

에어컨 실내기 사출 조립품의 열 변형 3D측정과 유한요소해석

홍석무^a, 황지훈^{b*}, 김철곤^b, 엄성욱^b

Study on the Thermal Deformation of the Air-conditioner Indoor Unit Assembly Using 3D Measurement and Finite Element Analysis

Seokmoo Hong^a, Jihoon Hwang^{b*}, Cheulgon Kim^b, Seong-uk Eom^b^a Department of Metalmold Design Engineering, Kongju National University, 1223-24, Cheonan Daero, Seobuk-gu, Cheonan, Chungnam-do, 331-717, Korea^b Samsung Electronics Co. Ltd., Global Technology Center, 129, Samsung-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 443-742, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	6	October	2014
Revised	11	January	2015
Accepted	20	January	2015

Keywords:

Polymer assembly
Thermal deformation
3D optical measurement
Finite element analysis
Thermo-graphic measurement

ABSTRACT

Thermal deformation, such as bending and twisting, occurs among the polymer parts of air-conditioner indoor units because of repetitive temperature change during heating operation. In this study, a numerical method employing finite-element analysis to efficiently simulate the thermal deformation of an assembly is proposed. Firstly, the displacement of an actual assembly produced by thermal deformation was measured using a 3D optical measurement system. The measurement results indicated a general downward sag of the assembly, and the maximum displacement value was approximately 1 mm. The temperature distribution was measured using a thermographic camera, and the results were used as initial-temperature boundary conditions to perform temperature-displacement analysis. The simulation results agreed well with the measured data. To reduce the thermal deformation, the stiffness increased 100%. As the results, the maximum displacement decreased by approximately 5.4% and the twisting deformation of the holder improved significantly.

1. 서론

에어컨 실내기의 부품은 대부분 폴리머로 구성되어있으면서, 금속을 포함하여 다양한 소재의 부품들로 조립된다. 이러한 부품들 중 열 교환기에서 발생하는 복사열과 온풍 및 냉풍 등의 요인은 열 전달 현상을 유발하는데, 이로 인해 부품 간의 온도 차가 발생하게 된다. 폴리머 소재는 특히 열에 민감하게 반응하기 때문에, 다양한 소재로 구성되어있는 조립품의 부위 별 온도 차는 여러 문제를

야기할 수 있다. 에어컨 실내기는 냉풍 작동 시 10°C 이하의 낮은 온도부터 온풍 작동 시 20~50°C 온도까지 반복적으로 열 충격을 받게 된다. 폴리머의 기계적 물성은 온도변화에 매우 민감하여 반복적 열 충격에 의한 열 변형이 발생하게 된다. 폴리머와 금속의 접촉부가 열팽창하면서 스틱 슬립(stick-slip)을 유발해 소음이 발생하기도 하고, 폴리머가 열 변형하면서 뒤틀려 구조적 문제를 일으키기도 한다^{1,2)}. 폴리머는 각 소재마다 특성이 다양하고 변형 예측이 난해하기 때문에, 시행착오를 통한 설계는 시간과 노력이 많

* Corresponding author. Tel.: +82-31-200-2531
Fax: +82-31-200-2467

E-mail address: jso.hwang@samsung.com (Jihoon Hwang).

이 소요된다. 따라서 CAE를 활용한 열 변형 구조해석을 수행하여, 불량을 예측하고 이를 최소화하는 설계기법을 정립할 필요가 있다.

