



가로리브와 U리브 용접부의 피로강도 향상을 위한 응력완화홀

정경섭¹ · 남승훈² · 양건봉³ · 김경남^{4*}

¹교수, 충북대학교, 토목공학부, ²공학석사, 충북대학교, 구조시스템공학과,
³박사과정, 충북대학교, 토목시스템공학과, ⁴공학박사, 충북대학교, 건설기술연구소

Relief Hole for Improvement of Fatigue Strength in Welded Intersections of Transverse and Longitudinal Ribs in Orthotropic Deck

Jung, Kyoung Sup¹, Nam, Seung Hoon², Yang, Keon Bong³, Kim, Kyoung Nam^{4*}

¹Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea
²Master of Engineering, Department of Structural Systems Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea
³Graduate Student, Department of Structural Systems Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea
⁴Ph.D. of Engineering, Institute of Construction Technology, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea

Abstract - On going researches which are being made on the welded joints at the intersections of closed ribs such as U-ribs with floor-beams in ortho-tropic steel decks still have been used the shape of scallops with or with not diaphragm inside. Stress Relief Hole(SRH) being presented in this study was investigated in order to reduce the fatigue damage in the intersections of U-rib with floor-beam. Finally, it is verified that circular SRHs sufficiently relieve the concentration stress at the intersections of U-rib with floor-beam and shows that SRH can be offer one of the methods that can prevent the fatigue damage in these structural details.

Keywords - Stress relief hole, Orthotropic deck, U-rib, Scallop, Weld, Fatigue

1. 서론

최근 경간이 길어지거나 상부구조의 하중을 줄이기 위하여 강바닥판이 적용될 때 바닥강판의 보강은 필수적이고 이러한 보강에는 가로 및 세로리브가 적용된다. 특히 이들 교차부에 발생하는 응력집중이나 국부변형에 의한 피로균열 등의 문제점 해결을 위해 여러 가지 형상의 스킨립이 사용되고는 있지만^{[1],[2],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9]}, 원천적인 방안이 되지 못하여 세로리브에 적용되는 U-리브의 두께가 6mm에서 8mm로 두꺼워지고 바닥강판의 두께도 12mm에서 14mm로 두껍게 적용되고 있는 상태이다. 최근 일본과 미국 등에서는

계속적으로 발생하는 바닥강판의 피로균열을 원천적으로 발생억제하기 위해 16mm로 두껍게 정하고 있을 뿐 아니라 우리나라에서도 이를 따르려고 하는 상황이다.

기계나 항공기 등의 분야에서는 구조부재에 발생하는 응력을 완화 또는 제거 등의 목적으로 응력집중 부재 근방에 구멍을 뚫어 대응한 연구에 대하여는 참고문헌[6]에서 조사 언급한 바와 같이, 현재는 통상적으로 적용되고 있으나, 이미 발생되어 진전되고 있는 균열 끝에 임시로 스톱홀을 두는 예를 제외하고는 토목 등 건설 구조물의 구조부재에서는 응력집중 해소를 위해 이와 같은 응력을 완화하기 위해 홀에 의한 방법 대신 피로 균열 발생을 억제하는 원천적 보강이나 스킨립 등을 이용하여 왔다.

앞서의 연구^{[6],[7]}에 제시된 바와 같이 응력집중부 근방에 배치된 응력완화홀(이하 SRH라 칭함)이 집중되는 응력을 분산시키는 데에 탁월한 효과가 있음을 확인 한 바 있으므로, 본 연구에서는 SRH가 기존 강바닥판교의 U-리브와 교차하는 가로리브에 일반적으로 배치시켜 왔던 스킨립의 역할을 충분히 대신할 수 있는지 여부를 연구 검토하여 그 적용

Note.-Discussion open until April 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 14, 2014; revised June 24, 2014; approved on August 2, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-264-2408 Fax. +82-43-264-2408

E-mail. kkn74@cbnu.ac.kr

가능성을 확인하고, 적용되는 원형 SRH의 위치 및 크기에 따른 영향을 분석하여 추후 보다 경쟁력 있는 강바닥판 교량 제작 및 공용 중 유지관리에 대응할 수 있는 SRH 개발의 이론적 근거를 마련하고자 하였다.

2. 강바닥판의 세로-가로리브 교차부

강바닥판은 만들고자 하는 교량 상부구조의 중량감소를 위해 고안되고 적용된다. 이 때 강재의 능력 제고를 위해 피할 수 없이 나타나는 좌굴문제 해결을 위해 바닥강판에 가로 및 세로 리브의 적용이 불가피하고, 이들 리브 교차부에는 피로문제가 발생된다.

2.1 검토 대상 구조물의 제원 및 재하 하중

일반적으로 세로-가로리브에는 개단면 형식인 역T형 플

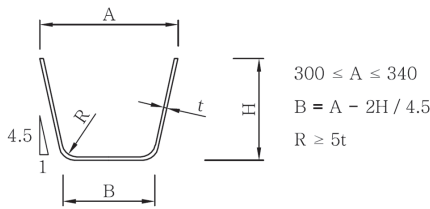


Fig. 1. Typical shape of closed longitudinal rib section

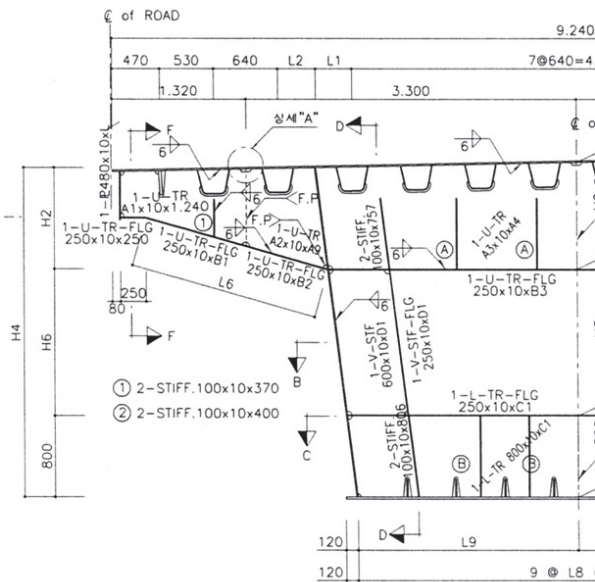


Fig. 2. Typical section of ortho-tropic steel box girder

레이트 거더 형식이 사용되지만, 최근 강성 및 외부 힘에 대한 지지 및 분산의 효과가 개방형보다 큰 폐단면 형식인 U-리브가 많이 사용되고 있다. 국내에서 생산되는 대표적인 U-리브의 표준치수는 Fig. 1과 같으며, 본 연구에 이용된 대상 강바닥판 교량의 대표적인 단면의 일부를 Fig. 2에 나타내었다. 교량의 개략적 제원은 경간 구성은 95+110+95 = 300m이며, 교폭은 9.24m이고 높이는 3.3~6.3m로 구성되는 2차선 1등급교이다^[8].

