

FGMs의 최적화 제조와 DIC 평가

권 오 현

부경대학교 안전공학과

(2011. 6. 15. 접수 / 2011. 10. 5. 채택)

Optimized Fabrication of FGMs and DIC Evaluation

Oh-Heon Kwon

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received July 15, 2011 / Accepted October 5, 2011)

Abstract : Recently new technological development needs the advances in the fields of new materials. The most advanced design is not useful if new material's performance is not realized adequately for bearing the service loads and conditions. FGMs suggests the reasonable solution for the those requirements because of its wide range micro-structure and the continuous constitutions. It's especially good for the heat-resisting components, piezoelectricity and aircraft fields. However the fabrication and its experimental estimation methods have not been established because of its various freedom of material's properties. Therefore it is necessary to develop the fabrication method and estimation of strength and deformation. The experiments are conducted under a four point flexural test. According to results, this study shows that FGMs is well fabricated and the deformation and strain fields are expressed very well by digital image correlation method.

Key Words : FGMs(functionally graded materials), DIC(digital image correlation), fabrication, deformation, strength, four point flexural test

1. 서론

최근의 다양한 첨단 기술의 발전과 더불어 에너지 등 각종 산업분야에서는 소재의 복합 기능성 및 극한 환경하의 사용이 가능한 첨단 신소재 개발이 요구되고 있으며 재료의 기능을 복합화한 강화복합재료가 활발히 연구되고 있다. 그러나 복합 기지와 강화재료와의 제반 물성차이에 의하여 재료간의 계면에서 해결되어야 할 많은 문제점 등이 나타난다¹⁾. 이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 방법으로서 강화재료의 조성비 및 구조를 연속적으로 변화시켜 경계의 불연속을 극소화하는 방안이 연구되고 있다²⁾. 기능경사재료(Functional Graded Materials; FGMs)에 대한 연구는 미국의 국가 기반기술로서 많은 주목을 받으며 다양한 범위에서 응용이 기대되고 있다. 특히 항공우주기술의 주요소인 내열특성분야, 핵융합로의 부품, 압전재료, 인공생체재료 등 그 실용성은 광범위하게 적용될 수 있다. 그러나 FGMs는 재료에 따라 현상, 조직,

특성 등이 다양하게 나타나기 때문에 FGMs 복합 재료의 제조방법 및 그 평가방법은 아직까지 명확히 확립되어져 있지 않다. 즉 재료의 자유도가 크기 때문에 최적의 조합을 찾기 어렵고 합성의 최적조건을 얻기 어렵다³⁾. 또한 다른 많은 조성의 물성을 파악하여 제어해야 할 뿐만 아니라 가압에서 형상을 제어 유지하기가 쉽지 않다. 게다가 면적이 큰 구조물의 경우에는 힘의 문제도 발생되며 경계면에서의 응력 문제도 발생된다. 따라서 본 연구에서는 세라믹재료와 금속재료를 이용한 FGMs를 제조한 후 제조된 FGMs의 물리적 기계적 성능을 평가하기 위하여 디지털 이미지 상관관계(Digital Image Correlation; DIC)법⁴⁾을 이용한 실험을 수행하고 그 유효성을 조사하고자 한다. 지난 수 십년간 변형과 응력을 측정하기 위한 다양한 기법은 수치해석적 기법, 광탄성실험법⁵⁾, 모아레간섭법⁶⁾, ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)법⁷⁾, 및 등이 상당한 신뢰성을 가지고 사용되어져 왔다. 이 중에서 DIC 평가를 이용하면 실시간으로 시험부 전 영역에 대하여 변형을 측정할 수 있다. 1980년대 이

후 개발되어 온 DIC법은 측정 대상 표면의 변형 전 후에 나타나는 스펙클(speckle) 패턴의 움직임을 기록하여 전 영역의 변형 정보를 얻는 기법이다. 본 연구에서 얻어진 결과를 바탕으로 FGMs 제조에 대한 기술을 확립함과 동시에 FGMs의 재료 강도적 특성평가에 DIC법의 유용성을 수립하고자 한다.

