

필터 형상과 자력 특성이 용접 불티 포집 효율에 미치는 영향 분석

Analysis on the Effects of Filter Shape and Magnetic Force on the Collecting Efficiency of Welding Spatter

신연제¹ · 소수현² · 유우준^{3*}Yeon-Je Shin¹, Soo-Hyun So², Woo-Jun You^{3*}¹Research Engineer, Fire Centre, Korea Conformity Laboratories, Cheongju, Republic of Korea²Professor, Department of fire safety, Kyungil University, Gyeongsan, Republic of Korea³Professor, Department of fire safety, Kyungil University, Gyeongsan, Republic of Korea*Corresponding author: Woo-Jun You, wjyou@kiu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: In this study, fundamental research was conducted to capture sparks generated during the arc welding process. **Method:** To this end, a mock-up collection device was developed, consisting of a blower for suction, a nozzle, and a filter and magnet at the suction point. To analyze the correlation between the shape of the filter and its magnetic properties, the porosity and pore size of both carbon filters and Colgate filters were quantified under conditions of a welding machine capacity of 1,800W and a welding time of 70s. The collection efficiency of sparks was calculated for magnetic strengths of 2.6, 3.4, and 4.05kgf. **Result and Conclusion:** As a result, empirical formulas were derived for the blower's suction capacity, magnetic strength, porosity, and pore diameter for capturing sparks, with experimental results confirming consistency within $\pm 10\%$. The findings of this study are expected to provide a quantitative design approach for collection devices that can minimize the risk of fire spread associated with welding operations at construction sites.

Keywords: Welding Spatter Collector Device, Porosity of Filter, Magnetic Force, Welding Fire, Welding Spatter and fume

요약

연구목적: 본 연구에서는 아크 용접 과정에서 발생하는 불티를 포집하기 위한 기초 연구를 수행하였다. **연구방법:** 이를 위해서 불티를 흡입하기 위한 송풍기와 노즐 그리고 흡입부의 필터와 자석으로 구성된 목업 포집 장치를 제작하였다. 필터의 형상과 자력 특성에 따른 상관관계를 분석하기 위하여 용접기의 용량 1,800W, 용접 시간 70s인 조건에서 카본필터와 콜게이트 필터 각각의 기공률과 기공의 크기를 정량화하였으며, 자력 크기 2.6, 3.4, 4.05kgf인 경우 불티의 포집 효율을 산출하였다. **연구결과 및 결론:** 그 결과 불티를 포집하기 위한 송풍기 흡입 용량, 자력의 크기, 기공률 그리고 기공 직경에 대한 경험식을 도출하였으며, 실험 결과가 $\pm 10\%$ 이내에서 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 건설 현장에서 용접 작업에 따른 화재 확산 위험을 최소화할 수 있는 정량화된 포집기 설계 방안을 제시하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어: 불티포집장치, 필터 기공율, 자력, 용접 화재, 용접불티 및 용접흡

Received | 16 July, 2024

Revised | 23 September, 2024

Accepted | 23 September, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

서론

아크 용접(Arc welding)은 용접봉과 모재 사이에 아크열을 발생시켜 용접봉을 용융하여 다양한 금속 소재를 접합하는 원리이며, 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있는 용접 방식 중 하나이다(Hojjati et al., 2004; Hashemabad et al., 2016; Liu et al., 2018). 하지만 용접 과정에서 발생하는 용접 흠(Welding fume)에 의해서 인체 유해성 물질이 발생하며, 작업 지점 주위의 가연물로 비산되는 용접 불티(Welding sparks)에 의한 화재 사고 및 위험성이 보고되고 있다(Narasimhan et al., 2019; Urban, 2017; National Fire Agency, 2023). 이러한 이유로 한국산업안전보건공단에서는 용접 작업 현장에서 용접 흠에 의한 인체 유해성과 불티에 의한 화재 위험성을 예방하기 위해서 「용접작업 보건 관리 지침」 및 「용접·용단 작업 시 화재예방에 관한 기술지침」을 배포하였으며, 재해 발생원인과 예방대책 그리고 작업 형태별 관리대책 등을 제시한 바 있다(Ryu, 2015; Lim, 2023).

