서 유동하는 단일 타원형 입자가 나타내는 움직임이 주기적인 시간동안 입자가 나타내는 총 변형률인 $\dot{\gamma}t$ 에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

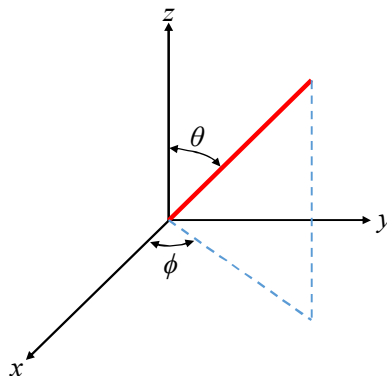


Fig. 2.3 Flowing ellipsoid particle at the coordinate system

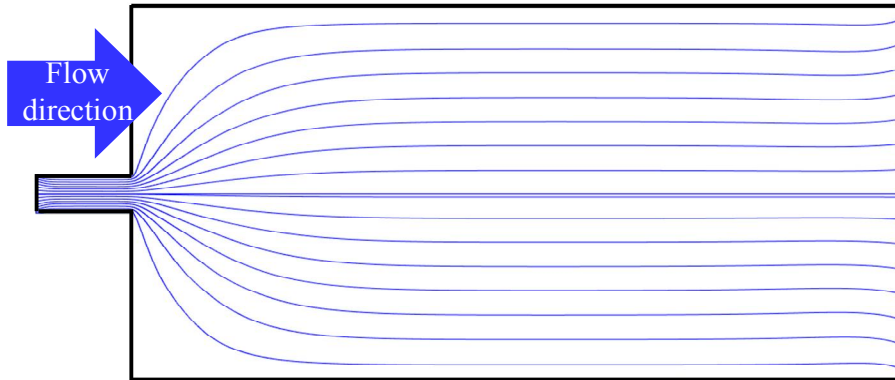


Fig. 2.4 Streamline pass from orifice channel to expanding channel

Fig. 2.4은 오리피스 유로를 통과한 후 나타나는 유선을 도시한 그림이며 복합소재 내부에서 유동하는 첨가제는 Fig. 2.4와 같은 유선을 따라서 이동하게 된다. 유선이란 유체 내부에서 나타나는 순간적으로 나타나는 속도 벡터의 접선을 모은 집합이며 이러한 유선은 유체 내부에서 유동하는 입자가 임의의 시간에서 움직이는 방향을 나타낸다. 따라서 복합소재 내부에서 유동하는 첨가제는 유동 입자로 간주할 수 있으므로 첨가제간 충돌 등의 외부영향이 없는 경우에는 복합소재 내부에서 발생한 유선을 따라서 이동하게 된다.

이와 같이 첨가제의 정렬은 유체 내부의 전단응력으로 발생하며 이는 식(2-3)과 식(2-4)가 전단변형률과 주기시간의 곱인 총 변형률에 의해 영향받는 것으로 확인할 수 있다. 이러한 총 변형률은 전단변형률을 발생시키는 전단응력에 영향을 받으므로 첨가제 정렬은 전단응력으로 인해 발생한다고 볼 수 있다. 또한 복합소재 내부에서 유동하는 첨가제는 복합소재 내부에서 발생하는 전단응력의 영향에 항시 노출되므로 첨가제 정렬은 복합소재 내부에서 끊임없이 발생하게 된다.

제 3 장 전산유체해석

제 1 절 오리피스 유로 모사 2D 해석

1. 해석 지배 방정식

단일 섬유형 첨가제의 오리피스 유로 내부에서 나타나는 유동 문제를 분석하기 위하여 유한요소기법 기반 다중물리해석 소프트웨어인 COMSOL®(v5.2a)를 사용하였다. 유체-구조연성 해석 모듈에서 제공하는 Arbitrary - Lagrangian - Eulerian (ALE) 기술로 액상 폴리머에 해당하는 유체와 첨가제에 해당하는 고체의 연속적인 변형 및 이동에 대한 해석을 실시하였다. 기본적인 유체 및 첨가제에 대한 지배방정식은 식(3-1), 식(3-2)의 정상상태, 비압축성 Navier-Stokes 식이 사용되었다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3-1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot [-pI + \mu\{\nabla u + (\nabla u)^T\}] + \rho\{(u - u_m) \cdot \nabla\}u = 0 \quad (3-2)$$

위 식에서 사용한 ρ 는 밀도, u 와 p 는 좌표계에서의 속도벡터와 압력, I 는 단위행렬 (unit diagonal matrix), μ 는 점성계수, u_m 은 기준 좌표계에서의 속도 벡터, 뒀첨자 T 는 행렬의 전치(transpose)를 의미한다. 고체 첨가제의 변형과 이동은 식(3-3)을 사용하여 계산하였다.

$$F = -n \cdot [-pI + \mu\{\nabla u + (\nabla u)^T\}] \quad (3-3)$$

식(3-3)의 F 는 섬유에 가해진 힘벡터, n 은 섬유 표면에서의 단위수직벡터이다. 오리피스 유로에서 나타나는 단일 첨가제의 유동은 식(3-1), 식(3-2), 식(3-3)을 연립하여 유체와 고체에서 나타나는 속도 및 응력 계산을 수행하였다.

2. 2D 해석 모델

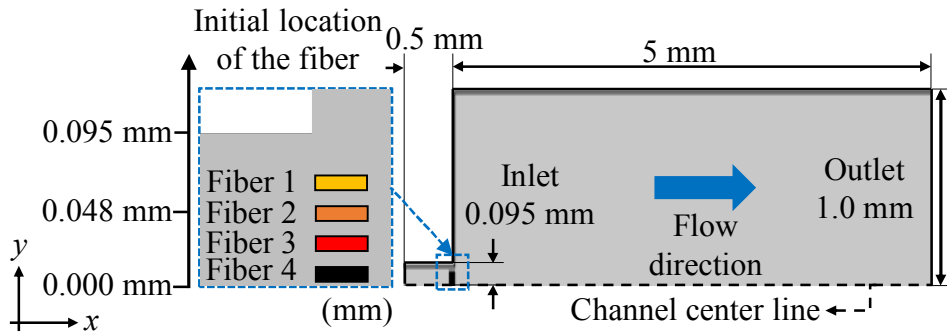


Fig. 3.1 2D calculation model for fiber alignment

식(3-1)~식(3-3)을 연립한 지배방정식은 Fig. 3.1과 같은 2D 해석 모델에 적용하였다. 해석 모델의 치수는 주입구 부분은 유로 두께 0.19 mm, 유로 길이 0.5 mm이며 확장부 영역은 유로 두께 2.0 mm, 유로 길이 5 mm로 설계되었다. 유로 내부에서 이동하는 유체는 실제 실험에서 사용한 PDMS의 점성계수와 밀도인 $3.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 와 1.03 g/cm^3 을 모델에 적용하였다. 해석 모델에서 이동하는 섬유는 섬유 두께 0.01 mm, 섬유 길이 0.05 mm이며 graphite의 탄성계수와 프아송비인 210 GPa와 0.2를 모델에 적용하였다. 해석 모델에서 유로 폭방향인 z방향으로 발생하는 섬유 정렬 변형은 무시하였다.

해석에 사용한 네 가지 섬유 모델은 유로 중심선에서 0.0625 mm, 0.0425 mm, 0.0225 mm와 0.00225 mm 만큼 떨어진 부분에 위치하며 순서대로 Fiber 1, Fiber 2, Fiber 3, Fiber 4로 Fig. 3.1에 도시하였다. 해석은 출발 위치에서 이동방향으로 2 mm이상 진행할 때까지 수행하였으며 섬유 및 PDMS의 이동속도는 모든 해석에서 확장부 유로 $Re=0.001$ 인 속도를 사용하였다. 해석에서의 섬유 각도 변화 및 이동계산에서의 시간 간격은 0.01 s로 평균 230 step을 계산하였다.

3. 해석 결과

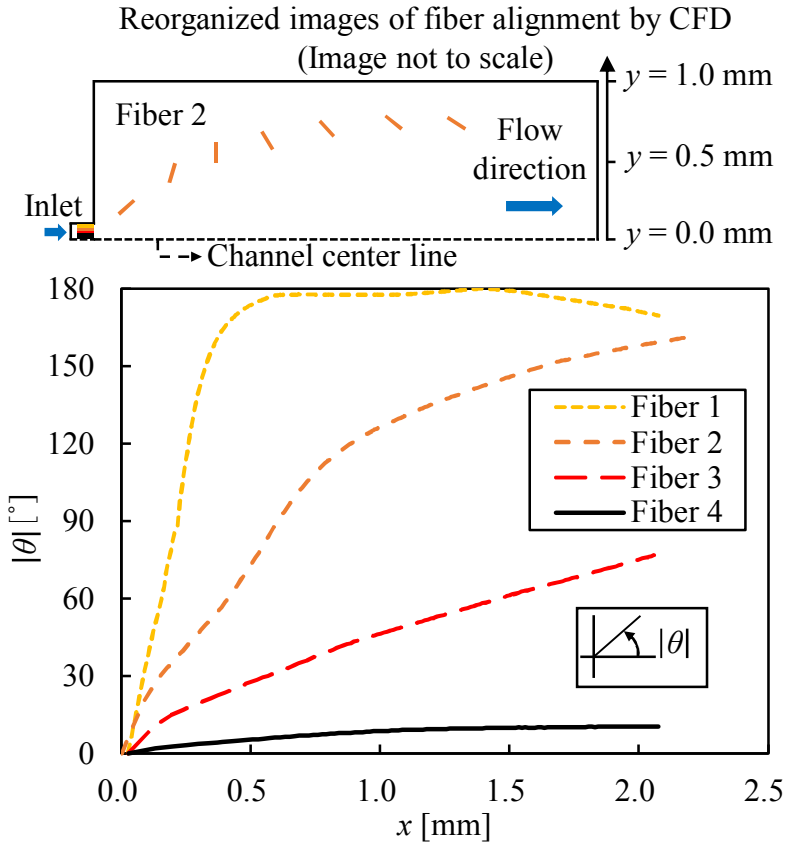


Fig. 3.2 Calculation result of fiber alignment at CFD

각각의 섬유 해석 결과는 Fig. 3.2로 도시하였으며 출발위치가 Fiber 2인 섬유의 유동에 따른 섬유의 변형과 이동을 일정한 위치간격으로 재구성한 도형 또한 도시하였다. 섬유의 각도는 3시 방향을 기준으로 하여 반시계 방향으로 회전하는 각도의 절대값을 θ 로 표시하였다. 각각의 섬유는 출발 위치에 따라서 서로 다른 정렬 거동을 보여주었으며 출발위치가 유로 벽면에 가장 가까운 Fiber 1은 유동 방향으로 0.2 mm까지 180°를 회전한 후, 출발지점과 같은 수평상태로 정렬되었다. 또한 유로 입구 방향으로 0.6 mm이상 이동한 후에는 섬유 각도 변화가 크게 감소하는 경향을 보였다. 이와는 반대로 유로 중앙선에 근접한 Fiber 4는 해석 영역 전체에서 0°~12° 사이의 각도를 유지하였다. Fiber 2는 0.9 mm까지

이동하는 동안 반시계 방향으로 104° 만큼 급격하게 회전한 후, 각도 변화가 둔화되는 경향을 보였으며 Fiber 3은 해석 영역 전체에서 일정한 시계방향 각도 증가를 나타냈다. 이러한 네 가지 섬유들은 섬유 출발위치에 따라서 확장부에서 이동하는 위치가 결정되었다. 유로 벽면에 근접한 위치에서 출발할수록 확장부에서도 유로 벽면 근처에서 이동하는 경향을 보였으며 유로 중심선에 근접한 경우에도 이동하는 동안 유로 중심선 근처에서 이동하는 경향을 보였다. 각도 변화의 경우에도 섬유의 출발 위치와 상관관계를 가졌다. 벽면에 가깝게 위치한 섬유일수록 유로 확장부의 초반부인 0~0.5 mm사이에서 급격한 각도 변화를 나타냈으나 유로 중심선에 근접한 섬유는 해석 영역 전체에서 15° 미만의 미약한 정렬 각도를 나타냈다. 또한 이러한 네 가지 섬유 모델들은 유로 확장 시 나타난 유선을 따라서 이동하였으며 유로 확장부에서는 섬유의 y 위치가 급격하게 변화하는 경향은 나타내지 않았다. 이와 같은 전산유체해석을 통하여 오리피스 유로에서 발생하는 단일 섬유 정렬 경향을 분석하였으며 7장의 오리피스 유로 분석 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

제 2 절 전단응력 방향 분석

1. 2D 해석 모델

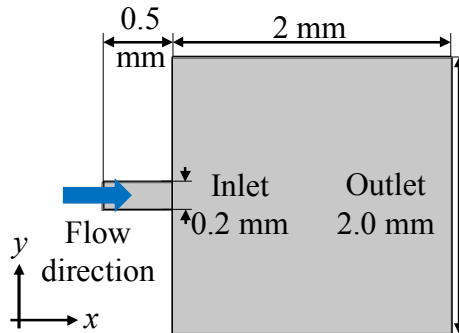


Fig. 3.3 2D model for calculation of shear stress direction

전단응력 방향을 계산하기 위한 속도구배는 Fig. 3.3과 같은 2D 해석 모델에서 계산하였다. 해석 모델은 오리피스 형상을 가지며 오리피스 주입구가 유로 두께 0.2 mm, 유로 길이 0.5 mm이며 확장부 영역은 유로 두께 2.0 mm, 유로 길이 2.0 mm이다. 해석에 사용한 유체는 실제 실험에서 사용한 액상 PDMS로 가정하였으며 점성계수와 밀도는 $3.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 1.03 g/cm^3 을 적용하였다. 정확한 전단응력 방향 계산을 위하여 정사각형 메쉬로 계산을 진행하였으며 해석 모델이 정상상태인 경우에서 해석을 진행하였다. 해석영역에서 계산된 정상상태 속도구배는 식(2-2)를 사용하여 전단응력 방향을 계산하는데 사용되었다.

2. 해석 결과

해석을 통하여 얻은 x , y 방향 속도벡터는 식(2-2)에 대입하여 Fig. 3.4와 같은 전단응력 방향으로 계산되었다. Fig. 3.4는 유로 중심선을 기준으로 대칭하여 전단응력을 도시한 그래프이며 전단응력 방향이 시계방향으로 나타나는 경우는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 로, 반시계 방향으로 나타나는 경우에는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 도시하였다.

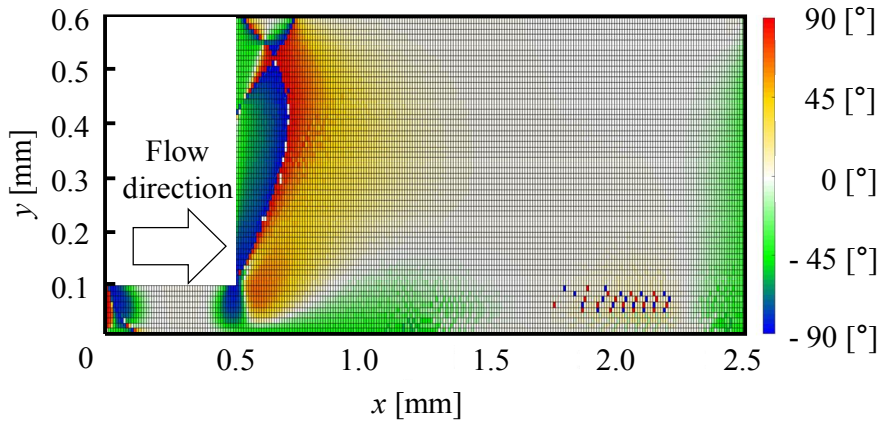


Fig. 3.4 Direction of shear stress distribution at the orifice channel

또한 그래프에 도시한 전단응력 방향이 유동방향과 수직에 가까울수록 명도가 어두운 색으로 도시하였으며 유동방향과 유사한 방향일수록 명도가 낮은 색으로 도시하였다. Fig. 3.4에 도시한 전단응력 방향은 오리피스 유로 통과 후 유로 중심부인 $y=0.1$ mm 이하에서 시계방향, $0.1 \text{ mm} < y < 0.3 \text{ mm}$ 에서 반시계 방향으로 나타났다. 이때 나타나는 두 가지 방향을 연결하는 경우 오리피스 통과 후 전단응력 분포는 퍼져나가는 동심원 형태를 나타냈다. 하지만 오리피스 통과 직후인 $x=0.5$ mm에 위치한 유로 벽면에서는 전단응력이 시계 방향으로 회전하는 경향을 나타냈다. 오리피스 통과 후 유동방향을 따라 진행된 전단응력 방향은 유동 방향과 유사한 0° 로 정렬되었으며 $x=2.0$ mm 이후부터 시계방향으로 전단응력 방향이 정렬되는 경향을 나타냈다. 이같이 해석한 전단응력 분포는 7장의 오리피스 유로 분석 결과와 비교하여 섬유 정렬 발생 원인을 확인하는데 사용하였다.

제 4 장 이미지 프로세싱

이 장의 일부는 제목: Image Processing of Additive Alignment inside a Polydimethylsiloxane and Carbon Fiber Mixture Flow로 Journal of Mechanical Science & Technology에 투고하였습니다.

제 1 절 이미지 프로세싱 준비

1. 이미지 전처리

유동가시화 이미지에 나타난 탄소 섬유 정렬 각도와 위치를 분석하기 위하여 이미지 내부 각도 분포를 분석할 수 있는 코드를 작성하였다. 코드는 상용 프로그램인 MATLAB (2016a, MathWorks)를 사용하여 작성하였으며 이미지 내부에 존재하는 첨가제 각도, 유로 내부 위치 등을 계산하는데 사용하였다.

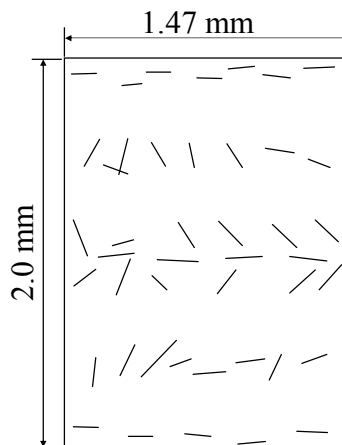


Fig. 4.1 Randomly aligned lines for examination of analysis code

작성한 코드의 정확도를 확인하기 위하여 Fig. 4.1에 도시된 무작위 정렬 각도를 지닌 선분으로 구성된 그림을 분석하였다. 해당 그림은 Fig. 4.2에 도시된

순서도를 따라 분석되었으며 선분 각도, 이미지 내부 선분 위치가 계산되었다. 분석에 사용할 이미지는 코드를 사용한 분석 전, 전처리를 위하여 이미지의 brightness, level, gain, sharpen을 조정하였다. 또한 이미지 처리 편의를 위하여 그림 내부의 명도를 반전시켰으며 선분의 명도가 0~200 미만, 배경은 최대값인 255로 표시되도록 조정하였다. 이때 이미지 구성 픽셀의 명도값을 검사하여 픽셀 명도가 200이상인 경우는 분석에서 배제하였다. 이렇게 전처리를 마친 이미지는 2차원 직교 좌표계에 올려 분석을 진행하였다.

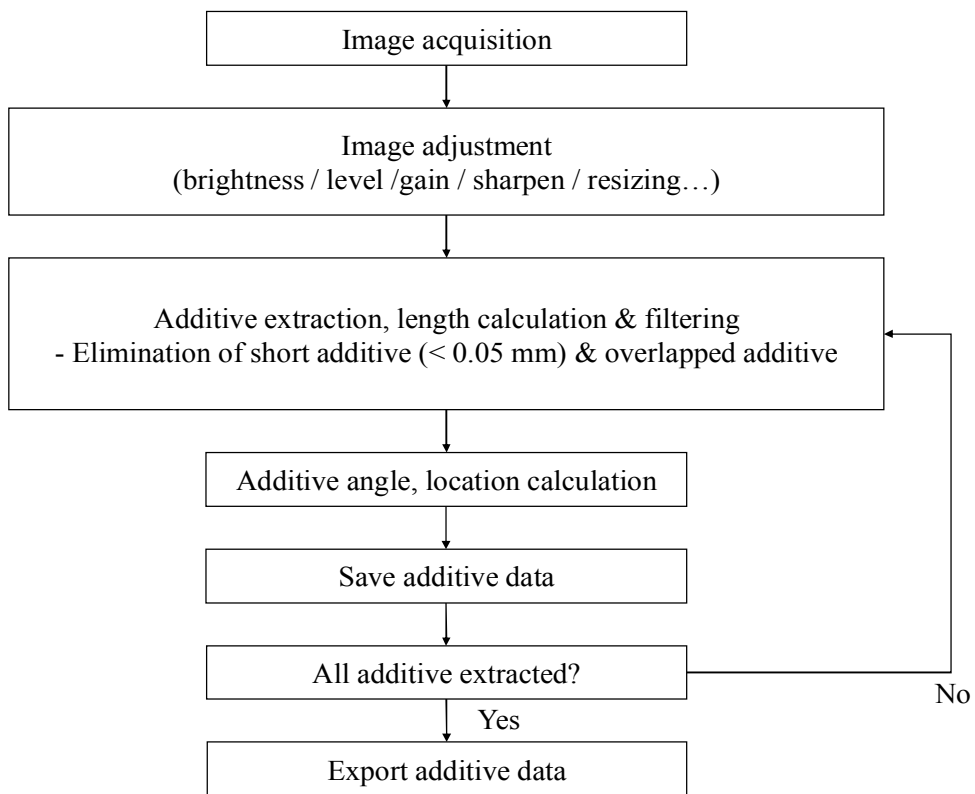


Fig. 4.2 Flow chart of image processing of additives

2. 이미지 내부 선분 분리

전처리가 끝난 후, 직교 좌표계에 올라간 이미지 내부 선분을 구성하는 픽셀의 명도값을 검사하여 선분과 배경을 분리하였다. 선분 분리 과정은 다음과 같은 과정을 거쳐 진행된다. 먼저 이미지 왼쪽 상단부터 픽셀 한 열씩 순차적으로 검사하여 픽셀 명도가 200 미만인 경우, 선분의 일부로 인식한다. 이후, 선분의 일부로 인식한 부분에서 픽셀 기준으로 인접한 8개의 픽셀을 3시 방향부터 시계방향을 따라서 검사한다. 이 경우에도 위와 이전과 마찬가지로 픽셀 명도가 200미만인 부분을 찾는다. 200 미만인 픽셀을 찾은 경우, 새롭게 찾은 픽셀 위치를 이전에 찾은 픽셀위치와 연결하고 새로운 픽셀 위치에서 시계방향 픽셀 검사를 반복한다. 그러나 더 이상 새로운 픽셀 위치를 찾을 수 없는 경우, 시계방향 픽셀 검사를 중단하고 연결한 선분을 별개로 분리한다. 그리고 이미지 픽셀 검사가 중단된 부분부터 픽셀을 다시 검사하기 시작하여 이미지 내부에 위치한 모든 선분을 분리하였다.

