

◆특집◆ 전자부품 패키징 기술

Compact Camera Module 생산 공정 자동화를 위한 Stage 내의 유동 및 열 해석

김태영*, 김성진**

Fluid Flow and Heat Transfer Analysis in the Motorized Stages for Manufacturing Automation of the Compact Camera Module

Tae Young Kim* and Sung Jin Kim**

Key Words : Compact camera module (컴팩트 카메라 모듈), Stage cooling (스테이지 냉각), Heat transfer analysis (열전달 해석), Fluid flow analysis (유동해석)

1. 서론

CCM (Compact Camera Module)은 전세계적으로 확대되고 있는 모바일 기기 산업 분야 중 하나인 카메라 폰의 핵심 부품이다. CCM 이 장착된 카메라 폰의 세계 시장 생산 규모는 2004 년 약 135 백만대를 시작으로 2007 년 약 464 백만대로 성장해왔다.¹ 이처럼 높은 성장률을 보이고 있는 카메라 폰 시장은 높은 정밀도를 갖는 CCM 의 대량 생산을 요구하고 있다.

우리나라의 모바일 기기 산업체들은 전 세계 카메라 폰 생산량의 절반 이상을 차지하며 세계 카메라 폰 시장을 선도하고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 CCM 생산 공정의 장비들은 수동 혹은 반수동 형태로 사용되어 효율성이 매우 떨어진다. 또한 장비를 다루는 작업자의 참여도가 증가함에 따라 공정 환경의 청정도가 감소하여 CCM

의 생산 수율이 많이 떨어진다. 따라서 생산의 효율성과 생산 수율을 향상시키기 위하여 CCM 생산의 인라인화를 통한 작업 공정의 자동화가 요구된다.² CCM 생산의 인라인화는 전 세계적으로 표준화가 이루어지지 않은 카메라 폰 생산 방식의 기준을 제시하는 한편, 인라인화와 관련된 기술을 선점함으로써 카메라 폰 생산 시장을 주도할 수 있는 효과를 갖는다.

CCM 은 수 μm 이하의 크기를 갖는 여러 부품들의 결합 및 접합으로 제작되기 때문에 CCM 을 공정에 따라 이송시킬 수 있는 고정밀의 Stage 가 필요하다.³ CCM 은 Stage 에 의하여 정밀하고 신속하게 다양한 공정을 거치게 되어 기존의 수동 혹은 반수동 공정에 비하여 효율적인 생산이 가능하게 된다. 이렇듯 Stage 의 성능은 CCM 의 정밀도 및 각 공정의 효율을 결정하는 핵심 요소이며 Toray, Shibaura 등은 각각 업체에 전용화된 Stage 를 개발하여 사용하고 있다. 높은 신뢰성을 갖는 우수한 Stage 의 개발은 체계화된 일련의 공정을 통하여 CCM 의 대량 생산을 가능케 하고 제작 단가를 낮추어 카메라 폰 시장을 확장시킬 수 있는 열쇠인 셈이다.

위에서 언급하였듯 CCM 은 다양한 접합 공정에 의하여 만들어지므로 주변 환경의 온도가 상온

* 한국과학기술원 기계항공시스템학부 대학원

** 한국과학기술원 기계항공시스템학부

Tel. 042-869-3083, Fax. 042-869-8207

Email : sungjinkim@kaist.ac.kr

전자장비 냉각 특히, 히트싱크 및 히트파이프의 성능 최적화, 미소 영역의 온도 측정 센서 개발, 유량 센서, 압력 센서 및 동전기적 현상을 이용한 펄프 개발에 관심을 가지고 있다.

에 비하여 높다. Stage 가 작동하는 환경의 온도가 높아지면 Stage 의 Motor 에서 발생하는 열을 효율적으로 제거하는 데에 어려움이 있으며, Motor 등의 발열부가 과열될 경우 Stage 가 오작동 할 수 있다. 여러 공정을 거쳐 생산되는 CCM 의 생산 방식 때문에 단위 공정을 담당하는 Stage 하나의 오작동은 라인 내에서 생산되는 모든 CCM 의 불량률을 유발시킬 수 있다. 따라서 Stage 의 열적 신뢰성 확보가 매우 중요하다.

