

## OpenFOAM®을 이용한 공압출기

### 다이 내부 유동 모사 및 가시화에 관한 수치 연구

문준호\* · 김주현\*\* · 문상호\* · 김시조<sup>†</sup>

#### Numerical study of the flow simulation and visualization in the co-extrusion die using OpenFOAM®

Jun Ho Mun, Ju Hyeon Kim, Sang Ho Mun and See Jo Kim

**Abstract.** It is of great importance to obtain the uniform layer thickness in the multi-layer co-extrusion processes. In the present study, the three-dimensional numerical simulation was carried out using the open source code named OpenFOAM® to understand the flow characteristics in the multi-layer die. In this numerical study, Multi-thin-layers were successfully computed depending on the number of repeating units. The generation mechanism for the multi-layer was numerically verified by the flow simulation and visualization in the co-extrusion die using OpenFOAM®. The results suggested that the multi-layer has a divided and folded mechanism similar to the stretching and folding in the chaotic flow.

**Key Words:** OpenFOAM(오픈 폼), multi-layer(다층), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Co-extrusion(공압출), Flow Visualization(유동가시화)

### 1. 서 론

압출 공정은 산업 현장에서 폴리머를 일정한 두께를 가지는 플라스틱 필름이나 시트 등을 생산하는데 사용이 된다. 압출 공정 관련 연구로 본 연구자에 의하여 단축압출기 내에서의 변형정도를 예측하는 척도로써 변형특성 즉 DC(deformation characteristics)를 정의하고 이로부터 기존의 단축압출기 내에서의 DC의 증가, 즉 혼합 정도의 증가는 시간 또는 압출기의 길이에 대하여 선형적임을 밝혀내었다.<sup>(1-4)</sup>

일반적으로 압출기는 제품이 생산되기까지 고체 폴리머를 압출방향으로 이동시키는 이송영역(feeding zone), 폴리머의 압축과 용융이 일어나는 압축영역(compressing zone), 완전히 녹은 고분자 유체가 압출되도록 계량하는 계량영역(metering zone)을 거쳐야 한다.

그 중 계량영역에서 폴리머가 스크류와 배럴 사이에 채워져 높은 압력이 형성된다. 이 높은 압력으로 인해 고분자 유체가 다이를 통해서 빠져 나오게 된다.<sup>(1-5)</sup> 그 중 다이의 출구 부분의 고른 속도 분포는 최종적으로 나오는 제품의 품질에 직접적인 영향을 주기 때문에 다이 출구 부분의 속도 분포를 고르게 하는 것이 최대의 관심사라고 할 수 있다. 또한 폴리머의 종류에 따라 내부 유동 특성이 차이가 많이 나기 때문에 쓰이는 폴리머에 따라 다이의 형상을 다르게 설계하여야 될 때도 있다. 이러한 복잡한 특성을 가지는 폴리머를 이용하여 좋은 제품을 만들어 내기 위해 다이의 최적 설계의 차원에서 많은 연구가 시도되었다.<sup>(6-11)</sup>

그러나 제품의 질을 높이는데 다이의 최적 설계도 중요한 부분이지만 단층으로 이뤄진 제품으로는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 일반적인 단층 압출 제품보다 공압출기를 사용하여 특수한 경우에 사용되는 다층으로 이뤄진 제품이 활발하게 만들어지고 있다. 공압출로 만들어진 다층의 제품은 본래 가지고 있는 각각의 층의 기능 외에도 부가적인 성능을 만들어 내 고성능 제품을 얻을 수 있는 것이 최대 장점이다.

<sup>†</sup> Corresponding author

안동대학교 기계설계공학과  
E-mail : sjkim1@anu.ac.kr

\* 안동대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 안동대학교 기계설계공학과

산업 현장의 한 예로 화학 회사에서 압출 제품으로 생산되는 고분자 제품은 내부에 연속적이고 다층상인 나노 복합체 차단막을 형성함으로써 기존의 차단성 소재 대비 뛰어난 차단성능을 제공한다. 또한는 나노(Nano) 크기의 무기관상 Clay를 이용한 나노 복합체로, 일반 플라스틱 특히 폴리에틸렌(HDPE, LDPE, PP) 등과 혼합하여 중공 성형, 압출성형 등 다양한 성형 방법을 통해 뛰어난 차단 성능을 갖는 차단성 용기를 제작할 수 있다.

