

SP試驗法에 의한 材料의 破壞強度 評價

鄭 世 喜

全北大學校 精密機械工學科 教授



●1934년 6월 21日生
●파괴역학을 전공하였으며, 기계 및 구조물에서의 특히 용접부의 강도 평가와 건전성 평가에 관심을 가지고 있다.

鄭 熙 敦

日本 東北大學 工學部



●1956년 2월 29日生
●안정성 및 재료평가에 관한 음향방출법(AE)을 전공하였으며, 재료의 환경강도, 경년변화 평가에 많은 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

원자로 材料의 機械的 性質이 放射線 照射에 의해서 그의 기능저하, 즉, BCC金屬의 延-脆性遷移溫度(DBTT; ductile brittle transition temperature)의 상승을 가져오고 있음을 잘 알려져 있다. 이러한 材質의 尖化를 評價하기 위하여 원자로에 試片을 삽입하는 소위 監視試驗이 행히지고 있으나, 원자로의 공간이 제한되어 있기 때문에, 종래의 표준 충격試驗片보다 작은 試片이 사용되는 특별한 試驗法의 확립이 요구되어 왔다.

한편, 火力發電所과 石油化學공장에서 쓰이는 高溫기기는 사용중 炭化物의 석출 등에 의해서 靱性値가 저하하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 고온중에서 사용되는 구조물部材의 健全성과 信賴性을 확보하기 위해서는 經年的인 材質의 變化를 파악 해두는 것이 절실히 요망 되고 있다. 최근 이들 高溫기기의 材質尖化를 測定하는 方法으로서, 電氣化學的 및 電氣學的 方法을 동원한 새로운 非破壞方法들이

모색되고 있으나, 최종적인 판단은 破壞試驗에 의존하지 않으면 안되는 상태에 있다. 그러나 이러한 기기들로 부터 채취되는 試驗片의 크기와 수량은 제한되어 있어서 가능한 小型의 試片으로 破壞強度를 評價할 수 있는 試驗方法의 개발이 요구 되어 왔다. 이러한 배경하에서 최근에 金剛材料의 破壞強度 評價方法으로서 美國과 日本을 中心으로 연구 개발 및 응용되고 있는 小型 펀치(small punch; 以下 SP라 함) 試驗法을 소개 하고자 한다.

2. 試驗方法의 概要

본 試驗方法은 극히 微小한 試驗片을 使用하며, 금속재료의 破壞靱성에 關連하는 特性(천이온도, 탄소성 파괴인성等)을 결정하는데 目的을 둔 것으로, SP試驗에 使用하는 試驗片과 지그는 그림 1과 같다⁽¹⁾. 試驗片은 10mm×10mm×0.5mm, 10mm×10mm×0.25mm의 平板狀의 超小型시험편과 소위 TEM디스크라고 불리는 3mmφ×0.25mm인 圓板狀의 세종류를 표준 試驗片으로 하고 지그는 10mm와 3mmφ

