

## 푸리에 변환을 이용한 미스얼라인된 Moire 무늬의 표준화

박두원\*, 森本吉春\*\*

\* 명지전문대학 기계설계과

\*\* 和歌山大學 시스템공학과

요 약 시편의 미소 변형을 측정하는 Moire법의 한 응용 방법인 미스얼라인먼트법을 이용하여 발생된 화상을 푸리에 변환에 의하여, 주파수 함수로 전환시킨 후 표준화 이론을 적용하여 시편의 변형을 Moire 무늬로 설명하고, 이를 뒷받침하는 식들을 유도하였다. 특히, 미스얼라인먼트법에서 발생하는 무늬의 회전 현상이나 무늬 개수의 증가를 설명하고 이에 관련된 식들을 얻었다. 또한 무늬 차수와 변형율과의 상관 관계를 보여주는 식을 주파수 벡터법과 기하학적인 방법으로 각각 유도하여, 이들 두식이 통상의 Moire법에서도 적용 가능한 보다 유용한 식임을 확인하였다.

### 1. 서론

시편면의 變形測定法으로써 光彈性법, Moire법, 홀로그래픽 干涉법이 이용되고 있다. 이들 방법에 의해서 얻어진 무늬들로서 應力, 變形, 변형율 등의 定性的인 分布를 알 수 있으므로, 이들의 유효성은 매우 크다. 이중 Moire법은 변형前과 변형後의 2개의 格子를 重疊시킴으로써 발생하는 Moire 무늬에서 변형을 측정하는 방법이다.

일반적으로 시편의 변형이 적은 경우 Moire법에 의하여 발생하는 무늬의 개수가 적기 때문에 이를 증가시키는 방법들이 연구되어 왔다. 그 한 방법으로는 미스매치법이 있다. 이 방법은 변형된 모델 그리드에 대하여 피치를 변경시킨 매스트 그리드를 중첩시켜, Moire 무늬를 발생시키는 방법으로 무늬 認識과 次數 결정을 自動化하기 위하여 연구<sup>(1),(2)</sup>되어 왔다.

다른 한편으로는 미스얼라인먼트법이 있다. 일찌기 Tanaka(田中)<sup>(3)</sup> 등은 매스트 그리드를 ±0.1mm 회

전시켜서 얻어진 2개의 Moire 무늬의 기울기를 측정하여 변형을 분포를 구하는 법을 제안한 바가 있으나, 이 방법은 변형율을 解析하기에는 효과적이긴 하지만 과정이 복잡하고 시간의 소모가 크다.

이러한 단점을 補完할 수 있는 방법으로서, 본 논문에서는 Morimoto(森本)가 개발한 푸리에 변환<sup>(4)</sup>을 이용하여 매스트 그리드와 모델 그리드 사이에  $\phi$ 의 차를 만들어 줌으로써 Moire 무늬의 수를 증가시킨 화상을 T.V.카메라로 거두어 들인 후, 푸리에 변환에 의하여 濃度情報를 位相정보로 바꾸고, 이 정보의 위상과 變位 사이의 連續적인 關係로부터 변형율을 측정하고, 변형의 형태를 해석하는 일련의 과정들을 標準化법과 미스얼라인먼트법을 相互 결합하여 시편의 변형을 설명하는 보다 간단한 측정법에 관한 연구를 기술한다.

### 2. 標準化 理論에서 본 미스얼라인먼트法

本章에서는 “미스얼라인먼트法”이 갖는 特徵에

대해서, 標準化 理論의 立場에서 說明한다. 먼저, 標準化에 의한 Moire 패턴의 發生 原理를 引用하여, 이것을 發展시켜, 미스얼라인먼트法에 의한 Moire 發生 패턴에 대하여 기술한다. 또, 미스얼라인먼트法에 의하여 發生하는 Moire 무늬에서 變形率 分布를 구하는 變換式을 導出한다.

2.1. 畫像의 標準化<sup>(5)</sup>

畫像이 함수  $f(\vec{r})$ 로 부여되는것으로 한다. 여기서  $\vec{r}$ 는 畫像 平面의 位置 벡터이다. 이것을 標準化 平面上的 點  $\vec{r}_{m,n} (-\infty < m, n < \infty \text{ 整數})$ 에서 標準化하고, 그 標準值를  $f(\vec{r}_{m,n})$ 라 한다. 再生 信號  $f(\vec{r})$ 는 內插 函數  $g(\vec{r})$ 를 사용하여 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$f(\vec{r}) = \sum_m \sum_n f(\vec{r}_{mn}) g(\vec{r} - \vec{r}_{mn}) \dots \dots \dots (1)$$

