

ERW강관에서 홈부식의 가속화에 미치는 유동의 영향에 관한 연구

김재성* · 김용*** · 이보영**

*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

***고등기술연구원 로봇생산기술센터

Study on the Effects of Flows on the Acceleration of the Grooving Corrosion in the ERW Pipe

Jae-Seong Kim*, Yong Kim*** and Bo-Young Lee**

*,** Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University,
Koyang 412-791, Korea

***Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Eng., Yongin 449-863, Korea

* Corresponding author : bylee@kau.ac.kr

(Received June 11, 2008 ; Revised June 23, 2008 ; Accepted July 31, 2008)

Abstract

The grooving corrosion is caused mainly by the different microstructures between the matrix and weld which is formed during the rapid heating and cooling cycle in welding. By this localized corrosion reaction of pipes, it evolves economic problems such as the early damage of industrial facilities and pipe lines of apartment, and water pollution. So lots of researches were carried out already about grooving corrosion mechanism of ERW carbon steel pipe but there is seldom study for water hammer happened by fluid phenomenon and corrosion rate by flow velocity. In this study, the analysis based on hydrodynamic and fracture mechanics was carried out. ANSYS, FLUENT and STAR-CD were used for confirmation of flow phenomenon and stress on the pipe. As the results, fatigue failure is able to be happened by water hammer and grooving corrosion rate is increased cause by turbulent. Grooving corrosion is happened on the pipe, then friction loss of fluid is occurred from corroded part. Erosion can be happened enough in corroded region of microscopic size that wear "V" form. Also pipe is able to be damaged by water hammer effects because of corroded region is general acting as a notch effects. Corrosion depth was more than half of total thickness, it can be damaged from water hammer pressure.

Key Words : ERW, Grooving corrosion, erosion, carbon steel pipe, Water hammer, Turbulent, Laminar

기호설명

 R_e : Reynolds 수 f : 마찰계수 \bar{u} : 평균유속(m/s) u^* : 전단응력속도(m/s) K : 체적탄성계수(kg/m²) E : 관의 영률(kg/m²) V_p : 압력파의 전파속도(m/s) σ_v : 폰미제스응력(MPa) τ_o : 벽면전단응력(MPa) Y : 비중량(kg/m³) μ : 점성계수(kg/ms) ρ : 밀도(kg/m³) v : 동점도(m²/s) δ_l : 점성저층의 두께(μ m)

1. 서 론

강관은 물, 유류, 천연 가스 등을 운송하는 배관용 및 건물의 골조, 유압 및 공압 실린더, 가이드 레일 등의 기계적 부품으로도 널리 사용되기도 한다. 이렇게 사용되는 강관의 70% 이상은 고주파 전기저항용접(High Frequency Electrical Resistance Welding, 이하 ERW)으로 제조되고 있다¹⁾. ERW 강관은 강재의 롤(roll)에 의해서 원형으로 연속 성형한 후 판재(sheet)의 끝단에 가공된 “V”형의 이음부를 고주파 전류에 의한 줄(Joule) 열로 가열하고 곧바로 스퀴즈 롤 (squeeze roll)로서 가압 접합함으로써 제조된다. 이렇게 제작된 ERW 강관을 해수, 공업용수 및 음용수 등의 배관으로 사용할 경우 용접선을 따라 깊은 “V”형의 국부적인 부식현상이 종종 발생되는데 이를 홈부식 또는 구상부식(grooving corrosion)이라 하며 실제 우리 생활주변에서 자주 관찰되는 부식 유형으로 알려져 있다. 홈부식의 발생 원인에 대해 몇몇 연구자들은 ERW 공정상 발생할 수밖에 없는 강관 내면 비드의 제거로 인해 용접부 내에 존재하던 MnS 개재물이 강관 표면에 노출되어 부식 환경과 직접 접촉해 용접부만 집중적으로 부식된다고 발표하였다. 또한 용접부의 경우 급열·급냉되므로 조직이 다른 부위와 상이하며, 용접 중 편석 등이 일어나 용접부와 비용접부 사이의 전위차가 50mV 정도 발생하게 되어 갈바닉(galvanic)부식으로 인한 부식속도가 증가한다는 주장도 있다²⁻⁵⁾. K. Risch의 경우 홈부식 사례의 관찰 결과로부터 산화물이나 황화물 입자 등 비금속 개재물과 용접금속 계면에서 틈새부식(crevice corrosion)이 발생하여 홈부식이 시작된다고 주장하였으며 V자형 홈부식의 밑바닥에서 틈새부식이 진행하고 있음을 사례로 들어 설명하였다⁶⁾. 그러나 지금까지 발표된 결과들은 대부분 조관 과정에서의 일반적인 사항만을 논하고 있을 뿐, 홈부식 틈새로 인해 부차적으로 발생하는 유체 흐름의 변화와 수격 현상으로 인한 응력 변화에 대한 연구는 미비한 실정이다. 실제로 ERW 방법으로 제조된 강관의 부식은 조관 과정에서의 용접과 밀접한 관련이 있는 부식이지만, 수용액의 조건 및 사용조건 등 환경인자의 영향 또한 무시할 수 없다. 아파트 등 실제 현장에서 ERW 강관에 흐르는 유체는 비드가 제거된 내면 부위에서 와류(vortex)를 일으켜 기계적 침식(erosion)을 수반할 가능성이 있으며, 수격현상으로 인해 부식 부위에서 반복피로 하중을 받아 부식의 전파속도가 증가되어 최종적으로 파손되는 경우도 예상할 수 있다.

