

단축압출 공정에서의 혼합성능 증진을 위한 카오스 스크류 개발에 관한 연구

김시조* · 권태현**

*안동대학교 기계공학과, **포항공과대학교 기계공학과
(1996년 2월 16일 접수)

Study on Development of a Chaos Screw for Enhancing the Mixing Performance in Single-Screw Extrusion Processes

S. J. Kim* and T. H. Kwon**

*Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology
P.O.Box 125, Pohang 790-600, Korea
(Received February 16, 1996)

요 약

단축 압출 공정에서 혼합 증진 장치로 사용될 수 있는 새로운 스크류("카오스 스크류"라 명명함)가 본 연구를 통하여 개발되었다. 스크류의 채널을 따라가면서 정규유동에서 존재하는 폐쇄 유선을 깨뜨리기 위하여 배리어를 공간상에서 주기적으로 배치하여 카오스 혼합을 일으키는 것이 새로운 스크류 설계의 기본적인 아이디어이다. 본 논문에서는 단축 압출기상에서의 카오스 혼합에 관한 기본 역학 구조를 설명하였고 카오스 스크류를 사용하여 실험적으로 카오스 혼합을 관찰하였다. 단축 압출기에서의 기존 스크류와 비교하여 카오스 스크류를 사용하였을 경우 혼합성능이 월등하게 증진됨을 실험적으로 얻은 혼합 형태로 부터 알수 있었다. 또한 카오스 스크류는 특히 출원된 다른 혼합 장치들에 비하여 형상이 간단하여 제작비가 저렴하고 스크류 특성이 우수하며 수치해석적 면에서 스크류 특성, 체류시간, 변형 척도등을 쉽게 예측할 수 있는 장점이 가진다.

Abstract—In the present study, we have developed a new screw (termed "Chaos Screw") as the mixing-enhancing device for the single-screw extrusion process. The basic idea in the new screw design lies in the spatially periodic barriers inserted in the channel to break closed streamlines in regular flows, which induces chaotic mixing. The present paper describes the basic mechanism of the chaotic mixing in a single-screw extruder and presents experimental evidence of the chaotic mixing using the Chaos Screw. Experimental mixing patterns due to the chaotic flow clearly indicate that the chaos screw drastically enhances the mixing performance compared with the conventional screw in a single-screw extruder. In addition, the present chaos screw has many advantages over the previously patented screw mixing devices: easiness in manufacturing, thus low cost, and high screw characteristics and finally from the computational viewpoint, easy numerical predictions of screw characteristics, residence time and mixing measure.

Keywords: Single-Screw Extruder, Chaos Screw, Mixing, Chaos, Chaotic Flow, Spatially-Periodic Flow, Deformation Measure, Screw Extrusion.

1. 서 론

단축 압출기(single-screw extruder)와 쌍축 압출기

(twin-screw extruder)는 여러 산업 분야에서 고분자 재료, 복합 재료, 분말 재료 등 신소재의 개발과 더불어서 각종 재료의 혼합 장치로서 널리 사용되고 있다. 단

축 압출기는 쌍축 압출기에 비하여 가격이 저렴한 장점이 있는 반면에 혼합 성능이 뒤떨어지는 단점이 있다. 실제 산업체들은 경제적 측면 때문에 가격이 저렴한 단축 압출기를 쌍축 압출기보다 훨씬 많이 사용하고 있는 실정이다. 따라서 단축 압출기의 단점인 혼합 성능을 개선할 수 있다면, 가격이 저렴하면서도 우수한 혼합 성능을 갖춘 혼합기로서의 단축 압출기가 개발될 수 있는 것이다. 이러한 점에서 단축 압출기의 구조를 변경시키지 않으면서도 단축 압출기의 혼합 성능을 증진시킬 수 있는 스크류의 개발은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

기존의 보통 단축 압출기내에서의 유동의 혼합(mixing)은 정규 층류 혼합(regular laminar mixing)이라 할 수 있다. 보통 정규 층류 유동의 경우 혼합의 지표로서 변형특성 DC(Deformation Characteristics)가 제안되었으며[1] 또한 최근에 스크류 압출 공정중에서 일어나는 3차원 유동에 대하여, 운동역학이 적절히 고려된 수정된 변형특성(Modified Deformation Characteristics)을 새로운 변형척도로 제안하였다[2,3]. 기존의 변형특성과 달리 수정된 변형특성은 두가지 연속적인 평균개념을 적용하여 길이변형률(length stretch rate)로 부터 정의하였다[3]. 지금까지의 혼합에 관한 연구결과로부터 재료입자는 압출기 안에서 변형을 일으키는데 이 변형에 의한 혼합정도(degree of mixing)는 압출기의 길이 방향으로 선형적으로 증가하고 있음을 알게되었다[1-4]. 이러한 사실은 단축압출기 내부에서의 혼합이 정규 층류 혼합 때문이며 단축압출기에서의 혼합 혹은 변형이 시간 또는 압출기의 길이 방향으로 선형적으로 증가한다는 사실은 단축 압출기에서의 혼합성능의 한계를 뜻하며 이를 극복하기 위하여는 압출기 내에서의 유동이 카오스 유동(chaotic flow)이어야 한다. 따라서 스크류의 설계에 있어서 스크류특성을 좋게 유지하는 범위내에서 기하학적 구조를 변경하여 카오스혼합(chaotic mixing)이 발생되어 혼합성능이 증진되는 방향으로 연구가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 카오스혼합(Chaotic Mixing)이 발생되어 혼합성능을 증진시킬 수 있는 스크류 개발에 관한 연구로서 공간주기 카오스 유동의 개념에 근거하여 단축 압출기의 성능이 증진되는 새로운 스크류 형상을 제안하고 이것을 카오스 스크류라 명명한다. 이러한 카오스 스크류 설계개념에 대한 기본적인 원리를 설명하고 카오스 스크류의 시제품을 제작하여 혼합성능 향상에 관한 실험

을 수행하고 기존의 스크류를 사용한 실험결과와 비교 분석하였다.

