

수소취화된 CANDU 압력관 재료의 파괴강도 평가를 위한 SP시험에 관한 연구

노승환*, 오장우**, 유효선***, 정세희***

* 한국원자력안전기술원 안전심사부

** 충남대학교 기계설계공학과

*** 전북대학교 정밀기계공학과

요 약 본 연구의 목적은 지금까지 적용되지 않은 극소형시험편을 이용한 소형펀치(small punch: SP)시험과 비파괴시험방법(non-destructive test: NDT)으로 알려진 음향방출(acoustic emission: AE)시험에 의해 수소취화된 압력관 재료의 새로운 파괴강도 평가법으로서 SP시험의 적용 가능성을 조사하는데 있다. 시험결과, 300ppm-H까지의 수소농도에서, 수소농도에 따른 Esp의 저하가 상온보다 -196°C의 경우가 뚜렷하여, 수소취화정도에 따른 Zr-2.5%Nb 압력관 재료의 파괴강도 평가는 상온보다 -196°C의 저온환경하에서의 평가가 더욱 우수함을 알 수 있었다. 또한 수소농도의 증가에 따라 재료의 파괴과정에서 발생하는 AE신호의 평균에너지의 peak와 누적 평균에너지 그리고 단위 등가파괴변형률(equivalent fracture strain: ϵ_{df})당 누적 평균에너지의 값이 크게 증가하였다. 그리고 하중-변위거동, E_{SP} 거동, 거시적, 미시적 SEM 관찰 그리고 AE 시험 결과들로부터 미소시험편을 이용한 SP시험법은 수소취화된 CANDU 압력관 재료의 새로운 파괴강도 평가법으로 유용성이 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

CANDU(Canadian Deuterium Uranium) 가압중수로(PHWR: pressurized heavy water reactor) 원자력발전소는 핵연료 및 핵연료주기, 가동률 그리고 가동중 핵연료 교체기능 등의 측면에서 현재의 가동기수가 월등히 많은 가압중수로(PWR: pressurized water reactor) 원자력발전소와 비교해 볼때 우수하여, 국내의 원자력 산업에서 CANDU-PHWR이 차지하는 비중은 크게 증대될 전망이다. 이러한 CANDU-PHWR의 원자력 발전시스템 중 핵연료채널 구조에서 두께 4mm, 내경 103mm 그리고 길이가 6m인 압력관(pressure tube)은 약 380여개 장착

되어 있으며, 기능상 두께 254mm의 PWR발전소의 reactor vessel에 해당하는 매우 중요한 요소로서 알려져 있다¹⁾. 또한 안전성 측면에서 볼 때 핵연료 채널 구성품중 핵물질인 핵연료와 직접 접촉하고 있어 핵연료 압력관은 다른 어느 부품보다도 건전성이 크게 요구되고 있다.

한편 이러한 CANDU 압력관에서 야기되는 주요 문제점들을 살펴보면, 압력관내에서 수소화물(hydride)석출에 의한 수소취화(hydrogen embrittlement)와 노내 변형에 의한 tube의 길이방향의 연신(elongation), 원주방향의 변형 그리고 처짐(sagging) 및 이에 따른 원자로 가동중 중수누설 등을 들 수 있는데²⁻⁴⁾, 이들 중 원자로 가동중 중수접

축에 의한 부식반응으로 발생하는 수소에 의한 압력관 재료의 수소취화가 가장 큰 문제로 대두되고 있다^{5~7)}. 따라서 수소취화에 의한 Zr-합금의 수소취화거동에 대한 많은 연구논문이 보고되고 있으나, 이들 연구내용은 대부분 Zr-합금재료의 균열개시와 전파거동에 미치는 hydride의 크기와 수소농도 그리고 작용응력에 대한 영향과 수화물 형성기구에 관한 연구^{8,9)}들로서 hydride의 형성정도에 따른 Zr-합금재료의 파괴강도 평가에 대한 연구보고는 거의 찾아보기 힘든 실정이다.

한편, 최근 원자로 내벽의 조사(irradiation)에 의한 기계적 성질의 저하를 평가하기 위하여 일본 원자력연구소(JAERI)에서 개발된 소형편치(small punch : SP)시험법¹⁰⁾은 현재 핵융합로의 조사취화에 따른 재료강도 평가¹¹⁾에 사용되고 있다. 그리고 음향방출(acoustic emission : AE) 시험은 재료의 내부응력 또는 외부로부터 가해지는 응력으로 인하여 재료내에서 발생하는 탄성파(elastic wave)를 분석하여 재료의 미시적인 변형거동과 균열의 발생 및 전파거동을 해석할 수 있는 매우 유용한 시험방법^{12,13)}으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 연구 배경하에서 지금까지 적용되지 않은 극소형시험편을 이용한 SP 시험과 비파괴시험방법(non-destructive test : NDT)으로 알려진 AE시험에 의해 Zr-2.5%Nb 압력관 재료의 수소취화 정도에 따른 파괴특성들을 조사함으로써, 수소취화된 압력관 재료의 새로운 파괴강도 평가법으로서 SP시험의 적용 가능성을 조사하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 시험편과 실험 방법

2.1. 시험편

본 연구에 사용된 재료인 PHWR의 압력관을 포함한 핵 연료채널의 개략적인 모양을 살펴보면 Fig. 1과 같다. 여기서 핵연료 압력관은 27% 냉간 가공된 Zr-2.5%Nb합금재료로서 그의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 그리고 SP시험편의 제작은 우선 tube로부터 반경방향으로 10mm×10mm의 단면을 갖는 각 봉으로 기계가공을 한 후, 0.3mm의 와이어 커터를 사용하여 시험편의 두께가 0.8~0.9mm가 되

Table 1. Chemical composition Zr-2.5% wt% Nb Pressure Tube.

