

## Moiré Fringe에 의한 액막 두께 미소 변위 측정 연구

A Study on the Small Disturbance Measurement of Liquid Film  
Thickness by Moiré Fringe

전 홍신\*, 김 경훈\*

H.S. Jeon, K.H. Kim

## ABSTRACT

Liquid film thickness is measured by moiré topography which monitored liquid surface. Moiré fringe measurement techniques share the inherent simplicity found in optical interferometric techniques have the advantage of use over a greater range of displacement. Moiré fringe are the geometric interference patterns observed when two dense line grating are superposed. Light transmitted through a fixed line grating is deviated by the liquid film surface, producing a distorted image of the grating. The moiré fringe produced by projection of this optically distorted grating onto a second stationary grating permit visualisation of the liquid surface and measurement of the liquid film thickness. This study measured the small amplitude of liquid film thickness to the moiré fringe pattern produced when spherical metal was dropped glycerin pool. And the measurement of liquid film thickness flowing down an inclined plate are required to calculate the liquid surface slope in a position.

Keyword : Moiré fringe(모아레 무늬), Measurement Technique(측정기술), Liquid Film(액막),  
Disturbance Measurement(변위 측정)

## 1. 서론

액체 표면의 검출은 많은 산업분야에서 여러 목적에 따라 응용되고 있다. 예를 들면, 탱크내의 액체의 깊이, 체적 또는 질량을 측정할 목적으로 액면을 검출한다든지, 또는 어떤 프로세스의 계측장비 시스템의 일부를 구성하여, 탱크내의 액면을 검출하여 액체의 공급·배출을 위한 시동·정지 신호를 얻기 위한다든지, 공급량·배출량 혹은 공급속도·배출속도를 제어하기 위한 시스템의 신호로서 액면을 검출하고 있다. 액면을 검출하는 방법에는 사람이 직접 눈으로 인식하는 방법, 액체의 열전달 현상<sup>(1)</sup>이나, 전자

파의 반사, 굴절 현상 등을 이용하는 방법<sup>(2)</sup>, 또한 액체가 도전성이면 기상중에 있는 전극이 액면에 접촉할 때 전류가 흐르는 것을 감지하여 액면을 검출<sup>(3)</sup>하는 방법 등이 있다.

액면을 검출하는 방법중에서도 전자파를 이용하는 방법은 측정 정도가 우수할 뿐만 아니라, 성능이 우수하여 이용분야가 확대되고 있다. 여기에는 파장이 짧은  $\gamma$ 선(파장  $10^{-12}$ m 이하, 진동수  $3 \times 10^{20}$  이상), 가시광선(파장 0.38~0.77 $\mu$ m) 및 마이크로 웨이브(파장  $10^{-4}$ m 이하)등이 사용되고 있다<sup>(2)</sup>. 이들 전자파는 어느 것이나 반사, 흡수, 굴절, 회절, 간섭 등의 현상을 일으키기 때문에, 파장의 크기와 취급하

\* 정회원, 경희대학교 기계공학과

는 대상의 물리적인 크기에 따라 이들 현상중 어떤 한가지를 이용하여 액면을 검출하고 있다. 그러나 전자파의 응용은 액면의 검출에 대한 on-off 또는 액면의 표면의 변위의 측정에 대해서는 전자파의 파장 정도의 크기에 대해서만 측정이 가능하다. 그러나 수 cm 정도의 크기의 액막두께를 측정할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 종래 주로 탄성체의 변형, 도장 산업(coating industry) 및 물체의 형상 인식을 위한 방법으로 사용되어 온 Moiré Topography를 이용하여 액체 표면을 검출하였다. Moiré Topography는 수  $\mu$ 에서 수 cm 까지 또는 더욱 큰 범위의 변위를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 모아레 포토그래피법을 이용하여 액막 표면 범위 측정에 관한 이론적 해석과 아울러 액막 표면 변위 및 유동중인 액막 표면 변위 측정에 적용하고 그 측정 결과로부터 액막 변위의 3차원 변위, 유동중인 액막표면 변위 등을 실험적으로 구명하였다.

