



WUF-W 접합부의 액세스 홀 형상변수 타당성 평가를 위한 경험식 제안

한상환^{1*} · 윤 용² · Y. Debbie Kim³

¹교수, 한양대학교, 건축공학과, ²석사과정, 한양대학교, 건축공학과

³Assistant Professor, Texas A&M University at Commerce, Department of Engineering and Technology

Empirical Equations for Checking Validity of Access Hole Parameters for WUF-W Connections

Han, Sang Whan^{1*}, Yoon, Yong², Kim, Y. Debbie³

¹Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Graduate Student. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

³Assistant Professor, Dept. of Engineering & Technology, Texas A&M University, Commerce, Texas, USA

Abstract - The welded unreinforced flange-welded web(WUF-W) connection is an all-welded moment connection, which is qualified for special moment frame(SMF) connections. However, previous studies reported that some WUF-W connections did not meet the drift requirement specified for SMF connections and such unexpected connection performance was resulted from weld access hole geometry. The objective of this study is to determine the permissible ranges of major access hole parameters such as access hole slope and the length of flat portion that lead to the satisfactory performance of WUF-W connections using Nonlinear finite element analyses are conducted. This study also proposes simple empirical equations to check the validity of access hole parameters to be selected in design process.

Keywords - Connection, Access hole, Special moment frame, Finite element analysis, Empirical equation, Cyclic behavior

1. 연구배경 및 목적

모멘트골조는 지진에 대한 횡력저항시스템으로 널리 사용되어 왔다. 특히 1994년 Northridge 지진이 발생하기 전까지는 철골모멘트골조는 우수한 에너지소산능력과 연성능력을 보유하는 것으로 알려져 왔다. 많은 연구자들이 보의 깊이가 작은 접합부를 대상으로 모멘트 접합부의 우수한 성능을 실험과 해석을 통하여 보고한 바 있다.

하지만 최근에는 시공성과 경제성의 이유로 모멘트 골조는 외각골조에만 국한 하여 배치함으로 보부재의 춤이 매우

깊어지게 되었고, 이는 지진 발생시 보에서 접합부로 전달되는 모멘트가 커져 접합부의 부하가 증가로 이어지게 된다^[1].

Northridge 지진에서 많은 철골모멘트골조의 접합부에서 다양한 형태의 균열로 인한 취성파괴가 발생하였다^{[2],[3]}. 접합부 취성파괴는 결국 철골모멘트골조 시스템이 전체의 취성적인 거동으로 이어지게 된다^[4]. 이러한 예상치 못한 철골 모멘트골조의 지진거동으로 인하여 Northridge 지진에서 큰 손상과 함께 경제적 피해를 발생시킨바 있다. 연성거동을 할 것이라는 예상이 접합부에서 보의 휨 항복과 패널존의 전단항복으로 연성을 발휘하여야 한다.

Northridge 지진이후 철골 모멘트골조 접합부의 성능에 영향을 미치는 여러 가지 원인분석과 성능향상을 위한 접합부 및 지침 개발을 위하여 SAC Project가 수행되었다^[5]. 이 연구를 통하여 기존 모멘트 접합부의 문제점을 찾고 이에 대한 해결방안을 제시하였고, 새로운 접합부가 개발되었다. 현재 AISC 358-10^[6]에 제시되어 있는 새로운 7개의 모멘트 접합부가 이 연구의 결과물이라고 할 수 있다.

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 14, 2017; revised July 8, 2017; approved on July 24, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2220-1715 Fax. +82-2-2291-1716