2. 기존의 혼합 성능 증진

2.1 단축 압출기의 구조 및 장점

일반적으로 스크류 압출기는 단축 압출기와 쌍축 압출기 또는 단축 압출기로 분류된다. 쌍축 압출기의 형상은 매우 복잡한 반면 단축 압출기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 비교적 간단하다. 그로 인해 단축 압출기의 장점은 쌍축 압출기에 비해 값이 싸고 설계하기가 쉽다는데 있다. 또한 단축 압출기의 기본적인 작동은 비교적 간단하다. 즉, 베럴 내부에서 스크류가 회전할 때, 가공 재료는 호퍼에서 다이 쪽을 향해 나아 간다. 이 때 재료는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 안내 영역(feed zone), 압축 또는 천이 영역(compression or transition zone) 및 혼합 영역(metering or melt conveying zone)을 거쳐 진행할 것이다. 모든 고체 알갱이는 압축 영역을 지나면서 녹게 되고, 그 후 혼합 영역에서 혼합이 시작된다. 혼합 영역에서의 채널(channel) 또는 유통로의 단면은 Fig. 1 또는 Fig. 2에 나타난 것처럼 직사각형 형상으로 비교적 간단하며 이 단면의 폭과 높이, 즉 단면종횡비(aspect ratio)가 기존 스크류에서 중요한 설계 변수가 된다.

2.2 카오스의 개념이 배제된 혼합 증진

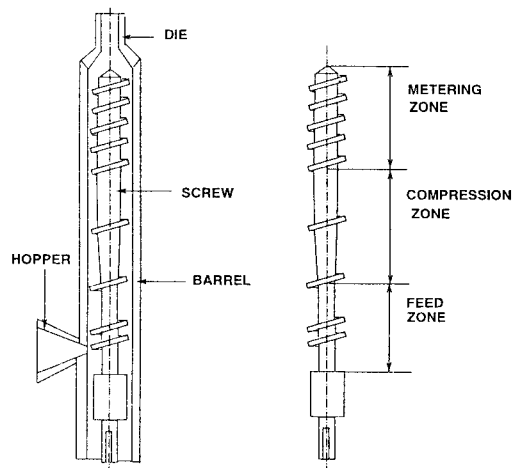


Fig. 1. Schematic diagram of the conventional single-screw extruder.

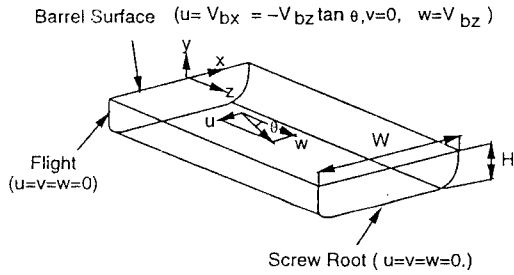


Fig. 2. Geometric model of the single-screw extruder, ignoring the curvature effect.

카오스의 개념을 고려하지는 않았지만, 산업체에서 단축 압출기의 혼합 성능을 향상시키기 위하여 개발된 장치로서 관련 특허가 많이 출원되고 있다. 핀 형태의 혼합 장치가 대표적인 그 예이며 이 장치에서는 스크류 표면 또는 베럴 표면에 삽입된 핀이 유동에 외관을 일으켜서 혼합 형태를 복잡하게 하여 혼합 성능이 증진된다. 이러한 핀 형태의 압출기는 최근까지 상당히 인기가 있었고 그 형상은 많은 연구자들에 의해 출원된 다른 특허들에 비해 구조가 비교적 간단하다. 이러한 핀-베럴 압출기의 전형적인 특허로서 특허번호 U.S. 4696575 및 4178104를 들 수 있다. 이 장치에는 다수의 핀을 내장하고 있고, 이 핀들은 스크류 밑 면까지 내려와 있으며 스크류 회전시 핀에 의한 걸림을 방지하기 위해 스크류 플라이트(flight)에 홈을 파거나 스크류 피치를 크게 하였다.

최근 단축 압출기의 혼합 이론에 따르면 중간 계면의 방향성(orientation of interfacial planes)이 혼합의 핵심적인 원리이다. 이러한 면에서 볼때, 핀-베럴 스크류 압출기는 압출기의 채널에서 핀의 작용으로 기존의 압출기보다 뛰어난 혼합 성능을 얻을 수 있는 장치라고 볼 수 있다. 그러나 스크류 플라이트에의 홈의 도입은 홈이 없는 보통의 스크류 플라이트와 비교하여 스크류의 홈이 있음으로써 스크류 플라이트가 유체를 밀어 주는 효과가 떨어져 스크류 특성(Screw Characteristics: SC)을 나쁘게 한다. 스크류 압출기를 설계하는데 있어, 스크류 특성(SC)은 매우 중요한 설계 요소로서 고려되어야 하는데[5], 핀-베럴 스크류 압출기는 빈약한 스크류 특성(SC)을 가지고 있다고 볼 수 있다.

