

개방형 U-type 기화기의 부식손상부 진단기법 개발 및 적용

†장 상 열 · 이 성 민 · 오 병 택 · 고 영 태

한국가스공사 연구개발원

(2001년 6월 12일 접수, 2001년 9월 20일 채택)

The Development and its Application of Diagnostic Technique for Corrosion Defect of U-type Open Rack Vaporizer

S. Y. Jang · S. M. Lee · B. T. Oh and Y. T. Kho

Pipeline Research Center of R&D Division, KOGAS, Ansan, Korea

(Received 12 June 2001 ; Accepted 20 September 2001)

요 약

개방형 기화기는 해수를 이용하여 열교환을 수행함으로써 액체상태의 액화천연가스를 천연가스로 기화시키는 역할을 한다. 86년부터 가동된 U-type 기화기는 천연가스생산과 관련된 중요설비 중 하나로서, 기화기 튜브는 항상 해수내에서 운전되고 있으며 기화기 튜브와 파이프사이의 용접부에서 해수로 인한 부식이 진행되고 있다. 본 연구에서는 용접부에서의 국부적인 부식원인을 찾기 위해 이종금속부식의 가능성을 평가해 보았으며 또한 비파괴적인 방법을 이용하여 부식피트의 깊이를 측정하고 유한요소를 통한 안전성 평가에 목적을 두었다.

이종금속부식가능성에 대하여 용접부 각 부위별로 시료를 채취하여 3.5%(wt.) NaCl 용액내에서 모재와 용접부위의 부식전위를 측정하였으며, 비파괴 검사를 통한 잔류두께측정은 tangential radio-graphy 시험이 가장 신뢰성 있는 기법임이 확인되었다. 미세한 부식피트가 발생된 경우에는 표면형상 복제기법을 적용하였다. 비파괴적인 방법을 이용하여 산출된 부식피트의 깊이와 형상을 근거로 2차원 유한요소 해석을 수행함으로써 내압으로 인한 기화기 튜브의 안전성을 평가할 수 있었다.

Abstract - Open rack vaporizer (ORV) has been used in liquefied natural gas (LNG) receiving terminal in order to vaporize LNG into natural gas (NG) by heat exchange with seawater. The U-type ORV which had been operated with seawater for 14 years is one of the important utilities of the gas production and the weld part of tube connected with header pipe had experienced many corrosion problems. To elucidate the cause of corrosion at weld part of vaporizer tube, corrosion potentials were compared by parts. This study concerns on the measurement of corrosion pit depth using non-destructive method and the evaluation of stress distribution in an aspect of safety with finite element analysis.

In order to confirm the reliability of galvanic corrosion between weld parts and base metal, the measurement of corrosion potential by parts was conducted for 20 minutes in 3.5 %(wt.) NaCl solution. Many non-destructive methods were tried to measure the

remaining thickness of vaporizer tube at fields. For general corrosion, tangential radiography test was confirmed as an effective method. In case of a fine corrosion pit, the shape of corrosion pit was reproduced using surface replication method.

From collected data, stress distributions were quantitatively evaluated with 2-dimensional finite element method and the diagnostic evaluation on internal pressure of the U-type vaporizer could be made.

Key words : U-type vaporizer, corrosion pit, surface replication, corrosion potential, non-destructive test, stress analysis

1. 서 론

-165℃의 초저온상태로 저장되어 있는 액화 천연가스(Liquified natural gas)를 기화시켜 공급하기 위하여 LNG 생산기지에서는 2가지 형태의 기화기를 사용하고 있는데, 튜브의 형태에 따라 크게 U-type 기화기와 I-type 기화기로 나눌 수 있다. 이들 기화기는 열교환 튜브 내부에 액상의 LNG가 흐르고 기화 열원으로서는 튜브외면에 흐르는 해수를 사용한다.

LNG 인수기지에서는 해수를 열매체액으로 이용하기 때문에 이들 재료를 해수에서 장시간 사용하게 되면 강한 부식성환경으로 인한 핀홀 발생, 용접결함부위에서의 선택적 부식 등의 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 초저온에서 물리적 특성이 우수하고 비교적 내식성이 좋은 오스테나이트 계열의 알루미늄 합금 5086이 사용되고 있으며 표면에 고분자 도장 또는 금속용사코팅 등을 적용하여 사용하고 있다¹⁾. 기화기는 생산기지의 중요설비중 하나이며, 이들 기화기의 손상은 곧 바로 생산기지 운영상의 안전성문제와 직결될 수 있으므로 설비의 사전 점검 및 보수는 중요한 문제로 대두되고 있다.

