

Al/Pd 박막의 수소 흡수 동역학(α 상)

조영신*[†]

*강원대학교 과학교육학부

Hydrogen Absorption Kinetics on Al/Pd Film in the α Phase

Youngsin Cho*[†]

**Dept. of Science Education, Kangwon National University,
192-1 Hyoja 2(i)-dong Chuncheon-si Gangwon-do 200-701, Korea*

ABSTRACT

Al film(135.5 nm thick) with Pd film(39.6 nm thick) was made by thermal evaporation method. Electrical resistance change by hydrogen absorption and desorption was measured with four point measurement method. Even though Al film(135.5 nm thick) did not absorb any hydrogen at room temperature, Al/Pd film absorbed hydrogen at upto 640 torr pressure. Hydrogen absorption kinetics was monitored by measuring resistance change of the sample in the temperature range from 25°C to 40°C. Absorption activation energy of Al/Pd film was about 10.7 and 17.7 kcal/mol H for 1st stage and last stage respectively at 1 torr hydrogen pressure. This activation values are bigger than that of Pd film, but are much less than that of Al film. This result indicates there is possibility that Al can be storage material for hydrogen by using Pd film evaporation on it.

KEY WORDS : electrical resistance(전기저항), film(박막), hydrogen absorption(수소 흡수), desorption(방출), kinetics(동역학), activation energy(활성화에너지)

1. 서 론

현재 인류가 당면하고 있는 에너지 문제와 환경 오염 문제를 동시에 해결할 수 있는 한 가지 대안으로 수소에너지가 많은 연구자들에 의해 진행되고 있으며 연구 결과의 일부는 수소 자동차, 연료

전지, 충전용 2차 전지 등으로 실용화 단계에 있다. 수소는 태양과 다른 열원 등을 이용하여 거의 무제한으로 생산할 수 있으며 수소는 사용 시에 산소와 결합하여 수증기를 만듦으로서 공해 문제를 심각하게 유발 시키지 않는 청정에너지원으로 각광 받고 있다. 청정에너지원¹⁾인 수소를 잘 이용하기 위하여서는 수소를 안전하게 많이 저장하였다가 손쉽게 꺼내어 사용할 수 있어야 한다.

[†]Corresponding author : yscho@kangwon.ac.kr

수소를 저장하는 기본적인 방법²⁾에는 고압 수소 저장, 액화 수소 저장, 물리 흡착에 의한 저장, 금속 수소화물에 의한 저장, 복합 수소화물에 의한 저장, 알칼리 복합체와 물에 의한 저장 등이 있다. 위의 여러 가지 방법에는 저장에 드는 비용, 가역성, 무게 밀도, 부피 밀도, 압력, 온도가 각각 달라서 이용 목적에 따라 장단점들이 있다.

수소 자동차 또는 수소 2차 전지 등에서 수소를 이용하기 위해서는 적은 부피 내에 많은 양의 수소를 저장하여야 한다. 위의 저장 방법 중 부피 밀도가 크고, 상온에서 수소를 가역적으로 저장, 방출할 수 있는 방법으로 금속 수소화물에 의한 저장 방법이 많이 연구되고 있다^{3,4)}. 액화 수소 저장 시 부피 밀도는 $70.8 \text{ kg-H}_2/\text{m}^3$ 인데 반하여 금속 수소 화물에 저장 시에는 $150 \text{ kg-H}_2/\text{m}^3$ 으로 거의 2배에 달한다.

수소를 흡수 저장할 수 있는 금속으로 연구되는 것들에는 Mg계열, Mg와 전이원소(Ti, Fe, Co, Ni, Ce, Nb, V) 합금, LaNi_5 계열, Mm계열, Ni계열 등이 있다. 이러한 금속에 수소를 금속 수소화물의 형태로 저장하였다가 필요할 때 수소를 방출시켜 사용하기 위해서는 다음의 조건들을 충족시켜야 한다. 즉, 쉬운 제조 공정, 빠른 수소화와 탈수소화 반응 속도, 용이한 초기 활성화 과정, 낮은 반응 온도, 큰 무게 밀도, 저렴한 재료 가격 등의 조건들을 충족시켜야 한다. 지금까지 연구되어진 금속들은 위의 조건들 중의 일부만을 충족시켰기 때문에 상용화에 진전을 어렵게 하였다.

