

## 원전 2차측 배관의 침식부식 수명 평가시스템

황경모 · 진태은  
한국전력기술주식회사

김영식  
안동대학교

### 요 약

원자력 발전소 2차측 배관에서 가장 심각한 문제로 대두되고 있는 침식부식현상을 예측/감시하는 시스템을 개발하는 연구를 수행하였다. 본 시스템은 침식부식 이론 및 관련 변수들로부터 단상 및 2상유체 배관의 침식부식률과 ASME Code의 허용기준에 따른 잔여수명을 예측할 수 있는 Prototype의 평가시스템 형태로 개발되었으며, 특정호기의 2차측 배관들 중에서 침식부식에 특히 민감한 T-형 및 L-형 배관을 선택한 후 시스템화시켜 검토하였다.

### 1. 서론

원전의 수명관리를 위해서는 보수 및 교체가 난이한 1차측 기기를 주대상으로 선정하여 연장운전을 포함한 기술적 타당성을 검토하는 것이 일반적이지만 전반적인 원전수명관리를 위해서는 1차측의 주요기기 뿐만아니라 실질적으로 원전운전시 문제가 되는 분야의 해결 또한 중요하다. 이의 일환인 원전 2차측 배관의 침식부식손상은 증기발생기 균열, 복수기 누설 및 터빈손상 등 많은 발전설비의 기능 저하와도 직·간접적으로 연결되어 있으며, 재료의 부식과 순환수의 수질 등으로 인하여 발생된다고 알려져 있다. 원전 선진국에서는 이러한 문제해결을 위하여 원전 감시시스템의 일환으로 2차측 배관의 침식부식 감시 시스템을 개발하고 있으며, 국내에서도 발전설비의 보다 효과적인 수명관리 및 운전기술의 확립을 위하여 이에대한 검토가 시도되어야 할 것이다.

이에따라 본 연구에서는 원전수명관리 측면에서 2차측 배관의 가장 심각한 문제로 대두되고 있는 침식부식에 대하여 적절한 평가방법 확보 및 진단감시시스템 개발을 위해 관련 이론을 검토하였으며, 이로부터 침식부식 감시시스템을 개발하기 위한 Prototype 형태의 시스템을 개발하였다.

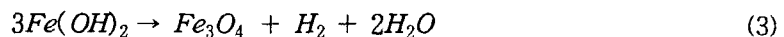
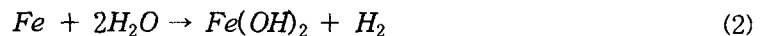
### 2. 침식부식 개념 및 영향인자

#### 2.1 침식부식 개념

침식부식은 침식, 마모, 캐비테이션 등과 같은 기계적인 손상과는 달리 부착력이 약한 다공성 마그네타이트(Magnetite) 피막에서 유체의 흐름에 의해 가속화되는 재질의 부식현상으로서 건증기 배관에서는 발생하지 않고 물과 습증기를 운반하는 배관에서 주로 발생한다. 침식부식률은 몇가지 부분 반응단계에 따라 결정되며, 각 단계의 반응률은 유체의 pH, 금속재질의 크롬과 몰리브덴 함량(h), 시간, 산소농도, 유속(w) 및 배관형상(K<sub>c</sub>) 등 여러가지 변수의 복합적 작용에 비례한다[1].

$$\frac{dm}{dt} = K_c * f(w, T, pH, O_2, h, t) \quad (1)$$

침식부식이 일어나는 강의 표면에 형성되는 산화막은 모두 마그네타이트로서 형성과정은 다음과 같다.



침식부식 현상은 보통 2단계로 진행된다. 첫단계는 마그네타이트의 일부가 기공에서 용해됨과 동시에 기공의 마그네타이트 표면에서 용해반응이 진행되는 것이다. 마그네타이트의 용해도(Solubility)는 온도, 수소이온 활동도 및 용액조성에 따라 변하며, 용해속도는 아레니우스(Arrhenius) 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$r_k = r_o \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \quad (4)$$

여기서  $E_k$ 는 활성화 에너지를 나타내며,  $r_0$ 는  $T = \infty$ 에서의  $r_k$ 의 값이다.