현재 각국에서는 손상부위의 평가를 위하여 압력용기 등과 관련하여 NBBI(National Board of Boiler and pressure vessel Inspectors), ASME code case, API 579등 여러 기준을 제정하여 사용하고 있다^{2)~7)}. 그러나 내부에 6.86 MPa 정도의 압력이 존재하는 U-type 기화기의 경우, 불행하게도 해수부식 등에 대한 적합한 검사나 평가코드가 없다. 따라서 현장에서는 이러한 설비를 운영함에 있어 현장엔지니어의 경험이나 판단에 많이 의존하고 있으며 정량적이고 과학적인 검사 및 평가방법이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부식으로 발

생한 파트에 대해 부식적, 역학적 관점에서 기화기의 안전성을 평가할 수 있는 기법을 체계화하여 적용해 보았다.

II. 결함형상 조사 및 실험

2.1. 결함의 형상 조사

1986년부터 가동된 U-type 기화기는 매년 5000~7000시간씩 가동해 왔으며 정기점검 시 주로 상부의 해수조 내에 있는 파이프와 기화기 튜브의 용접연결 부분이 심한 부식을 일으키고 있었다. 이 부위에서의 전형적인 부식형상을 Fig. 1 (a)에 나타내었으며 그 부식부위의 절단면을 Fig. 1 (b)에 나타내었다.

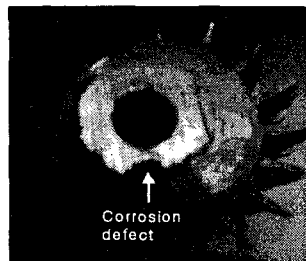


Fig. 1. Corrosion appearance in LNG vaporizer tube.

2.2. 실험

기화기 튜브의 상단은 운전 시 항상 해수에 잠겨있다. 이러한 부분의 용접부위에 용접봉의 선정이 제대로 되지 않을 경우, 전기화학적 반응에 의해 낮은 부식전위를 가지는 재료가 선택적으로 용출, 손상될 수 있다. 대부분의 손상된 기화기 튜브의 손상부위가 용접부위에 집중되어 있어 국부적으로 부식된 튜브의 손상원인을 해수내에서 부식전위의 차이로 인한 이종금속부식(galvanic corrosion)의 가능성에 초점을 두었다. 각 재료의 부위를 용접부를 기준으로 튜브모재, 용접부 하단 열영향부, 용접부, 용접부 상단 열영향부, 파이프의 5지점을 다이아몬드 컷트를 이용하여 절단하여 시료를 채취하였으며, 이들을 사용환경을 모사하기 위하여 3.5 %(wt) NaCl 수용액 내에서 20분간 시편을 침지시켜 안정화시킨 후에 부식전위를 측정하였다.

손상된 기화기 튜브에 대한 잔류두께측정을 위하여 비파괴적 평가를 시도하였다. 기화기 튜브의 손상이 발생한 경우, 내압으로 인한 튜브의 안전성을 평가하기 위해서는 잔류두께를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 여러 가지 비파괴 기법을 검토하여 현장에서 적용가능성이 예상되는 Tangential radiography test (TR시험)를 통하여 기화기의 튜브 손상부의 부식피트의 형상과 잔류두께측정을 시도하였다. 시험편의 두께 측정은 외면을 전혀 가공하지 않았으며 현장에서 사용되던 상태에서 적용하였다.

비파괴 검사법을 통한 결함부위의 형상을 파악하기 위하여 TR시험을 이용하여 거시적으로 튜브의 잔류두께를 파악할 수 있었지만, 또 다른 손상형태인 미세한 피트의 형상을 파악하기는 해상도가 떨어진다. 본 연구에서는 부식으로 인한 미세한 손상의 형상을 파악하기 위하여 Vynyl polysiloxane 소재를 이용하여 표면형상 복제기법을 시도하였다. 이러한 기법의 적용가능성을 확인하기 위하여 표준시편을 이용하여 부식피트의 깊이를 측정하여 비교한 후, 이를 실제 기화기 튜브 부식손상부에 적용해 보았다.

