

강상판 종리브 · 바닥강판 용접연결부의 응력집중

Stress Concentration of Longitudinal Rib to Deckplate Welded Joint in Orthotropic Steel Bridge Decks

장 동 일* 최 동 호** 최 준 혁*** 김 도 환****
Chang, Dong-Il Choi, Dong-Ho Choi, Jun-Hyeok Kim, Do-Hwan

ABSTRACT

Orthotropic steel bridge decks are potentially liable to cause fatigue cracks due to weld defects, residual stresses, and in-plane or out-of-plane stresses. In particular, the cracks propagated through deckplate in longitudinal rib to deckplate joints occur at weld toe and weld root due to stress concentrations. Numerical parametric studies are performed to show the influence of the parameters on the stress concentration at the connection between the longitudinal rib and the deckplate. The parameters include root gap, toe angle θ , toe radius ρ , and weld penetration. This study provides a fundamental point for the improvement of fatigue resistance and the estimation of the fatigue crack propagation in welded joint details.

1. 서 론

강도로교 강상판은 비교적 얇은 강판을 복잡한 형상으로 용접하여 조립함에 따라 많은 양의 용접을 피할 수 없고, 이로 인한 용접결함, 잔류응력, 면내·외 변형 등이 피로강도를 저하시키는 요인이다. 이러한 강상판 구조상세 중 종리브와 바닥강판 용접연결부는 균열이 바닥강판을 관통하여 포장체 표면에 나타나기 전에는 그 균열 여부를 파악할 수 없다는 문제점을 가지고 있으며, 용접지단부 또는 불완전용입이나 루트갭(gap)에 의한 응력집중으로 용접 루트부에서 균열이 발생할 가능성이 매우 크다. 실제로 피로균열 발생사례로서 종리브·바닥강판 용접연결부의 용접 루트부로부터 균열이 발생하여 포장체 표면에 두 개의 종방향 균열이 보고되었다[1]. 횡리브 십자 필렛용접 지단부에 대해서 매개변수를 이용한 수치적 평가와 피로시험 평가를 수행하였으며 최근엔 강상판의 종리브·횡리브 교차부에 대해서도 수행되었다[2][3].

이러한 문제점을 가지고 있는 종리브·바닥강판 연결부에 대해서 본 연구에서는 파괴역학적 접근방법에 의한 피로수명을 예측하고 평가하기에 앞서 용접부의 응력집중에 큰 영향을 미치는 종리브와 바닥강판 사이의 루트갭(gap), 용접부 지단각 θ , 곡률반경 ρ , 용입량 d 를 매개변수로 하여 응력해석을 수행하였으며, 이들

* 한양대학교 도시환경건설공학부 교수
** 한양대학교 도시환경건설공학부 조교수
*** 한양대학교 도시환경건설공학부 박사과정
**** 한양대학교 도시환경건설공학부 석사과정

변수가 용접부에 발생하는 응력변화에 미치는 영향을 분석·평가하였다. 이들 결과는 응력확대계수범위 ΔK 및 형상보정계수 F_w 를 구하기 위해서도 필요하며 이로부터 추후 용접상세부의 피로강도 향상과 피로 거동 평가에 기초자료로 이용하고자 한다.

2. 해석 모델링

2.1 대상구조물 및 해석모델링

수치해석에 사용된 시험체는 현재 가설중인 광안대교의 단면제원을 사용하였다. 광안대교 강상판의 패널은 340×260×8~10의 종리브가 5개 부착되고 횡리브 간격이 2.3m, 폭 3.5m, 길이 7.65m의 패널로 제작되어 현장에서 용접하여 조립된다. 본 연구에서는 그림 1(a)와 같이 시험체의 크기는 종리브, 횡리브 거동에 중점을 두어 이들은 실 교량에서의 동일한 크기를 택하였고 실험실 여건을 고려하여 폭 2.04m, 길이 5m의 대형시험체를 제작하여 수치해석과 피로시험을 실시하였다. 지점조건은 횡리브 하부플랜지 양쪽 끝단을 힌지로 처리하여 6지점개로 하였으며, 하중은 그림 1(b)와 같이 중앙 횡리브로부터 500mm, 종리브 중심선으로부터 왼쪽으로 170mm 떨어진 지점에 트럭 하중중을 나타내는 200mm×500mm의 면하중의 중심을 위치시켰다. 이때의 하중 크기는 단위하중 1ton을 재하하였다. 또한 해석시 강재의 탄성계수는 $2.1 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$, 프아송계수는 0.3을 선택하였으며 FEM해석 모델을 그림 2에 나타내었다. 구조해석은 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 사

