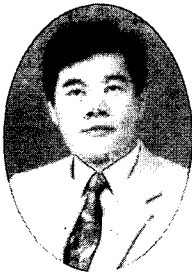


## Ni-MH 2차 전지의 특성과 연구 동향



**박충남**  
전남대학교 금속공학과 교수

### 1. 서론

최근 휴대용 전화기, 캠코더, 노트북 컴퓨터 등 휴대용 전자기기의 급속한 발전과 보급 확대, 그리고 무공해 전기 자동차에 대한

관심이 높아지면서 여기에 사용하는 2차(충전식) 전지의 수요가 급증하고 있다. 특히 이들 전기기와 전기 자동차의 소형, 경량화 추세와 함께 2차 전지의 성능이 바로 이 전자기기들의 성능을 좌우하게 됨으로써 에너지 밀도가 높은 고성능 2차 전지의 개발에 대한 연구가 세계 선진 각국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 차세대 고성능 2차 전지로서 Ni-MH 2차 전지와 리튬 이온 및 폴리머 2차 전지가 현재 개발에 성공하였거나 개발 중에 있다.

이 글에서는 Ni-MH 2차전지의 일반적인 특성과 이 전지에 대한 연구 동향을 간략히 소개한다.

Table 1. Properties of various secondary batteries.

| Properties               | Pb-acid   | Ni-Cd     | Ni-MH     | Li-ion    | Li-polymer |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Cell voltage(V)          | 2.10      | 1.20      | 1.20      | 3.60      | 2.45       |
| Wh/kg                    | 30-45     | 40-55     | 50-75     | 100       | 150        |
| Wh/l                     | 80-130    | 150-200   | 230-300   | 230-330   |            |
| Cycle life               | >700      | >1000     | 500-600   | 1200      | >100       |
| Rate capability          | excellent | excellent | good      | fair      | poor       |
| self discharge           | good      | good      | good      | excellent | excellent  |
| Safety/Reliability       | excellent | good      | good      | fair      | good       |
| Cost (¥/Wh)              | 35        | 114       | 140       | 291       |            |
| Voltage compatibility    | fair      | excellent | excellent | poor      | poor       |
| Charger compatibility    | fair      | excellent | excellent | poor      |            |
| Environmental acceptance | fair      | poor      | good      | good      | good       |
| Voltage stability        | fair      | excellent | excellent | fair      | fair       |

### 2. Ni-MH 2차 전지의 특성

#### 2-1. 일반적 특성

먼저 현재 개발된 주요 2차전지들의 4C (cellular phone, cordless power tool, notebook computer, camcorder) 시장 성장에 관한 자료를 그림 1에 도시하였다. 1996년에는 Ni-Cd 전지가 63.8%를, Ni-MH 전지가 27.7%를 그리고 Li ion이 8.4%를 점유하였으나 2001년에는 Ni-Cd 전지가 44% 정도를 점유하고, Ni-MH 전지와 Li계 (ion+polymer) 전지가 각각 28% 정도를 점유할 것으로 예상된다. Ni-MH 2차전지의 일반적 특성을 타 2차전지들의 특성과 비교하여 표 1에 실었다.

표 1에서도 알 수 있듯이 Ni-MH 2차전지는 Ni-Cd 전지와 매우 유사한 특성을 가지고 있으나 에너지 밀도와 환경 친화력 면에서 Ni-Cd 전지보다 크게 유리한 대신 가격이 다소 높다는 불리한 점이 있다. Ni-MH 2차전지와 Li계 전지를 비교해 보면 중량당 에너지 밀도에서 Li계 전지가 우수한 반면, 고율 충방전 특성, 안전성, 가격, 호환성 및 전압 안정성에서는 Ni-MH 2차전지가 Li계 전지보다 우수하다.

