

침윤소화약제의 효과성 증대를 위한 기술기준 개선방안

The Ways of Improving Technical Standards to Increase Effectiveness of Wetting Agent

장관수¹ · 김정민² · 조영재^{3*}Kwan Su Jang¹, Jung Min Kim², Young Jae Cho^{3*}¹Ph.D, Security & Disaster Management, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea²Undergraduate, Department of Fire Administration and Disaster Management, Donggeui University, Busan, Republic of Korea³Ph.D, Interdisciplinary Course for Crisis, Disaster and Risk Management, Sungkyunkwan University, Suwon, Republic of Korea

*Corresponding author: Young Jae Cho, bounces2000@naver.com

ABSTRACT

Purpose: This study is about offering ways of improving existing technical standards in order to propose how to deal with coal deep-seated fire and to increase effectiveness of wetting agent. **Method:** This study conducts infiltration experiment using eight tons of coal, three types of wetting agents and fire water. And this study analyzes domestic and international technical standards, overseas experimental cases. **Result:** It is found that two findings are identified; one is fire water cannot infiltrate into the coal due to high level of surface tension, and the other is three types of wetting agent can infiltrate into the coal to the depth of 5~25cm. Also, domestic wetting agent technical standards include measuring surface tension only and testing wood on extinguishing capacity test. On the other hand, this study found that deep-seated fire experiment using cotton, B-class fire test using heptane are used from abroad. Besides it is analyze that capillary rise test, sink test, contact angle measurement are conducted to increase effectiveness of wetting agent at the U.S. Bureau of Mines. **Conclusion:** Based on standards and cases of U.S. NFPA and Bureau of Mines, this study suggests that domestic technical standards should include adding a new test standard which measures infiltration directly.

Keywords: Coal, Deep-Seated Fire, Wetting Agent, Technical Standards, NFPA, Bureau of Mines

요약

연구목적: 본 연구에서는 석탄 심부 화재 발생 시 대응과 침윤소화약제의 실효성 확대를 위한 기술기준 개선방안을 제시하고자 하였다. **연구방법:** 석탄 8톤과 침윤소화약제 3종, 소화용수를 활용하여 침투 실험을 수행하고, 국내·외 기술기준 및 해외 사례를 분석하였다. **연구결과:** 소화용수는 높은 표면장력으로 인해 석탄 심부로 침투하지 못하였고, 침윤소화약제는 5~25cm 깊이까지 침투되었다. 국내 기술기준은 침투성에 대한 간접 측정 방식인 표면장력만 언급되어있고, 소화능력시험도 목재를 활용하는 것으로 확인되었다. 반면 해외에서는 면직물을 활용한 심부 화재 실험, 헵탄을 이용한 B급 화재 실험이 있는 것을 확인하였다. 그 외, 미 광산국에서는 모세관 상승 시험, 침전시험, 접촉각 측정이 있는 것으로 분석되었다. **결론:** 미국 NFPA 및 광산국의 기준과 사례를 토대로 국내 기술기준도 침투성을 직접적으로 측정할 수 있는 기준을 추가하여 실효성을 확대할 필요가 있을 것으로 사료된다.