다층을 만들기 위해서는 원하는 층만큼의 압출기가 필요해서 비용과 고도의 기술이 많이 필요하게 된다. 이러한 비용과 기술적 제약을 보완하기 위해서 층의 수만큼의 압출기를 사용하지 않고 다층 제품을 만들 수 있는 다층 공압출 시스템이 사용되고 있다. 여기서 원하는 만큼의 층을 만들기 위해서 그만큼의 압출기를 사용하지 않아도 되는 이유는 다층 공압출 시스템의 가장 핵심 부분인 다이의 내부 구조 때문이라고 할 수 있다.

이러한 다층 공압출 다이의 내부 유동 특성에 대한 연구는 컴퓨터의 성능의 향상과 더불어 수치해석을 통한 연구가 본격화 되었다. 다층 공압출 다이의 수치적 연구 사례를 살펴보면 해외에서는 공압출기 다이의 내부 특성을 알아보기 위해 수치해석을 통해 내부의 유동과 다층 사이의 두께에 관한 실험과 수치해석 연구를 하였으며 다층 공압출 다이 압출 성형을 통한 다층에서의 유연학적 성질을 측정하였다.<sup>(12-13)</sup>

국내에서는 다층 공압출 다이의 유동 특성과 혼합 특성에 대한 연구를 하였다.<sup>(14)</sup>

본 연구에서는 다층 공압출기에 가장 핵심 부분인 다층(multi-layer) 다이 내부 유동을 해석하여 다층이 생성되는 원리와 유체의 흐름이 분기 될 때 질량 유량(mass flow rate)이 얼마나 분배가 되는지 대해서 분석하고자 한다. 이러한 원리에 대해 알아보기 위해 전산 유동 해석을 통해 얻은 유선 등을 이용하여 다층이 어떻게 형성 되는지 관찰 하였으며 유체의 흐름이 분리 되는 부분에 면을 만들어서 각각의 유량이 얼마큼 분리 되는지 측정하였다. 또한 제품의 품질에 큰 영향을 미치는 속도장을 통해 다이 구간 별 내부 속도 분포를 가시화 하였다. 이러한 가시화는 후속연구에서 균일한 속도 분포를 가지기 위한 최적 다이 설계에 기초 연구 자료로 제공될 수 있다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 OpenFOAM®의 배경

OpenFOAM®(Open Field Operation and Manipulation)

은 OpenCFD Ltd.에서 개발한 범용 3차원 전산유체역학 코드로서, GNU GPL(General Public License)를 사용하기 때문에 누구나 무료로 내려 받아 사용할 수 있다.<sup>(15)</sup>

원래 OpenFOAM®은 1993년 Gosman 교수 연구실에서 FOAM이라는 이름으로 Henry Weller와 Hrvoje Jasak에 의하여 CFD 코드의 재 활용성을 위한 C++ 언어 기반의 CFD 솔버를 목적으로 개발이 시작되었고, 2004년 OpenFOAM®으로 개명하고 소스를 공개함으로써 전 세계의 많은 연구자들이 참여하여 지속적인 보완이 진행되어 2013년 현재 최신버전 2.2.1까지 개발되었으며, The OpenFOAM® Extend Project에서 활발하게 추가 알고리즘을 개발하고 있다.<sup>(16)</sup>

