

## ILM 시공시 발생할 수 있는 하중조합에 대한 강교량 주형의 국부좌굴 연구

### A Study of Local Buckling of Steel Bridge Girders subtended to Possible Load Conditions during Construction by Incremental Launching Method

염응준\* · 강민철\*\* · 황민오\*\*\* · 강영중\*\*\*\*

Youn, Eung Jun · Kang, Min Choul · Hwang, Min O · Kang, Young Jong

#### ABSTRACT

Recently, various and new special methods of construction about steel bridges have been tried, and the study about local buckling under this methods have been performed too. But, because of various cases, structural analysis is performed to check safety for each step of construction, and this is not efficient and economical method for time and manpower. So, for solution of this problems, general method about checking safety needs to be developed. In this study, local buckling of web of girder due to various load cases under construction by ILM(Incremental Launching Method) will be studied considering various parameters such as forces, aspect ratio, boundary condition and so on. Also, interaction curve will be plotted for each case.

#### 1. 서 론

현대 교량 구조물은 기술의 발전으로 더욱 장대화, 경량화 되는 추세에 있으므로, 강교량 형식의 구조물에 대한 기술의 발전이 계속 이루어지고 있는 추세이다. 시공기법에는 일반적으로, 콘크리트 교량의 특수 공법의 이용이 활발한 한편, 강교량은 오랫동안 크레인 가설공법을 채택하여 왔으나, ILM(Incremental Launching Method) 공법등의 시공방법이 강교량 구조물에도 시도되고 있다. 특히 ILM 시공시에는 시공 도중에는 완성된 교량과 전혀 다른 응력상태의 상태를 거치게 되는데 런칭(launching) 작업 시에는 휨응력, 전단응력 등이 동시에 작용함과 동시에 지점반력이 발생하게 되므로, 시공중에 발생할 수 있는 국부좌굴에 대하여 반드시 검토가 필요하다. 그러나 이러한 검토를 할 수 있는 기초연구가 미비하여 많은 어려움이 있으므로, 이러한 여러 가지 하중의 조합에 의한 국부좌굴 검토를 할 수 있는 기초 연구가 필요하다고 말할 수 있

\* 고려대학교 토목환경공학과 · 박사과정 · 공학석사 · tiger56@mail.korea.ac.kr - 발표자

\*\* 고려대학교 토목환경공학과 · 석사과정 · 공학사 · wauwau77@hotmail.com

\*\*\* 정회원 · 포항산업과학연구원 연구원 · 공학석사 · mohwang@rist.re.kr

\*\*\*\* 정회원 · 고려대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · yjkang@mail.korea.ac.kr

다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위한 방편의 초석을 마련하기 위해, 국부판의 지점반력을 포함한 하중조합 및 형상비, 경계조건을 매개변수로 하여, 이것에 따른 interactive curve를 작성하였다. 이 결과를 통하여 판형의 국부좌굴 양상을 살펴봄과 동시에, 각 응력 상태에 따른 국부좌굴 안정성 검토방법을 모색하였다.

## 2. 연구 동향 및 배경 이론

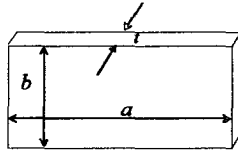


그림 1. 판형 (Plate)

표 1. 하중조합에 따른 Interaction Curve 식 (황, 2004)

| 하중조합            | 경계조건  |  |   |
|-----------------|---|--|---|
|                 | 단순-단순   | 고정-단순  | 고정-고정   |
| 압축력 & 전단력       | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 = 1$                | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 = 1$                             | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 = 1$                |
| 압축력 & 정모멘트(휨하중) | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^2 = 1$      | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^3 = 1$<br>(a/b ≠ 0.5일 때) | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^2 = 1$      |
|                 |   | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^2 = 1$<br>(a/b = 0.5일 때) |   |
| 전단력 & 정모멘트(휨하중) | $\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^X = 1$ | $\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^X = 1$              | $\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^X = 1$ |
|                 | $X = 0.5075 \ln(a/b) + 1.6272$  | $X = 1.8351 \ln(a/b) + 1.8351$   | $X = 0.5071 \ln(a/b) + 1.7757$  |
| 압축력 & 부모멘트(휨하중) |   | $\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^{10/7} = 1$              |   |
| 전단력 & 부모멘트(휨하중) |   | $\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^{10/7} = 1$         |   |

