



API-581에 의한 정량적 위험기반검사에서 취성파괴에 의한 사고발생 가능성 해석

이현창 · 장서일 · †김태옥

명지대학교 화학공학과

(2005년 3월 24일 접수, 2006년 2월 14일 채택)

Analysis of Likelihood of Failure for the Brittle Fracture through Quantitative Risk Based Inspection using API-581

Hern-Chang Lee · Seo-Il Jang · †Tae-Ok Kim

Dept. of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received 24 March 2005, Accepted 14 February 2006)

요 약

압력설비를 안전하고 효율적으로 사용하기 위하여 본 연구에서는 API-581 절차에 의한 위험기반검사
에서 취성파괴에 의한 사고발생 가능성을 정량적으로 해석하였다. 그 결과, 낮은 온도/낮은 인성파괴와 뜨
임취성에서는 A 충격곡선이고, 낮은 온도와 열처리 전인 상태에서 기술중속계수(TMSF)가 큰 값을 나타
내었고, 855°F 취성에서는 위험도가 무시할 수 있었으나, 시그마상 취성에서는 낮은 온도의 고 시그마인
경우에 TMSF가 큰 값을 나타내어 사고발생 가능성이 매우 높았다.

Abstract – To use pressurized facilities safely and effectively, a likelihood of failure (LOF) for the brittle
fracture was analyzed quantitatively through the risk based inspection using API-581 BRD. We found that
for the case of the low temperature/low toughness and the temper embrittlement, the technical module
subfactor (TMSF) showed high value for the A impact curve, low temperature, and the no post weld heat
treatment. But the risk didn't significantly change at the 855°F embrittlement, and the LOF for the sigma
phase embrittlement showed high value at low temperature of the high sigma.

Key words : Risk based inspection (RBI), Likelihood of failure (LOF), API-581, Brittle fracture, Technical
module subfactor (TMSF)

I. 서 론

최근 선진국을 중심으로 화학공장의 압력설비를 안
전하고 효율적으로 관리하기 위한 새로운 검사방법인
위험기반검사(risk based inspection, RBI) 기법이 개발·
활용되고 있다. 이 기법은 공정 또는 설비의 위험도를
산출하고, 위험도에 의해 공정 또는 설비의 검사 우선
순위 결정과 효율적인 검사방법을 제시할 수 있을 뿐
만 아니라, 안전·환경 및 사업 수행에 장애를 주는 위
험요소를 검토하여 비용-효과적인 방법으로 설비를 관
리하는 방법이다[1,2].

RBI는 수년전 미국기계학회(ASME)에서 비행기의
제트엔진과 원자력의 위험도를 정량적으로 분석하기

위해 처음으로 시도되었으며[3], 이 개념을 석유화학공
업 분야로 개선하여 발전시켰을 뿐만 아니라 가장 활
발하게 연구하고 있는 곳이 미국석유협회(API)이다.

최근에는 RBI 기법을 이용하여 상용화된 프로그램을
개발하여 보급하거나[4], 현장적용을 위한 기준(code)
제정[3,5] 등이 이루어지고 있으나, 정확한 알고리즘 분
석과 위험의 원인분석이 가능하고, 국내실정에 적합한
RBI 프로그램의 개발 및 현장적용 등에 관한 연구는
최근 들어 이루어지고 있으나 아직도 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 설비의 위험 원인분석이 가능하고, 국
내실정에 적합한 새로운 RBI 프로그램을 개발하기 위
한 연구의 일환으로, 정성적 RBI 프로그램 개발[6], 가
연성 및 독성가스의 누출사고 결과분석[7,8], 그리고 탄
소강 및 저 합금강과 스테인리스강의 외부부식에 의한
사고발생 가능성 해석[9,10] 연구에 이어, API에서 제

†주저자:kimto@mju.ac.kr

시된 위험기반검사의 절차인 API-581[2]에 의해 취성 파괴에 의한 사고발생 가능성을 해석하였다. 이를 위해 사고발생 가능성의 주요 인자인 기술중속계수(technical module subfactor, TMSF)를 산출하여 매개변수의 영향을 해석하였다.

