

부식 손상된 가시설 강재의 축압축 좌굴강도 추정에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Evaluation of Axially Compressive Buckling Strength of Corroded Temporary Steel

김 인 태^{1)*}

이 명 진²⁾

신 창 희³⁾

Kim, In Tae

Lee, Myoung Jin

Shin, Chang Hee

Abstract

Steel structures have been generally painted to prevent corrosion damage. However, the painted film is deteriorated with increase in service life, and then corrosion damage resulting in cross sectional area occurs on steel surface. As a result, the buckling strength of steel structures can be decreased due to the corrosion damages. The evaluation method of the axial buckling strength of columns about a variety of section shapes and supporting conditions have been presented, but evaluation method of buckling strength about irregular nonprismatic columns is not established. In this study, the axial buckling strength of corroded steels was evaluated based on the buckling test results of corroded steel specimens that were cut off at a temporary steel structure. The corroded specimens were picked up total 10 specimens according to various slenderness ratio from the web of a temporary structure's main beam. The length of specimens is 200, 300, 400, 500 and 600mm respectively. The rust productions were removed by the chemical treatment. Then, the surface geometry was measured at intervals of 1×1mm by using the optical 3D digitizing system, and the residual thickness of the specimens was calculated. The axial buckling test was performed on 10 corroded specimens and 12 non-corroded specimens under the fixed-fixed support condition. From the test results, the effect of corrosion damages on axial buckling load was investigated. Regardless of corrosion damage degree, the axial buckling strength of corroded specimens and non-corroded specimens was evaluated identically by using minimum average residual thickness or average residual thickness to minus its standard deviation. Reasonable measuring intervals of residual thickness was proposed by using the results to apply for practical works.

Keywords : Temporary steel structure, Corrosion damage, Axial buckling strength, Effective thickness, Buckling test

1. 서 론

강구조물은 대기환경하에서 장기간 사용하게 되면 강우, 비레염분, 온도, 습도 등의 환경적인 요인에 의해 부식손상이 발생한다. 그리고 이로 인하여 강부재의 단면이 감소하게 되어, 장기간 사용에 따른 강구조물의 내하능력 저하가 우려된다. 이와 같은 부식에 의한 내하능력 저하를 미연에 방지하기 위하여 강구조물은 주로 도장에 의한 방식이 일반적으로 실시되고 있지만, 사용연수의 증가에 따라 도막이 열화되어 강부재의 부식손상이 발생하고 있다(일본토목학회, 1996).

특히 강구조물 중에서 가시설 강구조물은 도장 등에 의한 방식처리를 실시하지 않고 있어, 조기에 녹층이 발생

하여 부식손상이 발생하고 있다. 그 사례를 들면, Fig. 1과 같이 가시설 주형보 및 주형받침보의 지점부 등에서는 통풍이 원활하지 않고, 토사 등의 오염물질의 적체가 용이하여 부식손상이 많이 발생하고 있다(김인태 등, 2009). 따라서 이러한 부식손상에 의한 강부재의 축압축 좌굴내하력 저하가 우려되며, 이에 대한 정량적인 평가방법의 정립이 필요하다.

현재 원형, H형, L형 등과 같이 다양한 단면형상을 가지는 등단면 기둥과 일정하게 단면이 변하는 변단면 기둥(일본건축학회, 2009), 그리고 다양한 지지조건(한국도로교통학회, 2008)에 대한 등단면 강부재의 압축 좌굴강도 평가식이 제시되어 있다. 그러나 불균일 부식 또는 국부부식 등의 부식손상이 발생하여 단면형상이 불규칙적

1) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 부교수

2) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

3) 정회원, (주)하우엔지니어링

* Corresponding author : itkim@pusan.ac.kr 051-510-2497

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

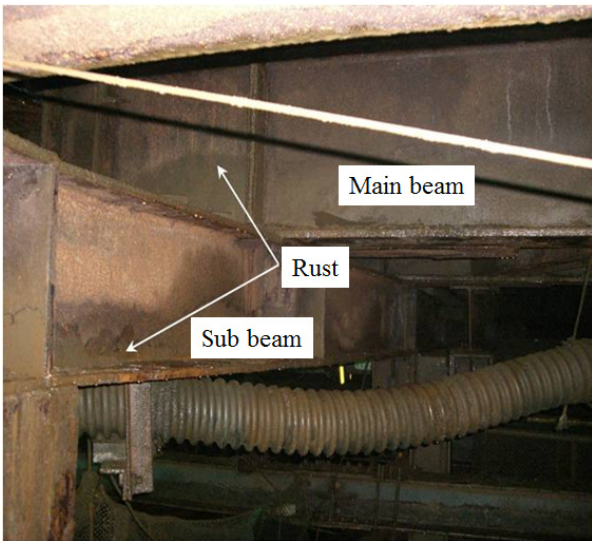


Fig. 1 An example of corrosion damages of temporary steel members

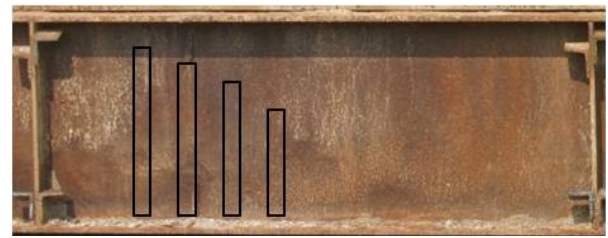
으로 변하는 변단면 강부재의 좌굴강도 추정에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 저자는 인장, 압축 및 휨을 받는 부식 강부재의 잔존내하력 평가법을 확립하기 위하여 일련의 실험적 연구를 진행하였다. 그 첫 번째 단계로 부식 손상된 강재의 인장실험을 실시하여 단면이 불규칙하게 변하는 부식강재의 인장강도 평가법을 제시하였다(김인태 등, 2010). 그리고 기계 가공으로 부식손상을 모사한 H형강의 압축좌굴실험을 실시하여, 웨브의 국부부식 정도에 따른 H형강의 복부 좌굴강도 추정법을 제시하였다(김인태 등, 2010).

본 연구에서는 부식강재의 축압축 좌굴강도 추정법을 검토하기 위하여, 지하철 가시철 현장에서 다년간 사용되어 부식 손상된 주형보에서 절취한 강재 시편의 축압축 좌굴실험을 실시하였다. 그 결과 부식에 의한 두께 감소량과 표면형상(변동계수)이 축압축 좌굴하중 저하에 미치는 영향에 대해 정량적으로 분석하였다. 그리고 무부식 강재시편과 부식 강재시편의 축압축 좌굴강도를 비교하여 부식 손상에 의해 불규칙하게 두께가 변하는 부식강재의 잔존 축압축 좌굴강도 평가법을 제시하였다.

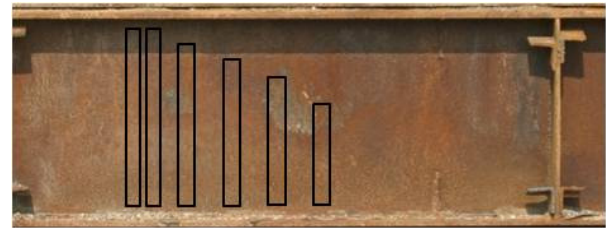
2. 실험 조건 및 방법

2.1 시편 제작

부식 강재의 잔존 내하력 평가를 위한 실험에는 부식축진실험 등과 같이 인위적 부식 환경하에서 짧은 시간에



(a) A Type main girder



(b) B Type main girder

Fig. 2 Fabrication of test specimens

부식손상을 발생시킨 시편 또는 실제 대기노출 환경하에서 장기간에 걸쳐 부식 손상된 강부재에서 절취한 시편을 사용하고 있다.