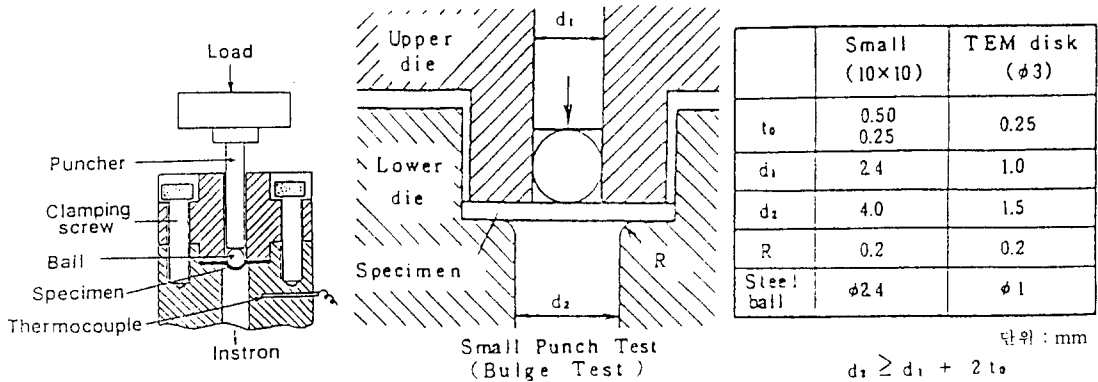


그림 1 SP시험용 지그와 시편치수

용으로 두종류가 있다. SP시험은 소위 bulge 시험으로 액체질소 근처의 저온으로부터 高温까지 여러단계의 高温역에서 실시되며, 이 실험으로 부터 얻어지는 荷重-變位曲線(그림 2) 으로부터 破壞靱성에 관계되는 두 종류의 工學量을 評價할 수 있다. 그 하나는 荷重-變位曲線下의 面積, 즉 변형 및 파괴에 소비된 에너지(以下 SP에너지라 부른다)를 구하여, SP에너지의 溫度依存曲線을 作成하고, 천이온도에 관련하는 SP DBTT를 測定한다. 다른 하나는 破壞時의 最大變位(δ^*) (그림 2참조)로 부터 破壞等價變形率($\bar{\epsilon}_{qr}$)을 산출하고, 이로부터 탄소성 파괴인성치(J_{IC})를 추정 할 수가 있다. SP시험을 실시함에 있어서는 荷重, 變位, 試驗溫度를 自動 記錄해야 하며, 試驗片에 대한 負荷는 cross-head 速度 0.1~1.0mm/min를 기준으로 하고, 0.5mm/min를 표준으로 한다.

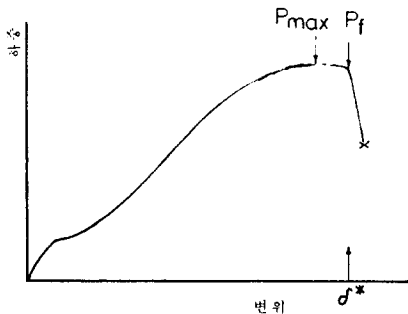


그림 2 SP하중변위곡선과 δ^* 의 결정방법

3. 試驗結果의 整理와 破壞

3.1 SP에너지 및 SP DBTT의 評價

그림 3은 SP시험으로 부터 얻어지는 荷重-變位曲線의 모형도이다⁽²⁾. 變形段階에 대응하여, 荷重-變位 선도는 I : 彈性굽힘 變形領域, II : 塑性굽힘 變形領域, III : 塑性膜 伸張變形領域 및 IV : 延性 不安定 領域의 넷으로 구분된다. 領域III은 SP시험 특유의 塑性流動을 나타내는 領域으로 變位の 증가에 따라 荷重의 증가가 발생된다. 이 變形領域에서는 塑性팽창이 일어나기 때문에, 편치端과 試驗片과의 접촉면적이 증가된다. 이 때문에 SP시험片的 膜應力은 一定값 以上으로 유지되어, 加工硬化를 일으키므로 하중은 증가하게 된다. 또 試驗溫度가 低下됨에 따라 破壞點은 領域IV로 부터 I 쪽으로 移動해 간다. 다시 말해서 저온에서

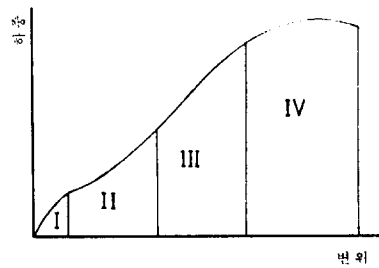


그림 3 SP 하중변위곡선의 모형도

는 荷重-變位가 적은 상태, 즉 低에너지에서 破壞되나, 온도가 상승함에 따라 破壞에 必要한 荷重·變位는 증가를 보이게 된다. 여기서 荷重-變位曲線下의 面積을 계산하여 “SP에너지”라고 定義하고 있다. 이와같이 구한 SP에너지를 각각의 試驗溫度에 대해서 정리하면 SP에너지의 溫度依存線圖를 그릴 수 있으며, 이때 $(SP_{max} + SP_{min})/2$ 로 구해지는 溫度를 SP遷移溫度(SP DBTT)라고 JAERI에서는 定義하고 있다⁽¹⁾. 이 SP DBTT와 표준 샤피충격 시험결과와의 비교는 다음 節에서 논하기로 한다.

