

재하속도가 H-형강 기둥부재의 횡방향 거동에 미치는 영향

박민석* · 김철영** · 한종욱*** · 채윤병****

Park, Minseok*, Kim, Chul-Young**, Han, Jongwook***, Chae, Yunbyeong****

Loading Rate Effect on the Lateral Response of H-Shape Steel Column

ABSTRACT

Dynamic response of structures can be evaluated experimentally by conducting cyclic loading tests. It has been known that steel materials are rate-dependent and the lateral response of a structure is significantly affected by the presence of axial force. However, the rate-dependency of steel column structures subjected to both axial and lateral loads has not been sufficiently studied yet due to the difficulty of controlling the axial force in a real-time manner during test. This study introduces an advanced way to apply the axial load in real-time to a column specimen using the adaptive time series (ATS) compensator and the flexible loading beam (FLB), where the H-shape steel columns made of SS275 are used for monotonic and cyclic loading tests with various loading rates with axial loads. The lateral strength and post-yield response of the steel columns are compared for each of monotonic and cyclic loading tests. The estimating equation of yield stress of various strain rate has proposed and finite element analysis were performed for comparison.

Key words : Loading rate, Steel column, Monotonic loading test, Cyclic loading test, Flexible loading beam

초록

대부분 동적 성능 평가는 반복 가력 실험을 수행함으로써 구조물의 동적 응답을 평가할 수 있다. 일반적으로 강재는 재하속도 의존성 재료로 알려져 있으며 기둥 부재의 횡방향인 수평방향 가력 시 기둥 부재의 축력인 수직하중이 작용하면 부재의 응답에 영향을 미친다. 하지만, 강재 기둥 구조물의 실험 시 수평 및 수직하중을 동시에 제어하는 것이 어려워 관련 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 기둥 부재를 ATS Compensator와 FLB 시스템을 이용하여 수평 및 수직하중을 고속으로 제어하였다. 실험은 H-형 구조용 압연강재인 SS275을 이용하여 수직 하중을 제어하면서 여러 속도로 단조 및 반복 가력 실험을 수행하고 부재의 항복 하중을 비교하였다. 또한, 유한요소해석 시 재하속도에 따라 새로운 항복 응력을 제안하고 수치해석을 통해 비교하였다.

검색어 : 가력 속도, 강재 기둥, 단조 가력 실험, 반복 가력 실험, 연성 가력 보

1. 서론

강 소재의 동적 하중에 의한 영향과 관련된 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어왔으며, 부재 또는 전체 구조물의 동적 하중에 의한 거동을 파악하는데 중요한 연구이다. 강 소재에 대한 인장 실험 시 속도에 의한 영향은 Boyce and Dillmore(2009), Kim et al.(2013), Yu et al.(2009) 등 여러 연구자에 의해 실험 연구가 수행되었으며, 일반적으로 강 소재의 인장 실험 시 재하속도가 빠를

* 중신회원 · 명지대학교 하이브리드구조실험센터 선임연구원, 공학박사 (MyongJi University · itfeels@nate.com)

** 중신회원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · MyongJi University · cykim@mju.ac.kr)

*** 중신회원 · 명지대학교 하이브리드구조실험센터 수석연구원, 공학박사 (MyongJi University · jwhan@mju.ac.kr)

**** 서울대학교 건설환경공학부 부교수, 공학박사 (Seoul National University · ybchae@snu.ac.kr)

Received April 16, 2021/ revised June 14, 2021/ accepted August 20, 2021

경우 강성, 항복 및 인장강도가 증가되는 경향을 보였다. 또한, 인장과 압축 실험 시 재하속도에 의한 영향 비교 연구는 Meyer and Abdel-Malek(2000)에 의해 연구가 수행되었으며, 압축보다 인장 실험에 의한 거동이 재하속도에 의한 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 하지만, 정해진 변위를 기둥 실험체에 가하여 하중-변위 이력으로 부재의 탄소성 및 극한 강도를 파악할 수 있는 실험인 단조/반복 가력 실험의 경우, 압축과 인장이 동시에 작용하여 실험 시 재하속도에 의한 영향은 재료 단위에 대한 실험과는 다른 결과를 보일 수 있다. 또한, 기존에 준정적으로 수행하는 단조/반복 실험은 느린 속도로 변위를 가하므로 지진과 같은 동적 하중에 의한 부재의 특성을 파악하기는 어려우며 이와 관련된 연구는 미비하다.