본 실험에서는 부산 지하철 공사현장에서 무방식 상태로 다년간 사용되어 부식 손상된 가시철 I형 주형보 2개를 입수하여, 시편을 제작하였다. 주형보의 강종은 SS400재로 공칭규격은 플랜지 폭 300mm, 플랜지 두께 24mm, 웨브 높이 700mm, 웨브 두께 13mm였다.

시편 제작에서는 먼저 외관상으로 부식 손상정도가 미미한 주형보(이하 A Type이라 칭함) 1개와 부식정도가 상대적으로 심한 주형보(이하 B Type이라 칭함) 1개를 선정하였다. 그리고 Fig. 2와 같이 A와 B Type의 주형보의 웨브로부터 강판을 절취한 후, 절단 및 기계 가공을 실시하여 폭이 30mm이고, 길이가 260, 360, 460, 560, 660mm인 5종류의 강재 시편을 각각 2개씩 총 10개의 강재 시편을 제작하였다. 그 중 길이 660mm의 강재 시편 2개는 B Type 주형보에서 절취하였다. 그리고 기준 좌굴강도 추정을 위해 무부식 SM400재 강판(공칭두께 10mm)에서 폭이 30mm이고, 길이가 260, 360, 460, 560, 660, 760mm인 6종류의 강재 시편을 각각 2개씩 총 12개의 무부식 강재시편도 제작하였다.

부식 강재 시편은 ISO 8407(ISO, 1991)에 근거하여 10% 염산 수용액에 24시간 이상 침수시킨 후, 전동 와이어 브러쉬로 표면에 생성되어 있는 부식생성물을 완전히 제거하였다. 그리고 부식 생성물 제거 후의 부식 시편 표면형상을 측정하였다. 부식생성물 제거 전·후의 시편 표

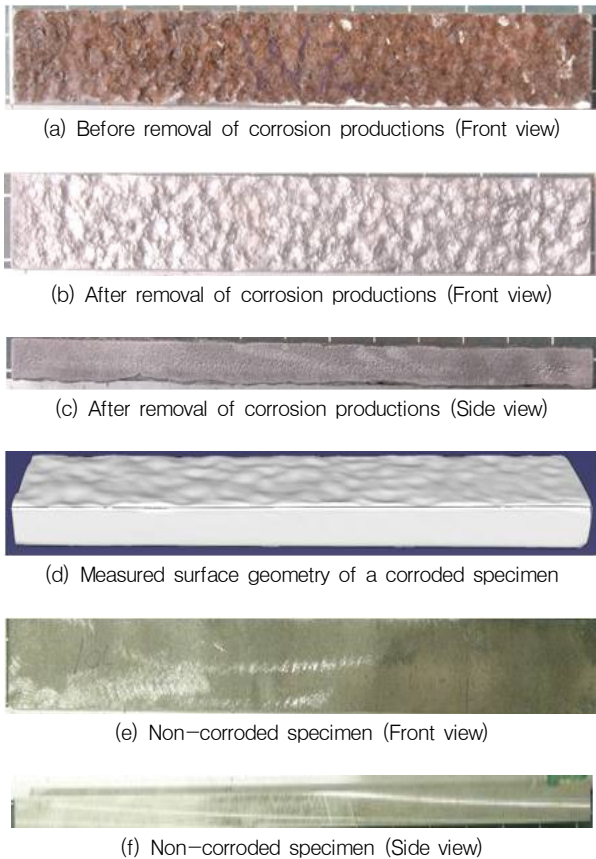


Fig. 3 Surface geometry of test specimens

면상태와 표면형상 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다.

본 실험에 사용된 시편의 치수와 수량은 Table 1과 같다. 시편의 기호는 무부식 시편(N), 주형보의 Type(A, B)과 시편의 지지길이를 표기하였다. 시편의 지지길이는 양단 고정단 사이의 시편 길이를 의미하며, 제작된 시편 길이에서 양단고정 축압축 재하를 모사하기 위하여 유압 지그에 정착된 시편 양단의 30mm, 즉 각 시편길이에서 정착길이 60mm를 뺀 나머지 시편의 길이를 의미한다. 따라서 이하 강재 시편의 길이는 절취 강재시편의 길이에서 양단 고정부 60mm를 제외한 양단고정 지지길이를 나타낸다. 예를 들어 비교적 부식손상이 심한 B Type 주형보로부터 절취한 길이 460mm의 시편(양단 고정 지지길이 400mm 시편)을 B400으로 표기한다. 그리고 동일 Type의 시편에서 각 치수별로 2개의 시편을 사용한 경우에는 N401, N402로 구분하여 표기하였다.

부식 시편을 절취한 가시철 주형보의 강종 SS400재와 무부식 시편으로 사용된 SM400재의 기계적 특성을 실험적으로 확인하기 위하여 A와 B Type 주형보의 플랜지(두께 24mm)로부터 부식강판을 2개씩 절취하였다. 그리

Table 1 Prepared test specimens

| Non-corroded specimen | Corroded specimen | Dimension(mm) | |
|-----------------------|-------------------|---------------|-------|
| | | Length | Width |
| N201 | A200 | 260 | 30 |
| N202 | B200 | (200) | |
| N301 | A300 | 360 | |
| N302 | B300 | (300) | |
| N401 | A400 | 460 | |
| N402 | B400 | (400) | |
| N501 | A500 | 560 | |
| N502 | B500 | (500) | |
| N601 | B601 | 660 | |
| N602 | B602 | (600) | |
| N701 | - | 760 | |
| N702 | - | (700) | |

() : Fix-Fix supported length

고 두께 13mm로 밀링 가공한 후 인장시편(KS B 0801 1A호)을 2개씩 제작하였다. 또한 무부식 시편을 절취한 SM400재 강판으로부터 인장시편 2개를 제작하였다.

부식 인장시편 4개와 무부식 인장시편 2개의 인장실험 결과, 부식 강재(SS400재)의 평균 항복응력은 301MPa 이었으며, 무부식 강재(SM400재)의 평균 항복응력은 295MPa로 확인되었다.

2.2 시편의 표면형상 측정 및 잔존두께 산출

축압축 좌굴실험에 앞서 0.024mm의 정밀도를 가지는 광학 3차원 형상 측정기(Optical 3D digitizing system)를 이용하여 부식시편 10개의 표면형상을 3차원으로 측정하였다. 표면형상은 일정 기준점을 원점으로 하여 1mm×1mm 간격으로 측정하였으며, 이를 이용하여 각 시편의 지지길이 범위에 대해 1mm×1mm 간격으로 잔존두께를 산출하였다. 예를 들어, A200과 B200 시편의 경우에는 각각 약 6,000점, B601과 B602 시편의 경우에는 약 18,000점의 잔존두께를 산출하였다.

