

전기저항 용접강관의 홈부식에 미치는 유동 해석

김용[†]·장혁*·류덕희*·김재성*·이보영**·부준홍**

Analysis of Flow on Grooving Corrosion at the Weld of a Carbon Steel pipe made by Electrical Resistance Welding

Yong Kim, Hyeuk Jang, Duck Hee Ryu, Jae Seong Kim, Bo Young Lee
and Joon Hong Boo

Key Words : Viscous sublayer(점성저층), Laminar(층류), Turbulent(난류), Water hammer(수격현상), Grooving corrosion(홈부식) ERW(전기저항용접), Dissolved oxygen(용존산소)

Abstract

Lots of researches were gone already about grooving corrosion mechanism of ERW carbon steel pipe. But there is seldom study for water hammer happened by fluid and acceleration of corrosion rate by increased flow velocity. Therefore, in this study carried out the analysis based on hydrodynamic and fracture mechanics. Analyzed stress that act on a pipe using ANSYS as a program, and also FLUENT and STAR-CD were used for flow phenomenon confirmation. As the result, fatigue failure is happened by water hammer and corrosion rate was increased because of turbulent flow.

기호설명

R_e	: Reynolds 수
f	: 마찰계수
\bar{u}	: 평균유속(m/s)
u^*	: 전단응력속도(m/s)
K	: 체적탄성계수(kg/m ²)
E	: 관의 영률(kg/m ²)
V_p	: 압력파의 전파속도(m/s)
σ_v	: 폰미제스응력(MPa)
τ_o	: 벽면전단응력(MPa)
Υ	: 비중량(kg/m ³)
μ	: 점성계수(kg/ms)
ρ	: 밀도(kg/m ³)
v	: 동점도(m ² /s)

1. 서론

전기저항용접(ERW: Electric Resistance Welding)은 고주파 전류로 피용접재를 가열시킨 후, 압축력을 가하여 접합하는 용접 방법이다¹⁾. 전기저항용접 강관을 해수, 공업용수 및 음용수 등의 배관으로 사용할 때 용접선을 따라 깊은 “V”형의 홈 형상으로 국부적으로 심하게 부식되는 현상을 홈부식 또는 구상부식(Grooving Corrosion)이라 하는데 이 부식은 실제 우리 생활주변에서 자주 관찰되는 부식 유형중의 하나이다. 일반적으로 홈부식은 조관 과정^{2,3)}, 전기화학적 차이^{2,5)}, 그리고 황 함유량의 고저³⁾로 인해 발생된다고 알려져 있다. 그러나 지금까지 발표된 결과들은 홈부식의 발생 기구에 대한 사항만을 지적하였을 뿐, 홈부식틈새로 인해 부차적으로 발생하는 유체 흐름의 변화와 수격 현상으로 인한 응력 변화에 대한 연구는 전무한 실정이다. “V”형의 부식틈새에서의 유동은 그 부위에서 와류(vortex)를 일으켜 기계

[†] 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원
E-mail : welding@empal.com
TEL : (02)300-0057 FAX : (02)3158-4429

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

적 침식(Erosion)을 수반할 가능성이 있으며, 사용 환경에서 일반적으로 걸리는 수압으로 인한 원주 방향의 응력이 부식이 진행된 부위에서 V-노치 효과로 인해 반복피로 응력이 발생되어 균열의 전파속도가 촉진될 가능성도 충분하다.

따라서 본 연구에서는 실제 누수에 의해 손상된 아파트 수도용 탄소강관을 분석하여 전기저항 용접강관의 흠부식에 미치는 유동현상에 대한 유체해석 및 수격현상으로 발생하는 응력에 대해 유한요소해석을 실시하였다. 정확한 해석을 위해 실측 모델링을 하였으며 부식의 진행 정도에 따른 유동 변화 및 폰미세스 응력의 정도를 확인하였다.