배경과 분리한 선분은 추가적인 세 가지 필터링을 거쳐 분석에 사용하였다. 첫 번째로 선분 길이가 기준 길이인 0.05 mm 이상인 경우만을 분석에 사용하였다. 이는 길이가 짧은 선분의 경우 각도 계산에 오차가 너무 커질 수 있기 때문이다. 선분의 길이는 분리한 선분을 구성하는 픽셀의 최대, 최소 좌표를 선분의 끝단으로 인식하여 계산하였다. 두 번째는 두 개 이상의 첨가제가 겹친 경우를 배제하여 분석에 사용하였다. 이를 위하여 선분을 구성하는 픽셀 개수를 확인하였다. 기준 픽셀 개수는 선분의 기준 길이인 0.05 mm를 구성하는 픽셀 개수 30개로 하였으며 이보다 픽셀이 더 많은 경우에는 첨가제가 겹쳐진 경우로 보아 분석에서 배제하였다. 이는 두 개 이상의 섬유가 겹친 경우 계산 복잡도와 오차가 증가하기 때문이다. 본 연구에서 사용한 이미지 처리 기준은 Table 4.1로 정리하였다.

Table 4.1 Image processing criteria

		Criteria
Line	Brightness range	0~200
	Maximum pixel	30
	Minimum line length [mm]	0.05
Back ground	Brightness range	200~255

제 2 절 이미지 분석

이 절에서는 3장 1절에서 분리한 선분을 분석하기 위하여 Hough 변환과 자체적으로 작성한 각도 분석 코드를 사용한 결과에 대해 설명하였다. Hough 변환은 상용 프로그램인 MATLAB에 포함된 코드로 사용하였으며 각도 분석 코드 또한 MATLAB으로 작성한 것을 사용하였다. 선분 각도는 Hough 변환과 각도 분석 코드로 계산하였으며 이미지 내부 선분 위치는 각도 분석 코드만을 사용하여 계산하였다.

1. 각도 분포 분석 방법

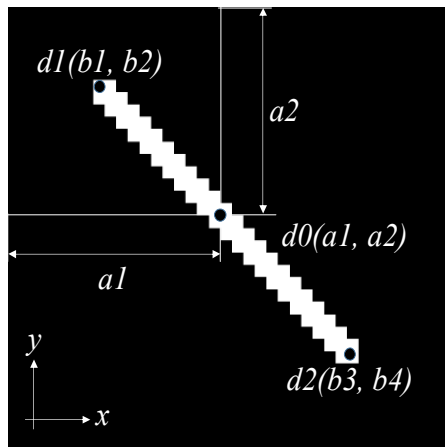


Fig. 4.3 Calculation of the line center in the image

$$a1 = \frac{b3 - b1}{2}, \quad a2 = \frac{b4 - b2}{2} \quad (4-1)$$

이미지 내부에 위치한 선분의 각도 분포를 분석하는 데에는 유로 내부 선분 위치와 선분 각도를 계산할 필요가 있다. 이때 유로 내부에 위치한 선분의 위치는 중심 좌표를 사용하여 각도 분석 코드로 분석하였다. Fig. 4.3은 어떤 선분의 위치를 선분의 중심 좌표 $d0$ 를 사용하여 각도 분석 코드로 분석한 그림이다. 선

분 중심 좌표 d_0 는 도시한 섬유 양쪽 끝점 좌표 d_1 과 d_2 좌표를 다음의 식(4-1)과 같이 평균하여 계산하였다. 이와 같이 식(4-1)로 계산된 선분 중심 좌표 d_0 는 섬유 중심에서 이미지 좌측 끝변까지 a_1 만큼, 섬유 중심에서 이미지 상단 끝변까지 a_2 만큼 떨어져있는 지점에 위치하고 있으며 이를 통해 선분이 이미지의 어느 부분에 위치하고 있는 지를 파악할 수 있다.

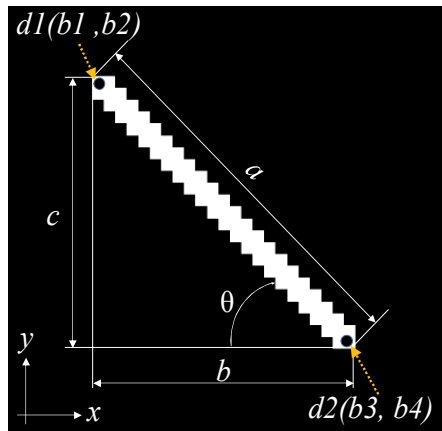


Fig. 4.4 A right angled triangle configuration of a line

선분의 각도는 선분 양쪽 끝점 좌표와 선분 길이를 사용하여 계산하였다. Fig. 4.4는 어떤 선분의 각도 θ 를 각도 분석 코드로 분석하는 경우에 필요한 변수를 간략하게 도시한 것이다. 먼저 Fig. 4.4의 선분 길이 a 는 선분 양쪽 끝점 d_1 과 d_2 좌표를 피타고라스 정리인 식(4-2)에 대입하여 계산하였다. 선분 각도 θ 는 식(4-2)를 통하여 계산한 선분 길이 a 와 선분 양쪽 끝점 좌표 d_1 과 d_2 의 x 축방향 차이인 b 를 직각삼각형의 사잇각을 계산하는 식(4-3)에 대입하여 계산하였다.

$$a = \sqrt{(b_3 - b_1)^2 + (b_4 - b_2)^2} \quad (4-2)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4-3)$$

이와 같은 이미지 전처리와 각도 분포 분석 방법을 사용한 선분의 각도 계산 과정을 간략하게 나타낸다면 Fig. 4.5로 정리할 수 있다.

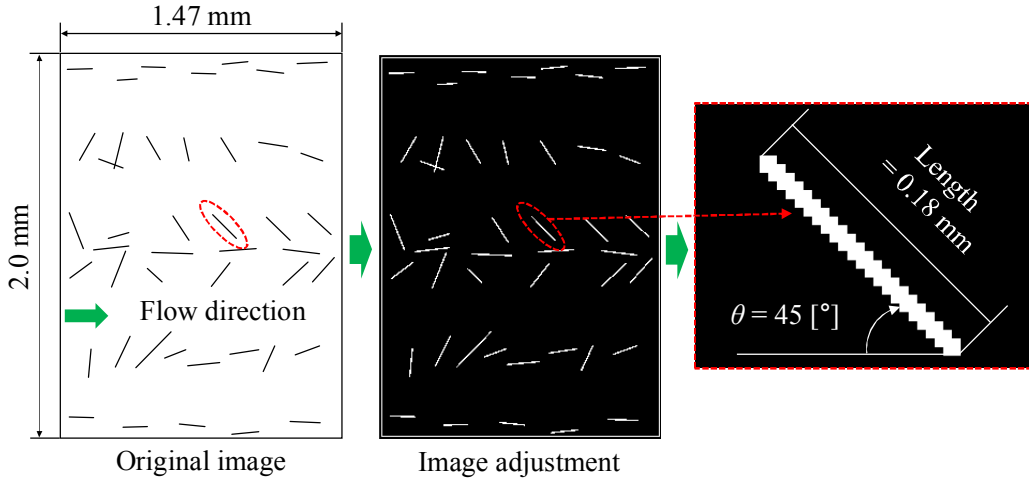


Fig. 4.5 Result of image processing of a randomly aligned line

2. 각도 분포 계산 결과

가. 이미지 내부 선분 각도

Hough 변환과 각도 분석 코드로 계산한 선분 각도는 실제 선분 각도와 비교하였다. Hough 변환으로 계산된 선분 각도는 실제 선분 각도와 오차 절대값이 평균 1.63° 로 계산되었다. 이에 반해 각도 분석 코드로 계산한 선분 각도는 실제 선분과 평균 0.77° 의 차이를 보였다. 또한 Hough 변환 각도와 각도 분석 코드의 분석 소모시간을 계산하였다. 각각의 계산시간은 Hough 변환이 17.6 초, 각도 분석 코드가 5.4 초가 걸렸다. 이를 통하여 임의 선분의 각도를 분석하는 경우, 각도 분석 코드가 Hough 변환보다 정확성과 계산속도 측면에서 우수한 것을 확인할 수 있었다.

나. 이미지 내부 선분 각도 분포

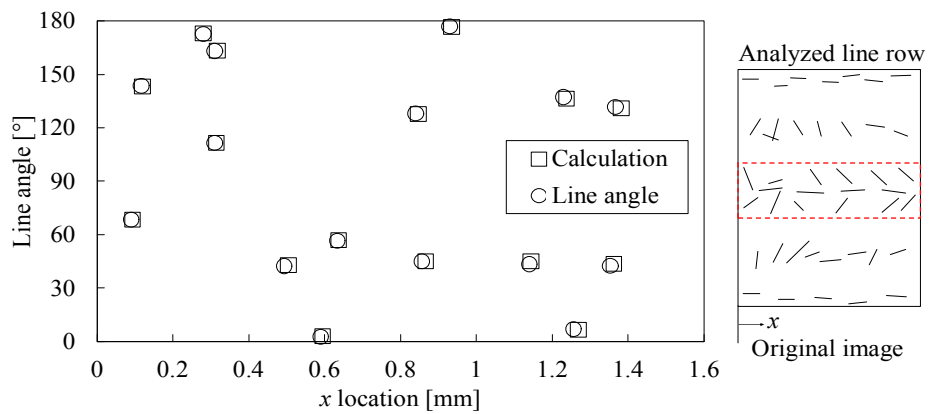
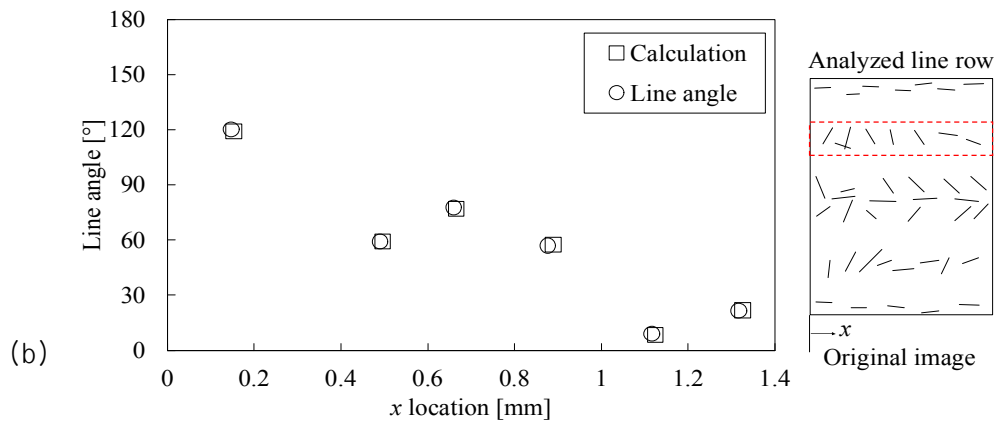
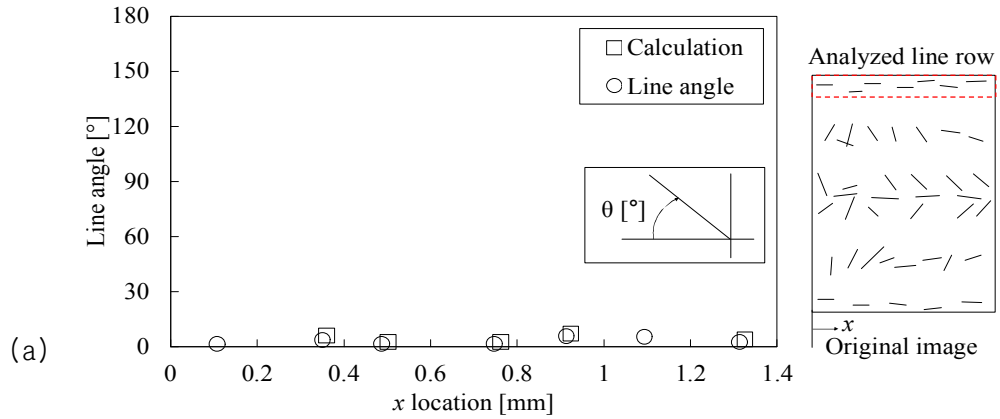


Fig. 4.6 Line image analysis result comparison between real and calculation line angle at (a) channel wall, (b) between channel wall and mid-channel and (c) mid-channel

Fig. 4.1 이미지 내부에 위치한 선분의 각도 분포를 각도 분석 코드를 사용하여 분석한 후 Fig. 4.6으로 도시하였다. Fig. 4.6에 도시한 그래프는 그래프 우측에 강조된 각각의 선분 열 위치에서 분석한 선분 각도 분포를 도시한 것이며, 각 그래프는 이미지의 x축 방향에 따른 실제 선분 각도와 코드로 분석된 선분 각도를 비교하고 있다. Fig. 4.6(a)는 이미지 상단에 위치한 선분 열을 분석한 그래프이며 이 그래프에서 분석한 선분 열에서는 모든 섬유가 x축 방향으로 누워있는, 유사한 각도를 나타내고 있다. 그래프로 분석한 결과, 실제 선분 각도와 코드로 분석한 선분각도가 유사한 값을 보였으며, 선분의 x축 방향에 따른 선분 위치 또한 유사한 값을 나타냈다. 이미지 중심부를 분석한 Fig. 4.6(b)와 Fig. 4.6(c)도 실제 선분 각도와 코드 분석으로 분석한 선분 각도가 유사한 값을 나타냈으며 각 선분의 위치 또한 실제와 코드 분석 결과가 유사하게 나타났다.

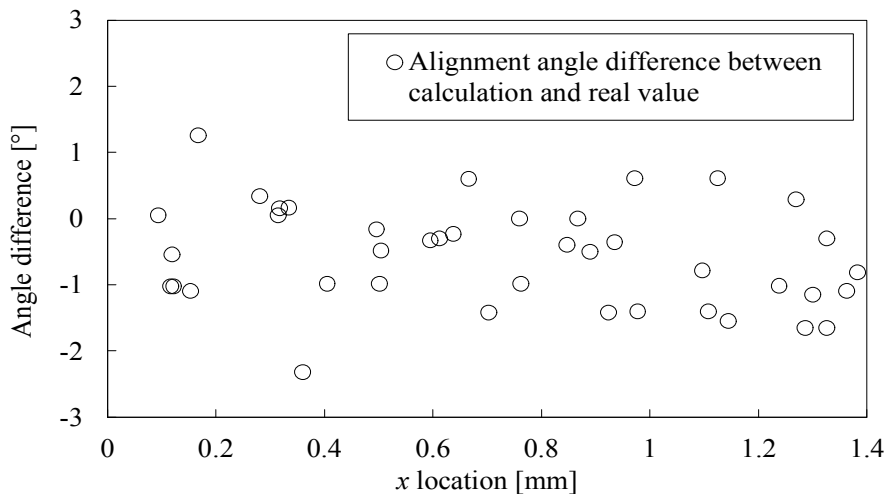


Fig. 4.7 Line angle difference between real and analysis result

Fig. 4.1의 모든 선분의 실제 각도와 코드를 사용하여 분석한 선분 각도의 차이는 Fig. 4.7로 정리하였다. 각각의 선분은 이미지 내부에서 선분이 위치하는 x , y 위치 좌표값을 통하여 코드로 분석한 섬유와 동일 섬유인지 아닌지를 비교하였으며 두 섬유가 동일한 섬유로 분류된 경우 실제 선분 각도와 코드로 분석한 각도를 비교하여 각도 사이의 오차를 계산하였다. 분석 대상이 된 이미지 내부 모든 선분의 x 축 방향에 따른 실제 각도와 코드로 분석한 각도 사이의 차이는 최대 $\pm 3^\circ$ 이내의 차이를 나타냈으며 모든 선분의 평균 오차는 0.77° 로 나타났다. 이러한 선분 이미지를 사용한 분석 결과를 미루어 보아 각도 분석 코드를 사용한 임의의 이미지 내부 분석 결과는 타당하다고 볼 수 있다.

제 3 절 유동가시화 이미지 분석

1. 유동가시화 이미지

3장 2절에서 사용한 각도 분석 코드를 사용하여 실제 복합소재 내부에서 유동하는 섬유형 첨가제 정렬을 분석하였다. 이를 위하여 액상 PDMS(Sylgard184, Dow Corning Co.)와 불밀링 탄소섬유(MFC, DowAksa Co.) 혼합물을 평행유로에서 유동가시화하였다. 혼합물 유동 속도는 $Re=0.001$ 로 고정하여 실험하였다. 유동가시화에 사용한 평행유로는 유로 두께 2 mm, 유로 폭 20 mm, 유로 길이 18 mm 인 경질 알루미늄 재질 직사각형 유로를 사용하였다. 이미지는 초고속 카메라(MIRO C110, Phantom)을 사용하여 초당 60 프레임으로 촬영하였다.

촬영한 유동가시화 이미지는 Fig. 4.2의 순서도를 따라 분석하였다. 이미지는 3장 1절 전처리를 따라 처리하였으며 각도 분포는 3장 2절 각도 분석 코드를 사용하여 분석하였다. 이러한 유동가시화 이미지 분석 과정은 Fig. 4.8로 간략하게 도식화하였다.

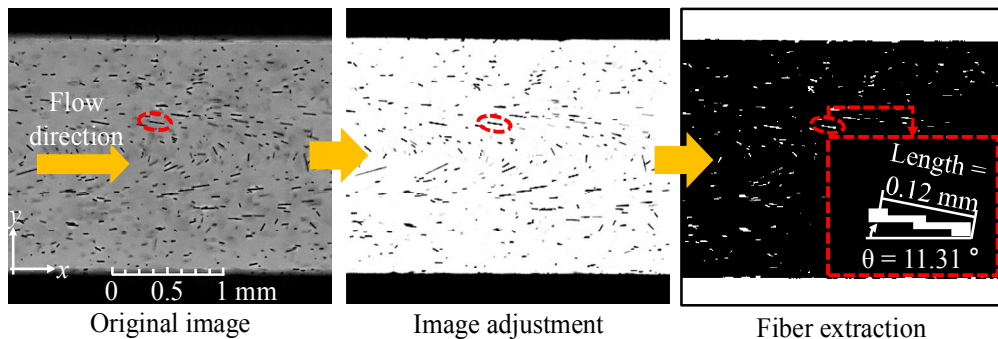
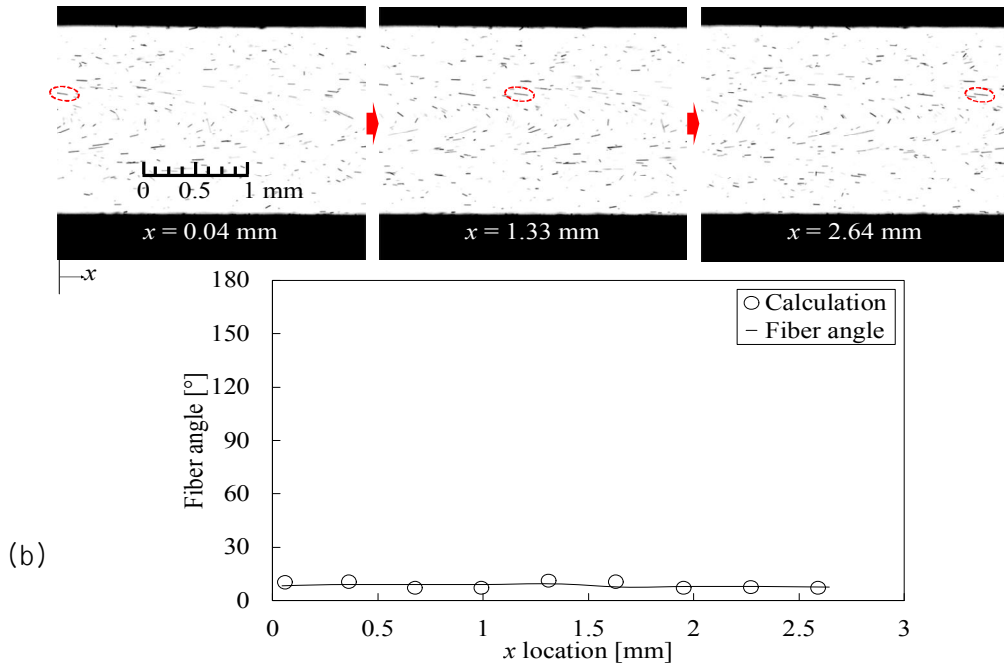
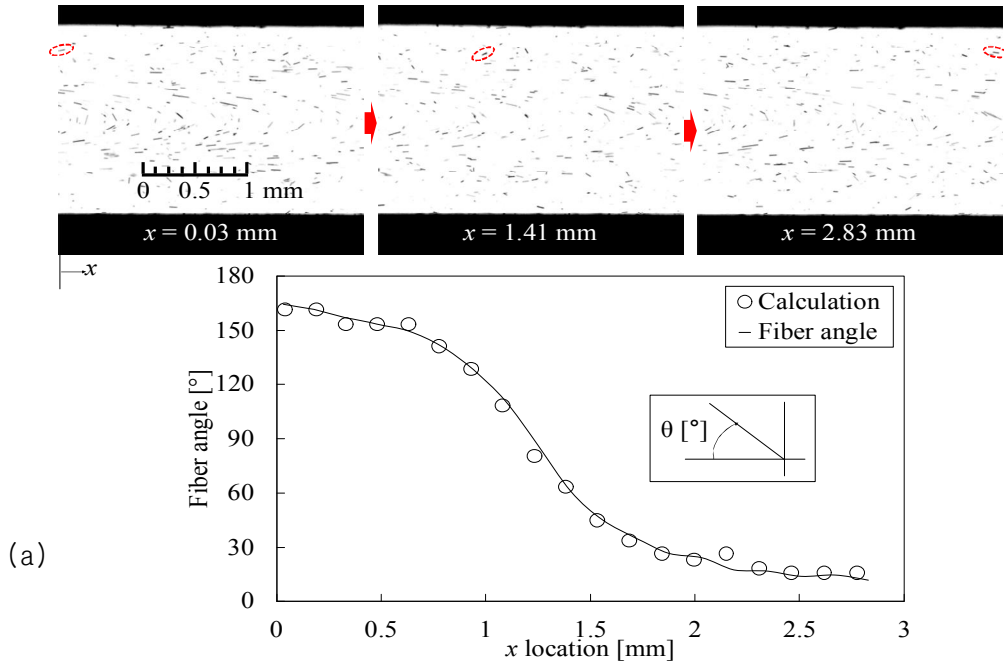