금속 재료 중 밀도가 작고, 즉 무게 밀도가 크고, 가격이 저렴한 Al에 수소를 저장할 수 있으면 위의 제약 조건 중의 큰 걸림돌을 제거할 수 있을 것이다. 일반적으로 금속이 덩어리형태일 때는 수소의 흡수와 방출에 시간이 걸리는 문제가 있다. 따라서 금속을 박막의 형태⁵⁻⁷⁾로 제작하면 표면적이 넓기 때문에 수소 흡수와 방출이 빠르게 진행될 수 있다.

이 연구의 목적은 수소를 가벼운 금속인 Al에 저장하는 방법을 고안하고, 수소 흡수 동역학을 알아 보는 것이다. Al 자체는 그 표면이 쉽게 산화되

어 수소 흡수가 거의 불가능하게 된다. 다음 Table 1에서 볼 수 있듯이 300°C 에서 1000°C 온도 범위에서 수소를 1 기압 가하는 조건에서 $\text{H/Al} = 2.4 \times 10^{-8}$ 에서 1.1×10^{-4} 의 범위의 수소를 흡수하는 것으로 밝혀져 있어 수소가 거의 흡수되지 않는다고 볼 수 있다.

이 문제의 해결 방법 중의 한 가지 시도로서 먼저 Al을 박막으로 제작하고, 그 표면의 수소 친화력을 높이기 위하여 Pd 박막을 Al 박막 위에 증착하였다. $\text{Pd}^{(9-11)}$ 는 상온에서 수소를 쉽게 흡수 방출하는 기능이 있는 것으로 알려져 있다.

이 연구에서는 Pd박막이 상부 층에 증착된 Al 박막에 기체 상태의 수소를 가압시켰을 때의 수소 흡수 동역학을 분석하였다.

2. 이 론

2.1 수소 흡수 단계

금속 내에 수소가 흡수되는 단계는 다음과 같이

Table 1 Solubility of hydrogen in Aluminum at 1 ATM hydrogen pressure⁸⁾

Temp. (°C)	Ramsley and Neufeld	Eichenaur et al.	Sharov
300	2.4×10^{-8}	-	2.4×10^{-8}
350	-	2.8×10^{-8}	-
400	12×10^{-8}	6.8×10^{-8}	-
500	3.0×10^{-7}	2.7×10^{-7}	-
600	6.3×10^{-7}	7.2×10^{-7}	-
660 (solid)	8.7×10^{-7}	12×10^{-7}	8.7×10^{-7}
660 (liquid)	1.66×10^{-7}	1.03×10^{-7}	-
700	2.4×10^{-7}	1.61×10^{-7}	-
750	3.0×10^{-7}	-	2.9×10^{-7}
800	4.0×10^{-7}	3.0×10^{-5}	-
900	-	5.3×10^{-5}	-
1000	-	8.5×10^{-5}	10.8×10^{-5}

2단계로 진행된다¹²⁾.

① 핵생성(Nucleation) 과정 : 수소가 금속 박막 내부로 확산하여 박막 내에 핵 같은 모양으로 형성되는 과정으로 다음과 같이 표현된다.

$$-\ln(1-r) = k_1 t \quad (1)$$

여기서 $r = \Delta R / \Delta R_\infty$, $\Delta R = R_0 - R_c$, $\Delta R_\infty = R_0 - R_\infty$, R_0 는 처음의 저항 값이고, R_c 는 보정 전기저항, k_1 는 흡수 속도 상수, t 는 시간이다.