3.2 SP試驗에 의한 탄소성 파괴인성치의 추정

Takahashi 등⁽³⁾은 SP試驗結果를 利用하여 彈塑性破壞靱性值(J_{IC})의 추정을 위한 경험적인 관계식을 제안 하고 있다. 그들을 Bayonmi에 의해 제안된 $J_{IC} = C_1 \bar{\epsilon}_q^2 + C_2$ (여기서 $\bar{\epsilon}_q$ 는 等價變形率, C_1, C_2 는 試驗材의 기계적 성질 및 미시조직에 의존하는 상수)의 관계식에 注目하고 $\bar{\epsilon}_q$ 값을 구하기 위해서 SP試驗中 試片의 두께변화를 검토했다. 그들은 여러 종류의 재료의 SP試驗을 통하여 그림 4에 보이는 바와 같이 試片의 두께변화와 變位の 관계를 얻고, 式 (1)과 같은 경험식을 얻었다.

$$t/t_0 = \exp[-\alpha(\delta/H)^{3/2}] \quad (1)$$

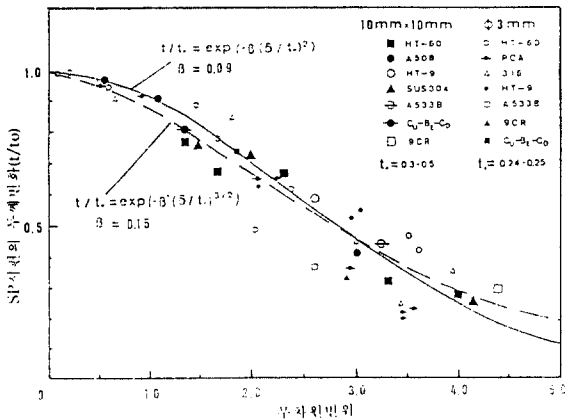


그림 4 SP 시험의 두께변화와 무차원 변위의 관계

여기서 t/t_0 는 試片의 두께 변화량, δ 는 試片中央部의 변위량, 그리고 H 는 아래 지그의 반경을 나타내고 α 는 1.3~1.2의 값을 가지고 있다.

한편, SP試驗과 같은 부하條件下에서 試片에 부과되는 等價변형량과 試片두께 변화의 관계는 Chakrabarth의 membrane 이론을 利用하는 것에 의해 式 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\epsilon}_q = \ln(t_0/t) \quad (2)$$

결국 式 (1)과 式 (2)를 연결시키는 것에 의해 파괴시의 破壞等價變形量 $\bar{\epsilon}_{qf}$ 는 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다. 즉,

$$\bar{\epsilon}_{qf} = \alpha(\delta^*/H)^{3/2} \quad (3)$$

여기서 δ^* 는 그림 2에 표시한 바와 같이 급격한 파괴거동이 일어날 때의 變位量을 나타낸다. 이 $\bar{\epsilon}_{qf}$ 는 간단히 荷重-變位曲線에서 직접 구할 수 있는 量이다. 그림 5는 同一재료에 대해서 얻어진 $\bar{\epsilon}_{qf}$ 와 J_{IC} 와의 경험적 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 彈塑性破