또한, 용접 흠을 제거하기 위한 연구사례는 송풍기(blower)에 의한 강제 흡입 방식과 정전기 집진(Electrostatic precipitators) 방식으로 구분할 수 있다. Ha 등은(Ha, 2007) 밀폐 공간에서 팬(Fan) 방식을 사용하여 환기 방식에 따른 유해가스 농도 및 저감 효율을 분석하였으며, 효율적인 배기 팬의 크기와 용량 그리고 환기 형태 등을 제시한 바 있다. Xu 등은(Xu et al., 2016) 정전식 집진기를 사용하여 포집된 입자를 배출하지 않고 포집장치 내부의 금속 전극(Electrode)에 부착하기 위한 전극의 형상, 온도 그리고 전력 변화에 따라서 0.2-120 μm 크기의 미립자 포집율의 상관 관계를 실험적으로 분석하였다.

기존 연구사례와 같이 유해가스 저감을 고려한 흠 집진기의 설치 권고 및 관련 연구는 활발하게 수행되고 있지만 화재 위험성 저감을 위한 비산 불티 포집기 설계 방안에 관한 연구는 매우 부족한 것이 현실이다. 특히, 불티의 경우 기초 실험을 통해서 고온의 환경에서도 자력이 형성되는 것을 확인하였으나 자력의 크기 및 설치 거리에 따라서 불티 포집의 성능향상에 대한 기초 실험 자료는 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 강제 흡입 방식의 송풍기를 사용하여 다공성 매질 필터와 자력의 크기 그리고 설치 거리를 고려한 기초 실험을 통하여 포집 효율 상관관계를 분석하고자 한다.

이론적 고찰 및 실험조건

이론적 고찰

Fig. 1은 불티 포집 방식을 나타낸 개략도이다. 그림에서 보듯이 용접기에 전력을 인가하여 용접봉이 용융되면 모재(base metal)에 부착되지 않은 불티가 주위로 비산되는 현상이 발생한다. 이러한 조건에서 자력이 부착된 강제 흡입 방식의 포집기를 작동하게 되면 불티의 총 포집력(F_{total})은 식(1)과 같이 송풍기에 의한 흡입력(F_{bl})과 자력에 의한 흡입력(F_{ma})로 나타낼 수 있다.

$$F_{total} = F_{bl} + F_{ma} \quad (1)$$

여기서 F_{bl} 은 실제 산업현장에서 작업자의 건강을 고려하여 포집기에 필터를 삽입하여야 하지만, 필터를 삽입할 경우 내부 차압이 증가하여 유속이 감소하게 된다. 따라서 F_{bl} 은 필터의 기공률 변화를 고려한 기존 연구사례를 적용하였으며, 식(2)와 같이 도출할 수 있다(Shin et al., 2021).

$$F_{bl} = \rho A_{bl} u_{bl}^2 \tag{2}$$

여기서 ρ , A_{bl} 그리고 u_{bl} 은 각각 공기의 밀도, 필터의 기공 면적 그리고 포집기 유속을 의미하며, 본 연구에서 사용한 A_{bl} 는 필터 3종의 기공률(ε)에 대해 Fig. 2와 같이 산출하였으며, Table 1에 필터의 형상에 따른 ε 의 결과를 정리하여 나타내었다.

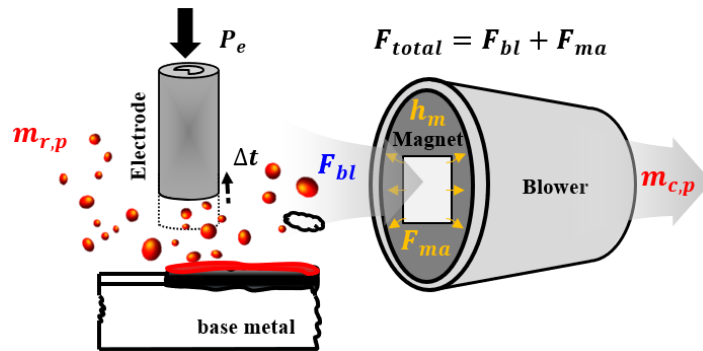


Fig. 1. Schematic of welding fume & spatter extraction system, assumptions for analysis of the collection force(F_{total})