II. 이 론

정량적 위험기반검사에서 누출 시나리오(s)별 설비의 위험도(risk)는 사고발생 가능성(likelihood of failure, LOF)과 사고결과 크기(consequence of failure, COF)의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낸다[2,3].

$$(Risk)_s = (LOF)_s \times (COF)_s \quad (1)$$

여기서 COF는 피해면적 또는 피해 손실액으로 나타내고, LOF는 설비의 고장발생 확률이나 고장횟수로, 일반 고장발생 확률에 설비변경계수(equipment modification factor, F_E), 그리고 관리시스템평가계수(management system evaluation factor, F_M)를 곱하여 식 (2)와 같이 조정된 고장발생 확률로 나타낸다.

$$Frequency_{adjusted} = Frequency_{generic} \times F_E \times F_M \quad (2)$$

여기서 F_E 는 단위공정들과 단위공정 내 설비 구성요소들 간의 차이를 반영하는 것으로, 설비의 해당부분에만 적용되기 때문에 각 설비와 그 설비가 운전되는 환경에 따라 영향을 받는다. 즉, 설비변경계수의 중속계수인 기술중속계수, 보편적 중속계수, 기계적 중속계수 및 공정중속계수가 설비의 고장발생 가능성에 영향을 미친다. 이 중에서 기술중속계수는 특정 메카니즘의 효과를 평가하기 위해 사용되는 인자로, 정상 또는 비정상 운전조건 하에서 손상메카니즘(damage mechanism) 선별, 특정환경 하에서 부식률, 검사프로그램의 유효성에 대한 정량화, 그리고 일반 고장발생 확률에 적용할 수 있는 변경계수 산출 등에 사용되며, 검사효율과 검사주기를 결정할 수 있도록 한다. 이때, 손상메카니즘에는 두께감소, 응력부식균열, 고온 수소취식, 노관손상, 기계적 피로, 취성파괴, 라이닝 손상, 외부부식 등이 있다[1,2].

8가지 손상메카니즘 중에서 사용유체, 재질 및 공정조건에 따른 취약성을 반영하는 취성파괴(brittle fracture)는 낮은 온도/낮은 인성파괴(low temperature/

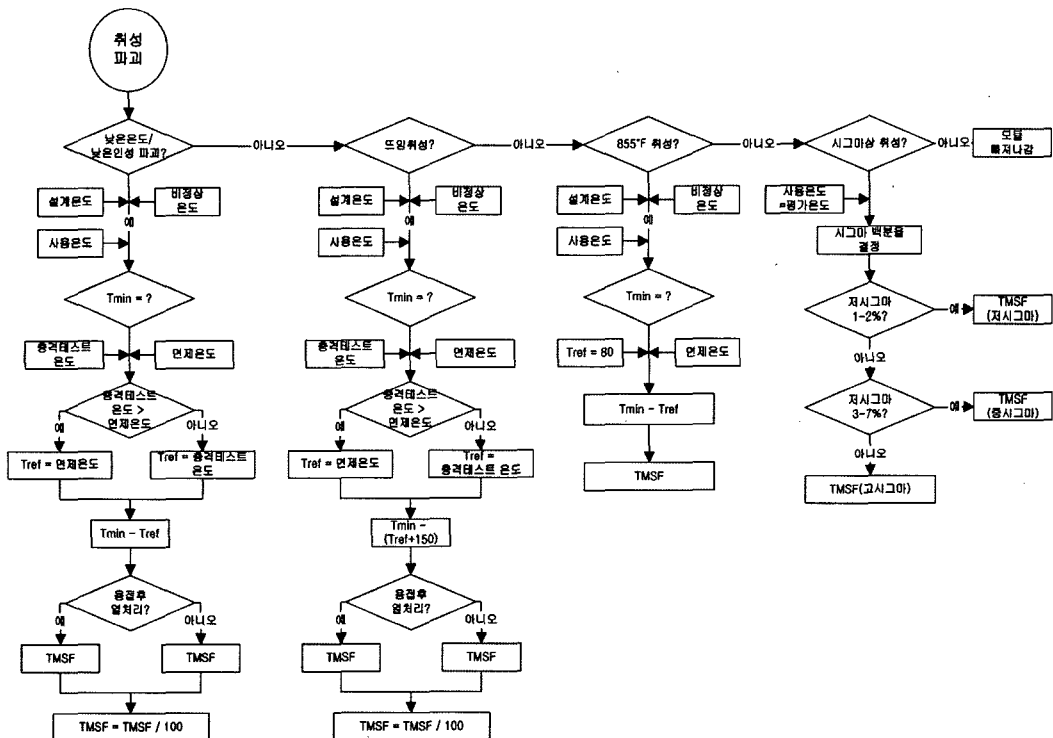


Fig. 1. Algorithm of TMSF calculation for the brittle fracture.

