

슬리브가 있는 볼트 체결부의 판재강성 공식

A Formula for Member Stiffness of Bolt-Jointed Part with a Sleeve

권 영 두* 윤 태 혁** 임 범 수*** 이 일 희****
Kwon, Young-Doo Yun, Tae Hyeok Lim, Beom-Soo Lee, Il-Hee
(논문접수일 : 1999년 12월 27일 ; 심사종료일 : 2001년 3월 13일)

요 지

기계구조물을 슬리브 없이 볼트-너트 체결하는 경우 판재의 강성에 대해서는 많은 연구가 진행되어 신뢰할 수 있는 이론이 보고되어 있다. 그러나 토목 분야에서 많이 사용되는 슬리브가 있는 볼트-너트 체결부에 대한 연구는 미진한 상태이다. 본 연구에서는 슬리브가 있는 경우 볼트-너트로 체결된 판재의 강성을 계산하는 공식을 유도하고 이를 콘크리트 구조물의 예에 적용하였다. 제안된 공식의 결과를 단순합산식과 유한요소법에 의한 결과와 비교하여 그 타당성과 유용성을 밝혔다. 본 연구에서 제안한 공식은 슬리브가 있는 체결부의 판재 강성을 계산하는 데 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 볼트 체결부, 슬리브, 판재강성, 유한요소법

Abstract

In the case of a mechanical structures jointed by bolts and nuts, many studies have been conducted on the stiffness of the jointed members. Accordingly, an appropriate formula for this case has already been formulated and verified by experimentation. However, the case of bolt-jointed members with a sleeve, which is a common situation in the civil engineering, has not yet been considered. In this work, a formula for evaluating the stiffness of bolt-jointed members with a sleeve, whose material is different from the jointed members, is proposed and applied to a concrete structure. The results using the proposed formula are compared with those of a formula of simple summation and those of a commercial finite element package. It may be concluded that the proposed formula can be used appropriately to calculate the stiffness of the jointed members with a sleeve.

Keywords : Bolted Joint, Sleeve, Member Stiffness, Finite Element Method

1. 서 론

볼트-너트 체결법(bolt-nut joint method)은 기계 부품이나 조선, 항공 및 토목 구조물의 체결에 널리 사용되고 있다. 특히 토목 분야에서 이 방법은 철근 콘크

리트로 된 댐이나 교량에 기계나 구조물을 설치할 때 주로 사용되고 있다. 이 경우 슬리브(sleeve)는 볼트 체결에 필요한 구멍을 만들기 위하여 사용된다.

본 연구에서 관심을 가지고 있는 판재강성¹⁾(member stiffness)은 하중을 받고 있는 판재의 분리 문제, 볼

* 정희원 · 경북대학교 기계공학부, 교수
** 정희원 · 구미1대학 기계설계과, 조교수
*** 경북대학교 대학원, 박사과정
**** 현대중공업 플랜트 산기설계부, 차장

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

트 강도의 계산 등 볼트 체결부의 해석 및 볼트의 피로 수명 예측에 필요한 중요한 요소이다. 슬리브 없이 볼트 체결된 일반적인 기계 구조물에 대한 판재강성의 경우 많은 연구가 진행되어 왔으며^{1)~4)} 해석 및 설계에 사용되는 신뢰할 수 있는 이론이 보고되어 있다.⁵⁾ 그러나 토목 분야에서 일반적으로 사용되는 슬리브가 있는 체결부에 대한 연구는 미진한 편이다.

본 연구에서는 슬리브가 있는 판재를 볼트체결할 때의 판재강성에 대한 수식을 유도하였다. 유도된 공식의 타당성을 검증하기 위하여 콘크리트 구조물의 판재강성 계산에 제안한 공식을 적용하였다. 슬리브가 플라스틱 또는 강으로 되어 있는 두 가지 경우를 고려하였다. 해석된 결과는 (1) 기존의 슬리브 없이 유도된 식⁵⁾의 결과, (2) 상용 유한요소 코드인 NISA II/DISPLAY III⁶⁾의 결과 및 (3) 강성의 단순합산법의 결과와 비교하였다. 유한요소 해석에서는 체결부의 영향이 현저히 감소되는 영역까지 체결부를 모델링하였다. 이러한 비교를 통하여 본 연구에서 유도된 공식이 슬리브가 있는 판재의 강성을 정확히 예측하고 있음을 밝혔으며 단순합산법을 슬리브가 있는 경우에 적용하면 오차가 커질 수 있음을 보였다. 따라서 본 연구에서 제안한 공식은 슬리브가 있는 체결부의 판재강성 계산에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

2. 볼트-너트 체결된 판재의 강성 계산식

2.1 슬리브가 없는 경우

많은 연구자들은 슬리브가 없는 경우 볼트-너트로 체결된 판재의 강성에 대한 신뢰할 수 있는 공식을 유도하였다. 본 논문의 내용 전개를 위하여 이를 간략하게 소개한다.

