

다양한 조건하에서의 진공청소기 흡입구 커버의 열변형 해석

강형선^{1*}

Thermal Analysis of Vacuum Cleaner Suction Nozzle Cover under Variable Conditions

Hyung-Seon Kang^{1*}

요 약 본 논문에서 가정용 진공청소기의 여러 조건하에서의 열변형 형태를 유한요소해석을 통해서 예측하고 이를 실험을 통하여 비교하였다. 유한요소해석에 있어서 (1) 벨트장력에 의한 압축력이 작용하였을 경우 (2) 벨트와 회전축의 마찰열 (3) 벨트장력과 열하중이 각각 고려되었을 경우의 3가지 조건을 대입하여 흡입구 커버의 변형 상태를 예측하였다. 또한 해석 결과를 실(real) 제품의 성능테스트를 통하여 비교하였고 내부 온도 상승을 방지할 수 있는 근본적인 개선 대책을 제시하였다.

Abstract In this paper, we make a study of a thermal deformation by FEM and test to define the deformation mode of the Vacuum-Cleaner's Nozzle-Cover. In FEM analysis, 3 different conditions were considered separately, such as (1) Compressive force by Belt tension, (2) Friction heat between Belt and Shaft and (3) Compressive force combined with heat. Throughout FEM analysis it was found that the deformation was caused by heat and it was proved through a simulation test with a real product.

Key Words : Up-Right Vacuum Cleaner(진공청소기), Finite Element Analysis(유한요소해석), 벨트(Rubber Belt), Heat Expansion(열팽창)

1. 서론

가정용 진공청소기의 성능을 나타내는 주요 인자로서 흡입성능, 조작성능, 소음, 면압특성 등 여러 가지가 있다. 이들 기본 성능을 높이는데 중점을 둔 연구는 상당히 성숙단계에 이르러 있다¹⁾²⁾. 하지만 소비자 관점에서의 청소기 자체가 가지는 성능을 보다 향상시킬 수 있는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 조립조건 및 사용조건에 따른 이상 발열 현상의 원인을 파악하여 적절한 Cooling 구조 설계 자료로 활용하는데 연구 목적이 있다³⁾⁴⁾.

가정용 카펫 사용이 일반화 된 미주 지역에서 주로 사용하고 있는 Up-Right type 진공청소기의 경우 카펫의 먼지를 효율적으로 제거하기 위해서 흡입구 전면에 고속으로 회전하는 솔을 장착하여 카펫을 때리면서 카펫 Pile로부터 분리된 먼지를 흡입하게 된다. 여기에 사용되는 솔은 회전이 원활한 원통형상의 Drum에 고정되어 있으며 이 Drum에 Pulley를 설치하여 종동축으로 사용하게 되

며, 고속으로 회전하는 Motor의 Shaft를 구동축으로 하게 된다. 이때의 동력은 Belt에 의해 전달되는데 비유적인 측면 및 기타 제반 여건을 고려하여 고무로 만든 평 벨트를 사용하는 것이 일반적이다. 그 밖에도 흡입구를 구성하는 주요 부품으로서 Cover는 제품의 외관을 형성하면서 회전 및 고정 부품들을 고정/지지하는 부품으로서 범용 Engineering Plastic인 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 수지를 사출 성형하여 제조한다. 대량 생산을 위한 사출 성형 부품의 특성상 Cover의 경우 가공 부품에 비해 그 정밀도가 낮으며 이는 구동 부품의 부품 간 정렬 상태에 영향을 주어 벨트의 이탈 및 부분 이탈에 의한 마찰열의 발생 원인이 될 수 있다. 실제로 소비자로부터 회수된 제품의 경우 Cover의 변형 및 Belt의 비정상 마모나 파손 등의 현상을 볼 수 있으며, 그 원인으로 앞서서 언급한 사출 부품간의 치수 및 조립 산포에 따른 비정상 정렬 및 벨트 성능 미달에 의한 과도한 발열, 적절하지 못한 Cooling 구조 등을 생각할 수 있다⁵⁾⁶⁾.

