

정보기술용 섬유제품(3)

- 전지용품제조기술 -

축전지(battery)란 화학반응의 에너지를 전기에너지로 바꾸는 장치라고 할 수 있다. 이러한 축전지에는 한번 사용하고 버리는 1차 전지와 충전이 가능한 2차 전지가 있는데 2차 전지의 중요성은 최근 들어 높아가고 있다. 예를 들어 오늘날 우리가 경험하는 무선 통신의 혁명도 우수한 성능의 축전지가 개발되지 않았더라면 결코 이룩될 수 없었을 것이다. 그만큼 축전지는 이제 쓰이지 않는 곳이 없을 정도로 광범위하게 사용되고 있는데 작고도 우수한 성능을 지닌 축전지의 개발은 컴퓨터, 통신, 의료분야를 비롯한 여러 산업분야에 크게 이바지 할 것으로 보인다. 일반적으로 축전지에는 전극을 분리하기 위하여 격리막(Separator)이 사용되는데 이 격리막은 대부분 섬유로 되어 있다. 여기에서는 축전지 격리막에 사용되는 섬유소재에 대하여 기술하도록 하겠다.

1. 축전지 격리막

축전지의 원리와 구조를 니켈-카드뮴 전지를 예를 들어 설명해보자 전지의 기본요소로는 양극과 음극의 한 쌍의 전극과 전해액 및 격리막을 들 수 있다. 양극의 수산화니켈, 음극의 카드뮴을 분리하여 전해액인 수산화칼슘 수용액에 넣고 전극사이에 전구를 연결시키면 전구에 불이 들어온다. 이 때 만일 두 전극을 서서히 접근시켜 전극이 서로 접촉되면 전구의 불은 꺼지고 전기는 더 이상 흐르지 않게 된다. 이는 외부회로(전구)로 흐르도록 한 전류가 전극의 접촉부위에서 누설되기 때문이다. 이러한 전류 누설 현상을 방지하기 위해서는 양극과 음극이 서로 접촉하지 않도록 양극 사이에 격리막을 사용해야 한다.

축전지용 격리막에 요구되는 소재의 기본적인 특성은 다음과 같다.

- ① 절연체이어야 한다.
- ② 전해액의 침투성이 좋고 그 보액 능력이 높아야 한다.

- ③ 이온 전도도가 높아야 한다.
- ④ 전해액에 대해 화학적으로 안정해야 한다.
- ⑤ 전극 활성물질에 대하여 내산화·내환원성이 있어야 한다.
- ⑥ 유연성이 있고 기계적 강도가 커야 한다.

이상과 같은 요구특성을 만족시키기 위해서는 섬유로 만들어진(sheet)가 가장 적합하다. 섬유 시트는 다공질이고 섬유 사이에 형성된 무수한 모세관에 의해 보액 능력이 높을 뿐만 아니라 전기 절연체이고 유연하며 가도가 높다. 밀폐식 2차 전지인 아연-알칼리 전지를 예로 들어보면 충전시 양극에서 발생한 산소 가스는 전지 밖으로 배출되지 않고 전지 내의 음극과 반응하여 물로 되돌아오도록 되어 있다. 이 때 격리막은 양극에서 발생한 산소가스를 음극으로 잘 통하게 해주어야 하는데 섬유상 시트는 이러한 역할을 하는데 충분하다. <표 1>은 축전지 격리막으로 사용되는 섬유재료의 종류와 형태를 나타낸 것이다.

축전지용 격리막의 종류로는 전해질의 이동에 따라 개방형 격리막(open separator), 반투막 격리막(membrane separator) 및 미공성 격리막(micro-porous separator) 등이 있다.

<표 1> 격리막으로 사용되는 섬유의 예

전지		격리막의 예
1차 전지	망간 전지	크라프트지에 전분을 도포한 시트
	알칼리망간 전지	펄프나 레이온섬유를 비닐론과 혼합한 시트
	리튬 전지	미세 PP섬유 부직포 시트
2차 전지	밀폐형 니켈·카드뮴 전지	PP섬유 부직포 시트, 나일론 섬유 부직포 시트
	밀폐형 아연 전지	미세 유리섬유 매트
	자동차용, 2륜차용 아연전지	유리섬유 매트, 페놀수지를 함침함 린터 펄프 시트, 합성펄프, 유리섬유, 분말무기물 등으로 만든 시트

