

## 열교환기의 경년열화 평가

오환섭(경희대학교), 정효진\*(경희대학교), 박상필(경희대학교), 손두익(한국산업안전공단)

### Evaluation on Degradation of Heat exchanger

H. S. Oh(Kyunghee Uni.), H. Y. Jung(Kyunghee Uni.), S. P. Park(Kyunghee Uni.), S. D. Yang(kosha.)

#### ABSTRACT

The Heat exchanger to be used in the place of business that is presented an utility period comes to be long and the problem of the length of life shares by the manufacture course and using environment factor. Consequentl, it is came to the front problem of inspection, repair, exchange, the utility stopping, safety and confidence. As a result the possibility which the large safety accident can happen comes to be high. It leads mostly to the large accedent when the explosion accident happens. to keep this, The system which the regular period passes to disuse the structure is prepared but The phenomenon which Time and the strength characteristic of the material change, namely Deradation. but It can't be a preventable solution by accident to the damage.

Consequentl, This research can take important role to prevent an every kind accident for domestic pressure vessel by evaluating the mechanical characteristic change of materal, the structure safety and residual life etc.

**Key Words :** 경년열화, 부식, 경도, 피로강도, 인장

#### 1. 서론

우리가 일반적으로 사용하고 있는 기기 혹은 구조물 등은 여러 인자에 의한 노화로 수명이 점차 단축된다. 그러나 기계 구조물 등의 강도수명을 지배하는 인자는 매우 다양하고, 특히 재료의 사용조건, 사용이력, 사용시간 등과 더불어 재료의 강도 특성이 변화하는 현상. 즉 경년열화의 영향도 중요한 요인 중 하나라고 생각된다.

재료의 경년열화는 기계나 구조물의 사용온도, 분위기, 그리고 사용시간 등에 따라 그 형태나 정도를 달리하며 수명상의 문제를 발생시킨다. 이에 따라 안전사고의 발생 가능성을 방지하기 위해 검사, 보수, 교환, 사용정지등으로 이어지며 안정성 및 신뢰성에 대한 정확한 평가가 요구 되어 진다.

지금까지 국내 학회에서 발표된 구조물의 경년열화에 대한 논문은 원자로에 적용되는 압력용기를 다룬 것이 다수를 차지하고 있으며, 용접형상에 따른 피로평가와 표면균열이 안정성에 미치는 영향에 관한 연구가 많이 이루어졌다. 하지만 이상의 연구들에서는 단순히 결함평가의 다양한 방법들이 제시 되는 경우가 대부분이었으며, 보다 근본적인 해결

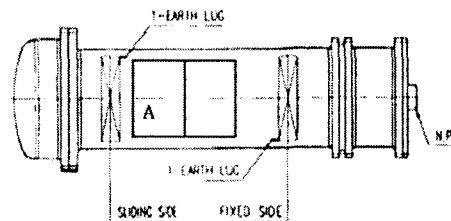
책이라고 할 수 있는 이들의 수명평가는 이루어지지 않았다.

#### 2. 열교환기용 경년열화재의 손상평가

##### 2.1 실험재료 및 시편

###### 2.1.1 실험재료

본 연구에서 압력용기의 경년열화 평가는 대림산업(주)의 열교환기를 대상으로 경년열화의 측정을 위한 시료의 채취를 <Fig 1>의 열교환기 중 A부에서 400? 00m/m의 크기로 채취하였다.



A: 시료 채취부

Fig 1. Heat exchanger

시험편은 동체의 길이방향, 원주방향, 용접부의 경년열화 정도를 비교할 목적으로 Fig 2와 같이 시료에서 채취하였다.

Table 1에 각 시험편의 종류와 용도를 표시하였다.