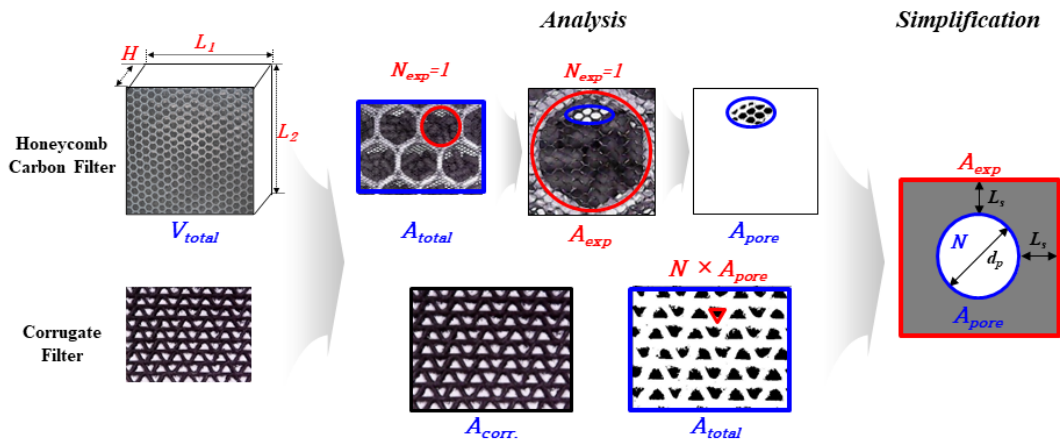


Fig. 2. Simplification method of carbon and corrugate filters

Table 1. Porosity of carbon and corrugate filters by simplification method

Filter	Carbon(1)	Carbon(2)	Corrugate
ε [%]	6.94	4.60	28.55

식(1)의 F_{ma} 는 자력의 크기(G)와 자석으로부터 이격된 거리(h_{ma})에 따라서 달라질 수 있기 때문에, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{ma} = f(G, h_{ma}) \tag{3}$$

실험조건

Fig. 3<a>는 본 연구에서 사용한 불티 발생 실험 장치 개략도로 용접 불티의 총 발생량($\Delta m_{p,total}$)은 용접 전력(P_e), 용접 시간(Δt)에 따라서 식(4)과 같이 관계식을 적용하였다(Shin et al., 2020).

$$\Delta m_{p,total} = (2.9 \times 10^{-5} + 1.23 \times 10^{-6} \times \Delta t) \times P^{1.289_e} \tag{4}$$

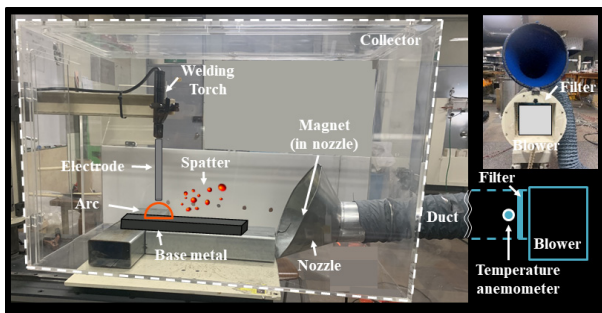
여기서 P_e 는 1,800W이며, $\Delta t = 70s$ 인 조건에서 가우스 미터(Gauss meter)를 사용하여 자석과의 거리 변화에 따른 자력의 크기를 계측하였다. 포집기 주름관 중앙에는 열 유속계(Temperature anemometer)를 사용하여 필터의 형상과 포집기 용량 변화에 따른 덕트 내부 유체의 온도와 유속을 계측하였으며, 본 연구에서 사용한 실험 장치의 규격은 Table 2와 같다.

포집된 불티의 질량($m_{c,p}$)은 Fig. 3에서 보듯이 송풍기로 흡입된 질량($m_{bl,p}$) 과 자석에 부착된 불티 질량($m_{ma,p}$)의 합으로 식(5)와 같다.

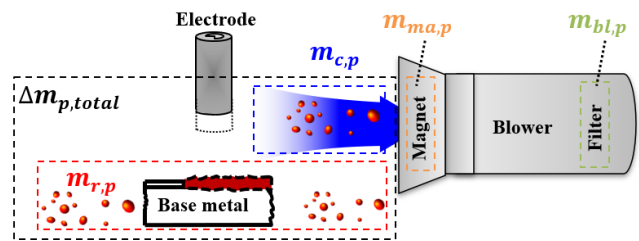
$$m_{c,p} = m_{bl,p} + m_{ma,p} \tag{5}$$