Fig. 4.8 Flow visualization image analysis process

2. 이미지 분석 결과



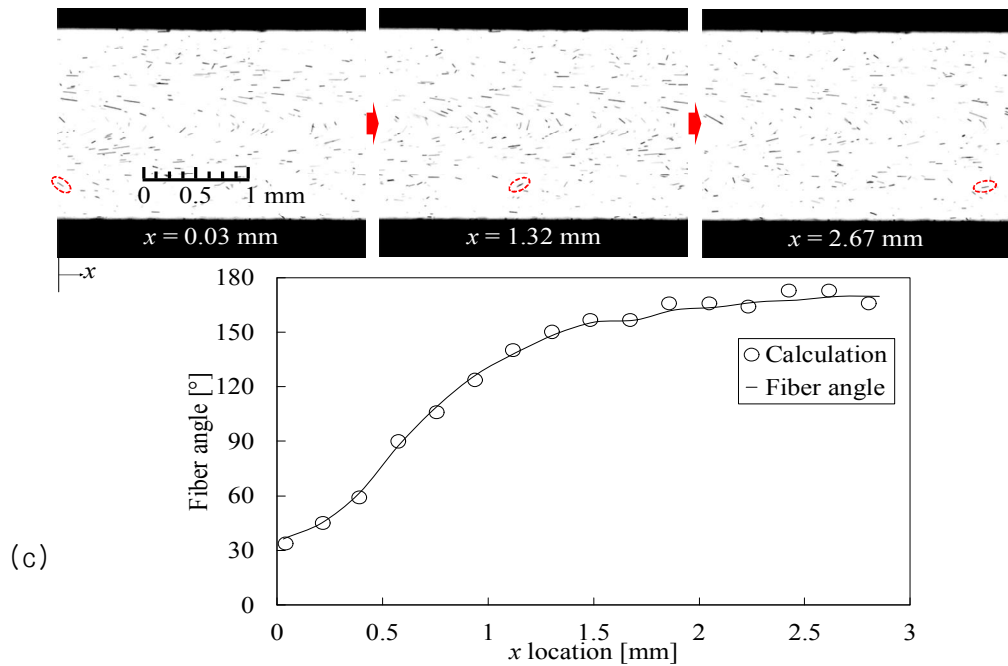


Fig. 4.9 Fiber angle comparison between image processing and real at (a) upper channel wall, (b) mid-channel and (c) bottom channel wall

각도 분석 코드의 정확도를 확인하기 위하여 평행 유로의 서로 다른 부분에서 유동하는 섬유 세 개를 코드로 분석하였다. 또한 각 섬유의 실제 정렬 각도와 위치를 코드로 분석한 결과와 비교하였다. 각 섬유의 정렬 분포 비교 결과는 Fig. 4.9로 정리하였다. 각 섬유는 유로의 상부 벽면 근처, 유로 중심부, 유로 하부 벽면 근처에서 유동하는 섬유를 대상으로 하여 분석하였다. 분석 대상이 된 섬유는 구별을 위하여 붉은 점선으로 강조하였다. Fig. 4.9(a)는 유로 상부 벽면 근처에서 유동하는 섬유를 대상으로 한 분석결과이다. 해당 섬유는 x 축 방향으로 이동하면서 반시계방향으로 회전하고 있었다. 섬유는 이미지 내부에서 x 축 방향으로 2.8 mm를 이동하였으며 초기각도 $161.6^\circ \sim 16^\circ$ 까지 각도가 145.6° 만큼 변화하였다. 실제 섬유 각도와 코드 분석 결과의 평균 오차는 각도 오차가 2.3° , x 축, y 축 방향 오차가 0.02 mm, 0.04 mm로 실제 섬유의 움직임과 유사한 결과를 나타냈다. Fig. 4.9(b)는 유로 중심부에서 유동하는 섬유를 대상으로 하여 분석한 결과이다. 해당 섬유는 x 축 방향으로 2.6 mm를 이동하면서 초기각도

10.3°~7.1°로 거의 일정한 각도를 유지하였다. 실제 섬유 각도와 코드 분석 결과 간 평균 오차는 각도 오차가 1.5°, x축, y축 방향 오차가 0.02 mm, 0.02 mm로 실제 섬유와 유사한 거동을 보였다. Fig. 4.9(c)는 유로 하부 벽면근처에서 유동하는 섬유를 분석한 결과이다. 해당 섬유는 x축 방향으로 2.64 mm를 이동하면서 시계방향으로 회전하고 있었다. 해당 섬유는 초기각도 33.7°~166.0°까지 각도가 132.3°만큼 변화하였다. 실제 섬유 각도와 코드 분석 결과의 평균 오차는 각도 오차가 2.0°, x축, y축 방향 오차가 0.05 mm, 0.01 mm로 실제 섬유의 움직임과 유사한 거동을 나타냈다. 이상의 분석을 통하여 유동가시화 이미지의 섬유형 첨가제 정렬을 각도 분석 코드로 정확하게 분석할 수 있음을 확인하였다.

제 5 장 3D 프린팅 금형 내부 유동가시화 실험 및 첨가제 정렬 분석

제 1 절 평행 및 직각 유로

1. 유동가시화 실험장치 및 방법

유로 내부에서 실제로 유동하는 섬유형 첨가제를 모사하기 위하여 유동가시화 실험을 진행하였다. 유동가시화는 평행 및 직각 형상이 모사된 유로에서 진행하였으며 유로 두께와 유동 속도를 실험 변수로 하여 진행하였다. 실제 섬유형 첨가제와 유동가시화 이미지 상의 첨가제 측정 결과간 오차는 약 3° 이내의 낮은 값을 나타내었기에 본 실험에서는 첨가제 정렬 측정 오차를 무시하였다. 유동가시화 실험 장치는 Fig. 5.1과 같이 구성하였으며 각각의 실험장치는 다음과 같다.

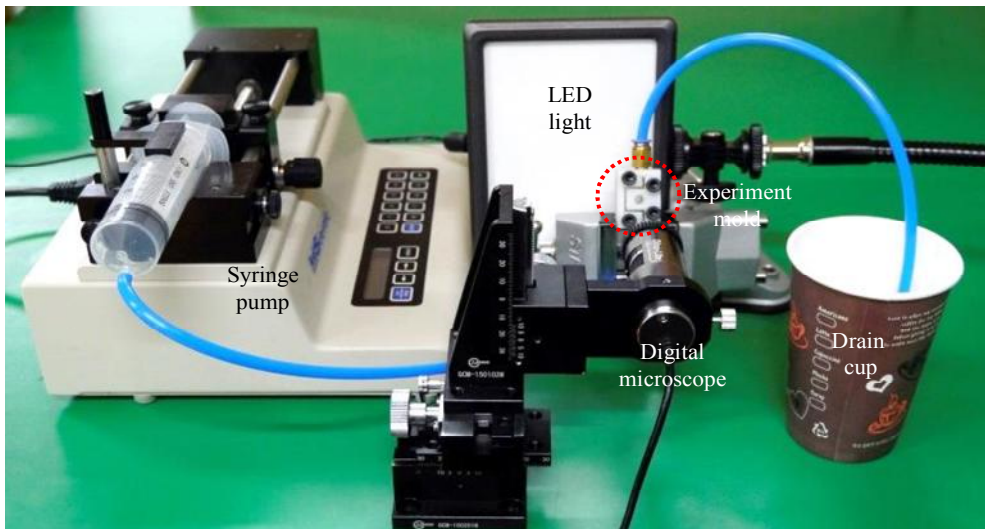


Fig. 5.1 Experimental device setup of flow visualization for 3D printed flow channels

가. 유동가시화 금형

평행 및 직각 유로를 유동가시화하기 위하여 3D 프린터(Object eden 260vs, Stratasys Ltd.)로 출력한 금형을 사용하였다. 금형은 실험 중 미세한 틈 사이로 발생할 수 있는 누수를 방지하기 위해 풀리젯 방법으로 제작하였다. 금형 형상은 30 X 20 X 24 [mm]인 직사각형 형상이며 금형 소재는 Vero white를 사용하였다. 금형 제작에 사용한 Vero white는 인장강도 50~60 MPa, Shore 경도 83~86 D, Rockwell 경도 73~76 M인 ABS 플라스틱 소재이며 45~50℃까지 변형이 일어나지 않는 소재이다. 금형에 대한 보다 자세한 사항은 Table 5.1로 정리하였다. 평행 및 직각유로 금형은 Fig. 5.2와 같이 출력하였다.

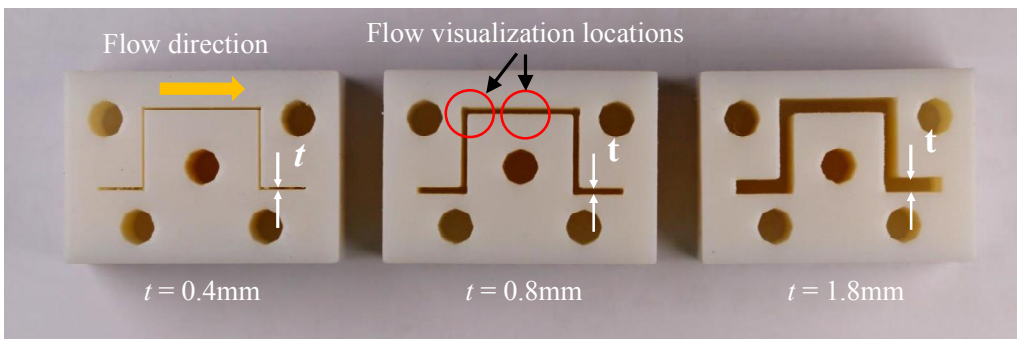


Fig. 5.2 Experimental mold fabricated by 3d printing

Fig. 5.2의 붉은 원은 본 연구에서 유동가시화를 진행한 부분을 의미한다. 금형 내부에 모사된 유로는 유로 폭이 20 mm이며 유로 두께가 0.4 mm, 0.8 mm, 1.8 mm로 Fig. 4.2와 같이 세 가지 종류의 직사각형 단면을 가지는 유로이다. 유로는 금형과 투명한 아크릴 관측창을 5개의 볼트와 너트로 관통 체결하여 구성하였으며 이렇게 구성한 유로는 Fig. 5.3과 같은 형상을 갖는다. 유로 구성에 사용한 아크릴 관측창은 두께 2 mm인 아크릴 판으로 제작하였으며 유동가시화의 용이성을 위하여 투명한 색상으로 제작하였다. 실험에 사용한 아크릴 관측창은 1회용으

로 사용하였다. 또한 중력에 의한 영향을 배제하기 위하여 금형 아래쪽에서 유동
 가시화 혼합물을 주입하였다.

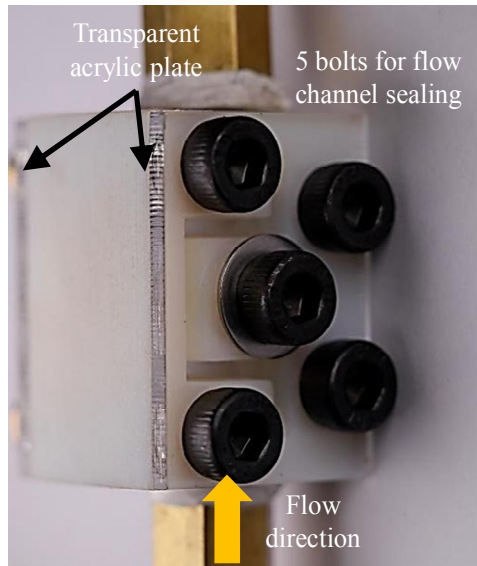


Fig. 5.3 Mold combination of 3D printed blocks and transparent acrylic window

Table 5.1 Specification of experimental mold and material

	information	
Mold	Mold size [mm ³]	30(W) x 20(D) x 24(H)
	Channel size [mm]	0.4(H) x 20(D) / 0.8(H) x 20(D) / 1.8(H) x 20(D)
	Material	Vero white
Vero white	Tensile strength [MPa]	50~60
	Shore hardness [D]	83~86
	Rockwell hardness [M]	73~76
	HDT [°C]	45~50
Object eden 260vs	System size and weight [cm]	87 x 120 x 73.5
	System size and weight [cm]	87 x 120 x 73.5
	Accuracy [μm]	20~85 at below 50 mm / 200 at full size
	Resolution [dpi]	600 at X, Y-axis / 1600 at Z-axis
Acrylic plate	Thickness [mm]	2
	Material	Acrylic
	Color	Transparent

Sources: For additional information, see Vero and Object eden 260vs (2015).

나. 디지털 현미경

유로 내부에서 발생하는 섬유형 첨가제 정렬은 Fig. 5.4와 같은 디지털 현미경(AM7515MZTL, Dino-light)을 사용하여 촬영하였다. 유로 내부에서 발생하는 섬유형 첨가제 유동을 촬영한 영역은 Fig. 5.2에 도시된 유로가 직각으로 꺾이는 부분과 평행 유로 부분에서 진행하였다. 촬상면은 아크릴판과 금형 사이에서 안

쪽으로 4 mm만큼 들어간 면을 촬영하였다. 첨가제 정렬 촬영 시 이미지 촬영 배율은 100배율로 고정하였으며 유동가시화 이미지는 30 fps로 촬영하였다. 본 연구에 사용한 디지털 현미경의 제원은 Table 5.2로 정리하였다.



Fig. 5.4 Digital microscope (AM7515MZTL, Dino-light)

Table 5.2 Specification of digital microscope

Digital microscope model	information	
AM7515MZTL	Product resolution	5M pixels (2592 x 1944)
	Magnification	10~140
	Frame rate [fps]	10 in 5MP/3MP/2MP/MJPEG 25 in 1.3MP/MJPEG 30 in VGA/MJPEG
	Unit dimension [cm]	10.5(H) x 3.2(D)

Sources: Sources: For additional information, see AM7515MZTL.

다. LED 조명

유로 내부에서 나타나는 섬유형 첨가제의 정렬을 강조하여 위하여 Fig. 5.5와 같은 LED 조명(Luxpad22, NanGuang Photo&Video Systems Co.)을 사용하였다. LED 조명은 유로 내부에서 이동하는 섬유형 첨가제와 복합소재 용매를 명확하게 구분하는데 사용되었다. 또한 LED 조명을 카메라와 대칭 위치에 두는 백라이트 방법을 사용하여 섬유형 첨가제 정렬을 강조하였다. 본 연구에서 사용한 LED 조명의 제원은 Table 5.3에 정리하였다.

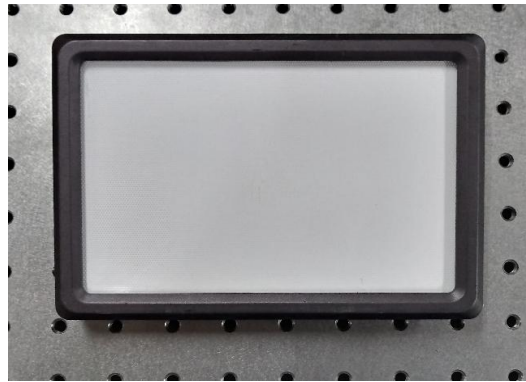


Fig. 5.5 LED light (Luxpad22, Nanguang Photo & Video Systems Co.)

Table 5.3 Specification of LED light

LED light	information	
Luxpad22	Dimension [cm]	12.3(D) x 17.5(H)
	Power [W]	6.7
	Illumination [LM]	551
	Color rendering index [Ra]	95

Sources: Sources: For additional information, see Luxpadd22.

라. 주사기 펌프

유로 내부로 주입하는 유체의 속도를 일정하게 유지하기 위하여 주사기펌프 (KDS-410, KD Scientific Inc.)를 사용하였다. 주사기 펌프 이동 속도는 금형 내부에 모사한 유로에서 계산되는 Re가 0.0002~0.004인 속도를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 유로 내부 Re와 주사기 펌프 이송 속도는 Table 5.4에 정리하였다.

Table 5.4 Specification of syringe pump and Re of flow channel

Re	Channel hydraulic thickness [mm]	Linear travel rate [ml/min]
0.0002	0.784	0.416
	1.538	0.424
	3.303	0.445
0.0004	0.784	0.832
	1.538	0.848
	3.303	0.889
0.0008	0.784	1.664
	1.538	1.696
	3.303	1.778
0.0012	0.784	2.496
	1.538	2.545
	3.303	2.667
0.002	0.784	4.159
	1.538	4.241
	3.303	4.445
0.004	0.784	8.319
	1.538	8.482
	3.303	8.889

마. 유동가시화 혼합물

복합소재 내부에서 유동하는 첨가제 정렬을 모사하기 위하여 Fig. 5.6의 PDMS 탄소섬유 혼합액을 사용하였다. PDMS(Sylgard 184)는 투명한 실리콘이며 혼합물 내부에서 유동하는 탄소섬유를 직접적으로 관찰하기 위하여 사용하였다. 본 연구에서 사용한 PDMS는 주제와 경화제를 질량비 기준 10:1으로 혼합하여 사용하였다. 탄소섬유는 비등방성 첨가제의 유동을 모사하기 위하여 사용하였으며 평균 길이 0.1 mm, 지름 7 μm 으로 분쇄한 제품을 사용하였다. PDMS와 탄소섬유는 질량비 기준 0.05%으로 혼합하여 사용하였으며 PDMS와 탄소섬유 혼합시 발생하는 기포는 1 Torr 압력이 유지되는 진공챔버에 약 30분정도 놓아두어 제거하였다. 이러한 과정을 거쳐 제조된 혼합물은 Fig. 5.3에 도시한 대로 금형 아래쪽에서 주입하여 중력에 의한 혼합물 주입영향을 배제하였다. 보다 자세한 혼합물 재료의 제원은 Table 5.5에 정리하였다.



Fig. 5.6 (a) PDMS sylgard 184 & (b) carbon fiber

Table 5.5 Specification of PDMS, carbon fiber and mixture

	information	
Sylgard 184	Viscosity [Pa · s]	3.5
	Uncured specific gravity	1.03
	Cure time [hr]	48 at 25°C
Carbon fiber	Average length [mm]	0.1
	Average diameter [μm]	7
Composite	Mixing concentration (%)	0.05
	Air bubble elimination time in vacuum chamber [min]	30

Sources: Sources: For additional information, see Sylgard 184 Dow Corning.

2. 평행 및 직각유로 실험결과

가. 평행유로

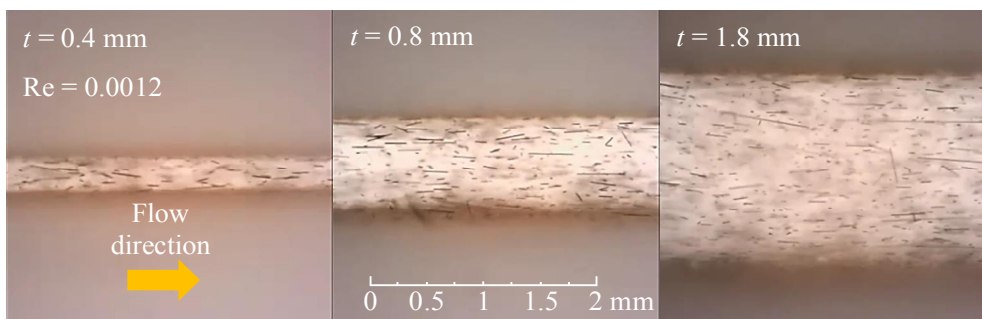


Fig. 5.7 Fiber alignment at parallel channel in different channel thicknesses

평행유로에서 유동하는 섬유형 첨가제의 정렬을 유동가시화 실험 유로 두께와 유로 내부 Re 변화를 통하여 분석하였다. 유로 두께에 따른 평행유로 내부 섬유 정렬은 Fig. 5.7로 정리하였다. Fig. 5.7은 유로 내부 Re가 0.012로 동일하고 유로 두께가 서로 다른 세 가지 유로에서 나타나는 섬유 정렬을 비교한 것이다. 각각의 유동가시화 이미지를 비교한 결과, 유로 두께가 좁을수록 유동방향으로 정렬된 섬유가 다수 나타났다. 반면에 유로 두께가 두꺼운 경우에는 섬유 정렬이 무작위한 방향으로 나타났다. 또한 유로 중심부에 위치한 섬유가 유로 벽면에 위치한 섬유보다 무작위한 방향으로 정렬되는 것으로 나타났다. 더불어 유로 내부 Re가 높을수록 섬유 정렬은 유동방향과 유사하게 나타났다.