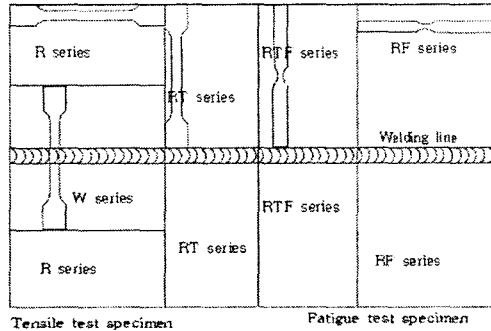


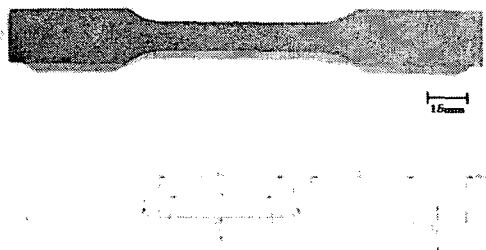
Fig 2. 시험편 및 시료

Table 1. Type of specimen

Symbols	Test specimen	비고
R	Tensile test specimen	Drum 1이 방향 시험편
RT	Tensile test specimen	원주방향 시험편
W	Tensile test specimen	용접부 시험편
RF	Fatigue test specimen	길이방향 시험편
RTF	Fatigue test specimen	원주방향 시험편
WF	Fatigue test specimen	용접부 시험편

### 2.1.2 시험편의 형상 및 치수

경년열화 정도가 하중방향에 따라 재료의 강도에 어떻게 나타나는가를 측정하기 위하여 정적인장강도와 항복강도의 시험을 위한 시험편은 Fig 3의 (a)와 같으며, 반복하중에 대한 피로정도를 측정할 목적으로 Fig 3의 (b)와 같은 시험편의 형상으로 가공하고 시험하였다.



(a) Tensile test specimen

(b) Fatigue test specimen

Fig 3. Shape of test specimen

## 2.2 표면 부식 및 부식 메커니즘의 규명

### 2.2.1 표면 부식 상태

표면부식은 재료의 응력단면감소, 응력집중 등을 유발하므로 부식의 메커니즘을 규명하고 정도를 측정하는 것은 매우 중요하다.

가. 거시적 관점에서 표면 손상의 관찰

열교환기의 내부부식은 전반적으로 일정하게 이루어진 것이 아니라 용기의 아래분에서 집중적으로 발생하고 있다. 이와같은 현상은 사용시 에어포켓이 형성되었거나 기타요인으로 냉각수와 접촉이 있는요인으로서 가동중 검사로서 주의깊게 살펴보아야 할 부분이다.

부식정도는 1mm에서 최고 약 6mm까지 부식되어 있는 것을 관찰 할 수 있다.(Fig 7 참조)

Fig 4는 부식정도를 원주방향으로 측정한 예이다. 부분적으로 예리한 노치를 형성함을 알 수 있고 응력집중의 영향을 고려해야 함을 시사하는 부분이다.

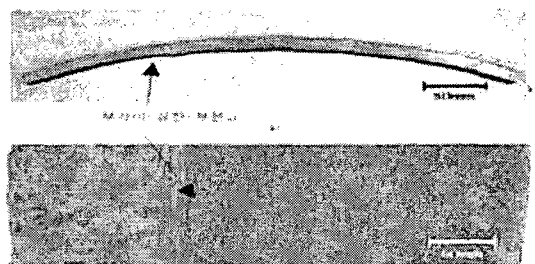


Fig 4 부식에 의한 표면손상

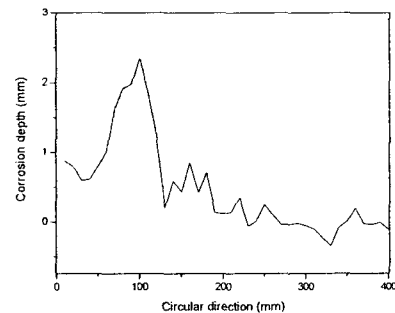


Fig 5. Measurement of corrosion depth

## 2.2.2 금속조직학적 관점에서 부식계면 관찰

Fig 6의 (a), (b)는 열교환기의 단면에서 내부측의 부식형상을 금속 현미경으로 관찰한 결과들을 표시한 것이다. 부식 단면을 보면 pit상의 표면부식이 생겨있고 그 크기는 100 $\mu$ m의 작은것에서 300 $\mu$ m ~ 500 $\mu$ m 용력 집중원으로서 의미가 있음을 알 수 있다. 이들의 크기가 같은 의미는 저탄소강(SM 15C)의 경우 피로한도에 영향을 미치지 않는 최소결함의 크기는 약 100 $\mu$ m정도임을 고려하여 용력집중원으로서의 의미뿐만 아니라 피로한도 저하요인이 됨을 알 수 있다.