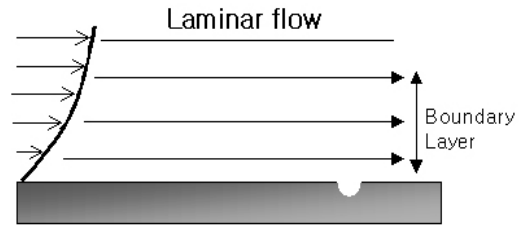
2. 배관내의 유동 특성

2.1 유속에 따른 부식 속도의 변화

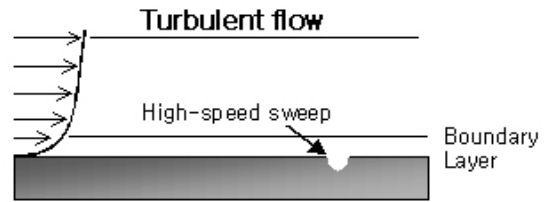
Fig.1과 같이 용액과 금속과의 계면에는 점성저층(Viscous sublayer)이라고 부르는 금속면에 밀접해서 거의 움직이지 않는 얇은 층이 있는데 용존산소가 금속면에 도달하기 위해서는 이 층을 확산에 의해서 통과해야만 한다. 정지액 속에서는 이 층의 두께가 1mm정도가 되지만, 물이 움직이면 수십 분의 1 이하로 감소해서 산소의 확산은 쉽게 된다. 일반적으로 파이프 내의 유체유동이 비압축성 유동일 때, 유동(층류 또는 난류)의 특성은 레이놀즈(Reynolds)수, Re , 라는 무차원 변수 값에 따라 결정된다. 통상적으로 $Re < 2000$ 이면 층류이고 그 값 이상에서는 난류가 되며, 이는 식(1)을 통해 구할 수 있다⁶⁻⁸⁾. 식(1)을 이용하여 층류유동을 하는 이론적인 최고 유속을 구하면 그 속도는 약 0.05m/s가 나오며, 그 이상의 속도에서는 난류유동을 하게 된다. 통상적으로 수도용 강관에 흐르는 물의 유속은 1.0m/s 이상으로 이는 금속면의 부식작용이 용존산소의 확산으로 인하여 쉽게 이루어진다는 말과 같다.

$$Re_e = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} \quad (1)$$

유체와 금속간의 접촉으로 인한 부식은 식(2)와 같이 전단응력속도(Shear stress velocity)를 계산함으로써 그 정도를 파악할 수 있으며, 이 값은 벽면전단응력(Wall shear stress)과 마찰계수의 함수

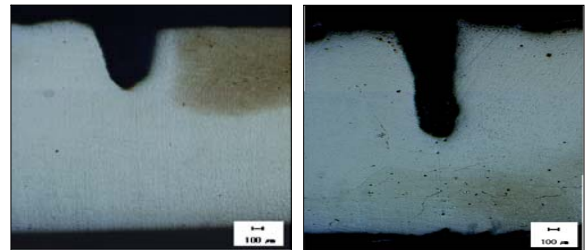


(a) Boundary layer thickness at laminar flow



(b) Boundary layer thickness at turbulent flow

Fig. 1 Differences of layer thickness according to flow conditions



(a) (b)

Fig.2 Cross-section micrograph of started corrosion (a) and penetrated until a middle of thickness on the pipe (b) for the modeling of fluid analysis, en-etched

로 나타낼 수 있다. 이는 식(3)부터 식(5)를 이용하여 계산 가능하다⁹⁻¹⁰⁾. 또한 식(6)을 이용하여 점성저층의 두께가 계산되며¹¹⁾, 이 두께가 작을수록 용존산소의 확산이 쉽게 되어 부식이 빨라진다고 할 수 있다.