국내 도로교 설계기준 허용응력설계법^[1]의 활하중에 대하여는 2.1.3 (1) ④에서 하중 재하시 타이어의 접지면에 대한 정의가 있고, 3.6.2항에 강바닥판 설계에 대한 언급이 있으며, 바닥판 및 가로, 세로리브 교차부 등 응력집중부에 대한 구조검토 시 차량의 접지면 압력을 0.72MPa에 맞추고 있다. 이러한 접지면 압력은 한계상태설계법^[5]의 3.6.1.4 (2)항에서도 똑같이 Fig. 3 및 Table 1과 같이 정해지고 있으나 차륜하중이 우리나라 DB24의 96kN에 비해 작은 미국 AASHTO^{[2],[3]}의 설계트럭 차륜하중 72.5kN이 작용되는 1998년 LRFD 3.6.1.2.5조항에서는 일반 설계에서와 같이 접지면적이 510×250mm로, 접지면 폭 510mm와 압력이 0.862 MPa로 하고 있다. 이후 버전에서는 LRFD계수 활용으로 접지압에 대한 언급이 삭제되면서 하중계수 및 충격 등으로 변화하는 하중에 대응하여 접지면 길이가 변화되도록 규정되고 있어, 국내 도로교 설계기준의 강바닥판 피로 설계의 경우 의문점이 있지만 본 연구에서는 국내 기준에 의거 검토하였다. 사용된 강재는 바닥강판과 U-리브는 SM490을, 가로리브 수직보강재 등 보강재에 대하여는 SM400을 적용하여 검토하였다.

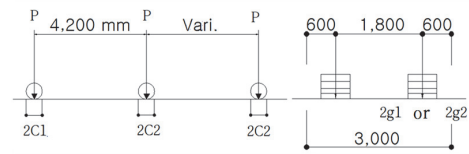


Fig. 3. Calculation of tire contact area of in korean spec

Table 1. Tire contact width and length in korean spec

Classification	Tire Contact Width (mm)		Tire Contact Length (mm)	
	Front (2g1)	Rear (2g2)	Front (2c1)	Rear (2c2)
DB-24	298.7	577.4	115.5	230.9

2.2 서브모델링

구조해석에는 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2009^[10]를 이용하였으며, 모델링에 사용된 요소는 상, 하부 플랜지와 웨브, 다이아프램 등은 Plate 요소, 상부콘크리트는 Solid 요소를 이용하되, 다이아프램 내 지점부 수직보강재, 횡방향 보강재 등과 같이 편심이 고려되지 않는 보강재에 한하여 Beam 요소를 적용하여 모델링을 단순화 하였다. 이들 서로 다른 요소들 연결부에서는 변형일치 조건을 부여하였다.

이러한 방법을 통하여 전체 모델링에 사용된 노드 수는 28,140개이며, 요소 수는 42,504개이다. 이중 Beam요소는 11,038개 Plate 요소는 28,318개이고 Solid 요소는 4,148개로 모델링 되었다. 서브모델링에 의해 모델링의 전체 크기를 줄여가며 4단계로 진행되었으며, 서브모델링 시 각 절점

에 이전 단계에서 발생된 변위를 하중으로 재하하였다. 정밀 해석 결과를 얻기 위해 요소의 크기를 작게 하였는바, Fig. 4와 같이 최종 서브모델링에 사용된 요소 수는 27,009개이다. 이중 Plate 요소는 26,624개, Solid요소는 6,400개로 모델링 되었다.

2.3 하중 재하 위치의 결정

강바닥판에 하중재하 시 하중위치에 따라 U-리브에 발생되는 응력의 크기가 달라진다. 종방향 재하위치는 Fig 4(a)에 나타낸 바와 같이 쉽게 구해지지만 횡방향 재하위치는 참고문헌 [7],[9],[11]외에도 이미 많은 연구에 의해 시험체나 최대 발생 응력의 위치는 밝혀진 상태이다.

참고문헌[9]의 실험 결과는 유리브 중심 위치로부터 약 $\pm 120\text{mm}$ 지점으로 위치하고 있다. 본 연구에서도 연구대상 구조체에 대하여 검토한 바, 적용되는 하중중심의 위치는 이 범위에서 오차수준 5.4%이내에서 가장 큰 발생응력이 확인되고 있으므로^[8], 최종적으로 기준선으로 $\pm 120\text{mm}$ 에 위치시키는 것으로 하였다.

3. 원형 SRH

3.1 SRH 배치 및 표기 방법

스켈럽 대응으로 적용하려고 하는 원형 SRH는 U-리브와 가로리브의 교차부에 놓이게 되며, 이와 같은 SRH는 구조물의 전체적 강성에는 영향이 거의 없는 정도이므로 최종 서브 모델링에 직접 배치하는 것으로 하였다.

기존 기계공학에서 사용되던 릴리프 홀은 경험적으로 응력이 집중되는 부분에 적당한 크기와 적절한 위치에 뚫어 사용되고 있는 상황이므로 이제는 그 근거조차 찾기 힘들게 되었다. 그러나 강바닥판교의 응력집중부에 적용되는 스킨럽 대응을 위한 SRH는 이제 처음 시도되는 것이다. 적용 가능성에 대하여는 이미 이전 연구^[6]에서 검토된 바 있으므로 본 연구에서는 SRH의 배치 위치나 크기 등에 대한 적절한 대응 방법을 찾기 위해 다양한 형태의 모델링을 통하여 그 위치 및 형태를 결정하고자 한다.

원형 SRH는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 U-리브 중심(U-리브의 높이 및 폭의 1/2위치)과 SRH 중심까지의 이격거리 S(space)와 U-리브의 중심에서 수직선에서 시계방향으로 나타낸 각도 A(angle), 마지막으로 SRH의 지름 D(diameter)

