



재순환식 커피 로스터의 커피 원두 섞임해석 및 소음저감 연구

사종성^a, 강태원^{b,*}

Noise Reduction on Parts of Coffee Roaster

Jongsung Sa^a, Taewon Kang^{b,*}^a Department of Automotive Engineering, Seoul University^b Department Mechanical & Biomedical Engineering, Kangwon National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	24	October	2023
Revised	15	November	2023
Accepted	16	November	2023

Keywords:

Coffee roaster
DEM
Noise reduction
Simulation

ABSTRACT

Generally, baristas do not seem to pay attention to the noise and vibration generated by coffee roasters as they primarily focus on preparing and serving good coffee. However, such aspects of coffee roasters cannot be ignored, particularly in a home or small coffee shop setting. To reduce the levels of noise and vibration when roasters are operating in quiet places, experiments and analyses based on computer simulations were conducted. Upon the finding that operating conditions and mixture status of coffee beans are the source of noise and vibration, several changes were made to candidate components such as blower design, blower motor speeds, and interior obstacles. While noise and vibration reduction across a wide frequency range was not completely achieved, modifications to the blower design resulted in meaningful reduction of noise and vibration at specific points.

1. 서론

1.1 기술 연구의 개요

우리나라는 과거 조상들의 다도(茶道) 문화라는 역사적 배경에 더불어 근래 들어서 일반 대중들의 생활수준 향상으로 커피를 즐기는 수요가 급증하고 있는 추세이다. 간단하게 즐겼던 인스턴트 커피에서 탈피하여, 이제는 커피 빈(coffee bean, 이하 커피 원두)을 직접 볶고 갈아서 풍미 있는 커피 향과 맛을 추구하는 단계로 발전하고 있다.

본 연구는 커피 원두를 직접 로스팅(roasting)하는 가정용 기기의 제품개발에 따른 커피 원두의 섞임 현상 개선과 소음저감 방안을 다루고 있다. 즉 커피를 즐기는 문화가 대중화되면서 지금까지 상업용으로 쓰이던 커피 로스터(coffee roaster) 기기가 가정용으로

로 소형화된 제품으로 변신하면서 커피 원두의 로스팅 시 발생하는 원두 섞임 특성과 이에 따른 소음에 주목하였다.

1.2 기술 연구의 목표

가정용 커피 로스터의 개발은 기존 상업용 대형 기기의 축소 과정으로 생각할 수도 있겠지만, 가정환경이 정숙성을 중요시 한다는 점을 고려하면 단순한 크기 변화만으로는 소기의 목적을 달성하기 어렵다. 남혜영^[1]은 현대인의 라이프 스타일 변화 중에 가정에서 직접 커피 로스팅과 드립(drip)을 시도한다는 점을 주목하여, 대형 기기의 소형화에 필요한 디자인 변화를 확인하고자 기존의 커피 로스터의 디자인 요소를 분석하였다. 그러나 이는 감성 평가 측면이 강하였으며, 기능의 변화에 대한 정량적인 분석은 미흡하였다. Radi^[2]는 가정용 커피 로스터의 기능 분석을 실시하였는데,

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6311

E-mail address: jirehk@kangwon.ac.kr (Taewon Kang).

기기의 소형화에 따른 커피 로스팅 온도의 민감성 부분을 언급하고 있다. Chiang^[3]은 로스팅 프로세스에 대한 전산해석을 실시하여 로스팅 공정에 적합한 온도 제어에 대한 연구를 실시한 바 있다. 최호만^[4] 등은 커피 로스터기의 자동화 구현을 위한 실험적 연구를 진행하였다. 이상의 연구는 산업용 기기에서 가정용 기기로 변신하는 것이기 때문에 디자인 측면, 기기의 소형화 및 자동화에 따른 온도 제어 연구가 주를 이루고 있는 반면에 가정이라는 환경변화에 주목한 정숙성, 기능성 측면을 고려한 재설계 연구는 미진한 상태이다.

따라서 본 연구는 가정용 커피 로스터의 개발 과정에서 커피 원두의 섞임 현상을 고려한 전산 해석과 실험을 통하여 원하는 진동 소음 특성을 확인하고 추가적인 개선 방안을 제안하고자 한다.

2. 커피 로스터의 구조 및 진동 소음 현상

2.1 기본 구조

본 연구에서 고려하는 가정용 커피 로스터는 70 g의 커피 원두를 10분 이내에 로스팅하는 기기로, 2 kW급 발열 코일을 통해 230°C 이내에서 열의 재순환 방식으로 작동한다. 터보팬에 의한 열풍의 복사 및 재순환을 포함하여 원두에 회전을 유도하여 균일하게 로스팅이 이루어진다. 가정용 커피 로스터의 외관 및 주요 구조는 Fig. 1과 같다.

