계장화압입시험법을 이용한 용강운반용 구조물의 안전성 평가

Safety Evaluation of Molten Steel Carrier by Using Instrument Indentation Technique

이정기*, 김이곤*, 유대화*, 김광호**, 이경로***, 김정엽*[†]

Jeong-Ki Lee*, Yi-gon Kim*, Dae-Wha Yoo*, Kwang-Ho Kim**, Kyeong-Ro Lee***

and Chung-Youb Kim*[†]

초 록 고온과 부식 환경에서 사용되는 용강운반용 철강구조물은 내화재에서 발생하는 가스에 의해 구조물 두께의 감소와 가스배출구 주변부의 확장 등이 일어나며, 이로 인해 구조물 전반에 걸쳐 응력이 증가하고 특히 가스배출구 주변에는 상당한 응력집중이 발생한다. 또한 구조물의 고온 환경은 소재의 항복강도나 인장강도와 같은 기계적 물성의 열화를 일으킬 수 있다. 이러한 문제점들은 구조물 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 10년 정도 사용한 구조물에 대하여 응력해석과 기계적 물성을 측정하여 열화 정도를 평가하였다. 구조물의 기계적 물성은 계장화압입시험법을 이용하여 구조물 표면에서 직접 측정하였다.

주요용어: 용강운반용 구조물, 안전성 평가, 응력해석, 계장화압입시험법

Abstract Because a molten steel carrier is used in high-temperature and corrosive environments, erosion and corrosion decrease the thickness of the structure and expand the vent hole for emitting gas generated from refractory bricks. This increases the stress throughout the structure and introduces a significant stress concentration around the vent hole. In addition, the high-temperature environment degrades mechanical properties such as the yield and tensile strengths. These problems seriously affect the safety of the structure. In this study, the safety of a 10-year-old structure was evaluated by analyzing the stress distribution and measuring the mechanical properties of the structure. The mechanical properties were directly measured on the structure surface using the instrument indentation technique.

Keywords: Molten Steel Carrier, Safety Evaluation, Stress Analysis, Instrument Indentation Technique

1. 서 론

고온 환경에서 사용되고 있는 용강운반용 철강 구조물(molten steel carrier)은 고온과 부식 환경 등 열악한 사용조건 때문에 사용시간의 경과에 따라 침·부식에 의해 구조물 두께가 전반적으로 감소하며, 특히 가스배출구 주위의 침식으로 인해 원형구멍의 확장과 구멍부위의 두께가 감소한다. 이로 인해 구조물에 발생하는 응력이 전반적

으로 증가하며, 가스배출구 주위의 침식에 의한 노치부 응력집중의 상승은 구조물 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이와 함께 구조물이 고온 환경 하에서 사용되고 있어, 항복강도나 인장강도와 같은 기계적 물성의 열화가 우려되고 있다. 기계적 물성의 열화는 침·부식에 의한 응력 증가와 함께 철강구조물에 대한 안전성을 악화시켜 안전사고를 일으킬 수 있어 이에 대한 검토가 요구되고 있다.

[접수일: 2013. 6. 26, 수정일: (1차: 2013. 11. 25, 2차: 2014. 2. 5) 게재확정일: 2014. 2. 7] *전남대학교 중화학설비 안전진단센터, **㈜프론틱스, ***중부대학교 자동차관리학과 [†]Corresponding Author: School of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea (E-mail: kimcy@chonnam.ac.kr)

본 연구에서는 10년 정도 사용한 용강운반용 철강구조물을 대상으로, 구조물의 기계적 물성을 평가하여 소재의 열화 정도를 평가하고, 구조해석을 통해 침/부식에 의한 구조물의 응력을 검토함으로써, 구조물의 전반적인 안전성을 평가하고자 한다. 구조물에 대한 기계적 물성의 평가는 일반적으로 구조물로부터 시편을 채취하여 인장시험으로부터 얻게 되나 현재 사용되고 있는 설비에서 시편을 채취하는 것은 힘들다. 최근 국내에서 개발된 계장화압입시험법(instrument indentation technique)[1-6]은 구조물로부터 시편 채취 없이 구조물에 대해 직접 기계적 물성을 측정하는 것이 가능하여, 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 구조물 표면에서 기계적 물성을 측정하였다. 구조해석은 사용중인 구조물의 부식 형상을 고려하여 수행하였으며 이를 원래의 구조물과 비교 검토하였다. 또한 계장화압입시험법을 이용하여 측정된 기계적 물성 결과와 비교함으로써 구조물의 안전성을 검토하였다.

