2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

직류전위차법을 이용한 저합금강의 동하중 파괴시험

Dynamic Fracture Testing of Ferritic Steels using Direct Current Potential Drop Method

오영진, 김지현, 황일순
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1

박윤원
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약 문

원전배관에 대한 파단전누설(Leak-Before-Break, LBB) **설계 개념의 적용을 위해서는, 저합금 강재에 대한 동적변형시효**(Dynamic Strain Aging, DSA)**의 효과가 충분히 고려되어야 한다. 이를 위해서는 다양한 온도와 하중 속도 조건에서의** J-R **파괴시험이 필요하며, 여기에는 동적 하중속도 조건도 포함되어야 한다. 동하중** J-R **파괴시험을 수행하기 위해서는 기존 탄성해중법**(Unloading compliance method)**은 적용될 수 없으며, 따라서, 직류전위차법이 널리 사용되고 있다. 그러나 직류전위차법**(Direct Current Potential Drop method, DCPD)**도 강자성 재료를 동하중 하에서 시험할 경우에는, 하중 시작점 근처에서 매우 큰 전압강하**(Potential peak)**를 발생한다는 문제를 갖고 있다. 본 연구에서는,** SA106Gr.C **원전 배관재에서 발생하는 전압강하의 특성을 조사하였으며, 직류전위차법을 이용해 신뢰성 있는 파괴저항 특성을 얻기 위한 방법으로, 파면 관찰을 통해 결정된 최종 균열 길이를 이용한 역추적 방법을 제안하였다.**

Abstract

To apply leak-before-break(LBB) concept to nuclear pipes, the dynamic strain aging of low carbon steel materials has to be considered. For this goal, the J-R tests are needed over a range of temperatures and loading rates, including rapid dynamic loading conditions. In dynamic J-R tests, the unloading compliance method can not be applied and usually the direct current potential drop (DCPD) method has been used. But, even the DCPD method was known to have the problem in defining the crack initiation point due to a potential peak arising in early part of loading of ferromagnetic materials. In this study, potential peaks characteristics were investigated for SA106Gr.C piping steels, and the definition of crack initiation point was made by back tracking from final physical crack length, and it was proposed that this technique could be applied to DCPD method in dynamic loading J-R test.

1. 개 요

기존의 원자력 발전소 고에너지 배관부는 배관이 극한 하중시 순간적으로 양단파단 (DEGB; Double Ended Guillotine Break) 될 수 있다는 가정을 하였으며, 이로 인한 동적영향의 배제를 위해 유체방출방호벽 (jet shield) 과 배관파단구속장치 (pipe whip restraint) 같은 구조물들을 설치하였다. 이러한 구조물에 의한 막대한 설치비용은 물론 발전소의 운전중검사 (ISI)나 유지보수시 배관접근을 어렵게 함으로 인하여 검、보수요원들의 방사선 피폭 증가 원인이 되었다[1]. 이에, 배관의 균열이 임계치에 도달하기 전에 균열을 발견하여 배관양단파단을 막을 수 있다는 파단전누설(LBB, Leak-Before-Break) 설계개념이 제시되었다. 배관설계에 파단전누설 개념을 적용하기 위해서는 측정가능한 정도의 유체 유출을 가진 가상 관통균열이 최대하중 조건에서도 충분한 여유도를 가지고 안전하다는 것을 파괴역학적으로 입증해야 한다.[2] 재료의 인장 및 파괴에 대한 물성치는 해석 결과에 큰 영향을 미치므로 물성치를 얻기 위한 시험조건과 사용시의 제한이 제시되어 있다.[2] 동적변형시효(Dynamic Strain Aging, DSA)에 민감한 재료는 온도와 하중속도 조건에 따라 인장물성치와 파괴 특성이 달라지는 것으로 알려져 있다.[2-3] 따라서, 인장물성치와 파괴특성은 운전온도하에서 다양한 하중속도로 측정될 필요가 있으며, Korean Standard Review Plan 3.6.3과 3.6.3-1에서는 탄소강 재료에 있어서는 동적변형시효를 충분히 고려할 것을 권고하고 있다.[4]

현재 J-R 시험에 대한 표준은 1)다중시편법(multi-specimen method)[5] 2)탄성해중법(unloading compliance method)[6] 3)직류전위차법(direct current electric potential drop method)[7]의 세 가지의 균열 길이 측정 방법을 포함하고 있다. 이들 중 다중시편법은 한개의 J-R 곡선을 얻기 위해 많은 개수의 시편이 필요하여, 그 효율성이 매우 떨어지며, 탄성해중법은 한개의 시편으로 시험이 가능하지만, 하중의 연속성이 없어서, 동하중 시험에는 근본적으로 적용이 불가능하다. 반면에 직류전위차법은 한개의 시편으로 시험할 수 있으며, 또한 연속적인 하중조건이 적용 가능하기 때문에 동하중 파괴시험에 널리 사용되어 왔다. 그러나 이 같은 직류전위차법도, 강자성 재료의 동하중 시험에 적용될 경우, 하중 시작 영역에 전위펄스가 발생하는 문제가 있는 것으로 보고되었으며[8-10], 이는 균열 첨단에서의 빠른 소성 변형으로 인한 magnetic domain들의 빠른 재배열이 그 원인이라고 추측되어져 왔다.[8]

이 같은 문제에도 불구하고, 동하중 J-R 시험은 계속 직류전위차법으로 수행되

어 오고 있으며, 이는 대체할 만한 적절한 균열길이 결정법이 없기 때문이다. 본 논문에서는, 다양한 하중속도와 입력전류량 조건에서 직류전위차법을 이용한 파괴저항 시험을 수행하여 potential peak의 특성을 조사하였으며, 다중시편법과 비교하여, 신뢰성 있는 J-R 곡선을 얻기 위한 방법을 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 직류전위차법