핵심용어: 석탄, 심부 화재, 침윤소화약제, 기술기준, 미국방화협회, 미국 광산국

Received | 18 August, 2022

Revised | 25 August, 2022

Accepted | 5 September, 2022

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

2016년 석탄 분진을 포집하는 여과 집진기에서 자연발화에 이은 2차례 연쇄 폭발이 발생하였다. 집진기의 특성상 내부에는 미세한 분진이 다량 적재되어 있었고, 장시간 고착된 석탄 분진 내부에서 열이 축적되어 자연발화가 발생하였다. 소화를 위해 분사한 소화용수는 석탄의 심부까지 침투하지 못하였고, 밀폐된 집진기 내부 압력이 높아지면서 1차 폭발이 발생하였다. 폭발 후 고착된 석탄 분진이 낙하하며 최소폭발농도(MEC; Minimum Explosion Concentration)가 조성되어 2차 폭발이 발생하였고, 해당 폭발로 인해 소방대원 부상 및 설비변형에 의한 조업 손실, 대기 환경문제가 야기되었다. 전술한 심부 화재는 고체 가연성 물질에서 발생하는 화재의 한 유형이며, 가연물 내부에서 열이 축적되어 연소하는 것을 의미한다(Kim et al., 2015; Kim et al., 2022). 특히 석탄 분진의 경우, 입도가 작아 산소와 접촉하는 면적이 일반 가연물보다 넓고, 함유된 휘발분(Volatile Matter)의 산화로 인해 발화가 용이하다. 또한, 석탄 분진은 체적당 60g 이상만 공기 중에 부유해도 최소폭발농도가 형성되어 분진 폭발이 가능하므로 밀폐된 공간에서의 석탄 분진은 매우 위험한 것으로 분석되었다(Fire Protection Handbook, 2008). 이러한 석탄 분진의 특성 때문에 심부 화재 발생 시 일반 소화용수로는 진압이 되지 않는데, 그 이유는 소화용수의 높은 표면장력과 석탄에 함유된 휘발분이 서로 활성화되지 않기 때문이다. 특히 미분무(Water Mist)와 같이 입자가 미세한 소화용수는 심부화재에 더욱 취약하다(Kim et al., 2021).

심부 화재를 유발하는 석탄에 대한 관리 문제를 해결하기 위해 2024년까지 대기환경보전법에 의거하여 옥내저탄장의 무화 해야 하며, 행정안전부에서도 2020년 안전분야 10대 개선과제로 선정하여 각고의 노력을 진행하고 있다. 한국소방산업기술원에서도 석탄의 자연발화 억제와 심부 침투를 위한 침윤소화약제 기술기준을 개정하고자 T/F를 개최하는 등 석탄 심부 화재의 위험성을 인식하고 있는 것으로 확인되었다.

그러나 석탄 심부 화재 대응에 필요한 침윤소화약제의 침투성에 관련된 기술기준은 표면장력 측정의 간접적인 방식에 머무르고 있으며, 직접적인 실험 기준은 없는 상황이다. 또한, 침윤소화약제 형식승인을 위한 소화실험에는 A급 목재를 활용하고 있으므로 석탄에 대한 직접적인 실험 기준이 없는 것으로 확인되었다.

따라서 본 연구에서는 휘발분 10%~30% 범위, 입자 50~70 μm 범위의 석탄 8톤을 활용하여 국내 침윤소화약제의 침투성 실험을 실시하였다. 그리고 국내·외 침윤소화약제 관련 기준을 살펴보고 침투성과 관련된 해외 실험사례를 제시하고 추후 기술기준 개정에 필요한 기초자료를 제공하여 석탄 심부 화재 대응에 이바지하고자 한다.

본론

실험방법

심부 침투 확인용 실험장치 구축

Fig. 1은 실험에 사용된 실험장치로 침윤 수용액 및 소화용수의 석탄 심부 침투를 확인하기 위하여 제작되었다. 실험장치는 가로 1000mm x 세로 1000mm x 높이 1200mm, 두께 10mm의 투명 아크릴로 4개가 제작되었고, 각 2톤의 석탄을 적재할 수 있도록 설계하였다. 적재된 석탄 표면에는 3% 침윤 수용액과 일반 소화용수 30리터를 주입하여 아크릴 표면으로 침투 깊이가 확인될 수 있도록 구성하였다. 분사 노즐의 경우 석탄 표면에 균등하게 유량분포를 확보할 수 있는 원형 분사 노즐(오리피스 직경 3.5mm, 분사각 45°)을 사용하였다.

