

조성비에 따른 Zr/BaCrO₄ 열지의 열적 특성

임채남, 이정민, 박병준, 강승호, 정해원^a

국방과학연구소 제 4기술연구본부 4부

Thermal Characteristics of Zr/BaCrO₄ Heat Paper with Fuel/Oxidizer Compositions

Chae-Nam Im, Jung-Min Lee, Byeong-June Park, Seung-Ho Kang, and Hae-Won Cheong^a

Agency for Defense Development, The 4th R&D Institute 4, Daejeon 34186, Korea

(Received July 4, 2016; Revised September 6, 2016; Accepted September 8, 2016)

Abstract: Thermal batteries use inorganic salt as electrolyte, which is inactive at room temperature. As soon as heat pellets are fired by an igniter, all the solid electrolytes are instantly melted into excellent ionic conductors. However, the abnormal heat generation by the igniter flame or heat pellets causes the thermal decomposition of the electrode and the melting of the anode, eventually leading to a thermal runaway, which results in overheating or explosion. The thermal runaway can be significantly reduced by the adoption of Zr/BaCrO₄ heat papers. In this study, the heat papers with various ratios of fuel (Zr) and oxidizer (BaCrO₄) were prepared by the paper-making process. We have investigated the calorimetric value, burning rate, and ignition sensitivity. The ignition test of heat pellets and the discharge test of thermal batteries were also carried out. At the composition of 40 wt.% of Zr, the heat papers showed the highest specific calorimetric value and burning rate. As a result, Zr/BaCrO₄ heat paper made by the paper-making process has shown the applicability for thermal batteries.

Keywords: Thermal battery, Thermal runaway, Zr/BaCrO₄ heat paper, Paper-making process

1. 서 론

열전지는 화약 열원(pyrotechnic heat source)을 이용해 짧은 시간에 전해질을 용융시킴으로써 활성화되는 전지로서, 음극(LiSi), 공용염(LiF-LiCl-LiBr), 양극(FeS₂) 및 열원(Fe/KClO₄)으로 구성되는 단위전지가 적층되는 구조를 갖는다(그림 1). 열전지는 외부에서 인가되는 활성화 신호에 의한 착화기(igniter)의 작동으로 화약 열원을 연소시켜 내부 온도를 약 500°C로 유지함으로써 전기를 발생시킨다

[1,2]. 하지만, 그림 1(a)와 같이, 열전지 내부에 순차적으로 적층된 열원 중 일부가 점화되지 않으면 발동시간이 느려져 방전 실패로 연결된다. 또한, 점화되지 않은 열원이 방전 중에 점화되면 국부적으로 과도한 열에너지가 유입되어 양극의 분해 및 음극의 용융을 일으킨다. 양극 분해는 황 가스를 배출하고, 이는 다시 음극과 반응하여 열폭주(thermal runaway)를 초래하며, 음극의 용융은 내부단락으로 인한 전지의 파열을 일으키는 원인이 된다고 보고되고 있다 [3,4]. 이와 같은 문제점을 해결하고, 열전지 내부 열원의 동시 점화 및 착화 신뢰성 확보를 통한 안정성을 증가시키기 위해 그림 1(b)와 같이 열지(heat paper)를 적용하여 사용하고 있다. 현대의 열전지에서 열지는 열원을 점화시키는 도화선으로 열전지의 발동시간을 단축시켜 운용 신뢰성을 향상시키는 목적으로 사용되고 있다 [5,6].

a. Corresponding author; imchw@add.re.kr

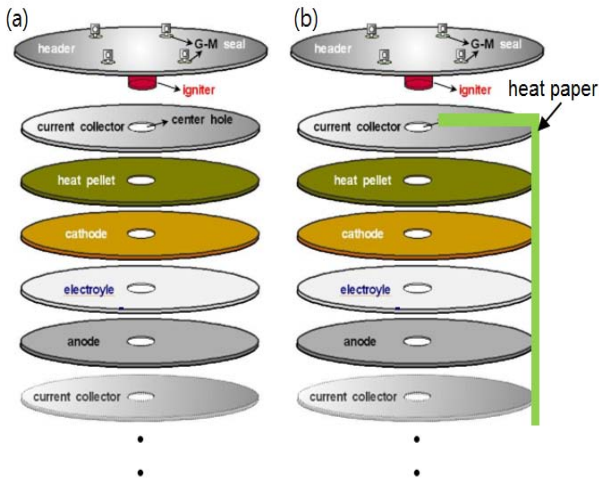


Fig. 1. The structure in thermal batteries; (a) without heat paper and (b) with heat paper.

