

저점성 SWNT 분산액 도포용 슬릿 노즐 설계를 위한 유동해석

손병철,¹곽호상,²이상현³

A STUDY ON FLOW IN A SLIT NOZZLE FOR DISPENSING A LOW-VISCOSITY SOLUTION OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES

B.C. Shon,¹ H.S. Kwak² and S.H. Lee³

A combined theoretical and numerical study is conducted to design a slit nozzle for large-area liquid coating. The objectives are to guarantee the uniformity in the injected flow and to provide the capability of explicit control of flow rate. The working fluid is a dilute aqueous solution containing single-walled carbon nanotubes and its low viscosity and the presence of dispersed materials pose technical hurdles. A theoretical analysis leads to a guideline for the geometric design of a slit nozzle. The CFD-based numerical experiment is employed as a verification tool. A new flow passage unit, connected to the nozzle chamber, is proposed to permit the control of flow rate by using the commodity pressurizer. The numerical results confirm the feasibility of this idea. The optimal geometry of internal structure of the nozzle has been searched for numerically and the related issues are discussed.

Key Words : 대면적 박막도포(Large-Area Thin-Film Coating), 슬릿 노즐(Slit Nozzle), 전산설계해석(Computational Design Analysis), 저점성 유체(Low-Viscosity Fluid), 탄소나노튜브 용액(Carbon Nanotubes Solution)

1. 서 론

단일벽 탄소나노튜브(Single-Walled Carbon Nanotubes, 이하 SWNTs)는 기계적 강도와 전기 및 열전도도, 광학적 투과성 면에서 매우 우수한 성질을 가진 신물질이다[1-2]. 최근 SWNT의 우수한 물성을 활용할 수 있는 응용소자를 개발하려는 노력이 활발하게 이루어지고 있는데 이미 SWNT 박막을 투명전극, 터치패드, 투명히터로 사용할 수 있다는 연구성과가 보고되고 있다[3-5]. 그러나 SWNT 박막을 이용한 소자를 상용화하기 위해서는 여러 가지 해결해야 할 과제가 있는데 그 중 하나가 수십 나노미터 두께의 균일한 SWNT 박막을 양산하는 기술이다.

SWNT는 용매에 소량이 분산된 용액 형태로 제조할 수 있

기 때문에 증착과 같은 고비용 공정을 거치지 않고 상온 대기상태에서 분산액을 도포하고 수분을 증발시켜 SWNT만 잔류시키는 방법으로 박막을 만들 수 있다. 현재 SWNT 박막을 만드는 데 주로 사용되고 있는 것은 스프레이 노즐을 이용하여 SWNT 분산액을 분무화하여 기판에 분사하는 방법이다. 그러나 이 방식은 대면적 처리에 공정시간이 많이 소요되고 도포 균일도를 일정 수준 이상 높이기 어려우며, 분무량에 비하여 기판에 부착되는 SWNT 양이 적어 재료 사용 효율이 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 대안으로 떠오르고 있는 것이 일자형 노즐을 이송하여 SWNT 분산액을 도포하는 슬릿 코팅(slit coating)이다. 이 연구는 슬릿 코팅 장비에서 도포된 박막의 균일도를 결정하는 핵심 부품인 슬릿 노즐을 개발하기 위한 작업의 일환으로 수행되었다.

슬릿 노즐은 기다란 일자형 틈새 모양을 가진 유체 분사 장치의 말단 부품을 지칭한다. 원형 단면을 가진 일반 노즐이 유체 토출의 점원이라면 슬릿 노즐은 유체 토출의 선원에 해당하므로 대면적 처리가 용이한 것이 장점이다. 기술적인 과제는 노즐의 폭 방향으로 균일한 토출량을 보장하는 것이다. 슬릿 노즐은 에어 커튼, 드라이어 등 여러 가지 용도로 사용되고 있지만 디스플레이 제조공정에 적용되기 시작한 것은

접수일: 2009년 1월 13일, 수정일: 2009년 2월 26일,

게재확정일: 2009년 3월 6일.

1 정회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과, STX엔과코

2 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

3 (주)탐엔지니어링, 기술연구소

* Corresponding author, E-mail: hskwak@kumoh.ac.kr

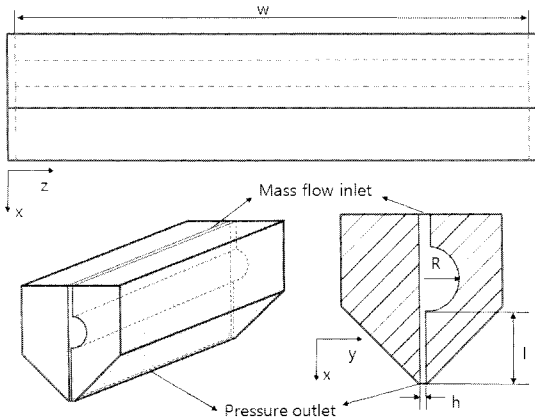


Fig. 1 The basic configuration of the slit nozzle

최근의 일이다[6]. LCD의 대면적화에 따라 스핀 코팅이나 스핀 건조가 기술적인 한계에 봉착하면서 슬릿 노즐의 이송을 기반으로 하는 코팅 및 건조 공정이 채용되고 있다[7-11]. 이미 7세대용 LCD 기판에 감광성 수지(Photoresist, 이하 PR)를 1-3 μm 두께로 도포할 수 있는 장비가 출시되어 사용되고 있다[12].