## 2. Moiré Topography에 의한 액막 두께 측정 원리

Moiré Topography를 이용하여 액면을 검출하는 방법에는 oblique shadow method, reflected image method, refracted image method 등 3 가지 방법이 있다. 본 연구에서는 refracted image method<sup>(1)-(4)</sup>를 사용하였으며, 이에 대하

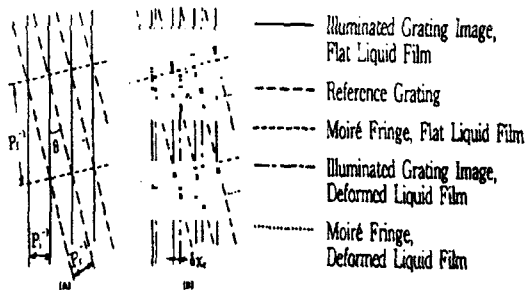


Fig. 1 (a) Relation between grating orientation and fringe pitch and (b) relation between ruling displacement,  $\delta x_r$  and fringe displacement,  $\delta y$ .

여 설명한다.

2개의 조밀한 직선의 격자를 작은 각도로 서로 교차시키면, 원래 2개의 줄무늬 방향에 대하여 직각방향으로 일련의 평행한 새로운 줄무늬가 기하학적인 간섭현상으로 생기게 된다. 이 줄무늬를 모아레 프린지(moiré fringe)라 한다. 2 개의 직선의 격자는 조사용 격자, 참조용 격자로 구분한다. refracted image method 는 측정 대상 물체를 조사용 격자와 참조용 격자 사이에 설치하여 측정하는 방법이다.

액막 두께가 일정한 경우에 조사용 격자를 통과한 직선의 격자는 참조용 격자와 서로 겹치면 Fig 1(a)에서 보여준 것처럼 또 다른 직선상의 모아레 프린지가 생긴다. Fig 1(a)에서 모아레 줄무늬 사이의 거리  $P_f$ 는 2개의 격자의 교차각  $\theta$ 와 참조용 격자의 격자선 피치  $P_r$ 에 따라 변하고 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_f = 2P_r \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

그러나 액막 두께가 조사용 격자의 격자선의 직각방향에 대하여 균일하지 않을 때는, Fig 1(b)와 같이 비틀어진 모아레 줄무늬가 생기게 된다. 이것은 두께가 일정하지 않은 투명한 액체를 통과한 빛이 그림 2에 보여준 것처럼 액막 표면에서 굴절되기 때문이다. 따라서 조사용 격자를 통과한 등간격의 격자선은, 액막 표면에서 굴절되어 마치  $\delta x_r$  변위를 한 것과 같이 보인다. 변위  $\delta x_r$  크기는 액막 표면의 기울기에 비례한다. 액막표면의 법선 방향의 단위 벡터

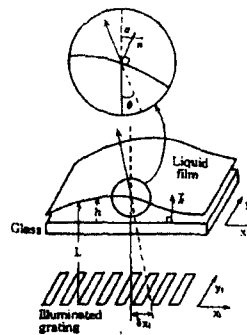


Fig. 2 Refraction of a light ray passing through a wavy surface

$\vec{n}$  과 유리면에 대한 법선방향의 단위 벡터  $\vec{k}$  와 이룬 각  $\alpha$  사이에는 그림 2에 의해 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\alpha = \arccos \vec{n} \cdot \vec{k} = \arctan \frac{dh}{dx} \quad (2)$$

또 Snell의 굴절 법칙에서 액막 표면에서의 굴절각  $\phi$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \arcsin(n \sin \alpha) - \alpha \\ &= \arcsin \left[ n \sin \left( \arctan \frac{dh}{dx} \right) \right] \\ &\quad - \arctan \frac{dh}{dx} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 변위  $\delta x_i$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \delta x_i &= L \tan \phi \\ &= L \tan \left[ \arcsin \left( n \sin \left( \arctan \frac{dh}{dx} \right) \right) \right. \\ &\quad \left. - \arctan \frac{dh}{dx} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

