

단부에 국부부식이 발생한 용접 원형 강관의 잔존 압축 강도 평가

김형석¹ · 신창희² · 다오두이킨³ · 정영수⁴ · 김인태^{5*}

¹석사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, ²박사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과,
³공학박사, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, 토목공학과,
⁴공학박사, 부산대학교, 지진방재연구센터, ⁵교수, 부산대학교, 사회환경시스템공학과

Evaluation on residual compressive strength of welded circular tubular members with locally corroded ends

Kim, Hyoung Seok¹, Shin, Chang Hee², Dao, Duy Kien³, Jeong, Young Soo⁴, Kim, In Tae^{5*}

¹MSc. Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

³Ph.D., Dept. of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh, 762554, Vietnam

⁴Ph.D., Seismic Simulation Test Center, Pusan National University, Yangsan, 50612, Korea

⁵Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract – To investigate compressive strength of corroded circular tubular columns, compression tests were carried out on welded circular tubular members with locally corroded end. The members were cut into short columns and artificial local corrosion were introduced to the bottom end with different corrosion depth of 0, 4, 6mm and height of 0, 20, 60, 180mm. As a result, compressive critical loads decreased linearly with increasing of corrosion level (depth and height), and it was confirmed that residual compressive critical loads can be evaluated by corroded volume loss ratio. Accordingly, an equation of residual compressive critical loads was suggested for welded circular tubular short columns with locally corroded ends.

Keywords – Welded circular tubular member, Short column, Local corrosion, Volume loss ratio, Compressive strength

1. 서 론

해양 구조물, 발전소 및 교량 등 대규모 시설물의 건설이 증가함에 따라 효율적인 부재의 사용이 요구되어, 강도와 강성이 모두 우수한 강관의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 특히, 원형 강관은 약축과 강축이 존재하지 않고 모든 방향에 대하여 강성이 동일하여 대규모 시설물에 널리 사용되고 있다. 하지만 원형 강관은 부재의 폭에 비해 두께가 얇아 부식이 발생할 경우 단면적의 손실

에 따른 구조성능의 급격한 저하가 우려된다.

Ahn et al.^{[1],[2]}은 길이방향 중심부에 국부부식을 인위적으로 모사한 원형 강관의 압축실험을 실시하여, 부피의 손실률에 따른 하중의 감소율을 평가하였다. Lutes et al.^[3]은 원형 강관에 대칭 또는 비대칭의 부식이 발생하였을 때 압축강도의 변화를 이론적으로 분석하였으며, 잔존 압축 하중비 추정식을 제안하였다. 또한, Nazari et al.^[4]은 입의의 위치에 발생한 국부부식이 원형 강관의 압축 강도에 미치는 영향을 검토하였으며, 강관의 형상비를 이용하여 하중비 평가식을 제안하였다.

한편, Fig. 1.에 나타난 것과 같이 강관 부재가 콘크리트 또는 강재 기초 등의 수평부재와 접해있는 경우, 강관의 하단부에는 이 물질과 수분 등의 적체로 인해 국부부식 및 단면손실이 발생하기 쉽다^{[5],[6]}. 예를 들어, 일본 Honshu 트리스교와 같이 콘크리트 슬래브를 관통한 사재의 하단부(콘크리트와의 접합부 상단)에서 국부부식에 의해 사재가 파단된 것과 같은 심각한 안전성 저하가

Note.-Discussion open until December 31, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 15, 2018; revised May 4, 2018; approved on May 10, 2018.
Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2497 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. itkim@pusan.ac.kr

우려된다. 앞서 언급한 선행 연구들은 원형강관의 중심부에 발생한 부식에 대해서는 검토하였으나 단부에 발생한 부식에 대해서는 검토한 사례가 없다. 또한, 선행 연구에서 제안한 평가식은 지나치게 많은 재원을 측정 또는 계산해야하거나 조건에 따라 달라지는 상수를 매번 실험을 통해 구해야 하는 단점이 있다. 따라서 강구조물의 경제적이고 합리적인 유지관리를 위해서는 기존 연구를 통해 검토되지 않았던, 단부에 국부부식 손상이 발생한 원형 강관의 잔존 내하력 평가법에 대한 검토가 필요하다.

이에, 본 연구에서는 단부에 인위적인 국부부식을 도입한 구조용 용접 원형 강관의 압축실험을 실시하여, 국부부식 정도와 압축 임계 하중과의 관계를 정량적으로 검토하였으며, 유효부피에 대한 잔존 부피비를 이용하여 단부에 국부부식이 발생한 용접 원형 강관의 잔존 압축강도 평가식을 제시하였다.