#### 2-2. Ni-MH 2차전지의

##### 전극반응 및 충방전 특성

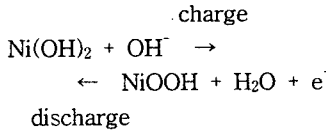
Ni-MH 2차전지의 전극반응은 다음과 같다.

2-2. Ni-MH 2차전지의 전극

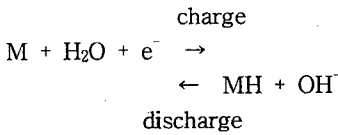
반응 및 충전방전 특성

Ni-MH 2차전지의 전극반응은 다음과 같다.

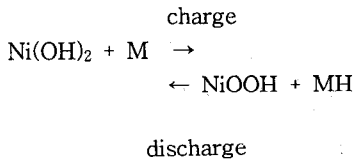
양극에서는



음극에서는



전체 전극반응은 다음과 같이 주어진다.



또한 25°C에서 위 반응에 대한 open cell voltage는 다음과 같다.

$$E(\text{V}) = 1.32 + 0.02956 \log P_{\text{H}_2}$$

여기서  $P_{\text{H}_2}$ 는 수소저장 합금(M)의 금속수소화물 생성에 대한 평형(또는 평탄) 압력을 나타낸다. 식에서 보면 평탄 압력이 높을수록 전지 전압은 높게 되나 log scale이기 때문에 전지전압의 평탄 압력 의존성은 그리 크지 않다. 그리고 평탄 압력이 너무 높으면 충전 중의 전지 내압이 너무 높아 안전에 문제가 있고, 평탄 압력이 너무 낮으면 방전 시 수소가 방출되지 않아 방전용량이 감소하게 된다. Ni-MH 전지에 사용되는 수소저장합금의 평탄 압력은 0.01-1 기압 정도이다.

4C's Cell Market Growth By Chemistry  
world : 1996 - 2001

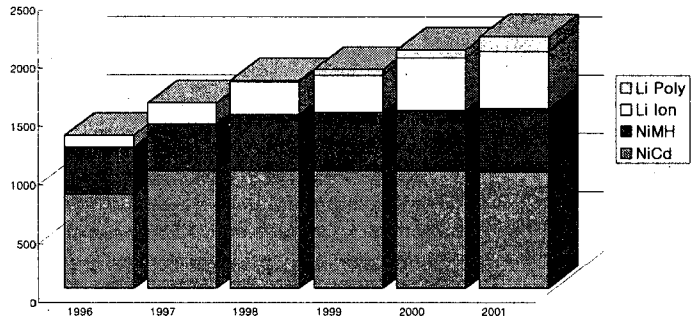


Fig. 1. 4C's cell market Growth By Chemistry.  
(world : 1996-2001)

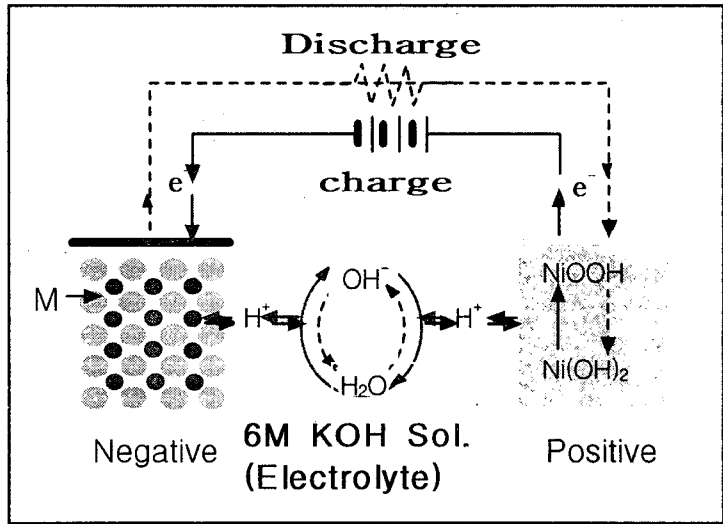


Fig. 2. The Principle of Nickel-Metal hydride battery.