핀 체결(pin joint)과 달리 볼트 체결에서는 초하중(initial load)을 가하게 되며 이에 따라 판재 안에는 압력이 작용하게 된다. Ito⁷⁾는 볼트 체결된 판재 안의 압력분포를 결정하기 위하여 초음파(ultrasonic wave)를 사용하여 관찰하였으며 압력이 체결부에서 멀어짐에 따라 감소함을 관찰하였다. 또한 그는 판재의 강성의 계산을 위하여 압력콘(pressure cone)의 각도(Fig. 1의 α 를 의미함)가 변하는 것을 고려한 Rotsher의 압력

콘법(pressure cone method)을 사용하였다. 그러나 이 방법은 너무 복잡하여 실제로 적용하기 어려우므로 압력콘의 각도를 고정된 단순화된 접근방식을 사용하게 되었다. Mishke⁵⁾는 압력콘의 각도로 45°를 사용할 것을 제안하였으나 Little⁸⁾과 Osgood⁹⁾는 압력콘의 각도가 $25^\circ \leq \alpha \leq 33^\circ$ 가 타당함을 밝혔다. 또한 Shigley와 Mischke⁵⁾는 충분히 뚜꺼운 판재에 대하여서는 압력콘의 각도로 30°가 적당함을 밝히고 판재 강성공식을 유도하였다.

Fig. 1은 슬리브가 없는 볼트-너트 체결된 판재를 나타내었고 Fig. 2는 슬리브가 있는 경우 초하중에 의한 체결부 주위의 압력 분포를 나타내었다. Fig. 2에서

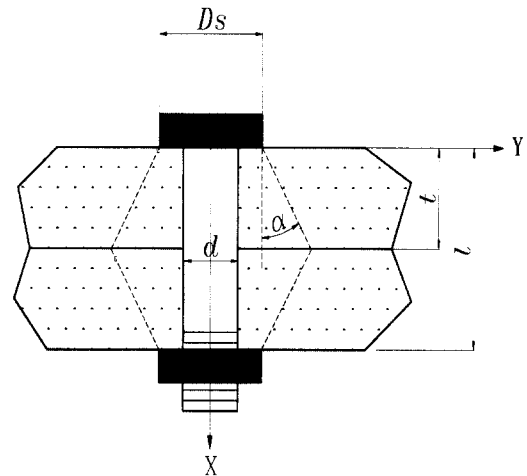


Fig. 1 슬리브가 없는 경우 볼트-너트 결합된 판재

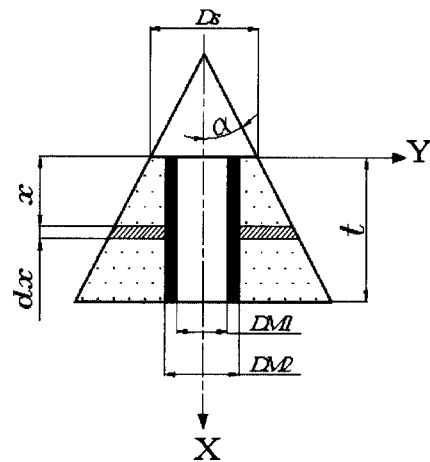


Fig. 2 슬리브가 있는 경우 초하중에 의한 체결부 주위의 압력분포

(1) "member"는 부재라고 하는 것이 타당하나 의미의 혼동을 줄 우려가 있어 판재라고 하였다.

초하중 P 가 작용할 경우 판재의 미소두께 dx 의 변형은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \int \frac{P}{EA} dx \quad (1)$$

그리고 dx 를 포함하는 요소의 단면적은 식(2)와 같다.

$$A = \pi(r_o^2 - r_i^2) \\ = \pi \left(x \tan \alpha + \frac{Ds+d}{2} \right) \left(x \tan \alpha + \frac{Ds-d}{2} \right) \quad (2)$$

여기에서 r_o 는 바깥 반지름($= x \tan \alpha + Ds/2$)이고 r_i 는 안쪽 반지름($= d/2$)이다. 또한 Ds 는 와셔의 직경, d 는 볼트의 직경, t 는 판재의 두께이다.

