

## LIGA 공정에서의 노광시간과 X선마스크 흡광체의 두께

길계환 · 이승섭 · 염영일

포항공과대학교 기계공학과  
(1998년 8월 6일 접수)

### Exposure Time and X-Ray Mask Absorber Thickness in the LIGA Process

Kye-Hwan Gil, Seung-Seob Lee and Young-Il Youm

Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology,  
Pohang 790-784, Korea

(Received August 6, 1998)

**요 약** - 감광체 내부에서 감쇠된 X선 에너지는 그 영역에 그대로 축적된다고 가정함으로써, LIGA X선노광 단계를 3 개의 부등식으로 모델링하였다. 그로부터 양질의 미세구조물을 얻기 위한 최소노광시간과 최대노광시간 그리고 X선마스크 흡광체의 필요두께에 관한 식이 구해졌다. 방사광의 에너지전달률 계산식이 소개되었으며, 이를 X선노광 단계에 적용하였다. 대표적 LIGA 감광체인 PMMA의 감쇠길이를 광자에너지의 역함수로 근사시키고, 마스크흡광체에 도달하는 X선의 평균 광자에너지를 앞서 유도된 식들에 도입함으로써, 평균 광자에너지와 PMMA의 두께에 대한 최소노광시간과 최대노광시간의 추이를 예측하였으며, PMMA의 노광 가능한 최대두께에 관한 식을 구했다. 또한, 마스크흡광체에 입사하는 X선의 광자에너지와 PMMA의 두께에 대한 금 마스크흡광체 필요두께의 추이도 예측되었다. 최대노광시간은 동일 총에너지전달률 강도에 대하여 평균 광자에너지가 증가함에 따라 단조증가하며, 감광체의 두께의 함수가 아니다. 최소노광시간은 PMMA의 두께가 PMMA의 감쇠길이보다 작은 일반적인 LIGA 공정에서, 동일 총에너지전달률 강도에 대하여 평균 광자에너지가 증가함에 따라 증가하며, PMMA의 두께에 대해서는 단조증가한다. 감광체의 노광 가능한 최대두께는 평균 광자에너지에서의 감광체의 감쇠길이에 비례하며, 그 비례상수는  $\ln(D_{\text{lim}}/D_{\text{th}})$ 이다. 금 마스크흡광체의 필요두께는 마스크흡광체에 입사하는 X선의 광자에너지에 대해서는 불규칙하게 증가하나, PMMA의 두께에 대해서는 완만한 증가세를 보이며, 총에너지전달률 강도 자체와는 무관하다. 유도된 여러 식의 단순성으로 인하여 노광시간, 마스크흡광체의 감쇠계수와 두께, 감광체의 감쇠계수와 두께, 그리고 방사광의 에너지전달률 강도 등의 상호연관성과 X선노광 현상에 대한 명확한 이해가 가능하였다.

**Abstract** - The LIGA X-ray exposure step was modelled into three inequalities, by assuming that the X-ray energy attenuated within a resist is deposited only in the localized range of the resist. From these inequalities, equations for the minimum and maximum exposure times required for a good quality microstructure were obtained. Also, an equation for the thickness of an X-ray mask absorber was obtained from the exposure requirement of threshold dose deposition. The calculation method of the synchrotron radiation power from a synchrotron radiation source was introduced and applied to an X-ray exposure step. A power function of photon energy, approximating the attenuation length of the representative LIGA resist, PMMA, and the mean photon energy of the X-rays incident upon an X-ray mask absorber were applied to the above mentioned equations. Consequently, the tendencies of the minimum and maximum exposure times with respect to mean photon energy and thickness of PMMA were examined and an equation for the maximally exposable thickness of PMMA was obtained. Additionally, the tendencies of the necessary thickness of a gold X-ray mask absorber with respect to thickness of PMMA and photon energy of the X-rays incident upon an X-ray mask absorber were examined. The maximum exposure time increases monotonically with increasing mean photon energy for the same total power density and is not a function of the thickness of resist. The minimum exposure time increases with increasing mean photon energy for the same total power density in the case of the

general LIGA process, where the thickness of PMMA is thinner than the attenuation length of PMMA. Additionally, the minimum exposure time increases monotonically with increasing thickness of PMMA. The maximally exposable thickness of resist is proportional to the attenuation length of the resist at the mean photon energy, with its proportional constant of  $\ln(D_{\text{dev}}/D_{\text{ex}})$ . The necessary thickness of a gold X-ray mask absorber increases irregularly with increasing photon energy of the X-rays incident upon an X-ray mask absorber due to absorption edges of gold, increases smoothly with increasing PMMA thickness ratio, and is independent of the total power density itself. The simplicity of the derived equations has made clearly understandable the X-ray exposure phenomenon and the correlation among the exposure times, the attenuation coefficient and the thickness of an X-ray mask absorber, the attenuation coefficient and the thickness of the resist, and the synchrotron radiation power density.

## 1. 서 론

LIGA 공정은 최근에 국내에 소개된 종횡비(aspect ratio)가 10 이상인 MEMS(microelectromechanical system) 제작기술의 일종으로서, 80년대 초에 독일의 핵연구센터(KfK)에서 우라늄 농축용의 극미세 분리 노즐시스템을 제작하면서 개발되기 시작하여[1], 현재는 독일의 IMT와 미국의 위스콘신-매디슨대학에서 각각 ELSA 가속기와 NSLS 가속기 등을 이용하여 공정 단계와 다양한 응용분야에 대한 연구가 진행중이며, 감지기와 구동기로의 응용을 위하여 희생층(sacrificial layer)을 이용한 운동 가능한 미세구조물을 그 영역이 확장되고 있다[2].