(c)는 두께 방향의 단면조직 사진을 표시한 것이다. 중앙부의 Grain size가 조대화 되어 있으나 이는 소재의 제조과정에서 내부냉각속도가 표면보다 늦어서 생긴 것으로 사료된다.

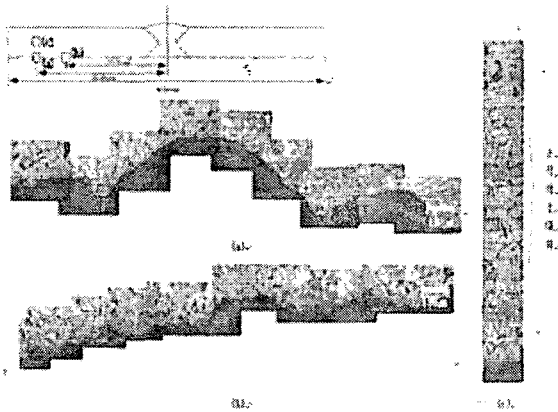


Fig 6. Pit상 표면부식과 금속조직

## 2.2.3 부식 메카니즘의 규명

Table 2, 3, 4, 5는 Fig 6의 (a)내측부와 (c)의 외측부에서의 EDX분석 결과를 표시한 것이다.

각 분석 결과 모재부와 용접부 모두 분석결과 Cl이 검출되었다. 따라서 본 용기의 부식원인은 Cl에 의한 화학부식이라고 생각된다.

Table 2 R(out) 모재 표면부(외측) EDX 분석결과

Element	Weight%
C	0.4%
O	0.2%
Al	0.5%
Si	1.7%
Mn	0.07%
Fe	72.6%
Sr	1.9%
Total	100.0%

Table 3. R(in) 모재 내측부 EDX 분석결과

Element	Weight%
C	0.4%
O	0.2%
Al	0.5%
Si	1.7%
Mn	0.07%
Fe	72.6%
Sr	1.9%
Total	100.0%

Table 4. Welding(out) 용접부의 외측부 EDX 분석결과

Element	Weight%
C	0.17%
Al	0.56%
Si	1.7%
Mn	0.08%
Fe	87.31%
Sr	0.15%
Sr	1.03%
Total	100.0%

Table 5. Welding(in) 용접부의 내측부 EDX 분석결과

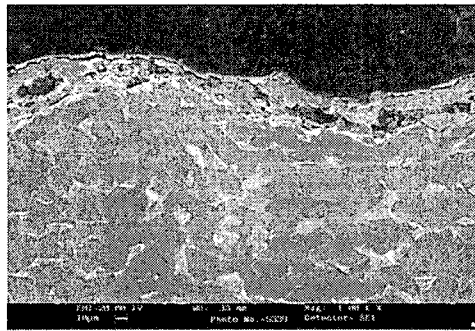
Element	Weight%
C	0.5%
O	20.4%
Si	0.2%
Cl	0.3%
Mn	0.03%
Fe	67.9%
Total	100.0%