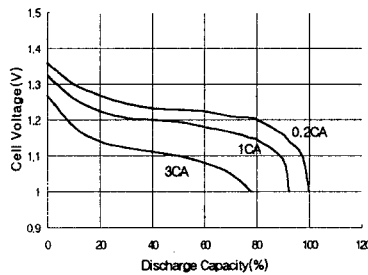


Fig. 3. The charging potential of Ni-MH battery.  
(Ch.0.3CA)

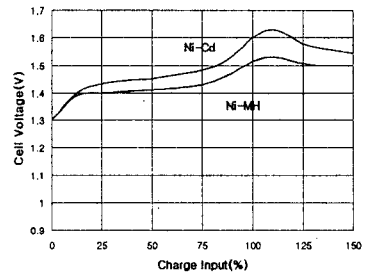


Fig. 4. The discharging potential of Ni-MH battery.  
(Ch. 1.0CA)

그림 2는 Ni-MH 전지의 전극 반응에 대한 모식도이다.

그림 3과 4에 Ni-MH 전지와 Ni-Cd 전지의 충전 곡선과 방전 곡선을 각각 나타내었다. 방전용량에 있어서 큰 차이를 보이고 충전 전압과 방전 전압 모두 Ni-MH 전지가 Ni-Cd 전지보다 다소 낮으나 대체적으로 매우 유사한 충전곡선을 나타내고 있다. 충전 말기에 나타나는 전압의 급강하는 이 전지들의 충전 종지에 대한 signal로 사용된다.

### 3. Ni-MH 2차전지의 구조 및 제조 방법

#### 3-1. 구조

그림 5와 6은 원통형 및 각형 Ni-MH 전지의 구조를 나타낸 것이다. 원통형에서는 separator 2 개, 양극 1 개, 음극 1개를 직사각형으로 절단한 후 이를 separator, 양극, separator, 음극 순으로 적층하고, 음극이 밖으로 오게 하여 말은 다음 니켈 도금한 강철 원통 속에 넣고, 전해액을 주입한 다음 밀봉한다. 각형에서는 전극 case에 맞게 작은 직사각형으로 절단한 여러개의 양극과 음극을, 양극에 주머니형의 separator를 덮어씌운 후, 차례로 적층하여 각형 case에 장입한다. 장입된 전극들은 전극반응 중에 수반되는 부피 팽창에 의해 전극 case 내에 단단하게 고정되어 있다.

#### 3-2. 양극 제조 방법

Ni-MH 2차전지는 Ni-Cd 2차전지의 음극인 Cd 전극을 수소저장 합금으로 대체한 것이기 때문에 양극 활물질은 Ni-Cd 전지의 것과 동일하게 Ni(OH)<sub>2</sub>를 사용한다. 그러나 음극의 높은 에

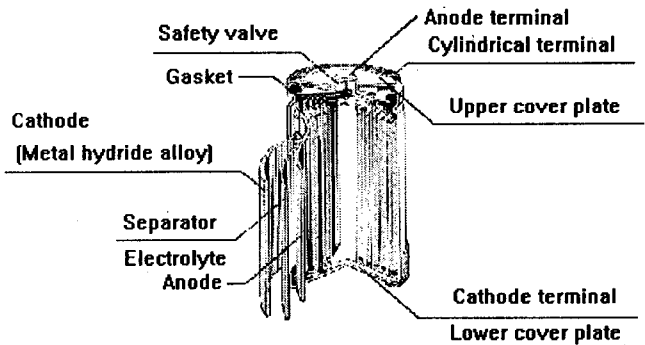


Fig. 5. The schematic diagram of cylindrical-type Ni-MH battery.