둘째단계는 용해된 마그네사이트 피막의 철이온이 물의 흐름에 의한 대류성 물질전달(Convective Mass Transfer)로 인하여 용액 속으로 확산되어 배관재질의 손실을 가속화 하는 것이다. 이러한 대류성 물질전달 속도는 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = K(C_s - C_b) \quad (5)$$

여기서  $K$ 는 물질전달 계수이며,  $C_s$ 와  $C_b$ 는 각각 표면과 유체 중의 철분농도를 나타낸다. 위의 두 단계는 연속적으로 일어나므로 전 침식부식률(Overall Erosion/Corrosion Rate :  $r$ )은 다음 식으로 표현된다.

$$r = \left( \frac{1}{r_k} + \frac{1}{r_{MT}} \right)^{-1} \quad (6)$$

여기서  $r_{MT}$ 는 식 (5)의  $dm/dt$ 이다.

한편 금속재질의 손실률  $dm/dt$ 을 구하기 위해서는 재질의 국부 물질전달계수를 알아야 한다. 국부 물질전달계수  $K$ (Local Mass Transfer Coefficient)는 국부적인 수력학적 조건에 의해 결정되는데, 일반적으로 Sherwood 수( $Sh$ ), Reynolds 수( $Re$ ), Schmit 수( $Sc$ ) 등 무차원수로 표시되는 경험식으로 부터 구해진다[3].

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (7)$$

여기서  $Sh = KD/d$ ,  $Re = D\rho V/\mu$ ,  $Sc = \mu/\rho d$ 이며,  $d$  [ $ft^3/sec$ ]는 확산계수이다. 이때 a, b, c는 실험실 및 플랜트 데이터로부터 구한 상수이다.

Berger-Hau의 관계식을 이용하면 직관에 대해서는,

$$Sh = 0.0165 Re^{0.86} Sc^{0.33} \quad (8)$$

직관에 대한 물질전달 계수는 식 (8)로 부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \left( \frac{d}{D} \right) (0.0165) (Re)^{0.86} (Sc)^{0.33} \quad (9)$$

## 2.2 영향인자

단상 및 2상유체 배관의 침식부식 영향인자는 다소 차이가 있지만 대체로 유속, 배관의 재질, pH, 용존 산소농도, 운전시간, 배관형상 등이며, 원전 2차측 배관의 침식부식률 예측을 위해서는 반드시 이들 영향인자들을 검토해야만 한다[4].

**용액의 pH** : 대부분의 금속은 수중에서 금속이온과 자유전자로 전리된다. 이때 수중에 존재하는 수소 이온( $H^+$ )은 자유전자와 결합하여 부식의 진행을 촉진시키며, 수산이온( $OH^-$ )은 금속이온과 결합하면서 금속표면에 금속산화물 피막( $Fe(OH)_2$ )을 형성하여 부식의 진행을 억제하는 역할을 한다. 이와같은 사실로 인하여 발전용수의 액성은 약알칼리성을 띠도록 암모니아, 모폴린 및 사이클로 헥실아민 등의 알칼리 약품을 사용하여 전회발성 처리(AVT) 방법으로 pH를 조절한다.

**배관의 재질** : 침식부식은 습증기 배관에 폭넓게 사용되는 탄소강 배관에서 가장 심하다. 그렇지만 탄소강에 크롬(Cr)이나 구리(Cu), 몰리브덴(Mo) 등의 원소를 소량 첨가시키면 침식부식 현상은 상당히 감소된다.

**습분** : 원전 2차측 배관의 침식부식은 건증기(Dry Steam) 배관에서는 거의 문제가 되지않고 주로 습증기(Wet Steam)나 물을 운반하는 배관에서 발생한다. 그러므로 대부분의 발전소에서는 습분분리기를 통과시켜 습분을 제거하거나, 가열에 의해 온도를 높여 증기의 건도(Quality)를 높게 유지시켜 가능한 한 침식부식을 억제하려고 한다.

**온도** : 침식부식은 온도에 따라 크게 영향을 받는다. 일반적으로 단상유체 탄소강 배관에서의 최대 침식부식률은 130~150°C 부근에서 나타나며, 2상유체 배관에서는 180°C 보다 낮은 온도에서 화학반응 속도가 느리고 높을때는 금속 표면에 마그네사이트 보호피막이 형성되어 침식부식을 억제하므로 180°C 부근에서 침식부식률이 가장 크게 나타난다.

