



# 수소저장용기의 재료와 안전성 확보

김 남 훈 | 전북대학교 수소연료전지공학과, 박사과정 | e-mail : namhk99@jbnu.ac.kr  
이 중 희 | 전북대학교 BIN융합공학과, 교수 | e-mail : jhl@jbnu.ac.kr

수소를 안전하게 저장하고 이용하기 위해서는 수소저장용기에 사용되는 재료의 안전성 확보 방안이 매우 중요하며, 또한 이러한 재료가 수소저장용기에 적용될 경우에 적용 재료 및 용기의 안전성 확보 방안에 대해서 살펴보고자 한다.

전 세계적으로 화석연료의 고갈과 환경 문제로 인해 수소 에너지에 대한 관심이 날로 증대되고 있는 실정이다. 수소를 에너지원으로 이용하기 위해서는 수소의 제조 및 이용 기술뿐만 아니라 중요한 기술 중의 하나가 수소의 저장 기술이다. 수소를 저장하는 방법에는 크게 수소를 액화하여 저장하는 액체수소 저장 방법과, 기체 상태의 수소를 가압하여 저장하는 고압 기체수소 저장 방법, 그리고 수소를 화학적 또는 물리적 방법으로 흡착하여 저장하는 방법으로 구분된다. 그중 현재 가장 경제적이면서 쉽게 수소를 저장할 수 있는 방법이 기체수소를 가압하여 저장하는 방법이다.

수소는 기체 상태에서 부피가 매우 크고 가볍다. 이로 인해 일정 공간 안에 많은 양의 수소를 저장하기가 어려우며, 이로 인하여 높은 압력으로 가압하여 기체 수소를 저장하여야 한다. 높은 압력으로 가압하여 저장하기 위해서는 높은 압력에 견딜 수 있는 저장용기가 필요하다. 이러한 기체수소를 가압하여 저장하는 수소저장용기는 용기의 형태에 따라 4종류로 구분된다. 즉 용기를 구성하는 재료가 단순한 강철과 같은 전체 금속으로 이루어져 있는 Type 1 형식과 이러한 금속 용기 위에 원주 방향의 힘을 보강하기 위해 금속 용기 위에 복합재료 등으로 원주방향으로 보강을 한 Type 2 용기, 그리고 얇은 강재 또는 알루미늄 등의

금속성 라이너 위에 전체적으로 복합재료 등으로 보강하여 만든 Type 3 용기와 플라스틱과 같은 비금속을 이용하여 라이너를 제조하고, 그 위에 전체적으로 복합재료로 보강한 Type 4 형태의 용기로 구분된다.

## 수소저장용기 형태에 따른 재료 안전성 확보

각 용기의 형태의 따라 재료의 안전성에 관련한 이슈가 다르게 된다. Type 1 형태의 용기는 가격은 저렴하나 무게가 매우 무겁고, 부식과 반복하중 등에 약하여 안전성에 취약하다는 단점을 지닌다. Type 2 형태의 용기의 경우는 용기의 무게가 약간 무겁고 원주방향으로 보강된 복합재료가 파손될 경우 용기 전체의 파괴로 전체의 파괴로 이어질 수 있는 단점을 지니나 가격이 상대적으로 저렴하다는 장점이 있다. Type 3 형태의 용기의 경우는 비교적 가볍고, 안전성이 뛰어나나 제조 단가가 비싸다. 또한 용기를 고압에 사용할 경우 복합재료와 금속 라이너 간에 소성변형의 차이로 인한 금속성 라이너가 쉽게 피로파괴에 이르러 용기의 수명이 짧다는 단점을 지닌다. Type 4 형태의 용기의 경우는 플라스틱 라이너를 사용하기 때문에 가장 가볍고 특히 피로파괴에 매우 강하여 용기의 수명이 매우 길다. 그러나 Type 4 용기의 경우 플라스틱

