

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(10), 896-901(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.10.896

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

온도 구배에 의한 날개 외피의 열변형 특성 연구

김정범*, 김홍일, 김재영

Investigation of thermal deformation of wing skin induced by temperature gradient

Jeong-Beom Kim*, Hong-Il Kim and Jae-Young Kim
Agency for Defense Development(ADD)

ABSTRACT

The skin-frame type structure is designed to investigate the thermal deformation of the wing skin induced by the temperature gradient. In order to effectively simulate the temperature gradient on the wing specimen, a water cooling system is devised on the frame of the specimen. Out of surface skin deformation of the skin-frame type structure made of SUS304 material with respect to the temperature is successfully measured using the digital image correlation (DIC) technique including quantitative evaluation of the measurement uncertainty.

초 록

온도 구배에 의한 날개 외피의 열변형 특성을 연구하기 위하여 비행체 날개의 포켓 형상을 본 딴 프레임 외피 구조 시편을 제작하였다. 날개에 발생하는 온도 구배 현상을 효과적으로 모사하기 위하여 프레임 외피 시편의 프레임에 수냉 시스템을 개발, 적용하였다. 공력 특성에 영향을 미치는 날개 외피의 면외 열변형을 정량적으로 평가하기 위하여 디지털 영상 상관 기법(Digital Image Correlation technique, DIC)을 사용하고, 면외 변위 측정 불확도 평가를 통해 측정 정확도를 분석하였다. SUS304 소재로 만들어진 프레임 외피 구조 시편의 시험을 수행하여 온도에 따른 외피의 면외 변형 특성을 성공적으로 획득하였다.

Key Words : Aerodynamic heating(공력가열), Wing thermal deformation(날개 열변형), digital image correlation technique(디지털 영상 상관 기법)

1. 서 론

운용 중 발생하는 공력가열은 날개 구조물을 열하중에 노출시켜 열변형을 초래한다. 특히 Fig. 1과 같이 프레임과 얇은 외피로 이뤄진 포켓 구조물의 경우 열용량 차이로 인해 프레임과 외피

사이에 온도 구배가 발생된다. 이로 인해 외피부에 불룩하게 면외 변형이 나타난다. 이러한 외피 면외 변형은 날개의 공력 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 정량적인 측정과 평가가 필수적이다. Mansfield 등은 공력 가열로 인한 온도 구배로 발생하는 날개 구조물의 좌굴 변형에 대해 연구

† Received : July 30, 2015 Revised : September 10, 2015 Accepted : September 11, 2015

* Corresponding author, E-mail : yacksu@add.re.kr

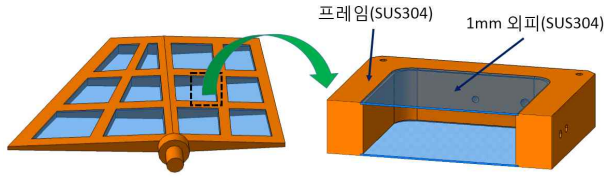


Fig. 1. Frame-Skin structure of wing

한바 있다[1]. Neto 등은 날개의 좌굴 변형된 국소 부위가 강도 저하를 야기해 구조물 전체의 파괴로 이어질 수 있다고 보고하였다[2]. 이렇듯 온도 구배로 인해 발생하는 외피의 면외 변형은 비행체의 비행 안정성에도 영향을 미침을 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서 날개 구조를 본 딴 프레임 외피 구조 시편을 제작하고, 시험을 통해 온도에 따른 외피의 면외 변형에 대한 정량적 분석을 수행하였다.