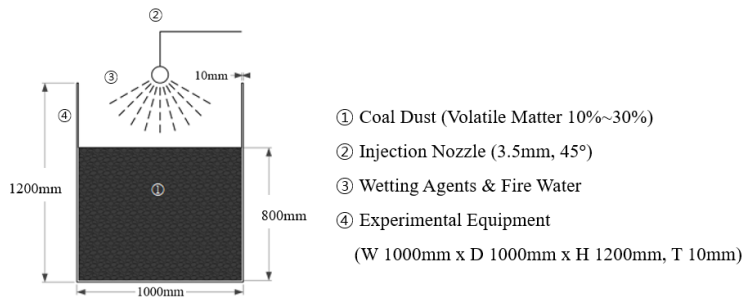


Fig. 1. The composition of measurement system

실험재료 및 약제

침윤소화약제의 경우, ‘소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준 고시(2012-57호)’에서 제시하고 있는 A급 목재를 기준으로 해야하나, 석탄 심부 화재의 실질적인 대응을 위하여 실제 현장에서 사용하고 있는 석탄의 종류를 우선 분석하였다. Table 1과 같이 최근 산업현장으로 입고된 석탄 55종을 분석한 결과, 휘발분 10%~20%인 석탄은 전체의 46%, 휘발분 20%~30%인 석탄은 23%, 휘발분 30% 이상은 29%로 나타났다.

특히, 휘발분이 20% 이상일 경우 120시간 이내 자연발화가 가능하고, 30% 이상일 경우 60시간 이내 자연발화가 되는 것으로 분석되었다(Fire Protection Handbook, 2008). 본 실험에 사용할 시료는 휘발분 10%, 20%, 30%의 3종을 선택하였고, 해당 물질의 입자는 50~70 μ m 인 것으로 나타났다.

Table 1. Types of coal in industrial fields according to volatile matters (55 types)

Division	~4%	5~10%	10~15%	15~20%	20~25%	25~30%	30%~
Types	1	1	9	16	10	2	16
Ratio	1%	1%	17%	29%	20%	3%	29%

선정된 석탄 시료의 심부로 침투할 침윤소화약제로는 국내·외 시판되는 약제 중 인증절차를 거쳐 국내에서 유통되고 있는 약제 3종과 일반 소화용수 1종을 사용하여 실험결과를 도출하였다. 여기서 사용되는 일반 소화용수는 산업현장에서 주로 사용하는 담수로 표면장력 71.4mN/m, 점도 4.9mPa·s, 염화나트륨 함유량 4.8mg/L를 의미한다. 아래 Table 2는 해당 침윤소화약제 수용액과 소화용수의 물리적 특성을 나타내고, 수용액의 농도는 3%로 설정하였다. 또한, 수용액과 소화용수의 침투 깊이를 측정하기 위해 아크릴로 제작된 실험장비의 표면에 주로 분사하였다.

Table 2. Physical properties of wetting agents and fire water that are used in the experiment

Wetting Agent	Experimental Concentration [%]	Surface Tension [mN/m]	Viscosity after dilution [cP]	Solution Amount [liters]
Wetting Agent A	3	30	1.038	30
Wetting Agent B	3	33	1.012	30
Wetting Agent C	3	31	1.028	30
Water	1	71.4	1.000	30

실험방법

본 연구는 산업현장에서 포집된 석탄 분진을 활용하여 국내 형식승인을 득한 침윤소화약제와 일반 소화용수의 침투성을 확인하기 위해 수행되었다. 실험에 사용된 석탄의 휘발분은 각 10%, 20%, 30% 수준의 3종이며, 입자 크기의 범위는 50~70 μm 이다. 가로 1000mm × 세로 1000mm × 높이 1200mm의 실험공간 4곳에 석탄을 높이 800mm로 채우고 상부에서 수용액 및 소화용수를 각 30리터씩 일괄 분사하였다. 분사를 시작한 시점부터 석탄에 침투되는 깊이를 측정하였으며, 깊이 5cm마다 침투 시간을 기록하여 60분간 측정하였다. 아래 Table 3은 실험 조건을 나타낸 것이다.