고속으로 유체를 분출하는 일반 노즐과 달리 액막 도포용 슬릿 노즐은 토출유량이 매우 작아 유동은 전형적인 층류 압력구동 유동이다. 설계해석을 위한 유동이론이 잘 정립되어 있고 전산유체역학적 방법으로 실제 장치에서의 유동에 대한 정량적인 예측이 가능하다. 틈새 간격이 일정한 슬릿 노즐에서 토출에 필요한 구동압력은 토출부의 틈새간격의 제곱에 반비례하며 토출 속도에 비례한다. PR 도포용 슬릿 노즐의 경우 토출구의 틈새간격은 수 μm 이하로 제작되고 있는데 이 경우 요구되는 구동압력은 수 bar 정도가 되어 일반적인 가압 장치로 안정적이고 정밀한 토출유량 제어가 가능하다. 따라서 균일한 PR 도포를 위한 기술적 과제는 유동 분석의 문제가 아니라 슬릿 노즐 폭방향으로 틈새 간격의 균일도를 보장하는 가공 및 제작의 문제로 귀결된다.

이 연구는 도포 대상인 SWNT 분산액이 가진 PR과는 다른 두 가지 중요한 성질 때문에 시작되었다. 첫째 단일 액상 물질에 가까운 PR과는 달리 SWNT 분산액에는 직경이 수 나노미터 이하이고 길이가 수십 나노에서 수 마이크로 미터에 이르는 SWNT가 분산되어 있다. 유로의 수력직경이 작아지면 분산된 SWNT가 묻쳐 도포 균일도에 영향을 주거나 경우에 따라서는 유로를 막는 문제가 발생한다. 이 때문에 틈새 간격을 10 μm 이상으로 크게 확보하여야 한다. 두 번째 현재 사용되고 있는 SWNT 분산액의 농도는 3% 미만으로 물성이 용매인 물과 거의 유사하기 때문에 점성계수는 PR에 비하여 1/40에 불과하다. 틈새 간격의 증가와 점성계수의 저하로 인하여

PR 코팅에 사용하고 있는 구조의 슬릿 노즐을 그대로 사용할 경우 토출에 필요한 구동압력이 수천 Pa 정도에 불과하여 기존의 가압장치로는 정밀 유량제어가 어렵다.

이 연구의 궁극적 목적은 도포 대상인 SWNT 분산액의 특성을 고려하여 안정적이고 균일한 도포가 가능한 슬릿 노즐을 개발하는 것이다. 이 논문에서는 점성유동의 이론을 적용하여 SWNT 분산액 도포용 슬릿 노즐을 설계하고 전산유체역학적 방법으로 그 타당성을 검증하였다. 또한 수치실험을 통하여 여러 가지 기하학적 인자가 유동에 미치는 영향을 파악하여 설계 인자를 결정하는데 필요한 지침을 제공하였다.

2. 해결과제 및 접근 방법

Fig. 1은 연구대상인 대면적 코팅용 슬릿 노즐의 기본적인 구조를 보여주고 있다. 노즐의 내부는 크게 두 개의 유로구조로 구성된다. 노즐의 종단부는 폭이 w , 틈새간격이 h , 길이가 l 인 박막 채널형 유로이며 이 유로는 폭 방향으로 일정한 압력을 만들어 주기 위하여 설치한 반경이 R 인 반원 단면의 공동에 연결되어 있다. 이 연구에서 사용한 시험용 슬릿 노즐의 기본적인 제원은 $h=50 \mu\text{m}$, $w=100 \text{ mm}$ 이다. 노즐을 $V=1 \text{ m/min}$ 의 속도로 이송하면서 $t=1 \mu\text{m}$ 의 두께로 SWNT 분산액을 만들고 수분을 증발시켜 50 nm \pm 10% 두께로 SWNT를 잔류시키는 것이 공정의 최종목표이다.

위에서 제시한 제원과 공정조건으로부터 노즐을 통과해야 하는 SWNT 분산액의 유량 Q 와 노즐 종단부의 평균유속 U 를 구하면

$$Q = wtV = 1.667 \mu\text{l/s} \tag{1}$$

$$U = Q/wh = 0.33 \text{ mm/s} \tag{2}$$

도포대상은 물을 용매로 사용하는 농도가 3% 미만인 SWNT 분산액으로 물성치는 물과 거의 유사하다. 따라서 물의 밀도($\rho=10^3 \text{ kg/m}^3$)와 점성계수($\mu=1.03 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)를 기준으로 노즐 종단부의 레이놀즈수를 평가하면

$$Re = Uh/\nu = 5.5 \times 10^{-2} \tag{3}$$

$Re \ll 1$ 이므로 유동은 점성이 지배적인 Creeping 유동에 해당된다. 또한 노즐 종단부의 유로의 폭과 틈새간격의 비는 $h/w=10^{-5} \ll 1$ 이므로 유동은 두 개의 무한한 수평판 사이를 흐르는 점성유동으로 볼 수 있다. 이 경우 압력에 의해 구동되는 유동은 Poiseuille 유동이라는 엄밀해로 표현할 수 있다[13].

$$u(y) = 6U \left(1 - \frac{y}{h}\right) \frac{y}{h} \quad (4)$$

$$U = -\frac{1}{12\mu} \frac{dp}{dx} h^2 \quad (5)$$

여기서 x 와 y 는 각각 유동방향과 이에 수직한 틈새 방향의 좌표를 나타내며 u 는 x 방향의 유속이고 p 는 압력이다. 이 식을 바탕으로 유동방향의 길이가 1인 채널에서 점성에 의한 이론적인 압력강하량 Δp_E 를 계산하면