low toughness), 뜨임취성(temper embrittlement), 855°F 취성 및 시그마상(sigma phase) 취성으로 구분되며[1,2], 취성파괴에서 API-581 절차에 의해 작성한 TMSF의 산출순서는 Fig. 1과 같다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1의 알고리즘을 사용하여 취성파괴에서 발생할 수 있는 낮은 온도/낮은 인성파괴, 뜨임취성, 855°F 취성, 그리고 시그마상 취성에 대하여 TMSF를 산출하고, TMSF에 미치는 매개변수의 영향을 해석하였다.

3.1. 낮은 온도/낮은 인성파괴

낮은 온도/낮은 인성파괴는 탄소강 또는 저합금강 물질에서 발생되며, 보통 균열이나 결함에서 시작되는 구조물의 갑작스런 사고를 유발하지만 설계응력이 보통 이와 같은 고장을 방지할 만큼 충분히 낮기 때문에 자주 발생하지는 않는다[11-13]. 그러나 두꺼운 벽을 가진 일부 노후된 설비, 운전중지에 기인하여 낮은 온도

Table 1. Parameter ranges for calculation of TMSF at the low temperature/low toughness fracture.

Parameters	Ranges
Temperature (°F)	10, 50, 100, 150, 200, 250, 300
Thickness (inch)	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
Impact curve	A, B, C, D
PWHT ^{a)}	Yes, No

^{a)}PWHT : post weld heat treated

를 갖는 설비, 또는 개조된 설비 등은 여러 가지 다양한 온도와 강도에 대해 민감할 수 있다.

Table 1은 낮은 온도/낮은 인성파괴에서 TMSF에 미치는 주요 매개변수의 변화범위들을 나타낸 것이다. 이때, 충격곡선(impact curve)은 재질별 기본곡선과 노멀라이징된 곡선을 이용한 ASME Code Section III, Division 1의 Fig. USC-66의 관계를 이용하여 공칭두께(nominal thickness)와 최소설계금속온도(minimum design metal temperature)와의 상관관계를 나타내는 곡선의