이에 본 연구에서는 부식이 일부 진행된 ERW 강관을 대상으로 강관 내부 유동이 홈부식 감수성 및 부식 속도에 주는 영향을 확인하고자 하였다. 이를 위해 실제

사용 환경을 모사할 수 있는 경계조건을 선정하여 유한 요소해석 및 유체해석을 실시하였다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 ERW 강관에서 발생하고 있는 결함 발생에 의한 피해를 극소화시킴으로서 안전하고 효율적인 관리에 기여하고자 한다.

2. 유동 현상

2.1 유속에 따른 부식속도의 변화

물 또는 중성 수용액 중에서 철이 부식되려면 용존산소와 동시에 음이온이 존재하여야 하며, 그렇지 않으면 철의 부식이 발생하지 않는다. 그러므로 음이온의 존재와 함께 용존산소 농도가 증가할수록 홈 부식속도 증가한다고 알려져 있다⁶⁾. Fig. 1에서 보는 바와 같이 용액과 금속과의 계면에는 금속면에 가깝게 존재하며 거의 움직이지 않는 얇은 층이 있으며, 이를 점성저층(viscous sublayer)이라 한다. 부식이 일어나기 위해서는 용존산소가 확산을 통해 이 층을 통과하여 금속면에 도달해야만 하는데 일반적으로 정지하고 있어 움직임이 없는 용액에서는 이 층의 두께가 1mm정도가 되지만, 물이 움직이면 수십 분의 1 이하로 감소해서 산소의 확산은 쉽게 된다. 파이프 내의 유체유동이 비압축성 유동일 때, 유동(층류 또는 난류)의 특성은 레이놀즈(reynolds)수, Re , 라는 무차원 변수 값에 따라 결정된다. 통상적으로 $Re < 2300$ 이면 층류이고 그 값 이상에서는 난류가 되며, 이는 식(1)을 통해 구할 수 있다⁷⁻⁹⁾. 식(1)을 이용하여 층류유동을 하는 이론적인 최고 유속을 구하면 그 속도는 약 0.052m/s가 나오며, 그 이상의 속도에서는 난류유동을 하게 된다. 통상적으로 수도용 강관에 흐르는 물의 유속은 1.0m/s 이상으로 난류가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

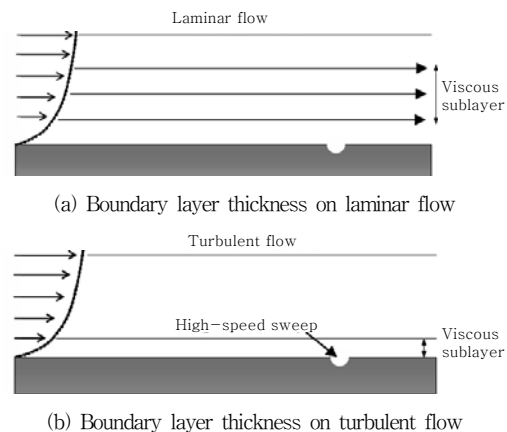


Fig. 1 Differences of layer thickness depend on flow conditions

$$R_c = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} \tag{1}$$

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 함수로 나타낼 수 있다. 이는 식 (3)에서 (5)를 이용하여 계산 가능하다¹⁰⁻¹¹⁾. 또한 식 (6)을 이용하여 점성저층의 두께가 계산되며¹²⁾, 이 두께가 작을수록 용존산소의 확산이 쉽게 되어 부식이 빨라진다고 할 수 있다.