OpenFOAM®은 라이브러리 형태로 개발되며 실제 특정 문제를 해결하기 위한 솔버는 독자적으로 개발할 수 있는 환경을 제공한다. 이 라이브러리들은 우리가 해석하고자 하는 편미분 방정식과 최대한 유사하게 만들어져 있어 C++ 언어에 대해 자세히 알지 못하더라도 쉽게 알아 볼 수 있도록 되어 있다. OpenFOAM®은 상용소프트웨어와 동일하게 비압축성 유동, 압축성 유동, 다상 유동, 난류 유동, 연소, 열전달, 전자기, 고체 역학 등 여러 가지 다양한 분야의 해석이 가능하며 국내에서는 Park 등에 의해 2010년 학회 논문에서 처음으로 소개 되었다.<sup>(17)</sup> 또한 현재 고분자 가공압출, 사출 분야에서도 Polyflow나 Moldflow 등의 상용 소프트웨어 대신 공개 소프트웨어인 OpenFOAM®를 이용한 해석이 늘어나고 있는 추세이다. 공개 소프트웨어를 이용한 석박사 CFD 교과목이 대학원에 개설되어 많은 사용자로 하여금 접근성을 높이고 있는 실정이다.<sup>(18)</sup>

### 2.1 multi-layer 원리

Fig. 1과 같이 두 개의 압출기를 이용하게 되면 보통 제품은 2개의 층으로 완성된다.

하지만 다층 공압출기의 멀티플리케이션 다이 어셈블리(Multiplication die assembly) 구간을 거쳐 시트 다이(sheet die)로 압출되는 층의 수는 압출기의 수와 입구 수에 의해서 2개의 층이 아닌 더 많은 층이 생성되게 된다.

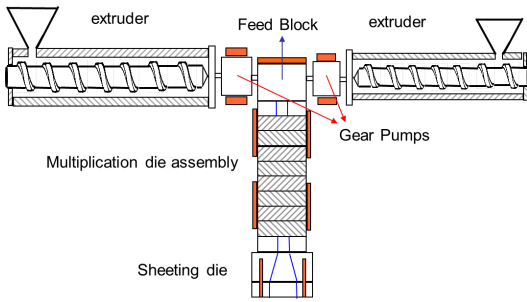


Fig. 1. Schematic drawing of the co-extrusion die

Fig. 2에서 멀티플리케이션 다이 어셈블리 구간을 거치면서 단층이 어떻게 다층이 되는지 설명하고 있다.

2개의 압출기를 통해 작용 유체가 멀티플리케이션 다이 어셈블리의 입구로 유입되어 다층 구간을 지나게 되면 다층 Bakers 변환이 나타나게 된다. 쉽게 말하면 늘림과 접힘(stretching and folding)의 카오스 변형 원리와 같다고 할 수 있다.

처음에 한 개의 층으로 시작하여 늘렸다 다시 접었다를 반복하게 되면 층이 배로 늘어나게 된다. 이와 마찬가지로 다이 안에 다층 구간을 지나게 되면 유입된 유체가 갈라졌다가 서로 만나 접히게 된다. 이러한 과정을 거치게 되면 입구의 수가  $M$ 이고 압출기의 개수가  $n$ 이라고 한다면 최종 나오는 층의 개수는  $M \times 2^n$ 이 나온다. 본 논문에서는 압출기의 개수가 2개이므로 총 16개의 층이 나오게 된다.

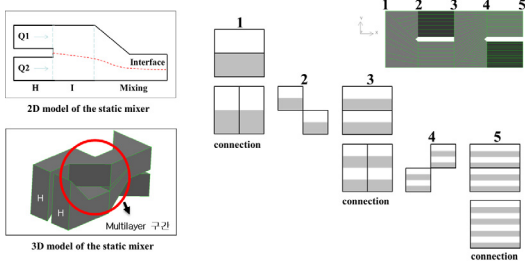


Fig. 2. Stretching and folding mechanism in the multi-layer die

### 3. 공압출기 수치해석

#### 3.1 공압출기 형상과 격자

해석에 사용된 공압출기는 Fig. 3와 같이 멀티플리케이션 다이 어셈블리 구간에 속하는 입구(inlet), 연결부

(connector), 다층(multi-layer)과 다이 어댑터(die adapter), 쉬트 다이(sheet die)로 이루어져 있다.