III. 실험결과

3.1. 재료의 이종금속부식 시험결과

3.5% (wt) NaCl 용액내에서의 부위별 전위 측정에 대한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 전체적인 전위의 변화가 크게 나지 않으며 가장

은 전위와 낮은 전위의 차이가 22 mV'였다. 이종금속부식의 발생가능성을 검증하기 위해서는 손상부, 즉 용접부의 부식전위가 주위 재료의 전위에 비교해 낮은 전위값을 나타내야 하는데 실험결과에서는 오히려 용접부 및 열영향부에서의 전위가 주위 기화기 튜브 및 상단부위의 모재 보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 용접부위의 손상은 전위가 낮은 금속과 높은 금속이 전기적으로 연결된 상황에서 낮은 금속이 선택적으로 부식되는 이종금속부식손상이라고 판단할 수 없다.

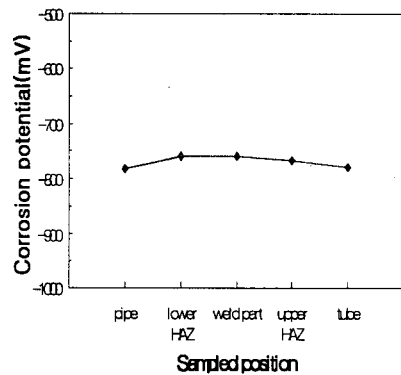


Fig. 2. Corrosion potentials measured from classified parts with respect to sampled position of LNG vaporizer tube in 3.5 wt.% NaCl solution after 20 minutes.

3.2. 비파괴 시험법을 통한 결함형상 파악

Fig. 3에 나타난 바와 같이 A 방향에서 촬영한 필름사진을 보면 화살표 부위에서 부식피트가 발생되었음을 보여주고 있다. B방향에서 촬영한 필름사진은 시편을 시계방향으로 90° 회전하여 촬영한 결과이다. 중앙부위에서 명암의 차이가 발생하여 결함이 존재하고 있음을 분명히 확인할 수 있다. 해석적, 실험적 방법에 의하여 결함부위의 잔류두께를 측정하였다⁸⁾. 필름판독결과에 의하면 부식피트가 생긴 부위의 최종 잔류두께를 3mm로 판정할 수 있었다.

본 기화기 시편의 부식피트에 대한 결과를 검증하기 위하여 단면을 절단하여 잔류두께를 실측한 결과 3.14 mm로 측정되었다. 따라서 TR 시험에 의한 잔류두께 측정 결과치는 오차범위 5 % 내에 속한 것으로서 신뢰도가 있음을 알 수 있으며 실제현장에서 손상부위의 잔

류두께측정이 가능하다고 판단된다.

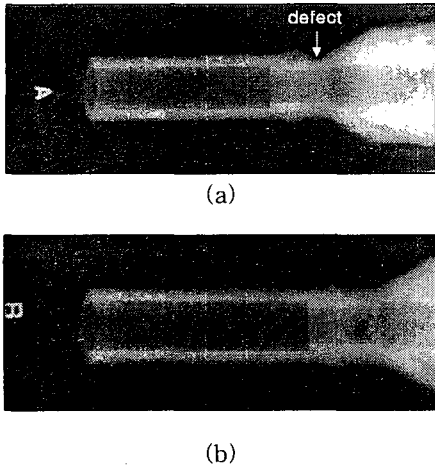


Fig. 3. Photographs for specimens on film obtained from tangential radiography test.
 (a) defect in top position
 (b) 90° clockwise rotation of specimen with respect to "B" position