LIGA 공정은 평면에서의 형상(pattern)에 제한이 없으며, 1  $\mu\text{m}$  미만의 평면 치수와 수백  $\mu\text{m}$  두께의 미세구조물을 1  $\mu\text{m}$  이하 수준의 정밀도로 구현할 수 있고[3], 종종 1 cm 두께까지 시도되고 있다[4]. 플라스틱, 금속, 합금 그리고 세라믹 등의 다양한 재료로 LIGA 미세구조물의 제작이 가능하며, LIGA 미세구조물은 종횡비가 100 정도까지 가능하므로 강한 기계적 성질과 반복기능성(repeatable functionality)을 지니고 있다. 뿐만아니라, LIGA 공정은 사출성형 단계를 포함하므로 대량생산성을 갖추었으며, 다른 MEMS 제작기술과의 탁월한 접합성도 갖추고 있으므로, 화공학, 의공학, 생물공학뿐만 아니라 미세기계, 미세광학, 집적광학, 그리고 감지기와 구동기 등 여러 응용분야에서 여타 미세구조물 제작기술에 비해 우수한 것으로 평가받고 있다[5].

LIGA라는 공정은 독일어 Lithographie, Galvanoformung, Abformung의 약어로서, LIGA 공정의 주요 단계인 방사광을 이용한 X선노광 및 현상, 전기도금 그리고 사출성형 단계를 나타내고 있다. LIGA 공정을 간략하게 살펴보면, 먼저, 가속기의 강력한 방사광을 X선마스크에 투과시켜 전기전도성 기판(substrate) 상의 감광체(resist)를 노광한다. 방사광의 고직진성과 1~2 Å 정도

의 짧은 파장, 그리고 금 마스크흡광체의 높은 대비율(contrast) 때문에 두꺼운 감광체를 노광할 수 있다. 감광체의 노광된 영역을 GG 현상액으로 현상(develop)함으로써, 금속이 채워질 수 있는 날카로운 윤곽을 가진 주형(mold pattern)이 만들어진다. 그 윤곽부분에 전기도금하고, 노광되지 않은 감광체를 용해, 제거시키면 종횡비가 큰 미세구조물을 얻을 수 있다. 이에 더하여, 여타 미세구조물 제작기술과의 탁월한 접합성을 이용하면 여러 변종된 LIGA 공정도 가능하다.

LIGA 공정의 X선노광과 현상 단계는 감광체에 축적된 X선 선량에 크게 좌우된다. 감광체의 깊은 골이 완전히 현상되도록 하기 위해서는 PMMA(polymethylmethacrylate)의 경우, 하부까지 최소 약 4  $\text{kJ}/\text{cm}^2$ 의 선량이 도달하여야 하며, PMMA의 상부에서의 선량은 15~20  $\text{kJ}/\text{cm}^2$ 를 초과하지 않아야만, 노광된 PMMA의 표면에 기포(foam)가 형성되지 않는다. 한편, 마스크흡광체 아래의 선량이 0.1  $\text{kJ}/\text{cm}^2$ 보다 크면 PMMA가 부분적으로 현상되어 저질의 미세구조물이 나타난다[6].

상기의 노광 조건을 구현하기 위하여 전통적으로 사용되는 방법은 감광체 상부에 축적되는 최대 선량과 마스크흡광체 아래의 감광체 상부에 축적되는 최대 선량의 대비율을 200으로 맞추는 것인데[7], 200 이상이나 이하의 대비율도 노광 조건을 만족한다는 점에서 그 근거가 빈약하다. 또한, Malek[8] 등은 PMMA 상부에 축적되는 선량과 PMMA 하부에 축적되는 선량의 비를 6 정도에 맞추는 노력을 기울여 실험을 수행하였으며, Mohr[9]는 가속기의 제원에 따라 PMMA에 축적되는 선량에 대한 적분식과 프레스벨 회절 및 광전자기 LIGA 공정의 형상전달(pattern transfer) 정밀도에 미치는 영향에 대하여 간략히 발표한 바 있다.

X선노광 단계를 유효하게 수행하기 위하여 X선노광 현상에 대한 명확한 이해가 필수적이며, 이를 고려하여 X선마스크를 설계, 제작하여야 할 것이나, 다양한 X선

마스크 투과체, X선마스크 흡광체, X선 감광체, 방사광의 에너지전달률 분포 그리고 관련된 필터 등의 상호관계 등이 적절하고도 일반적인 이론으로서 발표된 바는 없다.

본 연구에서는 X선노광 단계에 대한 기초적 이론을 유도하고, 그 이론을 PMMA와 국내에서 사용 가능한 포항광원에 적용하여, 유효한 노광시간과 금 마스크흡광체의 필요두께 등을 제시함을 목적으로 한다.

### 2. X선노광 이론

LIGA 공정에서 감광체의 분자간 결합이 끊어지는 물질 변화는 감광체에 축적된 X선 선량에 의존하므로, 감광체에서의 X선 선량의 축적에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔다. 감광체 원자에 흡수된 광자는 광전자, 오거(Auger) 전자, 형광 등을 발생시키며, 이들 전자와 광자는 부차적으로 탄성산란(Thomson scattering)과 비탄성산란(Compton scattering) 등을 거치며 주위 원자에 축적되므로, 이러한 연쇄반응을 통한 에너지 전달은 대부분 횡방향으로 1 μm 미만인 국부에 제한된다[10]. 그러므로, 본 연구에서는, 감광체 내부에서 감쇠된 X선 에너지는 그 영역에 그대로 축적된 것으로 간주하고, 감광체의 흡수계수는 그 감쇠계수(감쇠길이의 역수)와 동일하다고 고려한다. 또한, 마스크투과체 및 감광체 하부의 도금기초(plating base) 등에서 발생하는 형광이 감광체의 상부와 하부에 축적되어 X선 선량에 영향을 주지만, 역시 그 왜곡된 영향은 횡방향으로 1 μm 미만의 범위에 국한된다[11]. 본 연구에서는 이러한 부차적인 노광 효과를 무시하고, X선노광 단계에 간여하는 거시적 물리량에 중점을 두어 실험에 유용한 X선노광 이론을 유도한다.