$$\frac{\Delta p_E}{l} = \frac{12\mu U}{h^2} \quad (6)$$

식 (6)에서 노즐의 길이 1 cm당 압력강하량을 계산하면 16.5 Pa로 통상적인 노즐 종단부의 길이가 $l=50\text{--}100$ mm인 노즐에서 압력강하는 80-160 Pa 정도이다. 표준 대기압의 1%에 불과한 이처럼 작은 압력은 일반적으로 사용하는 분사용 가압장치의 작동범위에서도 벗어날 뿐 아니라 외부의 작은 외란이 영향을 미칠 수 있는 규모이다. 따라서 장치의 안정적 운영과 정확한 액막 두께 제어를 위해서는 기존의 가압장치에서와 같이 1 bar 규모의 작동압력으로 유량을 제어할 수 있도록 슬릿 노즐을 설계하여야 한다. 일반적인 유로에서 채용할 수 있는 가장 단순한 방법은 펌프와 같은 다공성 물질을 사용하여 추가적인 압력강하를 유발하는 것이다. 그러나 이 방법은 용매에 분산된 SWNT가 다공질의 나노 공극에 걸리는 문제가 발생하기 때문에 사용하기 어렵다. 다공성 물질을 사용하지 않으면서 1 bar 정도의 압력으로 장치를 구동할 수 있도록 압력강하를 유발하는 유동저항체를 적절히 설계하는 것이 이 연구의 일차적인 과제이다.

슬릿 노즐을 제작하기 위해서는 기본 제원으로 제시된 틈새 간격과 폭 이외에 노즐 종단 채널형 유로의 길이(l), 균일 가압을 위한 챔버의 크기(R)와 같은 형상인자를 결정하여야 한다. 또한 폭이 긴 슬릿 노즐의 경우, 설계가 적절하게 이루어졌다 하더라도 제작상의 오차나 작업중 작용하는 하중에 의해 폭 방향으로 틈새 간격의 변화가 생길 수 있으므로 그 영향을 파악하여 대비하여야 한다. 한편 50 μm 의 틈새 간격을 가진 채널은 리소그래피와 같은 반도체 공정으로 제작하기 어렵고 판재 접착이나 기계적 가공을 이용하여야 한다. 연구 수행과정에서 조사한 바에 의하면 가공 방법에 따라 채널의 형상이 유동 방향으로 직선형이 아닌 곡선형이 될 수도 있다. 전산유체해석을 통하여 결정해야 할 노즐의 형상인자와 발생 가능한 노즐 형상의 변형 및 가공법에 따른 형상 변화의 영향을 조사하여 설계지침을 제공하는 것이 이 연구의 또 하나

의 목적이다.

이 연구에서는 앞에서 논의한 기술적인 과제를 해결하기 위하여 점성유동의 이론에 기초하여 문제를 분석하고 전산유체역학을 통하여 그 타당성을 평가하였다. 레이놀즈수가 높은 난류의 경우, 문제에 따라 계산의 정확도와 신뢰성이 달라지지만 이 연구에서 다루고 있는 레이놀즈수가 매우 작은 층류 유동의 경우 수치계산의 정확도가 매우 높아 수치결과를 정량적인 평가자료로 활용하였다. 수치계산에는 상용 전산유체역학 패키지인 FLUENT 6.2을 사용하였다. 해석의 목적에 따라 슬릿 노즐의 전체 또는 일부를 계산영역을 하였으며 격자 민감도 시험을 통하여 충분한 분해능이 확인된 격자망을 사용하였다. 판성의 영향이 작아 수치기법이나 모델링의 논쟁거리가 없는 문제이므로 FLUENT가 제공하는 표준적인 수치기법, 즉 압력-속도 연동은 SIMPLE법, 대류항 계산은 1차 풍상차분법, 공간에 대한 이산화는 중앙차분법을 사용하였다. 유동경계조건으로 입구에는 질량 유량(Mass flow inlet)을 지정하고, 출구에는 대기압의 압력배출 조건을 주었으며 벽면에는 점착조건을 적용하였다. 3차원 정상상태 해법을 사용하여 유동을 계산하였으며 연속방정식과 운동량보존 방정식의 잔류오차가 10^{-6} 이하로 떨어지면 수렴한 것으로 판정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 노즐의 기본 구조

이 연구에서 고려하고 있는 슬릿 노즐의 기본 형상은 Fig. 1과 같으며 틈새 간격 h 와 폭 w 는 각각 50 μm 와 100 mm이다. 노즐 설계를 위하여 결정하여야 할 변수는 채널형 유로의 길이 l 와 균일 가압을 위한 입시 유체 저장고에 해당하는 반원 단면의 공동의 반경 R 이다. 그 영향을 파악하기 위하여 주어진 설계유량 Q 에 대하여 l 과 R 의 값을 바꾸어가면서 수치계산을 수행하였다.

먼저 채널 상류에 위치한 공동의 반경은 $R=5$ mm로 고정하고 채널의 길이 l 을 1 mm, 10 mm, 100 mm로 바꾸어가면서 계산을 수행하여 그 영향을 파악하였다. 대칭성을 고려하여 전체 유로의 반만을 해석영역으로 고려하였다. Fig. 2는 수치 계산 결과로 얻은 노즐 출구의 중앙부($z=w/2$)에서의 틈새 방향(y) 속도분포와 채널 가운데($y=h/2$)에서의 폭 방향(z) 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 2(a)의 결과에서 모든 경우, 유속분포가 두 개의 무한평판 사이를 흐르는 유동에 대한 엄밀해진 포물선형의 Poiseuille 유동과 일치함을 확인할 수 있다[13]. Creeping 유동의 경우, 입구 영역의 길이가 수직적경 정도의 크기를 가진다. 계산된 모든 경우의 채널의 길이가 틈새간격 $h=50$ μm 보다 훨씬 크므로 출구에서는 완전 발달된 유동이 나타나는 것이다. 노즐의 폭방향 유속 분포는 양 끝단

