

강재 기둥-보 구조물의 피로곡선 연구

Study for Woehler Fatigue Line of Steel Beam-to-Column Structure

공병승*

Kong, Byung-Seung

ABSTRACT

This study presents a fatigue line with a plastic rotational angle to a great extent of plastic strain of Low-Cycle-fatigue period, such as earthquake, etc. This fatigue line with a plastic rotational angle is measured and analysed more simply in practice rather than Woehler's fatigue line which is developed in stress variation of the structure. It shows that the slope of fatigue line with a plastic rotational angle is equal to that with plastic strain through the experiments by proving the correlation that the plastic strain ratio is directly proportional to the plastic rotational angle in plastic hinge.

1. 서론

구조물의 저항력을 산정하는 데는 재료학적인 면과 기하학적인 면에서의 고려가 주를 이루는데, 특히 저주기피로범위에서와 같이, 탄성범위내의 응력변동보다는 소성변형폭이 크게 발생하는 경우에는 Bauschinger 효과나 반복하중하의 강재의 변형용경화와 같은 특성으로 인하여 비선형 해석이 요구된다. 즉 구조물의 한 특정부위에서 하중저항력이 자신의 소성여유분까지를 모두 소실하게 되면 국부적인 변형에 의한 좌굴이 발생되고 이는 곧 바로 단면감소로 이어져 불과 별개의 반복하중하에서도 구조물의 파괴로 이어질 수 있다. 실제로 유럽통합시방서 내진설계편(Eurocode 8)에서는 지진하중하의 기둥-보 구조물의 연결부위의 단면감도를 이것에 연결된 보의 그것보다 20% 많게 요구하고 있어, 보의 파괴를 유도함으로써 연결부위의 파괴를 방지하고 있다. 물론 이러한 설계기준은 동하중하의 연결부위에 대한 연구가 아직 깊게 이루어지지 않아 안전은 전제로 한 것으로, 정하중하에서는 소성현지를 연결부위로 유도케하는 설계를 허용하고 있다. 이는 기둥-보 연결 설계의 새로운 이분으로, 연결부위 자체를 개별적인 부재로 인정하여 전체 구조물의 거동에 동등하다고 여기기 때문이다.

소성변형의 범위가 매우 큰 지진과 같은 동하중하의 구조물의 거동을 유효요소해석을 통하여, 전체적인 거동은 물론, 국부적으로 Hot Spot로 불리는 응력의 집중점에 접근, 실험으로 구하기 어려운 소성변형율을 구하고 이를 사용한 소성회전각의 피로곡선 기술키랄 구하고자 함이다.

2. 소성변형율과 소성회전각을 이용한 피로곡선

2.1 고정단 실험

Ballio는 수직으로 세워진 고정단보의 자유단에서의 변위에 의한 동하중 실험을 실시하여, 변형

*동서대학교 토목공학과 교수

을에 따른 피로곡선을 소성회전각에 의한 피로곡선으로 전환하고자 하였다. 일정한 길이 $L=1410\text{mm}$ 를 가진 강재로(HEA 220) 만들어진 고정단보의 자유단을 양방향 같은 크기의 변위로 일정하게 하중을 가하여 파괴도달시 까지의 하중-변위 곡선을 관찰하였다. 이때 동일단면의 강재 시편내에서는 각각 다른 크기의 변위를 주고 그것을 파괴시까지 일정하게 유지시키는 변위조정함수에 의한 응력실험으로 최종파괴시의 하중반복 횟수, 하중과 변위의 관계, 파괴부위, 항복강도 등의 주요사항 등을 도표 1과 같이 기록하였다.

도표 1. HEA 220 강재시편의 실험결과

실험명	Δv	v_y	F_y	σ_y	N_f	F_f	F_{max}	파괴형상
HEA 2	240	20	140	360	16	83	172	소성힌지
HEA 3	200	19	138	360	19	72	168	소성힌지
HEA 4	280	18	135	340	9	120	167	소성힌지
HEA 5	160	18	150	320	41	92	179	소성힌지
HEA 6	120	19	150	303	76	80	183	소성힌지
HEA 7	340	19	143	310	6	51	176	소성힌지
HEA 8	80	19	145	310	165	74	167	용접파괴

- 주)
- Δv (mm) : 고정단보의 자유단에서의 변위의 범위
 - v_y (mm) : 탄성한계 도달시의 고정단보의 자유단에서의 변위량
 - F_y (KN) : 탄성한계 도달시의 고정단보의 자유단에서의 작용하중
 - σ_y (N/mm²) : 강재시편의 항복강도
 - N_f (-) : 강재시편의 파괴시의 하중반복 횟수
 - F_f (KN) : 강재시편의 파괴시의 고정단보의 자유단에서의 저항하중
 - F_{max} (KN) : 실험중 고정단보의 자유단에서의 최대하중