특정매질 내부의 두께  $t$ 에서 단일 광자에너지 X선의 에너지전달률 강도  $P(t)$ 는

$$P(t) = P_0 e^{-\mu t} \tag{1}$$

로 표현할 수 있다[12].  $\mu$ 는 특정매질의 감쇠계수이며  $P_0$ 는 특정매질 입구에서의 에너지전달률 강도이다. 식 (1)을 이용하여 X선노광시 단일 광자에너지 X선의 에너지전달률 강도를 X선의 진행방향에 따라 도시하면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 ABS는 마스크흡광체를, BLK는 마스크투과체를, 그리고 PR은 감광체를 표시하고 있다. ① 경로

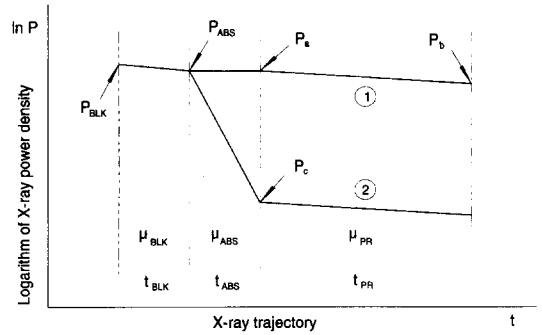


Fig. 1. Changing power density of monochromatic X-rays in a mask blank, a mask absorber, and a resist along the X-ray trajectory during X-ray exposure.

는 마스크투과체를 투과한 X선이 마스크흡광체를 거치지 않고 바로 감광체에 축적되는 과정을 나타내고, ② 경로는 마스크투과체와 마스크흡광체를 투과한 잔여 X선이 감광체에 축적되는 과정을 나타내고 있다. Fig. 1에서  $P$ 는 각 지점에서의 방사광의 에너지전달률 강도이다.

유효한 X선노광에 의해서 ① 경로 상의 감광체가 모두 현상 가능하게 되고, ② 경로 상의 감광체가 온전히 보존되어 전혀 현상이 이루어지지 않도록 하기 위하여, 다음 세 가지 노광 조건이 성립하여야 한다[6].

- 감광체 상부에 축적되는 X선 선량은 손상선량  $D_{dm}$ 보다 작아야 한다.
- 감광되어야 할 부분의 감광체 하부에 축적되는 X선 선량은 현상선량  $D_{dv}$ 보다 커야 한다.
- 마스크흡광체 아래의 감광체 상부에 축적된 X선 선량은 한계선량  $D_{th}$ 보다 작아야 한다.

이 노광 조건들을 수식으로 표현하면

$$q_a < D_{dm} \tag{2}$$

$$q_b > D_{dv} \tag{3}$$

$$q_c < D_{th} \tag{4}$$

의 부등식으로 나타낼 수 있다. 여기서,  $q_a, q_b, q_c$ 는 각각  $a, b, c$  지점에서의 X선 선량을 나타낸다. 식 (1)을 마스크흡광체와 감광체에 적용하면,  $c$  지점에서의 에너지전달률 강도  $P_c$ 와 감광체 내부의 두께  $t$ 에서 에너지전달률 강도  $P(t)$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_c = P_a e^{-\mu_{abs} t_{abs}} \tag{5}$$

$$P(t) = P_c e^{-\mu_m t} \tag{6}$$

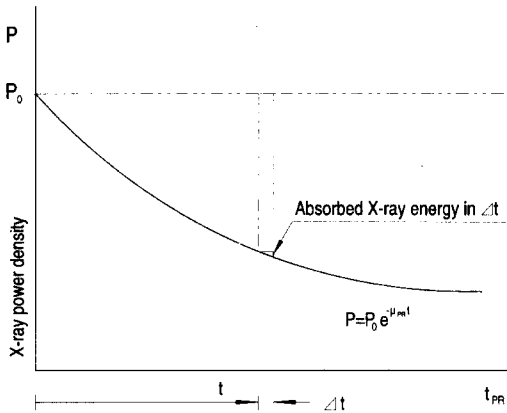


Fig. 2. Changing X-ray power density in a resist during X-ray exposure.

Fig. 2는 식 (6)을 도식한 것으로 감광체 내부에서 에너지전달률 강도  $P(t)$ 가 지수적으로 감소하는 일반적인 양상을 나타내고 있다. 노광시간  $\tau$ 동안에 감광체의 두께차  $\Delta t$ 에 축적되는 X선 선량은  $\tau[P(t)-P(t+\Delta t)]$ 로 표현할 수 있다. 그러므로 ① 경로 상의 X선 선량  $q_1$ 과 ② 경로 상의 X선 선량  $q_2$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_1(t) = \tau \mu_{PR} P_a e^{-\mu t} \quad (7)$$

$$q_2(t) = \tau \mu_{PR} P_a e^{-\mu_{max} t_{max}} e^{-\mu t} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터, a, b, c지점에서의 X선 선량  $q_a, q_b, q_c$ 는

$$q_a = \tau \mu_{PR} P_a \quad (9)$$

$$q_b = \tau \mu_{PR} P_a e^{-\mu_{max} t_{max}} \quad (10)$$

$$q_c = \tau \mu_{PR} P_a e^{-\mu_{max} t_{max}} \quad (11)$$

와 같이 구할 수 있다. 식 (9), (10), (11)을 식 (2), (3), (4)의 부등식에 적용하면, 노광 조건을 만족시키기 위해서 필요한, 노광시간  $\tau$ 과 마스크흡광체의 두께  $t_{ABS}$ 에 대한 부등식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{D_{dv}}{\mu_{PR} P_a e^{-\mu_{max} t_{max}}} < \tau < \frac{D_{dm}}{\mu_{PR} P_a} \quad (12)$$

$$t_{ABS} > \frac{1}{\mu_{ABS}} \ln \left[ \tau \mu_{PR} \frac{P_a}{D_{th}} \right] \quad (13)$$

식 (12)의 좌항과 우항을 각각 최소노광시간  $\tau_{min}$ 과 최대노광시간  $\tau_{max}$ 으로 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_{min} = \frac{D_{dv}}{\mu_{PR} P_a e^{-\mu_{max} t_{max}}} \quad (14)$$

$$\tau_{max} = \frac{D_{dm}}{\mu_{PR} P_a} \quad (15)$$

식 (13)에서 실제의 노광시간에 여유를 주기 위해  $\tau$ 를  $\kappa \tau_{min}$ 으로 치환하고, 식 (13)의 우항을 마스크흡광체의 필요두께  $t_{ABS}$ 로 새로이 정의하면, 마스크흡광체의 필요두께  $t_{ABS}$ 에 관한 식을 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서  $\kappa$ 는 노광시간의 안전계수로서 1보다 큰 수이다.

$$t_{ABS} = t_{ABS} \left[ \ln \frac{\kappa D_{dv}}{D_{th}} + \frac{t_{PR}}{l_{PR}} \right] \quad (16)$$

식 (16)에서  $l_{ABS}$ 와  $l_{PR}$ 은 마스크흡광체와 감광체의 감쇠 길이로서, 각각 마스크흡광체의 감쇠계수와 감광체의 감쇠계수의 역수이다.

