

◆특집◆ 비접촉 측정

전단간섭법과 수치해석을 이용한 평판 진폭의 정량적 계측

김경석*, 정현철*, 장완식**, 곽재호***, 장호섭****

Quantitative Measurement of Plate Amplitude Using Shearography and Numerical Analysis

Koung-Suk Kim *, Hyun-Chul Jung *, Wan-Sik Jang **, Jae-Ho Kwag *** and Ho-Seob Chang ****

Key Words : Shearography(전단 간섭계), Vibration(진동), Mode Shape(모드형상), Amplitude(진폭), Out-of-plane(면의 변형)

1. 서론

산업현장에서 산업 부재, 기기, 설비의 결함이나 부식을 검출하지 못하면 결국 커다란 손실을 가져온다. 이러한 경제적 산업적 손실을 줄이기 위해서는 비파괴 검사방법을 이용한 결함의 조기 검출이 반드시 필요하다. 현재 비파괴 검사 기법은 X선, 와전류, 초음파 검사등 산업사회 전반에 걸쳐 많은 기법들이 현장에 적용되고 있다.

이러한 검사 기법들은 대상물에 직접 접촉을 해야 하고 전처리 과정이 필요하며, 방법과 절차에 대한 제한사이 있다는 단점이 있다. 레이저를 이용한 비파괴 검사는 이러한 단점들을 보완하여 비접촉식 방법이며, 대상물에 대해 특별한 전처리 과정이 없이 비파괴 검사를 수행할 수 있다.

레이저를 이용한 대표적인 비접촉식 변형측정 방법으로는 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)으로 70 년대에 개발되었으며, 이러한 방법은 레이저

의 시간적 공간적인 가간섭성을 이용하여 대상물의 전영역에 걸쳐 실시간 측정 및 해석이 용이하다.

그러나 레이저를 이용한 비접촉 비파괴 검사 방법 중 하나인 ESPI 는 물체의 변형을 정밀하게 측정할 수 있지만 외부에서 발생하는 외란에 대해서는 매우 민감하여 산업현장에 외부진동을 감쇠하는 방진 테이블이 없이는 적용성이 매우 낮다.^{1,2} 그러한 반면, 레이저 스펙클 방법중 하나인 전단간섭계(Shearography)를 이용한 계측기법은 ESPI 에 비해 간섭계의 구성이 간단하고 가간섭 거리가 상대적으로 짧아도 대상물의 결함검출이 가능하다. 간섭계의 특성상 대상물에 발생하는 변형의 기울기를 측정하기 때문에, 대상물의 결함검출이 용이하고, 진동이나 외부 소음에 대해 매우 강인하다는 장점으로 산업현장에서 비파괴검사 기법으로 많이 사용되고 있다.

따라서 전단간섭법의 응용 영역은 더욱 증가하여 대상물의 진동해석에도 사용되고 있으며, 결함의 정량화³ 복합재 구조물의 해석 등⁴ 비파괴 검사분야에서 유용한 방법으로 활용이 되고 있다. 현재까지 전단간섭계는 변형의 기울기만을 측정하는데 이용되고 있으며, ESPI 가 측정할 수 있는 면의 변형을 직접 측정할 수는 없었다.

본 연구에서는 진동해석에 있어서 전단간섭법

* 조선대학교 기계설계공학과

** 조선대학교 기계공학과

*** 조선대학교 대학원

**** 조선대학교 산학협력단

Tel. 062-230-7004, Fax. 062-230-7838

Email gsckim@chosun.ac.kr

레이저 스펙클에 의한 변형의 계측 및 결함의 검출, 진동해석 등에 관하여 연구활동을 하고 있다.

을 이용하여 평판에서의 진동실험을 함으로써 진폭의 정량화를 하고 진동에 대한 해석을 함으로써 대상물에 발생하는 ESPI 의 진동모드와 비교하여 그 결과를 해석하였다

2. 원리

2.1 전단간섭계의 원리

Fig. 1 은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 ESPI 와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스펙클의 발생은 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1 에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2 에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2 에 임의의 기울기를 주면 기울어진 Mirror 2 에서 반사된 파면은 Mirror 1 에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD 의 상면에 맺히게 된다.^{5,6}

이렇게 두 빛이 간섭하고, 변형 전후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 대상물에 발생한 면외변형의 기울기를 표현하게 된다.