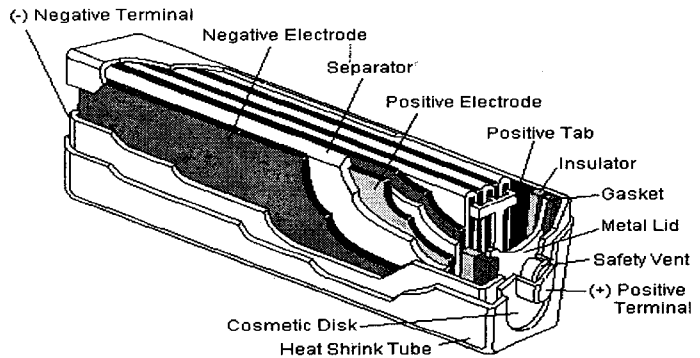


Fig. 6. The schematic diagram of prismatic-type Ni-MH battery.

너지밀도와 상응해서 양극의 에너지밀도를 높이기 위해 보통 Ni-Cd 전지에서 사용하는 소결식 Ni전극 대신 foamed Ni 전극을 사용한다. 즉, 스폰지형의 Ni foam에 Ni(OH)<sub>2</sub>를 소량의 Co(OH)<sub>2</sub> 및 결합제와 함께 pasting하여 전극을 제조한다. Co(OH)<sub>2</sub>는 양극의 전도성을 높이고 cycle 도중 양극에서의 산소발생을 억제하여 전지의 cycle 수명을 높이기 위해 첨가한다. Ni-MH 전지의 방전용량은 양극 활물질의 양에 의해 결정된다.

#### 3-3. 음극 제조 방법

Ni-MH 2차전지의 음극 활물

질로는 수소저장합금 분말을 사용한다. 수소저장합금 분말과 탄소 분말 그리고 결합제를 적당한 점도를 갖게 혼합하여 니켈 도금된 강철 grid에 도포하고 이를 건조시킨 후 가볍게 압연함으로써 음극판을 제조한다. 탄소 분말은 전도성을 좋게 하고 수소저장합금 분말의 과다한 미분화를 억제하는 효과가 있다. 수소저장합금의 종류는 여러 가지가 있으나 현재 시판 중인 Ni-MH 전지는 거의 희토류계의 AB<sub>5</sub> type 수소저장합금을 사용하고 있다. 음극활물질의 양은 양극 활물질의 양에 의해 결정되는데 대개 음극활물질의 방전용량이 양극활

물질의 방전용량보다 30-50% 더 크게 한다. 그 이유는 Ni-Cd 전지에서와 마찬가지로 과충전 시 양극에서 발생하는 산소를 촉매 효과가 좋은 음극에서 수소와 반응시켜 다시 물로 환원시키기 위해서이다.

### 3-4. 전해질 및 separator

전해질로는 비중 1.24-1.30 kg/l (6-7 molarity)의 KOH 수용액을 사용한다. 전해질의 비중이 높으면 전도성이 좋고 고율 방전성이 향상되며 빙점이 낮아지는 장점이 있으나, 전지 내압이 증가하고 cycle 수명이 단축되며 separator의 산화가 우려되는 단점이 있다.

Separator로는 polyamide 또는 polypropylene 부직포가 주로 사용된다. polypropylene은 polyamide에 비해 내산화성은 좋으나 전해질의 흡수성이 떨어져 모두 일장일단의 특성을 지니고 있다.

### 4. Ni-MH 2차전지에 대한 연구 동향

Ni-MH 전지는 지금까지 많은 연구가 이루어진 Ni-Cd 전지의 음극 활물질인 Cd를 수소저장합금으로 대체한 것이기 때문에 양극에 대한 연구보다는 음극에 대한 연구가 더 주류를 이루고 있다. 따라서 음극에 대한 연구 동향을 소개한다.

