

수소용기내에서 수소저장합금 분말 성형체의 수소 흡수 및 방출 거동

金贊中, 李宰明, 金大龍
경북대학교 공과대학 금속공학과

Hydrogen Absorption and Desorption Behaviors of Hydrogen Storage
Alloy Powder Compacts in Hydride Cylinder

Chan-Jung Kim, Jae-Myoung Lee and Dai-Ryong Kim

Department of Metallurgical Engineering, Kyungpook National University,
Taegu, 702-701

Abstract Hydrogen storage alloy powder compacts were prepared by using automatic press, with PTFE as a binder. Hydrogen absorption and desorption characteristics and thermal conducting property of the compacts were studied using test hydrogen cylinder, comparing with bare alloy powder. The compacts showed better rate capability and activation characteristics than bare powder. Effective thermal conductivity and diffusivity of the compact bed were $1.0 \times 10^{-2} \text{W/cmK}$ and $2.0 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$, respectively, which were similar to that of bare powder bed. A good rate capability of the compacts was interpreted in terms of hydrogen permeation rather than thermal conductivity in the beds.

1. 서 론

수소저장합금은 수소화 반응시에 수반되는 매우 큰 체적변화에 의해 쉽게 균열되며, 수소의

흡수와 방출과정을 반복함에 따라 수 μm 까지의 미세한 분말로 미분화된다. 이러한 미분화현상은 수소저장합금을 이용하는 장치에서 분말의 비산, 반응속도 및 열전달속도의 저하, 합금성능

열화의 촉진등 많은 문제점을 야기시킨다. 따라서 합금의 미분화를 억제하거나 미분화로 인해 생길 수 있는 문제점을 해결하기 위한 여러가지 방안이 제시되고 있는데, 합금의 성분을 개량하거나 합금을 슬러리화하는 방법등이 그 예라고 볼 수 있다¹⁻³⁾.

수소저장합금 분말을 적당한 방법으로 가압성형하여 펠릿(pellet)상으로 만들어 사용하는 방법도 미분화로 인한 문제점을 해결하기 위한 유력한 방법으로 제안되고 있으며, 이에 관한 연구는 Ishikawa¹⁾, Ron⁴⁾등에 의해 집중적으로 수행한 바 있다. 수소저장합금의 성형시에는 성형전처리, 결합제, 성형조건등이 성형체의 물성, 반응 및 열전달 특성을 결정하는 중요한 인자가 된다고 알려져 있다^{5,6)}. Song등⁷⁾에 의하면 미세하게 분쇄한 수소저장합금 분말에 Cu를 화학도금한 후 PTFE를 결합제로 첨가하여 가압성형 및 소결한 성형체는 수십 사이클의 수소화 반응 후에도 비교적 높은 강도를 유지하였으며, 활성화특성 및 불순물가스에 대한 저항성등이 우수하게 나타났다. 위와 같이, 지금까지 수소저장합금의 성형조건과 성형체의 특성 평가를 위한 연구가 많이 있었지만 대부분 소량의 시료를 사용한 것이며, 실제 생산장비를 이용한 성형체의 대량제조와 이를 수소저장용기에 적용했을 때의 여러가지 특성에 대한 조사는 거의 없었다.

본 연구에서는, 자동프레스를 이용하여 대량으로 제조한 수소저장합금 성형체를, 시험용으로 제작한 수소저장용기에 장입한 후 수소의 흡수 및 방출 거동을 조사하였다. 이 때 온도, 압력에 따른 흡수 및 방출속도, 용기내 온도 분포, 성형체 bed를 통한 열전달특성등을 측정하였으며, 이들 결과를 성형체 대신 합금분말 그대로 장입했을 때의 결과와 비교하여 합금분말 성형체의 특성을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 합금의 제조

실험에 사용한 합금은 $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$ ($Mm =$ mischmetal)이었으며, 합금원료로는 표준급(La=23.0, Ce=50.9, Nb=15.1, Pr=15.1, 기타=3.8wt%) mischmetal, 전해니켈 및 99.9% Al을 사용하였다. 혼합원료 15kg을 고순도 알루미늄이 도가니에 장입하여 진공고주파 유도로서 용해한 후 수냉 구리 주형에서 응고시켰으며, 제조된 합금은 균질화 열처리를 하지 않고 그대로 사용하였다. 합금 주괴는 분쇄기로서 325mesh의 분말로 파쇄하고 이를 다시 수소반응용기에 넣어 10회의 수소흡수, 방출을 반복하여 약 $25\mu m$ 이하(600mesh)의 미세분말로 만든 후 성형체 제조 또는 수소화 반응특성 측정용 시료로 사용하였다. Fig.1은 실험에 사용한 $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$ 합금의 X-ray 회절 스펙트럼(a)과 등온 압력-조성 곡선(b)을 나타낸 것으로서 합금의 용해상태가 양호하며, 평형압과 최대 수소흡수량으로 보아 수소저장합금으로 적합함을 알 수 있다.