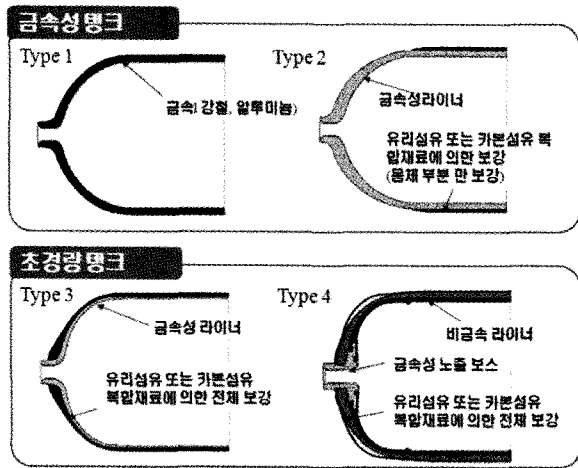


그림 1 고압 수소저장용기의 형태

표 1 재료의 사양

재료 사양	적용 재료					
	강철	알루미늄 합금	플라스틱 라이너	섬유	수지	코팅제
제조회사	✓	✓	✓	✓	✓	
재료의 형태	✓	✓	✓	✓	✓	
재료의 식별명	✓	✓	✓	✓	✓	
열처리 정의	✓	✓				
화학적 성분	✓	✓				
냉간 또는 극저온 성형	✓					
절차						
용접 절차 정의	✓	✓				

표 2 재료의 종류에 따른 시험 항목

재료 시험 data	적용 재료					
	강철	알루미늄 합금	플라스틱 라이너	섬유	수지	코팅제
인장 시험	✓	✓	✓			
차르피 충격시험	✓					
굽힘 시험	✓	✓				
육안 검사	✓					
부식 시험		✓				
지속하중 크랙 시험		✓				
연화온도/녹는 온도			✓			
유리전이 온도					✓	
수지 전단 강도(ILSS)					✓	
코팅 시험						✓
수소 적합성 시험	✓	✓	✓	✓	✓	

라이너를 통과하는 수소 가스가 어느 정도 항상 존재하게 되어 수소 투과를 잘 차단할 수 있는 고차단성 플라스틱 라이너 제작이 필요하다.

고압의 수소저장용기에 사용되는 다양한 재료에 대한 안전성 확보를 위하여 각 나라마다 정하는 규정이 약간의 차이는 있지만, 대체적으로 표 1에 나타난 재료 사양을 명확히 나타내고, 표 2에 나타난 시험을 통해 얻어진 데이터(data)를 제공하도록 권장하고 있다. 수소저장용기 제작에 사용되는 재료는 반드시 규정에서 정하는 용기의 사용조건에 적합한 재료를 사용하여야 하고, 서로 적합성이 없는 재료는 서로 접촉하지 않도록 하여야 한다.

표 3 용기의 형태에 따른 재료의 최소 안전율

구 성	용기의 형태			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
금속으로만 구성된 탱크	2.25	2.25	2.25	
보강재료	유리 섬유	2.75	3.65	3.65
	아라미드	2.35	3.10	3.10
	카본	2.35	2.35	2.35
	하이브리드	조성 비율에 따른 안전율 계산 적용		

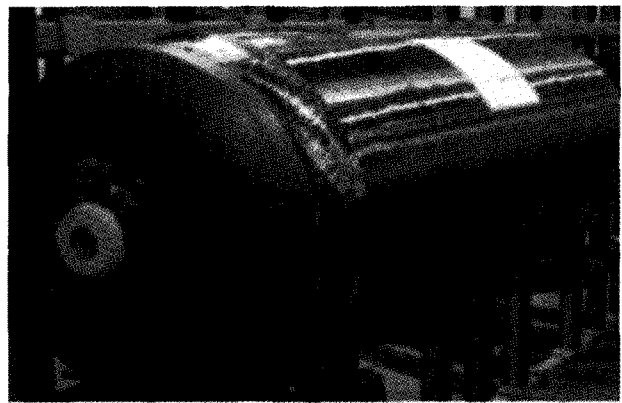
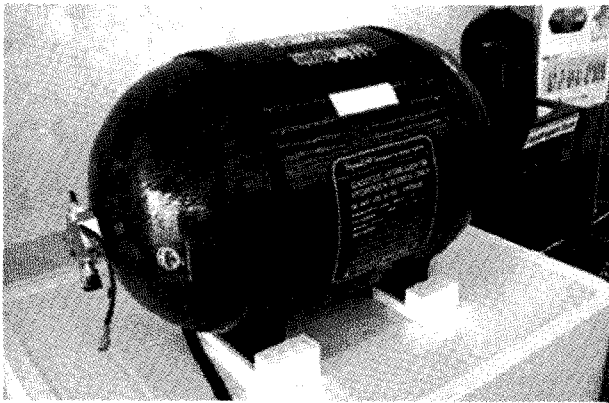


