

구조물 용접이음부의 응력집중계수 및 피로강도에 관한 연구

(A Study on the S.C.F and Fatigue Strength for Structural Welded Joint)

부산대학교 대학원 박재형*
부산대학교 공대 엄동석
현대중공업 해양연구소 하우일

1. 서론

해양구조물을 비롯한, 교량, 건설기계 등의 구조물은 거의 용접이음으로 이루어져 있다. 이러한 구조물들은 기하학적 형상변화에 따라 높은 응력집중이 형성되고 이것이 피로파괴의 원인이 됨은 잘 알려진 사실이다. [8] 특히, TUBULAR 이음에서 각 보강부재에 의한 응력집중의 저감효과를 정확히 파악하기는 어렵고 중요한 이음에서는 유한요소법에 의한 해석이나 모형실험에 의해 구하고 있다. 한편 보강되지 않은 것에 대해서는 많은 연구가 수행되어 응력집중계수 추정식이 구해져 경험식으로 이용되고 있다. [1][2][3] 그러나 이들 추정식은 각형 강관의 이음도 있으나, 거의 대부분이 원형 강관의 이음에 관한 것이고, 원형강관과 각형강관에 의한 이음에 대해서는 거의 연구가 없었다. 본 연구에서는 brace부에서 축력을 받을때와 면내 굽힘모멘트를 받을때 원형-원형 이음에 대한 응력집중에 대한 해석결과와 원형-각형 이음에 대한 응력집중에 대한 해석결과를 비교 검토하고 응력집중계수(S.C.F.)를 구하여 경험식과 비교 고찰하고자 한다. 또 각 모델에 대해서 해석된 응력의 분포를 이용하여 S-N곡선과 Miner법칙으로 균열발생수명을 예측함으로써, 피로강도 설계상 합리적인 이음형상을 결정하는데 있어서 설계기초자료를 제공하고자 한다.

2. TUBULAR JOINT 에서의 응력집중현상 과 균열발생수명예측

2.1 TUBULAR JOINT 에서 기존 응력집중계수(S.C.F)

원형이음의 응력집중계수에 대한 경험식으로는 Kuang[1], Gibsten[2], Wordsworth[3], Reber, Visser, 板本[4], 등이 있고, 각형이음에 대해서는 板本[4] 등의 제안식이 있다. 이들 기존식들을 정리해 보면, 다음과 같은 계수들로서 나타낼 수가 있다.

$$K_n = f_1(\alpha) f_2(\beta) f_3(\gamma) f_4(\tau) f_5(\sin\theta) f_6(\eta)$$

$$(\alpha = L/D, \beta = d/D, \gamma = D/T, \tau = t/T, \eta = g/D)$$

원형이음의 경우 각 경험식들을 정리하여 각 계수들 마다의 함수를 양대수 그래프에 그려 비교하면, β 는 0.5부근 까지 일정한 상태를 유지하며 그것을 넘어서면 급격히 저하한다. 그 외의 계수들은 직선적으로 증가하는 경향을 보인다. 각형이음의 경우는 β 가 0.5-0.7 부근에서 peak를 가지는 산모양의 곡선으로 나타내어지고, 그 외의 계수들은 거의 직선적으로 증가하는 경향이다.

2.2 TUBULAR JOINT 의 SCF에 대한 고찰

TUBULAR JOINT 에서 구조물에 작용하는 하중은 축하중, 면내 굽힘하중, 면외 굽힘하중의 3가지로서 작용하는데 이 3가지 하중들에 대한 이음 접합부의 응력분포 및 최대 응력 발생점은 다르다. 즉 축하중에 의한 응력값들이 굽힘에 의한 응력값들 보다 크다는 것은 축하중이 SCF(Stress Concentration Factor)값에 더 큰 영향을 미치는 것이기 때문이다. 그러므로 축하중에 대한 SCF 값에 비해 굽힘에 의한 SCF 값이 대체적으로 작다. [5][6]

2-3 균열발생수명예측

반복하중을 받는 모든 구조물의 피로수명을 예측하는데는 SN곡선을 가지고 Miner법칙을 이용한 방법과 파괴역학을 이용한 방법이 있다.

