

## 티타늄 합금 폐기물의 연소 특성에 관한 실험적 연구

### Experimental study on the combustion characteristics of titanium alloy

이준식<sup>1</sup>, 남기훈<sup>2\*</sup>

Jun-Sik Lee<sup>1</sup>, Ki-Hun Nam<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Most titanium alloy waste with cutting oil was discarded without recycling process so that it can be caused by metal and oil fires. However, there is no fire management system and studies on the titanium or titanium alloy waste in spite of high fire risk. The purpose of this experimental study is to identify the fire risk of the titanium alloy waste with cutting oil. We collected the 120g waste which was made in the biomedical titanium alloy cutting process. The waste was burned and conducted thermal image analysis with infrared camera. The experimental results which illustrated the process, characteristics, and trends of fire are presented. Firstly, the cutting oil was burned and partially the titanium alloy waste was burned. The maximum temperature of the fire was more than 650°C in some specific spots. These results means when a lot of titanium alloy waste with cutting oil was ignited, this fire could connect the titanium fire. In other words, the fire has a flammable liquid fire and combustible metal fire at the same time. The experimental study could be used fire prevention, response, and investigation of the titanium alloy waste.

*Keywords : Combustible metal fire, Fire safety, Fire prevention, Titanium, Machine safety*

---

1 정회원, 창신대학교 항공기계공학과  
2\* 정회원, 교신저자, 창신대학교 소방방재공학과  
E-mail: khnam@cs.ac.kr

1 Dept. of Aeronautical & Mechanical Engineering, Changshin University  
2\* Corresponding Author, Dept. of Fire & Disaster Prevention Engineering, Changshin University

## 1. 서 론

티타늄 합금은 경량이면서 높은 강도, 내부식성, 그리고 고온에서 그 성질이 변하지 않는 특성 등을 가지고 있어 우주, 항공, 의료 산업에서 주요 부품에 많이 사용되고 있다[1,2]. 하지만 티타늄 합금의 주성분인 티타늄은 가연성 금속으로 금속화재를 유발할 수 있는 금속이다. 특히, 티타늄 합금 절삭가공 후 발생하는 티타늄 합금 폐기물은 입자의 크기가 작아지고 금속화재를 유발할 수 가능성이 높아지게 된다. 일반적으로 가연성 금속의 경우 입자의 크기에 작을수록 화재 위험이 증가하며 입자의 크기에 따라 분진폭발의 위험을 동반하게 된다.

또한, 티타늄 합금 절삭 가공 후 발생하는 티타늄 폐기물은 절삭유가 묻어 있는 상태로 별도의 처리 과정 없이 폐기물 업체가 수거, 보관, 최종 폐기 또는 수출하는 과정을 거치게 된다. 이때 티타늄 합금 폐기물은 가연성 금속으로서의 화재 위험은 물론 절삭유의 화재에 의한 가연성 금속의 화재 위험을 동시에 갖게 된다. 하지만 이러한 티타늄 합금 폐기물의 화재 위험성에도 불구하고 국내에서는 금속화재에 대한 법적 기준은 물론 폐기물에 대한 처리, 관리, 화재예방 등에 대한 기준조차 마련되어 있지 않다. 더욱이 화재가 발생할 경우 금속화재와 유류화재가 동시에 발생하는 상황으로 전개될 가능성이 높아 현재 개발되어 있는 수계, 가스계 등의 소화약제로는 진화가 불가능한 상황이다. 또한, 절삭유에 포함된 티타늄 합금 폐기물에 대한 화재 위험성 및 절삭유와 미세한 티타늄 합금 폐기물이 화재의 확산에 미치는 영향에 대한 연구조차 진행되지 않고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 의료용으로 사용되는 티타늄 합금 절삭가공 과정에서 발생하는 티타늄 합금 폐기물에 대한 화재 위험성을 평가하기 위해 화재 실험을 진행하였다. 티타늄 합금 폐기물에 점화원

을 사용하여 연소 실험을 진행하였으며 열화상 카메라를 이용하여 화재의 열 특성을 분석하였다. 본 연구의 결과를 통해 티타늄 합금 폐기물의 화재 예방 및 대응에 필요한 방안을 도출하였다.