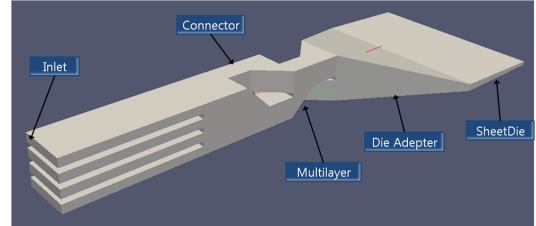


Fig. 3. Components in the co-extrusion die

공압출기의 형상은 Fig. 4와 같이 Gambit 소프트웨어를 사용하여 형상을 만들고 경계 조건과 격자를 완성 후 Fluent 입력 파일인 msh 파일 형태로 변환한 파일을 OpenFOAM® 입력 격자로 변환해서 사용하게 된다.

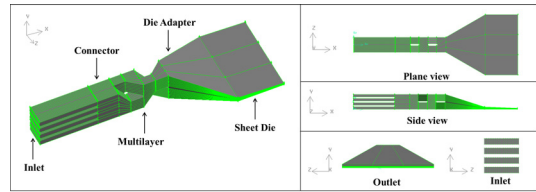


Fig. 4. Mesh generation using Gambit

공압출기 형상의 Fig. 5와 같이 Gambit 소프트웨어를 통해 매트릭스 파일로 프로그램하고 이 프로그램에서 격자수를 조밀하게 조정할 수 있도록 하였다. 모든 부분을 정렬 격자 육면체 요소로 만들었으며 노드 개수는 109,079개 요소 개수는 96,416개로 이뤄져 있다.

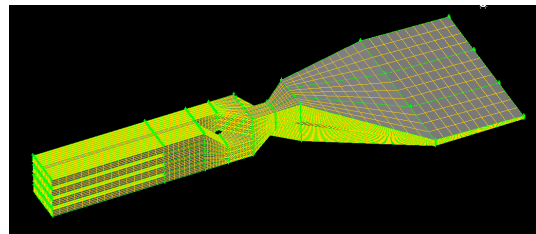


Fig. 5. Finer mesh generation using Gambit

#### 3.2 공압출기 수치해석 지배 방정식과 물성치

본 연구에 사용된 유체는 비압축성 뉴턴 유체이며 지배 방정식은 다음과 같다.

Continuity Equation :

$$\nabla \cdot \underline{v} = 0 \quad (1)$$

Momentum Equation :

$$\rho_m \left( \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} \right) + \underline{v} \cdot \nabla \underline{v} = -\nabla \cdot \underline{\delta} p + \nabla \cdot \underline{\tau} \quad (2)$$

본 논문에 사용된 작용 유체의 물성치는 동점도  $1e-6(m^2/s)$ 이며 밀도는  $1000(kg/m^3)$ 이다.

### 3.3 공압출기 경계조건과 해석 방법

공압출기의 경계조건을 Fig. 6와 같이 각각의 경계조건에 번호를 삽입하였으며, Table 1에서 각각의 이름과 경계조건의 종류를 설명하였다.

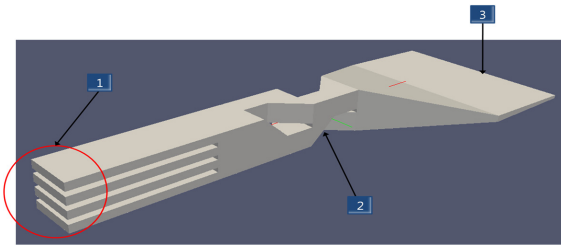


Fig. 6. Boundary conditions in the co-extruder

Table 1. Types of boundary conditions

Number	Name	Type
1	Inlet	Velocity inlet
2	Wall	Wall
3	Outlet	Outflow

본 논문에서의 OpenFOAM®에서 비압축성 유체 해석 솔버인 icoFoam을 이용하여 0초에서 2초까지 time step을 0.005초로 설정하여 unsteady 해석을 실시하였다.

초기 조건으로는 모든 입구에 길이 방향으로 0.3(m/s)로 동일한 속도를 적용하여 해석을 실시하였다.

## 4. 해석 결과

0.2초 때 유체가 공압출기의 다층 구간을 지나면서 어떻게 질량 유량이 분배 되는지 관찰하기 위해서 Fig. 7과 같이 5개의 구간으로 나누었다.