2.2 커피 로스터의 진동 소음현상 파악

본 연구를 위하여 로스터 성능에 충실한 시제품을 1차적으로 제작하고, 그 시제품(initial design)에서 발생하는 소음과 진동 현상을 측정하였다. 소음 특성을 파악하기 위하여 1.2 m 높이의 테이블에 커피 로스터를 위치시키고, 마이크로폰과의 거리는 0.5 m로 고정하였으며, 진동 특성은 커피 원두가 상하 방향으로 섞이면서 원

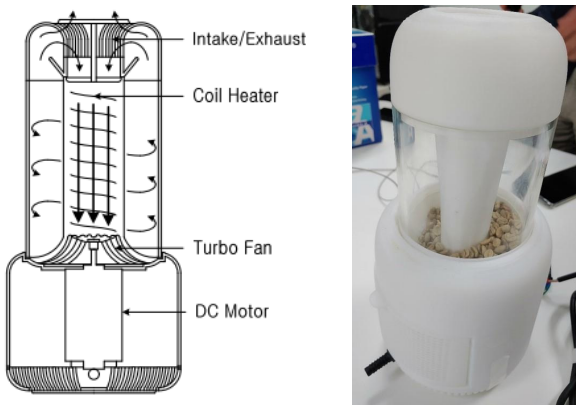
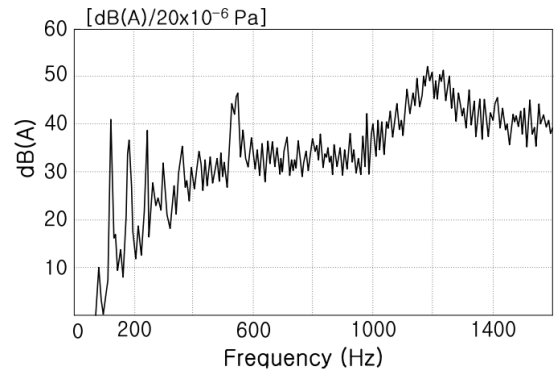
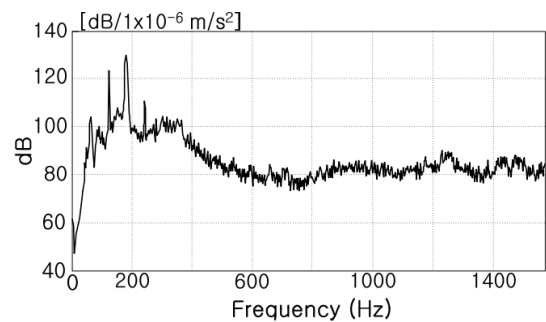


Fig. 1 Basic structure of coffee roaster



(a) Noise(high speed of bean)



(b) Vibration(high speed of bean)

Fig. 2 Noise and vibration level of coffee roaster(initial design)

심력에 의한 회전운동을 한다는 점을 고려하여 본체의 상하 방향으로 측정하였다.

커피 로스터 기기는 조리대나 식탁, 주방 가전제품과 마찬가지로 사용자의 활동 주변에 위치하기 때문에, 본 연구에서는 사용자들이 불편을 느끼는 주파수 영역에 주목하였다.

전체 소음레벨은 70.4 dB(A)의 수준을 나타내었다. Fig 2에서 보여주는 바와 같이, 저 주파수 영역의 거슬리는 소리에 해당되는 100 Hz 및 200 Hz 영역에서 소음의 피크 값이 나타나는 것과 본체의 진동 특성도 동일한 경향을 보이는 반면, 500 및 1,200 Hz 대역에서 피크 값을 가지는 소음 특성은 본체의 진동 주파수에서 볼 수 없었다.

이러한 시제품의 소음 특성은 사용자에게 큰 불편을 줄 것으로 판단되므로, 진동 특성과 상이한 영역에서의 소음 분산이 이루어지도록 하거나, 작동 과정에서 발생하는 소음레벨을 현 수준보다 더욱 개선시켜야 함을 시사한다.

한편, 시제품 측정으로부터 진동 특성과 소음 특성이 서로 정확하게 일치하지 않는다는 점을 확인하였는데, 이는 커피 원두의 섞임이 원두 회전에 관여하기 때문이다. 따라서, 원두의 상하 섞임에 대한 설계 개선 방향에 대한 정보를 얻고자, 커피 로스터의 외형 구조 설계 전에 전산 해석을 통한 원두 섞임에 대한 연구가 필요하다고 판단하였다.

3. 개선방안 도출 및 적용

3.1 커피 원두의 섞임 거동에 대한 전산해석

커피 로스팅에서 중요한 것은 터보팬의 공기유동으로 커피 원두를 회전시키면서 원두에 열이 골고루 가해지는 기능을 가지는 것이다. 특히, 저속(low speed)으로 원두를 회전시킬 때와 고속(high speed)으로 회전시킬 때의 원두 섞임이 확실하게 차이를 가져야 한다. 커피 원두의 거동 및 섞임 현상을 세밀하게 파악하기 위해서 전산 해석을 실시하였다. 본 연구에서는 많은 고체입자들의 운동과 그에 따른 효과를 해석하는데 유용한 이산요소법(discrete element method, 이하 DEM)을 적용하였다. DEM은 작은 입자들로 이루어진 비연속체의 흐름과 같은 운동 과정에서 발생하는 다양한 현상을 파악하는데 효과적인 방법으로 인식되고 있다^[7-9]. 본 연구에서는 Metariver Technology 기업의 DEM 전문 소프트웨어인 samadii/dem 프로그램을 사용하였다.

DEM은 기본적으로, 각각의 입자들이 받는 모든 힘을 고려할 때, 6자유도계 운동방정식을 해석하여 각 입자들의 움직임을 결정하는 라그랑지안 방법(Lagrangian method)을 사용한다. 이를 수식을 표현하면 식 (1), (2)와 같다.