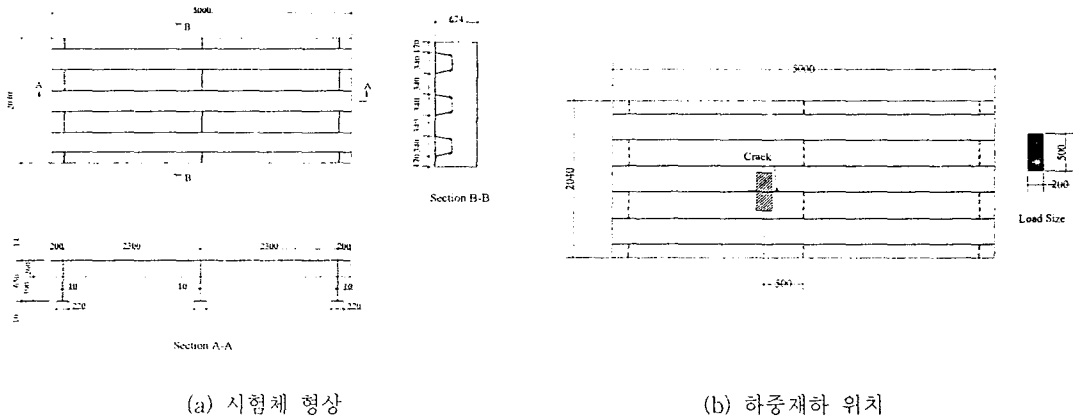


그림 1 강상판 대형시험체의 형상과 하중재하위치

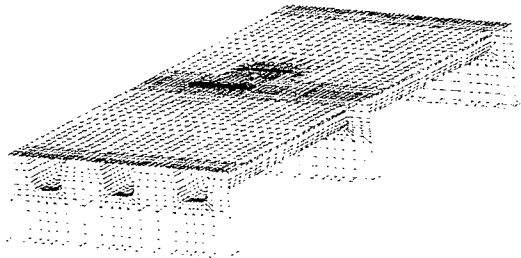


그림 2 강상판 대형시험체의 모델링

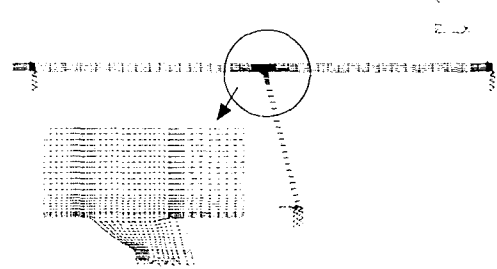


그림 3 종리브·바닥강판 용접연결부의 국부모델링

용하였다. 차량 운하중으로 인한 휨응력에 주안점을 두기 위해 얇은 8절점 쉘요소를 사용하였다.

2.2 국부해석 모델링

국부해석모델은 종리브와 바닥강판 용접연결부를 선택하였는데 이는 피로시험결과 바닥강판의 과도한 변형으로 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 종방향으로 균열이 발생하였기 때문이다. 국부해석모델은 국부모델링과 전체모델링에서 동일한 값을 갖도록 앞 절의 전체해석모델로부터 얻어진 각 절점의 변위를 이용하여 경계조건 및 등가하중을 결정하였으며 이를 그림 3에 나타내었다. 전체해석결과 얻어진 종리브·바닥강판 연결부의 변위는 관심대상위치에서 수직변위를 제외하곤 나머지 값들의 변위가 극히 적었으므로 2차원 해석을 수행하였고 평면변형상태로 가정하였다. 등가하중은 변하중 폭 500mm만큼 상판 상부에 등분포하중으로 재하시켰다. 지지조건은 바닥강판 양 끝단과 종리브 웨브의 하단에서의 x방향은 구속시켰으며 같은 위치에서의 y방향은 모두 등가스프링으로 지지하였다. 이러한 국부모델의 해석결과를 검증하기 위해 바닥강판 상단에서의 교축직각방향 응력분포 σ_x 를 비교하여 그림 4에 나타내었다.