외피의 면외 열변형 특성을 측정하는 방법은 여러 가지가 있다. 기존의 구조물 변형 측정 방법인 변형을 게이지는 포인트 측정 방법으로 측정 위치에서의 면내 변형만을 측정 가능하고, 고온 구조물 측정 시에는 별도의 온도 보상이 요구된다. 공철원 [3], Williams [4], Rakow [5] 등은 모아레 간섭계를 사용하였는데, 측정 정밀도를 높이기 위해서는 광원의 입사각과 반사각의 정확한 측정이 우선되어야 하고 시편으로부터 광원까지의 거리와 디지털 카메라까지의 거리가 일치되어야 한다. 이러한 이유로 모아레 간섭법은 측정 방법이 까다로우며 복잡하고, 시험 구성 정밀도에 따라 측정 민감도가 크게 달라지는 단점이 있었다. 안진수[6] 등은 모아레 간섭법에 디지털 영상처리기법을 적용하여 측정 정밀도를 높였다. 그러나 면외 변위 측정 민감도는 측정된 좌굴 변형량이 6 mm 이하일 때 300 μm 수준으로 나타나 여전히 측정 정밀도에 한계를 보였다.

한편 디지털 영상 상관 기법 (Digital Image Correlation technique, DIC)은 디지털 카메라로 촬영된 시편의 변형 전 후 영상을 비교하여 변형을 계산하는 방법으로 접촉 없이 시편의 동시 다점, 다차원 변형 측정이 가능하며 충분한 변형 측정 정확도를 확보할 수 있다[7]. 두 대 이상의 디지털 카메라를 활용하면 3차원 변위를 측정할 수 있으므로, 변형을 게이지와 모아레 간섭계를 모두 대체할 수 있다.

프레임 외피 구조를 비행 환경과 유사하게 수백 °C 이상의 온도 구배를 인가하기 위해 일반적으로 적외선 석영 램프 가열장치를 활용한다. 그러나 금속이 고온으로 가열되면 빛을 방출하기 때문에 DIC 등과 같은 영상 기반 변형 측정이

힘들다. Bing Pan[8]의 연구와 같이 푸른색 광원과 대역 필터(band-pass filter)등이 필요해 측정 시스템이 복잡해지게 된다. 본 연구에서는 이런 문제를 해결하기 위해 프레임 외피 구조 시편에 수냉 시스템을 적용하여 저온에서도 효과적으로 외피와 프레임간의 온도 구배를 구현하여 열변형을 성공적으로 측정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 SUS304 소재로 만들어진 프레임 외피 구조 시편에 수냉 시스템을 적용하여 온도 구배를 구현하고, DIC 기법을 적용하여 프레임 외피 구조의 면외 열변형 거동을 다차원으로 측정하고자 하였다.

II. 시험 시스템 구성

2.1 시험 장비 구성

프레임 외피 구조 시편의 열변형 특성 관측을 위해 시험 장비를 Table 1, Fig. 2와 같이 구성하였다. 시편의 온도변화를 K-TYPE 열전대를 이용하여 측정하였고, DIC 시스템으로 시편 전체 영역의 면내 변위와 면외 변위 데이터를 획득하였다.