첨가제 정렬 현상과는 별개로 유로 내부 위치에 따라서 유동 속도 차이가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 유동 속도 차이는 Fig. 5.8로 정리하였다. Fig. 5.8은 3초 간격으로 두께 0.8 mm, 유로 내부 Re=0.0004인 유로 내부에서 유동하는 서로 다른 섬유 두 가지를 추적한 것이다. 추적에 사용한 두 가지 섬유는 유로 중심부에서 유동하는 섬유는 실선으로 유로 벽면에서 유동하는 섬유는 점선으로 도시하였다. 추적결과, 유로 중앙에서 유동하는 섬유는 0.13 mm/s로, 유로 벽면 근처에서 유동하는 섬유가 0.08 mm/s로 유동하는 것을 확인하였다. 따라서 유로 중앙에서 유동하는 섬유가 유로 벽면에서 유동하는 섬유보다 9초 더 빠르게 이미지 바깥으로 이동하는 것을 확인하였다. 또한 섬유끼리 뭉친 덩어리가 유동이 진행함에 따라서 점차 분리되는 것을 확인하였다.

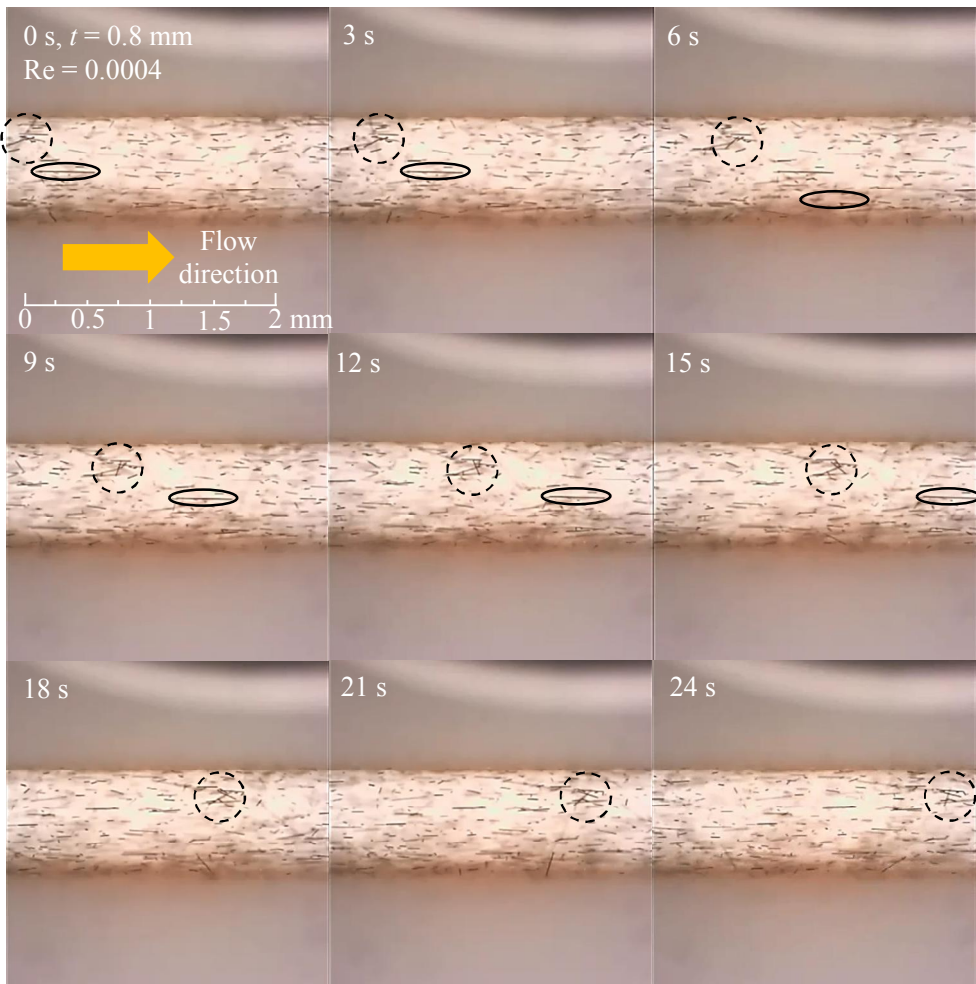


Fig. 5.8 Flow velocity comparison at different locations in parallel channel

나. 직각유로

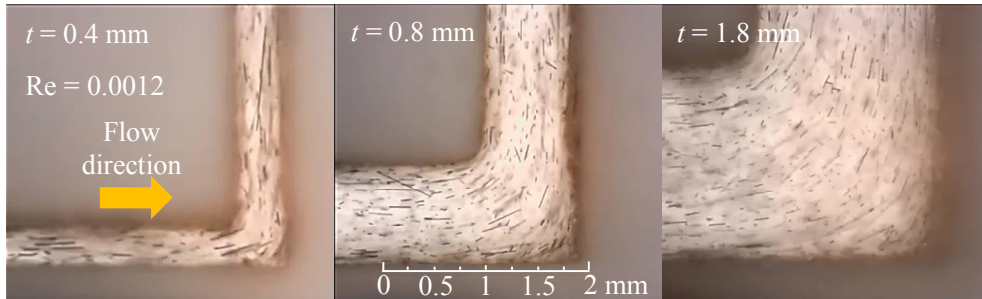


Fig. 5.9 Fiber alignment at perpendicular channel in different channel thicknesses

직각유로에서 나타나는 섬유 정렬은 평형유로와는 달리 유로 두께에 따라 변화하지 않았으며 유동속도 분포 또한 평형유로와는 다른 결과를 나타냈다. 직각유로 두께에 따른 섬유 정렬은 Fig. 5.9로 정리하였다. Fig. 5.9는 유로 내부 $Re=0.0012$ 로 동일하고 유로 두께가 서로 다른 세 가지 유로에서 나타나는 섬유 정렬을 비교한 것이다. 각 유로에서 유동하는 섬유는 공통적으로 유동방향을 따라서 정렬되었다. 일부 섬유는 유로 벽면과 충돌하여 유로 내부에서 회전하는 정렬을 나타냈다. 또한 섬유 길이가 유로 두께보다 긴 경우에도 유로의 회전 곡률 반경이 작은 부분에서 끼이지 않고 유동하는 모습을 나타냈다.

직각 유로에서 나타나는 유로 내부 위치별 속도 차이는 Fig. 5.10으로 정리하였다. Fig. 5.10은 2초 간격으로 두께 0.8 mm, 유로 내부 $Re=0.0012$ 인 유로 내부에서 유동하는 서로 다른 두 가지 섬유를 추적한 것이다. 두 가지 섬유는 유로가 바깥쪽으로 꺾이는 부분에 위치한 섬유는 점선으로, 안쪽으로 꺾이는 섬유는 실선으로 도시하였다. 추적결과, 유로가 바깥쪽으로 꺾이는 부분에 위치한 섬유가 바깥쪽으로 꺾이는 섬유보다 더 빠르게 이동하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4.10에서 실선으로 도시한 섬유가 유로의 회전 곡률 반경이 작은 부분을 통과하는 시간이 4초, 점선으로 도시한 섬유가 통과하는 시간이 10초인 것으로 확인하였다.

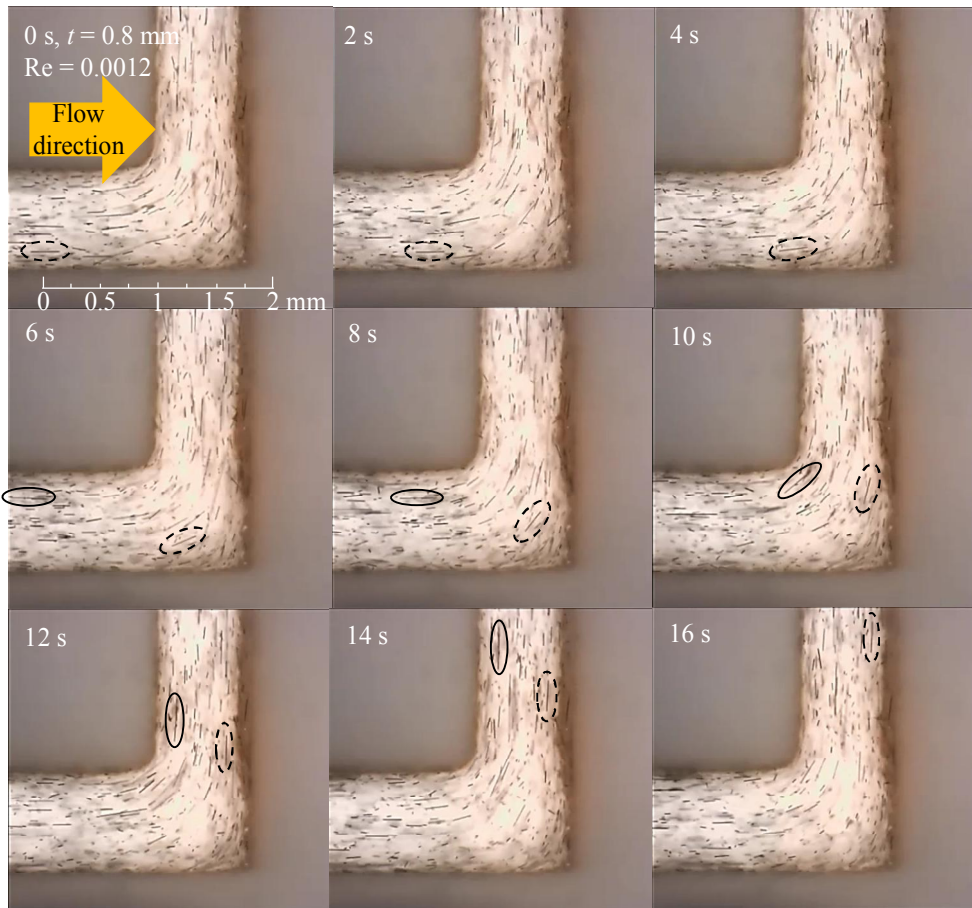


Fig. 5.10 Flow velocity comparison of different location in perpendicular channel

다. 3D 프린터 금형 내부 유동가시화 결과

평행 유로와 직각 유로에서 촬영한 유동가시화 영상을 통하여 유로의 두께가 두꺼울수록, 유로 내부 Re 가 낮을수록 유로 중앙부에서 유로 벽면에 비해 상대적으로 무작위한 섬유 정렬이 나타나는 것을 확인하였다. 또한 유로 각도가 변화하는 경우, 유로 내부에서 발생하는 섬유 정렬이 유로 위치에 따라서 변화하는 것

을 확인하였다. 이와 같은 유로 내부 섬유정렬과 유동속도차이는 유로 내부에서 발생하는 속도구배에 의한 것으로 보인다. 이는 유로 벽면 근처에서는 속도구배 차이가 크게 나타나기 때문에 대다수 섬유가 유동방향으로 정렬되며 유로 벽면에 비하여 속도구배 차이가 작은 유로 중심부에서는 섬유가 무작위한 방향으로 정렬되는 것을 통해 확인할 수 있었다. 또한 유로두께가 증가할수록 유로 중심부에서 나타나는 섬유 정렬이 상대적으로 무작위하게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 속도구배 차이가 크게 나타나는 유로 벽면에 비하여 속도구배 차이가 작게 나타나는 유로 중심부 영역이 유로 두께 증가에 따라 확장되었기 때문에 나타나는 현상이었다. 이 외에도 유로 내부의 Re가 감소하는 경우, 유동속도 감소에 따라 유로 내부에서 나타나는 속도구배 차이가 감소하여 유로 내부 Re가 높을 때보다 상대적으로 무작위한 섬유 정렬이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 유로 내부에서 나타나는 전단응력 변화가 섬유 정렬 경향과 유동 경향에 미치는 영향을 Fig. 5.8과 Fig 5.10으로 정리하였다. 본 장에서 분석한 내용은 Table 5.6으로 정리하였으며 다음 6장에서는 1절에서 얻은 분석 결과를 토대로 유로 각도를 변화하였을 때 발생하는 섬유정렬 현상을 분석하였다.

Table 5.6 Fiber alignment by channel shape and thickness

Channel thickness [mm]	Parallel channel		Perpendicular channel	
	Flow speed	Alignment direction	Flow speed	Alignment direction
0.4	max - center / min - wall	Flow direction	max - convex / min - concave	Flow direction
0.8				
1.8				

제 6 장 꺾인 유로 내부 유동가시화 실험 및 분석

제 1 절 각도 변화 유로

1. 유동가시화 실험장치 및 방법

5장에서 분석한 평행 및 직각 유로 유동가시화 결과를 토대로 유로 각도가 변화하는 경우 나타나는 섬유 정렬에 대하여 분석하였다. 유로 각도가 변화하는 금형을 사용한 실험장치는 유로 모사 금형을 제외한 모든 장비를 평행 및 직각 유로 유동가시화 실험과 동일하게 사용하였다.

가. 유동가시화 금형

각도 변화 유동가시화 실험에 사용한 금형은 Fig. 6.1로 정리하였으며 각각의 금형은 유동하는 도중 유로 각도가 30° , 45° , 60° , 90° 네 가지 경우로 변화하는 유로를 모사한 금형이다. 본 실험에서 유동가시화를 진행한 부분은 붉은 원으로 표시하였으며 해당 부위의 각도를 붉은색 실선으로 강조하였다. 네 가지 금형 내부에 모사한 유로 단면은 평행 및 직각 유로와 동일한 $20\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$ 직사각형 단면을 가지며 금형 재질은 투명한 아크릴 재질이다. 평행 및 직각 유로 유동가시화 실험과 마찬가지로 2 mm 두께의 투명한 아크릴 관측창을 부착하여 유로 내부에서 발생하는 섬유 정렬을 관찰하였다. 실험에 사용한 금형과 아크릴 관측창은 Fig. 6.2와 같이 3개의 볼트, 너트로 관통 체결하여 사용하였다. 또한 중력에 의한 영향 배제를 위하여 금형 아래쪽에서 혼합물을 주입하였다.

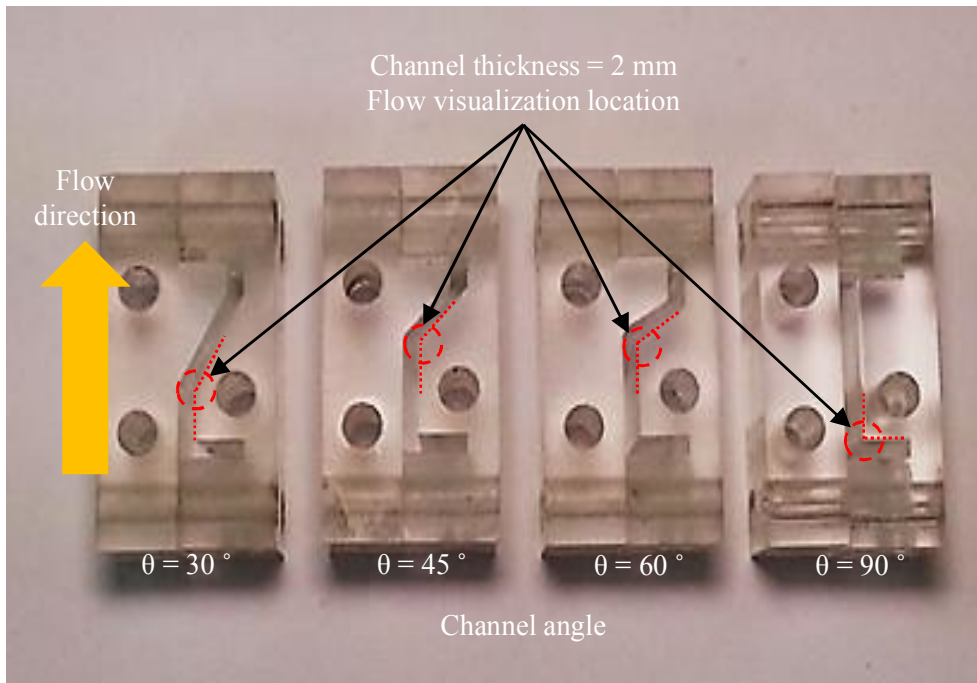


Fig. 6.1 Flow channel with channel angle change

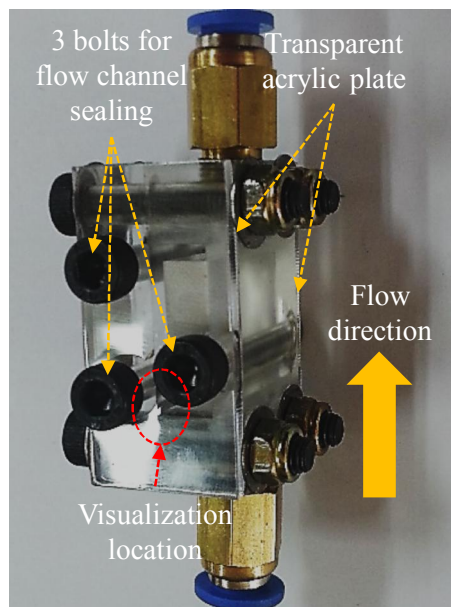


Fig. 6.2 Mold combination of acrylic block and transparent acrylic window

나. 주사기 펌프

평행 및 직각 유로 유동가시화 실험 결과를 토대로 하여 섬유 정렬이 분명하게 나타나는 가장 큰 Re를 선택하여 실험하였다. 사용한 Re는 0.001이며 실험에 사용한 유로의 수력직경은 모두 3.636 mm이다. 주사기 펌프는 수력직경과 Re를 통하여 계산한 2.243 ml/min의 이송속도로 일정하게 혼합물을 주입하였다.

2. 각도 변화 유로 실험 결과

가. 30° 각도 유로

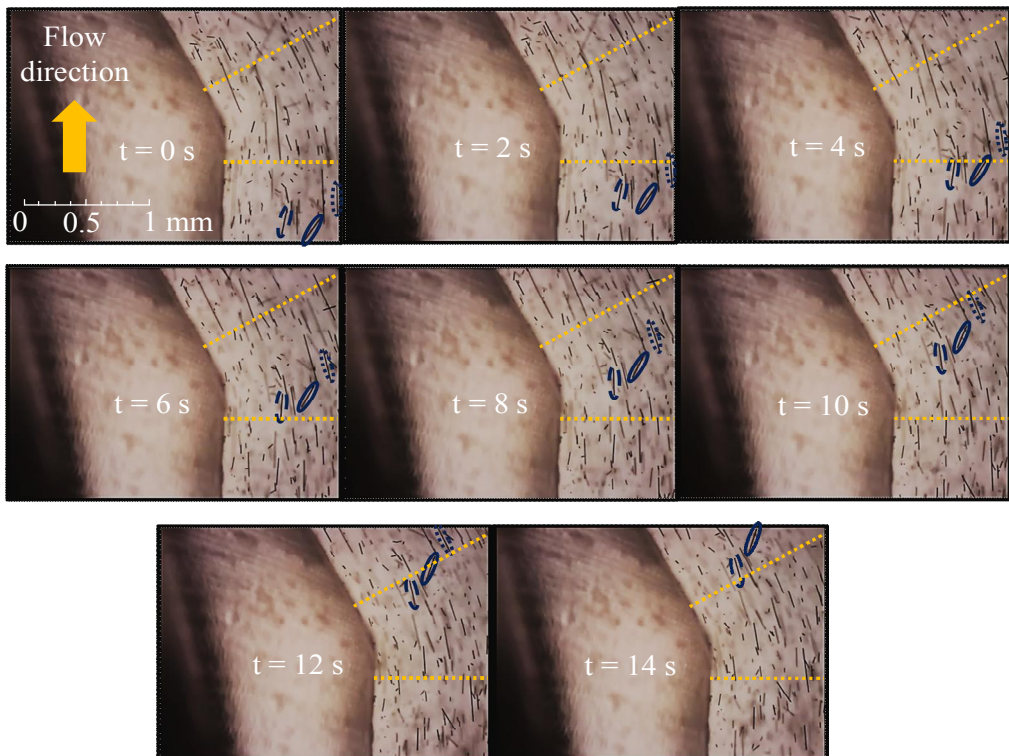


Fig. 6.3 Flow visualization at the convex corner (channel angle=30°)

Fig. 6.3은 유로 각도 변화가 30° 인 부분에서 나타나는 세 가지 섬유 정렬을 2초 간격으로 추적한 것이다. 분석에 사용한 섬유는 유로 중앙에서부터 유로 회전 곡률 반경이 작은 쪽 벽면 사이에 위치한 서로 다른 세 가지 섬유를 사용하였으며 Fig. 6.3 내부에 파란 원으로 도시하였다. 분석에 사용한 이미지는 디지털 현미경으로 촬영한 100배율, 30 fps 영상을 사용하였으며 유로 두께 2 mm, 유로 폭 20 mm인 직사각형 단면을 갖는 유로에서 촬영하였다.

분석에 사용한 세 섬유 모두 이미지 상에서 최초로 나타난 섬유 정렬을 유로 각도가 변화하는 영역을 지난 후에도 유지하였다. 또한 유로 중앙에 위치한 섬유가 다른 두 섬유보다 더 빠른 속도 유동하였으며 유로 벽면에 근접한 섬유가 가장 느린 속도로 유동하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 6.3의 섬유 추적 결과를 통하여 확인하였다.

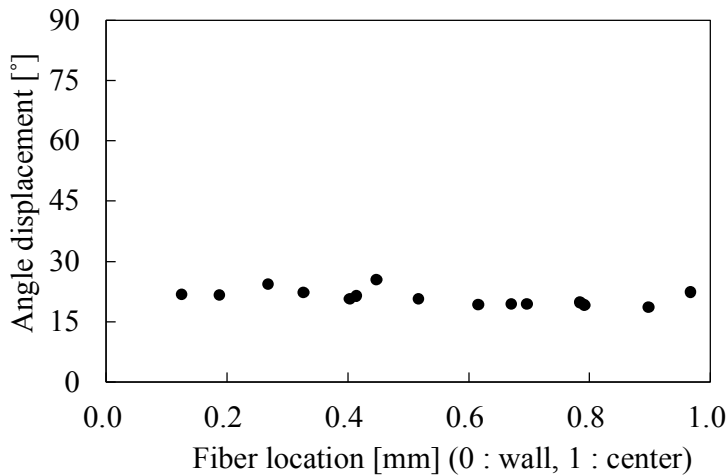


Fig. 6.4 Fiber angle displacement at the convex corner
(channel angle= 30°)

유로 각도 변화가 30° 인 부분에서 나타나는 섬유 정렬 변화는 Fig. 6.4 그래프로 정리하였다. Fig. 6.4는 분석 영역에서 서로 다른 위치에서 유동하는 섬유 15개를 추적하여 분석영역 통과 전후 변화한 섬유 정렬 각도를 나타낸 것이다. 이때 정렬 분석 영역은 Fig. 6.3 이미지 상의 노란 점선 사이로 한정하였다. 분

석대상이 된 15개의 섬유는 분석영역 통과 후 평균 21.07° 로 정렬되었다. 유로 각도를 고려한 분석영역 통과 전후 정렬 각도와 유로 각도의 차이는 평균 8.93° 로 나타났다.