② 계면이동(Interface at constant v) 과정 : 수소가 금속 박막 내부로 확산되어 핵을 형성한 후 핵과 핵 사이가 겹쳐져 계면을 만든 후 그 계면이 일정한 속도로 내부로 이동하는 과정으로 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$1 - (1 - \alpha)^n = \frac{v}{a} t = k_2 t \quad (2)$$

여기서 a 는 입자의 초기 반지름, n 은 계면의 모양에 의하여 결정되는 상수(Pd 과 Al 은 정방정계이므로, $n = \frac{1}{3}$), v 는 속도, k_2 는 흡수 속도 상수, t 는 시간이다.

2.2 수소 흡수 시의 활성화 에너지

앞서 구한 k_1 , k_2 와 아래의 Arrhenius 방정식을 이용하여 시료 내에 수소가 흡수할 때의 활성화 에너지를 구할 수 있다.

$$k_{1,2} = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

여기서 k 는 흡수 속도 상수, A 는 상수, R 은 기체상수, T 는 온도, E_a 는 활성화 에너지이다. 위 식을 본 실험에 필요한 형태로 유도하면 다음과 같다.

$$\ln k_{1,2} = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + const \quad (4)$$

$\ln k$ 와 $1/T$ 의 그림을 그려서 기울기 값으로부터 E_a 값을 구할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 실험 순서

Al 박막 위에 Pd 박막을 증착하여 만든 이중 박막의 수소 흡수 동역학을 알아보기 위한 실험 순서는 다음과 같다.

① Al 박막 실험 : 이중 박막의 아래층에 만들어질 박막과 같은 두께로 별도 제작하여 수소 흡수 방출 여부를 확인한다.

② Pd 박막 실험 : Al 박막 위에 증착시킬 Pd 박막과 같은 두께로 Pd 박막을 별도 제작하여 수소 흡수 방출 거동을 확인한다.

③ Al/Pd 박막 실험 : 본 실험으로서 Al 박막 위에 Pd 박막을 증착시켜 상온에서 수소 흡수 방출 거동을 확인한다. a 상에서의 수소 흡수 동역학을 분석하기 위하여 박막 시료의 전기저항을 측정한다.

위의 모든 실험은 상온에서 시행하였으며, 수소가압은 고압 수소통에 있는 기체상의 수소를 이용하였다. 일반적으로 박막 시료의 전기저항은 시료 내의 불순물(이 연구에서는 수소 원자)의 비율과 비례⁹⁾하므로 시료의 전기저항을 측정하면 시료 내의 수소의 농도 변화를 알 수 있다.

3.2 시료제작

박막 시료들은 진공 열 증착기를 이용하여 제작하였다. 전기 저항 측정용 박막 시료의 기판은 생물 실험용 커버 글라스(Corning 2948)를 3×10 mm 크기로 절단하여 사용하였다. 알루미늄으로 마스크를 제작하고, 그 마스크 윗면에 유리 기판을 설치하고 아래에서 위쪽 방향으로 Al(135.5 nm)과

Pd(39.6 nm)를 각각 증발시켜서 증착시켰다. 텅스텐 보트에 고진공을 직접 가하여 시료를 증발시켰다.

Al으로는 순도 99.999%, Pd는 99.99%의 원료를 사용하였고, 고진공 다층막 증착장치로는 대한 진공 엔지니어링 DMC-400BM을 사용하였고, 진공 증착기 내부에 시료 두께를 측정하는 수정 결정 두께 측정기기는 Edwards FTM5를 사용하여 측정하였다. 증착 시 기판의 온도는 300°C에서 증착하였다.

3.3 실험 장치

제작된 시료는 스테인레스강으로 제작한 시료 걸이(sample holder) 내에 장치하고 진공시켰다. 온도의 조절을 위하여 온도 조절기와 냉각수를 이용하였고 보온 상자 내의 온도 조절을 효율적으로 하기 위하여 소형 환풍기 2개를 사용하여 공기를 강제 순환시켰다. 보온 상자는 두께 5 cm로 120×60×40 cm³의 크기로 제작되었다.