따라서 포집기의 효율($\eta_{c,p}$)은 용접 불티의 총 발생량($\Delta m_{p,total}$)에 대해서 송풍기와 자력에 의해서 포집된 불티의 질량($m_{c,p}$) 비를 백분율로 나타낸 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{c,p} = \frac{m_{c,p}}{\Delta m_{p,total}} \times 100\% \tag{6}$$



<a> Welding collector apparatus



 Analysis method of collecting efficiency

Fig. 3. A picture of welding collector apparatus and schematic diagram of analysis method of collecting efficiency

Table 2. Specification of experiment apparatus

Measurement	Specification
Welding machine	Output current (20-220) A, Rated input voltage 220 V, Electric power 0-2.5 kW Rated duty cycle 60%, Model : Rolwal MMA-200E
Blower	Capacity 1,051 W, Inlet diameter 0.12 m, RPM 3200
Temperature Anemometer	Max. measurement range (T 500°C, u 50m/s), Accuracy (T 1%, u ±1.5% F.S) Model : KANOMAX anemometer 6162
Precision balance	Max. load 320 g, Accuracy 0.1 mg, Model : PX224KR
Magnetic meter	Max. Range 30,000(DC) 15,000(AC) G, Model : MG3002

용접 불티 포집장치의 효율 산출

Fig. 4<a>는 2.6kgf, 3.4kgf 그리고 4.05kgf인 자력의 크기(G) 각각에 대해서 이격거리(h_{ma}) 변화에 따른 자력에 의한 흡입력(F_{ma})를 측정된 결과이다. 그림에서 보듯이 동일한 h_{ma} 에 대해서 F_{ma} 는 G에 비례하며, $h_{ma} > 3\text{cm}$ 이상인 경우 F_{ma} 의 값은 0kgf에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 G와 h_{ma} 에 대한 F_{ma} 의 관계는 오차범위 ±5%에서 식(7)과 같은 관계를 갖는 것으로 나타났다.

$$F_{ma} = a_1 \times b_1^{h_{ma}} \tag{7}$$

여기서 a_1, b_1 은 실험 상수를 의미하며, Fig. 4와 같이 a_1 과 G의 관계는 오차범위 ±1 % 이내에서 $b_1 = 0.250$ 로 일정할 때 식(8)과 같은 관계로 실험식을 표현할 수 있다.

$$F_{ma} = (1.036 G^{0.948} \times 0.250^{h_{ma}}) \tag{8}$$

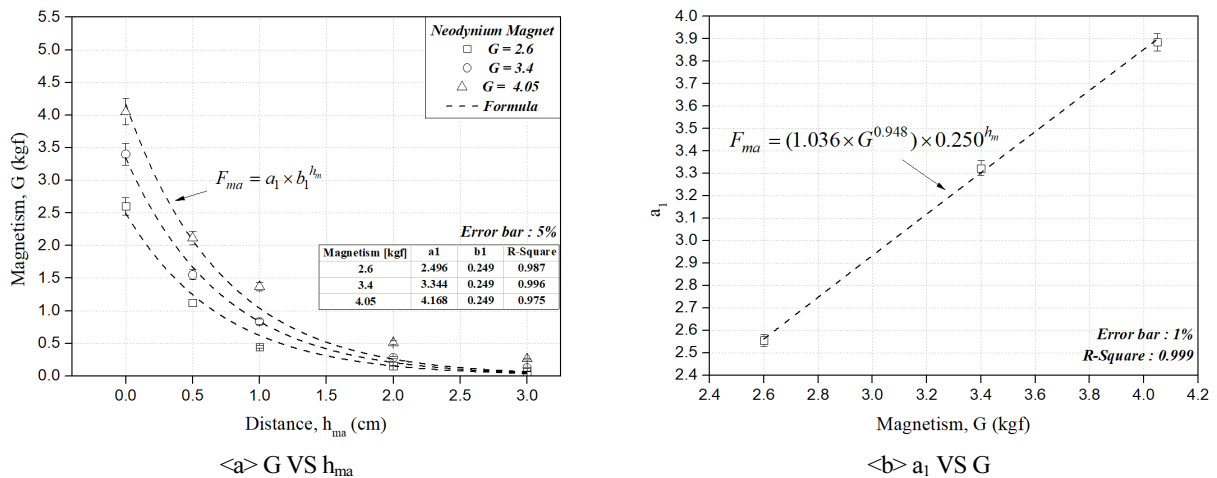


Fig. 4. Effects of installation distance on magnetic force

Fig. 5<a>는 송풍기 덕트의 직경이 0.12 m인 조건에서 용량(P_{bl})이 (127.5 ~ 1,051)W인 경우 필터의 기공률(ε) 변화에 따른 유속의 크기(u_{bl})를 측정한 결과이다. P_{bl} 이 동일한 조건에서 ε 의 값이 증가할수록 덕트 내부의 차압이 감소하기 때문에 u_{bl} 은 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 오차범위 $\pm 10\%$ 에서 식(9)와 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$u_{bl} = a_2 \times (\varepsilon)^{b_2} \tag{9}$$