핀-베럴 스크류 압출기 이외에도 기하학적 형상을 복잡하게 하여 혼합 성능을 증가시키는 여러 종류의 특허가 출원되었는데 대표적인 예로 U.S. 4779989 및 5178458 등을 들 수 있다. 이와 같은 특허들과 같이 스크류 형상을

여러 형태로 복잡하게 수정함으로써 많은 다른 형태의 스크류 채널을 생각할 수도 있겠지만 그것들은 본 연구의 주제인 카오스 유동의 개념에 근거를 두지 않으므로 더 이상의 구체적인 거론은 여기서 생략하기로 한다.

3. 카오스 혼합에 의한 카오스 스크류

3.1 카오스 혼합

지난 이십여 년간 정상 삼차원 유동에서의 혼합 증진 방법으로, 카오스 유동으로 인하여 혼합성능을 증진시킬 수 있음이 보고되어져 왔다. 즉, 역학계와 카오스의 새로운 개념에 근거하여, Aref[6]는 크리핑 유동의 혼합에 대한 흥미로운 주제를 다루었다. 삼차원 유동의 경우 Dombre 등은 ABC(Arnold, Beltrami, Childress) 유동에서 카오스의 수치해석적 증거를 제시하였다[7]. 최근 Ottino 등은 카오스 혼합을 여러 형태의 이차원, 삼차원 유동에 성공적으로 적용하여 카오스 분야에 크게 이바지하였다[8,9,11,12]. 카오스 개념에 의거한 혼합 장치로는 Ottino에 의해 개발된 EHAM(eccentric helical annular mixer)[8], Khakhar 등에 의해 개발된 PPM(partitioned pipe mixer)[9], Jones와 Thomas와 Aref에 의해 개발된 TP(twist pipe)[10] 등이 있다. 이상과 같은 연구 결과를 종합하여 보면, 카오스 혼합에 관한 삼차원 유동의 경우, 카오스 혼합은 두가지 형태의 카오스 유동에 의하여 발생된다. 즉, 1) 시간주기 유동(time periodic flow)으로부터의 것과 2) 공간주기 유동(spatially periodic flow)이 있을 수 있다. EHAM이 시간주기 유동, PPM이 공간주기 유동에 의하여 카오스 혼합이 발생하는 대표적인 장치이다. 그러나, PPM과 EHAM의 구조는 스크류 압출기에 적용하기에는 적합하지 않다.

본 연구에는 공간주기 카오스 유동의 개념에 근거하여 단축 압출기의 성능을 증진시키는 새로운 스크류 형상을 제안하고(카오스 스크류라 명명함) 새로운 스크류 설계와 새로이 설계된 카오스 스크류를 통한 혼합 성능 증진에 대하여 논의할 것이다.

3.2 카오스 스크류의 설계 개념

기존의 단축 압출 스크류내에서의 정규 층류 유동에서는 변형 정도가 시간 또는 스크류 길이 방향에 대해 선형적으로 증가하나[1-4], 카오스 혼합에 대하여 앞절에

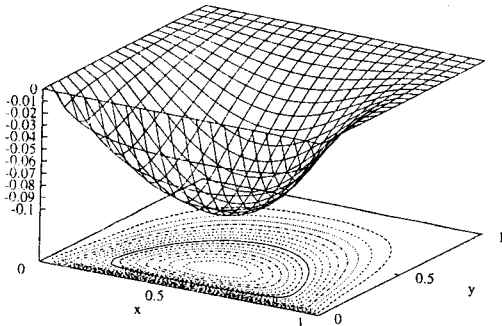


Fig. 3. Typical patterns of stream lines over the entire cross section of the channel.

서 설명한 바와 같이 카오스 유동에서는 변형 정도가 지수함수적으로 급격하게 증가한다[6-12]. 따라서 우수한 혼합 성능을 나타내는 카오스 혼합이 단축압출기에 도입되는 카오스 스크류의 기본 설계 및 설계 변수에 대하여 논의 하고자 한다.

Fig. 2는 압출기 내부 공간을 도시한 것으로 베럴과 스크류로 둘러싸인 3차원 공간상으로 유체입자가 x-y 단면상에서 순환 유동을 하면서 z 방향, 즉 압출기 다이 쪽 방향으로 흘러 나간다. x-y 단면상에서 2차원 순환 유동을 수치해석을 통하여 구한 대표적인 유선(stream line)의 모양이 Fig. 3에 나타나 있는데, 이웃하는 두 유선으로 둘러싸인 부분(일명 셀이라 함[1-4])에 존재하는 유체 입자는 다른 셀로 이동하지 못하여 혼합 정도가 카오스 유동에 비해 현저히 낮아진다. 카오스 유동을 발생시키기 위하여는 시간적 혹은 공간적으로 속도장을 주기적으로 변화시켜야 한다.

이차원 덕트 유동의 경우 외부 경계조건을 시간 주기로 반복하여 변화시켰을때 속도장이 주기적으로 변화되어 현저한 카오스 혼합이 발생된다[11]. 이와 같은 현상의 대표적인 이유로 셀의 가장 안부분에 해당하는 위치(elliptic 포인트)가 시간 주기의 외란으로 인하여 다른 위치로 크게 이동하여 시간적으로 속도장의 변화가 심하게 일어나기 때문이다. 만약 스크류의 속도를 시간 주기적으로 가변하거나 스크류 길이방향으로 압력 구배를 시간 주기적으로 변화시킨다면 단축 압출 공정에서도 기존 스크류의 설계 변경없이도 카오스 혼합이 발생할 수 있다. 그러나 이와같은 경우 토출량의 변화로 인한 제품의 품질 보증이 어렵게 되며 또한 이러한 공정조건의 변화에도 불구하고 elliptic 포인트의 위치 변화가 미소하여