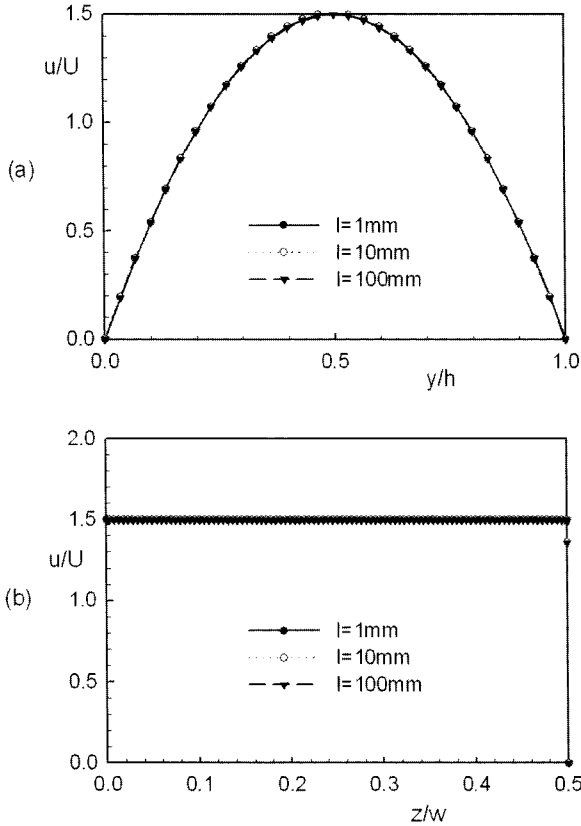


Fig. 2 Velocity profile at the exit of a slit nozzle (a) across the channel height at $z/w=0.5$; and (b) along the line parallel to the slit nozzle at $y/h=0.5$, $R=5$ mm

에 h 만큼의 경계층을 제외한 구간에서 상대편차가 0.2% 미만인 균일 유동, 즉 전형적인 Hele-Shaw 유동이 형성되었다 [13]. 출구 유동의 균일도만을 고려한다면 채널부의 길이 l 은 1 mm 이상으로 잡으면 무방한 것으로 나타났다.

Fig. 3(a)는 노즐 종단부의 채널 입구에서 채널 출구까지의 압력 변화를 도시한 것이다. 이 그림에서 종축의 압력은 식 (6)에 정리된 엄밀해인 Poiseuille 유동에서 유도한 압력강하 Δp_E 로 무차원화하였다. 엄밀해와 약간의 오차가 존재하지만 이론이 예측한 바와 같이 압력은 채널의 길이에 비례하여 선형적으로 감소하고 있다. Fig. 3(b)는 채널종단부의 중앙 ($z/w=0.5$)에서 출구 방향으로 유동 발달 과정을 보여주기 위하여 속도분포를 그린 것이다. 채널의 종단부로 유입된 유동은 $x/h=1$ 의 위치에서 완전 발달되어 Poiseuille 유동이 됨을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 3(a)에 나타난 약간의 오차는 바로 이 입구영역의 존재에 의한 것으로 볼 수 있다. 이상의 논의는 채널 종단부 설계에 Poiseuille 유동분포를 적용할 수 있음을 지적하고 있다. 문제는 압력강하의 절대량이 1 cm당 16.5

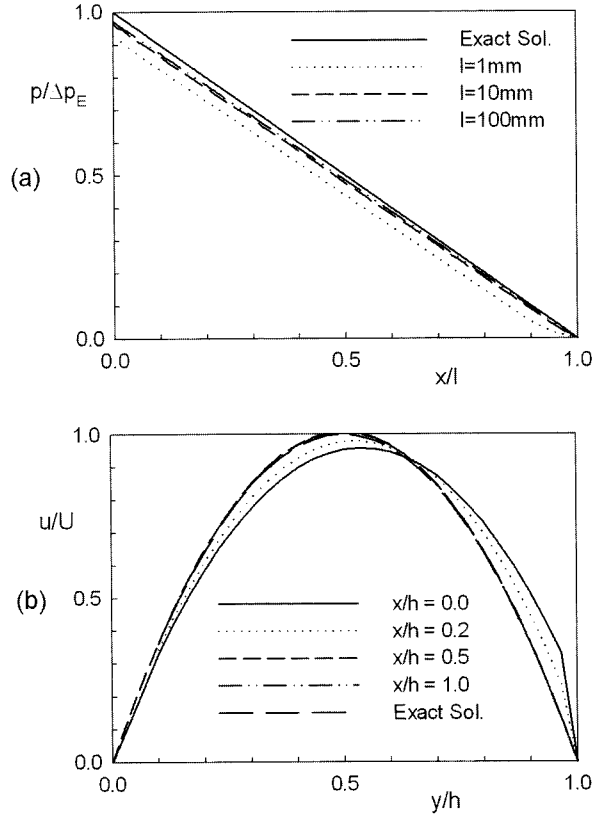


Fig. 3 (a) Pressure distribution in the terminal channel section of a slit nozzle along the line at $z/w=0.5$ and $y/h=0.5$; and (b) velocity profile across the channel height at $z/w=0.5$ for $l=10\text{mm}$, $R=0$

Pa에 불과하다는 것이다. 따라서 채널의 길이가 수 cm 정도면 채널에 용액을 공급하는 챔버의 작은 압력변화가 바로 출구유동에 영향을 주게 될 것이다.