2.3 실험 방법

본 실험에는 최대하중 1000kN, 최대변위 300mm의 U.T.M (Universal Testing Machine)을 사용하였다. 그리고 작용 하중에 따른 시험편의 수평변위를 측정하기 위하여 시편의 지지길이 L의 1/2위치와 폭 방향 중앙점에 변위 측정기(LVDT)를 설치하였다. 시편의 양단 30mm는 유압지그로 완전 고정하여 양단고정(Fixed-Fixed support)의 경계조

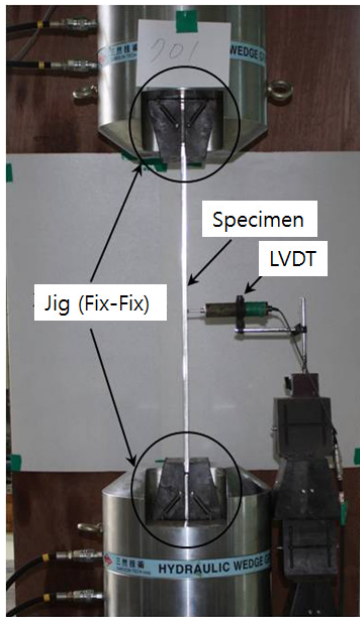


Fig. 4 Testing setup (N701 specimen)

건을 모사하였다. 재하실험은 변위제어(1mm/min)로 실시하였으며, 실험전경은 Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1 표면형상 측정 결과

전술한 바와 같이 시편의 3차원 표면형상 측정결과를 이용하여 각 시편 표면을 1mm×1mm 간격으로 분할하여 각 측정점에서의 잔존두께를 산출하였다. 시편의 잔존두께는 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 먼저 시편 길이방향 1mm 간격당 폭방향 30점의 평균 잔존두께를 산출하였다. 그리고 이들 평균 잔존두께의 최대값(이하 폭방향 평균의 최대두께(T_{max})라 칭함), 평균값(이하 평균두께(T_{avg})라 칭함) 및 최소값(이하 폭방향 평균의 최소두께(T_{min})라 칭함)을 계산하여, Table 2에 정리하였다. 여기서 평균두께는 전체 측정점(1mm×1mm 간격)에서 측정된 잔존두께의 평균값과 동일하며, 표준편차(S)는 전체 측정점으로부터 계산된 잔존두께의 표준편차를 의미한다.

부식에 의한 강재표면의 손상정도(요철정도)는 각 시편의 잔존두께에 대한 표준편차(S)를 그 평균두께(T_{avg})로 나눈 변동계수로 나타낼 수 있다. Table 2에 각 시편의 잔존두께의 표준편차와 변동계수, 그리고 좌굴하중도 정리하였다. 무부식 시편의 평균 잔존두께와 좌굴하중은 Table 3에 정리하였다.

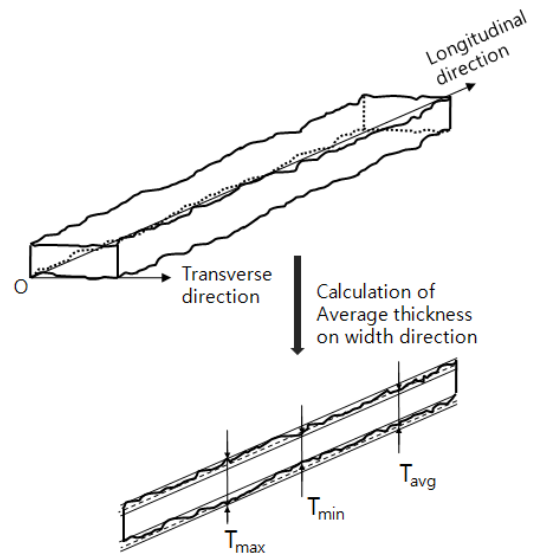


Fig. 5 Classification of residual thickness

Table 2 Thickness and buckling load of corroded specimens

| Specimen | T_{avg} (mm) | T_{max} (mm) | T_{min} (mm) | Standard deviation (mm) | Coefficient of variation | Buckling load (kN) |
|----------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|
| A200 | 10.28 | 10.57 | 9.91 | 0.296 | 0.0288 | 90.9 |
| B200 | 8.58 | 9.74 | 7.62 | 0.746 | 0.0869 | 66.7 |
| A300 | 10.23 | 10.86 | 9.81 | 0.297 | 0.0290 | 82.2 |
| B300 | 8.85 | 10.74 | 7.78 | 0.543 | 0.0614 | 62.7 |
| A400 | 10.45 | 10.76 | 9.78 | 0.294 | 0.0281 | 61.0 |
| B400 | 8.82 | 9.81 | 7.60 | 0.740 | 0.0838 | 49.7 |
| A500 | 10.18 | 10.73 | 9.51 | 0.332 | 0.0326 | 56.4 |
| B500 | 9.16 | 10.38 | 7.06 | 0.859 | 0.0938 | 44.4 |
| B601 | 7.87 | 8.96 | 6.75 | 0.983 | 0.1250 | 21.9 |
| B602 | 8.27 | 9.59 | 6.86 | 0.734 | 0.0887 | 24.5 |

Table 3 Buckling load of non-corroded specimens

| Specimen | Supported Length (mm) | T_{avg} (mm) | Buckling load (kN) |
|----------|-----------------------|----------------|--------------------|
| N201 | 200 | 10 | 94.3 |
| N202 | | | 92.8 |
| N301 | 300 | | 88.8 |
| N302 | | | 90.3 |
| N401 | 400 | | 81.1 |
| N402 | | | 83.2 |
| N501 | 500 | | 61.6 |
| N502 | | | 60.2 |
| N601 | 600 | | 49.7 |
| N602 | | | 49.6 |
| N701 | 700 | 40.1 | |
| N702 | | 40.0 | |

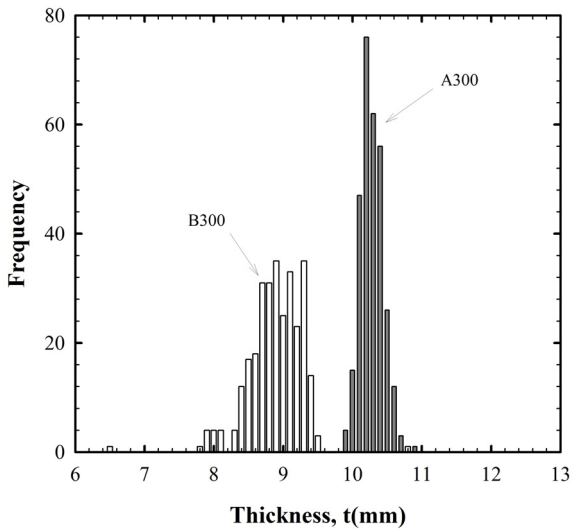


Fig. 6 Histogram of residual thickness (L=300mm)

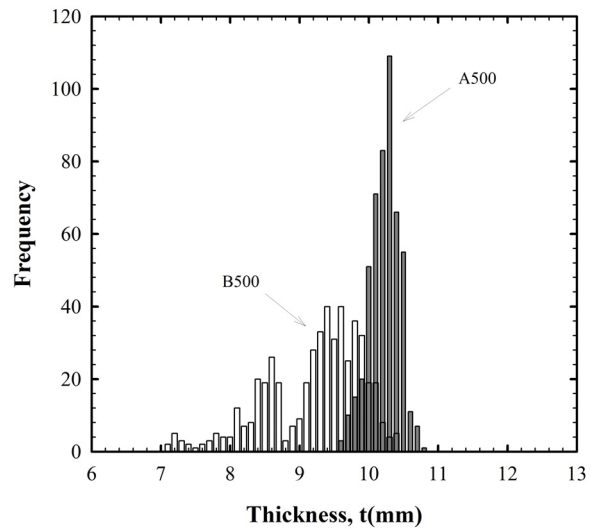


Fig. 7 Histogram of residual thickness (L=500mm)