식(2)를 식(1)에 대입하여 적분하면 식(3)과 같다.

$$\delta = \frac{P}{\pi E d \tan \alpha} \ln \frac{(2t \tan \alpha + Ds - d)(Ds + d)}{(2t \tan \alpha + Ds + d)(Ds - d)} \quad (3)$$

식(3)으로부터 (4)와 같은 판재 강성에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{\pi E d \tan \alpha}{\ln \frac{(2t \tan \alpha + Ds - d)(Ds + d)}{(2t \tan \alpha + Ds + d)(Ds - d)}} \quad (4)$$

같은 두께의 판재가 서로 체결되어 있는 경우 강성의 합은 $k_m = k/2$ 가 되고 $l = 2t$, 와셔직경 $Ds = 1.5d$, 압력콘의 각 $\alpha = 30^\circ$ 를 대입하면 판재 강성 k_m 은 식(5)와 같이 된다.

$$k_m = \frac{0.577 \pi E d}{2 \ln \left(5 \frac{0.577 l + 0.5 d}{0.577 l + 2.5 d} \right)} \quad (5)$$

2.2 슬리브가 있는 경우

Fig. 3은 슬리브가 있는 볼트-너트 체결부를 나타낸다. 슬리브가 있는 볼트-너트 체결된 판재의 강성에 대한 공식을 유도하기 위하여 다음과 같은 판별 파라미터(discriminant parameter, D_c)를 도입한다. 판별 파라미터는 공식 유도 과정에서 이 값이 양수, 음수

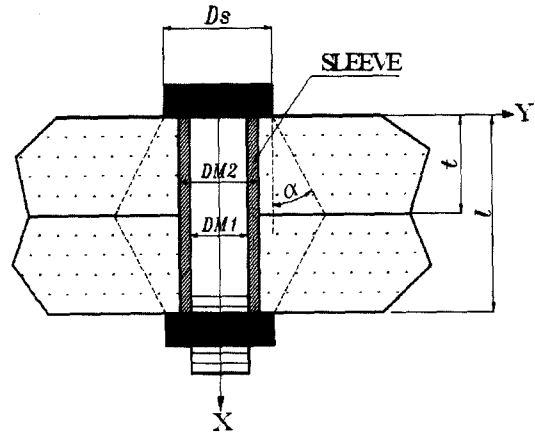


Fig. 3 슬리브가 있는 경우 볼트-너트 체결된 판재

또는 영이 됨에 따라 해를 구하는 절차가 달라지므로 이를 구분하기 위하여 도입된 것으로 식(6)과 같다.

$$D_c = DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2) \times \left(\frac{E'}{E} \right) \quad (6)$$

여기에서 E 는 판재의 탄성계수, E' 는 슬리브의 탄성계수를 나타낸다. 식(6)의 판별 파라미터는 체결부의 형상과 판재와 슬리브의 탄성계수 차이로 나타내어진다. 즉, 이 값은 판재의 탄성계수와 슬리브의 탄성계수와의 비율과 슬리브가 차지하는 면적에 따라 달라지게 된다.

2.2.1 판별 파라미터가 양수인 경우의 판재강성

2.1절과 같은 방법으로 슬리브가 있는 경우, 초하중 P 에 대한 미소 두께 dx 의 변형량 δ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{P}{\pi E} \int_0^t \frac{dx}{(A_1 x + A_2)(A_1 x + A_3) + A_4 \frac{E'}{E}} \quad (7)$$

여기에서 상수 $A_1 \sim A_4$ 는 체결부의 형상을 나타내는 값으로 다음과 같다.

$$A_1 = \tan \alpha \quad (8)$$

$$A_2 = \frac{Ds + DM_2}{2} \quad (9)$$

$$A_3 = \frac{Ds - DM_2}{2} \quad (10)$$

$$A_4 = \frac{DM_2^2 - DM_1^2}{4} \quad (11)$$

변형량 δ 를 계산하기 위하여 적용가능한 적분공식을 적분표에서 찾으면 다음과 같다.¹⁰⁾

$$\int \frac{dx}{uv} = \frac{1}{w} \ln \frac{v}{u} \quad (12)$$

$$u = B_2 + A_1 x \quad (13)$$

$$v = B_3 + A_1 x \quad (14)$$

$$w = A_1 B_2 - A_1 B_3 \quad (15)$$

식(7)을 적분공식이 적용가능한 형태로 바꾸면 다음과 같다.