수소의 가압은 직접 제작한 수소 가압 장치를 이용하였으며, 압력값은 압력 트랜듀서(Pressure transducer) (WIKA Model 1390)로 읽었다. 시료의 전기 저항값의 변화는 DMM(Keithley Model 196)으로 측정하고, 시료실의 온도는 Pt-100을 DMM(Keithley Model 195A)에 연결하여 측정하였다. DMM으로 읽은 값들은 HPIB카드(HP Model 82335 HP-IB interface card)를 통하여 PC에 기록하였다.

3.4 전기 저항 측정

시료가 박막이기 때문에 덩어리 시료와 같은 방법(2단자 측정법)으로 저항을 측정하면 단자 저항의 영향이 크기 때문에 실험 오차가 크게 발생한다. 직경 25 μ m Al선 4개를 구리 기판에 초음파용 접하고 4극 저항 측정법으로 전기 저항을 얻을 수 있도록 하였다. 전압 단자 사이의 거리는 ~7mm 이었고, 시료의 폭은 1 mm이다.

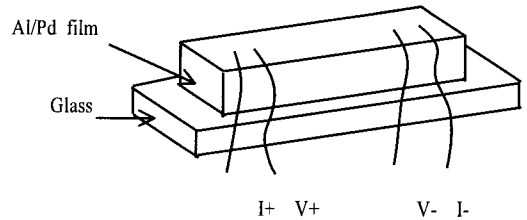


Fig. 1 Schematic diagram of sample and 4-probe resistance measurement connections

3.5 활성화 과정 및 수소 흡수 방출 과정

모든 박막들은 제작 시에 발생하였을 박막 내의 스트레스를 제거하여 재연성 있는 실험 결과를 얻기 위하여 활성화 과정을 거쳤다. 상온에서 수소를 5 또는 10 torr로 가압하였다가 진공 펌프로 수소를 뽑아내는 과정을 반복하였다. 금속 내에 수소 흡수와 방출 시에 열의 출입이 수반되는데, 이 열에 의하여 박막 구조 내의 스트레스가 제거된다. 박막의 전기저항을 측정하여 더 이상의 변화가 없을 때까지 즉, 더 이상의 구조적인 변화가 없을 때까지 활성화 과정을 반복하였다. Fig. 2는 Al/Pd 박막 시료의 활성화 과정에서의 전기 저항의 변화

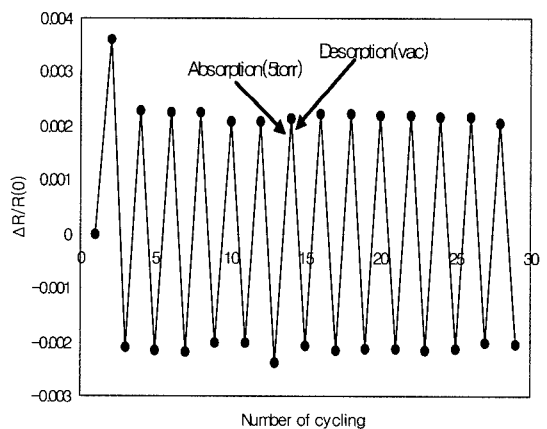


Fig. 2 Relative resistance change during activation process of Al/Pd film at room temperature

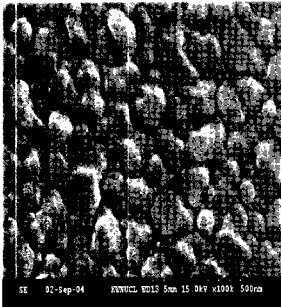


Fig. 3 SEM picture of Al sample(135.5 nm thick, ×100,000)

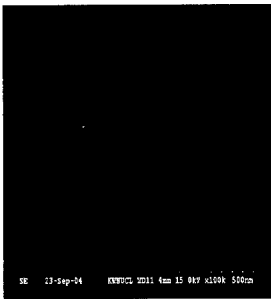


Fig. 4 SEM picture of Pd film(39.6 nm thick, ×100,000)

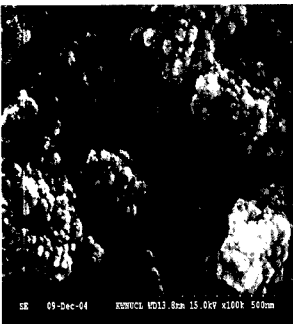


Fig. 5 SEM picture of Al/Pd film(Al=135.5 nm, Pd=39.6 nm thick, ×100,000)

를 보여 주고 있다.