직류전위차법에 의한 균열길이의 결정은, 균열의 진전에 따른 잔존 리가먼트의 감소로 시편의 전기 저항이 증가한다는 기본 원리에 따른 것이다. 이를 이용한 균열길이의 calibration은 Johnson에 의해 제안되었다.[8] 이 후, 많은 연구자들에 의해 연구되었으며[9-11], 최근 ASTM E1737-96에 의해 표준화 되었다.[7] ASTM E1737-96 Annexes 5 에서는 입력과 출력 단자의 위치를 그림1 과 같이 결정하였으며, 전위차와 균열길이에 대한 관계식은 아래와 같은 Johnson식을 권고하였다.

$$\frac{a}{W} = \frac{2}{\pi}\cos^{-1}\left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cosh\left[\left(\frac{U}{U_0}\right)\cosh^{-1}\left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_0}{2W}\right)}\right]\right]}\right]$$

여기서, U는 측정된 전위차, U_0는 처음 전위차, a는 균열길이, a_0는 처음균열길이, W는 시편 폭, 그리고 y는 전위차 출력선 간격이다. 균열길이의 측정을 위해서는, 그림2와 같이, 측정된 전위차를 균열개구변위(Crack Opening Displacement, COD)에 대해 나타낸 후, 선형영역을 fitting하여 5% 옵셋 선과 만나는 점을 균열시작점으로 보고 그 지점에서 U_0를 결정하게 된다. 즉 U_0는 calibration의 시작점이 되며, 이의 결정은 J-R 곡선의 결정에 중요한 영향을 미치게 된다. 전위차 출력선 간격은 파괴시험이 진행되는 동안 시편 자체의 변형에 의해, 균열개구변위의 증가에 비례하여 증가하게 된다. Landow 등은 출력선 간격 y를 시편의 변형 량에 맞추어 변화시켜 주었을 때 균열길이를 더욱 정확히 측정할 수 있음을 보고한 바 있다.[12]

이 같은 직류전위차법을 페라이트 강의 동하중 시험에 적용했을 경우의 실험적 측정치의 예를 그림3에 나타내었다. 가장 중요한 문제는 측정된 직류전위차 신호에 전위 pulse가 실리는 것인데, 이는 균열시작점 U_B를 결정하는 것을 어렵게 한다. 이는 하중이 인가되기 시작할 때 magnetic domain들이 빠른 속도로 재배열하

면서 형성되는 전자기적 신호의 결과라고 추측되어 왔다.[12] LBB 적용성 연구의 일환으로 수행된, 배관재의 동적변형시효에 대한 많은 연구에서 이 같은 전위 펄스가 관찰되었으며, 그림4,5는 그 예를 보여주고 있다.[13-14] 또한, 전위차 출력선 위치에 따른 전위차 펄스의 형태의 변화에 대한 연구도 최근 수행된 바 있다.[15]

2.2. 하중비법 (Load-Ratio Method)

현재 J-R 시험에 대한 ASTM 표준인 탄성 해중법 및 직류전위차법 이외에도, 하중-하중선 변위 곡선만으로 균열길이를 측정하는 방법에 대한 연구가 진행중이다. 이 같은 형태의 측정 방법은 key-curve method라는 이름으로 Ernst 등에 의해 처음 제안되었으며, Joyce등에 의해 사용되었다.[16-17] 그 후, Herrera등에 의해 normalization method가, Hu와 Joyce 등에 의해 하중비법(load-ratio method)이 제안되기에 이른다.[18] 하중비법은 최근 Chen과 Joyce[19]등에 의해 개량되었으며, 이봉상[20] 등에 의해 보다 간소화된 절차가 제안되었다.

하중비법은 실제 균열이 성장한 경우의 하중-하중선 변위 곡선을 균열이 전혀 성장하지 않았다는 가정하에 결정되는 하중-하중선 변위 곡선을 비교함으로써 균열길이를 예측하는 방법이다. 그림6의 OA 변형과정은 OA'의 과정과 A'A의 과정을 합한 변형과 동일하다. A'A의 변형과정에서는 탄성 해중이 일어난다는 뜻이고 이는 A'A의 변형 과정 전후의 소성 변형량이 동일함을 의미한다. 따라서, A'A의 변형 전후의 탄성 해중선은 각각 A'D와 AD가 된다. C_1은 시험편의 초기 compliance와 동일하므로 변위 곡선상의 임의의 점 A에서 compliance C_2는 OA'으로 표현되는 기준 곡선과의 하중비에 의해 결정될 수 있다. 여기에서 중요한 점은 그림6상의 OA'으로 표현되는 기준 곡선을 결정하는 방법인데, 여기에 대해서는 몇몇 연구자들에 의해 연구된 바 있다.[18-20]

3. 실험 방법

직류전위차 potential peak의 특성을 파악하기 위해, 상온에서 다양한 입력전류량과 하중 속도 조건에서 J-R 시험을 수행하였다. 탄소강의 동하중 파괴 특성에 대한 가장 신뢰성 있는 결과를 얻기 위하여 다중시편법을 이용하여 J-R 특성을 측정하였으며, 모든 시편에 대해 직류전위차를 동시에 측정하여 해석을 수행하였다. 측정된 하중-하중선변위 값을 이용하여, 하중비법을 적용하여 J-R 곡선을 계산하였으며, 이를 직류전위차법과 다중시편법의 결과와 비교하였다.