Klasons 등은 세라믹 섬유를 구조체로 사용하여 Zr/BaCrO₄ 열지를 제조하며, 연소 속도는 10~300 cm/s, 발열량은 400 cal/g를 가져야 한다고 발표하였다 [6]. Papenguth 등은 열지 개발 초기 단계에서는 21/79 Zr/BaCrO₄ 조성을 사용하였으나, 최근에는 발열량을 증가시킨 28/72 Zr/BaCrO₄ 조성을 사용한다고 발표하였다 [7]. 열지 관련하여 다양한 연구들이 수행되었지만, 유리섬유를 포함한 최적 조성비를 갖는 Zr/BaCrO₄ 열지에 관한 연구는 아직까지 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 Zr/BaCrO₄ 균질성 확보 및 공정 단순화를 위해 초지 공정(paper-making process)을 적용하였으며, 다양한 조성비를 갖는 Zr/BaCrO₄ 열지를 제조하였다. 발열량, 연소 속도, 점화 감도 및 열원 점화 시험 등의 열적 특성평가를 진행하였다. 또한, Zr/BaCrO₄ 열지를 적용하여 열전지 작동 성능을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료

본 실험에서 사용한 파이로테크닉 연료(fuel)는 지르코늄(Zr, Sejong Materials Co., Korea)이다. Zr은 공기 중에 쉽게 발화되는 민감한 특성을 가지고 있어, 수분이 30 wt.% 이상 되도록 보관하였고, 평균 입자 크기는 1~2 μm이다.

Table 1. The physicochemical data of Zr and BaCrO₄.

Material	Density (g/cm ³)	Particle size (μm)	Note
Zr	6.5	2~3	in water(30%)
BaCrO ₄	4.5	1~2	Grinding

Table 2. The characteristics of GF(glass fiber).

Substance	Length (mm)	Diameter (μm)
GF-A	6~9	6 ±1
GF-B	1~3	1 ±1

산화제(oxidizer)인 크롬산바륨(BaCrO₄, Samchun Chemical Co., Korea)은 수 μm ~ 수백 μm로 넓은 입도 분포를 가지는 powder를 분쇄하여 1~2 μm의 평균 입자 크기를 사용하였으며, 물성은 표 1과 같다. 파이로테크닉 재료의 지지체로는 유리섬유(Belcotex[®] GF, Lauscha Fiber International Co., Germany)를 사용하였으며, 물성은 표 2와 같다. 유리섬유와 Zr/BaCrO₄와의 결합력을 증가시키기 위해서 폴리아크릴아미드(polyacrylamide, Hansol Chemical Co., Korea) 유기 바인더를 사용하였다.

2.2 제조공정

그림 2에 초지 공정을 적용한 열지 제조공정을 나타내었다. 그림 2의 Zr/BaCrO₄ 수용액은 수 μm ~ 수백 μm로 불균일하게 섞여 있는 BaCrO₄와 Zr를 계량하여 혼합한 후, 균일한 입자 크기를 갖도록 높은 전단력(shearing force)을 가진 콜로이드 밀(In-line Disperser, Esysndmt Co., Korea)을 이용하여 평균 입자가 1~2 μm가 되도록 분쇄 및 혼합하여 제조하였다.

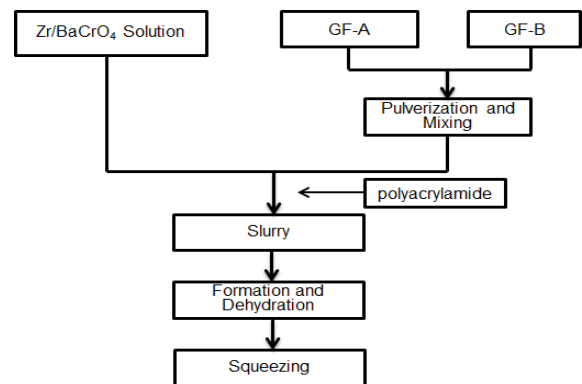


Fig. 2. The fabrication process of Zr/BaCrO₄ heat papers.