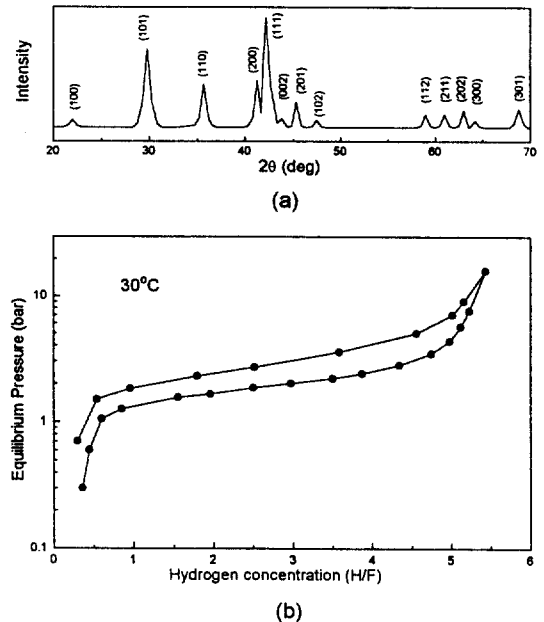


Fig. 1. X-ray diffraction pattern(a) and pressure-composition isotherm for hydrogen absorption and desorption(b) of $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$

2.2 성형체 제조

600mesh이하로 파쇄한 분말은, 성형성과 성형 후의 특성을 향상시키기 위하여 화학도금법으로 Cu를 약 20%정도 피복처리 하였다. 도금된 분말과 결합제인 PTFE(10%)를 분산매인 에탄올과 함께 불밀에 장입하여 24시간 혼합하였다. 혼합 슬러리를 건조하고 이를 다시 건식 불밀에서 12시간 혼합하여 균일성을 향상시켰다. 이 혼합분말은 기계적 방법으로 과립화(granulation)하여 자동프레스에 공급하였다. 이 때 성형압력은 4ton/cm²으로 하였으며, 시료형상은 10.5mm ϕ \times 4mmH의 원판상으로 제조하였다. 이 생성형체(green compacts)는 결합제인 PTFE를 소결시키기 위하여 335 $^{\circ}$ C, 수소분위에서 5분간 소결처리하여 최종시료를 얻었다.

2.3 실험장치 및 실험방법

Fig.2는 시험용 수소저장용기를 이용하여 용기 내 충전된 합금분말 또는 성형체의 수소화 반응 속도 및 열전달특성등을 측정하기 위한 전체 실험장치의 구성(a)과 저장용기부의 상세도(b,c)를 나타낸 것이다. STS 316으로 제작한 수소저장용기는 내부부피가 약 1,800cm³로서 합금을 3~4kg 장입할 수 있으며, 내부와 외부에 각각 독립적으로 냉각 또는 가열수를 흘려줄 수 있도록 되어 있다. (Fig.2(b)). 용기내부에는 외부에서 중심쪽으로 가면서 열전대의 열접점이 등간격이 되도록 방사선모양으로 6쌍의 열전대(T-type)을 배치하여(Fig.2(c)) 수소의 흡수 및 방출시에 합금층내의 온도변화를 정확하게 측정하였다. 또 용기의 밑바닥과 시료의 상부에는 두께 15mm의 PTFE판을 설치하여(Fig.2(b)) 열전달 특성을 측정할 때 용기의 상하부로 전달되는 열량을 최대

한 차단하였으며, 분말시료를 장입한 경우에는 Fig.2(c)에 표시한 것과 같이 수직방향으로 유리

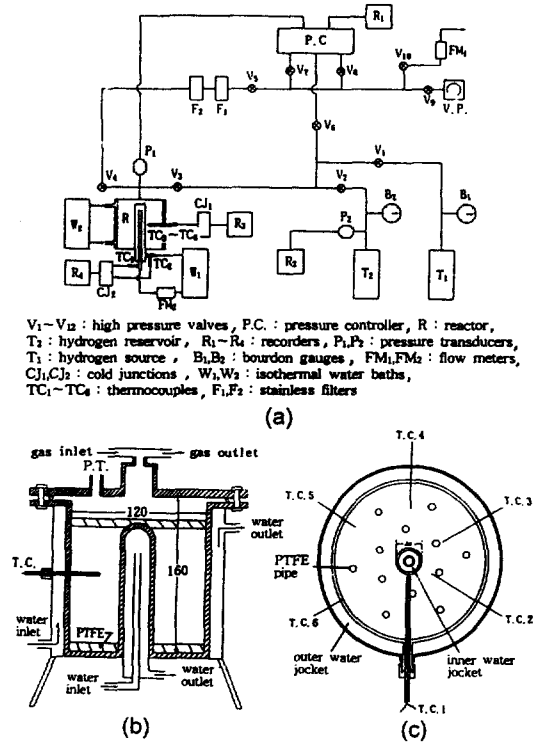


Fig. 2. Schematic diagrams of experimental apparatus, whole system(a), details of the hydrogen reactor(b) and crosssection of the reactor(c)