$f(\vec{r}), f(\vec{r}), g(\vec{r})$ 는 푸리에 變換이 可能하고, 각각의 푸리에 變換을  $F(\vec{\omega}), F(\vec{\omega}), G(\vec{\omega})$ 로 표시하면, 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(\vec{\omega}) = \frac{G(\vec{\omega})}{Q} \sum_p \sum_q F(\vec{\omega} - \vec{\omega}_{p,q}) \dots \dots \dots (2)$$

여기서,  $\vec{\omega}$ 는 周波數 벡터,  $\vec{\omega}_{p,q} (-\infty < p, q < \infty \text{ 整數})$ 는 周波數 平面上的 相反 벡터이다.

x方向, y方向의 標準化 間隔을 X, Y라 하면 Q는,  $Q = XY \dots \dots \dots (3)$

로 표시된다. 지금  $G(\vec{\omega})$ 를 다음과 같은 周波數 스펙트럼을 갖는 函數라고 가정한다.

$$G(\omega) = \begin{cases} Q (|\omega_x| < \frac{|\vec{\omega}_{1,0}|}{2}, \\ |\omega_y| < \frac{|\vec{\omega}_{0,1}|}{2}) \dots \dots \dots (4) \\ 0 \text{ (기타)} \end{cases}$$

여기서,  $\omega_x, \omega_y$ 는  $\omega$ 의 x成分, y成分이다.  $f(\vec{r})$ 의 周波數 스펙트럼  $F(\vec{\omega})$ 의 分布가  $G(\vec{\omega})=Q$ 인 領域內에 있는 경우는 얼라이어싱(aliasing)이 일어나지 않고 正確하게 再生된다.

2.2. Moire 패턴의 發生 原理

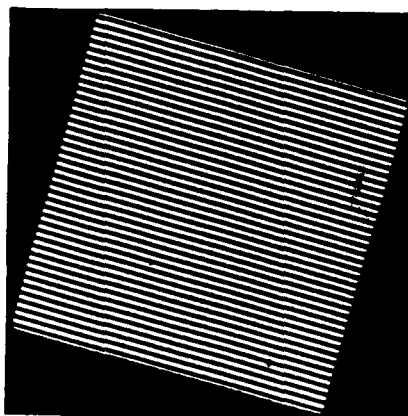


fig. 1. Model grid.

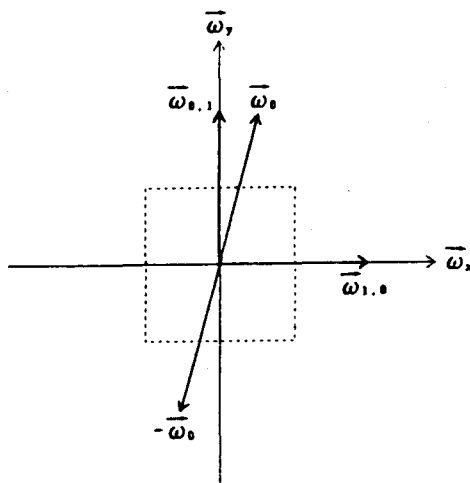


fig. 2. Frequency vector of grid.

지금, Fig.1에 표시한 바와 같은 正弦狀의 濃度 分布를 가진 그리드를 標準化한다고 하면, 이 그리드의 方程式은 다음 식으로 표시된다.

$$f(r) = \cos 2\pi(\vec{\omega}_0 \cdot \vec{r}) \dots \dots \dots (5)$$

여기서,  $\vec{\omega}_0$ 는 그리드의 주파수 벡터이고, 그리드의 피치를  $p_0$ 라 하면, 그 크기는 다음 식과 같이 定義된다.

$$|\vec{\omega}_0| = \frac{1}{p_0} \dots\dots\dots (6)$$

이 그리드를 푸리에 변환하면,

$$F(\vec{\omega}) = \frac{1}{2} \{ \delta(\vec{\omega} - \vec{\omega}_0) + \delta(\vec{\omega} + \vec{\omega}_0) \} \quad (7)$$

이 되고, 이 그리드 畫像의 푸리에 변환은 周波數平面에 있어서,  $\vec{\omega}_0$ 와  $-\vec{\omega}_0$ 의 두 개의 임펄스를 갖는다(Fig. 2).

지금, 標準化 間隔을 그리드의 피치  $p_0$ 와 같게 한다. 즉, 피치가 같은 마스터 그리드 (Fig.3)과의 重疊을 생각한다. Fig. 2에 있어서, 点線으로 둘러싼 長方形內에서  $G(\vec{\omega})=Q$ , 그 以外에서  $G(\vec{\omega})=0$  이므로,  $\vec{\omega}_0$ 는 点線의 長方形外에 있고 먼저의 畫像은 再生되지 않는다.