이번에는 $l=50$ mm로 고정하고 공동의 반지름 R 을 0.1, 0.5, 1.0 및 5.0 mm로 변화시켜 가면서 계산을 수행하였다. 이 공동은 노즐의 종단 채널부보다 수력직경이 큰 공간을 만들어 노즐의 폭 방향으로 일정한 압력을 형성함으로써 채널부에 가해지는 기압력을 폭 방향으로 균일하게 유지하기 위한 장치이다. Fig. 4(a)는 공동의 중심부에서 폭(z)방향으로의 압력변화를, Fig. 4(b)는 이 압력에 의해 구동된 노즐 출구 중심 ($y=h/2$)에서 폭 방향으로의 유속 변화를 도시한 것이다. 반지름이 가장 작은 $R=0.1$ mm인 경우를 제외하면 양끝단을 제외한 영역에서 압력과 속도의 편차는 1% 미만이었다. 다시 말해 $R=0.1$ mm 이외의 경우에 공동 내부 압력은 폭 방향으로 거의 일정하며 노즐 출구에서도 균일한 유동이 형성되었다. $R=0.1$ mm은 노즐 종단부 채널의 수력직경인 $2h$ 와 동일한 크기이다. 유량이 일정할 경우, 직경이 일정한 파이프에서 단위

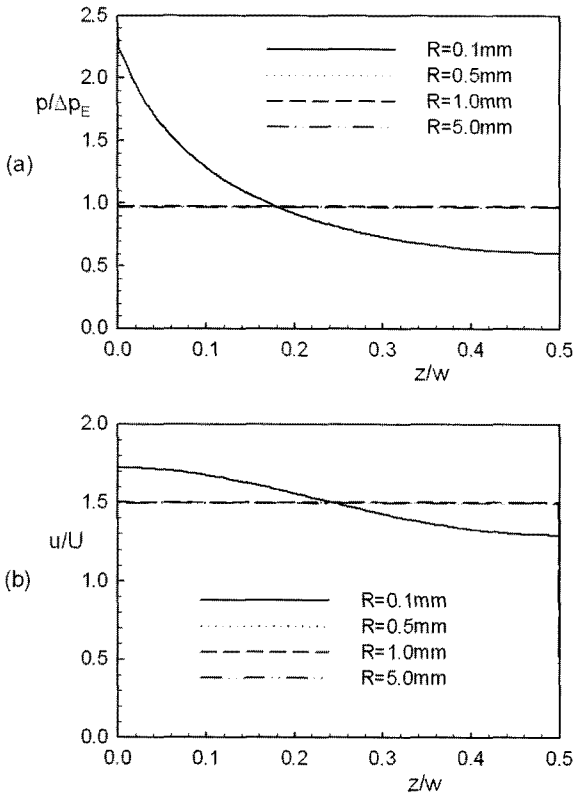


Fig. 4 (a) Pressure distribution along the center line of the cylindrical chamber; and (b) velocity distribution along the line of $y/h=0.5$ at the exit of a slit nozzle. $l=50$ mm

길이당 압력저항은 직경의 네제곱이 반비례하므로 원통의 공동의 지름이 노즐 중단부의 틈새 간격 보다 몇 배 이상 크면 균일 압력을 형성하는 장치로서 역할을 충분히 수행할 수 있음을 확인한 것이다.

3.2 압력강하 기구

앞 절의 수치해석 결과에서 확인할 수 있듯이 노즐의 공동부와 중단 채널부에서의 압력강하는 100 Pa 정도이다. 채널 출구에서의 모세관 압력 $\sigma/h \sim 4000$ Pa를 포함하더라도 목표한 유량을 송출하는데 필요한 압력은 수 kPa에 불과하다. 이와 같은 노즐에서는 수백 Pa의 미소한 압력 변화에 유량이 민감하게 반응하기 때문에 일반적인 가압장치로 제어하기 어렵다. 이 연구에서는 기존에 사용하던 가압장치의 운전범위에 해당하는 1 bar 규모의 작동압력에서 안정적인 토출을 이루는 것을 목표로 하였다. 이를 위해서는 토출장치에 추가적인 압력강하를 유발하는 기구가 필요하다. 가장 쉽게 생각할 수 있는 것이 공동을 다공성 물질로 채우는 방법이지만 연구대상

인 SWNT 분산액의 경우 SWNT가 걸러지는 문제가 생겨 적용할 수 없다.

이 연구에서 고안한 것은 슬릿 노즐의 기본 유로 구조를 훼손하지 않고 공동의 상류에 압력강하용 도입 유로를 길게 배치하는 방안이다. 직경이 D , 길이가 L 인 원형관을 흐르는 완전발달 층류유동의 경우 포아제유 유동이라는 엄밀해가 존재하기 때문에 이로부터 압력강하 ΔP 는 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\Delta P = 32\mu U^* L / D^2 \tag{7}$$

평균유속 U^* 는 토출 유량으로부터 $U^* = 4Q / \pi D^2$ 로 결정되므로 식 (7)은 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta P = 128\mu QL / \pi D^4 \tag{8}$$

원형관의 직경이 감소하면 압력손실은 직경의 네제곱에 반비례하여 증가하므로 직경이 100 μm 규모인 모세관을 사용할 경우 손쉽게 1 bar 규모의 압력손실을 유발할 수 있다. Table 1은 직경이 100, 200, 500 μm 인 세 가지 경우에 대하여 단위 길이당 압력 강하량과 100 kPa 정도의 압력강하를 유발하는데 필요한 관의 길이 L 을 식 (8)로부터 평가한 것이다. 직경이 100 μm 인 원형관의 경우, 14.3 cm 정도의 짧은 길이로도 필요한 압력강하를 유발할 수 있으나 상대적으로 유속이 매우 커지는 것이 문제가 발생한다. 직경이 500 μm 인 경우에는 평균 유속은 8.49 mm/s 수준으로 떨어지지만 압력강하에 필요한 원형관의 길이가 89.4 m 정도가 필요하여 장치를 구성하는데 어려움이 예상된다. 이에 대비하여 직경이 250 μm 인 원형관을 사용하면 5.6 m 정도의 길이를 확보하면 원하는 압력강하를 이룰 수 있다.