## 2. 이론적 배경

티타늄 합금은 낮은 절삭성으로 인해 가공이 어려워 난삭재로 분류되고 있으며 가공 시 약 1,100°C 이상의 높은 열이 발생하게 된다[1]. 절삭가공 시 이러한 높은 열을 낮추고 윤활성을 높이기 위해 절삭유가 사용되고 있다. 하지만 절삭가공 시 발생하는 높은 열은 절삭유 화재를 발생시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 기기의 화재예방에 관한 기준으로 한국공작기계공업협회 규격의 방전가공기 화재예방안전기준 (SPS-KOMMA 1 K1-1225)에서는 방전가공기에 자동소화장치를 구비하도록 하고 있다[3]. 방전가공기의 자동소화장치에 대한 성능 기준을 보면 화재 감지방식은 온도 또는 연기감지 방식으로 온도감지의 경우

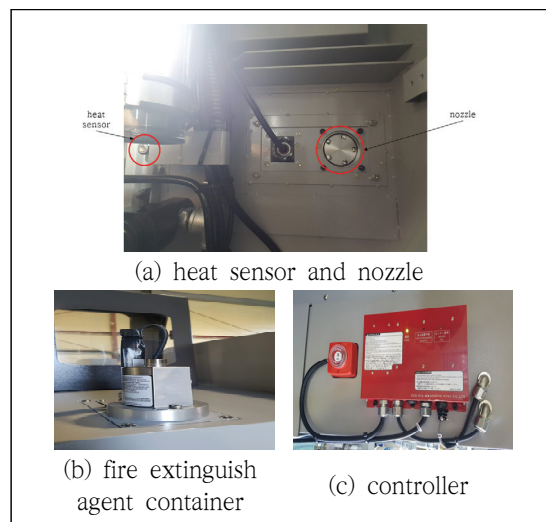


Fig. 1 Automatic fire extinguishing systems

75°C 이하에서 작동하도록 하고 있다. 소화약제는 인화된 절삭유에 대한 충분한 소화능력이 있는 것을 사용하도록 규정하고 있다. 일본의 경우도 국내와 마찬가지로 방진가공기의 화재 예방에 관한 기준에서 방진가공기계의 가공액에 착화하는 경우를 대비하여 Fig. 1. 과 같은 자동소화장치를 갖추게 하고 있다.

티타늄은 전이금속으로 가연성 금속에 포함되며 이러한 가연성금속 화재를 금속화재로 구분하고 있다. 금속화재는 높은 온도로 인해 화재의 진화가 어렵고 일반적인 수계 또는 가스계 소화약제를 사용할 수 없어 화재 발생 시 많은 위험을 동반하는 화재이다. 한국의 경우 금속화재에 대한 분류 기준 및 관련 법령이 마련되어 있지 않다. 이로 인해, 금속화재 예방 및 대응을 위한 시스템은 물론 금속화재용 소화약제 조차 개발되어 있지 않은 실정이다.

반면, 미국의 경우 29 CFR 1910.157과 National Fire Protection Association (NFPA)의 NFPA Code 10 을 통해 금속화재용 소화기에 대한 기준을 제시하고 있다. 또한, NFPA Code 484에서는 알루미늄(Al), 리튬(Li), 마그네슘(Mg), 나트륨(Na), 칼륨(K), 탄탈륨(Ta), 티타늄(Ti) 7 종류의 가연성 금속의 화재에 대한 예방, 대응, 각 금속별 적응 소화약제 등을 제시하고 있다[4-6].

### 3. 실험방법

절삭유가 포함된 티타늄 합금 폐기물의 화재 특성 분석을 위해 데이터 로거(model GL840), 열전대(K-type, 0.32 mm, -270°C~1,372°C), 열화상카메라(Testo T890, 열감도 0.04°C~30°C), 비디오 레코더를 활용하여 실험 장치를 구성하였다. 열전대를 이용하여 화재 실험을 위한 용기 표면

온도를 측정하였으며 열화상 카메라와 비디오 레코더를 이용하여 연소과정을 촬영하였다(Fig 2.).