E-mail. swhan@hanyang.ac.kr

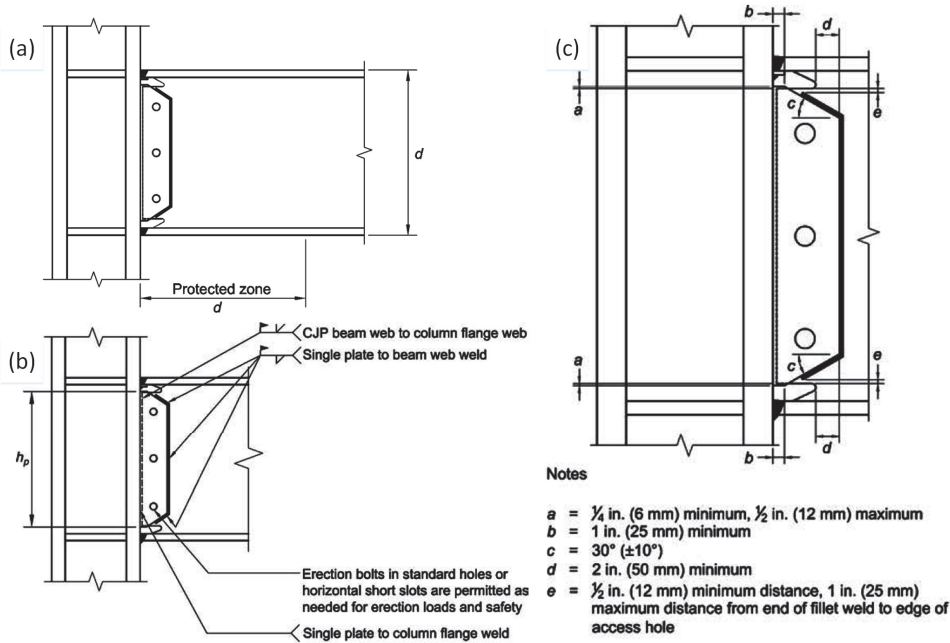


Fig. 1. WUF-W connections details (AISC 358, 2010): (a) WUF-W moment connection (b) General details of beam web-to-column flange connection (c) Details at top and bottom of single-plate shear connection

접합부의 개발 연구는 접합부를 강하게 하여 보에서 전달되는 모멘트를 충분히 저항할 수 있도록 하는 방법, 보를 약하게 하여 접합부로 전달되는 모멘트 양을 줄이는 방법, 접합부의 상세를 강화하는 방법으로 진행되었다^[7]. 이 연구들을 통하여 취성파단의 원인을 밝혀내었을 뿐만 아니라, RBS (Reduced Beam Section) 접합부, 현치 접합부, 리브 접합부 등의 새로운 상세가 개발되었다^{[5], [8]}.

WUF-W(Welded Unreinforced Flange-Welded web) 접합부는 이중 세 번째 방법으로 개발된 것으로 보의 플랜지와 웨브를 모두 기둥 플랜지에 용접 접합하여 제작한다(Fig. 1).

WUF-W 접합부의 우수성은 Lehigh 대학교와 University of Illinois at Urbana-Champaign의 두 연구기관에서 그 우수성이 검증되었다^[6].

하지만 다양한 액세스 홀 형상을 갖는 WUF-W 접합부에 대해 많은 선행연구가 수행되었고 WUF-W 접합부의 성능은 액세스 홀의 형상과 매우 큰 연관이 있음을 보고한 바 있다^{[9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]}.

본 연구에서는 WUF-W 접합부의 실험에서 찾은 이력곡선을 잘 모사할 수 있는 비선형 유효요소 해석모델을 선정하고, 이를 이용하여 WUF-W 접합부가 특수모멘트 골조(SMF)접합부의 성능을 만족할 수 있는 액세스홀 주요 변수의 허용범위(변형각 4% 이상)를 찾고 이에 대한 경험식을 제

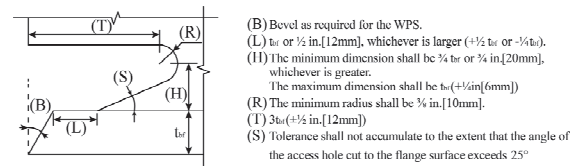


Fig. 2. Access hole geometric parameters according to current standard (AWS D1.8/D1.8M, 2009)

안하고자 한다. 액세스 홀 변수는 기존 Kim *et al.* (2017)^[18]의 연구에서 가장 영향이 있다고 제시한 액세스 홀 전이 기울기와 내민길이이다. 또한 경험식은 보춤-경간비와 보춤을 고려하도록 제안한다. Fig. 2에는 AWS D1.8/D1.8M^[19]에서 허용하는 액세스 홀 형상이 자세히 나타나있다.

2. 기존 연구 요약

WUF-W 접합부는 Ricles *et al.* (2002)^[20]과 Lee *et al.* (2005)^{[21], [22]}에 의해 수행된 24개 WUF-W 접합부 실험체의 연구 결과를 기반으로 AISC 358-10^[6]의 인증접합부로 지정되었다.

두 집단의 연구자들의 연구에 따르면 실험한 모든 접합부는 특수모멘트 골조(SMF) 인증접합부 요구사항인 회전각

4%이상을 확보하는 것으로 나타났다. 두 연구에서 사용한 접합부의 액세스홀 형상은 매우 유사하고 전이 경사각이 13°로 매우 완만한 것을 사용하였다. 그리고 사용한 보의 춤 경간비는 모두 동일한 9.8을 사용하였다.