(1) 개방형 격리막

개방형 구조의 격리막은 수용액계의 2차 전지 중, 충전시 양극으로부터 발생하는 산소가스를 음극 상에 흡수시키는 밀폐방식의 납전지, 니켈-카드뮴 전지 및 니켈-수소화물 전지에 작용되고 있다. 이 격리막은 전술한 기본기능뿐 아니라 가스 투과성도 우수하다. 삼성 전해액인 황산을 사용하는 납전지에는 1 μ m이하의 미세 유리섬유, 그리고 알칼리성 전해액인 KOH 수용액 등을 사용하는 니켈-카드뮴 전지나 니켈-수소화물 전지에는 폴리아미드나 PP등으로 제조된 부직포나 직물이 사용된다. PP의 경우 소수성이므로 전해액의 침투성이나 보액성이 나쁘기 때문에 계면활성제로 처리하거나 일부를 술폰화 처리 또는 폴리아미드와 혼방함으로써 친수성을 부여하는 것이 일반적이다. 유기용매를 사용하는 리튬 1차전지에는 처리하지 않은 PP섬유로 만든 부직포나 직물이 적용된다. 또 염화티오닐-리튬 전지에는 유리섬유로 만든 격리막이 사용된다. 1차전지인 망간전지에는 천연섬유를 습식으로 제조한 얇은 종이가 사용되며, 알칼리 망간전지나 수은전지의 격리막으로 PVA 섬유로 만든 얇은 종이가 사용되고 있다.

(2) 반투막 격리막

반투막 격리막으로 재생 셀룰로스로 만든 셀로판 등이 있으며 이들을 알칼리 수용액 중에서 이온교환막처럼 거동한다. 이 격리막은 아연산 이온의 투과 및 아연의 수지상 전기투석에 의한 단락의 제어효과가 있기 때문에 산화은-아연전지나 니켈-아연전지 등과 같이 아연을 음극으로 하는 전지에 적용되고 있다.

(3) 미공성 격리막

미공성 격리막은 개방형전지에 사용된다. 니켈-카드뮴 전지, 니켈-철저니, 니켈-아연 전지 및 산화은-아연 전지 등의 알칼리 전지에 구멍의 지름이 10 μ m 이하이고 두께가 200~100인 PE나 PP로 만든 박막형 미공성 격리막이 사용되며 또한 아크릴산이나 메타크릴산을 그래프트 중합시켜서 전도도나 보액성을 향상시킨 것도 사용된다. 이 격리막의 기능은 전지의 종류에 따라 다른데, 니켈-카드뮴 전지 및

니켈-철전지에서는 카드뮴이나 철의 이동(migration)에 의해 단락의 억제분만이 아니고 가스흡수반응에 의한 특수한 열의 발생을 피하기 위해 산소가스의 투과를 차단하는 기능이 작용하고 있다. 한편 니켈-아연 전지 및 산화은-아연 전지에서는 양극으로부터 발생하는 산소나 전해액에 용해한 은산 이온에 의해 산화를 받아 격리막이 손상되기 쉽기 때문에 전술한 셀룰로스가 격리막이 그 대체품으로 사용된다. 또, 셀룰로스가 격리막의 산화를 억제하기 위하여 병용해서 다층박막으로 하는 경우도 많다. 밀폐형 니켈-아연 전지나 대용량의 니켈-카드뮴 전지에는 미세공의 지름이 1미이하이고 다공도가 더욱 높은 미공성 격리막이 사용되는데 수명을 길게 하기 위하여 개방형 격리막의 부직포와 함께 사용하기도 한다. 납전지의 개방형에는 PE 섬유와 실리카를 혼합하여 얇은 종이 형태로 만든 것 또는 지름이 20 정도의 펄프 섬유를 만들고 이것에 합성수지로 강화처리 한 것 등이 사용되고 있다.

이상과 같이 섬유는 축전지 격리막의 중요한 구성재료로서 사용되고 있지만, 축전지의 전극재료로 이용되는 경우도 있다. 예를 들면, 납전지나 니켈-카드뮴 전지의 페이스트(paste)식 음극에는 염화비닐과 초산비닐과의 공중합체나 PP로 제조한 길이 1mm 정도의 단섬유가 강도보강재로서 첨가되고 있으며, 탄소섬유는 양극 및 음극의 집전체로서 이용되기도 한다.