박막 시료의 수소 흡수 방출 거동을 위한 실험은 상온에서 수소 압력을 단계적으로 640 torr까지 올렸다가 다시 단계적으로 압력을 내리는 방법으로 진행되었다. 급격한 수소 압력의 변화는 수소 흡수에 의한 시료의 팽창으로 시료 파괴가 일어날 수 있기 때문에 단계적으로 시행하였다.

수소 가압 시의 동역학 실험은 상온에서 수소를 1 torr부터 5 torr까지 압력을 1 torr 단계로 증가시키면서 가압 직후부터 평형 상태가 될 때까지의 전기 저항의 변화를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 박막의 상태

박막을 제작한 직후 박막 표면을 전자 현미경으로 촬영한 결과 Al은 Pd 보다 큰 덩어리 형태였고, Pd 역시 작기는 하였지만, 덩어리 상태였다.

박막시료들의 전기 저항값들을 분석한 결과 Pd 덩어리들이 서로 연결되지 않고 끊어진 형태(island, 섬)로 Al 박막 위에 올라가 있다고 볼 수 있다.

4.2 수소 압력에 따른 저항 변화

4.2.1 Al 시료의 저항 변화

Al 박막 자체를 Al/Pd 박막과 같은 조건으로 수



Fig. 6 Schematic diagram of Al/Pd film

소를 가압하였을 때 수소의 흡수 정도를 알아보기 위한 실험 결과를 Fig. 7에서 볼 수 있다. 수소 압력을 640 torr까지 가압하였는데도 Al 박막의 저항 변화는 0.009% 정도이다. 이 값은 실험 오차 범위 내에서 저항의 변화는 없다고 볼 수 있다. 즉 Al 박막에 수소가 전혀 흡수되지 않음을 알 수 있다.

4.2.2 Pd 시료의 저항 변화

Al 박막 위에 증착되는 Pd 박막과 동일한 두께로 제작된 박막의 수소 흡수 방출 거동을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 이 결과는 전형적인 Pd 박막의 저항 변화 추세를 보여 주고 있다. 즉, 상온에서 Pd

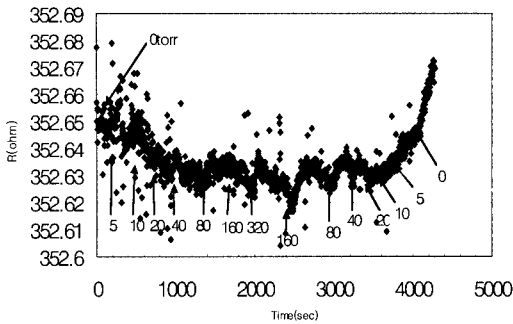


Fig. 7 Resistance change of Al film(135.5 nm thick) vs. hydrogen pressure at room temperature

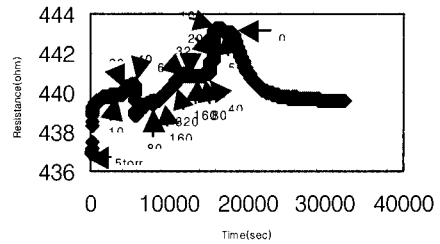


Fig. 9 Resistance change of Al/Pd film(Al 135.5 nm, Pd 39.6 nm thick) vs. hydrogen pressure at room temperature

박막에 수소가 잘 흡수되고 방출됨을 알 수 있다.