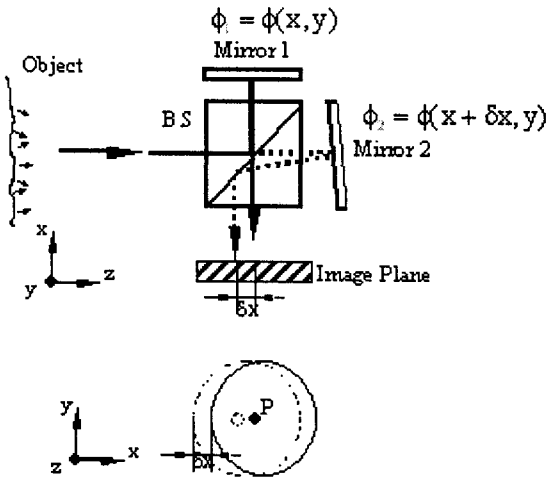


Fig. 1 Speckle pattern shearing interferometry

Mirror 2 를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2 가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 δx 로 표현한다. 전단방향과 전단

량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다. 이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의 p_1 과에 p_2 와 와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 다음과 같다.

$$\phi = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y)$$

변형에 의한 위상차의 변화는 식 (1)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하며, 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 ESPI 와 동일하기 때문에 수식 (2)에 표현한 바와 같이 d 와 d' 은 임의의 p 에 조사된 두 점의 각각의 변형이다.^{5,6}

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi' - \phi \\ &= (\phi'_2 - \phi'_1) - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi'_2 - \phi'_1) - (\phi_1 - \phi_1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_i - \vec{n}_v) \cdot (d - d') \quad (2)$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 식 (2)을 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (3)$$

Δd 는 테일러급수에 의해 식 (4)와 같이 표현할 수 있으며, Δx 는 상면에서 전단량 δx 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 식 (4)에서 2 차 이상의 고차항은 무시하면, 식 (4)은 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} + \left(\frac{\partial d}{\partial x}\right)\Delta x \quad (5)$$

2.2 변형계측에 이용되는 전단간섭법의 개념

전단간섭법을 적용하는 식(5)과 도함수의 정의로 설명할 때 구간이 매우 작아야 하나, 현재까지 개발된 국내의 상용장비 및 개발된 시스템은 대상물의 결함 검출의 민감도를 높이기 위해 전단량을 측정조건에 맞게 임의로 부여하며, 통상 대상물에 존재하는 결함의 1/2 정도를 전단량으로 한다. 이 또한 결함의 크기를 알고 있는 경우에 해당되며, 전단량이 50%라고 하는 것은 전단량이 ‘매우작다’는 조건을 적용할 수 없게 된다.

본 논문에서 제안하는 사항은 앞에서 언급한 전단간섭법의 이론적 제한사항을 수치미분을 이용하여 표현하고, 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하고자 한다.⁷

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} [d(x) - d(x_0)] \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x}\right) \Delta x \quad (6)$$

ESPI 나 전단간섭법 모두 화상처리이므로 식(4)와 식(5)의 각각의 기호를 변형 f, 대응화소, 전단량화소 h 로 바꾸어 쓰면, 식 (7)와 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f'으로 정리하면 식 (8)와 같다.

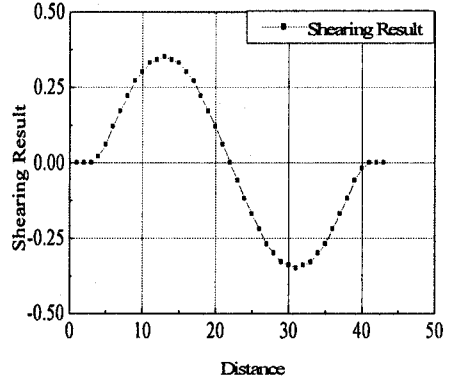
$$f'(x_i)h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \quad (7)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (8)$$

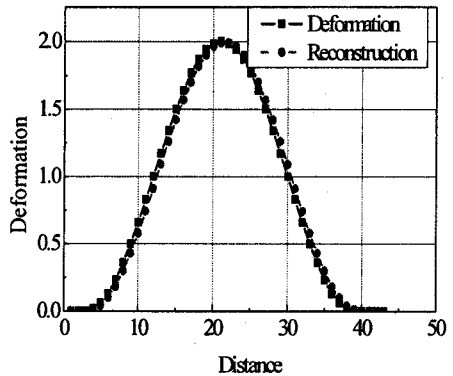
식 (8)는 테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다.