Table 3. The experimental conditions of the scale model experiment

Division	Experimental Condition	Division	Experimental Condition
Temperature [K]	290.15	Particle Size [μm]	50~70
Pressure [atm]	1	Amounts of Coal [ton]	8 (2ton x 4ea)
Height of injection [m]	0.8	Measurement Time [min]	60
Humidity [%]	50 ± 5%	Measurement Interval [cm]	5

실험결과

실험결과, 일반 소화용수는 석탄 심부로 침투하지 못하였으며, 나머지 3종은 5~25cm까지 침투하였으나 석탄 중심부인 40cm까지는 도달하지 못한 것으로 나타났다. 실험에 주입된 4종의 실험결과는 아래 Fig. 2와 같다. 또한, Fig. 3은 석탄의 휘발분에 따른 침윤 수용액과 소화용수의 60분간 침투 깊이를 나타낸 것이다.



Fig. 2. Results of infiltration of wetting agents and fire water into the deep seated part of coal

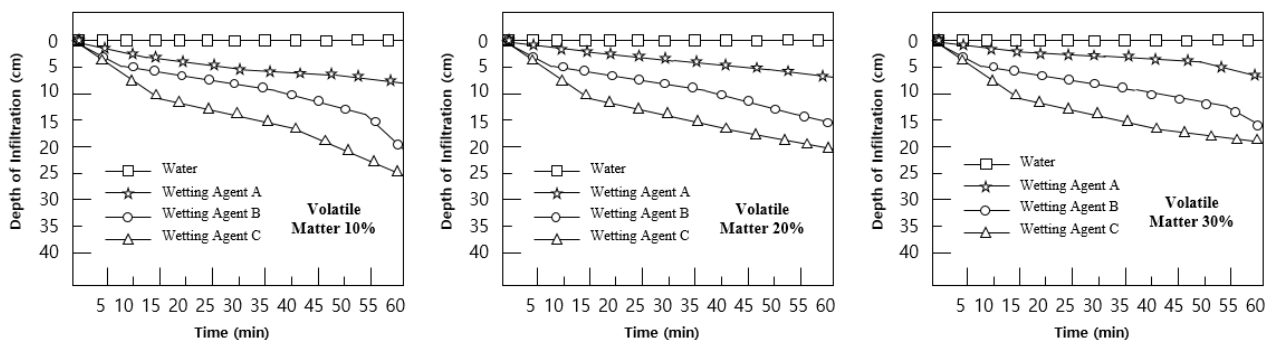


Fig. 3. Depth by infiltration time according to volatile matters (10%, 20%, 30%)

국내 인증절차를 거쳐 실제 사용하고 있는 침윤소화약제임에도 불구하고 석탄 심부로 침투가 제대로 되지 않는 제품도 있었으며, 침투되더라도 5~25cm 수준에 머무는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 석탄에 함유된 휘발분의 비율은 침윤소화약제의 침투력에 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 형식승인을 득한 침윤소화약제가 적재된 석탄 분진 심부로 침투하기 어려운 이유를 확인하기 위해 국내·외 관련 기준을 확인하고자 하였다.

국내 기준

소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준

국내 침윤소화약제에 대한 기준은 ‘소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준’ 제 10조에 언급되어있으며, 아래 Table 4와 같이 해당 내용을 요약하였다. 심부 화재를 냉각하기 위한 침윤소화약제는 침투성이 가장 중요하나, 기술기준상 침투성과 관련된 것은 간접적 시험인 제1호 표면장력 시험 외에는 없는 것으로 분석되었다.

Table 4. Summary of domestic wetting agents technical standards

구분	시험 내용	주요 내용
1호	표면장력	○ 침윤수용액의 표면장력은 33mN/m 미만이어야 한다.
5호	저온에 따른 표면장력 변화	○ -18℃에 저장된 침윤소화약제로 혼합된 침윤수용액의 표면장력값과 제 1호에 의해 측정된 침윤수용액 표면장력값의 차이는 5mN/m 이내어야 한다.
7호	점도시험	○ 침윤소화약제의 점도는 KS M 2014(원유 및 석유제품의 동점도시험방법 및 석유제품 점도지수 계산방법) 또는 B형 점도계로 사용온도범위에서 측정하였을 경우 설계 값의 ±30% 이어야 한다.