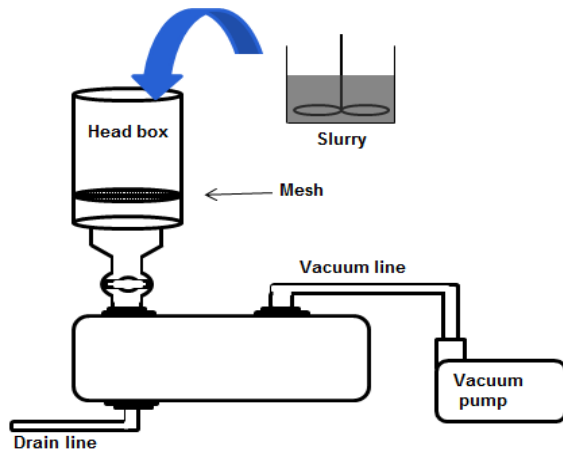


Fig. 3. Schematic diagram for the Zr/BaCrO₄ heat paper fabrication.

초지 공정을 이용한 열지 제조에 있어, 슬러리를 구성하고 있는 유리섬유와 Zr/BaCrO₄의 결합 및 균일한 분포가 열지 특성을 좌우한다고 볼 수 있다. 특히, 와이어 메쉬의 눈금 크기보다 작은 미세분말인 Zr/BaCrO₄는 초지 공정상에서 유출될 가능성이 높다. 따라서 섬유와 Zr/BaCrO₄를 결합시키거나 혹은 서로 응집시켜 섬유 내부에 잔류시켜야 한다. 유리섬유의 함량이 증가하면 열지 제조가 원활하고 강도 및 취급성이 향상되지만, Zr/BaCrO₄의 양이 상대적으로 감소하기 때문에 열적 특성이 저하된다. 이와 반대로 유리섬유 함량이 감소하면 Zr/BaCrO₄의 양이 상대적으로 증가하기 때문에 열적 특성은 증가하지만 강도 및 취급성이 저하되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 강도를 향상시켜 취급이 용이하도록 직경 및 길이가 긴 유리섬유(GF-A)를 열지의 지지체로 사용하였으며, Zr/BaCrO₄와의 결합이 용이하도록 직경이 작은 유리섬유(GF-B)를 사용하였다.

두 종류의 유리섬유를 적정량 혼합하여 분쇄한 후 교반 탱크로 이송하였다. Zr/BaCrO₄ 수용액을 첨가하고, 유리섬유와 Zr/BaCrO₄의 결합력을 향상시키고자 polyacrylamide(PAM)를 첨가한 후에 약품의 반응을 위해 500 rpm으로 약 3분간 교반하였다. 교반된 슬러리는 그림 3의 페이퍼 제조장치인 열지 제조장치(hand-sheet machine)의 headbox로 이동되어 지합(formation), 탈수(dehydration), 압착(squeezing) 공정을 거쳐 열지를 만들었다. Zr 및 BaCrO₄의 첨가량을 10~90 wt.%로 조절하였으며, 열지의 강도 및 취

급성을 고려하여 평량이 900~1,000 g/m², 두께가 0.60~0.70 mm가 되도록 제조하였다.

2.3 특성평가

제조된 Zr/BaCrO₄ 열지에 대해서 SEM (scanning electron microscopy, Philips)을 사용해 미세구조를 관찰하였다. 열지로서 요구되는 열적 특성중 발열량은 bombe열량계(Parr 6100, Parr Instrument Co.)를 사용하여 아르곤 분위기에서 측정하였다. 연소 속도는 그림 4의 측정 장치로 시험을 진행하였으며, 계측 및 기록은 DAQ (data acquisition system), 오실로스코프(MSO-8104A, Agilent Technologies Co.)를 사용하였다. 점화감도는 CO₂ 레이저 장치(Lasun-25, Medsun Co., Korea)를 사용하여 측정하였다.

