

광자결정 도파로 성형용 PDMS 스탬프 제작

오승훈*, 최두선**, 김창석***, 정명영#

PDMS Stamp Fabrication for Photonic Crystal Waveguides

Seung Hun Oh*, Du Seon Choi**, Chang Seok Kim*** and Myung Yung Jeong#

ABSTRACT

Recently nano imprint lithography to fabricate photonic crystal on polymer is preferred because of its simplicity and short process time and ease of precise manufacturing. But, the technique requires the precise mold as an imprinting tool for good replication. These molds are made of the silicon, nickel and quartz. But this is not desirable due to complex fabrication process, high cost. So, we describe a simple, precise and low cost method of fabricating PDMS stamp to make the photonic crystals. In order to fabricate the PDMS mold, we make the original pattern with designed hole array by finding the optimal electron beam writing condition. And then, we have tried to fabricate PDMS mold by the replica molding with ultrasonic vibration and pressure system. We have used the cleaning process to solve the detaching problem on the interface. Using these methods, we acquired the PDMS mold for photonic crystals with characteristics of a good replication. And the accuracy of replication shows below 1% in 440nm at diameter and in 610nm at lattice constant by dimensional analysis by SEM and AFM.

Key Words : Photonic crystal (광자 결정), Electron beam lithography (전자빔 리소그래피), Replica molding (복제 성형), Nano Imprint Lithography (나노 임프린트 리소그래피), PDMS (폴리디메틸실록산)

1. 서론

인터넷 이용 등의 폭발적인 증가에 따른 정보 전송 용량의 수요를 만족시키기 위해 소자의 소형화 및 고속화를 위한 광집적회로소자(PIC : Photonic Integrated Circuit)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이런 PIC 의 기술 중에서 광자 결정(Photonic crystals)은 파장 단위대의 작은 광도파로와 낮은 굽힘 손실(bending loss), 분산제어(dispersion control)가

가능해 높은 전송속도와 고집적화를 구현할 수 있는 구조체로 최근에 많은 연구가 진행되고 있다.¹

기존에는 광자 결정을 제작하기 위해 실리콘, SOI(silicon on insulator), GaAs 등과 같은 고굴절율차를 갖는 유전체에 전자빔 리소그래피와 금속층의 증착 그리고 식각등을 이용해 주기적인 패턴을 만들어 제작하였다. 그러나, 이는 반도체 공정을 기반으로 제작되므로, 공정 비용이 많이 들고, 대면적의 패턴을 만들기가 용이하지 못한 실정이다.

접수일: 2006 년 11 월 2 일; 게재승인일: 2007 년 2 월 12 일

* 부산대학교 나노융합기술학과

** 한국기계연구원

*** 부산대학교 나노시스템 공정 공학과

교신저자: 부산대학교 나노시스템 공정공학과

E-mail: myjeong@pusan.ac.kr Tel. (055) 350-5675

또한, 높은 굴절률로 인해 광섬유와 입출력 결합 효율이 낮은 단점이 있다. 따라서, 이를 보완하기 위해서 낮은 원가에 대량 생산이 가능하며, 도파 손실이 적고, 입출력 결합 효율이 높은 저 굴절률 차이를 갖는 고분자 기반의 광자 결정 소자제작에 대한 연구가 진행되고 있다.^{2,3}