3.1. 직류전위차법

시험에 사용된 재료는 울진 원자력 발전소 3,4호기의 주증기 배관에 사용하고 남은 보관재료인 SA106Gr.C 저합금 탄소강의 모재부로 재료의 화학적 조성은 (표1)과 같다. 시험편은 모두 L-C 방향으로 채취되었으며, 그림7과 같이 두께 1 inch의 표준 CT 시험편으로 가공하였다. 그림8과 같이 전류 입력단자와 전위차 출력 단자를 설치하였으며, 각각 볼트체결과 저항용접을 통해 부착하였다. 균열개구변위(COD)를 측정하기 위해 장착된 게이지를 전류가 흐르고 있는 CT시편과 절연시키기 위해 알루미나 나이프 에지를 시편 전면에 부착하였다.

시편은 가공 후, 시작 균열길이가 0.55W가 되도록 피로 예비균열을 진전시켰으며, 이때 delta-K를 15 MPa*$m^{0.5}$ 로 유지 하였고 하중비는 0.1로 하였다. 피로예비균열 진전 후 시편 측면에는 45°의 각도의 측면홈(side-groove)을 한 면 당 10%씩 양 쪽 20% 깊이로 가공하였다.

파괴시험에는 25톤 용량의 유압식 시험기가 사용되었으며, 시험기의 pull rod에는 전류가 흐르는 시편으로 부터 시험기를 완전히 절연하기 위한 장치를 장착하였으며, 비상시를 위한 접지를 따로 설치하였다. 그림9에서 나타낸 바와 같이, 균열개구변위, 하중, 등은 시험기의 주제어기를 거쳐 고속 데이타수집기에 들어오며, 직류전위차 신호는 증폭기를 거쳐 수집기에 들어오게 된다. 수집된 데이타는 빠른 속도로 PC에 저장 되게 하였다. 그림10에 시험에 사용된 유압시험기와 균열길이의 관찰을 위한 Traveling microscope, 그리고 고속 자료수집 장치의 모습을 나타내었다.

3.2. 하중비법(Load-ratio method)

본 연구에서 사용된 하중비 법은 이봉상 등에 의해 제안된 방법을 이용하였다.[20] 이는 한계하중 P_0를 통해 얻어진 정규 하중(normalized load)에 대한 실험적 관찰에 근거를 두고 있으며, 이를 그림11에 나타내었다.[20] 한계하중 P_0는 아래와 같이 표현되며,

$$P_0 = 1.455\, \sigma_{ys}\, B\, \beta b$$

여기서, $\beta = \sqrt{4\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 4\left(\frac{a}{b}\right) + 2} - \left(\frac{2a}{b} + 1\right)$, σ_{ys} = 항복응력 a = 균열길이, b = 잔존리가먼트, B = 시편두께를 나타낸다. 하중비법에 필요한 기준 곡선은 그림12와 같이 결정되며, 균열둔화에 의한 균열길이의 증가는 균열첨단개구변위(Crack Tip Opening Displacement, CTOD)의 반으로 가정한다. 여기서 CTOD는 아래와

같이 결정되며

$$CTOD = \frac{(1+\beta)}{\left(\frac{2W}{b} + \beta - 1\right)} \cdot \Delta_p$$

여기서, Δ_P 는 $\Delta_L - C_0 \cdot P$를 내며, Δ_L은 하중선 변위, C_0는 초기 컴플라이언스, P는 하중을 나타내며, 나머지는 앞서 내린 정의를 그대로 사용하였다.[20]

4. 결과 및 토의

4.1 준정적 하중속도 시험

시험장비와 해석 전반의 신뢰성 확보를 위하여, 준정적 하중 조건에서 파괴시험을 수행하였다. 시험은 탄성해중법의 절차를 따랐으며, 직류전위차를 동시에 측정하는 방법을 사용하였다. 직류전위차법에 의한 균열 시작점의 결정에 있어, ASTM E1737-96에서 권고하고 있는 5% 옵셋은 SA106Gr.C 탄소강에서는 그림 13에서 보여진 것과 같이 적절치 못함을 확인하였으며, 본 실험에서는 선형 영역을 벗어난다고 판단되는 위치를 결정할 수 있도록, 0.5%의 옵셋 값을 사용하였다. Johnson식에 의한 calibration은 출력단자 간격 y를 변화시키는 것과 고정시키는 두가지 방법을 사용하여 그 결과를 탄성해중법 결과와 비교하였다. 그림14(a)는 결정된 J-R 곡선을 나타내고 있으며, 그림14(b)는 직류전위차법으로 측정된 균열길이를 탄성해중법에 의해 측정된 균열길이와 비교한 결과이다.

y값을 고정시킨 경우가 변화시킨 경우에 비해 약간 낮은 값을 예측하고 있으며, 탄성해중법과 비교하여 더 큰 오차를 가짐을 확인하였다. 따라서, 동하중에 대한 본 시험에서는 Johnson식에 의한 직류전위차 calibration에 y값을 변화시키는 방법을 적용하였다.

4.2. 동적 하중속도 시험

직류전위차의 potential peak의 특성을 조사하기 위하여, 상온 조건에서 50A, 100A의 입력전류량과, 500mm/min, 1000mm/min, 2000mm/min의 하중속도로 시험을 수행하였다. 그림15(a),(b)와 같이, potential peak의 크기는 입력전류량에 무관한 것으로 보이며, 하중 속도가 증가할 수록 증가하는 경향을 나타내었다. potential peak의 회복속도는 그림16(a),(b)와 같이, 빠른 회복 속도와 느린 회복 속도를 구분하였으며, 입력전류량이 증가할 수록, 하중 속도가 느릴수록 빠른 회복속도를 보였다.