여기서 최대발생응력의 분포가 다소 다른 것은 용접지단부와 용접 루트갭에 의한 응력집중이 발생했기 때문이며 중심부 좌우로 약간의 차이를 나타내는 것은 2차원 해석모델의 가정과 교축방향 변위의 무시 등에 의한 것으로 판단되나 본 연구의 목적에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

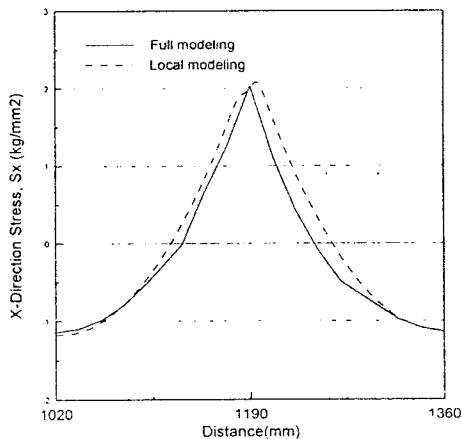


그림 4 전체모델과 국부모델의 응력값 비교

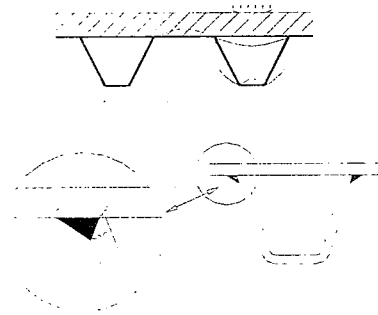
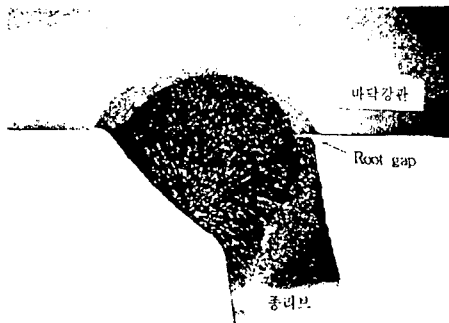


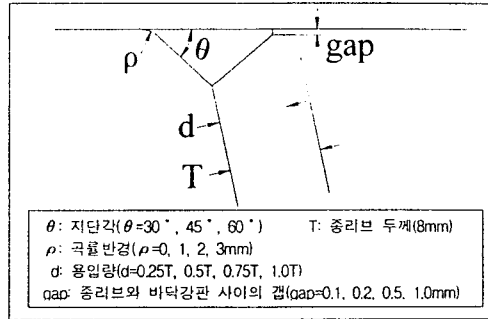
그림 5 종리브·바닥강판 연결부의 휨거동과 균열발생부

3. 용접형상에 따른 응력분포의 변화

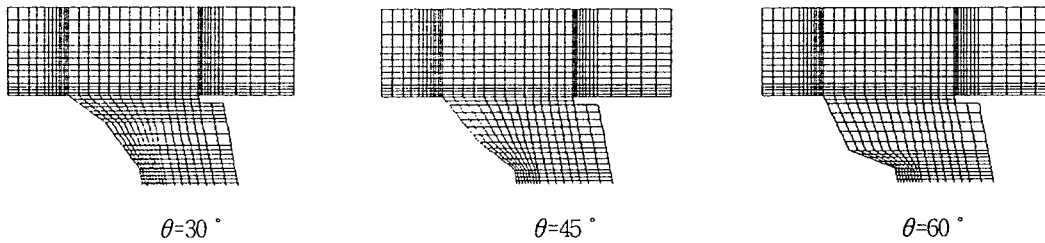
종리브·바닥강판 용접연결부는 운하중으로 인한 휨응력을 주로 받으며 피로균열 양상은 그림 5와 같이 용접 루트부와 용접지단부 양 끝단에서 발생된다[4]. 본 연구에서는 이와 같은 균열의 발생에 영향을 미치는 용접지단각 θ , 지단부 곡률반경 ρ , 루트갭(gap), 용입량 d를 매개변수로 선택하여 연결부의 용접형상의 차이에 따른 응력분포의 변화를 수치적으로 평가하였다. 이러한 변수를 선택한 이유는, 용접지단각과 곡률반경의 경우 용접형상을 결정하는 인자로서 이들 값에 따라 용접부의 응력집중의 정도가 달라지며, 용입량의 크기는 현재 설계지침에서는 종리브 두께가 8mm 이상일 경우 완전용입용접을 하기 위해 45°로 단부 개선을 한 뒤