한편, 再生 畫像의 푸리에 변환은 다음과 같이 표시된다.

$$F(\vec{\omega}) = \frac{G(\vec{\omega})}{2Q} \sum_p \sum_q \{ \delta(\vec{\omega} - \vec{\omega}_{p,q} - \vec{\omega}_0) + \delta(\vec{\omega} - \vec{\omega}_{p,q} + \vec{\omega}_0) \} \quad \dots\dots(8)$$

$G(\vec{\omega})$ 는 長方形外에서 0이므로, 식(8)중 다음 두 개의 항이 남는다.

$$F(\vec{\omega}) = \frac{1}{2} [ \delta(\vec{\omega} - (\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_{0,-1})) + \delta(\vec{\omega} - (-\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_{0,1})) ] \quad \dots\dots(9)$$

즉, 再生 畫像의 푸리에 변환은 Fig. 4에 표시한 바와 같이

$$\begin{cases} \vec{\omega} = \vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_{0,-1} \\ \vec{\omega} = -\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_{0,1} \end{cases} \quad \dots\dots(10)$$

과 같은 2개의 임펄스를 갖는다. 再生 畫像은 식(9)의 逆푸리에 변환이기 때문에,

$$f(\vec{r}) = \cos 2\pi \{ (\vec{\omega}_0 + \vec{\omega}_{0,1}) \cdot \vec{r} \} \quad \dots\dots(11)$$

로 부여되고, 이것은 Fig. 3에서 Moire 패턴으로 보인다.

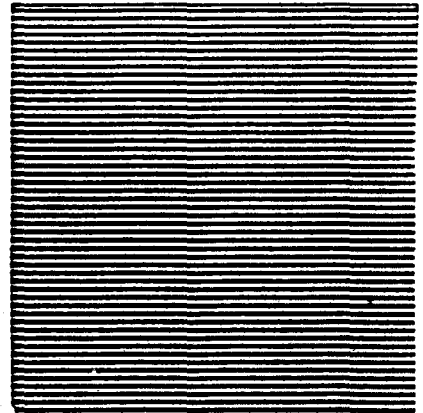


Fig. 3. Master grid.

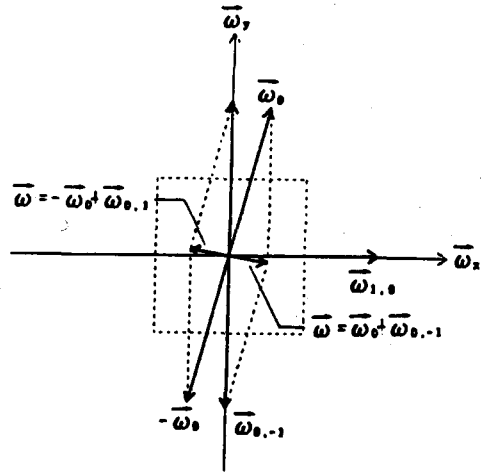


Fig. 4. Frequency vector of Moire pattern.

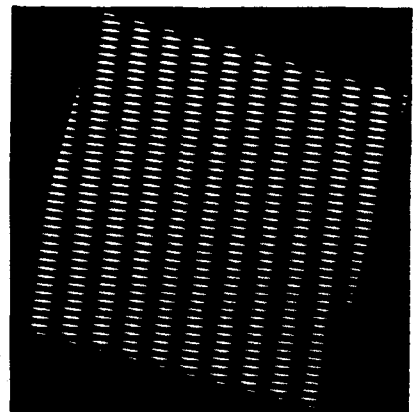


Fig. 5. Moire pattern.

2.3. 미스얼라인먼트法에 의한 Moire 패턴의 發生

미스얼라인먼트法은 變形이 작은 경우에, Moire 무늬의 개수를 增加시켜서 解析의 精密度를 높이는 目的으로 사용되는 것이다. 또, 피치가 같은 變形前의 모델 그리드와 매스터 그리드에, 미리 相對角度를 부여해 놓았을 때, 모델 그리드의 피치의 變化에 의해 Moire 무늬가 回轉하는 性質이 명확하게 되어 있다. 아래에는 이 두가지 特徵을 周波數 平面上으로 說明한다.

2.3.1. Moire 무늬의 回轉

周波數 平面上에 있어서, 周波數 벡터의 方向은,  $\omega_y$  軸에 대해서 時計 方向으로 회轉한다고 定義되어 있다. 따라서 Fig. 1의 모델 그리드의 周波數 벡터는, (+)方向으로 回轉하고 있는 것으로 된다.