2. 계장화압입시험법을 이용한 기계적 물성 평가

2.1. 계장화압입시험법

계장화압입시험은 구형의 압입자를 사용하여 재료 표면을 압입하고, 재료에 가해지는 하중과 압입깊이를 측정한다. 측정한 압입하중-변위 곡선으로부터 인장시험에서 얻어지는 응력-변위 곡선을 유도하고, 이로부터 항복강도, 인장강도 등과 같은 소재의 기계적 물성을 산출하게 되며, 그 개략적인 측정원리는 다음과 같다[4].

구형압입자를 이용하여 재료를 압입하면 하중이 증가함에 따라, 압입자 부근의 재료는 탄성, 탄소성, 소성의 3단계를 거치며 변형한다. 먼저 초기의 탄성단계에서는 평균접촉압력이 하중의 제공에 비례하여 증가하고, 압흔이 관찰되지 않는 가역적인 반응을 보이게 된다. 다음으로 압입하중이 일정한 값 이상이 되면, 재료 내부에 소성역이 발생하고 평균접촉압력은 탄성단계에 비해 서서히 증가하게 된다. 마지막으로 소성역이 표면까지 충분히 확장된 완전소성단계에서는 평균접촉압력은 거의 일정하게 되며 재료의 가공경화특성에 의해 매우 서서히 증가하게 된다. 따라서 이러한 변화양상의 분석을 통해 재료의 유동

Fig. 1 Schematic of the spherical indenter

특성을 압입시험으로부터 예측할 수 있다. 구형압입 시 발생하는 재료의 변형률은 일반적으로 이러한 압입변형양상을 분석하여 얻어진다.

Ahn과 Kwon[5]은 Fig. 1과 같은 구형압입자에 의해 금속재료에 발생한 진변형률 ε 을 식(1)과 같이 제시하였다.

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - (a_c/R)^2}} \frac{a_c}{R} = \alpha \tan \gamma \quad (1)$$

여기서 α 는 유한요소해석에 의해 도입된 상수로 0.14이며, a_c 는 압입흔의 반지름, R 은 압입자 반지름, γ 는 압입자의 중심점을 지나는 수직선과 압입자 중심부터 압입흔 모서리를 지나는 선이 이루는 각도를 나타낸다. 또한, 재료가 나타내는 대표적인 진응력 σ 와 평균압력 P_m 은 식(3)과 같은 관계가 있음이 알려져 있다[6].

$$\sigma = \frac{1}{\psi} P_m = \frac{1}{\psi} \frac{L_{\max}}{\pi a_c^2} \quad (2)$$

여기서 ψ 는 소성구속인자, $L_{\max}$ 는 압입하중을 의미한다. 위 식에서 실제 접촉 반경은 압입자 주변에서 발생하는 재료의 탄성, 소성변형 특성에 의해 측정한 압입깊이를 보정한 후 압입자의 기하학적 관계에 의해 산출한다.

식(1)과 (2)에 의해 얻어진 진변형률, 진응력 값은 각 재료의 변형속성을 나타내는 식(3)과 같은 구성방정식에 최적화시킴으로써 재료의 전체 변형속성 및 유동물성을 측정할 수 있다.

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (3)$$

여기서 K 는 강도계수(strength coefficient), n 는 가공경화지수(work hardening exponent)이다.

2.2. 측정

철강구조물은 두께 32 mm인 SM400B로 만들어졌으며, KS규격에 의하면 두께, $16 \text{ mm} \leq t \leq 40 \text{ mm}$ 의 경우, 항복강도 235 MPa 이상, 인장강도 400~510 MPa의 범위에 들도록 규정하고 있다 [7]. 기계적 물성의 측정은 ㈜프론틱스에서 개발한 계장화압입시험기 AIS 3000을 이용하여 KS 0950[1]에 규정된 방법을 따라 수행하였다. 압입시험은 지름 0.5 mm인 구형압입자를 사용하여 압입깊이 제어방식으로 수행하였다. 압입깊이를 10 μm 씩 증가시키면서 압입깊이가 150 μm 가 될 때까지 수행하였고, 하중인가 및 제거 속도는 5 $\mu\text{m/s}$ 로 하였다.