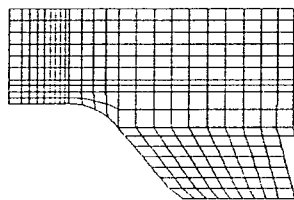
(a) 시험체의 용접부 형상



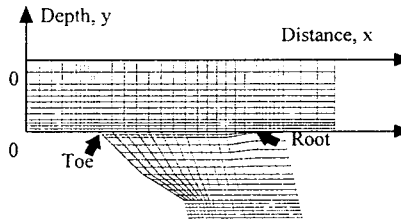
(b) 용접부의 매개변수



(c) 지단각에 따른 용접부 모델링(gap=0.5, d=0.75T, rho=0인 경우)



(d) 지단부 곡률반경(rho=3인 경우)



(e) 응력산출 위치

그림 6 유한요소 해석모델 및 매개변수

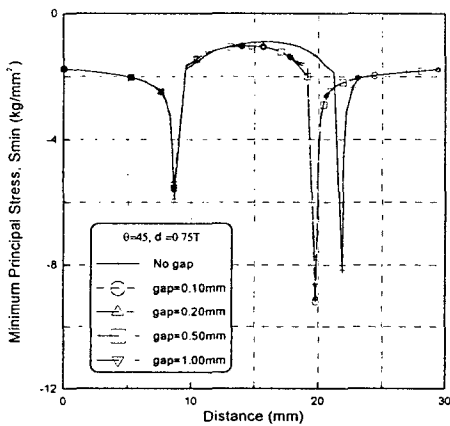
흡용접을 하도록 되어있긴 하지만, 용입량의 차이가 용접부에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해서 선택하였다[5].

본 연구에서 구한 응력분포는 응력확대계수범위 ΔK 의 형상보정계수 F_G 와 추후 용접상세부의 피로강도 향상과 피로거동 평가를 위한 기초자료로 이용하고자 한다. 매개변수 변화에 따른 용접부 해석모델과 매개변수 및 응력 추출위치를 그림 6에 나타내었다.