고분자 기반의 광자 결정을 구현하기 위한 제조 방법 중에서 나노 임프린트 리소그래피(NIL; Nano Imprint Lithography)은 고집적과 대량 생산에 용이하여 최근 많은 각광을 받고 있다.⁴ NIL 를 통한 광자 결정 도파로의 제작에 있어서 구조체의 형상은 스탬프의 정밀도에 직접적으로 연계되어 있다. 따라서, 스탬프의 제작기술이 NIL 의 핵심 요소 기술이라고 할 수 있다.⁵ NIL 기법은 패턴의 경화방식에 따라 열 경화 방식인 핫 엠보싱 기법과 UV 경화방식인 UV 엠보싱으로 나뉘어 진다. 특히, UV 엠보싱의 경우에 저압, 상온 공정으로 이루어지므로 공정시간이 매우 짧고 단순하여 고품질의 소자를 저가에 대량 생산할 수 있는 이점을 가지고 있다.⁶ 보통 UV 엠보싱용 스탬프는 UV 투과성 재질인 석영과 유리, PDMS 고무 등에 의해 만들어진다. 석영 및 유리 스탬프는 긴 공정 시간과 고가의 장비로 인한 제한적 요소가 수반되나, PDMS 고무는 복제공정을 통해 쉽게 저가로 제작할 수 있는 장점이 있다. 또한, h-PDMS 를 이용한 내구성 향상 및 이를 이용한 고분자 몰드제작을 통하여 상용 스탬프로의 활용 방안에 대한 연구들이 수행되고 있다.⁷ 그러나, PDMS 스탬프를 복제하기 위해서는 원형 몰드가 요구되며, 이런 원형 몰드는 전자빔 리소그래피를 통해 패턴을 제작하고, 이를 기반으로 이온 식각(Reactive Ion Etching) 공정을 통해 제작된다. 그러나, 식각 마스크로 사용되는 전자빔 레지스트인 PMMA 의 경우, 식각 저항비가 낮아 공정상에 문제점이 발생하게 되므로 Fig. 1 와 같이 금속층이나 산화층을 식각 마스크로 주로 사용하게 된다. 이로 인해 공정단계가 늘어나므로 많은 시간 및 비용이 요구되며, 각 공정 단계에서 치수안정성을 유지하기가 힘들게 된다. 따라서, 본 논문에서는 전자빔을 이용하여 레지스트 층을 패턴링한 후, 이를 원형 몰드로 사용하여 공정단계를 줄였으며, 초음파 및 가압 시스템을 접목한 복제성형을 통해 광자결정 구현을 위한 고 정밀 PDMS 스탬프를 제작하고자 하였다.

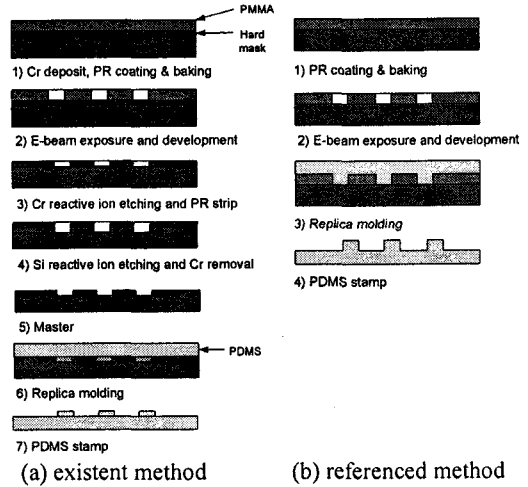


Fig. 1 Schematic process of existent method and referenced method for PDMS stamp fabrication

2. 전자빔을 이용한 광자결정 패턴 제작

2 차원 고분자 광자결정 광도파로를 제작하기 위한 원주 형태의 PDMS 스탬프는 직경이 440nm 이고, 격자상수가 610nm 로 설계되었다. 이를 구현하기 위한 전자빔 패턴은 격자상수 간격에 60 도 각도로 서로 격자패턴을 만들어서 육각형태로 형성시켰다.

✓ Cross Section View

PMMA950K A2, 125nm
Si Substrate

✓ Top View

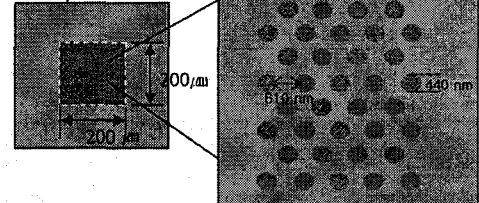


Fig. 2 Schematic view of basic pattern design

Fig. 2 와 같이 설계된 광자 결정을 제작하기 위한 UV 엠보싱용 PDMS 스탬프를 Fig. 3 와 같이 전자빔 리소그래피와 복제주조 기법을 통해 제작하고자 하였다. 이를 위해, 전자빔 리소그래피를 위한 레지스트를 스핀 코팅하였으며, 사용된 레지스트는 노광부와 비노광부 사이의 대비비가 높으

며, 현상 후 수직적인 형상에 유리한 분자량이 950K 인 PMMA A2 를 사용하였다. 레지스트의 두께는 스피너속도를 1000rpm 으로 45 초 동안 회전시켜 125nm 의 두께로 코팅하였으며, 레지스트에 회석된 솔벤트를 제거하기 위해 180℃의 핫 플레이트에서 5 분간 가열하였다.