SA106Gr.C 탄소강의 동적 하중속도에 대한 신뢰성 있는 J-R 곡선을 얻기 위해서 다중시편법을 이용하여 시험하였다. 시험은 주증기배관의 운전온도인 289°C에서 1000mm/min의 하중속도하에서 각각 다른 최종 변위량을 갖는 다섯개의 시편을 이용하여 수행되었다. 이에 대한 하중-하중선 변위 곡선을 그림17에 나타내었으며, 모두 일치하는 모양을 나타내어 다중시편법의 적용이 가능함을 확인하였다. 다중시편법에 의해 얻어진 J-R 특성을 그림18에 나타내었다.

다중시편법을 위한 모든 시험에서 직류전위차를 측정하였으며, 이를 이용하여 J-R 곡선을 결정하였다. 균열시작점의 결정은 potential peak의 영향으로 선형 fitting에 의한 방법은 적용이 불가능하였으므로, 본 실험에서는 시편 최종 파단 후 파면 관찰을 통해 결정된 최종 균열길이를 통한 역추적 방법을 사용하였다. 즉, 직류전위차법에 의해 결정된 최종균열길이를 파면 관찰을 통해 결정된 균열길이와 일치하도록 시행착오(trial&error) 방법을 사용하여 균열 시작점을 결정하였으며, 이 같이 결정된 세개의 J-R 곡선을 그림19에 나타내었다. 또한 하중비법에 의해 결정된 J-R 곡선을 그림19에 함께 표시하여 그 결과를 비교하였다.

결정된 J_{Ic}에 있어서, 직류전위차법 결과는 다중시편법에 비해 다소 큰 값을 예측한 것으로 생각된다. 세개의 시편 서로에 대한 것은 직류전위차법의 경우 최대 2.6%의 상대 오차로 측정치의 편차가 상대적으로 작았으며, 세개의 하중비법 결과는 최대 16.5%의 상대 오차로 역추적법을 사용한 직류전위차법에 비해서는 약간 큰 편차를 보였다.

5. 결 론

직류전위차법을 이용한 SA106Gr.C에 대한 동하중 파괴특성 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 준정적 하중속도 실험

직류전위차법에 의한 calibration 시작점이자 균열 시작점인 U0를 결정하는데 있어, ASTM E1737-96에 따른 5% 옵셋 방법은 SA106Gr.C 탄소강 재료에서 적절치 못하였다. 따라서 본 연구에서는 0.5% 옵셋을 사용하였다.

- 동적 하중속도 실험

다중 시편법을 이용하여, 신뢰성 있는 J-R 곡선을 결정하였으며, 이를, 동일 시편에 대해 측정한 직류전위차 값을 이용하여 결정된 J-R 곡선과 하중비법으로 결정된 곡선을 함께 비교하였다. 직류전위차법의 사용을 위한 균열 시작점의 결정은

하중시작점에서 나타나는 potential peak로 인해, 선형 fitting 및 옵셋 방법은 사용할 수 없었으며, 본 연구에서는 파면 관찰을 통해 결정된 최종균열길이로 부터 역추적해 나가는 방법을 이용하여 균열시작점을 결정하였다. 이 같은 방법으로 결정하는 J-R 곡선은 재현성이 뛰어남을 확인하였으며, 다중 시편법의 결과와 일치하는 결과를 보였다.

< 참고문헌 >

[1] U.S. N.R.C. "Evaluation of Potential for Pipe Breaks", NUREG-1061, Vol. 3, 1984

[2] C.W. Marschall, M.P. Landow, and G.M. Wilkowski, "Loading Rate Effects on Strength and Fracture Toughness of Pipe Steels Used in Task 1 of the IPIRG Program", NUREG/CR-6098, 1993

[3] C.W. Marschall, R. Mohan, P. Krishnaswamy, and G.M. Wilkowski, "Effect of Dynamic Strain Aging on the Strength and Toughness of Nuclear Ferritic Piping At LWR Temperatures", NUREG/CR-6226, 1994

[4] Korea Institute of Nuclear Safty, Korean Standard Review Plan 3.6.3,

[5] "Standard Test Method for J_{Ic}, A Measure of Fracture Toughness, ASTM E813-81", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

[6] "Standard Test Method for Dtermining J-R Curves, ASTM E1152-87", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

[7] "Standard Test Method for J-integral Characterization of Fracture Toughness, ASTM E1737-96", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

[8] H.H. Johnson, "Calibrating the Electric Potential Method for Studing Slow Crack Growth", Materials Research and Standards, Vol. 5, No. 9, September, 1965, pp.442-445

[9] U.S. N.R.C. "An Evaluation of J-R Curve Testing of Nuclrear Piping Materials Using the Direct Current Potential Drop Technique", NUREG/CR-4540, 1986

[10] M.G. Vassilaros and E.M. Hackett, "J-Integral R-Curve Testing of High Strength Steels Utilizing the Direct-Current Potential Drop Method", Fracture Mechanics : Fifteenth Symposium, ASTM STP 833, R.J. Sanford, American Society for Testing and Materials, 1984, pp. 535-552

[11] G.M. Wilkowski, J.O. Wambaugh, and K. Probhat, "Single-Specimen J-Resistance Curve Evaluations Using the Direct-Current Electric Potential Method and a Computerized Data Acquisition System", Fracture Mechanics : Fifteenth Symposium, ASTM STP 833, R.J. Sanford, American Society for Testing and Materials, 1984, pp. 553-576

[12] M.P. Landow and C.W. Marschall, "Experience in Using Direct Current Electric Potential to Monitor Crack Growth in Ductile Metals", Elastic-Plastic Fracture Test Methods: The User's Experience(Second Volume), ASTM STP 1114, J.A. Joyce, American Society for Testing and Materials, 1991, pp. 163-177

[13] J.W. Kim, "Effect of Dynamic Strain Aging on the Leak-Before-Break Assessment in SA106Gr.C Piping Steel", Ph.D. Thesis, 1997