2. 전기절연재용 소재

전기가 사용되는 곳에서는 항상 전기절연재를 필요로 한다. 한편, 산업이 고도화함에 따라 절연재의 요구 특성도 한층 강화되어 오늘날에는 두께는 최소화하면서도 충분한 절연효과를 갖는 새로운 절연재료의 필요성이 크게 대두되고 있다. 합성 또는 천연고분자로 만들어진 섬유는 대부분 전기의 절연체로서 절연재로 사용이 가능하다. 또한 섬유는 유연하고 다양한 모양으로 만들 수 있기 때문에 제작이 용이하고 휘어지기 쉬우며 강인하다. 소재에 따라서는 내열성과 내환경성이 우수하여 내구성 있는 절연재로 사용될 수 있다. 특히 전통적인 절연재인 석면의 대체재로서 그 중요성이 높아지고 있다.

(1) 전기 절연재의 요구특성과 종류

전기 절연재는 전류가 통하는 한 부분에서 다른 곳으로 전류가 흐르는 것을 막는 역할을 하는 물질을 말한다. 이러한 전기 절연재의 일반적인 요구 특성으로는 높은 절연내력(dielectric strength, kV/mm)과 절연재내에서의 낮은 전력손실을 들 수 있다.

교류계에서의 요구특성은 낮은 유전손실(dielectric loss, W/cm³), 낮은 유전손실률(dielectric dissipation factor) 및 낮은 유전역률(dielectric power factor)을 들 수 있다. 한편 직류계에서는 절연재의 표면을 통해 전류가 새어 나가는 것에 대한 저항성이 높아야 하는데 이러한 저항성은 체적저항(volume resistivity, $\Omega \cdot \text{cm}$)이나 표면저항(surface resistivity, Ω/square)으로 나타낸다. 또한 전기절연재는 이러한 전기적성질 이외에도 각종 외부의 환경(전기적 충격, 열적 충격, 기계적 충격)에서 견딜 수 있을 만한 충분한 강도와 내환경성을 가져야 한다.

일반적으로 전기절연재료는 섬유만 단독으로 사용하는 일은 거의 없고, 보통은 절연유를 함침하거, 합성수지를 도포 또는 함침한, 이른바 절연시스템이 사용되고 있다. 이 때 전기 절연재로 사용되는 섬유는 절연시스템에 함께 사용되는 물질에 대한 상용성 내지는 저항성이 있어야 한다.

절연시스템은 그 허용상한온도에 따라 여러 가지 등급으로 나뉘어지는데 <표 2>는 내열 등급별로 사용되는 섬유재료의 종류와 함께 사용하는 함침재료를 나타낸 것이다. 대용량변압기 케이블의 절연은 크라프트지(craft지)나 압축보드(press board)에 광유를 함침한 것을 쓰고 있으나 저유전율이 필요한 케이블에서는 PP 합성지와 크라프트지의 접합재가 쓰인다. 또 변압기에서는 종이 펄프와 폴리메틸 펜텐 섬유를 혼합하여 만든 압축보드가 일부 사용되고 있다. 또한 전차의 변압기는 내열등급 A(105℃)이지만, 어떤 상황에서는 비록 단시간이라도 130℃ 이상이 되는 경우가 있으므로 아라미드 종지와 실리콘유의 조합이 사용되고 있다. 최근에는 광유 대신 SF₆ 가스나 플루오르화 탄소액을 사용한 불연변압기가 개발되고 있다. 여기에는 크라프트지 대신 아라미드 종이나 폴리에스터 필름이 사용되는 경향이 있다.

<표 2> 절연시스템에 사용되는 섬유재료별 내열등급

내열등급	온도(℃)	섬유재료	함침 도포재료
Y	90	아크릴, 레이온, 비닐론, PE, 폴리아미드, PP, 종이, 셀룰로스	없음
A	105		광유, 유성니스
B	130	폴리에스터, 종이, 셀룰로스	알키드, 에폭시, 불포화폴리에스터
F	155	아라미드, 유리섬유	위와 같으나 내열성이 더 양호한 것
H	180		실리콘, 폴리이미드
200	200	유리섬유	폴리아미드이미드
220	200		비스말레이미드

내열 등급으로 보면 유기섬유가 사용될 수 있는 것은 등급 H까지이고, 그 이상은 유리섬유가 주로 사용되고 있다. 최근 주목받는 초전도·극저온기기의 절연구조재에도 유리섬유가 가장 많이 사용된다. <표 3>은 각종 섬유질 기재에 에폭시 수지를 함침한 적층판의 극저온물성을 나타내고 있다. 극저온용 재료로서는 강도와 파단신장이 크고, 열수축률이 적은 것이 좋다.