판형에 대한 국부좌굴에 연구는 많이 이루어져 왔지만, 대부분 특수한 경우의 구조해석 및 실험적 연구 중심으로 이루어져 왔으며. 전단 응력에 관한 좌굴강도에 대한 연구는 Lee et al.(1996), Bradford(96), 김 (1998)등에 의해서 연구되어 왔다. 한편, 기본적으로 1900년대 초에, Timoshenko(1910),Bergmann and Reissner(1932), Seydel(1933) 등에 의해 압축 및 전단에 대한 국부좌굴의 기본식이 유도 되었고, 아직도 현대의 국부좌굴 연구의 근간이 되는 기본식으로 이용되고 있다. 이러한 국부좌굴식의 형태에 기초하여, 황 (2004)은 전단력, 휨, 압축력의 조합과 경계조건, 그리고 형상비(a/b: 그림 1)에 따른 판형의 좌굴해석을 통하여, 각 조건에 따른 Interactive Curve 식을 제안하였다. 각 조건에 따른 Interactive Curve 식을 정리하면 표 1 과 같다.

또한, 단순지지 조건에서의 압축력, 전단력, 휨력의 조합하중에 대한 Interactive Curve식은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_c}{(\sigma_c)_{cr}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{cr}}\right)^2 = 1: \text{압축, 전단} + \text{휨} \quad (\text{Gerard and Becker}(1957\sim 1958)) \quad (1)$$

### 3. 전라 분석

#### 3.1 연구 방법

본 연구는, 범용프로그램(ABAQUS 6.3.1)을 이용하여 매개변수에 따른 국부좌굴 해석을 수행하였다. 요소는 4절점 쉘요소(S4R5)를 사용하였고, 물성치는 탄성계수와 포아송비를 각각,  $E= 21,000 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\nu= 0.3$  을 사용하였으며 단위는 kg, mm 단위로 사용하였다. 매개변수인 형상비(a/b: 그림 1)는 b를 3000mm로 고정시키고 a값을 조절하여 1, 2, 3 으로 변화시켜 해석을 수행하였으며, 경계조건과 그림 2와 같이 단순-단순 (simple-simple) 조건과 고정-고정조건(fixed-fixed)에 대하여 해석을 수행하였다. 하중조합은 휨 모멘트와 전단력, 그리고 지점반력을 모사하는 하중(그림3)을 조합하여 고려하였다. 또한, 그림3에서와 같이 지점반력을 모사하는 하중의 작용지점 폭(이하 지점폭) c를 0.1a, 0.5a, 1.0a로 변화 시켜 해석을 수행하였다.



그림 2. 경계조건

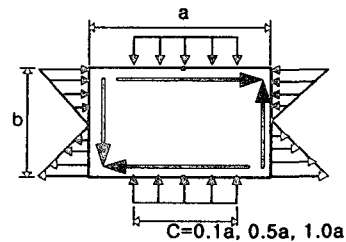


그림 3. 지점반력을 고려한 하중 조합

### 3.2 Interactive Curve

그림 4는 지점반력을 고려한 Interactive Curve를 매개변수에 따라서 나타낸 것이다. 그림 4에 쓰여진 변수의 의미는 표 2와 같다.