실험 부재인 기둥과 같은 축방향 부재의 횡방향인 수평방향 가력 시 거동은 기둥 부재의 축력인 수직하중에 큰 영향을 받는다. 일반적으로 수직 방향방향 하중은 수평방향의 강성을 증가시키지만 항복 후 연성도를 감소시키고 P-Delta 효과에 의해 더 빠른 부재의 파괴를 유발한다. 따라서, 더 정확한 구조물의 성능을 분석하기 위해서는 수직하중이 가해진 상태의 부재 실험을 진행해야 하지만 실제 단조/반복 가력 실험에서 실시간으로 수직 방향 하중을 가하면서 실험을 수행할 경우 수평방향 변위의 영향으로 설정한 수직 방향 하중이 실시간으로 변하므로 목표하는 수직 방향 하중을 유지하는 것은 어려우며 고속으로 진행되는 실험의 경우 부재에 직접적으로 수직 방향 하중을 실시간으로 제어하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 대부분의 단조/반복 가력 실험은 수직 방향 하중 제어가 비교적 쉽도록 준정적으로 이루어져 왔지만, 이 또한 축방향 부재의 경우 축방향 강성이 매우 커 작은 변위에도 큰 축력이 발생하므로 원하는 하중을 유지하는 것이 쉽지 않다. 이러한 영향으로 기존 연구에서는 일정한 수직하중을 유지하지 못하거나 Kabeyasawa et al.(2014), Park et al.(2015)의 연구와 같이 준정적 실험을 수행하는 시간 동안 수동으로 수직 방향 유압가력기를 변위로 제어하여 수직 방향 하중을 유지하며 실험을 수행하였다.

본 논문에서는 Chae et al.(2013)이 제시한 ATS Compensator를 적용한 MATLAB기반 고속 2축 제어 시스템과 정확한 수직하중 제어를 위한 FLB시스템을 구축하여 수직하중이 가해지는 H형강 기둥 부재의 단조/반복 가력 실험 시 재하속도의 영향을 분석하였다.

2. 실험 시스템

2.1 시스템 개요

기둥 부재에 수직하중을 가하면서 고속으로 단조/반복 가력 실험을 수행하기 위해서는 고속으로 제어가 가능한 시스템과 정확하게 수직하중을 가할 수 있는 시스템이 필요하다. 본 실험에서

고속으로 유압가력기를 제어하기 위해 Host PC의 MATLAB/Simulink에서 생성된 신호를 Target PC에 업로드하고 MTS사의 FlexTest GT Controller와 SCRAMNet 광케이블로 연결하여 외부신호로 받아 유압가력기를 제어할 수 있도록 Fig. 1과 같이 구현하였다.

단조/반복 가력 실험의 수평 방향 가력은 MTS사의 1,000 kN 유압가력기를 변위제어로 수행하였으며, 고속으로 실험 시 수직 방향 가력을 하중제어로 수행할 경우 유압가력기의 발진을 유발할 수 있으므로 변위제어로 수행하였다. 이때, 실험체에 작용하는 축력은 매우 작은 변위를 실시간으로 제어해야 하므로 FLB (Flexible Loading Beam)을 제작하고 양끝단에 MTS사의 500 kN 유압가력기를 이용하여 비교적 큰 변위로 수직하중을 제어하였다. 또한, 실험 중 수직하중을 일정하게 가하기 위하여 FLB 양끝단에 LVDT를 설치하여 수평변위로 인해 추가적으로 발생하는 FLB의 변위를 측정하였으며 측정된 FLB의 추가변위를 Fig. 2의 수직하중 제어시스템을 통하여 실시간으로 일정한 수직하중이 가해질 수 있도록 제어하였다.

2.2 ATS (Adaptive Time Series) Compensator

고속 단조/반복 가력 실험을 수행할 때는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 유압가력기의 목표변위와 실제변위 사이에 지연 현상이 생기며 이로 인해 목표로 하는 변위와 속도로 제어할 수 없어 부정확