이를 통하여 유로 각도가 30° 만큼 변화시키는 경우 섬유 정렬과 유동 경향에 미치는 영향이 미미한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 유로 각도가 30° 변화하는 유로는 유로 내부에서 발생하는 전단응력 차이나 속도 경계층이 평행유로와 별 차이가 없는 것을 Fig. 6.3을 통하여 확인하였다.

나. 45° 각도 유로

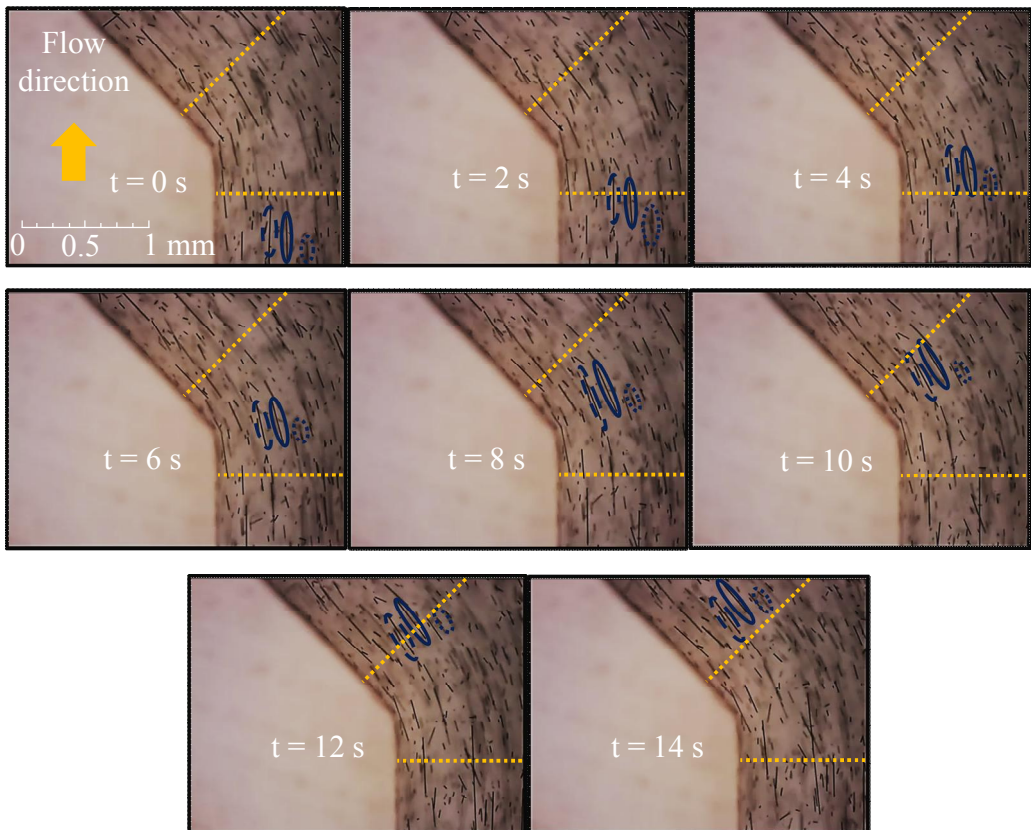


Fig. 6.5 Flow visualization at the convex corner (channel angle= 45°)

Fig. 6.5는 유로 각도 변화가 45° 인 부분에서 나타나는 섬유 정렬을 2초 간격으로 추적한 것이다. 30° 변화 유로와 마찬가지로 유로 중심부에서 유로 벽면 사이에 위치한 세 가지 섬유를 추적하였으며 Fig. 6.5 이미지 상에 파란 원으로 도시하였다. 세 가지 섬유 모두 최초 이미지 진입시 섬유 정렬을 유로 각도가 변화하는 부분에서도 유지하였다. 그러나 섬유 거동은 30° 변화 유로와는 달리 두 섬유 사이에 위치한 섬유가 가장 빠르게 이동하였다. 이러한 사항은 Fig. 6.5로 확인하였다.

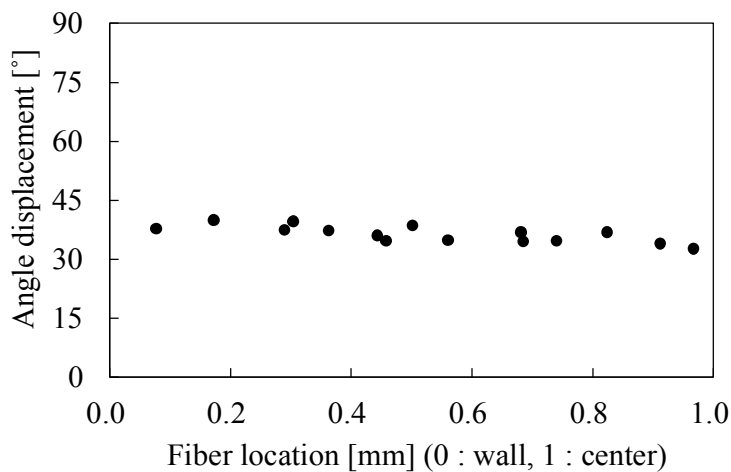


Fig. 6.6 Fiber angle displacement at the convex corner
 (channel angle= 45°)

Fig. 6.6은 유로 각도 변화가 45° 인 부분에서 나타나는 섬유 정렬 변화를 정리한 것이다. 분석 영역은 Fig. 4.16 이미지 상의 노란 점선 사이를 대상으로 하였다. 분석을 통해 서로 다른 위치에서 이동하는 15개 섬유가 분석영역 통과 전후 나타내는 정렬 각도를 계산했다. 분석영역 통과 전후 정렬 각도는 평균 36.37° 로 계산되었으며 유로 각도를 고려한 분석영역 통과 전후 정렬 각도와 유로 각도의 차이는 8.63° 로 나타났다.

유로 각도를 45° 만큼 변화시키는 경우에도 30° 변화 유로만큼이나 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 유로 각도가 45° 만큼 변화한 경우 나타나

는 정렬 각도가 8.63° 로 30° 변화 유로부터 0.3° 정도 더 감소한 정렬 각도를 나타내는 것으로 확인하였다. 그러나 30° 변화 유로와는 달리 유로 회전 곡률 반경이 작은 쪽에서 나타나는 섬유의 유동 속도가 더 빠른 것으로 나타났다. 이는 Fig. 6.5의 세 가지 섬유 유동을 추적하여 확인할 수 있었으며 이러한 섬유 유동 경향이 변화하는 이유는 유로 각도 변화에 의하여 유로 내부 속도 경계층 분포가 변화하였기 때문으로 보인다.

다. 60° 각도 유로

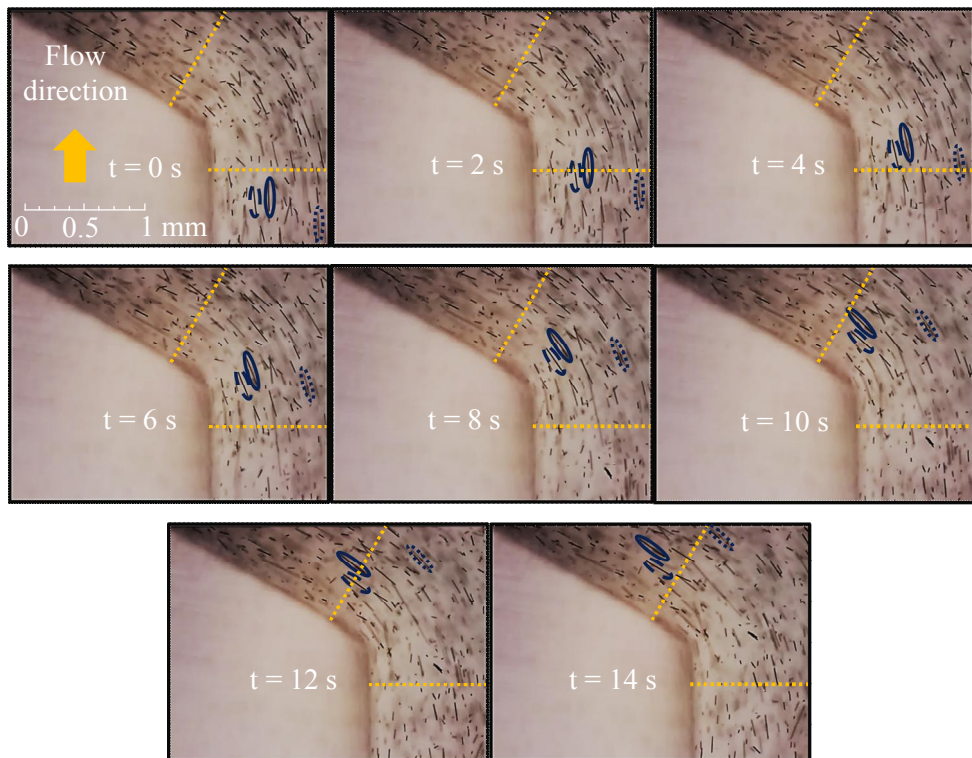


Fig. 6.7 Flow visualization at the convex corner (channel angle= 60°)

Fig. 6.7은 유로 각도 변화가 60° 인 부분에서 나타나는 섬유 정렬을 2초 간격으로 추적한 것이다. 다른 유로와 마찬가지로 세 가지 섬유를 분석하였으며 셋 모두 최초 이미지 진입 시 정렬 각도를 유로 각도가 변화하는 부분에서도 유

지하였다. 또한 45° 변화 유로와 마찬가지로 두 섬유 사이에 위치한 섬유가 가장 빠르게 이동하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 6.7의 세 가지 섬유의 정렬 추적을 통하여 확인하였다.

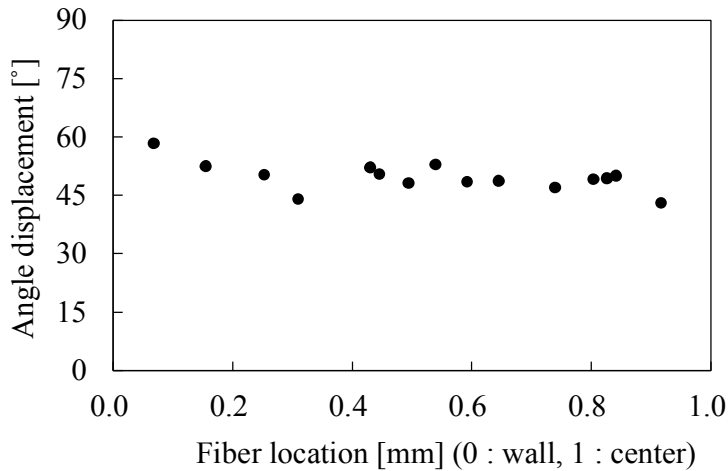


Fig. 6.8 Fiber angle displacement at the convex corner
 (channel angle=60°)

Fig. 6.8은 유로 각도 변화가 60° 인 부분에서 나타나는 섬유 정렬 변화를 정리한 것이다. 분석영역은 Fig. 6.8 이미지 상의 노란 점선으로 도시하였다. 분석은 서로 다른 위치에서 이동하는 15개 섬유를 사용하였으며 분석영역 통과 전후 정렬 각도는 평균 49.67° 로 나타났다. 또한 유로 각도를 고려한 분석영역 통과 전후 정렬 각도와 유로 각도의 차이는 10.33° 로 나타났다.

유로 각도를 60° 만큼 변화시키는 경우 발생하는 섬유 정렬 변화는 이전 두 가지 유로 각도 변화와는 달리 약 2° 정도 더 크게 변화하였으나 여전히 유로 각도와 유사한 방향으로 정렬되는 미미한 영향을 나타냈다. 유로 각도 60° 변화에서 나타나는 이동 경향은 이전 실험인 유로 각도 45° 와 마찬가지로 세 가지 섬유 중 두 섬유 사이에 위치한 섬유가 가장 빠르게 이동하는 경향을 나타냈다. 이 또한 유로 내부 속도 경계층 분포가 변화하였기 때문으로 보인다.

라. 90° 각도 유로

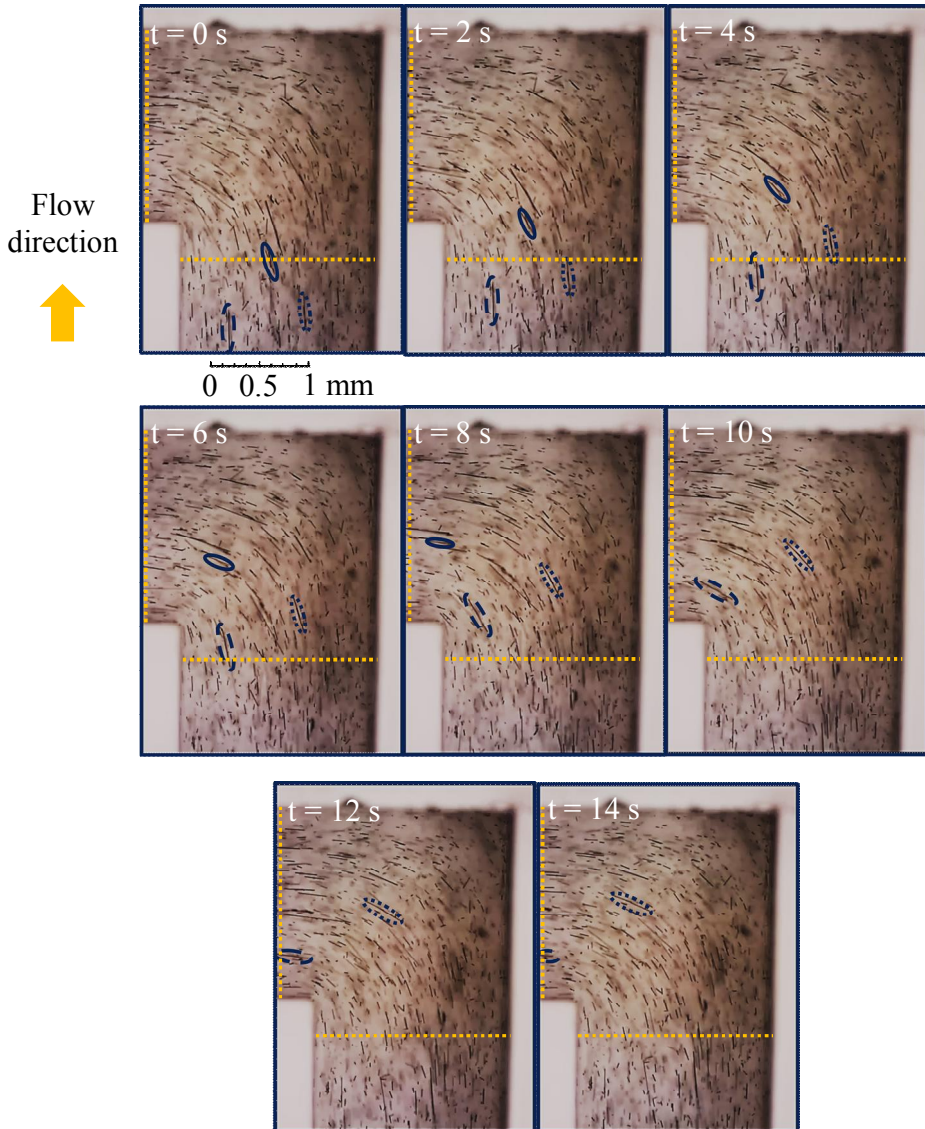


Fig. 6.9 Flow visualization at the convex corner (channel angle=90°)

Fig. 6.9는 유로 각도 변화가 수직인 부분의 섬유 정렬을 2초 간격으로 추적한 것이며 다른 유로와는 달리 유로 전체 영역을 촬영하였다. 유로 중심부와 벽

면에서 유동하는 세 가지 섬유를 선택하여 분석하였으며 각 섬유는 최초 이미지 정렬 각도를 유지하였다. 유동 속도의 경우 유로중심부에 위치한 섬유가 8초 만에 통과하여 가장 빠르게 유동하였으며 유로 회전 곡률 반경이 작은 쪽 벽면에 근접한 섬유가 10초 만에 통과하여 두 번째로 빠르게 유동하였다.

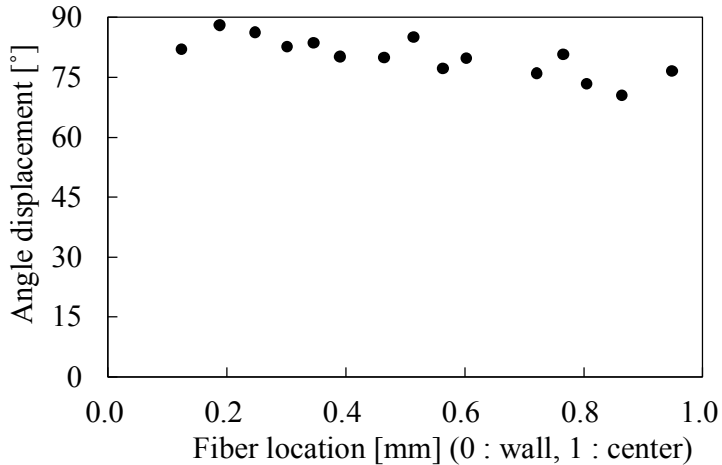


Fig. 6.10 Fiber angle displacement at the convex corner
 (channel angle=90°)

Fig. 6.10은 유로 각도 변화가 수직인 부분의 섬유 정렬 각도 변화를 정리한 것이다. 분석영역은 Fig. 6.10의 노란색 점선으로 도시하였다. 분석결과, 서로 다른 위치에서 나타나는 섬유 정렬 각도는 평균 80.16°로 나타났으며 정렬 각도와 유로 각도 차이는 9.84°로 나타났다.

유로 각도가 90°만큼 변화하는 경우에도 다른 세 가지 각도 변화 유로와 마찬가지로 섬유 정렬에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다. 특히 유로 각도 60° 변화 유로보다 0.49°만큼 더 작은 정렬 각도로 변화하는 것을 통하여 유로 각도에 의한 섬유 정렬은 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있었다. 유로 각도가 90° 변화하는 경우 나타나는 유동 경향은 속도 경계층 분포 변화의 영향으로 유로 회전 곡률 반경이 작은 쪽에 근접한 섬유가 매우 빠르게 유동하는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 서로 다른 유로 각도를 갖는 금형을 사용하였을 때 발생하는 섬유 정렬을 분석한 결과, 섬유 정렬 각도는 최초 정렬 각도에서 유로 각도와 최소 8.63° 에서 최대 10.33° 정도 차이가 나는 각도로 변화하였다. 이러한 분석결과는 유로 각도를 다양하게 변화시키더라도 유로 내부에서 유동하는 섬유 정렬은 평균 9.51° 밖에 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 섬유의 유동 경향은 정렬 각도와는 달리 유로 각도 변화에 영향을 받았으며 이는 유로 내부에서 발생하는 속도 경계층 분포가 유로 각도 변화에 맞춰 변화하였기 때문으로 보인다.

이 같은 실험 결과를 통하여 각도 변화에 의한 섬유 정렬 변화보다 더 큰 변화를 줄 수 있는 오리피스 유로에 대한 유동가시화 분석을 진행하였다. 본 장의 분석결과는 Table 6.1로 정리하였다.

Table 6.1 Fiber alignment and displacement at convex corner

Channel angle	Alignment angle [°]	Alignment displacement difference [°]
30 °	21.07	8.93
45 °	36.37	8.63
60 °	49.67	10.33
90 °	80.16	9.84
Average	-	9.51

제 7 장 오리피스 유로 내부 유동가시화 실험 및 분석

이 장의 일부는 각각 제목: Image processing of additive alignment inside a polydimethylsiloxane and carbon fiber mixture flow로 대한기계학회논문집 B에, 제목: 유동가시화를 통한 섬유형 첨가제 함유 액상 폴리머의 금형내 유동 모사로 한국복합재료학회지에 투고하였습니다.

제 1 절 오리피스 유로

1. 유동가시화 실험장치 및 방법

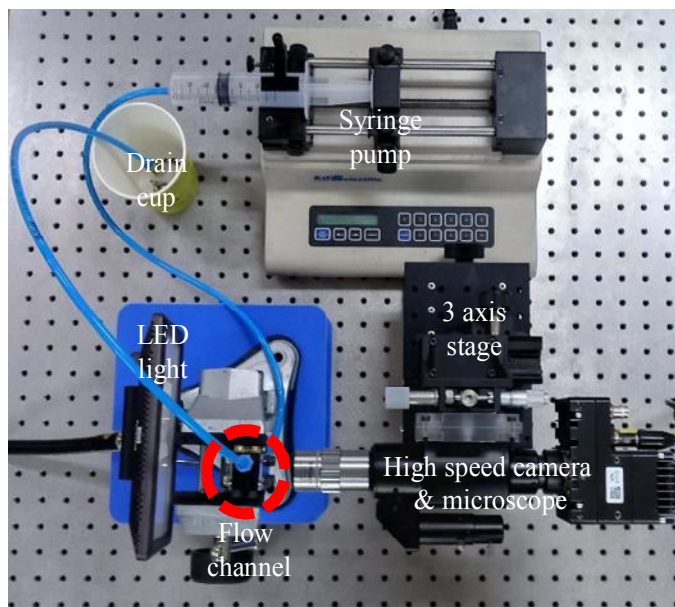


Fig. 7.1 Experimental device setup of flow visualization for orifice channel

오리피스 유로 유동가시화 실험을 위하여 Fig. 7.1과 같은 실험장치를 새롭게 구성하였다. 실험을 위하여 오리피스 유로가 모사된 금형을 새롭게 제작하였으며 혼합물 유동을 더 정확하게 촬영할 수 있도록 초고속 카메라와 대물렌즈를 실험 장치에 새롭게 구성하였다. 또한 정확한 x, y방향 거리를 조정할 수 있도록 기존의 2축 스테이지를 3축 스테이지로 교체하였다. 단, 조명과 주사기 펌프는 이전 3D 프린터 금형과 아크릴 금형 실험에서 사용한 것과 동일한 것을 사용하였다.