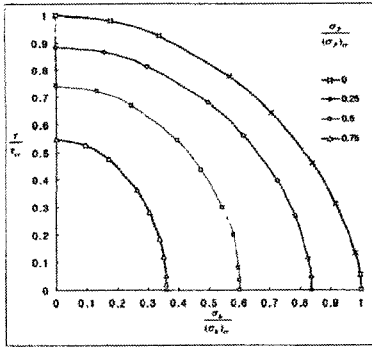
표 2. 각 변수의 의미

| 기호                | 의미          | 기호         | 의미    |
|-------------------|-------------|------------|-------|
| $\tau_{cr}$       | 순수 전단 좌굴응력  | $\tau$     | 전단 응력 |
| $(\sigma_p)_{cr}$ | 순수 지점 좌굴 응력 | $\sigma_p$ | 지점 응력 |
| $(\sigma_b)_{cr}$ | 순수 휨 좌굴 응력  | $\sigma_b$ | 휨 응력  |

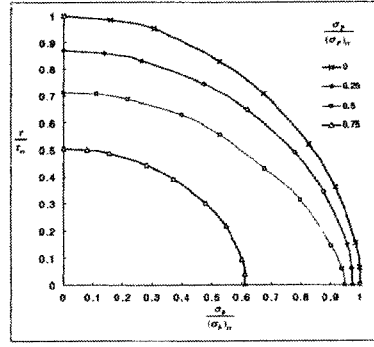
그림 4의 결과를 보면, 지점 응력비( $\sigma_p/(\sigma_p)_{cr}$ )가 증가할 때, 단순-단순 조건에서가 고정-고정 조건에서 보다 전단 및 휨응력비( $\tau/(\tau_{cr}), \sigma_b/(\sigma_b)_{cr}$ )의 감소가 대체적으로 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 지점폭 C가 작을 때와 형상비가 클 때에 전단 및 휨응력비( $\tau/(\tau_{cr}), \sigma_b/(\sigma_b)_{cr}$ )의 감소가 커진다는 것을 알 수 있다. 이것은 단순단순 조건이고, 지점폭이 작고 형상비가 클 때, 실제 ILM 시공중 복부판의 좌굴이 지점반력의 영향 때문에 생길 가능성이 크다는 것을 나타낸다. 또한, 작성한 Interactive Curve를 활용하면 좌굴에 대한 안정성을 대략적으로 검토할 수 있다. ILM 시공시, 정적해석을 통한 교량 복부판의 응력상태를 Interactive Curve에 나타내어 각 조건에서의 Interactive Curve보다 바깥쪽에 위치하는 응력상태라면 좌굴 위험성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3 좌굴 형상

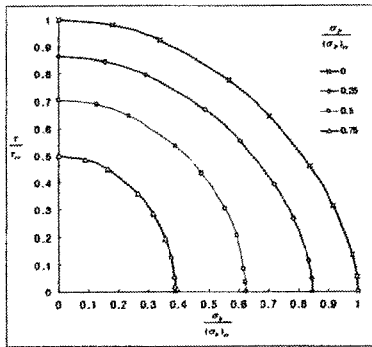
세 하중의 조합에 따른 좌굴 형상은 각각의 순수 좌굴 형상의 조합 형태로 나타난다. 그림 5는 각 하중조건과 경계조건에 따른 지점반력을 고려한 판형의 좌굴 형상을 나타낸 것이다. 그림에서 전체적인 경향을 살펴보면, 지점 응력비( $\sigma_p/(\sigma_p)_{cr}$ )가 크면서 지점폭이 좁을수록 지점응력의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 특히 지점폭 C가 0.1a일 때의 좌굴형상은 거의 지점응력에 의한 좌굴형상에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이것은 지점폭이 작을 때 지점반력이 주형 복부판의 좌굴에 많은 영향을 끼칠 수 있다는 것을 보여준다. 또한, 판형 지지형상이 단순-단순조건 보다 고정-고정조건에서의 좌굴형상이 복잡하게 나타나는 현상은 일반적으로 알려져 있는 휨력, 압축력, 전단력의 두가지 하중 조합으로 해석했을 경우들과 같은 좌굴 경향이다.