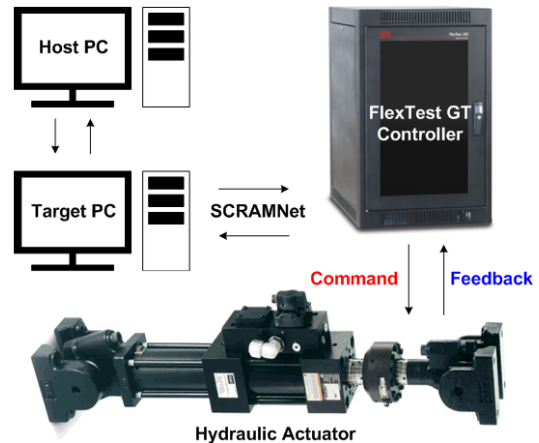


Fig. 1. Real-Time Actuator Control System

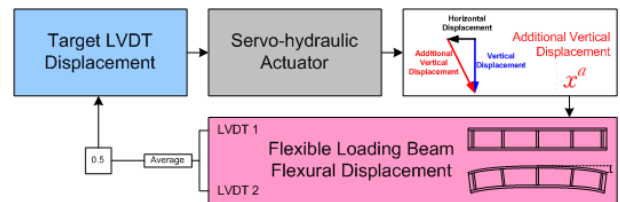


Fig. 2. Real-Time Actuator Control System

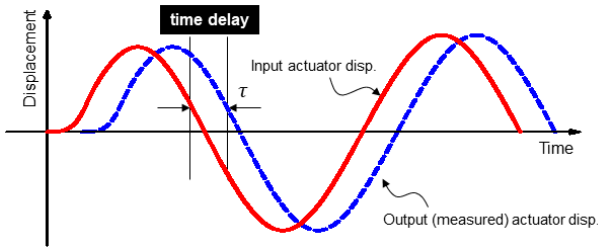


Fig. 3. Time Delay of Actuator

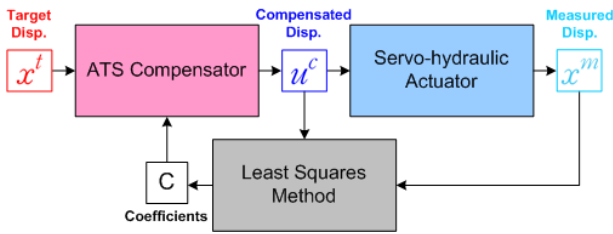


Fig. 4. Block Diagram of the ATS Compensator

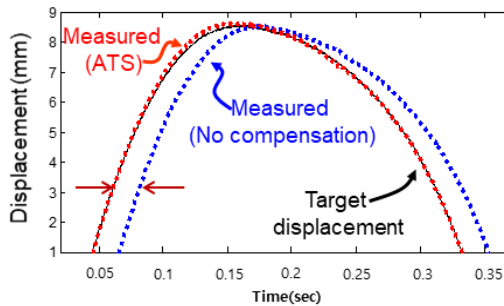


Fig. 5. Performance of ATS Compensator

한 실험결과가 나타난다. 이러한 응답지연현상을 보정하기 위해 Chae et al.(2013)이 제안한 ATS Compensator를 사용하였다.

이는 실험 시 제어하고자 하는 변위를 보정하여 실제 변위가 정해진 목표 변위와의 차이를 보다 정확하게 제어할 수 있는 시스템이다. Fig. 4는 ATS Compensator Block Diagram의 개략도이며, 목표변위(x^t)와 ATS Compensator 통과한 변위(u^c), 액추에이터 측정변위(x^m)를 실시간으로 각 스텝의 변위를 업데이트하여 Fig. 5와 같이 정확한 변위제어를 수행하도록 적용하였다.

2.3 수직하중 제어 시스템

단조반복 가력 실험 시 기동 부재에 작용하는 수직하중은 하중제어 또는 변위제어 방식으로 가할 수 있다. 하중제어 방식의 경우, 갑작스러운 파괴가 발생하거나 수평방향으로 재하 시 발생하는 추가적인 변위로 인해 하중유지가 어려워 유압가력기의 발진 현상을 유발할 수 있으며 변위제어 방식의 경우 재하하는 수직하중의 크기에 비해 작은 변위를 제어하여야 하므로 정확한 하중을 가하기

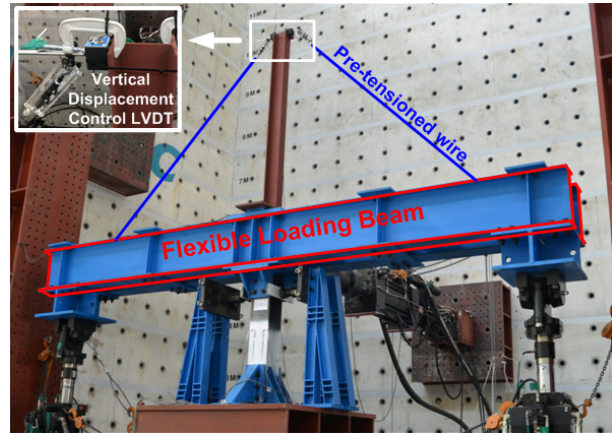


Fig. 6. Vertical Load Control System

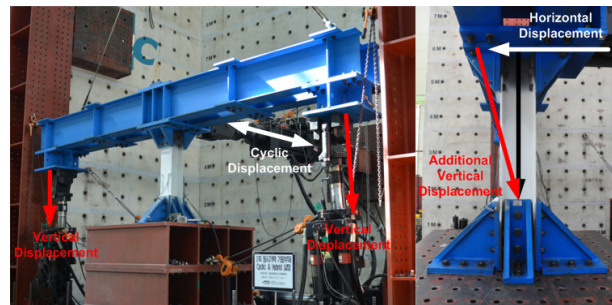


Fig. 7. Additional Vertical Load Phenomenon

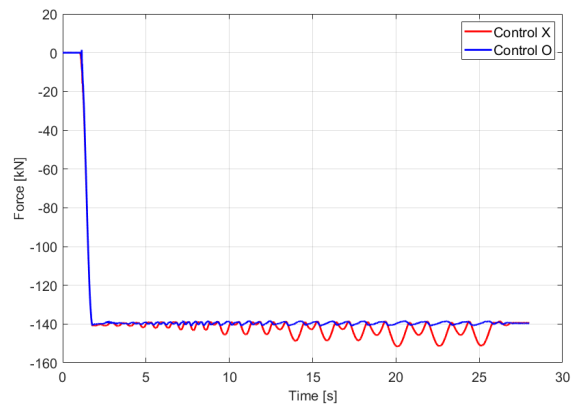


Fig. 8. Constant Vertical Load Control

어렵다. 따라서, 비교적 큰 수직 방향 변위를 제어하여 안정적인 하중을 가할 수 있도록 Fig. 6과 같이 FLB를 실험체 상부에 설치하고 FLB의 양 끝단에서 유압가력기로 비교적 큰 변위를 발생시켜 실험체에 수직하중을 제어하는 시스템을 갖추었다.