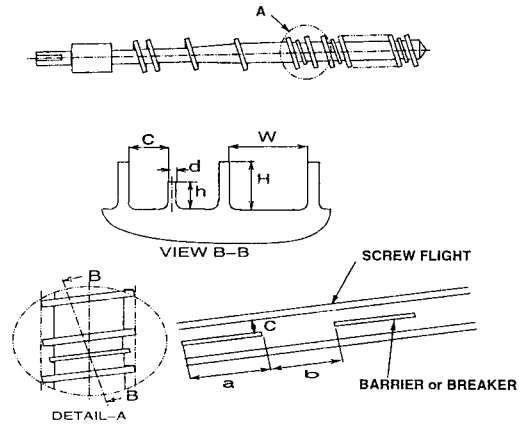


Fig. 4. Conceptual diagram of a chaos screw design for a spatially chaotic mixing.

혼합 성능 증가 또한 미소하여 진다.

따라서 압출 공정상에서는 시간 주기 개념으로 카오스 유동을 발생시키는 방법은 별로 효과적이지 못하다. 이러한 점을 고려하여 볼때 단축 스크류에서 카오스 유동을 얻어내는 방법으로 PPM처럼 공간주기 유동을 생각하여 볼수 있으며 이러한 공간주기 유동을 얻기 위해 단축압출 공정에 적합한 새로운 스크류 설계를 제안한다.

3차원 공간주기 유동을 생성시키기 위하여 Fig. 4에 나타낸것처럼 스크류의 유통로 방향을 따라가면서 기존 스크류 공간상에 배리어(barrier)를 공간 주기적으로 삽입하는 것이 새로운 스크류 설계의 기본적인 착상이다(카오스 스크류라 명명함). 카오스 스크류 상에서는 배리어가 존재하는 공간과 배리어가 존재하지 않는 공간, 즉 Fig. 4에서 (a,b)가 하나의 공간 주기 단위가 된다.

Fig. 5는 이러한 공간 주기 단위에서는 생성될 수 있는 유동장의 이해를 높이기 위하여 도식적으로 나타낸 그림들이다. 우선 배리어가 존재하지 않는 공간에서는 기존 스크류에서와 같이 하나의 elliptic 포인트 주위에 Fig. 5(a)와 같이 유선이 감싸고 있다. 만약 기존 스크류 형상에 배리어를 유통로상에 위치시키면 Fig. 5(b)와 같이 두개의 elliptic 포인트와 하나의 hyperbolic 포인트로 이루어진 유동장을 생각하여 볼수 있다. 두 경우 모두 셀이라는 공간상을 벗어나지 못하고 있다.

그러나 카오스 스크류에서는 Fig. 4에서 알수 있듯이 공간 주기적으로 배리어를 설치하였으므로 유동장은 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)를 합친 복잡한 유동형태, 즉 Fig. 5(c)가 얻어진다. 좀더 구체적으로 설명하면 이러

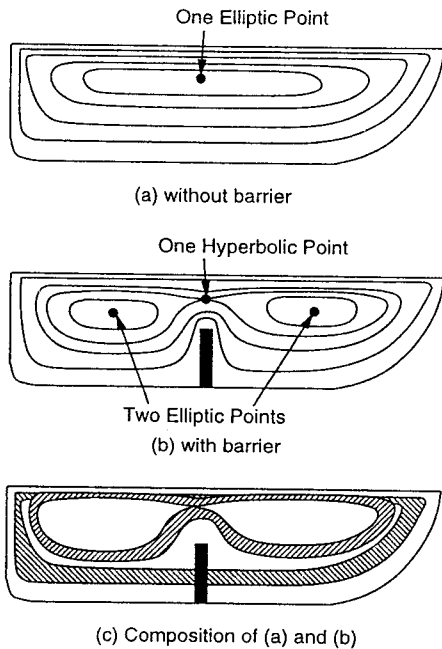


Fig. 5. Representation of the spacially periodic flows: (a) without barrier, (b) with barrier and (c) possibilities of chaos by combinations of (a) and (b).

한 공간 주기 단위에서는 배리어가 존재하지 않는 공간 상에서의 유동장을 배리어에 의하여, 즉 두개의 elliptic 포인트와 하나의 hyperbolic 포인트 구조로 이루어진 유동장에 의하여 깨뜨려지고 이와 같이 깨뜨려진 유동장이 배리어가 없어지면 다시한번 하나의 elliptic 포인트 구조로 된 유동장에 의하여 깨뜨려 짐으로서 하나의 공간 주기 유동이 형성되고 스크류 길이 방향으로 주기적으로 반복되면서 유체입자가 Fig. 5(a) 및 Fig. 5(b)의 경우와 달리 일정한 셀 주위를 벗어 나면서 유통로 단면 전체로 움직인다. 이것이 대표적인 카오스 유동의 한 형태이며 유체의 방향성이 공간 주기적으로 급격하게 재배치되기 때문에 변형 정도가 지수 함수적으로 증가하게 된다. 따라서 외부의 시간주기 조건이 없다 하더라도 기하학적으로 스크류 채널 구조를 공간 주기 형태로 만들어 카오스 유동을 쉽게 얻을 수 있고, 기존의 스크류의 간단한 구조 변경을 통하여 일반적인 압출기에서와는 달리 카오스에 의하여 혼합 성능이 증진된다.

