

합정 유류화재 대응을 위한 수성막포의 유변학적 특성 연구

전길송 · 김휘성 · 유정훈 · 유용호 · 박진옥[†]

한국건설기술연구원 화재안전연구소
(2023년 10월 24일 접수, 2023년 11월 8일 수정, 2023년 11월 8일 채택)

Research on the Rheological Properties of Aqueous Film Forming Foam to Respond to Ship Oil Fires

Kil-Song Jeon, Hwi-Seong Kim, Jung-Hoon You, Yong-Ho Yoo and Jin-Ouk Park[†]

Department of Fire Safety Research, KOREA Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea
(Received October 24, 2023; Revised November 8, 2023; Accepted November 8, 2023)

초 록

수성막포(aqueous film forming foam, AFFF)는 합정 유류화재 대응에 핵심적인 역할을 하는 주요 소화약제 중 하나이다. 이 형태의 소화약제는 막 형성, 열 제거, 연소 억제, 그리고 화학 물질 혼합물을 이용하여 화재를 진압하는 데 효과적이다. 이러한 특성은 유류화재 대응에 있어서 큰 장점을 제공하지만, AFFF는 폼 형태로 분사되어 화재에 대응하는 과정에서 기존 유체와 차별점을 가진다. 따라서 AFFF 폼의 레오미터를 활용한 유변학적 특성 분석은 합정 유류화재 대응을 위한 AFFF 분사 특성 예측에 핵심적인 역할을 수행하며, 이는 효과적인 화재 진압과 밀접한 연관이 있다. 본 연구에서는 레오미터 실험을 통해 AFFF 폼의 비뉴턴 유체(전단박화) 거동을 확인하였으며, 폼의 안정성과 직결되는 데이터들을 얻을 수 있었다. 이러한 실험 데이터들은 AFFF를 활용한 소화 시스템의 효율성을 높이는데 기여할 것으로 기대된다.

Abstract

Aqueous film forming foam (AFFF) is a critical fire suppression agent used in combating hydrocarbon fires. This type of fire suppressant is highly effective due to its ability to form a protective film, dissipate heat, inhibit combustion, and utilize a blend of chemical substances to extinguish fires. While these properties offer significant advantages in responding to hydrocarbon fires, AFFF is distinct in its deployment as it is dispensed in the form of foam. Therefore, the rheological analysis of AFFF foam using a rheometer plays a crucial role in predicting the spray characteristics of AFFF for combating hydrocarbon fires, and this is closely associated with effective fire suppression. In this study, we conducted rheometer experiments to confirm the non-Newtonian behavior (shear-thinning) of AFFF foam and obtained data on the foam's stability. These experimental data are expected to contribute to enhancing the efficiency of fire suppression systems utilizing AFFF.

Keywords: Aqueous film forming foam (AFFF), Oil fire, Rheological properties, Extinguishing agent, Rheometer

1. 서 론

화재는 인명과 재산에 대한 심각한 위협을 야기할 수 있는 재난 사건 중 하나로, 특히 합정 유류화재의 경우 더 큰 위협과 어려움을 야기할 수 있다. 합정 유류화재는 선박 및 해양 시설에서 가장 빈번하게 발생하는 화재 사고 중 하나로, 이에 대한 효과적인 대응이 절대적으로 필요하다[1]. 유류화재의 경우 일반화재와는 달리 물을 사용할 수 없기 때문에 산소를 차단하는 방식인 이산화탄소 및 모래를 이용하여

소화하는 것이 일반적이다. 하지만 화원의 규모가 커지게 되면 이러한 일반적인 방법으로는 효과적인 소화가 이루어지기 힘들며 합정의 경우에는 특히 더 제한적일 수밖에 없다. 이러한 합정에서 발생하는 유류화재 사고에 대응하기 위해서 수성막포(aqueous film forming foam, AFFF)의 활용이 적합하다고 판단된다. AFFF는 유동성이 우수한 불소계 계면활성제에서 생성된 거품이 화염 유류면을 덮어서 화염을 억제한다. 따라서 흘러나오는 유출된 유류와 같이 유층이 얇은 화재에 뛰어난 소화 효과를 발휘한다.