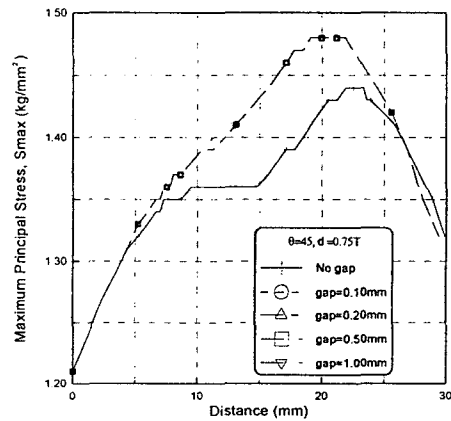
3.1 루트갭의 영향

종리브와 바닥강판은 실제적으로 완전한 밀착이 불가능하기 때문에 용접되지 않은 틈이 발생하는데 이를

'루트갭(Root gap)'이라 하고, 종리브 제작시 가공방법 또는 다듬질에 따라 그 크기가 달라진다. 따라서, 이 루트갭의 크기가 용접부의 응력분포에 어떠한 영향을 주는지 살펴보기 위하여 루트갭의 크기를 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0mm로 하여 해석을 수행하였다. 바닥강판의 하부와 상부의 응력분포를 그림 7에 나타내었다. 이때 용접지단각은 45° 이고 용입량은 75%로 하였다. 여기서 바닥강판 하부의 경우 루트갭의 크기가 증가할수록 루트부의 최소 주응력(압축응력)의 크기는 약간 감소하지만 그 크기는 매우 작다는 것을 알 수 있다. 갭이 없는 경우의 응력은 갭이 있는 경우와 비교했을 때 최대 10%정도로 압축응력이 감소하였다. 또한 바닥강판 상부에서의 최대 주응력(인장응력)은 바닥강판 하부와 마찬가지로 루트갭의 크기에 따른 영향은 거의 없으나 갭이 없는 경우에는 약 3.3%정도로 응력값이 감소하였다. 이로부터 종리브·바닥강판 용접연결부는 루트갭 크기의 영향보다는 갭의 유무에 따라 응력값이 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.



(a) 바닥강판 하부



(b) 바닥강판 상부

그림 7 루트갭의 크기에 따른 응력분포

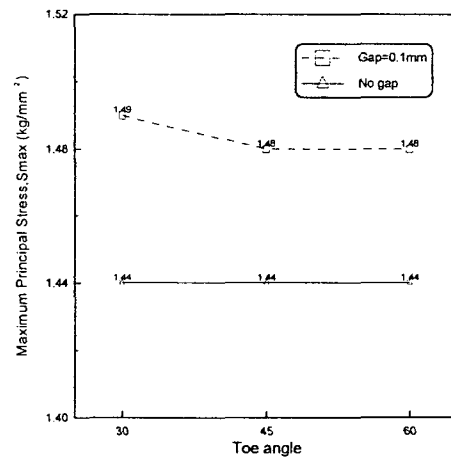
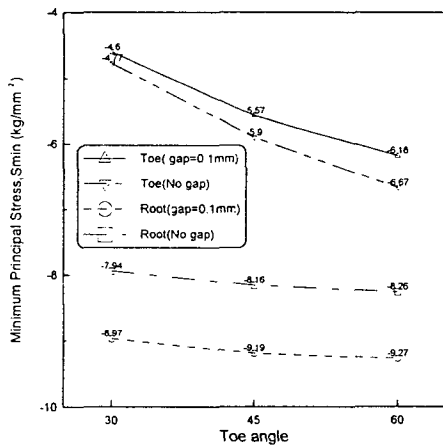


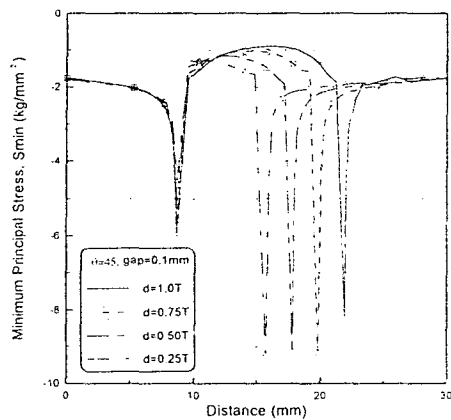
그림 8 지단각에 따른 지단부와 루트부의 응력변화 그림 9 지단각에 따른 바닥강판 상부의 최대응력값

3.2 용접지단각 θ 의 영향

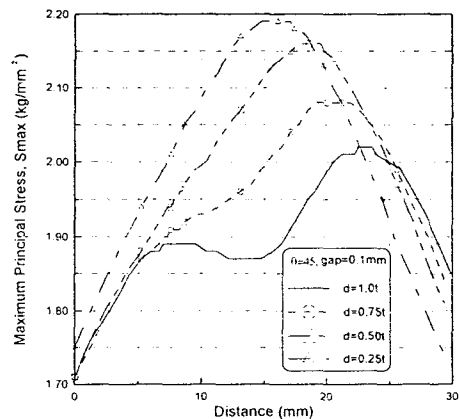
용접지단각은 용접방법에 따라 그 크기가 달라지며 여기서는 지단각을 30° , 45° , 60° 일 때 지단부와 루트부의 응력의 크기를 그림 8에 나타내었다. 여기서 루트갭의 크기를 0.1mm로 하였다. 그림 8로부터 용접지단각의 각도가 커짐에 따라 지단부에서는 압축응력이 크게 증가하지만 루트부에서의 응력값은 별 차이가 없다는 것을 알 수 있으며 지단각이 커질수록 갭의 유무에 따른 응력값의 차이가 증가한다. 그림 9는 용접지단각에 따른 바닥강관 상부의 최대주응력의 크기를 나타낸 것으로서 갭의 유무에는 차이가 있지만 지단각에는 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