측정은 약 5년과 10년 정도 사용된 두 개의 구조물에 대하여 실시하였다. 구조물의 사용시간

Fig. 2 Schematic of the structure

Fig. 3 Measurement of mechanical properties by using instrument indentation technique

경과에 따른 열화를 파악하기 위해서는 한 구조물에 대하여 기계적 물성을 주기적으로 측정하여 정량적인 비교 검토가 이루어져야 하지만, 대상으로 하고 있는 구조물의 경우 이전에 측정된 데이터가 없다. 따라서 본 연구에서는 약 5년과 10년 정도 사용중인 두 개의 구조물에 대하여 기계적 물성을 측정하여 상대적인 열화정도를 정성적으로 비교하였다.

Fig. 2는 내화재를 제외한 철강구조물의 형상을 보여주고 있으며, 구조물 하단부에 둘레 방향으로 배열된 작은 점들이 가스배출구이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 구조물 하단으로부터 1단에서 7단까지의 가스배출구가 위치한다. 계장화압입시험은, 뒤의 3장에서 설명할 구조해석결과에서 가장 응력이 크게 발생하고 침/부식이 비교적 심하게 나타나는 부분, 즉 가스배출구 5단을 기준으로 구조물 전후좌우의 각 1개 부위씩 총 4개 부위를 선정하였다. 그림에서 구조물 전면과 좌측의 측정위치 C와 D를 볼 수 있으며, 구조물 후면과 우측의 측정위치 A와 B는 각각 C와 D의 반대측에 있다. 측정은 구조물 안에서 수행하였으며, Fig. 3은 계장화압입시험법으로 측정중인 모습을 보여주고 있다.

2.3. 측정 결과

Figs. 4(a), (b)와 (c)는 각각 2.2절에서 설명한 4곳의 측정위치 A~D에서 계장화압입시험에 의해 측정된 항복강도, 인장강도, 파괴인성(fracture toughness)의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 각 측정위치는 2.2절에서 설명한 가스배출구 5단의 A, B, C, D에서 측정한 결과로서, 그림에서 굵은 실선과 점선은 각각 5년과 10년 사용한 구조물에서 측정한 결과의 평균값을 나타내며, 그림 (a)와 (b)의 가는 실선은 SM400B에 대한 항복강도와 인장강도의 기준값을 나타낸다.

그림에서 측정된 항복강도와 인장강도는 측정 위치에 따라 비교적 큰 편차를 보이고 있으며, 그림에서 굵은 실선과 점선으로 표시된 평균값은, 10년 사용한 구조물의 항복강도와 인장강도가 각각 6.5%, 6.2% 더 작은 경향을 보이고 있다. 5년 사용한 구조물의 경우 측정된 파괴인성은 편차가 비교적 크기 때문에 10년 사용한 구조물에서 측정된 결과와 비교하는 것은 어렵지만,

Fig. 4 Measured results of (a) yield strength, (b) tensile strength and (c) fracture toughness by using instrument indentation technique

평균값의 경우 5년 사용한 구조물에 비해 10년 정도 사용한 구조물이 약 6.6% 정도 작은 경향을 보인다.

한편, 측정된 항복강도와 인장강도 모두 SM400B에 대한 기준을 만족시키고 있다. 다만 10년 사용한 구조물의 좌측, D에서 측정된 항복강도는 규격의 최소 기준치인 235 MPa에 거의

근접한 235.7 MPa로 평가되어 상대적으로 열화가 더 진행되고 있다고 할 수 있다. 인장강도는 대체로 SM 400B의 기준범위인 400 ~ 510 MPa 안에 들고 있다.

이상에서와 같이 약 5년과 10년간 사용한 두 구조물에 대해 기계적 물성을 측정하여 열화정도를 평가하고자 하였으나, 사용 초기에 측정한 기준 데이터가 없어 사용 연한에 따른 기계적 물성의 열화정도를 정량적으로 평가할 수는 없었다. 이 측정 결과는 한 구조물에서 시간의 경과에 따른 소재에 대한 기계적 물성의 열화라 생각할 수 없다. 그러나 측정된 항복강도, 인장강도, 파괴인성의 평균값의 변화에서 알 수 있듯이 10년 사용한 철강재의 항복강도와 인장강도 모두 5년 사용한 철강재의 것보다 낮게 평가되고 있어 전반적으로 항복강도와 인장강도가 감소하고 있다고 판단할 수 있을 것이다.