지금, Fig. 1의 모델 그리드가 均一한 引張力을 받아서, 그 피치가  $p_e (p_e > p_0)$ 로 되었다고 한다. 즉, 그리드의 周波數 벡터의 크기는,

$$|\vec{\omega}_e| = \frac{1}{p_e} < \frac{1}{p_0} = |\vec{\omega}_0| \dots\dots\dots(12)$$

와 같이 變化한다. 단, 方向에 대해서는 變化하지 않는다. 이때의 周波數 벡터의 關係는 Fig. 6으로 표시되고, Moire 무늬의 周波數 벡터는 變形前보다 더욱 (+)方向으로 回轉한다는 것을 알 수 있다. 즉, 그리드가 引張 變形率을 받았을 때에는, 變形前의 모델 그리드에 미리 부여해 놓은 回轉 方向과 同一한 方向으로 Moire 무늬가 回轉하게된다. Fig. 7은 그때 發生하는 Moire 패턴의 一例이다.

逆으로, Fig. 1에 표시한 그리드가 均一한 壓縮力을 받아서, 피치가  $p_c (p_c > p_0)$ 로 되었다 하면, 그리드의 周波數 벡터의 크기는,

$$|\vec{\omega}_c| = \frac{1}{p_c} > \frac{1}{p_0} = |\vec{\omega}_0| \dots\dots\dots(13)$$

로 變化한다. 이때, 周波數 벡터의 關係는 Fig. 8과 같이 되고, Moire 무늬의 周波數 벡터는 (-)方向으로 回轉한다. 즉, 그리드가 壓縮 變形率을 받았을 때 發生하는 Moire 무늬는, 그리드에 미리 부여된 方向과 逆方向으로 回轉하는 것을 알 수 있다. 壓縮 變形率인 경우에 發生하는 Moire 패턴의 一例를

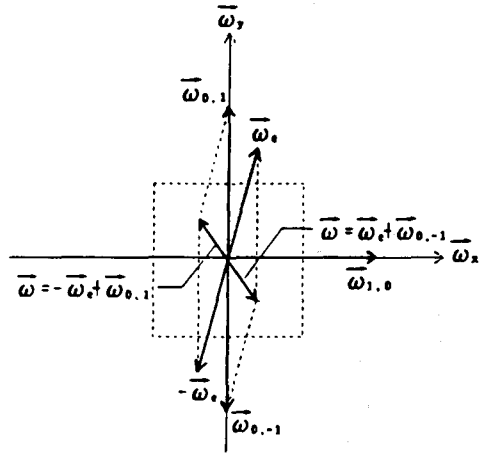


Fig. 6. Relation of frequency vector in tensile strain.

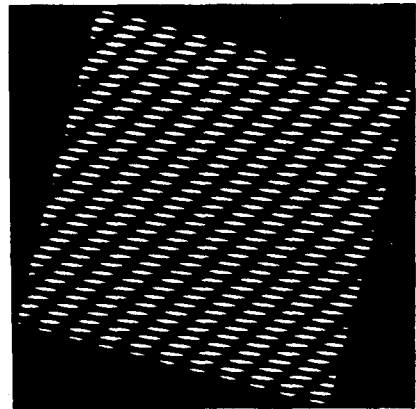


Fig. 7. Moire pattern in tensile strain

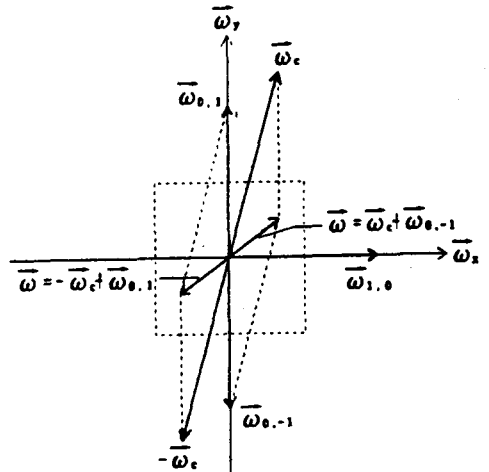


Fig. 8. Relation of frequency vector in compressive strain

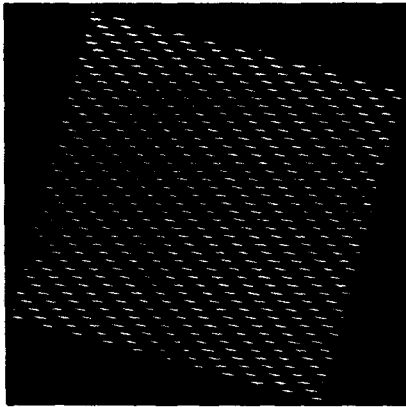


Fig. 9. Moire pattern in compressive strain.

Fig. 9에 표시한다.

따라서, 이 性質을 利用하면, 미리 매스터 그리드와 모델 그리드에 相對 角度를 부여해 놓으면, 實驗中 Moire 무늬의 回轉 移動의 모양을 관찰해서, 變形率의 符號를 判別할 수가 있다.