[14] J.H. Yoon, et. al., “Dynamic Strain Aging and J-R Characteristics of SA516Gr.70, Elbow Steel of Primary Coolant Pipe”, Proceedings of The Sixth Workshop on Integrity of Nuclear Components, Korea Institute of Nuclear Safty, 1999, pp. 15-24

[15] S.Y. Kim, K.J. Kang and D.Y. Jeung, "Estimation of Crack Iniciation with DCPD Method on Dynamic Fracture Testing of Ductile Materials", Proceedings of the KSME 1999 Fall Annual Meeting A, The Korean Society of Mechanical Engineers, 1999, pp.147-152
[16] H.A. Ernst, P.C. Paris, M. Rossow, and J.W. Hutchinson, "Analysis of Load-Displacement Relationship to Determine J-R Curve and Tearing Instability Material Properties", Fracture Mechanics, ASTM STP 677, American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 581-599
[17] J.A. Joyce, H. Ernst, and P.C. Paris, "Direct Evaluation of J-Resistance Curves from Load Displacement Records", Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700, American Society for Testing and Materials, 1980, pp. 222-236
[18] J.M. Hu, P. Albrecht, and J.A. Joyce, "Load Ratio Method for Estimating Crack Extension", Fracture Mechanics Twenty-Second Symposium (Volume 1), ASTM STP 1131, H.A. Ernst, A. Savena, and D.L. McDowell, American Society for Testing and Materials, 1992, pp. 880-903
[19] X. Chen, P. Albrecht, W. Wright and J.A. Joyce, "Improved Load Ratio Method for Predicting Crack Length", Special Applications and Advanced Techniques for Crack Size Determination, ASTM STP 1251, J.J. Ruschau and K. Donald, American Society for Testing and Materials, 1995, pp. 83-103
[20] B.S. Lee, J.H. Yoon and J.H. Hong, "A Modified Load Ratio Method for Characterizing J-R Curves of CT Specimens", Proceedings of the KSME 1997 Fall Annual Meeting A, The Korean Society of Mechanical Engineers, 1997, pp.990-995
[21] V. Kumar, M.D. German, C.F. Shih, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI/NP-1931, 1981

표 1. **시험에 사용된** SA106Gr.C **탄소강의 화학 조성**

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
%	0.24	0.23	1.08	0.011	0.011	0.11	0.09	0.04	0.09	0.007

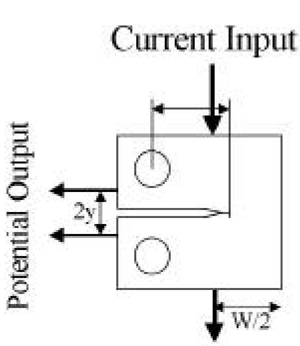


그림 1. CT **시편에서의 직류전위차 입출력선**

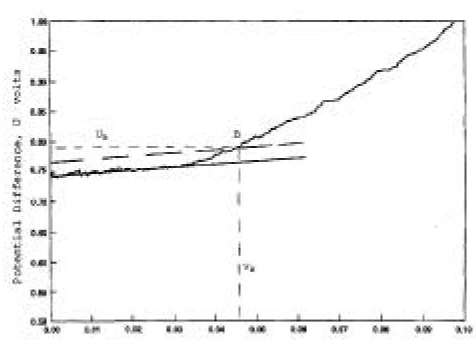
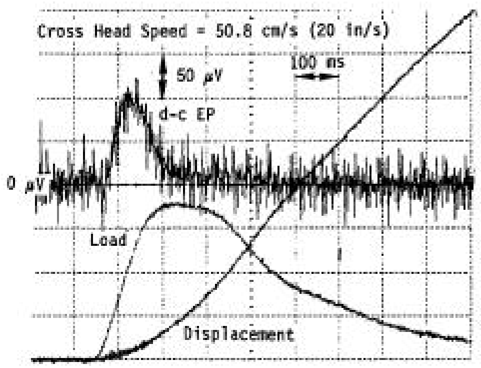


그림 2 **직류전위차** calibration**을 위한** COD-DCPD **곡선** [7]



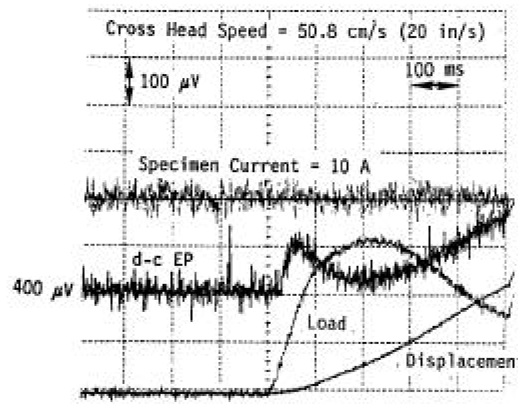


그림 3. **탄소강의 동하중 파괴시험에서 나타난** potential peak [12]

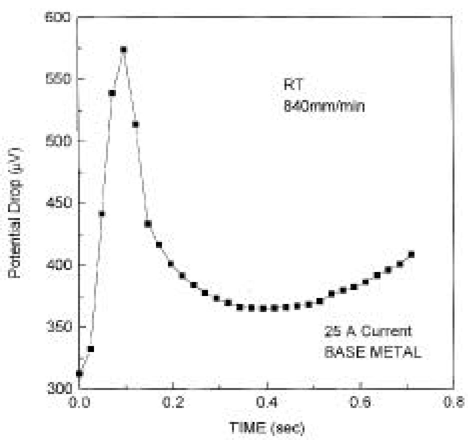


그림 4. **탄소강의 동하중** J-R **시험에 나타나는** potential peak**의 예** [13]