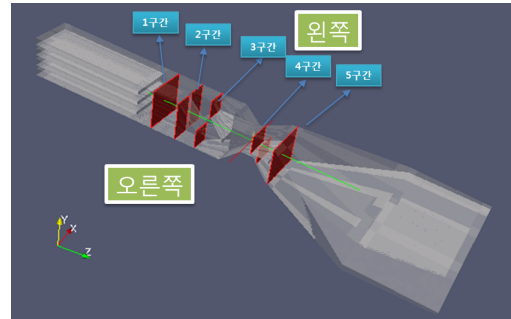


Fig. 7. dividing plane in the multi-layer zone

5개의 구간 별로 질량 유량의 분배를 쉽게 알아보기 위해서 Table. 2에 구간별 질량 유량 분배 정도를 나타냈다.

Table 2. Mass flow rate in each section

구간	질량 유량 [kg/s]	퍼센트[%]
1	$4.0955 \times 10^{-3}$	100
2	왼쪽 : $2.0299 \times 10^{-3}$ 오른쪽 : $2.0337 \times 10^{-3}$	49.5 49.6
3	왼쪽 위 : $2.1010 \times 10^{-3}$ 오른쪽 아래 : $2.1014 \times 10^{-3}$	49.1 49.2
4	왼쪽 아래 : $2.0514 \times 10^{-3}$ 오른쪽 위 : $1.9945 \times 10^{-3}$	50.1 48.7
5	$4.0955 \times 10^{-3}$	100

다층 구간이 처음에 1구간에서 100%의 질량 유량이 들어와 2구간에서 왼쪽과 오른쪽으로 나누어지게 되는데 여기서 왼쪽과 오른쪽이 약 49.5%로 비슷하게 분배가 되었으며 3구간은 왼쪽 위로 오른쪽 아래로 나누어지면서 각각 약 49% 정도 분배가 되는 것을 확인 하였다. 4구간에서는 왼쪽 아래 오른쪽 위로 3구간과 반대로 나뉘게 되는데 다른 곳과 달리 왼쪽 아래는 50%, 오른쪽 위는 약 49%로 약간의 차이를 보였다. 마지막 5구간에서는 4구간에서 나누어졌던 곳이 하나로 합쳐지는 부분으로 100%의 질량 유량이 측정되었다.

하지만 다층 구간의 층이 어떻게 층이 나누어지는지 질량 유량 측정으로는 는 관찰 할 수 없다.

유체가 공압출기의 다층 구간을 지나면서 어떻게 층이 나누어지는지 관찰하기 위해서 0.2초 때의 유동장의 유선을 Fig. 8과 같이 가시화 하였다.

4개의 입구로 유입된 유체가 다층 구간을 거치면서 각각 4개의 층으로 늘어나는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 9에서 multi-layer 구간을 확대해서 관찰하게 되면

4개의 층에서 총 16개의 층으로 늘어난 것을 확인 할 수 있다.

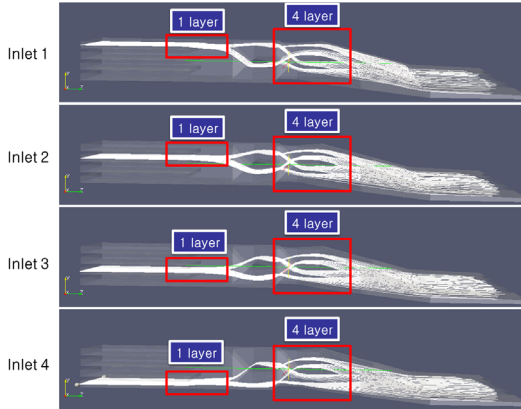


Fig. 8. Streamline visualization on inlet

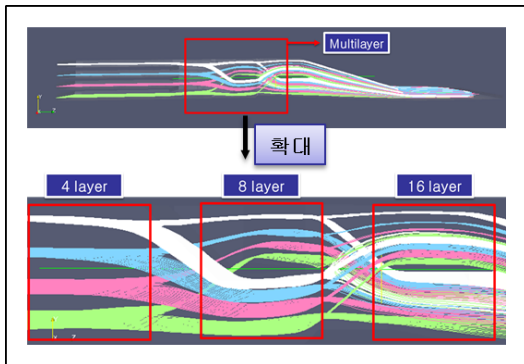


Fig. 9. Zooming streamlines in the multi-layer zone

다층 구간을 거치면서 4개의 층이 16개 층으로 늘어나게 되는데 어떤 원리로 층이 나뉘어지는지를 살펴보기 위해 다층 구간을 Fig. 10의 위치에서 관찰하였다.