4.2.3 Al/Pd 시료의 저항 변화

이중 박막인 Al/Pd 시료의 전기 저항의 변화는 단일 박막들의 저항 변화와는 아주 다른 양상을 Fig. 9에서 보여 주고 있다. 이중 박막의 경우 전기 저항은 두 개의 다른 금속의 전기 저항이 직렬과 병렬 상태로 복합적으로 연결되어 있기 때문에 이 그림으로부터 직접적인 정보를 바로 알아 낼 수 없다. 그러나 Al 자체만으로는 수소 흡수가 전혀 일어나지 않아서 전기 저항에 변화가 없었던 박막에 Pd 박막을 상층에 증착함으로써 수소 흡수 방출 거동이 확연하게 달라짐을 확인할 수 있다.

4.3 Al/Pd 시료 수소 흡수 방출 동역학

앞에서 Al/Pd 박막 시료에 수소 흡수 방출이 확인됨에 따라서 Al/Pd 박막의 수소 흡수 동역학 측정을 위한 실험을 시행하였다. 온도는 25°C부터 5°C 간격으로 40°C까지, 압력은 1 torr부터 1 torr 간격으로 5 torr까지 범위를 선정하였다. Fig. 10에서 R_0 는 수소 가압전의 최초 전기 저항이고, $\Delta R = R - R_0$ 이다. 여기서 R은 수소 흡수 과정에 있는 시료의 전기 저항이다. Fig. 11은 Fig. 10의 수소 흡수 초기 과정을 확대한 그림이다. 가압 수소의 압력이 커질수록 급속하게 수소의 농도(전기저항)가 증가하는 것을 볼 수 있다.

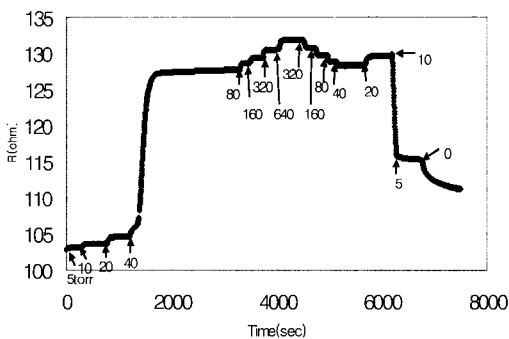


Fig. 8 Resistance change of Pd film(39.6 nm thick) vs. hydrogen pressure at room temperature

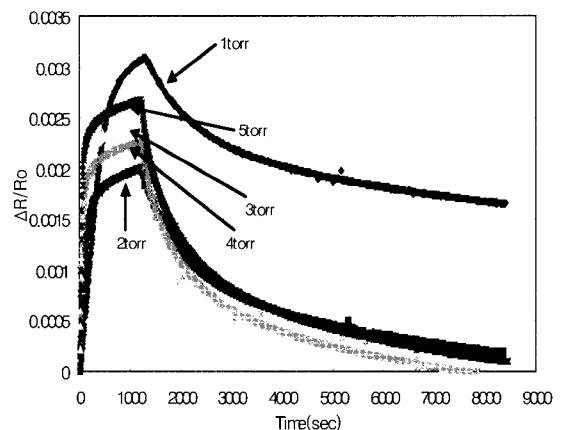


Fig. 10 Relative resistance change vs. time with various hydrogen pressure at 25°C

