

복사열에 노출된 소방용 폼 약제의 열적 특성 연구

김홍식[†] · 황인주^{*} · 김윤제^{**}

Thermal Characteristics of Fire-Protection Foams Exposed to Radiant Heating

H.-S. Kim[†], I.-J. Hwang^{*} and Youn J. Kim^{**}

Key Words : Fire-protection foam (소방용 폼), Heat radiation (복사열), Foam expansion ratio (폼 팽창비), Burnback resistance (인화 저항력).

Abstract

In order to evaluate the performance of fire-fighting agents used to protect structures from heat and fire damages, the thermal characteristics of fire-protection foams are experimentally investigated. The current research focuses on the destruction of a fire-fighting foam subjected to heat radiation. A simple repeatable test for fire-protection foams subjected to fire radiation is developed. This test involves foam generation equipment, a fire source for heat generation, repeatable test procedures, and data acquisition techniques. Results of the experimental procedure indicated that each thermocouple within the foam responded in a similar manner and gradually to a temperature of 15°C ~20°C. At this point, each trace generally rises to a temperature of approximately 90°C. The temperature gradient in the foam as time passes increases with increased foam expansion ratio. In addition, it is determined that the temperature gradient along the foam for depth decreases with increased foam expansion ratio.

기호설명

- T : 온도
 V : 용기 내의 폼 체적 (ml)
 W : 용기 내에 폼이 충전됐을 때의 총중량 (g)
 W_f : 용기의 중량 (g)
 X_{exp} : 폼 팽창비

1. 서론

화재발생시 인명과 건물을 보호하기 위한 소방활동의 수행 능력 평가에 관한 많은 연구가

진행되어 왔다. 폼 (foam)을 사용하여 화재를 진압할 경우 건축물의 외부는 폼에 의해 도포되기 때문에 열에 의한 피해를 막을 수 있다. 폼은 증발에 의해서 소산되어 열을 차단하고 흡수하는 우수한 성질을 가지고 있으며, 화원과 근접한 폼의 표면 온도는 수분이 남아 있는 한 증발 온도 이상으로 상승하지 않는 특성을 갖는다⁽¹⁾.

폼과 함께 물을 병용하는 화재 진압법은 매우 효과적인 소화 수단이며, 1904년에 처음으로 화재진압에 사용된 기록이 있다⁽²⁾. 이때 사용되었던 폼은 두 수용성 용액의 상호반응에 의해 생성되는 화학적 거품이었으며, 현재 널리 쓰이는 기계적 폼 생성방법이 도입되는 1950년대 중반까지 널리 사용되었다⁽³⁾.

화재 진압을 효율적으로 하기 위해서는 폼의 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 하지만, 폼은 본래 유동성이 강하기 때문에 물성을 쉽게 파악하기가 어렵다.

[†] 성균관대학교 대학원

^{*} 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부

^{**} 성균관대학교 기계공학부

TEL: (031)290-7448, FAX: (031)290-5849

E-mail: yjkim@skku.edu

일반적으로, 다음 네 가지 정의를 이용하여 소화용 폼의 성능 및 특성을 평가한다⁽⁴⁾.

1. 25% 수명시간 (또는 25% 환원시간): 폼 샘플의 25%가 수용액으로 환원되는데 소요되는 시간을 말한다.
2. 팽창비: 폼의 부피와 폼을 생성하는데 사용된 폼 농축액의 체적비이다.
3. 화재 진압능력 (fire performance): 주어진 크기의 화원을 진화하기 위한 폼의 성능에 비례한다.
4. 인화 저항력 (burnback resistance): 특정 테스트가 진행되는 동안 열에 견디는 폼의 성능을 말한다.

최근 화재예방 차원에서 폼의 사용이 대두되고 있지만 실험적으로 폼의 특성을 평가하는 것에는 많은 어려움이 있다. 일반적으로 폼의 성능은 화원을 소화하기 위해 폼을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우, 그리고 단순히 물을 사용하는 것에 대한 발화시간을 비교하여 평가한다.