2.3.2. Moire 무늬의 개수의 증가

매스터 그리드와 피치가 같은 모델 그리드가 變形을 받아, 周波數 平面上에 있어서 Fig. 10과 같은 關係로 되었다고 한다. 여기서, 매스터 그리드, 變形後의 모델 그리드 및 發生하는 Moire 무늬의 周波數 벡터를 각각,  $\vec{\omega}_{\theta,1}$ ,  $\vec{\omega}_c$ ,  $\vec{\omega}_m$ 라 하면, 이들 周波數 벡터의 關係式은 다음과 같이 된다.

$$\vec{\omega}_{\theta,1} = \frac{1}{p_\theta} (0, 1) \dots\dots\dots(14)$$

$$\vec{\omega}_c = \frac{1}{p_c} (\sin \phi, \cos \phi) \dots\dots\dots(15)$$

$$\vec{\omega}_m = \vec{\omega}_{\theta,1} - \vec{\omega}_c \dots\dots\dots(16)$$

여기서, 이 모델 그리드를  $\phi$ 만큼 (+)方向으로 回轉시킨다. 이것은 變形한 모델 그리드와 매스터 그리드를 回轉角  $\phi$ 를 부여해서 重疊하는 것에 相當한다(미스얼라인먼트法). 이때의 周波數 벡터의 關係는 Fig. 11과 같이 되고, 그 關係式은 다음과 같이 된다.

$$\vec{\omega}_c = \frac{1}{p_c} (\sin(\phi + \phi), \cos(\phi + \phi)) \dots\dots\dots(17)$$

$$\vec{\omega}_m = \vec{\omega}_{\theta,1} - \vec{\omega}_c \dots\dots\dots(18)$$

각각의 Moire 무늬의 周波數 벡터의 크기는

$$\begin{aligned} |\vec{\omega}_m|^2 &= \frac{1}{p_c^2} \sin^2 \phi + \left( \frac{1}{p_\theta} - \frac{1}{p_c} \cos \phi \right)^2 \dots\dots\dots(19) \\ &= \frac{1}{p_\theta^2} + \frac{1}{p_c^2} - \frac{2}{p_\theta p_c} \cos \phi \end{aligned}$$

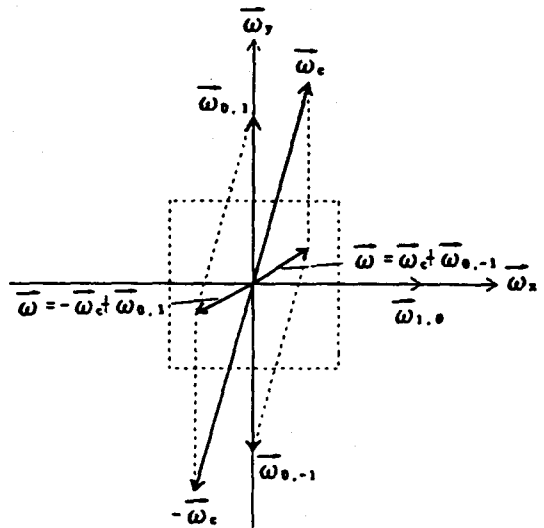


Fig. 10. Relation of frequency vector after deformation.

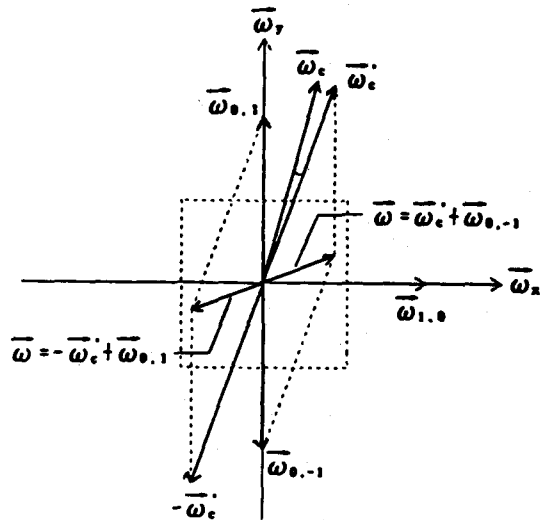


Fig. 11. Relation of frequency vector after testing the misalignment

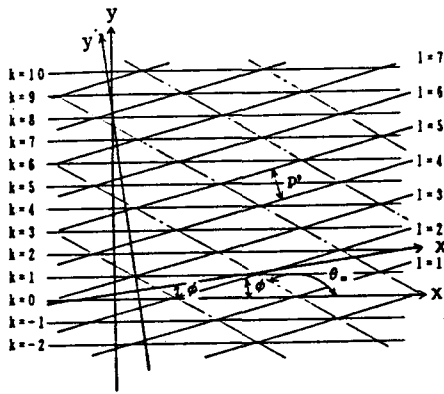


Fig. 12. Positional relation of model grid, scanning line, Moire fringe.