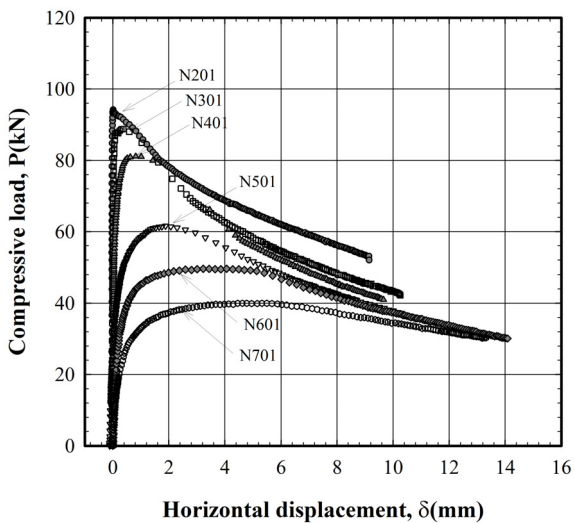


Fig. 8 Buckling load and horizontal displacement of non-corroded specimens

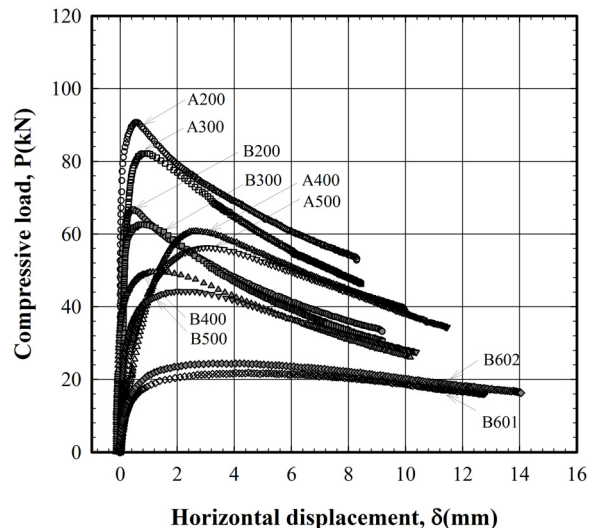


Fig. 9 Buckling load and horizontal displacement of corroded specimens

부식시편의 잔존두께 분포를 알아보기 위하여, 각 시편에 대한 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 간격으로 산출된 잔존두께의 히스토그램을 작성하여 비교하였다. 그 결과 잔존 두께의 히스토그램은 Fig. 6과 7에 나타난 것과 같이 상대적으로 손상정도가 심한 B Type이 A Type에 비교하여, 부식에 의한 두께 감소량이 크고 잔존두께의 표준편차도 큰 것으로 확인되었다.

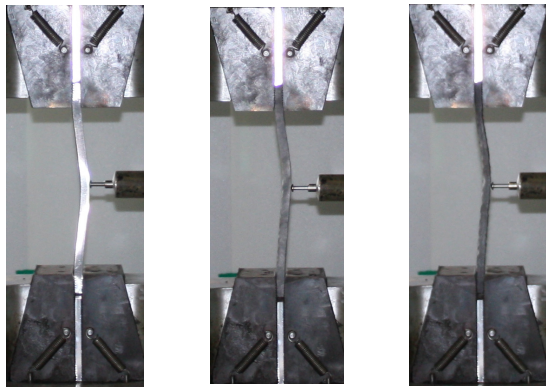
3.2 좌굴실험결과

3.2.1 좌굴하중(P_{cr})-수평변위(δ) 곡선

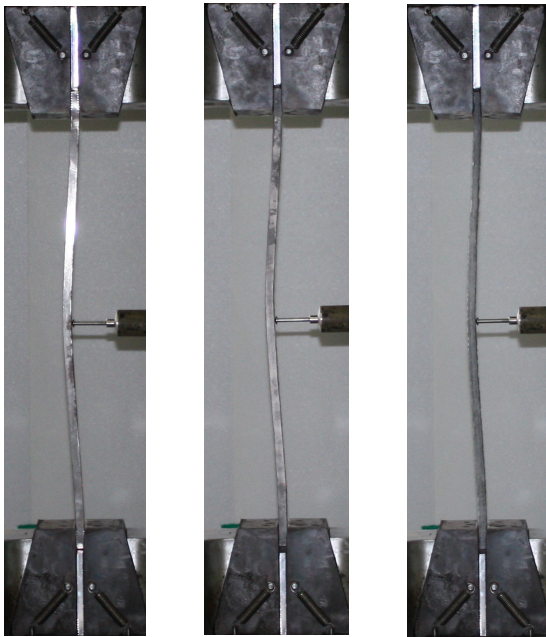
무부식 시편과 부식 시편의 축압축 하중과 수평변위와

의 관계를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 본 실험에서는 각 시편의 최대 축압축 하중을 좌굴하중(P_{cr})으로 하였다. Fig. 8에 나타낸 것과 같이 무부식 시편(N시편)의 좌굴하중은 지지길이 L이 200, 300, 400, 500, 600, 700mm로 증가함에 따라 감소함을 확인할 수 있다. 그리고 부식 시편(A, B 시편)의 경우도, 지지 길이 L이 증가함에 따라 좌굴하중이 감소함을 확인할 수 있다.

실험전 시편의 형상 측정결과, 초기변형이 발생한 시편은 확인되지 않았으나, Fig. 9의 A401과 B501 시편의 경우에는 축압축 하중재하의 초기단계에서 수평변위가 발생하기 시작하여 점차적으로 증가하였다. 즉 본 연구에



(a) N201 (b) A200 (c) B200



(d) N501 (e) A500 (f) B500

Fig. 10 Buckling shape (L=200, 500mm)

서는 그 원인을 명확히 할 수 없었지만, 편심압축 하중을 받는 기둥 또는 초기 수평변위가 발생해 있는 기둥의 축압축 좌굴과 유사한 거동을 보였다.

좌굴실험 후의 L=200mm 와 L=500mm 시편의 좌굴 형상을 Fig. 10에 나타내었다. 전체 시편의 좌굴형상은 잘 알려진 바와 같이 양단 고정된 기둥의 축압축 좌굴형상을 나타내고 있다.

본 실험과 같이 변단면 강재 시편의 축압축 좌굴은 시편의 지지길이 L의 1/2 위치 또는 단면적(또는 단면2차 모멘트)이 최소인 최소단면(폭방향 최소두께)에서 발생할 것으로 예상된다. 본 실험에서는 좌굴 발생위치를 추정하기 위하여 먼저 Fig. 11과 같이 실험 후 시편 단면을 사진 촬영한 후, 그 이미지 파일을 실제 스케일로 확대하

