

## 피팅 부식된 원형강관 기둥의 축압축 임계하중 평가

김성구<sup>1</sup> · 김민석<sup>1</sup> · 김인태<sup>2</sup> · 허정원<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>학사과정, 부산대학교, 사회기반시스템공학과, <sup>2</sup>교수, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, <sup>3</sup>교수, 전남대학교, 토목공학과

## Evaluation of Axial Compressive Critical Load for Pitting-Corroded Circular Tubular Columns

Kim, Seong Ku<sup>1</sup>, Kim, Min Suk<sup>1</sup>, Kim, In Tae<sup>2</sup>, Huh, Jungwon<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Undergraduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea

**Abstract** – This study conducted buckling analyses on 53 tubular steel pipe column models simulating pitting corrosion to evaluate the critical load of columns that have local corrosion. Considering pitting corrosion observed in actual atmospheric corrosion environments, the shape of corrosion pits was modeled as a cone with a cone angle of 145°. This allowed a quantitative assessment of the effects of pitting corrosion damage in the axial, circumferential, and thickness directions on the critical load of the tubular steel pipe column. The results showed that the critical load decreases linearly as the pitting corrosion damage increases in the axial, circumferential, and thickness directions of the column. Furthermore, the critical load was found out to be dependent on the region of corrosion damage within the range of one-wavelength of buckling along the column axis. Furthermore, a predictive formula for the axial compressive critical load of tubular steel pipe columns with pitting corrosion damage was proposed using the volume ratio of corrosion damage within the one-wavelength of buckling.

**Keywords** – Tubular steel pipe, Pitting corrosion, Volume ratio of corrosion, Critical load, One-wavelength of buckling

### 1. 서론

대기환경하의 강재 부식은 강재가 산소와 물에 노출되면 발생하는 자연적 현상으로, 기후조건(기온, 강수량, 습도, 일사량 등) 및 환경조건(염분, 대기오염 등)에 따라 부식손상 정도는 달라진다. 특히, 국부적으로 집중해서 발생하는 국부부식은 강재의 두께 및 단면적을 감소시켜 강부재의 안전성과 내구성을 저하시킨다. 따라서 이를 방지하기 위한 예방적 유지관리가 필요하고, 부식손상이 발생한 경우에는 부식손상 정도에 따른 강부재의 잔존강도 평가 및 적절한 보수·보강이 필요하다.

원형 강관은 취급이 용이하고 대칭 단면으로 시공에

유리하여 교량뿐만 아니라, 해양 및 기타 주요 구조물에 사용되고 있다. 그러나 원형 강관 기둥은 두께가 얇아 부식손상으로 인한 좌굴에 취약하고, 압축 파괴로 이어질 수 있다.

부식손상된 원형 강관 기둥의 좌굴강도 평가에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔다. Herbor *et al.*<sup>[1]</sup>은 해양 구조물에서 국부 부식된 강관 기둥의 실험적 및 해석적 검토를 통해, 한 개의 패치 부식(patch corrosion)이 있는 원형 강관 기둥의 압축강도 평가식을 제안하였다. 이에 추가적인 파라메트릭 유한요소해석을 실시하여 Nazari *et al.*<sup>[2]</sup>은 적용 범위가 확대된 압축강도 평가식을 제안하였다. Oyasæter *et al.*<sup>[3]</sup>은 국부적으로 균일 부식이 발생한 경우의 원형 강관 기둥의 해석적 검토를 통하여 부식 깊이에 따른 좌굴강도 예측식을 제안하였다. Ahn *et al.*<sup>[4],[5]</sup>은 해양환경하에서 강관 기둥에 경사져 국부부식이 발생한 원형 강관 기둥에 대한 실험적 및 해석적 검토를 수행하여, 원형 강관 기둥의 압축강도 평가식을 제안하였다. Kim *et al.*<sup>[6],[7]</sup>은 기둥의 원주 방향으로 균일하게 부식된 원형 강관 기둥의 실험적 및

Note.-Discussion open until August 31, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 12, 2025; revised on January 10, 2026; approved on January 12, 2026.

Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-62-530-1655 Fax. +82-62-530-1659

E-mail. jwonhuh@chonnam.ac.kr

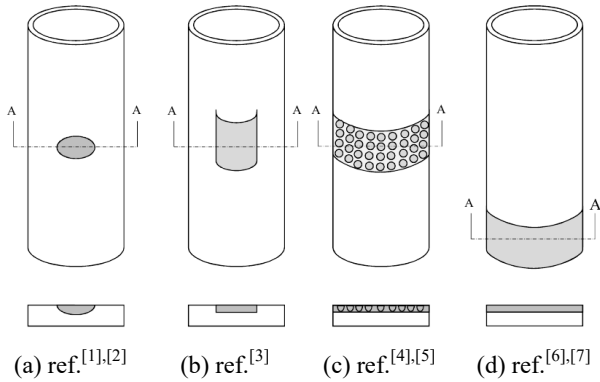


Fig. 1. Schematic representation of corroded column used in previous researches

Table 1. Corrosion shapes of introduced local corrosion

Reference	Considered corrosion parameters		
	Shape of patch corrosion		Corroded length
	Spherical	Rectangular	
[1], [2]	Single		×
[3]		Single	×
[4], [5]	Multiple		×
[6], [7]		Single	○

해석적 연구를 수행하여 기둥 축방향의 부식 손상 정도가 압축강도 평가에 주요 인자임을 정량적으로 제시하였다. 또한 이를 고려하여 부식손상에 의한 체적 손실 정도(Degree Of Volume, DOV)를 이용한 압축강도 평가식을 제안하였다.