본 연구에서는 소비자로부터 회수된 제품의 불량원인을 알아보기 위해 FEM을 이용한 강성해석을 상온 상태

¹조선이공대 하이테크 CAD CAM과

*교신저자: 강형선(mjsj5181@hanmail.net)

와 고온 상태에서 수행하였다⁷⁾. 상온 상태에서의 해석은 Belt의 장력만 작용했을 때의 변형을, 고온상태에서는 ABS 수지가 소성변형이 발생하기 시작하는 80℃ 온도에서의 열변형을, 그리고 Belt 장력과 열 하중이 동시에 가해졌을 때의 변형을 각각 살펴보고, 실험을 통해 유한요소 해석 결과와 비교함으로써 그 신뢰성을 검증하여 향후 제품 설계 기준으로 삼는데 그 목적을 두었다.

2. 유한요소 해석

2.1 형상 및 재질 특성

ABS 수지는 가공성, 내충격성, 강성 등의 뛰어난 실용 특성을 갖고 있으며, 특히 착색성과 광택이 우수하여 수려한 외관이 요구되는 각종 전기, 전자 및 잡화부품에 널리 사용되고 있으며, 본 연구에 사용된 ABS 수지의 물리적 성질은 [표 1]과 같다⁸⁾.

[표 1] ABS 재질 특성 (STAREX:HG-0760)

항목(단위)	물성치	항목(단위)	물성치
인장강도 (Kg/cm ²)	440	경도 (R-Scale)	106
굴곡강도 (Kg/cm ²)	630	비중	1.04
굴곡탄성율(Kg/cm ²)	22,000	열변형온도 (°C)	85
IZOD충격강도 (Kg/cm/cm)	32		

실제 제품의 경우 각 부품의 구동뿐만 아니라 편의성 및 디자인 사양 등을 만족시키기 위해 다수의 부품으로 구성되어 있으나 본 연구에서는 연구 목적상 구동부품 및 구동부품을 지지하고 있는 주요 부품들만을 해석 대상으로 삼을 것이며 주요 부위의 형상 및 명칭은 [그림 1]에 보인 바와 같다.

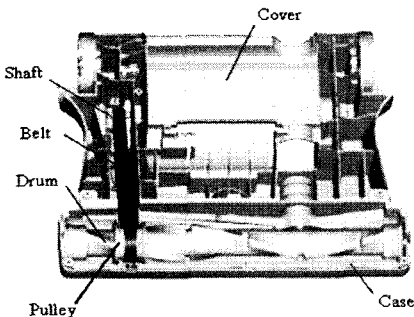


그림 1. 부품 명칭

회전축의 재질은 SM45C로서 플라스틱에 비해 매우 강하기 때문에 강체로 가정하였으며 제품 장착상태에서 최대 회전속도는 약 27,000 rpm이다. Belt는 NR(Natural Rubber) 계통으로 총길이 376mm, 두께 3mm, 폭 13.7mm이며 제품장착 후 길이는 30% 정도 신장되며 이때의 장력은 6.8Kg_r이다. Drum 및 Pulley는 일체화 되어 있으며 재질은 각각 PP+GF 30%(Polypropylene + Glass Fiber 30%), PPS(Poly Phenylene Sulfide)이며 ABS 부품 대비 기계적 강도가 뛰어나므로 그 변형에 대해서는 고려하지 않았다. Drum의 양단을 지지하면서 전면부 외관을 형성하고 있는 Case의 경우 PC (Poly Carbonate)를 원료로 사용한 사출성형 부품으로 PC의 경우 상온 상태에서의 인장강도는 670Kg/cm² 정도로 ABS의 1.4배 수준이다.