Stage 를 이용한 CCM 제작 방식이 보편적이지 않고, 사용되는 목적에 따라 Stage 의 형상과 작동 환경이 바뀌기 때문에 Stage 의 열적 신뢰성에 대한 연구는 체계화 되어 있지 않다. Stage 내부의 형상이 복잡하고 Stage 의 이송 속도, Loading 된 물체의 무게 등에 의한 발열량 변화 등이 불명확하므로 이론적인 접근 방식을 통한 Stage 의 열 및 유동 해석은 어려운 점이 많다. 또한 실제 Stage 를 제작하여 Stage 내부 각 부분의 온도 및 속도 분포를 측정하는 방식은 측정에 사용되는 장비의 설치가 용이하지 않고 비용 부담이 크며 다양한 형상의 Stage 에 대한 분석이 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 이론적, 실험적 방식의 어려움을 극복하기 위하여 수치해석에 의한 방식으로 Stage 내부의 열 및 유동 해석을 수행하였다. Stage 도면을 바탕으로 실제 Stage 의 형상 특성을 반영한 수치해석 모델을 만들고 다양한 유량, 발열량 등의 작동 조건에 대한 해석을 수행하여 Stage 각 부분의 온도 및 내부의 유동을 파악하였다. 수치해석은 전자장치 열해석 전용 프로그램인 ICEPAK 4.1 을 사용하였다. 해석을 수행한 모델은 Z θ stage 와 XY θ stage 이며, 해석 결과를 바탕으로 각 Stage 의 내부 최대 온도를 감소시킬 수 있는 열설계 방안을 제시하였다. 또한 Stage 청정 문제와 관련하여 Z θ stage 에 먼지제거판을 설치한 형상을 해석하여 먼지제거판 근처에서의 유동 현상을 파악했으며 최적의 먼지제거판 형상을 제시하였다.

2. 모델링

2.1 수치해석을 위한 Stage 형상 모델링

모델링은 실제 Stage 형상을 바탕으로 수치해석을 수행할 수 있는 프로그램 상의 모델을 만드는 과정으로 해석 결과의 정확성에 큰 영향을 미치는 중요한 과정이다. Z θ , XY θ Stage 의 실제 형상과 모

델의 형상은 각각 Fig. 1, 2 와 같다. Figure 1 과 2 에서 볼 수 있듯이 각 Stage 에 대한 수치해석 모델은 Stage 내부에서 발생하는 열전달 및 유동 현상을 정확히 분석하기 위하여 실제 Stage 의 형상을 잘 반영하고 있다. 수치해석의 수렴성 및 정확성을 높이기 위해서 일부 복잡하거나 열전달에 영향을 거의 미치지 않는 작은 요소 부품들은 특정만을 가지는 간단한 형상으로 모델링 하였다.