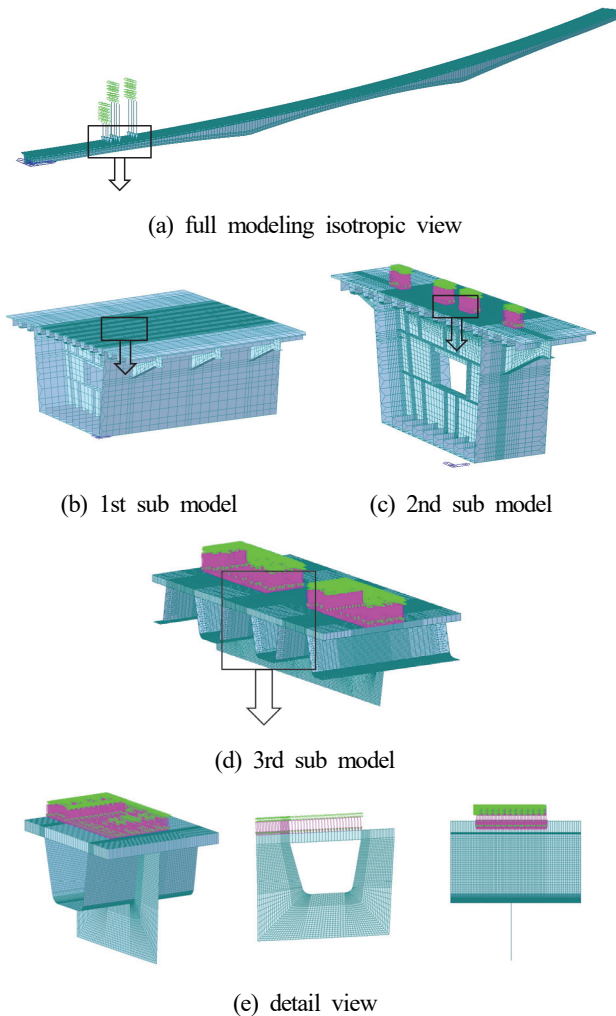


Fig. 4. Shape of modeling and sub-modeling of bridge components

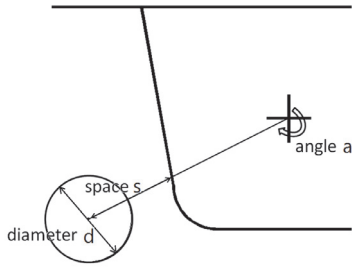


Fig. 5. Data for notation of circular SRH

등 3가지 정보로 위치를 나타내었다. 예를 들어, 이격거리 60mm, U-리브 중심에서의 각도 260°, 그리고 SRH의 지름을 25mm로 했을 때의 표기는 [s60-a260-d25]와 같이 나타내었다.

3.2 전산해석을 위한 요소 크기의 결정

FEM 해석 시 요소의 크기는 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 서브모델링의 요소크기를 정할 때 중요한 고려사항이 된다. 적절한 요소의 크기를 결정하기 위하여, 모델링은 Fig. 6과 같이 측정부위의 Element의 크기를 작게 나누고 요소의 수를 증가 시켜 해가 수렴하는 값을 찾는 방법을 사용하였다. 해석을 통해 응력집중부를 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 선정(굵은 선으로 표시된 요소)한 후, 선택된 특정 요소의 크기를 줄여가며 총 6단계의 모델링을 실시한 결과를 Fig. 8에 정리하였다. 응력집중 효과를 나타낼 수 있는 요소 크기의

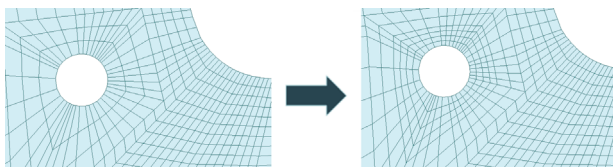


Fig. 6. Modeling example according element size change

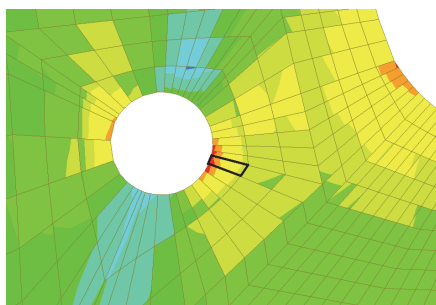


Fig. 7. Selection of stress concentration element

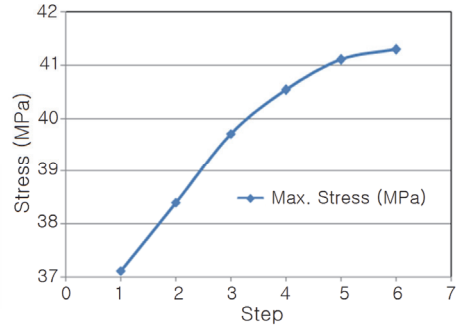


Fig. 8. Steps of modeling to decide element size near stress concentration territory

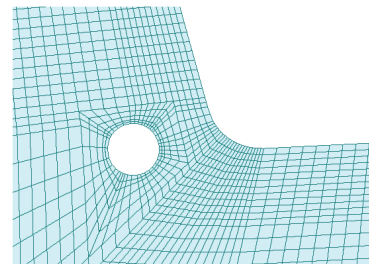


Fig. 9. Considering of element size in modeling

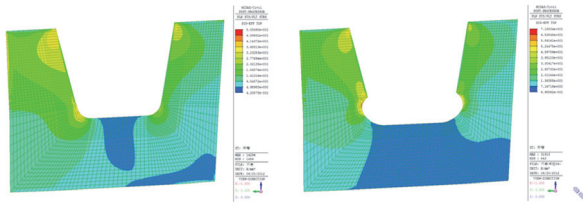
의 변화를 검토한 결과, Fig. 8 과 같이 5번째 모델링의 41.1 MPa에서부터 급격히 수렴하기 시작하는 것으로 나타났다. 요소의 크기는 Fig. 9와 같이 측면에서부터 비율적으로 크기를 줄이며 접근하였으며, 최종적으로 SRH 주변의 요소크기는 한 변의 크기를 4mm 이하로 결정하였다.

4. 분석 및 고찰

4.1 기존의 스켈럽을 이용한 대응 대책 검토

참고문헌[7]과 [9]등에서는 강바닥판의 U리브와 가로보의 교차부 용접 처리 및 스켈럽에 대한 처리방안을 제시하고 있다. 본 연구에서도 참고문헌과 동일한 상태에 대한 적절한 SRH의 크기 및 위치를 제안하고자 한다. 참고로 Fig. 4에 나타낸 바와 같은 인접하중의 외력 조건하에 모델링하여 U-리브와 가로리브가 교차하는 연결부를 전체 용접한 경우와 스켈럽을 적용한 경우에 대한 발생 응력 분포상황을 Fig. 10에 나타내었다.

이들 응력을 비교해 볼 경우 스켈럽 상단부에서 sig-eff 값이 72 MPa로 나타났으며 완전 용접된 형상에서는 U-리브 하단부에서 약 38.5 MPa이 얻어졌다. 일반적으로도



(a) With fully welded (b) With scallop.

Fig. 10. Stress distribution upon the weld details

전체 용접된 연결 상세가 하부 스캘럽이 있는 상세보다 응력만의 비교에서는 유리하다고 말할 수 있지만, U-리브와 가로리브를 접합하는데 있어서 정합을 위한 정밀도 유지 등은 물론 용접으로 인한 예측하지 못한 잔류변형 및 잔류응력 등을 피할 수 없고, 이로 인하여 접합부의 피로등급이 E등급(허용 한계 공칭 응력범위 31MPa)이 되고, 시공성 곤란으로 인한 비용의 증가 등을 고려할 때 불리한 상세가 된다. 반면, 스캘럽을 둔 경우 U-리브와 가로리브 교차부의 접합부를 가로리브의 웹 중심부로 이동시켜 피로등급을 C등급(허용 한계 공칭 응력범위 69MPa)로 향상시켜 이용하고 있다.

일반적으로 적절히 배치된 원형의 구멍은 근방의 공칭응력에 대한 피로등급이 D등급(허용 한계 공칭 응력범위 48 MPa) 정도로 예상되기 때문에^{[2],[3],[4]} 안전을 확보를 위하여 C등급과 원형홀 근방의 응력을 비교하였다. 또한 U-리브 하단응력의 경우 기존 적용된 E등급을 기준으로 비교하였다.