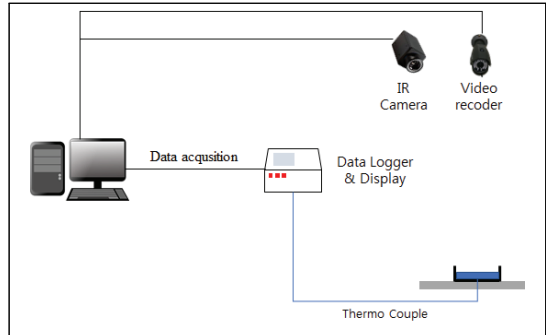


Fig. 2 Experimental setup for titanium alloy waste fire

티타늄 합금 폐기물 연소 과정에서 연소 확대 방지를 위해 사각형 팬(60cm(가로) × 60cm(세로) × 3cm(높이))위에 원형 팬(23cm(지름), 2cm(높이))을 설치하여 티타늄 합금 폐기물을 올려놓았다(Fig 3.). 티타늄 합금 폐기물 120g을 점화장치를 이용하여 착화시켜 연소 특성을 열화상 카메라를 활용하여 분석하였다.



Fig. 3 The photo of titanium alloy waste(120g) waste fire

일반적으로 금속화재의 온도는 약 2,760°C~4,700°C 범위를 나타낸다[7]. 하지만 본 연구에서 사용한 열화상 카메라의 온도측정 범위는 -20°C~1200°C이며, 온도측정 구간을 0°C~650°C와

651~1,200℃까지 설정해야 하는 제약이 있다. 본 연구에서는 초기 화재 발생 시 화재의 특성을 분석하기 위해 온도측정 범위를 0℃~650℃ 설정하였으며 610초 동안 측정하였다.

티타늄 합금 폐기물은 당일 절삭가공 과정에서 발생한 폐기물을 수거하여 실험 재료로 사용하였다. 절삭유의 경우 방전기기에 투입하여 약 30일(약12시간/일)을 사용한 것으로 일반적으로 절삭유는 기기에 넣어 순환 과정을 거쳐 일정기간 동안 사용되고 있다. 사용하지 않은 절삭유와 약 30일 사용한 절삭유에서 큰 차이점을 나타내지 않았다. 절삭유(Blasomill 22)는 합성오일과 첨가제 혼합물로 물에 불용해성이며 동점성은 40℃ 기준으로 22mm<sup>2</sup>/s, 인화점은 195℃, 점화온도는 200℃ 이상의 특성을 가지고 있다(Table 1.).

Table 1. Characteristic of cutting oil in this study

Product name	Blasomill 22
Solubility(water)	Infusibility
Kinematic	22mm <sup>2</sup> /s at 40℃
Flash point	195℃
Ignition temp.	over 200℃

#### 4. 실험결과

점화장치를 사용하여 티타늄 합금 폐기물에 점화 시작 약 9초 후 본 실험에 사용된 적외선 카메라의 최대 측정온도인 650℃에 도달하였다. 20초 후 최대온도가 감소하였으며 650℃ 이하를 유지하면서 지속적으로 온도가 감소하였으며 약 9분 후 급격한 감소를 보였다.

실험 시작 전 열전대를 사용하여 티타늄 합금 폐기물을 담은 용기의 온도는 27.2℃였으며 점화 후 즉각적인 발화가 시작되었다(Fig. 4.). 일반적으

로 유류의 연소는 증발 연소로 액체상태의 가연물이 증발하여 기화하고 기화된 가연물에 점화가 일어나 연소가 진행 된다.

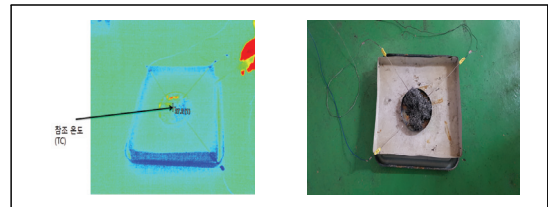


Fig. 4 Thermal(left) and optical(right) image of titanium alloy waste

Fig. 5.과 Fig. 6. 에서 최대온도 구간인 0초~21초 구간의 온도변화를 보면 점화 후 온도의 급격한 상승을 보였으며 9초~10초, 13초~19초 구간에서 열화상 카메라의 최대 측정 온도인 650℃에 도달한 것으로 나타났다. 4초 구간에서는 화염의 최대 온도는 406.4℃, 5초 구간에서는 559.6℃, 6초 구간에서는 481.7℃, 7초 구간에서는 584.1℃, 8초 구간에서는 587.7℃, 9초 구간에서는 열화상 카메라 측정최대 온도인 650℃에 도달하였다.