$$|\vec{\omega}_m|^2 = \left\{ \frac{1}{p_c} \sin(\psi + \phi) \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{p_\theta} - \frac{1}{p_c} \cos(\psi + \phi) \right\}^2 \dots\dots\dots(20)$$

$$= \frac{1}{p_\theta^2} + \frac{1}{p_c^2} - \frac{2}{p_\theta p_c} \cos(\psi + \phi)$$

이다. 또한

$$\cos(\psi + \phi) < \cos \psi \dots\dots\dots(21)$$

이 된다. 따라서, 윗식이 성립될 때 Moire 무늬의 개수는 증가한다.

2.4. 變形率-무늬 次數 關係式(周波數 벡터의 關係에서)

여기서는, 미스얼라인먼트法에 의해 發生한 Moire 무늬와 變形率의 關係를 구한다.

Fig. 12에 표시한 바와 같이, x-y 座標系에 대하여  $\phi$ 만큼 회전하고,  $(x_\theta, y_\theta)$ 만큼 平行 移動한 x'-y' 座標系를 생각한다. 變形前의 모델 그리드는 x 軸에 平行이고, 그중 1개가 y=0을 통하여 座標系를 設定한다. 또, TV의 走査線(즉, 마스터 그리드)은 각각 走査線 및 모델 그리드의 線 1개 마다에 붙여진 番號이고, y 方向으로 번호가 증가하도록 붙이는 것으로 한다. 이때, 다음식을 만족시키는

곳에 Moire 무늬가 發生한다.

$$jk - il = m \dots\dots\dots(22)$$

단, k,l,i,j,m은 整數이고, 각각 走査線의 격자선 指數, 모델 그리드의 격자선 指數, 격자선 指數 ij에 發生하는 Moire 무늬의 무늬 次數라 부른다.

또, 變形前의 모델 그리드의 피치를  $p_\theta$ , 走査線의 피치를 p라 할때, p와  $p_\theta$ 의 비를  $\lambda$ 라 하면 다음 식이 成立된다.

$$p = \lambda p_\theta \dots\dots\dots(23)$$

지금, y' 方向으로의 一次元 變形을 고려한다. 變形後의 모델 그리드의 피치를 p', x軸과의 기울기를  $\phi$ 라 하면, y' 方向으로의 오일러 變形率  $\epsilon_y$ 는,

$$\epsilon_y = \frac{p' / \cos(\psi - \phi) - p_\theta}{p / \cos(\psi - \phi)} \dots\dots\dots(24)$$

로 쓸 수 있다.

한편, 走査線의 격자선 指數가 N일때, 周波數 벡터의 關係는 Fig. 13와 같이 되고, 다음식이 成立된다.

$$\vec{\omega}_\theta = \frac{1}{p_\theta} (\cos(\phi + \frac{\pi}{2}), \sin(\phi + \frac{\pi}{2})) \dots\dots\dots(25)$$

$$= \frac{1}{p_\theta} (-\sin \phi, \cos \phi)$$

$$\vec{\omega} = \frac{1}{p} (\cos(\psi + \frac{\pi}{2}), \sin(\psi + \frac{\pi}{2})) \dots\dots\dots(26)$$

$$= \frac{1}{p} (-\sin \psi, \cos \psi)$$

$$N \vec{\omega}_{\theta,1} = \frac{1}{Np} (0, 1) \dots\dots\dots(27)$$

$$\vec{\omega}_m = N \vec{\omega}_{\theta,1} - \vec{\omega} \dots\dots\dots(28)$$

여기서

- $\vec{\omega}_\theta$  : 모델 그리드의 變形前의 周波數 벡터
- $\vec{\omega}$  : 모델 그리드의 變形後의 周波數 벡터
- $N \vec{\omega}_{\theta,1}$  : 격자선을 갖는 標準化의 周波數 벡터
- $\vec{\omega}_m$  : 모아레 무늬의 周波數 벡터

또 Moire 무늬의 피치를  $p_m$ , Moire 무늬와 x軸이 이루는 角을  $\theta_m$ 라 하면, Moire 무늬의 周波數 벡터는,