3.3. 표면 형상복제법을 이용한 결함부위 형상 파악

거시적인 부식손상 뿐만 아니라 복잡한 형상의 시편에 대한 결함형상을 제대로 검출해낼 수 있어야 진단에 대한 신뢰성을 확보하게 된다. 직경 2~3 mm 정도의 미세한 부식피트가 많은 시편을 이용하여 미세편흔의 발생여부 및 결함크기를 평가하기 위하여 TR 시험을 수행하였다. 복잡한 형상의 시편에 대한 방사선투과 촬영을 시도한 결과, 미세한 피트의 형상이 명확히 나타나지 않았다. 실제적으로 기화기 튜브는 3차원 형상인데 반하여 방사선 투과법의 결과는 2차원 필름형상이고 또한 필름의 해상도가 부족하여 multi-pit 형상을 나타내기에 무리가 있을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 부식으로 인한 손상의 형상을 파악하기 위하여 표면의 형상을 복제할 수 있도록 Vynyl polysiloxane 소재를 이용하여 표면형상복제기법을 시도하였다. 적용성을 평가하기 위하여 인위적으로 결함이 가공된 금속표준시편을 이용하여 본 기법의 미세 피트를 검출하기 위한 예비측정을 시도하였다. 여러 형상의 시

편에 적용해 본 결과 결함부위의 형상과 깊이를 정밀하게 파악할 수 있었다. Fig. 4의 시험 결과에서 보는 바와 같이 결과치는 시험편의 깊이를 정확히 측정하고 있으며 시편의 깊이보다 미소하게 저 평가되는 이유는, 본 기법의 특성상 소재의 유동성이 부족할 경우에는 결함의 최하단부까지 소재가 유입되지 않는 경우가 존재하기 때문이다.

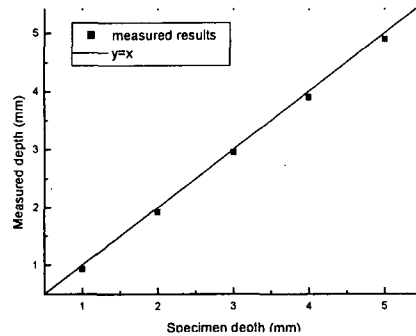


Fig. 4. The relationship between real depth of standard specimen and measured depth using surface replication method

아래 Fig. 5 (a)는 시편의 형상이며 Fig. 5 (b)는 표면복제법을 이용한 결함부위의 형상을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 결함의 형상을 정확히 복제해 낼 수 있었으며 이를 이용하여 기화기 튜브 손상부위의 손상깊이, 잔류두께, 결함의 형상을 파악할 수 있다. 결함의 폭이 넓으면 더욱 정밀한 부식피트의 측정이 가능하다. 본 진단의 대상이었던 기화기의 용접부위의 미세한 손상부위 형상복제는 이러한 방법을 적용하였다. 이를 이용하여 파악한 기화기의 손상부위의 형상의 80%는 결함선단의 곡률 반경이 2~5mm 정도로 파악되었다.



(a)



(b)

Fig. 5. Surface replication for corroded parts

(a) LNG tube reducer with corroded surface

(b) replica of corroded surface

IV. 역학적 평가

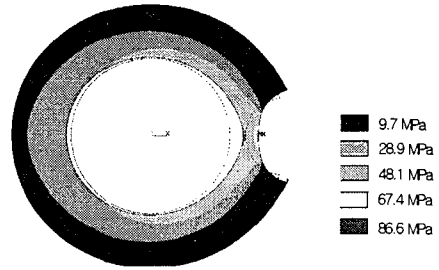
TR시험과 표면복제기법을 이용하여 수집된 자료를 토대로 손상된 튜브의 내압에 의한 응력집중정도를 유한요소해석을 이용하여 산출해 보았다. 부식 피트 부위의 해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS가 사용되었으며, 이를 이용하여 9가지 경우의 전형적인 부식피트가 발생하였을 경우에 구조물에 발생할 수 있는 응력분포를 구해보았다. Table 1은 해석에 사용되어진 알루미늄 합금 5086의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 1. Mechanical properties of Aluminum alloy 5086.

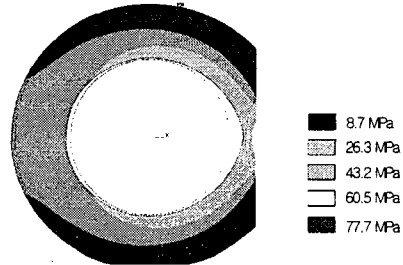
Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Shear Modulus (MPa)
115	260	22	77,000	0.33	27,000

Table 2. Maximum stress concentration with defect shape simulated using finite element method.(MPa)