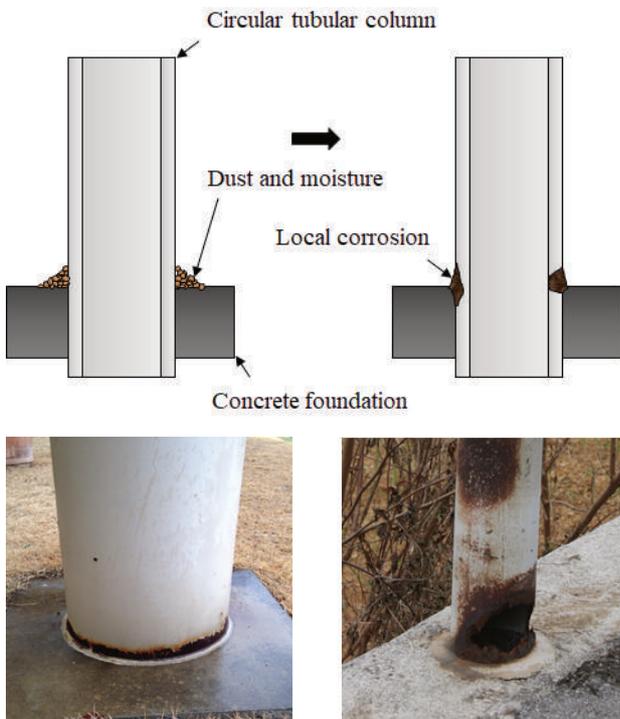


Fig. 1. Occurrence of local corrosion at the contact of columns with transverse members

2. 실험 절차

2.1 시험체 제작

본 연구에서는 강종 STPG 370으로 제작된 용접 원형 강관의 압축실험을 실시하였다. 원형 강관은 ASTM A 500^[7]에 근거하

여 외경 267.4mm 및 두께 9.3mm의 재원을 사용하였으며, 길이 920mm인 단주로 제작하였다(Fig. 2.). 원형 강관의 하단부에는 다른 부재와의 연결부나 하단지점부 등 단부에 발생할 수 있는 국부부식을 모사하기 위하여 인위적으로 부분 밀링(Milling) 절삭하였다. 부식 환경에 따라 국부부식정도가 다르게 나타나는 것을 고려하여 부식된 깊이 및 높이를 달리하여 가공하였다. 부식된 깊이는 0, 4 및 6mm로, 부식된 높이는 하단부로부터 0, 20, 60 및 180mm로 가공하여 무부식 시험체 2개와 부식 시험체 4개를 제작하였다. 또한, 다른 부재와의 연결부나 하단 지점부를 단순하게 모사하기 위하여 폭 400mm 및 두께 20mm인 정사각형 강판을 강관의 양단부에 필릿 용접하였다. 각 시험체별 상세 재원은 Table 1과 Fig. 3.에 나타낸 바와 같다.

시험체의 명칭은 부식된 두께와 높이를 각각 D(Depth), H(Height)의 뒤에 숫자로 표현하였다. 예를 들어, D0H0 시험체는 국부부식을 적용하지 않은 기준 시험체이며, D4H20 시험체는 Fig. 3.(b)와 같이 부식된 깊이를 4mm, 부식된 높이를 20mm로 가공한 시험체이다.

실험결과 분석에 시험체의 정확한 재원을 사용하기 위해, 원형 강관 및 밀링 가공된 깊이 및 높이를 측정하였다. 그 결과, 원형 강관의 초기 평균 두께는 8.8mm(공칭 초기두께는 9.3mm), 직경은 267.4mm, 길이는 920mm로 측정되었으며, 밀링 가공후의 재원은 설계값과 거의 동일한 수치로 측정되었다. 이에 따라, 본 연구에서는 실제 측정된 재원을 사용하여 결과를 분석하였다.

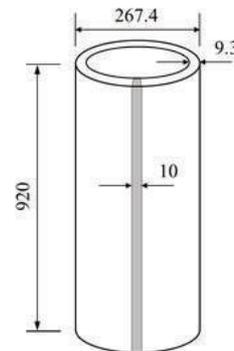


Fig. 2. Dimension of circular tubular steel pipe (mm)

Table 1. Dimension of introduced local corrosion

Corrosion level		Corrosion Depth		
		0mm	4mm	6mm
Corrosion Height	0mm	D0H0		
	20mm		D4H20	
	60mm		D4H60	D6H60
	180mm		D4H180	