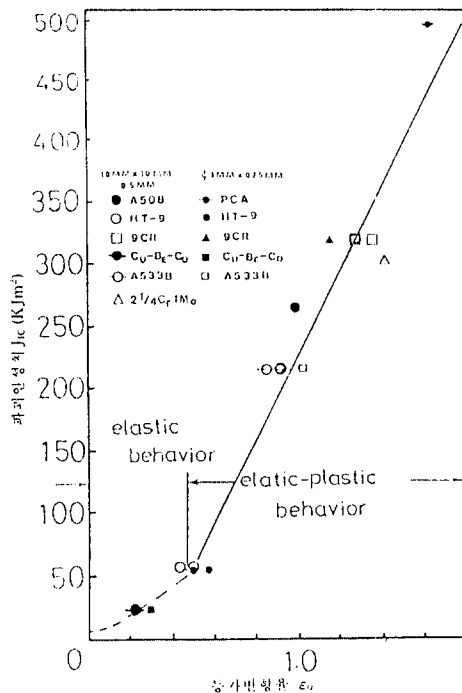


그림 5 탄소성 파괴인성치와 등가변형률의 관계

壞舉動을 보이는 재료에 있어서는 $\overline{\epsilon_{qr}}$ 와 J_{IC} 는 직선적인 관계를 보이고 있어서 SP試驗에 의해 $\overline{\epsilon_{qr}}$ 를 구함으로써 J_{IC} 값의 추정이 가능하다. 물론 이와같은 관계의 이론적인 해석이 앞으로의 연구과제로 남아 있다.

4. SP試驗에 의한 構造物部材의 經年變化 測定例

본 절에서는 高溫構造物 部材의 經年變化 추정과 그 잔존수명평가의 일환으로서, 高溫에서 長時間使用에 의한 재료의 機械的 性質의 變化를 SP試驗으로 평가한 일례를 소개한다. 또한 準非破壞檢査法(Semi-NDE)으로서의 SP試驗을 어떻게 現場에 적용할 것인가에 대해서도 살펴보기로 한다.

4.1 터빈로터⁽⁴⁾

그림 6은 22年の 운전경력을 갖고 있고, 폐기된 125MW급 터빈로터(turbine rotor)로서 사용온도와 試片의 채취위치(그림중 C, E, I, G)를 나타내고 있다. 그림 7은 代表的인 SP荷重-變位曲線으로서 -140°C 의 결과를 보인 것이다. 그림에서 NT로 표기되어 있는 試片

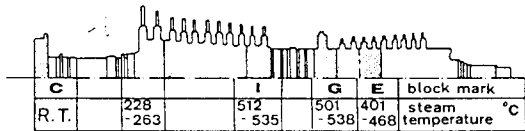


그림 6 터빈로터의 개략도와 시편 채취 위치

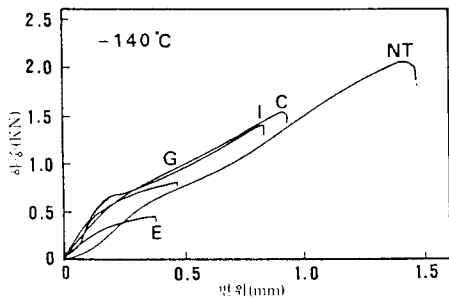


그림 7 터빈로터(CrMoV)강의 SP하중-변위곡선 (-140°C)