#### 4-1. 수소저장합금의 개발

##### 4-1-1. 수소저장합금의 종류 및 특성

Ni-MH 2차전지 음극용체료로는 희토류계로 대별되는 AB<sub>5</sub>계, Zr, Ti계로 대별되는 AB<sub>2</sub>계 수소저장합금이 현재 사용되고 있으며 방전용량이 크다는 장점을 가

Table 2. Electrical discharge capacities and problems of the various types of hydrogen storage materials.

| Properties<br>Materials               | Theoretical<br>capacity | Practical<br>capacity   | Utilization                 | Problems                                     |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|--|
| AB <sub>5</sub> (LaNi <sub>5</sub> )  | 372<br>mAh/g            | 300-340<br>mAh/g        | Commercialized              | low energy<br>density<br>per weight          |
| AB <sub>2</sub> (ZrMn <sub>2</sub> )  | 482<br>mAh/g            | 350-430<br>mAh/g        | partially<br>commercialized | activation,<br>cycle life,<br>self discharge |
| AB (TiFe)                             | 490<br>mAh/g            | 200<br>mAh/g<br>(Ti,Ni) | research                    | activation,<br>capacity<br>high pressure     |
| A <sub>2</sub> B (Mg <sub>2</sub> Ni) | 965<br>mAh/g            | 700-750<br>mAh/g        | research                    | cycle life,<br>hydride<br>stability          |
| A (Mg)                                | 2206<br>mAh/g           | not<br>available        |                             | too stable<br>hydride                        |

Table 3. The electrochemical properties of AB<sub>5</sub>-type metal hydride electrode.

| Alloy  | Capacity<br>(mAh/g) | Cycle<br>life | Activa<br>tion | Self-<br>discharge |
|--|---------------------|---------------|----------------|--------------------|
| (LM) <sub>1-0.15</sub> Ni <sub>3.5</sub> Co <sub>0.7</sub> Mn <sub>0.4</sub> Al <sub>0.4</sub> | 356                 | excellent     | fast           | excellent          |
| (LM)Ni <sub>3.5</sub> Co <sub>0.9</sub> Mn <sub>0.4</sub> Al <sub>0.2</sub>                    | 336                 |               |                |                    |
| (LM)Ni <sub>3.5</sub> Co <sub>0.5</sub> Mn <sub>0.6</sub> Al <sub>0.4</sub>                    | 339                 |               |                |                    |
| (LM)Ni <sub>3.5</sub> Co <sub>0.4</sub> Cr <sub>0.3</sub> Mn <sub>0.4</sub> Al <sub>0.4</sub>  | 352                 |               |                |                    |
| MmNi <sub>3.5</sub> Co <sub>0.7</sub> Al <sub>0.5</sub> Mn <sub>0.3</sub>                      | 324                 |               |                |                    |
| MmNi <sub>3.5</sub> Co <sub>0.7</sub> Al <sub>0.8</sub>  | 315                 |               |                |                    |
| MmNi <sub>3.5</sub> Co <sub>0.7</sub> Al <sub>0.7</sub> Si <sub>0.1</sub>                      | 303                 |               |                |                    |
| MmNi <sub>3.0</sub> Co <sub>0.7</sub> Al <sub>0.8</sub> Mn <sub>0.5</sub>                      | 281                 |               |                |                    |
| MmNi <sub>3.5</sub> Co <sub>0.9</sub> Al <sub>0.8</sub> (Mm 5% excess)                         | 305                 |               |                |                    |

Table 4. The electrochemical properties of AB<sub>2</sub>-type metal hydride electrode.