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

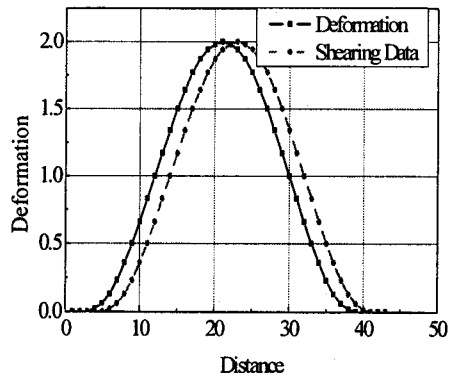
$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f h \quad (9)$$



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 2 Algorithm of deformation reconstruction

Fig. 1 에서 표현된 전단간섭계의 전단거울 (Mirror 2)이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 표현된 두 값을 감산한 결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형 전과 변형 후 상태의 비교결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

전단간섭법에 의한 진동해석을 위해 가장 적합한 방법은 평판에 발생하는 면외변형의 측정이며, 이를 위하여 532nm 인 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 진동실험을 위하여 기계적 물성이 Table 1 과 같은 두께 1mm, 가로 세로 150mm × 150mm 의 스테인레스 스틸평판을 제작하여 Fig. 3 와 같이 지그에 고정하였다. 실험 대상물의 전체적인 모습은 Fig. 4 와 같다. 스테인레스 스틸평판에 대한 포와 송비와 밀도를 Table 1 에 정리하였다.

Table 1 Mechanical properties of STS304 stainless steel

Young's Modulus	Poisson's Ratio	Density
193 GPa	0.3	8000 kg/m ³

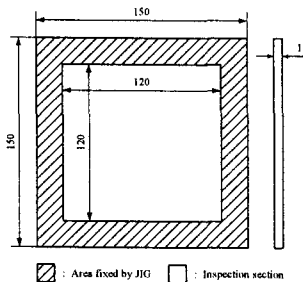


Fig. 3 Specimen used for vibration testing

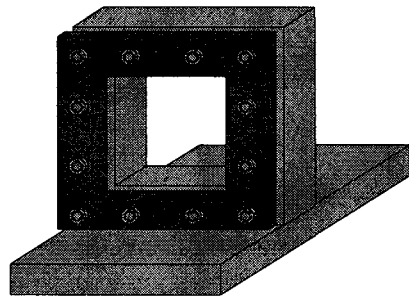


Fig. 4 JIG for fixing the specimen

제안된 방법에 의한 진동실험결과를 유한요소해석(ANSYS), LDV 그리고 스트로보스코프 위상이동 ESPI(SPS-ESPI, Stroboscopic Phase Shifting ESPI)의 실험결과와 비교하였다.

제안된 방법에 의한 진동실험은 SPS-ESPI 와 동일한 실험방법을 적용하였으며, 함수발생기(Model: HP 33120A), AOM(Model: AOM-403A1), 스피커, 스피커 증폭기 그리고 간섭시스템을 Fig. 5 와 같이 구성하여 실험하였다. Fig. 5 에서 일점제선은 AOM 을 통과한 레이저 빛으로서 진동해석을 위해서 1 차모드의 레이저 빛을 사용하였으며, 가는 실선은 광파이버로 유도된 1 차모드 레이저 빛의 확산조사를 나타낸다.

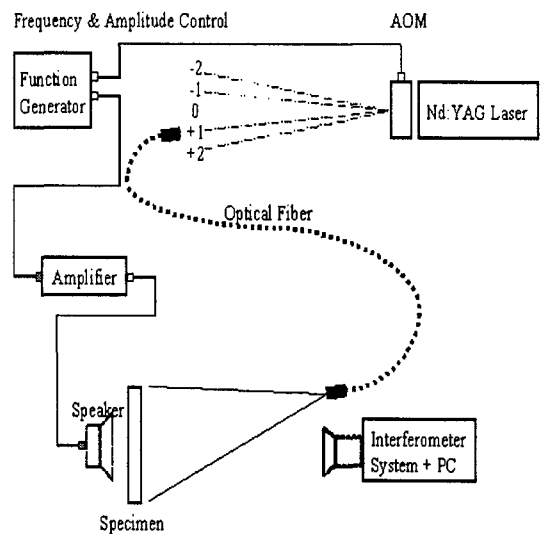


Fig. 5 Schematic of shearography for vibration analysis

4. 실험결과

각각의 실험에서 얻어진 공진주파수 및 진동모드형상을 Table 2 에 정리하였다. 1~5 차 모드의 진폭은 상대적으로 매우커서 ESPI 와 Shearography 를 이용하여 측정 비교하는데 어려움이 있다. 따라서 공진 주파수별 외부 가진 조건이 동일한 6~8 차 모드만을 비교하였다.