**배관형상** : 유로형상은 배관의 침식부식에 영향을 미치는 중요한 요소로서 배관형상에 따라 변하는 유체의 교란 정도와 국부적으로 변하는 유속에 의한 운동량의 변화에 따라 침식부식에 미치는 영향이 달라지게 된다. 배관형상에서 침식부식이 심하게 발생하는 곳은 습증기 배관인 추기라인과 유로가 급격히 바뀌는 후단의 굽은관, 오리피스, 제어밸브와 같은 유량 제어기기의 직후단 등과 같은 곳이다. 이와같은 배관의 침식부식손상 예측에는 Keller의 기하학적 형상계수,  $K_C$ 를 사용한다[5]. 그러나 어떠한 형상계수

도 유체가 충돌하여 정체되는 곳의 형상계수인  $f$ (최대 형상계수)을 초과하지 않는다.

유속 : 금속특성과 수질상태에 따라서 차이가 있지만 금속표면에서 유체의 흐름은 산화피막의 형성을 방해하거나 피막에 손상을 준다. 유속은 설계시 재료에 따라 그 한계가 정해져 있으나 관내에 이물질이 끼어 유로가 작아지면 국부적으로 유속이 한계를 초과 할 수 있다. 2상유체에서 유속이 빨라지면 증기와 함께 운반되는 물의 입자가 굵은관이나 밸브 등에 고속으로 부딪치게 될 때 금속은 경화되어 취약하게 되고, 이 충격으로 인해 금속에서 침식부식이 발생하게 되므로 배관의 직경과 유속은 적절하게 선정되어야 한다.

산소 : 배관내 유체의 용존산소 또한 침식부식에 큰 영향을 미치는 요소로서 2상유체에서 보다 단상유체 배관에서 영향을 크게 미친다. 염분과 같은 전해질을 함유한 물에 녹아 있는 용존산소는 수산화철과 반응하여 부식을 촉진시키기도 하지만, 염분이 없는 급수에서는 조직이 견고하고 치밀한 부식 생성물층인 마그네사이트 층을 형성하여 보호피막의 역할을 함으로써 침식부식을 억제해주시기도 한다.

### 3. 침식부식으로 인한 2차측 배관의 침식부식을 예측 이론

#### 3.1 단상유체 배관의 침식부식을 예측

급수계통이나 응축수 계통 등과 같은 단상유체 배관의 침식부식을 예측은 계통의 운전온도, pH, 산소농도, 유속, 배관재료의 크롬과 몰리브덴 함량, 운전노출 시간 및 배관형상에 따라 침식부식에 미치는 변수를 KWU-Siemens 식에 적용시켜 침식부식률을 구한다[5].

$$S_1 = 6.25 \cdot K_c \cdot \{B \cdot e^{NW} \cdot [1 - 0.175(pH - 7)^2] \cdot 1.8 \cdot e^{(-0.118g)} + 1\} \cdot f(t) \quad (10)$$

여기서  $S_1$  [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ ]은 단상유체 배관의 침식부식률을 나타내며, 적용가능한 유체의 pH 범위는  $7 \leq pH \leq 9.39$ 이다. 나머지 Parameter는 다음과 같이 표현된다.

$$B = -10.5 h^{1/2} - 9.375 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0.79 \cdot T - 132.5$$

$$N = -0.0875 h - 1.275 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1.078 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2.15 ;$$

0%  $\leq h \leq$  0.5% 일때,

$$N = (-1.29 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0.109 \cdot T - 22.07) \cdot 0.154 \cdot e^{-1.2 \cdot h}$$

0.5 <  $h \leq$  5% 일때,

$$f(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 : \text{보정계수}$$

$$C_1 = 0.9999934$$

$$C_2 = -0.3356901 \times 10^{-6}$$

$$C_3 = -0.5624812 \times 10^{-10}$$

$$C_4 = -0.3849972 \times 10^{-15}$$

$t$  : 운전노출 시간

운전노출 시간이 200시간 이하 :  $f(t) = 1$

운전노출 시간이 96,000시간 이상 :  $f(t) = 0.79$

$K_c$  : Keller의 기하학적 형상계수

$W$  : 유속(m/sec)

$pH$  : pH 값(모폴린을 사용하는 경우에는 측정값에 0.2를 더함)

$g$  : 산소농도( $\mu\text{g}/\text{kg}$ , ppb)

$h$  : 크롬과 몰리브덴 함유량의 합(%)

$T$  : 온도(K)

#### 3.2 2상유체 배관의 침식부식을 예측

주증기 및 TBN Bypass 계통 등과 같은 2상유체 탄소강관의 침식부식을 예측을 위하여 사용한 식은 Keller의 경험식으로서 배관형상, 재질, 유속 및 습분 등의 효과를 고려한 것이다[6].

$$S_2 = C \cdot f(T) \cdot f(X) \cdot K_c - K_s \quad (11)$$

여기서,  $S_2$  : 재료의 최대 국부손실 깊이,  $\text{mm}/10^4\text{hrs}$

$f(T)$  : 침식부식 손상에 대한 온도의 효과를 알려주는 무차원 값.