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \tag{2}$$

$$\tau_o = \frac{1}{2} f \rho \bar{u}^2 \tag{3}$$

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re} \tag{4}$$

$$f_{turbulent} = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \tag{5}$$

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

2.2 배관내의 수격현상

배관내의 유체흐름이 급격한 밸브 작동 등에 의하여 운동 상태에 갑작스러운 변화가 발생하면 유체의 운동에너지가 압력에너지로 변화하여 압력상승이 일어나고, 이때 상승된 압력은 압력파가 되어 관로를 왕복하면서 점차 감쇠된다. 이러한 현상을 수격현상(water hammer)이라고 하며 이때의 상승된 압력을 수격압이라고 한다¹³⁻¹⁴⁾. 발생한 수격압은 배관의 진동과 그로 인한 소음을 일으키며 심한 경우 배관이나 부속 기기류가 파손되는 등 배관계의 내구연한이 감소될 수 있다.

이러한 수격 현상 시 압력파의 전파속도 및 유체의 운동에너지가 압력에너지로 변화하여 발생하는 최대 수격수두는 다음과 같이 Allievi¹⁵⁾에 의해 제안된 식(7)과 식(8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{g K}{\gamma \left(1 + \frac{KD}{Et}\right)}} \tag{7}$$

$$H = \frac{V_p \cdot \bar{u}}{g} \tag{8}$$

또한 수압으로 걸리는 압력과 그에 따라 파이프에 걸리는 전단 변형에너지는 폰 미세스 응력(von mises stress)으로 표현할 수 있으며 그 값은 식(10)에 의해서

계산할 수 있다¹¹⁾.

$$P = \gamma \cdot H \tag{9}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \tag{10}$$

3. 실험 방법

3.1 유속에 따른 부식정도 해석

D.A. Jones¹⁶⁾는 스테인리스강의 공식(pitting) 등과 같은 국부부식의 경우는 침식부식의 원리에 의해 발생하고 이러한 침식부식은 난류유동의 경우에 나타난다고 발표하였다. 이것은 즉 Fig. 1 (b)에서와 같이 국부적으로 부식된 곳에 유체 흐름의 방해로 인해 와류가 형성되어 점성저층의 두께가 감소되며 용존산소가 금속면과 도달하기 훨씬 수월해 진다는 것을 말한다. 따라서 본 연구에서는 부식이 발생되지 않은 매끄러운 강관과 부식이 진행된 강관과의 유체흐름을 비교 해석하여 홈부식의 가속화에 대해 확인하고자 하였다. 해석 값에 대한 신뢰도를 명확히 하기 위하여 우선적으로 홈부식 손상된 강관의 단면을 관찰하여 부식 부위를 실측 모델링 하였으며, 이를 해석하기 위하여 상용 열·유체해석 프로그램인 STAR-CD 3.0와 FLUENT 6.0을 사용하였다. 강관 홈부식 부분에 대한 모델링은 Fig. 2의 (a) 및 (b)의 실측 치수를 대입하였으며, 수돗물이 44mm의 지름을 갖는 ERW 강관을 가득히 채운 상태에서 1.8m/sec의 속도로 흐르고 있다고 가정된 후, 부식 부위를 중심으로 1/4 영역에 대해 해석하였다.