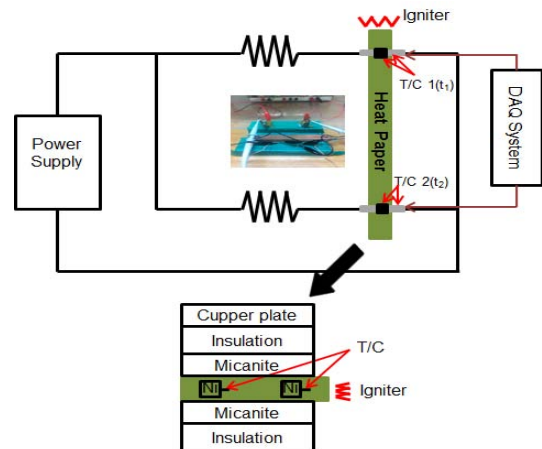


Fig. 4. The burning rate and combustion temperature test apparatus.

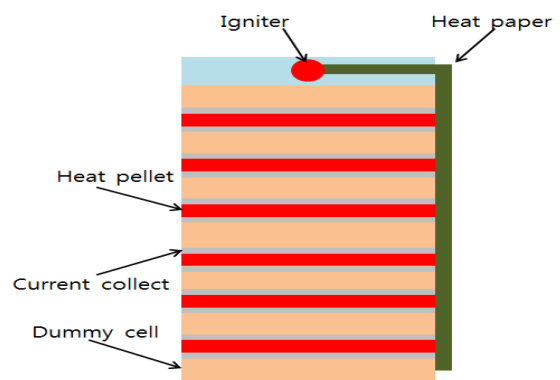


Fig. 5. Schematic diagram for heat pellet ignition tests.

열원점화 시험은 그림 5의 측정 치구를 사용하여 실시하였다. 제조된 열지를 적용하여 제작한 열전지로 방전시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세구조 관찰

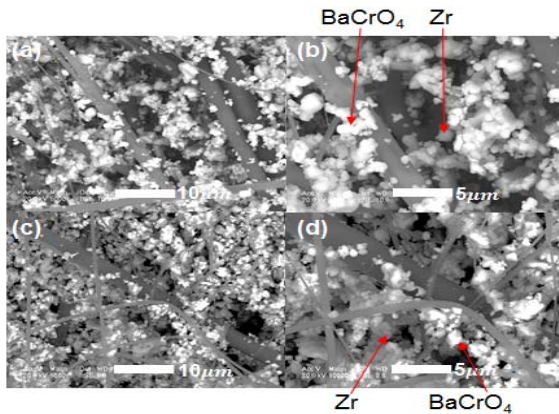


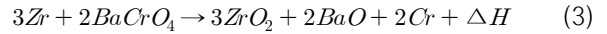
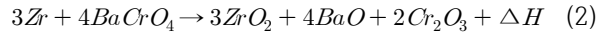
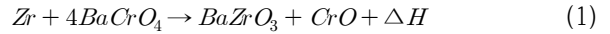
Fig. 6. SEM micrograph of Zr/BaCrO₄ heat papers with various ratios of Zr and BaCrO₄ powder; (a), (b) Zr 30 wt.%, (c), (d) Zr 80 wt.%.

그림 6은 유리섬유와 Zr/BaCrO₄간 결합상태 및 성분 분포 분석을 위한 SEM-BSE (back scattered electrons) 사진이다. 그림 6의 (b)와 (d)를 보면, 명암의 차이에 따라 Zr/ BaCrO₄를 확인할 수 있는데, BaCrO₄가 밝은 색을 띠며, Zr은 어두운 색으로 구분할 수 있다. Zr 함량이 증가함에 따라 열지의 색상이 전체적으로 어두운 것을 알 수 있다. 또한, 직경이 큰 유리섬유가 열지 전체의 지지체로 강도 및 취급성을 향상시키고, 직경이 작은 유리섬유는 Zr/BaCrO₄와 응집되어 고르게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

3.2 발열량

Zr/BaCrO₄ 산화반응은 식 (1) ~ 식 (3)과 같은 반응으로 이루어지며, Zr이 불충분하면 식 (1)에 의한 반응으로 BaZrO₃, CrO가 생성되며, Zr이 충분하면 식 (2) 및 식 (3)과 같이 ZrO₂가 생성된다. Zr/BaCrO₄의 완전연소를 위한 화학양론적 조성(stoichiometric composition)에 해당하는 Zr 함량은 약 40 wt.%이며, 이 때 발열량은 최대치(505 cal/g)를 갖는 것으로 알

려져 있다 [8].