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_m &= \frac{1}{p_m} (\cos(\theta_m - \frac{\pi}{2}), \\ &\quad \sin(\theta_m - \frac{\pi}{2})) \dots\dots\dots(29) \\ &= \frac{1}{p_m} (\sin \theta_m, -\cos \theta_m) \end{aligned}$$

$$= \frac{\partial x}{\partial m} \sin \theta_m$$

$$\begin{aligned} p_m &= \sum \Delta p_m = \sum \frac{\partial y}{\partial m} \Delta m (-\cos \theta_m) \dots\dots\dots(31) \\ &= \frac{\partial y}{\partial m} (-\cos \theta_m) \end{aligned}$$

Moire 무늬의 주파수 벡터는 식(29),(30),(31)에서 다음과 같이 변형된다.

$$\vec{\omega}_m = (\frac{\partial m}{\partial x}, \frac{\partial m}{\partial y}) \dots\dots\dots(32)$$

한편, x-y 座標系와 x'-y' 座標系의 關係는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \dots\dots\dots(33)$$

따라서, y'方向으로의 무늬 次數의 變化率은 다음과 같이 구해진다.

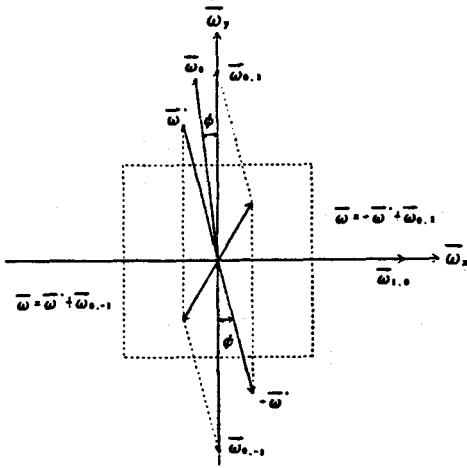


Fig. 13. Relation of frequency vector.

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial y} &= \frac{\partial m}{\partial x} (-\sin \phi) + \frac{\partial m}{\partial y} \cos \phi \\ &= \frac{1}{p} \sin \phi (-\sin \phi) \dots\dots\dots(34) \\ &\quad + \frac{1}{Np} - \frac{1}{p} \cos \phi \cos \phi \\ &= \frac{\cos \phi}{Np} - \frac{\cos(\phi - \phi)}{p} \end{aligned}$$

윗식에 식(23), 식(24)를 代入하면,

$$\frac{\partial m}{\partial y} = \frac{\cos \phi - (1 - \epsilon_y) N \lambda}{N \lambda p_0} \dots\dots\dots(35)$$

격자선 指數 N로 走査線을 그었을 때, 식(22)에서 무늬 次數도 N씩 變化한다.

따라서, 윗식은

$$\epsilon_y = \frac{p_0}{N} \frac{\partial m}{\partial y} - \frac{\cos \phi}{N \lambda} + 1 \dots\dots\dots(36)$$

또, N=λ=1이며, 미스얼라인먼트가 없는 경우는,

$$\epsilon_y = p_0 \frac{\partial m}{\partial y} \dots\dots\dots(37)$$

로 되고, 通常의 Moire法에 있어서의 變形率-무늬

Fig. 14. Relation of the pitch of Moire fringe and degree.

또, Fig. 14에 있어서, 무늬 次數를 m에서 m+Δm까지 微小 變化 시켰을 때의 무늬 間隔을 Δp\_m라 하고 무늬 次數의 變化率을 一定하다고 하면,

$$p_m = \sum \Delta p_m = \sum \frac{\partial x}{\partial m} \Delta m \sin \theta_m \dots\dots\dots(30)$$

次數의 關係式과 一致한다.

2.5. 變形率-무늬 次數 關係式 (幾何學的 關係에서)

前節에서는, 周波數 벡터의 關係에서 變形率-무늬 次數 關係式을 도출하였으나, 여기서는 幾何學的 關係만에 注目하여, 變形率-무늬 次數 關係式을 도출하기로 한다.

前節과 같이 x-y 座標系에 대하여 ϕ만큼 回轉한 x'-y' 座標系를 생각한다(Fig. 12). 變形前의 모델 그리드는 x'軸에 平行이고, 그중 1개가 y'=0를 통과하도록 座標系를 設定한다. 이때 x'의 位置에서의 모델 그리드의 y'座標는,

y' = l p\_0 (38)

p\_0은 모델 그리드의 格子 피치이고, l은 格子에 붙여진 線番號이다.

y'方向만의 一次元 變形을 생각한다. 變形後의 모델 그리드의 피치를 p', x'軸과의 기울기를 ϕ 라하면, y'方向의 오일러의 垂直 變形率은,

ε\_y = (P' / cos(ϕ - ϕ) - p\_0) / (p / cos(ϕ - ϕ)) (39)

또, 이때 x'의 位置에서 모델 그리드의 y'座標는,

y' = x' tan(ϕ - ϕ) + (lp) / cos(ϕ - ϕ) (40)