하지만 최근 선행연구에서는 실험연구를 통하여 WUF-W 접합부가 SMF 접합부 요구조건을 만족하지 못하고 조기파단되는 경우가 있음을 보고하였고 이는 액세스홀 형상과 직접적인 연관이 있음을 지적하였다^{[13],[14],[16]}.

액세스홀 형상이 WUF-W 접합부 거동에 미치는 영향을 평가하기 위한 선행연구에서 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 보고하였다^{[17],[18]}.

WUF-W 접합부의 유한요소 해석에서 감차적분을 이용하고 전단잠김(shear locking) 현상을 제거한 C3D8R 요소가 정확성과 계산 효율성 면에서 우수하고, 액세스홀 주변 기하비선형과 응력집중 현상을 잘 반영하기 위하여 매쉬 분할 수를 4개로 나누는 것이 적당한 것으로 제안하였다. 그리고 접합부의 파단을 유한요소 해석을 통하여 찾기 어려우므로 파단지표(rupture index)를 사용하여 예측하였다. 즉 접

합부에 RI 값이 1150이 이르면 파단이 발생하는 것으로 보고하였다. 그리고 액세스홀의 주요 형상변수는 전이경사각(S)와 내민길이(L)로 WUF-W 접합부 거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다.

3. 해석모델의 검증

본 연구에서는 선행연구에서 사용한 유한요소 모델과 매쉬분할을 사용하여 세 개의 접합부실험체의 이력모델을 모사하였다^{[13],[20]}. 파단시점을 예측하기 위하여 파단지표(RI)를 사용하였고, 이 값이 1150에 도달할 때 접합부가 파단되는 것으로 설정하였다.

RI 값은 다음 식에 의하여 계산하였다^[23].

$$RI = \alpha \frac{PEEQ/\epsilon_y}{\epsilon_f} = \frac{PEEQ/\epsilon_y}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}})} \quad (1)$$

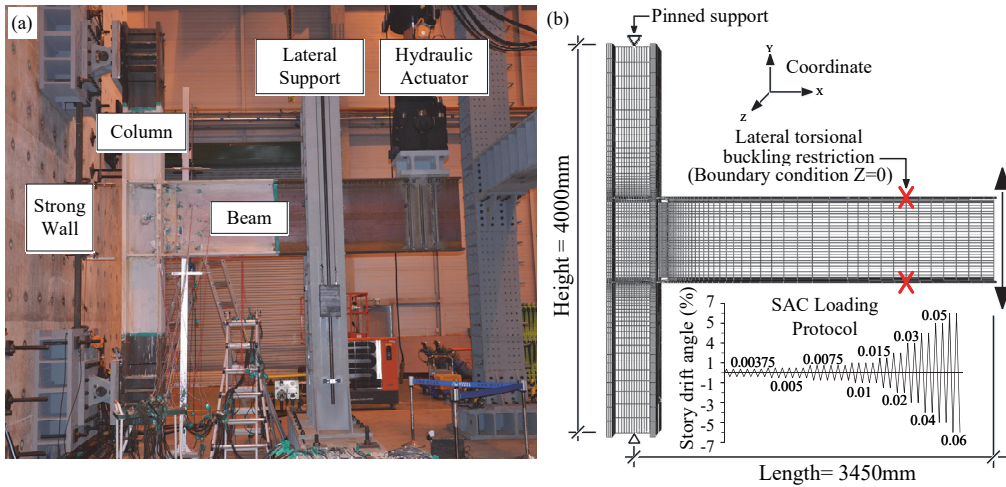


Fig. 3. Test setup and FE model (Han et al., 2014): (a) Test setup (b) FE model

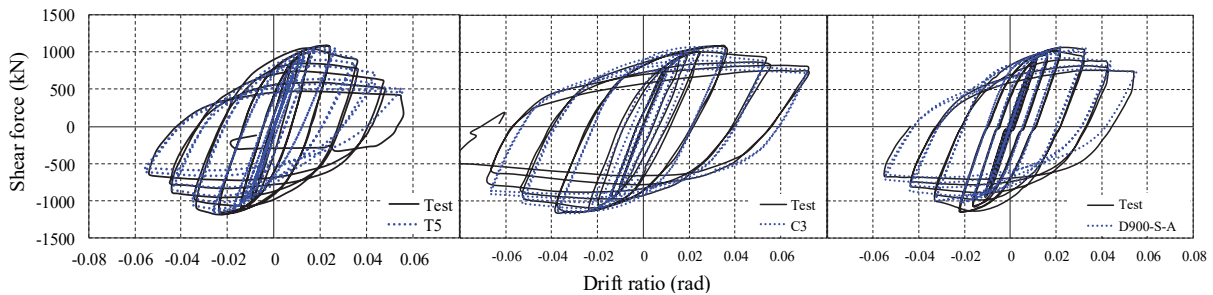


Fig. 4. Comparison between test results and analytical results (Ricles et al., 2002; Han et al., 2014)