한편, 액막 표면의 굴절에 의해 참조용 격자면상에서 격자선 변위  $\delta x_r$  은, 조사용 격자의 격자선 피치  $p_i$  와 참조용 격자의 격자선 피치  $p_r$  에 따라 변하게 되며 다음 식으로 주어진다.

$$\delta x_r = \delta x_i \left( \frac{dx_r}{dx_i} \right) = \delta x_i \left( \frac{p_i}{p_r} \right) \quad (5)$$

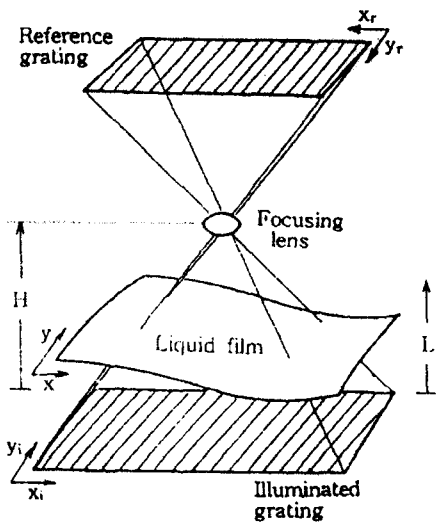


Fig. 3 Relation between coordinates in the reference grating, illuminated grating and liquid film thickness

더욱이 참조용 격자면상에 모아레 줄무늬 변위  $\delta y_r$  은 Fig 1(b)에서는 참조용 격자면상에서 격자선 변위  $\delta x_r$  가 확대되었음을 보여주고 있으며, 식 (1)에 의해서 다음 식으로 표시된다.

$$\delta y_r = \frac{1}{2} \delta x_r \operatorname{cosec} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (6)$$

2개의 격자의 격자선이 이룬 각  $\theta$ 를 측정하기보다는, 모아레 줄무늬의 피치  $p_r$  를 측정하는 것이 용이하므로, 위 식 (6)에 식 (1)을 대입하여  $\theta$ 를 소거하면, 참조용 격자면상에 나타난 모아레 프린지의 변위  $\delta y_r$  은 다음 식으로 주어지게 된다.

$$\delta y_r = \pm \delta x_r \left( \frac{p_r}{p_i} \right) \quad (7)$$

여기에서  $\delta y_r$  의 부호는 액막 표면의 경사에 대한 모아레 줄무늬의 변위를 고찰하여 결정된다. 따라서 모아레 줄무늬의 변위  $\delta y_r$  은 식 (4),(5),(7)를 정리하면 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \delta y_r &= \pm \frac{p_i L}{p_i} \\ &\quad \times \tan \left[ \arcsin \left( n \sin \left( \arctan \frac{dh}{dx} \right) \right) \right. \\ &\quad \left. - \arctan \frac{dh}{dx} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

또 액막표면의 경사가 작은 경우 위 식 (8)은 다음 식으로 근사시킬 수 있다.

$$\delta y_r = \pm \frac{p_i L}{p_i} (n-1) \frac{dh}{dx} \quad (9)$$

이 식은 모아레 줄무늬의 변위  $\delta y_r$  가 액막 표면의 기울기, 즉 액막의 두께 변화  $dh/dx$ 에 비례하는 것을 의미한다. 식 (9)를 모아레 줄무늬에 따라 적분하면 다음 식으로 주어진다.

$$\int_{x_r}^{x_r} \delta y_r \frac{dx}{dx_r} dx_r = \pm \frac{p_i L}{p_i} (n-1)(h-h_0) \quad (10)$$

액막 표면의 좌표  $x$ 에서 참조용 격자면의 좌표  $x_r$  으로의 변환은 Fig 3을 참고하면 다음 식과 같이 주어진다.

$$\frac{dx}{dx_r} = \frac{dx}{dx_i} \frac{dx_i}{dx_r} = \left( \frac{H-L}{H} \right) \left( \frac{p_i}{p_r} \right) \quad (11)$$