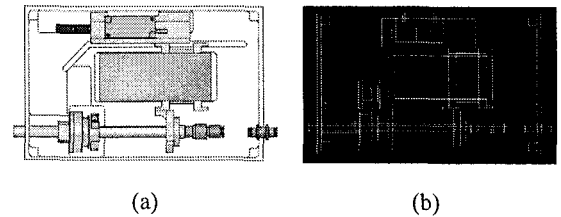


Fig. 1 Actual figure (a) and a numerical model (b) for the Z θ stage

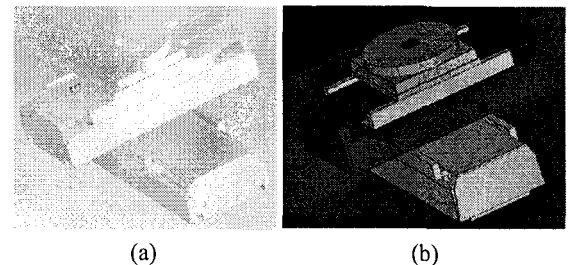


Fig. 2 Actual figure (a) and a numerical model (b) for the XY θ stage

3. 수치해석

3.1 수치해석 조건 및 가정

Stage 내부 및 Stage 와 주변 작동 유체간의 열전달은 자연대류로 이루어짐을 가정하였다. Stage 가 움직일 경우에는 Stage 와 주변 유체간의 상대 운동으로 인하여 강제 대류가 발생할 수 있으나, Stage 의 이동 속도가 공정에 따라 다양하게 변화하므로 Stage 외부 유체의 상대 속도를 가정할 수 없다. 자연 대류 조건은 Stage 가 정지한 상태에서 발열을 하는 최악의 조건을 가정함으로써 신뢰성 높은 열설계 방안을 제시할 수 있다. 발열부의 최대 온도는 150 $^{\circ}$ C 이하로 예측되므로 복사에 의한 열전달은 무시하고, 주변 유체의 온도는 고온의 집합 공정을 고려하여 상온보다 높은 35 $^{\circ}$ C 로 가정한다.

3.2 Stage 내부의 열전달 특성

위에서 언급한 조건 및 가정을 사용하여 각 Stage 에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과는 Fig 3, 4 와 같으며 낮은 온도는 푸른색 계열로 높은 온도는 빨간색 계열로 표현된다.

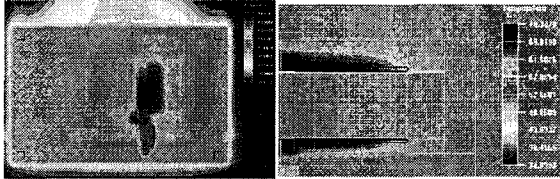


Fig. 3 Numerical simulation results for the Z0 stage

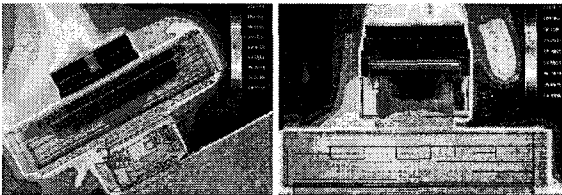


Fig. 4 Numerical simulation results for the XY0 stage

Figure 3 에서 나타나듯이 Z0 stage 의 경우 Magnet bobbin 에서 총 30W 발열할 경우 최대 온도가 70.3 °C 로서, 실제 Bobbin 의 예측된 온도 값(ϕDCT 제시)과 거의 일치한다. Z0 stage 내에서 발열부인 Bobbin 의 온도가 가장 높으나 Bobbin 과 주변 요소간의 접촉되는 면적이 넓지 않고 Stage 내부의 유체 유동이 원활하지 않아서, Bobbin 의 온도가 주변 기계 요소의 온도보다 10 °C 이상 높은 국소적인 열집중 현상이 발생한다.

XY0 stage 는 총 480W 의 열을 방출할 경우 (0 stage 에서 80W, Y stage 에서 200W, X stage 에서 200W 를 방출하며 Stage 의 발열량은 각 Stage 를 작동시키는 Motor 의 Input power 의 비에 따라 결정하였다.) 최대 온도가 112 °C 로써 실제 XY0 stage 의 최대 온도(ϕDCT 제시)와 거의 일치함을 알 수 있다. Figure 4 는 XY0 stage 의 열전달 현상을 해석한 결과이며 실제의 경우와 마찬가지로 바닥에 위치한 X Stage 보다 바닥으로부터 멀리 위치한 0 Stage 의 온도가 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 열용량이 큰 바닥면이 바닥면에 넓게 접촉한 X Stage 의 열을 제거하는 역할을 담당하기 때문이다. 반대로 위쪽에 위치한 Stage 는 자연대류만으로

로 대부분의 열을 제거하기 때문에 온도가 높다. Figure 4 에서 보듯이 X Stage 와 0 Stage 의 최대 온도 차이가 약 40 °C 로 Stage 간의 온도 불균형이 심하며 발열부와 주변 요소간의 열전달 면적이 적어 발열부에서의 열집중 현상 나타남을 알 수 있다.