1960년대 중반 이후 AFFF는 가연성 액체 화재 진화를 위한 주된 소화약제 기술 중 하나로 사용되어 왔다. AFFF는 미국 해군 연구소와 산업 협력체의 협동 연구 결과물이며, 그 혁신적인 특성은 불소 계면활성제의 사용 때문이다. 이로 인해 AFFF는 액체 가연물 위에서의 빠른 이동, 유동성, 자체 복원력, 탁월한 화재 진화 능력을 제공한다. 이후의 AFFF 조성은 불소와 탄화수소 계면활성제의 혼합으로 이루어졌

[†] Corresponding Author: KOREA Institute of Civil Engineering and Building Technology
Department of Fire Safety Research, Hwaseng 18544, Korea
Tel: +82-31-369-0525 e-mail: jopark@kict.re.kr

Table 1. Material Safety Data Sheet (MSDS) of AFFF

Chemical name	Common and alternative names	CAS number	Contents (%)
Water	Dihydrogen oxide	7732-18-5	45~55
C6 fluorotelomer based surfactant (Substitutedalkyl)heteromonocycle-ol, oligomeric, C4-C12	Contains per- or poly-fluoroalkyl substances	-	0.5~0.8
Alkylalkyl(C=5-12) sulfate alkali metal salt	Private	Private	4~6
Diethylene glycol monobutyl ether	Private	Private	3~6
Diethylene glycol monobutyl ether	2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	112-34-5	10~14
Ethylene glycol	1,2-Ethanediol	107-21-1	20~25

Table 2. General Physical Properties of AFFF

Concentration used	Importance (20 °C)	Viscosity (20 °C)	Storage temperature	pour point	pH (20 °C)	Exterior
6%	1.03	8 cst	- 10~30 °C	- 15 °C	pH 8	Transparent amber

으며, 이러한 계면활성제의 혼합은 AFFF의 효과적인 성능을 확보하는 데 핵심적인 역할을 한다[2].

AFFF는 그 독특한 특성으로 인해 합정 유류화재 대응에서 주목받고 있다. 이 소화제는 불과의 막 형성, 열 제거, 연소 억제, 화학 물질 혼합물의 활용 등 다양한 기능을 수행하여 화재를 효과적으로 진압할 수 있다[3]. 그러나 AFFF는 기존 유체와는 다르게 폼(foam) 형태로 분사되어, 화재 대응 시 기존 유체의 분사 특성과 차별성이 존재한다. 이러한 차별화된 특성을 유변학적 관점에서 살펴보면, AFFF의 레오미터 실험은 유변학 특성을 자세히 분석하는 데 중요하다[4,5]. 특히 AFFF를 통해 발생하는 폼 자체의 유변학 특성을 분석하는 것이 중요하다. 여기서 폼이라 하면 넓은 범위에서는 액체나 고체에 둘러싸인 기체방울은 의미하는데, AFFF의 폼의 경우는 소화약제와 물과의 혼합물이 고유의 팽창비에 따라 거품을 형성하여 형상을 유지하는 것을 뜻한다. 이런 AFFF 폼 자체의 유변학 해석에 대한 연구 사례는 극히 드문 실정이다. 이는 앞에서 설명한 폼의 특징과도 연관이 있는데, 약제와 물 그리고 기체가 혼합되어 생성된 폼은 균일하게 형성되기 어려우며 특히 현재 분석 기준 자체가 존재하지 않기 때문이다[6,7]. 하지만 본 연구에서는 폼 자체의 유변학 해석을 통한 특성 파악을 하고자 한다[8,9]. 유변학적 해석을 통해 AFFF의 유변학 특성, 즉 전단률, 점성, 응력-변형 곡선 등을 정확히 파악할 수 있다[10]. 이는 합정 유류화재에 대응하기 위한 적합한 분사 특성을 예측하고, 화재 진압에 필요한 최적의 소화약제의 양 및 압력을 결정하는 데 도움이 된다[11].

본 연구에서는 AFFF 폼의 민감한 유변학 특성을 레오미터 실험을 통해 자세히 분석하여, 이 정보를 기반으로 합정 유류화재 사고에 대응하기 위한 효과적인 전략을 개발하고자 한다[12,13]. 이를 통해 선박의 안전성을 높이고 AFFF를 활용한 소화 시스템의 효율성을 향상시키는 것이 목표이다[14,15]. 이 연구의 결과는 합정 유류화재 대응 및 선박 안전에 기여할 것으로 기대되며, 이를 통해 화재로부터의 위험을 최소화하고 안전한 해양 환경을 보호하는 데 기여할 것이다.