가. 유동가시화 금형

오리피스 유로 내부에서 발생하는 첨가제 섬유 정렬은 금형 내부에 오리피스를 모사한 금형을 제작하여 가시화하였다. 금형 내부에 모사한 오리피스 유로는 오리피스 부분과 유로 확장부간의 유로 두께차이가 10배인 직사각형 단면 유로를 가지며 유로의 정확한 치수는 Table 7.1로 정리하였다. 또한 오리피스 유로 후방에서 나타나는 첨가제 정렬을 분석하기 위하여 오리피스를 비대칭하게 배치하였다. 금형은 알루미늄 재질로 제작하였으며 Fig. 7.2와 같이 조립하여 유로 내부에서 발생하는 첨가제 정렬을 유동가시화 하였다. 실험에 사용한 아크릴 관측창은 내부가 비치는 두께 2 mm의 투명한 아크릴판으로 제작되었으며 조립부에서 발생하는 누수를 방지하기 위해 볼트와 너트로 관통 체결하여 조립하였다.

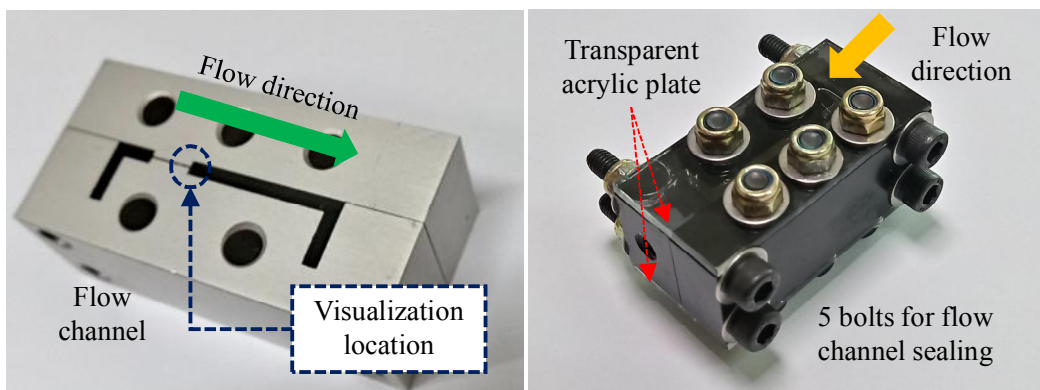


Fig. 7.2 Orifice channel mold and mold combination of orifice channel mold and transparent acrylic window

Table 7.1 Specification of orifice channel mold

	information	
Mold	Mold size [mm ³]	54(W) x 20(D) x 27(H)
	Orifice channel size [mm]	0.19(H) x 20(D)
	Expanded channel size [mm]	0.5(H) x 20(D)
	Material	Aluminum

나. 초고속 카메라

오리피스 유로 내부에서 발생하는 첨가제 정렬 경향을 분석하기 위하여 초고속 카메라(MIRO C110, Phantom)를 사용하였다. 초고속 카메라는 일반적인 경우 60 fps, 좀 더 자세한 분석이 필요한 경우 600 fps로 촬영을 실시하였다. 촬영된 이미지는 각도 분석 코드를 사용하여 분석하였다. 촬상면은 금형과 아크릴판이 부착되는 부분에서 1 mm만큼 유로 안쪽으로 들어간 위치이다. Fig. 7.3은 본 연구에서 사용한 초고속 카메라이며 자세한 제원은 Table 7.2로 정리하였다.



Fig. 7.3 High speed camera(Miro C110, Mitutoyo corp)

Table 7.2 Specification of high speed camera

		information
Miro C110	Product resolution	1.3 Mpx resolution 12bit (1,280 x 1,024)
	Magnification	2x with M plan APO 2x lens(Mitutoyo corp)
	Frame rate [fps]	915 at 1,280 x 1,024 1,295 at 1,280 x 720 52,445 at smaller resolution
	Unit dimension [cm]	7.168(H) x 5.734(D)

Sources: For additional information, see Phantom C110 (2017).

다. 대물렌즈

오리피스 유로에서 나타나는 첨가제 정렬을 자세히 분석하기 위하여 2배율 대물렌즈(M plan APO, Mitutoyo corp)를 사용하였다. 대물렌즈는 초고속 카메라와 현미경을 사용하여 연결하였으며 유로 내부에서 발생하는 첨가제 정렬을 확대하여 가시화하는데 사용하였다. 실험에 사용한 2배율 대물렌즈의 자세한 제원은 Table 7.3으로 정리하였다.



Fig. 7.4 2X magnification lens(M plan APO 2X, Mitutoyo corp)

Table 7.3 Specification of 2X magnification lens

	information	
M plan APO 2X lens	Magnification	2X
	W.D. [mm]	34.0
	FOV [mm]	2.34 X 3.2 at 1/2 " camera
	Focal depth [mm]	100 at $\lambda=550$ nm

Sources: For additional information, see M plan Apo / M plan Apo HR (2008).

라. 주사기 펌프

주사기 펌프 이송 속도는 유로 두께 2 mm에서 $Re=0.0010$ 이 되는 속도인 2.243 ml/min을 사용하였다. 이는 오리피스 통과 후 유로가 확장되는 부분에서 Re 가 0.001이 되는 이송 속도이며 꺾인 유로 실험과 동일한 이송 속도이다. 오리피스 유로 금형에 모사한 유로 형상이 이전 실험들과 동일한 20 mm X 2.0 mm 크기 직사각형 단면이기 때문에 오리피스 유로 유동가시화 실험에서는 이전 실험과 동일한 이송 속도로 실험을 진행하였다.

마. 유동가시화 혼합물

유동가시화를 위하여 PDMS와 탄소성유 혼합물을 사용하였다. PDMS와 탄소성유는 이전 3D 프린터 및 아크릴 금형에서 사용한 것과 동일한 제품을 사용하였다. 단, 탄소성유 길이를 일정하게 유지하기 위하여 체눈 크기가 63~106 μm 인 표준체를 사용하여 탄소성유를 분리하였다. 또한 PDMS와 탄소성유 혼합물 농도는 질량비 기준 0.03%로 조정하여 실험에 사용하였다. 이는 대물렌즈를 사용하여 촬영한 경우 3D 프린터 및 아크릴 금형 실험과는 달리 이미지 내부의 탄소성유가 과밀집 상태로 촬영되어 코드를 사용한 분석이 곤란했기 때문이다.

2. 오리피스 유로 실험 결과

오리피스 유로에서 발생한 섬유형 첨가제 정렬은 오리피스 통과 후 유로 출구 방향으로 약 3 mm를 이동할 때까지 촬영한 이미지를 4장의 각도 분석 코드를 사용하여 분석하였다.

가. 유로 내부 위치별 섬유 정렬

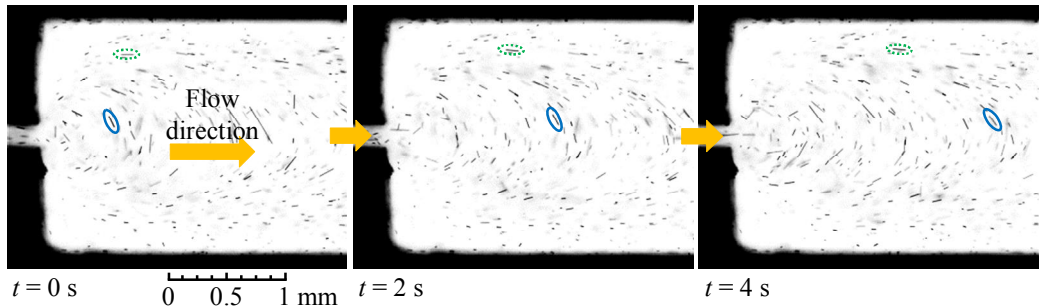


Fig. 7.5 Sequential flow visualization images taken in 2 s interval for PDMS and carbon fiber Mixture flow inside the orifice channel

Fig. 7.5는 유로 내부 위치에 따른 섬유 정렬 경향을 확인하기 위하여 유로의 서로 다른 부분에 위치한 섬유를 2초 간격으로 추적하여 도시한 것이다. Fig. 7.5에서 점선으로 표시된 부분은 유로 벽면부에서 이동하는 섬유를 나타낸 것이며 실선으로 표시된 부분은 유로 중심부에서 이동하는 섬유를 나타낸 것이다. 두 섬유 모두 2초 간격으로 섬유 정렬을 추적하였으며 추적한 섬유의 이동 속도는 유로 벽면부 섬유가 0.15 mm/s, 유로 중심부 섬유가 0.36 mm/s로 유로 중심부가 유로 벽면부 보다 더 빠르게 이동하였다. Fig. 7.5의 두 섬유는 오리피스 출구에서 유로 출구 방향으로 이동하는 도중 섬유 정렬 변화를 나타냈다. 두 섬유의 정렬 변화는 유로 벽면부 섬유가 평균 1.49 degree/s, 유로 중심부 섬유가 3.85 degree/s로 유로 중심부가 유로 벽면부보다 더 작은 정렬 변화를 나타냈다. 이 외에도 추적한 두 섬유의 섬유 정렬뿐만 아니라 이미지 내부에 촬영된

섬유들의 정렬 경향도 확인하였다. 오리피스 통과 후 유로 전단응력 분포를 도시한 Fig. 3.4와 마찬가지로 오리피스 통과 후 동심원 형상의 섬유 정렬을 나타냈으며 유로 벽면부에 위치한 섬유는 동 방향으로 정렬되는 경향을 나타냈다.

이를 미루어 보아 오리피스 유로 내부에서 나타나는 섬유 정렬은 5장의 평행 유로 실험 결과와 마찬가지로 유로 내부에서 발생하는 전단응력 변화에 영향을 받는 것으로 보인다. 이는 유로 내부 위치에 따라서 서로 다른 정렬 경향과 유동 속도를 나타내는 것과 3장의 전단응력 분포와 유사한 섬유 정렬 경향이 나타나는 것으로 확인할 수 있었다.

나. 섬유 정렬 분포

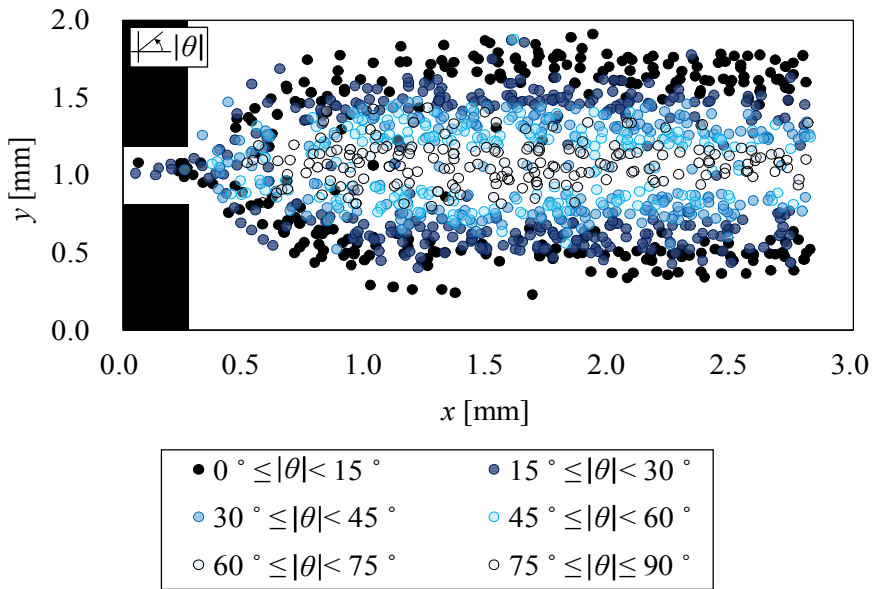
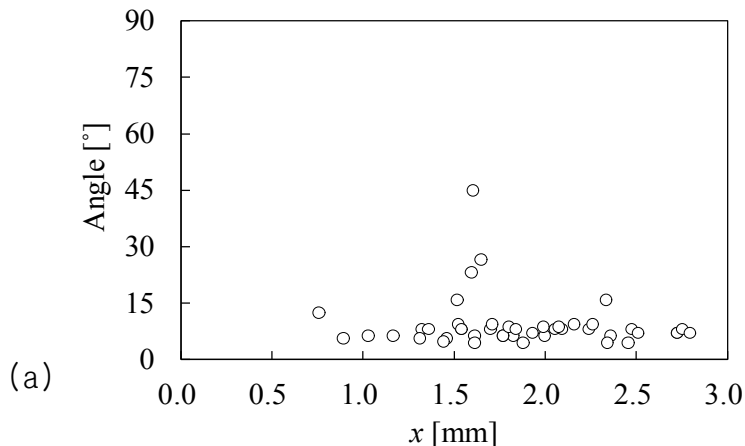


Fig. 7.6 Fiber alignment angle distribution depending on the location inside the flow channel

Fig. 7.6은 오리피스 유로를 통과한 후 나타나는 섬유 정렬 경향을 각도 분석 코드로 분석한 결과를 도시한 그래프이다. Fig. 7.6은 촬영한 이미지 8210개

중 0.5초 간격으로 41초간 정리한 82개 이미지, 1295개의 섬유를 분석한 결과를 도시한 그래프이며, 분석한 모든 섬유의 정렬 각도와 위치는 점으로 도시하였다. 각 섬유에 대한 데이터는 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 사이의 각도를 15° 간격으로 6등분하여 도시하였으며, 섬유 정렬 각도가 유동방향인 0° 에 가까운 경우 명도가 밝은 색으로, 유동방향과 수직인 90° 에 가까울수록 명도가 어두운 색으로 도시하였다. 유로벽면부에서 유동하는 대다수 섬유는 유동방향과 유사한 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 이내의 정렬 각도를 나타냈으며 섬유간 정렬 각도 편차 또한 작게 나타났다. 하지만, 유로 중심부에서 유동하는 섬유는 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 사이의 무작위한 정렬 각도를 나타냈으며 섬유간 각도 편차도 유로 벽면부에 비하여 크게 나타났다. 그러나 Fig. 7.6은 Fig. 3.4와 Fig. 7.5와 같은 동심원 형상의 퍼져나가는 섬유 정렬이 아닌 종 형상의 섬유 정렬을 보여주었다. 이는 촬영한 이미지 내부에 존재하는 모든 섬유를 분석하지 않고 일부 섬유만을 추출하여 분석한 것과 서로 다른 시간에서 촬영된 섬유를 같은 위치좌표에 표시하였기 때문이다.

또한 Fig. 7.6에서 나타난 섬유 정렬은 유로 내부의 y 위치에 따라 서로 다른 정렬 경향을 나타냈다. 이러한 유로 내부 y 위치에 따른 섬유 정렬 분포는 유로 상부를 세 부분으로 나누어 Fig. 7.7로 도시하였다.



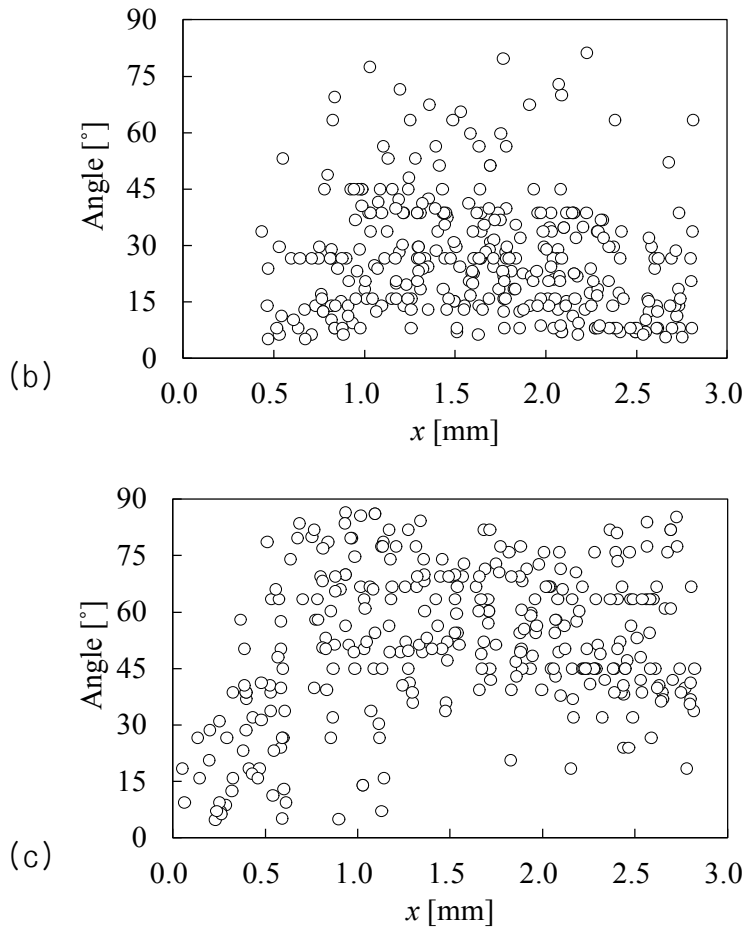


Fig. 7.7 Fiber alignment distribution at (a) $1.7 \text{ mm} \leq y \leq 2.0 \text{ mm}$, (b) $1.3 \text{ mm} \leq y < 1.7 \text{ mm}$ and (c) $1 \text{ mm} \leq y < 3 \text{ mm}$

Fig. 7.7은 Fig. 7.6을 y 축 기준으로 $1 \text{ mm} \leq y < 1.3 \text{ mm}$, $1.3 \text{ mm} \leq y < 1.7 \text{ mm}$, $1.7 \text{ mm} \leq y \leq 2.0 \text{ mm}$ 로 구분하여 해당 부분에 위치하는 섬유 정렬 각도와 x 위치 데이터를 개별 그래프로 도시한 것이다. Fig. 7.7(a)는 유로 벽면부의 섬유 정렬 각도를 도시한 그래프이며 대다수 섬유가 유동방향과 유사한 $0^\circ \sim 15^\circ$ 이내의 정렬 각도를 나타냈다. 유로 벽면부에 위치한 섬유의 평균 정렬 각도는 9.30° 이며 각도 편차가 유로의 다른 부분에 비하여 작게 나타났다. Fig. 7.7(b)는 유로 벽면과 유로 중심부 사이에 위치한 섬유 정렬 각도를 도시한 그래프이며 대다수

섬유가 $0^\circ \sim 45^\circ$ 이내의 정렬 각도를 나타냈다. 유로 벽면인 Fig. 7.7(a)에 비하여 평균 정렬 각도가 26.58° 로 증가하였으며 각도 편차 또한 증가하였다. Fig. 7.7(c)는 유로 중심부에 위치한 섬유 정렬 각도를 도시한 그래프이다. $x=0.5$ mm 이하에서는 $0^\circ \sim 45^\circ$ 이내의 정렬 각도를 나타냈으나 $x=0.5$ mm 이후에는 대다수 섬유가 $45^\circ \sim 90^\circ$ 사이의 무작위한 정렬 각도를 나타냈다. 평균 정렬 각도는 51.89° 로 다른 두 부분보다 증가한 평균정렬 각도를 나타냈다.

유로 벽면인 Fig. 7.7(a)와 유로 중심부인 Fig. 7.7(c)를 통하여 유로 내부에서 발생하는 전단응력 차이가 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 이렇게 유로 내부 위치에 따라서 전혀 다른 섬유 정렬을 보이는 이유는 이전 실험과 마찬가지로 전단응력 차이가 변화하여 나타나는 현상으로 보인다.

다. 섬유 정렬 각도 비교

Fig. 7.7로 정리한 섬유 정렬 분석 결과는 3장의 전산유체해석 결과와 비교하여 전산유체해석의 타당성을 검증하였다. 이를 위하여 Fig. 3.2의 Fiber 1~4와 그와 유사한 부분에 위치한 섬유간 정렬 각도 비교 결과를 Fig. 7.8, Fig. 7.9, Fig 7.10으로 도시하였다. 각각의 그래프는 전산유체해석으로 해석한 정렬 각도는 실선으로 도시하였으며 실제 섬유 정렬 각도는 둥근 점으로 도시하였다. 정렬 각도 비교는 오리피스 통과 직후인 $x=0.5$ mm부터 1.5 mm를 진행한 $x= 2.0$ mm까지 진행하였으며 정렬 각도 비교를 위하여 Fig. 3.2와 마찬가지로 실제 섬유 각도를 $0^\circ \sim 180^\circ$ 기준으로 정리하였다. 또한 그래프의 섬유 각도는 3시 방향을 기준으로 반시계방향으로 회전하는 방향을 양의 방향으로 삼아 도시하였다.