그러나 이들 교차부에 대해 제시되고 있는 스캘럽 등의 구조상세 및 이들에 대한 상세범주의 허용피로응력범위에 맞추어 설계 가설되어 공용 중인 많은 구조상세에서 피로균열이 발생하는 사례가 적지 않아, 발생응력 이외에 잔류응력, 변형 등 여타 다른 요인이 있을 것으로 예상되지만, 기존의 발생응력범위에 대응하는 핫스팟응력^{[2],[3]} 등을 고려해 보았지만 실제 계산된 결과응력과 비교할 때 무리가 있어 참고문헌 [6]~[9] 등에서 택한 접근 방법으로 상세해석의 응력을 이용하여 피로검토를 실시하도록 하였다.

4.2 원형 SRH의 적용

4.2.1 개요

Fig. 10(b)에 나타난 바와 같이 U-리브와 가로리브 교차부 전체를 용접할 경우, U-리브의 하단곡선부분에서 응력이 집중되며, 그로 인하여 피로균열 유발 취약점이 되고 있다. 이 응력집중을 분산시키기 위하여 본 연구에서는 응력집

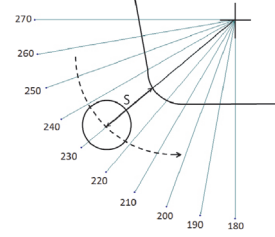


Fig. 11. Scheme of the angular position of SRH

중부 근방에 원형 SRH를 위치시켜 발생하는 U-리브의 하단곡선부의 응력과 완전용접 상태에서의 응력을 비교하여 SRH의 효과를 비교 검토하며, 기존의 비슷한 형태의 연구물이 없고, 형태와 응력의 종류에 따라 그 위치 및 형상에 따라 발생하는 최대 응력의 크기 및 위치가 달라지므로 임의의 기준점을 시작으로 다음과 같이 가장 효율적 위치를 찾아내었다.

SRH를 결정짓는데 가장 먼저 중점을 둔 것은 U-리브 하단곡선부를 중심으로 모델링하여 대략 어느 부분에서 응력 집중과 효과적인 완화가 이루어지는가를 찾는 것이다.

이를 고려하여 응력집중이 생기지 않는 직선접합부는 제외하고 곡선접합부 주변을 중심으로 SRH를 배치하여 모델링을 실시하였다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 먼저 직경 25mm, 이격거리 S는 20, 40, 60mm 3가지에 대하여 검토하고 이들로부터 얻은 데이터를 검토하여 응력집중과 완화에 민감한 각도들을 선정하고 이후, 이들 선정된 각도를 갖는 방향에 원형 SRH를 배치하고자 할 때, 이격거리 및 직경변화 및 순이격거리 등에 따른 발생응력의 변화를 검토하여 원형 SRH의 적용가능성을 분석하였다. 결과 Data는 평면응력(Plane-stress) 상태에서 Element 내 유효응력(Sig-eff) 값을 출력하였으며, 정적인 상태를 나타내는 자중은 충격을 고려한 활하중을 포함하여도 허용응력 이하로 되는 조건이므로 피로에 영향을 주지 않는다고 판단하여 충격을 포함한 차량하중으로 인해 발생된 응력만을 검토하였다.

4.2.2 각도 변화에 따른 SRH의 응력변화

직경 25mm를 갖는 SRH에 대하여 20mm의 이격거리를 둔 상태에서 각도를 252°부터 208°까지 총 14가지 경우로 배치시켜 결과를 검토하였다.

Table 2에는 각도별 응력변화를 나타내는 총 14개 모델들에 대해 ① 스캘럽 또는 SRH 주변의 최대 발생응력과, ② 모든 모델에서 U-리브 하단에 가장 큰 응력이 발생한 1개의 요소를 선별하여 각도 변화에 따른 응력 변화를 확인하고 있

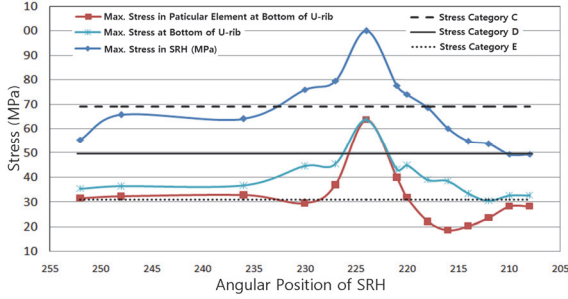


Fig. 12. Stress variation by change of angular position (s20, d25 are constant) of SRH

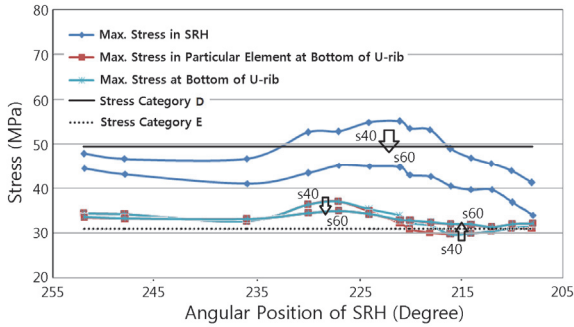


Fig. 13. Stress variation by change of angular position of SRH (d25)

Table 2. Stress at 20mm space, 25mm dia. with angular position

Notation of SRH	Max. Stress in SRH or Scallop (MPa)	at Bottom of U-rib	
		Particular Element Stress (MPa)	Max. Stress (MPa)
All welded	-	38.5	38.5
Scallop	72.0	-	-
1 s20-a252-d25	55.4	31.6	35.4
2 s20-a248-d25	65.7	32.2	36.3
3 s20-a236-d25	64.0	32.8	36.6
4 s20-a230-d25	75.9	29.5	44.6
5 s20-a227-d25	79.5	36.9	45.4
6 s20-a224-d25	100	63.7	63.7
7 s20-a221-d25	77.6	39.9	43.2
8 s20-a220-d25	74.0	31.8	44.8
9 s20-a218-d25	68.5	22.1	38.9
10 s20-a216-d25	60.0	18.6	38.4
11 s20-a214-d25	54.7	20.3	33.3
12 s20-a212-d25	53.6	23.6	30.4
13 s20-a210-d25	49.3	28.2	32.6
14 s20-a208-d25	49.3	28.2	32.6

는 U-리브 하단 특정 요소응력, 마지막으로 ③ 각도 변화에 따라서 각기 다른 요소에 발생되는 U-리브 하단부의 응력집중에 의해 발생된 최대응력을 정리한 U-리브 하단최대응력 등, 3부분으로 구분하여 나타냈다. 이후 진행된 모델링들 역시 동일한 기준으로 결과 값을 정리하였다. 결과 값들 중 U-리브 하단 특정 요소응력은 모델링의 정확도를 판단하는 기준으로 사용된다. 각 상황별 모델링은 일정한 기준 하에 특정 요인만을 변화시켰기 때문에 특정 위치의 요소의 응력 또한 일정한 패턴을 가지게 된다. 이에 U-리브 하단 특정 요소 응력 결과 값이 연속적이고 일정한 패턴을 유지한다면 모델링의 정확도가 높다고 판단되며, 결과 값이 불규칙한 변화를 나타낼 때는 모델링 시 오류가 있다고 판단하여 Fig. 6~8에 나타낸 바와 같이 여러 단계를 거쳐 모델링의 재검토 및 리모델링을 실시하였다. 본 논문에 제시된 모든 결과 값들은 동일한 절차를 실시하여 모델링의 정확도를 높였다. 이후 동일한 내용이므로 각 단계 마다 중복되는 U-리브 하단 특정 요소 응력의 설명은 생략한다.