2. 실험

2.1. 재료

이 실험은 일반화재가 아닌 합정에 존재하는 다양한 적재물(헬리콥터, 전투기, 보급용 유류 등)에서 발생할 수 있는 유류화재 대응을 향



Figure 1. Picture of AFFF foam creation.

상시키기 위한 핵심적인 연구로, AFFF 폼의 유변학적 특성을 분석하는 것을 목표로 한다. AFFF 폼은 화재 진압 시 핵심적인 역할을 하며, 이러한 폼의 특성을 정확히 이해하는 것이 이 연구의 중요한 부분이다. 실험에 사용된 AFFF는 합정 유류화재 대응에 일반적으로 사용되는 6% 농도의 제품이며 대성산업의 6% AFFF (DS-3066) 제품을 사용하였다. 이 제품은 본 연구의 목표인 합정 유류화재 대응 주체에 맞게 현재 해군에서 실제 사용되고 있는 수성막포 상용 제품이다. 해당 제품의 MSDS 및 주요 물리적 특성은 Table 1과 Table 2에 요약하였다. 이 실험은 이러한 제품의 유변학적 특성을 자세히 이해하고, 화재 진압에 어떻게 활용될 수 있는지 밝히는 것을 목표로 한다.

실제로 화재 소화에 적용되는 것은 폼 자체이므로, 이 연구는 AFFF 폼의 생성 및 유변학적 특성 분석에 중점을 두었다. 폼의 생성 과정은 다음과 같이 진행되었다. 물과 AFFF를 94%와 6%의 부피 비율로 혼합한 후 1500 rpm으로 5분 동안 교반하여 폼을 생성하였다. 이러한 조건은 사전 실험을 통해 최적화되었으며, 실제 분사되는 폼을 측정할 수 없다는 변수를 최소화하기 위하여 현장과 가장 유사하다고 판단되는 상태를 구현하고자 하였다. 생성된 폼을 Figure 1에 나타내었다.

이렇게 생성된 폼은 레오미터 동심 실린더에 피펫을 이용하여 균일하게 주입한 후 분석하였다. 이러한 실험 절차를 통해 폼의 유변학적

특성을 자세히 분석하고, 폼이 화재 진압 시 어떻게 작용하는지에 대한 중요한 정보를 얻었다.

2.2. 분석(레오미터를 이용한 유변학 분석)

AFFF를 통해 생성된 폼의 유변학 분석을 위해 Anton Paar (Austria)사의 모듈식 소형 레오미터 MCR 702e 모델을 활용하였으며, 이 분석에 동심 실린더(concentric cylinder, CC) 측정 시스템을 사용하였다. 이 시스템은 저점도 액체 테스트에 적합하며, AFFF 폼의 저점도 특성을 고려하여 선택되었다[16,17]. 또한, 이 시스템은 온도를 조절하면서 측정이 가능하기 때문에 온도에 따른 AFFF 폼의 유변학적 특성을 분석할 수 있었다[18]. 분석 조건은 온도, 시간, 그리고 토크 조건으로 설정되었다. 이러한 조건 설정은 정확한 유변학적 특성 평가를 위해 필수적이다. 레오미터는 정밀한 조건을 제어하여 AFFF 폼의 점성, 전달률, 응력-변형 곡선 등을 측정하였다[19,20].

이러한 실험 결과는 합정 유류화재에 대응하기 위한 적합한 분사 특성을 예측하고, 화재 진압에 필요한 최적의 소화약제의 양 및 조건을 결정하는 데 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 또한, 이러한 유변학적 특성을 합정 유류화재 대응 전략에 적용하는 방법에 대한 연구 결과는 합정 유류화재 대응 및 선박 안전에 기여할 것으로 예상된다[21,22].