$$\delta = \frac{P}{\pi E} \int_0^l \frac{dx}{(xA_1 + B_2)(xA_1 + B_3)} \quad (16)$$

식(7)을 식(16)을 비교하여 B_2, B_3 를 A_2, A_3, A_4 로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_1^2 x^2 + A_1(B_2 + B_3)x + B_2 B_3 \\ = A_1^2 x^2 + A_1(A_2 + A_3)x + A_2 A_3 + A_4 \frac{E'}{E} \end{aligned}$$

$$B_2 + B_3 = A_2 + A_3 \quad (17)$$

$$B_2 B_3 = A_2 A_3 + A_4 \frac{E'}{E} \quad (18)$$

식(18)에 식(17)을 대입하여 정리하면 식(19)와 같다.

$$B_2^2 - (A_2 + A_3)B_2 + A_2 A_3 + A_4 \frac{E'}{E} = 0 \quad (19)$$

식(19)에서 B_2 를 구하면 식(20)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{A_2 + A_3 \pm \sqrt{(A_2 + A_3)^2 - 4A_2 A_3 - 4A_4 \frac{E'}{E}}}{2} \\ &= \frac{A_2 + A_3 \pm \sqrt{(A_2 - A_3)^2 - 4A_4 \frac{E'}{E}}}{2} \end{aligned} \quad (20)$$

식(9), (10), (11)를 식(20)에 대입하면 B_2 를 구할 수 있고 식(17)로부터 B_3 를 구할 수 있다. B_2 와 B_3 는 다음과 같다.

$$B_2 = \frac{Ds + \sqrt{DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}}}{2} \quad (21)$$

$$B_3 = \frac{Ds - \sqrt{DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}}}{2} \quad (22)$$

위에서 구한 B_2, B_3 를 식(13)~(15)에 대입하면 u, v, w 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u = B_2 + A_1 x &= \left[\frac{Ds + \sqrt{DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}}}{2} \right] \\ &+ [\tan \alpha] x \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} v = B_3 + A_1 x &= \left[\frac{Ds - \sqrt{DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}}}{2} \right] \\ &+ [\tan \alpha] x \end{aligned} \quad (24)$$

$$w = A_1(B_2 - B_3) = \tan \alpha \sqrt{DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}} \quad (25)$$

여기에서 제곱근 안의 값 $DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}$ 는 앞에서 도입한 판별 파라미터 D_c 가 된다. 판별 파라미터가 음수인 경우에는 제곱근 안의 값이 음수가 되므로 식(12)와 같은 적분공식을 적용할 수 없게 된다. 여기에서는 판별 파라미터가 양수인 경우에 대한 식을 구하고 판별 파라미터가 음수인 경우는 다음 절에서 다룬다. 판별 파라미터를 사용하여 식(23)~(25)을 간략히 나타내어 식(12)에 대입하면 변형량 δ 는 식(26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{P}{\pi E} \frac{1}{\sqrt{D_C} \tan \alpha} \ln \frac{Ds^2 - D_C + 2 \tan \alpha (Ds + \sqrt{D_C})t}{Ds^2 - D_C + 2 \tan \alpha (Ds - \sqrt{D_C})t} \quad (26)$$

식(26)으로부터 판재 강성 $k_{mc}^{(+)}$ 를 구하면 식(27)과 같이 표현된다.

$$k_{mc}^{(+)} = \frac{P}{2\delta} = \frac{\pi E \sqrt{D_C} \tan \alpha}{2 \ln Y} \quad (27)$$

여기에서 하첨자 c 는 슬리브가 있는 경우를 의미하고 상첨자는 양의 판별 파라미터를 나타내고 Y 는 다음과 같다.

$$Y = \frac{Ds^2 - D_C + 2 \tan \alpha (Ds + \sqrt{D_C})t}{Ds^2 - D_C + 2 \tan \alpha (Ds - \sqrt{D_C})t}$$

2.2.2 판별 파라미터가 음수인 경우의 판재강성

앞에서 언급하였듯이 판별 파라미터가 음수일 경우는 식(12)와는 다른 형태의 적분공식을 사용하여야 한다. 판별 파라미터가 음수인 경우에는 다음과 같은 형태의 적분공식을 사용하였다.¹⁰⁾

$$\int \frac{1}{a + bx^2} dx = \frac{1}{\sqrt{ab}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} x \quad (28)$$

식(7)의 적분부분만을 다시 적어 보면 다음과 같다.