지금부터 카오스 스크류의 설계 변수에 대하여 설명하고자 한다. 기존 스크류의 경우에는 기하학적 설계 변수

로 Fig. 2에 보인바와 같이 스크류의 폭(W), 높이(H)를 들수 있으나 카오스 스크류의 경우에는 이외에도 Fig. 4에 나타난 것과 같이 배리어의 두께(d), 높이(h), 배리어가 존재하는 영역(a), 배리어가 존재하지 않는 영역(b), 채널 단면상에서의 배리어 위치(c) 등을 들수 있다. 만약 W, H, h, c 및 d가 고정되었을때 유통로 방향으로 공간 주기 단위 (a,b)가 연속적으로 반복되며 (a, b)-(a,b)-(a,b)...로 표시될 수 있다. 그러나 배리어가 존재하는 영역(a)에서 a, h, c 및 d가 가변되고 배리어가 존재하지 않는 영역(b)에서 b가 가변된다면 여러종류의 공간 주기 단위를 가지는 카오스 스크류를 만들수 있다. 어느 경우에서도 배리어가 존재하는 영역과 존재하지 않는 영역이 주기적으로 반복되어야 하며 이것이 카오스 스크류의 기본 설계 개념이며 설계 변수가 된다. 그리고 이것들은 압출기 채널의 높이(H)를 특성길이로 하여 무차원화 하여 실험과 수치해석적 방법을 통하여 유동을 구체적으로 연구하고자 한다면, 새로운 카오스 스크류 설계의 최종 목적이라 할 수 있는 최적의 W/H, h/H, c/H, (a/H,b/H)등을 결정할 수 있다.

3.3 카오스 스크류의 장점

카오스 혼합에 기초한 새로운 설계와는 대조적으로 혼합 성능 증가의 목적으로 기존 특허에 출원된 스크류들은 스크류 형상이 복잡할 수록 혼합 성능이 우수하다는 착상에 근거하고 있다. 그러나 이들 혼합장치의 복잡한 형상때문에 가질수 밖에 없는 가장 큰 문제점은 제작하기가 힘들다는 것이다. 한편 유통로 방향으로 공간주기의 형상을 갖는 카오스 스크류는 기존 스크류에 배리어만을 추가함으로써 기존의 특허 스크류에 비해 제작하기가 훨씬 쉽다. 또한 복잡한 형상에서는 스크류 설계에 중요한 스크류 특성(screw characteristics), 체류 시간(residence time), 혼합 특성(mixing measure) 등을 수치 해석적으로 예측하기가 어렵다. 그러나 새로이 설계된 스크류에서는 기하학적 구조가 간단하기 때문에 공간주기 채널 형상에 관련한 매개변수 및 다양한 무차원량에 대하여 효과적으로 스크류 특성, 체류 시간, 혼합 특성등을 예측할 수 있다. 또한 카오스 스크류는 스크류 플라이트와 유사한 형상을 사용하였기 때문에 스크류 특성, 즉 압출 성능이 기존의 특허 스크류에 비해 우수하다. 예를들면, 핀-배럴 압출기에서는 스크류 플라이트에 홈을 내었고 다른 특허 장치에서는 혼합 영역에서

구조가 복잡하여 압출 성능이 기존 스크류에 비하여 현저하게 떨어질 수 밖에 없다.

따라서 카오스 스크류라고 칭한 본 새로운 스크류는 기존의 특허 스크류에 비해 i) 제작이 용이하고, ii) 따라서 가격이 저렴하며, iii) 스크류 특성이 우수하며 iv) 수치해석적으로 스크류 특성, 체류시간 분포, 혼합 특성을 예측하기 쉽다는 장점을 갖고 있다.

다음절에는 카오스 스크류의 혼합 성능 증진을 확인하기 위하여 카오스 스크류의 시제품을 제작하여 삼차원 공간주기 유동에서의 혼합 형태를 실험적으로 해석하고자 한다.

4. 실험적 고찰

압출공정에서 카오스 스크류의 혼합 상태를 실험적으로 확인하기 위하여 앞에서 언급한 공간 주기 유동의 개념을 기초로 하여 제작된 시제품의 설계 치수가 Fig. 6에 나타나 있다. 카오스 스크류의 혼합 성능을 비교하기 위하여 기존의 스크류도 제작하였으며(앞으로 보통 스크류라 함) 이때 일반적인 스크류의 설계치수는 카오스 스크류와 동일하며 여기서 배리어는 물론 존재하지 않는다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 본 연구에서 설계된 카오스 스크류는 스크류 반경, 헬릭스각(helix angle), 안내 영역, 압축 영역, 혼합 영역이 각각 3 cm, 12°, 21.

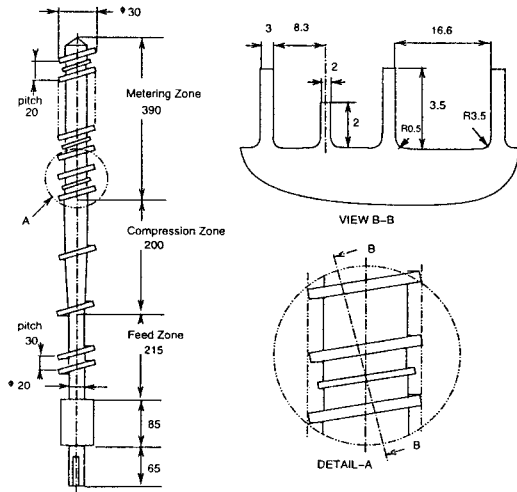
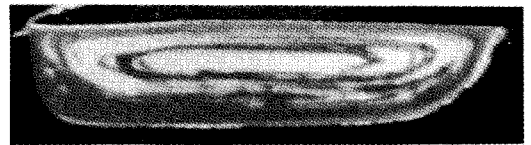


Fig. 6. Real geometry of the typical Chaos-Screw designed in the present study with the real dimensions (No Scale, units in mm).