실험결과에서 보면, 1회 반복하중후 강재의 모멘트저항력이 일시적으로 증가하나, 계속되는 반복하중후에는 파괴시까지 계속 감소되는 현상을 볼 수 있다. 이는 재료학적으로 소성범위에서의 변형응력화 현상에 의해 일시적으로 강재가 경화되는 현상이며, 일정한 변형율에 해당되는 응력이 소성힌지에서 생기는 국부좌굴의 증가로 인한 강재단면적의 감소로 점차 증가하게 되어 전체 강재의 모멘트저항력의 감소를 가져오는 것이다. 또한 국부좌굴의 생성으로 인하여 강재수직축을 중심으로의 Torsion 효과도 응력의 증가를 초래한다.

2.2 수치해석

위의 실험중에서 HEA 220의 강재시편에서 임의로 1개를 선정하여 FEM을 이용한 수치해석을 시도하였다. 프로그램으로는 복잡한 구조물의 선형과 비선형 해석에 유리한 ABAQUS를 이용하였으며, 이는 다양한 2차, 3차원의 요소종류를 사용하여 연결부위의 접촉면과 소성힌지부분의 국부좌굴 해석에 유리하다. 강재의 재료특성은 기사용 된 강재시편이 항복강도이외의 정확한 값을 측정할 수 없고, 하항복점이후 인장강도까지의 재료특성이 이관 실험과 같은 큰 범위의 소성변형의 거동을 주도하기 때문에 상당히 중요한 변수로 작용하게 된다. 독일 아헨공대의 강구조연구소와 금속공학연구소에서는 강도가 각기 틀린 여러 구조형 탄소강들의 일축 인장시험을 통하여 상,하항복점과 변형율경화에 따른 인장강도 등을 구하였는데, 건설재료로 주로 사용되는 항복강도 약 400 Mpa의 탄소강들이 하항복점에서 변형율경화 전까지의 흐름상태의 변형율과 초기의 변형율경화계수가 대략 일정한 값을 가짐을 알수 있었다.

2.3 실험과 수치해석의 비교분석

하중직각방향으로의 변형을 방지하기 위하여 고정단보의 자유단 부분을 구속시켰으며, 하중 전달방법도 실험과 동일하게 탄성범위내에서의 1회 반복후 계획된 최대변위량까지 재하한 후 다시 반대방향의 최대변위량까지 반복하중을 가하였다. 몇회의 반복하중후 고정단보의 양쪽 플랜지 부

분해 국부변형이 생기기 시작하며, 이에 따라 고정단부의 기하학적인 저항력이 감소하기 시작하면서 극한강도에 도달하여 파괴되고 만다. 여기서 언급해야할 사항은 유한요소해석으로는 실제상황에서 일어나는 국부변형 위의 소거 Crack의 발생시점을 정확히 해석할 수 없고, 이를 위해서는 파괴역학에 근거를 둔 새로운 형태의 요소들 이용해야하나, 계산시간 등으로 인하여 본 연구에서는 연구목적상 제외시켰다. 또한 하중변복에 따른 재료의 경화현상과 소거완복률도 고려되지 않았다. 그림 1에는 실험에 의한 강재살인체의 실제 변형과 해석상의 변형을 비교하였고, 그림 2에 그 결과를 작용하중-변위곡선으로 나타내었다.

도표 2. HEA 220 No.3 실험과 해석결과의 비교

	v_u (mm)	F_u (kN)	F_y (kN)	F_{max} (kN)
실 험	130	128.0	72.0	118.0
수치해석	17.6	141.2	67.6	115.7
편 차(%)	-7.3	+1.0	-9.6	-1.8



그림 1. HEA 220 No. 3의 파괴시 변형사건과 수치해석 모델



그림 2. HEA 220 No. 3의 실험과 해석에 의한 하중-변위 곡선

2.4 손실회전각에 의한 피로곡선

강재의 피로거동은 전통적으로 Woehler의 S - N선도와 같이 작용응력 변동폭을 중심으로 표시되어 왔다. 근래에는 저주기피로범위에서 응력-변형률의 상관관계를 Manson과 Coffin에 의해 주로 변형률에 의한 $\log \epsilon - \log N$ 의관계로 나타내게 되는데, 실질적으로 부재의 파괴시 그 파괴부위의 (대부분 국부파괴에 의한 비틀림현상이 일어남) 변형률은 작용회전에 따라 큰 차이가 있으며 실험을 통해서도 정확한 값을 추정하기가 거의 불가능하다. 이에 부재의 피로파괴에 대한 연구에 회전각 θ 에 의한 피로곡선을 적용하게 되었으며, 이는 위의 실험에서와 같이 간단하게 측정된