Madrzykowski⁽⁵⁾는 가스 연료를 사용하여 복사열이 추가되는 압축공기 폼 시스템을 사용하여 폼을 수직 판넬 시편에 도포하였는데, 동일한 양의 물을 사용하는 것과 비교할 때 발화시간이 두 배정도 지연된다는 연구결과를 얻었다. 이때, 판넬에 도포되어 있는 폼량을 근거로 수분의 양을 산정하였는데, 폼의 두께는 폼에 내포된 물의 양과 물 만을 사용할 때의 양이 동일한 상태에서 산정하였다. 하지만, 사용된 물의 양보다 더 많은 수분을 함유한 폼이 수직판넬로부터 미끄러져 흘러내리지 않고 도포될 수 있기 때문에 폼 보호 실험에서 기록한 발화 지연 시간은 정확하지 않을 수 있다.

이보다 더 상세한 연구로 Persson⁽⁶⁾은 폼 표면 바로 위에 원추 모양의 방열체로부터 복사열을 추가하는 방식으로 폼의 성능을 시험하였다. 여러 가지 폼을 마른 상태이거나 인화물이 깔린 비이커에 담은 후, 폼의 수명과 증발율에 대하여 측정 연구를 수행하였다. 실험에 사용된 폼은 팽창비가 6.5에서 11.5의 범위를 갖는 일반적인 소화용 폼으로, 이러한 범위의 팽창비를 갖는 폼은 약간 습하므로 효과적으로 수직 표면에 부착되지 않았다. 부과된 복사열 범위는 0~35 kW/m² 이었으며, 증발율은 통상적인 복사 강도에 비례한다는 것을 밝혔다. 또한, 그는 폼의 수명이 추가되는 복사열에 따라 증가된다는 결론을

얻었고, 폼의 파괴가 복사열에 의해 가속화된다고 추측하였다.

복사열을 추가하는 방식과 팽창비 등의 변수에 따른 폼의 특성예측 및 측정에 관한 연구는 미미한 실정이다. 본 연구는 열이나 화재 등의 피해로부터 건물을 보호하기 위해 사용되는 소화용 폼의 특성에 관한 것으로, 복사열에 의한 폼의 파괴와 열침투 깊이를 고찰하였다.

2. 실험적 연구

2.1 개요

본 연구에서는 폼으로 덮인 표면에 복사열이 가해질 때의 상황을 모사하기 위해 실험장치를 제작하였다. 소화용 폼의 특성 파악을 위한 구성장치로는 크게 폼 생성 장치, 열 생성을 위한 화원, 그리고 데이터 획득 장치 등으로 구성하였다.

화원의 강도를 크게 하기 위해 양쪽 면에 각각 3개의 전기히터를 설치하였으며, 전기 히터에 의한 복사열은 화재 진압용으로 널리 쓰이는 소화용 폼인 수성막폼 (aqueous film forming foam: AFFF)에 노출되며 이때 폼 내부의 온도를 측정하였다⁽⁷⁾. 전기 히터는 폼으로 덮인 강판 부분에 일정 복사량이 공급되도록 방향설정을 하였으며, 반사판을 설치하여 복사열의 손실이 적게 설계하였다. 복사열의 측정은 열유속 변환기 (heat flux transducer, MEDTHERM, Schmidt-Boelter type)를 사용하였다. 폼이 도포되는 시험 강판 (900 cm²)에는 폼의 두께에 따른 온도를 측정하기 위해 높이차를 두고 열전대를 설치하였고, 일정한 두께로 폼을 도포한 후 강판을 전기 히터의 바로 아래에 위치시켰다. 증발온도 및 침투온도 등의 폼 특성을 위한 측정은 폼이 강판에서 완전히 증발되는 5~15분 동안 수행하였다. 또한, 폼의 화재 지연시간을 측정하기 위해 강판 온도도 측정하였다. 폼 내부 온도와 복사량은 데이터 획득장치 (YOKOGAWA, data acquisition control unit, DA-100, DS-600)를 사용하여 기록하였으며, 폼 표면의 온도를 가시화하기 위해 적외선 온도 측정기 (infrared thermography, JENOPTIK, VARIOSCAN 3011)를 사용하였다. Figure 1은 실험의 경제성을 고려하여 적은 양의 폼이 생산되도록 실험실 스케일의 폼 발생 실험장치 사진을 나타내며, 주된 구성 요소들의 작동특성은 다음과 같다.