식 (14), (15), 그리고 (16)은 단일 광자에너지의 X선에 대한 식임에 유의하고, 방사광은 넓은 광자에너지 대역 상의 광자의 집합이며 감쇠계수  $\mu_{PR}$ 은 광자에너지  $E$ 의 함수임을 고려하면, 노광시 적용해야 할 최소노광시간  $\tau_{min}$ 과 최대노광시간  $\tau_{max}$ 은

$$\tau_{min} = \frac{D_{dv}}{\sum_E^N \mu_{PR}(E) P_a(E) e^{-\mu_m(E) t_m}} \quad (17)$$

$$\tau_{max} = \frac{D_{dm}}{\sum_E^N \mu_{PR}(E) P_a(E)} \quad (18)$$

로 표현될 수 있다. 여기서  $\sum_E^N$ 는 방사광의 에너지전달률 분포를 N개의 광자에너지 미소 대역으로 분할한 후, 각 미소 대역에서의 함수값을 방사광의 전체 광자에너지 대역에 걸쳐 총합한 것을 표시하며,  $P_a(E)$ 는 마스크흡광체에 도달한 방사광의 에너지전달률 분포에서, 광자에너지 미소 대역내의 광자로 인한 에너지전달률 강도이다.

마스크흡광체에 도달한 X선의 전체 에너지전달률 분포에 대하여 식 (16)의 중량평균을 잡으면, 실제의 X선 마스크에 적용해야 할 마스크흡광체의 두께  $t_{ABS}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{ABS} \cong \frac{\sum_E^N P_a(E) t_{ABS}(E)}{\sum_E^N P_a(E)} \quad (19)$$

여기서  $t_{abs}(E)$ 는 식 (16)을 가리키며, X선마스크의 마스크흡광체 두께가 식 (19)로 계산된 값보다 두꺼우면 한계선량의 노광 조건을 만족한다.

### 3. 응용 및 고찰

#### 3.1. 방사광 에너지전달률 강도의 계산

포항광원의 White 빔라인은 고강도의 방사광을 프론트엔드를 거쳐, 방사광 근원점으로부터 24.7 m 위치에 설치되어 있는 노광진동기로 전달한다. 방사광은 진공용기를 통해 진행하다가, 노광진동기 전방 44.1 cm 지점에서 254  $\mu\text{m}$ 의 베릴륨윈도우를 투과한다. 이 때 방사광의 가시광선과 자외선 영역은 거의 소멸되고, 고광자 에너지 대역의 X선 영역은 대부분 투과하여 38.3 cm 길이의 1기압 헬륨용기와 35  $\mu\text{m}$  두께의 캄톤 필름, 그리고 5.8 cm 길이의 대기를 거쳐 X선마스크에 도달한다. Fig. 3에 White 빔라인의 노광대와 노광진동기 상세도가 나타나 있다.

저장링 휨전자석으로부터의 광자전달률  $\mathcal{J}$ 은 다음 식으로 표현될 수 있다[13].

$$\frac{d\mathcal{J}}{d\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \alpha \gamma \frac{\Delta\omega}{\omega} \frac{I}{e} \frac{\omega}{\alpha} \int_{\omega\omega_c}^{\infty} K_{5/3}(y') dy' \quad (20)$$

여기서  $\phi$ 는 수평각이며, 미세구조상수  $\alpha$ 는  $1/137.04$ 이고, 전자에너지비  $\gamma$ 는 전자의 정지 에너지에 대한 저장링전자 에너지의 비이다.  $e$ 는 기본전하이며,  $\omega$ 는 광자의 원형주파수이고,  $\Delta\omega$ 는 원형주파수의 미소 대역이다.  $I$ 는 저장링전자 전류로서 시간에 따라 감소하고,  $\omega_c$ 는 방사광 에너지전달률 분포를 동일한 에너지전달률 양으로 양분하는 임계원형주파수로서  $\omega_c = 3\gamma^3 c / 2\rho$ 의 관계를 가지며( $c$ ; 광속,  $\rho$ ; 저장링 휨전자석 곡률 반경),  $K_{5/3}$ 는 차수가 5/3인 2종 개량된 베셀함수이다.

저장링전자 전류  $I$ 의 변화는 방사광 에너지전달률 분포의 분포비를 변화시키지 않으므로, 본 연구에서는 일정한 저장링전자 전류에 대하여 수식을 유도한다. 식 (20)은  $K_{5/3}$ 를 근사시킴으로써 수치적으로 계산될 수 있으므로[14], 0.1% 광자에너지 대역당 저장링의 에너지전달률  $p(E)$ 는

$$p(E) = \frac{d\mathcal{J}}{d\phi} \phi_e E \quad (21)$$

로 구해지며  $\phi_e$ 는 빔라인의 수평 입사각이다.