3.3 열설계 방안

3.2 절에서 살펴보았듯이 Z0 stage 와 XY0 stage 내부의 발열체에서 발생하는 열이 주변 기계 요소로 전달이 되지 않아 국부적으로 온도가 높은 열집중 현상이 나타남을 알 수 있다. Stage 의 발열체는 Stage 를 이송하는 Motor 나 Magnetic bobbin 으로 이 부분의 열집중 현상을 해결하지 않으면 Stage 의 정밀도를 보장할 수 없게 된다.

Stage 내에서 발생하는 열집중 현상을 해결하기 위한 방안은 다음과 같다. 첫 번째로 발열체와 주변 요소간의 접촉 면적을 증가시키는 것이다.⁴ Bobbin 이나 Motor 의 형상을 바꾸어 기계 요소들과 접촉시키면 발열부에서 Stage 내부 기계 요소나 유체로의 열전달량이 증가하여 열집중 현상 정도를 감소시킬 수 있다. 두 번째 방법은 발열체의 열을 Stage 외벽으로 전달하는 것이다. Stage 의 외벽은 넓은 면적을 가지므로 일종의 Heat sink 의 역할을 수행할 수 있다. Stage 내부 구성요소의 크기를 변경하여 발열체에서 발생한 열을 Stage 외벽으로 전달하여 Stage 내부의 온도를 감소시킨다. 세 번째는 Stage 에서 주변 유체로의 열전달량을 증가시키는 것이다. Stage 외벽에 열전달 면적을 넓혀주는 Heat sink 를 설치하여 Stage 외벽에서 주변 작동 유체로의 열전달량을 증가시킨다. 이때 Heat sink 는 자연 대류의 경우에 대하여 최적화된 형상을 갖도록 한다.

자연대류 하에서 Fig. 5 와 같은 Heat sink 가 지면에 수직하게 설치되어 있을 경우, 보통 Heat sink 의 체적을 결정하는 변수 W, L, H 는 정해지게 된다. 따라서 자연대류 조건에서 최대의 열전달 성능을 갖는 Heat sink 의 형상을 찾는 것은 최적의 Fin 사이의 간격 D_{opt} 를 구하는 문제로 귀결된다. Fin 의 두께도 열전달 성능에 영향을 미치나 Fin 의 길이가 길지 않고 유체에 비하여 높은 열전달 계수를 가지므로 간단히 1mm 로 가정하였다. 최적의 Fin 간격 D_{opt} 는 두 가지의 Limiting case ($D \rightarrow 0, D \rightarrow \infty$)를 이용하여 구할 수 있다.⁵

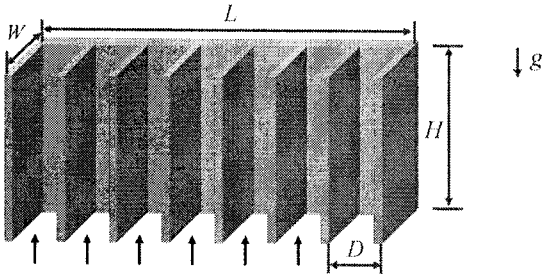


Fig. 5 A heat sink under natural convection

첫 번째 Limiting case, limit (a), 는 Fin 간의 간격이 매우 가까워서 유동장이 Fully developed 되는 경우 ($D \rightarrow 0$)로서 열전달량이 Fin 사이의 거리 D 의 제곱에 비례한다. 두 번째 Limiting case, limit (b), 는 Fin 사이의 거리가 멀 경우 ($D \rightarrow \infty$)이다. 각 Fin 에서 발생하는 Boundary layer 가 근처에 위치한 Fin 의 Boundary layer 와 만나지 않는 Boundary layer limit 를 따르며 이 때의 열전달량은 Fin 사이의 거리 D 에 반비례하게 된다. 따라서 최대의 열전달량을 갖는 Fin 간격은 Fig. 6 과 같이 두 Limiting case 가 서로 만나는 D_{opt} 가 될 것이다.