H	N	O	Nb	Fe	Ta	C
> 6	45~52	1080~1200	2.5	950	> 250	80

되도록 기계가공하였다. 절단된 시험편을 #300~#1500번의 사포(emery paper)를 사용하여 시험편의 표면에 가공경화가 일어나지 않도록 물을 주입하면서 사상가공을 한 후, 최종적으로 SP시험편의 규격인 10mm×10mm×0.5mm의 크기로 제작하였다¹⁰⁾. 이때 시험편 두께의 허용오차는 ±0.05mm로 하였다. 그리고 SP시험편의 수소 주입방법을 살펴보면, 먼저 제작된 표준 SP시험편을 노에 삽입한 후 노를 진공상태로 하고 노의 온도를 400℃(상승속도: 약 7℃/min.)까지 가열하였다. 그 다음 약 0.5 Torr의 압력과 설정된 수소주입시간동안 수소를 주입한 후, 공냉처리하는 방법을 이용하였다. 그리고 시험편에 주입된 수소농도의 측정은 핵 연료봉의 수소농도 측정기를 이용하여 ppm단위로 측정하였다.

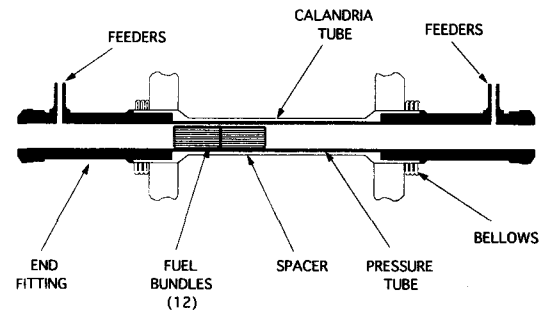


Fig. 1. Simplified diagram fuel channel.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 소형 편치(SP) 실험 방법

Fig. 2에 SP 시험장치의 개략도와 시험지그의 상세도를 나타내었다. SP시험 지그는 크게 상부다이(upper die)와 하부다이(lower die) 그리고 편치(punch)와 강구(steel ball)로 구성되어 있으며, 시험편에 컵(cup)형 변형량을 완전히 억제시켜 재료의 소성변형이 부하용 강구의 직하에 집중될 수 있도록 4개의 체결볼트로 상부다이와 하부다이 사이에 시험편

을 토오크 렌치를 사용하여 50kg·mm 로 체결하였다. SP시험은 용량 10ton의 만능시험기를 사용하여 펀치전단에 HRC62~67의 경도를 갖는 φ2.4mm의 강구를 놓고 이를 통하여 시험편의 상부에 하중을 가하였다. 이때 시험편에 가해지는 변위속도는 0.2mm/min.로 하였다. 시험중의 하중값은 load cell에서 나오는 미세전압치를 증폭기에서 증폭시킨 후, AE 계측 장비의 parametric input 단자에 입력시켜 측정하였으며, 변위값은 변위속도로부터 계산하였다. 시험온도는 상온과 액체질소(liquid nitrogen)온도인 -196℃로 하였다. 이때 두 실험온도의 설정은 실험 온도 변화에 따른 재료의 열팽창계수의 특성을 고려하여 설정한 것이다.

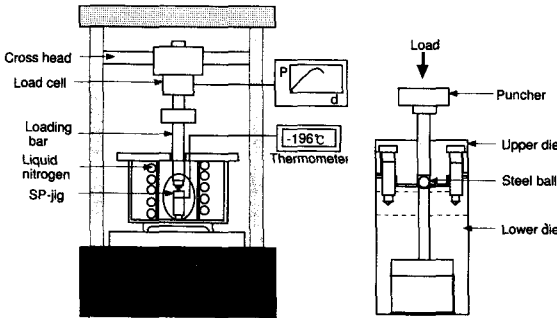


Fig. 2. The schematic diagram of SP test equipment.

2. 2. 2. 음향방출(AE) 실험방법

실험에 사용된 AE 장비는 Physical Acoustic Corporation(PAC)사의 SPARTAN AT 장비를 사용하였다. AE 신호는 Fig. 3에 보여진 AE 계측

system을 통하여 분석하였으며, 신호검출에 사용된 센서는 넓은 범위의 주파수(50~1000kHz) 범위를 탐지할 수 있는 광대역형(wide band type) 압전형 센서(piezoelectric sensor)를 사용하였다. 센서에서 감지된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭한 뒤 noise 제거를 위해 100~1200kHz의 bandpass filtering을 한 후 AE 계측기에 입력되었다. 입력된 AE 신호는 다시 20dB 증폭시키고 신호처리를 위해 A/D 변환기에서 디지털화되어 분석되었다. AE 실험은 주위의 잡음(background noise)에 의해 상당한 악영향을 받기 때문에 문턱전압(threshold voltage: V_{th})값의 결정시에는 주위의 여러 잡음(mechanical noise, electromagnetic noise, liquid nitrogen boiling noise 등) level을 고려하여 V_{th} 값을 설정해 주어야만 한다. 본 연구의 AE 신호분석에 있어서 V_{th} 값은 75dB(3.55mV)로 설정하였다. 그리고 AE 센서의 부착은 미소시험편의 크기, 액체질소에 의한 센서의 손상과 이득저하를 방지하기 위해서 wave guide을 이용하여 부착하였다. 이때 wave guide는 SP 하부다이에 연결하였으며, 센서 사이에는 high vacuum grease를 바른 후, clamp 및 토오크렌치를 사용하여 65kg·mm 의 일정 토오크로 고정하였다. 시험에 채택된 AE 신호 인자는 AE신호의 envelop 면적으로 계산된 AE-에너지를 이용하였다. 그리고 실험결과와 고찰에서 사용된 SP시험의 등가파괴변형률(equivalent fracture strain: ϵ_{qf})은 아래식으로부터 산출하였다¹¹⁾. 이때 ϵ_{qf} 은 SP 시험시 시험편의 변형 개시부터 파괴까지 일어나는 시험편 등가변형률을 나타낸 값이다.

$$\epsilon_{qf} = \ln(t_0 / t^*) = \beta(\delta / t_0)^{3/2}$$

여기서 t_0 : 시험편의 초기두께, t^* : 파괴시 시험편의 최소두께, β : 실험상수(=0.15), δ : 변위이다.