여기서 a_2, b_2 는 P_{bl} 와 ε 에 따른 u_{bl} 에 대한 실험 상수를 의미하며, Fig. 5와 같이 a_2 와 P_{bl} 의 관계는 오차범위 $\pm 10\%$ 이내에서 $b_2=0.13$ 로 일정할 때 ε 및 P_{bl} 에 따른 u_{bl} 은 식(10)과 같이 산출할 수 있다. 따라서 식(2)는 식(11)과 같은 관계를 갖는다.

$$u_{bl} = 0.4P_{bl}^{0.46} \times (\varepsilon)^{0.13} \tag{10}$$

$$F_{bl} = \rho A_{bl} (0.4P_{bl}^{0.46} \times (\varepsilon)^{0.13})^2 \tag{11}$$

실험식에서 도출된 결과로부터 식(1)의 총 포집력(F_{total})은 자력의 크기(G)와 거리(h_{ma}) 그리고 P_{bl} 과 ε 에 따라서 달라질 수 있기 때문에, 다음 식과 같은 관계를 갖는 것으로 나타났다.

$$F_{total} = (1.036G^{0.948} \times 0.25^{hm}) + (\rho A_{bl} (0.4P_{bl}^{0.46} \times (\varepsilon)^{0.13})^2) \tag{12}$$

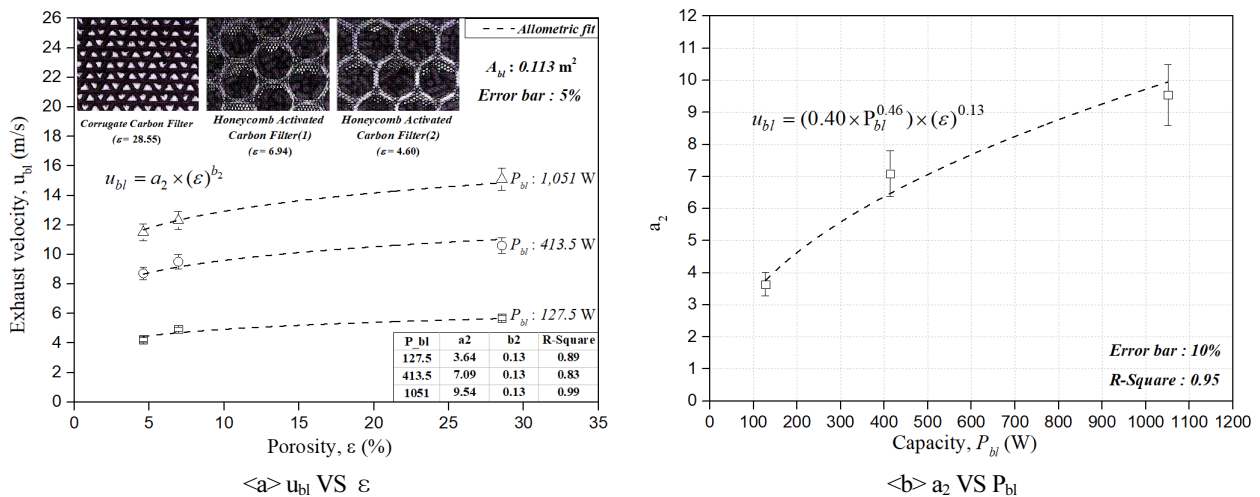


Fig. 5. Experiment results of exhaust velocity and experiment coefficient(a_2) in accordance with blower capacity and porosity of filters

Fig. 6<a>는 송풍기의 흡입 유속(u_{bl})이 15.1m/s이고 자석과의 이격거리(h_{ma})가 0cm에 가까운 조건에서 자석에 부착된

불티 질량($m_{ma,p}$)의 측정값을 분석한 결과이다. 그림에서 보듯이 F_{ma} 가 각각 (2.56, 3.30, 3.90) N인 조건에서 $m_{ma,p}$ 는 각각 (0.025, 0.049, 0.097) g으로 측정되었으며, $\pm 10\%$ 이내에서 $m_{ma,p} = 1.21 \times 10^{-3} (F_{ma}^{3.18})$ 과 같은 관계를 갖고 있는 것으로 나타났다. 그림에서 오차범위 이상에서 $m_{ma,p}$ 가 측정된 이유는 용접봉이 용융될 때 비산되는 각각의 불티 입자가 서로 다른 자성 비를 가질 수 있기 때문에 발생한 것으로 판단된다(Shin et al., 2020).