본 연구에서는 전자의 방법으로 TUBULAR 이음에 이를 이용하여 균열발생수명을 예측해 보았다. 한편 현재 사용되고 있는 피로설계곡선으로 누적손상계산법에 의한 피로수명예측은 실험결과 보다 짧은 수명을 갖는 경향을 나타내고 있다. [7]

TUBULAR 이음부의 피로해석시 사용되는 SN곡선에 대해 조사하여 보면 가장 많이 사용되는 피로설계곡선은 미국용접학회(AWS)에서 제시한 AWS-X곡선, API(American Petroleum Institute), ASME, BS곡선등 많은 SN곡선이 있는데 시험방법, 시험편의 특성등이 다르기 때문에 큰 차이를 나타낸다. [8]

3. 모델링 및 해석방법

본 연구에서는 3-Dimension Thin Shell Element를 사용하여 FEM 해석을 함으로써 응력 집중부의 응력계산 뿐만 아니라 TUBULAR 이음의 전 부분에 대한 응력분포와 변형률을 계산하여 구조형식 및 치수변화에 따른 응력집중계수들을 구할 수 있었다. 본 해석법에서는 4각형요소의 4 절점의 방법을 주로 사용하였고, 일부분에서는 요소 설정과정의 편리를 도모하기위해 3각형요소의 3 절점을 사용하였다. FEM 해석시 가장 중요한 사항은 적당한 요소의 크기인데, W.Visser(6)가 주장한 Mesh-size는 $(tR)^{0.5}$ 또는 $2(tR)^{0.5}$ (t, R 은 Brace, Chord 각각의 두께 및 반지름 이다.) 이고, UKOSRP(9)에 의하면 TUBULAR 이음의 접속부에서 Mesh Size가 $0.75(Rt)^{0.5}$ 이하 이므로 본 연구에서는 이를 따랐다. 본 연구의 모델치수는 Chord부의 지름, 두께, 길이는 219, 7, 1804로서 고정시키고, Brace부의 지름, 두께를 변화시켰다. 축력을 받을때는 대칭성을 고려하여 1/4모델 이므로 BC형 5개, CC형 5개의 각각의 총요소수는 470-513의 사이에 있고, 총절점수는 490-554의 사이에 있으며, 모멘트를 받을 때는 대칭성을 고려하여 1/2모델 이므로 BC형 5개, CC형 5개의 각각의 총요소수는 926-1038 이고, 총절점수는 947-1080의 사이에 있다. 본 해석의 양단 경계조건은 고정이다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 Photo1, Photo2에서 나타난 바와같은 모델 20개에 대해서 모델링하였다. 모델 전체의 응력분포는 Photo3, Photo4에서 보는 바와같이 이음부의 접합부에서 응력 집중현상이 일어남을 알 수 있고, 그 중에서도 축력을 받을때는 거의 모든 모델이 이음부의 saddle부분과 crown부분에서 최대극부응력을 받고 있음을 알 수가 있다. 그러나 모멘트를 받을 때는 saddle, crown부분에서 조금 떨어진 접합부에서 최대극부응력이 작용하고 있음을 확인할 수 있었다.

또 원형-원형 이음과 원형-각형 이음에서의 최대극부응력의 발생위치는 거의 일치하나, 응력집중현상의 정도는 급격한 차이를 보이고 있음을 알 수가 있다. 본 연구에서 해석된 축력을 받았을때 SCF와 여러가지 경험식들과 비교하여 Table1에 원형-원형이음의 결과를 나타낸다. 모델 치수별 경향은 경험식과 잘 일치하고 있으며, 일반적인 FEM해석 결과에서 처럼 경험식들 보다 조금 큰 경향을 나타내고 있다. 또 Fig1, Fig2는 각도변화에 따라 brace부의 이음부에서의 응력분포상태를 나타내었다.