유한요소해석 결과와 SPS-ESPI 의 실험으로 얻어진 6~8 차 모드의 진동모드형상이 동일하며 모드형상의 방향만 변화되었음을 알 수 있다.

또한, SPS-shearography 의 실험결과는 SPS-ESPI 의 x 방향의 기울기와 동일한 형태임을 알 수 있다.^{8,9}

각각 실험방법으로 얻어진 공진 주파수를 Table 3 에 나타내었다. 모든 실험 결과가 거의 유사함을 알 수 있으며, 실험결과를 각각의 실험을 기준으로 Frequency 를 분석하여 Fig. 6 과 같이 정리하였고, 각 모드별 전단량은 Table 4 과 같다.

Table 2 The result of the first 8 mode shapes obtained by using each method

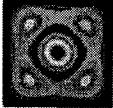
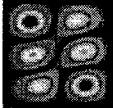
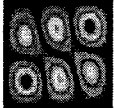









Result Method	Mode Shape		
	6th	7th	8th
FEM			
frequency	2,171	2,708	2,708
LDV			
frequency	2,081	2,574	2,598
SPS-ESPI			
frequency	2,208	2,654	2,674
SPS-Shearography			
frequency	2,115	2,575	2,615

Table 3 The natural frequency of each mode by using each method

Mode	Ansys	LDV	SPS-ESPI	SPS-shearography
6th	2,171	2,081	2,208	2,115
7th	2,708	2,574	2,654	2,575
8th	2,708	2,598	2,674	2,615

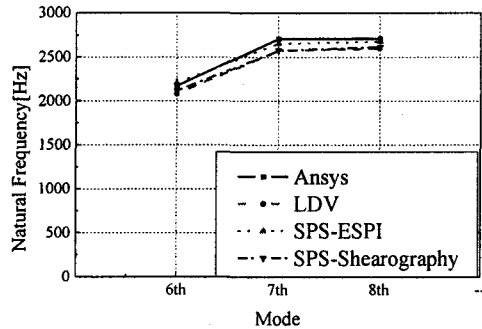


Fig. 6 The frequencies comparison obtained by using each method

Table 4 Applied shearing amount at each mode

Mode	Distance[mm]	Pixel
6th	9	35
7th	22	88
8th	22	88

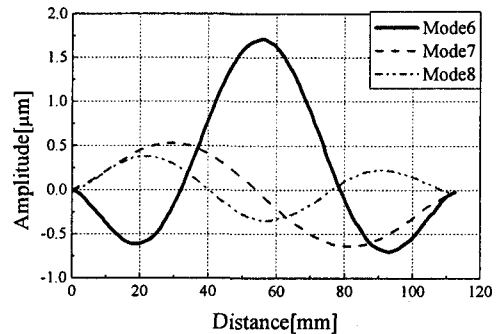


Fig. 7 The Amplitude line profile at each mode by using SPS-ESPI

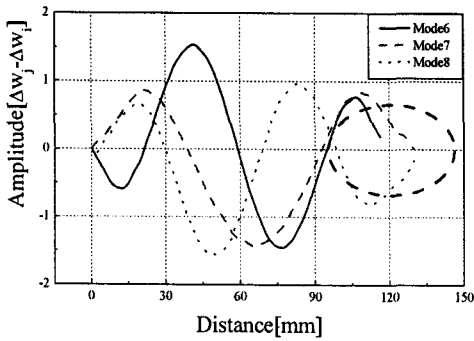


Fig. 8 Slope profile at each mode by using SPS-shearography

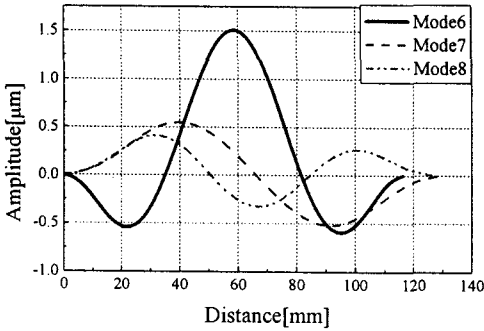


Fig. 9 Amplitude line profile at each mode by using SPS-ESPI

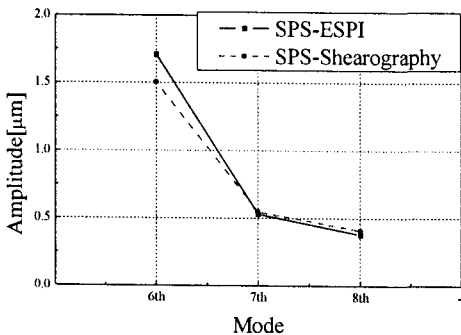


Fig. 10 Comparison of max. amplitude by using ESPI and shearography

본 논문에서 제안한 방법과 다른 실험방법에 의한 공진 주파수 획득 결과를 비교할 때 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 제안한 방법이 신뢰성이 있음

을 알 수 있다.