이와 같은 기존 연구에서 Fig. 1과 Table 1에 나타난 것과 같이, 국부 부식손상을 단일 부식피트, 국부 균일 부식 또는 드릴링으로 부식 피트를 모사하였다. 따라서, 실제 대기환경하에서 국부 부식된 원형 강관 기둥의 축압축 강도 평가에의 직접 적용은 제한적이다. 따라서, 실제 대기 환경하에서 발생하고 있는 부식피트의 크기, 깊이, 형상 및 분포를 고려한 추가적인 검토가 필요하며, 기둥 축방향의 부식손상 정도에 대한 고려도 필요하다.

대기환경하의 부식은 부식환경 및 재료 특성 등의 영향으로 부식피트의 크기, 깊이, 형상 및 분포의 불확실성이 매우 크다. 이 중 부식피트의 크기와 깊이는 부식 환경에 노출된 기간에 비례하여 증가하고, 부식피트의 분포는 도장 등의 방식피막의 균질성 및 열화 정도에 따라 변한다. 따라서 실제 대기환경하의 도장강재의 부식 손상 모사에는 아직 많은 어려움이 있다.

한편, 선박의 도장 강부재에서 측정된 부식형상은 원

통형, 반타원형, 원뿔형으로 분류할 수 있다. Nakai *et al.*<sup>[8]</sup>은 도장된 강재 선박 구조물(bulk carrier)의 피팅 부식 특성을 조사하여, 피팅 부식 형상이 반지름 대 깊이의 종횡비가 0.2에서 0.5인 원뿔형(cone)로 대표할 수 있음을 제시하였다. 그리고 Qidi *et al.*<sup>[9]</sup>은 대기환경하에 4년간 노출된 무도장 강재와 25년간 공용된 도장 강부재의 부식형상을 측정하여 부식피트의 형상은 원뿔형으로 근사화할 수 있으며, 개별 부식피트의 증첩이나 부식 피트의 깊이와 상관없이, 원뿔 각(cone angle)의 평균은 약 145°라 제시하였다.

이에, 본 연구에서는 부식피트 형상을 원뿔형으로 모사한 원뿔형 피팅 부식이 발생한 원형 강관 기둥의 임계하중을 해석적으로 평가하였다. 먼저, 부식피트는 원뿔각 145° 원뿔형으로 모델링하여 원형 강관 기둥의 원주방향으로 등간격으로 발생한 경우, 두께방향의 원뿔형 부식피트의 깊이(부식손상 깊이), 원주방향의 분포수(부식손상 둘레), 길이(축)방향으로의 원뿔형 부식피트의 분포 높이(부식손상 높이)에 따른 임계하중의 변화를 검토하였다. 그리고 이를 종합적으로 검토하여, 좌굴 한파장내의 유효부피에 대한 잔존 부피비를 이용하여 원형 강관 기둥의 임계하중 평가식을 제안하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 부식피트 형상 모델링

본 연구에서 대기환경하의 피팅 부식을 대상으로 하여 부식피트 형상은 원뿔형으로 모델링 하였으며, 원뿔각은 145°로 일정하게 하고, 이들 개별 부식피트 깊이 및 분포 등의 부식손상 정도에 따른 파라메트릭 유한요소해석을 수행하였다.

피팅 부식의 모델링은 원뿔형 부식 피트만 모델링할 경우, 인접 부식피트와의 연결이 곤란하여, 한 개의 피팅 부식과 이를 포함하는 직각 육면체의 기본파트를 생성하였다. 그리고 이를 원형 강관 기둥의 축방향, 원주방향으로 확장하여 해석 모델을 제작하였다.

한 개의 피팅 부식을 포함한 기본파트는 Fig. 2와 같이 축방향으로 63.54 mm, 원주방향으로 52.50 mm이고, 그 중앙에 원뿔형 부식 피트가 위치하도록 하였으며, 이를 중심으로 좌우, 상하 대칭이 되도록 하였다. 원

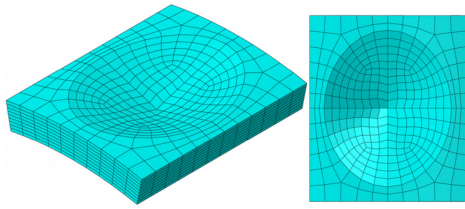


Fig. 2. FE mesh of base part (8.3 mm corrosion depth)