3. 결과 및 고찰

AFFF를 통해 생성된 폼 자체의 유변학적 특성을 분석하기 위하여 폼을 생성시킨 뒤, 레오미터를 이용하여 유변학적 특성 분석을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다. 먼저 전단속도에 따른 점도 측정을 수행하였으며 그 데이터를 활용하여 전단속도를 고정시켜서 시간에 따른 점도 변화 및 온도에 따른 점도 변화를 측정하였다. 이러한 결과를 통해 AFFF 폼의 화재 진압 능력 및 안정성을 더 잘 이해할 수 있다. 추가적으로 점탄성 평가 역시 수행하였다. 점탄성 평가는 폼의 기본적인 설계 방향에 대한 데이터를 제시해줄 수 있을 것이며, 특히 탄성 평가에 따라 폼의 형상유지 능력 측정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.1. 점도 특성 평가

2장의 분석방법과 같이 준비한 AFFF 폼의 전단속도에 따른 점도 측정 결과를 Figure 2에 나타내었다.

동일한 샘플을 3번 반복 측정하여 재현성을 확인하였다. 측정한 전단속도 범위는 저전단속도 0.1 1/s부터 고전단속도 1000 1/s까지 포함하였다. AFFF 폼을 레오미터로 측정된 결과, 전단속도에 따라 점도가 변하는 비뉴턴 유체의 특성을 보이고 있었으며 전단속도가 빨라짐에 따라 점도가 낮아지는 경향인 전단 박화(shear-thinning) 거동을 나타내었다[23]. 이러한 거동은 폼 내부에 자리잡고 있는 기포들이 낮은 전단속도에서는 측정장비에 토크를 걸어주는 역할을 하고 있지만 높은 전단 속도에서는 그 기포들이 파괴되면서 상대적으로 더 낮은 토크가 걸리게 되면서 생긴 현상으로 파악된다. 또한 추가적인 가정으로 측정에 사용되는 시간 경과에 따라 생성된 기포들이 자연 소멸되면서 생기는 현상일 수도 있기 때문에 측정된 점도의 중간 값에 해당되는 5 1/s의 전단속도로 고정하고 시간에 따른 점도의 변화를 측정하였다. 측정 결과를 Figure 3에 나타내었다.

시간 경과에 따라 AFFF 폼의 점도 변화를 확인하기 위하여 5 1/s의 전단속도로 120 min 동안 점도 변화를 측정하였다. 결과를 살펴보면,

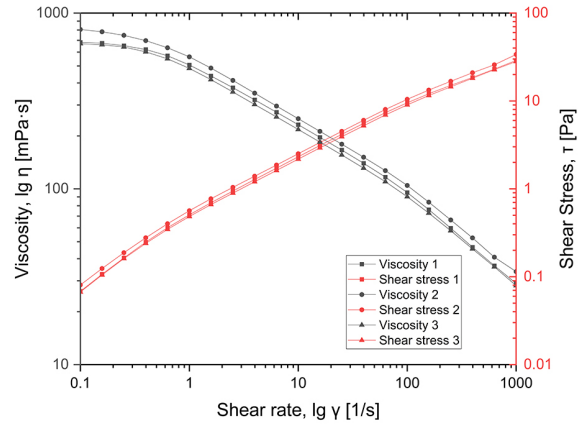


Figure 2. Viscosity and Shear stress according to the Share rate of AFFF foam.

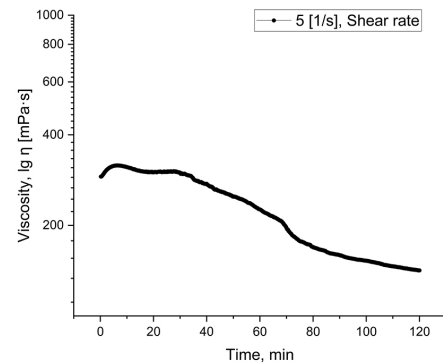


Figure 3. Variation of Viscosity of AFFF foam over time.

약 30 min까지 초기 점도인 300 mPa · s를 유지하고 있다가 그 이후부터 점도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 약 60 min에서는 초기 점도의 약 70%에 해당하는 210 mPa · s까지 감소하는 경향을 나타내었다. 측정 종료 시점인 120 min에서는 초기 점도의 50%에 해당하는 150 mPa · s까지 점도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 시간이 더 경과하면 이 점도는 더 낮아질 것으로 예상된다. 초기 화재 진압의 측면에서는 30 min까지 점도가 변하지 않고 폼의 형상을 유지하는 것은 매우 큰 의미를 가진다. 하지만 화재가 장시간 지속되게 되면 폼의 형상을 유지할 수 없으므로 이 데이터를 활용하여 화재 진압에 고려되어야 할 것이다.