2. FGMs 성형

2.1. 재료 및 실험방법

세라믹재료는 Al_2O_3 1 μm APS(Atmospheric Plasma Spraying) 분말과 Ni 분말(1 μm)을 사용하였다. 재료는 여러 비의 분말을 혼합하여 Al_2O_3/Ni FGMs을 성형하였다. 6가지(5, 10, 20, 40, 60, 80%) 분말 조성은 에탄올로 습식 볼밀 혼합한 후 10 MPa의 성형로에서 각 성분비율당 약 3 mm 두께로 Fig. 1과 같이 원통형으로 금형성형하였다. 성형된 분말성형체는 HIP(Hot Isostatic Press; 1200°C, 100 MPa, 30분)질소챔버를 이용하여 소결하여 FGMs으로 제작 완성하였다. Fig. 1에는 HIP 챔버를 같이 나타낸다. 일반적으로 이종 재료가 결합되면 계면상의 불균질 변화가 나타난다. 계면상의 불균질변화는 재료의 열팽창계수 차이에 따른 열적 열화에 매우 민감한 영향을 미친다. 따라서 열적 물리적 불일치에 의한 영향을 최소화하는 방향으로 FGMs을 성형하기 위하여 가능한 입자의 조성성분의 조절과 산포도를 최적화하였다. 본 연구에서는 조성성분의 산포도를 확인하기 위하여 금속광학 현미경으로 면밀히 관찰한 후 소결성형하였다.

2.2. 조직관찰

성형된 FGMs의 조직관찰을 위하여 광학현미경을 사용하여 산포를 확인한 후 전자식주사현미경(SEM)을 이용하여 계면의 연속성을 확인하였다. 다

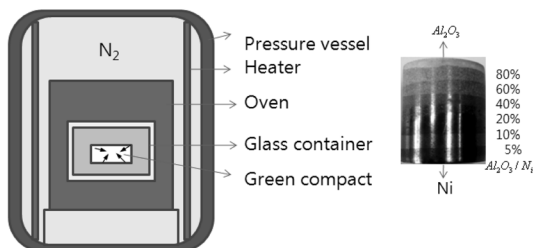


Fig. 1. Schematic of HIP equipment and the image of FGMs body.

층재료로 구성된 FGMs는 경계면에 불연속적 조성을 가질 수 있으며 이로 인하여 변형 및 응력의 불균일과 요구된 강도의 크기를 유지 못하게 된다. 또한 열차폐 효과를 효율적으로 얻을 수 없게 된다. 요구된 조성설계대로 이루어진 FGM의 성형이 확인 된 후 물리적, 기계적 특성을 파악하기 위하여 경도 및 4점 굽힘 시험을 수행하였다.

3. 재료특성치 평가

3.1. 재료특성 실험 방법

재료특성치 실험 및 강도평가는 기본적으로 경도 및 4점굽힘시험을 수행하였으며 표면의 변형률 측정은 배면 변형률 스트레인 게이지를 부착하여 수행되고 동시에 3차원 DIC를 통한 변형률 측정을 시행하여 강도해석에 적용하였다. 4점굽힘 실험에 사용된 시험편은 원통형(직경 21.48 mm, 높이 23.95 mm)으로 성형된 FGMs을 조성비율에 따라 두께가 약 2.8 mm의 경계층을 기준으로 하여 2 mm두께로 정밀히 디스크형태로 절단한 후 길이 15 mm, 폭 4 mm가 되도록 절삭하였다. DIC는 변형체의 내·외부에 발생하는 변위 및 변형률을 전장(full-field)에서 실시간으로(real time) 평가할 수 있는 방법으로, 시험편 표면의 변형 전·후의 스펙클 패턴의 움직임을 평가하여 변위장을 얻는 기법이다. 이 방법은 시험편의 표면에 임의로 분포되어 있는 그레이레벨 강도(intensity gray levels)를 분석하여, 변형이 진행된 다른 시간대의 두 개의 디지털 이미지 사이의 그레이레벨 강도(intensity gray levels)를 최적화하여 수행된다. DIC기법에 의하여 시험편의 표

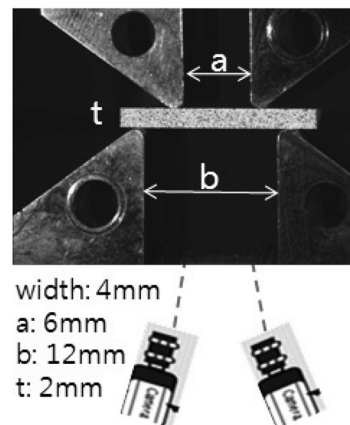


Fig. 2. The picture of the DIC experimental set-up for 4-point flexural test.