<표 3> 섬유강화 에폭시수지 적층판의 극저온 물성

섬유강화재	인장강도(MPa)		파단신도(%)		열수축률(%) 20℃ → -196℃	
	20℃	-196℃	20℃	-196℃	세로축	가로축
크라프트지	135	128	1.4	1.1	0.27	0.60
레이온부직포	47	88	2.3	1.8	0.78	0.83
폴리에스터 부직포	75	124	3.4	2.8	0.77	0.82
폴리에스터	66	115	3.4	2.9	0.77	0.86

직물						
나일론 직물	95	128	17.8	4.7	0.82	0.88
유리섬유직물	240	450	4.3	5.2	0.23	0.65
유리로빙 직물	360	560	1.8	6.8	0.20	0.67
유리매트 직물	130	250	2.4	4.5	0.30	0.68
탄소섬유 직물	470	490	1.2	1.2	0.02	0.87
아라미드 직물	410	450	2.1	2.2	0.00	0.93

(2) 사용형태

전기 절연재로 쓰이는 섬유는 대부분의 경우에 직물이나 부직포 또는 종이의 형태로 사용되며 필요에 따라 수지를 함침시키기도 한다. 섬유재료와 함침재료의 조합은 무수히 많으나 가장 널리 쓰이는 전기 절연재의 종류와 성질을 정리하면 <표 4>와 같다.

<표 4> 섬유상 전기 절연재의 전형적인 물성

		비중	두께	신장율	인장강도	인열 강도 (kN/m)	열적 등급	절연 내력	유전 상수	유전 손실 률	체적 저항
	석면종이 (바인더없는)	0.72	0.088		0.90		300				
	석면종이(유기 질 바인더로 결합된)	0.82	0.25	1			130				
	석면판 (유기질 바인 더로 결합된)	0.96	0.8		MD : 110~250 CD: 66~131						
	유리섬유 직 물(에폭시수지 로 결합된)	1.3~ 1.45	0.12~ 0.25	2.3 2.4	MD : 90~145 CD : 19~55		155				
	셀룰로스가 섬유 표준크	0.68 ~	0.25	3.5 7.5			90				

	라프트지	1.35									
	셀룰로오스계 유 개퍼시터 크 라프트지	0.75~ 1.15	0.015								
	셀룰로오스계 섬유 크라프 트 보드	0.9~ 1.35	3	5~6 8~10	MD : 83~152 CD : 28~61						
	아라미드 종 이(바인더 없 는)	0.01	0.25	21 18		MD:32 CD: 16					
	폴리에스터종 이 (에포시 수지 함침된)	1.5	0.38	24 5~24	MD : 46 CD : 30						
	폴리에스터 적층판 (매트/필름/매 트)	0.97	0.25	42 46		MD:19 CD:14					

(3) 전기 절연재용 섬유

전기 절연재로 사용되는 무기계 섬유재료로는 석면(asbestos)과 유리섬유가 있다. 유기계 섬유로는 셀룰로오스계 섬유가 가장 오랫동안 사용되어 왔으나 그 사용량은 점차 줄어들고 있고 지금은 아라미드 섬유폴리에스터 섬유 등 합성섬유가 많이 사용되고 있다. 대표적인 전기 절연재용 섬유로는 다음과 같은 것들이 있다.

① 석면

전기 절연용으로 사용되는 석면은 크리소타일(chrysotile)로서 수화된마그네슘 실리케이트이며 조성식은 $Mg_6(OH)_8Si_4O_{10}$ 으로 표시된다. 크리소타일 석면은 섬유 제조장치에 의해 실 또는 직포로 만들어지거나 습식법에 의해 종이로 만들어진다. 100% 석면으로 된 종이는 강도가 너무 약하기 때문에 소량의 보강섬유나 바인더를 넣어서 물성을 보강한다. 또는 100% 석면 종이에 다른 포화제(Saturant)를 넣어

물성을 개선하여 사용하기도 한다.