다음으로 AFFF 폼은 화재 진압에 사용되므로 온도에 따른 경향을 확인하고자 하였다. 시간 경과에 따른 점도 측정과 마찬가지로 전단속도를 5 1/s로 고정시키고 온도를 15 °C부터 150 °C까지 변화시키면서 점도 변화를 측정하였다. 그 결과는 Figure 4에 나타내었다.

결과를 살펴보면, 온도가 증가함에 따라 점도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 특히 100 °C 이후에는 급격한 점도 변화를 보이다가 110 °C 이후에서는 점도가 측정이 되지 않는 결과를 나타내었다. 이는 측정된 폼의 94%가 물이기 때문에 물의 증발에 따른 결과로 예상된다. 물론 분석양이 실제 현장에서 사용하는 것과 달리 매우 작기 때문에 점도가 더 급격하게 영향을 받는 것으로 판단된다. 화염에 직접 노출되는 폼은 결국 형상을 유지하는 것이 어렵다는 것을 알 수 있었다. 하지만 실제 현장에서는 사용되는 양이 매우 많기 때문에 화염 소화가 가능하며 이 데이터를 활용하면 온도 안정성이 더 큰 폼 소화약제

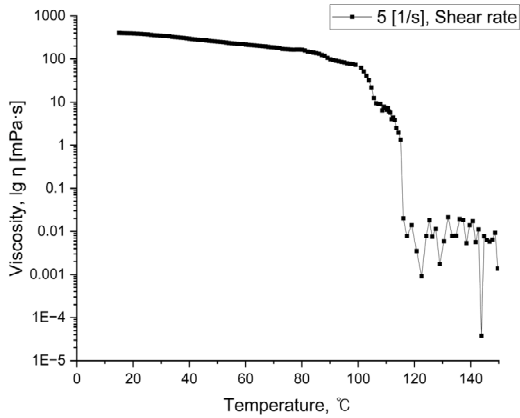


Figure 4. Viscosity of AFFF foam on temperature.

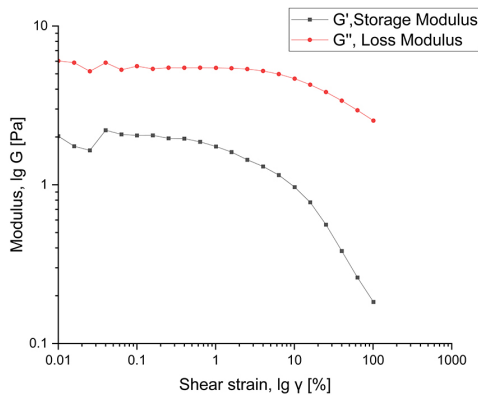


Figure 5. Modulus analysis evaluation of AFFF foam.

개발에 도움이 될 것으로 판단된다.

3.2. 점탄성 특성 평가

앞서서 AFFF 폼의 점도 특성을 평가하고 분석하였다. 여기에 추가적으로 점탄성 분석도 수행하였으며 modulus 분석 툴을 사용하였다. 해당 분석은 amplitude sweep 모드를 이용하였으며 그 결과는 Figure 5에 나타내었다.

결과를 살펴보면, 우선 측정 전반에 걸쳐서 점성 특성을 나타내는 loss modulus가 탄성 특성을 나타내는 storage modulus보다 더 크게 측정되는 것을 알 수 있다. 이는 폼이 탄성 특성보다 점성 특성을 더 크게 나타내는 유체라는 것을 의미한다. 따라서 폼은 액상에 가까운 거동을 나타내는 것을 modulus 분석을 통하여 입증할 수 있었다. 이는 폼 분사에 매우 큰 의미를 나타내며 기본적으로 유체특성을 메인으로 하여 분사 시스템을 설계하고 현재까지 측정된 데이터를 활용하여 상황에 맞는 분사조건을 설정하여 실제에 적용하면 효과적인 운영이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 폼의 단단함 정도를 나타내는 storage modulus 또한 폼의 형상 유지 능력과 관련이 있으며, 이 데이터는 향후 연구에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구는 함정 유류화재 대응을 위한 주요 소화약제 중 하나인 수성막포(aqueous film forming foam, AFFF)의 유변학적 특성을 체계적

으로 분석하였다. AFFF는 막 형성, 열 제거, 연소 억제, 화학 물질 혼합물을 이용하여 화재를 효과적으로 진압하는 데 사용되는 소화약제로, 함정 유류화재 대응에 핵심적인 역할을 한다. 특히 본 연구는 실제 화재 진압 시 사용되는 AFFF 폼의 유변학적 특성을 중점적으로 분석하였으며, 다음과 같은 중요한 결론을 얻을 수 있었다.