코팅된 전자빔 레지스트위에 광자결정 패턴의 구현을 위해서는 기계적인 파라미터와 전기적인 파라미터 등을 조절해야 한다. 특히, 전자빔 리소그래피를 위해 가장 중요한 파라미터는 원하는 패턴구현을 위한 최적의 노광량이다. 이런 노광량은 가속전압 및 개구수의 크기에 의해 결정되는 빔전류와 전자빔이 한 점에 머무르는 시간에 비례하고, 패턴의 면적에 반비례하게 된다.

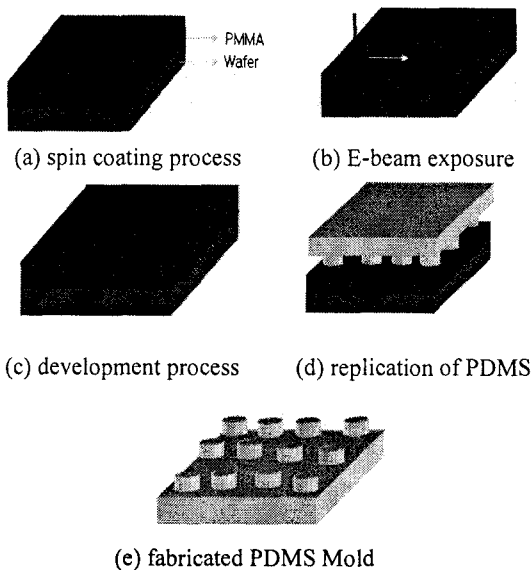
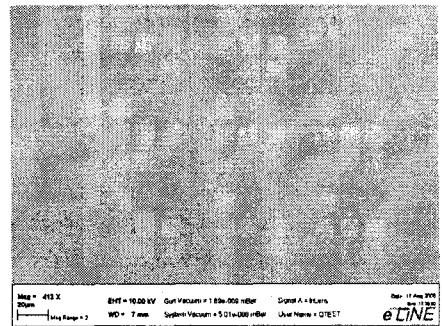


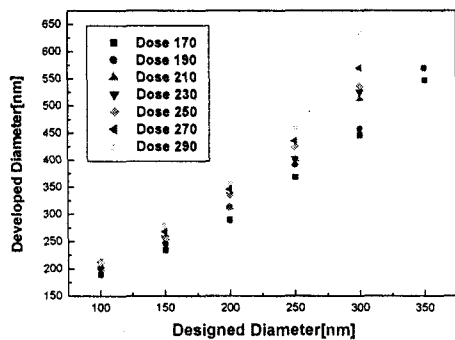
Fig. 3 Sequence of PDMS mold Fabrication

따라서, 설계된 광자결정 패턴의 구현에 맞는 최적의 적정 노광량은 실험을 통해 결정하여야 한다. 적정 노광량은 얻고자 하는 패턴의 크기 및 형상, 코팅된 레지스트의 두께와 종류, 그리고 레지스트 아래쪽 기판의 재질 등에 따라 결정된다. 특히, 본 논문에서의 광자결정 패턴의 경우는 밀집한 구멍구조로 이루어지므로 인접한 패턴에서의 산란된 전자빔에 의하여 설계된 패턴보다 커지게 된다. 이를 근접 효과라 부르며, 이런 근접효과에 의한 영향은 보정을 통해서 노광시 반드시 고려되어야