Fig. 12를 보면 U-리브 하단의 최대응력 곡선은 연속적인데 반해 각도별로 다른 위치에 배치된 SRH의 영향으로 최대 발생응력은 다른 요소에서 발생되게 되므로 구간별로 비연속적인 모습을 나타내고 있다. 각도 252°에서 반시계 방향으로 원형 SRH의 위치를 변화시킬 때 원형 SRH 주변과 U-리브 하단 부위에 발생하는 각 단계별 최대응력은, 224° 위치에서 최대치를 나타내며 불규칙적으로 나타나고 있지만, U-리브에 위치하고 최대 발생응력을 나타내는 특정 요소의 경우에만 한정하여 본다면 SRH를 230°까지는 발생 응력이 감소 뒤 최대응력 발생 각도인 224° 까지 응력이 급격히 상승한 후에 다시 급강하하여 212° 위치에서 최저응력을 보인 뒤 약간씩 증가한 후 수렴하는 모습을 보이고 있다.

그러나 발생응력의 크기를 생각하면 응력이 집중되어 거의 전 구간 허용피로응력범위를 초과하는 U-리브 하단은 말할 것도 없고, SRH에 있어서도 각도 236도에서 218도까지의 범위에 배치되면 문제가 있음을 나타내고 있다. 게다가 이격거리 20mm는 SRH의 지름이 25mm이기 때문에 실제 순이격거리가 7.5mm 밖에 안 되는 짧은 길이이므로, 교차부의 용접을 고려하면 이격거리는 거의 없다. 이격거리 40, 60mm의 모델링을 실시하여 그 결과를 Fig. 13에 종합하여 나타내었다.

응력의 차이는 있지만 전체적인 양상은 이격거리 20mm를 갖는 홀의 경우와 비슷하다. SRH 내부 발생응력은 230°

위치에서 응력이 증가하여 이후 221° 근방에서 최대응력값을 보인 후 감소하며, 이격거리가 커질수록 발생응력의 크기도 작아진다. 한편 U-리브 하단부에서는 이격거리 20mm에서 응력이 집중하였던 위치 224°가 227° 근방으로 이동하면서 완화되지만 216°번 위치 부근에 위치할 때 18.6MPa까지 감소하였던 응력이 이격거리가 60mm로 커지면 U-리브 하단부에 발생하는 최대응력은 SRH가 어느 위치에 오더라도 허용피로응력범위 31MPa를 초과하는 상태로 됨을 확인할 수 있었다.

이상 검토 결과로부터 교차부 응력완화를 위한 U-리브 중심을 기점으로 하는 SRH의 각도별 배치에 대한 검토는 SRH 내부 발생응력보다는 U-리브 하단 부위에 발생하는 응력의 완화가 주요 관심 대상이므로 검토 각도는 SRH 배치에 의해 U-리브 하단의 발생응력이 변화하는 230°, 최소값이 나타나는 근방인 221°, 212° 및 208°를 대상으로 선택하였다.

4.2.3 이격거리 변화에 따른 원형 SRH 및 U-리브 하단 부위의 응력변화

앞의 절에서 검토된 내용에 따르면 원형 SRH 내부의 최대 발생응력값과 U-리브 하단 곡선부위에 발생하는 응력은 230°~218° 위치에서 최댓값을 보이며, 그 이하 또는 이상의 각도에서는 낮은 응력 상태에서 감소 또는 증가하는 추세를 보이고 있다. 원형 SRH 내부의 응력변화는 해당 구조상에 대한 피로 저항을 고려할 때, 대응에 크게 문제가 없다고 판단하여 U-리브 하단부의 응력변화에 중점을 두고 검토하였다.

이격거리에 대한 변화 추이는 주어진 각도에 대하여 Fig. 14와 같이 변동한다.

먼저 앞에서 선택한 각도들에 대하여 이격거리 20~100 mm인 범위로 SRH를 변경 배치함에 따라 발생하는 응력 결

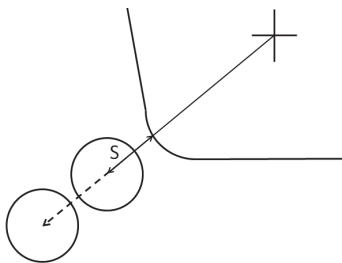
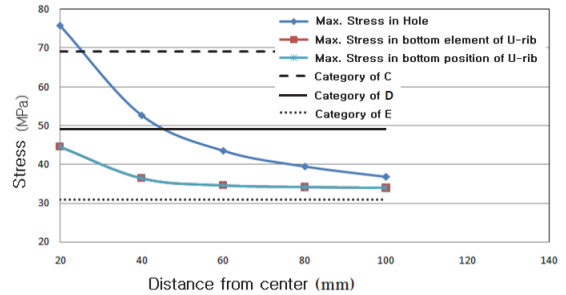


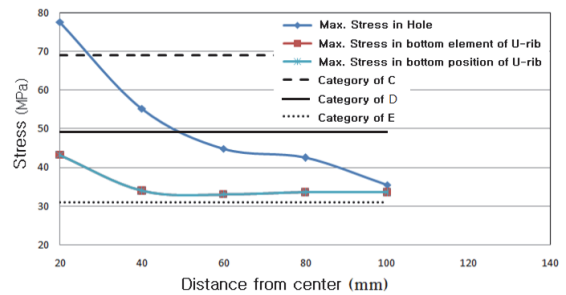
Fig. 14. Disposition of SRH considering space (Distance from center of U-rib outside)

과 Data를 정리하면 Fig. 15와 같다.

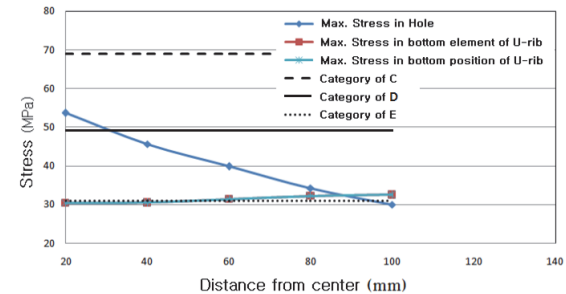
Fig. 15에 따르면 SRH의 직경이 25mm인 경우 U-리브 하단 부위에서 발생하는 최대 응력을 생각할 때에는 각도 212°로 배치한 경우 이격거리가 20mm 및 40mm인 경우를



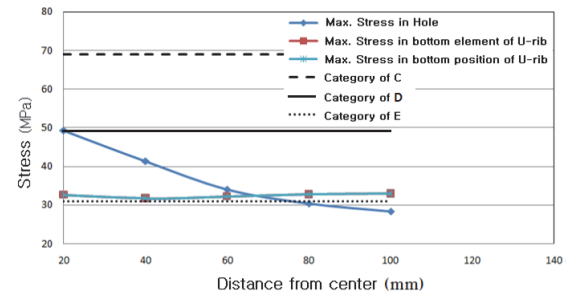
(a) 230°



(b) 221°



(c) 212°



(d) 208°

Fig. 15. Stress variation by change of space (d25)

제외하고는 허용피로응력범위를 만족하지 못하는 것을 나타내 보이고 있다. 이러한 결과는 이미 앞에서 얻은 바 있으며, 여기서는 각 각도가 나타내는 방향에 SRH를 배치할 경우 보다 확실히 발생응력의 경향, 즉 U-리브 하단부에서의 발생응력의 감소가 쉽지 않음을 확인할 수 있다.