유리섬유가 포함되어 있는 Zr/BaCrO₄ 열지의 연소 조건을 확인하기 위해서 식 (2)와 식 (3)에 대입하여 계산한 결과 Zr 함량이 35 ~ 55 wt.%일 때 가장 높은 발열량을 보이며, 이후 감소하는 것을 확인하였다.

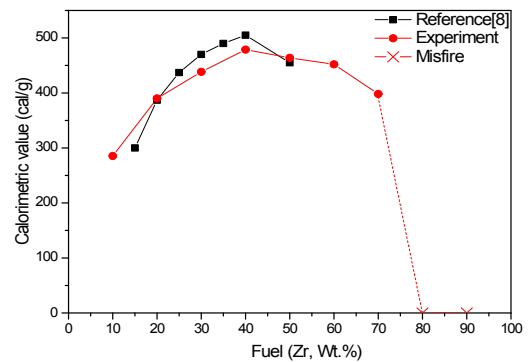


Fig. 7. A comparison of the calorimetric value in the reference and the experiment of Zr/BaCrO₄ heat papers.

Table 3. The thermal characteristics of Zr/BaCrO₄ heat papers.

Zr/BaCrO ₄ (%)		Calorimetric value (cal/g)	Burning rate (cm/s)	Ignition test (1 W, 10 ms)
Zr	BaCrO ₄			
10	90	285.4	6.8	○
20	80	390.0	50.7	○
30	70	438.3	128.6	○
40	60	478.7	173.3	○
50	50	463.9	120.6	○
40	60	452.0	61.0	○
70	30	398.2	7.6	○
80	20	-	0.9	○
90	10	-	-	○

그림 7 및 표 3을 살펴보면, Zr 함량이 증가할수록 발열량이 증가하였으며, Zr 40 wt.%에서 478.7 cal/g으로 가장 높게 나타났다. 이후 감소하여 50 wt.%에서

463.9 cal/g, 60 wt.%에서 452.0 cal/g, 70 wt.%에서 398.2 cal/g를 나타내었고, 80~90 wt.%에서는 미점화(misfire)가 발생하였다. 문헌값 [8]과 실험값 간의 오차는 열지 내부의 유리섬유 비율과 제조 공정상에서 Zr/BaCrO₄ 혼합분말이 물과 함께 일부 유출되어 발생한 것으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 Zr 함량 20~40 wt.% 부근(Zr 함량이 화학양론적 조성보다 부족한 구간)에서 실험값이 문헌값 보다 발열량이 약간 더 작은 것을 보면 알 수 있다. Zr(6.52 g/cm³)의 비중이 BaCrO₄(4.496 g/cm³) 보다 더 무겁기 때문에 열지 제작 중 탈수 과정에서 Zr이 상대적으로 더욱 많이 가라앉으며 빠져나갔기 때문인 것으로 해석된다. 발열량 측정은 아르곤 분위기에서 수행되며, 미점화는 연소되어야 할 화약류가 연소되지 않는 것을 의미한다. Zr 80~90 wt.% 열지는 BaCrO₄ 함량이 20~10 wt.%이므로 Zr이 산소와 결합하여 ZrO₂를 형성하면서 연소가 이루어지는데 산화제인 BaCrO₄의 양이 상대적으로 적기 때문에 미점화가 발생한 것으로 추측된다.

3.3 연소 속도

자체적으로 제작한 그림 4의 측정 장치를 사용하여 시험을 진행하였다. 시험 방법은 단열재 및 절연재 위에 열지를 놓고, 열지 위에 약 5 cm 간격으로 주석합금과 열전대를 올린 다음 단열재 및 절연재를 적층하고, 구리판으로 적당한 하중(240 g)을 가하여 움직이지 않도록 고정하였다. Power supply를 연결하여 전류를 흘려주고, 오실로스코프 및 데이터 측정장치로 데이터를 계속하였다. 착화기로 열지를 점화시키면 열전대를 통해 연소 온도가 계속되며, 동시에 양쪽 주석합금이 끊어지면서 발생하는 전위의 시간 차이를 이용하여 연소 시간을 산출하였다 (그림 8).