이다. 지금, 이 變形된 모델 그리드를 TV 카메라로 거둬들인다. 走査線은 x'軸에 平行하고, 그의 피치를 p라한다. x'의 位置에서의 走査線의 y'座標는,

y = kp (41)

k는 整數이고 走査線 1개마다에 붙여진 番號이다. 한편, x'의 位置에서의 走査線의 y'座標는,

y' = (kp) / cos ϕ - s - x' tan ϕ (42)

s는 線番號 0인 走査線의 y'切片이다. 走査線의

피치 p와 變形前의 모델 그리드의 피치 p\_0의 比를 λ라 하면, 다음식의 關係가 성립된다.

p = λ p\_0 (43)

이때, 다음 무늬 次數 方程式을 만족하는 곳에 Moire 무늬가 發生된다.

jk - il = m (22)

상기 식들로부터 무늬 次數가 Δm만큼 增加하면 Δy'는,

Δy' = (∂y' / ∂m) Δm = (λ p\_0 Δm) / (j cos ϕ - i λ (1 - ε\_y)) (44)

격자선 指數N의 격자선을 생각한다. 走査線의 線番號를 k씩 增加시키면 식(22)에서, 그 무늬 次數도 N씩 增加한다. 따라서, 이때의 Δm은 N으로 되고, 그때의 y'方向의 무늬 間隔 δ\_y는 i=N, j=1을 代入하여,

δ\_y = (∂y' / ∂m) N = (λ p\_0 N) / (cos ϕ - N λ (1 - ε\_y)) (45)

로 된다. 위식을 ε\_y로 바꾸고, 미스얼라인먼트가 없는 경우,

ε\_y = (p\_0) / δ\_y (46)

로 되고, 通常의 Moire法에서의 變形率-무늬 次數 關係式과 一致한다.

3. 결론

이상의 연구 結果를 要約하면 미스얼라인먼트법을 이용하여 마스터 그리드와 모델 그리드 사이에 ϕ차를 부여하여 Moire 무늬의 수를 증가시킨 후, 시편의 변형에 의하여 발생하는 Moire 무늬의 해석을 간편하게 하고 보다 유용한 수식으로 표현할 수 있었다. 標準化 理論을 적용함으로써 무늬에 發生되는 현상들, 회전, 무늬수의 변화 등을 설명하고 변형율과 Moire 무늬 차수의 關係를 설명하는 수식을 유도할 수 있었다.



이 모든 과정들을 푸리에 변환을 이용하여 화상의 함수를 주파수 함수로 바꾸어 설명함으로써 보다 편리한 해석이 가능하였다. 주파수벡터와 기하학적방법으로부터 각각 얻어진 변형율을 표현하는 식들은 기존의 Moire 무늬 해석에도 적용될 수 있는 유용한 식임을 확인하였다.

이러한 연구 결과는 향후 다양한 시편들의 변형을 측정하는데 이용함으로써, 본 연구에서 얻어진 식들의 실험적 결과를 통하여 확인하고 보완 및 발전시킬 계획이다.

### 참고 문헌

(1) 加藤和典, 室田忠雄, 關根貞夫, “ミスマッチ法に

よるモアレじまの調整とその計算機處理の自動化”, 非破壊検査 36-11, (1987), pp. 838-844.

(2) 加藤和典, 福山啓悟, 岡田 力, “マアレじま畫像の計算機處理におけるしまの認識と次數決定法について” 非破壊検査 37-2, (1988), pp. 71-78.

(3) 田中吉之助, 中島 稔, “Photograting法實驗的解析方法”, 材料試験 10-85, (1961), pp. 116-121.

(4) 森本吉春, 東 利彦, “フリエ變換を用いたモアレ法によるひずみ解析”, 日本機械學會論文集(A編) 54-504, (1988), pp 1546-1552.

(5) Rosenfeld, A. and Kak, A.C. “Digital Image Processing”, Vol. 1, 53-115 (1982), Academic Press

## Normalization of the Misaligned Moire Pattern Using Fourier Transform

T. W. Park\*, Y. Morimoto\*\*

\* Depart. of Mech. Design, Myong Ji Jr. College

\*\* Depart. of Systems Eng. Wakayama Univ. Wakayama, JAPAN

**Abstract** The fringes developed by misalignment, an application of Moire method measuring small deformation of specimen, was transformed to frequency function. After that, theory of normalization was applied to derive the equations explaining the relation of the deformation and Moire fringes. Above all, the equations were produced to explain the rotation and increasing of fringes. In addition to that, the relation of fringe number and strain was illustrated with the equations deduced from frequency function and geometrical method respectively. These two expressions were more effective than the used ones owing to the one can accommodate the other.

(Received: February 17, 1995.)