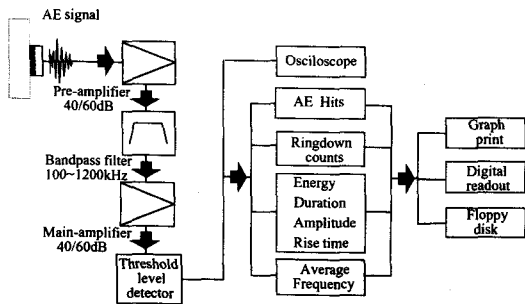


Fig. 3. Block diagram of the AE signals process.

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1. 미소시험편에 의한 Zr-2.5%Nb 재료의 파괴 강도

서론에서 언급하였듯이 Zr-2.5%Nb의 압력관재료는 수소화물 석출에 의한 수소취화가 가장 큰 문제

로 대두되고 있다. 따라서 상온에서 Zr-2.5%Nb 미소시험편의 파괴강도에 미치는 수소농도의 영향을 살펴보기 위해 수소주입을 행하여 얻은 수소농도가 각각 17, 108, 270, 1020 그리고 1128ppm-H의 시험재를 대상으로 SP실험을 행하였다. Fig. 4는 각 시험편에서 얻은 하중-변위거동의 결과들로서, 그림에서 보는 바와 같이 곡선 (b), (c)의 108ppm-H재와 270ppm-H재의 경우는 거의 같은 최대하중과 변위를 보이고 있으나, 시험재의 수소농도가 증가함에 따라 최대하중과 변위는 점점 감소하고 있어 수소농도 증가에 따른 낮은 파괴강도의 특성을 관찰할 수 있다. 또한 곡선(a)의 17ppm-H과 곡선(e)의 1128ppm-H의 경우를 비교해 보면 P_{max} 이후의 파괴거동은 연성적 파괴거동에서 연취성적 파괴거동으로 천이되었음을 알 수 있다. Fig. 5는 수소취화재의 저온에서의 파괴강도 특성을 알아보기 위해 Fig. 4의 동일한 수소농도의 시험편을 대상으로 액체질소의 온도인 -196°C 에 시험한 하중-변위선도의 결과들이다. 먼저 수소농도가 가장 낮은 17ppm-H의 곡선 (a)의 경우, P_{max} 와 변위(δ)가 각각 1.75kN과 1.12mm값을 보여 여러 시험재중 가장 큰 최대하중과 변위를, 이에 반해 수소농도가 가장 높은 곡선(e)의 1128ppm-H의 경우를 보면, P_{max} 와 δ 가 각각 0.83kN과 0.62mm값을 보여 매우 낮은 최대하중과 변위를 보이고 있다. 전체적으로 볼때 수소농도가 증가함에 따라 Zr-2.5%Nb의 압력관 재료는 낮은 최대하중과 변위를 보이고 있음을 뚜렷히 관찰할 수 있다. 한편, 이러한 저온하에서의 파괴거동을 Fig. 4의 상온의 경우와 비교해 볼때 매우 큰 차이가 있음을 관찰할 수 있는데, 우선 곡선(a)의 17ppm-H의 경우, 변위에서는 큰 차이를 보이고 있지 않지만 P_{max} 의 거동은 상온의 경우는 약 1.31kN을, 저온 -196°C 의 경우는 약 1.75kN을 보여, 저온에서 보다 높은 P_{max} 을 보이고 있다. 이같은 현상은 낮은 수소농도에서는 Zr-2.5%Nb 재료의 우수한 인성에 의해 높은 파괴강도를 보이는 것으로 사료된다. 그러나 수소농도가 108ppm-H이상의 경우에는 상온의 하중-변위거동보다 모두 낮은 파괴강도 및 변위를 보이고 있어 수소취화에 의한 파괴거동의 변화를 명확히 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 4와 Fig. 5의 상온과 -196°C 의 여러 하중-변위거동으

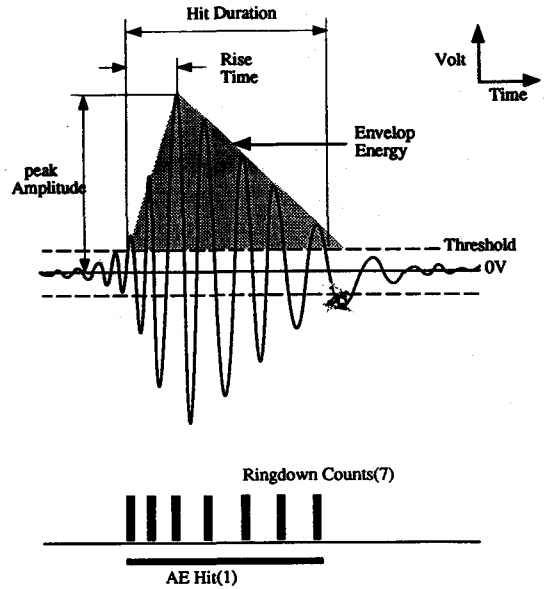


Fig. 4. The waveform of AE signal.

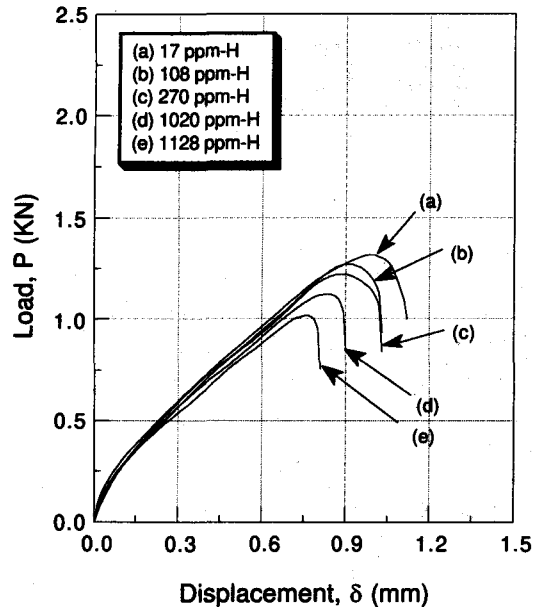


Fig. 5. The behaviors of load vs displacement with various hydrogen concentration for Zr-2.5% Nb pressure tube at room temperature.