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_j (\overrightarrow{F_{ij}^n} + \overrightarrow{F_{ij}^t}) + \overrightarrow{F_{ext,j}} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = \sum_j (r_i n_{ij} \times \overrightarrow{F_{ij}^t}) + \overrightarrow{T_{ext,j}} \quad (2)$$

여기서 n 은 충돌방향을 기준으로 법선 방향을, t 는 접선방향을 의미하며, $\overrightarrow{F_{ext}}$ 와 $\overrightarrow{T_{ext}}$ 는 각각 충돌 외에 입자로 가해지는 외력과 토크의 합을 나타낸다. 외력으로는 중력을 비롯하여 해석하는 목적에 따라서 자기력, 전기력 등이 고려될 수 있으며, 입자 주위의 유체 흐름이 존재하는 경우에는 항력(drag force)과 부력(buoyancy force) 등이 고려될 수 있다.

본 연구에 적용된 이산요소법 해석에는 입자-입자, 입자-벽면 간의 충돌 계산에 있어서 비선형 점탄성 모델(nonlinear viscoelastic model)이 사용되었다. 충돌로 인해 발생하는 오버랩(overlap)을 δ 라 하고, μ_d 를 동 마찰계수(dynamic friction coefficient), $\overrightarrow{u_{ij}}$ 를 두 입자 간의 상대속도, \overrightarrow{n} 과 \overrightarrow{t} 를 각각 법선 및 접선방향 단위 벡터로 정의하면, 충돌에 의한 법선과 접선방향의 힘은 식 (3), (4)와 같이 계산된다^[5,6].

$$\overrightarrow{F_{ij}^n} = f_K^n + f_C^n \quad (3)$$

$$\overrightarrow{F_{ij}^t} = \begin{cases} \overrightarrow{f_K^t} + \overrightarrow{f_C^t} & \text{if } \left| \overrightarrow{f_K^t} + \overrightarrow{f_C^t} \right| < \mu_d \left| \overrightarrow{F_{ij}^n} \right| \\ \mu_d \left| \overrightarrow{F_{ij}^n} \right| \overrightarrow{t} & \text{if } \left| \overrightarrow{f_K^t} + \overrightarrow{f_C^t} \right| \geq \mu_d \left| \overrightarrow{F_{ij}^n} \right| \end{cases} \quad (4)$$

입자들의 각 방향 충돌력은 탄성력과 점성력의 두 요소로 구성되며, 두 입자가 접촉하고 있는 동안의 에너지 손실은 충돌 전후의 속도차이를 만들어낸다^[6]. 수식 (3)과 (4)의 비선형 점탄성 모델의 탄성력은 Hertz의 식을, 점성력은 Tsuji^[5]의 모델을 사용하였다.

3.1.1 커피 원두의 구형 모델링

커피 원두의 모델링을 구형(sphere)으로, 입자의 크기는 5~8 mm로 가정하여 커피 로스터 내부 영역에서 나타나는 거동형태를 분석하였다. 해석 절차는 구형으로 모델링한 커피 원두가 정상상태의 유동장에서 이동하며, 유동장은 입자(커피 원두)의 거동에 영향을 받지 않는 것으로 단순화시켜서 해석을 진행하였다.

Fig. 3은 커피 원두의 모델과 섞임 현상에 대한 변화를 주기 위한 모델이다. 제품의 내부와 동일한 사양(case A)과 커피 로스터 내부에 별도의 구조물을 삽입한 사양(case B)을 고려하였다.

3.1.2 커피 원두의 섞임 해석

커피 원두의 섞임을 파악하는 전산 해석은 시제품의 내부와 동일한 case A와 내부에 별도의 구조물을 삽입한 case B를 서로 비교하였다. 터보팬의 공기유동에 의한 원두의 섞임 현상은 두 가지 모두 원주 방향으로 매우 활발한 거동을 보였지만, case A의 경우 서로 섞이는 정도는 미미하였다. 반면에, case B의 경우에는 삽입된 구조물과 입자의 충돌로 인하여 상부와 하부에 위치한 입자의 섞임 효과가 더욱 개선됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 Fig. 3의 case A, B의 해석 과정에서 계산되는 입자(커피 원두를 모델링)의 노출시간(exposure time)에 대한 히스토그램(histogram)을 나타낸다. 여기서 노출시간이란 DEM 전문 소프트웨어에서 정의되는 함수로, 입자 주변의 공기가 입자와 반응하면서 공기에 온전히 노출된 누적 시간의 총합을 의미한다. 즉, 입자가

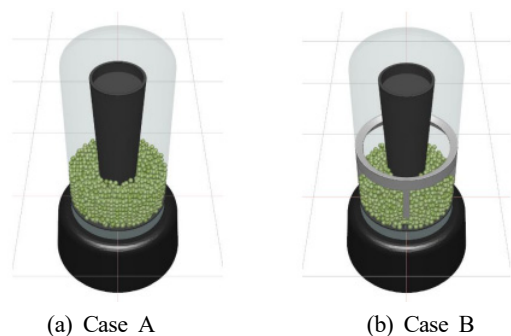
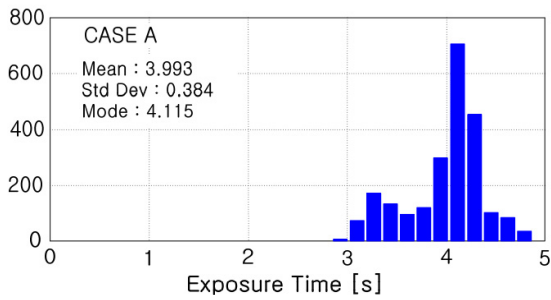
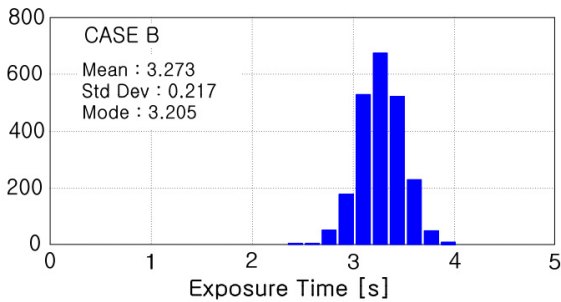