한다. 본 연구에서는 설계 형상을 줄여감으로써 여분의 노광량을 보상하여 설계된 광자 결정의 크기에 맞는 적정 노광량을 구하였다. 최적의 노광량을 위한 실험은 Fig. 4(a)에 제시된 바와 같이 노광량을 170 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에서 290 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 까지 10 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 씩 증가시키고, 패턴의 설계 형상 지름을 100 μm 에서 400 μm 까지 증가시키면서 수행하였다. 노광시 초점을 용이하게 하고, 빔의 산란을 최대한 방지하기 위해 레지스트와 전자원까지의 거리를 3mm 로 근접하게 설정하였으며, 가속전압을 10keV, 개구수 크기를 30 μm , 스텝 크기를 6.4nm 로 설정하여 노광량 실험을 수행하였다. 전자빔을 통해 만들어진 패턴의 현상은 MIBK 와 IPA 를 1 대 3 으로 희석시킨 현상액으로 온도를 21℃ 근처에서 45 초간 현상을 하였으며, IPA 로 20 초간 세척하였다. 노광량 실험 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었으며, 노광량을 270 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, 설계 패턴의 형상지름이 254nm 일 때 Fig. 5 와 같이 설계된 광자결정 패턴을 구현할 수 있었다.



(a) Written pattern for dose test



(b) Dose test results

Fig. 4 Dose test experiment for the dosage optimization

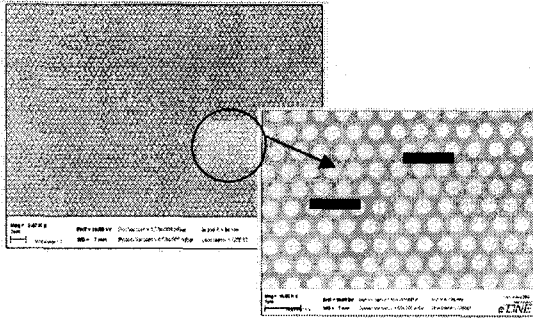
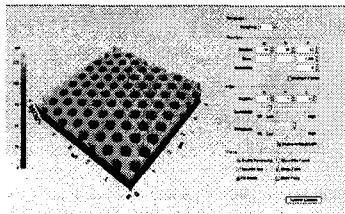
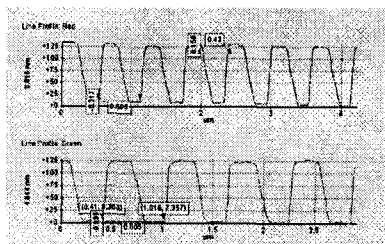
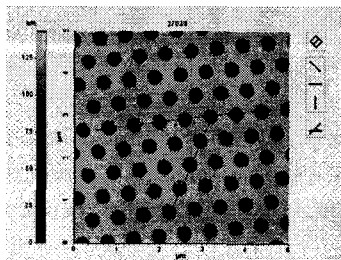


Fig. 5 The SEM image of fabricated PMMA pattern using e-beam lithography

제작된 광자결정 패턴의 직경 및 높이의 치수 정밀도를 알아 보기 위하여 AFM 을 통하여 측정 하였으며, 측정된 치수는 Fig. 6 에 보여지듯이 직경이 439nm, 높이가 124nm, 격자상수가 605nm 로 나타났다. 이것은 설계치와 매우 일치하는 크기로 제작되었음을 알 수 있다.



(a) 3D image of PMMA hole array by AFM



(b) Dimensional analysis to fabricated PMMA hole array

Fig. 6 Fabricated hole array on PMMA resist

3. NIL 용 PDMS 스탬프의 고 정밀 제작기법 연구

전자빔을 통하여 제작된 광자결정의 패턴을 원형몰드로 이용하여 PDMS 스탬프를 제작하였다. PDMS 용액은 Dow Corning 사의 Sylgard™ 184 을 사용하였으며, 전구체와 경화제가 10:1 의 일정 비율로 혼합되어 충분히 안정화 시간을 거친 상태의 고분자 용액이다. 이 안정화된 PDMS 용액을 전자빔 리소그래피를 통해 제작된 광자결정의 패턴에 충분한 두께가 유지되도록 붓고 열경화시켜 NIL 용 스탬프로 사용된다. 그러나, PDMS 몰드의 제조시 높은 점도의 PDMS 용액이 모서리 부분으로 주입될 때 표면에서의 충전과정에서 빠져나가지 못한 공기로 인해 미세기포가 형성된다. 이런 과정에서 생긴 미세 기공은 PDMS 의 열경화 과정에서 성장하게 되며 높은 점성에 의해 빠져나가지 못하므로 기포가 발생하게 된다. 그리고 높은 점도를 가진 PDMS 용액의 충전은 모세관력을 통해서 이루어지지만, PDMS 용액의 높은 점도와 표면장력으로 인해서 구멍 구조 내에 미충진 문제가 발생하게 된다. 이런 문제점들은 NIL 공정으로 제작되는 광자 결정의 치수 안정성에 있어 매우 중요하게 작용한다. 따라서, 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 초음파의 진동에너지를 가압시스템을 제조 공정시 접목하여 기포 제거 및 충전 효과를 도모하였다. 또한, 가압 시 몰드의 정밀도, 안정성, 균일성 등을 향상시키기 위하여 Fig. 7 의 적층구조로 가압되었다. 여기서, 실리콘고무의 탄성과 실리콘 및 금속 기판이 평편도를 보장해 주는 수단으로 이용된다.