3.2 수격현상에 따른 배관 응력 해석

부식형태를 확인하기 위해 각기 다른 입열 조건으로 제조된 6가지의 ERW 강재를 사용하여 자연부식시험을 실시한 후 표면조도 측정기로 측정된 결과 Fig. 2와 같

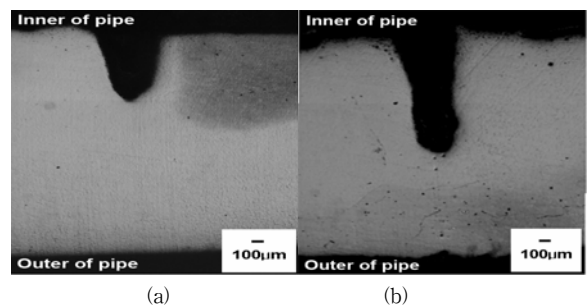


Fig. 2 Cross-section micrograph of started corrosion (a) and penetrated until a middle of thickness on the pipe (b) for the modeling of fluid analysis, en-etched

이 부식 폭은 6가지의 강종 모두 약 0.5mm로 용접부 폭 전체가 부식되며 부식 깊이만 변화되고 있는 것을 관찰할 수 있었다¹⁷⁾. 이에 따라 폭은 0.5mm로 고정하고 깊이만 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm 및 2.5mm로 변화시켜 ERW 강관의 파손에 영향을 주는 폰미세스 응력의 변화를 해석하였다. 해석은 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 실제 부식은 “U” 형상을 띠지만 단순 해석을 위하여 V-노치 형상으로 모델링하였다. 또한, 수격현상으로 인해 배관에 발생하는 순간적인 폰미세스 응력을 구하기 위하여 식(7)부터 식(9)를 사용하였으며, 실제 배관에 걸리는 원주방향 응력(σ_{real})을 안전율을 고려했을 때의 배관의 허용응력(σ_{allow})값과 비교하여 사용 중 수압으로 인한 균열 발생 가능성을 검토하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유속 변화에 따른 부식 발생 가속화

지금까지 유속과 부식률과의 관계에 대해 발표된 여러 결과들을 보더라도 유속의 증가는 부식률을 증가시킨다는 결론을 얻을 수 있다⁶⁾. 따라서 점성저층의 두께가 얇아수록 용존산소의 확산은 쉽게 일어난다는 유체 역학의 이론적 배경을 바탕으로 유속에 따른 경계층 두께의 변화를 계산하였다. 식 (4), (5)와 같이 무차원계수인 마찰계수를 층류와 난류에 따라 정의하였으며, 식 (6)에 의해 경계층 두께를 계산하였다. 이 모든 계산은

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
Y (kg/m ³)	1000	ρ (kg/m ³)	1000
μ (kg/ms)	1.002×10^{-3}	ν (m ² /s)	1.002×10^{-6}