| Alloy  | Capacity<br>(mAh/g) | Cycle<br>life | Activat<br>ion | Self-<br>discharge |
|--|---------------------|---------------|----------------|--------------------|
| Ti <sub>0.6</sub> Zr <sub>0.4</sub> V <sub>0.5</sub> Mn <sub>0.5</sub> Ni <sub>1.0</sub>                   | 445                 | poor          | fast           | fair               |
| Ti <sub>0.6</sub> Zr <sub>0.4</sub> V <sub>0.6</sub> Mn <sub>0.4</sub> Ni <sub>1.0</sub>                   | 416                 |               |                |                    |
| Ti <sub>0.6</sub> Zr <sub>0.4</sub> V <sub>0.6</sub> Mn <sub>0.4</sub> Cr <sub>0.2</sub> Ni <sub>0.8</sub> | 368                 |               |                |                    |
| Ti <sub>0.6</sub> Zr <sub>0.4</sub> V <sub>0.4</sub> Mn <sub>0.4</sub> Cr <sub>0.4</sub> Ni <sub>0.8</sub> | 369                 |               |                |                    |
| Zr <sub>0.7</sub> Ti <sub>0.3</sub> V <sub>0.4</sub> Ni <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.3</sub> Cr <sub>0.1</sub> | 407                 | good          | slow           |                    |
| Zr <sub>0.7</sub> Ti <sub>0.3</sub> V <sub>0.4</sub> Ni <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.4</sub>                   | 437                 |               |                |                    |
| Zr <sub>0.6</sub> Ti <sub>0.4</sub> V <sub>0.4</sub> Ni <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.3</sub> Co <sub>0.1</sub> | 397                 |               |                |                    |
| Zr <sub>0.7</sub> Ti <sub>0.3</sub> V <sub>0.4</sub> Ni <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.3</sub> Co <sub>0.1</sub> | 407                 |               |                |                    |
| Zr <sub>0.5</sub> Ti <sub>0.4</sub> Ni <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.3</sub> Fe <sub>0.1</sub>                  | 379                 |               |                |                    |

진 Mg계의 A<sub>2</sub>B계와 가격이 싸다는 장점을 가진 TiFe의 AB계가 있다. 이들 각각의 수소저장합금의 특성을 표 2에 나타내었다.

#### 4-1-2. AB<sub>5</sub>계 수소저장합금

AB<sub>5</sub>계 수소저장합금은 사이클 수명이 우수하고 활성화가 쉬워 가장 먼저 Ni-MH 2차전지의 음극재료로 실용화 된 재료이다. 방전용량은 높지만 사이클 수명이 좋지 않았던 LaNi<sub>5</sub>에 La보다 가격이 저렴한 미쉬메탈을 사용하고 Ni 대신에 사이클 수명 향상과 전극반응을 원활히 하기 위해 Co, Al, Cr 등을 치환하여 합금을 제조하여 300mAh/g 정도의 방전용량에 500사이클 이상의 사이클 수명을 가지는 실용 Ni-MH 2차전지의 음극재료로 개발되었다. 여러 합금 조성의 AB<sub>5</sub>계 수소저장합금의 방전용량을 표 3에 나타내었다.

#### 4-1-3. AB<sub>2</sub>계 수소저장합금

AB<sub>2</sub>계 수소저장합금은 AB<sub>5</sub>계 합금에 비해 방전용량은 높지만 Zr과 Ti의 치밀한 산화물 피막 때문에 활성화 속도가 낮고 사이클 수명이 짧으며 자기 방전이 크다는 단점을 가지고 있어 실용화에 시간이 걸렸다. 하지만 최근 Ti와 Zr의 비를 적절히 배분하고 V, Mn, Ni 등을 첨가하여 활성화 속도개선은 물론 제반 전극 특성을 향상시킨 연구가 활발히 보고되고 있다. 대표적인 AB<sub>2</sub>계 수소저장합금의 조성과 방전용량을 표 4에 나타내었다.

#### 4-1-4. A<sub>2</sub>B계 수소저장합금

A<sub>2</sub>B계 수소저장합금은 높은 수소저장용량을 가지고 합금 무게가 가볍기 때문에 최근 연구가

활발해 지고 있는 수소저장합금이다. 하지만 Mg<sub>2</sub>Ni합금은 수소흡방출을 위해서는 300도 이상의 고온이 필요하며 활성화가 늦다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 불밀을 통한 합금의 나노구조화, 표면활성화제 첨가 또는 기계적 합금화 등의 방법이 연구되고 있다. 위의 방법외에도 다각적인 연구가 이루어지고 있지만 아직 실용화에 충분한 사이클 수명을 가진 전극재료와 공법이 개발되지 않았다. 하지만 갈수록 치열해지는 Li 전지와와의 경쟁에서 살아남으려면 고성능, 저비용의 전극재료의 개발이 시급한데 Mg<sub>2</sub>Ni도 유망한 재료의 하나로 집중적인 연구 투자가 필요하다.