관측창이 설치된 전기가열 오븐을 가열장치로 사용하였다. 가열된 공기를 팬으로 강제 대류 시

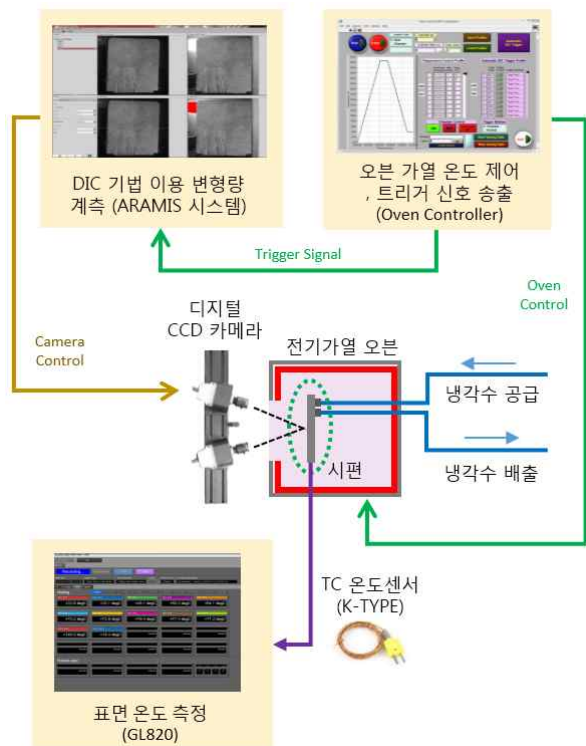


Fig. 2. Block diagram of specimens and measuring system

Table 1. Construction of test equipment

항목	장비 구성
시편	- 프레임 외피 구조 시편 (SUS304) - 수냉 시스템(배관, 연결포트)
DIC 시스템	- 디지털 CCD 카메라 2대 (2448×2050 Pixel, f=50mm) - 변형 분석 소프트웨어 (GOM사 ARAMIS SYSTEM)
가열장비	- 전기 가열 오븐 (EC13HA)
온도	- K-TYPE 열전대 (OMEGA사) - 계측 온도 데이터 로거(GL820)

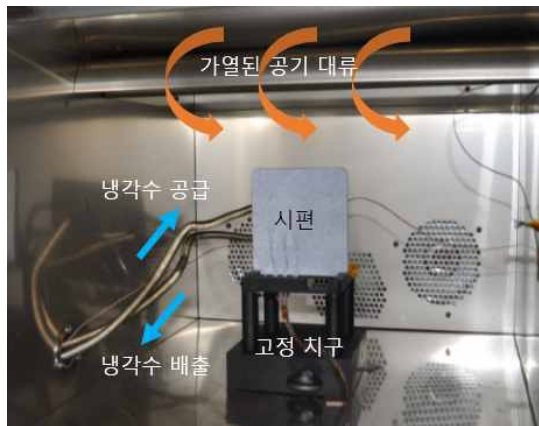


Fig. 3. Disposition of the specimen in the heating oven

켜 내부 온도를 균일하게 유지시킬 수 있는 것이 특징이다. 수냉 시스템은 시편에 온도 구배를 구현하기 위해 시편에 연결된 연결포트와 배관으로 구성되었고, 이를 통해 냉각수의 공급/배출이 이루어진다(Fig. 3). 수냉 시스템이 적용된 프레임 외피 구조 시편의 두께 1 mm 박판은 최대 180°C까지 가열 가능하다.

2.2 프레임 외피 구조 시편

날개의 포켓 구조를 모사하기 위해 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 프레임과 상대적으로 두께가 얇은 박판으로 구성된 프레임 외피 구조 시편을 제작하였다. 프레임 외피 구조는 가로, 세로 120 mm, 높이 10 mm 크기이며 두께 1 mm 외피가 프레임에 레이저 용접으로 접합되었으며 외피와 프레임의 소재로 SUS304를 사용하였다. 온도 구배의 구현을 위해 시편 가열 시 프레임부의 온도 상승을 지연시킬 필요가 있다. 따라서 프레임 내

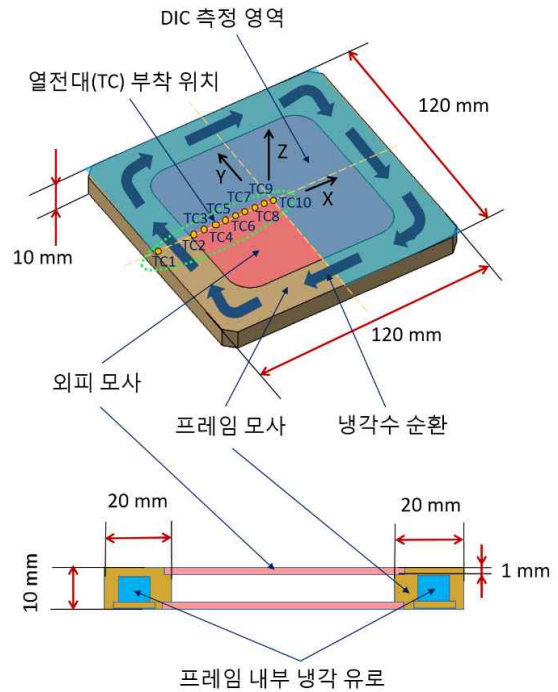


Fig. 4 Dimensions and section shape of the specimen

부에 수냉 시스템을 구성하여 냉각수가 순환되도록 설계하였다. 시편 가열 시 외피는 팽창되지만 냉각된 프레임에 의해 외피 접합면에서 열팽창이 지연된다. 이러한 경계조건은 외피의 좌굴 거동을 야기하고, 작용하중에 따른 좌굴 거동을 분석하기 위해서 시편 중앙부에서의 변형을 측정할 필요가 있다.