은 經年變化의 程度를 比較하기 위하여 사용재에 대해서 脫脆化 熱處理($955^{\circ}\text{C}/2$ 時間)를 행한 것이다. 열처리재에 비해서 高溫에서 장시간 사용된 재료는 最大荷重 및 變位가 현저하게 떨어지고 있음을 알 수 있다. 여기서 각 試驗溫度에서의 파괴거동을 살펴보기 위해서 SP에너지와 試驗후 試片표면사진을 試驗溫度에 대해서 정리한 것이 그림 8이다. 그림에서 알 수 있듯이 사용재 E의 경우, NT재에 비해 낮은 SP에너지값을 보이고 있으며 -196°C 에서는 試片중양에서부터 원주방향으로 꽃이 피는듯한 파괴거동을 보이고 있다. -110°C 부근을 경계로 하여 파괴거동에는 차이가 보이는데, 고온역으로 이동함에 따라 에너지의 급격한 증가가 관찰되고, 試片의 원주상에 강한 소성변형역과 균열이 생성되어 있다. 이들 시편에 대해서 얻어진 파면관찰 결과를 그림 9에 보인다. 사용재의 경우 -196°C 에서는 입계와 입내파면이 혼재되어 있는 상태이고 -140°C 에선 全面입내파면을 보이고 있다. 반면, NT재의 경우, -196°C 에서 덩플과 입내파면이, 그리고 -140°C

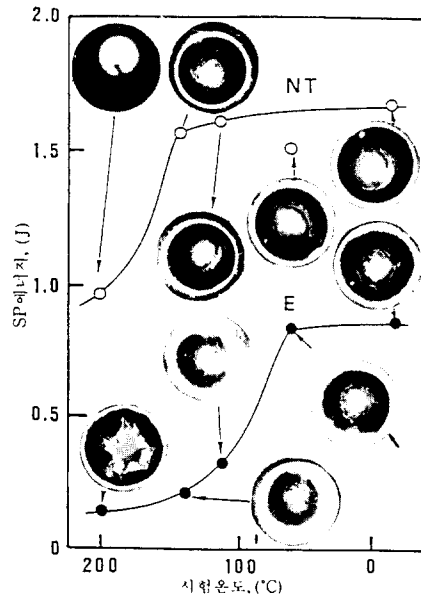


그림 8 터빈로터(CrMoV)강의 사용재와 열처리재의 온도에 의한 파괴거동과 SP에너지의 변화

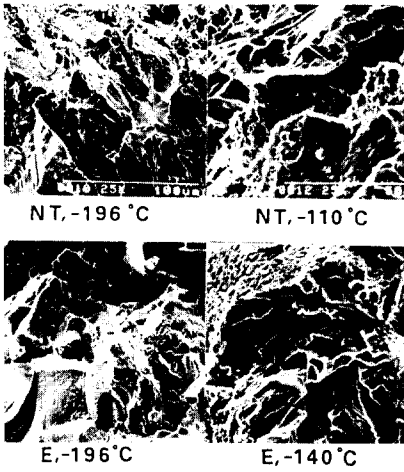


그림 9 터빈로터(CrMoV)강의 사용재(E)와 열처리재(NT)의 SP 시험후 파면사진

부근에서 실온까지는 덩플파면이 관찰되었다. 여기서 이러한 파면의 천이가 SP에너지의 급격한 변화의 원인으로 되고 있음을 알 수 있고, 溫度에 대한 SP에너지변화의 物理的의미는 표준 샤피충격시험과 同一하다는 것을 알 수 있다. 같은 試片에 대해서 얻어진 SP試驗과 표준 샤피충격 試驗結果를 정리한 것이 그림 10이다. 또한 여기서 얻어진 결과의 정량적인 관계를 그림 11에 나타낸다. 그림에서 Tsp는 SP試驗에서 얻어진 열처리재와 사용재의 파면천이온도의 차이를 의미하고 Tcvn은 샤피충격試驗에서 얻은 차이를 나타낸다. 이 그림을 통하여 알 수 있듯이 두 試驗方法으로 얻어진 결과는 서로 직선적인 관계($T_{sp}=0.57 T_{cvn}$)를 나타내고 있다. 그림에 참고를 위하여, Kameda^(5,6)에 의해 행해진 Sb와 P를 첨가한 NiCr강의 결과를 함께 표시했다.