3. 구조해석

3.1. 해석모델 및 해석조건

용강온반용 철강구조물은 컵 형상의 용기로서 철강재 내면에 내화재를 부착하여 고온의 용강으로부터 철강구조물을 보호하도록 되어 있다. 철강구조물에는 내화재에서 발생되는 가스를 방출하기 위해 일정한 간격을 두고 구멍이 뚫려 있는데, 사용중에 발생되는 고온 가스에 의한 침/부식으로, 구조물의 두께가 전반적으로 감소하고, 가스가 방출되면서 가스배출구의 직경이 증가한다. 또한 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 구조물 내면의 가스배출구 주변으로는 접시 형상으로 넓어지고 가스배출구 둘레 방향의 두께는 얇아진다. 철강구조물의 두께와 가스배출구의 부식 형상은 위치마다 다르므로, 측정된 형상중 가장 부식이 심한 경우를 기준으로 모델링을 하였다.

구조물 안쪽에 위치한 내화재는 압축력에 강하지만 인장력에는 취약한 특성을 가지고 있으며, 내화재는 용강의 압력에 의해 인장력을 받게 되므로 구조물에 가해지는 하중을 줄이지 못한다. 따라서 해석은 Fig. 2와 같이 철강구조물만을 대상으로 하여 수행하였다. 하중조건은 작업중 용강의 최대 기준양을 기준으로 하였으며, 이와 함께 구조물의 자중도 고려하였으며, NASTRAN을

이용하여 선형해석을 수행하였다. 또한 상대적인 강도 비교를 위하여 침/부식이 진행되지 않은 원래의 구조물에 대한 구조해석도 함께 수행하였다.

3.2. 해석결과 및 검토

Figs. 5와 6은 각각 새구조물(original structure)과 10년 정도 사용한 구조물(used structure)에 대한 응력해석 결과를 보여주고 있다. 두 그림에서 (a)는 구조물 외부의 응력 분포를, (b)는 응력이 비교적 크게 발생하는 구조물 내부 하단에 위치한 가스배출구 주위의 응력 분포를 보여주고 있다. 새구조물에 비해 사용중인 모델의 경우 구조물 하부에서 볼 수 있듯이 두께 감소 때문에 전반적으로 응력이 높으며, 특히 그림 (b)에서 볼

수 있듯이 가스배출구 주위의 침/부식으로 인해 응력집중이 증가하고 있음을 알 수 있다.

새구조물과 사용중인 구조물에 대한 각 단에 위치한 가스배출구에서의 최대응력분포는 Fig. 7과 같다. 그림에서와 같이 결과를 극좌표계로 나타내어 가스배출구 위치에 따른 응력분포를 알기 쉽게 하였다. 그림에서는 2 ~ 7단에 있는 가스배출구에서의 응력분포를 보여주고 있다. 둘레방향은 가스배출구 번호로서, 각 단에는 1에서 40번까지 총 40개의 가스배출구가 있고, 1번 가스배출구는 구조물 전면에 위치한다. 또한 중심에서 반지름 방향은 응력의 크기를 나타내고 있다.

구조물에는 용강의 압력에 의해 구조물 둘레방향의 응력이 발생하며, 용강 무게와 구조물의 자중에 의해 높이방향 응력이 발생한다. 그림에

Fig. 5 Stress distribution for the original structure (unit: MPa)

Fig. 6 Stress distribution for the used structure (unit: MPa)

Fig. 7 Stress distribution at vent holes (a) for the original and (b) the used structure