폼 (foam): 소화용 폼은 수직 혹은 돌출 표면에 잘 부착될 수 있도록 점착성이 있어야 하고, 함수성과 좋은 열저항성을 가져야 한다. 이런 조건을 만족하기 위해서는 적합한 폼 농축액과 생성 시스템도 함께 결정되어야 한다.

본 실험에서 사용한 폼은 ANSUL사의 ANSULITE 3% 제품을 사용하였다. 이 수성막 폼은 안정적이며 내구성이 있어 소화용 폼에 적합하며, 한번 만들어진 폼은 적어도 12시간 이상 유지되는 특성을 갖는다. 폼은 팽창비에 따라 다르지만 수직면에도 10 cm의 두께로 쉽게 부착되었다. 하지만, 폼 두께의 절대 한계는 설정하지 않았다.

폼 발생장치 (foam generator): Figure 2에 도시한 압축공기 폼 발생장치는 여러 종류의 폼을 생성할 수 있다⁽⁵⁾. 압축공기는 액체상의 폼 수용액에 압력을 가하여 혼합기의 좁은 오리피스 관으로 유도하는데 쓰인다. 또한, 공기량 조절을 위한 니들 밸브 (needle valve)를 지나 혼합기 (mixing device)의 압축 수용액과 만나게 된다. 혼합기를 빠져나가면서 공기와 혼합액은 스테인레스 구슬이 들어있는 원통관인 폼 팽창기 (foam expander)에서 팽창된다. 이 관을 지나가는 동안, 공기와 혼합액은 완전히 혼합, 팽창되어 튜브를 통과하여 폼을 방출한다. 폼 발생장치의 팽창비 조절은 혼합기의 바로 상단에 위치한 공급 공기 조절용 니들 밸브로 이루어진다. 본 논문에서 사용된 폼의 폼 팽창비 (foam expansion ratio, X_{exp})는 12~32사이의 범위를 갖는다. 팽창비는 일정 범위에서 니들 밸브의 개도 변화에 따라 선형적으로 변하며, 계산은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다. 폼 수용액의 밀도는 1g/ml로 가정한다.

$$X_{exp} = \frac{V(ml) \times 1(g/ml)}{W(g) - W_1(g)} \quad (1)$$

공기 압축기 (air compressor): 폼 발생장치에서 쓰이는 압축 공기는 공기 압축기에서 발생되며, 압축공기는 레귤레이터를 통해 폼 수용액 탱크로 공급된다. 압축 공기는 폼 발생장치에 쓰이기 위해 1.5~2.0 kgf/cm² 정도의 일정한 압력으로 조절된다. 이 범위 내에서 공기의 압력 변화는 폼 유동율을 변화시키지만 폼 팽창비에는 큰 영향을 주지 않는다.

폼 수용액 탱크 (foam solution reservoir): 폼 발생장치에서 폼 수용액 탱크가 높고 가느다란 형상이라면 탱크 내의 폼 수용액에서 농도차가



Fig. 1 Photograph of experimental apparatus.

발생되므로 폼 팽창비에 현저한 차이를 나타낼 수 있다. 또한, 수용액의 압력변화는 공기비와 수용액의 유동률에 변화를 주어 생성된 폼의 팽창비에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 폼 제조 중 수용액에 미치는 중력의 영향을 최소화 하기 위해 지름이 크고 높이가 낮은 탱크 제작이 요구된다.