수 있다. 저주기피로범위에서는 탄성보다 소성쪽의 비중이 매우 커서 공적으로 소성변형률값이 구조물의 전체기동에 주영향을 미치는 편에 착안하여, 소성회전각만에 의한 피로곡선, 즉 $\log \varphi_{pl} - \log N_F$ 에 의한 개념을 도입하였다(Feldmann). 소성회전각 φ_{pl} 는 그림 1의 실험과 같은 경우 다음 식 1과 같이 간단히 구할수 있다.

$$\Delta\psi_{pl} = \Delta\psi_{tot} - \Delta\psi_{el} = \frac{(\Delta v - 2v_y)}{L} \quad (1)$$

그림 3에 위의 강재실험체에 대한 피로도달시까지의 소성회전각과 반복하중수에 대한 상관관계를 양축에 Log를 위하여 표시하여 보았다. 실험에서 용접피로에 의한 실험체는 제외했으며, 강재의 순수피로만을 고려하였다.

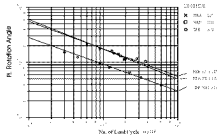


그림 3. Ballio의 실험결과에 의한 소성회전각의 피로곡선

이 그림에서 다음의 두가지 사실을 분석할 수 있다.

- 1) 소성회전각 φ_{pl} 와 피로도달시의 반복하중수 N_F 는 양축 Log의 그래프에서 Woehler의 응력피로 곡선과 동일한 직선으로 표시되며,
- 2) 이 소성회전각에 의한 피로곡선의 기울기는 각기 다른 강재실험체에서도 거의 동일하며 그 값은 약 2.0 이다.

이러한 소성회전각에 의한 피로곡선의 기울기는 1행강의 소성변형률에 의한 피로곡선의 기울기에서부터 다음과 같이 간단하게 산술적으로 유도할 수도 있다. 만약에 강재의 소성현저에서의 소성회전각 φ_{pl} 과 가장 심한 국부좌굴의 소성변형률 ϵ_{pl} 사이에 1차 비례관계가 성립된다는 가정하에 다음과 같은 간단한 식을 세울 수 있다.

$$\frac{\psi_{pl,2}}{\psi_{pl,1}} = \frac{\epsilon_{pl,2}}{\epsilon_{pl,1}} \quad (2)$$

소성변형률 ϵ_{pl} 에 의한 피로곡선의 기울기 m_D 와 소성회전각 φ_{pl} 의 피로곡선의 기울기 m_D 은 다음과 같이 수식으로 각각 나타낼 수 있다.

$$m_D = \frac{\Delta \log N_D}{\Delta \log \epsilon_{pl}} = \frac{(\log N_{D,2} - \log N_{D,1})}{(\log \epsilon_{pl,2} - \log \epsilon_{pl,1})} \quad (3)$$

$$m_R = \frac{\Delta \log N_R}{\Delta \log \psi_{pl}} = \frac{(\log N_{R,2} - \log N_{R,1})}{(\log \psi_{pl,2} - \log \psi_{pl,1})} \quad (4)$$

하중 반복횟수는 서로 같으므로

$$N = N_D = N_R \quad (5)$$

식 (1)에서 식 (5)를 정리하면

$$m_R = \frac{(\log N_{R,2} - \log N_{R,1})}{(\log \psi_{pl,2} - \log \psi_{pl,1})} = \frac{(\log N_{D,2} - \log N_{D,1})}{(\log \epsilon_{pl,2} - \log \epsilon_{pl,1})} = m_D \quad (6)$$

위 식에서 보는바와 같이 소성회전각 ψ_p 의 피로곡선의 기울기 m_R 은 소성변형율 ϵ_{pl} 에 의한 피로곡선의 기울기 m_D 와 같은 값을 가지며 그 크기는 Boller와 Seeger⁷⁾의 실험에서 밝혀진 바와 같이 $m_R = m_D = 2.0$ 이다. 또한 위의 Ballio의 실험에서도 $m_R = 2.0$ 임이 밝혀졌다.

3. 기둥과 보의 반강결연결

앞 절에서의 사실을 이용하여 소성회전각에 의한 피로곡선의 연구를 기둥-보 연결로 확장시키기 위해 용접연결된 구조물을 그림 4과 같이 실험하였다. 여기서 HEB 300 단면의 기둥은 상부로부터의 축하중 200 (KN)이 상재된 상태에서, HEA 220 단면의 보에 탄성범위내의 시험반복하중 후 0.01 (rad)씩 증가율을 가진 상하 반복하중을 부재 파괴시까지 지속적으로 가하였다. 부재의 항복강도 $\sigma_y = 307$ MPa로 측정되었다.