소화기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준

국내 침윤소화약제의 소화능력시험은 ‘소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준’ 제11조 소화성능 1항에 의거하여 ‘소화기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준’에 있는 A급 화재용 소화기와 동일한 소화능력시험을 거치게 된다. A급 화재용 소화기의 소화능력시험은 목재 연소로 진행되며, 산업현장에 있는 입자가 작은 석탄 분진과 특성이 다르므로 실질적인 실험 기준이 필요할 것으로 사료된다.

국외 시험기준

NFPA(National Fire Protection Association) 18 Standard on Wetting Agents

미국 NFPA 18 코드에는 침윤소화약제에 대한 내용이 명시되어 있으며, 국내 기준보다 인체 독성에 대한 부분과 금속 등에 대한 부식율, 표면장력에 대해 자세히 나와 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 아래 Table 5와 같이 면직물(Cotton)을 활용한 심부 화재(Deep-Seated Fire) 실험방법이 언급되어있으며, 이는 침투성과 직접적인 관련이 있는 실험 기준으로 판단된다. 또한, NFPA 18에는 아래 Table 6과 같이 헵탄을 활용한 B급 화재용 실험방법이 언급되어있다.

Laboratory Tests for Selecting Wetting Agent for Coal Dust Control(H. William Zeller, 1983)

미국 광산국에서는 화학적 계면활성제의 사용이 석탄 분진을 제어할 수 있는지 여부에 대해 연구를 수행하였으며, 효과적인

인 계면활성제 선택을 위한 실험실 시험기준인 모세관 상승 시험(Capillary Rise Test), 침전시험(Sink Test), 낙하된 수용액 액적의 표면장력 각도를 측정하는 접촉각 측정(Contact Angle Measurement) 등을 제시하였다(Fig. 4).

(1) Capillary Rise Test

Crowl et al.(1967)에 의해 개발된 모세관 상승 시험은 직경 8mm, 높이 120mm, 하부는 필터로 구성된 유리관을 비수용성 접착제로 실험공간 바닥에 고정시키고, 높이 60mm까지 석탄 분말 시료를 2g 정도 채운 후, 침윤 수용액 2mm 높이에 넣어 흡윤되는 시간과 양을 측정하였다. 측정 항목은 침윤 높이 변화에 따른 시간 측정, 일정 시간 후 흡수된 수용액의 높이, 일정 시간 후 흡수된 수용액의 무게이며, 석탄 분진 제어를 위한 침투성 시험에 가장 적합한 것으로 나타났다.

(2) Sink Test

Walker et al.(1952)에 제안된 침전시험은 석탄의 흡윤성을 측정하기 위한 것으로 미분탄을 액체 표면에 침식시키고, 표면 아래로 가라앉는데 걸리는 시간을 측정하는 것이다. 일반적으로 50~100ml의 침윤 수용액과 0.3~0.5g의 석탄을 이용하여 실험 하였고, 석탄의 균집을 최소화하기 위해 시료 주입 전 밀가루 망을 활용하였다. 이러한 침전시험은 주로 분무 액적(Spray Droplet)에 의한 입자 포집 등 물에 대한 석탄 침투성을 확인하는데 적합한 것으로 나타났다.

(3) Contact Angle Measurement

접촉각 측정은 액적과 고체 표면 사이에 형성되는 접촉각을 측정하는 것으로 침윤 수용액의 흡윤성을 측정하는 척도이다(Hansford et al, 1980). 형성되는 각도는 전체 흡윤에 대해 0° 에서 젖지 않은 표면에 대해 90° 로 표현할 수 있다. 해당 측정은 석탄 분진을 평평하게 유지한 후, 단일 액적 낙하(Single Droplet Test)를 수행하여 석탄과 액적 표면의 각도를 측정하는데, 이 경우 각도가 0에 가까울수록 좋은 침윤 수용액으로 판단하는 것이다(Schwendeman et al, 1972).