식 (21)의  $p(E)$ 에 빔라인의 여러 필터에 의한 여광효과인자  $f_f = e^{-\sum \mu_i t_i}$ 를 곱하고 노광면적  $A \cong 2L\phi_e(h_v + L\sigma_v)$ 로 나누면 0.1% 광자에너지 대역당 마스크흡광체에 입사하는 방사광의 에너지전달률 강도  $p_a(E)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_a(E) = p(E) f_f / A = \frac{d\mathcal{J}}{d\phi} E e^{-\sum \mu_i t_i} / 2L(h_v + L\sigma_v) \quad (22)$$

여기서  $\mu_i$ 는  $i$ 번째 필터의 감쇠계수,  $t_i$ 는  $i$ 번째 필터의 두께,  $L$ 은 방사광 근원점으로부터 노광지점까지의 거리,  $h_v$ 는 노광진동기의 수직진동 진폭이고  $\sigma_v$ 는 방사광의 수직 확산각의 표준편차로서 다음식으로 근사될 수 있다[13].

$$\sigma_v \cong \frac{0.64}{\gamma} \left( \frac{E}{E_c} \right)^{-0.53} \quad (23)$$

여기서  $E_c$ 는 임계광자에너지로서  $E_c = h\omega_c / 2\pi$ 이며  $h$ 는 플랑크 상수이다.

Fig. 4는 저장링전자 에너지  $E_e = 2.047$  GeV, 저장링전자 전류  $I = 100$  mA을 기준으로, 방사광이 White 빔라인에서 여러 필터를 거치면서 그 에너지전달률 분포가 변

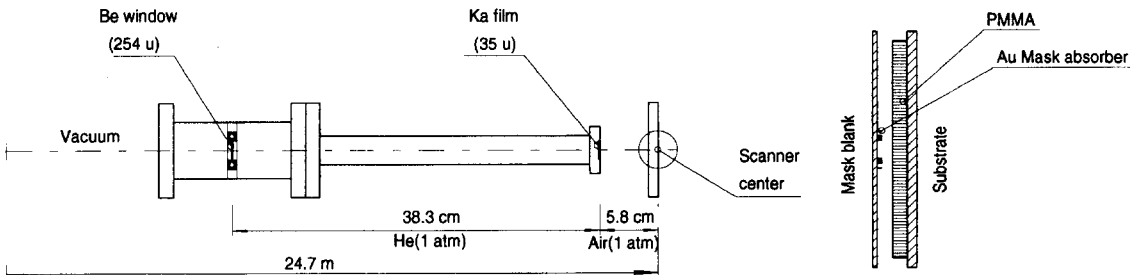


Fig. 3. Lithography station of white beamline and the scanner center detail.

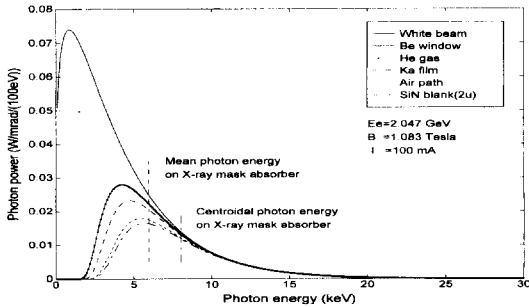


Fig. 4. Changing power spectrum of the synchrotron radiation passing through various filters in white beamline at the pohang light source.

화하는 양상을 도시하고 있으며, 일점쇄선으로 표시된 수직선은 마스크흡광체에 입사되는 X선의 중심(centroid) 광자에너지를, 쇄선으로 표시된 수직선은 3.2 절에서 언급된, 마스크흡광체에 입사되는 X선의 평균(mean) 광자에너지  $\bar{E}$ 를 나타내고 있다. 베릴륨윈도우를 거치면서 저광자에너지 대역의 방사광은 완전히 소멸하므로, 방사광의 총에너지전달률은 반 정도로 줄어든다. 이어서, 1 기압 헬륨에 의한 방사광의 감쇠는 상대적으로 미소해서, 베릴륨윈도우에 의해서 감쇠된 에너지전달률 분포 곡선에 거의 근접해 있음을 관찰할 수 있다. 본 연구의 계산에서 사용된 여러 필터의 감쇠계수 등은 LBL의 CXRO에서 공개된 자료를 이용하였으며, 마스크투과체는 2  $\mu\text{m}$  두께의 실리콘질화막으로 고려하였다.

### 3.2. PMMA의 노광시간과 노광 가능한 최대두께

Fig. 5는 PMMA의 감쇠길이를 광자에너지  $E$ 에 대하여 나타낸 것으로 그림에서 관찰되듯이 PMMA의 감쇠길이는 다음과 같은 광자에너지  $E$ 의 멱함수로 근사시킬 수 있다.

$$l_p \approx B_1 E^{B_2} \quad (24)$$

식 (24)에서  $B_1$ 은  $2.61 \times 10^{-10}$ ,  $B_2$ 는 3.26이며  $l_p$ 의 단위는  $\mu\text{m}$ ,  $E$ 의 단위는 eV이다. 그러므로 PMMA의 감쇠계수는  $\mu_p = 1/l_p = 1/(B_1 E^{B_2})$ 로 표현할 수 있다.

마스크투과체를 투과하여 마스크흡광체에 입사하는 방사광의 에너지전달률 분포상의 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 를 식 (14)와 (15)에 도입하면, 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 에서의 최소노광시간  $\tau_{\min}$ 과 최대노광시간  $\tau_{\max}$ 는 다음과 같이 기술된다.

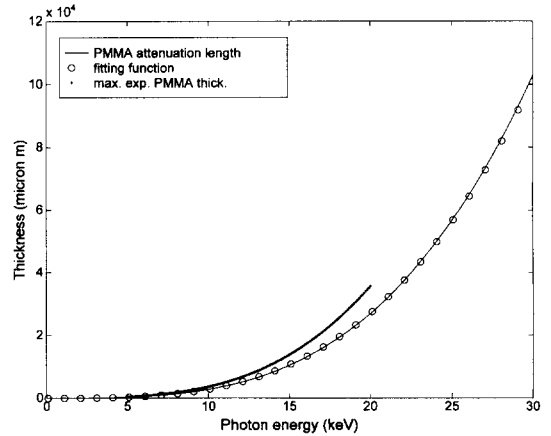


Fig. 5. Attenuation length of PMMA and its fitting function versus photon energy, and maximally exposable thickness of PMMA versus mean photon energy.

$$\tau_{\min} |_{E=\bar{E}} = D_{av} l_p(\bar{E}) e^{t_p/l_p(\bar{E})} / P_a \quad (25)$$

$$\tau_{\max} |_{E=\bar{E}} = D_{dm} l_p(\bar{E}) / P_a \quad (26)$$

식 (25)와 (26)에서  $P_a$ 는 마스크흡광체에 입사하는 단일 광자에너지 방사광의 에너지전달률 강도  $P_a(E)$ 를 전체 광자에너지 대역에 걸쳐 총합한 총에너지전달률 강도이다. 식 (26)의 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 는  $l_p(\bar{E}) = P_a / \sum_E \{P_a(E) / l_p(E)\}$ 의 관계식으로부터 구할 수 있으며, PMMA의 두께 비  $t_p/l_p$ 가 고정된 경우에는 식 (25)의 평균 광자에너지는 식 (26)의 평균 광자에너지와 동일하다.