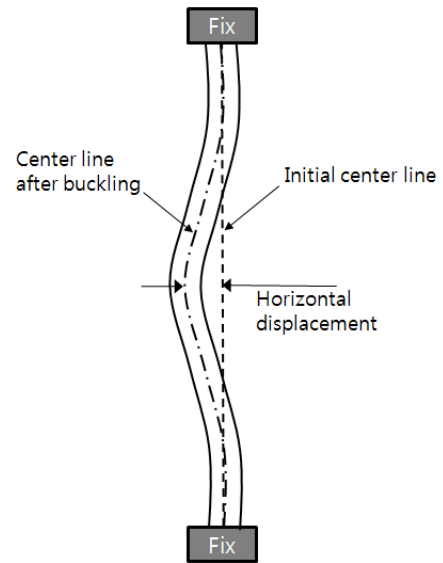


Fig. 11 Determination of buckled position

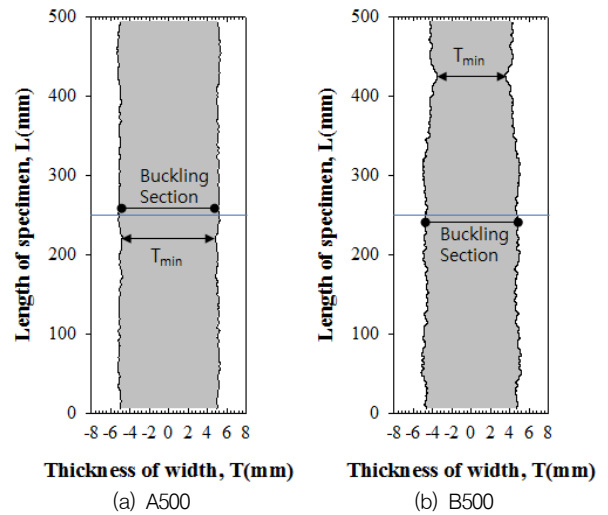


Fig. 12 Buckling position (L=500mm)

였다. 그리고 시편 상단과 하단 고정부의 각 중앙점(시편 두께의 1/2점)을 연결한 초기 중심선으로부터 최대 수평 거리가 발생한 위치를 좌굴 발생위치로 하여, 각 시편의 좌굴 발생위치를 계산하였다. 무부식 시편의 좌굴 발생 위치는 시편의 길이 L의 1/2지점을 기준으로 약 $\pm 2\%$ 범위 내에서 발생하였다.

그리고 부식 시편의 경우에는 약 $\pm 5.5\%$ 범위 내에서 좌굴이 발생하였다. 즉 Fig. 12와 같이 최소단면이 시편의 중간부(L/2위치) 이외의 위치에 발생한 경우에도, 좌굴은 최소단면의 위치와 상관없이 시편의 중간(L/2)부근에서 발생하였다. 예를 들면, Fig. 12(b)에 나타난 것과 같이 최소단면(폭방향 평균 두께 7.02mm)이 시편의 상

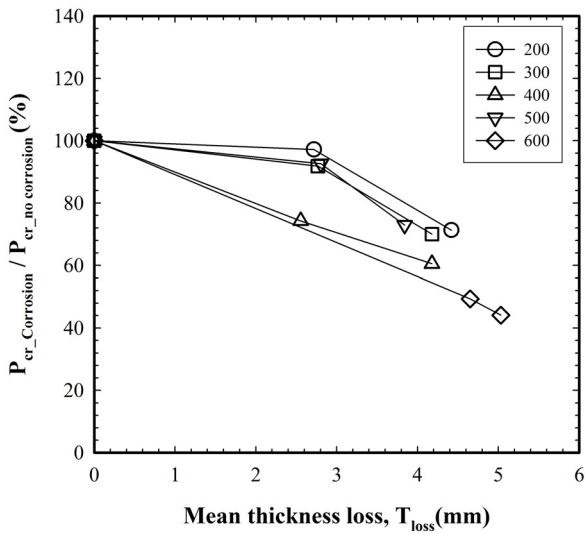


Fig. 13 Relationship between buckling load and thickness loss

부에 발생하였지만, 좌굴은 시편지지 길이 L 의 1/2부근 (폭방향 평균 두께 9.54mm)에서 발생하였다. 따라서 본 시편과 같이 부식에 의해 두께가 불규칙하게 변하는 경우, 그 변동계수가 0.12 이하(Table 2 참조)이면 단순 압축좌굴은 지지길이 L 의 1/2부근에서 발생함을 알 수 있다.

3.2.2 축압축 좌굴하중과 부식두께 감소량과의 상관관계

본 절에서는 동일한 지지길이를 가지는 무부식 시편(N 시편) 2개와 A, B Type의 부식시편 각 1개의 좌굴하중을 이용하여 부식 두께감소량과 좌굴하중과의 상관관계를 분석하고자 한다. 양단고정 지지길이가 $L=200, 300, 400, 500, 600$ mm로 동일한 무부식 시편 2개의 평균 좌굴하중에 대한 A, B Type 부식시편의 좌굴하중비(%)를 평균 부식 두께감소량으로 정리하여 Fig. 13에 나타내었다. 부식시편의 평균 부식두께 감소량은 초기 공칭두께 13mm와 측정된 평균두께(T_{avg})의 차로 계산하였다.

Fig. 13에 나타난 것과 같이 동일 지지길이에 대한 좌굴하중은 평균 부식두께가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 그리고 부식두께 증가에 따른 좌굴하중의 감소는 $L=200, 300, 500, 400, 600$ mm의 순으로 현저하게 나타났다.

3.2.3 축압축 좌굴하중과 잔존두께의 표준편차·변동계수와의 상관관계

부식손상에 의한 축하중 좌굴하중의 감소와 표면형상

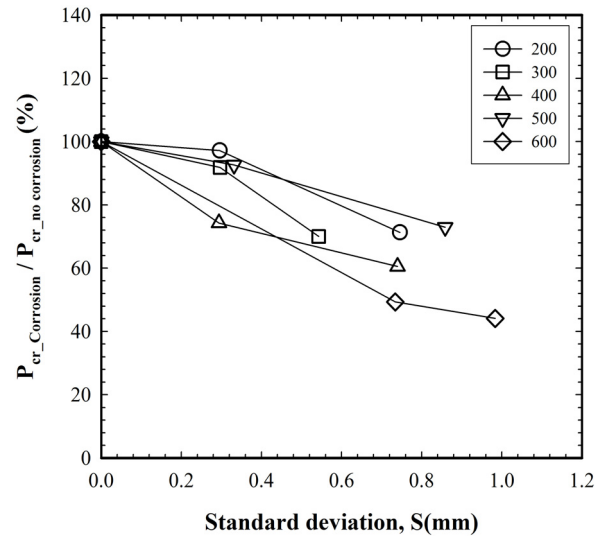


Fig. 14 Relationship between buckling load and standard deviation

의 요철정도와의 상관관계를 분석하기 위하여 좌굴하중을 시편 잔존두께의 표준편차로 정리하여 Table 2에 나타내었다. Table 2와 Fig. 14에 나타난 것과 같이 잔존두께의 표준편차와 변동계수가 증가함에 따라 축압축 좌굴하중은 거의 선형 감소함을 알 수 있다. 따라서 표면의 요철정도가 심할수록 축압축 좌굴강도의 감소가 현저함을 알 수 있다.

4. 축압축 좌굴강도의 추정

4.1 기둥의 기준 압축강도 곡선

축압축 부재의 좌굴하중(Euler load)은 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (1)$$

여기서 E : 탄성계수, I : 단면2차모멘트, L_e : 기둥의 유효길이이다.