CAE해석을 활용하여 열전달 및 변형을 분석한 선행연구는 많이 수행되어왔다. Jung 등^[3]은 그린카 에어컨에 사용되는 전동 압축기 모터 시스템의 열 유동해석을 수행하여, 모터 및 인버터부의 열전달 특성을 파악하고 방열설계를 위한 인자를 선정하고 성능개선 방안을 제시했다. An 등^[4]은 에어컨 실외기의 열교환기를 다공성 매질로 모델링하고 핀 주위의 유동에 대한 전산모사(CFD)를 통해 실외기의 성능해석에 필요한 모델 상수를 결정하는 방법을 제시했으며, 도출한 모델을 활용하여 열교환기의 열 전달량을 예측했다. 이와 같은 연구는 열 유동해석을 통한 열전달 현상을 모사한 것이다. 열에 의한 변형을 파악하기 위해서는 열 유동해석과 열전달 및 구조해석이 연계(Thermal FSI: thermal-fluidstructure interaction)되어야 한다. Paeng 등^[5]은 고온의 가스와 저온의 공기가 직교 유동형태인 일체형 세라믹 열교환기에 대해 CFD 상용 프로그램으로 수치 계산하여 온도 및 압력분포를 구하고, 이를 입력 하중조건으로 열응력 해석을 수행했다. 이러한 연성해석(Thermal FSI)을 통해 유동의 온도분포에 따른 열응력 및 열 변형이 세라믹 열교환기의 안전성에 미치는 영향을 파악했다. Choi 등^[6]은 자동차용 디스크 브레이크의 로터 냉각 성능을 향상시킨 통풍성 디스크 브레이크(ventilated disc brake) 주위의 유동해석을 기반으로 로터의 열전달해석을 수행한 후, 산출된 온도장 및 격자를 이용하여 열 변형 해석을 수행했다. 연성해석의 효율성을 위해 해석 도메인을 주기성을 갖는 최소단위로 구성해 해석시간을 단축했는데, 실제 상황과 차이는 있지만 로터 형상에 따른 통풍 및 냉각 성능을 상대적으로 비교하는데 적합하다는 것을 입증했다. 이와 같이 유체-구조 연계 해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만^[7,8], 구조가 복잡할수록 해석시간이 오래 걸리게 되며 수렴성에도 문제가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 열화상 카메라를 통해 에어컨 실내기 난방 작동 중 발생하는 온도분포를 확보하여, 열 변형 해석의 입력데이터로 활용하는 방법을 고안했다. 또한 동적 3차원 변형측정 장비를 사용하여 작동 중 열 변형으로 인해 발생하는 변위를 측정하고, 이를 유한요소해석 결과와 비교하여 타당성을 검증했다. 검증된 해석기법을 활용해 에어컨 실내기의 열 변형을 최소화할 수 있는 개선 방안을 제시했다.

2. 3차원 변형 및 열화상 측정

2.1 3차원 변형 측정

에어컨 실내기 난방 가동 중 열전달에 의한 실내기의 변형을 3차원 측정하기 위해 PONTOS(GOM mbH, Germany) 장비를 활용하였다^[9]. PONTOS 장비는 측정 포인트(node)에 마커(marker)를

부착하고 CCD 카메라 2대를 연결해 스테레오 방식으로 측정하며, 가동과 동시에 측정을 시작해 일정시간 간격으로 3차원 변형이력을 관찰 할 수 있다. 본 연구의 3차원 측정은 부품 단위가 아닌, 실제 조립품의 가동 상태에서 실측하기 때문에 매우 유용한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 실내기를 정면에서 봤을 때, 왼쪽 끝단 부^[2,3]와 아래쪽 조립부^[4,5]에서 주로 변위가 크게 발생하며, 전체적으로 왼쪽 아래 방향으로 쏠리는 양상이 관찰되었다. 3차원 측정 결과로 판단할 때, 전체 조립품 중 특히 변형이 심한 부품은 drain이며 열팽창 시 holder를 밀어내는 현상이 발생한다. 또한 holder부품은 고온의 증발기(evaporator)와 직접적인 면 접촉으로 인해 열 변형 및 뒤틀림 변형이 관측되었다. 각 부분의 변위 발생량은 가동 후 7분까지 점차 증가하다가, 이후 정상상태를 유지하게 된다.

2.2 열화상 측정

에어컨 가동 시 실내기의 온도분포 확인을 위해 열화상 카메라로 외부온도를 측정했다. 측정 전 emissivity 값을 보정하기 위해 열전대(thermo-couple)를 사용했고, 튜닝작업을 통해 0.95로 결정되었다. 3차원 측정 시 가장 심한 변형을 보인 holder를 집중적