2.2 3D 모델링

본 연구의 주요 관심 대상인 Cover 및 Drum의 양단을 지지하는 Case는 Belt장력의 영향을 적게 받는 형상 및 모서리 Rounding등을 일부 생략하였으며 이렇게 해서 만들어진 FEM 모델의 전체 Node 및 Element 수는 각각 20130개와 20433 개이다.

2.3 물성 부여

ABS 수지는 열가소성 수지로서 강하고 단단하며, 자연색은 옅은 상아색을 띠지만, 어떤 색으로도 착색할 수 있고, 광택이 있는 성형품을 만드는 것이 가능하다. ABS 수지는 우수한 기계적 성질, 전기적 성질, 내약품성을 갖고 있고 압출성형, 사출성형, 진공성형 등 모든 가공기술에 응용할 수 있다. ABS는 인장강도, 굴곡강도, 충격강도, 크리프 강도 등의 기계적 특성이 우수하다. 또한 성형성도 우수하지만 열적 성질(내열온도, 열변형온도)에서 사용조건이 100~110℃ 이상인 경우에는 엔지니어링에 문제가 있다³⁾.

유한요소해석의 대상이 되는 Cover(ABS)와 Case(PC)는 Elastic / Isotropic 조건을 사용하였으며 Mechanical-Thermal coupling 상태의 해석의 경우 탄성계수, Poisson 비, 항복점 등은 모두 [그림 2]와 같이 온도의존적인 1차원 함수로 가정하였으나, 실제 제품의 온도 변화에 따른 물성 변화는 역S자 곡선 형태를 갖는 것으로 알려져 있다.

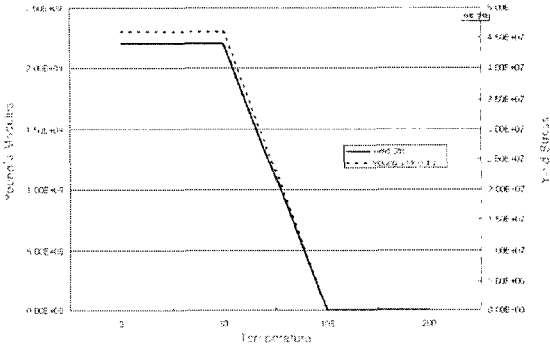


그림 2. 탄성계수 및 온도영역별 항복응력

2.4 경계조건 및 하중조건

하중은 Belt의 장력을 Motor 회전축과 Brush 회전축의 중심에서 서로 마주보게 하여 17lb(6.8Kg)의 힘이 가해지도록 하였다. Motor 축(shaft)과 Brush가 상대적으로 운동하기 때문에 Motor 축을 Rigid bar로 모델링하고 Belt가 접촉하는 반대편 Bar 끝단을 고정하고, Motor 축 베어링을 지지하는 블록은 강체축을 다점 지지하는 방식(Multi Point Constraint)을 채택하여 베어링 블록의 지지 형태로 묘사하였다(그림 3의 점 "A"). Belt room 내부의 온도는 80°C로 설정하고, 나머지 부분의 온도는 모두 25°C로 정하였다. 즉, Belt room 내부 온도를 항온으로 간주하고 나머지 구조물 및 대기를 상온 조건으로 설정하여, Belt로부터 Cover 내벽으로는 대류 열전달로, Cover 내 매질의 열전달 현상은 전도 열전달로 해석하였다.

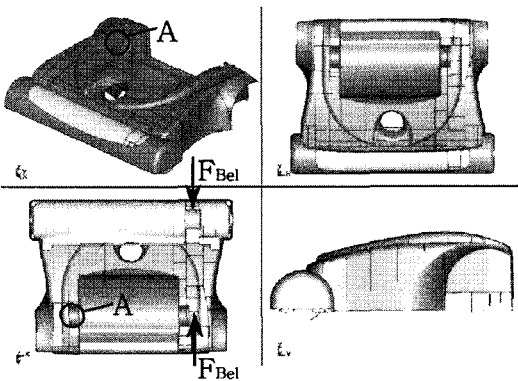


그림 3. 구속조건과 하중조건

모델의 구속은 전체적인 변형거동에 영향을 미치지 않도록 모터의 벨트로부터 멀리 떨어진 곳을 완전히 구속시켰으며 부품간의 접촉은 Surface to Surface Contact를