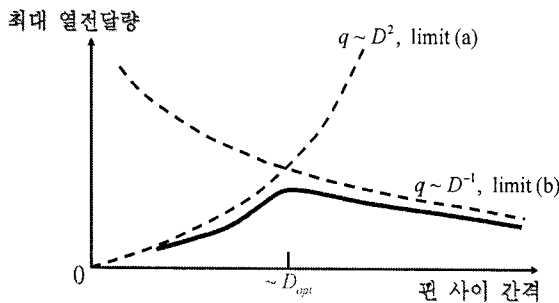


Fig. 6 The optimal fin-fin spacing for natural convection

최적화된 Fin 간격 D_{opt} 에 대하여 Bar-cohen 과 Rohsenow [6]는 식 (1)이 성립됨을 실험적으로 증명하였다.

$$D_{opt} = 2.7HRa_H^{-1/4} \quad (1)$$

이 때, Ra_H 는 Characteristic length 를 Heat sink 의 높이 H 로 하는 Rayleigh number 이며 다음과 같이 표현된다.

$$Ra_H = g\beta H^3 \Delta T (\alpha \nu) \quad (2)$$

단, $g, \beta, \Delta T, \alpha, \nu$ 는 각각 중력가속도, 유체의 열팽창계수, Fin 과 유체의 온도차, 유체의 Thermal diffusivity, 유체의 dynamic viscosity 이다. 식 (1)과 (2)를 사용하여 최적의 Fin 간격 (Z0 stage 경우 6.5mm, XY0 stage 경우 7mm)을 찾아내었고 수치모델에 적용하였다.

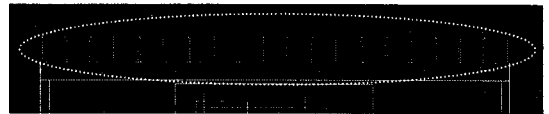
3.4 열설계 방법의 적용 및 효과

3.4.1 Z0 stage

3.3 절에서 파악한 최대 온도를 낮출 수 있는 방안을 수치해석 모델에 적용하였다. Figure 7 는 Z0 stage 의 발열부인 Bobbin 의 한 면(a)과 Stage 외벽 (b)에 최적의 Fin 간격을 갖는 Heat sink 를 설치한 그림이다. 또한 Bobbin 의 상면을 Stage 상부 외벽에 접촉시켜 발열부와 Stage 외벽 간의 열저항을 줄여서 열전달량을 증가시켰다.



(a)



(b)

Fig. 7 Z0 stage after assembling heat sinks

이와 같은 설계 방안을 적용한 후의 수치해석 결과는 Fig. 8 과 같다. Figure 8 에서 나타나듯 열설계 방안을 적용할 경우 전도에 의한 열전달량이 증가하고, Stage 외벽으로 전달된 열이 Heat sink 를 통하여 주변 유체로 전달되어 Bobbin 에서의 열집중 현상이 완화된 것을 볼 수 있다.

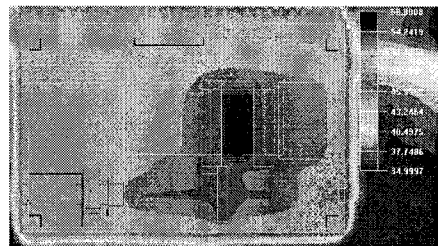


Fig. 8 Temperature field in the Z0 stage after applying thermal solutions

Stage 내 최대 온도를 비교하면 열문제 해결 방안을 적용한 경우의 최대 온도는 57°C로서 해결 방안 적용 전의 70°C와 비교하여 13°C 정도 감소하였다. 각 열설계 방안의 효과를 살펴보면 발열체와 Stage 외벽 간의 열저항을 줄였을 경우 최대 온도가 2°C, Heat sink 설치시 11°C 감소하였다.