3.3 용입량 d의 영향

종리브와 바닥강관 용접시 용입량이 용접부의 응력분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 용입량을 종리브 두께 T의 25%, 50%, 75% 3개의 부분용입용접과 100% 완전용입용접으로 구분하여 해석하였으며 바닥강관의 하부와 상부의 응력분포를 그림 10에 나타내었다. 여기서 루트갭의 크기는 강상관 대형시험체의 매크로 시험편으로부터 얻어진 자료를 토대로 0.1mm로 하였고, 지단각 θ 는 45° 로 하였다. 용입량의 차이에 따른 바닥강관 하부에서의 응력분포를 살펴보면 용입량의 차이에 따른 최소 주응력(압축응력)의 크기는 별 차이가 없으나 완전용입을 하면 부분용입시의 응력값보다 약 10%정도 감소함을 알 수 있다. 또한 바닥강관 상부의 응력분포의 경우 용입량이 줄어들수록 최대 주응력(인장응력)이 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서 인장응력의 크기를 줄이기 위해선 가능한 한 완전용입을 하는 것이 유리하다. 그림 11과 그림 12에 용입량과 용접지단각에 따른 지단부의 응력분포와 바닥강관 상부의 최대응력값의 변화를 나타내었다. 용입량의 영향을 용접지단각에 대해서 살펴보면 용접지단각이 커질수록 바닥강관 하부의 지단부에서의 용입량의 영향은 더 크게 나타나는데 이는 용접부의 목두께 차이에 의한 것으로 판단된다. 그러나 바닥강관 상부에서는 지단각의 차이에 따른 응력 변화는 없다는 것을 알 수 있다.



(a) 바닥강관 하부



(b) 바닥강관 상부

그림 10 용입량의 차이에 따른 분포

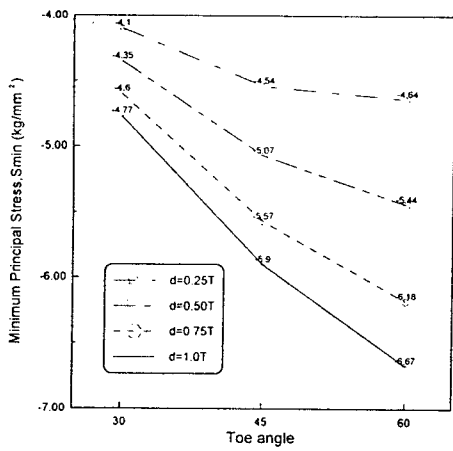


그림 11 지단부의 응력변화

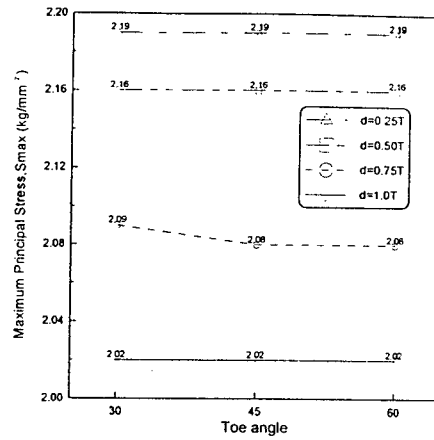
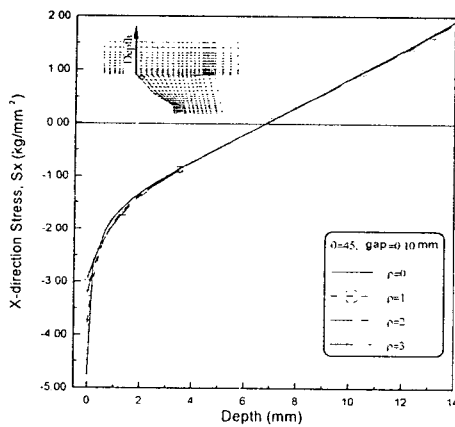