Fig. 3 Spherical coffee bean with and without external structure



(a) Case A



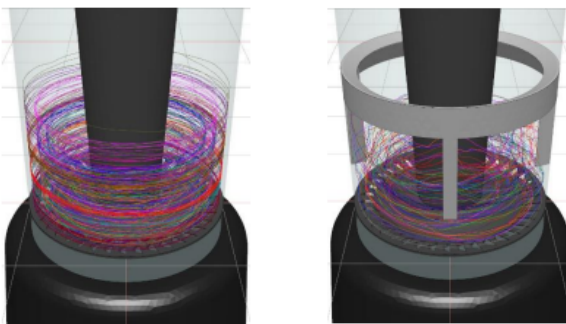
(b) Case B

Fig. 4 Histogram of coffee bean mixture

있는 주변 환경의 공기에 노출된 전체 시간을 뜻한다.

물론 커피 원두의 혼합 과정에서는 공기와의 화학반응은 고려하지 않았지만, 입자의 혼합이 양호하게 이루어질 경우에는 입자들의 유동 계산과정에서 노출시간의 산포가 적을 것이며, 그 반대의 경우에는 큰 산포를 가지므로 의미 있는 비교 지표라 할 수 있다. Case B의 경우를 살펴보면 case A에 비해서 더 작은 산포를 가지므로, 활발한 원두의 혼합이 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 case A, B의 해석 결과 중에서 20개의 입자를 선정하여 섞임 과정의 궤적(path)을 비교한 것이다. 앞에서 언급한 섞임의 정도를 확률적으로 해석한 결과와 동일한 예측을 보여주고 있다. 즉, case A는 커피 원두의 궤적이 동일한 원을 따르면서 회전하는 반면에, case B는 커피 원두의 궤적이 상하로 섞이면서 회전하는 것을 볼 수 있다. 따라서 삽입된 별도의 구조물로 인하여 상부



(a) Case A

(b) Case B

Fig. 5 Path lines of elements

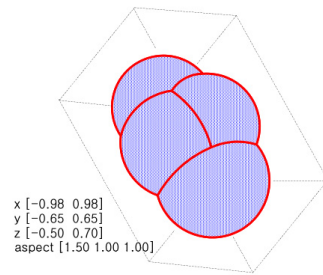


Fig. 6 Modelling of non-spherical coffee bean

와 하부의 입자가 잘 섞이는 것을 알 수 있다.

이는 커피 원두의 섞임 현상을 해석하는 과정에서 별도의 구조물과 같이 커피 로스터 내부 경계조건(boundary condition)의 민감도가 높음을 보여준다. 그러나 case B를 설계에 반영하는 경우, 제품의 사용 편의성과 커피 원두의 깨짐 현상과 같은 문제점이 발생할 수 있으므로, 이는 향후의 연구과제라 하겠다.

3.1.3 커피 원두의 비 구형 모델링

외부 구조물의 역할을 최소화하면서 커피 원두의 섞임 현상을 보다 정밀하게 분석하기 위하여, 원두의 형상을 이상적인 구형에서 비대칭 형상으로 모델링을 개선하였다. 다양한 모양을 가지고 있는 커피 원두의 형상을 묘사하는 것은 불가능할 뿐만 아니라 현실성이 낮다고 판단되어, 앞 절에서 진행했던 구형의 커피 원두 모양을 비대칭으로 전환하는 모델링을 적용하여 살펴보았다.

즉, 실제 원두 모양과 최대한 유사한 형상을 위해서 Fig. 6과 같이 작은 구형의 입자를 조합한 cluster 형태의 비 구형 입자(non-spherical particle)의 모델링으로 개선시켜서 전산 해석을 실시하였다.

이번 해석의 목적은 커피 로스터 내부에 별도의 구조물 없이도 양호한 섞임 현상을 보이는 지의 여부와 커피 원두가 회전하는 속도에 따른 섞임 현상의 차이점을 파악하기 위함이다. 터보팬을 구동하는 모터 회전속도가 300 rpm인 경우를 저속(low speed), 600 rpm인 경우를 고속(high speed)으로 정의하고 실시하였다.

커피 로스터의 내부에 별도의 구조물이 없는 case A의 조건에서 해석한 결과, 저속과 고속에서의 섞임 현상은 Fig. 7(a), (b)와 같다. 또한 Fig. 7(c)와 (d)는 커피 원두의 섞임 과정에서 계산된 수직 방향의 높이를 나타낸다. 여기서 계산되는 수직 방향의 높이는 커피 원두가 회전하면서 벽면에서 순간적으로 이루는 층의 높이를 의미한다. Fig. 7(a)는 저속일 때의 시각적인 결과이고, Fig. 7(c)는 커피 원두들이 커피 로스터 내부에서 층을 이루는 모습을 보여주는 결과이다. 저속이기 때문에 섞임의 정도가 많지는 않지만, 외벽으로 다가갈수록 층의 높이 변화가 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

