

PC 펠렛의 마이크로웨이브 건조를 위한 에너지 효율 분석

이현민^{*,***}·김재경^{**}·전익식^{**,***†}

^{*}(주)에스에이씨, ^{**}공주대학교 생산기술연구소, ^{***†}공주대학교 일반대학원 기전공학과

Analysis of Energy Consumption for Microwave Drying in PC Pellet

Hyun Min Lee^{*,***}, Jae Kyung Kim^{**} and Euy Sik Jeon^{**,***†}

^{*}SAC Co., Ltd., ^{**}Industrial Technology Research Institute, Kongju National University,

^{***†}Graduate School of Mechatronics Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

Semiconductor inspection equipment makes components using materials with insulating properties for functional inspection including current and voltage of semiconductor parts. A representative insulating material is plastic, and plastic is made of a component through an injection process using plastic pellet. When plastic pellets contain excessive moisture, problems such as performance degradation and product surface defects occur. To prevent this, pre-drying is essential, and the heat convective type is the most applied. However, the heat convective type has a problem of low consumption efficiency and a long drying time. Recently, many studies have been conducted on a drying method using microwaves due to high energy efficiency. In this paper, drying was performed using a microwave for drying PC pellets. Energy consumption and drying efficiency analyzed by set up an experimental apparatus of heat convective, microwave, and hybrid(heat convective + microwave) types. It was confirmed that energy consumption and drying efficiency were high when drying using microwaves, and it was confirmed that the hybrid method improved drying performance compared to the heat convective method. It is expected that the research results of this paper can be used as basic data for drying plastic pellets using microwave.

Key Words : Energy consumption, Microwave drying, Polycarbonate, Pellet

1. 서 론

반도체 검사장비는 부품 생산 시 불량 검출을 위해 테스트를 진행하며 전압 및 전류를 포함한 기능 검사를 수행한다. 기능 검사를 위한 검사 장치의 구성 부품들은 전류 및 전압 등을 측정하기 위해 절연 재료로 제작된다[1]. 대표적인 절연재료로는 플라스틱이 있으며 일반적인 공법으로 사출성형공정을 통해 제조된다. 사출 공정에 사용되는 원료는 펠렛 형태로 공급되며 플라스틱 펠렛은 크게 흡습성 수지와 비흡습성 수지로 나눌 수 있다. 흡습성

수지의 경우 대기 중에 존재하는 수분을 흡수하여 내부에 지니게 된다. 플라스틱 펠렛이 습기를 흡수하여 수분이 과다하게 함유되어 있으면 사출 시 펠렛 용융물의 흐름 특성 변화가 발생하게 되며 이는 품질 저하로 이어져 공정 관리에 문제가 발생한다. 품질 저하는 제품은 단순한 표면 결함에서 최종 제품에서 성능의 변화에 이르기까지 다양한 불량으로 이어질 수 있다[2]. 따라서 가공 및 성형 공정 전 건조가 필수적으로 필요하다.

플라스틱 펠렛의 건조는 대부분 열풍을 이용한 대류 방식으로 적용된다. 열풍 대류 방식은 매질의 외부 온도를 상승시켜 내부로 건조되기 때문에 펠렛의 겉표면만 건조되고 내부는 건조가 덜 되는 현상이 발생한다. 이로 인해 건조시간의 증가 및 건조기 내부의 온도 상승으로

[†]E-mail: osjun@kongju.ac.kr

인한 부품 손상 등이 발생하며 에너지 효율이 매우 낮다 [3]. 마이크로웨이브를 이용한 건조는 에너지 효율이 높아 최근 건조 방식에서 크게 주목받고 있다[4]. 퇴비 및 하수 슬러지 건조, 의약품 건조 등 다양한 산업 분야에 적용되고 있으나 아직 플라스틱 펠렛 건조에 적용되고 있지 않다.

본 논문에서는 PC 펠렛 건조를 위해 마이크로웨이브를 이용하여 건조실험을 수행하였다. 건조 성능 및 에너지 소비 분석을 위해 마이크로웨이브 건조, 열풍대류 건조, Hybrid(열풍+마이크로웨이브)건조 방식으로 실험장치를 구성하여 비교 분석하였다.