Fig. 8 Stress values of the vent holes at the front side of the structure

서 볼 수 있듯이 전반적으로 구조물 상단(7단 방향)에서 응력이 가장 작으며 하단(2단 방향)으로 갈수록 응력은 증가한다. 그러나 최대응력이 발생하는 위치는 5단의 34번 가스배출구로서 두 구조물의 차이가 없으며, 이것은 구조물의 구조적인 특성에 의한 것으로 판단된다. 또한 응력은 구조물 좌우가 대략적으로는 대칭으로 분포하지만 정확하게 같지는 않은데, 이는 구조물이 완벽한 대칭구조가 아니기 때문이다. 이러한 응력분포는 새구조물이나 사용중인 구조물 사이에는 차이가 없으며, 사용중인 구조물은 새구조물에 비해 응력이 크게 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 8은 구조물 전면에 위치한 가스배출구 1번의 각 단별 응력분포를 보여주고 있다. 그림에서 수직축의 숫자는 높이방향 가스배출구의 단을 나타내고 있으며, 새구조물과 10년 사용한 구조물에 대하여 2단에서 7단까지의 응력을 비교하였다. 응력은 대체로 용강의 압력으로 인해 저단에서 높다. 이 예의 경우 두께의 감소와 가스배출구 주위의 침/부식으로 인해 응력은 2.5 ~ 2.8배 정도 증가하고 있다.

한편, 최대응력은 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 두 경우 모두 구조물 좌측 지지대의 하단 부근의 가스배출구(5단 34번)에서 발생하며, 그 크기는 각각 107.3, 310.6 MPa이다. 새구조물의 경우에는 소재 최소 항복강도의 1/2보다 작지만, 10년 정도 사용중인 구조물 소재의 최소 기준 인장강도 402 MPa 보다는 작지만 최소 항복강도 235 MPa 보다 높은 결과를 보여주고 있다. 또한 이 값은

계장화압입시험으로 측정된 최소 항복강도 235.7 MPa보다 높은 결과로서 항복영역이 국부적이긴 하지만 구조물의 안전에 유의할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 용강운반용 철강구조물에 대하여, 계장화압입시험법을 이용한 소재의 기계적 물성 측정과 응력해석을 통해 구조물의 안전성을 검토하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 계장화압입시험에 의한 기계적 물성 평가 결과 5년과 10년 사용한 구조물의 항복강도와 인장강도는 모두 소재 SM400B의 기준을 만족시키지만, 10년 사용한 구조물의 경우 5년 사용한 것에 비하여 낮은 값으로 평가되어 기계적 물성의 열화가 진행되고 있음을 알 수 있었다. 특히 10년 사용한 구조물의 항복강도는 235.7 MPa로 SM400B의 최소 기준값에 근접한 것으로 평가되었다.
- 2) 구조해석 결과, 용강의 압력 증가로 인해 구조물 하단으로 갈수록 가스배출구의 응력은 증가하며, 최대응력은 구조물 지지대의 우측 하단부에 위치한 가스배출구에서 발생한다.
- 3) 침/부식으로 인한 구조물 두께 감소와 가스배출구 주위의 부식으로 인하여 응력집중이 발생을 하고 있으며, 10년 사용한 구조물의 경우 최대 응력은 소재의 기준 항복응력은 물론 계장화압입시험법에 의해 측정한 항복응력을 넘고 있어 구조물의 안전에 유의할 필요가 있는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 전남대학교 중화학설비안전진단센터의 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- [1] KS B0950 "Metallic materials - Instrumented indentation test for indentation tensile properties," Korean Agency for Technology

- and Standards, 2009
- [2] ISOTR29381, "Metallic Materials - Instrument Indentation Test for Measurement of Indentation Tensile Properties," Inter. Standard Org. (2008)
- [3] J.-S. Lee, J.-i. Jang, B.-W. Lee, Y. Choi, S. G. Lee and D. Kwon, "An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics," *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 1101-1109 (2006)
- [4] K.-W. Lee, M.-J. Choi, J.-Y. Kim, K.-H. Kim, D. Kwon, "Instrumented Indentation Technique: New Nondestructive Measurement Technique for Flow Stress-Stain and Residual Stress of Metallic Materials," *Journal of the KSNT*, Vol. 26, No. 5, pp. 306-314 (2006)
- [5] J. H. Ahn and D. Kwon, "Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentation: examination of strain definition and pile up effect," *J. Mater. Res.* Vol. 16, pp. 3170-3178 (2001)
- [6] J. Y. Kim, K. W. Lee and D. Kwon, "Determination of tensile properties by instrumented indentation technique: Representative stress and strain approach," *Surf. Coat. Tech.* Vol. 201, pp. 4728-4736 (2006)
- [7] KS D 3515 "Rolled Steels for Welded Structure," Korean Agency for Technology and Standards (2008)