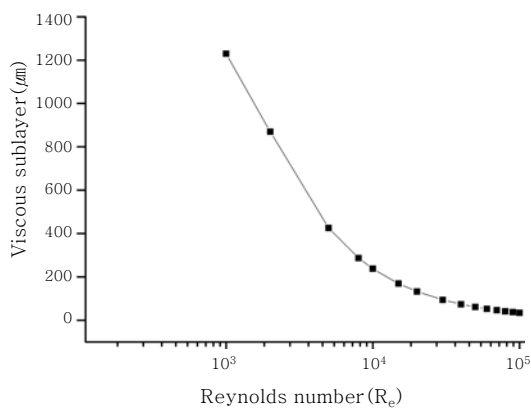


Fig. 3 Viscous sublayer thickness vs. Reynolds number

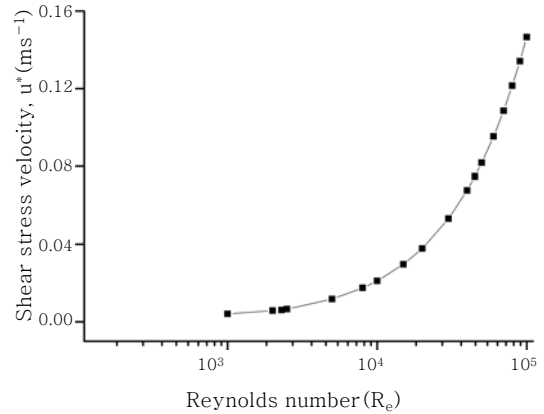


Fig. 4 Shear stress velocity vs. Reynolds number

Table. 1에 주어진 물의 밀도, 동점도 및 점성계수 값을 사용하였으며, Fig. 3 및 Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 전단응력속도와 경계층두께는 서로 반비례하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 유속의 증가에 따른 점성저층 두께의 감소 변화를 나타낸 그래프로서 Re 값이 2,300이 되는 지점에서 배관 내부에 흐르는 물의 유속은 약 0.052m/s이며, 이때 형성되는 경계층 두께는 약 0.823mm정도이다. 그러나 유속이 점차적으로 증가하여 1m/s가 되면 Re 값은 4,5000으로 난류유동을 하게 되며, 그 때 형성되는 점성저층의 두께는 약 0.067mm로 금속면과 거의 밀접한 상태가 된다. 이는 유속이 빨라짐에 따라 점성저층의 두께가 얇아지고 용존산소가 금속면에 도달하는 것을 더욱 용이하여 부식발생이 빨라질 수 있다는 것을 보여준다.

또한, Fig. 4에서 나타내는 것과 같이 Re 값의 증가로 유속이 증가할수록 전단응력속도가 증가되며, 이로 인해 관로와 유체사이에서의 마찰이 침식에 의한 부식발생을 더욱 촉진시킬 것이다.

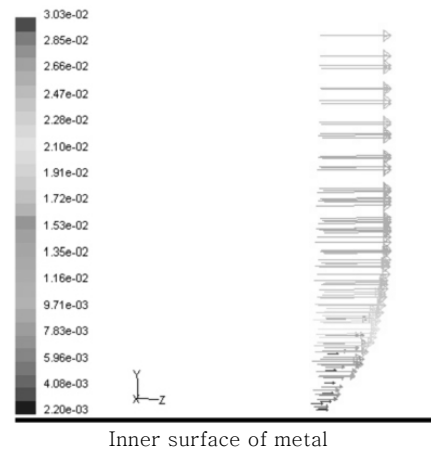


Fig. 5 Distribution of fluid velocity in the laminar flow(inlet flow speed = 0.02m/s)

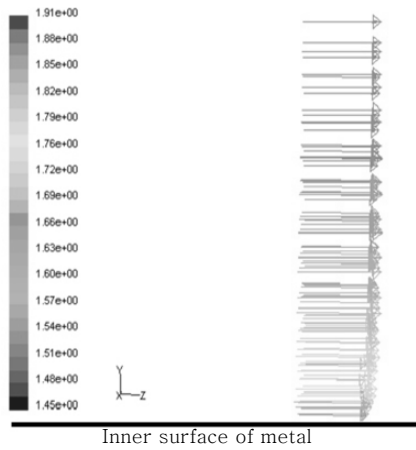


Fig. 6 Distribution of fluid velocity in the turbulent flow (inlet flow speed = 1.8m/s)

Fig. 5 및 Fig. 6은 Fig. 1 (a) 및 (b)에서 이론적으로 설명한 층류 및 난류 유동에서의 속도분포에 대해 FLUENT 해석한 결과로서, 강관 표면에서부터 중심부까지의 유속을 상대적으로 보여주고 있다. 본 해석결과를 통해 일정한 속도를 가지는 유체가 배관내부로 유입되면 마찰로 인해 유속이 느려진다는 것을 확인할 수 있었으며, 초기 유입되는 유체의 속도가 빠를수록 급속면에 가까운 곳에서의 유속(1.54m/s)은 난류를 형성하기에 충분한 유속이 흐르며, 그로 인해 점성저층 두께가 얇아진다는 것을 재차 확인하였다.

4.2 부식 발생 후 가속화 기구

유속의 증가와 더불어 유체 흐름을 방해하는 “V” 형태의 홈부식 틈새가 존재하는 경우 매끄러운 강관보다 유체와 관로사이의 마찰로 인한 침식이 뚜렷하게 나타나게 된다. 배관의 내부에 부식이 발생하지 않은 매끄러운 강관과 홈부식에 의해 틈새가 발생한 강관에 대해 물이 1.8m/s의 속도로 흐르는 조건으로 해석을 진행한 결과 홈부식이 발생한 강관(0.143m/s)에서의 유체 속도가 매끄러운 강관(0.8m/s)에서 보다 5배 이상 늦어지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 Fig. 7과 같이 부식이 진행되어 생성된 “V”형태의 홈은 기계적 침식을 유발하며 이는 마이크로 단위의 홈부식 틈새에서도 관로 마찰 증가로 인해 홈부식은 더욱 가속화될 것이라고 판단할 수 있다.