여기서 α , ϵ_f , ϵ_y , σ_m , σ_{eff} 는 각각 재료상수, 연성파단변형률 [$= \exp(-1.5\sigma_m/\sigma_{eff})$], 항복변형률, 등방응력과 등가응력이다. 식 (1)에서 PEEQ는 다음 식에 의하여 구한다.

$$PEEQ = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p} \quad (2)$$

여기서 ϵ_{ij}^p 는 i와 j 방향 성분의 소성 변형률을 의미한다. 실험체 T5, C3, D900-SA를 대상으로 실험에서 얻은 이력곡선을 유한요소해석을 통하여 구현하였다. Fig. 3에는 WUF-W 접합부 해석모델이 나타나있다. 실험체와 동일한 구속조건을 사용하였고, 보 끝 지점에서 변위제어 반복하중을 실험과 동일하게 SAC loading protocol 하중 이력에 따라 적용시켰다^{[24],[25]}. 유한요소해석 상용소프트웨어인 ABAQUS CAE/Standard^[26]를 사용하였다. Fig. 4는 각 실험체의 실험에서 얻은 이력곡선과 해석을 통하여 얻은 이력곡선이 나타나 있다. 실험에서 얻은 이력곡선과 해석을 통하여 얻은 이력곡선이 잘 일치하는 것을 관측할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Kim *et al.* (2017)^[18]이 제안한 해석

모델을 동일하게 사용하여 액세스 홀 주요변수의 사용 범위를 평가할 것이다.

4. 액세스 홀 변수 범위 결정

현행 AISC 341-10^[27]에 따르면 특수 모멘트 골조 접합부는 4%의 층간변위비에 해당하는 성능을 보유하고 있어야한다. 액세스 홀 형상변수 전이경사각(S)와 내민길이(L)의 적절한 범위를 제안하기 위하여 2가지(692mm, 890mm) 보춤(d)과 세 가지(7.0, 8.5, 10) 보춤-경간비(l/d)를 가진 WUF-W 접합부를 고려하였다.

보춤(d)과 보춤-경간비(l/d)를 변수로 조합된 6가지 WUF-W 접합부 중 하나에 대하여 각각 5가지 전이경사각(S)과 5가지 내민길이(L)를 조합하여 총 25가지($= 5 \times 5$) 액세스 홀 형상을 고려하였다. 결과적으로 25가지 액세스 홀 형상에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 각 해석모델이 4%의 층간변위비에 도달하는 시점에서 갖는 RI 값을 평가하였다.

본 연구에서는 2가지 보춤(d)과 3가지 보춤-경간비(l/d)