면에 나타나는 변위 및 변형률장의 측정을 위하여서는 시험 중 시험편 변형 영상을 1391×1039 픽셀을 가지는 고해상도 CCD카메라(QICAM)로 일정간격으로 취득한다. 광원은 광섬유 조명기를 사용하고 획득된 변형영상은 DIC 해석프로그램을 이용하여 평가하였다. Fig. 2는 4점굽힘실험을 위하여 장착된 지그 및 카메라의 위치를 나타내고 있다. 4점굽힘지그는 ASTM C1161⁸⁾을 따라 제작되었다.

3.2. DIC 기본사항

DIC는 시험편 표면의 변형 전·후에 기록된 이미지(기준이미지와 변형이미지)의 동일 지점의 움직임을 매칭하여 얻어지는 변위장으로부터 변형체에 발생하는 변형률을 평가한다. DIC 이론에 대한 내용은 다양한 논문^{9,10)}에서 기술되고 있으므로 여기서는 기본적인 개념을 중심으로 간략히 언급한다.

Fig. 3에서 임의의 점P의 변위를 계산하기 위하여 기준이미지의 점 $P(x_0, y_0)$ 를 중심으로 $(2n+1) \times (2n+1)$ 픽셀크기의 정방 기준 국부 미소 서브셋 S를 선택하고 변형이미지에 위치한 동일점 P를 매칭한다. 단일 픽셀보다 서브셋을 사용하는 이유는 그레이 레벨의 편차를 보다 더 보상함으로써 더 정확한 최

적매칭을 얻을 수 있다. 변형체의 변형연속성을 고려할 때, 기준이미지의 서브셋에 있는 이웃하는 점들은 변형상태에서의 서브셋에서도 이웃하는 점으로 존재할 것이다. 따라서 $P(x_0, y_0)$ 주위의 점 $Q(x_i, y_i)$ 는 변형 후에도 P점이 변형된 위치의 근방에서 매칭되어야 한다. 또한 이미지는 디지털이미지이므로 1픽셀단위보다 더 작은 서브픽셀로 정밀매칭을 하기 위한 반복계산에서 초기추측치가 필요하다.

적절한 초기추측치의 설정으로부터 반복계산하여 기준 상태의 서브셋 픽셀과 하중에 의한 변형상태의 서브셋 픽셀의 최적 매치상태를 얻음으로써 U, V 변위를 계산할 수 있다. 얻어진 변위장으로부터 변형률을 평가한다. 최적매치는 서브셋 S를 나타내는 그레이 수준값으로 주어지는 오차함수를 최소화함으로써 얻어진다. Fig. 5에서 매핑함수는 1차형상함수를 이용하여 다음 식 (1)을 사용한다.

$$\begin{aligned} x'_i &= x_0 + u + u_x dx + u_y dy \\ y'_i &= y_0 + v + v_x dx + v_y dy \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 좌표계 (x, y) 와 좌표계 (x', y') 는 임의의 점 P와 인접 점 Q의 변형 전후를 나타내며, u, v 는 기존 점의 변위성분을, u_x, u_y, v_x, v_y 는 1차변위 도함수를 나타내고 있다.

기준이미지 서브셋과 변형 이미지 서브셋 사이의 유사도를 측정하기 위하여 상관관계계수를 사용한다. 상관관계계수 C는 ZNSSD(Zero normalized sum of squared differences)수법¹¹⁾을 사용하여 두 임의의 점 $P(x_0, y_0), Q(x_i, y_i)$ 에 대한 변형 후의 점 $P'(x'_0, y'_0), Q'(x'_i, y'_i)$ 에 대하여 다음 식 (2)에 의해 주어진다.

$$C = \sum_{i,j=-n}^n [P - Q]^2$$

$$P = \frac{f(x_i, y_j) - f_n}{\left[\sum_{i,j=-n}^n (f(x_i, y_j) - f_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{g(x'_i, y'_i) - g_n}{\left[\sum_{i,j=-n}^n (g(x'_i, y'_i) - g_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

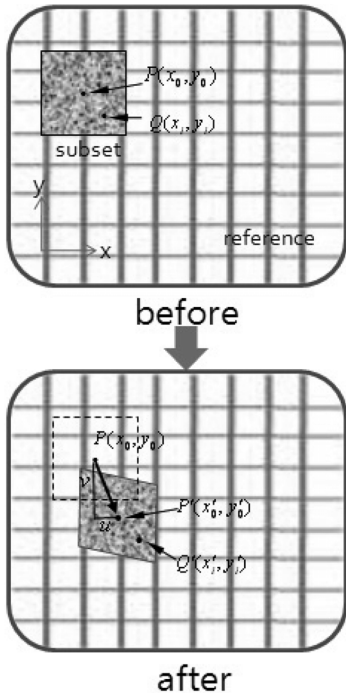


Fig. 3. The schematic diagram of a reference and deformation image.