Fig. 6는 필터 3종에 대하여 F_{bl} 가 (0.28 ~ 3.23) N인 조건에서 $m_{bl,p}$ 을 분석한 결과이다. F_{bl} 이 증가함에 따라 $m_{bl,p}$ 가 비례적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, $m_{bl,p} = 0.77 \times F_{bl}^{0.37}$ 인 경우 $\pm 10\%$ 이내에서 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 포집기의 효율($\eta_{c,p}$)은 아래와 같은 실험식으로 산출할 수 있으며, 관계식에서 보듯이 용접 시간(Δt)과 용접기 전력(P_e)이 증가할수록 불티의 총 발생량($\Delta m_{p,total}$)이 증가하기 때문에 $\eta_{c,p}$ 의 값이 반비례하는 반면 F_{ma} 와 u_{bl} 이 증가할수록 $\eta_{c,p}$ 가 증가하는 것으로 예측할 수 있다.

$$\eta_{c,p} = \frac{(1.21 \times 10^{-3} (F_{ma}^{3.18})) + (0.77 \times F_{bl}^{0.37})}{(2.9 \times 10^{-5} + 1.23 \times 10^{-6} \times \Delta t) \times P_e^{1.289}} \times 100\% \tag{12}$$

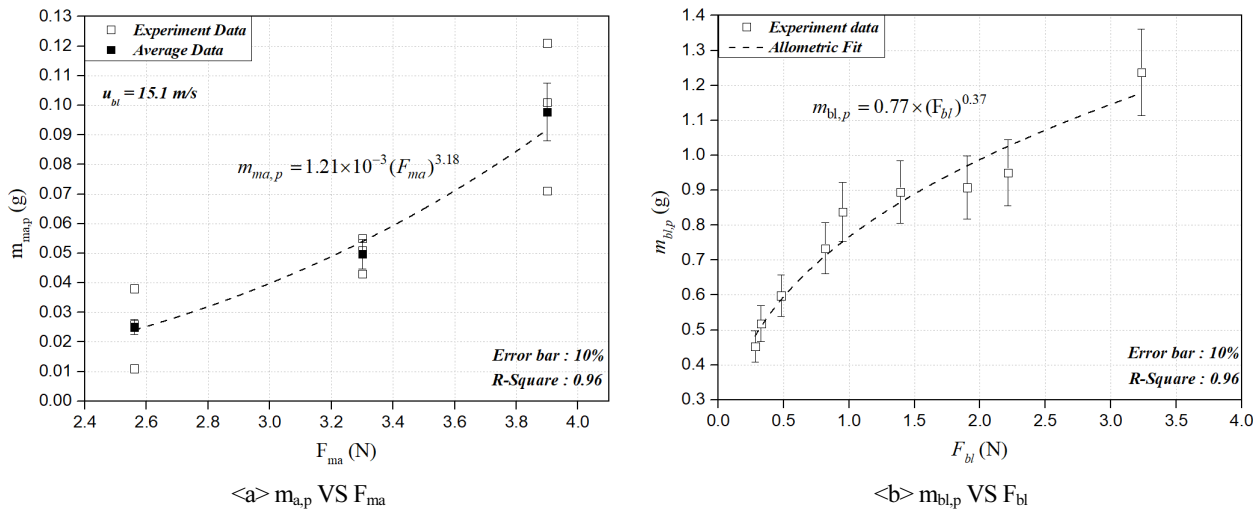


Fig. 6. Experiment results of collected mass($m_{a,p}$) by magnetic force(F_{ma}) and collected mass($m_{bl,p}$) by blower force(F_{bl})