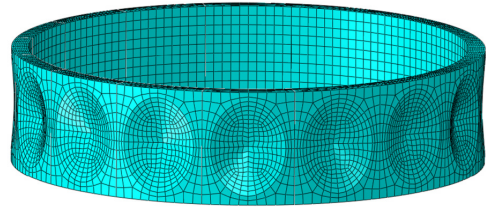
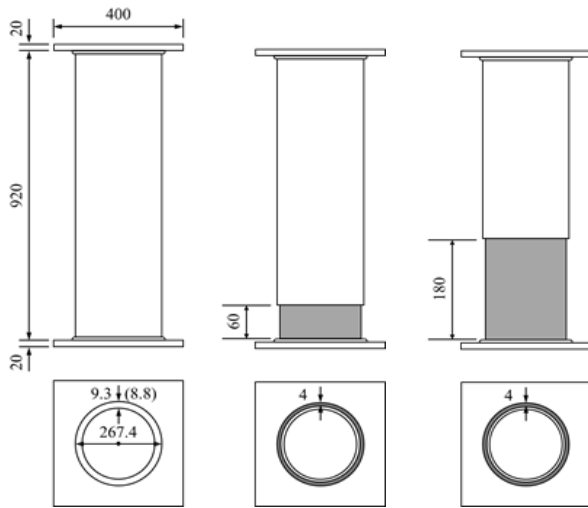


Fig. 4. FE mesh of 1 line part (8.3 mm corrosion depth)



(a) Uncorroded specimen (b), (c) Corroded specimens

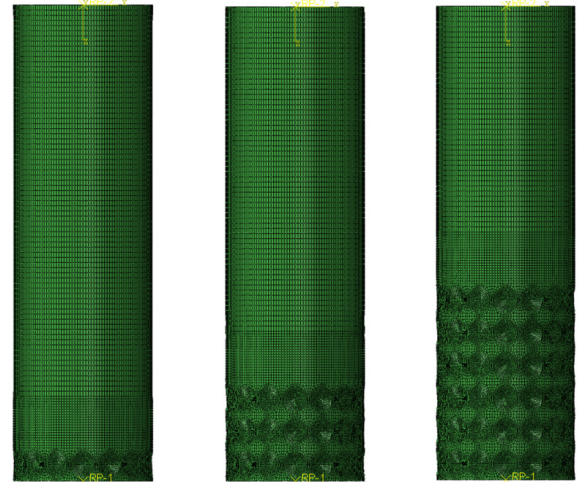
Fig. 3. Dimension of test specimens (mm)

뿔형 부식깊이는 3.1 mm, 6.2 mm, 8.3 mm로 하였고 원 뿔각은 145°로 일정하게 하였다. 기본파트의 요소 분할은 축 및 둘레 방향으로 각각 5 mm, 두께 방향으로는 1 mm로 하였다.

2.2 피팅 부식손상 원형 강관 기둥의 모델링

Kim et al.<sup>[6],[7]</sup>은 Fig. 3와 같이 단부에 국부적으로 균일 부식이 발생한 원형 강관 기둥의 축압축 실험과 유한요소해석을 실시하였다. 본 연구에서는 이 원형 강관 기둥에 피팅 부식이 발생한 경우의 해석적 검토로 강관의 직경, 길이, 두께 및 재료특성을 동일하게 사용하여 해석 모델을 제작하였다.

본 연구의 해석 모델 예를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 기준 해석 모델로는 Table 2에 나타난 것과 같이 부식손상이 없는 원형 강관 기둥을 제작하였다. 그리고 부식 깊이(3.1 mm, 6.2 mm, 8.3 mm)인 3종류의 원뿔형 부식피트가 기둥의 원주방향으로 1줄당 16개씩 균일 및 대칭 분포하는 해석모델을 제작하였다(각각



(a) D83-P16-L1 (b) D83-P16-L3 (c) D83-P16-L6

Fig. 5. FE models with pittings at bottom end

Table 2. Analytical models for pitting corrosion height

Corrosion depth (×0.1 mm)	Number of corrosion pit per line	Number of corrosion line	Symbol
0	0		D00-L0
31	16	1-6	D31-P16-L1-L6
62	16	1-6	D62-P16-L1-L6
83	16	1-6	D83-P16-L1-L6

D31-L1, D62-L1, D83-L1이라 칭함). 또한, 원주방향 1줄 모델(Fig. 4)에 추가하여 축방향으로 2줄부터 6줄까지 피팅 부식을 확장한 해석모델도 작성하였다(각각 D31-L2-L6, D62-L2-L6, D83-L2-L6이라 칭함). 이들 19개의 해석 모델은 기둥의 길이(축)방향 부식손상 정도가 임계하중에 미치는 영향을 해석적으로 검토하기 위해 제작되었다.

기둥의 축방향과 원주방향으로 기본 파트를 배치할 때, 기본 파트와 인접 구간의 축방향 요소 크기는 5 mm, 이 이외의 구간은 10 mm로 하였으며, 두께 방향은 1 mm로 동일하게 모델링하였다.