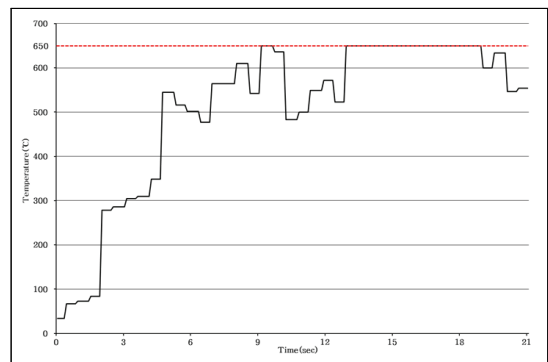


Fig. 5 Titanium alloy fire temperature changes (0sec~21sec)

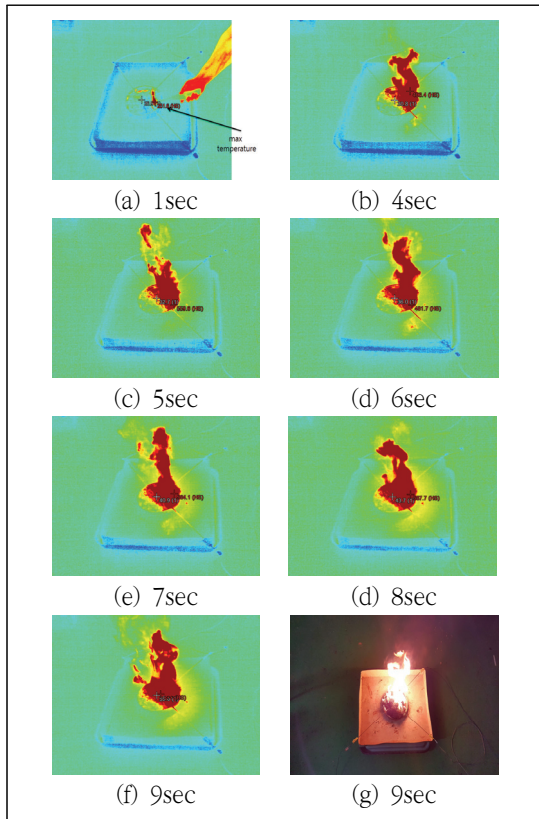


Fig. 6 Thermal((a)~(f)) and optical((g)) images of titanium alloy waste during firing

Fig. 7. 은 바닥에서 부터 수직방향으로 높이에 따른 화염의 온도 변화를 보여주고 있다. 최대 온도 지점인 9초 구간에서 화염의 온도가 불꽃의 하단 부분에서 가장 높게 나타나며, 위쪽으로 갈 수록 온도는 내려간다. 이는 불꽃의 타 구간의 온도가 200℃ 이하를 유지하고 있는 것과는 대조적이다. 또한, 연소과정에서 티타늄 합금 폐기물의 급격한 연소는 나타나지 않았지만 실험과정에서 티타늄이 연소하는 현상인 밝은 빛이 0초~21초 구간에 부분적으로 관찰되었다. 이러한 현상은 티타늄 폐기물이 쌓여 있는 부분에서 질삭유 연소 외에 부분적으로 입자의 크기가 작은 티타늄 폐기물의 연소가 이루어졌음을 의미한다.

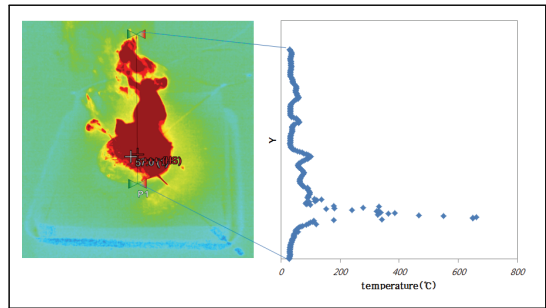


Fig. 7 Thermal image and temperature profile with y-axis location



Fig. 8 The photo of burned titanium alloy waste

본 실험에서 사용된 티타늄 합금 폐기물은 금속화재(Fig. 8.)로까지 이어지는 않았지만 티타늄 합금의 입자크기, 형태에 따라 연소가 나타날 수 있는 가능성이 높다고 할 수 있다.