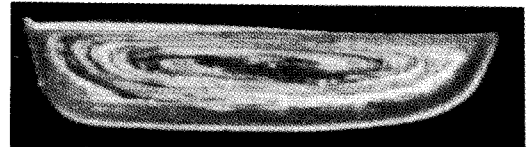
5 cm, 20.0 cm, 39 cm로 전체 길이를 95.5 cm가 되며 보다 명확히 혼합 거동을 관찰하기 위해서 가능한 한 혼합 영역을 크게 하였다. 스크류 채널의 높이(H)는 0.35 cm, 단면 종횡비(W/H)는 4.5에 해당된다(단면적을 H로 나누어 얻어진 값). 배리어는 채널의 중앙에 위치하며 폭과 높이는 각각 0.2 cm이고 배리어가 위치하는 영역(a)과 위치하지 않는 영역(b) 모두 27.4 cm이므로 중요한 무차원 설계 변수로 공간 주기는 $(a/H, b/H) = (27.4, 27.4)$, $h/H = 0.57$ 이 된다.

가공 재료로 LDPE 를 사용하였으며 다음과 같은 수정된 크로스 모델(Modified-Cross model)로 점성 계수를 얻었다[13].

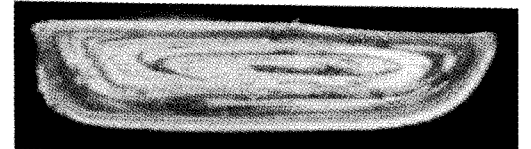
$$\mu(\dot{\gamma}, \theta) = \frac{\eta_0}{1 + C(\eta_0 \dot{\gamma})^{1-n}}$$



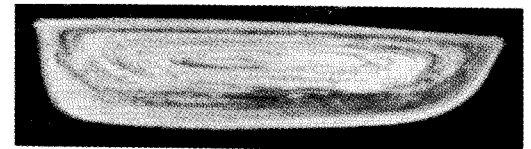
(a) $l = 0$ (mm)



(b) $l = 120$ (mm)



(c) $l = 240$ (mm)



(d) $l = 360$ (mm)

Fig. 7. Mixing patterns on the cross-section of the extruder channel for the standard screw at several positions from the initial stage(a) to the final stage(d) of the metering zone(screw speed : 5.6 rpm); 1(mm) : length along the screw axis from the beginning of the metering zone.