결론

본 연구에서는 허니컴과 콜게이트 형상의 카본필터를 사용하여 자력의 크기(G)와 송풍기 용량(P_{bl}) 변화에 따른 불티의 포집 효율($\eta_{c,p}$)을 실험적으로 분석하였다. 불티의 총 포집력(F_{total})을 산출하기 위해서 자력에 의한 흡입력(F_{ma})과 송풍기에 의한 흡입력(F_{bl})으로 구분하여 G의 크기가 2.6kgf, 3.4kgf 그리고 4.05kgf인 경우에 대해 이격거리(h_{ma}) 변화에 따른 F_{ma} 의 관계를 도출하였으며, P_{bl} 과 필터의 기공률(ϵ)에 따른 흡입 유속(u_{bl}) 실험결과로부터 F_{bl} 의 상관관계를 분석하였다. 불티의 포집 효율($\eta_{c,p}$)과 F_{total} 의 관계를 예측하기 위해서 P_{bl} 가 (127.5 ~ 1,051)W인 조건에서 필터의 ϵ 변화에 따라서 자

석에 부착된 불티 질량($m_{ma,p}$)과 송풍기로 흡입된 질량($m_{bl,p}$)을 측정하였으며, 기존 연구사례로부터 불티의 총 발생량 ($\Delta m_{p,total}$)을 적용하여 $\eta_{c,p}$ 를 예측하기 위한 실험식을 도출하였다. 그 결과 불티의 포집효율($\eta_{c,p}$)은 자력에 의한 흡입력 (F_{ma})과 필터의 기공률에 따른 흡입 유속(u_{bl})의 크기에 비례하는 반면, 용접 시간(Δt)과 용접기 전력(P_e)에 반비례하는 것으로 나타났다. 하지만 강제 집진 방식의 불티 포집장치의 효율을 예측하기 위해서는 다양한 형상의 필터와 자력의 크기를 적용한 실험자료가 구축될 필요가 있으며, 본 연구는 용접 불티에 의해서 화재 위험성을 최소화하기 위한 불티 포집기 설계 방안을 제시하는데 기초 자료의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Ha, H.-C. (2007). Study on Work Environment Improvement and Applicability of Exposure Standards for Reducing Welding Fume (Manganese) in the Shipbuilding Industry, Korea Occupational Safety and Health Agency, 2008-4-5, Korea Occupational Safety and Health Agency.
- [2] Hashemabad, S.G., Gu, Z., Ando, T. (2016). "Flux-less direct soldering of aluminum by ultrasonic surface activation." Journal of Materials Processing Technology, Vol. 233, pp. 135-141.
- [3] Hojjati, A.Y.M., Immarigeon, J. (2004). "Fusion bonding/welding of thermoplastic composites." Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 43, pp. 161-165.
- [4] Lim, D.-S. (2023). Technical Guidelines for Fire Prevention in Welding and Cutting Operations, Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA GUIDE F-1-2023, Korea Occupational Safety and Health Agency.
- [5] Liu, Y., Liang, C., Wei, A. (2018). "Solder-free electrical Joule welding of macroscopic graphene assemblies." Materials Today Nano, Vol. 3, pp. 1-8.
- [6] Narasimhan, P.N, Mehrotra S., Raja, A.R., Vashista, m., Yusufzai, M.Z.K. (2019). "Development of hybrid welding processes incorporating GMAW and SMAW." Materialstoday: Proceedings, Vol. 18, pp. 2924-2932.
- [7] National Fire Agency (2023). "National fire data system." <https://www.nfds.go.kr>
- [8] Ryu, H.-U. (2015). Guidelines for Health Management of Welding Operations, Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA GUIDE H-73-2015, Korea Occupational Safety and Health Agency.
- [9] Shin, Y.J., Ko, G.H., Ro, K.C., You, W.J. (2021). "Correlation analysis of collection efficiency according to suction conditions of welding spatter extraction system." Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 9, No. 1, pp. 66-71.
- [10] Shin, Y.J., You, W.J. (2020). "Effects of welding time and electrical power on thermal characteristics of welding spatter for fire risk analysis." Energies, Vol. 13, No. 24, pp. 1-13.
- [11] Urban, J.L. (2017). Spot Ignition of Natural Fuels by Hot Metal Particles. Ph.D. Thesis, University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA.
- [12] Xu, X., Zheng, C., Yan, P., Zhu, W. (2016). "Effect of electrode configuration on particle collection in a high-temperature electrostatic precipitator." Separation and Purification Technology, Vol. 166, pp. 157-163.