수직하중을 가하면서 수평으로 변위를 제어하게 되면 Fig. 7과 같이 수평 변위로 인해 추가적인 수직하중이 가해지므로 실험에 영향을 미치게 된다. 이러한 추가적인 수직하중 발생을 방지하기

위하여 분해능이 0.001 mm인 변위계를 FLB 중앙의 일정한 높이에서 양 끝단으로 설치하여 수평변위에 의해 발생하는 추가적인 FLB의 처짐변위를 측정하고 측정된 변위는 Flex Test GT Controller를 거쳐 xPC로 전송되어 제어하려는 변위의 각 스텝마다 새로운 FLB 변위를 계산 후 제어하였다.

그 결과, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 단조/반복 가력 실험을 수행하는 동안 기둥 부재에 작용하는 수직 방향 하중이 목표로 하는 하중을 유지할 수 있었다.

3. 단조/반복 가력 실험

3.1 실험 세팅

3.1.1 설치 전경

본 실험은 KREONET으로 연결된 하이브리드구조실험센터(HYSTEC)에서 수행되었다. Fig. 9와 같이 수평방향 가력을 위한

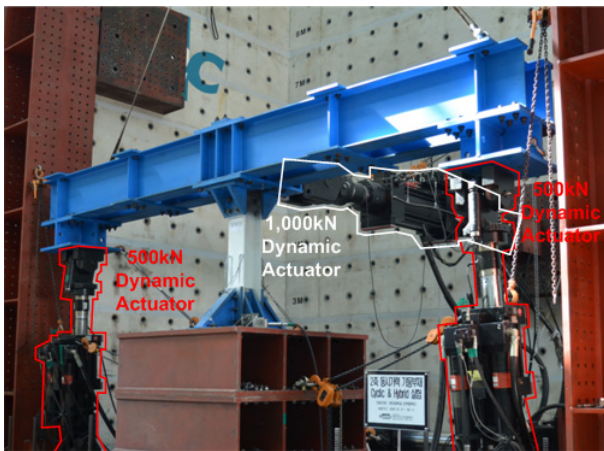


Fig. 9. Test Setup for Monotonic/Cyclic Loading Test with Axial Force

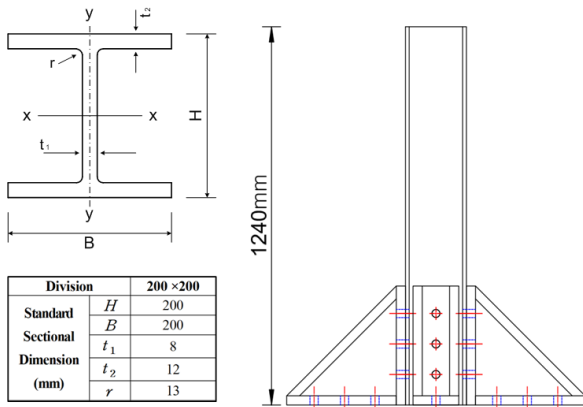


Fig. 10. Test Specimen for Monotonic/Cyclic Loading Test with Axial Force

1,000 kN 동적유압가력기 1대와 수직 방향 가력을 위해 500 kN 동적유압가력기 2대를 반력벽과 반력바닥에 설치하여 재하하였다.

계측장비는 imc 장비를 사용하여 실험체의 강제 게이지 및 FLB의 처짐을 측정하는 LVDT를 100 Hz로 계측하였으며 유압가력기의 하중 및 변위는 xPC를 이용하여 1024 Hz로 계측하였다. 실험체의 바닥부분 경계조건을 고정단으로 구현하고 FLB와의 고정을 위하여 별도의 브라켓을 제작하여 플랜지와 웹부분을 반력 블록과 FLB에 고정하였다.

3.1.2 실험체 제원

실험체는 일반 구조용 압연 강재(SS275) H형강 200×200×8/12로 길이가 1240 mm인 기둥부재를 사용하였으며 실험체의 제원과 도면은 Fig. 10과 같다.

3.2 저속 및 고속 단조 가력 실험

단조 가력 실험에서의 수평 방향 최대 변위는 기둥 부재의 Drift Ratio 6.5 %인 80 mm까지 실험을 수행하였다. 저속 단조 가력 실험의 경우, 변위-시간 이력은 Fig. 11과 같이 1 mm/s의 속도로 변위를 제어하였으며, 총 실험 소요시간은 초기에 수직하중을 가하는 시간을 포함하여 84초이다.