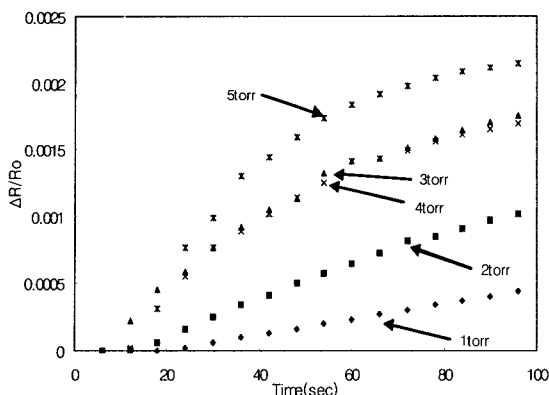


Fig. 11 Enlarged figure of fig. 7 from 0 to 100 second

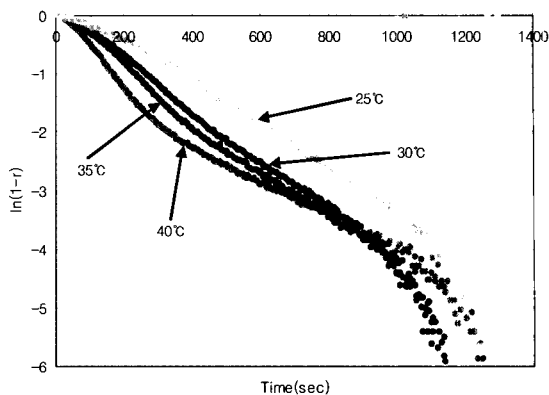


Fig. 12 ln(1-r) vs. time graph of Al/Pd film at 1 torr hydrogen pressure

4.4 Al/Pd 시료의 수소 흡수 활성화에너지

앞의 방정식 (1)을 이용하여 온도별 수소 흡수 동역학 실험 결과를 그린 것을 Fig. 12에서 볼 수 있다. Fig. 12의 곡선의 기울기를 살펴보면 대략 세 부분(초기, 중기, 말기)으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 세 부분의 기울기를 이용하여 활성화 에너지를 구하였을 때 초기와 말기는 방정식 (1)을 만족하였으나 중기는 만족하지 않았다. 중기에 해당하는 부분을 방정식 (2)를 이용하여 실험 결과를 그렸을 때 방정식을 따르지 않았다. 이러한 결과는 이 시료의 중기는 위에서 언급한 2개의 수소 흡수 과정과는 다른 기작이라고 가정할 수 있을 것이다.

방정식 (4)를 이용하여 초기 부분의 활성화 에

너지를 얻기 위한 그림을 Fig. 13에서 볼 수 있다. 저자의 선행 연구의 결과와 이 연구의 결과를 종합하면 다음 표와 같다.

직선의 기울기로부터 시료의 초기 활성화에너지는 10.7 kcal/mol H, 후기 활성화에너지는 17.7 kcal/mol H로 얻어졌다. 이 값들은 Al/Pd 시료의 Pd 박막의 두께와 유사한 영역의 Pd 박막(두께 31 nm) 시료의 활성화에너지값(5.3 kcal/mol H)의 약 2배와 3.3배에 해당한다.

위의 활성화에너지값으로부터 수소에 의하여 시료의 저항이 변화한 것은 Al 박막 위에 덮혀져 있는 Pd 자체의 수소 흡수에 의한 것이 아니며

Table 2 Activation energy(E_a) of Al/Pd and Pd films

Sample Name	Pd thick. (nm)	E_a (kcal/mol H)
Al/Pd ¹	39.6	10.7 ³
		17.7 ⁴
Pd935 ²	31	5.3
Pd938b ²	67	4.1

* 1. present work
3. First stage

2. author's previous work
4. Last stage

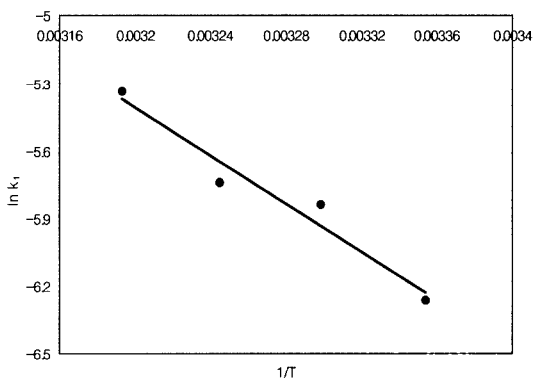


Fig. 13 ln k vs. 1/T graph of Al/Pd film at 1 torr hydrogen pressure

Al/Pd 이중 박막 전체의 전기적인 변화에 의한 것임을 알 수 있다.