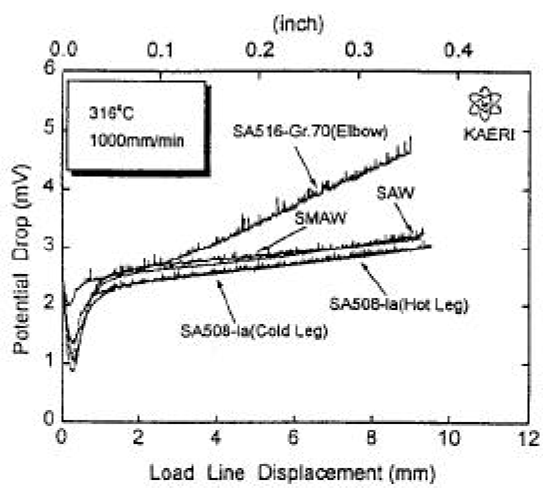


그림 5. **탄소강의 동하중** J-R **시험에 나타난** potential peak**의 예** [14]

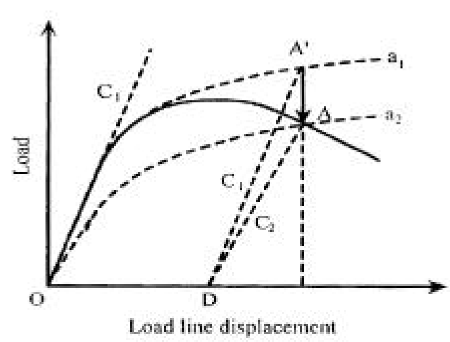


그림 6. **하중비법의 기본 원리** [20]