식 (25)와 (26)으로부터 여러 인자에 의한 노광시간에 대한 영향을 손쉽게 유추할 수 있다. 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 가 증가하면, PMMA의 감쇠길이가  $l_p$ 가 증가하므로, 식 (26)으로부터 동일 총에너지전달률 강도  $P_a$ 에 대하여 PMMA의 두께  $t_p$ 와 상관없이 최대노광시간  $\tau_{\max}$ 이 단조 증가함을 알 수 있다. 또한 최소노광시간  $\tau_{\min}$ 의 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 에 대한 거동을 살펴기 위하여  $(\partial \tau_{\min} / \partial E) |_{E=\bar{E}}$ 를 구하면

$$\frac{\partial \tau_{\min}}{\partial E} \Bigg|_{E=\bar{E}} = \frac{D_{av}}{P_a} e^{t_p/l_p} \frac{dl_p}{dE} \left( 1 - \frac{t_p}{l_p} \right) \Bigg|_{E=\bar{E}} \quad (27)$$

이다.  $dl_p/dE$ 가 양수이므로, PMMA의 두께  $t_p$ 가 PMMA의 감쇠길이가  $l_p$ 보다 작으면, 최소노광시간  $\tau_{\min}$ 은 동일 총에너지전달률 강도  $P_a$ 에 대하여 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 가 증가함에 따라 증가한다. LIGA 공정에서 일반

적으로  $t_p < l_p$ 의 조건이 성립하므로, 빔라인 상의 필터 등에 의해서 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 가 증가하면, 동일 총에너지전달률  $P_a$ 에 대하여 최소노광시간  $\tau_{min}$ 도 증가함을 알 수 있다. 반대로  $t_p > l_p$ 이면, 동일 총에너지전달률  $P_a$ 에 대하여 최소노광시간  $\tau_{min}$ 은 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 가 증가함에 따라 감소한다. 한편, PMMA의 두께  $t_p$ 의 증가에 대해서는 최소노광시간  $\tau_{min}$ 이 단조증가한다. 다음의 Fig. 6은 동일 총에너지전달률 강도  $P_a$ 에 대하여 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 에 따른 최소노광시간  $\tau_{min}$ 과 최대노광시간  $\tau_{max}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 최소노광시간  $\tau_{min}$ 은 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 뿐만 아니라 PMMA의 두께  $t_p$ 의 함수이므로, Fig. 6에서 PMMA의 두께비  $t_p/l_p$ 를 변화시키며 최소노광시간  $\tau_{min}$ 을 도시하였는데, PMMA의 두께비  $t_p/l_p$ 는 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 가 증가함에 따라 PMMA의 감쇠길이  $l_p(\bar{E})$ 가 증가하는 경향을 내포하고 있다. 따라서, 식 (27)과 달리,  $t_p/l_p > 1$  이더라도 Fig. 6의 최소노광시간  $\tau_{min}$ 은 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 에 대해서 증가한다.

PMMA의 두께  $t_p$ 에 대해서, 최대노광시간  $\tau_{max}$ 은 일정하나 최소노광시간  $\tau_{min}$ 은 단조증가한다. 만일 PMMA의 두께가 계속 증가하여 최소노광시간  $\tau_{min}$ 과 최대노광시간  $\tau_{max}$ 가 동일해진다면, 이 때의 PMMA의 두께는 PMMA의 노광 가능한 최대두께일 것이므로,  $\tau_{max}/\tau_{min}=1=(D_{dm}/D_{dv}) e^{-\mu_e t_p}$ 로부터 PMMA의 노광 가능한 최대두께  $t_{p,max}$ 에 관한 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{p,max}(\bar{E}) = l_p(\bar{E}) \ln \frac{D_{dm}}{D_{dv}} \cong 1.32 l_p(\bar{E}) \quad (28)$$

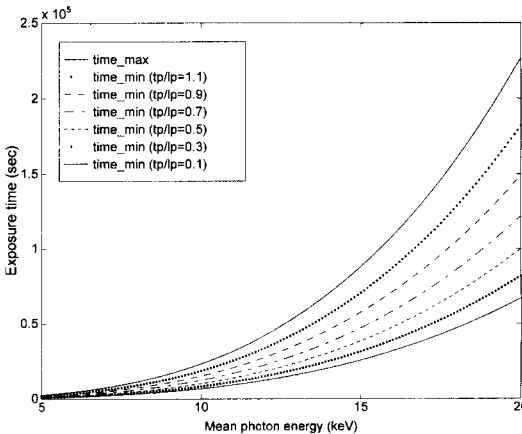


Fig. 6. Minimum and maximum exposure times versus mean photon energy, compared for various PMMA thickness ratios.

식 (28)의 후항은  $D_{dm}=15 \text{ kJ/cm}^3$ 와  $D_{dv}=4 \text{ kJ/cm}^3$ 을 적용한 결과이다. 식 (28)로부터 PMMA의 노광 가능한 최대두께  $t_{p,max}$ 는 방사광의 평균 광자에너지  $\bar{E}$ 에서의 PMMA의 감쇠길이  $l_p(\bar{E})$ 에 비례하며 그 비례상수는  $\ln(D_{dm}/D_{dv})$ 임을 알 수 있다. Fig. 5에 5~20 keV의 평균 광자에너지 대역에 대해서 PMMA의 노광 가능한 최대두께가 나타나 있다.