$f(X)$  : 침식부식 손상에 미치는 증기 젖음의 영향을 알려주는 무차원 값.

Subcooled Water인 경우 1이며, 2상 혼합물인 경우  $f(x) = (1-x)^{K_r}$ 이다.

$x$  : 증기분율로서  $0 < K_r < 1.0$ 이다. 가장 적절한  $K_r$  값은 0.5

$K_C$  : 유체 흐름에 미치는 Keller의 기하학적 형상계수,  $(\text{mm} \cdot \text{s})/(\text{m} \cdot 10,000\text{hrs})$ .

$C$  : 유속,  $\text{m/s}$

$K_S$  : 침식부식이 관찰되기 전에  $f(T) \cdot f(X) \cdot C \cdot K_C$  값이 넘어야 할 초기값.

Keller에 의하면  $1.0 \text{ mm}/10^4\text{hrs}$ 이다.

#### 4. 침식부식으로 인한 2차측 배관의 수명 예측

일반적으로 원전 2차측 배관의 수명예측에는 설계당시 배관두께, 측정에 의한 배관두께, 가동년수 및 발전소의 정상적인 가동주기를 이용하지만 본 연구에서는 단상 및 2상유체에 관련된 식 (10)과 (11)을 사용하여 실제 배관두께를 예측한다. 이때 탄소강 배관의 침식부식을 평가는 발전소 운전 중 안전을 보장할 수 있는 설계기준 코드에 근거한다.

##### 4.1 배관두께 계산

평가시점의 배관두께는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T = T_{nom} - T_{E/C} \quad (12)$$

여기서,  $T_{nom}$ 과  $T_{E/C}$ 는 각각 설계당시의 공칭 배관두께와 침식부식에 의해 마모된 배관두께를 나타낸다. 잔여 배관두께( $T_R$ )는 현상태의 배관두께( $T_C$ )와 최소 배관허용두께( $T_m$ )의 차와 같다.

$$T_R = T_C - T_m \quad (13)$$

##### 4.2 잔여 배관수명 예측

본 연구에서 배관두께 허용기준치의 초과여부는 압력기준(Pressure Criterion) 방식을 토대로 하여 평가하며, Code에서 요구하는 최소 요구두께는 다음 식으로 구한다[7].

$$T_m = \frac{PD_o}{2(S_E + PY)} + A \quad (14)$$

여기서  $P$  [psig]는 내부 설계압력을 나타내며,  $S_E$  [psi]는 설계온도에서의 내부압력과 이음효율에 대한 재료의 최대 허용응력으로서 A106 GrB 및 A234 WpB인 경우에는 15,000psig이다. 그리고  $D_o$ 와  $A$  [in]는 각각 배관의 외경 및 여유두께를 나타내며,  $Y$ 는 온도와 재질에 따른 계수이다. 이때 온도가 900°F 미만이면  $Y$ 는 0.4이며, 배관지름이 4in 이상이면,  $A = 0.0$  이다. 이에따른 압력기준 예측 잔여수명( $L_r$ ) 산출식은 (15)와 같으며,  $W_R$ 은 연간 침식부식률을 나타낸다.

$$L_r = \frac{T_R}{W_R} \quad (15)$$

#### 5. 평가시스템

##### 5.1 평가절차

원전 2차측 배관의 침식부식 현상을 평가하기 위한 절차는 그림 1의 흐름도에서 처럼 우선 평가해야 할 부위를 선정하고, 침식부식 현상에 영향을 미치는 변수들의 값을 취득한 후 KWU-Siemens 식 및 Keller 식을 이용하여 배관부위의 침식부식률을 계산한다. 그후 평가시점의 배관두께를 공칭 배관두께( $t_{nom}$ ) 및 최소 배관허용두께( $t_{min}$ )와 비교한 후 배관의 잔여수명과 수리/교체여부를 판단한다.