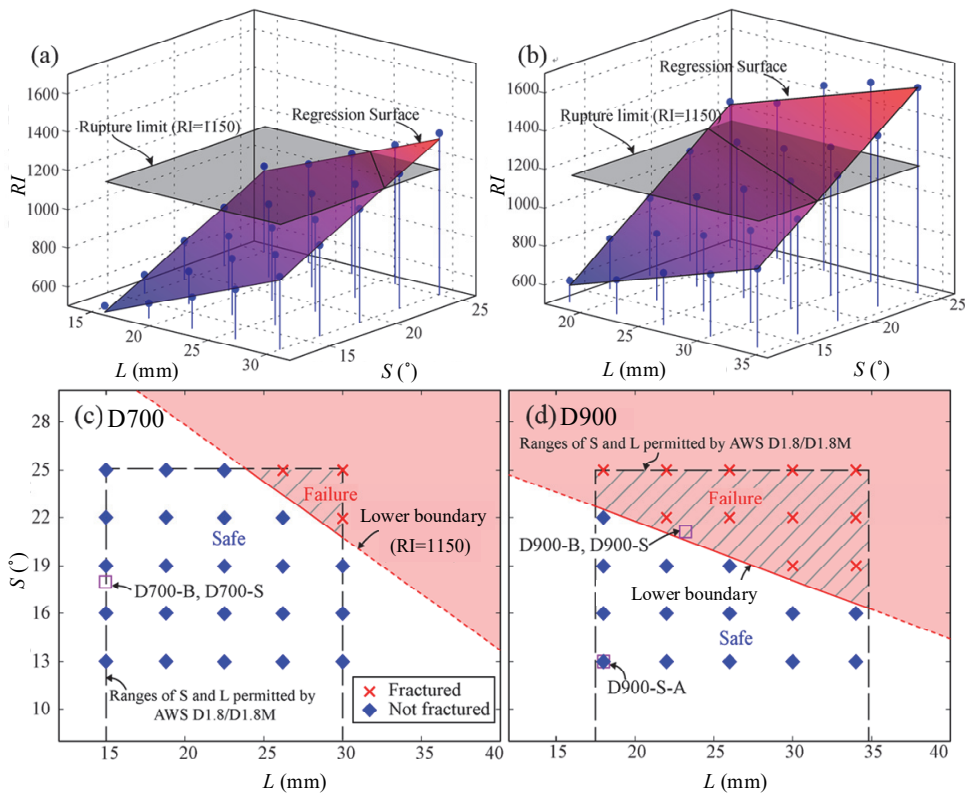


Fig. 5. Rupture index values of finite element models according to access geometric parameters

를 조합한 6가지 보에 액세스 홀 형상을 적용하여 총 150가지(=5×5×2×3)의 WUF-W 접합부 해석모델을 분석하였다. Fig. 5(a), (b)는 서로 다른 보춤(d)과 보춤-경간비(l/d)를 가진 WUF-W 접합부의 RI 값을 나타낸다. 보와 기둥에 각각 SS400 강재와 SM490 강재를 사용하였다. SS400과 SM490의 공칭항복강도는 각각 235MPa와 325MPa이다.

Fig. 5(a)는 692mm의 보춤(d)과 9.98의 보춤-경간비(l/d)로 이루어진 WUF-W 접합부 해석모델을 나타내며, Fig. 5(b)는 890mm의 보춤(d)과 7.68의 보춤-경간비(l/d)로 이루어진 WUF-W 접합부 해석모델을 나타낸다. 본 연구에서는 RI 값이 1150보다 작은 경우의 WUF-W 접합부 해석모델이 특수 모멘트 골조(SMF) 접합부의 요구성능을 만족한다고 판단하였다.

또한 SS400 강재 보와 SM490 강재 기둥으로 이루어진 선행연구의 접합부인 D700($l/d=9.95$)과 D900($l/d=7.68$)의 전이경사각(θ)과 내민길이(L)의 범위를 $S-L$ 평면에 Fig. 5(a), (b)의 평면을 정사영 함으로써 Fig. 5(c), (d)와 같이 나타내었다.

선행연구^[13]의 5가지 실험체에 적용된 액세스 홀 전이경사각(θ)과 내민길이(L)를 Fig. 5(c), (d)에 함께 나타내었다. 선행연구 실험체의 실험결과와 대조하였을 때, 특수모멘트 골조(SMF) 접합부의 요구조건을 만족한 D700-B, D700-S, D900-S-A 실험체의 두 액세스 홀 형상변수는 각각 Fig. 5(c), (d)의 안전영역에 위치하였다. 반면, 특수모멘트 골조(SMF) 접합부 요구조건을 만족하지 못하고 조기파단이 발생한 실험체인 D900-B, D900-S의 경우는 두 액세스 홀 형상변수가 Fig. 5(d)의 파단영역에 존재하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5(c), (d)에 현행 AWS D1.8/D1.8M^[19]에서 제시하는 전이경사각(θ)와 내민길이(L)의 범위를 점선의 형태로 나타내어 비교하였다. 상당수의 액세스 홀 형상변수 조합이 파단영역에 존재하여 현행기준의 형상변수 범위 이내에서도 조기파단으로 인하여 특수모멘트 골조(SMF) 접합부 요구성능을 만족하지 못할 수 있음이 확인되었다.