적용하여 최대한 실제에 가깝도록 하였고, 마찰계수는 0.5를 적용하였다. 또, 열 해석을 위한 경계조건으로 Brush Cover와 공기와의 접촉면에는 대류 열전달 조건을 적용하였다. Belt의 장력을 해석 모델에 적용하기 위하여 하중조건은 Shaft와 Pulley의 중심축에 서로 마주보는 방향으로 벨트의 장력만큼의 하중을 가했으며 열 하중 조건은 벨트를 둘러싸고 있는 방의 내부 온도를 균일한 것으로 가정하였다.

2.5 해석 결과와 고찰

2.5.1 Belt 장력에 의한 구조해석 결과

Belt 장력(0~75lb)만을 고려한 구조해석 결과를 [그림 4]에 나타내었다. Belt의 장력을 축 양단에 가하였을 때 장력의 증가에 따라 축간 거리의 변화는 선형적으로 줄어드는 탄성 변형을 하는 것을 알 수 있었으며 제품과 동일 조건인 6.8Kg의 하중에 도달했을 때 그 변화량이 0.77mm에 달했다. [그림 5]는 변형 전/후의 변형량을 보인 것으로 장력에 의한 Cover 및 Case의 변형은 Drum 양단 지지부에 집중되는 것을 알 수 있었다(원 표시부). 이런 양상은 벨트 주변 내벽에 변형이 집중되어 있는 소비자로부터 회수된 제품의 불량부위와는 확연히 다른 것을 알 수 있었다.

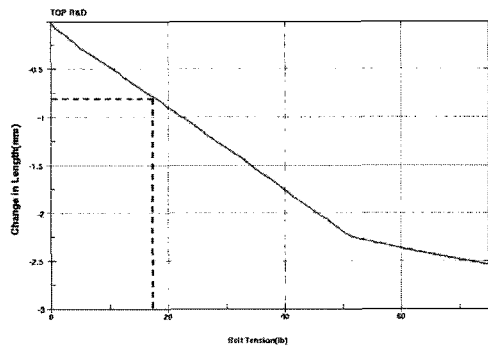


그림 4. 벨트장력조건에서의 축간거리 변화

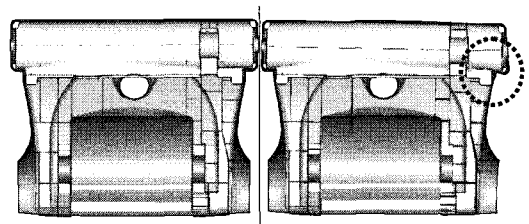


그림 5. 벨트장력조건에서의 변형형상

2.5.2 열 하중에 의한 구조 해석 결과

마찰열의 영향을 파악하기 위하여 벨트장력을 무시하고 마찰열만을 고려한 해석을 수행하였다. [그림 6]은 최대온도가 발생한 위치([그림 3]의 “A”)에서의 시간에 따른 온도 이력곡선인데 1500초 정도에서 열 평형상태에 도달하였다. [그림 7]은 마찰열에 의한 열변형 해석 결과를 보인 그림으로 Belt room의 내부 온도를 ABS의 열변형이 시작되는 온도인 80℃까지 가하여 2000초 정도가 경과한 후 열 평형 상태에서 제품의 변형된 모습을 보인 것이다. 해석 결과 축간 거리는 Belt 장력만을 하중으로 가했을 때와는 반대로 최대 0.09mm 증가하였는데 이는 열팽창에 의한 것으로 사료된다. [그림 7]의 원 안의 형상과 같이 Belt 주변 Rib의 변형이 심하며 이는 실제로 시장으로부터 입수된 시료의 모습과 매우 흡사하다. 따라서 시장불량의 주요 원인은 Belt의 Slip에 의한 마찰열임을 쉽게 추정할 수 있었다.