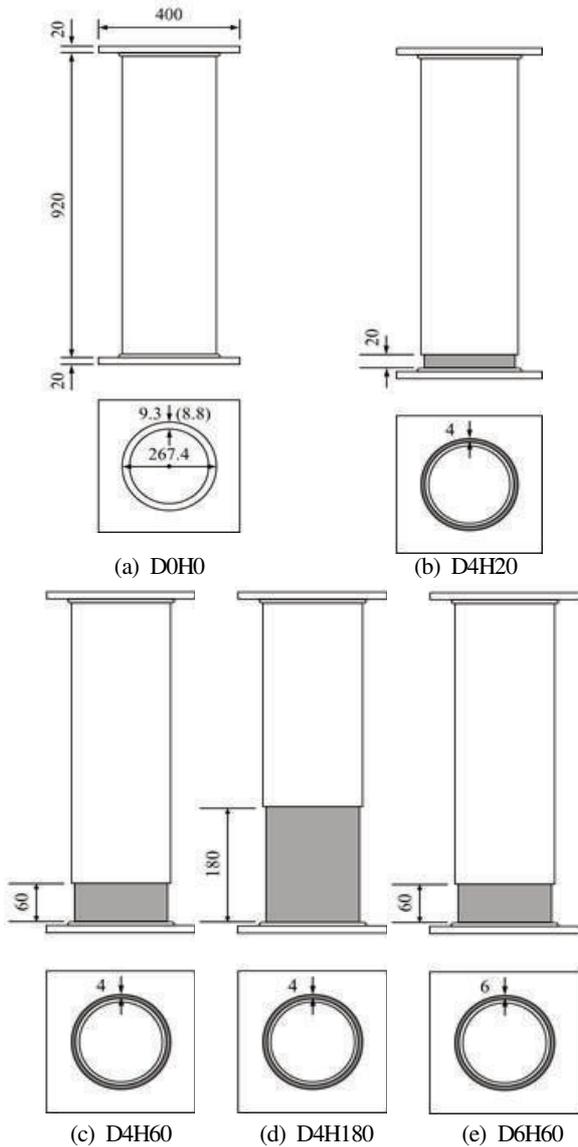


Fig. 3. Fabrication of specimens (mm)

원형 강관 시험체 제작에 사용된 강재의 재료특성을 확인하기 위해 인장시험을 실시하였다. 인장 시험체는 Fig. 4.에 나타낸 바와 같이 용접부에서 1개, 용접부를 포함하지 않는 영역에서 3개를 채취하였으며, ASTM E8^[8]에 준하여 제작하였다. 인장시험으로부터 얻은 강재의 재료특성과 밀시트(Mill sheet)상의 화학성분을 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험 조건

본 연구에서는 5000kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 압축시험을 실시하였다. 압축시험은

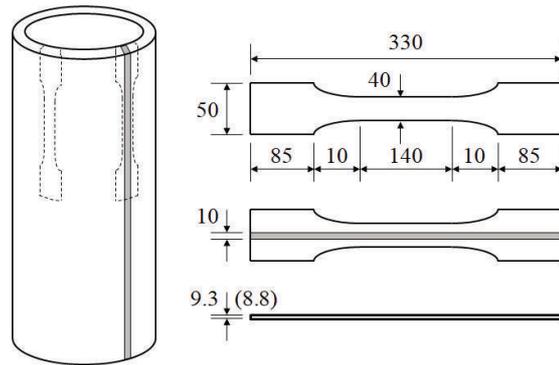


Fig. 4. Tensile test specimen (mm)

Table 2. Material properties and chemical compositions

Specimen	Material properties			
	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation at failure (%)	
Parent metal	342	416	40	
Weld metal	419	475	25	
Chemical composition (wt%)				
C	Si	Mn	P	S
0.150	0.100	0.390	0.014	0.007

ASTM E8^[8]에 따라 변위 제어방식을 사용하였으며, 시험체가 항복하기 전까지는 1mm/min의 속도로, 항복 후에는 5mm/min의 속도로 재하하였다. 또한 Fig. 5.에 나타낸 바와 같이 변형률 게이지를 시험체의 길이방향 중심부에 둘레방향으로 4개 부착하여 하중의 편심 재하 여부를 검토하였다. 실험은 압축 하중이 최대하중에 도달한 후 80%로 감소하였을 때 종료하였다. Fig. 5.에 실제 압축시험의 모습을 나타내었다.

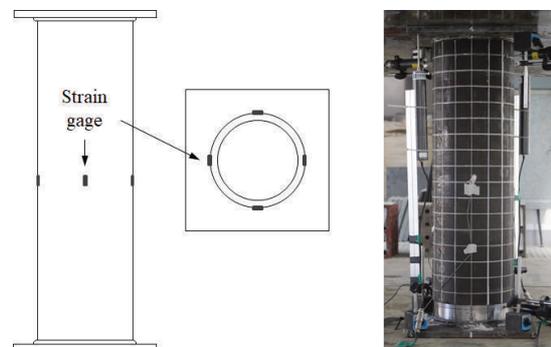


Fig. 5. Test setup

3. 실험 결과

3.1 원형 강관의 압축 거동

압축실험 결과를 압축하중-수직변위 곡선으로 Fig. 6.에 나타내었다. D0H0 및 D4H20시험체는 임계 하중(Critical load)을 지나 극한 하중(Ultimate load)에 도달한 후 하중이 감소하였으며, D4H60, D4H180 및 D6H60시험체는 임계 하중(Critical load)에 도달한 후 하중이 감소하였다.

일반적으로 원통형 셸(Cylindrical shell)은 얇은 두께 구조물(Thin-walled structure)로서, 순수 압축 하중을 받을 때에는 임계하중에서 국부좌굴에 의해 파괴된다. 하지만, 비교적 두께가 두꺼운 강관의 경우에는 임계 하중에 도달한 후에도 하중이 증가하여 극한 하중에 도달하게 된다^[9]. 즉, D0H0 및 D4H20 시험체는 비교적 두께가 두꺼운 강관으로 거동하였고, D4H60, D4H180 및 D6H60 시험체는 두께가 얇은 강관으로 거동한 것을 알 수 있다. 여기서, D4H20시험체는 D4H60 및 D4H180 시험체와 동일한 잔존 두께(4.4mm)를 가지고 있음에도 불구하고 극한 하중에 도달한 것을 알 수 있는데, 그 이유는 Fig. 7.에 나타난 시험체별 좌굴형상에서 확인할 수 있다.