원형 강관 기둥의 두께방향 부식손상 정도가 임계하

**Table 3.** Analytical models for pitting corrosion thickness

Corrosion depth (×0.1 mm)	Number of corrosion pit per line	Number of corrosion line	Symbol
0	0		D00-L0
31	16	1-2	D31-P16-L1, L2
62	16	1-2	D62-P16-L1, L2
66	16	1-2	D66-P16-L1, L2
70	16	1-2	D70-P16-L1, L2
77	16	1-2	D77-P16-L1, L2
80	16	1-2	D80-P16-L1, L2
83	16	1-2	D83-P16-L1, L2

**Table 4.** Analytical models for corrosion circumferential length

Corrosion depth (×0.1 mm)	Number of corrosion pit per line	Number of corrosion line	Symbol
31	4	2	D31-P4-L2
	8	2	D31-P8-L2
	16	2	D31-P16-L2
62	4	2	D62-P4-L2
	8	2	D62-P8-L2
	16	2	D62-P16-L2
83	4	2	D83-P4-L2
	8	2	D83-P8-L2
	16	2	D83-P16-L2

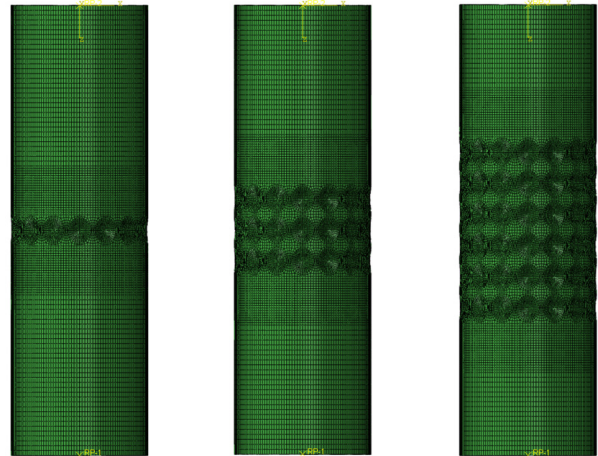
중에 미치는 영향을 해석적으로 검토하기 위하여 원뿔형 부식 피트의 깊이를 0, 3.1, 6.2, 6.6, 7.0, 7.7, 8.0, 8.3 mm로 변화시킨 해석 모델을 생성하였다. 이때 이들 부식 피트는 기둥의 원주방향으로는 1줄당 16개로, 축방향으로는 1줄 및 2줄로 분포하는 14개의 해석모델이 각각 제작되었다(Table 3 참조).

원형 강관 기둥의 원주방향 부식손상 정도가 임계하중에 미치는 영향을 해석적으로 검토하기 위한 해석 모델을 제작하였다. 부식 깊이는 3.1 mm, 6.2 mm, 또는 8.3 mm로 일정하게 하고 기둥의 원주방향으로 1줄당 부식 피트 수를 4, 8, 16개로 증가시키고, 축방향으로는 2줄로 분포하는 9개의 해석 모델을 제작하였다(Table 4 참조).

위의 해석 모델은 단부에 국부 부식이 발생한 경우를 모사하였다. 한편, 피팅 부식은 기둥의 단부 이외에서도 발생할 수 있을 것이다. 그리고 부식손상 정도가 동일한 경우에도 발생 위치에 따라 임계하중이 달라질 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 동일 부식손상이 발생한 경우, 부식손상 위치에 따른 임계하중 변화를 검토하기 위하여 하단부에 분포시킨 한 줄당 부식피트 16개가 배열된 부식 깊이 6.2 mm와 8.3 mm의 부식을 원

**Table 5.** Analytical models for pitting corrosion location

Corrosion depth (×0.1 mm)	Number of corrosion pit per line	Number of corrosion line	Symbol
62	16	1-10	D62-P16-L1-L10-C
83	16	1-10	D83-P16-L1-L10-C



(a) D83-P16-L1-C (b) D83-P16-L3-C (c) D83-P16-L6-C

**Fig. 6.** FE models with pittings at center

형 강관 기둥의 중앙부에 모사한 해석 모델을 제작하였다. 해석모델은 최대 10줄로 부식피트를 생성하여, 길이방향으로 중앙에 대칭되도록 배치하였다(Table 5, Fig. 6 참조).

### 2.3 유한요소해석 절차 및 결과 평가

상용 유한요소해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 피팅 부식손상된 강관 기둥 모델의 해석을 수행하였다. 기둥의 축압축 좌굴 해석은 선형과 비선형 좌굴 해석의 두 단계로 수행하였다. 먼저 선형 좌굴 해석에서는 고유치(eigenvalue) 기반의 해석을 통해 기둥의 이론적 탄성 좌굴 강도를 예측하고 좌굴 모드를 확인하였다. 그리고 첫 번째 고유치(모드 1 좌굴 형상)를 사용하여 비선형 좌굴해석을 실시하여, 좌굴 형상 확인 및 하중-변위 곡선을 산출하였다. 비선형 해석은 변위 제어법으로 단계별로 수행하였으며, 각 단계별 변형은 다음 단계의 시작 형상으로 사용되었다.

해석요소는 대변형을 고려한 C3D8R의 솔리드 요소를 사용하였다. 경계조건은 각 해석모델의 상단 끝부분에는 기둥 축방향 변위를 제외한 모든 자유도를 구속하였으며, 하단 끝부분은 모든 자유도를 구속하였다.

본 연구에서 대상으로 하는 원형 강관은 조밀 단면(compact section) 및 단주(short column)로 분류된다. 이에 본 연구에서는 하중-변위 곡선으로부터 구해진 항복하중을 탄성안정론<sup>[11]</sup>에 근거하여 원형 강관 기둥의 임계하중으로 정의하였다. 그리고 임계하중은 Coplan 법<sup>[10]</sup>으로 탄성 직선구간의 연장선과 탄성 이후에 처음으로 나오는 초기 선형구간의 접선의 교차점에 해당하는 하중으로 산출하였다.