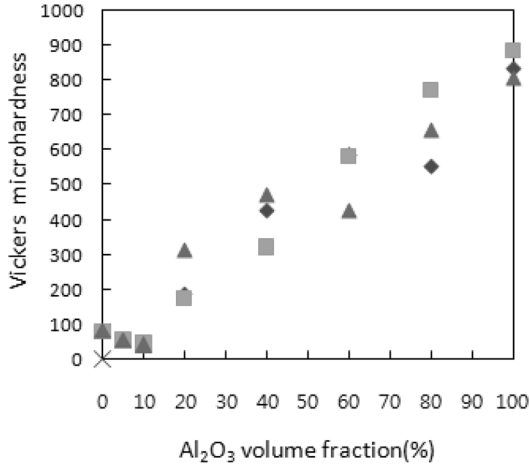


Fig. 4. Vickers microhardness to volume fraction,

여기서 f_n , g_n 은 다음과 같다.

$$f_n = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{i,j=-n}^n f(x_i, y_i) \quad (3)$$

$$g_n = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{i,j=-n}^n g(x'_i, y'_i)$$

P점의 변위는 P점 주위의 미소 서브셋 면적에 있어서 상관계수 C를 최소화함으로써 얻어질 수 있다. 상관관계계수 C를 최소화하는 반복계산은 Newton-Raphson법¹²⁾에 의해 주어진다.

3.3. 경도시험

Fig. 4는 성형제작된 FGMs 재료를 Ni/Al₂O₃ 각 조합 성분별로 선택하여 경도시험을 수행한 결과이다. 실험은 미소 비커스경도기를 사용하여 3회 이상 수행하였으며 경도측정 하중은 1.96 N, 압입시간은 15초로 정하였다. Al₂O₃ 체적분율 비가 100%인 경우가 가장 큰 값으로 평균 900을 나타내었다.

3.4. 굽힘시험

Fig. 5은 FGMs 각 성분조합부에 대하여 4점 굽힘시험을 수행하여 하중 및 변위선도의 관계를 나타내었다. 시험편은 FGMs 디스크에서 각 체적분율로 15×4×2 mm의 크기로 제작한 후 DIC 측정을 위하여 스펙클 패턴을 형성하였다. 굽힘시험은 소형재료시험기(BOSE, ElectrForce 3200, 4.5 kN)를 사용하였으며, 부하 하중속도를 0.1 mm/min로 수행하였다.

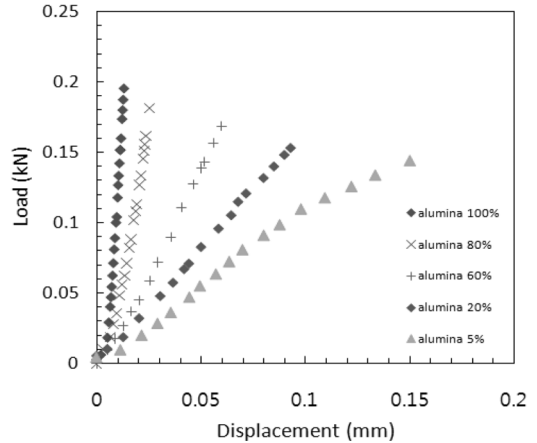


Fig. 5. The relationship of loads and displacements according to the alumina volume fraction,