4.2.4 원형 SRH 크기에 따른 응력변화

(1) 이격거리가 일정할 때($s = \text{constant}$)

이상 SRH의 직경이 25mm로 일정할 때, SRH가 배치되는 위치의 변화에 따라 발생하는 응력을 살펴보았으나, 교차부 특히 U-리브 하단 부위에서의 발생응력을 허용피로응력 범위 이하로 감소시키는 범위를 얻을 수는 있었지만 매우 한정적이었다.

이제 적용되는 원형 SRH의 크기를 변화시켜 검토함으로써 어느 정도 크기의 SRH가 적절한가를 살펴 볼 필요가 있다고 판단하여 앞서 진행된 각 각도별 위치에 대하여 이격거리 60mm를 기준으로 SRH의 직경 변화에 따른 응력변화를 검토 하였다. 앞에서 직경 25mm인 SRH의 적정 이격거리 20~40mm를 고려하여 보다 큰 직경에 대한 검토인 점을 고려하여 이격거리를 60mm로 하였다. Fig. 16은 교차부 직경 변화를 나타내고 있다.

앞에서 선택한 각도별 위치에 대하여 이격거리를 60mm로 고정한 상태에서 SRH의 중심점을 기준으로 반지름을 1mm씩 증가시켜 지름을 25mm부터 41mm까지 9가지를 모델링하였으며 이들 결과는 Fig. 24에 나타내었다.

Fig. 17에 따르면 선정된 각도 230° 및 221° 근방의 방향으로 배치되는 SRH의 직경이 아무리 변화해도 Max. Stress in Bottom of U-rib의 응력이 피로응력등급 “E”의 한계값인 31MPa를 초과하는 것으로 나타나 U-리브 하단부의 피로문제를 해결하는 데에는 무리가 있다. 그러나 SRH 직경을 212° 근방에서는 29mm이상, 208°에서는 33mm이상으로 배치하면 교차부에서의 발생응력이 허용피로응력범

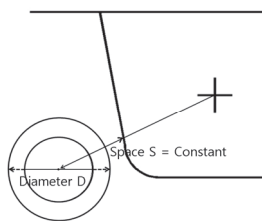
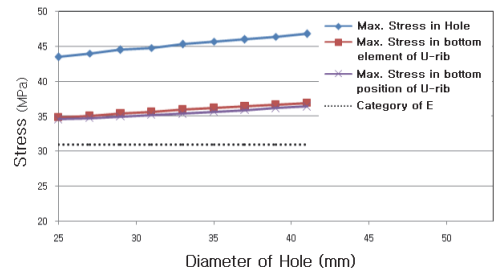


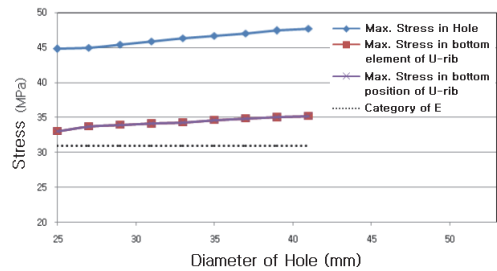
Fig. 16. Example of changes in SRH dia

위인 31MPa 보다 작게 발생되고 있다.

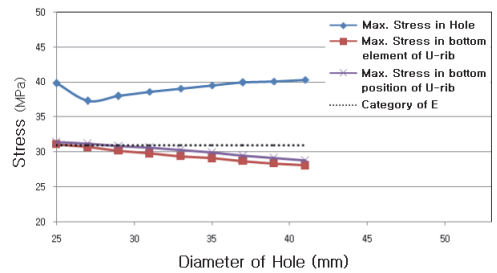
즉, SRH가 U-리브 하단 위치보다 아래쪽에 위치되는 212°보다 작은 각도를 가리키는 방향에 놓인 모델링에서는 230°와 221° 방향에 SRH를 둔 상황과는 다른 결과가 나타났다. 212°의 경우 원형 SRH 내에 발생된 최소응력은 지름 27mm에서 37.3MPa로 최솟값을 기점으로 다시 증가하는 모습이고, 221° 방향에 배치시켰을 때는 전체적으로 212°의



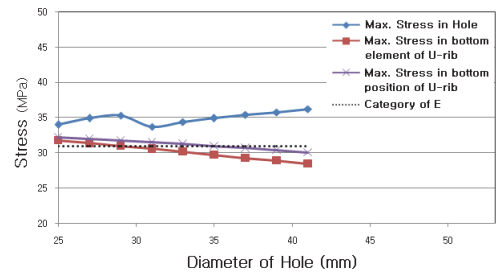
(a) 230°



(b) 221°



(c) 212°



(d) 208°

Fig. 17. Stress variation by change of diameter (s60)

경우보다 낮은 응력이지만 30mm 전후의 직경에서 변곡점을 갖는 모습이 나타났다. 양 방향 모두 SRH 내부 발생응력은 충분히 작아서 피로균열 발생에 대한 우려는 없다고 판단된다. 한편 U-리브 하단 부에 발생하는 응력에 있어서도 앞에서 간략히 기술하였듯이 배치하고자 하는 SRH의 직경을 33mm 이상으로 한다면 212° 방향 이격거리 60mm에서 문제가 없으며 208° 방향에서는 39mm 정도로 충분히 교차부 상부에 발생하는 응력범위를 허용피로응력범위 이하로 낮출 수 있음을 확인할 수 있었다.

교차부 근방에 배치되는 SRH의 직경이 커지면 전단 내하력의 감소와 국부좌굴 문제가 다시 또 발생될 우려가 있을 것이나, 현재 강바닥판 교차부에 배치시키는 스킵 대부분의 곡선부 R의 크기가 20mm 이상 35mm까지로 되고 있는 점을 고려한다면 SRH의 직경은 40(R = 20)mm까지는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

(2) 순이격거리가 일정할 때($s' = \text{constant}$)

이격거리가 일정하게 적용될 때 SRH의 지름이 증가함에 따라 Fig. 16의 이격거리는 변화가 없어도 Fig. 18의 순이격거리(s')가 감소된다. 이번 모델링에서는 지름의 크기와 순이격거리를 일정하게 하여, 결과 Data의 응력변화를 살펴보고 이격거리(s)와 순이격거리(s')중 어떤 요소가 응력변화에 지배적인지를 알아보하고자 실시되었다.

모델링은 Fig. 18에 나타난 것처럼 지름이 증가함에 원의 중심을 반지름만큼 증가시켜 순이격거리가 일정하도록 모델링되었다. 지름은 4mm씩 증가시키면서 원의 중심도 같은 방향으로 2mm씩 이동하여 지름 25mm부터 57mm까지 9개의 모델링을 실시하였고, 어떻게 배치시켜도 U-리브 하단 부위의 발생응력이 커져 피로에 취약하게 되는 각도 230° 및 221° 방향을 제외한 212° 및 208° 방향에 해당하는 모델링에 대하여만 검토하였다.