$$\int_0^t \frac{dx}{(A_1x + A_2)(A_1x + A_3) + A_4 \frac{E'}{E}} \quad (29)$$

식(29)를 식(28)과 같은 형태로 나타내기 위하여 변수 X 를 $Y = X + (A_2 + A_3)/(2 \times A_1)$ 로 치환하여 나타내면 식(30)과 같다.

$$\int \frac{\frac{A_2 + A_3}{2A_1} + t}{\frac{A_2 + A_3}{2A_1} A_1^2 Y^2 + A_2 A_3 + A_4 \frac{E'}{E} - \frac{(A_2 + A_3)^2}{4}} dY \quad (30)$$

식(30)과 식(28)을 비교하면 다음의 관계식을 얻을

수 있다.

$$a = A_2 A_3 + A_4 \frac{E'}{E} - \frac{(A_2 + A_3)^2}{4} \quad (31)$$

$$b = A_1^2 \quad (32)$$

여기에서 상수 $A_1 \sim A_4$ 들은 식(8)~(11)에 나타낸 바와 같이 체결부의 형상을 나타낸다.

식(31), 식(32)의 상수값 a , b 와 적분공식(28)을 이용하면 식(30)의 적분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{ab} = A_1 \sqrt{\frac{Ds^2 - DM_2^2}{4} + \frac{DM_2^2 - DM_1^2}{4} \frac{E'}{E} - \frac{Ds^2}{4}} = \frac{\tan \alpha}{2} \sqrt{-DM_2^2 + (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}} \quad (33)$$

$$\left[\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} x \right]_{\frac{A_2 + A_3}{2A_1}}^{\frac{A_2 + A_3}{2A_1} + t} = \tan^{-1} \left(\frac{2 \tan \alpha}{\sqrt{-DM_2^2 + (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}}} \left(\frac{Ds}{2 \tan \alpha} + t \right) \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2 \tan \alpha}{\sqrt{-DM_2^2 + (DM_2^2 - DM_1^2) \frac{E'}{E}}} \left(\frac{Ds}{2 \tan \alpha} \right) \right) \quad (34)$$

제곱근 안의 값은 판별 파라미터, $Dc = DM_2^2 - (DM_2^2 - DM_1^2)E'/E$ 가 음수이므로 양수가 되며 이를 $\sqrt{|Dc|}$ 로 나타내면 식(33) 및 (34)는 각각 다음과 같이 된다.

$$\sqrt{ab} = \frac{\tan \alpha}{2} \sqrt{|Dc|} \quad (35)$$

$$\tan^{-1} \sqrt{\frac{b}{a}} x = \tan^{-1} \left(\frac{Ds + 2t \tan \alpha}{\sqrt{|Dc|}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{Ds}{\sqrt{|Dc|}} \right) \quad (36)$$

따라서 판별 파라미터가 음수인 경우의 변형량 δ 의 적분항은 다음과 같이 된다.

$$\int_0^t \frac{dx}{(A_1x + A_2)(A_1x + A_3) + A_4 \frac{E'}{E}}$$

$$= \frac{2}{\tan \alpha \sqrt{|D_d|}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D_s + 2t \tan \alpha}{\sqrt{|D_d|}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{D_s}{\sqrt{|D_d|}} \right) \right] \quad (37)$$

최종적으로 변형량 δ 및 강성 $k_{mc}^{(-)}$ 는 각각 다음과 같이 구하여 진다.

$$\delta = \frac{P}{\pi E} \frac{2}{\sqrt{|D_d|} \tan \alpha} \left[\tan^{-1} \left(\frac{D_s + 2t \tan \alpha}{\sqrt{|D_d|}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{D_s}{\sqrt{|D_d|}} \right) \right] \quad (38)$$

$$k_{mc}^{(-)} = \frac{P}{2\delta}$$

$$= \frac{\pi E \tan \alpha \sqrt{|D_d|}}{4 \left[\tan^{-1} \left(\frac{D_s + 2t \tan \alpha}{\sqrt{|D_d|}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{D_s}{\sqrt{|D_d|}} \right) \right]} \quad (39)$$

식(27)과 식(39)는 슬리브가 있는 경우 볼트 체결된 판재강성을 계산하는 공식이다. 이를 적용하기 위해서는 먼저 체결부의 형상과 판재 및 슬리브의 형상에 따라 정의된 판별 파라미터 D_c 를 계산하여 이 값이 양수인 경우에는 식(27)을 사용하고, 음수인 경우에는 식(39)를 사용하면 된다.