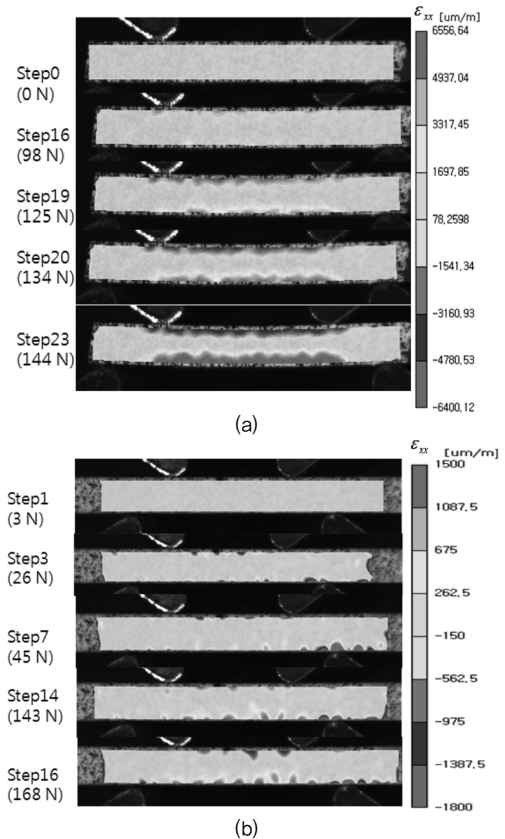


Fig. 6. The normal strain contours according to the load step at the alumina volume fraction (a) 5% and (b) 60% regions.

Al₂O₃/Ni 비가 작아질수록 탄성계수의 값은 작아지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Al₂O₃의 체적분율이 5% 및 60%일 때 DIC

평가를 한 후 표면에 나타나는 단면 수직변형률 ϵ_{xx} 를 각 하중 단계별로 나타낸 것이다. 하중단계별로 전 평가영역에 있어서 변형률의 변화를 시각적으로 잘 표현하고 있다. 변형률 등고선의 변화를 보면 5%일 때는 균질재의 변형률 등고선의 양상과 거의 유사하나 60%의 경우는 최대변형률이 나타나는 모양이 u 변위방향에 따라 섬의 형태를 반복하여 나타나고 있음을 보여준다. 이것은 일반적 균질재와 다르게 Al_2O_3 와 Ni 분말복합재료의 물성치 차이에 따른 결과로 보여지며 유사한 결과가 20%, 40%의 경우에도 나타났다.

Fig. 7은 Al_2O_3 의 체적분율이 5%일 때의 y 방향 변위 v 의 변화를 각 하중단계별로 얻은 변위등고선의 예를 나타낸다. 등고선으로부터 직접적으로 변

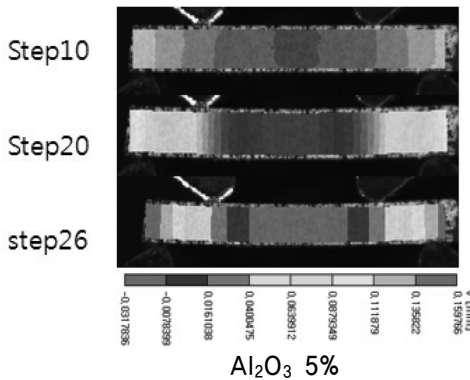


Fig. 7. The v displacement contours of the alumina volume fraction 5% region at the each loading step.

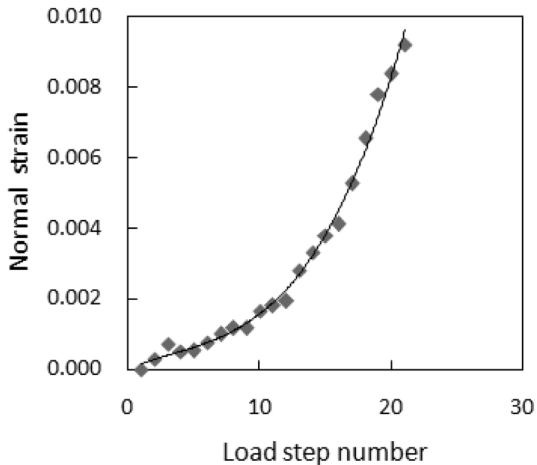


Fig. 8. The variation of the normal strain at the point of the maximum tension stress in the case of alumina volume fraction 5%.

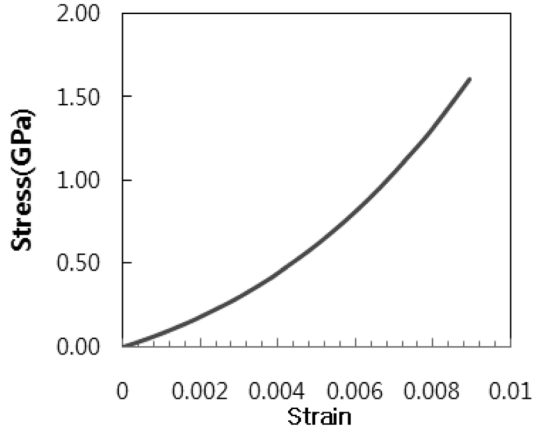


Fig. 9. The relationship bending stress and strain at the center point of the bottom(alumina volume fraction 5%).

