

용접변형예측을 위한 용접부 수치 모델링

박정웅^{1*}

Computational Modelling to Predict the Welding Deformation in Steel Structures

Jeong-Ung Park^{1*}

요 약 용접에 의해서 발생하는 변형은 강구조물의 치수를 변화시킬 뿐 아니라 역학적 강도를 저하시켜 강구조물의 제작공정과 공용중 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 특히 토목 강구조물의 경우 제작 및 조립공정에서 용접프로세스에 의해 불가피하게 발생하는 용접변형에 의한 실제치수의 변화를 검토하기 위해 넓은 장소에서 부분 또는 전체 가조립공정을 실시해야 한다. 이러한 가조립된 구조물은 현장에 설치되기 위해 해체하여 운반되어 현장에서 재조립하여 가설된다. 또한 높은 곳에서 작업해야 하므로 안전사고의 우려와 함께 크레인, 족장과 같은 부대장비를 사용해야 하므로 비경제적이다. 따라서 대형 강구조물의 제작시 발생하는 용접변형에 의한 부재오차를 검증하기 위한 가조립 공정을 생략하기 위해 용접변형 예측기법의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 이를 위해 대형 강구조물의 용접변형 예측 기법인 등가하중법을 이용한 용접부 수치모델링을 정립하고 이를 이용해 용접순서와 자중이 용접변형에 미치는 영향을 검토하였다.

Abstract Welding deformation causes critical problems under construction and in use of steel structures by varying the magnitude of the steel structures and deteriorating mechanic strength. Existing method to construct steel structures in civil engineering needs preassembly process for a part of or the whole structures on a broad space to examine the size of structures inevitably varied in the process of welding (assembly process). It leads to waste of time, space and human efforts, worry of safety accidents with the characteristic of the work to be performed on a high place, and non-efficiency and non-economy by using such supplementary equipments as crane. This paper, to remove the needless preassembly process by pre-estimating welding deformation produced under construction of large steel structures, devises a method modeling welded part for applying the equivalence load method and examines the effects of welding sequence and self weight on welding deformation by the method.

key words : Welding deformation, 용접변형, Equivalence load method, 등가하중법, Pre-assembly, 가조립, Welding sequence, 용접순서, dead weight, 고정하중

1. 서론

용접시 발생하는 변형은 강구조물의 치수를 변화시켜 이를 수정 또는 교정하는 공정이 추가됨으로써 생산성 저하를 초래한다. 특히, 토목 강구조물의 경우 공장에서 제작된 구조물을 넓은 가조립장에서 부분 또는 전체 가

조립을 실시하여 구조물의 치수를 검토한 후 이를 다시 해체하여 현장으로 운반되어 조립된다. 이러한 가조립 공정은 많은 시간과 인력 그리고 넓은 공간을 필요로 하고 게다가 높은 곳에서 족장을 설치하고 작업해야하므로 안전사고의 위험성과 함께 크레인과 족장과 같은 부대장비를 사용해야함으로 비경제적인 문제점을 안고 있다. 그럼에도 불구하고 가조립공정을 실시하는 것은 조립공정의 대부분을 차지하는 용접프로세스에 의해 발생하는 구조물의 치수변화를 무시할 수 없기 때문이다. 따라서 대형 강구조물의 제작시 발생하는 용접변형을 사전에 예측하

이 논문은 2005년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

¹조선대학교 토목공학과

*교신저자: 박정웅(jupark@mail.chosun.ac.kr)

여 이를 제작공정에 고려함으로써 불필요한 수정과 교정 작업을 생략할 수 있는 용접변형예측기술이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 용접변형을 예측하기 위해 등가하중법을 적용하기 위한 용접부 모델링기법을 정립하고 이를 이용하여 용접순서와 고정하중(자중)이 용접변형에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 등가하중 결정을 위한 실험 및 해석

용접변형을 예측하기 위해 유한요소법을 이용한 온도 이력에 따른 열탄소성해석[1]법으로 작은 시험편의 용접 변형을 예측하기 위해서도 많은 시간이 소요되므로, 대형 구조물의 용접변형 예측에는 현실적으로 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 소형 시험체에서 발생하는 용접변형 으로부터 등가하중을 결정하고 이를 대형강구조물의 용 접변형을 예측하는 등가하중법[2,3,4]의 적용이 널리 이 용되고 있다. 따라서 여기서는 소형시험편을 이용한 실험 결과로부터 구한 각변형, 횡수축 그리고 종수축 값을 구 하고, 이를 등가하중으로 치환하여, 탄성해석을 실시하고 이를 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2.1 실험