석면은 300℃ 까지 유선성능을 유지하지만 실제 사용가능 온도는 함께 사용하는 보강섬유나 바인더의 종류와 양에 따라 달라진다. 석면 절연재는 일반적으로 저전압을 사용하는 경우에 사용되며 내열성이 요구되는 곳에 사용된다. 그러나 석면은 폐암을 유발하기 때문에 그 사용에 있어서 크게 제한을 받고 있다.

② 유리섬유

알칼리가 없는 알루미늄-보로실리케이트 유리(alumino-borosilicate glass)가 사용된다. 연신된 유리섬유는 연속섬유(continuous filament) 또는 단섬유(chopped fiber)의 형태로 만들어져 직물이나 부직포 매트 또는 종이로 만들어 진다. 유리섬유 매트나 종이는 압축하여 밀도를 높일 경우 섬유의 파손이 발생하므로 수지에 함침하는 방법이 일반적으로 사용된다. 유리섬유는 연화점(softening point)이 538~593℃로 높아 내열성이 좋고 열전도율이 높으며 수분율이 낮고 내화학성이 좋다. 실제 사용온도는 함께 사용하는 수지의 종류에 따라 결정된다.

③ 셀룰로스계 섬유

셀룰로스는 가장 값싼 섬유재료 중의 하나이고 셀룰로스계 종이는 다양한 두께와 등급으로 제조할 수 있기 때문에 사용이 용이하다.

종이의 기계적 성질은 보통 수준이고 재질이 유연하고 다루기 쉬울 뿐만 아니라 수지나 기름에 함침하기도 용이하다. 종이의 유전상수(dielectric constant)는 주파수가 증가할 수 있도록 감소하는 반면 유전손실은 주파수와 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있지만 통상적인 주파수 범위 및 온도에서는 그다지 문제되지 않는다. 일반적으로 셀룰로스계 섬유로 만든 종이는 100 이상에 급격히 분해되므로 그 응용은 낮은 온도에 한정된다. 미처리 종이의 경우 <표 2>의 등급 Y(90℃)에 해당하며 수지로 처리한 경우에는 등급 A(105℃)에 해당하는 내열성을 갖는다. 셀룰로스 섬유는 수분을 잘 흡수하기 때문에 수분에 의해 전기적 성질이 달라지기 쉬운데, 셀룰로스의 수산기를 아세틸화 또는 시아노에틸화시키면 수분의 영향을 크게 줄일 수 있다.

④ 폴리에스터 섬유

전기 절연재로 사용되는 폴리에스터계 섬유는 주로 PET 섬유로서 PET 섬유는 기계적 성질이 우수하고 유연하기 때문에 사용이 용이하다. 100% PET 섬유를 사용한 경우에는 통상 120℃ 까지 사용 가능하며 적절한 수지를 함침할 경우 등급 F(155℃)로도 가능하다. 폴리에스터는 강산에 공격을 받으면 분자사슬이 절단되고 페놀이나 크레졸과 같은 유기용제에 용해되기 쉽다는 문제가 있지만 절연재로 사용하는 대부분의 기름에 대해서 좋은 안정성을 가지므로 별로 문제되지 않는다. 사용형태는 주로 종이나 부직포 매트 형태인데 매트の場合は 폴리에스터 필름과 라미네이트하여 사용되기도 한다. 이러한 라미네이트 소재는 유연하며 등급 F의 내열성을 갖는다.

⑤ 아라미드 섬유

전기 절연재로 사용되는 아라미드 섬유는 메타계 아라미드인 PMIA[poly(m-phenylene isophthalamide)]이며 주로 종이의 형태로써 사용된다. 아라미드 종이는 유전특성이 뛰어나고 기계적 성질이 매우 우수하며 다양한 두께로 제조할 수 있다. PMIA 는 융점이 없고 375℃ 에서 분해가 시작되므로 내열성이 매우 우수하지만 실제 사용온도는 220℃ 정도이다. 또한 수분흡수에 따른 유전능력의 변화가 거의 없다. 아라미드 종이는 함침용 수지와 상용성이 좋은 편이고 산이나 유기약제에 대한 저항성이 우수하다. 또한 β -선 및 γ -선에 대한 저항이 뛰어나서 원자력발전설비에 유용하다. 그러나 아라미드 섬유는 성능이 우수한 반면 고가이기 때문에 연속사용온도가 높거나 원자력 발전설비 또는 설비의 신뢰도가 크게 요구되는 특수한 분야에 사용되고 있다.