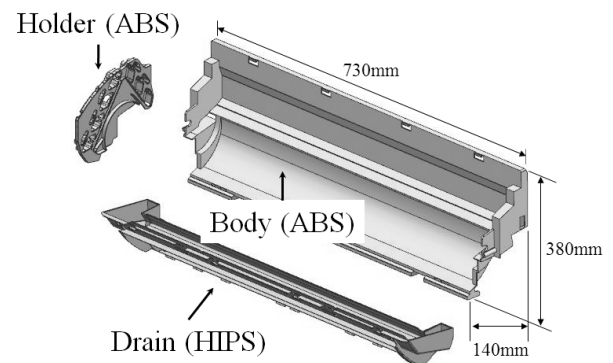


Fig. 1 Expanded view of the assembly of Air-conditioner indoor unit

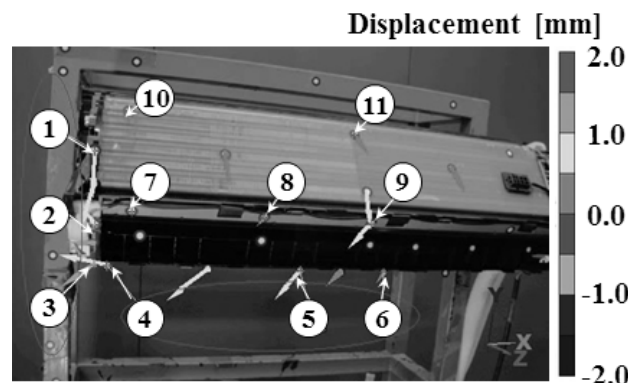


Fig. 2 Measurement result of the 3-dimensional thermal deformation during the system operating

으로 관찰했다. Fig. 3은 제품의 단면도인데, 이해를 돕기 위해 열화상 카메라 측정결과를 왼쪽 측면도와 겹쳐서 표기한 후 붉은 점선으로 표현했다. 가동 전에는 모든 부품의 온도가 25°C로 측정되었으나, 가동 후 7분 경과시점에서 부위별 약 10°C 정도의 온도 차를 보이는 것을 확인했다. 특히 증발기의 동 파이프(Cu)와 접촉되는 부분은 28°C, 알루미늄 핀(fin)과 접촉하는 면은 38°C로 측정되었다.

3. 유한요소해석

실내기의 열 변형 해석을 정확하게 수행하기 위해서는, 먼저 내부 열원으로부터 발생하는 열의 유동과 열전달 현상을 파악해야 한다. 즉, 유체-열전달-구조 연계해석 기법(thermal FSI)이 필요하다. 하지만 본 연구에서는 복잡한 프로세스를 단순화하여 해석의 효율성을 향상시키고 동시에, 의미 있는 결과를 빠르게 도출하기 위해 열화상 측정으로 얻은 온도 분포를 표현할 수 있도록 경계조건을 설정하여 해석했다. 일반적으로 대류열전달 계수가 2~20 W/m²·°C 정도의 값이 사용되는 것을 감안하여 10 W/m²·°C로 설정하고^[10] 증발기의 동 파이프와 접촉하는 면의 대기온도는 40°C, 알루미늄 핀과 접촉하는 면의 대기온도는 60°C로 세팅했다. 또한 발생 온풍은 40°C로 온도를 알고 있기 때문에, drain의 온풍 접촉

면 대기온도를 40°C로 설정했다. 이외 나머지 외관 면은 상온의 대기와 접촉하므로 25°C로 입력했다. 이러한 온도 경계조건으로 열전달 해석을 수행하면, 7분 후 Fig. 4와 같이 실험과 매우 유사한 온도분포 결과를 얻을 수 있다.

3차원 측정으로 주요 변형 부위를 확인했기 때문에 변형이 큰 영역을 집중적으로 살펴보기 위해 holder, body, drain을 1/2모델링하여 조립했다. 조립 시 리브 및 보스를 사용한 볼트 체결부는 body-holder간 1개소, body-drain간 2개소로 많지 않고 영역도 매우 작기 때문에, 해석 편의상 접촉(tie) 조건으로 설정했다. 전체 크기에 비해 두께가 매우 얇고, 리브나 보스 등 구조물의 세장비가 매우 크기 때문에 해석 모델링 및 요소 생성의 편의성을 위해 1/2 모델로 단순화하여 사용했다. 상용 소프트웨어인 ABAQUS 6.10을 사용했고, coupled temperature-displacement 기법을 활용했다^[11]. 사용된 요소(mesh)는 약 30만개이며 해석시간은 대략 40분 정도 소요된다.