위의 원형 강관 기둥 모델의 해석 절차와 임계하중 산출방식은 기존 Kim *et al.*<sup>[7]</sup>의 무부식 시편 2개와 국부적으로 균일하게 부식된 시편 13개의 축압축 실험결과와의 비교를 통해, 검증하였다. 그 결과, 해석 결과는 실험결과와의 오차율 5% 이내로 본 해석의 유효성을 확인하였다.

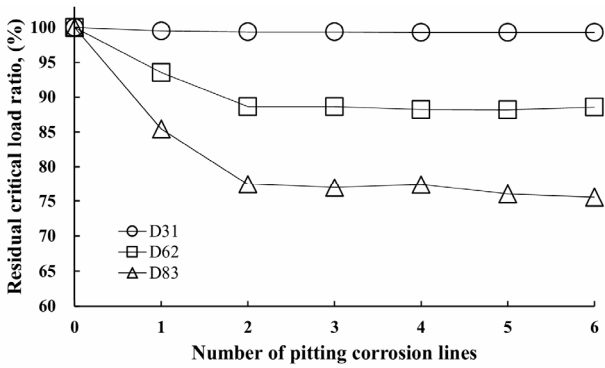


Fig. 7. Critical load vs. longitudinal pitting corrosion length

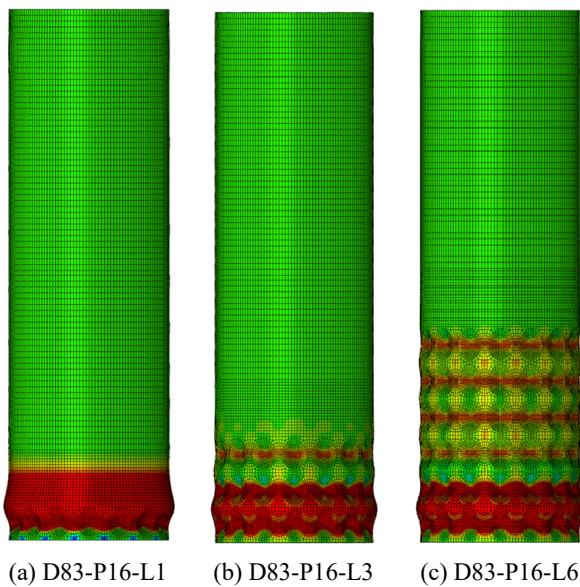


Fig. 8. Buckled shape

### 3. 유한요소해석 결과

#### 3.1 길이 방향 피팅 부식손상 정도에 따른 임계하중

원형 강관 기둥의 축방향으로 부식손상 정도가 증가함에 따른 임계하중을 검토하기 위하여, 단부에서 길이 방향으로 16개의 피팅 부식이 1줄에서 6줄로 증가함에 따른 임계하중비를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 임계하중비는 무부식된 강관 기둥에 대한 부식된 강관 기둥의 임계하중 비(%)이다.

Fig. 7에 나타낸 것과 같이 피팅 부식의 줄 수가 증가함에 따라 임계하중은 선형 감소하고, 2줄부터는 부식손상 정도의 증가(줄 수의 증가)에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다. 이는 부식깊이 3.1 mm, 6.2 mm, 8.3 mm에서 모두 동일한 경향을 확인할 수 있다. 이와 같이 축방향으로 피팅 부식손상 정도가 2줄까지만 임계하중이 감소하고 이 이후 증가에는 감소하지 않는 이유는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이, 좌굴은 하단부로부터 2줄까지의 영역 내(좌굴의 한파장)에서만 발생하므로 이 범위 내의 부식손상 정도가 임계하중에 영향을 미치지 않으므로 판단된다.

좌굴 반파장(Half-wavelength of buckling)은 기둥의 하단부로부터 횡 방향으로 최대 변위가 발생하는 위치까지의 수직거리이며, 식 (1)과 같이 무부식 원형 강관의 직경과 두께로 계산된다<sup>[11]</sup>. 본 해석에 사용한 무부식 원형 강관(D00-L0)의 직경과 두께에 대한 좌굴의 반파장( $H_e$ )은 59.0 mm로, 원형 강관 시험체에서 측정된 60 mm와 거의 동일함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 무부식 원형 강관의 좌굴 한파장( $2H_e$ )은 120 mm로, 단부로부터 120 mm가 원형 강관 기둥의 임계하중을 결정한다고 할 수 있다.

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

여기서,  $R$ 은 원형 강관의 반경,  $t$ 는 원형 강관의 두께이다. 즉, 피팅 부식된 원형 강관의 임계하중 평가에는 강관 축방향 전체 길이에 걸친 부식손상 정도가 아니라, 좌굴 한파장( $2H_e$ ) 길이 내의 부식손상 정도에 근거하여 임계하중을 평가하는 것이 적합함을 알 수 있다.