또 Table2에서는 원형-각형이음의 결과를 나타내고 있는데 비교한 자료는 爲廣正起 [10]등이 제시한 추정식과 비교하였는데, 이 추정식은 chord부와 saddle부의 구별없이 하나의 SCF값만 도출하고있지만 본 해석에서는 chord, saddle를 구별하였는데 해석결과 chord부에서의 SCF값이 잘 일치하고, 일반적인 FEM해석 결과처럼 조금 큰 경향을 나타내고 있다. 모멘트를 받을때 SCF값은 2에서 4.5 사이 로서, 축력을 받을때 보다 상당히 작은 값을 나타내며, 경험식과 비교할때 일반적인 FEM 해석결과 처럼 조금 큰 값을 나타내고 있다. 또, 원형-원형이음의 SCF값은 모델별로 조금의 차이를 보이고 있지만 각형-각형이음에서는 거의 차이가 없었다. 균열발생수명에측은 하중폭 20.4ton(+10.2ton)이고, 하중비 $R=-1$ 인 완전양진일때, $\epsilon_r=0.26$, $c=-0.47$, $\sigma_r=917.04$, $b=-0.095$, $E=206850$ 일때의 Strain Life곡선을 이용하여 균열발생수명을 예측하고 그 결과를 Table4에서 나타내었다. 원형-원형 이음에서는 모델별로 수명이 크게 차이 보이지 않지만 원형-각형 이음에서는 차이가 거의 나지않음을 알 수 있었다.

CCM3 모델과 BCM3 모델의 균열발생수명의 분포를 Photo5, Photo6에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 종래부터 연구되어온 경험식이 있는 원형-원형 T자형이음과 아직 연구된 바가 거의 없는 원형-각형 T자형이음에 대해서, 축력을 받을때와 면내 굽힘하중을 받을때 각각 5개씩, 모두 20개의 모델에 대해서 전체적인 응력분포를 구하고, SCF를 구하여 비교하고, 균열발생수명을 예측하여 보았다. 해석결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 원형-각형이음의 SCF값이 원형-원형이음의 SCF값보다 크다.
2. 축력을 받을때의 SCF값이 면내굽힘하중을 받을때의 SCF값 보다 크다.
3. $\beta(d/D)$ 의 값이 0.77까지는 SCF값이 증가하나 그 이상은 감소하는 경향을 보인다.
4. 최고극부응력이 작용하는곳 부근에서 균열발생수명을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 원형-원형이음의 균열발생수명은 brace지름의 크기가 클수록 응력이 작

소하고 수명이 증가하나, 원형-각형이음은 모델5를 제외하고는 별로 차이가 없다.

--- 참고 문헌 ---

- [1] J.G.Kuang, Stress Concentration in Tubular Joints, OTC 2205, 1975.
- [2] Gibstein, M.B., "Parametric Stress Analysis of T Joints", Int. Conf. European Offshore Steel Research Seminar (EOSRS) PAPER 26, 1978.
- [3] Wordsworth, A.C and Smedley, G.P., "Stress Concentrations at Unstiffened Tubular Joint", Int. Conf. EOSRS, Paper 31, 1978.
- [4] 板本, 笑島, 八角形鋼管T型分岐継手の力學性狀, 建築學會 講演集 2311, 1979
- [5] Hanna, S.Y., Wang, W.J., Nair, V.V.D. and Chang, N.H., "Fatigue Design Considerations for Deepwater Fixed Platforms", OTC 4774, 1984.
- [6] Visser, W. and Koninkijke, "On the Structural Design of Tubular Joints", OTC 2117, 1974.
- [7] Martin, T. and McGregor, J., "An Investigation into the Stress Distribution and Fatigue Strength of a Welded Tubular T-joints", OTC 2856, 1977.
- [8] Vughts, J.H. and Kinra, R.K., "Probabilistic Fatigue Considerations in the Design of Framed Offshore Structure", OTC 2609, 1976.
- [9] Clayton, A.M. and Irvine, N.M. "Stress Analysis Methods for Tubular Connections", Int. Conf. EOSRS, PAPER 30, 1978.
- [10] 爲廣正起, 昭和 57年 5月 西部 造船會 第 64回 定例講演において