### 4-2. 수소저장합금 분말의

#### 표면 개질

#### 4-2-1. 금속 도금

합금조성의 변경외에 전극의 사이클 수명의 향상과 전극반응 향상을 위해서 소위 micro-encapsulation 이라는 금속도금 방법이 연구되었다. 금속도금의 대표적인 것으로는 Ishikawa 등이 제시한 무전해 구리도금법이 있다. Ishikawa등에 따르면 합금 분말에 무전해 구리도금은 충방전시에 전극의 탈락을 막아 사이클 수명을 증대시키고 전극의 성형성을 향상시키며 도금된 구리는 전류의 미소집전체 역할을 해서 전극반응 속도를 향상시킨다고 보고되었다. 하지만 Ishikawa 등의 방법은 유독성의 PdCl<sub>2</sub> 등의 전처리제를 사용해야 하며 발암물질로 알려진 포르말린을 환원제로 사용하여야 하는 등의 환경오염 문제를 가지고 있으며 도금 속도가 느리고 공정이 복잡하여 전체적인 제조비용을 상승시

키기 때문에 이를 개선하기 위해 산성문전해 구리도금법이 개발되었다.

구리도금법외에도 전해 또는 무전해 Ni도금을 통하여 전극의 활성화 속도를 개선하고 사이클 수명을 증가 시키는 연구도 활발히 이루어져 왔다.

#### 4-2-2. 표면 활성화제

표면활성화제를 불밀링을 통하여 활성화가 느린 AB<sub>2</sub> 또는 A<sub>2</sub>B계 수소저장합금 전극에 접합시키는 연구가 최근 실시되고 있다. 표면 활성화제로서는 활성화가 용이하며 취성이 강한 AB<sub>5</sub>계 수소저장합금이나 Ni, MgNi 등이 사용되고 있다. 이러한 표면 활성화제는 활성화 속도가 낮은 수소저장합금 전극에서 치밀한 산화피막을 깨주거나 수소의 확산 이동 통로를 만들어주는 역할을 함으로써 전극의 활성화 속도를 크게 개선시킨다.

#### 4-2-3. 불화처리(Fluorination treatment)

불화처리는 일본의 S. Suda 등에 의해서 개발된 방법으로 AB<sub>5</sub> 또는 AB<sub>2</sub> 계의 수소저장합금을 불소가 함유된 액에 함침시켜 합금표면을 불화시켜 활성화 속도를 개선하며 사이클 수명을 향상시키는 방법이다. 불화처리된 합금표면은 쉽게 취화되어서 깨져 수소의 이동통로가 되어 활성화 속도를 개선하며 전극 표면의 산화를 억제시켜 사이클 수명을 개선시키는 것으로 알려져 있다.

### 5. Ni-MH 2차전지의 전망

Ni-MH 2차전지의 향후 전망은 Li계 2차전지와와의 경쟁력에 크게 좌우될 것으로 보인다. 먼

저 중량당 에너지 밀도면에서는 Li계 전지를 능가할 가능성이 거의 없어 보인다. 다만 A<sub>2</sub>B계 수소저장합금 전극이 개발될 경우나 새로운 고용량 수소저장합금 전극이 개발될 경우 Li계 전지와 견줄 수 있을 것이다. 그러나 Ni-MH전지는 가격과 안전성 및 고율 방전성에서는 Li계 전지보다 월등히 우수하기 때문에 2차 전지의 용도에 따라 경쟁력의 우위가 바뀔 가능성이 크다. 휴대폰, camcorder 및 notebook 컴퓨터 등 경량화가 극히 요구되는 분야에서는 Li계 전지가 Ni-MH 전지보다 우위를 차지할 가능성이 높고, cordless power tool이나 전기자동차 분야에서는 Ni-MH 전지가 Li계 전지보다 우위를 확보할 가능성이 높다. 현재 휴대폰용 2차전지로 국내와 일본에서는 거의 Li ion 전지를 사용하고 있고, 유럽과 미국에서는 거의 Ni-MH 전지를 사용하고 있다.