## 2.3 노후용기의 경년열화 평가

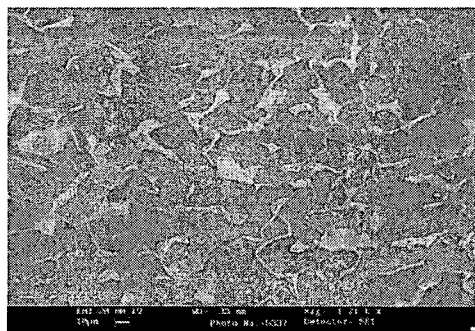
### 2.3.1 반복 가열로 인한 연화현상

Fig 7의 (a)는 열교환기 내부의 부식된 단면의 금속조직 (b)는 두께의 중간부분의 금속조직 (c)는 외측 표면부의 금속조직을 SEM으로 관찰한 것이며 비교하면 (b)의 grain size가 조대화 되어있다. 그러나 (b)의 grain의 조대화는 강관의 생산과정 등 내부의 냉각속도가 늦은 mass effect의 영향이라 생각되고 사용온도를 기준으로 볼때 grain의 성장에는 영향이 없다고 생각된다.

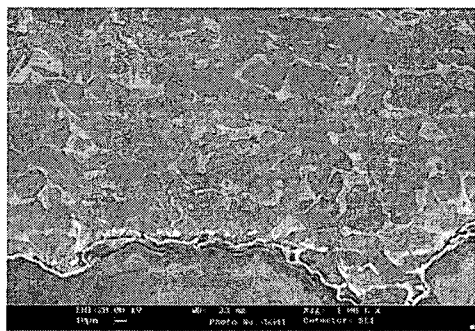
Fig 7 (a)의 부식 경계부분을 중심으로 grain boundary상에 석출물의 존재는 확인할 수 없다. 또, 하중작용 방향으로 결정립의 변형도 찾아볼 수 없다. 따라서 결정의 조대화와 석출물의 정도 및 결정립의 변형 등을 확인할 수 없으므로 사용온도에 의한 반복가열로 인한 연화현상은 없다고 판단된다.



(a) outer surface of shell



(b) middle point of shell



(c) inner surface of shell

Fig 7. Feature of microstructure at the Shell section

### 2.3.2 경도치에 의한 연화 메커니즘

열교환기의 경년열화 평가방법으로 경도측정법은 유효한 수단이다. 경년열화의 현상으로서 micro-vickers 경도를 측정하고 그 결과를 표면 부식 사진과 함께 Fig 8에 표시 하였다. Hv<sub>a</sub>는 부식이 거의 생기지 않는 부분의 경도이고 Hv<sub>b</sub>는 부식이 심한 부분의 경도이다.

부식이 생기지 않는 a부의 경도를 기준으로 볼 때 부식이 심한 b부분의 경도비는 0.84로서 경도치가 떨어지므로 부식면이 연화되었음을 보여주고 있다.

결정의 조대화나 편석이 관찰되지 않았지만 경도치의 저하는 알 수 있다.

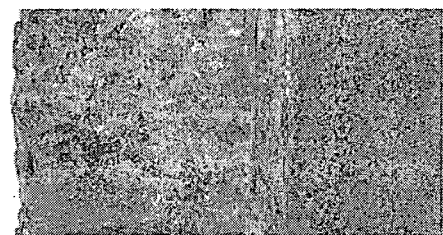
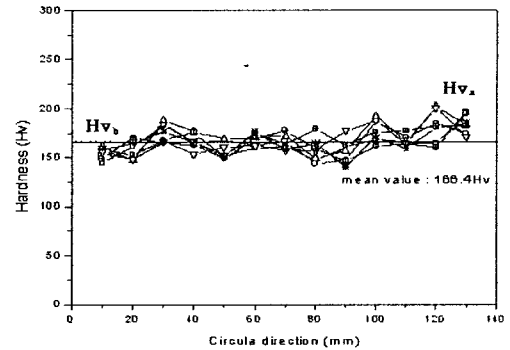


Fig 8. Hardness distribution circular direction of specimen by micro vickers hardness test

## 2.4 경년열화재의 피로강도 거동

### 2.4.1 S-N 곡선과 피로강도 거동

Fig 9는 경년열화재의 S-N curve를 나타낸 것이다. 여기서 RTF재는 원주방향의 시험편이고 RF재는 길이방향의 시험편, WF재는 용접부를 포함하고 시험편으로