섬유를 채운 직경 8mm의 다공성 PTFE관의 기체통로를 설치하였다. 내부 순환용수의 입구쪽에 유량계를 설치하고, 또 입구와 출구에 각각 T-type 열전대를 삽입하여 용기의 외벽에서 중심부쪽으로 일정한 온도차가 존재할 때 합금층을 통하여 전달되는 열량을 측정할 수 있게 하였다. 본 연구에서는 수소의 흡수반응은 등압조건에서, 방출반응은 일정유속의 조건하에서 실시하였는데, 이를 위해서 수소가스의 입구측에는 자동압력조절기(Druck, DPI 500)를 장착하고 출구쪽에

는 정밀유량계를 설치하였다.

Fig.2(a)의 반응용기(reactor)에 분말상 또는 성형체의 시료를 3~4kg 장입하고 약 1시간 정도 10^{-2} torr이하의 진공으로 배기시켰다. 부피가 4.0.8L인 reservoir T₂내에 수소기체를 적당량 채운 후 자동압력조절기를 이용하여 반응용기내의 압력이 15~25bar 범위내에서 일정하게 되는 등압조건하에서 수소를 흡수시켰다. 이 때 반응용기의 내부 및 외부냉각수의 온도를 25℃로 유지하면서 순환시켰으며, 수소의 흡수속도는 시간에 따른 reservoir T₂내의 수소압력강하로부터 계산하였다. 흡수반응이 끝나면 내부 및 외부순환용수의 온도를 50~70℃로 올려서 용기내의 온도가 평형에 도달하도록 한 후 밸브 V₅와 유량계 FM₁을 이용하여 방출속도를 5L/min로 일정하게 유지하면서 수소를 방출시켰다. 수소의 흡수 및 방출시 반응용기내 설치된 열전대를 이용하여 용기내 합금층의 온도분포를 측정하여 이로부터 반응속도와 열전달특성의 상관관계를 정성적으로 평가하였다.

반응용기내 합금층의 열전달특성은 정상상태법(steady state method)⁸⁾과 정속승온법(constant heating method)⁹⁾으로 측정된 유효열전도도 및 유효열확산계수(effective thermal conductivity and thermal diffusivity)로서 비교하였다. 무한 원통형 좌표계로 가정되는 조건하에서 원통의 중심에서 원주방향으로 정상상태의 열흐름이 있을 때 중심으로부터 임의의 반경 r₁과 r₂의 온도를 각각 T₁, T₂라 하고 원통의 길이를 L, heat flow를 Q(J/s)라 하면

$$Q = \frac{2 \pi k L}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(1)$$

로 주어지며, 여기서 k는 열전도도(W/cmK)를 나

타낸다. 또 정속승온법에서는 원통형 시료의 표면을 일정한 속도 B(K/s)로 가열할 때 중심으로 부터 r₁, r₂지점의 온도를 각각 T₁, T₂라 하면 두 점의 온도차 ΔT는

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (B/2 \alpha) [(r_2^2 - r_1^2)/2 + r_1^2 \ln (r_2/r_1)] \dots\dots\dots(2)$$

의 근사식으로 주어지며, 여기서 α (cm²/s)는 열확산계수이다. 특정한 조건하에서, Q, r₁, r₂, T₁, T₂ 및 B등을 실험적으로 측정할 수 있으므로 위의 식으로부터 열전도도 k와 열확산계수 α를 구할 수 있다. 그러나 본 실험의 조건에서 측정된 값은 분말층 또는 성형체층 전체에 대한 겉보기(apparent) 또는 유효(effective) 열전도도등의 값으로 얻어진다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수소의 흡수 및 방출속도

본 연구에서는 수소저장합금 성형체의 수소흡수 및 방출거동을 맨분말시료와 비교해서 조사하였다. Fig.3은 325mesh로 파쇄한 분말 약 3700g을 시험용 반응용기에 채우고 용기내의 압력을 20bar로 일정하게 유지하면서 수소를 흡수시킬 때, 수소의 흡수 방출 사이클에 따른 수소 흡수곡선의 변화를 나타낸 것이다. 이를 보면, 최초의 수소흡수속도는 매우 느리지만 수소의 흡수·방출 사이클수가 증가함에 따라 점차 빨라져서 네번째 이상의 사이클부터는 흡수속도의 차이가 거의 없다. 수소흡수 반응속도가 느린 것은 분말층내의 통기도와 열전달 특성이 나쁘기 때문일 것이다.