### 3.3. 금 마스크흡광체의 필요두께

식 (16)의 감광체와 마스크흡광체로서 PMMA와 금을 적용하면, 안전계수  $\kappa$ 가 2인 금 마스크흡광체의 두께  $t_{Au}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t_{Au}(E) = l_{Au}(E) \left[ 4.38 + \frac{t_p}{l_p(E)} \right] \quad (29)$$

식 (29)에서 금 마스크흡광체의 필요두께  $t_{Au}$ 를 평균 광자에너지가 아니라 광자에너지의 함수로 두었는데, 이는 식 (19) 자체가 마스크흡광체에 도달한 X선의 에너지전달률 분포에 대한, 식 (16)의 중량평균이기 때문이다. 그러므로, 평균 광자에너지에 대한 금 마스크흡광체의 필요두께의 경향은 광자에너지에 대한 경향과 유사할 것이다. 식 (29)로부터 금 마스크흡광체의 필요두께  $t_{Au}$ 는 PMMA의 두께  $t_p$ 와 무관한 최소치가 존재하며, 이와 함께 PMMA의 두께비  $t_p/l_p$ 에 비례하는 항을 가짐을 알 수 있다. X선의 광자에너지가 커지면 금 마스크흡광체의 필요두께는 금의 감쇠길이에 의존하여 불규칙하게 증가한다. 또한, 마스크흡광체의 필요두께  $t_{Au}$ 는 X선의 에너지전달률 강도  $P_a$  자체와는 무관함을 알 수 있다.

Fig. 7은 PMMA의 두께비와 마스크흡광체에 입사하는 방사광의 광자에너지에 따른 금 마스크흡광체의 필요두께의 양상을 나타내고 있다. 금 마스크흡광체의 필요두께  $t_{Au}$ 는 PMMA의 두께비  $t_p/l_p$ 에 대해서는 완만한 증가세를 보인다. 마스크흡광체에 입사하는 광자에너지의 증가에 따라 금 마스크흡광체의 필요두께가 일정한 증가를 보이지 않는 것은 금의 감쇠길이가 absorption edge로 인하여 관심있는 X선 광자에너지 대역에서 매우 불규칙한 양상을 보이기 때문이다. 식 (29)를 구하기 위하여  $D_{dv}=4 \text{ kJ/cm}^3$ 와  $D_{dm}=0.1 \text{ kJ/cm}^3$ 을 이용하였는데 한계선량은 마스크흡광체의 두께에만 간여하는 인자로서, 만약 현상 후에 잔류해야할 PMMA 주형의 표면 상태가 중요한 변수가 아니라면, 이것의 값을  $0.1 \text{ kJ/cm}^3$ 보다 상당가량 증가시켜도 무방할 것이다.

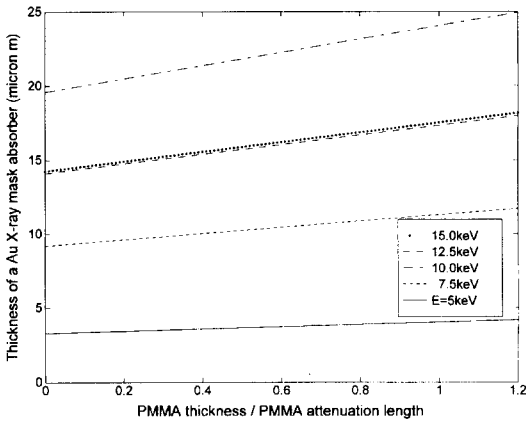


Fig. 7. Necessary thickness of a gold X-ray mask absorber versus PMMA thickness ratio, compared for various photon energy.

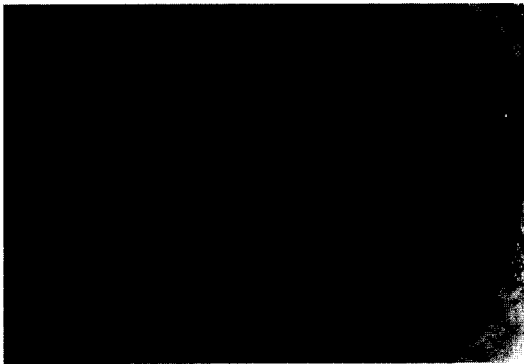
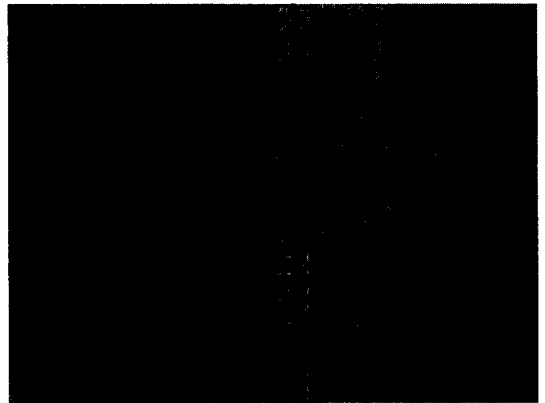


Fig. 8. Photograph of developed 120 μm thick PMMA mold patterns for electrostatic microactuators, on a 3 inch silicon wafer.

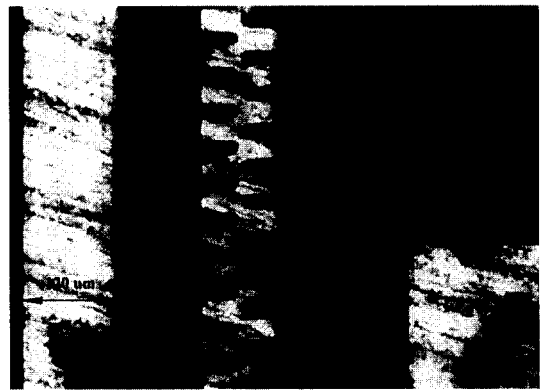
3.4. 실험

연구중인 미세 정전구동기의 노광 및 현상된, 120 μm 두께의 PMMA 주형이 Fig. 8에 나타나 있다. 정전구동기의 전체 크기는 6 mm×6 mm이며 3" 실리콘 웨이퍼 상에 좌우로 4개씩의 주형이 배열되어 있다. 노광에 이용된 X선마스크는 2 μm 두께의 실리콘질화막 상에 설계형상이 8 μm 두께로 금도금된 것이다. 저장링 전자 에너지  $E_e=2.047$  GeV, 저장링 전자 전류  $I=100$  mA의 저장링 운전 조건에서 노광진동기의 수직진동 진폭  $h$ , 이 10 mm 일 때, 최소노광시간과 최대노광시간은 각각 32.5 min과 73.3 min으로 계산되었으며, 실제의 노광은 White 빔라인에서 100 mA 기준으로 39.8 min 동안 진행되었다.