로부터 얻은 SP-파괴에너지(E_{SP})의 거동을 시험재의 수소농도 따라 정리한 결과이다. 이때 E_{SP} 는 하중-변위곡선의 아래 면적으로부터 산출한 값이다.

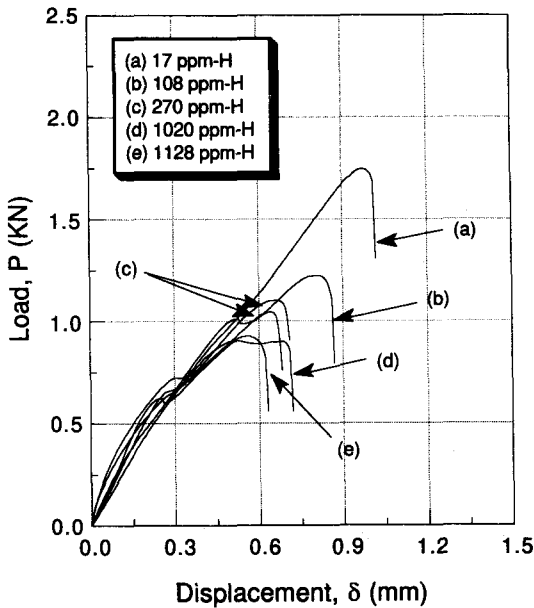


Fig. 6. The behaviors of load vs displacement with various hydrogen concentration for Zr-2.5% Nb pressure tube at -196°C.

그림에서 상온 및 -196°C의 경우 모두 수소농도의 증가에 따른 E_{SP} 의 감소를 보이고 있으나, 그 정도는 시험온도와 수소흡입 농도에 따라 크게 차이를 관찰할 수 있다. 먼저 상온의 경우를 보면, 300ppm-H까지의 수소농도에서 E_{SP} 의 변화가 크지 않으나, 1000ppm-H이상의 농도에서는 약간 낮은 E_{SP} 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, -196°C의 저온환경에서는 300ppm-H까지의 수소농도에서는 E_{SP} 의 변화가 매우 크고, 그 이상의 수소농도에서는 거의 같은 낮은 파괴에너지 거동을 관찰할 수 있다. 따라서 이상의 시험결과들로부터 수소취화정도에 따른 Zr-2.5%Nb 압력관 재료의 파괴강도 평가에서 미소시험편에 의한 SP시험법의 적용 가능성을 확인할 수 있으며, 상온의 경우보다 액체질소의 온도인 -196°C의 저온환경하에서의 평가가 더욱 우수함을 알 수 있다. 이같은 결과는 재료내에 존재하는 분자상태의 수소는 동일 수소농도에서 열팽창계

수가 상온보다 낮은 -196°C에서 보다 큰 수소압력 상태를 유지하기 때문에 수소취화에 따른 파괴특성 평가가 뚜렷히 나타나는 것으로 사료된다. 또한 이같은 시험결과를 Zr-합금의 압력관 재료에 대한 종래 시험결과¹⁰⁾ 즉, 인장시험편의 경우, 20~400ppm 수소농도에 따른 상온에서의 단면수축률(reduction of area)이 약 45~48% 정도로 거의 유사한 기계적 성질을 보이는 시험결과와 비교해 보면, 미소시험편을 이용하는 SP시험법이 수소농도에 따른 파괴강도 평가에 있어 종래의 시험방법에 비해 보다 우수한 시험방법임을 알 수 있다. 그리고 CANDU 압력관 재료에서 수소취화에 의해 파괴인성의 저하와 수화물 지체균열(delayed hydride cracking) 거동에 영향을 미치는 수소농도의 범위가 약 300ppm-H의 이하 범위라는 점을 고려해 볼때, 저온 SP시험은 새로운 수소취화재의 파괴강도 평가방법으로 그 적용 가능성이 매우 높음을 확인할 수 있다. 이와 같이 SP시험방법에 의해 보다 정확하게 수소취화거동에 따른 파괴강도를 평가할 수 있는 것은 미소시험편의 상부에서 강구에 의해 시험편에 작용하는 응력상태가

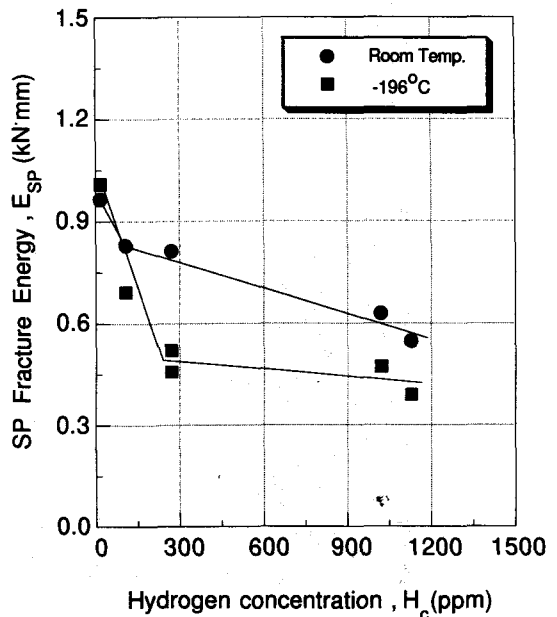
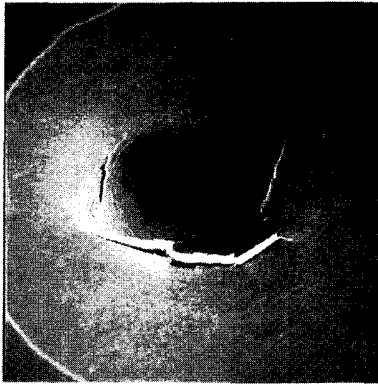
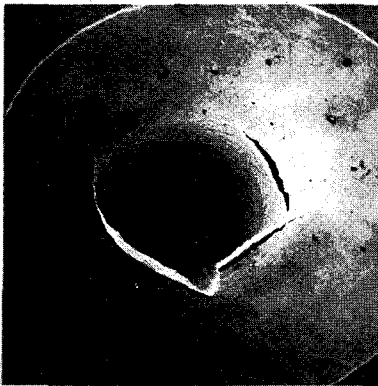