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (2)$$

$$\tau_o = \frac{1}{2} f \rho \bar{u}^2 \quad (3)$$

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

$$f_{turbulent} = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

$$\delta_l = 5 \left(\frac{\nu}{u^*} \right) \quad (6)$$

2.2 배관내의 수격현상

배관내의 유체흐름은 급격한 밸브 작동으로 인하여 유체의 운동에너지가 압력에너지로 변화되어 압력상승이 일어나고, 이때 상승된 압력은 압력파가 되어 관로를 왕복하면서 점차 감쇠되어 가는데 이러한 현상을 수격현상(water hammer)이라 한다¹²⁻¹³⁾. 일반적으로 수격이 일어나는 장소는 한정되어 있지만, 가벼운 수격이라도 늘 반복되는 경우, 관, 밸브 등은 손상이 현저하게 빨라져 서서히 누수를 일으키기도 한다.

이러한 수격 현상시 압력파의 전파속도 및 그에 따른 최대 수격수두는 Allievi¹⁴⁾에 의해 제안된 식(7) 및 식(8)을 이용하여 구할 수 있으며, 수압으로 걸리는 압력과 그에 따라 파이프에 걸리는 전단 변형에너지는 폰 미세스 응력(Von Mises stress)으로 표현할 수 있으며 그 값은 식(9)에 의해 계산된다¹¹⁾.

$$H = \frac{V_P \cdot \bar{u}}{g} \quad (7)$$

$$V_P = \sqrt{\frac{gK}{\gamma(1 + \frac{KD}{Et})}} \quad (8)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (9)$$

3. 해석 방법

3.1 유동해석

D.A. Jones¹⁵⁾는 스테인리스강의 공식(pitting) 등과 같은 국부부식의 경우는 침식부식(erosion corrosion)의 원리에 의해 발생하고 이러한 침식부식은 난류유동의 경우에 나타난다고 발표하였다. 이것은 즉 Fig 1과 같이 국부적으로 부식된 곳에서 와류 형성으로 인해 경계층 두께가 감소되어 용존산소가 금속면과 도달하기 훨씬 수월해 진다는 것을 말한다.

따라서 본 연구에서는 부식이 발생되지 않은

건전한 강관과 부식이 진행된 강관과의 유체흐름을 비교해석하여 홈부식으로 인한 경계층 두께의 변화 및 침식부식 현상을 확인하고자 하였다. 해석 값에 대한 신뢰도를 명확히 하기 위하여 실제 손상된 배관을 참조하였으며, 상용 열유체해석 프로그램인 STAR-CD 3.0을 사용하여 해석하였다. 해석을 위해 내경 44mm, 길이 1m의 강관에 수돗물이 가득 찬 상태에서 1.8m/sec의 속도로 흐르고 있다고 가정하였다.

3.2 응력해석

실제 홈부식이 일어난 여러 종의 강관을 살펴본 결과, Fig. 2와 같이 부식 폭은 약 0.5mm로 실제 용접부 전체가 부식되었으며 부식 진행 깊이만 변화되고 있는 것을 관찰하였다. 이를 참고로 폭은 0.5mm로 일정하게 하고 깊이만 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm 및 2.5mm로 달리하여 파손에 영향을 주는 폰미세스 응력의 변화를 해석하였다. 해석은 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 이용하였으며, 실제 부식은 "U" 형상을 띠지만 단순 해석을 위하여 V-노치 형상으로 모델링 하였다.

이후 수격현상으로 인해 순간적으로 배관에 걸리는 폰미세스 응력을 구하기 위하여 식(7)부터 식(9)가 사용되었다. 해석결과는 KS D 3507에 제시된 배관용 탄소강관의 규격 값과 비교되었으며, 실제 배관에 걸리는 원주방향 응력(σ_{real})을 안전율을 고려했을 때의 배관의 허용응력(σ_{allow}) 값과 비교하여 사용중 수압으로 인한 균열 발생 가능성을 검토하였다.