3.4.2 XYθ stage

XYθ 에도 앞서 설명한 열설계 방안을 다양한 방식으로 적용하였다. 적용한 각각의 해결 방안과 효과를 살펴보면 Table 1 과 같다.

Table 1 Effects of thermal solutions for the XYθ stage

Thermal solution	온도감소 (°C)
발열부와 주변 기계 요소 간의 접촉	14
Stage 간의 접촉 면적 넓히기	3
최적화된 Heat sink 설치	11

각각의 방법을 적용한 모델의 특징은 Fig. 9 와 같다. Figure 9 (a)는 주변의 기계 요소와 떨어져 있던 XYθ stage 의 발열부를 Stage 바닥면에 닿아 있는 요소와 접촉시킨 것이다.

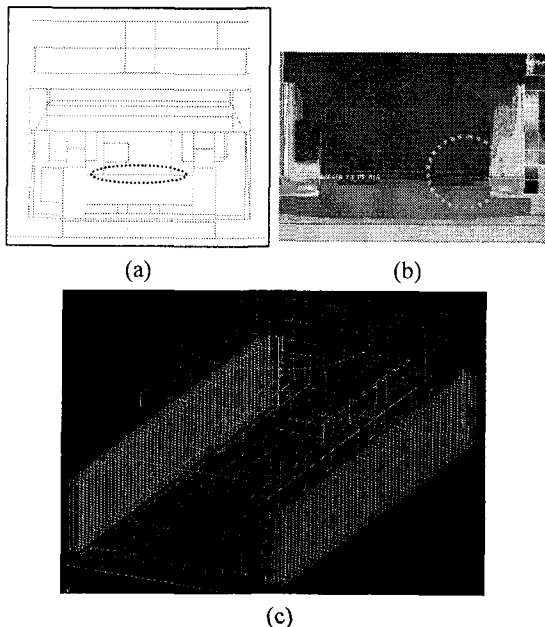


Fig. 9 XYθ stage after applying thermal solutions

이 방안은 발열부의 열을 주변 요소로 전달하여 국부적인 열집중 현상을 완화시키며, Stage 외벽까지 전달된 열이 주변 유체로 방출되어 효율적으로 열을 제거할 수 있다. Figure 9 (b)는 각 Stage 를 연결하는 요소의 면적을 넓힌 방법이다. XYθ stage 의 경우 각 Stage 간의 온도차이가 극명하게 나타남을 Fig. 4 에서 볼 수 있었다. 각 Stage 간의 열전달 면적을 넓혀서 Stage 간의 열저항을 감소시키면 바닥면으로부터 높이 위치한 Stage 의 열을 바닥면으로 전달하여 최대 온도를 낮추고 Stage 간의 온도 불균형 현상을 막을 수 있다. Figure 9 (c)는 Y stage 외벽에 최적의 Fin 간격을 갖는 Heat sink 를 설치한 그림이다. 주변 유체와 온도차가 적은 X stage 나 Heat sink 를 설치하기 어려운 형상의 θ stage 의 경우에는 Heat sink 의 효과가 미비함을 수치해석을 통하여 확인하였다. Y stage 에 Heat sink 를 설치할 경우 주변 유체로의 열전달량이 증가하여 XYθ stage 의 최대 온도가 11°C 감소하였다.

위의 열설계 방법을 XYθ stage 에 적용한 후 수치해석을 수행한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 열설계 방법을 적용하기 전의 결과(Fig. 4)와 비교하면 발열체에서의 열집중 현상이 완화되어 Stage 내부의 온도가 많이 균일해졌음을 볼 수 있다. 이에 더하여 Stage 간의 증가한 접촉 면적을 통하여 바닥면에 수직인 방향으로의 열전달이 증가하여 Stage 간의 온도 불균형 현상이 감소하였음을 볼 수 있다.