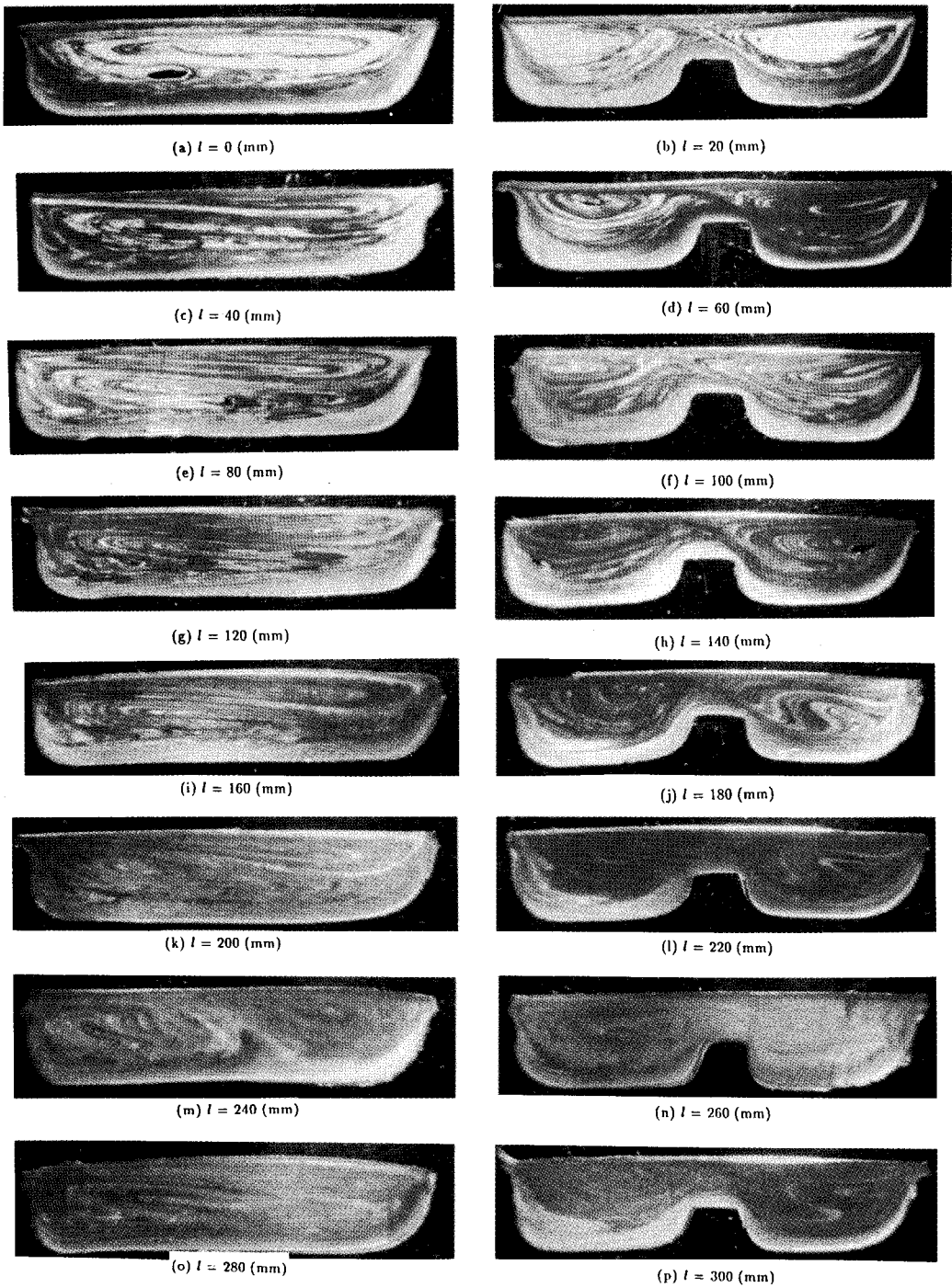


Fig. 8. Mixing patterns on the cross-section of the extruder channel for the Chaos-Screw taken from the center of the no-barrier zone and the barrier zone, alternately, along the down channel direction (screw speed : 5.6 rpm); 1: same as Fig. 7.

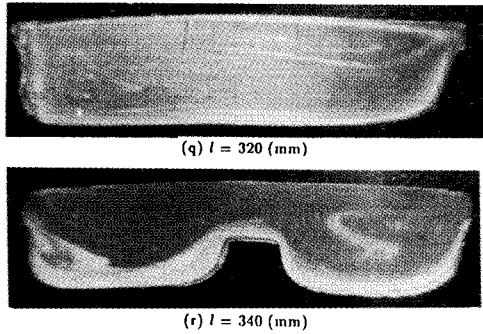


Fig. 8. Continued.

여기서 $\eta_0 = Be^{\Theta/\Theta_0}$, Θ 는 온도이다. 실험적으로 구한 상수값들은 $B = 5.76651E-02$ [kg/(m · sec)], $\Theta_0 = 5817.74$ [°K], $C = 1.44540E-03$ [(kg/(m² · sec))ⁿ⁻¹], $n = 0.35$ 이다.

압출 공정중에 사용한 다이는 길이 7 mm 직경 1.5 mm이며 스크류 회전속도는 5.6 rpm이고 가능한 등온에서 실험하기 위해 안내영역에서의 온도를 180°C로 고정시키고, 압출영역과 혼합영역 그리고 다이에서는 모두 190°C를 유지하였다.

실험적인 관찰은 새로이 설계된 스크류와 보통 스크류의 혼합거동에 초점을 맞추었다. 혼합 거동을 관찰하기 위해 사용한 염료는 LDPE와 비슷한 유연학적 특성을 나타내는 붉은색 염료를 사용하였다. 압출 공정이 정상 상태에 이른 후 작동을 멈추고 완전히 냉각 시켜 스크류 채널 안에 붙어 있는 나선모양의 플라스틱을 떼어 낸다. 참고로 본 실험에서는 압출기 밖으로 냉각된 플라스틱 재료를 쉽게 떼어낼 수 있도록 개방 형식의 베럴을 사용하였다.

지금부터 공간주기로 인한 유동 형태의 변화에 주목해 보기로 하겠다. 보통 스크류와 카오스 스크류를 사용하여 실험에 의해 관찰된 유동 형태가 Fig. 7, 8에 나타나 있다. 이들 사진들에서 나타난 시편들은 나선 형상의 플라스틱을 혼합 영역이 시작되는 부분부터 스크류 채널이 끝나는 부분까지 여러 위치에서 얇게 썰어 광학 현미경으로 여섯 배 확대하여 얻은 것들이다.

보통 스크류를 사용하였을 경우, 혼합 영역이 시작하는 부분에서 스크류 끝 부분까지에서 얻은 전형적인 시편이 Fig. 7에 나타나 있다. 이 경우 기존의 압출 공정에서 예상되는 쉘의 형태(Fig. 5(a)참조)를 쉽게 관찰할 수 있으므로 본 실험에서 수행된 유동 가시화 기법이 얼

마나 성공적이었는지를 알 수 있다. 전체적인 쉘 형상은 유통로를 따라가면서 변하지 않는데, 이것은 한 쉘 안의 입자는 다른 쉘로 이동하지 않음을 나타낸다. 또한 쉘의 두께는 유통로를 따라 점점 얇아짐을 알 수 있다. 이러한 쉘의 두께는 변형 정도, DC[1-4]와 밀접히 연관되어 있으나 카오스 유동에서처럼 쉘 두께 감소 정도가 Fig. 7에서 알 수 있듯이 지수함수적이라고 판단하기 어렵다. 스크류 회전속도, 다이 형상을 바꾸어서 실험한 경우에도 이와 유사한 결과를 얻었다.