혼합기 (mixing device): 공기와 수용액 흐름의 압력 변화는 불안정한 폼 형성을 유발시킨다. 따라서, 혼합기는 공기와 수용액 유동 압력의 변화에도 부드럽게 폼이 배출되도록 설계되어야 한다. Figure 3은 폼 혼합기의 설계 단면을 보여준다. 본 연구에서는 혼합 수용액이 구슬이 채워진 폼 팽창기에 원활히 들어갈 수 있도록 등축 혼합 유로를 사용하였다. 폼 수용액은 세관을 통과하여 액상으로 분사하게 되는데,

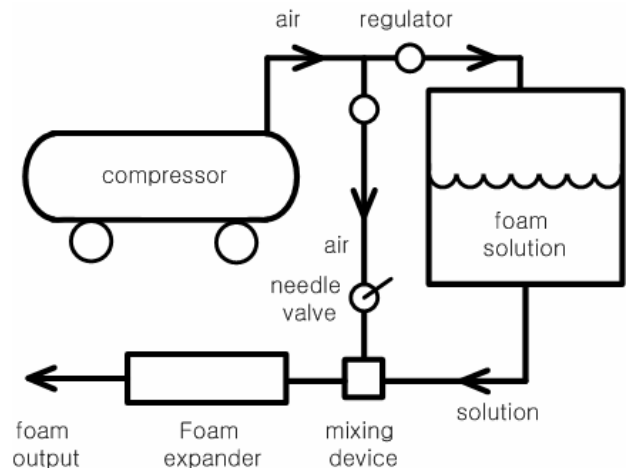


Fig. 2 Schematic of a foam generator.

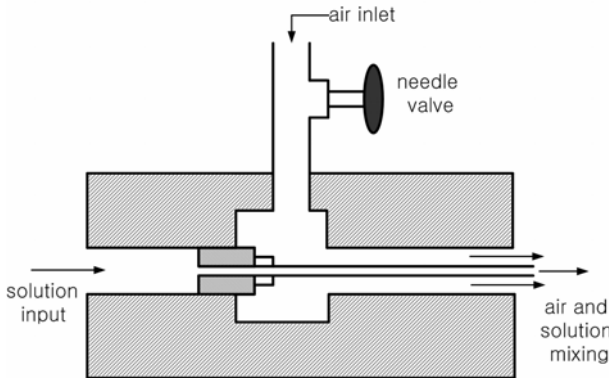


Fig. 3 Schematic of a mixing device.

시각적으로 관찰해 보면 유동의 안정성 여부를 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Figure 4는 팽창비가 11.6인 폼에 복사열 4.6 kW/m²를 가하였을 때 폼 내부 9곳에 열전대를 설치하여 온도 변화를 측정된 결과이다. 즉, TC 1은 강관에서 8 cm 높이, TC 2는 7 cm 높이, TC 8은 1 cm 높이, TC 9는 강관에서의 온도를 측정된 것이다. 폼의 높이는 10 cm 이상으로 강관 위의 열전대를 덮을 수 있게 하였다.

폼 내부에 설치된 9개의 열전대는 초기에 약 15°C~20°C를 나타내지만, 약 70°C까지 일정한 상승률로 급격히 상승한다. 그 후 온도 상승률은 서서히 증가하여 약 90°C에 도달하였다. 이는 폼 내부 수분이 증발하는 동안 열을 흡수하여 방출하기 때문에 폼이 완전히 기화될 때까지 폼 표면온도는 물의 기화온도에 가까운 90°C 이상까지는 상승하지 않기 때문이다. 일정한 형태의 온도 상승 이후에는 온도 분포가 크게 변동하는 것을 알 수 있다. 이는 열전대를 덮고 있던 폼이 증발하여 열전대가 폼 밖으로 노출되어 복사열에 직접 노출되기 때문이다.