모든 시험체는 단부 부근에 발생한 국부좌굴에 의해 파괴되었는데, D4H60 및 D4H180 시험체는 부식 손상부에서 좌굴이 발생한 반면, D4H20 시험체는 부식 손상부의 상부에서 좌굴이 발생한 것을 알 수 있다. 따라서 D4H20 시험체에서 좌굴이 발생한 영역은 단면 감소가 없는 무부식 부위로서 D0H0 시험체와 두께가 동일하므로 비교적 두께가 두꺼운 강관으로 거동한 것으로 판단된다.

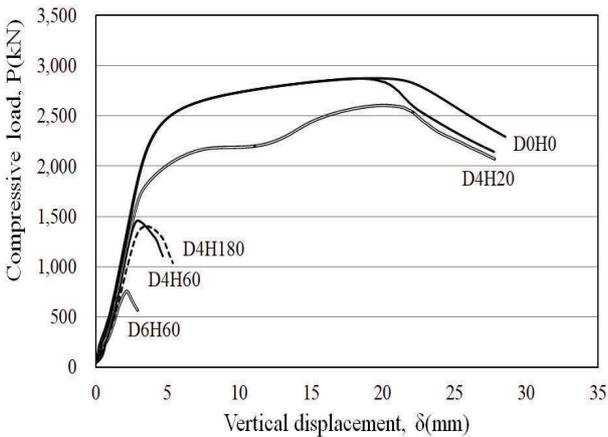


Fig. 6. Compressive load - vertical displacement curves

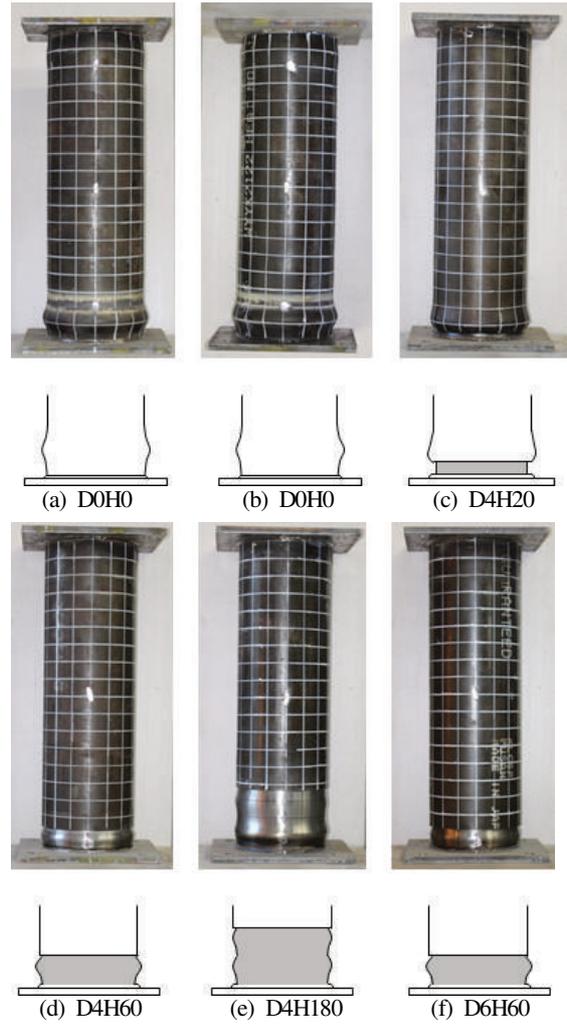


Fig. 7. Buckling mode

3.2 부식 정도에 따른 압축 하중의 변화

부식된 깊이 및 높이에 따른 압축 하중의 변화를 분석하기 위해, 본 실험 결과를 Fig. 8.과 같이 부식된 깊이 및 높이에 따른 임계 하중비(Critical load ratio)로 나타내었다. 여기서 임계 하중 비란 무부식 시험체의 임계 하중에 대한 부식된 시험체의 임계 하중의 비를 나타낸다.

본 연구에서 임계 하중을 기준으로 검토한 이유는, 도로교 설계기준에서 원형강관 부재의 허용응력은 항복응력을 고려하여 검토하도록 명시되어 있기 때문이다. 또한 용어의 선정에는 항복 하중과 임계하중의 혼용을 피하기 위해 탄성안정론^[9]에 근거하여 임계하중으로 통일하였다.

Fig. 8.(a)는 부식된 깊이에 따른 임계 하중비를 나타낸 것이며 부식된 높이는 60mm로 동일하고 부식된 깊이를 0, 4 및 6mm로 가공한 시험체(D0H0, D4H60 및 D6H60)를 사용하였다. 그

림에 나타난 것과 같이 부식된 깊이가 증가함에 따라 임계 하중비는 선형 감소함을 알 수 있다. Fig. 8.(b)는 부식된 높이에 따른 임계 하중비를 나타낸 것이며 부식된 깊이는 4mm로 동일하고 부식된 높이를 0, 20, 60 및 180mm로 가공한 시험체(D0H0, D4H20, D4H60 및 D4H180)를 사용하였다. 부식된 높이가 0, 20, 60mm로 증가함에 따라 임계 하중비는 선형 감소하였지만 부식된 높이가 60mm에서 180mm로 증가하여도 임계 하중비는 더 이상 감소하지 않는 것을 알 수 있다. 부식된 높이가 60mm 이상이어도 하중이 더 이상 감소하지 않는 이유는 아래와 같이 추정할 수 있다.