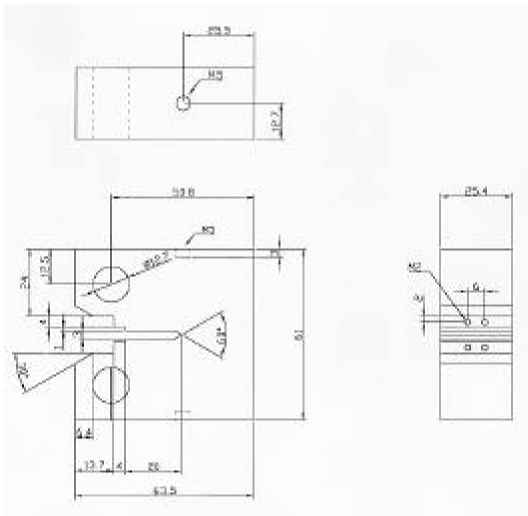


그림 7 탄소강의 동하중 J-R 시험에 사용된 CT 시편의 형상

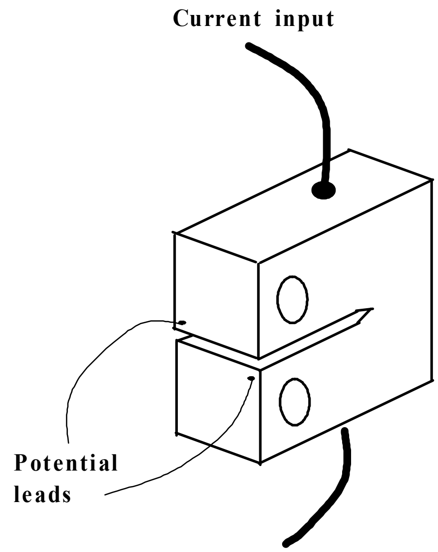


그림 8. 직류전위차법을 위한 입출력선의 연결 위치

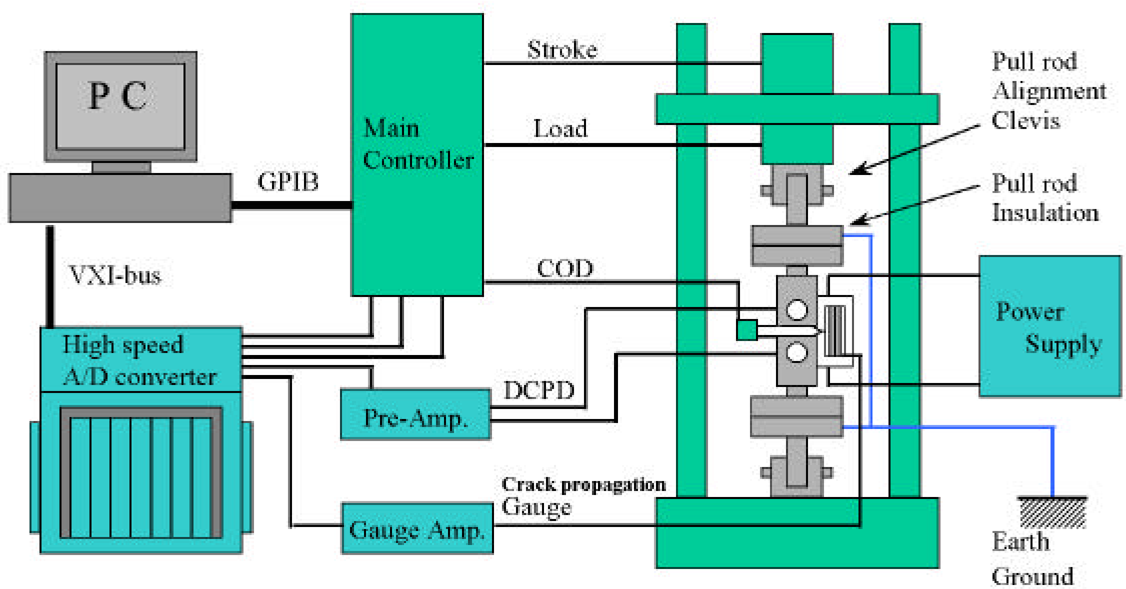


그림 9. 직류전위차법을 이용한 파괴시험을 위한 장치 개략도

그림10. **시험에 사용된 유압식 시험장비와 고속자료수집장치**, traveling microscope

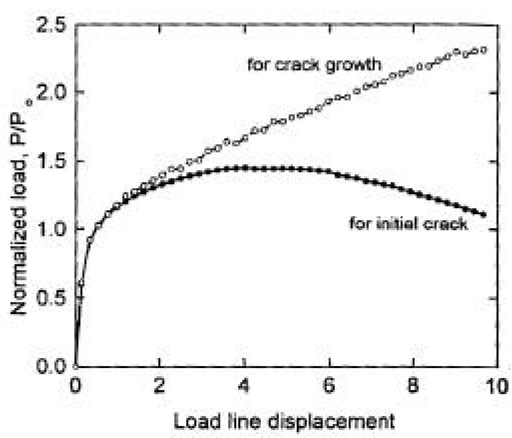


그림 11. a_0**와** a**에 대해 정규화된 하중-하중선 변위 곡선** [20]

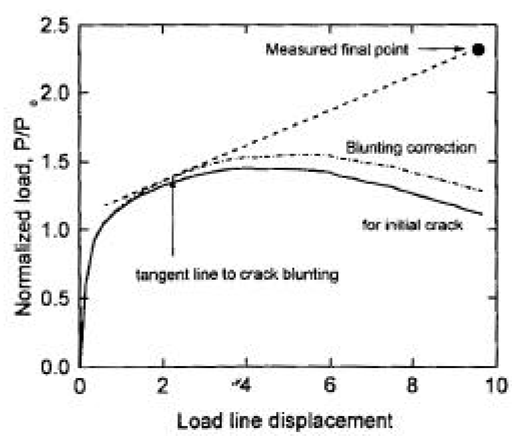


그림 12. **접선 근사를 이용한 경화 곡선의 결정**[20]

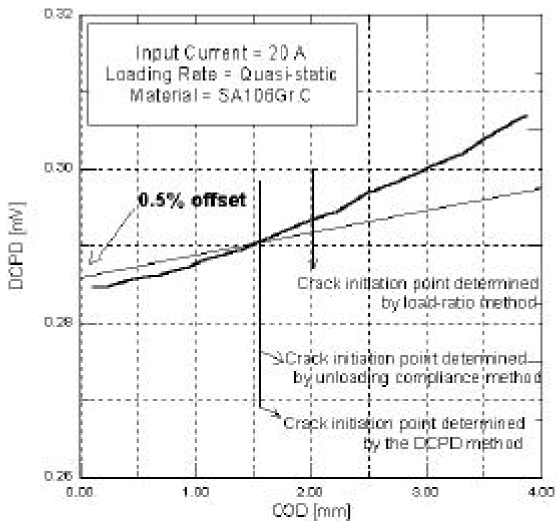
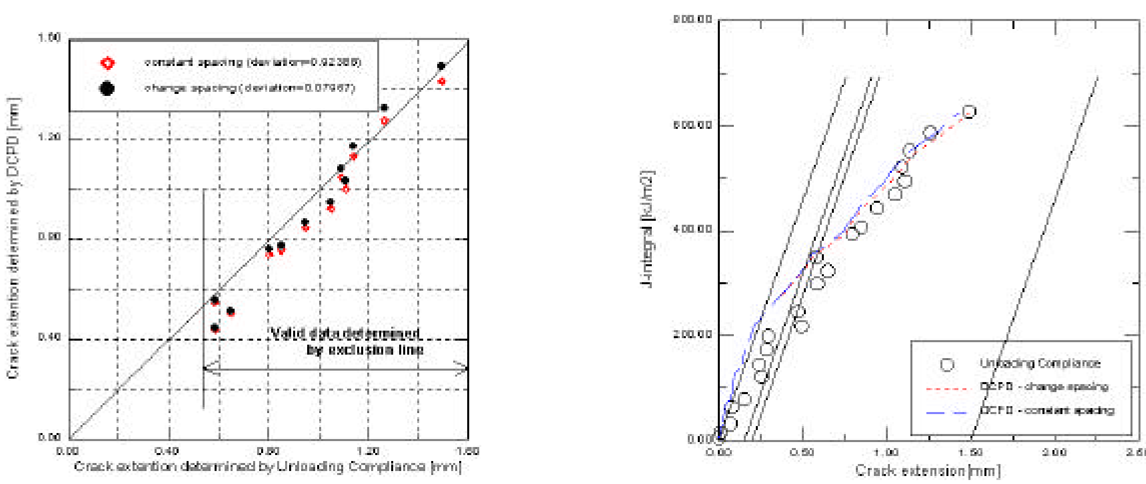


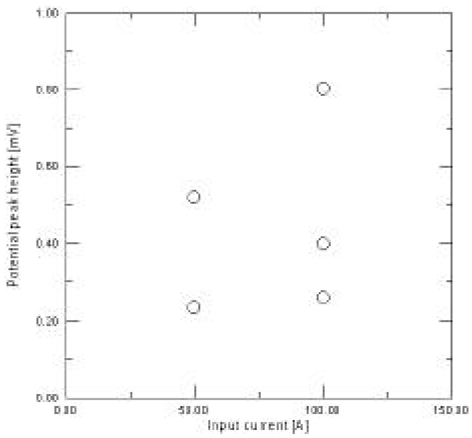
그림 13. **준정적 하중속도에서의**
SA106Gr.C**의** DCPD-COD **곡선**