온도 구배를 정확하게 측정하기 위해 총 10개의 열전대를 시편 전면부, 변형이 발생하는 영역에 부착하였다. DIC 시스템에 의한 변위 측정 시 시편을 향해 디지털 카메라의 시야가 확보되어야 하는 점을 고려하여 열전대 부착 영역은 시편 좌측 하단으로 제한하였다. 냉각수 유로 양쪽에 TC1과 TC2를 부착하고, TC2부터 시편의 박판 중앙부인 TC10 위치까지 5mm 간격으로 열전대를 부착하였다. 열변형 측정 후 결과 분석 시 열전대가 부착된 영역을 제외하고 변형량 분석이 수행된다.

2.3 DIC 적용 및 측정 불확도 평가

일반적으로 구조물의 변형 측정을 위해 변형을 게이지나 모아레 간섭계 등을 활용한다. 최근에는 고온 영역에서도 보정 없이 측정이 가능하고, 시편 전체 영역에서 변형을 동시에 획득 가능한 DIC 기법의 사용이 증가하고 있다. DIC 기법은 비접촉식 측정 기법의 하나로 픽셀들의 변

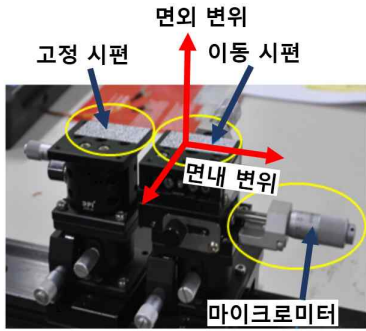


Fig. 5. Sepspecimens for quantitative evaluation of the measurement uncertainty

형 전과 후의 영상으로부터 픽셀들 사이의 상관 관계를 파악하고, 각 픽셀의 변위를 계산하는 방법이다[9-11]. 특히 두 대 이상의 카메라를 사용하면 각 픽셀의 3차원 변위를 측정할 수 있어 시편의 면내 변형과 면외 변형이 모두 측정 가능한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 DIC 기법의 적용하여 프레임 외피 구조의 열변형 측정을 수행하였다. DIC 시스템으로 2448×2050 픽셀의 해상도를 가지는 두 대의 디지털 카메라로 구성된 GOM사의 ARAMIS 시스템 사용하였다. DIC 시스템 사용하기에 앞서 DIC의 측정 불확도가 본 시험 목적인 프레임 외피 구조의 면외 열변형 측정에 충분한 지에 대한 정량적 평가를 수행하였다.

DIC 시스템의 측정 불확도 획득을 위해 Fig. 5와 같이 스펙클 패턴을 입힌 시편을 치구에 넣고 면내, 면외 방향으로 이동시키면서 DIC 시스템을 이용하여 변위를 측정하였다.

마이크로미터로 인가한 면내 및 면외 변위를 M, DIC로 측정한 변위값을 D, 변위값의 차이를 Δ라고 할 때 이들의 관계는 식 (1)과 같다. 식 (1)을 통해 DIC 시스템의 합성 표준불확도 u_D 는 식 (2)와 같다. u_Δ 는 변위값 차이의 표준불확도, u_M 은 마이크로미터의 표준불확도이다.

$$D = \Delta + M \tag{1}$$

$$u_D = k \sqrt{u_\Delta^2 + u_M^2} \tag{2}$$

변위값 차이는 A형 평가를 통해 표준불확도를 구하였다[12]. 측정 결과 변위값 차이의 표준불확도가 면내 방향으로 0.70 μ m, 면외 방향으로 3.1 μ m임을 확인하였다. 그리고 마이크로미터의 불확도는 B형 평가를 통해 3.0 μ m로 예상하였다. DIC 시스템의 측정 불확도는 확장계수 k를 2로 사용하여 신뢰수준이 약 95%일 때, 면내 6.2 μ m, 면외 8.6 μ m로 평가되었다. 현재 시편의 변형을 고

려하였을 때, DIC 시스템은 충분한 측정 불확도를 확보하고 있다고 판단된다.