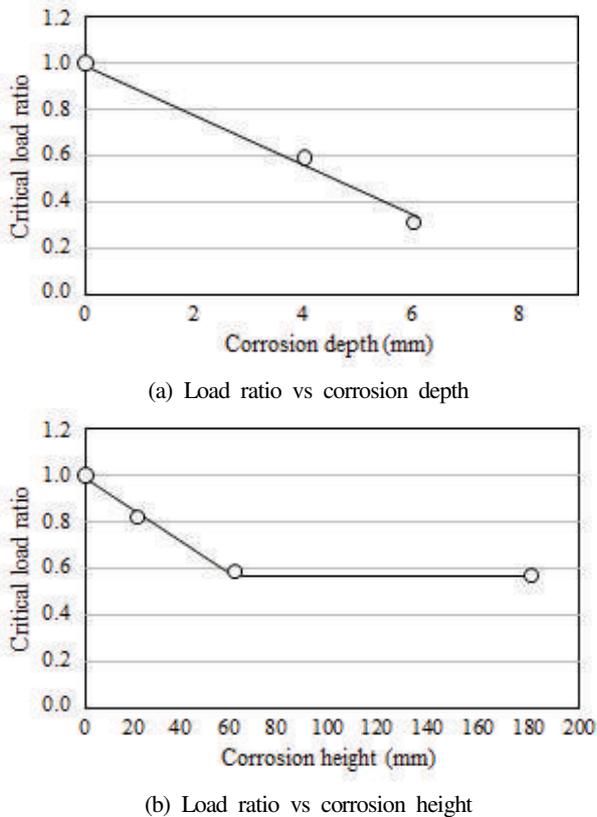


Fig. 8. Compressive critical load vs. corrosion level

원형 강관에 압축 하중이 작용하면, 원형 강관의 축방향에 따라 일정한 단위 길이로 분할한 링 요소(Ring element)들의 상호 작용에 의해 Fig. 9.와 같이 단부로부터 특정 길이만큼 떨어진 위치의 링 요소가 가장 취약해진다. 이에 따라, 이 위치의 링 요소가 가장 먼저 임계 하중에 도달하게 되고, 횡 방향 최대 변위가 발생하게 된다. 이 때, 단부로부터 횡 방향 최대 변위가 발생하는 링 요소까지의 수직 거리를 좌굴의 반파장(Half-wavelength of buckling)이라고 하며 식 (1)과 같이 원형 강관의 직경과 두께에

의해 결정된다^[9]. 본 연구에서 사용한 무부식 원형 강관의 직경과 두께를 대입하면 좌굴의 반파장은 59.0mm로, 실험 후 시험체에서 측정한 60mm와 거의 동일하였다.

$$H_e = 1.72 \sqrt{Rt} \tag{1}$$

여기서, H_e 는 좌굴의 반파장이며, R 은 원형 강관의 반경, t 는 원형 강관의 두께이다.

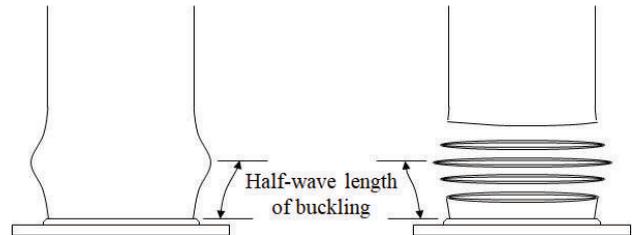


Fig. 9. Definition of half-wavelength of buckling

만약 부식된 높이가 좌굴의 반파장 위치보다 작은 경우, 즉 부식된 높이가 좌굴의 반파장 위치 이내에서 변할 경우 반파장 이내에 위치한 링 요소들의 단면이 변하게 되고 이는 임계 하중과 좌굴 발생 위치에 영향을 미치게 된다. 반면, 부식된 높이가 좌굴의 반파장 보다 커질 경우, 부식된 높이가 계속 증가한다 하더라도 반파장 이내에 위치한 모든 링 요소들은 변하지 않아 임계 하중과 좌굴 발생 위치에도 더 이상 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다. 따라서 본 실험에서 부식된 높이가 0mm에서 60mm로 증가할 때 임계 하중은 선형 감소하였지만, 부식된 높이가 60mm에서 180mm로 증가하더라도 좌굴의 반파장(60mm)이내의 링 요소는 동일하므로 임계 하중 또한 더 이상 감소하지 않고 동일하였다고 추정할 수 있다.