소재는 ABS, HIPS(high impact polystyrene)로, 기계적 물성은 Table 1에 정리되어 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯, 3차원 측정과 해석결과와 경향이 매우 양호한 일치성을 보인다. Fig. 5(b)를 보면, 부위별 온도 차에 의해 왼쪽 끝 부위에서 약 0.75 mm 정도 최대변위가 발생하는 것을 예측할 수 있는데, Fig. 5(a)의 3차원 변형 측정결과와 거동이 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다. 완벽한 좌우대칭이 아님에도 해석의 편의를 위해 1/2모델을 사용한 점, 모델링을 상당부분 단순화한 점, 실제조립공차를 고려하지 않은 이상적인 모델을 사용한 점 등 실제와 다른 요인들이 존재하기 때문에 완벽하

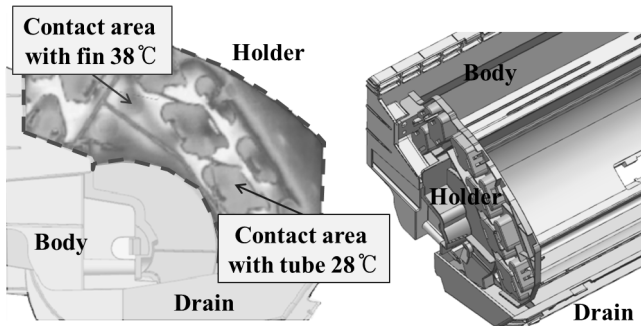


Fig. 3 Parts assembly of measuring area and the measurement result of temperature distribution using thermo-graphic camera

	ABS	HIPS
Density (g/cc)	1.18	1.05
Young's modulus (GPa)	2.28	2.09
Conductivity (W/m·°C)	0.177	0.150
Expansion (/°C)	9.4E10-5	9.0E-5
Specific heat (J/g·°C)	2.05	2.20

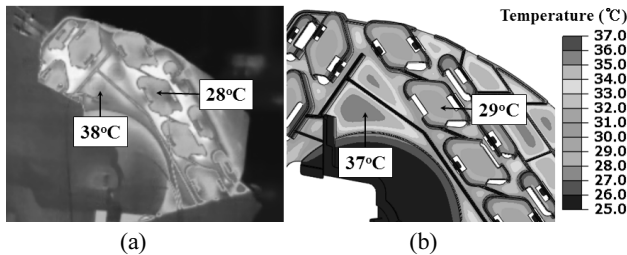


Fig. 4 Comparison the result between (a) measurement using thermo-graphic camera and (b) temperature-displacement analysis using finite element analysis (FEA)

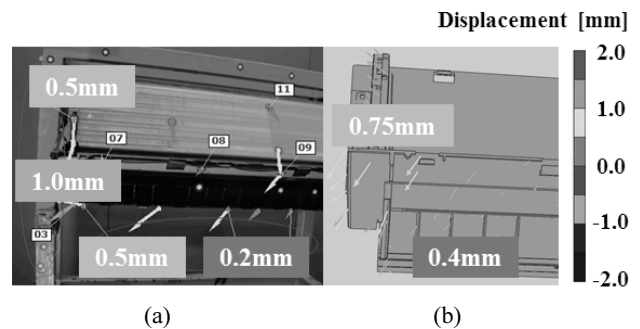


Fig. 5 Comparison of the 3D displacement distribution between (a) experimental and (b) FEA result

계 일치하는 결과를 얻을 수 없지만, 이를 고려하여 변형의 절대적 수치보다는 거동의 경향을 참고하여 설계 방향을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 개선방안 및 CAE 검증

조립상태의 제품에서 열 변형에 의한 휨이나 비틀림 등이 발생하는 요인은, 온도변화에 따라 소재의 물성(열적, 기계적)이 서로 다르기 때문이다. 이를 구조적으로 개선하기 위해서는 사출금형을 수정해야하는데, 폴리머 소재의 특성상 예측이 난해해 시간과 경제적 효율성이 저하된다. 따라서 본 연구의 해석기법을 활용하여 변형을 최소화하기 위한 설계 아이디어를 검증한다.