Fig. 19는 순이격거리가 47.5mm인 경우로서, 역시 SRH 내부에 발생하는 응력은 그 크기가 모두 40MPa 이하이고 SRH의 직경이 27mm 이상인 경우 거의 변화가 없어 피로균열 발생 문제는 없다고 판단된다. U-리브 하단부에 발생하는 최대응력은 배치된 SRH의 직경이 커질수록 감소하는 경향을 나타내며 각도 212° 방향의 경우 직경 37mm 이상, 208° 방향에 SRH를 배치할 경우는 직경 45mm 이상을 배치하면 U-리브 하단 부위에 발생하는 응력들이 모두 허용피로 응력범위 이내로 감소하게 됨을 보여준다.

즉, 각도 212° 방향에 SRH를 배치시킬 경우, U-리브의 하단응력은 홀의 지름이 증가함에 따라 지속적으로 감소하는데, 그 경향은 지름이 25mm에서 57mm로 약 120%증가하는데 대해 최대 발생응력은 31.4MPa로부터 28.4MPa까지 약 10%의 응력감소를 나타내었다.

각도 208° 방향으로 배치시키게 되더라도 그 경향은 각도 212° 방향으로 위치시킨 경우와 거의 유사한 응력 변화거동을 보였다. 지름의 증가에 따라 SRH 내부에 발생하는 최대응력은 변화가 거의 없었으며, U-리브 하단부의 응력은 지름이 증가함에 따라 발생응력의 감소경향은 크지 않았다. 그러나 이 부위에 대한 구조상세의 상세범주에 따르면 허용피로응력범위가 31MPa 정도로 생각되므로, SRH의 지름은 중

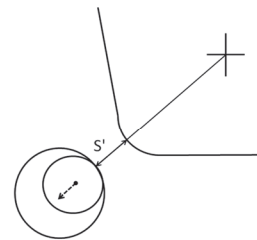
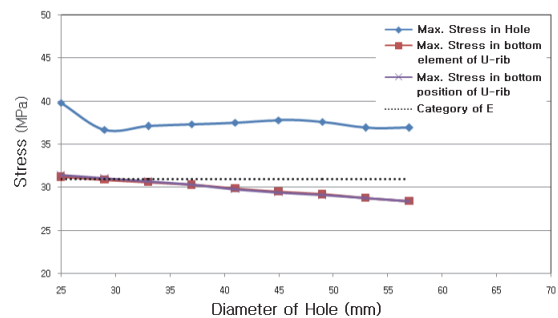
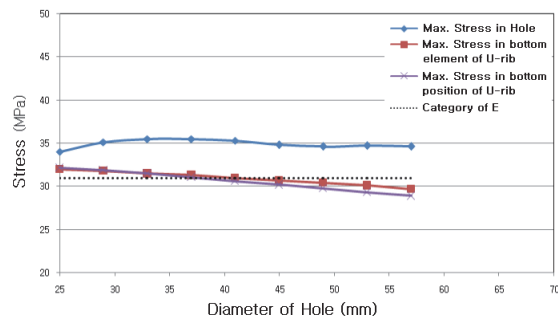


Fig. 18. Modeling of SRH with constant clear space



(a) 212°



(b) 208°

Fig. 19. Stress variation by change of diameter with constant clear space ($s'47.5$)

요인자임에 틀림없으며 이를 만족하는 직경을 쉽게 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

결과만을 고려할 때 SRH의 지름은 SRH 내부에 발생하는 응력의 변화만을 생각하면 이격거리의 변화나 각도별 위치에 비하여 상관도가 낮지만 피로 문제가 보다 심각한 U-리브 하단 부위에 발생하는 응력을 고려한다면 해당 상세범주에 대한 허용피로응력범위 규정을 만족시키기 위한 중요한 인자라고 판단된다. 하지만 원형 SRH의 지름을 결정할 때는 이격거리를 이용하는 것이 순이격거리를 고려하는 경우보다 그 접근 효율성이 높지만 최소한의 순이격거리가 절대적으로 필요하므로 필요로 되는 순이격거리를 미리 결정한 후 SRH의 직경을 결정하는 것이 좋다고 생각한다.

4.3 고찰

4.3.1 원형 SRH의 배치각도

원형 SRH가 적용되는 방향과 위치를 고려할 때, U-리브의 폭과 높이의 1/2을 중심으로 각도가 시계방향으로 208° ~ 216° 사이에 홀이 위치하였을 때 U-리브 하단 곡선부에 발생하는 응력이 허용피로응력범위 이하의 값을 가지게 되는 것을 확인하였다.

4.3.2 원형 SRH의 이격거리 변화

SRH의 위치에 관련하여 U-리브 외측으로부터 SRH 중심까지의 이격거리는 40mm 이전에 홀이 위치할 때에는 각도 변화에 따라 차이는 있지만, SRH 내부 또는 U-리브 하단 곡선부에 발생하는 응력이 급격한 응력증가는 물론 필요로 되는 순이격거리 확보 불가로 인하여 문제가 발생할 수 있으며, SRH의 직경이 25mm 이하에서 이격거리를 60mm 이상 이격되는 경우에는 U-리브 하단부에 발생하는 응력이 허용피로응력범위를 벗어나 응력분산의 효과를 나타내지 못함을 확인하였다.

4.3.3 원형 SRH의 지름변화

원형 SRH의 지름변화에 따른 발생응력은 SRH를 U-리브 하단 아래쪽에 위치시킬 경우에는 지름의 증가에 따라 그 응력이 감소하며, 순이격거리를 일정하게 하면서 지름에 변화를 줄 경우, 지름이 크게 되어도 SRH 절취부 내의 최대 발생응력에는 큰 변화가 없으면서, U-리브 하단부위에 발생하는 응력은 지속적으로 감소하였다. 그 응력의 변화율은 이

격거리를 고려한 경우가 순이격거리를 고려한 경우보다 크게 나타났다.

4.3.4 SRH의 적용성

기존 U-리브와 가로리브 교차부에 발생하는 피로응력을 감소시키기 위해 U-리브와 가로리브가 교차하는 부위 전체를 용접하게 됨으로써 발생하는 응력과 스켈럽을 적용하게 됨에 따라 발생하는 응력들의 크기는 같은 외력조건에 대해 SRH를 적용하여 집중되는 응력을 완화시킬 수 있음이 확인되었으며, 이로써 SRH를 이용한 구조상세는 해당 구조상세의 상세범주에 대한 허용피로응력범위를 초과하지 않도록 집중응력을 분산시켜 피로균열이 발생되지 않는 충분한 저항능력을 갖춘 구조상세 중 하나가 될 수 있음을 확인하였다. 예를 들면 도로교 설계기준이 규정한 설계조건 하의 강바닥판교 가로-세로리브 교차부 구조상세에 대해 [s60-a212-d33] SRH를 배치할 경우, SRH 내부에서는 최대응력 : 39.1MPa, U-리브 하단 부위에서는 최대응력 : 30.3MPa 정도가 발생되어 각각의 상세범주에 대한 해당 허용피로응력범위 49MPa, 31MPa를 모두 만족시킨다.