3. 수소저장용 섬유

탄화수소계의 연료를 차량내에서 수소가 풍부한 가스로 개질시켜 이용하는 방법은 연료 공급이 용이하고 연료 공급당 주행거리가 길다는 점이 있지만, 개질 가스 중 부생성물에 함유된 일산화탄소(CO)는 PEMFC의 음극(수소극)의 백금촉매

에 흡착하여 촉매성능을 떨어뜨리는 촉매 피독 현상을 일으켜 실용화시 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 순수한 수소를 직접 사용하는 연료전지가 관심의 대상이 되고 있으며 이 때의 수소저장 방법으로는 다음과 같은 방법이 있다.

(1) 압축 수소방식

압축 및 저장되는 것이 수소기체이기 때문에 액체 연료보다 에너지 밀도가 낮다. 현재의 연료 전지 발전 효율로 400km 이상 주행하는데 필요한 에너지 양을 확보하기 위해서는 350 대기압의 압력으로 적어도 170L 탱크의 용적이 필요하다. 가스의 저장 관심에서는 새로운 고압화 방법도 검토될 수 있으나 승압과정에서 에너지 손실이 커지며, 무엇보다도 자동차 탑재용으로 이용하기에는 저장용기가 너무 크고 안전성이 떨어지는 단점이 있다.

(2) 액체 수소 방식

에너지 밀도가 높은 자동차의 항속거리는 확보할 수 있지만 상온에서는 증발하기 때문에 주위의 열을 흡수하지 않도록 단열하는 것이 과제이다. 액화한 다음 에너지 손실이 큰 것도 문제이다.

(3) 수소 흡장 합금(메탈 · 하이브리드)

수소저장매체가 금속이기 때문에 수소저장량이 중량비로 1wt% 정도 밖에 되지 않는 점, 수소의 반복적인 흡·탈착에 의해 금속이 미분화되어 전지의 수명이 짧은 점, 수소의 충전 및 방출에 열교환이 필요하고 충전시간도 길다는 점 등이 문제점으로 지적되어 세계적으로 저장용량이 크면서 가볍고 안전성을 갖는 새로운 수소저장체 개발에 대한 연구가 계속 진행되고 있다.

(4) 수소 저장 화학 물질(케미컬 · 하이브리드)

이론적으로는 중량비 7~10wt% 정도의 저장이 기대되지만 더욱 새로운 기술 개발이 필요하다. 또, 재생에 필요한 에너지 등 에너지·사이클로서의 기초적인 검

도가 필요하다.

(5) 탄소재료

1970년대 흑연에 알칼리 금속을 도핑하면 수소저장량이 현저하게 증가한다는 사실이 밝혀지면서부터 탄소재료를 이용한 수소저장에 대한 관심이 있었으나 수소저장합금(metal hydride)에 비해 저장량이 작았기 때문에 많은 연구가 진행되지 못하였다.

(6) 탄소 나노 튜브

탄소나노튜브를 이용한 수소저장은 1997년 미국 IBM의 Bethune 등에 의해 처음 시도되었고, 최근 전기자동차의 사용화 문제로 미국 Department of Energy(DOE)에 의해 전략적인 연구 계획이 수립된 분야이다. DOE의 전략적인 수소저장 계획에 의하여 6.5wt%(63kg H₂/m²)의 수소저장능력을 가지면 충분히 상업적 가치가 있는 것으로 평가되어, 수소 저장량 6.5wt%는 DOE의 수소저장 계획의 목표치가 되었다. 탄소나노튜브에 수소를 저장할 수 있다는 사실이 알려지면서 최근 전 세계적인 수소저장에 관한 많은 실험들이 비밀리에 진행되고 있고, 동시에 이론적 계산 및 컴퓨터 모사실험 등 많은 연구결과들이 보고되고 있다.

현재, 탄소나노튜브의 수소저장은 그래파이트 나노파이버(graphite nanofibers (GNFs))에 67.5wt%의 수소를 저장할 수 있다는 Rodriguez등의 보고와 알칼리 금속을 탄소나노튜브에 도핑하면 14~20 wt%의 수소를 저장할 수 있다는 Chen등의 연구결과처럼 DOE의 목표치 6.5wt%가 훨씬 넘어서는 연구결과들이 다수 보고되고 있다. 그러나 이러한 연구결과들은 만흔 연구자들에 의해 실험결과의 재현성이 크게 되다가 최근 잘못된 실험결과인 것으로 최종 판명된 바 있다. 탄소나노튜브는 제조시 수율이 낮고 직경의 조절이 용이하지 않아 가스의 효과적인 저장이 어려운 문제가 제기되었다.