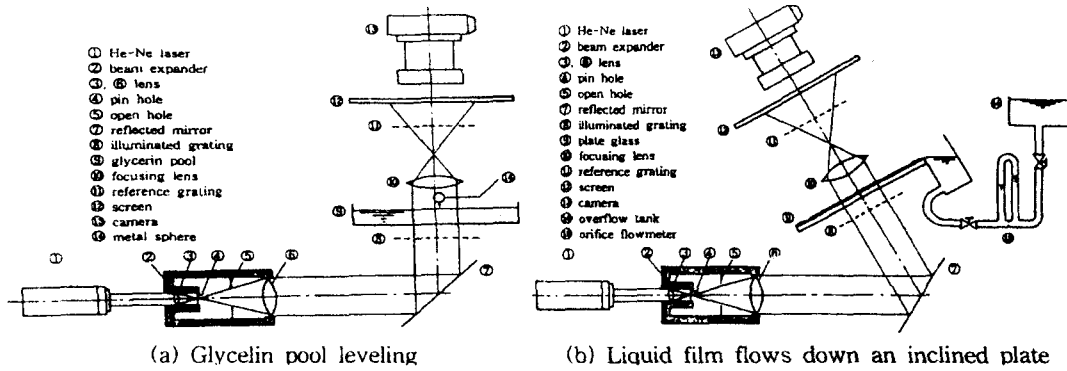


Fig. 4 Experimental apparatus for refracted image moiré topography

조사용 격자에서 초점 조절용 렌즈사이의 거리  $H$ 는 직접 측정할 수도 있지만, 초점 조절용 렌즈의 초점거리  $f$ 가 주어지면 다음 식으로 계산할 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$H = \left(1 + \frac{p_r}{p_i}\right) f \quad (12)$$

따라서 결국 식 (10), (11)에서 모아레 줄무늬에 따라 액막두께의 변위는 다음 식으로 주어진다.

$$h - h_0 = \pm \frac{p_r p_f}{p_i^2 L} \left(\frac{H - L}{H}\right) \times \left(\frac{1}{n - 1}\right) \int_{x_0}^{x_r} \delta y, dx, \quad (13)$$

모아레 프린지의 상에서 몇 개의 줄무늬에 대하여 액막두께의 변위를 구하면, 3차원적인 액막표면의 형상이 주어진다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

Fig 4(a),(b)에 본 연구에서 사용한 실험장치의 계통도를 도시하였다. 실험장치는 출력 5mW, 발진파장 632.8nm, 빔 직경 약 0.8mm인 He-Ne 레이저①, 빔 익스펜더②, 표면반사경⑦, 피치가 250lines/inch 또는 150lines/inch 이며 크기가 50mm×50mm인 조사용 격자⑧, 글리세린 풀⑨, 초점 조절용 렌즈⑩(조리개 F2.5, 초점거리  $f$  150mm인 카메라 렌즈), 피치가 250lines/inch 크기 50mm×50mm인 참조용 격자 및 카메라

⑬(조리개 F4, 초점거리  $f$ 50mm)으로 이루어져 있다. 실제 액체가 흐르고 있을 때 액막 두께의 미소 변동을 측정하는 실험장치는 Fig 4(b)에 도시하였다. 이 때의 실험장치는 글리세린 풀④ 대신에 판유리⑨로 대체하고, 이것을 경사지게 설치하여 물탱크, 교축유량계⑮, 오버프로텍트⑭를 통하여 유리면상으로 물을 흘려 액막류를 만들어 액막 표면의 변위를 측정하였다. 이때의 조사용 및 참조용 격자선의 피치는 모두 250lines/inch를 사용하였다.