5. 결론

교차부 U-리브 하단 부위의 피로손상을 줄이기 위해 본 연구를 통하여 제시된 SRH 즉, U-리브가 교차하는 가로리브의 적절한 위치에 적합한 크기의 원형의 구멍을 두는 방법에 대하여 검토한 결과, SRH의 배치 위치 및 크기와 관련하여 다음과 같은 특성들을 확인할 수 있었다.

- (1) 현재 적용되는 U-리브 스켈럽의 응력집중부인 용접 단부를 고려할 때, 크기와 형상이 거의 유사하게 되는 이격거리 60mm, 각도 212, 그리고 직경 33mm인 원형 SRH의 경우 내부 발생 최대응력의 50%, U-리브 하단 부위에서 발생하는 최대응력의 22%를 감소시킬 수 있었다.
- (2) 원형 SRH의 배치에 있어서 배치각도가 변화하면 SRH 자체내부에 발생하는 응력보다는 U-리브 하단 용접부에 발생하는 응력이 피로에 더 취약하며, 이를 극복하기 위한 배치 각도가 존재함을 확인하였다.
- (3) 원형 SRH를 배치할 때 이격거리를 변화시킬 때, 이격거리 40mm이하에서는 SRH 내부는 물론 U-리브 하단부

의 응력이 급격히 증가하는 등 문제가 발생할 수 있으며, 적용된 SRH의 직경을 작게 하더라도 이격거리를 크게 되면 U-리브 하단부에 허용피로 범주를 벗어나게 됨을 확인하였다.

- (4) 한편 지름이 커지면 발생응력이 감소하지만, U-리브 경계와 원형 SRH의 중심까지를 고려하는 이격거리보다는 SRH의 경계까지의 순이격거리를 고려하여 직경을 결정하는 것이 보다 중요한 인자인 것으로 판단된다.

위 결론에 의거 국내외 강상판교의 피로손상에 관련된 문제를 해결하기 위하여 대응하는 추세는 U-리브의 두께를 증가시키고 있으나 사용 판재의 두께를 늘리는 것 보다 기존 두께의 판재에 SRH를 배치시키는 것이 더 효과적이라 생각되며, 그 효과가 추후 곡선 SRH의 적용 등 계속된 연구로 재확인되어 이론에서 벗어나 실험으로 검증된다면 향후 강바닥판을 이용하는 구조체의 자중 감소 및 시공비를 대폭 줄일 수 있을 것이다. 그러나 이번 연구에서 모델링 되었던 U-리브 하단부에 발생하는 응력의 감소를 위한 원형 SRH는 아직 U-리브 하단부에 발생하는 피로균열의 문제를 충분히 해소시키지 못하였다고 생각하며, 현재 진행 중인 추가 연구에서는 SRH의 형상 및 형상 변화에 따른 배치 위치의 재확인, 그리고 교차부 용접처리 방법 등을 변화시키는 등 조금 더 효과적인 SRH를 제시하고자 하며, 이번 연구에서 다루지 않았던 SRH로 인한 교차부 국부좌굴에 관한 해석 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] 국토해양부(2010) 도로교설계기준, pp.3-22-3-30. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard*, Korea, pp.3-22-3-30 (in Korean).
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (1998) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2nd Ed.),USA.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (2012) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (6th Ed.),USA.
- [4] Brown, J.D., Lubitz, D.J., Cekov, Y.C., Frank, K.H., and Keating, P.B. (2007) *Evaluation of Influence of Hole Making Upon the Performance of Structural Steel Plates and Connections*, Report No. FHWA/TX-07/0-4624-1. University of Texas at Austin, USA.
- [5] 국토해양부(2012) 도로교설계기준(한계상태설계법), pp. 6-28-6-32. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Korea, pp.6-28-6-32 (in Korean).
- [6] 정경섭, 남승훈, 김경남, 양건봉(2013) 강구조상세부의 피로저항능력 개선을 위한 응력완화홀 적용성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제5호, pp.451-461. Jung, K.S., Nam, S.H., Kim, K.N., and Yang, K.B. (2013) Evaluation on Applicability of Stress Relief Hole for Improvement of Fatigue Stress Capacity of Steel Structural Details Using Stress Relief Hole, *Journal of Korean Society of Steel Structures*, KSSC, Vol.25, No.5, pp.451-461 (in Korean).
- [7] 오순택(2006) 강바닥판교의 설계 및 시공성 향상방안: 강바닥판교 3차원 실물 모형체의 피로강도, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제1호, pp.23-32. Oh, S.T. (2006) Improvement of the Design and Construction Technique of Orthotropic Steel Deck Bridges: Fatigue Strength of Three Dimensional Full-Scaled Mode, *Journal of Korean Society of Steel Structures*, Vol.18, No.1, pp.23-32 (in Korean).
- [8] 남승훈(2013) 강바닥판과 U리브 용접부의 피로응력 감소를 위한 응력완화홀, 석사학위논문, 충북대학교. Nam, S.-H. (2013) *Relief Hole for Decreasing Fatigue Stress in Welded Intersections of Orthotropic Deck and U-Rib*, Master's Thesis, Chungbuk National University, Korea (in Korean).
- [9] 한태진(2011) 3차원 실물 강바닥판 시험체의 면외거동을 고려한 연구, 석사학위논문, 국민대학교. Han, T. (2011) *Analytical Study on Out of Plane Behavior for 3-Dimensional Full-Scale Orthotropic Steel Deck Systems*, Master's Thesis, Kookmin University, Korea (in Korean).
- [10] MIDAS Information Technology (2009) *MIDAS Civil: Integrated Solution System for Bridge and Civil Structures*, MIDAS IT Co., Ltd., Korea, pp.381-388 (in Korean).
- [11] 이성진, 경갑수, 박진은, 이희현(2012) 주행차량에 따른 개단면 강바닥판 교량의 국부거동 특성, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.101-108. Lee, S.J., Kyung, K.S., Park, J.E., and Lee, H.H. (2012) Characteristic of Local Behavior in Orthotropic Steel Deck Bridge with Open Ribs According to Running Vehicle, *Journal of Korean Society of Steel Structures*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.101-108 (in Korean).

요 약 : 연구대상인 강바닥판교의 U-리브와 가로리브를 교차하는 접합부에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으나 아직까지는 현재 적용되고 있는 스킨랩 자체 또는 내부의 다이어프램 형상을 개발 이용하고 있는 정도이다. 근본적으로 문제가 되고 있는 교차부 U-리브 하단 부위의 피로손상을 줄이기 위해, 본 연구를 통하여 제시된 SRH, 즉, U-리브가 교차하는 가로리브의 적절한 위치에 적합한 크기의 원형의 구멍을 두는 방안에 대하여 검토하였다. 최종적으로 원형 SRH가 강바닥판교의 U-리브와 가로리브 교차부 응력집중을 충분히 완화시킬 수 있음을 확인하였고, 이 부위의 구조상세의 피로손상을 방지할 수 있는 방안 중 하나로 SRH를 제안할 수 있었다.

핵심용어 : 응력완화술, 바닥판, U-리브, 스킨랩, 용접, 피로