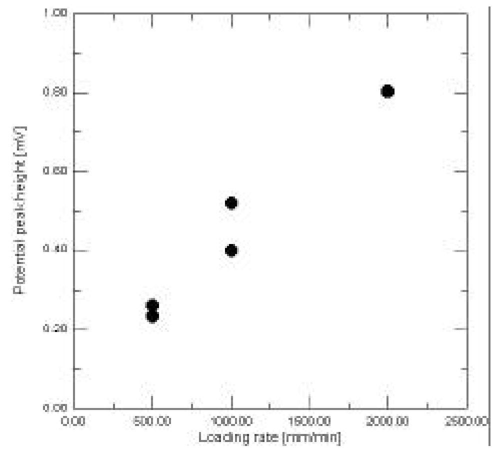
(a) **탄성해중법과 직류전위차법에 의해 결정된 균열길이의 비교**

(b) **탄성해중법과 직류전위차법으로 결정된** J-R **곡선의 비교**

그림 14. **준정적 하중속도에서** SA106Gr.C**의 파괴시험 결과**

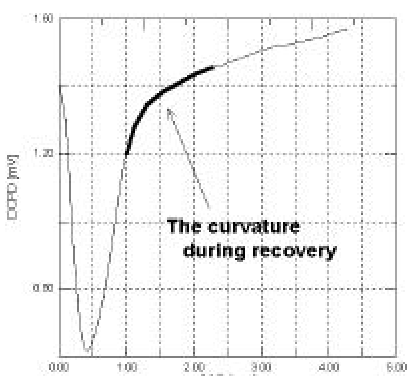


(a) **입력전류량에 대한 특성**

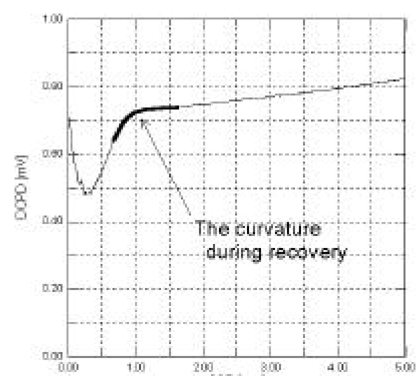


(b) **하중속도에 대한 특성**

그림 15. **입력전류량과 하중속도에 대한** potential peak**의 크기 특성**



(a) Potential peak**의 느린 회복**



(b) Potential peak**의 빠른 회복**

그림 16. Potentia peak**의 회복 속도**

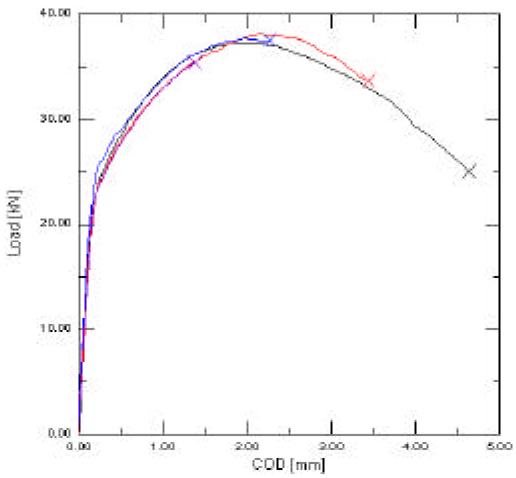


그림 17. **다중시편법을 이용한 실험에서 측정된 하중-하중선변위 곡선**

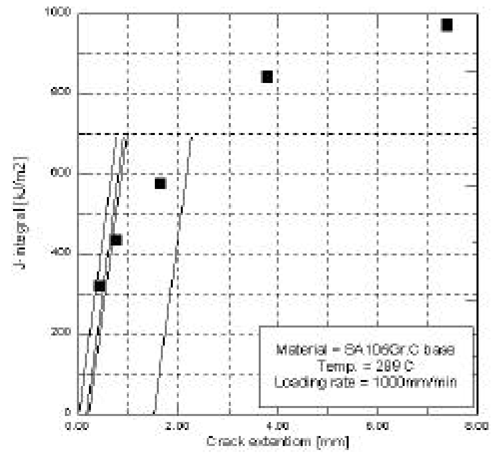


그림 18. **다중시편법을 통해 결정된** SA106Gr.C **탄소강의 동적 파괴특성**

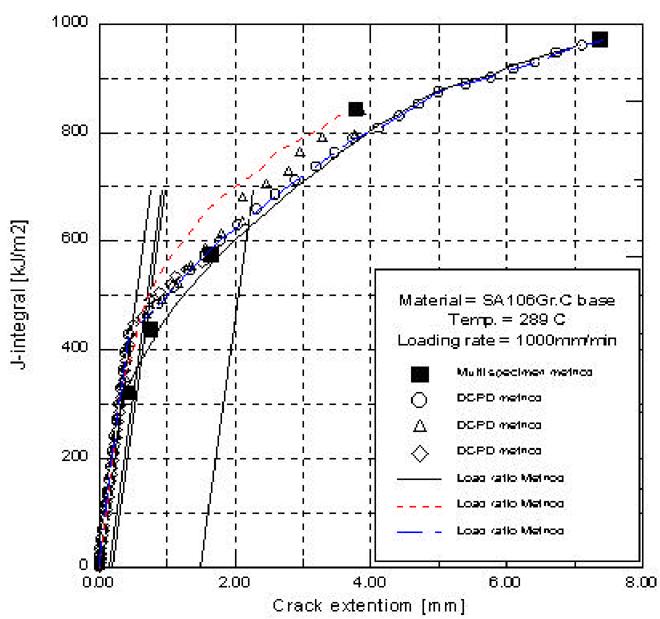


그림 19 **직류전위차법, 하중비법, 다중시편법으로 결정된** SA106Gr.C **탄소강의 동하중 파괴특성**