3.3 잔존 압축 하중비 평가

중앙부에 국부부식이 발생한 원형 강관의 잔존 압축 하중비는 부식이 발생하지 않은 강부재의 부피(체적)에 대한 부식 강재의 부피비에 반비례한다고 알려져 있다^{[11],[12]}. 이는, 임계 하중비(\bar{P}_c)는 식 (2)와 같이 부식 부피비(V_c / V_t)를 이용하여 추정할 수 있음을 의미한다.

$$\bar{P}_c = a \left(\frac{V_c}{V_t} \right) + b \tag{2}$$

여기서, \bar{P}_c 는 기준 시험체의 임계 하중에 대한 부식된 시험체

의 임계 하중비이며, V_c 는 부식으로 감소된 부피, V_t 는 원형 강관의 총 부피이다.

본 연구에서 사용한 시험체와 같이 단부에 부식손상이 발생한 경우의 임계 하중비도 부식 부피비에 선형 비례하는 경향이 있음을 확인할 수 있다(Fig. 10.). 그러나 D4H60과 D4H180의 시험체와 같이 부식된 깊이는 각각 60mm와 180mm로 부식 부피비는 다르지만, 임계 하중비가 동일한 경우에 대해서는, Fig. 10.에 나타난 것과 같이 식(2)로 임계 하중비를 정도 높게 추정할 수 없을 것이다. 그리고 본 연구에서는 강관 길이를 920mm로 하였지만, 예를 들어 800mm 또는 1000mm로 강관 길이를 달리 하여도 임계 하중은 본 실험과 동일하지만 부식 부피비는 다르게 계산되어 식(2)의 상수 a, b는 실험에 사용된 기둥 길이에 따라 변하게 될 것이다. 따라서 식(2)을 이용하여 국부부식이 발생한 원형 강관의 임계 하중비를 추정하는 것은 제한적이라고 할 수 있다.

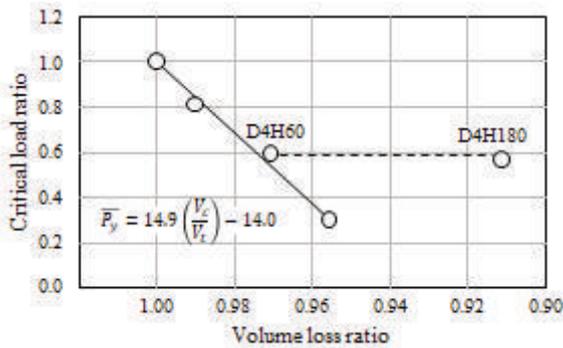


Fig. 10. Relationship between Volume loss ratio (Eq. (2)) and Experimental critical load ratio

이에 본 연구에서는 원형 강관의 길이 및 부식 높이에 상관없이 동일한 평가식으로 임계 하중비를 평가하기 위해 국부부식된 원형 강관의 잔존 임계 하중비 평가식을 검토하고자 한다. 먼저, Fig. 8.(a)와 (b)에서 기술한 것과 같이 임계 하중비는 부식된 깊이 또는 부식된 높이가 증가함에 따라 선형 감소함을 알 수 있다. 그리고 부식된 높이가 식(1)의 좌굴의 반파장 이상인 경우에는 임계 하중은 동일하고, 단부로부터 좌굴의 반파장 영역내의 부피가 임계 하중의 변화와 상관관계가 있음을 확인하였다. 따라서 임계 하중비는 식(3)과 같이 강관의 초기두께(8.8mm)에 대한 부식된 깊이(d)의 비와 좌굴의 반파장(H_e)에 대한 부식된 높이의 비를 조합하여 나타낼 수 있을 것이다. 단, 부식높이(H)가 좌굴의 반파장(H_e)보다 큰 경우에는 좌굴의 반파장(H_e)으로 한다. 또한 식(4)에 나타난 바와 같이, 임계 하중비는 유효부피에 대한 부식 부피비 또는 잔존부피 비로 나타낼 수 있을 것이다.

$$\bar{P}_y \propto \left(1 - \frac{d}{t} \frac{H}{H_e}\right) \text{ or } \bar{P}_y \propto \left(1 - \frac{V_c}{V_e}\right) \quad (3)$$

$$\bar{P}_y = \left(1 - \frac{V_c}{V_e}\right) = \frac{V_r}{V_e} \quad (4)$$

여기서, d 는 부식된 깊이, t 는 원형 강관의 초기두께이며, H 는 부식된 높이, H_e 는 유효높이(좌굴의 반파장)이다. V_r 은 유효부피 내의 잔존부피이다.

본 실험을 통해 측정된 임계 하중비와 식(4)로 계산한 임계 하중비를 비교하여 오차율과 함께 Table 3과 Fig. 11.에 나타내었다. Table 3과 Fig. 11.에 나타난 것과 같이 식(4)를 이용한 임계 하중비는 부식깊이 및 부식높이의 부식정도가 다른 경우에 대해서 9%이내로 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 단부에 국부부식이 발생한 용접 원형 강관의 임계 하중비는 좌굴 반파장의 유효높이 및 유효부피를 도입한 식(4)를 이용하여 정도 높게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Comparison of experimental and calculated critical load ratio

Specimen	Experimental ratio	Calculated ratio (Eq. (4))	Error rate (%)
D0H0	1.000	1.000	0.0
D4H20	0.818	0.848	3.6
D4H60	0.594	0.545	8.9
D4H180	0.571	0.545	4.7
D6H60	0.308	0.318	3.2