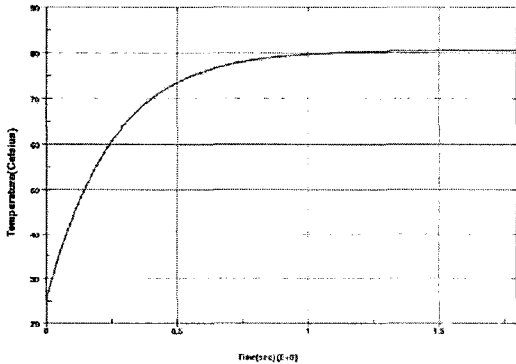


그림 6. [그림 3] “A” 위치에서의 온도이력곡선

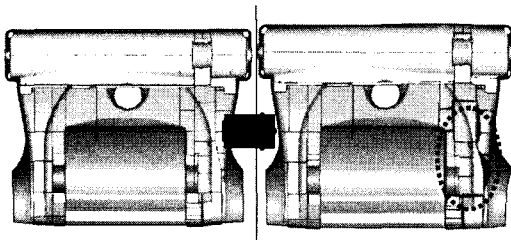


그림 7. 온도평형상태후의 변형형상

2.5.3 장력과 열 하중에 의한 구조해석 결과

[그림 8]은 Belt의 장력과 마찰열을 모두 고려한 경우의 결과로서 벨트장력과 함께 벨트와 회전축과의 Slip으로 인해 발생하는 마찰열에 의해 Belt room 온도가 80℃까지 상승한다고 가정하여 해석을 실시한 결과이다. 열평형 상태

에 도달하는데 걸린 시간은 약 1000초였다. 열 하중만을 고려한 경우와 비슷한 변형 모드를 보이고 있으며, 축간 거리는 장력에 의한 변위보다 조금 작은 최대 0.6mm 정도의 변형을 보였으며, 이는 열팽창에 의한 거리 증가요인이 복합되어진 결과로 생각할 수 있다.

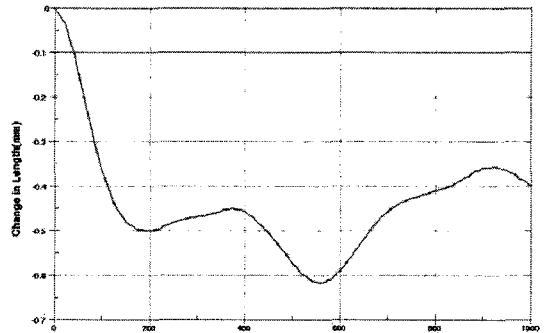


그림 8. 벨트장력과 마찰열(80℃)을 고려한 축간거리 변화

3. 재현실험

3.1 재현실험

실험은 해석결과의 검증을 위해 실제 제품에 Belt 를 장착하여 축간 변화를 측정하였으며 마찰열에 의한 Cover의 열변형을 검증하기 위해 과도한 부하 조건에서 실제 제품을 작동시켜 Belt 온도 및 Belt room 내부 온도를 측정하였다. 실험결과 Belt 장력에 의한 축간 거리의 변화량은 요소해석 결과보다 0.27mm 작았다. 이는 각 부품간의 조립 공차 및 모델링 과정에서 단순화된 형상 때문인 것으로 판단된다. 또, 실제 제품을 이용한 온도 상승 실험 결과, 마찰열을 고려한 해석에서 선정된 내부 온도 조건처럼 Belt room 내부 온도가 80℃ 이상 상승하였으며 그로인한 변형 모드 역시 해석 결과와 유사하게 재현되었다.