- 응력  $\sigma_s$  와 반복수  $N_f$  와의 관계는 인장강도를 중심으로 표시하면

$$\begin{aligned} \text{RTF재} : \sigma_s &= 103.2 - 14.1 \log N \\ \text{RF재} : \sigma_s &= 78.8 - 9.1 \log N \\ \text{WF재} : \sigma_s &= 68.1 - 6.7 \log N \end{aligned} \quad (1)$$

-  $10^4$ 수명의 시간강도를 기준으로 표시하면

$$\begin{aligned} \text{RTF재} : \sigma_n &= 42 - 14.11 \log N \\ \text{RF재} : \sigma_n &= 42 - 9.11 \log N \\ \text{WF재} : \sigma_n &= 42 - 6.7 \log N \end{aligned} \quad (2)$$

피로한도  $\sigma_s$  는 RTF재의 경우  $\sigma_{RTF} = 200 \text{MPa}$ , RF재의  $\sigma_R = 240 \text{MPa}$ , WF재의  $\sigma_s = 280 \text{MPa}$  이고 WF재 > RF재 > RTF재의 순서이다.

RTF재, RF재, WF재의 피로강도는 low cycle 영역에서는 거의 차이가 없으나 high cycle 영역에서는 동일응력에서도 반복수 의존성이 크게 나타나고 있다. 따라서 경년열화는 원주방향의 시료인 RTF재가 가장 크게 나타나고 그 다음이 길이방향의 시료인 RF재에서 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 압력용기

의 제작시 강판의 Rolling 방향을 어떻게 고려하였는가를 설계에 명시하여야 한다. 또 용접부에서는 피로강도가 가장 높게 나타나는 것으로 보아 본 압력 용기의 설계조건과 사용조건을 고려할 때 연화되지 않았다고 생각된다. 그러나 연화인지 취화인지 하는 문제는 초기재료의 물성치를 파악하는 것이 중요하지만 현재로서는 피로강도가 현저히 떨어지므로 연화로 간주하는 것이다.

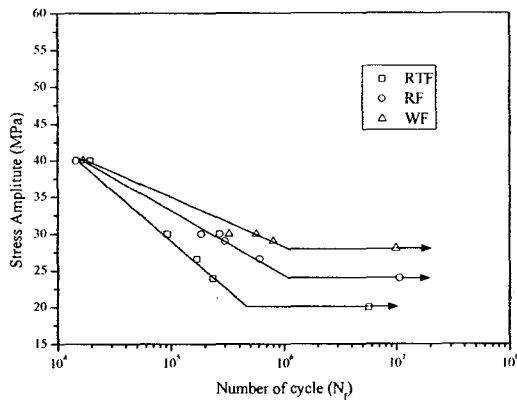


Fig 9. S-N Curve

#### 2.4.2 인장강도와 피로한도 거동

Fig 9 및 Table 6은 경년열화재의 S-N Curve와 기계적 성질의 거동을 표시한 것으로 RF재, RTF재, WF재 모두 항복강도나 인장강도가 유사하다.

인장강도에 대한 피로한도의 비  $\sigma_w = \sigma_B$ 는 RF재가 0.52, RTF재 0.44, WF재가 0.60으로 나타났다. 일반적으로 저탄소강의 경우 피로한도  $\sigma_w$ 나 인장강도  $\sigma_B$ 와의 비는

$$\sigma_w \cong 0.5\sigma_B, \quad \sigma_B < 1400 \text{ MPa} \quad (3)$$

임을 고려하면 RTF재가 RF재에 비하여 피로강도측면에서 볼때 연화되었다고 생각된다. 또 WF재의 용접부는 모재에 비하여 경화된 듯하나 초기 강도에 대한 데이터를 구하는 것이 현시점에서 불가능하므로 경년열화재의 평가를 위하여 향후 체계적 연구가 요망된다.