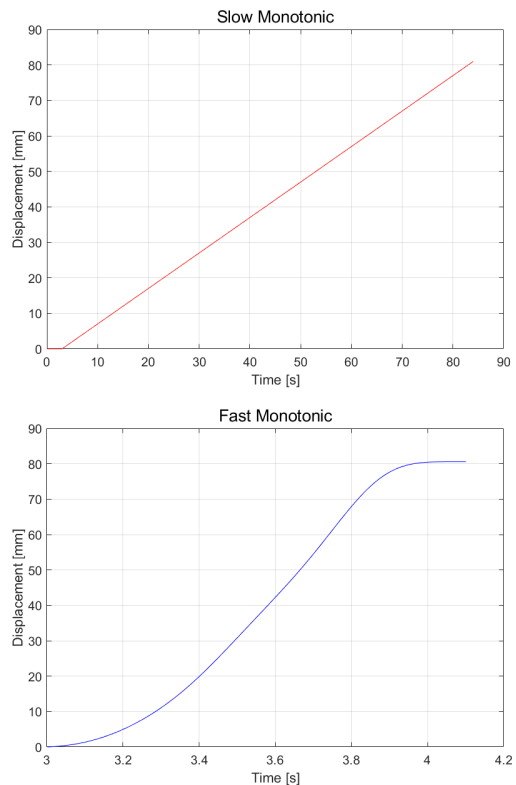


Fig. 11. Displacement-time History for Monotonic Test

고속 단조 실험의 경우, 변위-시간 이력은 Fig. 12와 같으며 최대속도는 저속의 120배속인 120 mm/s의 속도로 변위를 제어하였으며, 총 실험 소요시간은 초기에 수직하중 가하는 시간을 포함하여 5초이다.

수직하중 제어 시스템을 이용해 FLB의 처짐을 6.35 mm로 유지하도록 하여 부재에 작용하는 수직 방향 하중을 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 수평 변위를 가하는 시간 동안 55 kN을 최대한 유지하도록 제어하였다.

3.3 저속 및 고속 반복 가력 실험

반복 가력 실험은 기동 부재의 Drift Ratio 1~6 %로 44단계로 나눠 수행되었으며 각 Drift Ratio별로 2회씩 재하하였다. 저속 반복 가력 실험의 경우, 변위 이력은 Fig. 13과 같이 2 mm/s의 속도로 변위를 제어하였으며, 총 실험 소요시간은 초기에 수직하중을 가하는 시간을 포함하여 2577초이다.

고속 반복 실험의 경우, 2가지 속도로 수행하였으며 저속의 60배속과 100배속인 120 mm/s, 200 mm/s의 속도로 변위를 제어하였다. 변위 이력은 저속 반복 가력 실험과 같으며 총 실험 소요시간은 초기에 수직하중 가하는 시간을 포함하여 각각 46초, 29초이다.

수직하중 제어 시스템을 이용해 수평 변위를 가하는 동안 부재에

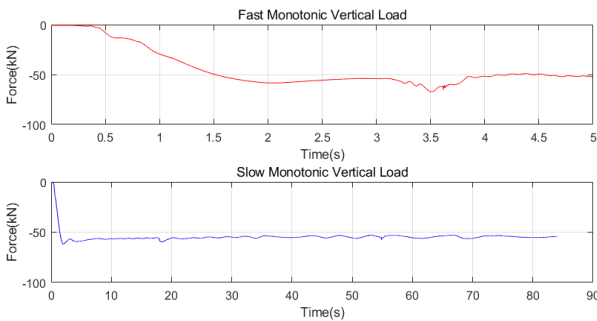


Fig. 12. Constant Vertical Load Control in Monotonic Tests

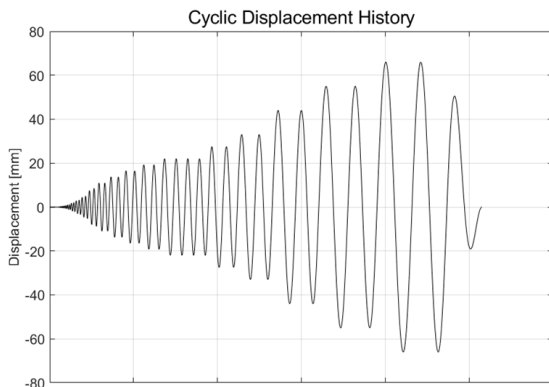


Fig. 13. Displacement History for Slow/Fast Cyclic Test

작용하는 수직 방향 하중을 55 kN으로 유지하도록 제어하였다.

3.4 실험결과 및 분석

3.4.1 저속 및 고속 단조 가력 실험

실험은 Fig. 14와 같이 FEMA (Federal Emergency Management Agency)에서 제시하는 구조물 내진기준에서 제시된 방법으로 구조적 성능 수준이 L.S. (Life Safety) 수준인 Drift ratio 2.5 % 변위까지 이용하여 항복 하중을 비교하였다. 실험의 결과는 Fig. 15에서 볼 수 있듯이 저속/고속 단조 가력 실험에서 강성은 비슷하게 나타났으나, 고속 단조 가력 실험에서 항복 하중이 더 높게 나타났다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 저속 단조 가력 실험의 항복 하중이 91.4 kN, 고속 단조 가력 실험의 항복 하중은 97.5 kN로 고속 단조 가력 실험에서 6.7 % 높게 나타났다.