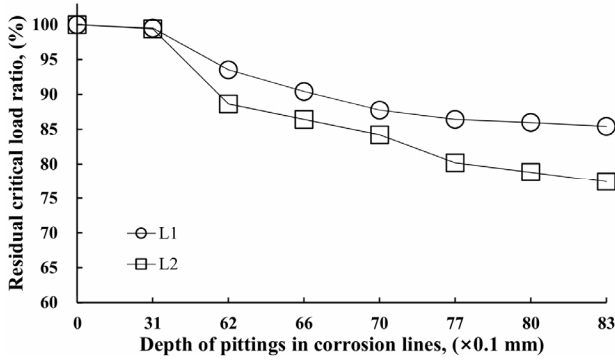


Fig. 9. Critical load vs. pitting corrosion depth

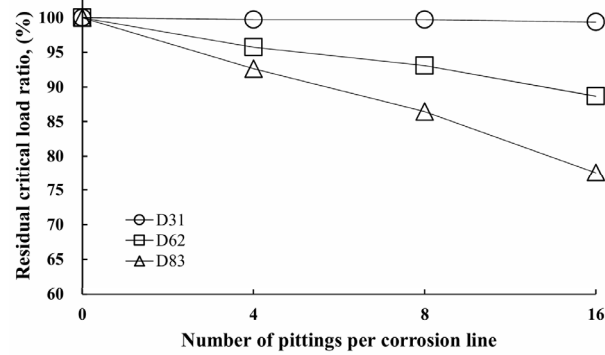


Fig. 10. Critical load vs. circumferential pitting corrosion length

### 3.2 두께방향 피팅 부식손상 정도에 따른 임계하중

강관 두께방향으로의 피팅 부식손상 정도에 따른 임계하중을 분석하기 위하여, 부식 깊이가 3.1, 6.2, 6.6, 7.0, 7.7, 8.0, 8.3 mm로 증가함에 따른 임계하중을 산출하였다. 단 길이방향의 줄 수는 1줄 또는 2줄로 일정하고, 한 줄당 피팅 부식 개수는 16개로 일정하다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이, 원형 강관 기둥의 두께 방향 부식 깊이가 증가함에 따라 임계하중은 선형적으로 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

### 3.3 원주방향 피팅 부식손상 정도에 따른 임계하중

원형 강관 기둥의 원주방향으로의 피팅 부식손상 정도에 따른 임계하중을 분석하기 위하여, 2줄로 1줄당 피팅 부식의 개수를 4, 8, 16개로 증가함에 따른 임계하중을 산출하였다. 단 부식깊이는 3.1 mm, 6.2 mm 또는 8.3 mm로 일정하고 각 부식깊이에 대해 3가지씩 총 9가지에 대해 검토하였다.

그 결과, Fig. 10에 나타난 것과 같이 원주방향 부식

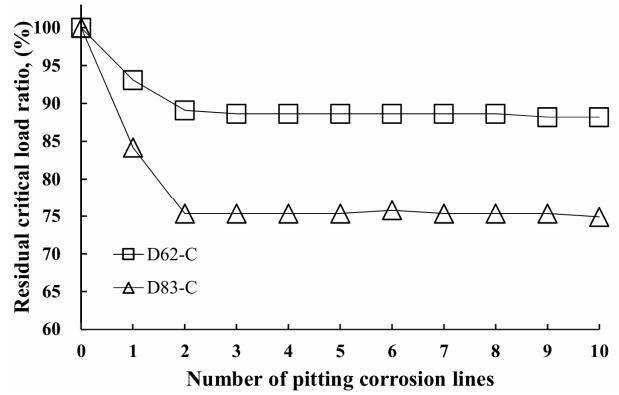


Fig. 11. Critical load vs. longitudinal pitting corrosion length at center of the pipe

손상 정도(피트수)가 4개, 8개, 16개로 증가함에 따라 임계하중은 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

### 3.4 피팅 부식손상 위치에 따른 임계하중

피팅 부식손상 위치에 따른 원형 강관 기둥의 임계하중의 변화를 검토하기 위하여, Fig. 6에 나타난 것과 같이 기둥의 축방향 중앙부를 기준으로 대칭으로 1줄당 16개의 부식피트를 배치하여 1줄부터 10줄까지의 피팅 부식손상된 원형 강관 해석 모델의 임계하중을 계산하였다. 부식 깊이 6.2 mm와 8.3 mm인 경우의 줄 수의 증가에 따른 임계하중비를 Fig. 11에 나타내었다. 기둥 단부에 피팅 부식손상이 발생한 경우의 Fig. 7과 비교하여 임계하중비는 단부와 중앙부의 차이는 최대 오차율이 3% 이내로 거의 동일함을 알 수 있다. 그리고 단부 피팅 부식과 동일하게 2줄까지는 선형적으로 감소하고 그 이후의 임계하중비가 거의 동일하였다. 따라서, 원형 강관 기둥의 임계하중은 피팅 부식이 기둥의 단부에 발생하던, 중앙부에 발생하던 피팅 부식 발생 위치와의 상관성은 없는 것을 확인할 수 있다.