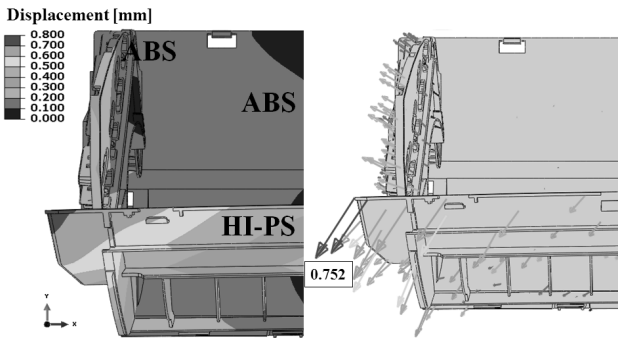
4.1 Drain 소재 변경

현재 에어컨 실내기의 부품 소재는 body와 holder가 ABS, drain은 HIPS로 구성되어 있는데, 앞서 언급한 것처럼 이종 폴리머 소재의 조립은 서로 다른 열적 물성으로 인해 온도 변화에 따른 거동이 달라 뒤틀림이나 휨과 같은 변형이 유발될 가능성이 존재할 수 있기 때문에 drain의 소재를 ABS로 변경하는 방안을 제안했고, Fig. 6과 같이 해석을 수행했다. 해석결과 열 변형으로 인한 변위량이 거의 개선되지 않은 것을 확인할 수 있는데, 이는 HIPS와 ABS

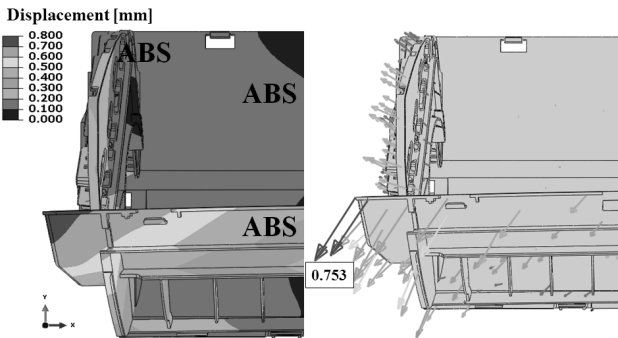
의 기계적 물성이 크게 차이가 나지 않기 때문에 판단된다. 열적 물성의 차이는 주어진 온도 변화에 대해서 크게 영향을 주지 못하는 것으로 확인되어, 실제 부품 단가가 HIPS에 비해 1.5배정도 높은 ABS로 대체하는 것은 비용 상승 대비 큰 효과가 없을 것으로 생각된다.

4.2 Drain 강성 보강

다른 방안으로 drain의 구조적 강성을 높이는 방법을 생각할 수 있다. 일반적으로 굽힘이나 비틀림에 대한 강성 보강설계는 리브(rib)나 두께를 보강하게 되는데, 강성 증가에 따른 효과를 신속하게 판단하기 위해 drain에 리브를 추가하여 정해석을 수행해 보았다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 중력방향의 변형을 감소시킬 수 있는 위치에 리브를 추가한 결과, 중력에 의한 처짐량이 0.15 mm에서 0.08 mm로 절반가량 감소하므로 강성 보강의 효과를 확인할 수 있다. 리브로 강성을 보강한 모델을 이용한 coupled temperature-displacement 해석결과는 Fig. 8과 같다. Drain의 강성이 증가했을 때 최대 변위량은 약 6.5% 감소하고 holder가 바깥쪽으로 비틀리는 현상이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)의 holder 쪽 변위 벡터를 보면 좌측 위로 휘어져 올라가면서 뒤쪽과의 구배가 존재하는 것을 확인할 수 있는데, Fig. 8에서는 위쪽으로 뒤틀리는 현상이 감소하고 변위의 편차가 줄어들었다. 에어컨 실내기의 부품은 두께가 얇고 좌우로 긴 형상을 가지는 것을 감안할 때, 굽힘 방향으로의 강성을 보강하는 설계가 필요할 것으로 생각된다.



(a)



(b)