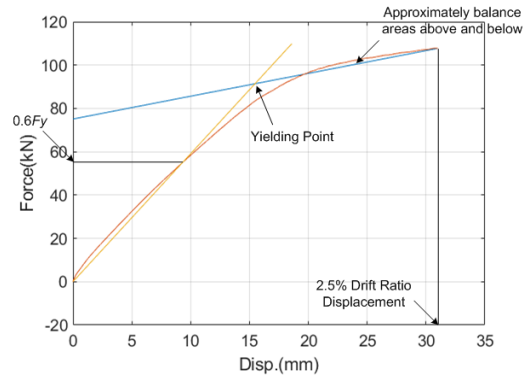


Fig. 14. Idealized Force-Displacement Curve (FEMA)

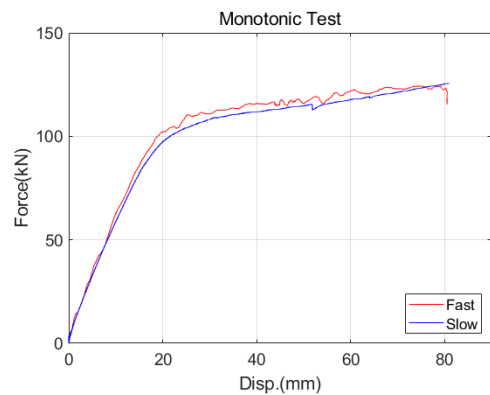


Fig. 15. Force-displacement Relationship of Monotonic Tests

Table 1. Comparison of Slow and Fast Monotonic Test Results

Comparisons	Yield Strength (L.S.)
Slow Monotonic Test (1 mm/s)	91.4 kN
Fast Monotonic Test (120 mm/s)	97.5 kN

3.4.2 저속 및 고속 반복 가력 실험

반복 가력 실험의 경우 Fig. 16에서 볼 수 있듯이 각 Drift Ratio에서 첫 번째로 재하되는 변위에서의 하중을 이어 Backbone Curve로 나타내었다. 실험의 결과는 Fig. 17에서 볼 수 있듯이 모든 실험에서 강성은 비슷하지만 가력 속도가 빠를수록 높은 최대 하중을 보이며, Table 2에 나타나 있듯이 저속(2 mm/s) 반복 가력 실험의 항복 하중은 87.4 kN이며, 고속(120 mm/s)

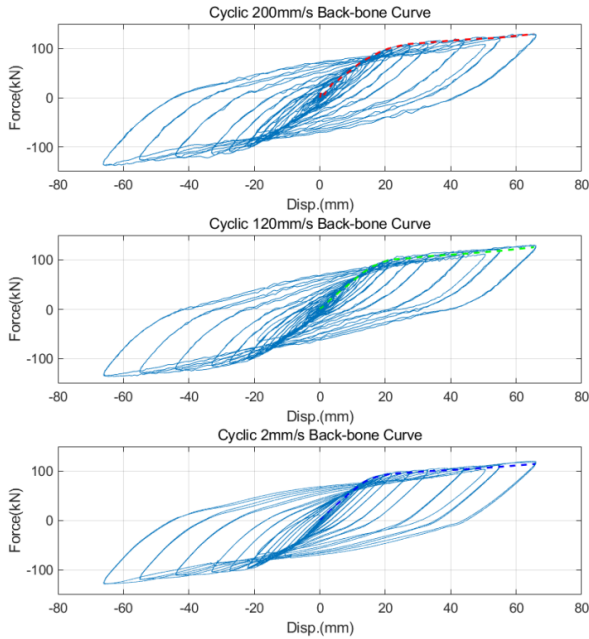


Fig. 16. Back-bone Curve of Cyclic Tests

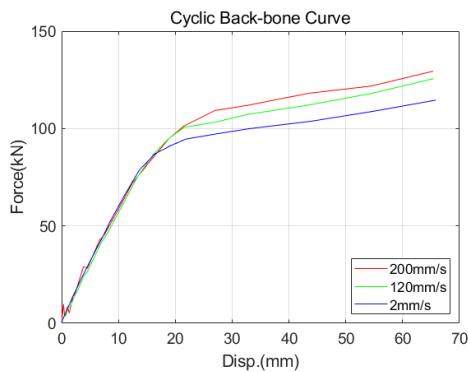


Fig. 17. Force-displacement Relationship of Cyclic Tests

Table 2. Comparison of Slow and Fast Cyclic Test Results

Comparisons	Yield Strength (L.S.)
Slow Cyclic Test (2 mm/s)	87.4 kN
Fast Cyclic Test (120 mm/s)	93.7 kN
Fast Cyclic Test (200 mm/s)	94.5 kN

반복 가력 실험의 항복 하중은 93.7 kN이다. 초고속(200 mm/s) 반복 가력 실험의 항복 하중은 94.5 kN로 항복 하중은 고속 및 초고속 반복 가력 실험에서 저속 반복 가력 실험보다 각각 7.2 %, 8.1 % 더 높게 나타났다. 보통 반복 가력 실험의 경우, 최대 하중 이후 하중이 감소하지만 본 연구의 반복 가력 실험에서는 증가하였다. 이는 Bannantine et al.(1990)의 저서 및 Marohnic et al.(2015)의 연구에서 재료의 종류 및 부재의 형상에 따라 연화 및 경화 효과가 발생할 수 있으며 강재 H형강의 경우 반복 경화 효과가 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 수치해석

4.1 해석 모델

Fig. 18과 같이 ABAQUS를 이용하여 실제 실험과 최대한 비슷한 조건을 구현하였으며 기둥 부재에 수평 방향으로 반복 가력 실험에서 사용된 변위-시간 이력과 수직 방향으로 하중을 적용하였다.