[그림 9]는 Belt room 내부에 Thermo-couple을 7point 부착하여 실사용 조건보다 가혹한 부하를 Drum에 부여한 후 내부 온도 변화를 읽은 것으로서, Belt 온도는 초기 기동 후 급상승하여 82℃ 정도까지 매우 짧은 시간동안 도달하는데, 이는 초기 기동하는 순간부터 회전축과 Belt 사이에 Slip이 발생하기 시작했기 때문인 것으로 보인다. 또한 Belt 표면 온도가 Belt room 내부 온도보다 훨씬 높게 형성되는 것을 알 수 있는데, 이는 Belt 에서 발생된 열이 Belt room 내벽으로 대류에 의해 지속적으로 전달되나 Belt 온도가 고정되어 있지 않고 계속해서 상승하기 때문이며, 따라서 과도한 부하조건 하에서는 Belt room 내부 온도가 포화 될 수

없을 것으로 판단된다. Belt room 내부 온도 분포도 최소 96℃에서 최대 124℃까지 상당한 차이를 보이고 있으며 Shaft 쪽에 근접한 ④, ⑥번의 온도가 높게 형성된 것으로 보아 Slip이 Shaft 쪽에서 더 심하다는 사실을 알 수 있다. [그림 6]에서 보여 지는 것처럼 Belt room 내부는 일정 온도로 포화 되지는 않았다. 상기 조건으로 실험을 중단하지 않고 계속 진행한 경우 과도한 부하 조건 때문에 Belt 성능이 계속 저하되어 Slip양은 더 많아지므로 결국은 Belt가 더 이상 동력을 전달하지 못하고 Shaft 에서 국부적인 Slip의 집중으로 인해 파단 되었다. 약 20% 정도의 Slip이 발생하는 시점에 Belt의 온도는 120~140℃ 사이이며 이때 Belt room 내부 온도는 ABS 열 변형 온도 이상인 80~100℃ 사이에 분포함을 확인 할 수 있었다. [그림 10]은 온도 상승 시험을 마친 후 실(real) 제품의 변형된 형상을 보인 것으로 열 하중 하에서의 해석 결과와 유사한 변형 모드를 보이고 있다.

[그림 11]은 Belt room 내부 마찰열만을 고려한 유한요소 해석 결과의 변형 모드와 온도 상승 실험 후 Belt가 끊어진 제품의 변형 모드를 비교해 놓은 것으로서 변형 형태가 매우 유사함을 알 수 있다. [그림 11(b)]는 제품의 내벽이 바깥쪽으로 변형 되어 있는데 과도한 사용 조건에서 생길 수 있는 Belt의 비정상적인 마찰열로 인한 변형으로 생각할 수 있다.

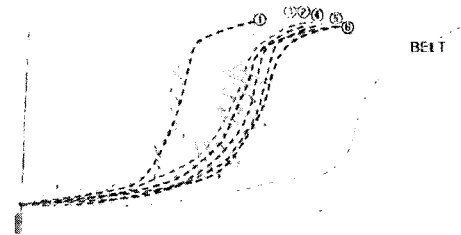


그림 9. 벨트 룸(Belt room)에서의 온도변화

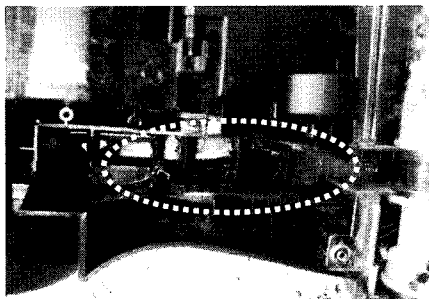
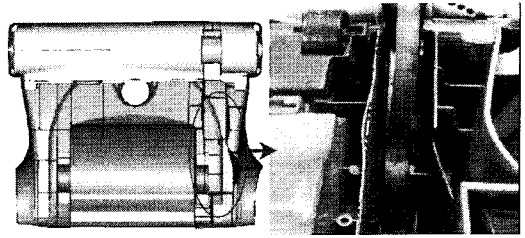