유사한 범위로의 응용을 위하여 실시한 유한요소해석에 의한 분석은 도표 3와 그림 5에서와 같이 실제의 파괴거동과 매우 근접하는 만족할만한 결과를 내었다. 특히 해석의 파괴형상에서는 전체적인 파괴양상이 아닌 국부좌굴의 영향임이 명확히 판명되며, Hot Spot에서의 소성변형율의 값을 쉽게 판정할 수 있어 그림 6과 같이 소성변형율과 소성회전각은 명백한 직선관계임을 증명할 수 있었다. 이것은 수치해석의 장점을 통하여 보의 플랜지부분에 발생하는 최대 국부좌굴(Hot Spot)에서의 소성회전각 ψ_p 과 소성변형율 ϵ_{pl} 의 값을 손쉽게 밝혀낼 수 있는 것으로 위의 가정의 타당성을 입증할 수 있다.

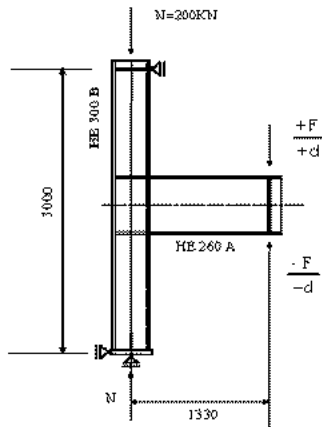


그림 4. No. E1의 실험도

도표 3. No. E1 실험과 수치해석의 결과 비교

	ψ_{tot} 1×10^{-6}	M_y	ψ_y 1×10^{-2}	$M_{z,s}$	ψ_u 1×10^{-2}	M_u	ψ_u/ψ_y
실험	3.75	250.0	0.94	295.0	8.3	395.0	8.8
수치 해석	3.61	260.8	0.89	307.4	7.6	471.0	8.5
편차 (%)	-4.0	+4.3	-5.30	+4.2	-8.4	+19.2	-3.4

- 주) ψ_{tot} (rad) : 전체회전각
 M_y (KNm) : 탄성한계에서의 모멘트값
 ψ_y (rad) : 탄성한계에서의 회전각
 $M_{z,s}$ (KNm) : $\psi = 2.5\%$ 에 해당되는 모멘트값
 ψ_u (rad) : 3회 반복하중시의 회전각
 M_u (KNm) : ψ_u 에 해당되는 모멘트값
 ψ_u/ψ_y (-) : 유연도값



그림 5. 실험 No. E1의 수치해석에 의한 파괴 변형도

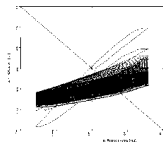


그림 6. 실험 No. E1의 소성변형률과 소성 회전각의 1차비례관계

4. 결론

위와 같은 실험과 수치해석연구의 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) Low-Cycle-Fatigue 범위에서와 같이 소성변형범위가 큰 구조물의 거동을 연구하기 위한 고정 단로의 실험을 통하여 국부변형의 요인을 파악하고 소성회전각에 의한 피로손상을 관찰한 결과 그 형상이 Woehler의 응력피로곡선과 동일한 직선이며, 기울기는 약 2.0임을 밝혀냈다.
- (2) 소성변형률과 소성회전각의 관계가 직선을 이루는 1차 비례관계임을 가정하여 산술적으로 위의 실험에서의 기울기가 약 2.0임을 증명하였다.
- (3) 기존의 Package Program을 바탕으로 수치해석모형을 개발하여, 실험과의 일치도를 입증하고, (2)에서의 가정의 타당성을 도식으로 증명하였다.
- (4) 수치해석모형을 이용하여 기동-보 연결의 기하학적, 재료학적 응용이 가능케 되어 동하중하의 피로연구에 많은 도움이 될 수 있으리라 기대한다.

참 고 문 헌

1. Eurocode 8, 1988, Seismic design method Part 1, Commission of european union
2. Sedlacek, G., Weynand, K., et al., 1992, SERICON : An international data base of beam-to-column-joints out of steel, RWTH Aachen
3. Ballio, G. and Castiglioni, C.A., 1994, Seismic behaviour of steel sections, Journal of constructional steel research, Vol. 29, pp 21-54
4. Bohmann, D. and Sedlacek, G., 1994, DINGO, Dreidimensionaler Interaktiver Netzgenerator mit Graphischer Oberfläche, Lehrstuhl fuer Stahlbau, RWTH Aachen
5. Sedlacek, G and Dahl, W., 1994, Bruchmechanische Sicherheits-analyse im Stahlbau, Abschlussbericht, AIF-No.9044, Aachen
6. Feldmann, M., 1994, Zur Rotationskapazitaet von I-Profilen statisch und dynamisch belasteter Traeger, Dissertation, Lehrstuhl fuer Stahlbau, RWTH Aachen
7. Bolter, Ch. and Seeger, T., 1987, Materials data for cycle loading, Part A: Unalloyed steels, Part B: Low-Alloy steels, Materials science