### 3.5 피팅 부식손상된 원형 강관 기둥의 임계하중 평가식 제안

위의 Fig. 7, Fig. 9 및 Fig. 10에 나타난 것과 같이 피팅 부식손상된 원형 강관의 임계하중비는 원형 강관의 길이방향, 원주방향, 두께 방향의 부식 손상정도가 증가함에 따라 선형 감소함을 확인하였다. 그리고 피팅 부식의 분포가 축방향으로 식 (1)의 좌굴 한파장( $2H_c$ )

영역내의 부식손상 정도가 임계 하중과 선형 비례함을 확인하였다. 그러므로 임계 하중비는 식 (2)와 같이 무부식 강관의 초기두께( $t$ )에 대한 부식된 깊이( $d$ )의 비, 원주에 대한 부식된 둘레( $c$ )의 비와 좌굴 한파장( $2H_c$ )에 대한 부식높이의 비( $H_c$ )를 조합하여 나타낼 수 있을 것이다. 그러나, 부식높이( $H_c$ )가 좌굴의 한파장( $2H_c$ )보다 큰 경우에는 부식높이는 좌굴 한파장( $2H_c$ )으로 한다. 또한, 임계 하중비( $\bar{P}_y$ )는 유효부피( $V_e$ )에 대한 부식 손상된 부피비( $V_c$ ) 또는 잔존 부피비( $V_r$ )로 나타낼 수 있을 것이다<sup>[6]</sup>.

$$\bar{P}_y \propto \left(1 - \frac{d}{t} \frac{c}{2\pi r} \frac{H_c}{2H_c}\right) \quad (2a)$$

$$\bar{P}_y \propto \left(1 - \frac{V_c}{V_e}\right) \quad (2b)$$

$$\bar{P}_y = \left(1 - \frac{V_c}{V_e}\right) = \frac{V_r}{V_e} \quad (3)$$

여기서, 유효부피  $V_e$ 는 무부식 강관 단면적과 좌굴 한파장의 곱으로 계산한 부피이다.

본 해석 결과와 식 (3)으로 산출된 임계 하중비를 Fig. 12에 나타내었다. 임계 하중비는 부식깊이, 부식높이 및 부식둘레로 계산된 식 (3)의 잔존 부피비와 최대 9.05 % 이내로 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로, 피팅 부식이 발생한 원형 강관 기둥의 임계 하중비는 좌굴 한파장의 유효부피를 도입한 식 (3)을 이용하여 오차율 9.1 % 이내의 정도로 평가할 수 있을 것이다. 즉, 국부적인 균일부식에 근거하여 제안된 식 (3)은 피팅 부식에도 적용할 수 있음을 확인하였다.

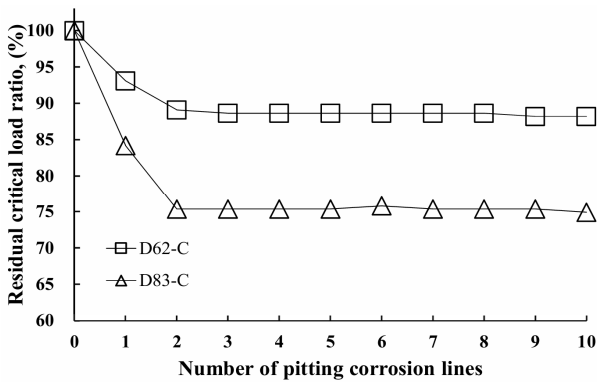


Fig. 12. Correlation between critical load ratio and remaining volume ratio (Eq. (3))

### 3.6 피팅 부식손상된 원형 강관 기둥의 압축 임계하중 평가법

단주 원형 강관의 압축 임계하중은 식 (4)의 사용강재의 항복응력( $\sigma_y$ )과 기둥의 반경( $R$ )과 두께( $t$ )를 이용하여 계산할 수 있다. 그리고, 피팅 국부부식의 부식손상된 원형 강관의 임계 하중비는 식 (3)으로 계산할 수 있어, 원형 강관의 임계 하중( $P_y$ )은 식 (4)에 부식 손상된 유효 부피비를 적용한 식 (5)로 평가할 수 있을 것이다.

$$P_y = 2\pi R t \sigma_y \quad (4)$$

$$P_y = 2\pi R t \sigma_y \left(\frac{V_r}{V_e}\right) \quad (5)$$

본 해석으로부터 산출된 임계 하중에 대한 제안식 식 (5)로 계산된 임계 하중의 오차율을 Fig. 13에 나타내었다. 해석값에 대한 제안식에 의한 임계 하중의 최대 오차율은 4.65 %로 확인되었다. 그러므로, 본 연구의 제안식 식 (5)를 이용하여 원뿔 피팅 국부부식이 발생한 원형 강관의 임계 하중을 최대 오차율 5 % 내로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 피팅 부식손상된 원형강관 기둥의 압축거동을 검토함에 있어, 동일한 부식피트가 균일 및 대칭으로 분포하는 것을 대상으로 하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 식을 부식손상된 원형 강관의 압축 하중 평가에 적용하기 위해서는 향후 편심 하중, 비대칭 피팅 부식 분포 등에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

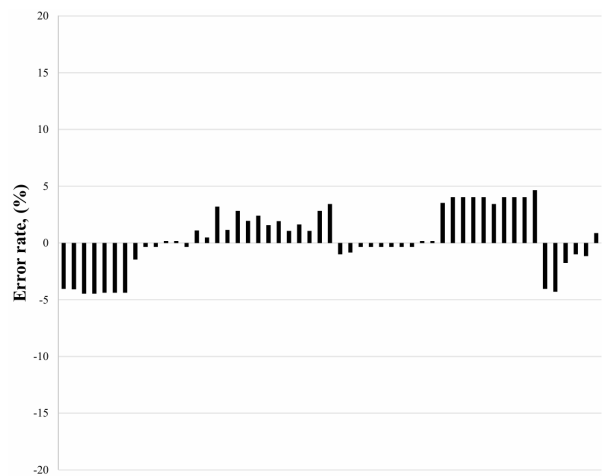


Fig. 13. Error rate of critical loads between FEA and Eq. (5)