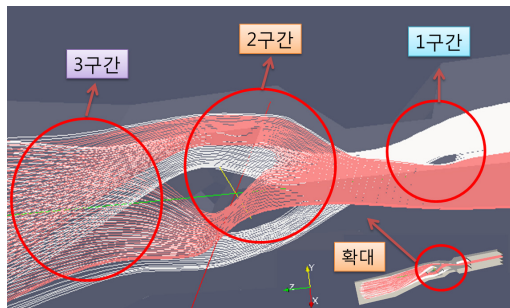


Fig. 10. Dividing streamlines in the multi-layer zone

첫 번째 단층으로 이뤄진 유체가 다이 입구로 들어오면서 1구간에서 지그재그로 나뉘지면서 1개의 층이 2개의 층으로 나뉘지게 된다. 2개의 층이 지그재그로 나뉘져 각각 2구간을 거치게 된다.

여기서 지그재그로 나뉘진 2개의 층들이 또 한 번 갈라지게 된다. 이렇게 되면 2구간을 지나면서 2개의 층으로 유입된 유체가 4개의 층으로 증가하게 된다. 마지막으로 3구간을 지나면서 나뉘졌던 4개의 층들이 합쳐져서 다층을 이루게 된다.

이렇게 특수한 다층 구간을 쉽게 표현하면 반죽을 늘렸다가 다시 합쳐 면의 가닥수를 늘리는 수타면의 제조 방법과 유사하다고 할 수 있다. 이러한 과정을 거치게 되면 입구의 수가 M이고 압출기의 개수가 n이라고 하면 수치적으로 표현하면 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M \times 2^n \quad (3)$$

다층을 만드는 원리도 중요하지만 최종적으로 가장 중요한 것은 다층으로 이뤄진 제품의 품질이라고 할 수 있다. 즉 다층으로 형성된 제품의 두께 방향으로의 두께의 균일성이 보장 되어야 한다. 이를 위해 다층으로 이루어진 속도 분포가 다이 출구에서 일정한 분포를 이루는 것이 중요하다.

이렇게 제품의 품질을 향상시키기 위해서는 우선 다이 내부의 속도 분포를 파악해야 한다. 다이의 내부 속도 분포를 알아보기 위해서 다이의 각각의 부분에 단면을 만들어서 단면에서의 길이 방향 속도장 프로파일을 만들어서 속도 분포를 가시화 하였다.

Fig. 11은 입구 부분의 속도장 프로파일을 가시화한 것이다. 아직 다층 구간 전이기 때문에 층이 나누어지지 않아 속도장의 분포가 일정하게 나타났다.

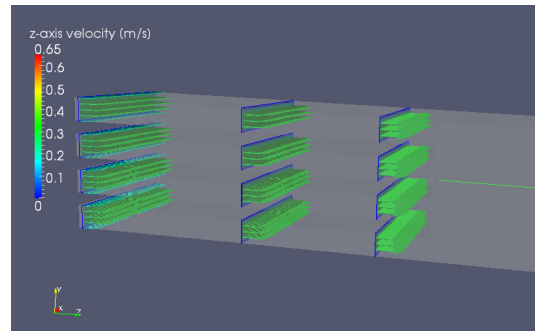


Fig. 11. Velocity profiles in the inlet zone of the die

Fig. 12은 연결부와 다층 구간의 속도 장 프로파일을 가시화하였다.

다층 구간을 지나면서 층이 나뉘지게 되면서 속도분포가 일정하지 않고 불안정하게 나타났다.