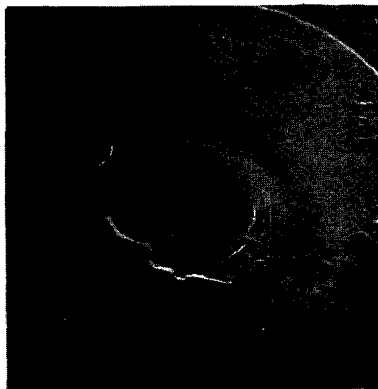
Fig. 7. The behaviors of SP-fracture energy with various hydrogen concentration for Zr-2.5% Nb pressure tube at room temperature and -196°C.



(a) 17 ppm-H



(b) 270 ppm-H

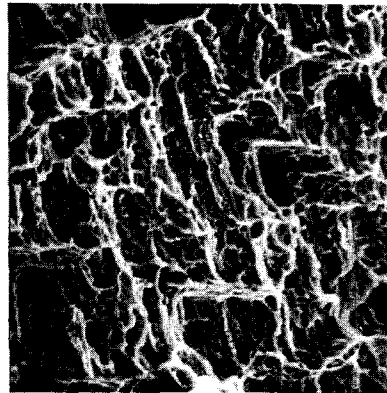
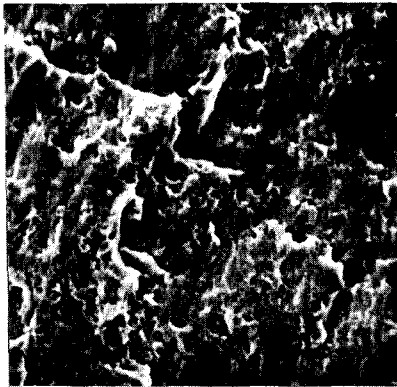


(c) 1128 ppm-H

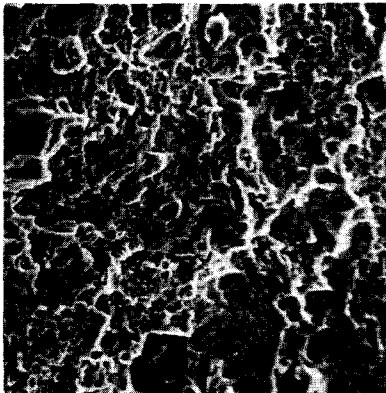
(a) Room Temp.

(b) -196°C

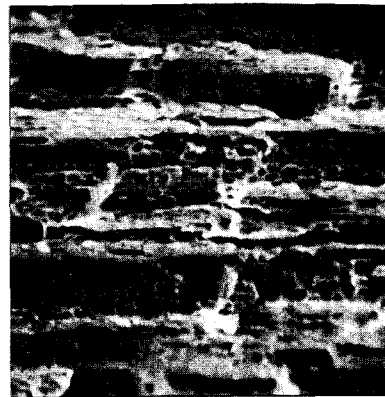
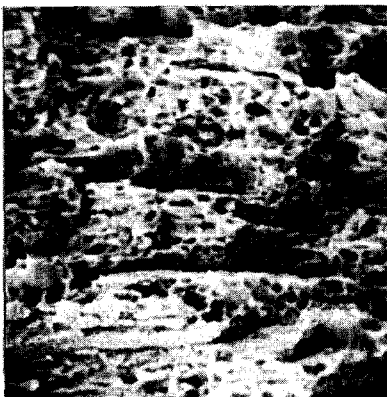
Fig. 8. SEM macrofractographs with several hydrogen concentration at room temperature and -196°C.



(a) 17 ppm-H



(b) 270 ppm-H



10 μ m

(c) 1128 ppm-H

(a) Room Temp.

(b) -196°C

Fig. 9. SEM microfractographs with several hydrogen concentration at room temperature and -196°C.

막응력(membrane stress)상태이기 때문이라고 사료되며, 이같은 고찰은 종래 인장시험편을 이용하여 시험편에 가하는 응력상태가 일축응력상태에서 이축응력상태로 갈수록 수소흡입 농도에 따른 시험편의 파괴변형률(fracture strain: ϵ_f)의 저하정도가 증가하여 수소취화거동을 보다 정확하게 평가할수 있다¹⁰⁾는 사실과 관련하여 생각할 수 있다.

3.2. 거시적, 미시적 파면 관찰

Fig. 7, 8 및 9는 상온 및 -196℃에서 시험한 여러 시험재중 수소농도가 17, 270 그리고 1128ppm-H의 시험재를 대상으로 전자현미경에 의해 관찰한 거시적, 미시적 파면관찰이다. 먼저 거시적 파면사진을 보면, 상온의 경우는 17과 270ppm-H의 경우는 큰 소성유동정도와 반구정점에서 멀리 떨어진 부위에서 원주방향으로 주 균열이 형성되어 연성적 파괴거동을 관찰 할 수 있다. 이에 반해 수소농도가 큰 1128ppm-H의 시험재는 17과 270ppm-H의 경우보다 적은 소성유동과 불연속적인 균열의 형성을 관찰할 수 있어 수소취화에 따른 시험재의 파괴거동을 관찰할 수 있다. 한편, -196℃의 경우는 모두 상온의 경우보다 소성유동정도가 적음을 관찰할 수 있으며, 특히 Fig. 5의 하중-변위거동중에서 낮은 파괴율 보인 270과 1128ppm-H의 시험재의 경우는 반구정점 부위에서 주균열이 전파, 파괴되었음을 관찰할 수 있어 뚜렷한 취성적 파괴거동을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 8에서 이들 시험재의 미시파면 결과를 살펴보면, 상온의 경우 수소농도가 증가할수록 dimple의 크기가 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있으며, 특히 수소농도가 높은 1128ppm-H의 시험재의 경우는 파면상에 많은 미소 void를 관찰할 수 있는데 이러한 미소 void는 수소화물(hydride)의 파괴에 기인한 결과로 사료된다. 그리고 -196℃의 경우를 보면, 17ppm-H의 낮은 수소농도에서는 뚜렷한 연성적 미시파면을 관찰할 수 있는 반면, 270ppm-H와 1128ppm-H의 경우는 뚜렷한 취성적 파면을 관찰할 수 있어 수소취화에 의한 취성파괴를 확인할 수 있다. 그리고 17과 270ppm-H의 경우에는 관찰되지 않은 미소 void가 1128ppm-H의 경우는 파면상에 많이 형성되어 있음을 관찰할 수 있으며, 이같은 미소 void의 형성은 Fig. 9의 거시적인