## 4. 결론

본 연구에서는 원뿔 피팅 부식손상에 따른 원형 강관 기둥의 임계하중 평가법을 검토하기 위하여, 기둥의 길이(축)방향, 원주방향 및 두께방향으로 부식 손상정도가 다른 원형 강관 기둥의 파라메트릭 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기둥의 원주 및 두께 방향으로 피팅 부식손상 정도가 증가함에 따라 임계하중은 선형적으로 감소함을 확인하였다.
- (2) 기둥의 길이방향으로 피팅 부식손상 정도가 증가함에 따라 임계하중은 선형적으로 감소하는 것을 확인하였다. 이는 기둥의 좌굴 한파장 내에서만 유효하며, 좌굴 한파장 이상의 부식손상이 임계하중에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었다.
- (3) 기둥의 길이, 원주 및 두께 방향의 부식손상 정도를 조합하여 도출한 좌굴 한파장의 유효부피에 대한 잔존 부피비는 임계하중비와 최대 오차율 9.1 % 이내로 일치함을 확인하였다.

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

- (4) 무부식 단주 원형 강관 기둥의 임계 하중 계산식에 좌굴 한파장의 잔존 부피비를 적용하여 아래와 같이 피팅 부식손상이 발생한 원형 강관 기둥의 임계 하중 평가식을 제안하였다. 제안 평가식으로 계산한 임계 하중은 유한요소해석 결과와 오차율 5 % 이내로 잘 일치함을 확인하였다.

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

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00562480, 2021R1A2C1005587).

## 참고문헌(References)

- [1] Hebor, M.F., and Ricles, J.M. (2002) Local Buckling Strength of Patch Corrosion Damaged Steel Tubular Bracing, *Steel Struct*, Vol.2, No.1, pp.59-70.
- [2] Nazari, M., Khedmati, M., and Khalaj, A. (2014) A Numerical Investigation into Ultimate Strength and Buckling Behavior of Locally Corroded Steel Tubular Members, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.11, pp.1063-1076.
- [3] Oyasæter, F.H., Aeran, A., Siriwardane, S.C., and Mikkelsen, O. (2017) Effect of Corrosion on the Buckling Capacity of Tubular Members, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, Vol.276, 012037.
- [4] Ahn, J.H., Nam, D.G., Lee, W.H., Huh, J.W., 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).
- [5] 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.
- [6] Kim, H.S., Shin, C.H., Dao, D.K., Jeong, Y.S., and Kim, I.T. (2018) Evaluation on Residual Compressive Strength of Welded Circular Tubular Members with Locally Corroded Ends, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.3, pp.145-152 (in Korean).
- [7] Toledo, K.K., Kim, H.-S., Jeong, Y.-S., and Kim, I.-T. (2020) Residual Compressive Strength of Short Tubular Steel Columns with Artificially Fabricated Local Corrosion Damage, *Materials*, MDPI, Vol.13, No.4, 813.
- [8] Nakai, T., Matsushita, H., Yamamoto, N., and Arai, H. (2004) Effect of Pitting Corrosion on Local Strength of Hold Frames of Bulk Carriers (1st Report), *Marine Structures*, Elsevier, Vol.17, No.5, pp.403-432.
- [9] Wang, Q., Kainuma, S., and Yang, M. (2020) Fundamental Study on The Relationship Between Rust Characteristics and Corrosion Degree of Common Steel, *Proceedings of Constructional Steel*, Vol.28.
- [10] Jelka, G. (1998) Study of the Yield Point of the Thread, *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol.10, No.3-4, pp.244-251.
- [11] Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (2012) *Theory of Elastic Stability*, Dover Publications, USA.

---

**요약**: 본 연구에서는 국부부식이 발생한 원형 강관 기둥의 임계하중 평가법을 검토하기 위해, 피팅 부식을 모사한 원형 강관 기둥 해석 모델 53개의 좌굴해석을 실시하였다. 실제 대기부식환경에서 확인된 피팅 부식을 고려하여, 부식 피트 형상은 원뿔각 145°의 원뿔형으로하여 원형 강관 기둥의 길이방향, 원주방향 및 두께 방향의 피팅 부식손상 정도가 임계하중에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 그 결과, 기둥의 길이방향, 원주방향 및 두께 방향의 피팅 부식 손상정도가 증가함에 따라 임계하중이 선형적으로 감소하고, 임계하중은 기둥 길이방향으로 좌굴 한파장 영역내의 부식손상 정도에 의존함을 확인하였다. 또한, 좌굴 한파장 내의 부식손상 부피비를 이용하여 원뿔형 피팅 부식손상이 발생한 원형강관 기둥의 압축 임계하중 평가식을 제안하였다.

**핵심용어**: 원형강관, 피팅부식, 부식손상 부피비, 임계하중, 좌굴한파장

---