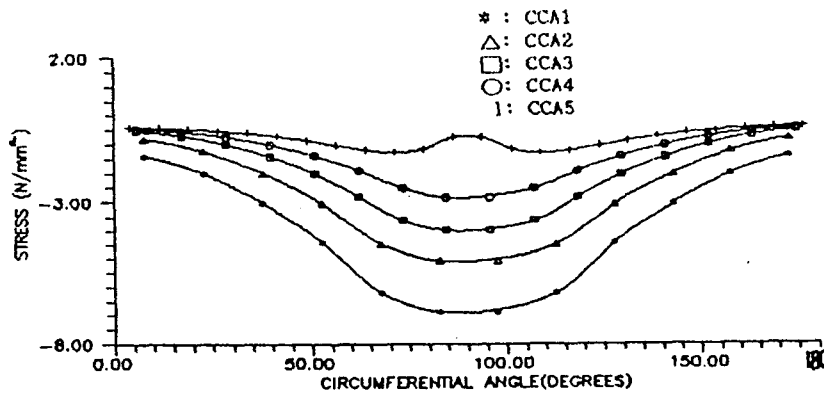


Fig. 1 Stress Distribution of Brace Side in Intersection between Brace and Chord (CCA)

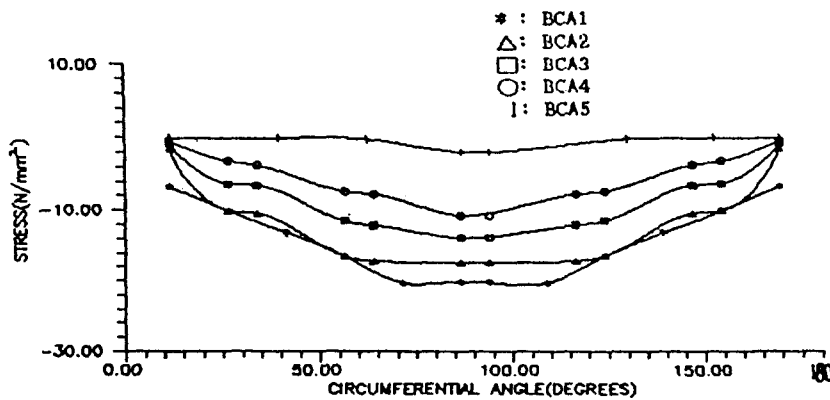


Fig. 2 Stress Distribution of Brace Side in Intersection between Brace and Chord (BCA)