4.2 재료 응력-변형률 곡선

실험체에 최대 변형률이 발생하는 부분인 기둥 하단부에 변형률 계를 부착하여 실험 시 Drift ratio 2.5 % 변위까지의 변형률 속도를 제곱평균제곱근으로 구하고 Fig. 19와 같이 실험 시 항복 하중과 변형률 속도와의 관계를 구하였다.

Nguyen et al.(2019)에서 제시하는 Eq. (2)를 통해 해석에 적용할 재료 모델의 응력-변형률 곡선을 구할 수 있지만, 실제 실험 시 변형률 속도가 증가할 때 항복 하중도 증가하는 속도의존성을 고려하기 위해 Eq. (1)을 통해 변형률 속도에 따른 재료의 항복 응력을 계산하여 응력-변형률 곡선을 산정하고 해석에 적용하였다.

$$\dot{\sigma}_y = 1.2295 \sigma_y \dot{\epsilon}^{0.0246} \quad (1)$$

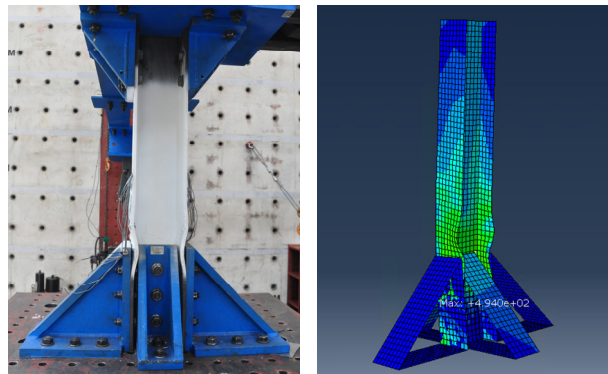


Fig. 18. ABAQUS Model of Cyclic Tests

Eq. (1)에서 σ_y 는 강재의 항복 응력, $\dot{\epsilon}$ 는 실험 시 변형률 속도, $\dot{\sigma}_y$ 는 변형률 속도에 따른 재료의 항복 응력이다.

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & (\epsilon \leq \epsilon_y) \\ \dot{\sigma}_y & (\epsilon_y \leq \epsilon \leq \epsilon_{st}) \\ \dot{\sigma}_y [1 + E(\epsilon - \epsilon_{st}) / (\alpha \dot{\sigma}_y)]^n & (\epsilon \geq \epsilon_{st}) \end{cases} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 σ 는 계산된 응력, E 는 탄성계수, α 는 소성 지수, n 은 변형경화 지수, ϵ , ϵ_y , ϵ_{st} 는 변형률, 항복 변형률, 변형경화 구간의 시작점이다.

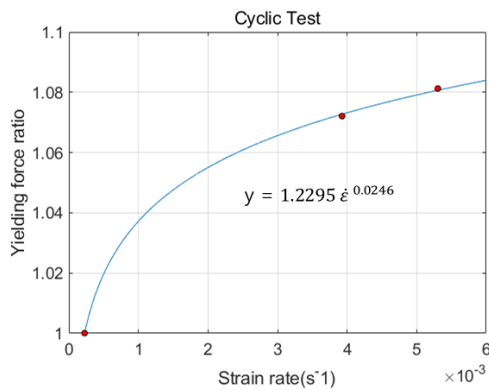


Fig. 19. Yielding Force-Strain Rate Relationship of Cyclic Tests

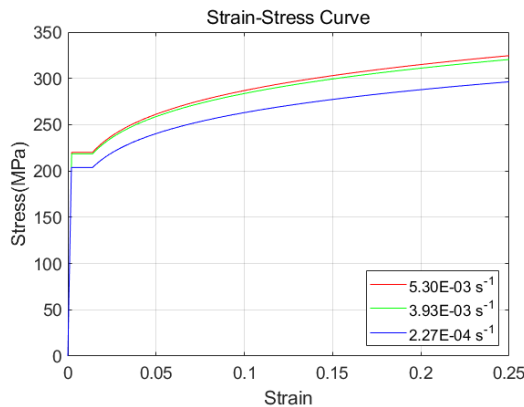


Fig. 20. Yielding Force-Strain Rate Relationship of Cyclic Tests

Table 3. Comparison of Slow and Fast Cyclic Finite Element Analysis Results

Comparisons	Yield Strength (L.S.)	
	Experiment	ABAQUS
Slow Cyclic Test (2.27E-04 s ⁻¹)	87.4 kN	95.4 kN
Fast Cyclic Test (3.93E-03 s ⁻¹)	93.7 kN	100.3 kN
Fast Cyclic Test (5.30E-03 s ⁻¹)	94.5 kN	101.0 kN

해석에 적용된 응력-변형률 곡선은 Fig. 20에서 볼 수 있듯이 실제 실험에서 계산된 변형률 속도를 이용하여 계산된 3개의 응력-변형률 곡선이다.