Table 6. Data of tensile and fatigue test

Series	Yield strength, $\sigma_y$ (MPa)	Ultimate strength, $\sigma_B$ (MPa)	Fatigue limit, $\sigma_w$ (MPa)	Strength ratio, $\sigma_w / \sigma_B$
Base metal	220	415 ~ 50		Ref. Data
R, RF	320	450	240	0.52
RT, RTF	315	453	200	0.44
W, WF	317	470	280	0.60

#### 2.5 인장 및 피로파면 해석

파면해석의 목적은 high cycle 피로영역에서 노후 열교환기의 경년열화의 메카니즘을 규명할 목적으로 경년열화의 특징인자중의 하나인 cavity의 확인하고, Crack의 발생 및 전파거동의 양상을 확인하는 것이다.

Fig 10은 인장시험 결과의 파면을 SEM으로 관찰하고 대표적인 예를 그 결과로 표시한 것으로 Fig 10의 (a), (b), (c), (d) 모두에 cavity가 확인됨을 알 수 있다.

Fig 11, 12, 13은 RF재, RTF재 및 WF재의 피로파면의 대표적인 예를 표시한 것으로 cavity가 관찰되는 것은 RF재, RTF이고 용접된 WF재는 cavity가 관찰되지 않았다.

RF재와 RTF재의 경우 표면에서 여러개의 균열이 발생·성장하고 이들의 합체되는 시점에서 급격한 최종파괴를 연결됨을 알 수 있다. 그러나 WF재의 경우 Fig 13의 (a)에서 1개의 균열이 발생하여 전파하고, (e)에서 최종파괴에 이르는 양상을 보여주고 있다. 따라서 경년열화재의 피로한도 저하 메카니즘은 내부에 존재하는 cavity가 응력집중원으로서 균열발생 및 성장원으로 역할을 하고 있다고 판단된다. 또 용접부와 모재부의 강도비가 다른것은 추후 검토가 요망된다.

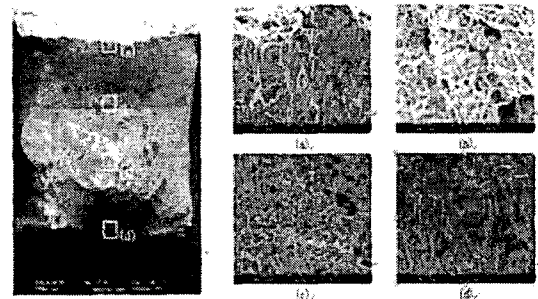


Fig 10. Micro-fractography of tensile test specimen by SEM

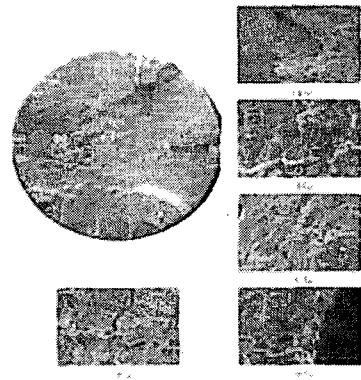


Fig 11. Micro-fractography of fatigue test specimen by SEM ( $\sigma = 30 \text{ MPa}$ ,  $N_f = 1.7 \cdot 10^4$ , R series)

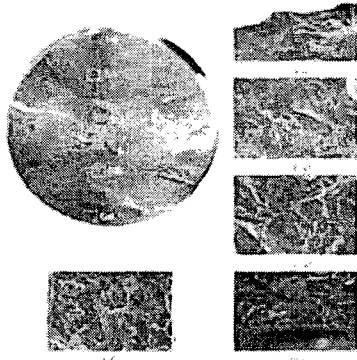


Fig 12. Micro-fractography of fatigue test specimen by SEM(  $\sigma=30MPa$ ,  $N_f=3.0 \times 10^5$ , RT series)

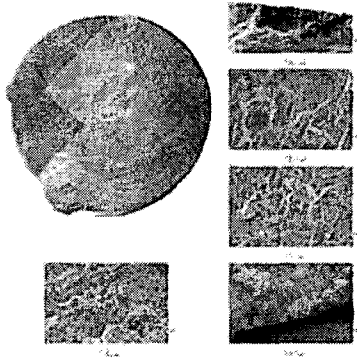


Fig 13. Micro-fractography of fatigue test specimen by SEM(  $\sigma=30MPa$ ,  $N_f=8.1 \times 10^5$ , W series)