## 6. 참고 문헌

1. C.S. tuck. "Modern Battery Technology" 1st edition, ch.4.,(1991)
2. J. O'M. Bockis, B.E. Conway, E. Yeager and R.E. White, "Comprehensive Treatise of Electrochemistry", Vol. 3, Plenum Pre. (1981)
3. H.F. Bittner and C.C. Badcock, *J. electrochem. Soc.*, Vol.130, (1983), 193C
4. H. Ewe, E.W. Justi and K. Stephan, *Energy Convers.*, 13 (1973) 109
5. H. Tamura, C. Iwakura and T. Kitamura, *J. Less-Common Metals*, 89 (1983) 567
6. D.E. Hall, J.M. Saver and D.O. Gothard, *Int. J. Hydrogen Energy*, 13 (1988) 547
7. A.H. Boonstra, G.J.M Lippits and T.N.M Bernards, *J. Less-Common Metals*, Vol. 155, (1989), 119
8. T. L. Markin and R.n.eil, *J. Electrochem. Soc.*, 118 (1981) 217
9. J.J.G. Willems and K.H.J. Buschow, *J. Less-Common Metals*, 129 (1987) 13
10. T. Sakai, T. Hazama, H. Miyamura, N. Kuriyama, A. Kato and H. Ishikawa. *J.Less-Common Metals*, 172~174 (1991) 1175
11. J. Choi and C.-N. Park, *J. Alloys and Compound*, (1994)
12. H. Ishikawa, K. Oguro, A. Kato, H. Suzuki and E. Ishii, *J. Less-Common Metals*, Vol.120, (1986), 123
13. 노학, 최승준, 장상민, 박원, 최전, 박충년, Ni-MH 고성능 2차전지용 전극재료의 표면처리기술개발, 제 1회 전지기술 심포지움, 한국공업화학회, (1996), 39-48
14. 박충년, 최승준, 장상민, 박원, 최전, 노학, AB<sub>2</sub>계 금속수소화물 전극의 개발, 한국수소에너지학회지, 7-1(1996), pp. 117-120
15. 박충년, 최승준, 장상민, 박원, 최전, 노학, 압연이 Ni-MH 2차전지용 금속수소화물 전극의 충.방전 특성에 미치는 영향, 한국수소에너지학회지, 7-2(1996), pp. 165-171
16. 박충년, 최승준, 장상민, 박원, 최전, 노학, Ni-MH 2차전지용 AB<sub>5</sub>계 수소저장합금의 소결에 따른 전극의 특성, 한국수소에너지학회지, 7-2(1996), pp. 157-164
17. 최 전, 박충년, "금속수소화물 전극 제조에 있어서 알카리 무전해 구리도금법의 응용" 한국수소에너지학회지, 3:9-15 (1992)
18. 최전, 박충년, " Si-sealant를 이용하여 제조한 금속수소화물 전극의 특성" 한국수소에너지학회지, 4:23-28(1993)
19. "금속수소화물 전극제조에 있어서 산성 무전해 구리도금법의 응용" 대한금속학회지, 34:97-103(1994)
20. "PTFE를 이용하여 제조한 금속수소화물 전극의 특성", 대한금속학회지, 33:171-175 (1995)
21. "(Mm)Ni<sub>5</sub>계 수소저장합금의 전극특성", 수소에너지학회지, 6:35-41(1995)

< 김정식 위원 >