1. AFFF 폼의 유변학적 특성: AFFF 폼은 전단속도에 따라 점도가 변하는 비뉴턴 유체의 특성을 나타내며, 전단속도가 증가할수록 점도가 낮아지는 전단 박화(shear-thinning) 거동을 나타낸다.
2. 시간에 따른 점도 변화: AFFF 폼은 초기 점도를 유지한 뒤 일정 시간 이후에 점도가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 변화는 폼의 분리 현상과 관련이 있으며, 이는 폼의 안정적인 사용과 관련된 중요한 지표로 활용될 것이다.
3. 온도에 따른 점도 변화: 온도가 상승함에 따라 점도가 낮아지는 경향을 나타낸다. 특히 100 °C 이후에는 급격한 점도 변화를 보이다가 110 °C 이후에서는 점도가 측정되지 않는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 AFFF 폼이 화염에 직접 노출되는 경우, 폼의 형상을 유지하기 어렵다는 것을 시사한다.
4. 점탄성 특성: 점탄성 분석을 통해 폼이 점탄성보다 점성 특성을 더 크게 나타내는 것을 확인하였으며, 이는 폼이 액상에 가까운 특성을 갖는 유체임을 나타낸다. 이러한 결과는 폼 분사 시스템을 설계하고 현장에서 적절한 분사 조건을 설정하는 데 도움을 줄 것으로 예상된다.

본 연구는 폼 소화약제의 유변학적 특성을 분석함으로써 함정 유류화재 대응 및 선박 안전에 기여하고, 화재로부터의 위험을 최소화하며 안전한 해양 환경을 보호하는 데 기여할 것으로 기대된다. 하지만 앞으로 해결해야 할 과제가 존재하는 연구이다. 추후에는 본격적으로 분석에 대한 신뢰성 및 해석의 근거 확보가 필요하다. 이러한 단계가 해결된다면 레오미터 측정을 통한 데이터를 특정 용도에 사용되는 AFFF의 성능 평가 기준으로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 나아가 다양한 환경에 따른 여러 종류의 소화약제 폼의 유변학 해석으로 확장 역시 가능할 것으로 예상된다. 최종적으로 이러한 연구가 향후 새로운 수성막포 개발에 도움 될 수 있도록 해석의 체계화가 필요하다.

감 사

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민간협력진흥원에서 수행하는 민간기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (협약번호 UM23512RD5)

References

1. T. H. Park, T. S. Kim, J. H. Park, Y. J. Hyun, B. C. Lee, T. D. Kim, B. J. Kim, and J. S. Kwon, Experiments on the application of class A and B Fires to derive the optimum air ratio of compressed air foam systems, *Fire Sci. Eng.*, **37**, 38-43 (2023).
2. J. O. Park, Y. H. Yoo, and W. S. Kim, Numerical study on the foam spraying for AFDSS applicable to initial fire suppression in large underground spaces, *J. Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, **23**, 503-516 (2021).
3. H. Y. Kim, D. H. Rie, and S. S. Kim, Development of auto mixing system of high expansion foam for optimal expansion perform-