기둥의 축압축강도(σ_{cr})는 식 (1)을 사용재료의 항복응력 σ_y 로 무차원하여, 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

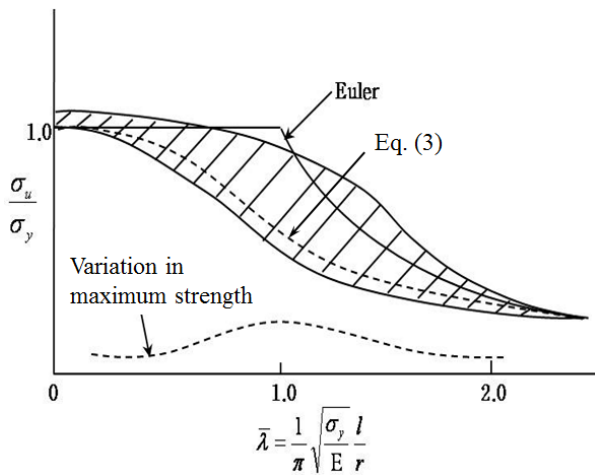


Fig. 15 Distribution of maximum compressive strength (JSCE, 1987)

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \frac{L_e}{r} \right]^2} \quad (2)$$

여기서 r :기둥 단면의 회전반경이다.

강재 기둥의 중심축 압축실험은 세계 각국에서 다양한 실험들이 실시되어 왔으며, 국내에서도 다양한 조건하의 기둥에 대한 내하력 평가를 위한 연구가 실시되어 왔다 (서성연 등, 1988; 신영식 등, 1997; 장호주 등, 2005; 김중락 등, 2010). 강재 기둥의 최대 축압축강도는 이들 실험데이터를 각각의 항복응력 σ_y 로 무차원하고, 세장비에 관한 변화를 모식적으로 표시하면 Fig. 15에 사선으로 나타낸 것과 같이, 중간주 영역에서는 상당히 큰 오차를 나타내고 있다(일본토목학회, 1987).

강재 기둥의 설계에는 다음 식 (3)으로 규정된 기준압축강도(σ_{cr}/σ_Y)에 안전율 1.7을 확보하도록 허용축방향 압축강도를 규정하고 있다(일본도로협회, 2002; 한국도로교통협회, 2000).

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} &= 1.0 & (0 \leq \lambda_c \leq 0.2) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} &= 1.109 - 0.545\lambda_c & (0.2 \leq \lambda_c \leq 1.0) \\ \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} &= \frac{1}{0.773 + \lambda_c^2} & (1.0 < \lambda_c) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 σ_Y 는 항복응력, $\lambda_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \frac{L_e}{r}$ 이다.

4.2 부식 강재의 유효두께 추정

본 연구에서 대상으로 하고 있는 축압축 부재는 기존 연구에서 대상으로 하고 있는 등단면이 아니라, 부식에 의해 두께가 불규칙하게 감소하여 축방향으로 단면이 불규칙하게 변하는 변단면이다. 이와 같은 변단면 기둥의 축압축 좌굴하중 또는 압축강도 추정법은 기둥의 단면이 일정하게 증가하거나 감소하는 경우와 2개의 등단면으로 구성된 경우에 대해서만 제시되어 있다(일본토목학회, 1987; 일본건축학회, 2009). 그러나 본 연구와 같이 불규칙하게 단면이 연속적으로 변화하는 부식 손상된 축압축 부재에 대해서는 어떻게 축압축 좌굴하중 또는 축압축강도를 추정할 것인가에 대한 연구 사례는 찾아보기 힘들다.

이에 여기서는 본 실험결과에 근거하여 부식손상에 의해 두께가 불규칙하게 변화하는 강재의 축압축 좌굴강도 추정법에 대해 검토하고자 한다. 무부식 시편의 축압축 좌굴강도(σ_{cr}/σ_Y)는 공칭두께(초기두께), 사용 강재의 기계적 성질로 계산한 식 (3)의 세장비 파라메타(λ_c)로 Fig. 15와 같이 나타낼 수 있을 것이다. 그러나 부식시편의 좌굴압축강도 계산에 있어서는 부식에 의한 강재의 기계적 성질은 변하지 않지만, 축방향으로 두께가 불규칙하게 변하므로 식 (3)에서 세장비 파라메타(λ_c)의 계산이 곤란하다. 따라서 부식 축압축 강재기둥의 경우, 두께가 일정한 기둥과 동일한 압축강도를 가지는 유효두께(축방향으로 일정, T_e)의 산정이 필요하다.

본 연구에서는 두께가 불규칙하게 변하는 부식시편의 유효두께로 Fig. 16과 같이 폭방향평균 최소두께(T_{min}), 폭방향평균 최대두께(T_{max}), 평균두께(T_{avg})를 이용하여 축압축강도를 평가하고자 한다. 그리고 3.2.2절에 기술한 것과 같이 축압축 좌굴하중이 평균두께와 표준편차에 반비례한다는 것에 근거하여 잔존두께의 분포가 고려된 평균두께-표준편차($T_{avg}-S$)로도 축압축강도를 평가하고자 한다.

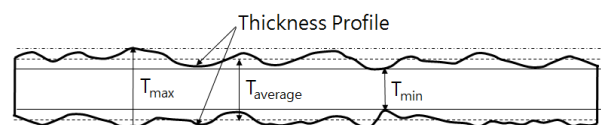


Fig. 16 Effective thickness

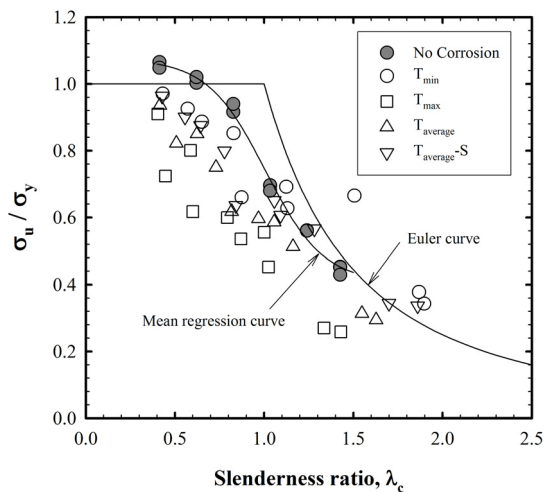


Fig. 17 Buckling strength of test specimens

Table 4 Error rate of the evaluated buckling strength

| Thickness | Error rate (%) | | |
|----------------------|----------------|---------|---------|
| | Average | Maximum | Minimum |
| T _{min} | 3.4 | 57.6 | -22.1 |
| T _{max} | -31.0 | -10.1 | -43.2 |
| T _{avg} | -17.2 | -7.5 | -30.4 |
| T _{avg} - S | -7.8 | 12.4 | -27.0 |

무부식 시편의 축압축 실험결과를 축압축 좌굴강도(σ_{cr}/σ_y)와 세장비 파라미터(λ_c)로 정리하여 Fig. 17에 나타내었다. 그리고 부식시편의 실험결과를 폭방향평균 최소두께(T_{min}), 폭방향평균 최대두께(T_{max}), 평균두께(T_{avg}), 평균두께-표준편차($T_{avg}-S$)로 정리한 데이터와 오일러 곡선도 Fig. 17에 나타내었다.

폭방향평균 최소두께(T_{min}), 폭방향평균 최대두께(T_{max}), 평균두께(T_{avg}), 평균두께-표준편차($T_{avg}-S$)로 정리한 부식 시편의 축압축 좌굴강도의 평가정도를 비교하기 위하여 공칭두께(10mm)로 계산한 무부식 시편의 데이터와 그 평균회귀곡선(식 (4))도 Fig. 17에 도시하였다. 이 평균회귀곡선의 결정계수는 0.994였다.