용접조건은 전류 280(A), 전압 31.5(V), 속도 10(mm/s) 이며, 필렛용접시 목두께는 3.5(mm)로 현장조건을 따르 도록 설정하였으며, 이하 모든 실험조건에 동일하게 적용 하였다. 또한 가용접길이와 가용접간격은 각각 500(mm), 50(mm)로 하였다. 용접변형 측정은 용접전 측정위치를 마킹하여 초기변형과 용접후 최종변형을 측정하고, 최종 변형에서 초기변형을 소거하여 구했다. 각변형 시험편의 형상과 치수를 그림 1에 보여 주고 있다. 그림 2는 종급 힘 시험편의 치수와 형상을 보여주고 있다. 부재단면의 용접열원과 종립축의 관계에 의해 발생하는 종급힘변형 을 일으키는 종급힘 등가하중을 도출하기 위해 실시하였 으며, 용접길이는 2,000mm로 종급힘 용접변형이 크게 발 생하도록 다른 시험편 보다 길게 제작하였다. 그림 3 횡 수축 시험편의 형상과 치수를 보여 주고 있다. 횡수축 시 험편은 모재의 상/하 면에 각각 3개의 stiffener를 용접하 여 각변형은 발생하지 않고 횡수축만 발생하도록 제작하 였다. 여기서 Ts는 stiffener의 두께이고, Tf는 하부플랜지 의 두께를 의미한다.

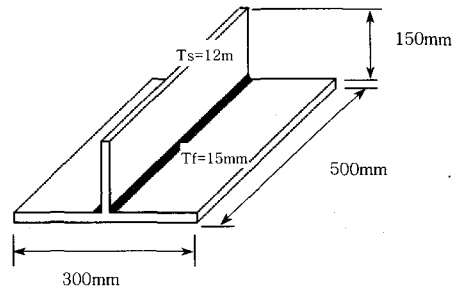


그림 1. 각변형 시험편 형상과 치수

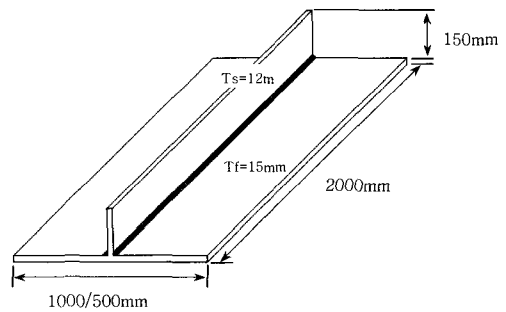


그림 2. 종급힘 시험편 형상과 치수

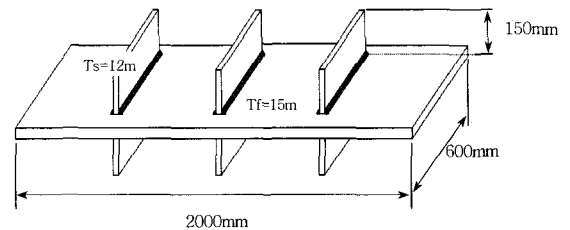


그림 3. 횡수축 시험편 형상과 치수

2.2 용접변형 실험결과 및 등가하중에 의한 해석결과

등가하중법을 용접변형 예측에 적용하기 위해 사용한 프로그램은 MSC. Marc를 사용하였으며, 전/후처리 프로 세스는 MSC. Patran을 사용하였다.

각변형 실험은 필렛용접에 의해 발생하는 각변형량의 평균값 0.00877(rad.)을 등가하중으로 결정하고 탄성해석 을 실시하여 각변형을 재현하였다. 그림 4는 탄성해석을 실시하여 구한 전체 각변형 형상을 보여주고 있다. 그림 5는 탄성해석 결과와 실험결과를 비교하여 보여주고 있 다. 결과에 의하면 해석결과와 실험결과가 잘 일치하고 있어 실험에서 구한 등가하중이 타당함을 보여 주고 있 다.