Table 1 Analysis conditions in this paper

K (kg/m ²)	3.15×10^8	t (mm)	3
E (kg/m ²)	2.10×10^{10}	D (mm)	44
Υ (kg/m ³)	1000	ρ (kg/m ³)	1000
μ (kg/ms)	1.002×10^{-3}	v (m ² /s)	1.002×10^{-6}

4. 해석 결과

4.1 유동 변화에 따른 부식 가속화

지금까지 유속과 부식률과의 관계에 대해 발표된 여러 결과들을 보더라도 유속의 증가는 부식

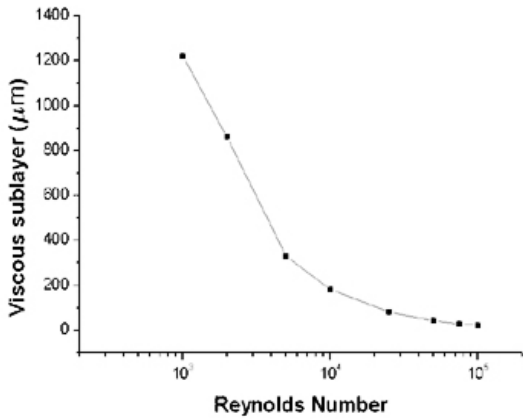


Fig. 3 Viscous sublayer thickness vs. Reynolds number

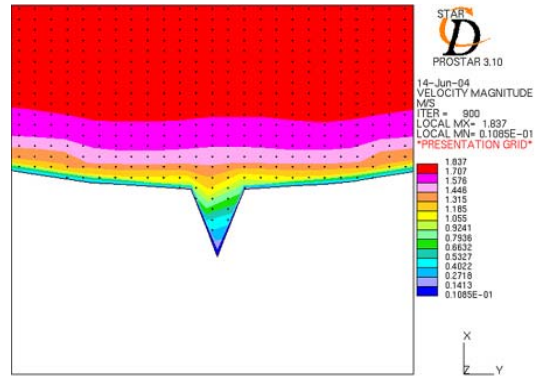
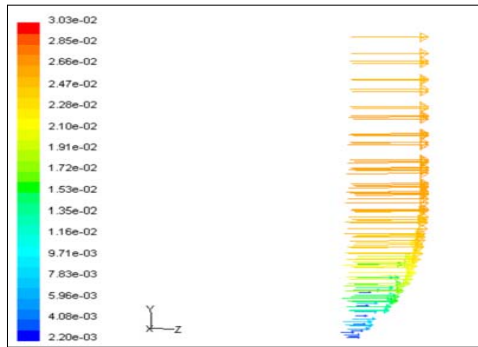
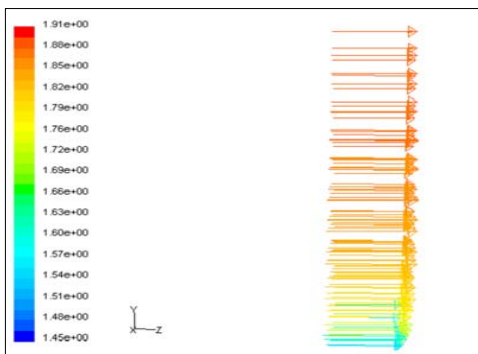


Fig. 5 Distribution of fluid speed on partially corroded pipe



(a) Distribution of fluid velocity at 0.02m/s



(b) Distribution of fluid velocity at 1.8m/s

Fig. 4 Fluid velocity distribution using FLUENT

를 증가시킨다는 결론을 얻을 수 있다¹²⁻¹³). 따라서 점성저층 두께가 얇아수록 용존산소의 확산은 쉽게 일어날 것이라는 유체역학의 이론적 배경을 바탕으로 유속에 따른 경계층 두께변화를 해석하였다.