4.3 수격에 의한 배관 손상 가능

Fig. 2 (a)와 같이 용접부에 초기 홈부식이 시작되고 점차적으로 Fig. 2 (b)와 같이 부식이 진행되면 수압이 동일하더라도 파이프가 받게 되는 부식부위의 응력집중

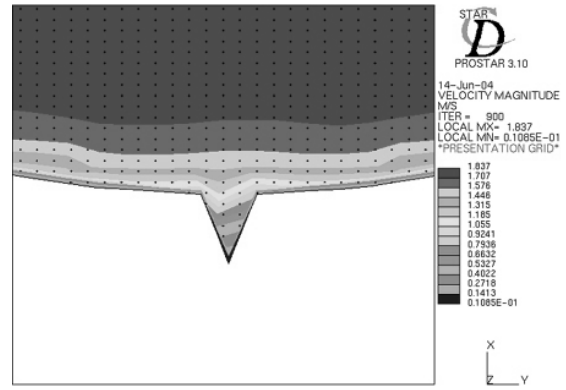


Fig. 7 Distribution of fluid speed on partially corroded pipe

은 커지게 된다. 순간 압력은 식(9)와 같이 비중량과 수격수두에 의해 계산되며, 수격수두는 식(7)과 같이 압력 파의 전파속도와 관내에 흐르는 유속의 함수로 나타낼 수 있다. 순간적으로 관로에 걸리는 최고 유속을 1.8m/s 라고 가정할 경우, 이때 파이프 내면에 균일하게 작용하는 수압은 약 2.86MPa이다. Fig. 7은 “U” 형태로 부식이 0.5mm정도 진행된 파이프를 V-노치 형상으로 단순화하여 모델링한 것이며, 2.86MPa의 내압이 분포하중의 형태로 작용할 경우 부식부위에서 받게 되는 폰미세스 응력분포로 나타낸 것이다. 이때 걸리는 최대응력은 약 97MPa이며, 두께 3mm의 파이프에 부식 깊이를 0.5mm 씩 변화시켜 얻은 최대응력에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 부식이 일어나지 않은 건전한 강관에 수압으로 인해 걸리는 응력은 약 88MPa로 나타났으며 그 깊이가 1.5mm가 될 때까지는 최대응력 변화는 거의 나타나지 않았다. 그러나 부식 깊이가 1.5mm이상 존재할 경우 최대응력은 급격하게 증가하였으며, 2.5mm이상에서는 응력값이 300MPa 넘어가게 되

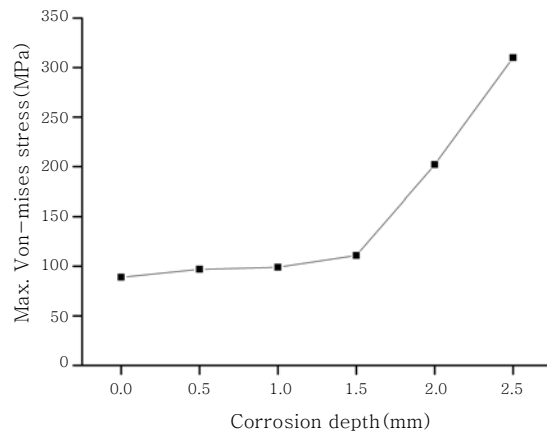


Fig. 8 Variousness of von-misses stress depend on corrosion depth

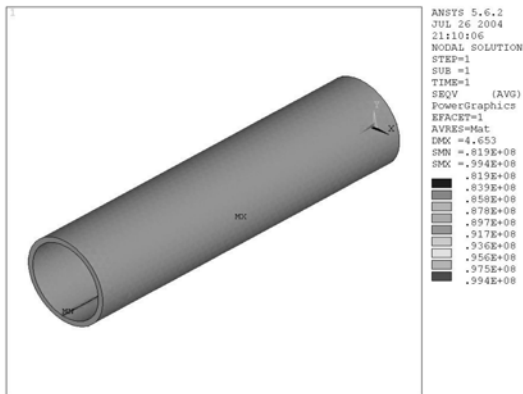
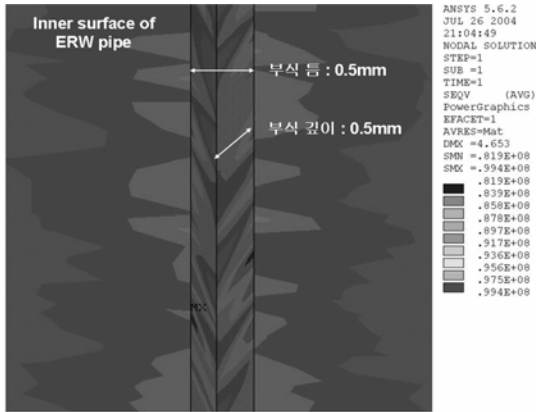