ASME Code Section III의 NB3200에는 국부 막응력(Local Membrane Stress)의 정의 및  $t_{min}$  보다 작은 배관두께의 허용기준이 설정되어 있는데, 평가시의 배관벽 두께( $t_p$ )가  $0.3t_{nom} < t_p < t_{min}$  범위내에 있을 경우, 즉 배관 벽두께가 설계 최소값  $t_{min}$  보다 작지만 배관의 구조적 강도를 유지할 수 있다면 이 배관은 굵이 수리나 교체할 필요가 없다[8]. 본 연구에서는 최소 허용배관두께를 기준으로 배관의 잔여수명을 예측하는 Prototype의 침식부식 손상 평가시스템을 개발하였다.

##### 5.2 평가화면 구성 및 평가결과

침식부식 평가시스템의 화면은 Title Window, 시간에 따른 배관두께의 감소 그래프를 나타내는  $T_c - t$  Curve Window, 평가시점의 배관두께 및 잔여수명을 나타내는 System Status Window, 시스템과 평가 대상부위 및 입력 데이터를 받아들이는 Input Data Status Window, 평가화면 전환 및 종료에 관한 Function Key를 나타내는 Window로 구성하였다.

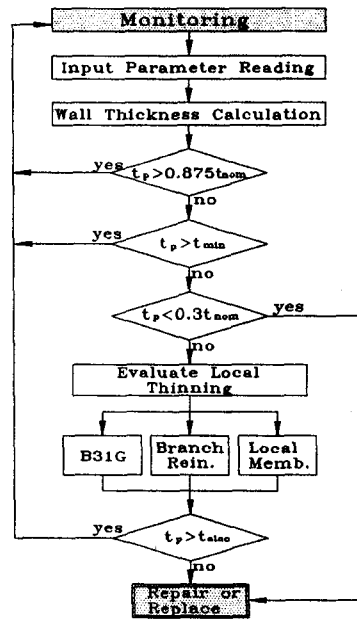


그림 1. 침식부식 평가 흐름도

본 시스템은 침식부식손상 평가시스템의 기본적인 검증을 위하여 건설당시 특정호기의 원자력 발전소 2차측 배관에서 단상유체가 흐르는 Main Feed Water 계통과 2상유체가 흐르는 Main Reheat & TBN Bypass 계통의 배관들 중 침식부식에 가장 민감한 곳으로 예상되는 T-형 및 L-형 배관을 채택하여 평가하였다. 평가시스템을 운영하는데 필요한 변수들은 기존 센서들로부터 취득해야 하지만 여기서는 임의의 데이터를 입력시켰다.

그림 2와 3은 본 평가시스템을 이용하여 얻은 결과물로서 배관설치 후 50,000시간 까지의 단상 및 2상 유체 배관의 두께변화를 보여주고 있으며, 평가시점에서의 배관 잔여수명은 단상 및 2상유체 배관에서 각각 5.6년과 14.5년으로 확인되었다. 또한 동일기기, 동일조건 하에서 평가를 수행하였을 경우에는 단상인 경우보다 2상유체 배관이 훨씬 더 침식부식 손상이 심한 것으로 확인되었다.