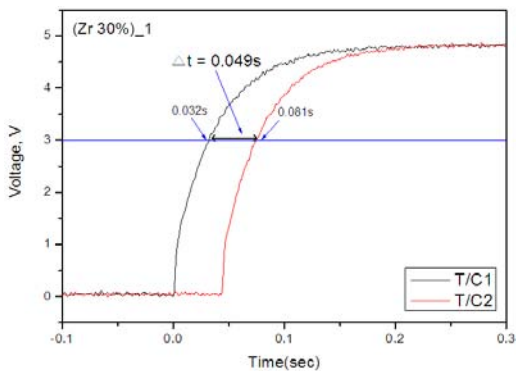


Fig. 8. The burning rate measurement of Zr/BaCrO₄ heat papers.

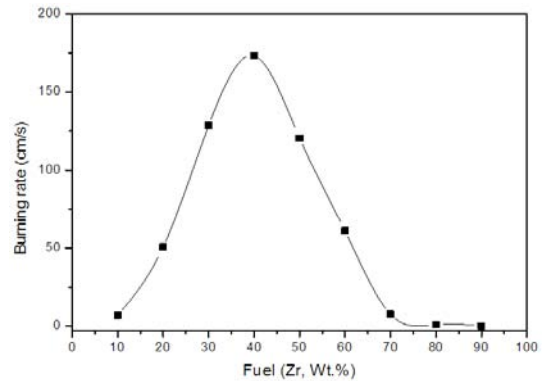


Fig. 9. Burning rate of Zr/BaCrO₄ heat papers.

시험은 각각 4회씩 진행하였고, 평균값을 표 3과 그림 9에 나타내었다. 그림으로부터 Zr 10 wt.%일 때 6.8 cm/s, Zr 40 wt.%는 173.3 cm/s로 Zr 40 wt.%까지는 함량이 증가할수록 연소 속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이후 50 wt.%에서 120.6 cm/s, 70 wt.%는 7.6 cm/s, 80 wt.%은 0.9 cm/s로 계속적으로 감소하였고 90 wt.%에서는 미점화가 발생하였다. 일반적으로 열량, 순도, 입자크기, 비표면적, 입자 모양 및 균일한 혼합이 연소 속도에 영향을 미친다고 보고되어 지고 있다 [9-11]. 따라서 이러한 결과는 연소 속도 증가 요인에 대한 보고와 같은 결과를 나타내고 있다. 열지 내부에 유리섬유와 응집되어 Zr/BaCrO₄의 평균 입자 크기는 1~2 μm이며, 균일하게 혼합되어 있다. 또한, 실험으로부터 Zr 40 wt.%일 때 최고치에 발열량을 나타내었고, 이와 상관관계에 있는 연소 속도 또한 40 wt.%에서 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 시험 완료 후 단열재 및 집전판을 제거하였을 때, 외부 산소의 유입으로 Zr/BaCrO₄ 열지가 연소되는 것을 확인하였다. 시험 중에는 집전판의 압력으로 인하여 시험장치 내부로 유입되는 산소의 영향이 없으며, Zr/BaCrO₄ 열지 내부의 산화제 함량이 부족하여 미점화가 발생한 것으로 볼 수 있다.

3.4 점화감도 / 열원점화시험

Zr/BaCrO₄는 정전기에 매우 민감하며, 건조한 환경에서는 낮은 에너지의 불꽃에 의해서도 쉽게 점화된다. 일반적으로 CO₂ 레이저 출력을 이용하는 방법 또는 고온 노에 넣고 온도 조건별에 따라 점화 성능을 측정하는 방법 등을 활용하여 시험을 진행한다고 보고 되고



Fig. 10. Ignition tests of Zr/BaCrO₄ heat papers.



Fig. 11. Heat pellet ignition tests by Zr/BaCrO₄ heat papers (Zr 20 wt.%).

있다 [12,13]. CO₂ 레이저 최소 출력을 1 W, 10 ms (0.0024 cal)로 정하여 대기 중에서 점화감도시험을 진행하였다(그림 10). 최소 출력 조건에서 모든 시료가 즉시 점화됨을 확인하였다.