Figure 4로부터 폼 팽창비 ($X_{exp}=11.6$)가 작기 때문에 폼에 함유되어 있는 수분이 많아 열전대가 반응하는 시간이 오래 걸리는 것을 알 수 있다. 강관에서 가장 멀리 위치한 열전대 (TC 1) 즉, 복사열원에 가장 가까운 열전대는 복사열이 가해짐에 따라 급격하게 상승하여 80°C까지 상승하는데 100 sec 정도가 소요되었다. 하지만 강관 (TC 9)에서의 온도는 폼이 완전 증발한 후인 300 sec가 되어야 상승함을 알 수 있었다. 이 결과를 유추해보면 약 25 cm×25 cm×10 cm 체적의 폼이 복사열

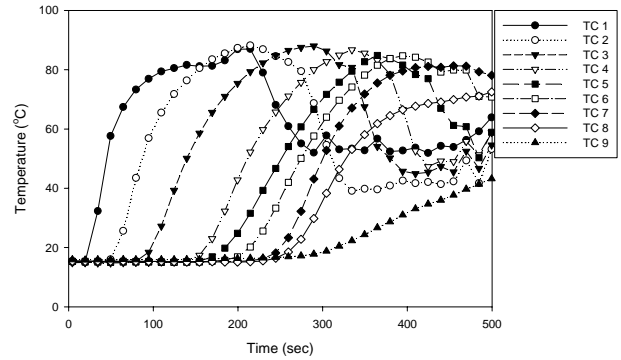


Fig. 4 History of temperature distribution in the foam ($X_{exp}=11.6$, $q^{\cdot}=4.6$ kW/m²).

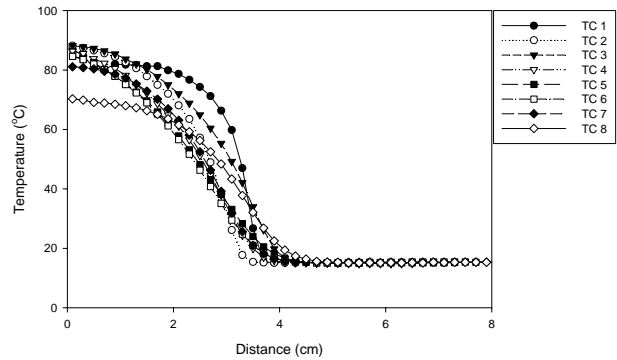


Fig. 5 Temperature distribution along the foam depth ($X_{exp}=11.6$, $q^{\cdot}=4.6$ kW/m²).

4.6 kW/m²을 갖는 화재에 노출될 때 300 sec 동안 보호 받을 수 있다는 것을 알 수 있다.

폼 표면에서 강관까지 거리변화에 따른 침투 온도는 Fig. 5에 도시하였다. 폼 내부로 복사열이

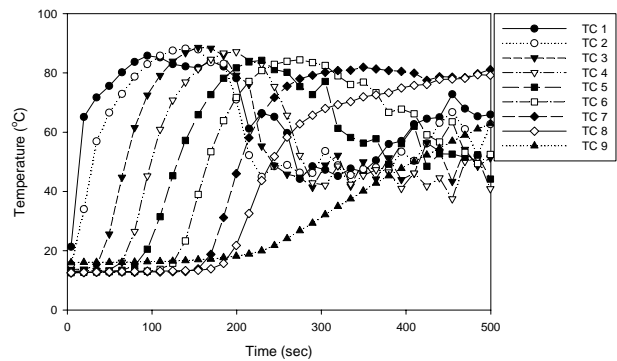


Fig. 6 History of temperature distribution in the foam ($X_{exp}=19.8$, $q^{\cdot}=4.6$ kW/m²).