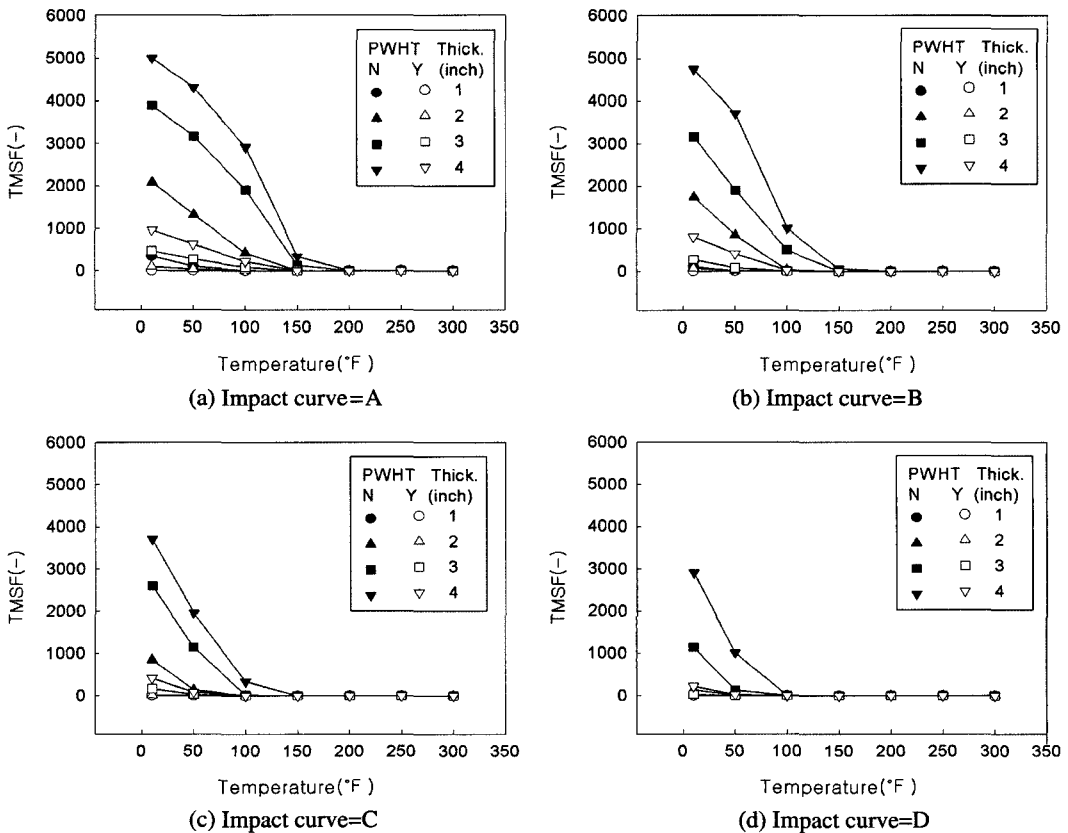


Fig. 2. Effect of temperature, PWHT, and thickness on TMSF for the low temperature/low toughness of brittle fracture.

로[2], 재질종류에 따른 최소설계금속온도는 A>B>C>D의 관계를 가진다.

Fig. 2는 다양한 충격곡선에서 온도와 재질두께의 변화에 따른 TMSF 변화를 나타낸 것으로, 열처리(PWHT) 전의 TMSF는 약 150°F 이하의 온도에서 온도가 증가할수록 급격히 감소하여 150°F 이상에서는 거의 영의 값을 나타내었다.

또한 Fig. 2에서 TMSF는 두께가 증가할수록 증가하였으며, 열처리 전의 경우가 열처리 후의 경우보다 온도에 민감하였다. 그리고 충격곡선에 대한 영향은 열처리 전의 4 inch 두께에서 최고값이 A, B, C, D 충격곡선에 대해 각각 5000, 4800, 3800, 2900을 나타내었는데, 이것은 충격곡선에서 최소설계금속온도가 높아서 운전 온도와의 온도차이가 크기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 뜨임취성

많은 강재(steel)는 650~1070°F 범위에서 오랜 시간

Table 2. Parameter ranges for calculation of TMSF at the temper embrittlement of brittle fracture.

Parameters	Ranges
Temperature (°F)	650, 700, 750, 800, 900, 1000, 1070
Thickness (inch)	1.0, 2.0, 3.0, 4.0
Impact curve	A, B, C, D
PWHT	Yes, No

동안 노출되면 뜨임취성에 의해 인성이 약해지는데, 특히 석유화학분야에서 Cr-Mo 강을 사용하는 경우 강재의 입계(grain boundary)에서 합금성분의 분리로 뜨임취성이 자주 발생된다[14]. 이때, 뜨임취성에 영향을 미치는 매개변수의 변화범위는 Table 2와 같다.

Fig. 3은 다양한 충격곡선에서 TMSF에 미치는 온도와 열처리 여부 및 재질두께의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 TMSF는 A 및 B 충격곡선인 경우 두께 4