- ance according to changing temperature, *Fire Sci. Eng.*, **24**, 139-144 (2010).
4. Y. E. Song, Y. J. Joo, D. G. Shin, K. Y. Cho, and D. J. Lee, Thermal and rheological characterizations of polycarbosilane precursor by solvent treatment, *Compos. Res.*, **35**, 23-30 (2022).
 5. H. Y. Song and K. Hyun, Characterization of polymeric materials with rheological properties, *Polym. Sci. Technol.*, **28**, 401-408 (2017).
 6. I. K. Jang, S. R. Seo, and S. K. Park, Study on anti-washout properties and shear-thickening behaviors of surfactant added cement grouts, *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 480-484 (2012).
 7. Y. G. Jung and H. Y. Lee, Effects of temperature on the rheology of lecithin/CaCl₂ organogels, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 244-247 (2018).
 8. Y. S. Han, B. L. Choi, M. B. Kim, Y. W. Lee, and S. H. So, Full-scale fire suppression test for application of water mist system in road tunnel, *Fire Sci. Eng.*, **25**, 51-56 (2011).
 9. T. Y. Shin, S. H. Han, and J. H. Kim, Estimation of yield stress and plastic viscosity of concrete using the slump flow test, *J. Korea Concr. Inst.*, **32**, 165-171 (2020).
 10. E. H. Kwon, E. M. Lee, M. Y. Kim, H. S. Chang, Y. T. Guahk, K. H. Kim, and N. S. Nho, The rheological behaviors and non-newtonian characteristics of maltenes made by SDA method from oil sands bitumen. *Appl. Chem. Eng.*, **25**, 209-214 (2014).
 11. G. Kim, J. Fukai, and S. Hironaka, Rheological modeling of nanoparticles in a suspension with shear flow, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 445-452 (2019).
 12. J. B. Ahn and S. T. Noh, The rheology of the silica dispersion system with single and mixed solvent, *Appl. Chem. Eng.*, **20**, 685-691 (2009).
 13. B. Y. Lee, P. Dahal, H. S. Kim, S. Y. Yoo, and Y. C. Kim, A Study on the molecular weight control and rheological properties of branched polycarbonate, *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 388-393 (2012).
 14. K. N. Jang, M. R. Lee, B. R. Park, K. J. Yun, and E. S. Baek, An experimental study on a discharge pressure, flow rate and foam discharge concentration through the nozzle according to the foam suction nipple diameter, *Fire Sci. Eng.*, **29**, 84-97 (2015).
 15. Y. H. Yoo, S. H. Park, S. J. Han, and J. O. Park, The study on application of automatic monitor system for initial fire suppression in double-deck tunnel, *J. Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, **18**, 419-429 (2016).
 16. D. E. Kim and Y. C. Kim, Study on the physical and rheological properties of Nylon66/MWCNT composites, *Appl. Chem. Eng.*, **24**, 214-218 (2013).
 17. M. G. Kim, E. A. Chu, and H. Y. Lee, Effects of pentanol on the rheology of lecithin/LiCl Oranogel, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 679-683 (2021).
 18. J. S. Choi and B. S. Jin, Changes in rheological properties of o/w emulsions according to the type of nonionic surfactant and emulsion stabilizer, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 415-420 (2019).
 19. H. Ji, H. M. Lim, Y. W. Chang, and H. S. Lee, Comparison of the viscosity of ceramic slurries using a rotational rheometer and a vibrational viscometer, *J. Korea Ceram. Soc.*, **49**, 542-548 (2012).
 20. C. H. Choi, Y. S. Ok, B. K. Kim, C. S. Ha, W. J. Cho, and Y. J. Shin, Melt rheology and property of short aramid fiber reinforced polyethylene composites, *Appl. Chem. Eng.*, **3**, 81-87 (1992).
 21. S. J. Bak, S. W. Song, J. L. Lee, B. G. Min, and J. S. Sin, cure kinetics and rheological properties of epoxy resins containing low toxicity flame retardant, *Appl. Chem. Eng.*, **15**, 41-47 (2004).
 22. E. A. Chu, N. H. Kim, M. S. Kang, Y. M. Lee, and H. Y. Lee, Investigation of rheological properties of lecithin/D-sorbitol/water mixtures, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 247-251 (2023).
 23. S. T. Noh, H. S. Park, B. S. Cho, E. S. Yoo, and J. B. Ahn, Shear thickening behavior of fumed silica suspension in polyethylene Glycol, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 384-389 (2011).

Authors

Kil-Song Jeon; Ph.D., Researcher, Department of Fire Safety Research, KOREA Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; jeonkilsong@kict.re.kr
 Hwi-Seong Kim; B.Sc., Researcher, Department of Fire Safety Research, KOREA Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; hwiseongkim @kict.re.kr
 Jung-Hoon You; B.Sc., Researcher, Department of Fire Safety Research, KOREA Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; jhyou@kict.re.kr
 Yong-Ho Yoo; Ph.D., Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, KOREA Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseng 18544, Korea; yhyoo @kict.re.kr
 Jin-Ouk Park; M.Sc., Researcher, Department of Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Fire Researcher Center, Hwaseng 18544, Korea; jopark@kict.re.kr