4.2 Boiler Superheater Tube 材⁽⁷⁾(SUS 31b)

표 1에 화력발전소의 보일러 가열기 튜브재의 경년변화를 測定하기 위한 SP試片의 경력을 표시한다. 우선 건전재인 SUS316A의 SP하중-변위곡선을 그림 12에 나타낸다. 그림을 보면 前절의 CrMoV강과는 달리 저온으로 내려갈수록 하중 및 변위가 증가하나, 사용재의

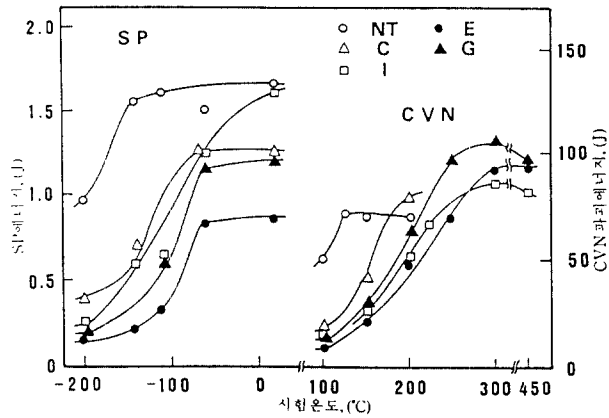


그림 10 각 시험온도에 있어서의 SP에너지와 CVN 파괴에너지의 비교(터빈로터강)

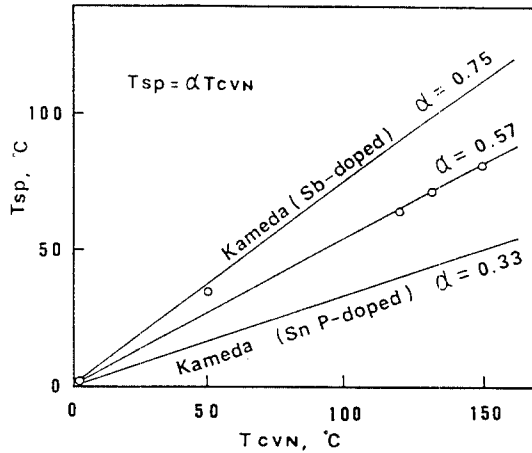


그림 11 SP시험과 샤피충격시험에서 얻어진 파면천이온도차의 관계(터빈로터강)

표 1 보일러 과열기의 튜브(SUS 316)시험

기 호	사용온도(°C)	운전시간(hr)	비 고
A	0	0	건전재
B	620	35,300	사용재
C	603	83,100	"
D	609	106,000	"

경우 반대의 현상을 보였다. 이러한 현상은 SP에너지와 파괴거동의 측면에서 살펴본 것이 그림 B이다. 건전재(SUS 316A)는 전온도영역에서 연성적인 파괴를 보이고 있으나 사용재

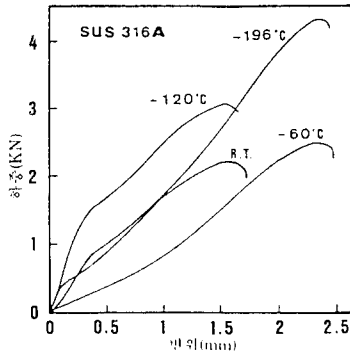


그림 12 보일러 가열기 튜브의 건전재의 각 온도에 있어서의 SP 하중-변위곡선.

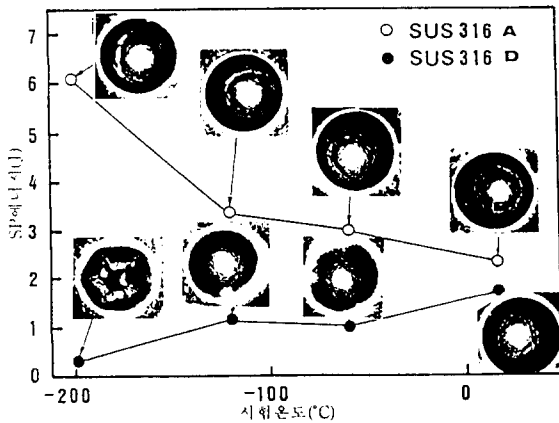
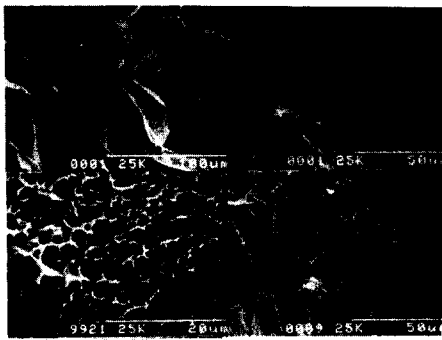