### 3. 결론

본 논문에서는 압력용기류 기계구조물의 사용시간이 길어짐에 따른 재료의 기계적 성질 변화의 검출 및 잔여수명의 평가 등을 통한 구조물의 안전성 확보를 목적으로 사용중인 열교환기의 경년열화를 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) CI에 의한 표면부식과 부식으로 인한 표면에 pit상 결함이 생기고 국부적으로 표면부식이 심한 부분이 존재하고, 표면의 pit상 부식의 깊이가 두께의 1/2을 초과하는 곳도 있다. 이와 같은 국부부식과 표면의 pit상 결함과 내부 Cavity 피로강도의 거동 등은 응력집중원으로서 피로균열의 발생, 전파거동의 영향을 끼치는 주요 인자들임으로 경년열화와 잔여수명평가의 체계적인 연구가 필요하다.

(2) 강도비가 길이방향과 원주방향이 다르다는 점은 경년열화 인지 이방성의 영향 인지는 불확실하나 추후 연구를 통하여 어느 방향의 시료를 검사대상으로 해야 할 것인지와 pit상 표면결함이 크기와 단위

면적당 수 등을 검사대상으로 검토하는 것이 바람직하다.

(3) 피로한도가 용접부 > 길이방향 > 원주방향의 순으로 나타났고 용접부를 제외한 모재부에서는 파면에 Cavity가 관찰되고 있다.

(4), 상기의 체계적인 연구와 검사기준 설정을 위해 설계자, 관리자, 사용자와 연구자가 함께 하는 압력용기 안전위원회를 상설로 하는 협력교류체제가 필요하다.

### 참고문헌

- (1) Madox, S., 1975, "An Analysis of Fatigue Crack in Fillet Welded Joint", International Journal of Fracture, Vol.11, No.2 pp. 221-243
- (2) Bowness, D and Lee, M., 2000, "Prediction of Weld Toe Magnification Factors for Semi-elliptical Crack in T-butt joint", International Journal of Fatigue, Vol.22, pp. 369-387
- (3) Newman, J. and Raju, I., 1981, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185-192
- (4) Fett, T., 1987, "An Extension of the Newman-Raju Formula", International Journal of Fracture, Vol.33, pp. R47-R50
- (5) Yuuki, R and Yoshida, T., 1986, "Fatigue Life Prediction System for Structures", Journal of High Pressure Institute, Vol.24 No.3, pp. 115-123
- (6) 한국가스안전공사, 2001. 6 월압력용기 기준
- (7) 한국가스안전공사, 199. 4 월압력용기 검사 실무지침
- (8) 한국기계연구원, 2000. 7 월압력용기의 노후도 진단 및 평가기술
- (9) 오환섭, 1989 피로강도에 대한 미소표면 결함의 영향? 한국자동차공학회 Vol.11, No.1
- (10) P. Paris, F. Erdogan, 1963, "Critical Analysis at crack Propagation Laws", The Journal of Basic Engineering, ASME, Dcember, pp. 528-534
- (11) E. K. Waker, 1970. "Effects of Enviornment and Complex", Load History on Fatigue Life, ASTM STP 462, pp. 1-14
- (12) 오환섭, R. Yuuki, 1992, "BEM을 이용한 크랙전파해석 및 수명예측에 관한 연구? 경희대학교 재료과학 연구소 논문집, Vol. 5 pp. 21-30
- (13) 高温構造安全技術組合, 1982, BWRI 冷却系配管の健全性評價にウある研究
- (14) 오환섭, 이병권, 1998, 회전급힘용력하에서 환병제의 미소표면균열의 성장거동해석
- (15) JWS. 1982, Fractographic Atlas of steel Welsmenets. 黒木出版社