유연성이 있는 테프론 세관을 사용하면 공동의 상류쪽에 지그재그 형태로 유로를 배치하는 것이 가능하므로 공간을 많이 차지하지 않고도 필요한 압력강하를 유발할 수 있다. Fig. 5는 압력강하용 원형관과 균일가압을 위한 공동, 중단 채널부를 모두 포함한 전체 유로를 개념적으로 그린 것이다. 제안된 방안의 타당성을 평가하기 위하여 Fig. 5에 표시된 압력

Table 1 The length of a straight circular tube required for making a pressure drop of 100 kPa with a flow rate $Q=1.667 \mu\text{l/s}$

D [μm]	U^* [mm/s]	$\Delta P/L$ [kPa/m]	L required for making $\Delta P=100$ kPa
100	212	699	14.3 cm
250	34.0	17.9	5.58 m
500	8.49	1.12	89.36 m

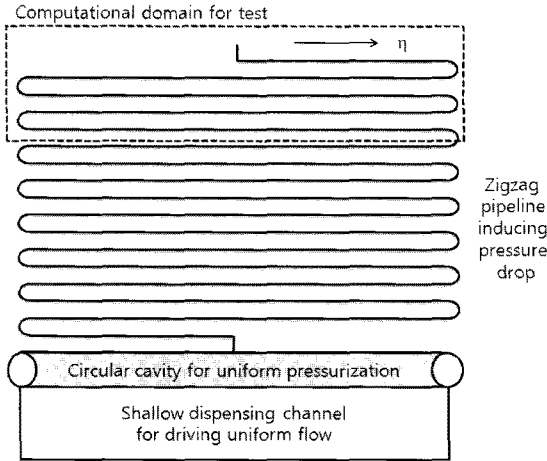


Fig. 5 Schematic illustration of the flow passage designed for inducing a pressure drop of O(100 kPa)

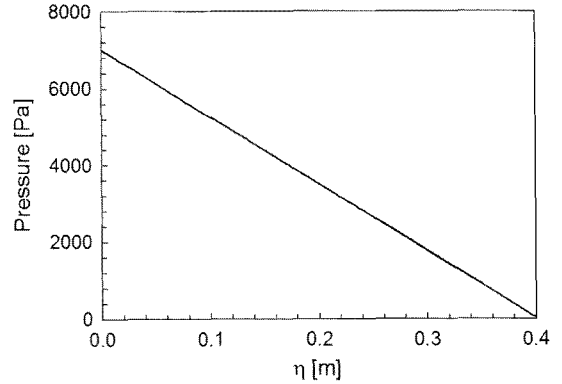


Fig. 6 Variation of pressure inside the pipeline designed for inducing pressure drop shown in Fig. 5. η denotes the coordinate moving along the center of pipeline

강하용 세관의 일부 영역을 대상으로 수치계산을 실시하였다. 세관의 직경은 $D=250 \mu\text{m}$ 이고, 폭 방향 길이는 노즐의 폭과 같은 100 mm이며 지그재그 형으로 배치된다. 평행하게 이웃한 두 세관의 중심 사이 거리는 1.25 mm이고 180° 회전하는 세관의 회전반경은 6.125 mm이다. 계산의 효율성을 위하여 총 0.4 m 길이의 파이프로 계산영역을 제한하였다. Fig. 6은 압력강하용 원형관의 길이방향으로 변화하는 압력을 그린 것이다. 이 그림에서 η 는 파이프 길이 방향으로 파이프의 중심의 위치를 따라 만든 유선좌표이다. 곡선 부분의 관로가 존재함에도 불구하고 압력은 파이프의 길이에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 동압이 매우 작고 부차적 손실계수도 마찰계수에 비해 상대적으로 작아 압력강하가 마찰손실에 의해 지배되기 때문이다. 압력강하량도 6.99 kPa로 식 (8)의 예측값 7.16 kPa와 2.5%의 오차범위 내에서 일치하고 있다. 가압장치의 작동압력이 결정되면 식 (8)로부터 압력강하용 세관의 총길이를 산정할 수 있음을 보여주는 결과이다. 결론적으로 공동의 선단에 유연한 세관을 설치한 슬릿 노즐이 적정 수준의 작동압력으로 SWNT 분산액을 분사할 수 있는 유효한 기구임을 확인하였다.

3.3 기타 형상인자의 영향

여기서는 슬릿노즐의 가공과 관련된 기술적인 문제를 다루기로 한다. 지금까지의 설계해석에서는 직육면체형의 이상적인 채널형의 노즐 말단구조를 고려하였다. 이러한 구조물은 표면조도가 매우 좋은 두 장의 유리 기판을 일정한 두께를 가지는 접착띠로 붙여 제작이 가능하다. 우려되는 문제는 가공 또는 운전 중의 가해지는 하중에 의해 노즐 말단의 채널부의 틈새 간격이 균일하게 유지되지 않고 변형될 수 있다는

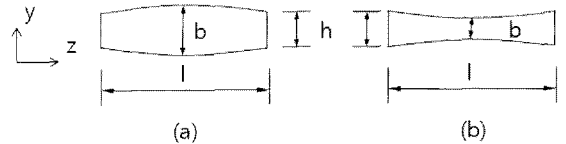


Fig. 7 Cross-sectional view of the deformed terminal slit channel part. (a) Convex deformation ($b/h > 1$); and (b) concave deformation ($b/h < 1$)

것이다. 이 연구에서는 이러한 노즐 틈새의 변형이 미치는 영향을 평가하기 위하여 그림 Fig. 7과 같이 채널의 정중앙 부위의 틈새 간격 b 가 설정된 틈새간격 h 보다 늘어난 볼록형 채널과 줄어든 오목형 채널에 대하여 수치계산을 실시하여 SWNT 분산액 토출량의 균일도를 조사하였다.