2.2.3 판별 파라미터가 영인 경우의 판재강성

판별 파라미터가 영인 경우 식(7)은 다음과 같이 간략화된다.

$$\delta = \frac{P}{\pi E} \int_0^t \frac{4dx}{(2 \tan \alpha x + D_s)^2} \quad (40)$$

식(40)은 간단히 적분이 되며, 판재의 강성 $k_{mc}^{(0)}$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$k_{mc}^{(0)} = \frac{P}{2\delta} = \frac{-\pi E}{\tan \alpha} \left(\frac{1}{2 \tan \alpha + D_s} - \frac{1}{D_s} \right) \quad (41)$$

2.3 슬리브가 있는 경우 판재강성의 단순합산식

슬리브가 있는 경우의 판재강성을 구하기 위하여 다음과 같이 슬리브와 판재의 강성을 단순히 합하는 오류를 범할 수 있다.

$$k = k_{sleeve} + k_{cone} \quad (42)$$

여기에서 $k_{sleeve} = L/A_s E_s$ (A_s 는 슬리브의 단면적, E_s 는 슬리브의 탄성계수), k_{cone} 은 식(5) ($d = DM_2$)와 같다. 식(42)은 비선형성을 고려치 않은 것으로 결과에서도 논의하겠지만 상당한 오차를 내게 된다.

3. 콘크리트 구조에의 적용

본 연구에서 유도한 슬리브가 있는 경우 판재강성 공식을 콘크리트 구조물에 적용하여 공식의 타당함과 유용성을 보이고자 한다. 두 가지 예제를 고찰하였는데 첫 번째 예제는 슬리브가 없는 경우로 본 연구에서 유도한 공식이 적절하다면 슬리브가 없는 경우에도 잘 적용되어야 하므로 이를 보인 것이다. 두 번째 예제는 슬리브가 있는 경우로 다른 방법으로 구한 판재강성과 비교하여 본 연구에서 제안한 공식의 유용성을 보이고자 한다. 여기에서 다른 방법이란 (1) 기존의 슬리브 없이 유도된 공식(2.1 절의 식(5)), (2) 상용 유한요소 코드인 NISA II/DISPLAY III⁶⁾ 및 (3) 단순합산식(2.3 절의 식(42))을 의미한다. (1)번 (3)번 방법은 앞에서 언급하였으므로 유한요소 해석에 대하여 언급한다. 고려한 문제의 치수는 $D_s = 30\text{mm}$, $DM_1 = 20\text{mm}$, $DM_2 = 22\text{mm}$, $t = 50\text{mm}$, $l = 100\text{mm}$ 이고 입력콘의 각도는 $\alpha = 30^\circ$ 를 사용하였다(Fig. 3 참조). 또한 Table 1에 판재 및 슬리브의 물성치를 나타내었다.

슬리브가 있는 볼트 체결부의 해석을 위하여 DISPLAY III를 사용하여 볼트체결부를 모델링하고 NISA II⁶⁾를 사용하여 해석하였다. 볼트 체결부를 축대칭 요소(axisym-

Table 1 해석에 사용한 판재 및 슬리브의 물성치

| | 판재 | | 슬리브 | |
|---------|--------|---------|---------|-------|
| | 콘크리트 | 강 | 강 | 플라스틱 |
| E (MPa) | 21000. | 206000. | 206000. | 1100. |
| ν | 0.15 | 0.3 | 0.3 | 0.45 |