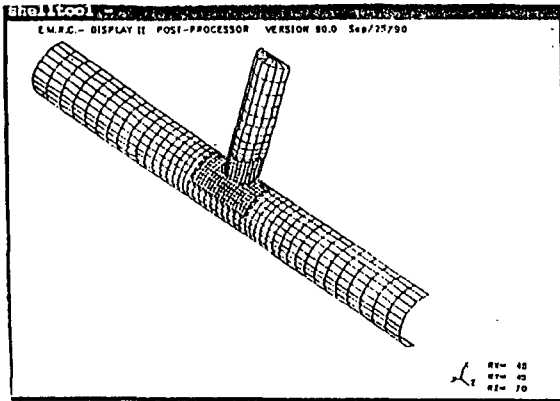


Photo 1. Element Division of Model CCM3

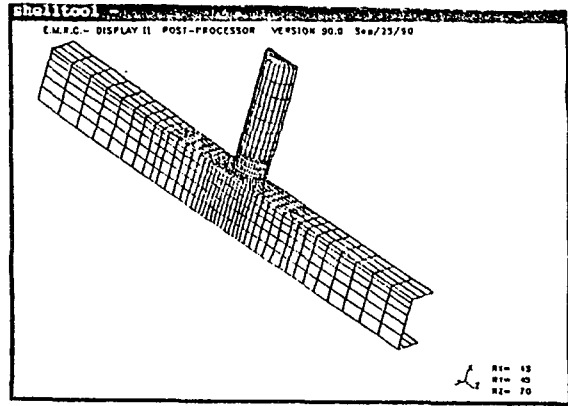


Photo 2. Element Division of Model BCM3

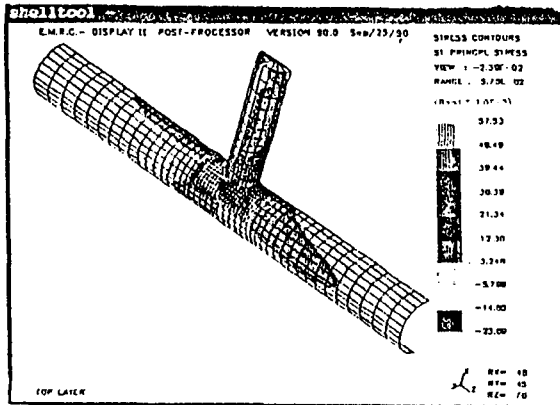


Photo 3. Stress Distribution of Model CCM3

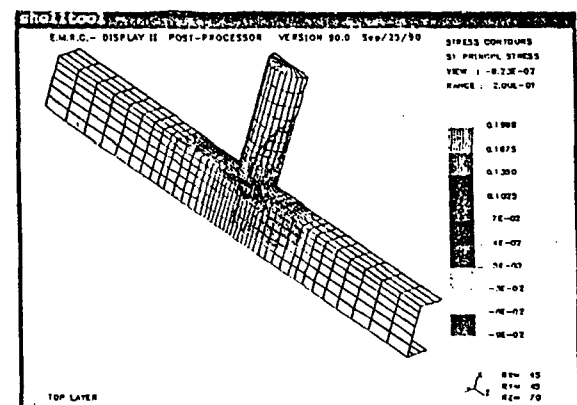


Photo 4. Stress Distribution of Model BCM3

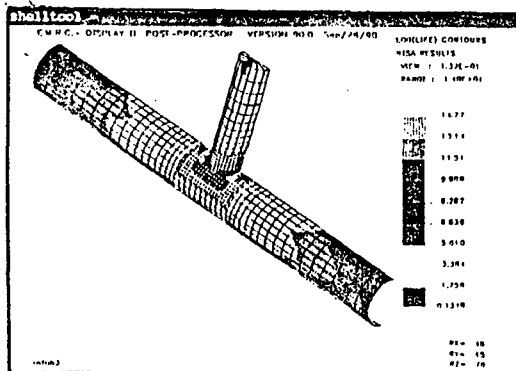


Photo 5. Crack Initiation Life of Model CCM3

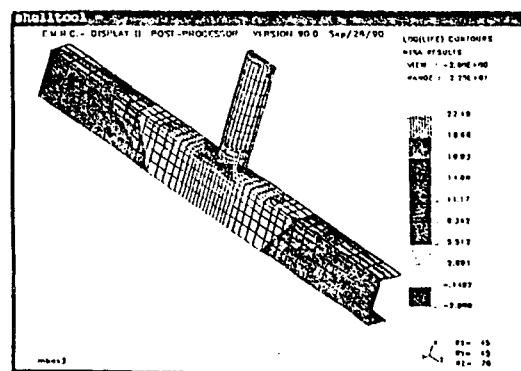


Photo 6. Crack Initiation Life of Model BCM3