앞으로의 연구에서는 수소가 이중박막 시료의 Pd 박막의 두께의 변화를 연구하여 수소 흡수를 위한 최적 두께를 찾고, 수소가 시료의 어느 부분에 들어가 있는지를 밝힘으로써 수소 흡수 거동의 근원을 밝힐 예정이다.

5. 결 론

수소 저장 금속의 작은 무게 밀도를 해결하고 수소 흡수 속도문제를 해결하기 위한 방안으로 Al 박막 시료의 수소 흡수 방법과 수소 흡수 동역학을 연구하였다.

유리 기판 위에 두께 135.5 nm Al 박막은 수소를 전혀 흡수하지 못하였다. 그러나 두께 135.5 nm Al 박막 위에 두께 39.6 nm Pd 박막을 증착한 시료는 수소를 흡수·방출하는 특성을 보였다. 이러한 특성은 Al 박막 자체가 전혀 수소를 흡수하지 않는 특성과는 전혀 다른 특성이다. 이 시료의 25°C부터 40°C 사이의 온도 영역에서 1 torr 수소 압력에서 흡수 시의 초기 활성화 에너지는 10.7 kcal/mol H, 후기 활성화 에너지는 17.7 kcal/mol H로 얻어졌다. 이 값들은 비슷한 두께의 Pd 박막의 활성화 에너지의 2배에 해당하지만 Al 박막의 활성화에너지보다는 훨씬 작은 값이다. 이 분석 결과는 Al 박막 위에 Pd 박막을 증착함으로써 Al이 수소를 저장할 수 있는 재료가 될 수 있는 가능성을 시사한다.

후 기

본 연구의 일부는 한국과학재단 지원(2004년도 과학고 영재교육 내실화 지원사업 R&E 프로그램)으로 수행되었으며, 저자는 이 실험을 위하여 시료를 제작하고 실험 결과를 얻고 분석하는데 도움을 준 강원대학교 과학교육과의 김동환, 김향희, 유수상, 백보라에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- 1) 김길환, "수소에너지", 현대과학신서 113, 전파과학사, 서울, 1981.
- 2) 김종원 외, "알기 쉬운 수소 에너지", 수소에너지 사업단, 한국수소 및 신에너지학회, 2005.
- 3) J. Volkl and G. Aleford, "Topics in Applied Physics", G. Alefeld and J. volkl ed., Springer, New York, Vol. 28, 1978.
- 4) J. Volkl and G. Aleford, "Topics in Applied Physics", G. Alefeld and J. volkl ed., Springer, New York, Vol. 29, 1978.
- 5) M. A. Butler, D. S. Ginley, "Hydrogen sensing with palladium-coated optical fibers", J. Appl. Phys., Vol. 64, No. 7, 1988, pp. 3706-3712.
- 6) R. C. Hughes, W. K. Schubert, "Thin films of Pd/Ni alloys for detection of high hydrogen concentrations", J. Appl. Phys. Vol. 71, No. 1, 1992, pp. 542-544.
- 7) D. E. Azofeifa, N. Clark, A. Amador, A. Saenz, "Determination of hydrogen absorption in Pd coated Al thin films", Thin Solid Films, Vol. 300, 1997, pp. 295-298.
- 8) W. M. Mueller, J. P. Blackledge, G. G. Libowitz, "Metal Hydrides", Academic Press, London and New York, 1968.
- 9) F. A. Lewis, "The Palladium Hydrogen System", Academic Press, London and New York, 1967.
- 10) Young-sin Cho, J. S. Lee and C. W. Kim, "The hydrogen absorption kinetics in very thin Pd film(α phase)", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 9, No. 1, 1998, pp. 25-30.
- 11) 조영신, "PdHx 박막의 광투과도", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 12, No. 3, 2001, pp. 201-209.
- 12) C. M. Stander, "Kinetics of decomposition of magnesium hydride", J. of Inorg. Nucl. Chem., Vol. 37, 1977, pp. 221-223.