Fig.3은 유속의 증가에 따른 점성저층 두께의 감소 변화를 나타낸 그래프로서, Re 값이 2000을

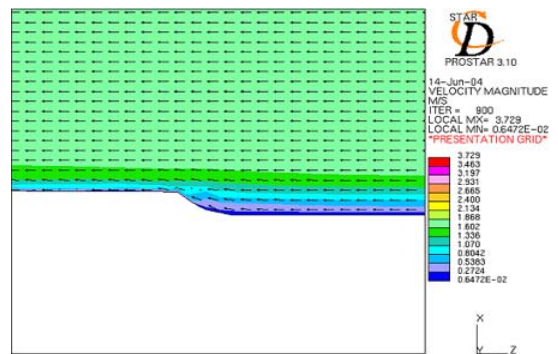


Fig. 6 Vector expression for erosion effects on the corroded part

나타내는 지점에서 파이프에 흐르는 물의 유속은 약 0.05m/s가 되며 이때 형성되는 경계층 두께는 약 0.86mm정도가 된다. 그러나 유속이 점차적으로 증가하여 1m/s가 되면 Re 값이 10000으로 난류 유동을 하게 된다. 이때 형성되는 경계층 두께는 약 0.04mm로 금속면과 거의 밀접한 상태가 되며 이 해석결과는 용존산소의 확산이 난류에서 보다 수월하다는 것을 나타낸다.

Fig.4 (a) 및 (b)는 Fig.1 (a) 및 (b)에서 이론적으로 설명한 층류 및 난류 유동에서의 속도분포를 FLUENT 해석하여 나타낸 것이며, 해석결과는 Fig.3과도 잘 일치한다.

Fig.5는 부식틈새에서의 유체속도 분포를 나타내고 있는데 1.8m/s의 속도로 흐르는 물이 아주 미세한 홈부식 틈새에서 그 속도가 0.3m/s 이하로 감소된 결과를 보여준다. 홈부식이 발생되지 않은 매끄러운 강관에서 1.8m/s의 속도로 흐르는 유체의 속도를 해석한 결과, 금속면과 인접한 부

위에서 그 속도가 약 0.8m/s로 나타났는데, 이는 흠부식 틈새에서 마찰손실로 인한 영향이 어느 정도인지 잘 나타내주는 단적인 결과이다. Fig.6은 흠부식 틈새에서의 침식부식 현상을 벡터로 나타낸 것이며, 이 결과를 통해 부식이 진행되어 생성된 “V”형태의 흠은 기계적 침식을 유발하며 이는 마이크로 단위의 부식 틈새에서도 충분히 발생될 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 수격현상으로 인한 배관손상 가능성

Fig.2 (a)와 같이 용접부에 초기 흠부식이 시작되고 점차적으로 Fig.2 (b)와 같이 부식이 진행된다면 수압이 동일하더라도 파이프가 받게 되는 부식부위의 응력집중은 커지게 된다. 따라서 이를 고려하여 수격현상으로 인한 수압 및 그에 따른 응력 변화를 해석하였다.

순간적으로 파이프에 걸리는 압력은 비중량과 수격수두의 함수이며, 수격수두는 식(7)로 구한다. 최고 유속을 1.8m/s라고 가정할 경우, 식(8)에 Table.1의 조건을 대입하면 압력파의 전파속도 V_p 는 1591m/s가 나오며, 이에 따른 최대 수격수두는 292m가 된다. 따라서 최종적으로 수압을 계산하면 약 2.86MPa이 파이프 내면에 균일하게 걸린다는 것을 이론적으로 알 수 있다.

Fig.8 (a)는 Fig.2 (b)의 “U” 형태로 부식이 0.5mm정도 진행된 파이프를 V-노치 형상으로 단순화하여 모델링한 것이며, 2.86MPa의 내압이 분포하중의 형태로 적용될 경우 부식부위에서 받게 되는 응력분포를 폰미세스 응력으로 나타낸 것이다. Fig.8 (a)에서 걸리는 최대응력값은 약 98.2MPa이 나오며 Fig.8 (b) 및 (c)에서와 같이 두께 3mm의 파이프에 부식 깊이를 0.5mm씩 변화시켜가며 동일한 조건으로 해석하면 Fig.7과 같은 그래프를 얻을 수 있다. Fig.7에서 알수 있듯이 부식이 일어나지 않은 건전한 강관에 수압으로 인해 걸리는 응력은 약 88MPa이 나타났으며 그 깊이가 1.5mm가 될 때까지는 최대응력 변화는 거의 나타나지 않았다. 그러나 1.5mm이상에서는 그 변화가 급격하게 나타나며, 2.5mm에서는 응력값이 300MPa을 넘어가게 되어 KS D 3507에서 규정한 배관용탄소강관의 항복응력인 294MPa 이상이 된다. 탄소강관의 안전율을 2로 가정하여 배관의 허용응력을 고려할 경우에도 Fig.8 (b)에서 보듯이 150MPa을 넘지 않으며, 이러한 결과는