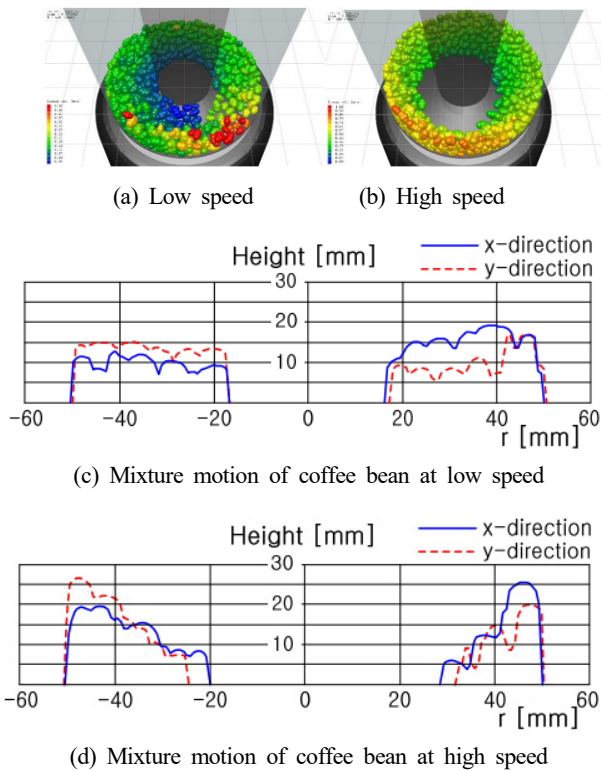


Fig. 7 Numerical analysis of coffee bean mixture

반면에 Fig. 7(b)는 고속일 때의 시각적인 결과이며, Fig. 7(d)는 커피 원두들이 커피 로스터 내부에서 층을 이루는 결과이다. 안쪽에서 원주 바깥쪽으로 층 높이가 차이가 날 때, 원두가 서로 섞이는 것이 확연하게 드러나는 것을 알 수 있다. 즉, 커피 로스터의 외벽에서 안쪽에서 살펴보면, 한 쪽 끝의 가장 높은 위치를 점하던 커피 원두들이 그 반대편 외벽 쪽에서는 다른 커피 원두들의 아래 쪽에 위치하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 커피 원두가 회전하면서 위아래로 섞이는 움직임으로 인한 결과임을 유추할 수 있다.

이러한 해석 결과를 근거하여 커피 로스터의 섞임 효과는 모터의 회전속도를 높일수록 효과적임을 알 수 있다. 그러나 섞임 효과만 강조하다보면 터보팬과 모터의 소음 증가 현상을 야기시키면서 상품성을 낮추는 결과로 귀결됨에 주의하여야 할 것이다.

따라서 커피 원두의 높은 유동속도를 유지하면서 작동 과정에서 발생하는 소음을 저감시키는 방안으로 터보팬과 모터의 회전속도 및 디자인 개선 등을 포함하는 구조변경으로 결정하였다.

3.2 회전속도에 따른 진동 소음 측정

앞에서 실시한 전산 해석에 의하면, 모터의 회전속도를 높이는 것이 커피 원두들의 회전속도를 증가시키고 동시에 커피 원두가 회전하면서 위아래로 섞이는 움직임을 만드는 방법에 긍정적인 효과를 준다는 정보를 확보하였다. 그러나 단순히 회전속도만을 높이는 기능만으로 커피 로스터 설계가 종료되는 것은 아니다.

앞에서 언급한 바와 같이, 진동 소음 측면에서는 모터의 속도 증가가 꼭 긍정적이지 않으며, 많은 경우에 오히려 역효과를 만들 수 있다. 커피 원두의 회전속도를 높이려면, 근본적으로 모터의 속도를 올려야 하는데, 이로 인한 손해를 감수하여야 한다. 즉, 모터의 회전속도 증가에 따른 소음 문제가 더욱 커질 수 있으며, 로스팅을 잘하기 위해서는 고른 열 접촉이 이루어져야 하는데 이 역시 높은 회전속도와는 역행하는 상품 특성으로 나타날 수 있다.

그 이유는 회전속도가 너무 높은 경우, 커피 원두들은 로스터 안쪽의 외벽을 따라서 회전을 하는데, 마치 외벽에 달라 붙어서 서로 간의 간섭을 만들지 못하고 원심력을 따라 원주 바깥 방향의 움직임이 주를 이루게 되기 때문이다.

이처럼, 고르게 커피 원두들이 로스팅되는 적절한 온도 분포 제어에 매우 중요하지만, 본 연구에서는 균일한 온도 제어가 가능하다는 가정하에서 진동 소음 특성 개선에 집중하기로 하였다.

원두들의 회전이 커피 로스터의 진동 소음 현상에 영향을 미치는지 확인하기 위하여 두 종류의 환경하에서 진동 소음을 측정하였다.

첫 번째는 커피 원두가 없는 상태에서 고정된 회전속도인 저속 및 고속으로 로스터의 모터를 가동하면서 진동 소음 현상을 측정하였고, 두 번째는 일정량(70g)의 원두들이 모터의 두 가지 속도에 따라서 회전하면서 야기시키는 진동 소음을 측정하였다. 이는 전산 해석에서 고속의 섞임 현상이 유리함을 나타낸바, 이에 따른 회전속도의 증가를 고려한 것이다.