2. 시스템 구성

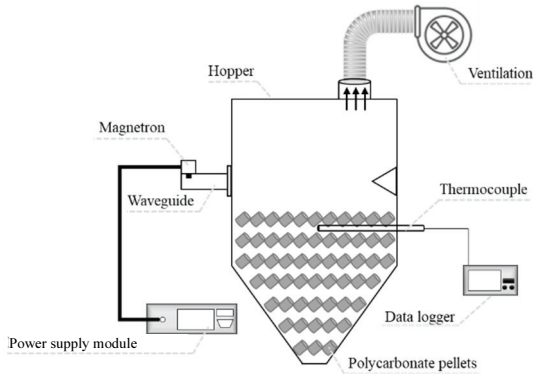
2.1 마이크로웨이브 건조 시스템 구성

마이크로웨이브 건조 실험 장치는 종래의 호퍼 드라이어의 크기를 토대로 제작하였다. 전체 크기는 마이크로웨이브의 손실을 줄이기 위해 마이크로웨이브 파장의 배수로 설정하였으며 호퍼 내부에 마이크로웨이브 조사를 위한 도파관은 호퍼 구조의 중간에 설치하였다. 또한, 호퍼 내부에서 전자기장이 집중되는 것을 방지하고자 큰 형상

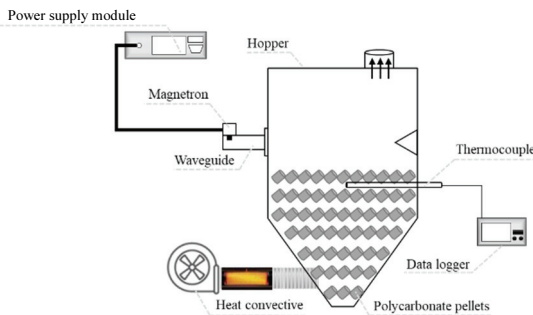


(c) Real image of microwave hopper dryer

Fig. 1. Schematic diagram and real image according to the drying type.



(a) Microwave dryer



(b) Hybrid dryer (Heat convective + Microwave)

의 반사판을 도파관과 마주보도록 설치하였다. 2.45GHz의 1kW 마그네트론 1개를 사용하였으며 이에 맞는 도파관 WR-340을 설치하였다. 내부의 가열된 수분을 밖으로 배출하기 위해 Fig. 1의 (a)와 같이 360m³/h의 배풍량을 갖는 배풍기를 상단에 적용하였다. Fig. 1은 마이크로웨이브를 호퍼 드라이어의 모식도를 나타낸다.

2.2 실험 준비

건조 대상은 엔지니어링 플라스틱 중 대량 생산되고 있는 것 중 하나인 PC(Polycarbonate)로 선정하였다. PC 펠렛의 흡수율이 0.15% 이상 되도록 실험 전 12시간 이상 수분 흡수를 위해 실험실 내 항습기와 25kg의 시료를 배치하여 충분히 수분을 공급하였다. 준비된 펠렛을 호퍼 내 장입한 후 1시간동안 마이크로웨이브를 이용하여 가열 및 건조를 수행한다. 마이크로웨이브는 연속적으로 물체에 조사 시 Hot spot 발생으로 특정 위치에서 급격히 온도가 상승하는 문제가 있다. 이를 방지하기 위한 많은 연구가 수행되고 있으며 그 중 On-off 제어 방식은 특히 특정 위치에서의 온도가 주변온도보다 상당히 높은 경향이 있을 경우 가장 효과적이다[5-7]. 이의 경우, 마이크로웨이브의 전원을 차단하는 동안 전도로 인한 열 에너지의 균등화는 가열 대상 전체에 더 균일한 온도 프로파일을 형성할 수 있다[8]. 선행문헌을 토대로 마이크로웨이브의 On-

off 비율은 1:1로 적용하였다. 마이크로웨이브 방법과 열풍과 마이크로웨이브의 복합 방법은 같은 호퍼구조를 사용하였으며 열풍방식의 경우 산업적으로 사용되고 있는 국내H사의 호퍼드라이어 25kg용량으로 비교실험 및 분석하였다. Hybrid 방식에서 열풍의 온도는 마이크로웨이브로 인한 가열을 고려하여 80°C로 설정하였으며 열풍건조에서는 산업에서 통상적으로 PC를 건조할 때 적용하는 온도(120°C)로 설정하였다.