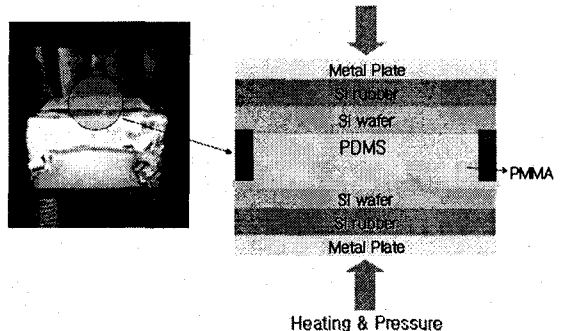


Fig. 7 Stacked structure for compensating parallelity

또한, 설계된 광자 결정의 패턴의 경우, 원형

몰드로 사용된 PMMA 패턴과의 표면적이 크므로 이형 시 Fig. 8(a)와 같이 접착에 의한 패턴의 손상이 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이런 이형 시 발생하는 문제점들을 해결하기 위하여 아세톤을 통한 초음파 세척 공정을 통하여 PMMA의 패턴층을 제거함으로써 자연적인 이형을 유도하여 이형시의 접착 문제를 해결하였다.⁸

Table 1은 각각의 복제 성형방법에 따른 패턴의 치수정밀도를 나타내었다. 가압 및 초음파 진동 시스템이 접목되지 않은 복제성형 I의 경우, 직경 및 격자상수의 치수는 1% 이하의 정밀도를 유지하였으나, 높이의 경우는 패턴된 레지스트의 층과 10nm 이상의 오차가 발생하였다. 그러나, 초음파 진동에너지와 가압시스템 및 세척공정이 접목된 복제 성형II의 경우로 제작된 PDMS 스탬프의 경우는 Fig. 8(b)와 같이 양각의 NIL 용 PDMS 스탬프를 정밀하게 제작할 수 있었다. 제작된 PDMS 스탬프의 패턴의 치수 정밀도를 AFM을 통해서 측정하였다. 측정된 기둥의 직경 및 높이의 치수는 Fig. 9에 보여지듯이 직경이 438nm, 높이가 124nm, 격자상수가 605nm로 치수 안정성에 있어 편차가 수 nm 수준으로 정밀도가 1%이하로 형상을 재현하였다. 이러한 정밀도는 일반적으로 나노 구조 광자 결정 도파로의 설계 공차인 5% 수준 보다 훨씬 정밀하므로 광자 결정 도파로의 제작에 유효하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1 Precision comparison of fabricated pattern

	Designed pattern	Resist structure	Replica molding I	Replica molding II
Height	125nm	124 nm	113 nm	124 nm
Diameter	440 nm	439 nm	437 nm	438 nm

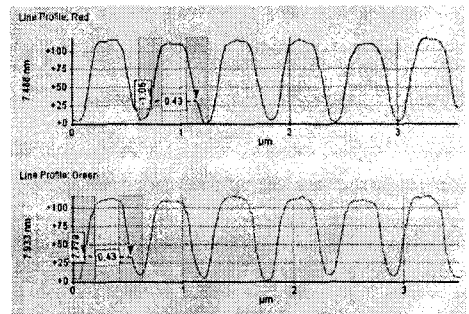
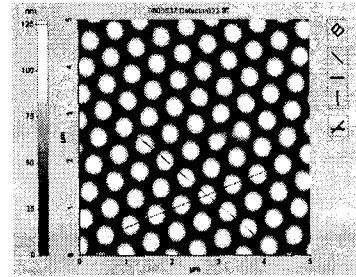
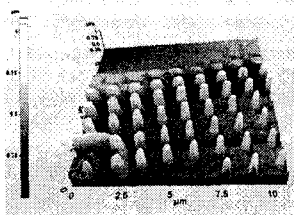
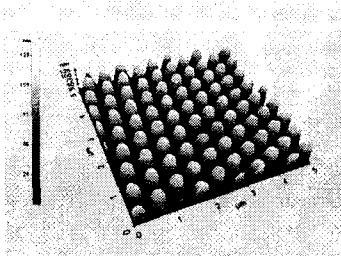