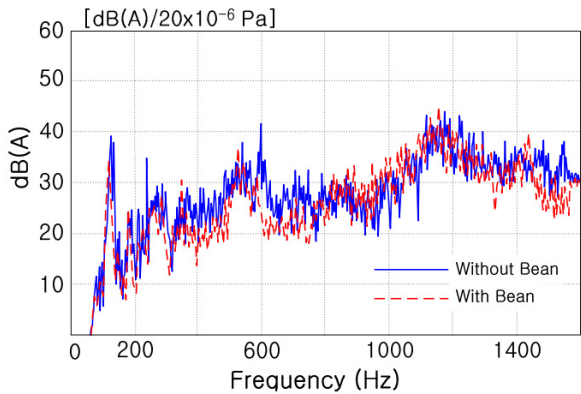
Fig. 8(a)는 저속에서 측정한 커피 원두의 유무(with and without)에 따른 소음 특성을 보여준다. 또한 커피 로스터의 진동 현상도 특기할만한 차이점이 없었으며, Fig. 8(b)는 고속에서 측정한 커피 원두 유무에 따른 진동 특성을 보여준다. 커피 원두의 유무와 상관없이 저속 및 고속에서 커피 로스터의 소음과 진동 특성은 큰 변화가 없었다.

반면에 모터의 회전속도 변화에 의한 소음 진동 특성은 뚜렷한 차이점을 나타냈는데, 저속에서 고속으로 변화 시 Fig. 8(c)와 같이 소음이 증가되었는데, 커피 로스터의 전체 소음레벨은 62.5 dB(A)에서 70.4 dB(A)로 증가되었으며, 진동 특성도 Fig. 8(d)와 같이 동일한 경향을 가진다.

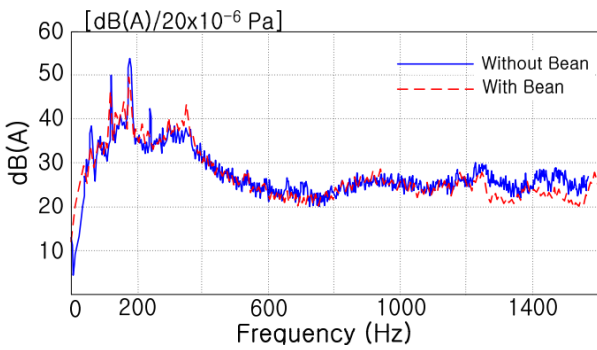
3.3 디자인 개선에 의한 고려

커피 원두가 회전하면서 효과적으로 섞이기 위해서는 직경 방향으로 충분한 공간이 필요하지만, 터보팬으로부터 올라오는 공기유동으로 인한 섞임도 발생하여야 하기 때문에 커피 로스터의 외형 치수가 중요하다고 볼 수 있다.

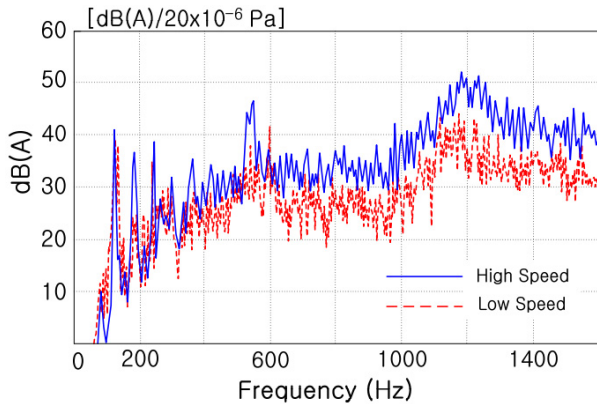
그러나 정작 다양한 설계 변경을 실시한 결과, 외형 크기의 변화



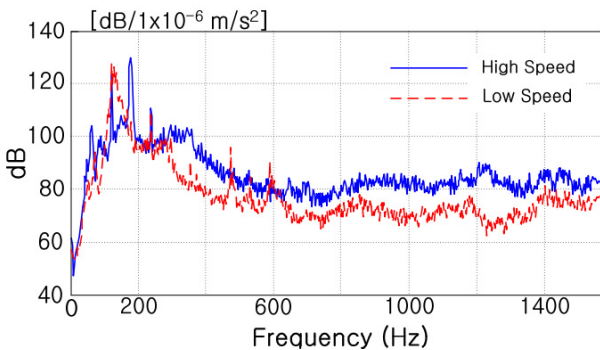
(a) Noise (without/with coffee bean at low speed)



(b) Vibration (without/with coffee bean at high speed)

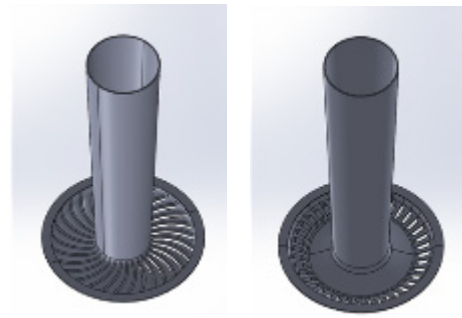


(c) Noise (with coffee bean at low and high speed)



(d) Vibration (with coffee bean at low and high speed)

Fig. 8 The comparison of noise and vibration



(a) Version 1 (b) Version 2

Fig. 9 Blower design variation

보다는 원통 내부 공기유동의 방향을 유도하는 내부 설계가 더 중요하다라는 것을 확인하여 아래의 두 가지 형태로 로스터 송풍구 설계 변경에 따른 개선을 고려하였다. 가장 먼저 고려한 것은 아래부터 올라오는 공기유동이 다시 밖으로 나가기 위한 배출구 압력을 고려한 날개의 개수였다.

Fig. 9는 blower 디자인 개선 내용을 보여주고 있다. Version 1은 로스터 내부 공기유동을 유도하는 송풍구의 면적을 최대화하는 디자인으로 30개의 날개가 가운데 챔버를 중심으로 원형을 유지하도록 날개를 배치하는 형태이다.