Table 5. NFPA 18 standard on wetting agent 6.3 deep-seated fire test

Division	Contents
6.3.1	○ Wetting agent solutions shall extinguish deep-seated cotton fires and exhibit less runoff than water when tested in accordance with 6.3.2 and 6.3.3
6.3.2	○ Tests shall be conducted three times with plain water and three times with the wetting agent solution prepared at the manufacturer’s recommended concentrations
6.3.3	○ The tests shall be conducted using a cylindrical basket of perforated sheet steel, 114mm in diameter and 178mm high, and ginned cotton weighing 100g shall be used and the test conducted as follows: - Stuff 50g of cotton into the bottom half of the basket - Heat a steel rod 35mm in diameter and 33mm long to 593°C - Place the rod on the cotton in the basket - Immediately insert 50g of cotton into the basket on top of the rod - Pour 250mL of test liquid(water or wetting agent solution) onto the cotton and catch the runoff in a pan placed below the basket - Measure and record the volume of runoff

Table 6. NFPA 18 standard on wetting agents chapter 7. class B fire extinguishment tests

Division	Contents
7.1	○ Products listed for use on Class B fires shall pass all the fire tests specified in this chapter
7.2	○ Wetting agent solutions at the concentrations specified by the manufacturer shall be evaluated to and comply with the requirements of ANSI / UL 711 CAN / ULC S508 for Class B fires
7.3	○ Tests for Class B fires shall be conducted as follows: - A 4.65m ² 20 B pan fitted as described in ANSI / UN 711 CAN / ULC S 508 with a backboard that is the width of the pan and 0.9m high shall be used - A 51mm layer of heptane fuel shall be floated on a 102mm depth of water - The fuel in the pan shall be ignited and allowed to free burn for 60 seconds - A 37.9 L/min nozzle shall be used to apply the wetting agent solution to the fire using one, or a combination, of the following methods: (a) The nozzle shall be fixed in position at an angle above the horizontal in order to direct the discharge across the pan onto the backboard for the entire duration of the test (b) The nozzle shall be permitted to be moved as necessary for control and extinguishment - In no case shall the nozzle extend over any part of the test pan - The fire shall be extinguished within 5 minutes of the start of application of the wetting agent solution
7.4	○ Extinguishment shall be achieved in two consecutive tests

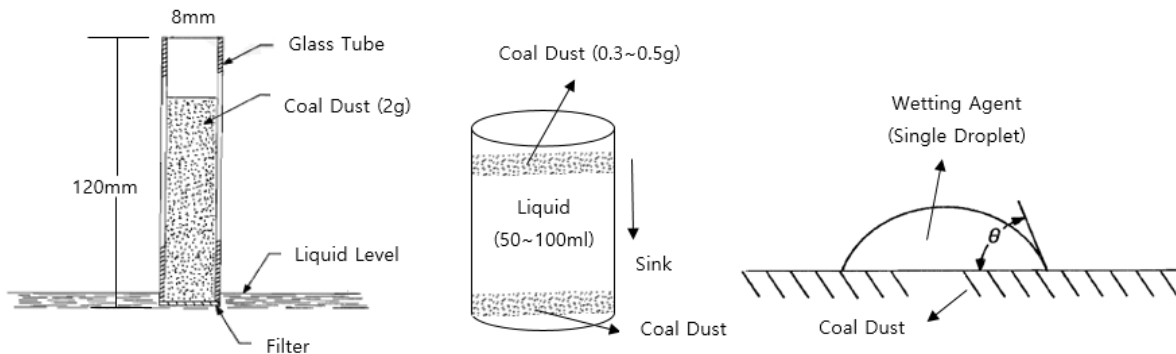


Fig. 4. Capillary test, sink test, contact angle measurement(H. William Zeller, 1983)

결론

본 연구에서는 2024년 「대기환경보전법」 개정에 따른 옥내저탄장 내 석탄의 심부 화재 대응을 위해 침윤소화약제의 실효성 확대를 위한 연구를 진행하였다. 특히, 국내 인증절차를 거쳐 실제 사용되는 침윤소화약제의 석탄 심부 침투력을 실험하였고, 국내·외 기준 및 침투 관련 실험 기준 사례를 제시하여 제도개선의 발전 방향을 모색하였다.