Fig. 9 Dimensional analysis to fabricated PDMS stamp with dot array



(a) Bad PDMS stamp due to sticking problem



(b) PDMS stamp with dot array

Fig. 8 Fabricated PDMS stamp by replica molding

4. 결론

본 논문은 고분자를 기반으로 한 광자결정 도파로를 제작하기 위한 NIL 용 PDMS 스탬프를 간단하면서 정밀하게 제작하기 위한 방법에 대해 연구한 결과이다. 먼저 설계된 광자결정의 구현을 위하여 전자빔 리소그래피를 이용하여 원형 패턴을 제작하였으며, 이를 위한 최적의 공정조건도 도출하였다. 또한, 제작된 패턴을 원형 몰드로 사용하여 초음파 및 가압 시스템과 전자빔 레지스트의 세척 공정을 접목한 복제성형공정으로 직경이 440nm, 격자상수가 610nm인 설계된 광자결정과 수 nm의 편차를 가지고 정밀 복제되어 정밀도가 1% 이하로 형상을 재현하였다. 이는 기존의 고분자 광자 결정을 위한 스탬프와 비교하여 식각 및 lift off 등의 후속공정이 필요하지 않아 제작 방법

이 단순하며, 정밀제작에 있어 유리하여 광자 결정 나노 시스템을 제작하는데 매우 유리한 기술을 제공할 수 있을 것이다.

Proceedings, pp.334, 1995.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Seekamp, J., Zankovych, S., Helfer, A. H., Maury, P., SotomayorTorres, C. M., Bottger, G., Ligura, C., Eich, M., Heidari, B., Montelius, L. and Ahopelto, J., "Nanoimprinted passive optical devices," *Nanotechnology*, Vol. 13, No. 5, pp.581, 2002.
2. Liguda, C., Bottger, G., Kuligk, A., Blum, R., Eichb, M., Roth, H., Kunert, J., Morgenroth, W., Elsner, H. and Meyer, H. G., "Polymer photonic crystal slab waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, No. 17, pp. 2434, 2001.
3. Sotomayor, T. C. M., Zankovych, S., Seekamp, J., Kam, A. P., Cedeno, C. C., Hoffmann, T., Ahopelto, J., Reuther, F., Pfeiffer, K., Bleidiessel, G., Gruetzner, G., Maximov, M. V. and Heidari, B., "Nanoimprint lithography: an alternative nanofabrication approach," *Mater. Sci. Eng. C.*, Vol. 23, No. 1, pp.23, 2003.
4. Choi, C. G., Kee, C. S. and Helmut, S., "Fabrication of polymer photonic crystal slabs using nanoimprint lithography," *Appl. Phys.*, Vol.6, pp.e8-e11, 2006.
5. Yoshihiko, H., Satoshi, H., Satoshi, I., Michio, K. and Yoshio, T., "Nano imprint lithography using replicated mold by Ni electroforming," *Appl. Phys.*, Vol. 41, No. 6B, pp.4186, 2002.
6. Younan, X., and Whitesides, G. M., "Soft lithography," *Angew. CHem. Int. Ed.*, Vol. 37, No.5, pp.550, 1998.
7. Mizuno, H., Sugihara, O., Kaino, T., Okamoto, N. and Hosino, M., "Low loss polymeric optical waveguides with large cores fabricated by hot embossing," *Opt Lett.*, Vol. 28, No.23, pp. 2378, 2003.
8. Fuchs, F. J., "Ultrasonic Cleaning Fundamental Theory and Application," *Precision Cleaning* 95