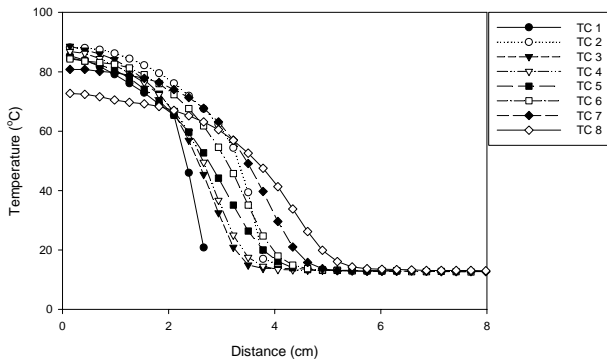


Fig. 7 Temperature distribution along the foam depth ($X_{exp}=19.8$, $q^*=4.6$ kW/m²).

침투되어 거리변화에 따라 분포되는 폼 온도는 Fig. 4에 도시한 각 열전대의 시간적 차이에 일정 시간을 곱하여 소거시키고 시간축을 거리축으로 바꾸면 Fig. 5처럼 나타낼 수 있다. 온도 변화를 보면 복사열은 약 3.5 cm 정도까지 침투되었으며, 그 이상에서는 거의 대기온도 상태로 유지되는 것을 알 수 있다.

각 열전대로부터 측정된 폼 내부의 온도 기울기는 30°C~70°C 범위 내에서 거의 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다.

Figure 6은 팽창비가 19.8인 폼에 복사열 4.6 kW/m²를 가하였을 때 폼 내부의 온도 변화를 나타낸다. 팽창비가 커짐에 따라 폼 내부의 온도 상승시간이 짧아지는 것을 알 수 있다. 즉, 복사열원에 가장 가까운 열전대인 TC 1은 팽창비가 11.6일 때 보다 급격하게 상승하였고, 강판 (TC 9)의 온도도 약 210 sec부터 상승함을 알 수 있다.

Figure 7은 폼 팽창비가 19.8일 경우 열전대 위

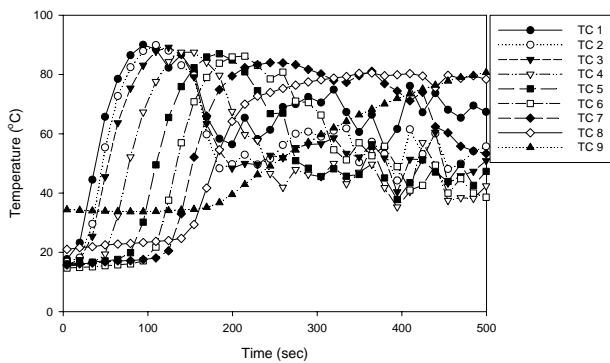


Fig. 8 History of temperature distribution in the foam ($X_{exp}=29.6$, $q^*=4.6$ kW/m²).

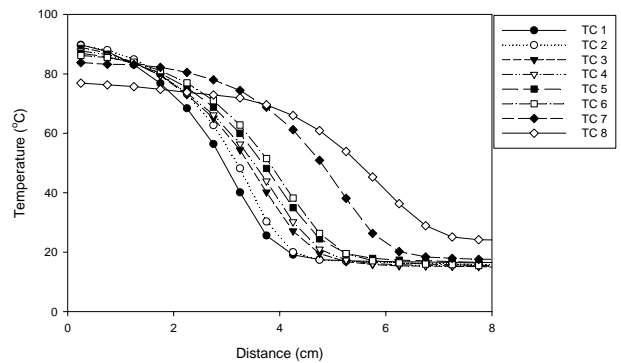


Fig. 9 Temperature distribution along the foam depth ($X_{exp}=29.6$, $q^*=4.6$ kW/m²).

치변화에 따른 온도 분포를 나타낸 것이다. 온도 기울기는 11.6일 때 보다 감소하였지만, 복사열의 침투 깊이는 약 4 cm로 증가하였다. 이것을 유추해 보면 동일한 침투 깊이에서 복사열이 커지면 온도 기울기가 커짐을 알 수 있다.