#### 3.2 실험방법

He-Ne 레이저①로부터 발진한 빔은 빔 익스펜더②의 렌즈③를 통해 가장 교축되는 위치에서 핀 홀④을 통과한다. 핀 홀을 통해 다시 확대된 빛은 빔 익스펜더내로 반사광이 들어오지 않도록 설치된 개구⑤를 통해 렌즈⑥에서 직경이 약 28mm인 평행광이 된다. 평행광은 표면반사경⑦에서 반사되어, 조사용 격자(피치  $P_i$ )⑧를 통과한 후 등간격의 평행한 직선의 줄무늬광선(일명 격자선광선)이 된다. 한편 금속구⑭를 글리세린 풀⑨에 떨어뜨려 글리세린 표면은 평탄하지 않고 불균일하게 되어 있다. 등간격의 격자선 빛은 이 불균일한 액면을 통과시에 굴절하여 불균일한 간격의 격자선의 상이 형성된다. 이 상을 초점 조절용 렌즈⑩를 조절하여 참조용 격자(피치  $P_r$ )⑪면상에 초점을 맞추면 2개의 격자선이 중첩된 모아레 프린지의

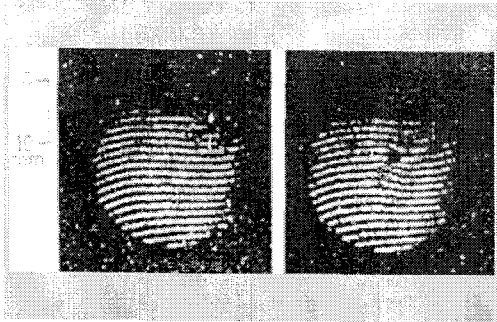


Fig. 5 Moiré fringe formed as a disturbance levels

상이 나타난다. 이 상을 불투명 유리 와 트레이싱 종이로 만든 스크린⑫에 투영시켜 이것을 ASA 400 인 필름으로 카메라⑬으로 촬영하였다. 초점 조절용 렌즈에 의하여 초점을 조절하는 방법은 조사용 격자의 격자선간 거리와 참조용 격자의 격자선간의 거리가 결정되면, 조사용 격자에서 초점 조절용 렌즈까지의 거리(H)와 초점 조절용 렌즈에서 참조용 격자 사이의 거리를 조절하여 행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정지중의 액막 표면 변위

조사용 격자 및 참조용 격자의 격자선 피치  $P_1, P_2$ 를 모두 250lines/inch 를 사용하고, 글리세린의 풀에 금속구를 떨어지는 전후에 나타나는 모아레 프린지를 Fig 5(a),(b)에 도시하였다.

Fig 5(a)는 글리세린 풀의 표면이 평탄한 경우의 모아레 프린지이다. 그림에서 모아레 프린지의 중심부는 직선의 줄무늬가 보이지만, 외연부는 비틀어진 줄무늬를 보이고 있다. 이것은 렌즈의 수차(收差)에 의한 영향 때문이라고 사료된다<sup>(8),(9)</sup>. Fig 5(b)는 글리세린 풀에 금속구를 떨어뜨린 후의 액막의 표면이 균일하지 않은 경우의 모아레 프린지를 나타낸 것이다.

Fig은 액체표면이 평탄하지 않아 모아레 프린지의 형상이 변화를 가져온 것을 알 수 있다.

Fig 5(b)에서 액막의 변위를 측정하기 위하여 Fig 5(c)에 도시적으로 재구성하여 나타내었

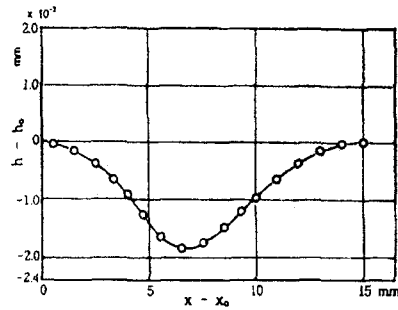


Fig. 6 Small disturbance of liquid film thickness measured from moiré fringe patterns in Fig. 5

다. Fig 5(c)에서 ①번 화살표로 표시된 곳이 평탄한 액막을 가리키는 직선의 프린지 위치이고, ②번 화살표의 위치로부터 모아레 프린지 변위를 측정하고 식 (12)에 의해 글리세린 액막 두께의 변위  $h-h_0$ 를 계산하여 Fig 6에 도시하였다. 이 모아레 프린지의 상은 조사용 격자의 격자선의 직각 방향에 대한 액막의 변위를 나타낸 것이다.