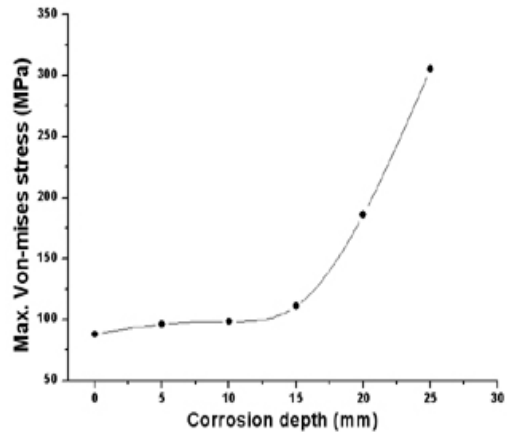
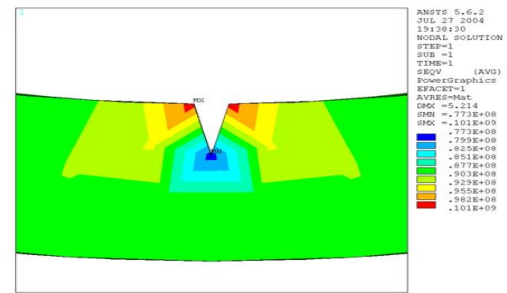
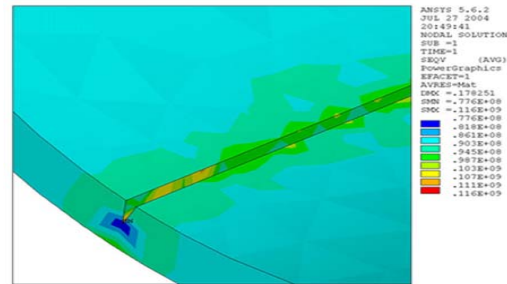


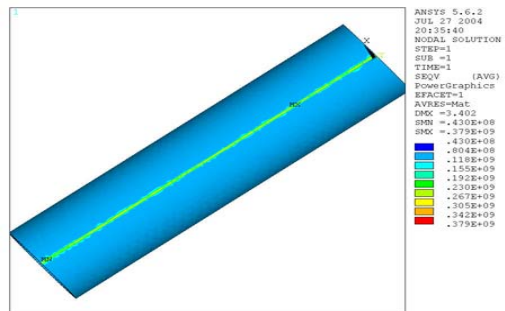
Fig. 7 Various of von-misses stress according to corrosion depth



(a) Corrosion depth is 0.5mm



(b) Corrosion depth is 1.5mm



(c) Corrosion depth is 2.5mm

Fig. 8 Result of stress analysis using ANSYS various corrosion depth

절반 이하의 부식깊이에서는 수압으로 인한 응력 피로에 영향을 거의 받지 않는다는 사실을 말해 준다.