Fig. 8은 카오스 스크류를 사용하여 얻은 실험 결과이며 모든 실험 조건은 위의 경우와 동일하다. Fig. 8에 보이는 사진들은 길이 방향으로 배리어가 있는 영역의 중간 지점과 배리어가 없는 영역의 중간 지점에서 떼어낸 시편으로부터 얻어낸 혼합 패턴이며 이들 결과들을 자세히 관찰해 보면, 유통로를 따라 가면서 붉은 염료가 점점 균일하게 퍼지고 이와 동시에 그 강도는 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 카오스 스크류의 공간적 주기성으로 인해 혼합 성능이 증진됨을 보여주는 결과이다. 혼합 영역이 시작되는 부분, 즉 배리어가 없는 첫 단면에서는 보통 스크류에서 관찰된 쉘을 볼 수 있으나 Fig. 8(b), (d)에서 보는 바와 같이 배리어 왼쪽 위 중간 부분에서 소위 섬(island)이라는 것을 관찰할 수 있다. 쉘이나 섬(island)과 같은 닫힌 궤도가 유통로를 따라 가면서 계속해서 유지된다면 캄토러스(KAM(Kolmogorov-Arnold-Moser)torus)[8]라고 알려진 불변 튜브(invariant tube)가 나타나게 된다.

그러나, 본 실험에서는 이러한 류의 쉘들과 섬들이 유통로를 따라 대단히 빠르게 소멸됨을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 캄 튜브가 나타나지 않으며, 대신, 유동 형태가 유통로를 따라가면서 두개의 불변체군(invariant manifolds), 즉 하나는 배리어가 없는 영역(예: Fig. 8(e))의 중간 부분에서 다른 하나는 배리어가 있는 영역(예: Fig. 8(f))의 중간 부분에서 주기적으로 반복되고 있다. 만약 Fig. 8에서 유동 형태의 변화를 주의있게 관찰하면, 두개의 서로 다른 불변체군 내부에서 유체 입자가 늘림(stretch)과 접힘(folding)이 연속적으로 반복하여 일어나고 있는데 이로 인하여 혼합 성능이 급격하게 증진된다. 따라서 본 카오스 스크류는 공간 주기적으로 이러한 서로 다른 불변체군에 의하여 늘림과 접힘을 반복하는 특징을 지니고 있다. 스크류 회전속도, 다이 형상을 바꾸어서 실험한 경우에도 이와 유사한 결과를 얻었다.

5. 결 론

보통 스크류를 사용하는 일반적인 압출 공정에서는 유체 입자의 변형 정도는 시간 또는 스크류 길이에 대하여 선형적으로 증가한다. 본연구에서는 기존 스크류의 간단한 수정을 통해 단축 압출 공정에서의 혼합 성능을 증진시키는 카오스 스크류를 개발하였다. 새로이 개발한 카오스 스크류 설계의 기본적인 아이디어는 헬을 깨뜨리기 위해 스크류 채널에 공간 주기적인 배리어를 삽입하는데 이것이 카오스 혼합을 일으키게 기본 원리이다. 본 논문에서는 이러한 카오스 스크류 설계개념에 대한 기본적인 원리를 설명하였고 시제품을 제작하여 혼합성능 향상에 관한 실험을 수행하였다.

실제 실험 결과, 카오스 스크류의 경우 카오스 유동이 발생하였고 기존의 스크류를 사용한 경우보다 월등히 우수한 혼합성능을 얻을 수 있었다. 또한 공간 주기적으로 발생하는 두개의 서로 다른 불변체군 내부에서 유체 입자가 늘림(stretch)과 접힘(folding)이 연속적으로 반복하는 현상이 발견 되었다. 이것은 카오스 스크류의 공간적 주기성으로 인해 혼합 성능이 증진됨을 보여주는 결과이다. 따라서 압출 공정에서 새로이 개발한 카오스 스크류가 기존의 스크류보다 혼합성능이 뛰어나다고 결론내릴 수 있었다.

마지막으로 단축 압출 공정에서의 카오스 스크류의 장점은 혼합 성능을 증진시키기 위하여 특허 출원된 다른 혼합 장치들에 비하여 형상이 간단하여 제작비가 저렴하고 스크류 특성이 우수하며 수치해석적 면에서 스크류 특성, 체류시간, 변형특성등을 쉽게 예측할 수 있다는 데 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(921-0900-024-2)과 산업과

학기술연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. T.H. Kwon, J.W. Joo and S.J. Kim, *Polym. Eng. Sci.*, **34**, 174 (1993).
2. S.J. Kim, and T.H. Kwon, *Korean J. Rheol.*, **6**, No. 1, 60 (1994).
3. S.J. Kim and T.H. Kwon, "Measures of Mixing for Extrusion by Averaging Concepts", *Polym. Eng. Sci.*, in press.
4. S.J. Kim and T.H. Kwon, "Accurate Determination of a Deformation Measure in the Screw Extrusion Process", *Polym. Eng. Sci.*, in press.
5. S.J. Kim and T.H. Kwon, *Polym. Eng. Sci.*, **35**, 274(1995).
6. H. Aref, *J. Fluid Mech.*, **143**, 1 (1984).
7. T. Dombre, U. Frisch, J.M. Greene, M. Henon, A. Mehr and A.M. Soward, *J. Fluid Mech.*, **167**, 353 (1986).
8. J.M. Ottino, "The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos and Transport," Cambridge Univ. Press, Cambridge, (1989).
9. D.V. Khakhar, J.G. Franjione and J.M. Ottino, *Chem. Engn. Sci.*, **42**, 2909 (1987).
10. S.W. Jones, O.M. Thomas and A. Aref, *J. Fluid Mech.*, **209**, 335 (1989).
11. C.W. Leong and J.M. Ottino, *J. Fluid Mech.*, **209**, 463 (1989).
12. S.C. Jana, M. Tjahjadi and J.M. Ottino, *AIChE J.*, **40**(11), 1769 (1994).
13. R.B. Bird, R.C. Armstrong and O. Hassager, "Dynamics of Polymeric Liquids," Vol.1, Fluids Mechanics, Wiley-Interscience, New York (1987).