두께방향으로의 시험편 파면관찰에서 보다 명확히 확인할 수 있다. 따라서 이상의 거시적, 미시적 SEM 관찰 결과들로부터도 미소시험편을 이용하는 SP시험법은 수소취화 정도에 따른 압력관 재료의 파괴강도 평가에 적용 가능한 시험방법임을 알 수 있다.

3.3. 미시 파괴과정에 따른 AE 신호 특성

Fig. 10과 Fig. 11은 상온과 -196℃에서 수소농도가 각기 다른 시험재의 미시 파괴과정중 일정시간(2200msec)동안 검출된 AE신호의 평균에너지의 거동을 하중-변위선도와 함께 나타낸 결과이다. 먼저 상온의 경우를 살펴보면, 17ppm-H의 시험재의 경우는 변형초기($\delta \approx 0.15\text{mm}$)에 약 10J의 AE 에너지분포를 보이고 파괴점까지 낮은 AE 에너지거동을 보이고 있다. 이에 반해 270ppm-H의 경우는 변형 초반부($\delta \approx 0.03\text{mm}$)에서는 약 20J, 그리고 변형 중반부($\delta \approx 0.45\text{mm}$)에서는 약 90J의 peak거동을 보여, 17ppm-H의 경우보다 높은 AE 에너지 거동을 관찰할 수 있다. 그리고 그림(c)의 수소농도 1128ppm-H의 경우, AE 에너지 peak 거동은 변형 초반부($\delta \approx 0.12\text{mm}$)와 P_{max} 부근($\delta \approx 0.68\text{mm}$)에서 각각 약 150J과 200J의 값을 보이고 있어 수소농도의 증가에 따라 재료의 파괴과정에서 발생하는 AE신호의 에너지 peak값이 크게 증가함을 알 수 있다. 한편, -196℃에서 동일시험재를 대상으로 얻은 AE 평균에너지 분포를 보면, 저온 하에서도 뚜렷한 연성적 파괴거동을 보인 17ppm-H의 경우 시험초반부($\delta \approx 0.05\text{mm}$)에서 약 20J 그리고 P_{max} 부근에서 약 150J의 높은 AE 에너지값을 보여, P_{max} 부근 이전까지는 Fig. 10의 상온의 경우와 유사한 낮은 AE 에너지분포를 관찰할 수 있다. 그러나 취성적 파괴거동을 보인 270ppm-H와 1128ppm-H의 경우는 P_{max} 부근에서 각각 약 300J과 700J의 값을 보여 수소취화정도가 증가함에 따라 상이한 AE 에너지 peak값을 명확하게 확인할 수 있다. 특히 주목할 만한 내용은 가장 낮은 SP-파괴에너지를 보인 1128ppm-H의 경우 AE신호분포중 가장 높은 AE 에너지 peak거동을 나타내고 있다는 사실이다. 이같은 사실은 수소농도에 따른 누적 평균에너지의 분포거동을 나타낸 Fig. 12에서도 확인할 수 있다. 그림에서 수소농도가 증가함에 따라 시험동안 발생된

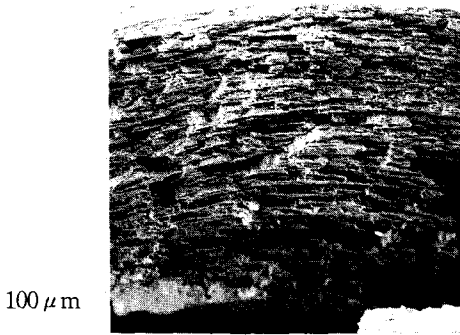


Fig. 10. SEM microfractograph through thickness of 1128 ppm-H specimen at -196°C.

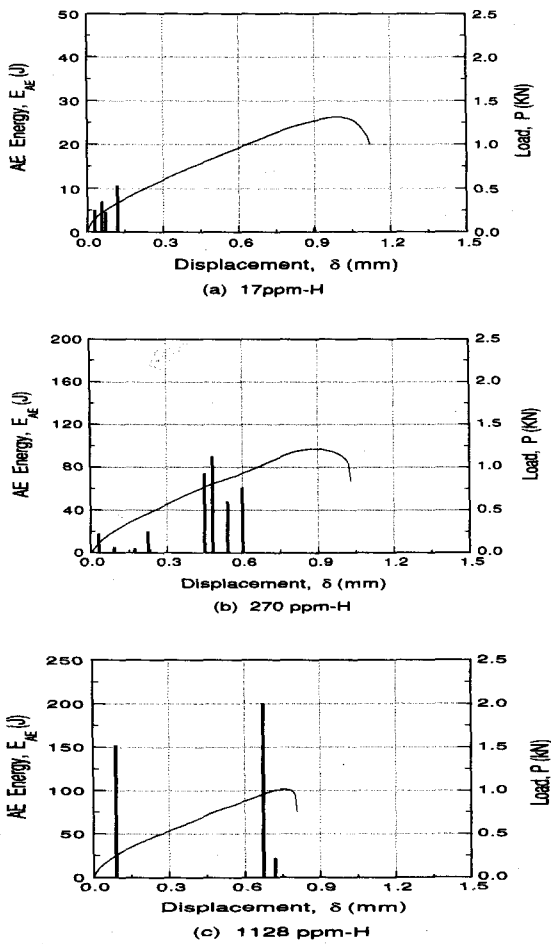


Fig. 11. AE energy distribution with several hydrogen concentration at room temperature.