팽창비가 29.6인 폼에 동일한 복사열 (4.6 kW/m²)을 가하였을 때 폼 내부 온도 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 팽창비가 19.8일 때 보다 온도 상승 시간이 단축되었으며, 폼이 완전히 증발하여 강판의 온도 상승 시간도 160 sec로 짧아짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 9에 도시한 바와 같이 폼 표면에서 강판까지의 거리 변화에 따른 침투 깊이도 5 cm까지 증가하였으며, 온도 기울기는 더욱 감소하였다.

Figure 10은 팽창비가 29.6인 폼에 복사열 4.6 kW/m²를 가하였을 때 적외선 온도 측정기 (infrared thermography)로 폼 표면의 온도를 가시화

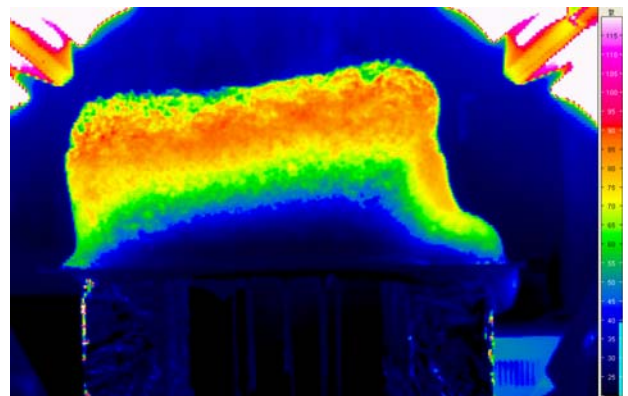


Fig. 10 Temperature visualization on the surface of fire-protection foam ($X_{exp}=29.6$, $q^*=12$ kW/m²).

한 것이다. 가시화 결과를 비교 및 평가하기 위해 폼 표면에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였는데 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 소방용 폼에 복사열이 가해질 때 폼의 특성에 따른 정성적인 관측과 함께 폼 온도 변화를 실험적으로 고찰하였다. 특히, 폼 내부의 온도 기울기는 폼 팽창비의 함수임을 알 수 있었으며, 침투 깊이가 동일할 때 복사열이 커지면 온도 기울기도 커짐을 유추할 수 있었다.

향후 연구에서는 다양한 복사 강도에 따른 폼의 특성과 소방 능력에 영향을 미치는 풍향, 폼의 노화 등과 같은 부차적인 영향들도 고려되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 지원 하에 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다 (R&D/01-E-01).

참고문헌

- (1) Colletti, D. J., 1993, Quantifying the Effects of Class A Foam in Structure Fire Fighting: The Salem Tests, *Fire Engineering*, Vol. 146, No 2, pp. 41 ~ 44.
- (2) Bikerman, J. J., 1953, *Foam: Theory and Industrial Applications*, Reinhold Publishing Corporation, New York.
- (3) NFPA publication SPP-44, *Fire Fighting Foams and other Foam Systems*.
- (4) Wilson, A. J., 1989, *Foams: Physics, Chemistry and Structure*, Springer Verlag, New York.
- (5) Madrzykowski, D., 1988, *Study of the Ignition Inhibiting Properties of Compressed Air Foam*, NISTIR 88-3880, U. S. Department of Commerce, NIST, Gaithersburg, MD.
- (6) Persson, H., *Fire Extinguishing Foams Resistance Against Heat Radiation*, 1992, *Proceedings of the 1st International Conference on Fire Suppression Research*, Stockholm, Sweden, pp. 359~376.
- (7) Colletti, D. J., 1994, *Class A Foam: An Emerging Technology*, *Compressed-Air Foam Mechanics*, *Fire Engineering*, Vol. 147, No 3, pp. 61 ~ 66.
- (8) Christopher, F. Boyd and Marino Di Marzo, 1998, *The Behavior of a fire-protection foam exposed to radiant heating*, *Int. J. Heat and mass transfer*, Vol. 41, No 12, pp. 1719 ~ 1728.