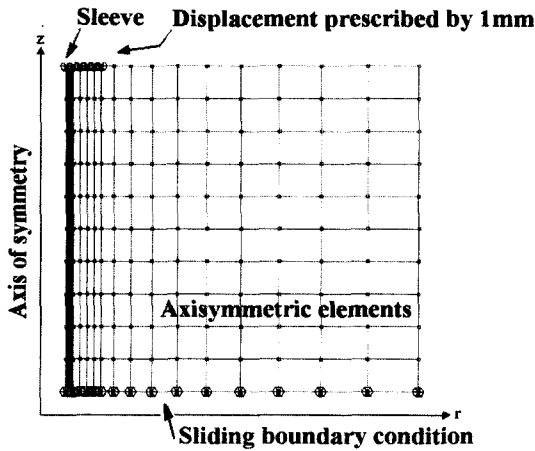


Fig. 4 슬리브가 있는 볼트-너트 체결부 주위의 압력분포와 판재강성 계산을 위한 유한요소모델

metric element)를 사용하여 모델링하였으며 유한요소 모델의 크기는 몇 번의 해석을 통하여 볼트 체결의 영향이 상당히 감소한 영역까지를 포함하였다. 이렇게 결정된 요소의 반경 방향 길이는 50mm로서 볼트 지름의 약 5배가 되는 영역이다. 사용한 요소의 개수는 150개이고 Fig. 4에 유한요소 모델을 나타내었다. 그림에서 슬리브 부분은 검게 표시하였다. 요소 개수에 따른 수렴성을 보기 위하여 요소의 개수를 두배로 늘린 300개에 대한 해석도 수행하였다. 경계조건으로 와서면 부분의 변위를 아래 방향으로 1mm를 주었으며, 반대쪽 면의 절점에 고정경계조건을 주어 실제의 볼트가 체결될 경우의 조건과 비슷하도록 하였다. 이렇게 만든 유한요소 모델에서 판재 강성은 와서면 부분의 절점 반력을 합하여 이것과 경계조건으로 가한 변위와의 비로 계산하였다.

3.1 슬리브가 없는 경우

본 연구에서 슬리브가 있는 경우 볼트 체결부의 판재강성에 대하여 유도된 공식(27), (39)은 슬리브가 없는 경우를 포함하는 일반적인 식이다. 즉 슬리브가 없는 경우를 계산하면 기존의 슬리브가 없는 경우에 유도된 공식(5)과 같은 결과를 내야 한다. 이는 본 연구에서 유도한 공식에 슬리브의 물성에 판재의 물성을 사용하여 확인할 수 있다. Table 2에 슬리브 없이 체결된 판재의 강성을 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 본

Table 2 슬리브가 없는 경우의 판재강성(단위 : N/mm)

| 구분 | 본연구 제안식 (27) | 기존의 슬리브 없는 경우의 식(5) | 단순 합산식 (42) | 유한요소법 (요소수 150개) |
|-------|----------------|---------------------|-------------|------------------|
| | $k_{mc}^{(+)}$ | k_m | k_s | |
| 판재 강성 | 0.3326E+6 | 0.3326E+6 | 0.3221E+06 | 0.3370E+6 |

연구에서 제안한 공식은 슬리브가 없는 경우 유도된 식과 완전히 일치하는 결과를 내고 있다. 이로부터 제안한 공식의 유도 과정이 타당함을 알 수 있다. 단순합산식의 경우에는 약 3.2% 정도의 오차가 있다. 유한요소 해석의 결과를 보면 k_{mc} 와의 오차가 1.3%로 유사한 값을 가진다. 요소의 개수를 늘리게 되면 오차는 더 줄어들게 될 것이며, 다음 절에서 논의한다.

3.2 슬리브가 있는 경우

슬리브가 있는 경우의 판재강성을 본 연구에서 제안한 식의 결과와 다른 방법으로 계산한 결과를 비교함으로써 제안한 식의 유용성을 보이고자 한다. 판별 파라미터가 양수인 경우와 음수인 경우 두가지를 고려하였다. 예제로 고려하고 있는 체결부의 형상에 대하여 슬리브의 재료가 플라스틱인 경우 양수가 되고 강인 경우 음수가 되었다.

3.2.1 플라스틱 슬리브의 경우 : 양의 판별 파라미터

플라스틱 슬리브를 사용하는 경우의 판재강성을 Table 3에 나타내었다. 유한요소 해석 결과와 비교하면 요소수를 150개를 사용한 경우 오차가 약 2.0%로 본 연구의 제안식과 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다. 여기서 요소 개수를 2배인 300개로 늘리면 판재강성이 0.2991E+5으로 되어 $k_{mc}^{(+)}$ 값에 가까워지게 된다. 단순합산식의 경우 약 0.2% 정도의 오차가 있다

Fig. 5에는 볼트 체결부 주위의 압력 분포를 나타내고 있다. 본 연구에서 사용한 유한요소 모델이 볼트 체결부의 영향이 거의 없는 부분까지 포함하고 있음을 알 수 있으며 압력콘의 각도를 30°로 가정하는 것이 큰 무리가 없음을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 볼트 체결부 주위의 응력집중 현상을 관찰할 수 있다. 즉 Z방향 응력을 보면 볼트 체결부 주위에서는 -1494MPa이고 체결부에서 상당히 떨어진 부분은 21MPa이었다.