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \frac{0.6694}{1 + e^{-\frac{\lambda_c - 1.007}{-0.1627}}} - 0.4057 \quad (4)$$

무부식 시편의 평균회귀곡선(식 (4))으로 계산한 압축강도에 대한 폭방향 최소두께, 폭방향 최대두께, 평균두께, 평균두께-표준편차로 나타난 부식시편의 압축강도의 평균, 최대 및 최소 오차율(%)를 계산하여 Table 4에 정

리하였다. 여기서 무부식 시편의 세장비 파라미터는 실험 데이터의 분포를 고려하여 0.4에서 1.5까지로 한정하였으며, 이 범위 내에서 부식시편의 축압축 좌굴강도와 비교하였다.

Table 4에 나타난 것과 같이 무부식 시편의 축압축 좌굴강도에 대한 부식시편의 좌굴강도의 오차율은 최대두께(T_{max}), 평균두께(T_{avg}), 평균두께-표준편차($T_{avg}-S$), 최소두께(T_{min})의 순으로 감소하였다. 따라서 평균오차율에 근거하여 비교하면, 부식강재의 축압축 좌굴강도는 불규칙으로 변하는 두께의 폭방향평균 최소두께(T_{min})를 이용하여 평가하는 것이 가장 적절하다고 할 수 있다. 단, 최소두께에 의한 압축강도 추정은 최대오차율이 57.6%로 무부식 시편의 압축강도에 비해 57.6%정도 과대 평가되는 데이터가 있다는 것에 주의해야 할 필요가 있다.

4.3 부식강재의 압축 좌굴강도 추정

Fig. 15의 기준 압축강도곡선을 추가한 Fig. 17을 Fig. 18에 다시 나타내었다. Fig. 18에 나타난 것과 같이 폭방향 최대두께, 평균두께로 압축강도를 평가한 경우에는, 각각 10개의 데이터 중 7개와 1개의 데이터가 기준 압축 좌굴강도 곡선을 하회하고 있음을 알 수 있다. 따라서 기준 압축 좌굴강도 곡선을 기준으로 평가하면, 부식강재의 압축좌굴 강도는 불규칙한 두께의 폭방향 최소두께(T_{min}) 또는 아래의 식 (5)와 같이 평균두께-표준편차(S)로 추정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

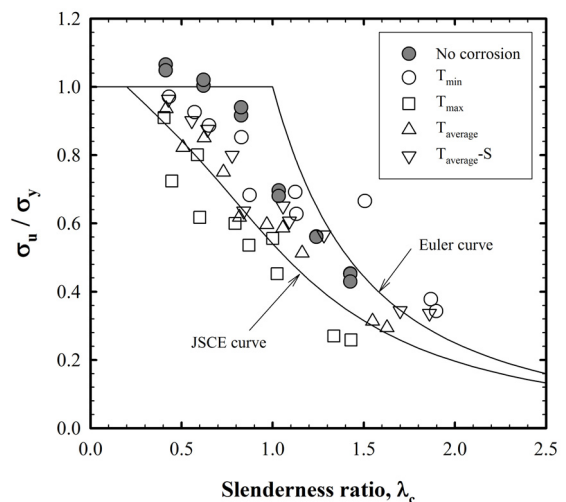


Fig. 18 Comparison of buckling strength

$$T_e = T_{avg} - S \quad (5)$$

여기서 T_{avg} 는 잔존두께의 평균두께, S 는 잔존두께의 표준편차이다.

본 연구의 저자는 부식 강재의 인장실험을 실시하여, 불규칙하게 두께가 변하는 부식 강재의 인장강도는 평균 두께-표준편차(식 (5))를 이용하여 무부식 강재의 인장 강도에 비교하여 평균오차를 2% 이내로 추정할 수 있음을 제시하였다(김인태 등, 2010). 그리고 부식손상을 인위적으로 모사한 H형강 웨브의 좌굴강도 실험을 실시하여 잔존 복부좌굴강도도 복부의 잔존두께와 표준편차(식 (5))로 추정할 수 있음을 실험적 및 해석적으로 확인하였다. 따라서 인장과 축압축 하중을 받는 부식강재의 인장 강도와 압축좌굴강도, 그리고 부식 손상된 H형강의 복부 좌굴강도는 잔존두께의 평균두께와 표준편차의 차, 즉 식 (5)를 이용하여 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 부식강재의 잔존두께 측정간격

앞의 4.3절에서는 부식강재의 축압축 좌굴강도는 부식 시편의 잔존두께를 측정하여 산출한 폭방향평균 최소두께와 식 (5)의 평균두께-표준편차로 추정할 수 있음을 제시하였다. 여기서 폭방향평균 최소두께, 평균두께와 표준편차는 각각 부식시편의 표면형상을 1×1mm 간격으로 측정된 잔존두께를 이용하여 산출하였다. 그러나 실제 부식강재를 1×1mm 간격으로 측정하여 잔존두께를 산출하는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다.

이 절에서는 현실적인 잔존두께 측정간격을 검토하기 위하여 측정간격을 1×1mm에서 5×5mm, 10×10mm, 20×20mm, 50×50mm, 100×100mm로 변화시켜 산출한 폭방향평균 최소두께, 평균두께와 표준편차의 변화를 검토하였다. 먼저, 본 실험에서 사용한 시편을 대상으로 측정간격을 검토할 경우, 시편 폭이 30mm이므로 폭 방향으로 30mm 이상의 측정간격에 대한 검토가 곤란하다. 이에 Fig. 19에 나타난 것과 같이 A Type 시편 4개와 B Type 시편 6개를 각각 폭방향으로 연결하여 시편의 최소 지지길이 200mm를 기준으로 각각 1개의 120×200mm과 180×200mm 강판으로 합성하였다. 그리고 각 합성강판을 대상으로 1×1mm에서 5×5mm,

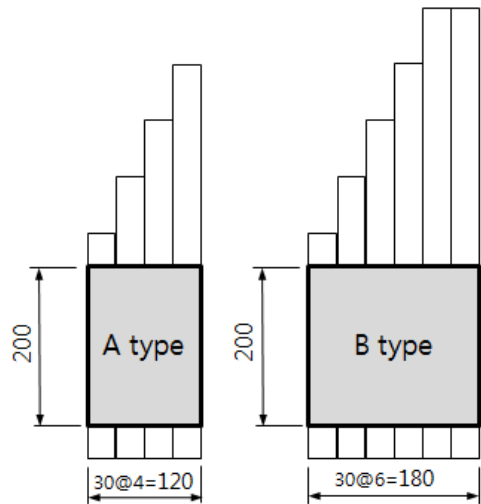


Fig. 19 Combined specimens for thickness measurement(unit; mm)

Table 5 Error rate of different measurement interval

| Measurement interval (mm) | Average error rate(%) | | | |
|---------------------------|-----------------------|--------|---------------|--------|
| | T_{min} | | $T_{avg} - S$ | |
| | A Type | B Type | A Type | B Type |
| 1×1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2×2 | 0.13 | -0.32 | 0.30 | -0.16 |
| 5×5 | -0.02 | 0.67 | -0.00 | 0.24 |
| 10×10 | -0.20 | -0.36 | 0.07 | -0.47 |
| 20×20 | 0.10 | -3.51 | -0.60 | -3.48 |
| 50×50 | -1.37 | 5.68 | -2.40 | 1.51 |
| 100×100 | 1.26 | 0.73 | -2.64 | 0.97 |

10×10mm, 20×20mm, 50×50mm, 100×100mm으로 측정 간격을 변화시켜 잔존두께를 산출하고 최종적으로 폭방향평균 최소두께, 평균두께, 표준편차를 계산하였다.