Fig. 7 은 SPS-ESPI 로 측정된 진폭을 나타낸 그래프이다.

일반적인 전단간섭법은 대상물에 발생하는 진폭 기울기를 측정하기 위하여 임의의 전단량을 부여하게 되는데, Fig. 8 은 임의의 전단량에 대한 진폭의 기울기 변화이며, Table 4 는 각 모드별 전단량이다. Fig. 8 의 원형 점선 부분을 분석하면 전단량에 따른 진동모드별 해석영역이 각각 다른 것을 알 수 있고, 전단량 차이에 의한 각 진동모드별 진폭의 기울기가 무작위적으로 나타나 있다.

또한 Fig.8 과 같이 진폭의 기울기 측정결과에 전단량에 대응하는 화소수를 적용하고 수치적분하면 Fig. 9 와 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 10 은 동일한 외부 가진 조건에서 SPS-ESPI 와 SPS-shearography 로 측정된 각 모드별 최대 진폭값이며, 두 실험결과가 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존에 적용되는 전단간섭법에 수치미분 및 수치적분을 적용하여 대상물에 발생하는 면외변형 및 진동의 진폭을 정량적으로 계측하는 방법을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 제안된 방법의 전단간섭법은 고정밀 변형측정하는 ESPI 장점과 외란에 강인한 전단간섭법의 장점이 통합된 산업현장적용성이 매우 높은 면외변형의 정량측정이 가능한 전단간섭법이다.
2. SPS-ESPI 에서 동일한 외부 가진 조건으로 6~8 의 고차모드의 진폭을 정량 측정할 수 있었으며, LDV 에 비하여 측정에 소요되는 시간이 적고, SPS-ESPI 와 동일한 시간에 공진주파수, 진동모드형상 및 진폭을 정량 측정하였다.

위와 같은 결과로 제안된 방법의 전단간섭법은 외란에 민감한 ESPI 의 제한사항을 극복하고, 고정밀 계측이라는 장점과 외란에 강인한 전단간섭법의 장점을 통합하여 면외변형의 고정밀 정량측정, 변형률의 측정 및 결함의 검사 등 산업현장에서 적용성이 높은 계측기법을 제시하였다.

후 기

이 논문은 2006 년 조선대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

Using Shearography,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 36-43, 2006.

참고문헌

1. Baik, S. H., Park, S. K. and Kim, C. J., “Applications of Speckle Interferometer,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 14-18, 2004.
2. Kang, Y. J., Park, N. K. and Kwon, Y. K., “Ideal Phase map Extraction Method and Filtering of Electronic Speckle Pattern Interferometry,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 12, pp. 20-26, 2002.
3. Fulton, J. P., Deaton, J. B., Rogowski, R. S. and Namkung, M., “Capabilities and Limitations of Electronic Shearography for Detection of Cracks in Thin Plates,” Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, pp. 365-372, 1994.
4. Hung, Y. Y. “Applications of digital Shearography for testing of composite structures,” Composites Part B, Vol. 30, pp. 765-773, 1999.
5. Jones, R. and Wykes, C., “Holographic and Speckle Interferometry: A Discussion of the theory,” practice and application of the techniques, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1989.
6. Creath, K., “Temporal Phase Measurement Method, in Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques,” IOP Publishing, pp. 94~140, 1993.
7. Jung, H. C. and Kim, K. S., “Quantitation Vibration Amplitude Measurement Using Stroboscopic Phase Shifting ESPI,” Journal of Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp.95-98, 2006.
8. Kang, K. S., Kim, K. S., Jung, H. C. and Jang, H. S., “Influence of Shearing Amount on Detecting Crack-shaped Internal Defect by Shearography,” Journal of Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 112-115, 2006.
9. Chang, H. S., Lee, K. J., Kim, K. S. and Jung, H. C., “Quantitative Out-of-plane Deformation Measurement of Pressure Vessel With the Defect