3. 에너지 소비 분석

3.1 건조효율

건조효율은 건조기의 가장 중요한 지표 중 하나이며, 총 에너지 소비에 대한 수분 증발을 위해 펠렛을 가열하는데 사용되는 에너지의 비율로 정의한다[9].

$$\eta_{Dr} = \frac{Q_{eva} + Q_{temp}}{E_{total}} \quad (1)$$

where, η_{Dr} = drying efficiency (%)

Q_{eva} = energy consumed for moisture evaporation of the PC pellet (kJ)

Q_{temp} = energy consumed for the temperature increment (kJ)

E_{total} = total supplied electrical energy during the drying process(kJ)

장치에 전달되는 전력은 적산전력계를 통해 측정하였다. PC 펠렛의 수분 증발에 소비되는 에너지는 식 2에 의해 계산된다[10].

$$Q_{eva} = h_{fg} w_{eva} \quad (2)$$

where, w_{eva} = the amount of evaporated moisture(kg) from PC pellet

h_{fg} = latent heat of water inside the PC pellet, given by equation (3)[9]

$$h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 (T - 273.16) \quad (3)$$

$$273.16 \leq T(K) \leq 338.72$$

온도 증가에 소비되는 에너지의 양은 식 4를 사용하여 도출할 수 있다[10].

$$Q_{temp} = P_{abs} \Delta t \quad (4)$$

where, P_{abs} = absorbed power for temperature increment of the PC pellet(kW)

Δt = the required time to temperature increase (sec)

3.2 SEC(Specific energy consumption)

SEC는 PC펠렛 건조 공정에서 건조 공정에 공급되는 총 에너지와 건조 중 제거된 물의 양을 고려한 두 값의 관계로 추정한다. SEC는 식 5에 따라 도출할 수 있다[9].

$$SEC = \frac{E_{total}}{m_{eva}} \quad (5)$$

where, SEC = the specific energy consumption(kJ/kg)

E_{total} = total supplied electrical energy during the drying process(kJ)

m_{eva} = the amount of evaporated moisture(kg)

건조 과정에서 공급된 총 전기에너지는 식 6을 이용하여 계산된다.

$$E_{total} = (P_{mg} + P_{bf} + P_{sf}) \Delta t \quad (6)$$

where, P_{Mg} = the electrical power supplied to the magnetron(kW)

P_{bf} = the consumed electrical power by blower (kW)

P_{vt} = the consumed electrical power by ventilator(kW)

4. 결과 분석 및 고찰

건조 실험 결과 마이크로웨이브만을 이용하여 건조 시 최고 온도는 49.2°C였으며, Hybrid 방식에서의 최고 온도는 76.6°C로 나타났다. Fig. 2는 마이크로웨이브 방식과 Hybrid 방식에서의 건조 후 위에서 촬영한 열화상 이미지이며 Fig. 3은 건조 방식에 따른 펠렛의 건조 온도를 나타낸다. 마이크로웨이브의 경우 전기장 분포에 따라 가열된 구간과 가열되지 않은 구간으로 불균일한 온도분포를 확인할 수 있다. Hybrid의 경우 열풍이 투입되는 방향으로 온도가 집중되는 것을 볼 수 있으며 이러한 현상은 시스템을 구성하는데 있어 열풍을 균일하게 만들어주는 구조체를 적용하지 못해 발생한 것으로 사료된다. 일반 열풍 호퍼드라이어에서는 타공망 구조체를 적용하여 균일하게 가열되는 구조를 갖는다. 이에 따라 Hybrid 방식에서의 함수율 분석은 열풍이 적용된 영역(m3, m5)에서만 시료를 채취하여 분석하였다.

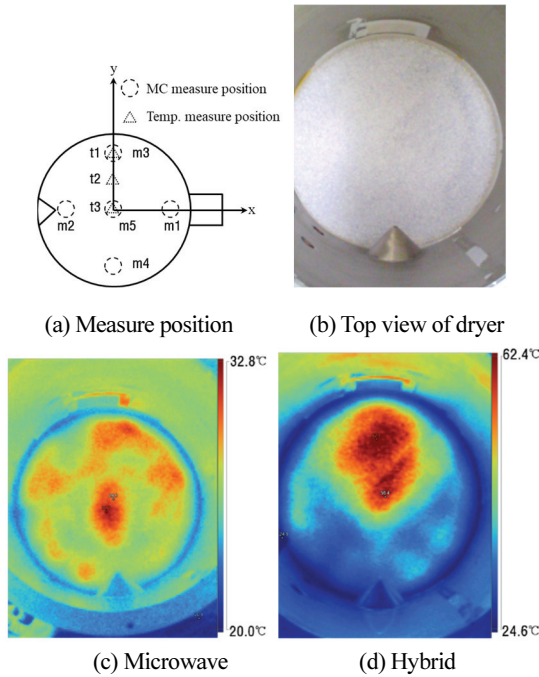


Fig. 2. Thermal image by drying type.