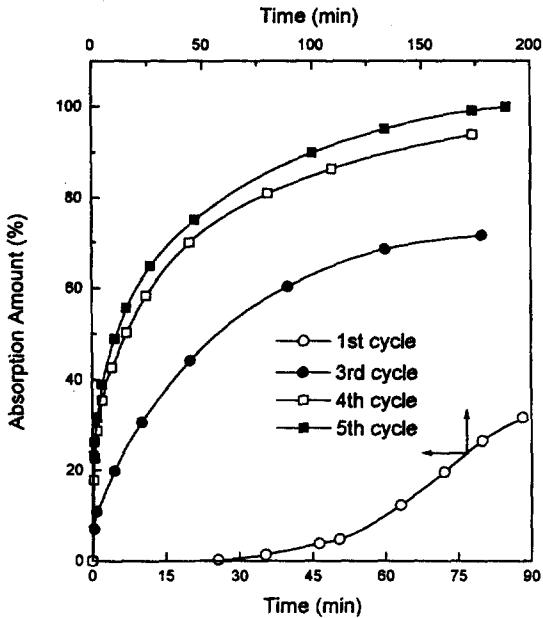


Fig. 3. Changes of hydrogen absorption curves with the number of hydriding cycles for bare powder, pressure of reactor = 20 bar, cooling water = 25°C

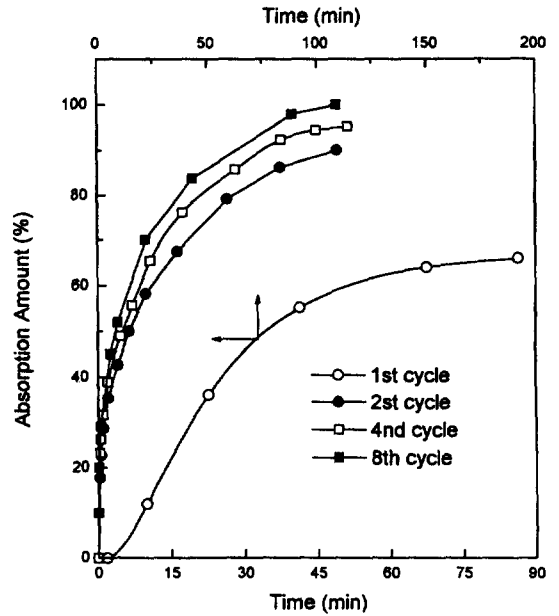


Fig. 4. Changes of hydrogen absorption curves with the number of hydriding cycles for compacts, pressure of reactor = 20 bar, cooling water = 25°C

Fig.4는 합금의 성형체에 대해 수소화반응 사이클에 따른 수소흡수곡선의 변화를 보인 것이다. 앞의 맨분말시료에 비해 최초의 수소흡수반응이 빠를 뿐 아니라 두번째 사이클부터 상당히 빠른 속도로 수소가 흡수된다. 또 완전히 활성화된 상태에서는 약 45분만에 수소의 흡수가 완료된다. 위의 두 결과를 비교해 보면, 맨분말 상태에 비해 성형체의 활성화 특성이 더 우수하며, 수소화 반응속도도 빠르다. Fig.5는 완전히 활성화된 상태에서 맨분말시료와 성형체의 수소흡수속도를 비교해 보인 것으로서 성형체의 경우가 훨씬 빠른 반응속도를 나타내고 있다. 또, 두 시료 모두 반응의 극히 초기단계(1분이내)의 반응속도가 매우 빠르며, 그 이후에는 반응속도가 완만히 감소해 가고 있다. 초기에 반응속도가 매우 빠른 것은 주어진 반응 구동력하에서

합금의 고유수소화 반응속도에 가까운 값을 보이기 때문이며, 그 후에는 반응열에 의해 합금층내부의 온도가 상승해서 합금자체의 평형압력이 증가하여 일정하게 인가된 압력하에서 반응의 구동력이 감소하게 되므로 수소화 반응은 합금층 내부의 열전달 속도에 의해 지배되게 된다. 실제 반응의 초기에 급격하게 발생하는 반응열에 의해 합금층 내부의 온도가 20bar의 '형압을 나타내는 온도인 103°C까지 상승하는 부분도 있었다. 위의 결과를 종합해 보면, 분말상태의 시료에 비해 성형체의 수소흡수속도가 상대적으로 빠름을 알 수 있다.