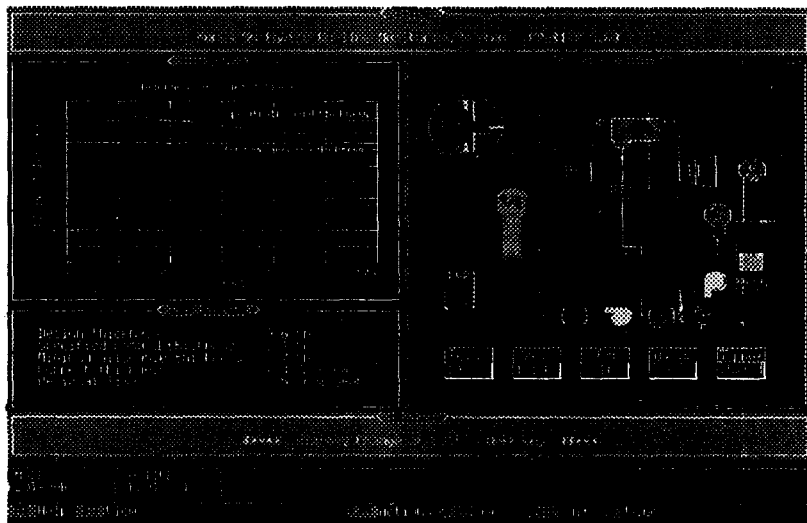


그림 2. 단상유체 배관의 침식부식손상 평가 실행화면

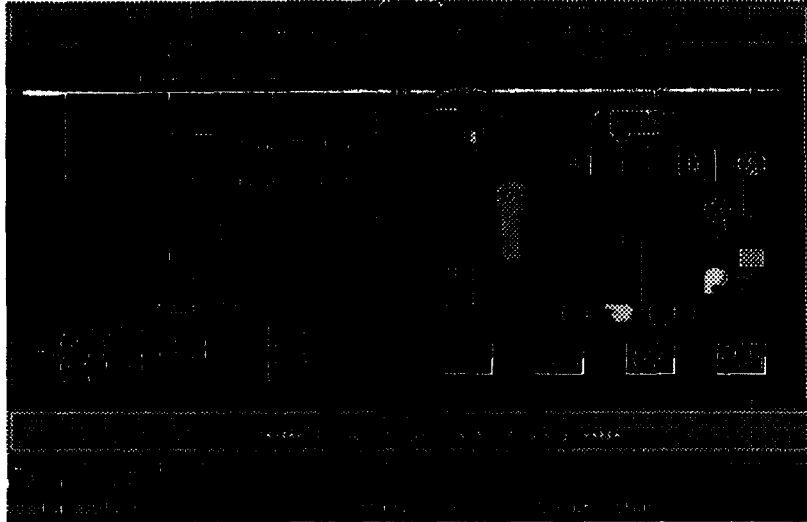


그림 3. 2상유체 배관의 침식부식손상 평가 실행화면

## 8. 결론

원자력 발전소 2차측에서 주로 발생하는 침식부식은 유체의 흐름으로 인하여 가속되는 재질의 부식현상으로서 물과 수증기를 운반하는 배관에서 발생한다. 본 연구에서는 단상 및 2상유체가 흐르는 탄소강 배관의 침식부식손상 예측에 KWU-Siemens 식과 Keller 식을 사용하였으며, 침식부식률과 배관의 잔여수명을 예측할 수 있는 Prototype의 평가시스템을 개발하여 특정호기의 2차측 배관들 중에서 침식부식에 특히 민감한 T-형 및 L-형 배관을 선택한 후 시스템화시켜 검토하여 보았다.

기본적인 평가결과 침식부식률은 대상 발전소 운전개시 후 7.5년에 실시한 배관감육현상 검사와 거의 비슷하거나 약간 큰 것으로 나타났다. 향후 본 연구에서는 최소 허용배관두께 이하인 경우의 배관교체 여부와 평가절차 및 방법 등의 측면을 보완하여 보다 완벽한 시스템을 개발할 예정이다. 이러한 침식부식률 평가시스템을 완성하여 실제 발전소에 적용할 경우 경제적, 기술적 측면에서 상당히 효과적일 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

1. N. Henzel, D. C. Crosby and S. R. Eley, "Erosion/Corrosion in Nuclear Plants Single- and Two Phase Flow Experience, Prediction, NDE Management" Chicago, Illinois, pp109~115, Apr. 1988.
2. G. J. Bignold and I. S. Woolsey, "Mechanistic Aspects of Erosion/Corrosion under Boiler Feedwater Conditions", in Proceedings of the Third Meeting on Water Chemistry of Nuclear Reactors, British Nuclear Engineering Society, London, pp219~226, 1983.
3. V. K. Chexal and J. S. Horowitz, "Flow-Assisted Corrosion in Carbon Steel Piping Parameters and Influences", EPRI-3970NS9 Aug, 1989.
4. G. A. Delp, J. D. Robison and M. T. Sedlack, "Erosion/Corrosion in Nuclear Plant Steam Piping : Causes and Inspection Program Guide Lines" EPRI NP-3944, April, 1985.
5. Von W. Kastner and K. Riedle, "Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion" VGB Kraftwerkstechnik 66, December 1986 pp1171~1178.
6. H. Keller, "Corrosion and Erosion Problems in Saturated-Steam Turbines", AIM Conf., Liege, Belgium, May 22~28, 1978.
7. C. S. Hoemann and E. G. Berak, "Engineering Evaluation of Erosion/Corrosion in Piping System", pp117~122.
8. T. L. Gerber, D. M. Norris and W. F. Lucas, "Acceptance Criteria for Structural Evaluation of Erosion/Corrosion Thinning in Carbon Steel Piping", pp93~101.