III. 시험 결과

3.1 시험 수행

DIC 기법으로 변형을 측정하기 전에 두 대의 디지털 카메라는 매 시험 전 보정이 필수적으로 요구된다. 본 시험에 앞서 사용된 보정 패널은 GOM/CP20/MV 90 X 72를 사용하였다. 디지털 카메라는 시편으로부터 50 cm 거리를 두고 측정되었으며 두 카메라 사이의 각도는 20.8°로 고정되었다. 보정 편차(calibration deviation) 결과는 0.038 pixels로 나타났다.

가열오븐은 내부 온도를 25 °C부터 최고 온도 300 °C까지 가열속도 10 °C/min로 균일하게 가열되도록 제어하였다. 시편 촬영용 트리거 신호는 10 °C 상승시마다 송출되도록 설정 하였다. 가열 전 시편 외피의 초기 온도는 13 °C로 측정되었다. 시험 전 시편으로 공급되는 냉각수 관로를 열어 수냉 시스템의 정상 작동 여부를 확인하였다. 시험 중 추가되는 가열량으로 인해 시편이 고정되는 바닥면의 열변형이 발생되어 시편의 강제운동을 유발하지만 측정 후 결과 분석 시 DIC 시스템의 자체 알고리즘을 사용하여 보정하도록 하였다. 시험 중 DIC 시스템의 측정 불확도가 보장되도록 카메라 보정 시의 주변 온도 20 °C를 시험 종료 시까지 일정하게 유지시켰다.

3.2 열변형 측정 결과

DIC 기법을 통한 열변형 형상 측정 시험은 총 2개(#1, #2)의 시편으로 수행되었다. 냉각수가 흐르는 프레임부터 시편 박판 중앙부까지 총 10개의 열전대를 부착하였다(Fig. 4). 본 논문에서 온도차 ΔT는 TC10(시편 중앙부 온도)과 TC1(프레임 온도)의 차이로 정의하였다. 본 연구에서는 최대 ΔT 136 °C 까지 시험을 수행하였다. Fig. 6은 ΔT 별로 측정된 온도 분포를 나타낸 것으로, 수냉식 프레임을 사용함으로써 시편 외피에 효과적으로 온도 구배를 인가한 것을 확인할 수 있다. 즉, 비행 중 공력가열에 의해 발생하는 외피의 좌굴 현상을 모사할 수 있음을 확인하였다.

Figure 7은 시편 중앙부의 면외 변위를 DIC 시스템으로 측정한 값이다. ΔT 136 °C에서 두 시편의 최대 변형이 각각 1.77mm, 1.68mm 측정되었다. 또한 시편 중앙부의 면외 변위는 ΔT 136 °C 범위 내에서 ΔT에 선형적인 거동을 보