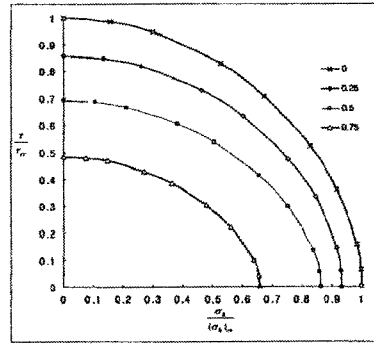
**C=0.1a, simple-simple, a/b=1**



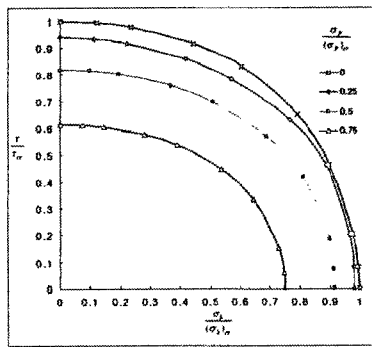
**C=0.1a, fixed-fixed, a/b=1**



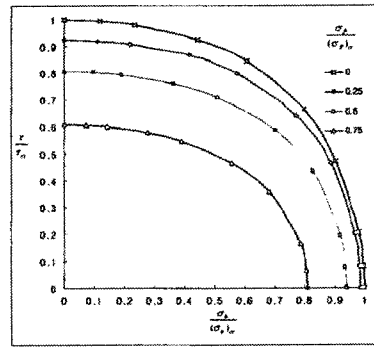
**C=1a, simple-simple, a/b=1**



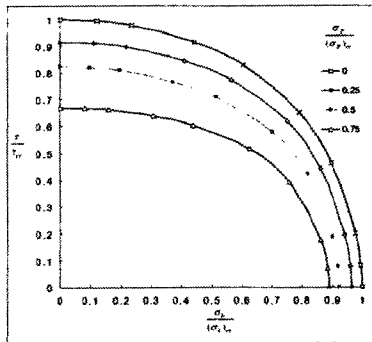
**C=1a, fixed-fixed, a/b=1**



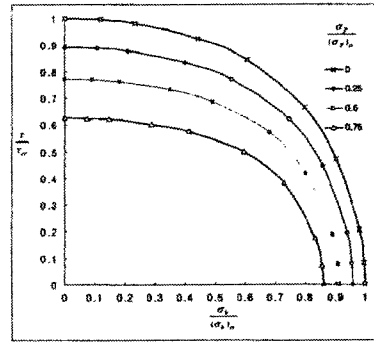
**C=0.1a, simple-simple, a/b=3**



**C=0.1a, fixed-fixed, a/b=3**



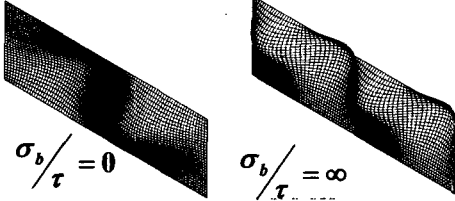
**C=1a, simple-simple, a/b=3**



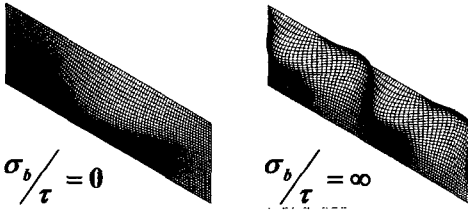
**C=0.1a, fixed-fixed, a/b=3**

C=1a, simple-simple

$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.25$$

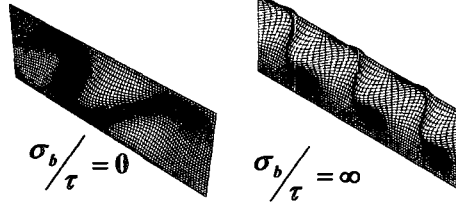


$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.75$$

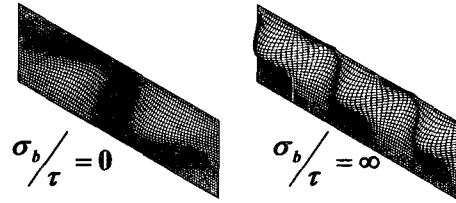


C=1a, fixed-fixed

$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.25$$

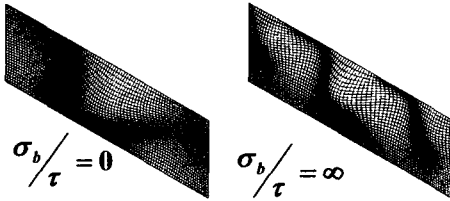


$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.75$$

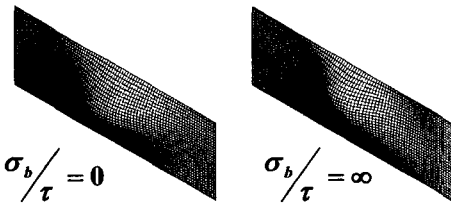


C=0.1a, simple-simple

$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.25$$

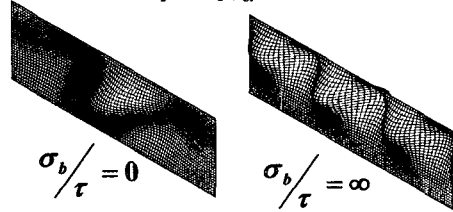


$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.75$$



C=0.1a, fixed-fixed

$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.25$$