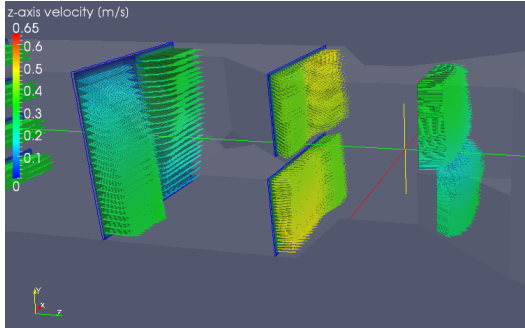


Fig. 12. Velocity profiles in the connector and multi-layer zone of the die.

연결부와 다층 구간에서 층이 나뉘지면서 속도장이 일정하지 않고 불안정하였지만 Fig. 13와 같이 다이 어댑터와 쉬트 다이로 가면서 나뉜 층들이 겹쳐지면서 불안정했던 속도장 프로파일이 점차 안정화된 것을 관찰 할 수 있다.

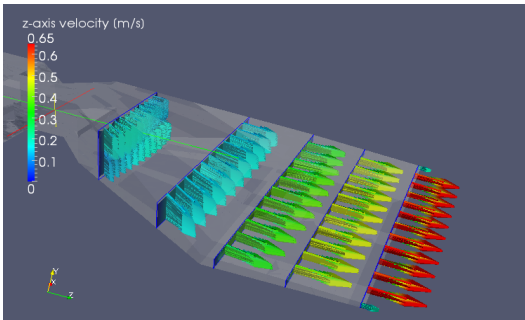


Fig. 13. Velocity profiles in the die adapter and sheet die zone of the die.

## 5. 결론

본 논문에서는 다층 공압출 시스템에서 가장 중요한 다이의 특성인 다층을 생성하는 원리와 제품의 품질을 좌우하는 내부의 속도 분포를 알아보기 위해서 OpenFOAM®을 통해 해석을 실시하였으며 Paraview를 통해 후 처리를 실시하였다.

공압출 다이의 질량 유량이 다층 구간을 지나면서 질량 유량이 어떻게 분배가 되는지 측정하기 위해서 5구간으

로 나누어 질량 유량을 측정하였을 때 1구간에서 질량 유량이 100%로 들어와 2구간에서 왼쪽과 오른쪽, 3구간에서 왼쪽아래 와 오른쪽 위, 4구간에서 왼쪽 위와 오른쪽 아래로 각각 49% 정도로 분배된다. 2~ 4구간에서 나누어졌던 질량 유량이 5구간에서 100%가 되는 것을 측정하였다. 2~4구간에서 약 2%의 오차가 발생하였다.

또한 해석 된 결과를 바탕으로 다층이 생성되는 원리를 알아보기 위해 공압출기 내부에 형성된 유동장으로 부터 계산된 유선을 가시화한 결과 다층 구간에서 단층의 유체가 지그재그로 갈라지고 또 한 번 지그재그로 갈라지면서 다층으로 형성 되는 것을 알 수 있었다.

다이의 내부 속도장 분포를 파악하기 위해서 각각의 부분에서 단면을 생성하여 속도장 프로파일을 관찰한 결과 단층에서 다층으로 변하는 다층 구간에서는 속도가 불안정했다. 그 후 여러 층의 유체가 합쳐지는 다이 어댑터 구간에서 점차 안정적으로 변하는 것을 관찰 할 수 있었다.

본 수치 연구를 통하여 최종적으로는 다이 내부의 유동 특성을 파악하여 다이 출구에서 균일한 두께의 다층 압출 필름 생산이 가능하도록 전산설계가 가능하게 되었다.

본 연구 분야에서는 점탄성 모델을 도입하고 자유 계면 현상을 해석하는 일이 압출 공병에서 매우 중요하며 최근 다른 연구자들에 의하여 성공적으로 수행되었다.<sup>(19-21)</sup> 이를 기초로 본 연구자들은 다이 내부를 통해 최종적으로 제품이 나오면서 점탄성 유체의 유변학적 성질에 의해 생기는 다이 스웰 현상과 여러 층의 유체가 합쳐질 때 생기는 경계 면의 변화와 정적, 동적 접촉각에 대해 물리적 현상을 이해하는 것이 매우 중요하며 본 연구를 바탕으로 향후 계속적으로 연구 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 “2011년 학부교육 선진화 선도대학(ACE) 지원사업”의 일환으로 시행되는 연구입니다.