1×1mm 간격으로 측정하여 산출한 폭방향평균 최소두께와 평균두께-표준편차를 기준으로 하여 각 측정 간격별 폭방향평균 잔존두께와 평균두께-표준편차의 상대 오차를 Table 5에 나타내었다. Table 5에 정리한 것과 같이 A, B type 시편의 경우, 측정간격을 1×1mm에서 100×100mm로 확대한 경우의 최대 오차율은 2.64% 정도였다. 그리고 상대오차가 가장 크게 나타난 50×50mm인 경우에도 상대오차는 5.68% 이하였다. 따라서 본 실험에서 사용한 부식 강재의 폭방향 최소두께, 평균두께-표준편차는 측정간격을 1×1mm에서 100×100mm까지 확장하여 측정된 잔존두께를 이용하여 오차율 약 3% 이내로 추정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 무부식 등단면 강재시편 12개와 부식 손상으로 인해 불규칙하게 두께가 변하는 부식 강재시편 10개의 양단고정 축압축 좌굴실험을 실시하였다. 그 결과, 부식두께감소량, 표면형상에 따른 좌굴강도 감소량을 평가하였으며, 무부식 강재시편과 부식 강재시편의 축압축 좌굴강도를 비교하여, 부식강재의 축압축 좌굴강도 추정법에 대해 검토하였다.

본 연구에서 얻어진 주요한 결과를 아래와 같이 정리하였다.

- (1) 단순 압축 강재의 좌굴은 불규칙하게 변하는 두께의 변동계수가 0.125이하인 경우, 최소단면과 상관없이 강재의 지지길이의 1/2 위치 부근에서 발생하였다.
- (2) 부식 두께감소량이 증가함에 따라, 그리고 시편의 표면요철정도(표준편차, 변동계수)가 증가함에 따라 부식 강재의 축압축 좌굴하중은 거의 선형 감소함을 확인하였다.
- (3) 축압축하중을 받는 부식강재의 축압축 좌굴강도는 잔존두께 측정에 의해 산출된 폭방향최소 잔존두께(T_{min}) 또는 평균 잔존두께(T_{avg})와 표준편차(S)의 차로 계산된 유효두께($T_e = T_{avg} - S$)로 추정할 수 있을 것이다.
- (4) 부식강재의 T_{min} 와 $T_{avg} - S$ 는 측정간격 $100 \times 100\text{mm}$ 로 측정된 잔존두께로부터 정도 높게 산출할 수 있다.

본 연구에서는 지하철 공사현장에서 사용된 가시철 주형보에서 절취한 한정된 개수의 축압축 시편을 대상으로 하였다. 따라서 부식 손상된 강구조물의 좌굴강도 추정을 위해서는 다양한 부식환경하에서 부식손상된 강재, 강부재 및 강구조물에 대한 지속적인 실험적 연구에 의한 데이터의 축적과 이에 대한 해석적 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0070229).

참고문헌

1. 김인태, 장홍주, 정지영, “가시철 부식 강재의 잔존 인장 성능 평가에 관한 실험적 연구”, 한국강구조학회논문집, 제22권 제5호, 2010, pp.399-409.
2. 김인태, 신창희, 정지영, “부식H형 강재의 복부좌굴강도 추정 에 관한 기초적 연구”, 한국강구조학회논문집, 제22권 제5호, 2010, pp.421-433.
3. 김인태, 전상혁, 허정욱, 정진환, “지하철 공사현장 환경하의 가시철 강재의 부식두께감소량 추정”, 한국강구조학회논문집, 제21권 제3호, 2009, pp.301-310.
4. 김종락, 이은택, 이소연, 배기열, “중심압축력을 받는 일반구조용 강관의 구조성능에 관한 연구”, 한국강구조학회논문집, 제20권 제3호, 2008, pp.437-444.
5. (사)한국도로교통협회, 건설교통부제정 도로교설계기준, 2000.
6. 산업자원부 기술표준원, 금속재료 인장 시험편 KS B 0801.
7. 신영식, 윤성기, “휨을 받는 얇은 판 부재에서의 웨브재의 좌굴 거동과 보강에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 제13권 제6호, 통권104호, 1997, pp.329-339.
8. 양영성, 김규석, “고강도 강관 용접H형강주의 좌굴강도에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제4권 제6호, 통권20호, 1988, pp.225-236.
9. 장호주, 양영성, “중심압축하중을 받는 스테인리스 강관 기둥의 좌굴내력에 관한 연구”, 한국강구조학회논문집, 제17권 제2호, 2005, pp.207-216.
10. 日本土木学会(JSCE), 座屈設計ガイドライン, 鋼構造シリーズ 2, 1987, pp.88-104.
11. 日本建築学会, 鋼構造坐屈設計指針, 2009
12. 日本土木学会(JSCE), 鋼橋における劣化現象と損傷の評価, 鋼構造 시리즈 7, 1996.
13. 財団法人 日本道路協会(JRA), 道路橋示方書·同解説, 2002, pp.123-136.
14. ISO, ISO 8407 Corrosion of metal and alloys - Removal of corrosion products from corrosion test specimens, 1991.

(접수일자 : 2011년 4월 28일)

(수정일자 : 2011년 7월 18일)

(심사완료일자 : 2011년 7월 22일)

요 지

강구조물은 주로 도장에 의해 방식처리 되고 있지만, 장기간 사용함에 따라 강재표면에 부식손상이 발생하게 된다. 이러한 부식손상은 단면감소와 이로 인한 좌굴내하력을 저하시킬 우려가 있다. 현재 다양한 등단면형상과 지지조건에 대한 좌굴강도 추정식 및 설계식이 제안되어 있으나, 부식손상으로 인한 불규칙한 변단면 강부재의 축압축 좌굴강도 평가법은 아직 확립되어 있지 않다. 본 연구에서는 부식 손상된 가시철 강부재에서 절취한 강재시편의 축압축 좌굴실험을 실시하여, 부식강재의 좌굴강도 평가에 대한 기초적 연구를 수행하였다. 본 실험에서는 먼저 가시철 주형보의 웨브로부터 시편 지지길이를 200, 300, 400, 500, 600mm로 달리한 5종류 시편을 각각 2개씩 총 10개의 강재시편을 절취하고, 화학적 방법에 의해 녹을 제거하였다. 그리고 3차원 광학 스캐너를 이용하여 1×1mm 간격으로 표면형상을 측정하여, 각 시편의 잔존두께를 산출하였다. 그리고 10개의 부식 손상된 시편과 부식 손상되지 않은 무부식 시편 12개를 양단 완전고정지지 조건하에서 축압축 좌굴실험을 실시하여, 부식두께감소량 및 시편의 표면형상과 축압축 좌굴강도와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과, 부식 손상정도에 상관없는 무부식 등단면 강재와 동일하게 좌굴강도를 평가할 수 있는 불규칙 변단면 부식강재의 폭방향평균 최소두께 또는 평균잔존두께와 표준편차의 차로 계산되는 유효두께를 적용하여 축압축 좌굴강도를 추정할 수 있음을 제안하였다. 또한 이러한 결과를 실무에도 적용할 수 있도록 실용적인 부식강재의 잔존두께 측정간격도 제시하였다.

핵심 용어 : 가시철 강구조물, 부식손상, 축하중 좌굴강도, 유효두께, 좌굴실험