5. 액세스 홀 타당성 평가를 위한 경험식 제안

본 연구에서는 보춤(d)과 보춤-경간비(l/d)의 영향을 고려하기 위하여 2가지(692mm, 890mm) 보춤(d)과 3가지(7.0,

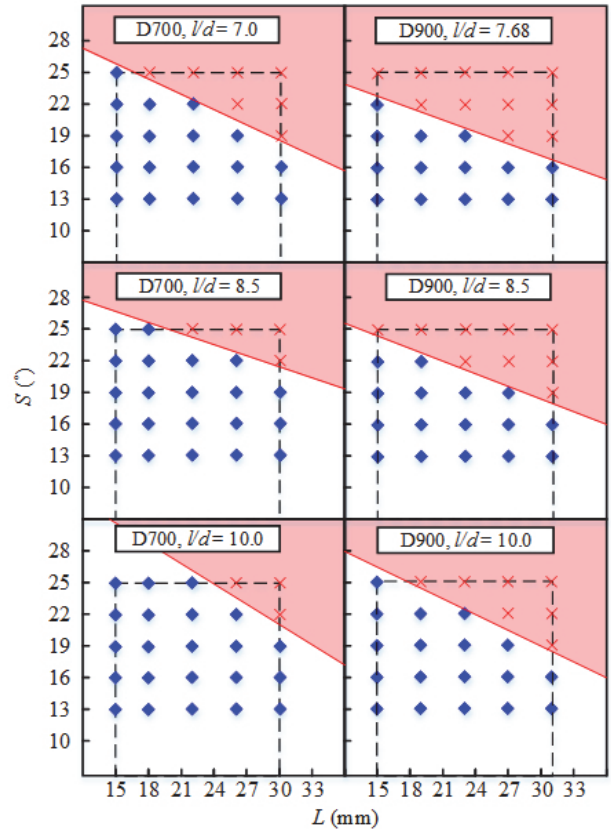


Fig. 6. Rupture index values according to l/d

8.5, 10.0) 보춤-경간비(l/d)를 조합하여 구성한 6가지 보의 WUF-W 접합부 해석모델에 대하여 앞서 수행한 분석과정을 반복하여 수행하였다.

Fig. 6은 보춤(d)과 보춤-경간비(l/d)의 조합에 따른 WUF-W 접합부의 액세스 홀 변수 조합과 안전영역 및 파단영역의 경계(RI=1150)를 실선으로 나타낸 것이다. 동일한 보춤-경간비(l/d)를 가진 WUF-W 접합부 해석모델들을 비교하였을 때, 비교적 얇은 보춤(692mm)을 가진 D700의 경우보다 깊은 보춤(890mm)을 가진 D900 해석모델이 보다 넓은 파단영역을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 보춤-경간비(l/d)가 커질수록 WUF-W 접합부 해석모델의 파단영역이 감소하는 경향을 보였다.

보춤(d)과 보춤-경간비(l/d)에 따른 6가지 WUF-W 접합부에 대하여 각각의 해석모델이 가진 파단영역의 경계는 액세스 홀 형상변수인 전이경사각(θ)과 내민길이(L) 사이의 선형관계를 가진 식으로 정의되며, 보춤(d)별 WUF-W 접합부 해석모델의 분석결과를 종합하여 각 변수들의 계수를 도출하였다.

따라서 본 연구에서는 2가지 보침을 가진 총 150개 WUF-W 접합부의 해석 결과를 이용하여 액세스 홀 형상변수인 전이 경사각(S)과 내민길이(L)에 대하여 보침-경간비(l/d)를 변수로 식 (3)과 (4)와 같은 경험식을 제안하였다. 이 식은 액세스 홀 형상변수 조합이 안전영역 내에 위치하여 층간변위비 4%의 특수모멘트 골조(SMF) 요구조건을 만족하기 위한 것이다.

$$0.78L + 1.12S < 35.15 + l/d \quad (3)$$

$$0.34L + 1.39S < 28.87 + l/d \quad (4)$$

6. 결론

본 연구에서는 현행기준 AISC 358-10^[6]과 AWS D1.8/D1.8M^[19]에 따라 설계된 WUF-W 접합부의 조기파단 가능성을 확인하고, 액세스 홀 형상과 보침-경간비를 고려하여 액세스 홀 형상변수의 적절한 사용범위를 제안하고자 하였다. 선행연구의 실험결과와 해석결과를 바탕으로 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 해석모델의 타당성을 검증하였다.

보침, 보침-경간비, 2가지 주요 액세스 홀 형상변수의 조합에 따라 총 150개 해석모델을 모델링한 후 해석을 수행하여 회귀분석을 통해 WUF-W 접합부 액세스 홀 형상변수의 타당성 평가를 위한 경험식을 제안하였다.

선행연구 Kim *et al.* (2017)^[18]에서 적용된 유한요소 해석 모델의 타당성을 평가하였다. 유한요소 해석에서 감차적분을 사용한 계산 효율성 증가와 전단잠김(Shear locking) 현상이 해결된 특징을 지닌 C3D8R 요소와 액세스 홀 주변에서의 응력집중 현상과 기하비선형성을 예측하기 위하여 메쉬 분할수를 4개로 사용하는 것은 WUF-W 접합부의 이력거동을 예측하는데 정확한 결과를 주는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 4가지 변수의 조합에 따른 총 150개($5 \times 5 \times 2 \times 3$) WUF-W 접합부의 해석 결과를 이용하여 액세스 홀 형상변수인 전이경사각(S)과 내민길이(L)에 대하여 보침-경간비(l/d)를 변수로 액세스 홀 형상변수가 안전영역에 위치하기 위한 식을 제안하였다.