Fig 6은 액막 표면의 변위  $h-h_0$ 가 0인 평탄한 곳에서부터 점차 부의 값으로 커지다가 다시 평탄함을 보여주고 있다. 변위가 가장 심한 부분은 금속구에서 가장 가까운 부분이고, 이것은 금속구가 글리세린 풀에 떨어져 움푹한 부분이 형성되었음을 의미하고 있다. 변위를 알면 결국 액막두께를 구할 수 있다. 변위가 가장 큰 곳의 액막두께는 가장 얇다고 예측할 수 있다.

4.2 액막 표면의 3차원 변위

액막두께의 변위를 3차원적으로 측정하기 위하여 금속구를 글리세린의 풀에 떨어뜨려 동일한 실험을 행하였다. 조사용 격자의 격자선의 피치  $P_1$ 는 150 lines/inch로 변경하였다. 이 때 얻어진 모아레 프린지를 Fig 7(a),(b),(c)에 도시하였다. Fig 7(a)은 액막 표면이 균일한 경우의 모아레 프린지를 나타냈지만, Fig 6(a)에서와 같이 외연부에서 모아레 프린지의 비틀어진 상이 보이고 있다. 이것도 렌즈의 수차의 영향 때문이라고 사료된다. Fig 7(b)는 금속구를 떨

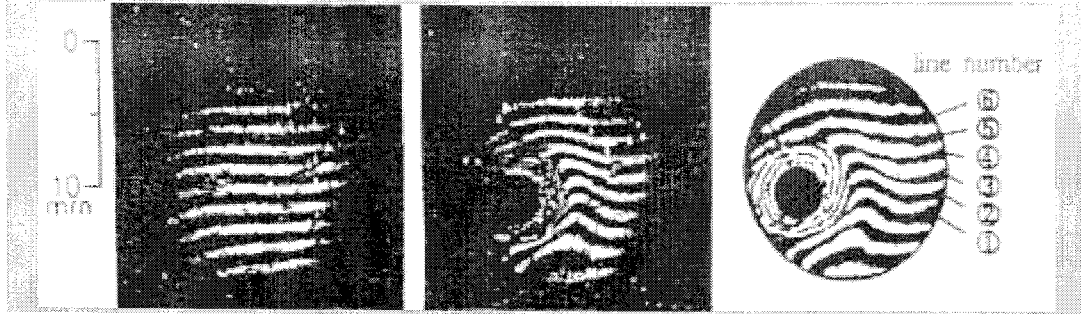


Fig. 7 Moiré fringe in  $P_1=150$  lines/inch,  $P_2=250$  lines/inch, Fig. 8 Three dimensional disturbance of liquid surface measured from moiré fringe patterns in fig. 7

어뜨린 후의 모아레 프린지의 형상으로서, 그림은 금속구에 가까운 위치일수록 모아레 프린지의 곡선의 변화가 커지고, 금속구에 인접한 곳에서는 미세한 모아레 프린지가 보이고, 구 표면에 바로 인접한 곳에서는 프린지의 형상이 불명확하게 나타난 것이 보이고 있다. 이것은 구의 인접한 곳에서는 액막 표면의 변화, 즉 액막두께가 변화되는 비율이 매우 심하기 때문에 모아레 프린지가 중첩된 결과라고 사료된다. Fig 7(c)로 재구성된 모아레 프린지의 수개의 줄무늬를 따라 식 (12)에 의해 계산된 굴리세린의 액막두께의 변위  $h-h_0$ 를 3차원으로 Fig 8에 나타내었다. Fig 8은 금속구가 떨어진 주위가 액막 표면의 변위가 가장 심한 것을 보이고 있으며, 구로부터 멀어짐에 따라 액막표면의 변위가 작아지는 것을 보여, 결국 이것은 액막두께가 두껍게 되는 것을 알 수 있다.