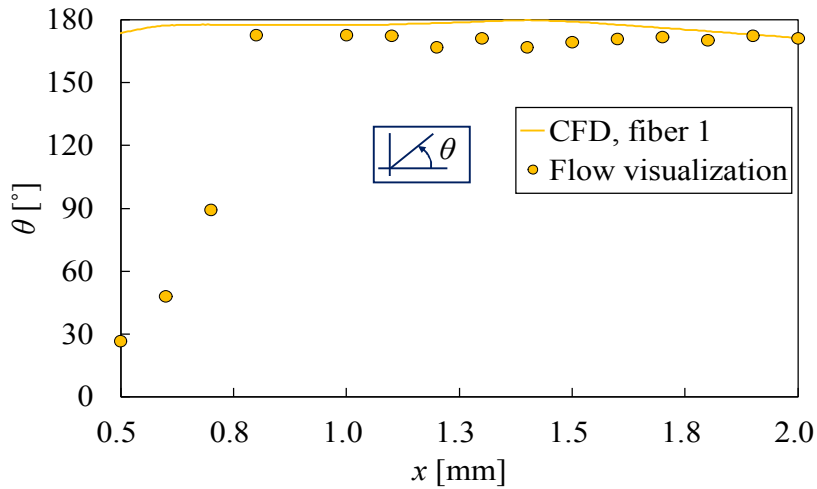


Fig. 7.8 Fiber alignment angle of fiber 1

Fig. 7.8은 유로 중심선에서 0.0625 mm만큼 떨어진 섬유인 Fiber 1과 그와 유사한 경로를 따라 이동하는 실제 섬유의 정렬을 비교한 것이다. 두 섬유는 오리피스 통과 직후 $0.05 \text{ mm} < x < 0.08 \text{ mm}$ 범위에서는 상이한 정렬 각도를 나타냈으나 $x=0.8 \text{ mm}$ 이후로는 유사한 정렬 각도를 나타냈다. 이러한 상이한 정렬 각도는 전산유체해석이 2차원에서 진행되어 발생한 것으로 보인다. 실제 섬유는 3차원 유로 내부에서 이동하였으며 아크릴 관측창에서 1 mm 안쪽 영역을 촬영하였기 때문에 전산유체해석보다 약간 느린 속도로 이동하였다. 따라서 전산유체해석에서 나타난 섬유 정렬이 이동가시화 실험에서 촬영한 섬유보다 빠른 속도로 정렬되는 것은 정상적인 현상이다.

또한 두 섬유는 이동이 진행될수록 이동방향으로 정렬되는 경향을 나타냈으며 $x=0.8 \text{ mm}$ 이후에는 Fiber 1이 2.51° , 실제 섬유가 8.60° 정도의 섬유 정렬 각도 변화를 나타냈다. 이는 $x=0.8 \text{ mm}$ 이후 유로 벽면에서 나타나는 강한 전단 응력 차이가 섬유에 영향을 미쳤기 때문이다. 따라서 $x=0.8 \text{ mm}$ 이후 두 섬유의 정렬 각도 변화가 10° 미만으로 나타났으며 유로 벽면에 근접하여 이동한 결과 평균 정렬 각도가 Fiber 1은 176.75° , 실제 섬유는 170.79° 로 이동방향과 유사한 방향으로 나타난 것으로 보인다.

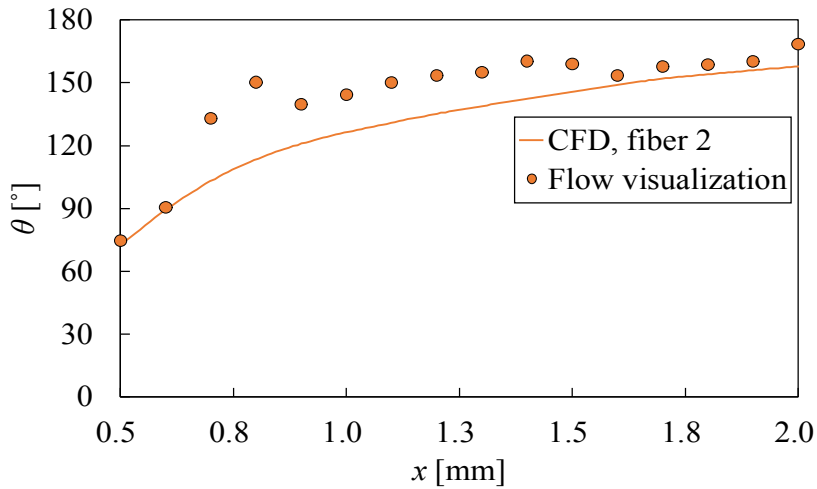


Fig. 7.9 Fiber alignment angle of fiber 2

Fig. 7.9는 유로 중심선에서 0.0425 mm만큼 떨어진 섬유인 Fiber 2와 그와 유사한 경로로 이동하는 실제 섬유 정렬 각도와 비교한 그래프이다. Fiber 2는 $x=0.6$ mm에서 유동방향과 수직인 방향인 90° 로 정렬되었으며 이후 지속적으로 정렬 각도가 변화하였다. 그러나 이러한 정렬 각도 변화는 $x=0.8$ mm 이후 변화 폭이 점차 감소하는 경향을 나타냈다. Fiber 2와 유사한 경로로 이동한 실제 섬유도 이와 유사한 정렬 경향을 나타냈다. 실제 섬유는 오리피스를 통과한 직후인 $x=0.5$ mm부터 정렬 각도가 점차 증가한 후 $x=0.8$ mm부터 정렬 각도 증가가 둔화되는 경향을 보였다. 또한 각각의 섬유는 이미지에서 사라질 때까지 Fiber 2가 79.99° , 실제 섬유가 97.89° 만큼의 정렬 각도 변화를 나타냈다.

Fig. 7.9에서 비교한 두 섬유는 Fig. 7.8과는 달리 $0.05 \text{ mm} < x < 0.08 \text{ mm}$ 범위에서도 매우 유사한 섬유 정렬을 나타냈는데 이는 Fig. 7.8의 두 섬유보다 유로 중심에 0.02 mm 더 근접한 부분에서 유동한 영향으로 보인다. Fig. 7.8은 유로 벽면에 근접하기이기 때문에 2차원, 3차원에 따른 전단응력 차이가 크게 영향을 받겠지만, Fig. 7.9는 유로 중심방향으로 0.02 mm 더 근접한 부분에서 이동하기 때문에 전단응력 차이에 의한 영향이 더 적기 때문이다.

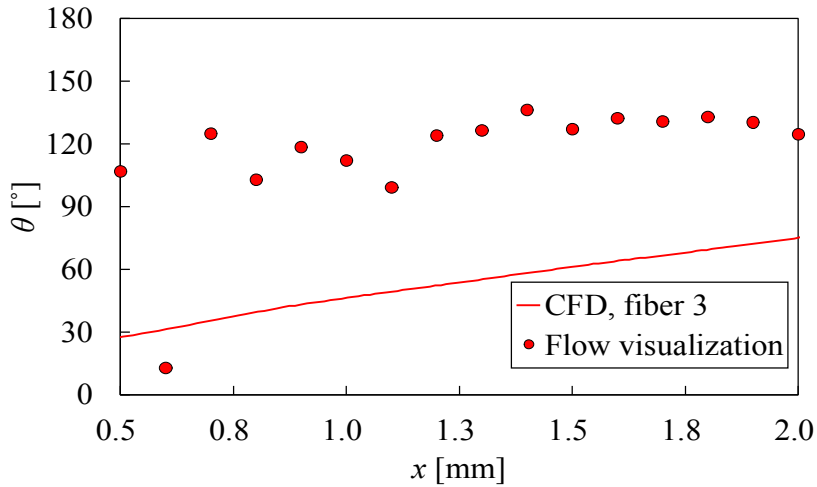


Fig. 7.10 Fiber alignment angle of fiber 3

Fig. 7.10은 유로 중심선에서 0.0225만큼 떨어진 Fiber 3의 정렬 각도를 그와 유사한 경로로 이동하는 실제 섬유 정렬 각도와 비교한 그래프이다. Fiber 3과 실제 섬유는 Fiber 1, Fiber 2와는 다르게 실제 섬유와 상이한 정렬 경향을 나타냈다. Fiber 3은 오리피스 통과 후 48.92°의 정렬 각도 변화를 나타내면서 완만한 정렬 각도 증가를 보였다. 반면, 그와 유사한 경로를 이동한 실제 섬유는 $x=0.6$ mm에서 93.73° 정도의 급격한 정렬 각도 변화를 나타낸 후 $x=1.2$ mm부터 28.50° 정도의 각도 변화를 나타내면서 유동하였다.

이러한 두 섬유의 섬유 정렬 차이는 Fig. 7.10의 두 섬유가 유로 중심부에 근접하여 유동하는 것과 전산유체해석에서 단일 섬유를 해석하였기 때문으로 보인다. 유로 중심부에서는 속도 경계층 성장으로 인해 유로 벽면보다 낮은 전단 응력 차이를 나타내며 여기서 유동하는 섬유는 무작위한 정렬 각도를 나타내게 된다. 이는 Fig. 7.6과 Fig. 7.7(c)를 통하여 확인할 수 있는데 실제로 유로 중심부를 유동하는 섬유는 45°~90° 이내의 무작위한 정렬 각도를 나타내는 결과를 나타냈다. 따라서 Fiber 3의 정렬 각도는 해당 유동역역에서 나타나는 일부 섬유의 정렬만을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

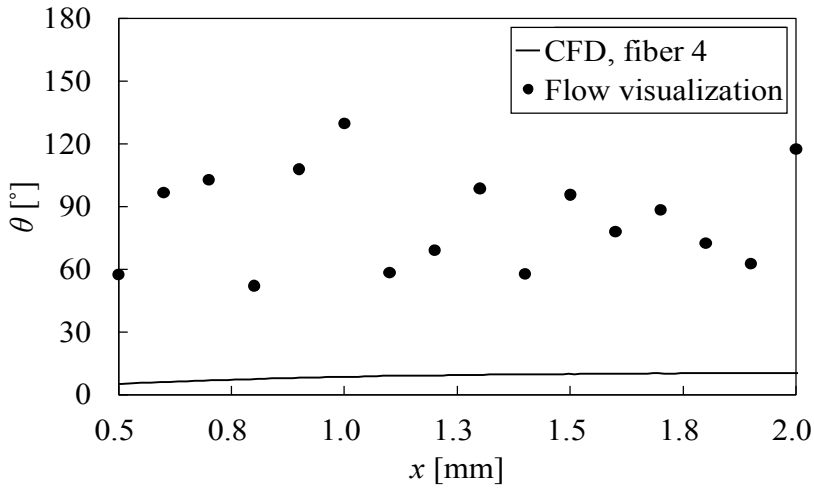


Fig. 7.11 Fiber alignment angle of fiber 4

Fig. 7.11은 유로 중심선에서 0.0025 mm만큼 떨어진 Fiber 4와 그와 유사한 경로를 이동하는 실제 섬유 정렬 각도를 비교한 그래프이다. Fiber 3과 마찬가지로 Fig. 7.8, Fig. 7.9와는 달리 해석과 실제 정렬 각도가 상이한 결과를 나타냈다. Fiber 4는 오리피스 통과 후 이미지에서 사라질 때까지 5.13°의 정렬 각도 변화를 나타냈으며 거의 일정한 정렬 각도를 나타냈다. 그러나 실제 섬유는 오리피스 통과 후 이미지에서 사라질 때까지 78.25°의 정렬 각도 변화를 나타냈으며 Fiber 4에 비하여 무작위한 정렬 각도를 나타냈다.

Fig. 7.11의 두 섬유간 정렬 각도 차이도 Fig. 7.10과 마찬가지로 유로 중심부를 유동하기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 유로 중심부를 유동하는 섬유는 유로 중심부의 전단응력 차이가 벽면보다 낮게 나타나기 때문에 무작위한 섬유 정렬을 나타내기 때문이다. 이러한 섬유 정렬현상은 Fig. 7.5와 Fig. 7.7(c)를 통하여 확인할 수 있었다.

라. 평균 섬유 정렬 각도 및 표준편차

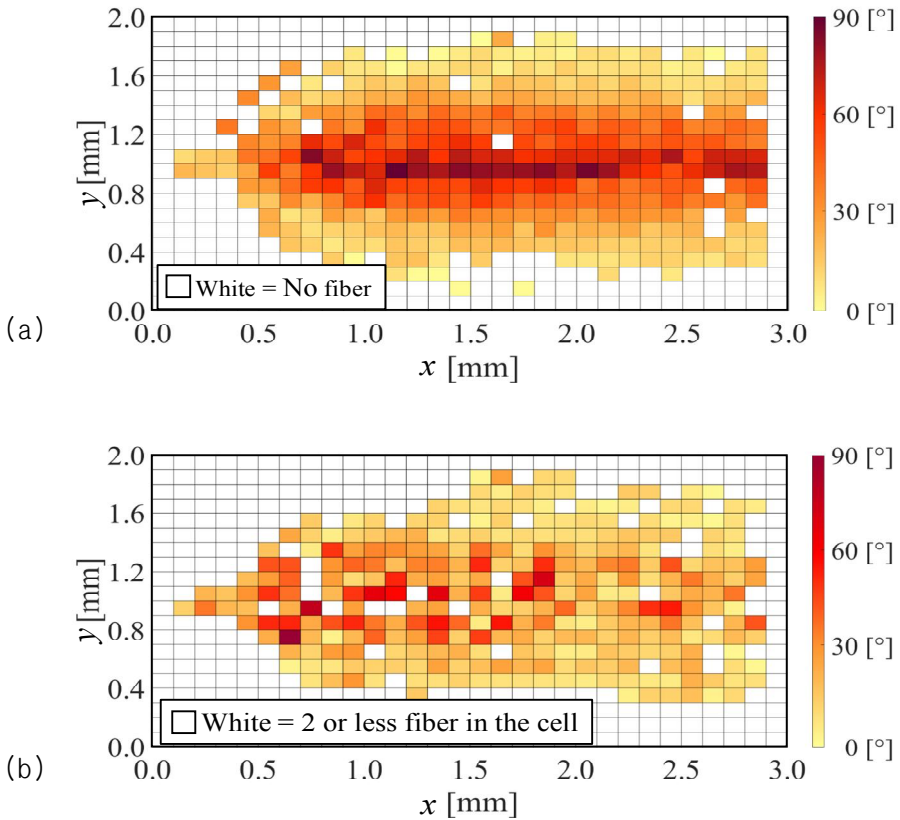


Fig. 7.12 Analysis of fiber angles within $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ cells by (a) average value and (b) standard deviation value

Fig. 7.12는 Fig. 7.6에서 분석한 1295개의 섬유를 0.1 mm^2 로 분할한 격자 평면에 배치한 후, 각각의 격자에 배치한 섬유들의 평균 정렬 각도와 표준편차를 도시한 그래프이다. 각도 표시의 편의성을 위하여 $0^\circ \sim 90^\circ$ 기준으로 정리하였다. 각각의 그래프에서 하얀색으로 표시된 부분은 섬유 데이터가 없는 부분을 나타내며 평균 정렬 각도가 유동 방향과 수직인 방향인 90° 와 유사한 경우 어두운 색으로, 유동방향과 유사한 방향인 0° 인 경우 밝은 색으로 도시하였다. 분석에서

발생하는 오차를 줄이기 위하여 0.05 mm 미만에서 0.20 mm 사이에 해당하는 길이를 가진 섬유만을 사용하였다. 이는 길이가 0.05 mm미만인 섬유의 경우 원형 혹은 사각형으로 인식되어 오차를 증가시키기 때문이며 0.20 mm 이상인 경우에는 여러 섬유가 겹쳐있는 섬유 뭉치로 인식하여 제거하였기 때문이다. 정렬 각도 평균과 표준편차 계산을 위해 사용한 섬유 정렬 각도 길이는 Fig. 7.13으로 도시하였다.

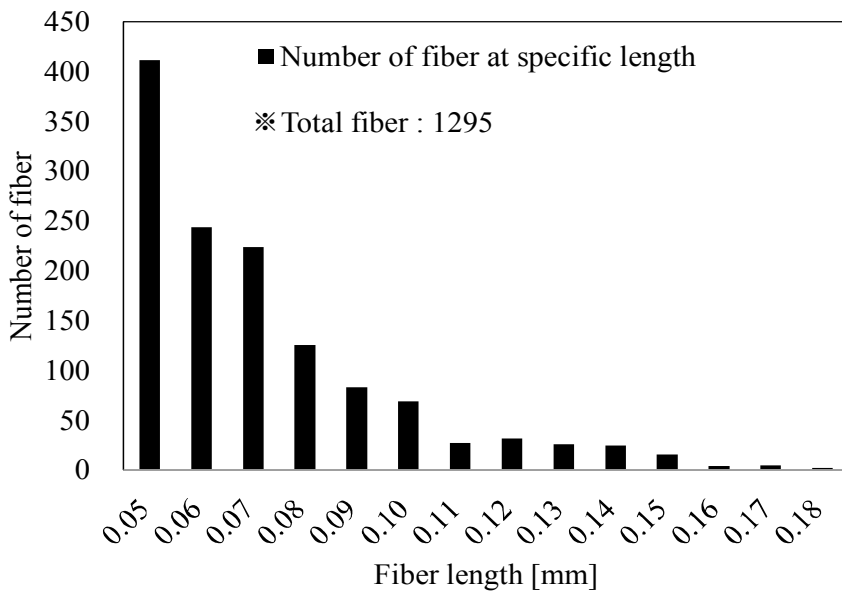


Fig. 7.13 Distribution of analyzed fiber length

Fig. 7.12(a)는 격자에 배치한 섬유의 평균 정렬 각도를 도시한 그래프이며 오리피스 유로 출구 부분인 $x=0.3$ mm부터 정렬 각도가 변화하기 시작하였다. 이후 $0.3 \text{ mm} < x < 0.7 \text{ mm}$ 에서는 $14^\circ \sim 51^\circ$ 사이의 각도를 평균적으로 나타냈다. 섬유가 $x=0.7$ mm를 지난 후에는 유동 방향과 수직인 90° 와 가까운 정렬 각도를 나타내기 시작하였으며 $x=0.7$ mm에서 정렬된 각도는 유동을 따라 이동하면서 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 유로 y 위치에 따른 각도 정렬의 경우, 유로 벽면부에서는 $x=0.7$ mm 이후 유동방향과 유사한 $0^\circ \sim 30^\circ$ 각도를 나타내는 노란색 격자가 주로 나타났다. 반면, 유로 벽면부에서 유로 중심부로 이동할수록 정렬 각

도가 90° 에 근접한 각도로 변화하였다. 또한 유로 출구방향으로 이동할 수록 정렬 각도가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7.12(b)는 분석한 1295개 섬유 의 표준편차 그래프이다. 오리피스 유로 실험에서 나타난 섬유 각도는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 사이의 각도를 나타냈으며 측정 오차는 약 3° 이므로 표준편차가 특정 위치에 존재하는 섬유 각도 분산을 대변한다고 판단하였다. 그래프에 도시한 표준편차는 Fig. 7.6에서 나타난 정렬 각도 분포와 유사한 분포를 나타냈으며 유로 벽면부에 위치한 격자는 낮은 표준편차를, 유로 중심부로 이동할수록 표준편차가 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, $x=2.0$ mm 이후 나타나는 각도 표준편차는 유로 벽면과 유로 중심부가 큰 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있었다.

이렇듯 Fig. 7.12로 도시한 그래프를 통하여 오리피스 통과 후 발생하는 섬유 정렬이 전단응력 차이에 의해 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 유로 벽면부에 위치한 섬유가 유로 벽면의 강한 전단응력 차이로 인하여 낮은 정렬 각도와 낮은 표준편차를 나타내는 것과 유로 중심부로 갈수록 전단응력 차이가 감소하여 정렬 각도와 표준편차가 증가하는 것으로 확인할 수 있었다. 또한 오리피스 통과 후 발생하는 섬유 정렬이 Fig. 3.4와 같은 확장 전단응력에 의한 영향임을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 7.12에 도시한 정렬 각도와 표준편차가 오리피스 통과 직후인 $0.3 \text{ mm} < x < 0.7 \text{ mm}$ 사이 영역에서 Fig. 3.4와 Fig. 7.5와 같은 동심원 형상을 나타내는 것으로 확인하였다.

제 2 절 두께 변화 오리피스 유로

1. 유동가시화 실험장치 및 방법

유로 두께에 따른 오리피스 내부 섬유 정렬 경향 분석을 위하여 유로 두께를 변형한 새로운 금형으로 유동가시화를 진행하였다. 본 절에서 진행한 실험에서는 7장 1절에서 사용한 실험장치 구성에서 유로 두께 변형 금형과 좁은 유로 촬영을 위하여 배율을 확대한 대물렌즈만을 변경하여 사용하였다.

가. 유동가시화 금형

유로 두께가 변화하는 경우 나타나는 섬유 정렬 변화를 확인하기 위하여 7장 1절에서 사용한 금형을 기반으로 변형한 새로운 금형을 제작하였다. 새로운 금형은 Fig. 7.14에 정리하였으며 금형과 유로의 자세한 치수는 Table 7.5로 정리하였다.

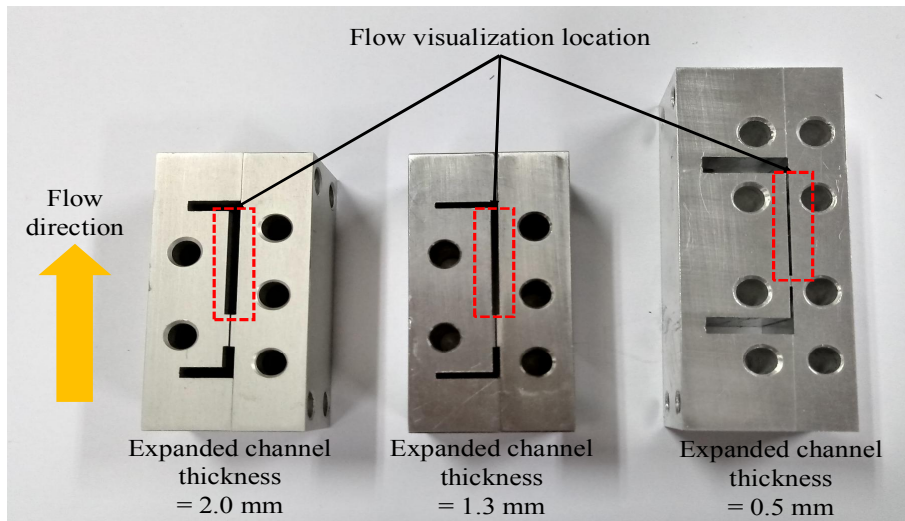


Fig. 7.14 Orifice channel mold depending on the thickness of the expanded channel

Table 7.4 Specification of orifice channel mold

	information	
Mold	Mold size [mm ³]	54(W) x 20(D) x 27(H) / 70(W) x 20(D) x 28(H)
	Orifice channel size [mm]	0.19(H) x 20(D)
	Expand channel size [mm]	/ 0.5(H) x 20(D) / 1.3(H) x 20(D) / 2.0(H) x 20(D)
	Material	Aluminum / Stainless

나. 대물렌즈

유로 두께 변화에 따른 2배율 렌즈의 촬영한계를 극복하기 위하여 유로 두께에 따라 2배율, 5배율 대물렌즈(M plan APO, Mitutoyo corp)를 사용하였다. 실험에 사용한 대물렌즈의 제원은 2배율은 Table 7.3으로, 5배율은 Table 7.6으로 정리하였다.