그림 13 보일러 가열기 튜브재의 건전재와 사용재의 SP시험 결과



SUS 316D -196°C	SUS 316D 17°C
SUS 316A -1	SUS 316D -120°C

그림 14 보일러 가열기 튜브의 사용재(SUS 316D)와 건전재(316A)의 SP 시험후 파면 관찰결과

(SUS 316D)의 경우엔 전반적으로 SP에너지가 낮고 -196°C 에 있어서는 CrMoV강의 사용재와 비슷한 파괴양상을 나타내고 있다. SP시험 후 파면사진을 그림 14에 나타낸다. 건전재에 있어서는 -196°C 에서도 전형적인 연성파면이 나타나고 있으나 사용재의 경우 -196°C 에서 완전한 입계파면이 관찰되고 -120°C 부근을 경계로 입내파면이 나타나고 있다. 더구나 실온에서 조차 사용재는 입내파면을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 15에 SP에너지와 CVN에너지를 비교했는데 각 재료에 있어서 두 에너지의 변화거동은, 前절의 CrMoV강의 결과와 마찬가지로, 전반적으로 일치하고 있으며, 이것은 SP시험이 CVN시험의 代用으로서 충분한 가능성을 내포하고 있다는 것을 의미한다.

4.3 SP시험의 현장에의 應用에 대한 고찰

지금까지 SP시험의 소개와 그의 有用성에 대해서 설명해 왔지만 以下에선 準非破壞檢査法(Semi-NDE)로서의 SP시험법을 現場에 어떻게 적용시킬 것인가에 대해서 간단히 논하기로 한다. 그림 16은 그러한 과정을 나타낸 흐름도⁽⁷⁾이다. 먼저 정기검사중 전기화학적, 전기화학적, 전기학적 수단에 의하여 부재의 금속학적 변화를 검토하게 되고 초음파법 등에 의해 잠재균열의 감시를 행하게 된다. 이러한 결과에 따라 劣化度의 程度를 판단하고 劣化가

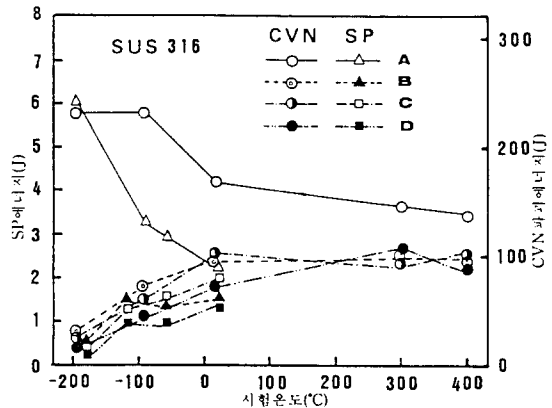


그림 15 각 시험온도에 있어서의 SP에너지와 CVN 파괴에너지의 비교(SUS 316).