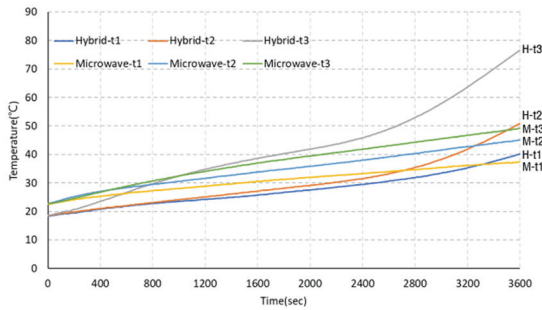


Fig. 3. Drying Temperature of PC pellets by position and type.

사용된 에너지는 Fig 4에서 보여주는 것과 같이 열풍방식을 기준으로 Hybrid 방식이 82%, 마이크로웨이브 방식이 19% 수준을 사용하였다. 건조효율은 Fig 5에서 보여지는 것과 같이 마이크로웨이브 방식이 57.96%로 가장 좋았으며 두번째로 Hybrid 타입이 12.69%로 나타났다. 여기서 주목할 점은 Hybrid 타입이 낮은 열풍온도를 적용하였음에도 건조 효율이 좋아진 것을 확인할 수 있다. Fig 6은 각 건조방식에 따른 SEC를 나타내며 열풍 방식과 하이브리드 방식은 각각 271.13MJ/kg, 281.31MJ/kg으로 비슷한 결과를 확인할 수 있다. 마이크로웨이브 방식은 다른 방식은 이와 비교 시 50% 수준으로 나타났다. 에너지 측면으로는 마이크로웨이브를 적용하는 것이 효율적이거나 마이크

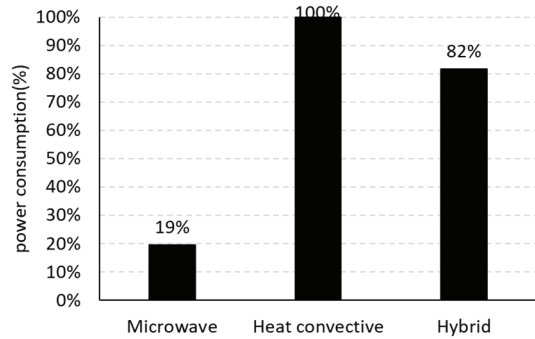


Fig. 4. Power consumption by drying type.

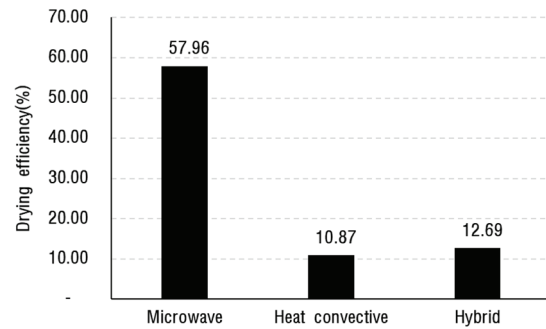


Fig. 5. Drying efficiency by drying type.

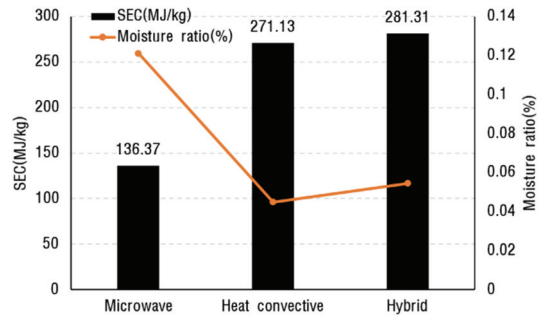


Fig. 6. Specific energy consumption and moisture ratio by drying type.

로웨이브만을 이용한 건조 시 Fig 6에 나타난 건조 후 함수율 결과와 같이 상대적으로 긴 건조시간을 가져가야 한다. 사출 공정에 PC 펠렛을 적용하기 위해서는 0.03-0.05%의 함수율을 가져가야 하므로 더 오랜 시간 건조를 해야 하는 문제가 발생한다.