Fig. 8은 오목형 및 볼록형 틈새구조를 가지는 슬릿 노즐 출구에서 폭방향의 단위 길이당 유량 q 의 분포를 그린 것이다. 여기서 q 는 다음과 같이 정의된다.

$$q = \int_0^b u(y, z)_{exit} dy \tag{9}$$

중앙부의 틈새 간격이 좁아진 오목형 채널의 경우, 주변부에 비하여 중앙부의 점성저항이 증가하여 상대적으로 단위 길이당 유량이 작아짐을 볼 수 있다. 볼록형 채널에서는 이와 반대의 현상이 나타난다. 폭 방향의 단위 길이당 유량변화를 정량적으로 살펴보면 틈새 간격의 차가 4% 이상이 되면 ($b/h \geq 1.04$ 또는 $b/h \leq 0.96$) 폭방향으로 단위 길이당 유량의 불균일도가 10%를 넘어서고 있다. 식 (5)는 속도를 틈새방향으로 적분한 단위길이당 유량 q 가 h 의 세제곱에 비례함을 지적하

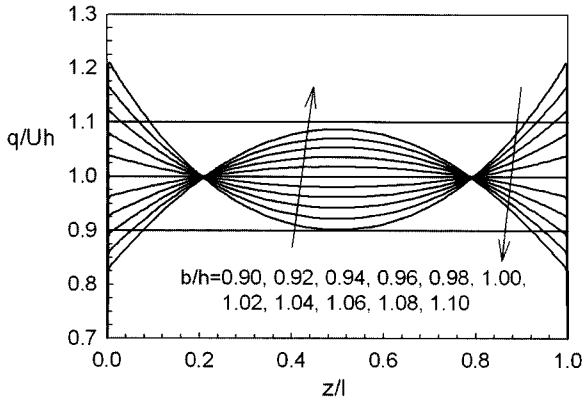


Fig. 8 Variation of the flow rate per unit length q at the exit of the deformed slit nozzle as shown in Fig. 7

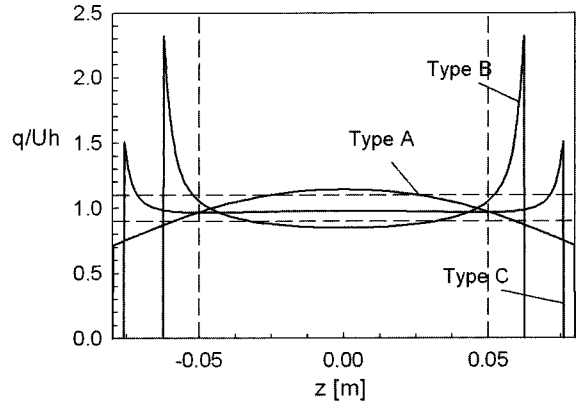


Fig. 10 Variation of the flow rate per unit length q at the exit of a slit nozzle. The planar shapes of the slit channel are described in Fig. 9

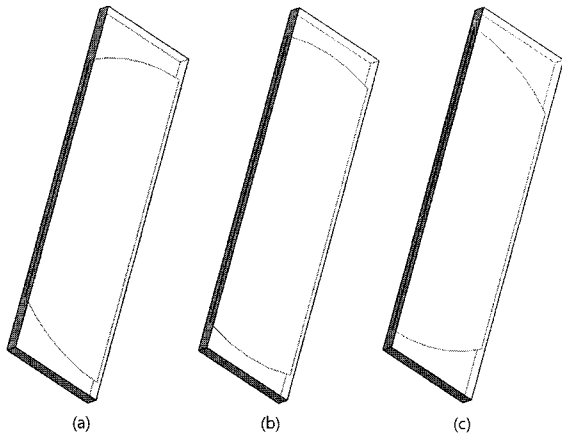


Fig. 9 Three shapes of slit channel manufactured by using a precision rotary milling machine. (a) Type A; (b) Type B; and (c) Type C

고 있다. 이로부터 도포균일도 10%을 만족하기 위해서는 노즐의 틈새 간격의 균일도를 $\pm 3\%$ 이하로 유지하여야 함을 개략적으로 유추할 수 있다. 계산결과는 이러한 이론적 논의를 정량적으로 뒷받침하고 있다.

현실적인 제약은 이와 같은 접착띠를 이용하는 방법으로 3% 이내의 편평도를 가지는 틈새 간격이 50 μm 인 슬릿 채널을 제작하는 것이 용이하지 않다는 것이다. 다른 방안으로 생각할 수 있는 방법은 하나의 기판에 단차를 만들어 다른 기판과 접착시켜 틈새를 만드는 방법이다. PR 코팅에 사용되는 슬릿 노즐에서처럼 틈새 간격이 1 μm 정도로 작으면 반도체 공정으로 기판의 한쪽 면에 단차 제작이 가능하다. 하지만 50 μm 의 간격을 가지는 단차는 반도체 공정으로 만들기 어렵고 현재 고려하고 있는 표면조도가 좋은 유리기판의 경우 통상적인 밀링과 같은 기계적 가공으로 제작하기도 쉽지 않다. 해

결방안을 찾는 과정에서 연삭과 유사한 표면가공 방법을 사용하여 유리 기판에 50 μm 깊이의 단차를 정밀 제작하는 방법이 있음을 확인하였다. 문제는 이 가공방법은 원형의 연삭 도구를 회전시켜 가공하기 때문에 평면적으로 사각형 형태의 채널을 제작할 수 없다는 점이다. 가공 가능한 것은 Fig. 9에 도시된 것과 같이 원형의 일부로 만들 수 있는 확대형(A형), 확대축소형(B형), 축소형(C형) 세 가지 평면형상이다.