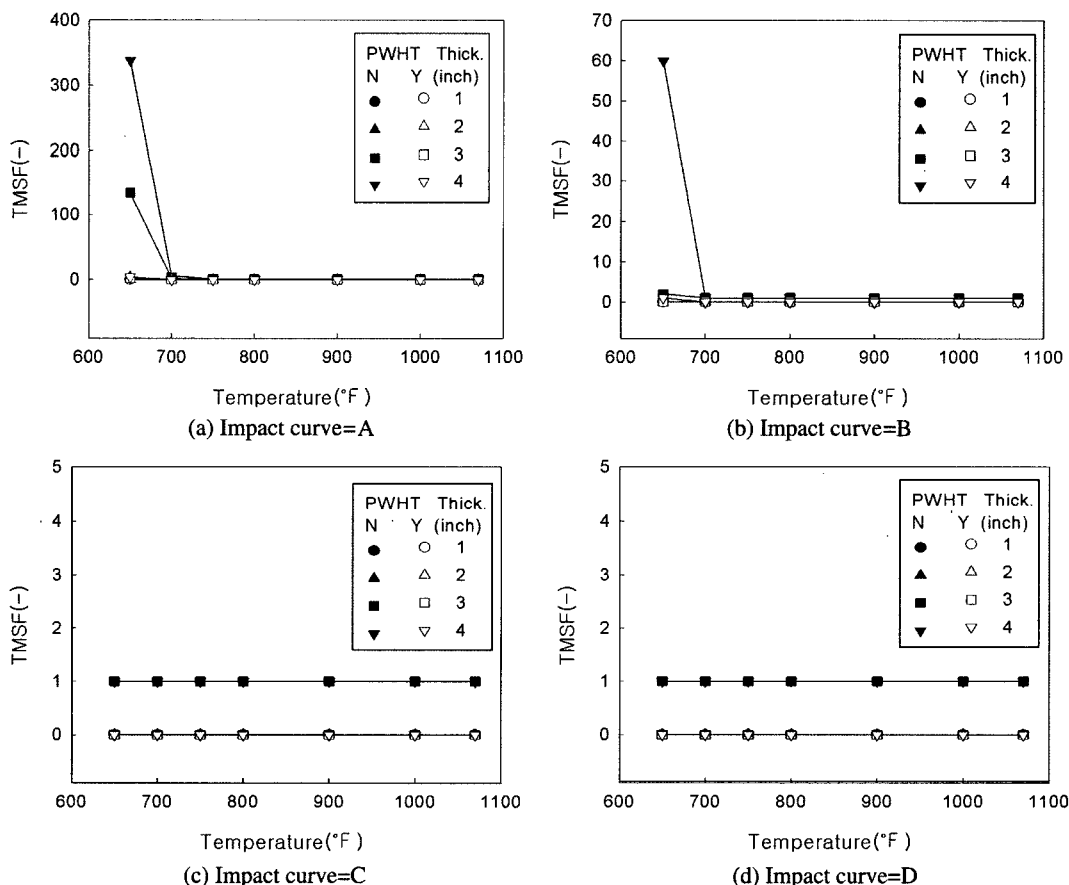


Fig. 3. Effect of temperature, PWHT, and thickness on TMSF for the temper embrittlement of brittle fracture.

inch이고, 열처리 전에서는 700°F 이하에서 민감하였으며, 열처리 후의 경우는 온도에 거의 민감하지 않은 것으로 나타났으나, C 및 D 충격곡선에서는 거의 민감하지 않고, 온도에 무관하게 일정한 값을 나타내었다. 이것은 A 충격곡선인 경우에는 요구되는 최소설계금속온도가 높으나 B, C, D 충격곡선으로 갈수록 요구되는 최소설계금속온도가 낮아지기 때문으로 생각된다.

3.3. 855°F 취성

855°F 취성은 13 wt% 이상의 크롬 함량을 가진 페라이트계 스테인리스강에서 700~1000°F 온도범위에 노출된 경우에 발생하는데, 이 온도범위에서 산출된 TMSF는 온도에 무관하게 약 2의 적은 값을 나타내어 설비의 위험도에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

3.4. 시그마상 취성

시그마상 취성은 페라이트계(Fe-Cr), 마르텐사이트계(Fe-Cr), 그리고 오스테나이트계(Fe-Cr-Ni) 스테인리스강이 1100~1700°F의 온도범위에 노출되었을 때 발생하며, 형성되는 시그마의 생성속도와 양은 합금의 화학적 조성과 이전의 냉각작업에 의존한다[15-17].

Fig. 4는 다양한 시그마(σ) 량에서 온도변화에 따른 TMSF 변화를 나타낸 것으로, TMSF는 저(low) 시그마($1\% < \sigma < 5\%$) 또는 중간(media) 시그마($5\% \leq \sigma < 10\%$)에서는 온도에 민감하지 않았으나, 고(high) 시그마($10\% < \sigma$)에서는 약 200°F 이하에서 최고값을 나타내고, 200~600°F에서 급격하게 감소하여 약 1000°F 이상에서 거의 영의 값에 도달하였다. 이것은 시그마 양이 증가될수록, 그리고 온도가 낮을수록 인성이 약해지기

때문이다.

따라서 약 600°F 이하의 고 시그마를 사용하는 금속에서는 위험도가 크기 때문에 특별한 주의가 필요함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

위험 원인분석이 가능하고, 국내실정에 적합한 한국형 위험기반검사 프로그램을 개발하기 위한 연구의 일환으로, API-581 절차에 의한 위험기반검사에서 다양한 취성파괴(낮은 온도/낮은 인성파괴, 뜨임취성, 855°F 취성, 시그마상 취성)에 의한 사고발생 가능성을 정량적으로 해석하였다. 그 결과, 낮은 온도/낮은 인성파괴와 뜨임취성에서는 A 충격곡선이고, 낮은 온도와 열처리 전인 상태에서 기술중속계수(TMSF)가 큰 값을 나타내었고, 855°F 취성에서는 위험도가 무시할 수 있었으나, 시그마상 취성에서는 낮은 온도의 고 시그마인 경우에 TMSF가 큰 값을 나타내어 사고발생 가능성이 매우 높았다.