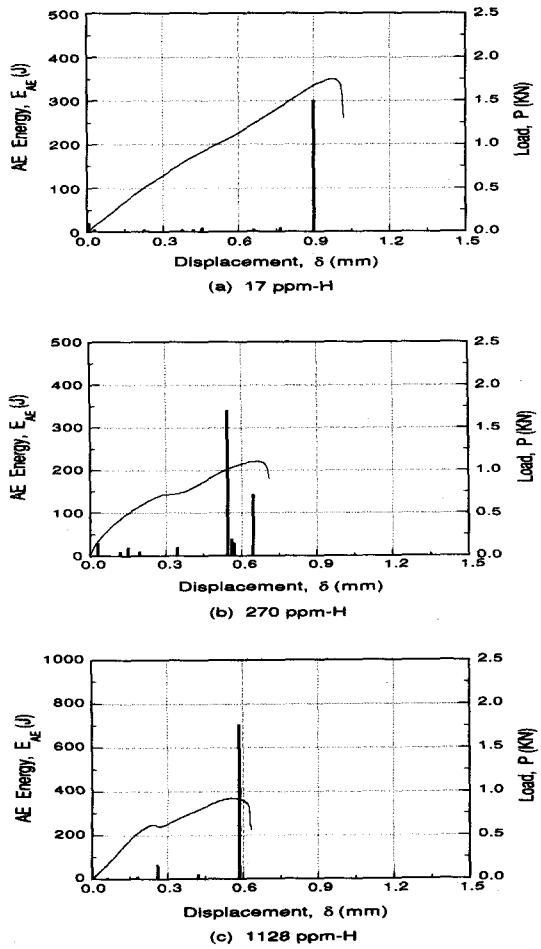


Fig. 12. AE energy distribution with several hydrogen concentration at -196°C.

AE신호의 누적 평균에너지가 증가함을 알 수 있으며, 특히 상온의 경우보다는 -196°C의 경우가 높은 누적 평균에너지의 분포거동을 보여, 취성파괴에 따른 높은 AE신호를 관찰할 수 있다. Fig. 13은 단위 등가파괴변형률(equivalent fracture strain : ϵ_{qt})당 누적평균에너지의 분포를 나타낸 결과로써 상온의 경우보다는 -196°C의 경우가 수소흡입농도에 따른 평균에너지 값의 차가 더욱 큼을 확인할 수 있어, 미소 시험편에 의한 수소취화정도를 평가하는데에는 상온 보다는 저온의 환경인 -196°C의 경우가 보다 정확하게 평가 가능함을 알 수 있다. 특히 300ppm-H의 농도 이하에서의 압력관 재료의 미시 파괴과정에 따른

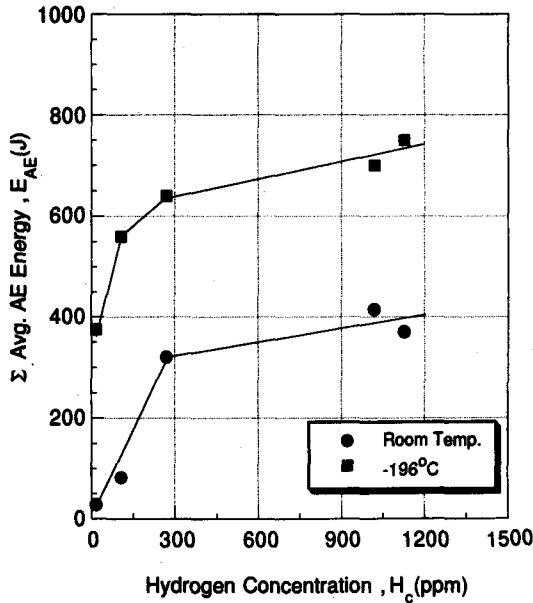


Fig. 13. Relationship between hydrogen concentration and Σ Avg. AE energy at room temperature and -196°C .

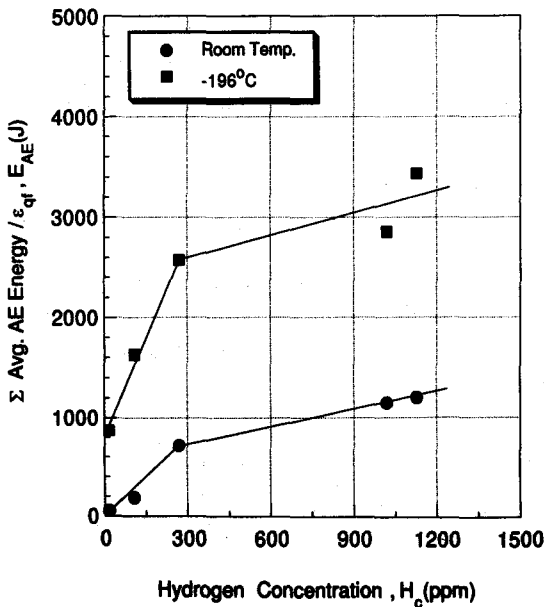


Fig. 14. Relationship between hydrogen concentration and Σ Avg. AE energy per equivalent fracture strain at room temperature and -196°C .

누적 AE 평균 에너지 값의 분포차가 큼을 알 수 있어, AE시험 또한 수소취화 정도에 따른 압력관 재료의 미시파괴거동 평가에 사용가능함을 알 수 있다.

따라서 이상의 시험결과 즉, 하중-변위거동, E_{SP} 거동, 거시적, 미시적 SEM관찰 그리고 AE 평균에너지 거동과 단위 등가파괴변형률당 누적 평균에너지 분포 등의 결과로부터 미소시험편을 이용한 SP 시험법은 수소농도에 따른 재료의 파괴강도 평가에 적용 가능한 시험방법으로 그 유용성이 크게 기대된다.