Table 3 플라스틱 슬리브를 사용하는 경우의 판재강성 (단위 : N/mm)

| 구분 | 본연구 제안식(27) | 단순합산식(42) | 유한요소법 (요소수 150개) |
|------|----------------|------------|---------------------|
| | $k_{mc}^{(+)}$ | k_s | |
| 판재강성 | 0.3095E+6 | 0.3089E+06 | 0.3157E+6 |

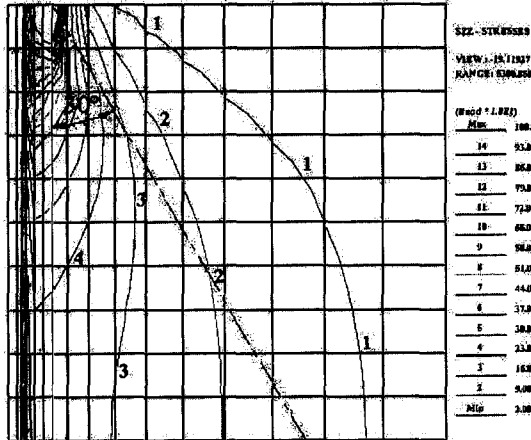


Fig. 5 슬리브가 있는 경우 볼트-너트 체결부 주위의 압력분포에 대한 유한요소 해석 결과

3.2.2 강 슬리브의 경우 : 음의 판별 파라미터

강 슬리브를 사용하는 경우의 판재 강성을 Table 4에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 단순합산식의 경우에는 약 13% 정도의 오차가 있다. 앞의 플라스틱 슬리브를 사용한 경우와 같이 고려해 보면 단순합산식은 슬리브의 재질에 따라 오차가 달리 나타나게 된다.

유한요소 해석 결과와 비교하면 요소수를 150개를 사용한 경우 오차가 약 1.5%로 본 연구의 제안식과 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다. 요소의 개수를 2배인 300개로 늘리면 강성은 0.4886E+6으로 약간 오차가 늘어나게 된다.

Table 4 강 슬리브를 사용하는 경우의 판재강성(단위 : N/mm)

| 구분 | 본연구 제안식(39) | 단순합산식(42) | 유한요소법 (요소수 150개) |
|------|----------------|------------|---------------------|
| | $k_{mc}^{(-)}$ | k_s | |
| 판재강성 | 0.5105E+6 | 0.4441E+06 | 0.5029E+6 |

4. 결 론

본 연구에서는 슬리브가 있는 볼트-너트 체결부의 판재 강성에 대한 계산 공식을 제안하였다. 판재와 슬리브의 강성 및 체결부의 형상에 따라 정의되는 판별 파라미터를 도입하여 판별 파라미터의 부호에 따라 공식을 유도하였다. 콘크리트 구조물에 슬리브가 없는 경우와 있는 경우에 대하여 단순합산식, 유한요소법의 결과와 비교하여 제안된 공식의 타당성과 유용성을 밝혔다. 단순합산식을 슬리브가 있는 경우에 사용하면 큰 오차가 있을 수 있으므로 주의가 요망된다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 공식은 슬리브가 있는 체결부의 판재강성의 계산, 체결부 설계 및 볼트의 피로수명 예측에 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 김진곤, 박성수, 김윤여, 최석환, 김병권, "볼트결합부가 있는 구조물의 유한요소 모델링 및 실험적 검증", 대한기계학회논문집 A권, 제20권 제6호, 1996, pp. 1854~1861
- 백성남, 지태한, 박영필, "체결력에 따른 볼트결합부의 동적 파라미터 해석", 대한기계학회논문집 A권, 제20권 제1호, 1996, pp.53~67
- 박종필 외, "체결력의 변화에 따른 볼트결합부의 동적모델링에 관한 연구" 가톨릭상지전문대학논문집 제27집, 1997, pp.195~209
- 강석용, 임장근, "접촉 요소에 의한 기계 부품의 유한요소 해석", 대학기계학회논문집 A권, 제 22권 10호, 1998, pp.1894~1901
- J. E. Shigley, C. R. Mischke, *Mechanical Engineering Design*, Mcgraw-Hill, 1995, p.779
- NISA II user's Manual, Version 7.0
- Y. Ito, J. Toyoda, and S. Nagata, "Interface Pressure Distribution in a Bolt Flange Assembly", ASME paper no. 77-WA/DE-11, 1977
- R. E. Little, "Bolted joint: How much give?", *Machine Design*, No. 9, 1967
- C. C. Osgood, "Saving weight on bolted joint", *Machine Design*, Oct.25, 1979
- W. H. Beyer, *Standard Mathematical Tables*, CRC Press, 1984, p.618