국내에서는 아직 연료전지나 전지 자동차가 상용화되지 않았기 때문에 시장규모를 파악하기 어렵지만, 현재 현대, 대우, 기아를 중심으로 국제 협약 기준에 맞

는 수소연료전지 자동차를 개발 중이다. 특히 판매 대수의 10%를 무공해자동차(ZEV : zero emission vehicle)로 채워야 한다는 규정은 앞으로 자동차 시장에 있어서 연료전지 자동차의 시장규모를 확대시키는 주 요인이 될 것으로 예상된다.

환경부에서는 대도시 대기오염 개선을 위하여 대도시의 시내버스를 천연가스로 전환, 보급하는 사업을 시행하고 있다. 그 동안 사업의 추진에 어려움을 주었던 관련 제도와 법규 정비가 거의 완비되었으며, 천연가스버스의 개발과 시범운행도 성공적으로 마쳐 자동차 제작사에서 천연가스버스의 양산 제작이 시작된 상태이다. 천연가스버스사업은 2000년 6월 서울시 공용차고지 내 충전소를 시작으로 사업을 시작해 2001년 12월6일 22개소의 충전소가 설치되고 4백 22대의 천연가스버스가 운행중이다.

2005년 이후부터는 휴대용 전원인 소형 연료전지가 기존의 2차전지 시장과 새롭게 출시되는 고기능 단말기의 전원시장 중 일부를 차지할 것으로 예상된다. 또한 최근에 LG칼텍스 정유는 (주) 세티(SETI)와 독일 프라운호퍼연구소(Fraunhofer ISE)와 공동으로 노트북에 적용 가능한 연료전지 시스템을 국내 최초로 개발하여 이를 탑재한 노트북의 시제품도 만들었다. 전체 시스템은 소형 연료전지와 수소 탱크, 기타 제어장치 등으로 이루어져 있고 기존 배터리가 있던 공간은 연료전지 시스템으로 대체되었다. 이렇게 연료전지가 휴대용 전원인 기존의 2차 전지를 대체 혹은 보완함으로써 연료전지의 시장 규모는 더욱 확대될 것으로 예상된다.

국내 대체에너지 저장물질의 산업현황을 살펴보면, 우선 연료전지 산업의 경우 1985년에 한국에너지기술연구소와 한전기술연구원 공동으로 5.9kW급 인산염형 연료 전지 본체를 수입하여 국내 최초로 발전 시스템을 구성하여 성능 실험을 실시한 것이 국내의 연료 전지 기술 개발 효시이다. 최근에는 기업체 및 학계 연구소에서 인산염형, 응용 탄산염형, 고체 전해질형 및 고분자 전해질 연료 전지도 개발하고 있다. 국내에서는 연료 전지 본체 개발은 LG칼텍스정유, 연료 개질기는 SK(주), 전력 변환장치는 LG산전, 계통 연계 기술 개발은 한국전기연구소가 담당하고 가스공사가 사업을 주관하는 공동 연구 체제를 구성하였다. 현재 국내의 기술수준은 전반적으로 기초 연구 단계이며 연료 전지 본체를 포함한 연료개질, 전

력 변환장치 등의 소규모 시제품을 개발하고 있다.

연료전지 자동차는 산업자원부와 과학기술부의 후원하에 현대·기아 자동차는 1998년부터 차세대 자동차기술개발 사업단이 주관하는 연료전지자동차 기술 개발 사업에 참여하고 있다. 200년 9월에 10kW급 메탄전지/배터리 하이브리드 전기자동차를 국내 최초로, 세계적으로는 7번째로 개발하였다. 수소 교환막형 연료전지 스택은 한국과학기술연구원(KIST)과, 수소막 정제 일체형 메탄올 수증기 개질형 연료변환기는 SK(주)와 운전 주변 장치를 구성하는 각종 부품은 국내외 협력 업체와 공동으로 개발하였다. 또한 현대·기아 자동차는 미국의 연료전지 전문회사인 UTC 퓨어셀(UTC Fuel Cells; UTCFC)사와 연료전지자동차 공동 개발 프로그램을 2000년 4월에 착수하여 2001년 3월에 싼타페 수소연료전지자동차를 개발하였다.