4. 결론

수소취화에 따른 Zr-2.5%Nb 압력관 재료의 새로운 파괴강도 평가법으로서 SP시험의 적용 가능성을 조사하기 위해 수행된 SP 시험과 AE 시험결과는 다음과 같다.

- 1) 시험재의 수소농도가 증가함에 따라 상온 및 -196°C 에서 P- δ 의 거동은 점점 감소하여 수소농도 증가에 따른 낮은 기계적 성질을 관찰할 수 있으며, 상온의 경우보다 -196°C 의 경우가 P- δ 의 저하정도가 더 큼을 알 수 있었다.
- 2) 300ppm-H이하의 수소농도에서, 수소농도에 따른 E_{SP} 의 저하가 상온보다 -196°C 의 경우가 뚜렷하여, 수소취화 정도에 따른 Zr-2.5%Nb 압력관 재료의 파괴강도 평가는 상온 보다 -196°C 의 저온 환경하에서의 평가가 더욱 우수함을 알 수 있었다.
- 3) -196°C 의 경우 시험편은 모두 상온의 경우보다 소성유동 정도가 적음을 관찰할 수 있으며, 수소농도 270ppm-H 이상의 시험재의 경우는 반구정점 부위에서 주균열이 전파, 파괴되었음을 관찰할 수 있어 뚜렷한 취성적 파괴거동을 확인할 수 있었다.
- 4) 수소농도의 증가에 따라 재료의 미시파괴정에서 발생하는 AE신호의 평균 에너지 peak와 누적 평균 에너지값 그리고 단위 등가파괴변형률(equivalent fracture strain: ϵ_{qf})당 누적 평균에너지(Σ Avg. AE Energy/ ϵ_{qf})의 값이 크게 증가하여 취성 파괴에 따른 높은 AE신호를 관찰할 수 있었다.

5) 이상의 시험결과들 즉, 하중-변위거동, E_{SP} 거동, 거시적, 미시적 SEM관찰 그리고 AE 평균에너지 거동과 단위 등가파괴변형률당 누적 평균에너지 분포 등의 결과로부터 미소시험편을 이용한 SP 시험법은 수소농도에 따른 CANDU 압력관 재료의 새로운 파괴강도 평가법으로 유용성이 크게 기대된다.

참고 문헌

1. CAN3-N285. 4-M91, "Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plant Components", (1991).
2. B. G. Parfenov, V. V. Gerasimov and G. I. Venecliktova, "Corrosion of Zirconium and Zirconium Alloys", Translated from Russian, Israel Program for Scientific Translations, (1969).
3. A. R. Causey, A. G. Norsworthy, et al, "Factors Affecting Creep Sag of Fuel Channels in CANDU-PHW Reactors", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 24, No 3, (1985), pp. 207~214.
4. CANDU Nuclear Power System, TDSI-105. AECL, (1981)
5. M. P. Puls, "Hydrogen-induced Delayed Cracking : I. Strain Energy Effects on Hydrogen Solubility", Report AECL-6302, (1975).
6. Hiroshi Kawanishi, Shiort Ishino and Yoshitsugu Mishima, "Directionality of the Grain boundary hydride in Zircaloy-2", Zirconium in Nuclear Application, ASTM STP 551, (1973), pp. 201~211.
7. C. G. Coleman and J. F. R. Ambler, "Susceptibility of Zirconium Alloys to Delayed Hydride Cracking", Proc. of 3rd Int. Conf. on Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 633, (1977). pp. 608~629.
8. L. A. Simpson and M. P. Puls, "The Effects of Stress, Temperature and Hydrogen Content on Hydride-induced Crack Growth in Zr-2.5% Nb", Metallurgical Transactions, 10A, (1979), pp. 1093~1105.
9. Fan Yunchang and D. A. Koss, "The Influence of Multiaxial States of Stress on the Hydrogen Embrittlement of Zirconium Alloy Sheet", Metallurgical Transactions, Vol. 16A, (1985), pp. 675~681.
10. JAERI-memo(62-193), "小型パンチ(SP) 試験法(案)", 日本原子力研究所, (1987), pp. 1~135.
11. T. Misawa, K. Suzuki, M. Saito, and Y. Hamaguchi, "Determination of the Minimum Quantity of Irradiated Ferritic Steel Specimens for Small Punch DBTT Testing", Journal of Nuclear Materials, (1989), pp. 421~424.
12. C. H. Caceres, and A. H. Rodriguez, "Acoustic Emission and Deformation Bands in Al-2.5%Mg and Cu-30%Zn". Acta metall., Vol. 35, No. 12, (1987), pp. 2851~2864.
13. B. Raj, B. B. Jha, and P. Rodriguez, "Frequency Spectrum Analysis of Acoustic Emission Signal Obtained during Tensile Deformation and Fracture of an AISI 316 Type Stainless Steel." Acta Metall., Vol. 37, No. 8, (1989), pp. 2211~2215.

A Study on the Small Punch Test for Fracture Strength Evaluation of CANDU Pressure Tube Embrittled by Hydrogen

Seung-Hwan Nho*, Jang-Woo Ong**, Hyo-Sun Yu***, Se-Hi Chung***

* Korea Institute of Nuclear Safety

** Chung Nam National University

*** Jeon Buk National University

Abstract The purpose of this study is to investigate the usefulness of small punch(SP) test using miniaturized specimens as a method for fracture strength evaluation of CANDU pressure tube embrittled by hydrogen. According to the test results, the fracture strength evaluation as a function of hydrogen concentration at -196°C was much better than that at room temperature, as the difference of SP fracture energy(E_{SP}) with hydrogen concentration was more significant at -196°C than at room temperature for the hydrogen concentration up to 300ppm-H. It was also observed that the peak of average AE energy, the cumulative average AE energy and the cumulative average AE energy per equivalent fracture strain increased with the increase of hydrogen concentration. From the results of load-displacement behaviors, E_{SP} behaviors, macro- and micro-SEM fractographs and AE test, it has been concluded that the SP test method using miniaturized specimen(10mm \times 10mm \times 0.5mm) will be a useful test method to evaluate the fracture strength for CANDU pressure tube embrittled by hydrogen.

(Received : August 8, 1995)