Fig.6은 두 시료에 대해서 20bar에서 포화되도록 수소를 흡수시킨 후 내부 및 외부 순환용수의 온도를 50°C(방출평형압=3.7atm)로 유지하면 5L/min의 일정한 속도로 수소를 연속방출

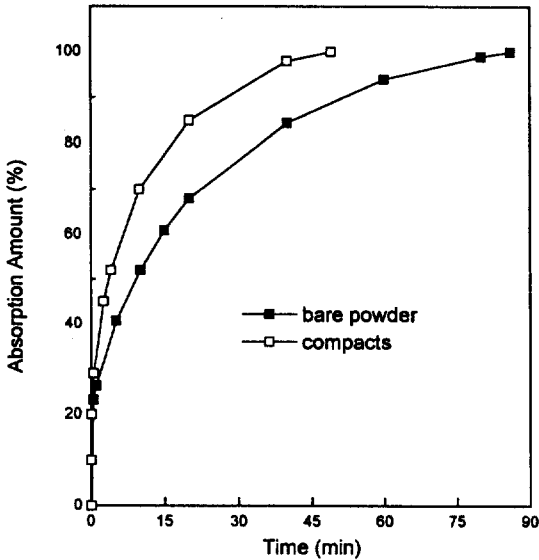


Fig. 5 Comparison of hydrogen absorption curves for fully activated compacts and bare powder, pressure of reactor = 20 bar, cooling water = 25°C

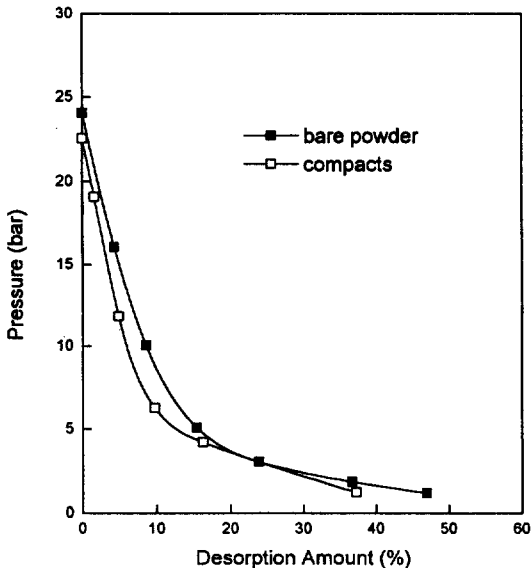


Fig. 6 Pressure changes with desorption amounts for compacts and bare powder at constant desorption rate(5 L/min), temperature of circulating water = 50°C

시킬 때, 방출된 수소량에 따른 용기내 압력변화를 비교해 보인 것이다. 두 시료 모두 방출초기에는 빠른 압력강하를 보이다가 P-C-T곡선상의 평탄부압력(plateau pressure)에 도달하면 압이 서서히 감소해 간다. 본 실험에서는 외부압력을 대기압(1atm)으로 정하였기 때문에 용기내의 압력이 1.07bar이하로 될 때는 방출속도가 5L/min을 유지할 수 없었다. 따라서 Fig.6의 결과는, 방출속도를 5L/min으로 유지할 수 있는 시점까지만 나타낸 것이다. 또 Fig.6에서 성형체를 장입한 경우의 총방출량이 맨분말을 장입한 경우에 비해 다소 높게 나타났다. 이것은 성형체 시료의 수소방출 특성이 더 우수하다는 것을 뜻하는 것이다. 그러나 두 경우 모두 총방출량이 흡수된 수소의 50% 이하로서, 방출 효율이 매우 낮다. 이러한 결과는 수소의 방출반응시에 일어나는 흡열과정에 의해 열전달속도가 느린 합금층 내부의 온도가 크게 감소하여 합금의 방출평형압과 고유반응속도가 감소하기 때문이다. 반응용기의 내부와 외부 순환용수의 온도를 50°C로 했을 때 합금층내부의 온도가 20°C 이하로 감소되기도 하였다. 내부 및 외부의 순환용수 온도를 70°C로 했을 때의 결과를 Fig.7에 나타냈는데, 전체적인 경향은 Fig.6과 같으나 순환용수의 온도가 높기 때문에 분말시료와 성형체 모두 방출시의 용기내 압력이 높고 총방출량은 크게 증가하고 있다. 그러나 여기서도 성형체의 방출특성이 맨분말시료에 비해 상대적으로 우수함을 알 수 있다.