4.3 해석 결과

ABAQUS를 이용한 동적 해석으로 실험과 같은 변위-시간 이력을 입력데이터로 해석하였을 경우 재하속도에 따른 차이가 불분명 하였으나, 속도 변형률에 따라 다르게 계산된 응력-변형률 곡선을 적용하여 해석한 결과, Table 3에 나타나 있듯이 변형률 속도가 2.27E-04일 때 항복 하중이 95.4 kN이며, 변형률 속도가 3.93E-03 일 때 100.3 kN, 변형률 속도가 5.30E-03일 때는 101.0 kN으로 항복 하중은 고속 및 초고속 반복 가력 해석에서 저속 반복 가력 해석보다 각각 5.1 %, 5.9 % 더 높게 나타났다.

해석 결과는 실제 실험 결과와는 저속에서 8.4 %, 고속 및 초고속 에서 각각 6.6 %, 6.4 %의 차이가 있으며, 이는 실험 도중 경계조건 변화가 생겨 차이를 보이는 것으로 판단되나, 실험과 해석에서 저속 과 고속의 차이가 명확하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 고속으로 변위를 제어하고 실험을 수행하는 동안 수직하중을 유지할 수 있는 실험시스템을 구축하였으며, 이를 이용하여 저속/고속의 단조/반복 가력 실험을 수행하고 결과를 비교하였다.

ATS Compensator를 적용한 고속제어 시스템과 FLB를 이용한 수직하중 제어 시스템을 활용하여 실험을 수행하였으며 실험체는 일반 구조용 압연 강재(SS275) H형강 200×200×8/12로 실험체 길이가 1240 mm인 기둥부재를 사용하였다.

항복 강도와 실험의 최대 가력 변위인 Drift ratio 6 % 일 때의 강도를 비교한 결과, 고속 단조 가력 실험은 저속 단조 가력 실험에 비해 항복 하중이 6.7 % 높게 나타났으며, 저속 반복 가력 실험보다 100배 더 빠르게 가력하는 고속 반복 가력 실험에서 항복 하중은 8.1 % 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 또한, 속도 변형률에 따라 다르게 계산된 응력-변형률 곡선을 적용하여 기둥 부재의 반복 가력 가력을 해석한 결과, 항복 하중은 고속 및 초고속 반복 가력 해석에서 저속 반복 가력 해석보다 각각 5.1 %, 5.9 % 더 높게 나타나 저속과 고속의 차이를 모사할 수 있었다.

상기한 결과를 종합해 보았을 때, 수직하중이 가해지는 H형강 기둥 부재의 내진성능평가를 위한 실험 시, 기존의 저속의 단조/반복 가력 실험이 아닌 고속의 단조/반복 가력 실험을 수행하고 해석 시에는 변형률 속도에 따라 재료의 응력-변형률 곡선을 산정하여 적용함으로써 부재의 동적거동을 더 정확하게 파악할 수 있는 방법으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원 (21CTAP-B132914-05)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L. (1990). *Fundamentals of metal fatigue analysis*, 1st ed., Chapter 2, Strain-life, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., pp. 40-73.
- Boyce, B. L. and Dilmore, M. F. (2009). "The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from 0.0002 s⁻¹ to 200 s⁻¹." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 263-271.
- Chae, Y. B., Kazemibidokhti, K. and Ricles, J. M. (2013). "Adaptive time series compensator for delay compensation of servo-hydraulic actuator systems for real-time hybrid simulation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 42, No. 11, pp. 1697-1715.
- Kabeyasawa, T., Kato, S., Sato, M., Kabeyasawa, T., Fukuyama, H., Tani, M., Kim, Y. S. and Hosokawa, Y. (2014). "Effects of bi-directional lateral loading on the strength and deformability of reinforced concrete walls with/without boundary columns." *10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska, USA.
- Kim, J. H., Kim, D. Y., Han, H. N., Barlat, F. and Lee, M. G. (2013). "Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling." *Materials Science and Engineering A*, Vol. 559, No. 222-231.
- Marohnic, T., Basan, R. and Franulović, M. (2015). "Evaluation of the possibility of estimating cyclic stress-strain parameters and curves from monotonic properties of steels." *3rd International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading*, Vol. 2015, Prague, Czech Republic, pp. 277-284.
- Meyer, L. W. and Abdel-Malek, S. (2000). "Strain rate dependence of strength-differential effect in two steels." *Journal de Physique IV France*, Vol. 10, pp. Pr9-63-Pr9-68.
- Nguyen, N. V., Pham, T. H. and Kim, S. E. (2019). "Strain rate-dependent behaviors of mechanical properties of structural steel investigated using indentation and finite element analysis." *Mechanics of Materials*, Vol. 137.
- Park, H. G., Baek, J. W., Lee, J. H. and Shin, H. M. (2015). "Cyclic loading tests for shear strength of low-rise reinforced concrete walls with grade 550 MPa bars." *ACI Structural Journal*, Vol. 112, No. 3, pp. 299-310.
- Yu, H. D., Guo, Y. J. and Lai, X. (2009). "Rate-dependent behavior and constitutive model of DP600 steel at strain rate from 10⁻⁴ to 10⁻³ s⁻¹." *Materials and Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2501-2505.