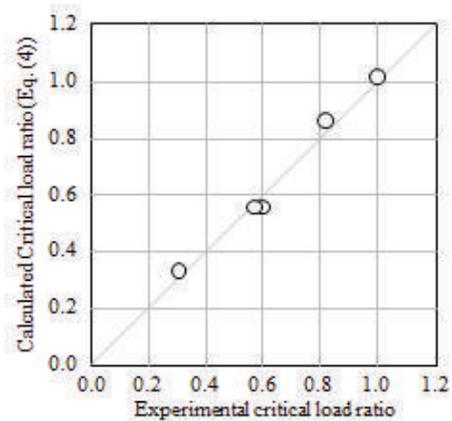


Fig. 11. Error rate between experimental and calculated (Eq. (4)) critical load ratio

3.4 부식 손상 원형 강관의 압축 임계강도 평가

일반적인 원형 강관 단주의 압축 임계 하중은 항복 응력과 단면의 제원을 이용하여 식(5)와 같이 계산할 수 있다. 그러나 현재 국부부식이 발생한 원형 강관의 임계 하중을 평가할 수 있는 방법이 제안되어 있지 않아, 이에 대한 평가식을 제안하고자 한다.

단부에 국부부식이 발생한 원형 강관의 임계 하중비는 식(4)로 계산할 수 있으므로, 임계 하중은 식(5)에 부식에 의해 감소된 유효 부피비를 적용한 식(6)으로 계산할 수 있을 것이다.

$$P_c = 2\pi R t \sigma_y \tag{5}$$

$$P_c = 2\pi R t \sigma_y \left(\frac{V_r}{V_e} \right) \tag{6}$$

여기서, P_y 는 원형 강관의 임계 하중이며, σ_y 는 강재의 항복 응력이다.

본 실험으로부터 측정된 임계 하중과 식(6)의 제안식으로 계산된 임계 하중을 비교하여 Table 4와 Fig. 12.에 나타내었다. 실험값과 제안식에 의한 계산값의 최대 오차율은 9.4%로, 본 연구의 제안식(6)을 이용하여 단부에 국부부식이 발생한 원형 강관의 임계 하중을 최대 10% 오차범위 내로 평가할 수 있음을 알 수 있다. 단, 식(6)의 항복응력은 용접부를 포함하지 않는 강재의 인장 실험으로부터 구한 항복응력을 사용하였다. 따라서 안전점검시 단부에 국부부식이 발생한 용접 원형 강관의 임계 하중은 강종의 확인 및 항복 응력 산정, 강관의 반경(R) 및 초기두께(t)의 측정, 부식높이 및 부식깊이의 측정, 식(1)에 의한 좌굴의 반파장 계산 및 유효 부피비 산정을 통하여 추정할 수 있을 것이다.

실제 강구조물에 발생하는 부식은 불균일한 표면형상으로 나타난다. 이때, 부식된 강재의 거동은 부식 손상 정도에만 영향을 받는 것이 아니라 부식이 발생한 표면형상에도 영향을 받게 된다. 하지만 부식 손상 정도는 주로 강재의 정적거동에 영향을 미치는 반면, 부식이 발생한 표면형상은 강재의 피로거동에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 원형강관부재의 압축거동을 검토함에 따라, 부식 표면형상의 영향을 배제하기 위해 밀링으로 시험체를 가공하여 원주방향 또는 길이방향으로 동일한 두께의 부식손상을 모사하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 식을 사용하여 실제 부식된 원형 강관의 잔존 압축 하중을 평가하기 위해서는 불규칙한 부식형상이 임계하중에 미치는 영향 또는 불규칙한 부식형상의 단축화 등에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 생각된다.

Table 4. Comparison of experimental and calculated critical load (Eq.(6))

Specimen	Experimental load (kN)	Calculated load (kN) (Eq.(6))	Error rate (%)
D0H0 (1)	2,453	2,444	0.4
D0H0 (2)	2,455	2,444	0.5
D4H20	2,008	2,074	3.2
D4H60	1,458	1,333	9.4
D4H180	1,401	1,333	5.1
D6H60	756	778	2.8

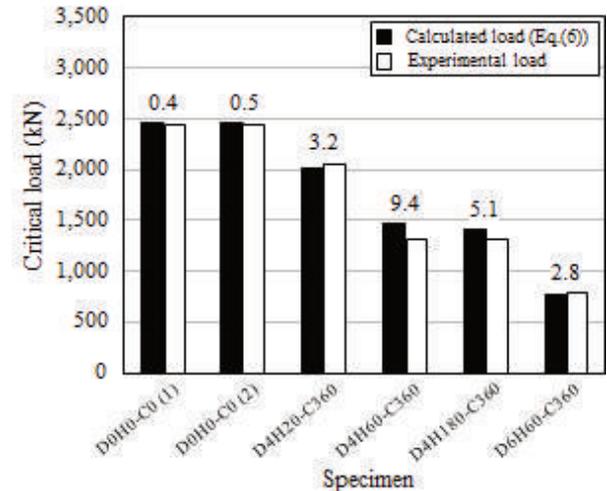


Fig. 12. Error rate between experimental and calculated critical load (Eq. (6))

4. 결 론

본 연구에서는 부식손상에 따른 원형 강관의 구조적 성능 저하를 평가하기 위해, 단부에 부식된 깊이 및 높이가 다른 국부부식을 적용한 용접 원형 강관 단주의 압축실험을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 부식된 깊이 및 높이가 증가함에 따라 잔존 임계 하중이 선형적으로 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 부식된 높이가 좌굴의 반파장 이상으로 증가할 경우에는 부식된 높이에 따른 하중 감소는 발생하지 않음을 확인하였다.