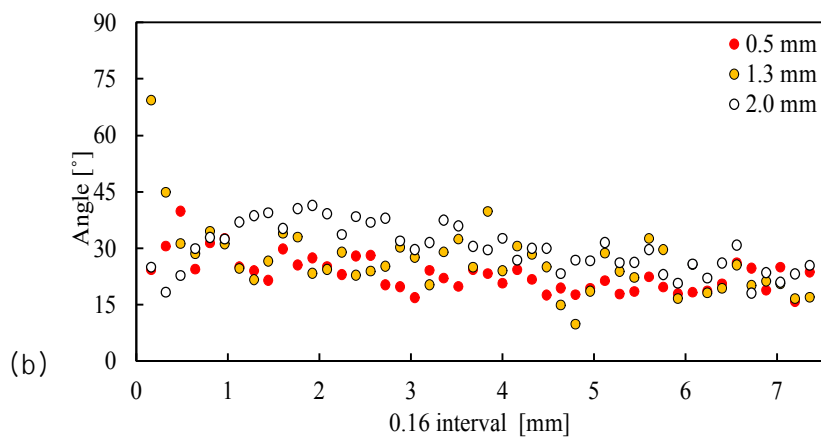
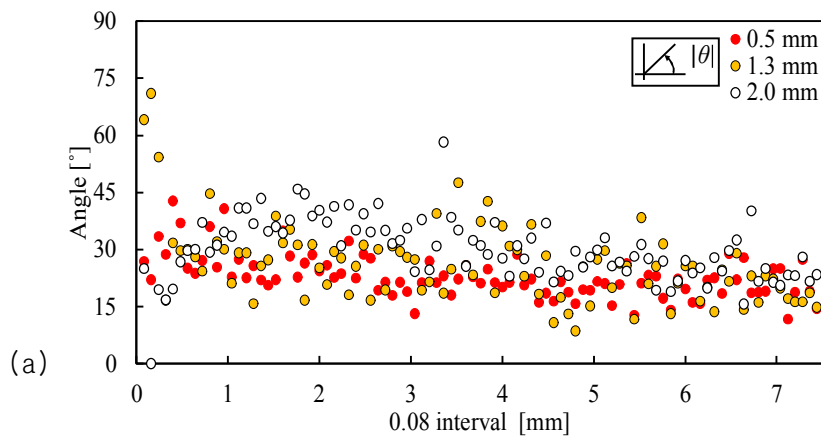
Fig. 7.15 5X magnification lens (M plan APO 5X, Mitutoyo corp)

Table 7.5 Specification of 5X magnification lens

		information
M plan APO 5X lens	Magnification	5X
	W.D. [mm]	34.0
	FOV [mm]	0.96 X 1.28 at 1/2 " camera
	Focal depth [mm]	100 at $\lambda=550$ nm

Sources: For additional information, see M plan Apo / M plan Apo HR (2008).

2. 두께 변화 오리피스 유로 실험 결과



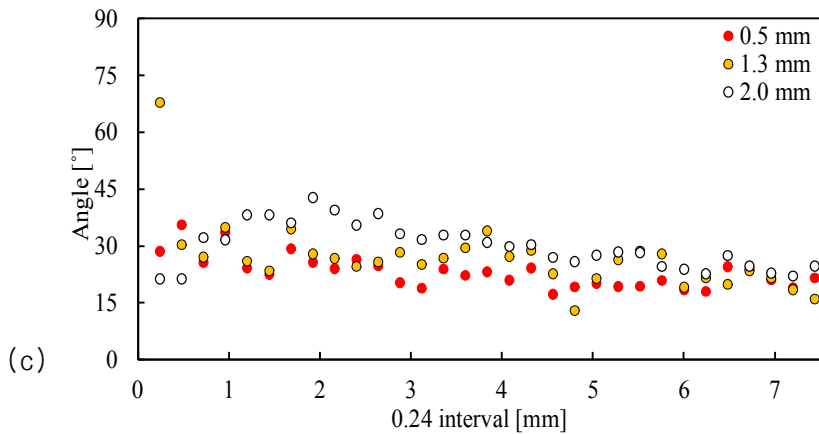


Fig. 7.16 Fiber alignment angle by flow direction depending on the thickness of the expanded channel and fiber x location extraction at (a) 0.08 mm interval, (b) 0.16 mm interval and (c) 0.24 mm interval

유로 두께에 따른 섬유 정렬 각도는 각도 추출 간격에 따라서 Fig. 7.15로 도시하였다. Fig. 7.15에 도시한 각 그래프의 각도 추출 간격은 유동방향인 x 축 방향을 기준으로 Fig. 7.15(a)는 0.08 mm, Fig. 7.15(b)는 0.16 mm, Fig. 7.15(c)는 0.24 mm간격으로 추출하였다. 섬유 정렬 각도는 4장의 각도 분석 코드를 사용하여 오리피스 통과 후를 기준으로 $x=7.5$ mm까지 분석하였으며 분석 시 실제 섬유와 이미지 픽셀의 배율은 1 mm당 0.0056개의 픽셀로 계산되었다. 모든 그래프는 각각의 데이터 추출 간격 사이에 존재하는 섬유 정렬 각도를 x 방향을 기준으로 평균하였으며 섬유의 정렬 각도는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 기준 각도로 도시하였다.

그래프에서 나타나는 섬유 정렬 경향은 유로가 두꺼울수록 큰 정렬 각도를 나타냈으며 섬유가 유동방향으로 이동하는 경우 정렬 각도가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 유로 두께가 증가할수록 오리피스 통과 후 확장 전단응력이 더 넓은 범위에 분포하게 되므로 유로 중심부에서 나타나는 정렬 각도가 무작위한 각도를 나타내는 것으로 보인다. 또한 유로 내부에서 발생하는 전단응력 차이로 인하여 섬유가 유동을 따라서 진행할수록 정렬 각도가 유동방향과 유사한 0° 쪽으로 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 유동방향 섬유 정렬 경향은 데이터 추출 간격을 더 크게 할수록 더 분명하게 나타났다.

각각의 데이터 추출 간격에 따라서 섬유 정렬을 분석한 결과는 Table 7.7로 정리하였다.

Table 7.6 Fiber alignment analysis depending on the thickness of the expanded channel

channel thickness [mm]	Interval 0.08 mm	Interval 0.16 mm	Interval 0.24 mm
	Max / min / average angle [°]	Max / min / average angle [°]	Max / min / average angle [°]
0.5	42.79 / 11.7 / 22.95	39.91 / 15.92 / 23.02	35.67 / 17.31 / 23.17
1.3	58.25 / 0 / 22.88	69.34 / 9.87 / 23.09	67.88 / 12.96 / 23.23
2.0	71.06 / 8.58 / 26.02	41.42 / 10.59 / 26.02	42.80 / 14.22 / 26.22

제 8 장 결 론

본 연구에서는 복합소재 내부에 혼합한 비등방성 첨가제의 정렬방향을 분석하기 위하여 PDMS와 탄소섬유 혼합물을 사용하여 유동가시화 및 전산유체해석을 실시하였다. 다양한 형상과 구조를 가진 금형에서 혼합물의 유동을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

기존 연구를 참고하여 오리피스 유로에서 진행한 섬유형 첨가제 전산유체해석은 오리피스 구조가 첨가제 정렬에 영향을 미친다는 결과를 나타냈다. 해석 결과, 유로 벽면에 근접하여 출발한 Fiber 1, Fiber 2는 오리피스 통과 후 급격한 섬유 정렬을 나타냈으나 $x=0.5$ mm, $x=0.8$ mm 이후 유동 방향과 유사한 각도로 정렬되었다. 반면에 유로 중심부에서 출발한 Fiber 3, Fiber 4는 정렬 각도가 점차 증가하거나 초기 정렬 각도에서 변화하지 않는 정렬경향을 나타냈다. 또한 해석에서 계산된 Fiber 1~4의 네 가지 섬유 모델은 유로 확장부에서 나타나는 유선을 따라서 이동하였다. 이렇게 계산한 해석 결과는 실제 실험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였으며 이와 같은 섬유 모델의 정렬 원인을 분석하기 위하여 오리피스 형상 내부에서 나타나는 속도구배 방향을 계산하였다. 계산 결과 속도구배 방향이 실제 실험에서 나타는 첨가제 정렬 경향과 유사한 동심원 형상을 나타내는 것을 확인하였다.

유로 내부에서 발생하는 첨가제 정렬을 분석하기 위해 유동가시화 실험을 진행하였으며 촬영한 이미지를 분석하기 위하여 각도 분석 코드를 작성하였다. 각도 분석 코드는 기존에 이미지를 분석하는데 사용하던 Hough 변환에 비해 0.86° 오차가 적게, 12.2초 더 빠르게 분석할 수 있었다. 각도 분석 코드의 타당성은 선분 그림과 실제 실험으로 촬영한 이미지를 손으로 분석한 결과와 비교하여 검증하였으며 이미지 내부의 선분 혹은 첨가제를 빠르고 정확하게 분석할 수 있음을 확인하였다.

유동가시화 이미지를 분석한 결과 유로 두께, 유동 속도, 유로 각도 만을 변형한 구조나 주입 조건은 첨가제 정렬에 큰 영향을 미치지 못했다. 유로 두께만을 증가시키는 경우에는 혼합물 내부의 첨가제가 무작위한 방향으로 정렬되었으나 첨가제 정렬 방향은 유로 두께만으로는 특정한 방향으로 조정할 수 없었다.

유동 속도를 조정하는 경우에는 유동 속도 증가를 통하여 혼합물이 유동하는 방향으로 첨가제 정렬 방향을 조정할 수 있었으나, 유로 두께나 유로 폭 방향 등의 유동 방향과 다른 방향으로 조정할 수는 없었다. 유로 각도를 변화시키는 경우, 유로 각도를 30° , 45° , 60° , 90° 까지 네 가지로 변화시켰으나, 유로 각도 변화 전후 첨가제 정렬은 유동 방향과 유사하게 나타났다. 이 경우 유로 각도 변화 전후 첨가제 정렬 각도 차이가 최소 $8.63^\circ \sim 10.33^\circ$ 정도였으며 최대 정렬 각도 차이인 10.33° 는 60° 유로에서 나타났다. 이는 유로 각도를 변화시키는 것이 첨가제 정렬에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 의미한다.

그러나 유로 형상에 오리피스를 추가한 경우에는 유로 두께 혹은 폭 방향으로 첨가제 정렬이 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 첨가제 정렬 현상은 오리피스 통과 후 유로가 확장되는 영역인 $0.5 \text{ mm} < x < 1.5 \text{ mm}$ 사이에서 급격하게 진행되었으며 유로 확장부의 유로 두께에 따라서 첨가제 정렬 각도가 달라지는 것을 확인하였다. 특히 유로 중심부에 위치한 첨가제는 $4.76^\circ \sim 86.42^\circ$ 사이의 무작위한 정렬 각도를 나타냈으며 대다수 첨가제 정렬 각도가 $45^\circ \sim 90^\circ$ 사이에 위치하는 것을 Fig. 7.7로 확인할 수 있었다. 이에 반해 유로 벽면에 위치한 대다수 첨가제는 유동 방향과 유사한 15° 이하로 정렬되었으며 해당 위치의 평균 또한 9.3° 로 유로 중심부의 51.89° 보다 낮게 나타났다. 이와 같은 유로 내부 위치에 따른 정렬은 Fig. 7.6, Fig. 7.12를 통해서도 확인할 수 있었다. 또한 오리피스 통과 후 정렬된 첨가제 각도가 유동이 진행됨에 따라서 점차적으로 유동방향과 유사한 정렬 각도를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이 밖에도 오리피스 통과 후 나타나는 첨가제 유동 현상이 평행 유로에서 나타나는 첨가제 유동 현상과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같은 오리피스 유로 내부에서 발생하는 첨가제 정렬 및 유동 현상은 유로 내부에서 발생하는 전단응력에 의한 현상이다. 특히 오리피스 통과 후 급격하게 진행되는 첨가제 정렬은 오리피스에서 유로 확장부로 진행할 때 발생하는 확장 전단응력에 의해 나타난다. 이러한 확장 전단응력에 의한 영향은 Fig. 3.4의 속도구배 방향 그래프와 Fig. 7.5에서 나타나는 첨가제 정렬 경향이 유사한 동심원 형상을 나타내는 것으로 확인할 수 있었다.

본 연구는 유동가시화를 통하여 액상 PDMS 내부에서 유동하는 탄소섬유를 직접적으로 분석하였으며 유로 형상에 따른 첨가제 정렬 영향을 확인하였다. 전산 유체해석을 통하여 오리피스 유로 통과 후 발생하는 첨가제 정렬 요인을 분석하였으며 오리피스 유로 통과 시 발생하는 확장 전단응력과 유선이 첨가제 정렬에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 이와 같은 분석 결과는 복합소재의 열전달 성능 향상에 대한 기초가 될 것으로 기대한다.

Reference

Advani, S. G., Tucker, C. L., The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites, *Journal of Rheology* 31(8) (1987) 751-784.

Allan, P. S., Bevis, M. J., Gibson, J. R., May, C. J., Pinwill, I. E., Shear controlled orientation technology for the management of reinforcing fibers in moulded and extruded composite materials, *Journal of materials processing technology* 56(1-4) (1996) 272-281.

Amitay-Sadovsky, E., Wagner, H. D., Hardness and Young's modulus of transcrystalline polypropylene by Vickers and Knoop microindentation, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 37(6) (1999) 523-530.

AM7515MZTL - specification, AnMo electronics corporation, accessed 2018.10.24.
https://www.dino-lite.com/products_detail.php?index_m1_id=0&index_m2_id=0&index_id=57.

Ayres, C., Bowlin, G. L., Henderson, S. C. Taylor, Shultz, J., Alexander, J., Telemeco, T. A., Simpson, D. G., Modulation of anisotropy in electrospun tissue-engineering scaffold: Analysis of fiber alignment by the Fast Fourier transform, *Biomaterials*, Vol. 27(32) (2006) 5524-5534.

Choi, E. S., Brooks, J. S., Eaton, D. L., Al-Haik, M. S., Hussaini, M. Y., Enhancement of thermal and electrical properties of carbon nanotube polymer composites by magnetic field processing, *Journal of Applied physics* 94(9) (2003) 6034-6039.

Choy, C. L., Leung, W. P., Kowk, K. W., Lau, F. P., Elastic moduli and thermal conductivity of injection molded short-fiber-reinforced thermoplastics, *Polymer composites*, 13(2) (1992) 69-80.

Cooper, C. A., Ravich, D., Lips, D., Mayer, J., Wagner, H. D., Distribution and alignment of carbon nanotubes and nanofibrils in a

polymer matrix, *Composites Science and Technology*, 62(7) (2002) 1105-1112.

Creighton, C. J., Sutcliffe, M. P. F., Clyne, T. W., A multiple field image analysis procedure for characterisation of fibre alignment in composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(2) (2001) 221-229.

Fiedler, B., Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Nolte, M. C., Schulte, K., Fundamental aspects of nano-reinforced composites, *Composites Science and Technology*, 66(16) (2006) 3115-3125.

Folgar, F., Tucker, C. L., Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 3(2) (1984), 98-119.

Fu, S. Y., Mai, Y. W., Thermal conductivity of misaligned short-fiber-reinforced polymer composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 88(6) (2003) 1495-1505.

Fujita, R., Nagano, H., Novel fiber orientation evaluation method for CFRP/CFRTP based on measurement of anisotropic in-plane thermal diffusivity distribution, *Composites Science and Technology*, 140 (2017) 116-122.

Gusev, A., Heggli, M., Lusti, H. R., Hine, P. J., Orientation Averaging for Stiffness and Thermal Expansion of short Fiber Composites, *Advanced engineering materials*, 4(12) (2002), 931-933.

Isaza M. C. A., Herrera Ramírez, J. M., Ledezma Sillas, J. E., Meza, J. M., Dispersion and alignment quantification of carbon nanotubes in a polyvinyl alcohol matrix, *Journal of Composite Materials*, 52(12) (2018) 1617-1626.

Ishizaki, T., Nagano, H., Measurement of three-dimensional anisotropic thermal diffusivities for carbon fiber-reinforced plastics using lock-in thermography, *International Journal of Thermophysics*, 36(10-11) (2015) 2577-2589.

Jeffery, G. B., The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid, Proc. R. Soc. Lond. A, 102(715) (1922), 161-179.

Jiang, Q., Wang, X., Zhu, Y., Hui, D., Qiu, Y., Mechanical, electrical and thermal properties of aligned carbon nanotube/polyimide composites, Composites Part B: Engineering, 56 (2014) 408-412.

Junk, M., Iller, R., A New Derivation of Jeffery's Equation, Journal of Mathematical Fluid Mechanics, 9(4) (2007) 455-488.

Kimura, T., Ago, H., Tobita, M., Ohshima, S., Kyotani M., Yumura, M., Polymer composites of carbon nanotubes aligned by a magnetic field, Advanced materials, 14(19) (2002) 1380-1383.

Kratmann, K. K., Sutcliffe, M. P. F., Lilleheden, L. T., Pyrz, R., Thomsen, O. T., A novel image analysis procedure for measuring fibre misalignment in unidirectional fibre composites, Composites Science and Technology, 69(2) (2009) 228-238.

Kuribara, M., Nagano, H., Anisotropic thermal diffusivity measurements in high-thermal-conductive carbon-fiber-reinforced plastic composites, Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 5(1) (2015) 15-25.

Lee, G. W., Park, M., Kim, J. k., Lee, J. I., Yoon, H. G., Enhanced thermal conductivity of polymer composites filled with hybrid filler, Composites Part A: Applied science and manufacturing 37(5) (2006) 727-734.

Luxpad22 - technical data, Guangdong Nanguang photo & video systems Co., accessed 2018.10.24., <http://www.nanguang.cn/product/showproduct.php?id=231&lang=en>.

Mamunya, Y. P., Davydenko, V. V., Pissis, P., Lebedev, E. V., Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders, European polymer journal 38(9) (2002) 1887-1897.

Moniruzzaman, M., Du, F., Romero, N., Winey, K. I. Increased flexural modulus and strength in SWNT/epoxy composites by a new fabrication method, *Polymer*, 47(1) (2006) 293-298.

M Plan Apo / M plan Apo HR, Mitutoyo corporation, (last modified 2008.3), accessed 2018.11.8., <http://www.mitutoyo.co.jp/eng/support/service/catalog/04/E14020.pdf>.

Nagano, H., Kato, H., Ohnishi, A., Nagasaka, Y., Measurement of the thermal diffusivity of an anisotropic graphite sheet using a laser-heating AC calorimetric method, *International Journal of Thermophysics*. 22(1) (2001) 301-312.

Object eden 260vs - specifications - download the spec sheet, Strataysys Ltd. (last modified 2015), accessed 2018.10.24, http://www.strataysys.com/3d-printers/objet-eden260vs#_ga=2.175743530.980089178.1542275638-1890565933.1542275638.

Papathanasiou, T. D. and Guell, D. C., Flow induced alignment in composite materials, Woodhead Publishing Limited, (1997)

Phantom C110 - download data sheet, Vision research Inc. (last modified 2017.2), accessed 2018.11.8., <https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/mirocnn/c110>.

Sandler, J., Shaffer, M. S. P., Prasse, T., Bauhofer, W., Schulte, K., Windle, A. H., Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, *Polymer*, 40(21) (1999) 5967-5971.

Sylgard 184 Dow Corning, Dow corning corporation, accessed 2018.10.24.,

http://research.engineering.ucdavis.edu/ncnc/wp-content/uploads/sites/11/2013/05/Sylgard_184_data_sheet.pdf

Thostenson, E. T., Chou, T. W., Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization, *Journal of physics D: Applied physics*, 35(16) (2002)

L77.

Toll, S., Andersson, P.O., Microstructure of long- and short- fiber reinforced injection molded polyamide, *Polymer Composites* 14(2) (1993) 116-125.

Trebbin, M., Steinhauser, D., Perlich, J., Buffet, A., Roth, S. V., Zimmermann, W., Thiele, J., Forster, S., Anisotropic particles align perpendicular to the flow direction in narrow micro channels, *PNAS* 110(17) (2013) 6706-6711.

Vero - download the data sheet, Stratasys Ltd. (last modified 2017), accessed 2018.10.24.,
<http://www.stratasys.co.kr/materials/search/vero>.

Villmow, T., Potschke, P., Pegel, S., Haussler, L., Kretzschmar, B., Influence of twin-screw extrusion conditions on the dispersion of multi-walled carbon nanotubes in a poly(lactic acid) matrix, *Polymer*, 49(16) (2008) 3500-3509.

Weidenfeller, B., Hofer, M., Schilling, F. R., Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene, *Composites Part A: applied science and manufacturing* 35(4) (2004) 423-429.

Wong, C. P., Bollampally, R. S., Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging, *Journal of Applied Polymer Science* 74(14) (1999) 3396-3403.

Xu, Y., Chung, D. D. L., Mros, C., Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 32 (12) (2001) 1749-1757.

Yurgartis, S. W., Measurement of small angle fiber misalignments in continuous fiber composites, *Composites Science and Technology*, 30(4) (1987) 279-293.

Zhao, X., Zhang, Q., Chen, D., Lu, P., Enhanced mechanical properties of graphene-based poly (vinyl alcohol) composites, *Macromolecules*, 43(5) (2010) 2357-2363.