그림 2 카본/에폭시 복합재료 Type 3와 Type 4 수소 저장 탱크

수소저장용기 제조에 사용되는 다양한 재료는 적용되는 용기 형태에 따라서 표 3에 나타난 바와 같이 최소 안전율을 확보하여 용기를 설계하여야 한다. 강철 재료와 카본섬유 재료는 낮은 안전율을 적용하나 아라미드 섬유나 유리섬유의 경우는 비교적 높은 안전율을 적용하도록 하고 있다.

수소저장용기의 안전성 확보를 위한 인증 절차에 필요한 재료 시험으로는 Type 4 용기의 플라스틱 라이너 재료의 경우는 -40℃에서 인장시험을 실시하여 재료의 제조회사에서 제공하는 사양서의 물성치를 만족하여야 하고, ISO 306에 따라 측정된 플라스틱에 대한 연화 온도는 100℃ 이상이어야 한다. 또한 Type 2, 3, 4에 사용되는 복합재료용 수지의 경우에는 ASTM D 3418에 따라 3번의 반복 시험을 통해 측정된 유리전이 온도가 재료제조회사에서 제공한 사양 안에 들어야 한다. 동시에 ASTM D2344에 따라서 시행되는 수지 전



그림 3 수소저장용기의 화염시험

단응력 시험은 시편을 물에 24시간 동안 끓인 후에 3번의 반복 시험을 통하여 측정값을 얻는데, 복합재료의 전단응력이 13.8MPa 이상의 값을 가져야 한다.

Type 1, 2, 3에 사용되는 재료의 수소 적합성 시험

표 4 용기 형태에 따른 용기의 안전성 확보 시험

시험 종류	용기의 형태			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
수압 시험(Burst Test)	√	√	√	√
상온 반복 가압 시험	√	√	√	√
폭파전 누출(LBB) 수행 시험	√	√	√	√
화염시험	√	√	√	√
관통시험	√	√	√	√
화학물 노출 시험		√	√	√
복합재료 결합 허용 시험		√	√	√
가속 응력 파괴 시험		√	√	√
극한 온도 반복 가압 시험		√	√	√
충격 손상 시험			√	√
누출 시험				√
가스 투과 시험				√
보스 토크 시험				√
수소 가스 반복 가압 시험				√

은 상온환경에서 사용 가능 수소 충전수의 3배의 횟수 동안에 이상이 없이 충방전 할 수 있어야 한다. 수소 저장용기의 경우는 2.0MPa 이하의 압력과 작동압력의 1.25배의 압력 사이를 반복하여 충방전 시험하고, 라이너의 경우는 2.0MPa 이하와 용기의 1.25배의 작동압력에서 발생하는 라이너 벽에서 일어나는 동일 응력 상태에서 반복 시험을 통해 사용 충전 횟수의 최소 3배 이상의 반복 충전 횟수 동안에 이상이 없어야 한다. 용기 또는 라이너 제조에 사용되는 모든 금속성 재료의 경우 열처리 후에 ISO 6506-1에 따른 경도시험을 실시하여야 하고, 설계에서 규정한 범위 내에 반드시 들어야 한다. 수소저장 용기와 라이너에 사용되는 모든 강철 재료는 ISO 9809-1 또는 ISO 9808-2에 정해진 재료에 대한 요구조건을 만족하여야 한다. 만약 스테인리스강이 사용될 경우 EN 1964-3의 요구 조건을 만족하여야 하며, 용접된 스테인리스 강 경우에는 EN 13322-2에서 요구하는 조건을 충족하는 재료가 사용되어야 한다.

수소저장용기 또는 라이너 제조에 사용되는 알루미늄 합금의 경우에는 ISO 7866에서 정한 재료 요구조건을 만족하여야 하고, 용접된 알루미늄 합금의 경우는 EN 12862의 요구 조건을 만족하여야 한다. 이처럼 수소 저장 용기에 사용되는 재료는 각 재료에 따라 안전성 확보를 위한 충분한 시험을 통하여 입증된 재료가 사용되어야 한다.