각 변수들의 계수는 해석결과와 회귀분석을 통해 도출하였으며, 보침이 692mm와 890mm인 WUF-W 접합부에 대하여 다음과 같이 경험식을 제안하였다. 보침이 692mm, 890mm인 WUF-W 접합부를 설계할 경우, 주요 액세스 홀 형상변수(S, L)의 경험식 만족여부를 통하여 현행기준 AWS D1.8/D1.8M^[19]의 액세스 홀 형상변수 기준범위에서 발생할 수 있는 조기파단의 가능성 여부를 판단할 수 있다.

결과적으로 층간변위비 4%의 특수모멘트 골조(SMF) 요구조건을 만족하기 위한 액세스 홀 전이 경사각(S)과 내민길이(L)의 타당성을 평가할 수 있다.

$$(1) \text{ 692mm의 보 침을 가진 WUF-W 접합부} \\ 0.78L + 1.12S < 35.15 + l/d$$

$$(2) \text{ 890mm의 보 침을 가진 WUF-W 접합부} \\ 0.34L + 1.39S < 28.87 + l/d$$

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 연구비 지원(NRF-2014R1A-2A1A11049488)으로 수행되었고 이에 감사를 표한다. 또한 심사자 세 분의 제안사항과 추천내용에 대하여 감사를 드린다.

참고문헌(References)

- [1] Engelhardt, M.D., and Husain, A.S. (1993) Cyclic-Loading Performance of Welded Flange-Bolted Web Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.119, No.12, pp.3537-3550.
- [2] Youssef, N.F.G., Bonowitz, D., and Gross, J.L. (1995) *A Survey of Steel Moment-Resisting Frame Buildings Affected By the 1994 Northridge Earthquake*, US National Institute of Standards and Technology, USA.
- [3] Malley, J.O. (1998) SAC Steel Project: Summary of Phase 1 Testing Investigation Results, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.20, pp.300-309.
- [4] Stojadinović, B., Goel, S.C., Lee, K.-H., Margarian, A.G., and Choi, J.-H. (2000) Parametric Tests on Unreinforced Steel Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.126, No.