3.2 열전달 특성

앞의 결과에서, 분말시료에 비해 성형체의 수소 흡수 및 방출 특성이 우수한 것으로 나타났

다. 이러한 결과와 분말층(powder bed) 또는 성형체층(compact bed) 내의 열전달 특성의 관계를 조사하기 위해서 수소의 흡수와 방출 과정에 대해 용기중 합금층내의 온도분포와 열전도도 수과정 동안 초기에 합금층의 각 위치에서의 온도 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 T_1 , T_3 , 및 T_6 는 각각 반응용기의 중심부에서 1cm(내부 냉각수관의 표면), 3cm 및 6cm되는 위치의 온도 변화를 표시하고 있다. 이를 보면, 중심부에서 3cm위치의 온도가 가장 높고 각 위치 모두 반응개시후 약 1분 일때 가장 높은 온도를 나타내고 있다. 분말시료의 경우에도 유사한 온도분포를 보였는데 최대온도가 약간 더 높고 최대온

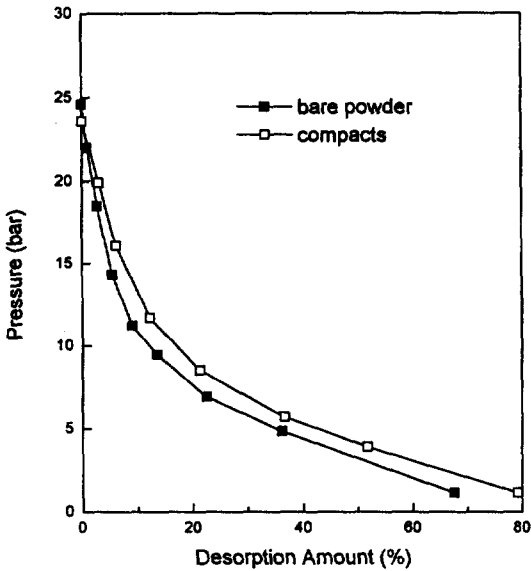


Fig. 7. Pressure changes with desorption amounts for compacts and bare powder at constant desorption rate(5 L/min), temperature of circulating water = 70°C

도가 약간 더 높고 최대 온도에 도달한 후 온도의 감소가 느리게 나타났다.

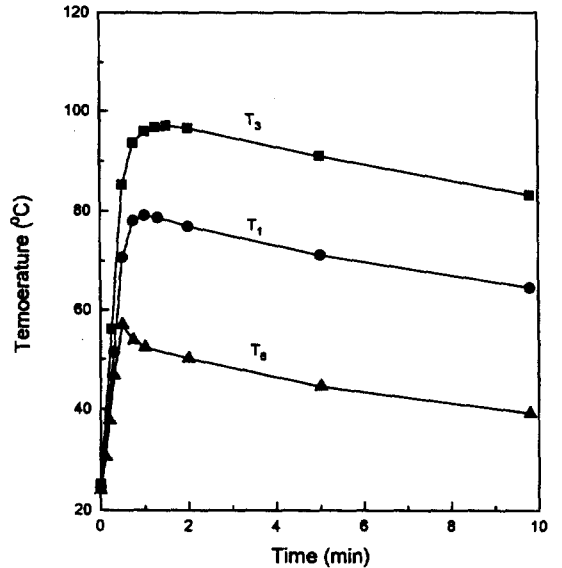


Fig. 8. Temperature changes with time at each position of T_1 , T_3 and T_6 in the reactor during hydrogen absorption for compacts(where, $T_1=1\text{cm}$, $T_3=3\text{cm}$, $T_6=6\text{cm}$ from the center), pressure=20 bar

Fig.9와 Fig.10은 분말시료와 성형체 시료를 장입한 각 반응용기에서 수소흡수시 합금층내의 온도분포를 반응개시후의 시간에 따라 나타내 본 것이다. 두 경우 모두 반응시간에 관계없이 반응용기의 중심부에서 3cm 즉, 중심부 냉각관의 표면으로부터 2cm되는 위치의 온도가 가장 높게 나타나며, 냉각관이 있는 중심부와 외부로 갈수록 온도가 감소한다. 이 그림에서 온도분포가 비대칭적으로 되어 있는 것은 반응용기의 중심 냉각부에 비해 표면 냉각부의 면적이 크고 총냉각수량도 많기 때문이다. 위의 두 결과를 비교해 보면, 성형체를 장입한 경우의 최대온도가 상대적으로 낮고 온도분포도 평탄하다. 이러한 온도분포를 볼 때 성형체층내의 열전도특성이 더 우수한 것으로 보인다. 그러나 앞의 수소 흡수속도항에서 보았듯이 각 시간대별로 반응속