$$\sigma_p / (\sigma_p)_{cr} = 0.75$$

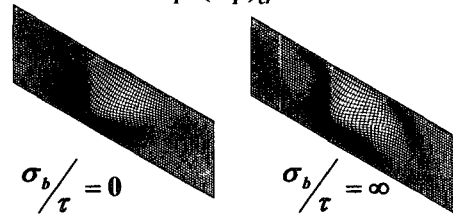


그림 5. 각 하중조건과 경계조건에 따른 좌굴형상

#### 4. 결론

본 논문에서는 ILM시공시 발생할 수 있는 응력들의 조합과 경계조건, 그리고 교량 복부판의 형태 및 보강재를 표현하는 형상비를 고려한 판형의 탄성좌굴해석을 수행하였다. 본 해석의 결과를 통하여 Interactive Curve를 작성하고 그 경향을 살펴보았다. 또한, 이러한 연구 결과를 통하여, ILM 시공시 교량 복부판의 좌굴검토에 관한 지표를 마련하였다.

전단, 휨, 지점 반력을 모사한 해석에서는 단순단순 조건이고, 지점폭이 작고 형상비가 클 때, 실제 ILM 시공중 복부판의 좌굴이 지점반력의 영향 때문에 생길 가능성이 크다는 결론을 도출 하였으며, 작성한 Interactive Curve를 활용하면 좌굴에 대한 안정성을 대략적으로 검토할 수 있다. ILM 시공시, 정적해석을 통한 교량 복부판의 응력상태를 interactive curve에 나타내어 각 조건에서의 Interactive Curve보다 바깥쪽에 위치하는 응력상태라면 좌굴 위험성이 있는 것으로 간주하고 그 보강대책을 세워야 할 것이다. 복부판의 보강을 보강재로 할 경우, 보강재를 설치했을 때의 상태는 본 연구에서의 형상비를 조절한 것과 같으므로, 이를 감안하여 다시 좌굴 검토를 할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 「포항산업과학연구원 국가지정 강교량연구실(NRL)」의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Theodore V. Galambos, *Stability design criteria for metal structures, 5th edition* , John Wiley & Sons, inc. 1998
2. Hans H. Bleich, *Buckling strength of metal structures* , Lexington Books. 1975
3. Charles G. Salmon, John E. Johnson, *Steel structures design and behavior, 4th edition*, HarperCollins, 1996
4. 황경민 2004, 다양한 하중과 경지조건을 고려한 판형의 탄성좌굴, 석사 학위논문, 고려대학교, 2004
5. *ABAQUS Manual Series, version 6.3*, HKS KOREA., 2000