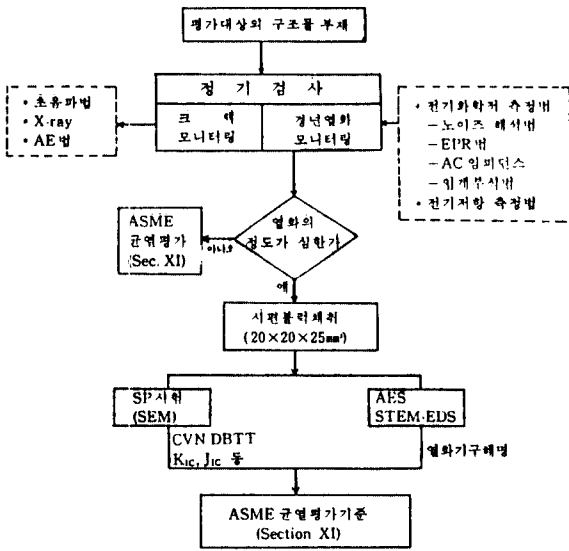


그림 16 준 비파괴 검사법 (Semi-NDE) 으로서의 SP 시험의 현장에서의 응용과정

심할 경우, 기계적 성질의 변화를測定하기 위한 SP試驗이 行하여지게 된다. 이 SP試驗結果를 利用하여 파괴역학적 工學量을 구하고 後에 APME의 flaw evaluation sec. XI의 기준에 의하여 기기의 운전을 지속시킬 것인가 교체를 行할 것인가를 판단하는 것이 그림 16의 기본적인 思考이다. 여기에서 가장 큰 문제점으로 대두 되는 것이 있는데, 그중 하나가 금속학적성질을 평가한후, SP試驗의 必要性을 결정하는 과정이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 금속학적因子の 변화에 대응하는 기계적 성질의 변화에 관한 실험실레벨의 연구가 絶對히 요망된다고 할 수 있다. 이 과정에 있어서는 문제점을 안고 있는 現場뿐만 아니라 大學 및 研究所의 育기적인 협력체제가 必要하다는 것을 말하고 싶다. 또 하나의 문제점은 現場에서 SP試片을 어떻게 또는 어떤 부위에서 채취해야 할 것인가에 대한 것으로, 앞으로 많은 功부가 필요하다고 생각된다.

5. 맺음말

本 SP試驗法은 使用되는 試片이 微小하다는 長點때문에 材質의 評價나 더불어 非破壞檢査

의 일환으로서 利用할 수 있음을 說明해 왔다. 現存하고 있는 巨大구조물들의 잔존수명평가가 要求되고 있는 지금, 精량적인 경년변화측정方法으로서 SP試驗法은 높은 可能性을 내포하고 있는 試驗法으로 여겨지며, 이 方法을 現場에 정착시키기 爲해선 産·學·研의 共同研究체제가 必要하다고 할 수 있다.

참고문헌

- (1) Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)-Memo 62-193, 1987.
- (2) Kameda, J., 1987, 超小型試驗法에 의한 鐵鋼材料의 破壞特性評價, 日本金屬學會誌, 第23卷, 第6號, pp. 520~527.
- (3) Xinyuan Mao, Shoji, T., and Takahashi, H., 1987, "Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by Combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis", J. of Testing and Evaluation, Vol. 23, p.49.
- (4) Lu, Y., Shoji, T., Takahashi, H., 1987, "CrMoV 耐熱鋼의 새로운 經年變化診斷技術" 日本機械學會論文集.
- (5) Baik, J.M., Kameda, J., and Buck, O., 1983, "Small Punch Test Evaluation of Intergranular Embrittlement of an Alloy Steel", Scripta Metallurgical, Vol. 17, No. 12, p. 1443.
- (6) Baik, J. M., Kameda, J., and Buck, O., 1985, "Development of Small Punch Tests for Ductile-Brittle Transition Temperature Measurement of Temper-Embritted Ni-Cr Steel", ASTM, STP 888, p. 92.
- (7) Takahashi, H., Shoji, T., and Jeong, H.D., 1988, "Residual Life Assessment and Non-destructive Evaluation of Material Degradation in Power Plant Components by means of Small Punch Test", Proc., of International Conference Life Extension and Assessment Den Haag, Netherland.