응력분포의 경향을 살펴보다라도 Fig.8 (a)에서는 파이프 바깥 면까지 응력이 작용되지 않지만, Fig.8 (b)와 같이 파이프 두께의 절반 이상이 부식으로 인해 손상된 후부터는 바깥면까지 응력이 분포되는 것을 볼 수 있으며, Fig.8 (c)와 같이 25mm 부식이 진행되면 용접선 바깥 면 전체에서 270MPa 정도의 원주방향 응력이 걸린다는 것을 알 수 있다. 파이프 바깥면에 응력이 걸린다는 사실은 최종적으로 ERW 방법으로 용접된 탄소강관의 누수가 부식으로 일어나는 것이 아니라 수압으로 인한 균열전파로 일어난다는 사실을 말해주고 있으며, 실제 흠부식에 의해 누수가 발생된 배관을 보더라도 누수부위가 터짐 형태를 나타내는 것은 본 연구의 해석결과와 잘 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 ERW 방법으로 제작된 탄소강관의 흠부식이 발생한 후에 유동의 영향으로 인한 흠부식률의 증가와 함께 수격현상에 따른 파이프의 파손응력을 이론적으로 해석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흠부식이 일단 발생하게 되면, 부식틈새에서 유체는 마찰손실을 유발한다. 따라서 흠부식의 영향으로 인한 침식은 아주 미세한 크기의 부식 틈새에서도 충분히 발생할 수 있다.

(2) 일반적으로 수격현상으로 인해 파이프에 순간적으로 걸리는 압력은 약 88MPa 정도지만, 부식이 파이프 두께의 절반 이상 진행된 후부터는 그 압력이 급격히 증가하여 결국은 수압으로 인한 파손으로 이어질 가능성이 충분하다.

(3) 배관을 흐르는 유체의 속도는 곧 경계층두께의 감소로 이어지며 이는 용존산소의 확산이 쉬워져 금속면과의 부식작용이 더욱 원활하게 이루어진다는 사실을 말한다. 따라서 부식을 억제하기 위해서는 배관 시스템 설계시, 한계유속의 제한이 필수적이라 할 수 있다.

참고문헌

(1) Howard B. Cary, 1998, Modern Welding

Technology, 5th Ed., Prentice Hall, p249-250, p622-631.

(2) C. Kato, Y. Ootoguro, S. Kado, 1976, "Grooving in ERW Pipes in Sea Water", Proc. 6th international Congr. Metallic Corrosion, Sydney, Austral, p1104.

(3) T. Kurisu, T. Kyuno, S. Harada, T. Doi, 1979, "Effects of Various Factors, Mechanisms and Preventive Method of Grooving Corrosion of ERW and CBW Carbon Steel Pipes", Kawasaki steel Tech Report. p321-336.

(4) H. D. Lee, W. S. Jeong, J. H. Park, C. H. Bea, P. J. Kwak, 2001, Korea Society of Water Quality, Vol.17, No.5, p627-635.(in Korean)

(5) H. J. Sung, H. S. Kim, B. W. Lee, K. H. Lee, D. S. Seo, 1998, Corrosion Science Soc. of Korea Vol.27, No.2 p122-136.(in Korean)

(6) J.A. Wharton, R.J.K. Wood, 2004, "Influence of flow conditions on the corrosion of AISI 304L stainless steel", wear Eng., 256, p525-536.

(7) R.W. Fox, A.T. McDonald, Introduction to fluid mechanics, 4th edition, 1994, p35-44, p406-413.

(8) J.F. Douglas, J.M. Gasiorek, J.A. Swaffield, Fluid Mechanics, 3rd edition, Longman Scientific & Technical, London, 1995, p300

(9) D.J. Tritton, Physical Fluid Dynamics. 2nd ed., Clarendon Press. Oxford. 1992, p285

(10) B.J. Cantwell, "Organized motion in turbulent flow", Annu. Rev., Fluid Mech. 13, 1981, p457-515

(11) S.K. Robinson, "Coherent motions in the turbulent layer", Annu. Rev. Fluid Motion 23, 1991, p601-639.

(12)Wylie. E. B. and Streeter, V. L., 1978, Fluid Transients. McGraw-Hill, p244-247

(13) ASSE Standard No. 1010 , Water Hammer Arresters.

(14) Bernard J. Hamrock, Bo Jacobson, Steven R. Schmid, 1999, Fundamentals of Machine Elements, McGraw Hill, p237-239

(15) D.A. Jones, 1982, Corrosion Processes, R.N. Parkins, ed., Applied Science, p176-178.

(16) Mars. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd Ed., McGraw Hill, p25, 70-71, 95,97, 485-487.