Fig. 6 FEA results for material change of the drain from (a) HIPS to (b) ABS

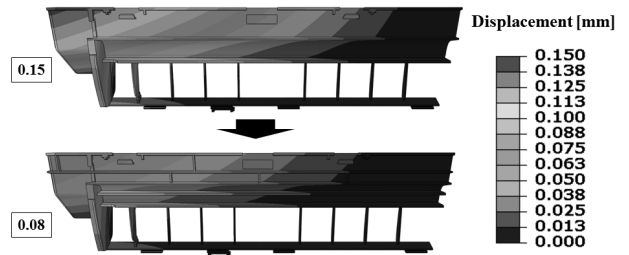


Fig. 7 Reinforcement stiffness of the drain by adding a rib

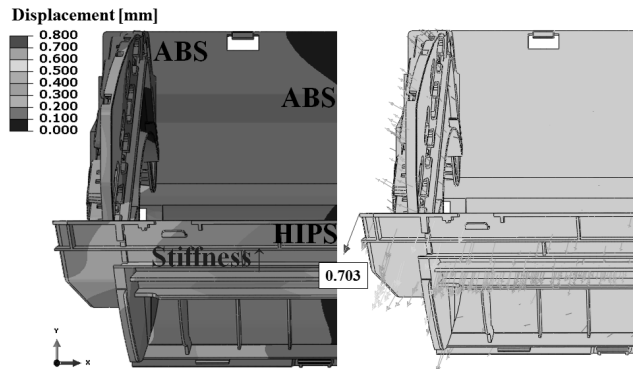


Fig. 8 FEA result after increase of the drain stiffness

5. 결 론

본 논문에서는 에어컨 실내기를 구성하는 폴리머 소재 사출물의 열 변형을 유한요소해석으로 빠르게 예측하기 위한 해석기법 연구를 수행했다. 유한요소해석에 앞서, 3차원 측정을 통해 에어컨 실내기 조립품의 가동 중 열 변형을 실시간 추적하여 온도 변화에 대한 변형이력을 확보할 수 있었다. 전체적으로 아래로 처지면서 holder가 바깥쪽 위 방향으로 휘어져나가는 경향을 보였으며, 최대 변위량은 drain이 아래 방향으로 처지는 방향으로 약 1 mm 정도 발생하는 것으로 확인되었다. 열화상 카메라로 가동 중 온도분포를 측정하여 유한요소해석의 초기 경계조건 설정에 활용했고, 해석결과 기존 thermal FSI기법보다 시간적 측면에서 효율성은 대폭 향상시키면서 3차원 측정 결과와 거의 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 에어컨 실내기의 열 변형을 감소시키기 위해 변위량이 가장 큰 drain의 강성을 리브 보강을 통해 증가시켰을 때, 최대 변위량이 약 6.5% 감소하고 holder의 비틀림 현상이 크게 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

추후 drain의 강성을 보강한 실 제품을 3차원 측정하여 해석결과와 교차검증 된다면, 산업현장에서 불량 원인을 빠르게 파악하고 설계 및 개발기간을 단축시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Lee, D. G., Park, J., Park, K. H., Ha, B., Kim, H., Park, S. H., 2013, Investigation of Mechanism of Frictional Impulse Noise in Closed Cabinet, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, 37:2 249-255.
- [2] Bouissou, S., Petit, J.-P., Barquins, M., 1999, Stress Drop and Contact Stiffness Measured from Stick-slip Experiments on PMMA-PMMA Friction, Tribology Letters, 7 61-65.
- [3] Jung, J. H., Shin, Y. H., Kim, S. C., Cho, H. S., 2011, A Study on the Thermo-flow Analysis of Air Conditioning Compressor Motor System for Green Car, Proc. of Korea Soc. Automotive Eng., 630-635.
- [4] An, C. S., Choi, D. H., 2004, Flow and Heat Transfer Analysis for the Performance Improvement of Cross-flow Fin-tube Heat Exchangers, Proc. of Korea Soc. for Computational Fluids Eng., 183-189.
- [5] Paeng, J. G., Kim, K. C., Yoon, Y. H., 2009, A Study on Numerical Analysis of Thermal Stress for an Monolith Ceramic Great Exchanger, Trans. the Soc. of Air-Conditioning and Refrigerating Eng. of Korea, 21:11 613-620.
- [6] Choi, B., Park, B., 2001, CFD and FEM Analysis of Automotive Disc Brake, Proc. of Kor. Soc. Automotive Eng., 820-825.
- [7] Lim, S., Kim, K. S., Kim, D. W., Jo, S. W., 2011, Thermal Fluid Flow Structural Coupled Analysis of Solid Motor Nozzle for Safety Estimation, Proc. of Korea Soc. for Computational Fluids Eng., 99-102.
- [8] Park, J. W., Meng, Q., Lee, S. H., Jeong, I. J., Nam, S. Y., Bae, S. H., Lee, S. S., 2008, A Study on Heat Transfer and Thermal Stress Analysis Method Utilizing FSI Technique, Proc. of Korea Soc. Precision Eng., 595-596.
- [9] GOMPONTOS 2011, PONTOS User's Manual, GOM mbH, Germany.
- [10] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavigne, A. S., 2007, Introduction to Heat Transfer, John Wiley and Sons(ASIA) Pte. Ltd., USA.
- [11] ABAQUS 6.10 2011, ABAQUS User's Manual, Dassault Systemes Simulia Corp., USA.