Fig. 9(a)는 Fig. 8의 미세 정전구동기의 빗살(comb) 주



(a)



(b)

Fig. 9. Micrographs of enlarged comb structures of an electrostatic microactuator in Fig. 8(a) developed PMMA mold patterns and (b) inckel electroplated structures (dark region) before PMMA removal.

형을 확대해서 보여주는 현미경 사진이다. PMMA 빗살 주형이 완전히 현상되었음을 관찰할 수 있다. PMMA 주형 상부의 긁힌자국(scratch)은 PMMA의 두께를 120 μm 로 가공하기 위한 연마공정에서 기인한 것이다. Fig. 9(b)는 계속하여 전기도금된 니켈 빗살 구조물의 현미경 사진이며, 그림에서 어두운 부분이 니켈 구조물이고 밝은 부분이 아직 제거되지 않은 PMMA 주형이다. 빗살의 손가락 (finger) 너비는 16 μm이고 손가락 간격은 30 μm이다.

4. 결 론

유도된 여러 식의 단순성으로 인하여 노광시간, 마스크흡광체의 감쇠계수와 두께, 감광체의 감쇠계수와 두께, 그리고 방사광의 에너지전달률 분포 등의 상호연관



성과 X선노광 현상에 대한 이해가 가능하게 되었다. 감광체로 PMMA를, 마스크흡광체로 금을 적용하여 최소노광시간과 최대노광시간, 감광체의 노광 가능한 최대두께, 금 마스크흡광체의 필요두께 등의 경향이 검토되었다.

최대노광시간은 동일 총에너지전달률 강도에 대하여 평균 광자에너지가 증가함에 따라 단조증가하며, 감광체 두께의 함수가 아니다. 최소노광시간은 PMMA의 두께가 PMMA의 감쇠길이보다 작은 일반적인 LIGA 공정에서, 동일 총에너지전달률 강도에 대하여 평균 광자에너지가 증가함에 따라 증가한다. 한편, PMMA의 두께에 대해서는 단조증가한다. 감광체의 노광 가능한 최대두께는 X선의 평균 광자에너지에서의 감광체의 감쇠길이에 비례하며, 그 비례상수는  $\ln(D_{th}/D_{av})$ 이다. 금 마스크흡광체의 필요두께는 마스크흡광체에 입사하는 X선의 광자에너지에 대해서는 불규칙하게 증가하나, PMMA의 두께비에 대해서는 완만한 증가세를 보이며, 총에너지전달률 강도 자체와는 무관하다.

이러한 연구결과는 프로그램으로 작성되었으며, X선 마스크 설계 및 제작과 LIGA공정의 X선노광 단계에 적용될 수 있을 뿐만 아니라 일반적인 자외선노광(photo lithography)에도 변용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(ME-97-099)와 1997학년도 포항공과대학교의 자체연구비의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. 또한, X선마스크 제작에 도움을 주신 포항공대의 오 동영씨, 전자부품종합기술연구소의 홍 성제 연구원, 정 석원 연구원에게도 감사 드립니다. 아울러 포항가속기연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner and D. Munchmeyer, *Microelectron. Eng.* **4**, 35 (1986).
- [2] H. Guckel, P. S. Mangat, H. Emmerich, S. Mas-soud-Ansari, J. Klein, T. Earles, J. D. Zook, T. Ohnstein, E. D. Johnson, D. P. Siddons, and T. R. Christenson, *Solid State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, 1996, pp. 60-63.
- [3] C. Muller and J. Mohr, *Interdisciplinary Sci. Rev.* **18**, 3 (1993).
- [4] H. Guckel, K. J. Skrobis, J. Klein, and T. R. Christenson, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12**, 4 (1994).
- [5] W. Menz, *Sensors and Actuators A* **54** (1996), pp. 785-789.
- [6] P. Bley, W. Menz, W. Bacher, K. Feit, M. Har-menning, H. Hein, J. Mohr, W. K. Schomburg and W. Stark, *1991 International Microprocess Conference*, Kanazawa, 1991.
- [7] C. K. Malek, K. H. Jackson, W. D. Bonivert and J. Hruby, *J. Micromech. Microeng.* **6** (1996), pp. 228-235.
- [8] C. K. Malek, K. Jackson, R. A. Brennen, M. H. Hecht, W. D. Bonivert and J. Hruby, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 6 (1994).
- [9] J. Mohr, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico-Fermi" Course CXXVIII*, edited by E. Burattini and A. Balerna (IOS press, Amsterdam, 1996) pp. 181-207.
- [10] M. Feldman and J. Sun, *J. Vac. Sci. Technol. B* **10**, 6 (1992).
- [11] G. Feiertag, W. Ehrfeld, H. Lehr, A. Schmidt and M. Schmidt, *J. Micromech. Microeng.* **7** (1997), pp. 323-331.
- [12] J. H. Hubell, *Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV* (National Bureau of Standards, Washington, 1969) pp. 1-16.
- [13] K. J. Kim, *Physics of Particle Accelerators*, edited by R. G. Lerner (American Institute of Physics, New York, 1989) pp. 567-598.
- [14] S. W. Chung (private communication).
- [15] C. H. Mastrangelo and W. C. Tang, *Semiconductor Sensors*, edited by S. M. Sze (John Wiley & Sons Press, New York, 1994) pp. 75-78.