- (1) 산업현장에 입고된 55종의 석탄을 분석하여 휘발분 10%~30% 범위, 입자 50~70 μ m 범위의 석탄 8톤을 침투대상으로 선정하였다. 또한, 국내 형식승인 절차를 거쳐 사용 중인 3종의 침윤소화약제와 일반 소화용수를 각 30리터 주입하여 60분간 침투되는 깊이를 측정하였다. 실험결과, 일반 소화용수는 높은 표면장력과 석탄의 휘발분으로 인해 심부로 침투하지 못하였으며, 침윤소화약제 3종은 60분간 5~25cm 침투되는 것으로 확인되었다.

- (2) 일반 소화용수는 표면장력이 70mN/m 이상으로 국내 기술기준에 언급된 33mN/m보다 높아 침투가 어려웠으며, 그 외 침윤소화약제의 침투력 미비 현상에 대한 원인을 찾기 위해 국내 기술기준을 분석하였다. 분석 결과, 국내 침윤소화약제에 대한 기준은 “소화약제의 형식승인 및 제품검사의 기술기준”에 간접 측정 방식인 표면장력 밖에 없었으며, 소화능력시험 또한 A급 화재용 소화기와 동일한 목재를 활용하는 것으로 분석되었다.
- (3) 해외 기준에서는 면직물을 활용한 심부 화재 침투 실험 및 헵탄을 활용한 B급 유류 화재에 대한 실험 기준이 있는 것으로 확인되었다. 또한, 미국 광산국에서는 석탄 분진을 제어하기 위한 침윤소화약제의 침투 시험사례가 있었으며, 이는 모세관 상승 시험, 침전시험, 단일 액적의 접촉각 측정인 것으로 확인되었다.
- (4) 2024년 대기환경보전법 개정과 석탄 심부 화재 대응을 위하여 2020년 행정안전부에서는 안전분야 10대 개선과제로 석탄의 화재, 폭발 방지를 선정하였고, 한국소방산업기술원에서도 석탄의 자연발화 억제와 침윤소화약제 기술기준 개정에 적극적인 노력을 하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구의 결과가 이러한 석탄 심부 화재 대응을 위한 기술기준 개정에 기초자료로 활용되어 침윤소화약제 실효성 확대를 위해 사용될 수 있다고 사료된다.

References

- [1] Armand, V.B. (2018). NFPA 18 Standard on Wetting Agents. National Fire Protection Association, USA.
- [2] Crowl, V.T., Wool-dridge, W.D.S. (1967). “A method for the measurement of adhesion tension of liquids in contact with powders.” Society of Chemical Industry, No. 25, pp. 200-212.
- [3] E. Cote (2008). Fire Protection Handbook. National Fire Protection Association, USA.
- [4] Hansford, D.T., Grant, D.J.W., Newton, J.M. (1980). “The influence of processing variables on the wetting properties of a hydrophobic powder.” Powder Technology, Vol. 26, pp. 119-126.
- [5] Kim, J-H., Park, W-H., Kim, W-H., Myoung, S-Y. (2021). “A study on the effects of droplets characteristics of water mist on the spray density on the floor.” Journal of Korean Society of Disaster Information, Vol. 17, No. 1, pp. 120-127.
- [6] Kim, K.-S., Choi, Y.-J., Choi, J-W. (2022). “An experimental study on the spontaneous ignition of flaxseed oil and olive oil adsorbed on towels” Journal of Korean Society of Disaster Information, Vol. 18, No. 2, pp. 324-332.
- [7] Kim, N.-K., Rie, D.-H. (2015). “A study of fire extinguishment characteristic for the real scale deep-seated fire.” Journal of Fire Science Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 13-19.
- [8] Schwendeman, J.L., Sun, S.-M., Salyer, I.O., Wurstner, A.L. (1972). “Polymer-augmented aqueous foams for suppression of respirable coal dust.” Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 200, No. 1, pp. 765-783.
- [9] Walker, P.L., Petersen, E.E., Wright, C.C. (1952). “Surface active agent phenomena in dust abatement.” Industry and Engineering Chemistry Research, Vol. 44, No. 10, pp. 2389-2393.
- [10] William, H.Z. (1983). Laboratory Tests Selecting Wetting Agents for Coal Dust Control, 8815, Bureau of Mines, USA.