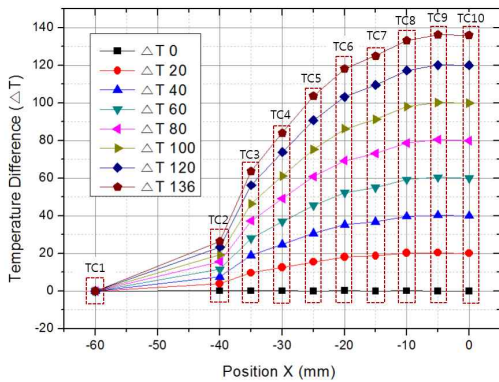


Fig. 6. ΔT by position on the x-axis of specimen #2

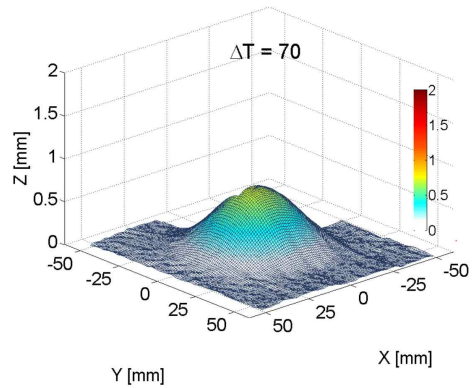


Fig. 8. 3-dimensional displacement result of specimen #2 (ΔT 70 °C)

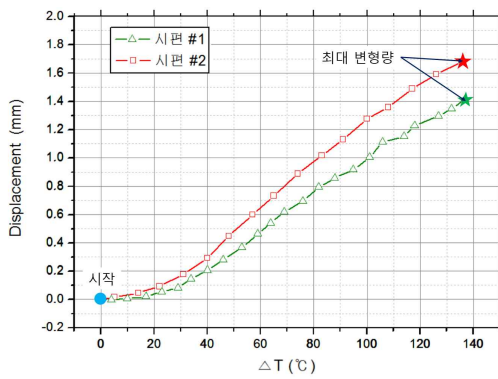


Fig. 7. Displacement of the center of specimens by temperature difference

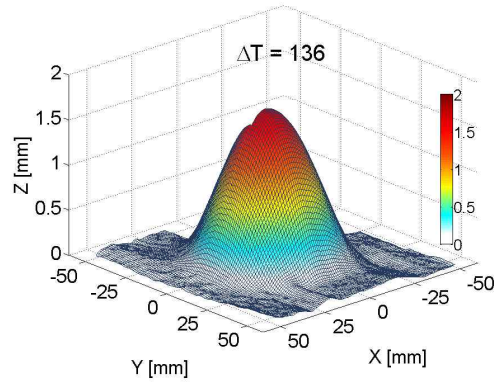


Fig. 9. 3-dimensional displacement result of specimen #2 (ΔT 136 °C)

임을 확인하였다.

DIC 기법을 이용한 시편 전체 영역에 대한 면외 변위 측정 결과를 3차원으로 표현하였다. Fig. 8은 ΔT 70 °C에서의 시편 #2 좌굴 형상이고 Fig. 9는 온도 구배가 가장 컸던 ΔT 136 °C에서의 시편 #2 좌굴 형상이다. DIC 기법을 이용함으로써 날개 모사 시편의 ΔT 에 따른 형상을 정량적으로 획득할 수 있어, 시편 프레임과 외피의 온도차이인 ΔT 가 커질수록 시편의 중앙부가 부풀어 오르는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 3차원으로 측정된 시편 #2의 변형 결과를 이용해서 단면 변위를 온도 구배 변화별로 계산한 결과이다. 온도가 유지되는 프레임 부위 (-60~40mm, 40~60mm)는 변형이 발생하지 않는데 비해, 얇은 외피의 경우 Fig. 6과 같이 ΔT 가 증가함에 따라 대칭적으로 부풀어 오르는 현상을 정량적으로 확인할 수 있었다. Fig. 10은 Fig. 8, 9와 같은 3차원 결과로부터 시편 중앙부 단면의 변위를 ΔT 별로 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 시편 중앙부를 기준으로 대칭적으로 변형된 것을