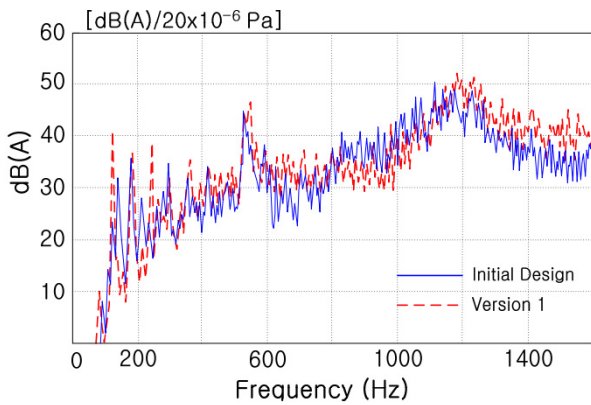
반면 version 2는 날개의 형상에 따라 송풍이 시작되는 공기 임팩트의 위치 변경을 시도한 것이다. 즉, 이전 디자인 개선과 동일하게 30개의 날개를 통하여 내부 송풍 면적을 최대화하는 것은 같지만 공기유동이 커피 원두의 하부보다는 내측 35도의 경사에서 이루어지게끔 함으로써 커피 원두가 공기유동의 벡터성분에 영향을 더 받을 수 있는 구조를 취하였다. 즉, 회전을 오래 함에 따라 커피 원두가 로스터 내부의 벽면에 밀착되는 것을 방지하고, 위로 올라가는 힘과 내측으로 밀어내는 힘을 동시에 받음으로써 커피 원두의 섞임을 강제하도록 설계하였다.

4. 개선방안 적용 결과

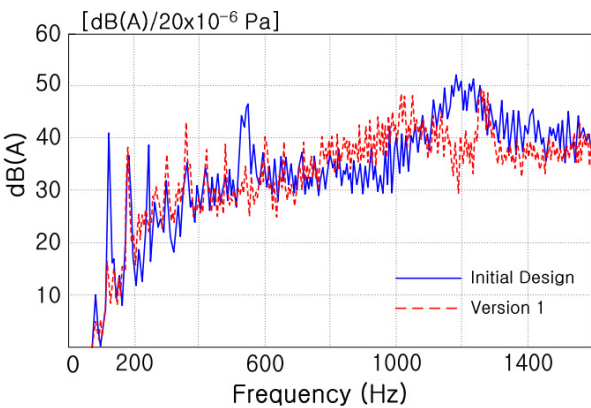
4.1 개선방안의 적용과 소음진동 측정

커피 로스터 내부의 유동에 대한 전산 해석 결과, 커피 원두의 섞임 현상은 로스터의 높이 방향보다는 외형의 반경에 더 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 전산 해석에 근거할 때, 커피 원두가 위로 올라가는 것보다는 반경 방향의 섞임이 회전 속도에 더 민감하게 반응하는 것으로 파악되었기 때문이다.

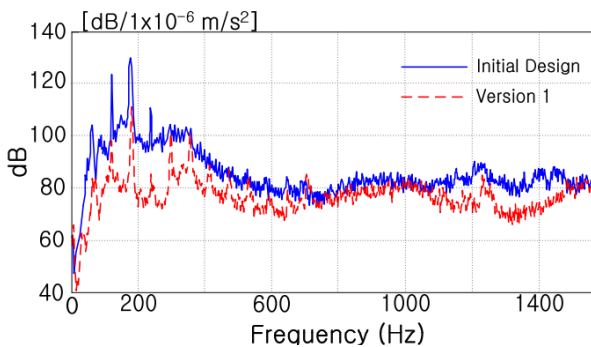
커피 로스터의 내부 공기유동을 변화시키는 version 1을 적용한 결과, Fig. 10(a)와 같이 소음 현상의 개선점을 찾을 수 없었으며, 전체 소음레벨도 0.2 dB(A)의 변화(70.4 dB(A)에서 70.2 dB(A)로 변화)에 불과하였다.



(a) Noise(with coffee bean, initial and version 1 at high speed)



(b) Noise(with coffee bean, initial and version 2 at high speed)



(c) Vibration(with coffee bean, initial and version 2 at high speed)

Fig. 10 Noise and vibration of roaster with different versions

반면에 version 2를 적용한 결과, Fig. 10(b)에서 보이는 바와 같이 1,200 Hz 영역의 피크 값이 1,000 Hz와 1,300 Hz 영역으로 분산되는 효과를 가지며, version 1 대비 100 Hz 영역에서의 소음 피크 값이 현저하게 줄어들었음을 확인하였다.

결론적으로 1.3 dB(A)의 개선(70.4 dB(A)에서 69.1 dB(A)로 감소)효과를 볼 수 있었다.

비록 만족할 만한 소음 개선 효과를 얻을 수는 없었지만, 진동 특성은 Fig. 10(c)와 같이 400 Hz 이하의 주파수 영역에서 뚜렷한 개선 효과를 얻을 수 있었다.

4.2 적용결과의 고찰

커피 원두의 섞임에 대한 전산 해석 및 송풍구 구조변경에 따른 개선안 (version 1, 2)을 적용한 결과, version 1에서는 뚜렷한 소음진동 현상의 개선 효과를 얻지는 못했다. 반면에, version 2에서는 진동 현상의 뚜렷한 개선 효과를 얻었다. 다만 소음 현상 개선은 1.3 dB(A)에 불과하였다.