그림 10. 온도상승시험후의 변형형상



(a) 유한요소해석 결과 (b) 실험결과

그림 11. 유한요소해석 결과와 실험결과와의 비교

4. 결론

본 연구에서는 Up-Right형 진공청소기의 결함 원인을 알아보고 그 대책을 강구하기 위해 유한요소 해석 및 실험을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구 대상 청소기의 경우 벨트 장력이 가해졌을 때 베어링 지지부아래 굴곡부가 구조적으로 가장 취약함을 알 수 있다.
2. Belt room 내부 마찰열을 고려한 해석 결과와 온도 상승 실험을 통해 소비자로부터 회수된 결함의 원인은 Cover의 강성 부족에 의한 것이 아니라, 과도한 사용 조건에서 Belt와 회전 부품과의 Slip에 의한 마찰열에 기인한 것임을 알 수 있었다.
3. 장력과 열을 동시에 부여한 결과는 열만을 가했을 때의 변형 모드와 거의 유사하여 벨트 장력이 내부 변형에 미치는 효과는 미미한 것으로 추정 된다.

본 연구의 결과는 강도의 보완 보다는 Slip 메커니즘 및 Belt의 특성, 실사용 중에 나타날 수 있는 변수가 Belt에 미치는 영향 등에 대한 고찰 및 연구를 통해 내부 온도 상승을 방지할 수 있는 근본적인 개선 대책을 찾고, Cooling 구조의 추가 검토로 개선 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Kim, J. Y. , Kwac, L. K. , An, J. S., Yang, D. J., Song, K. S., and Park, K. H., 2004, "The Flow Analysis for Vibration and Noise Diagnostic of Vacuum Cleaner Fan Motor", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 13,

No. 4, pp. 56-63

- [2] Velarde-Suarez, S., Ballesteros-Tajaluara, R., and Nurtado-Cruz, J. P., 2006, "Experimental Determination of the Tonal Noise Sources in a Centrifugal Fan," Journal of Sound and Vibration, Vol. 295, Issues 3-5, pp. 781-796
- [3] K. H., 1998, "Incompressible Flow Simulation of Impeller for Vacuum Cleaner Motor", Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, pp. 17-35
- [4] Jan Rune Nilssen, Thermal analysis of a cooling system using forced convection, NDRE P.O.Box 25, No-2027 Kjeller, Norway
- [5] Park, C. W. and Lee, S. J., 2002, "Fluid Dynamic Study on the Improvement of Vacuum Cleaner Suction Nozzle Performance", KSME Spring Conference, pp. 1826-1830
- [6] LS-DYNA Thermal Analysis User Guide, LSTC
- [7] Paul A. Du Bois, A simplified approach to the simulation of rubber-like materials under dynamic loading, consulting engineer Freiligrathstrabe 663071 offenbach , 4thEuropean LS-DYNA User Conference, D-131-46
- [8] 한국 플라스틱 정보 센터, "플라스틱 해설과 물성집"
- [9] Yoon, S., Lee, K. O., Lee, S. B. and Park, K. R., 2004, "Thermal Stress and Fatigue Analysis of Exhaust Manifold," Key engineering materials, Vol. 261/263, No.2, pp. 1203-1208.

- [10] C. W. and Lee, S. J., 2002, "Fluid Dynamic Study on the Improvement of Vacuum Cleaner Suction Nozzle Performance", KSME Spring Conference, pp. 1826-1830
- [11] Hilewaert, K, Van den Braembussche, R.A., 1999, "Numerical Simulation of Impeller-Volute Interaction in Centrifugal Compressor." Journal of Turbomachinery, Vol. 121, pp. 603-608

강 형 선(Hyung-Seon Kang)

[정회원]



- 1991년 2월 : 조선대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 조선대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 전남대학교 기계공학과(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 조선이공대학 하이테크CAD/CAM과 겸임교수

<관심분야>

CAD/CAM, 공작기계 주축설계, 자동차사고분석 ...