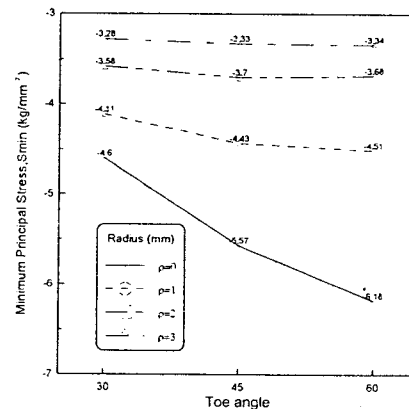
그림 12 바닥강판 상부의 최대응력값의 변화

3.4 지단각 θ 와 지단부의 곡률반경 ρ 의 영향

용접지단부의 곡률반경 ρ 의 영향을 알아보기 위해 용접 지단각을 45° 로 고정하고 지단부의 곡률반경 $\rho = 0, 1, 2, 3\text{mm}$ 에 대해서 해석을 수행하였고 지단부에서 상판 두께방향의 응력분포를 그림 13(a)에 나타내었다. 이를 보면 지단부에서의 최소 주응력(압축응력)의 크기는 ρ 가 증가함에 따라 크게 감소하였다. 그러나 이러한 지단부의 응력집중효과는 지단부로부터 약 1mm 정도 즉, 판두께의 약 1/14정도라는 것을 알 수 있다. 그림 13(b)는 지단각 θ 와 곡률반경 ρ 의 변화에 따른 지단부에서의 최소 주응력(압축응력)의 변화양상을 나타내었다. 이로부터 응력집중은 지단각 θ 에 비례하며 곡률반경 ρ 에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 특히 $\rho=0$ 인 경우 $\theta=60^\circ$ 에서는 $\theta=30^\circ$ 에 비해 약 20%의 응력증가를 나타내었다. 그러나 $\rho=2$ 이상이 되면 용접 지단각의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.



(a) 용접지단부에서의 두께방향 응력분포



(b) 지단각변화에 따른 응력분포

그림 13 지단부 곡률반경의 변화에 따른 응력분포

4. 결 론

강상판의 종리브와 바닥강판 용접부에 대한 수치해석결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 종리브와 바닥강판 사이의 루트갭의 크기는 용접부의 발생 응력에 영향을 미치지 않으며 단지 갭의 유무에 따라 크게 달라진다. 그 값의 차이는 압축응력의 경우 10%정도, 인장응력의 경우 3.3%정도이다.
- (2) 용입량이 적을수록 용접부의 발생 응력의 크기는 증가하는 것으로 나타났으며 완전용입을 할 경우 바닥강판 상·하부의 응력크기는 약 10%정도 감소하는 것으로 보아 가급적 완전용입을 하는 것이 유리함을 알 수 있다.
- (3) 응력집중은 지단각 θ 에 비례하고 곡률반경 ρ 에 반비례하며 이러한 응력집중효과는 판두께의 약 1/14정도까지 영향을 미친다. 아울러 곡률반경이 2mm 이상이 되면 용접지단각 θ 의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

- [1] H. Kolstein, J. Wardenier (1998). "A New Type of Fatigue Failures in Steel Orthotropic Bridge Decks", *Proceedings of Fifth Pacific Structural Steel Conference*, Seoul, Korea, Vol. 1, pp. 483-488.
- [2] 山田 健太郎, 牧野時則, 菊池洋一 (1979). "横リブ十字隅肉溶接止端部に發生する疲勞龜裂の解析", 土木學會論文集, 第292号, pp. 1-12, 1979年 12月.
- [3] 三木千壽, 館石和雄, 奥川淳志, 藤井裕司 (1995). "鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部應力と疲勞強度", 土木學會論文集, 第519号/I-32, pp. 127-137, 1995年 7月.
- [4] T. Gurney (1992). *Fatigue of Steel Bridge Decks, State-of-the-Art Review 8*, TRRL, P. 160, HMSO, 1992.
- [5] 건설교통부, "강도로교 상세부 설계지침", 대한토목학회, 1997.