Fig. 9 Result of stress analysis using ANSYS at 0.5mm corrosion depth

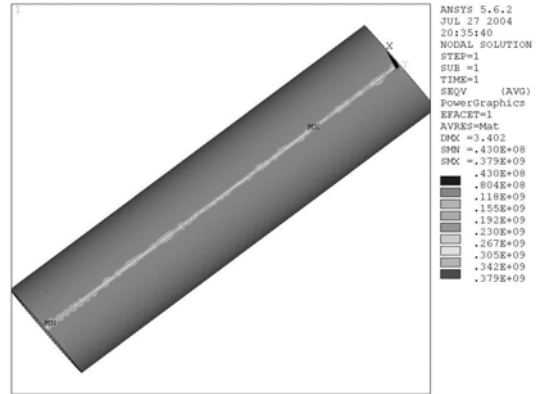
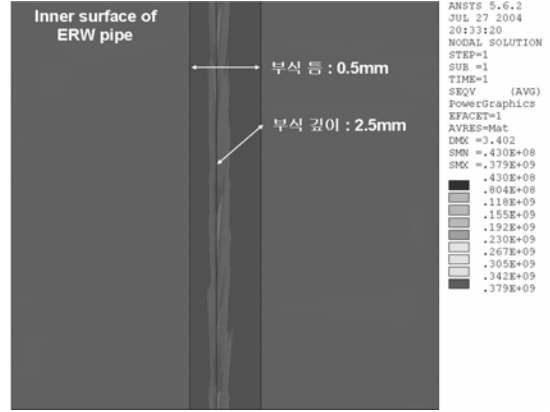


Fig. 10 Result of stress analysis using ANSYS at 2.5mm corrosion depth

어 KS D 3507에서 규정한 배관용 탄소강관의 항복응력인 294MPa 이상이 된다. 탄소강관의 안전율을 2로 가정하여 배관의 허용응력을 고려할 경우에도 150MPa를 넘지 않으며, 이러한 결과는 절반 이하의 부식 진행은 수압으로 인한 응력 피로에 영향을 거의 받지 않는다는 사실을 말해준다.

응력분포의 경향을 살펴보다라도 Fig. 9에서는 파이프 바깥 면까지 응력이 작용하지 않지만, Fig. 10과 같이 파이프 두께 절반 이상이 부식으로 인해 손상된 후부터는 바깥 면까지 응력이 분포하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10과 같이 2.5mm 부식이 진행되면 용접선 바깥 면 전체에서 270MPa 정도의 원주방향 응력이 걸린다는 것을 확인하였다. 파이프 바깥 면에 응력이 걸린다는 사실은 최종적으로 ERW 방법으로 용접된 탄소강관의 누수가 부식으로 일어나는 것이 아니라 수압으로 인해 일어난다는 사실을 말해주고 있으며, Fig. 11과 같이 실제 홈부식 손상에 의해 누수가 발생된 배관을 보더라도 누수 부위가 터짐 형태를 나타내는 것은 본 연구의 해석 결과와 잘 일치한다.

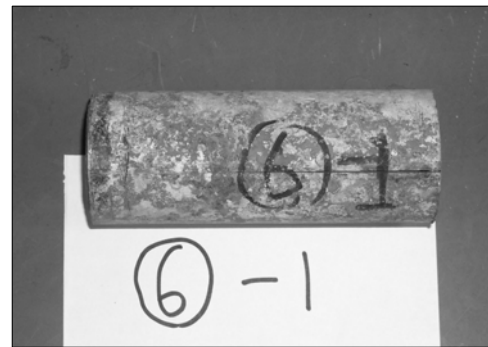


Fig. 11 Case study of corroded pipe

5. 결 론

본 연구에서는 ERW 방법으로 제작된 탄소강관의 홈부식이 발생한 후에 유동의 영향으로 인한 홈부식률의 증가와 함께 수격현상에 따른 파이프의 파손응력을 이론적으로 해석하였다. 해석 결과 값에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 실제 부식된 강관을 검토하여 해석조건을 설정하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 홈부식으로 인해 형성된 “V”형상의 부식틈새는 유