Table 2에 160 mm의 직경을 가지는 원형도구로 제작할 수 있는 세 가지 형태의 노즐의 제원과 목표한 도포량을 만족시키기 위한 SWNT 분산액의 질량유량을 정리하였다. 이 연구에서는 이 세 가지 형상의 노즐 내부의 유동에 대한 수치계산을 실시하였다. Fig. 10은 세 가지 형태의 채널 형상을 가진 노즐의 출구에서 나오는 틈새간격 방향의 유속을 적분한 단위길이 당 유량 q 의 분포를 그린 것이다. 세 가지 유형 모두에서 채널 유로 폭의 변화에 의해 출구에서 균일한 유동이 형성되지 않음을 확인할 수 있다. 확대형인 A형 채널의 경우, 전체적인 속도의 편차는 작지만 채널의 중앙부에서 측면 방향으로 점진적으로 속도가 감소하여 모든 영역에서 속도편차가 나타나고 있다. 반대로 축소형인 C형 채널에서는 측면에 급격한 속도의 변화가 생기지만 노즐의 중앙부에는

Table 2 Specifications of the three different slit channels of length 50 mm which can be manufactured by using a rotary milling of a diameter 160 mm

	Width [mm]		Mass flow rate [kg/s]	Difference of q in the central region of 10mm
	Inlet	Outlet		
Type A	129	160	2.67×10^{-6}	15.4 %
Type B	152	152	2.53×10^{-6}	9.0 %
Type C	160	129	2.08×10^{-6}	11.4 %

비교적 균일한 유속분포를 나타나고 있다. 확대-축소형인 B형 채널의 경우, 전체적인 분포는 C형과 유사하나 균일한 유량이 나오는 중앙부의 폭이 넓게 나타나고 있다. 실제 도포 대상이 되는 중앙부의 100 mm 구간에서 단위 길이 당 유량의 상대편차를 Table 2에 정리하였다. B형만이 최대 편차가 9.0%로 나타나 설계기준으로 설정한 도포 균일도 10%를 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 이론 및 수치해석을 통해 SWNT 분산액을 도포하기 위한 슬릿 노즐의 내부형상을 설계하고 그 타당성을 분석하였다. 노즐 설계에 필요한 유로 내부 압력 및 속도 분포는 점성이론과 수치해석을 통해 구한 결과가 잘 일치하였다. 노즐을 구성하는 여러 구성요소의 기하학적 인자가 노즐 출구의 유동 균일도에 미치는 영향을 분석하여 설계 지침을 제시하였다.

채널중단부의 길이는 틈새 간격인 50 μm 보다 충분히 큰 1 mm 이상이면 출구에서의 균일유동을 보장할 수 있으며 균일 가압을 위한 공동 구조물은 반지름이 틈새 간격보다 수배 이상이면 그 기능을 수행할 수 있는 것으로 나타났다. 작동 범위가 1 bar 규모인 통상적인 가압장치를 사용하여 점성이 작은 SWNT 분산액의 흐름을 정확하게 조절하기 위하여 유연성이 있는 모세관을 노즐 선단의 압력강하 기구로 사용하는 방안을 제시하고 그 유효성을 검증하였다. 또한 가공과 관련하여 직육면체형이 아닌 종단 채널부 유로 형상이 토출 특성에 미치는 영향을 수치적으로 조사하였다. 폭방향으로 편차가 10% 미만인 균일한 토출을 보장하기 위해서는 가공 또는 공정중의 하중에 의해 발생하는 노즐 간격의 편차가 폭방향으로 3% 미만으로 유지하여야 함을 확인하였다. 노즐 중단부에 직선형 가공이 어려워 원형 가공을 채용하는 경우에는 확대-축소형 형상으로 노즐을 제작하는 것이 균일한 토출량 분포를 얻는데 가장 유리한 것으로 나타났다.

후 기

이 연구는 2007년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2004, Wu, Z., Chen, Z., Du, X., Logan, J.M., Sippel, J., Nikolou, M., Kamaras, K., Reynolds, J.R., Tanner, D.B., Hebard, A.F. and Rinzler, A.G., "Transparent, conductive carbon nanotubes films," *Science*, Vol.305, pp.1273-1276.
- [2] 2005, Zhang, M., Fang, S., Zakhidov, A.A., Lee, S.B., Aliev, A.E., Williams, C.D., Atkinson, K.R. and Baughman, R.H., "Strong, transparent, multifunctional, carbon nanotube sheet," *Science*, Vol.309, pp.1215-1219.
- [3] 2005, Artukovic, E., Kaempgen, M., Hetch, D.S., Roth, S. and Gruner, G., "Transparent and flexible carbon nanotube transistors," *Nano Lett.*, Vol.5, pp.757-760.
- [4] 2005, Huang, H., Liu, C. and Wu, T., "Aligned carbon nanotube composite films for thermal management," *Adv. Mater.*, Vol.17, pp.1652-1656.
- [5] 2007, Yoon, Y.-H., Song, J.-W., Kim, D., Kim, J., Park, J.-K., Oh, S.-K. and Han, C.-S., "Transparent film heater using single-walled carbon nanotubes," *Adv. Mater.*, Vol.19, pp.4284-4287.
- [6] 1992, Cohen, E. and Gutoff, E., *Modern Coating and Drying Technology*, New York: VCH publishers.
- [7] 1999, Taylor, S.D. and Hrymak, A.N., "Visualization and flow simulation of a two-layer slot coater," *Chem. Eng. Sci.*, Vol.54, pp.909-918.
- [8] 2002, Lee, A.G., Shaqfeh, E.S.G. and Khomami, B., "Study of viscoelastic free surface flows by the finite element method: hele-shaw and slot coating flows," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol.108, No.3, pp.41-44.
- [9] 2004, 정진도, 김장우, 김성근, "Slit coater 내의 photo resist의 코팅 특성," *반도체및디스플레이장비학회지*, Vol.3, No.3, pp.41-44.
- [10] 2004, 김장우, "Slit coater 노즐에서 photo resist의 유동 특성," *반도체및디스플레이장비학회지*, Vol.3, No.3, pp.37-40.
- [11] 2006, 유의준, "Slit coater용 Nozzle 성능개선을 위한 수치 해석적 연구," 호서대학교, 석사학위논문.
- [12] <http://www.cemes.co.kr>.
- [13] 1986, Schlittiching, H., *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, Korea.