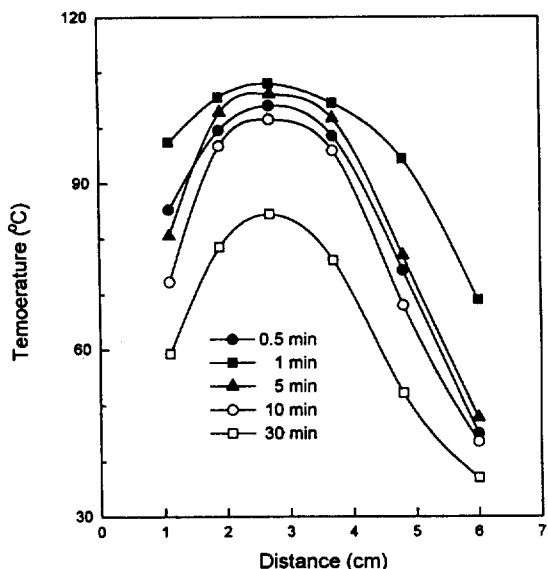


Fig. 9 Changes of temperature distributions with time in the reactor for bare powder during the absorption of hydrogen at constant pressure(25 bar)

도가 서로 다르기 때문에 단위 시간당 반응열의 방출량이 다르고 더우기 외부로부터 들어오는 수소기체의 온도와 대류의 효과를 고려한다면 위의 결과로서 열전달 특성을 평가하기는 어려운 점이 많다고 생각된다.

Fig.8 또는 Fig.9등으로 부터 용기내의 최대온도를 구할 수 있는데 반응압력을 달리한 조건에

Table 1. Maximum peak temperature in the reactor for different samples and absorption pressures

Sample	Absorption pressure (bar)	Peak temperature (°C)
Bare powder	20	99.6
	25	111.1
Compacts	15	87.5
	20	97.3
	25	103

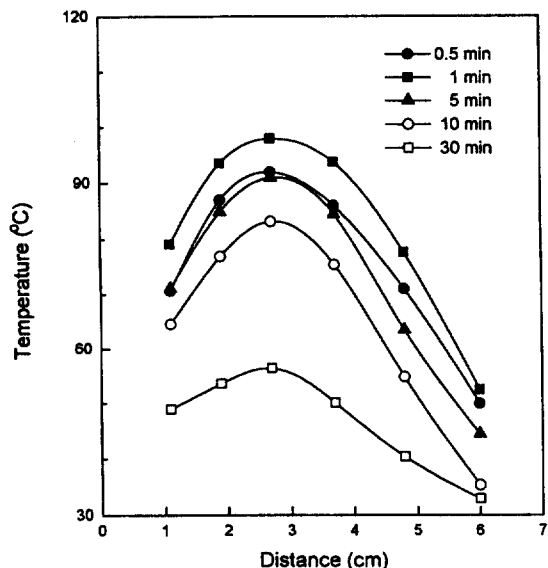


Fig. 10 Changes of temperature distributions with time in the reactor for compacts during the absorption of hydrogen at constant pressure(25 bar)

서 얻어진 최대 온도치를 Table 1에 요약하였다. Table 1을 보면, 흡수반응시 용기내의 인가압력(applied pressure)이 높을수록 최대온도가 높으며, 이 최대온도는 각 인가압력을 흡수평형압으로 하는 평형온도 81°C(15bar), 93°C(20bar), 103°C(25bar)와 거의 일치한다. 반응용기내에 인가된 일정한 압력하에서 수소화반응이 시작되면 반응열에 의해 시료내부의 온도가 급격히 상승해서 열전달 거리가 먼 위치의 온도는 평형온도까지 상승하여 수소흡수반응이 정지하게 된다. 따라서 이후부터 전체 반응은, 상대적으로 느리게 되며, 시료층을 통한 열전달속도에 크게 의존하게 될 것이다. 수소의 방출과정의 용기내 온도분포는 흡수과정과 반대로 나타나며, 그 전체적인 경향은 유사하다.

분말시료와 성형체의 열전달 특성을 좀더 정확하게 평가하기 위해서 정상상태법과 정속가열

법을 이용하여 유효열전도도와 열확산계수 (effective thermal conductivity and diffusivity) 를 측정하였다. 본 실험에 사용한 장치로 정상 상태에서의 heat flow($Q=J/s$)와 온도분포를 측정할 수 있으며, 외부순환용수를 반응용기의 표면을 일정한 속도로 가열할 수 있도록 설계되어 있기 때문에 앞의 식(1)과 식(2)를 이용하여 열전도도와 열확산계수를 구할 수 있다. 각 시료에 대해서 구한 유효 열전도도와 열확산계수값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Effective thermal conductivities and diffusivities of bare powder and compacts bed