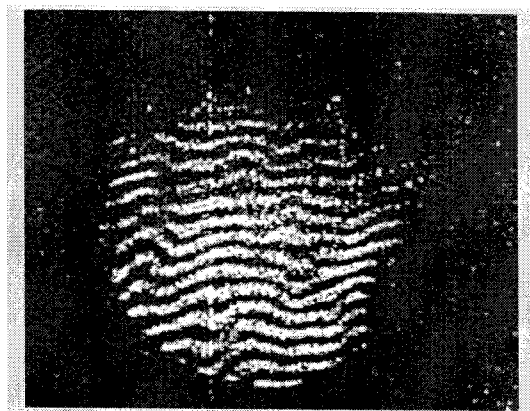


Fig. 9 Moiré topography grow as the travel down an inclined plate

#### 4.3 유동중인 액막 표면 변위

실제 유동중인 액막 두께 변동 측정으로의 응용에 대한 가능성을 검토하기 위하여 자유낙하 액막표면의 미소 변화의 측정을 시도하였다. Fig 4(b)의 실험장치에 의해 얻어진 모아레 프린지를 Fig 9에 나타내었다. Fig 9는 유동중인 액체 표면을 직접 모아레 프린지의 상으로 촬영하였으므로, Fig 5(a)와 7(a)와 같이 모아레 프린지의 중앙부에서 볼 수 있는 비틀어짐이 없는 직선의 줄무늬의 형상이 나타나지 않고 있다. 이것은 결국 액막 표면이 평탄한 부분을 알 수 없음을 의미한다. 이 때문에 유동중인 액막의 표면 변위  $h-h_0$ 는, 어떤 임의의 위치에서 액막 표면의 경사를 알 수 없어 측정할 수 없었다. 따라서 어떠한 방법에 의해서 임의의 위치에서 액막표면의 경사를 알 수 있다면 액막류의 액막 표면의 변위를 측정할 수 있다고 사료된다. 그러나 모아레 프린지의 상으로부터 액막표면의 형상(최대 진폭, 액막표면의 경사 증가, 감소의 비율  $d^2h/dx^2$ )은 정성적으로 알 수 있다.

#### 5. 결론

액막 표면의 미소 변위의 측정을 목적으로 모아레 토포그래피를 이용하여 실험 및 해석을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정지액체 중에 금속구를 낙하시킨 경우 액막 변위를 모아레 포토그래피법으로 측정할 결

과 액막 변위( $h-h_0$ )의 변화량 및 액막 변위 영역을 명확히 규명할 수 있었다.

(2) 정지 액체 중에 금속구를 낙하시킨 경우 금속구 주위에 발생하는 모아레 프린지 원리를 이용하여 액막 변위의 3차원 변위의 변화, 측정 영역 내의 변위와 액막 사이의 관계 등을 구할 수 있다.

(3) 유동중인 액막류의 액막표면의 변위를 측정하기 위해서는 임의의 위치에서 액막 표면의 경사를 알면 측정이 가능하다.

#### 참고문헌

- 1) 甲藤好郎, "傳熱概論", 養賢堂, 1972
- 2) 小宮勤一, "液面", コロナ社, 1985
- 3) 전홍신, 박경석, "흡기관내 액막유동의 액막 두께 측정방법", 한국자동차공학회지 제10권 제 2호, 1988, pp43~51
- 4) Haroon S. Kheshgi, L.E. Scriven, "Measurement of Liquid Film Profiles by Moire Topography", Chemical Engineering Science Vol.38, No.4, 1983, pp525~534
- 5) J.C. Scott, "Moire Fringes for Liquid Surface Wave Measurement", Optics Technology November 1969, pp240~243
- 6) J.C. Scott, R.W.B. Stephens, "Use of Moire Fringes in Investigating Surface Wave Propagation in Monolayers of soluble Polymers", The Journal of the Acoustical Society of America Vol.52, No.3(part2), 1972
- 7) Hecht E., "Theory and Problems of Optics", Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Co., New York, 1975
- 8) 久保田廣, 浮田ウ吉, 會田軍太未, "光學技術 핸드ブック", 朝倉書店, 1982
- 9) 小敏布, "レンズの科學入門(上)", 朝日ソノラマ, 1976