(2) 유효부피에 대한 잔존 부피비를 도입하여 아래와 같이 부식된 용접 원형 강관의 임계 하중비 계산식을 제안하였다. 선행 연구자들이 제안한 바와 같이 총 부피에 대한 부피비로 임계 하중비를 평가할 경우 임계 하중비와의 상관관계만을 확인할 수 있었으나, 본 연구에서 제안한 방식을 사용하여 평가할 경우 최대 오차율 8.9% 이내로 잔존 임계 하중비의 정량적인 평가가 가능함을 확인하였다.

$$\bar{P}_y = \left(1 - \frac{V_c}{V_e}\right) = \frac{V_r}{V_e}$$

(3) 일반적인 원형 강관 단주의 임계 하중 계산식에 본 연구에서 제안한 임계 하중비 계산식을 적용하여 아래와 같이 단부에 국부부식이 발생한 용접 원형 강관 단주의 임계 하중 계산식을 제안하였다. 제안식으로 계산한 임계 하중과 실험으로부터 얻은 임계 하중을 비교해본 결과, 단부에 국부부식이 발생한 용접 원형 강관의 임계 하중을 9.4%의 오차 이내로 평가할 수 있음을 확인하였다.

$$P_y = 2\pi R t \sigma_y \left(\frac{V_r}{V_e}\right)$$

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌(References)

- [1] 안진희, 남동균, 이원홍, 허정원, 김인태(2016) 원형 강관의 국부 부식손상 수준 및 손상형태에 따른 압축강도 성능평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제4호, pp.213-222.
- Ahn, J.H., Nam, D.K., Lee, W.H., Huh, J., and Kim, I.T. (2016) Evaluation of Compressive Strengths of Tubular Steel Members According to Corrosion Damage and Shape, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.4, pp.213-222 (in Korean).
- [2] Ahn, J.-H., Choi, W.R., Jeon, S.H., Kim, S.-H., and Kim, I.-T. (2016) Residual Compressive Strength of Inclined Steel Tubular Members with Local Corrosion, *Applied Ocean Research*, Elsevier, Vol.59, pp.498-509.
- [3] Lutes, L.D., Kohutek, T.L., Ellison, B.K., and Konen, K.F. (2001) Assessing the Compressive Strength of Corroded Tubular Members, *Applied Ocean Research*, Elsevier, Vol. 23, No.5, pp.263-268.
- [4] Nazari, M., Khedmati, M.R., and Khalaj, A.F. (2014) A Numerical Investigation into Ultimate Strength and Buckling Behavior of Locally Corroded Steel Tubular Members, *Latin American Journal of Solids and Structures*, LAJSS, Vol.11, No.6, pp.1063-1076.
- [5] 김인태, 신창희, 정지영(2010) 부식H형 강재의 복부좌굴강도 추정에 관한 기초적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.421-433.
- Kim, I.T., Shin, C.H., and Cheung, J.Y. (2010) A Fundamental Study on Evaluation Web Crippling Strength of Corroded H-Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.421-433 (in Korean).
- [6] 김인태, Kainuma, S., 정진환(2008) 콘크리트에 접해있는 강재의 국부부식과 피로손상, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.313-321.
- Kim, I.T., Kainuma, S., and Cheung, J.H. (2008) Local Corrosion and Fatigue Damages of Steel Plates at the Boundary with Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.2, pp.313-321 (in Korean).
- [7] American Society for Testing and Materials (2013) *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes* (ASTM A500/A500M-13), USA.
- [8] American Society for Testing and Materials (2016) *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials* (ASTM E8/E8M-16a), USA.
- [9] Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (2012) *Theory of Elastic Stability*, Dover Publications, USA.

요약 : 본 연구에서는 연결부나 지점부 등 단부에 국부부식이 발생한 원형강관의 압축강도 평가법을 검토하기 위해, 단부에 인위적인 국부부식을 모사한 용접 원형강관의 압축실험을 실시하였다. 원형강관 시험체는 단주로 제작하였으며, 부식환경에 따른 다양한 국부부식 정도를 모사하기 위해 부식된 깊이를 0, 4, 6 mm로, 부식된 높이를 0, 20, 60, 180 mm로 기계 가공하였다. 압축실험 결과, 압축 임계하중은 부식된 깊이 및 높이가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였으며, 잔존 임계하중비는 부식손상 부피비로 추정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 국부부식 손상 부피비를 이용하여 단부에 부식손상이 발생한 용접 원형강관 단주의 잔존 압축 임계하중 평가식을 제시하였다.

핵심용어 : 용접 원형 강관, 단주, 국부부식, 손상부피비, 압축강도