열전지는 내부 발열 원인 열원이 점화되면서 고체 전해질을 용융시켜 전지로서 작동하게 되므로, 열원의 점화 여부는 열전지 신뢰성에 있어서 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 열전지는 착화기 불꽃으로 열원을 점화시키기 위하여 전극 중앙에 홀이 있다. 그러나 본 시험은 그림 5에서 보는 바와 같이, 착화기 불꽃에 의해 열원이 점화되지 않도록 전극 위쪽에 홀이 없는 절연체를 놓고, Zr/BaCrO₄ 열지로만 열원을 점화시키는 방법이다. 시험 방법은 더미(절연체)를 1 cm의 높이로 적층하고, 더미 상·하부에 열원(6장) 및 집전체(stainless steel)를 적층한 다음, 착화기 및 열원 측면에 Zr/BaCrO₄ 열지를 부착하였다. 퓨즈에 전류를 인가

하여 Zr/BaCrO₄ 열지를 점화시키고, 점화된 Zr/BaCrO₄ 열지에 의해 열원이 연소되는지를 확인하였다.

그림 11과 같이, 6장의 열원이 모두 점화되었고, 열원 점화 후 나타난 사선모양은 열원의 연소열에 의해서 직접적인 열 충격을 받은 집전체가 변형을 일으켜 나타난 현상으로 볼 수 있다.

3.5 열전지 방전시험

본 연구에서 제조된 Zr/BaCrO₄ 열지는 모든 열원을 안정적으로 점화시키는 것을 앞에서 확인하였다. 열전지의 발동 특성 및 작동 성능을 확인하기 위해 Zr/BaCrO₄ 열지를 적용하여 중앙 홀을 막고 방전시험을 실시하였다. 열전지는 내부에 3개의 셀 스택이 적층된 구조를 갖고 있으며, 작동 운용조건을 고려하여 저온(-32°C) 및 고온(+63°C)에서 시험을 수행하였으며 그 결과를 표 4에 나타내었다.

그림 12의 저온 시험 결과를 보면, 열지가 연소되는 적층 순서인 1~3적층에서 각각 0.48, 0.99, 1.20초 이내에 규격 최소전압인 24 V에 도달하였으며, 시간 경과 후에도 과열 및 전압 하락 등의 이상 현상 없이 정상적으로 방전이 진행되었다.

Table 4. Activation time of thermal batteries with Zr/BaCrO₄ heat papers(Zr 20 wt.%).

	Activation time (s)		
	Stack 1	Stack 2	Stack 3
Low temperature	0.48	0.99	1.20
High temperature	0.40	0.80	0.85

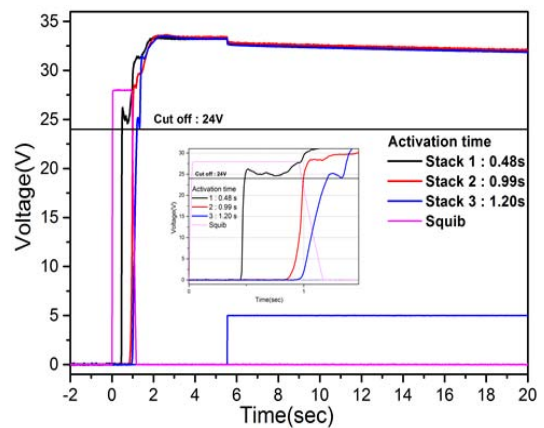


Fig. 12. Low temperature(-32°C) discharge test of thermal batteries with Zr/BaCrO₄ heat papers(Zr 20 wt.%).

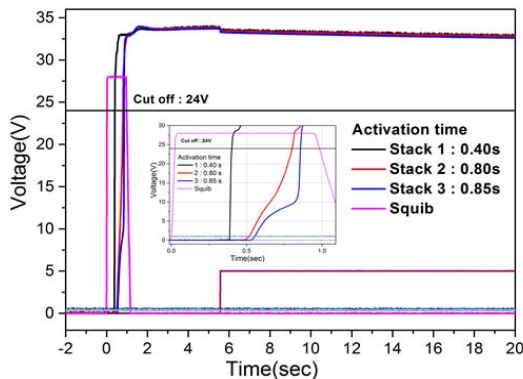


Fig. 13. High temperature(+63°C) discharge test of thermal batteries with Zr/BaCrO₄ heat papers(Zr 20 wt.%).