열풍방식은 어느정도 최적화된 시스템(호퍼의 크기, 균등가열, 열풍온도 등)을 사용하였으며 마이크로웨이브 및 Hybrid 방식은 건조에 대한 가능성 및 상대적 비교를 위

해 제작된 실험 장치로 최적화되지 않은 상태이다. 결과적으로 마이크로웨이브를 이용한 건조 시 열풍이나 건조된 대류를 이용하여 복합적으로 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 또한, Hybrid 방식에서의 실험장치 최적화 및 마이크로웨이브 On-off 비율, 열풍온도 등 공정조건에 따른 건조 효율과 SEC를 분석하여 최적조건 도출 시 더 큰 건조 성능을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 엔지니어링 플라스틱인 PC 펠릿에 대하여 마이크로웨이브를 이용한 건조와 에너지 소비에 대해 실험적으로 분석하였다.

첫째, 호퍼 구조를 갖는 마이크로웨이브 드라이어 실험 장치를 구성하였으며, 열풍, 마이크로웨이브, 마이크로웨이브+열풍 방식을 적용한 건조 실험을 하였다.

둘째, 실험결과 마이크로웨이브를 이용한 건조방식에서 가장 높은 건조효율(57.96%) 및 가장 낮은 SEC(136.37MJ/kg)을 확인할 수 있었다.

셋째, 마이크로웨이브만을 적용한 방식에서 최종 함수율이 상대적으로 높아 더 긴 건조시간이 소요되는 문제를 확인하였으며, Hybrid 방식은 종래의 열풍 방식과 비교하여 건조 효율(10.87% → 12.69%)이 높아지는 것을 확인하였다.

향후, Hybrid 방식에서 더 높은 건조 효율을 얻기 위해 공정조건에 따른 건조성능 분석과 이를 바탕으로 한 최적공정조건에 관한 응용 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 이 논문은 2019년 중소벤처기업부의 기업연계형 연구개발인력양성 사업(S2755803)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Seungryeol Yoo, "System Design for High-speed Visual Inspection of Electronic Components", JSDT, Vol. 11, No. 3, pp.39-44, 2012.
2. J.K. Kim, H.S. Part, K.S. Lee, E.S. Jeon, "Long Life

- Design of SSD Test Gender by Reducing Ejecting Force", JSDT, Vol. 19, No. 4, pp.139-144, 2020.
3. H. F. Giles Jr, J. R. Wagner J and E. M. Mount III, Extrusion. "The Definitive Processing Guide and Handbook", Norwich, NY: William Andrew, 2005. ISBN 0-8155-1473-5.
4. Sang-Hyeon Bae, Min-Gyo Jeong, Ji-Hong Kim, and Wang-Sang Lee, "A continuous power-controlled microwave belt drier for improving heating uniformity", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 27, No. 5, pp. 527-529, 2017.
5. H. Darvishi, M. Azadbakht, A. Rezaeiasl, A. Farhang, "Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating", Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 12 (2013), pp. 121-127.
6. Pedro Plaza-Gonzalez, Juan Monzo-Cabrera, J. M. Catala-Civera and D. Sanchez-Hernandez, "Effect of Mode-Stirrer Configurations on Dielectric Heating Performance in Multimode Microwave Applicators", IEEE TMTT, Vol. 53, No.5, pp.1699-1706, 2005.
7. S. Watanabe, M. Karakawa, and O. Hashimoto, "Computer simulation of temperature distribution of frozen material heated in a microwave oven", IEEE Trans. Microw. Theory Techn., Vol. 58, No. 5, pp. 1196-1204, 2010.
8. T. Sun, "Key models of heat and mass transfer of asphalt mixtures based on microwave heating", Drying Technol., Vol. 32, No.13, pp. 1568-1574, 2014
9. Sundaram Gunasekaran, Huai-Wen Yang, "Optimization of pulsed microwave heating", Journal of Food Engineering, Vol. 78, No. 4, pp. 1457-1462, 2007.
10. A. Motevali, S. Minaei, A. Banakar, B. Ghobadian, M.H. Khoshtaghaza, "Comparison of energy parameters in various dryers", Energy Convers Manage, Vol. 87, pp. 711-725, 2014.
11. W. Jindarat, P. Rattanadecho, S. Vongpradubchai and Y. Pianroj, "Analysis of energy consumption in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB)", Dry Technol. Vol. 29, No. 8, pp. 926-938, 2011.

접수일: 2021년 10월 22일, 심사일: 2021년 11월 25일,
계재확정일: 2021년 11월 27일