체와 관로사이의 마찰을 증가시켜 홈부식이 가속화 되는 것을 확인하였으며, 구상부식과 같은 국부부식 형태의 부식이 전면부식보다 유동의 흐름에 민감함 알 수 있었다. 또한 홈부식이 발생한 강관의 경우 형성된 부식 틈새와 유체 사이의 마찰손실에 따라 아주 미세한 크기의 부식 틈새에서도 침식은 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 충분히 있음을 확인할 수 있었다.

3) 배관을 흐르는 유체의 속도는 곧 점성저층 두께의 감소로 이어지며 이는 용존산소의 확산이 쉬워져 금속면과의 부식작용이 더욱 활발하게 이루어질 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 이에 따라 현장에서의 부식을 억제하기 위해서는 배관 시스템 설계 시 한계유속의 제한 및 수격방지기의 장착이 필수적이라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 (No.M20604005402-06B0400-40210) 사업 및 지식경제부의 부품소재전문기업 기술지원사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Y.S. Kim : High Frequency Electrical Resistance Welding of Pipes, KWJS journal 16-5(1998), 45-47 (in Korean)
2. C. Kato, Y. Otaguro, S. Kado : Grooving in ERW Pipes in Sea Water, Proc. 6th international Congr (1976). Metallic Corrosion, Sydney, Austral, 1104
3. T. Kurisu, T. Kyuno, S. Harada, T. Doi : Effects of Various Factors, Mechanisms and Preventive Method of Grooving Corrosion of ERW and CBW Carbon Steel Pipes, Kawasaki steel Tech Report(1979). 321- 336

4. Hyun Dong Lee, Won Sik Jeong, Jung Hun Park, Chul Ho Bea, Pil Jea Kwak : Korea Society of Water Quality, 17-5(2001), 627-635.(in Korean)
5. Hee jun Sung, Heong Sik Kim, Byung Woo Lee, Young Bok Jeong, Kwang Hak Lee, Do Soo Seo : Corrosion Science Soc. of Korea, 27-2(1998), 122- 136(in Korean)
6. E. T r e i s s : Double Inductiv e Annealing of the Weld Area, 3R International, 20(1981) 627
7. J.A. Wharton, R.J.K. Wood : Influence of flow conditions on the corrosion of AISI 304L stainless steel, wear Eng., 256(2004), 525-536
8. R.W. Fox, A.T. McDonald : Introduction to fluid mechanics, 4th edition(1994), 35-44, 406-413
9. J.F. Douglas, J.M. Gasiorek, J.A. Swaffield : Fluid Mechanics, 3rd edition, Longman Scientific & Technical, London(1995), 300
10. D.J. Tritton : Physical Fluid Dynamics. 2nd ed., Clarendon Press. Oxford.(1992), 285
11. B.J. Cantwell : Organized notion in turbulent flow, Annu. Rev., Fluid Mech. 13(1981), 457-515
12. S.K. Robinson : Coherent motions in the turbulent layer, Annu. Rev. Fluid Motion 23(1991), 601-639.
13. Wylie. E. B. and Streeter, V. L. : Fluid Transients. McGraw-Hill(1978), 244-247
14. ASSE Standard No. 1010 : Water Hammer Arresters.
15. Bernard J. Hamrock, Bo Jacobson, Steven R. Schmid : Fundamentals of Machine Elements, McGraw Hill (1999), 237-239
16. D.A. Jones : Corrosion Processes, R.N. Parkins, ed., Applied Science(1982), 176-178
17. Yong Kim, Bo-Young Lee : A study on Grooving corrosion at the weld of a low carbon steel pipe made by Electrical Resistance Welding, KWJS journal 22-5(2004), 58-64(in Korean)
18. Joung Hyun Suh : A study on the characteristics of Heat treated ERW weld seam and the technology of seam Annealing, KWJS journal 17-1(1999), 133- 144(in Korean)