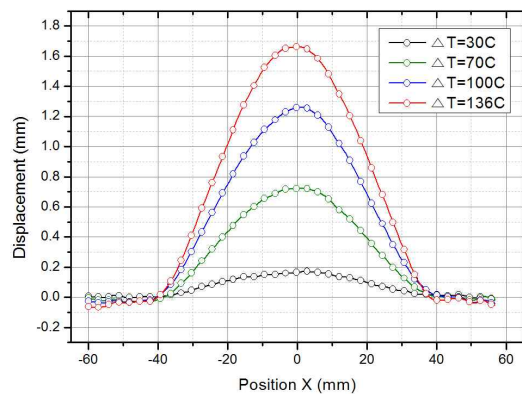


Fig. 10. deformation of section shape of specimen #2

알 수 있다. 만약 시편 포켓의 형상이 달라지고 외피 재료의 구성이 달라진다면 외피 변형 특성이 달라질 것으로 예상된다. 따라서 이렇게 측정된 시편 외피의 정량적인 변위 결과는 추후 날개 포켓 구조 설계, 해석 및 공력 특성 분석 등에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

IV. 결론

본 연구에서는 가열 환경에서 프레임 외피 구조 시편의 변형 모사와 측정을 수행하였다. 시편 외피의 3차원 열변형을 효과적으로 모사하기 위해 수냉식 프레임을 고안하여 저온 가열 환경에서도 고온 비행 환경을 모사할 수 있었다. 또한 변형을 정량적으로 측정하기 위하여 DIC 기법을 적용하였다. DIC 측정 시 정확성을 판단하기 위해 측정 불확도 평가를 수행하였고, 면내 변위와 면외 변위에 대한 측정 불확도를 확인하였다. 시편 가열 시험에 DIC 기법을 이용하여 시편 외피 영역에 대한 3차원 면외 변위를 측정하였다. 시편의 외피 중앙부와 프레임의 온도차이로 인해 외피 중앙부가 부풀어 오르는 현상을 정량적으로 측정할 수 있었다. 향후 본 시험방법을 적용하면, 고온 환경에서 프레임 외피 구조 시편의 변형 거동 특성 연구에 활용할 예정이며, 공력 영향 해석 등에도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

Reference

- 1) E. H. Mansfield, Sc.D. , "Leading-Edge Buckling due to Aerodynamic Heating", A. R. C. R.&M. No.3197, 1960, pp. 1~20
- 2) A. T. Neto, F. L. S. Bussamra, H. A. C. Silva, "A new metamodel for reinforced panels under compressive loads and its application to the fuselage conception", Lat. Am. J. Solids Struct. 11(2014), 2014, pp. 223~244
- 3) C. W. Kong, I. C. Lee, C. G. Kim and C. S. Hong, "Buckling and Postbuckling Behavior of Composite Plate with a Hole", J. KSAS, 24(3), 1996, pp. 53~63
- 4) J. G. Williams, M. Stein, "Buckling Behavior and Structural Efficiency of Open-

Section Stiffened Composite Compression Panels", AIAA J., 14(11), 1976, pp. 1618-1626

5) J. F. Rakow, A. M. Waas, "Thermal Buckling of Metal Foam Sandwich Panels for Convective Thermal Protection Systems", J. Spacecraft Rockets, 42(5), 2005, pp. 832~844

6) J. S. Ahn, W. M. Kyoung, C. G. Kim, C. S. Hong and S. M. Jeon, "Study on the Delamination Buckling Behavior by Use of Shadow-moire Method", J. KSAS, 26(3), 1998, pp. 86~95

7) Tailie Jin, N. S. Goo, "Measurement of Thermal Deformation of a Double Ring Structure using Digital Image Correlation Technique", J. KSAS, 39(9), 2011, pp. 877~882

8) B. Pan, D. Wu, Z. Wang, Y. Xia, "High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200°C", Meas. Sci. Technol., 22(2011), 015701 (11pp)

9) K. S. Kim, "Principle of Digital Image Correlation", J. KSNT, 32(5), 2012, pp. 597~602

10) T. L. Jin, N. S. Goo, "Thermal Stress Measurement of a Double Ring Structure Using Digital Image Correlation Method", Experimental Techniques, online published, 2013

11) M. De Strycker, L. Schueremans, W. Van Paepegem, D. Debruyne, "Measuring the thermal expansion coefficient of tubular steel specimens with digital image correlation techniques", Opt. Laser Eng., 48(2010), 2010, pp. 978~986

12) "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", JCGM 100, 2008