또한, 그림 13의 고온 시험 결과에서도 1~3적층에서 각각 0.40, 0.80, 0.86초 이내에 규격 최소전압에 도달하였으며, 정상적으로 방전을 완료하였다. 열전지 작동 초기에 열지가 점화된 후, 점화된 열지에 의해 각 스택의 열원이 차례대로 모두 점화되어 정상적으로 작동한 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초지 공정을 적용한 Zr/BaCrO₄ 열지를 제조하였고, Zr 및 BaCrO₄ 조성비에 따른 Zr/BaCrO₄ 열지의 발열량, 연소 속도, 점화 감도 및 열원점화시험 등의 열적 특성평가를 수행하였다. Zr/BaCrO₄ 열지를 적용하여 열전지 작동 성능을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직경이 큰 유리섬유가 열지 전체의 지지체로 강도 및 취급성을 향상시키고, 직경이 작은 유리섬유는 1~2 μm의 입자 크기를 가진 Zr/BaCrO₄ 분말을 고르게 분포시키는 역할을 하고 있음을 확인하였다.

(2) Zr 40 wt.%에서 476.5 cal/g, 173.3 cm/s으로 가장 높은 발열량과 연소 속도를 나타낸 후 점차 감소하였다. 화학양론적 완전연소 조건에 근접하는 Zr 40 wt.%까지 열적 특성이 증가한 후 점차 감소함을 확인하였다. 열원 점화시험에서는 Zr/BaCrO₄ 열지에 의해 열원(6장)이 점화됨을 확인하였다.

(3) Zr/BaCrO₄ 열지를 적용하여 저온(-32°C) 및 고온(+63°C)에서 열전지 방전시험을 실시한 결과, 저온에서는 1.20초 이내, 고온에서는 0.85초 이내에 각각 규격 최소전압인 24 V에 도달하였으며, 시간 경과 후에도 과열 및 전압 하락 등의 이상 현상 없이 정상적으로 방전이 완료되었다. 열전지 작동 초기에 Zr/BaCrO₄ 열지에 의해 각 스택의 열원이 차례대로 모두 점화되어 열전지가 정상적으로 작동하였다.

REFERENCES

- [1] R. A. Guidotti and P. Masset, *Journal of Power Sources*, **161**, 1443 (2006).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.013>]
- [2] H. W. Cheong, S. H. Kang, J. M. Kim, and S. B. Cho, *Journal of Ceramic Processing Research*, **13**, 198 (2012).
- [3] C. N. Im, J. M. Lee, S. H. Kang, and H. W. Cheong, *J. Korean Inst. Electorn. Mater. Eng.*, **27**, 528 (2014).
- [4] R. A. Guidotti, *Sandia Report* (Sandia National Laboratories, California, 2006) p. 1-18.
- [5] J. R. Sweeney, I. McKirdy, R. Comrie, and I. Stewart, *Aerospace Energetic Equipment Conference* (Avignon, France, 2004).
- [6] V. Klasons and C. M. Lamb, *Handbook of Batteries* (New York, USA, 2002) p. 1-22.
- [7] H. W. Papenguth, D. E. Wesolowski, and S. K. Showalter, *Proc. of 44th Power Sources Conference* (2010) p. 521.
- [8] H. Ellern, *Military and Civilian Pyrotechnics* (Chemical Publishing Company, New York, 1968) p. 274-289.
- [9] B. Berger, *Chimia*, **58**, 363 (2004).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.2533/00094290477677678>]
- [10] B. Berger, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **30**, 27 (2005).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/prop.200400082>]
- [11] T. Kuwahara, T. Kohno, and C. H. Wang, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit(AIAA)* (Atlanta, USA, 2012) p. 1-6.
- [12] T. Kuwahara and C. Tohara, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **27**, 284 (2002).
[DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1521-4087\(200211\)27:5<284::AID-PREP284>3.0.CO;2-T](http://dx.doi.org/10.1002/1521-4087(200211)27:5<284::AID-PREP284>3.0.CO;2-T)]
- [13] T. Kuwahara, T. Kohno, and C. H. Wang, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **29**, 56 (2004).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/prop.200400024>]