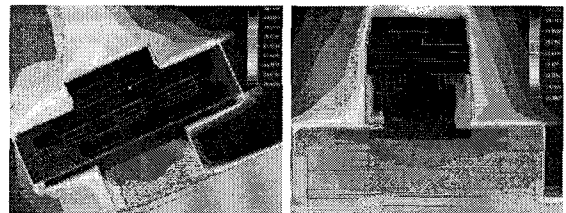


Fig. 10 Temperature field in the XYθ stage after applying thermal solutions

3.5 먼지제거판의 설치

Zθ Stage 작동시 왕복 운동을 하는 Shaft 와 Stage 외벽 간의 마찰에 의하여 미세한 먼지가 발생하여 CCM 을 오염시킬 수 있다. 발생하는 미세 먼지에 의한 CCM 의 오염을 막기 위해 Fig. 11(a)와 같이 Shaft 와 Stage 의 연결부 근처에 먼지제거판을 설

치하여 먼지가 외부로 흘러나가는 통로를 차단하였다. 또한 Stage 의 한 면에 (Shaft 가 설치된 곳의 반대쪽 면) Suction type pump 를 연결하여 발생한 먼지가 유동을 따라 Stage 를 통과하여 Pump 로 유입되도록 하였다. (Fig. 11(b))

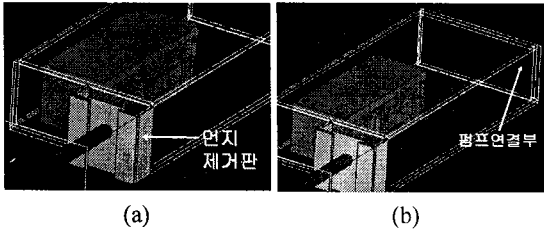


Fig. 11 Numerical model including the suction pump connector (a), the dust collector (b)

Stage 청정에 관련한 연구를 수행하는 한국과학기술원 구조동력학 및 응용제어 연구실에서 제안한 먼지제거판의 형상은 Fig. 12 와 같은 3 가지 종류이다.

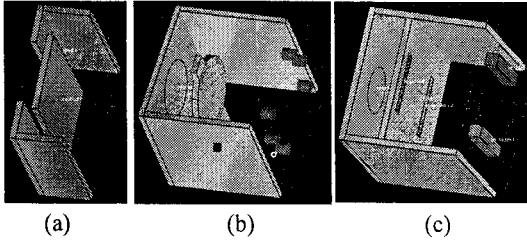


Fig. 12 Three types of dust collectors

DCT(㉔)에서 제시한 Suction type pump (최대흡입유량: 22 L/min, 최고진공압력:-84 kPa)의 조건하에 수치해석을 수행하였다. 유량을 최대흡입유량의 1/3, 2/3 그리고 1 배로 증가시켜가며 압력강하량의 변화를 살펴보았다. Table 2 에서 볼 수 있듯이 같은 유량 조건에서 Fig. 12 (b)와 (c)가 Fig. 12 (a)에 비하여 압력강하량이 낮음을 알 수 있다.

Table 2 Pressure drop for dust collectors unit (Pa)

모형 유량	Fig. 12 (a)	Fig. 12 (b)	Fig. 12 (c)
$Q = 1/3 Q_{max}$	-164.8	-137.7	-134.5
$Q = 2/3 Q_{max}$	-654.3	-546.2	-533.8
$Q = Q_{max}$	-1468.1	-1226.5	-1200

효율 높은 먼지제거판의 형상을 찾기 위하여 Shaft 와 Stage 의 연결부 근처 및 먼지제거판 내에서의 유동 특성을 살펴보았다. Figure 13(a)와 (b)는 각각 먼지제거판 Fig. 12(b)와 (c)내에서의 유동 패턴이다. Figure 13 에서 보이듯이 Pump 에 의하여 외부의 유동이 먼지제거판을 거쳐 Stage 내부로 들어 온다. 그러나 Fig. 13 (b)에서는 Recirculation 현상이 주기적으로 나타나서 미세 먼지가 Stage 외부로 유출될 가능성이 있다. 따라서 압력강하 특성이 우수하며 먼지제거에 효율적인 유동패턴을 갖는 Fig. 12 (b)를 최적의 먼지제거판으로 제시하였다.