참고문헌

- [1] API, *Based Resource Document of Risk Based Inspection : API-580*, American Petroleum Institute, New York, (2001)
- [2] API, *Risk-Based Inspection - Basic Resource Document : API 581*, American Petroleum Institute, New York, (2000)
- [3] ASME, *Risk-Based Inspection : Development of Guidelines*, Centers for Research and Technology Development(CRTD), 20(1), American Society of Mechanical Engineers, (1994)
- [4] DNV, *User Manual for Process Hazard Analysis Software Tools (PHAST)*, Ver 4.1, Des Norske Veritas (DNV) Technical Manual, (1993)
- [5] ASME, *Risk-Based Testing : Development of Guidelines*, CRTD, 40(1), American Society of Mechanical Engineers, (2000)
- [6] 이현창, 유준, 김환주, 김태욱, "API-581에 의한 정성적 위험기반검사(RBI) 프로그램 개발", *안전경영과학회지*, 6(1), 49-60, (2004)
- [7] 이현창, 유준, 김환주, 장서일, 김태욱, "API-581에 의한 위험기반 검사에서 가연성 물질의 사고결과 분석", *한국안전학회지*, 19(4), 60-68, (2004)
- [8] 이현창, 김환주, 신동일, 김태욱, "API-581에 의한 위험기반검사서 독성가스의 누출사고 결과분석", *한국가스학회지*, 8(4), 8-14, (2004)

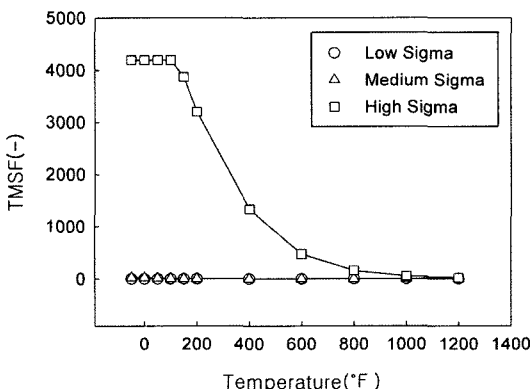


Fig. 4. Effect of temperature and sigma phase type on TMSF for the sigma phase embrittlement of brittle fracture.

- [9] 이헌창, 김환주, 장서일, 김태욱, “API-581에 의한 정량적 위험기반검사에서 탄소강 및 저합금강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성 해석”, *안전경영과학회지*, **6(4)**, 239-248, (2004)
- [10] 이헌창, 김환주, 김태욱, “API-581에 의한 정량적 위험기반검사에서 스테인리스강의 외부부식에 의한 사고발생 가능성 해석”, *안전경영과학회지*, **6(3)**, 99-107, (2004)
- [11] Iwodate, T., M. Prager and M.J. Humphries, *Reliability of New and Older Chrome-Moly Steels for Hydrogen Process Vessels : Part I. Degradation in Service, Part II. Enhanced Performance*, The 1990 Pressure Vessel and Piping Conference, June, PVP-Vol. 201 or MPC-Vol. 31, (1990)
- [12] Iwodate, T., J. Watanabe and Y. Tanaka, “Prediction of the Remaining Life of High-Temperature/Pressure Reactors Made of Cr-Mo Steels”, *Trans. of ASME*, **107**, 230, (1985)
- [13] Viswanathan, R., “Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components”, ASM International, Materials Park, OH, (1989)
- [14] Timmins, P.F., “Predictive Corrosion and Failure Control in Process Operations”, ASM International, (1996)
- [15] Kaieda, Y. and A. Oguchi, “Brittle Fracture Stress of an Fe-Cr Alloy (Sigma Phase) under High Hydrostatic Pressure and High Temperature”, *Trans. of the Japan Inst. of Metals*, **22(2)**, 83-95, (1981)
- [16] Morris, D., “The Influence of Sigma Phase on Creep Ductility in Type 316 Stainless Steel”, *Scripta Metallurgica*, **13**, 1195-1196, (1979)
- [17] Tikhonov, A.S. and V.G. Osipov, *Sigma Phase in Wrought Fe-Cr Alloys*, Consultants's Bureau, New York, (1971)