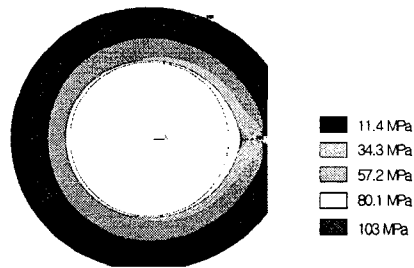
defect depth \ defect shape	round shape		wedge shape
	R=5mm	R=10mm	
3mm	38.7	34.3	50.4
4mm	56.8	50.3	72.4
5mm	86.6	77.7	103.0



(a) R = 5mm



(b) R = 10mm



(c) Wedge type

Fig. 6. Stress distributions of vaporizer tube with defect depth of 5mm and various shape.

사용된 요소(element)는 2차원 8절점요소이며, 주어진 경계조건은 배관내의 내압으로 6.86MPa가 적용되었다. 기화기 튜브에는 내압에 의한 Hoop Stress가 발생하게 되며, 각 해석을 통해 부식피트의 형태별로 폭(W), 깊이(D), 부식피트의 반경(R)을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 응력집중부위의 최대응력을 산출해 보면 Table 2와 같다. Fig. 6은 산출된 결과 중 결함깊이가 5mm인 경우, 각 결함형상

에 따른 응력분포를 도시한 것이다. 결과에서 보듯이 일반적으로 원형보다는 썩기형의 응력 집중에 의한 최대응력이 크게 발생하며, 썩기형의 결합깊이 5mm 모델에서는 알루미늄 5086합금의 항복응력의 89.5%에 해당되는 응력이 집중되고 있음을 확인할 수 있으므로 설비의 안전을 고려한다면 사전에 예방조치가 취해져야 할 것으로 판단되었다. 결합의 형상에 따라서 응력 집중정도가 다르긴 하지만 부식깊이가 3mm이상의 경우 결합부위의 하중이 크게 집중되며(썩기형의 경우 항복강도의 약 43%), 향후 부식속도가 가속된다면 안정성에 문제가 발생할 가능성이 있을 것으로 사료된다.

V. 결 론

대부분의 구조물의 파괴는 결합이 기점이 되어 발생하고 있다. 결합이 정기검사에서 검출되는 경우, 그 설비가 어느 시점까지 건전성을 유지하며 사용이 가능한지 또는 언제 보수를 필요로 하는가를 평가하는 것은 대단히 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 LNG 인수기지의 기화기 튜브에 대한 진단에 있어서, 재료의 불균일한 성분으로 인한 전기화학적 거동의 변화를 검토하였으며 결합여부를 비파괴적인 검사기술을 적용해 보고 안전성을 평가하고자 하였다. 기화기 튜브의 용접부에서는 이중금속부식이 발생되지 않았음을 확인하였고 부식과 해수의 침식에 의한 손상으로 판단되었다. TR시험을 통하여 잔류응력을 정확히 측정하여 신뢰성 있는 기법임을 확인하였으나 직경 2~3mm의 미세한 부식피트의 발생은 검출하지 못하였다.

본 연구에서 시험적용한 표면복제법을 이용하면 부식피트의 형상을 정확히 파악할 수 있었으며 파악된 형상에 근거한 응력집중정도를 유한요소해석을 통하여 해석함으로써 그 안전성을 정량적으로 평가할 수 있었다.

감사의 글

본 논문을 쓰기 위해 도움말씀 주신 한국표준과학연구원 백운봉 선임연구원과 비파괴 시험을 수행해 주신 (주)대한검사기술 관계연구원에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 고영태, 이성민, 김용철, 송홍석, "해수분위 기에서의 초저온 재료 부식연구" 한국가스공사 보고서 (1991)
- [2] API 510 "Pressure Vessel Inspection Code : Maintenance Inspection, Rating, Repair, and Alteration" (1999)
- [3] ASME Sec. VIII "Rules for Construction of Pressure Vessels" (1998)
- [4] ASME Sec. XI "Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components" (1998)
- [5] NBBI code "Inspection of Pressure Vessels", (1997)
- [6] ASME B31.8 "Gas Transmission and Distribution Piping Systems" (1995)
- [7] API Recommended practice 579 "Fitness-For-Service" (2000)
- [8] 이성식, 김영환 : 비파괴검사 학회지 Vol. 18, No. 3 (1998)