## 참고문헌

- (1) Kwon, T.H., Joo, J.W. and Kim, S.J., 1994, “Kinematics and Deformation Characteristics as a Mixing Measure in the Screw Extrusion Process,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34(3), pp.174.
- (2) Kim, S.J. and Kwon, T.H., 1994, “Deformation Measure in Three-Dimensional Duct Flows” *Korean Journal of Rheology*, Vol. 6(1), pp.60.

- (3) Kim, S.J. and Kwon, T.H., 1996, "Measures of Mixing for Extrusion by Averaging Concepts", *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 36(11), pp.1466 .
- (4) Kim, S.J. and Kwon, T.H., 1996, "Accurate Determination of a Deformation Measure in the Screw Extrusion Process" *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 36(11), pp.1454.
- (5) Rauwendaall, C., 1994, "Polymer Extrusion" Hanser, NY.
- (6) Liu, T. J., Hong, C. N., Chen, K. C., 1988, "Computer-aided analysis of a linearly tapered coat-hanger die" *Polymer engineering and science* Vol. 28(23), pp. 1517.
- (7) Hurez, P., Tanguy, P. A., Blouin, D., 1993, "Numerical simulation of profile extrusion dies without flow separation" *Polymer engineering and science* Vol. 33(15), pp. 971.
- (8) Mueller, C.D., Kerns, J., Ebeling, T., Nazarenko, S., Hiltner, A., Baer, E., 1997. "Microlayer Coextrusion: Processing and Applications" *Polym. Proc. Eng.*, Vol. 9, pp. 137-157.
- (9) Slayter G., 2002. "Two-phase materials" *Scientific American*, 206, pp124-128.
- (10) Kim, J., Han, C., 1991. "Polymer-polymer interdiffusion during co-extrusion" *Polym. Eng. Sci.*, 41, pp. 258-269.
- (11) Van der Hoeven, J.C., Wimberger-Friedl R., Meijer H.E.H., 2001, "Homogeneity of multi-layers produced with a Static Mixer" *Polym. Eng. Sci.*, 41, pp. 32-42.
- (12) Van Der Hoeven, J.C., Wimberger-Friedl, R., Meijer, H.E.H., 2001, "Homogeneity of multi-layers produced with a static mixer" *Polymer Engineering & Science*, Vol. 41, pp. 32-42.
- (13) Zhao, R., Macosko, C. W., 2002, "Slip at polymer-polymer interfaces: Rheological measurements on co-extruder multi-layers" *Journal of Rheology*, Vol. 46, pp. 145-167.
- (14) Yang, H. C., Park, S. K. and Oh, S.W., 2003, "Mixing Characteristics of Static Mixers" *Proc. of KSME 2003 spring annual Meeting*, pp. 1955-1960.
- (15) <http://www.openfoam.com/>, The Openfoam source CFD toolbox.
- (16) <http://www.extend-project.de/>, The OpenFOAM® Extend Project.
- (17) Park, J. K., Kan, K. H., 2010, "Reviw on OpenFOAM An Open Source Software" *Journal of computational fluids engineering*, Vol.15(3), pp. 46-53.
- (18) <http://www.dfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS/CFD/MSc/> Phd course in CFD with OpenSource software.
- (19) Favero, J.L., Secchi, A.R., Cardozo, N.S.M., Jasak, H., 2001, "Viscoelastic flow analysis using the software OpenFOAM and differential constitutive equations" *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 165, pp. 1625-1636.
- (20) Holmesa, L., Faverob, J., Osswald, T., 2012, "Numerical simulation of three-dimensional viscoelastic planar contraction flow using the software OpenFOAM" *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 37, pp. 64-73.
- (21) Favero, J., L. Nilo, Cardozo, N. S. M., Secchi, A. R., Jasak, H., 2010. "Simulation of Free Surface Viscoelastic Fluid Flow Using the viscoelastic InterFoam Solver" *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 31-36.