- 1, pp.40-49.
- [5] SAC Joint Venture (2000) *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings* (FEMA-350), Federal Emergency Management Agency, USA.
- [6] American Institute of Steel Construction (2010) *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications* (ANSI/AISC 358-10), USA.
- [7] Bruneau, M., Uang, C.-M., and Sabelli, S. (2011) *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw-Hill, USA.
- [8] 오상훈, 최영재, 윤성기, 이동규(2010) SN 강재가 사용된 강구조 용접모멘트접합부의 내진성능 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제3호, pp.271-280.
- Oh, S.H., Choi, Y.J., Yoon, S.K., and Lee, D.G. (2010) Evaluating Seismic Performance of Steel Welded Moment Connections Fabricated with SN Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No. 3, pp.271-280 (in Korean).
- [9] Chi, W.-M., Deierlein, G.G., and Ingrassia, A.R. (1997) *Finite Element Fracture Mechanics Investigation of Welded Beam-Column Connections*, SAC Report No. SAC/BD-97-05, SAC Joint Venture, USA.
- [10] El-Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E., and Kunnath, S.K. (1998) *Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections*, SAC Report No. SAC/BD-98-01, SAC Joint Venture, USA.
- [11] Lu, L.-W., Ricles, J.M., Mao, C., and Fisher, J.W. (2000) Critical Issues in Achieving Ductile Behavior of Welded Moment Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.55, pp.325-341.
- [12] Mao, C., Ricles, J., Lu, L.-W., and Fisher, J. (2001) Effect of Local Details on Ductility of Welded Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.9, pp.1036-1044.
- [13] Han, S.W., Moon, K.H., and Jung, J. (2014) Cyclic Performance of Welded Unreinforced Flange-Welded Web Moment Connections, *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Vol.30, No.4, pp.1663-1681.
- [14] Han, S.W., Jung, J., and Ha, S.J. (2016) Seismic Performance of WUF-W Moment Connections According to Access Hole Geometries, *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, Vol.32, No.2, pp.909-926.
- [15] Han, S.W., Kim, N.H., and Cho, S.W. (2016) Prediction of Cyclic Behavior of WUF-W Connections with Various Weld Access Hole Configurations Using Nonlinear FEA, *International Journal of Steel Structures*, KCSS, Vol.16, No.4, pp.1197-1208.
- [16] 황성훈, 문기훈, 한상환, 이진영(2010) WUF-W 모멘트 접합부의 비탄성 반복 하중 실험, 대한건축학회논문집-구조계, 대한건축학회, 제26권, 제10호, pp.61-68.
- Hwang, S.-H., Moon, K.-H., Han, S.-W., and Lee, J.-Y. (2010) Inelastic Cyclic Loading Tests on Welded Unreinforced Flange-Welded Web (WUF-W) Moment Connections, *Journal of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.26, No.10, pp.61-68 (in Korean).
- [17] 한상환, 정진, 문기훈, 김진원(2012) 개선된 액세스 홀 형상을 갖는 WUF-W접합부의 실험을 통한 내진성능평가, 한국지진공학회지, 한국지진공학회, 제16권, 제6호, pp.21-28.
- Han, S.W., Jung, J., Moon, K.-H., and Kim, J.W. (2012) Experimental Evaluation of the Seismic Performance of WUF-W Moment Connections with a Modified Access Hole, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.16, No.6, pp.21-28 (in Korean).
- [18] 김남훈, 김태오, 한상환(2017) 액세스 홀 형상변수가 WUF-W 접합부 반복거동에 미치는 영향, 대한건축학회논문집-구조계, 대한건축학회, 제33권, 제1호, pp.33-40.
- Kim, N.-H., Kim, T.-O., and Han, S.W. (2017) Effect of Access Hole Configuration Parameters on Cyclic Behavior for WUF-W Connections, *Journal of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.33, No.1, pp.33-40 (in Korean).
- [19] American Welding Society (2009) *Structural Welding Code - Seismic Supplement* (AWS D1.8/D1.8M), USA.
- [20] Ricles, J.M., Mao, C., Lu, L.-W., and Fisher, J.W. (2002) Inelastic Cyclic Testing of Welded Unreinforced Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.128, No.4, pp.429-440.
- [21] Lee, D., Cotton, S.C., Hajjar, J.F., Dexter, R.J., and Ye, Y. (2005) Cyclic Behavior of Steel Moment-Resisting Connections Reinforced by Alternative Column Stiffener Details I: Connection Performance and Continuity Plate Detailing, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.24, No.4, pp.189-214.
- [22] Lee, D., Cotton, S.C., Hajjar, J.F., Dexter, R.J., and Ye, Y. (2005) Cyclic Behavior of Steel Moment-Resisting Connections Reinforced by Alternative Column Stiffener Details II: Panel Zone Behavior and Doubler Plate Detailing, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Con-

- struction, Vol.24, No.4, pp.215-238.
- [23] Hancock, J.W., and Mackenzie, A.C. (1976) On the Mechanisms of Ductile Failure in High-Strength Steels Subjected to Multi-Axial Stress-States, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Elsevier, Vol.24, pp.147-160.
- [24] 이경구(2008) 비탄성 국부좌굴을 고려한 철골 모멘트 접합부의 회전능력 평가를 위한 모델 개발, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제5호, pp.617-624.
- Lee, K. (2008) Evaluation of Rotation Capacity of Steel Moment Connections Considering Inelastic Local Buckling - Model Development, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.5, pp.617-624 (in Korean).
- [25] Krawinkler, H., Gupta, A., Medina, R., and Luco, N. (2000) *Loading Histories for Seismic Performance Testing of SMRF Components and Assemblies*, SAC Report No. SAC/BD-00/10, Sacramento, CA.
- [26] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2011) *Abaqus Analysis User's Manual, Ver. 6.10*, DSS, USA.
- [27] American Institute of Steel Construction (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-10), USA.

요 약 : WUF-W 접합부는 부재의 접합이 모두 용접으로 이루어진 접합부이며, 특수모멘트골조(SMF) 인증접합부 중 하나이다. 하지만 선행 연구들을 통해 일부 WUF-W 접합부 실험체가 4% 층간변위비의 특수모멘트골조(SMF) 요구성능을 만족하지 못하였으며, 이는 액세스 홀 형상과 연관이 있음이 보고되었다. 본 연구에서는 비선형 유한요소 해석을 이용하여 WUF-W 접합부의 요구성능을 만족하기 위한 주요 액세스 홀 형상변수의 허용범위를 결정하였다. 또한 WUF-W 접합부 설계과정에서 주요 액세스 홀 형상변수의 타당성을 평가할 수 있는 간단한 경험식을 제안하였다.

핵심용어 : 접합부, 액세스 홀, 특수모멘트골조, 유한요소해석, 경험식, 이력거동