진동 소음 특성을 반영하는 인자는 회전속도를 좌우하는 모터, 커피 원두가 섞이면서 만드는 현상, 공기를 불어넣어 주는 송풍구 구조 등이 있는데, 모터의 진동 소음 특성은 공산품을 사용하기 때문에 본 연구에서 제어할 수 있는 변수에서 제외하였고, 남은 것은 송풍구 디자인과 커피 원두의 섞임 정도이다.

전산 해석을 통하여 섞임의 현상을 유도하는 것에 대한 정보를 얻을 수 있었으나, 현재의 진동 소음 측정 결과는 원두의 섞임 정도가 송풍구 구조변경과 어떻게 연계되어 디자인 차별화를 유도하였는지를 설명하지 못하고 있다.

따라서 좀 더 정밀한 분석을 위해서는 다른 변수를 통한 소음 진동 결과 데이터를 더 확보하여야 한다. 예를 들면, 모터의 회전속도 변화나 디자인 변경보다는 공기유동을 고려한 밀폐(sealing) 처리 설계 변경이 필요함을 시사한다.

또한 온도 제어 부분을 본 연구에서는 균일한 환경에서 실시하였지만, 원두 로스팅에서 온도 변화를 제어하는 분석도 매우 중요하다. 이는 온도 제어가 현재의 진동 특성을 용납할 수도 있기 때문에 설계 변경에 영향을 줄 수 있다.

커피 원두의 로스팅 효과는 수치화할 수는 없지만 version 2는 시제품에 비해서 진동 특성이 개선되었음을 확인하였다.

5. 결론

재순환 방식의 커피 로스터의 소음 진동 개선을 위하여 전산 해석을 근거한 개선 방안을 도출하고 이를 적용한 실험 결과를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

대형 거피 로스터기기를 소형화함에 있어서 단순 사이즈의 변화는 진동 소음 특성이 전혀 개선되지 않을 수 있음을 확인하였다.

소형화의 크기를 정하기 전에 원두 섞임에 대한 설계 가이드를 얻기 위하여 전산 해석을 실시하였다. DEM 소프트웨어를 사용한 결과 원형(sphere) 모델링보다는 cluster 형태의 비 구형(non spherical particle) 모델이 원심력을 따라 운동하는 커피 원두들의 섞임 운동을 관찰하는데 효과적임을 확인하였다.

커피 로스터 내부의 공기유동 개선으로 소음의 개선은 미미하였지만, 진동 특성에서는 뚜렷한 개선 효과를 보았다. 다만, 원두들이 회전하면서 위아래로 섞이는 과정에서 발생하는 진동 특성과 소음 특성이 일치하는 실험 결과를 얻지 못하여 진동 특성만큼의 소음

개선을 유도하는 설계 요소를 찾지는 못하였다.

커피 원두의 섞임은 회전속도에 단순 영향을 받기보다는 유동 변화를 주는 경계조건에 더 민감한 것으로 보인다. 커피 로스터 내부에 별도의 구조물이 고려되면 섞임 효과가 증대될 수 있음을 확인하였다. 그러나 진동 소음 특성에 유리한 설계 변경인지는 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구의 커피 원두 유동에 대한 전산 해석에 추가하여 열 유동이 커피 원두에 미치는 영향으로서 온도 제어 및 추가적인 소음저감 효과를 나타낼 수 있는 밀폐 처리 등의 설계 개선안은 추후 과제에서 살펴보고자 한다.

후 기

본 논문은 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

References

- [1] Nam, H. Y., 2016, A Study on the Design Development of Coffee Roasting Machine, Masters thesis, Hanbat National University, Republic of Korea.
- [2] Radi, Purwantana, B., Alamsyah, R. P., Prawira, H. D., 2019, Design of Portable Coffee Roaster for Home Industry, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 327 012019, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/327/1/012019>.
- [3] Chiang, C. C., Wu, D. Y., Kang, D. Y., 2016, Detailed Simulation Of Fluid Dynamics and Heat Transfer Coffee Bean Roaster, J. Food Process Eng., 40:2 e12398, <https://doi.org/10.1111/jfpe.12398>.
- [4] Choi, H. M., Namkung, H., Kim, D. W., Park, C. Y., 2015, An Experimental Study on the Automation of Semi-Hot-Air Coffee Roasting Process, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 24:6 687-695, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2015.24.6.687>.
- [5] Tsuji, Y., Tanake, T., Ishida, T., 1992, Lagrangian Numerical Simulation of Plug Flow of Cohesionless Particles in a Horizontal Pipe, Powder Technol., 71:3 239-250, [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)88030-L](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L).
- [6] Di Renzo, A., Di Maio, F. P., 2004, Comparison of Contact-force Models for the Simulation of Collision in DEM-based Granular Flow Codes, Chem. Eng. Sci., 59:3 525-541, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>.
- [7] Norouzi, H., R., Zarghami, R., Sotudeh-Gharebagh, R., Mostoufi, N., 2016, Coupled CFD-DEM Modeling : Formulation,

Implementation and Application to Multiphase Flows, Wiley, Newark.

- [8] Nguyen, H., 2007, GPU Gems 3, Addison-Wesley Professional, NJ.
- [9] O’Sullivan, C., 2011, Particulate Discrete Element Modeling: A Geomechanics Perspective, CRC Press, London.



Jongsung Sa

Professor in the Department of Automotive Engineering, Seoil University. His research interest is the Noise and Vibration of Automotive/Mechanical System.
E-mail: jsthistory@seoil.ac.kr



Taewon Kang

Professor in the Department of Mechanical & Biomedical Engineering, Kangwon National University. His research interest is the Analysis of Mechanical System.
E-mail: jirehk@kangwon.ac.kr