위의 변화과정을 전 영역에 있어 쉽게 얻을 수 있어 DIC평가의 유용성을 잘 나타낸다. Fig. 8은 Al_2O_3 체적분율 5%인 경우에 시험편의 중심에서 최대 인장면에서의 수직변형률을 하중단계별로 DIC평가하여 얻어진 결과를 나타낸다. 파단에서의 최대변형률은 약 0.009로 나타났고 하중증가에 따라 비선형적 거동을 보여주고 있다. 이것은 FGMs내의 Ni 체적분율이 거의 대부분을 가지는 위치에서의 변형률로 Ni의 특성에 의해 지배되고 있음을 나타낸다.

하중-변위곡선에서 얻어진 응력과 DIC 평가에서 얻어진 변위 및 변형률 등고선을 사용하여 응력-변형률 선도를 작성한 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 주어진 관계를 이용하여 Al_2O_3 5% 체적분율 FGMs 재료의 탄성계수 E 는 85.99 GPa로 구해졌다.

4. 결론

본 연구에서는 세라믹기지지재료인 Al_2O_3 1 μm APS파우더와 Ni파우더(1 μm)를 혼합하여 Al_2O_3/Ni FGMs을 성형하는 기법을 수립하였으며 얻어진 FGMs 복합재료는 DIC기법을 이용한 변형장을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) Al_2O_3/Ni FGMs이 요구된 조성설계대로 이루어진 성형이 확인되었다.
- 2) 마이크로미터스경도는 100-900의 경도값이 체적분율에 따라 얻어졌다.
- 3) DIC 평가에 의하여 변형률 및 변위장의 변화가 하중증가에 따라 시편 전체면적에 대하여 잘 표현되었다.

4) 각 체적분율에 따른 탄성계수는 DIC평가에서 얻어진 변형률에 의해 얻어질 수 있다.

감사의 글 : 이 논문은 2009학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2009-40).

참고문헌

- 1) M. Arai, K. Matsuhitaka, K. Sugimoto and M. Endo, "Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nano fiber", JSME Annual Meeting, pp. 667~668, 2007.
- 2) H. P. Xiong, A. Kawasaki, Y. S. Kang and R. Watanabe, "Experimental study on heat insulation performance of functionally graded metal/ceramic coatings and their fracture behavior at high surface temperature", Surface & coatings technology, Vol. 194, pp. 203~214, 2005.
- 3) M. Sasaki and T. Hirai, "Fabrication and properties of functionally gradient materials", Journal of the ceramic society of Japan, Vol. 99, pp. 1002~1013, 1991.
- 4) S. R. Mcneil, W. Peters, M. A. Sutton, "The estimation of stress intensity factor by digital image correlation", Engineering fracture mechanics, Vol. 28, pp. 101~112, 1987.
- 5) R. K. Muller and L.R. Saackel, "Complete automatic analysis of photoelastic fringes", Experimental mechanics, Vol. 19, pp. 245~251, 1979.
- 6) F. P. Chiang, "Moire methods of strain analysis", Experimental mechanics, Vol. 19, pp. 290~308, 1979.
- 7) P. Rastogi, "Principle of holographic interferometry and speckle metrology", Photomechanics, Springer, pp. 103~145, 1999.
- 8) Standard Test Method for "Flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature", ASTM C 1161, 2006.
- 9) D. Lecompte, A. Smith and S. Bossuyt, "Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation", Optics and lasers engineering, Vol. 44, pp. 1132~1145, 2006.
- 10) F. M. Sanchez-Arevalo and G. Pulos, "Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior of materials", Materials characterization, Vol. 59, pp. 1572~1579, 2008.
- 11) A. Giachetti, "Matching techniques to compute image motion", Image vision computers, Vol. 18, pp. 247~260, 2000.
- 12) A. C. Chapra and R. P. Candae, "Numerical methods for engineers", McGraw-Hill, pp. 157~159, 1998.