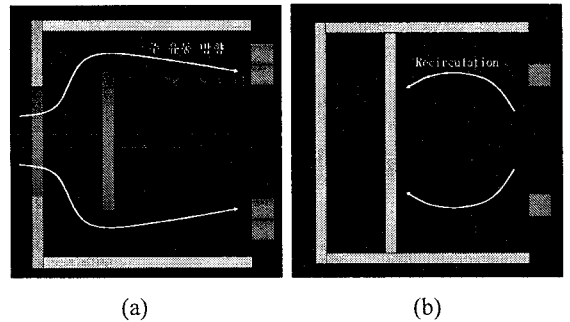


Fig. 13 Fluid flow in the dust collectors

4. 결론

Stage 의 형상을 모델링한 후 수행한 수치해석 결과를 바탕으로 각 Stage 의 열전달 특성을 파악하였다. 수치해석을 통하여 파악한 Stage 의 열 문제들로는 발열부의 열집중 현상 (Z0 stage, XY0 stage)과 Stage 간의 온도 불균형 문제 (XY0 stage)가 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 열설계 방법을 제시하고 수치해석적으로 효과를 검증하였다. 발열부에서 Stage 외부로의 열저항을 감소시켜 최대 온도를 낮출 수 있는 열설계 방안으로 Stage 내 요소 부품 형상 변경, Heat sink 설치 등을 제시하였다. 제한한 열설계 방안을 모델에 적용을 하고 수치해석을 수행한 결과 Z0 stage 의 경우 최고 온도를 13°C, XY0 stage 의 경우 최고 온도를 최대 27°C 낮출 수 있었다. XY0 stage 와 Z0 stage 두 경우 모두에 대하여, Stage 내부 요소의 디자인 변경 없이 최대 온도를 많이 낮출 수 있다는 점에서 Heat sink 의 설치를 가장 효율적인 열설계 방법으로 추천한다.

Z0 stage 경우, Shaft 의 왕복 운동에 의하여 발생하는 미세 먼지에 의한 CCM 의 오염을 방지하기 위하여 Shaft 와 Stage 의 연결부 근처에 먼지제거판을 설치하여 먼지가 외부로 흘러나가는 통로를 차단하였다. 또한 Suction type pump 를 연결하여 Stage 의 외부로부터 내부로의 유동을 발생시켜 미세 먼지가 Stage 내부로 들어와 Pump 를 통해 빠져 나가도록 하였다. 먼지제거판을 설치한 Stage 의 압력 특성 및 유동 특성을 파악하여 가장 효율적으로 먼지를 제거할 수 있는 먼지제거판 형상을 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점기술개발사업 (과제명 : CCM(Compact Camera Module) 시스템통합 및 핵심요소기술 개발, 과제 번호 : 10024124-2007-13)의 연구비 지원으로 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. Yun, W. C., "Development of inline assembling equipment for CCM," Ministry of Commerce, Industry and energy, 2008.
2. Park, C. W., "A report for bonding equipment with high accuracy for Flexible PCB" Ministry of Commerce, Industry and energy, 2005.
3. Choi, J. S., Lee, G. S., Lim, D. H., Song, J. Y., Lee, C. W., Kwak, Y. G and Kim, S. H., "A Research on the Assembly of the Camera Modules for Mobile Phones," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 989-992, 2005.
4. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., "Fundamentals of heat and mass transfer 5th edition," John Wiley & Sons, pp. 88-92, 2002.
5. Bejan, A., "Convection heat transfer 2nd edition," John Wiley & Sons, pp. 202-205, 1995.
6. Bar-cohen, A. and Rohsenow, W. M., "Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates," J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 116-123, 1984.