결론적으로 다량의 티타늄 합금 폐기물에서 화재가 발생할 경우 티타늄 금속화재로 이어질 수 있다는 것을 의미한다. 특히, 티타늄 폐기물의 경우 질삭유가 묻어 있는 상태로 쉽게 연소할 수 있으며 이로 인해 금속화재까지 이어질 수 있다.

## 5. 고찰 및 결론

본 연구에서는 의료용 티타늄 합금 폐기물의 화재특성을 분석하기 위해 화재 실험을 진행하였다. 실험결과 티타늄 합금 폐기물에 점화 후 열화



상 카메라를 이용한 열화상분석에서 측정 최고 온도 650℃ 이상의 온도가 나타났다. 또한, 최고 온도 지점의 화염 분석에서 특정 부분에서만 온도가 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 연구결과로 볼 때 점화원에 의한 절삭유의 인화 또는 열 축적에 의한 발화로 인해 유류화재가 발생할 수 있으며 이로 인해 금속화재가 동시에 발생할 수 있는 가능성이 매우 높은 것으로 판단할 수 있다.

이러한 유류화재와 금속화재가 결합된 형태의 화재는 일반적인 소화약제 및 화재 진화 방법으로는 진화가 어려우며 마른모래가 유일한 대응방안이다. 하지만 마른모래의 경우도 수분이 포함될 경우 사용할 수 없으며 대부분 지자체에서 관리하고 있지만 관리 및 화재 발생 시 마른모래의 공급에 대한 시스템이 갖추어져 있지 않은 실정이다.

이에 무엇보다도 티타늄 합금 폐기물의 보관, 이송, 최종 폐기 과정에서 점화원에 대한 관리가 필요하다. 티타늄 합금의 경우 입자가 미세해지면서 금속화재의 위험이 증가하지만 절삭유가 표면에 묻어 있는 상태로 금속화재로 이어질 수 있는 가능성이 낮다. 하지만 절삭유의 경우 인화점이 195℃로 쉽게 연소가 시작된다. 이러한 절삭유의 연소는 결국 티타늄 합금 폐기물이 연소할 수 있는 조건을 형성하게 되고 결국 금속화재까지 이어지게 된다. 즉, 티타늄 합금 폐기물의 화재 예방은 폐기물의 보관, 이송, 최종 폐기 과정에서 연소할 수 있는 환경적 요소 및 점화원에 관리를 통해 이루어 질 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2017학년도 창신대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 창신-2017-교내-45)

## 참고문헌

- [1] Rahman, M., Zhi-Gang, W., and Yoke-San, W., "A Review on High-Speed Machining of Titanium Alloys", *International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 49, no. 1, pp. 11-20, (2006).
- [2] Jin-Woo Kim, Jung-Sub Kim, & Sang-won Lee., "Experimental Characterization of Turning Process of Titanium Alloy Using Cryogenic Cooling and Nanofluid Minimum Quantity Lubrication", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 185-189, (2017).
- [3] Korea Machine Tool Manufacturers' Association, "Electric discharge machines-safety standard for fire prevention(SPS-KOMMA 1 KI-1225)", Gwangmyeong : Korea Machine Tool Manufacturers' Association, (2009).
- [4] Occupational Safety and Health Administration, "OSHA 29 CFR 1910.157 Portable fire extinguishers" Occupational Safety and Health Administration, (2002). [Online]. <https://www.osha.gov>
- [5] National Fire Protection Association, "NFPA 10 Standard for portable fire extinguishers", Massachusetts : National Fire Protection Association, (2018).
- [6] National Fire Protection Association, "NFPA 484 Standard for combustible metals", Massachusetts : National Fire Protection Association, (2015).
- [7] Eugene Meyer, "Chemistry of hazardous materials", Boston : Pearson Education Inc., (2013).

(접수: 2018.10.11. 수정: 2019.02.14. 게재확정: 2019.03.05.)