Sample	Sample charge density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W/cm ² · K)	Thermal diffusivity (cm ² /s)
Bare powder	2.87	1.05×10^{-2}	1.80×10^{-2}
Compacts	2.77	1.00×10^{-2}	2.20×10^{-2}

Table 2에서 수소저장합금 분말의 유효 열확산계수는 실험적으로 측정, 보고된 값이 없기 때문에 직접적인 검증은 어렵지만, 유효 열전도도는 Suda등⁹⁾이 TiMn_{1.5} 합금의 분말에 대해서 측정된 $\sim 1.0W/cmK$ 와 매우 근사한 값을 보여준다. 또 열전도도(k)와 열확산계수(α)는 $k = \rho \cdot C_p \cdot \alpha$ (여기서, ρ =밀도, C_p = 정압비열)의 관계식을 가지는데, Table 2의 결과를 이용하여 평균 C_p 를 구해 보면, 분말시료에서 $0.20J/g \cdot K$, 성형체에서 $0.16J/g \cdot K$ 가 얻어지며, 이 값은 덩어리 상태의 순금속 비열 $0.4 \sim 0.5J/g \cdot K$ 를 고려할 때 상당히 합리적인 값으로 생각된다.

본실험에 사용한 장치상 다소의 실험 오차를 고려한다면 수소저장용기에 장입된 분말시료와 성형체의 겉보기 열전달 특성에는 큰 차이가 없

다고 볼 수 있다. 그러나 수소의 흡수 및 방출 속도에 관한 결과를 보면 동일한 조건하에서 성형체의 반응속도특성이 훨씬 우수하게 나타났다(Fig.3~Fig.7). 이것은 분말시료의 경우, 수소의 흡수 및 방출과정에 열전달 문제 뿐 아니라 분말층 내부를 통한 수소의 통기도도 중요한 역할을 하기 때문이라 생각되지만, 본 연구에서는 이에 관한 확인실험이 이루어지지 않았다. 일반적으로 분말시료의 경우 수소화 반응이 반복될 때 미분화 현상과 함께 분말의 충전밀도가 크게 증가하기 때문에 통기도가 크게 감소하는 것으로 알려져 있다. 성형체의 경우에는 성형체 개개의 사이에 공극이 매우 크기 때문에 충분한 통기도를 가진다. 그러나 Table 2에서 보듯이 성형체의 유효 열전달 특성은 분말시료와 크게 다르지 않게 나타났는데, 이것은 본 실험에 사용한 성형체의 형상이 원통상으로서 용기내에서의 충전밀도가 낮기 때문이며, 성형체의 형상을 구형으로 하여 충전밀도를 향상시킨다면 높은 통기도를 유지하면서 열전달 특성도 개선할 수 있을 것으로 예측된다. 이러한 부분에 대해서는 앞으로 더욱더 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

자동성형기를 이용하여 수소저장합금분말의 성형체를 대량으로 제조하고 특별히 설계한 수소저장용기를 이용하여 그 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 합금분말을 펠렛상으로 성형함으로써 활성화특성과 용기내 수소의 흡수 및 방출속도가 개선되었다.
2. 합금분말층과 성형체층(compact bed)내의

결보기 열전달 특성은 비슷하였으며, 유효열전도도와 유효열확산계수는 각각 $1.0 \times 10^{-2} \text{W/cm} \cdot \text{K}$ 및 $2.0 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 나타났다.

3. 분말층내의 수소흡수 및 방출속도는 열전달 특성외에도 통기도에 의해 영향을 받는 것으로 판단되며, 분말을 성형함으로써 이를 이용하는 수소저장용기의 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 “1990년도 특정기초 연구비” 지원에 의해 수행된 결과의 일부로 이에 감사드립니다.

References

1) M. Ishikawa, K. Ogura, A. Kato, H. Suzuki

- and E. Ishii ; J. Less-Common Met., 107, 105(1985)
- 2) 石川 博, 小黒啓介, 加 明彦, 鈴木 博 ; 化學工學, 50, 256(1986)
- 3) 逢坂達吉, 佑僑政司, 芳野久土 ; 日本特許(特開) 昭 60-60400(1985)
- 4) M. Ron ; U. S. patent, 4,507,263(1985)
- 5) 山本豊等 ; 日本特許(公開) 昭 60-262830 (1985)
- 6) W. A. Steyert et al. ; U.S. Patent, 4,360, 569(1982)
- 7) 송규태, 김찬중, 최병진, 김대룡 ; 수소에너지, 5(1), 51(1994)
- 8) 長崎誠三 ; “分析實驗技術入門” 第1集, 空理工株式會社, 1978, p160~175
- 9) S. Suda and N. Kobayashi ; J. Less-Common Met., 74, 127(1980)