### 수소저장용기 형태에 용기의 안전성 시험

앞에서 언급한 바와 같이 재료에 대한 충분한 검증이 이루어진 재료만을 이용하여 수소저장용기가 제조되어야 한다. 비록 재료에 대한 충분한 검증이 이루어졌다 해도 용기의 제조 과정에서의 결함 또한 용기의 안전성을 떨어뜨릴 수 있다. 고압에서 사용되는 수소 저장 용기는 아주 작은 결함이 있더라도 치명적인 대형사고로 유발될 수 있어 충분한 검증 절차를 거쳐서 검증이 이루어져야 한다. 완성된 용기의 경우 용기의

형태에 따라 그림 3, 표 4와 같은 시험을 통하여 안전성을 확보하고 있다.

### 맺음말

일반적으로 수소용기가 적용되는 사용처에 따라 추가적인 안전성 확보가 요구되고 있으며, 상기의 재료 및 용기에 대한 안전성 확보를 위한 시험에 대한 내용은 수소연료전지 자동차에 적용을 위한 용기에 해당하는 것이다. 고압으로 가압하여 수소를 저장하는 기술은 다른 수소저장 방법에 비해 저장 비용 및 편리성 측면에서는 매우 우수하나, 고압으로 인한 안전성 측면이 크게 염려되는 부분이기 때문에 특별한 주의를

기울여야 한다. 특히 고압의 오랜 반복하중에 잘 견디고, 수소의 투과 차단성이 우수한 재료의 기술개발은 미래의 수소사회에 대비한 중요한 해결해야 하는 과제 중 하나이다. 또 고압의 수소가스에 재료가 장기간 누출 되었을 경우의 수소 취성 등과 같은 수소 환경에서의 특성과 충방전 동안에 발생하는 열에 의한 재료의 물성 저하 등과 같은 다양한 특성에 대한 검증된 재료가 사용되는 것도 안전성 확보를 위해 매우 중요한 인자이다. 특히 용기 제작에 사용되는 강철이나 알루미늄 합금의 경우는 수소가스 환경에 장시간 노출될 경우의 취성 및 소성 파괴 등과 같은 검증된 재료를 사용하여 용기의 안전성을 확보하여야 한다.



### 기계 용어해설

#### 부라인(Brine)

냉동장치와 냉각되는 물품 사이에서 열의 이동을 촉진시키는 매체인 염화칼슘 수용액, 염화나트륨 수용액, 염화마그네슘 수용액.

#### 니트로글리세린(Nitroglycerin)

맹렬한 폭발력이 있으므로 다이내마이트의 원료로 쓰이며, 진한 초산과 진한 황산의 혼합액에 글리세린을 작용시켜서 만드는 무거운 유상의 액체.

#### 무부하시험(No-load Test)

변압기나 유도기 등으로 부하를 걸지 않고 철 손실, 여자전류 등을 알아내는 시험, 또는 부하를 걸지 않고 기계 내부마찰의 손실, 부속기기의 소요동력을 조사하는 시험.

#### 니트랄로이(Nitralloy)

탄소 0.2~0.3%, 알루미늄 0.8~1.3%, 크롬 0.9~1.8%를 함유하며 질화부품의 표면경도를 크게 할 때 채택되는 대표적인 질화강.

#### 성능곡선(Performance Curve)

터보형 펌프에서는 회전속도, 전양정, 토출량 등을, 펌프 수차에서는 출력, 유량, 회전수 등을, 송풍기 및 압축기에서는 가스량, 압력, 축동력 등을 그래프 상에 나타낸 곡선.

#### 정기정비(Periodic Maintenance)

기기보전이나 성능유지를 위하여 일정 기간의 운전을 한 후 정기적으로 주요 부분을 개방하여 실시하는 점검 및 수리.

#### 광도전 셀(Photo Conductive Cell)

반도체 표면에 빛을 비추면 캐리어가 증가하여 저항이 낮아지는 광도전성을 지닌 것을 써서 빛의 강약을 전류의 강약으로 변화시키는 소자.

#### 포토 다이오드(Photo Diode)

광원용 다이오드가 순방향으로 바이어스되는 데 대하여 역 바이어스 되어서, 빛에 닿으면 전류가 흐르고 빛의 강도에 거의 비례한 출력전압을 발생하는 것.