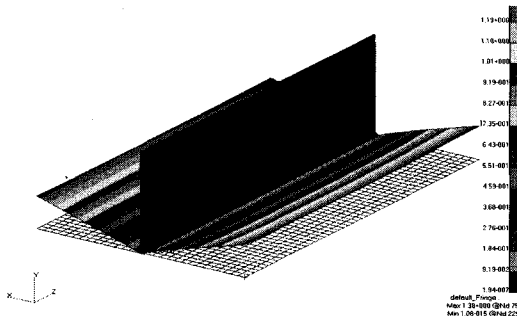


그림 4. 등가하중법에 의한 각변형

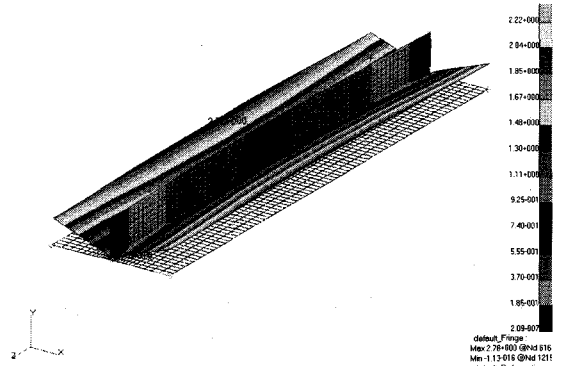


그림 6. 종굽힘 전체변형형상(b=500mm)

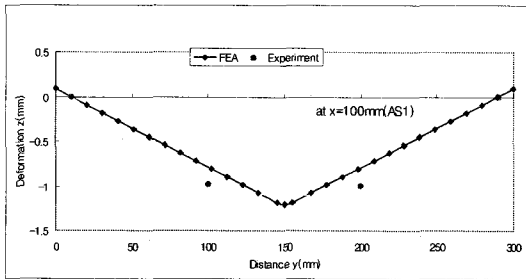


그림 5. 실험과 해석의 각변형결과 비교(x=100mm)

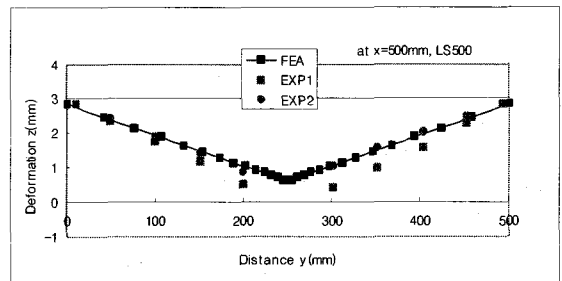


그림 7. 종굽힘변형에 의해 발생하는 각변형(실험/해석) (폭 500mm 시험편, x=500mm)

종굽힘변형에 대한 등가하중을 결정하는 여러 가지 제안식이 있으나, 필렛용접을 모델을 이용하여 제안한 Satoh식[5]을 사용하였다. Satoh식에서 $P_T = 107 Q_{net}(N)$ 이고, Q_{net} 은 아래와 같이 계산하였다.

$$Q_{net} = \eta AV/v \text{ (J/mm)}$$

여기서, 아크효율 $\eta = 0.8$, 전류=280(A), 전압=31.5(V), 속도=10(s/mm)이다.

그림 6은 종굽힘 시험체(b=500mm)에 대해 Satoh 식으로부터 구한 종굽힘 등가하중은 75,499(N)과 각변형 등가하중을 재하하여 구한 전체 용접변형형상을 보여주고 있다. 그림 7은 폭(b)이 500mm의 시험체의 각변형을, 그림.8은 시험체의 종굽힘변형에 대해 실험결과와 탄성해석결과를 비교하여 보여주고 있다. 각변형과 종굽힘 등가하중에 의한 해석결과와 실험결과가 잘 일치하였다.

횡수축량을 측정을 위한 실험에서 시험편의 앞면과 뒷면의 평균으로 하나의 용접부에 발생하는 수축량, 0.17(mm)/1Seam을 구하였다. 이것은 용접변형 예측시 등가하중으로 치환하여 적용된다.

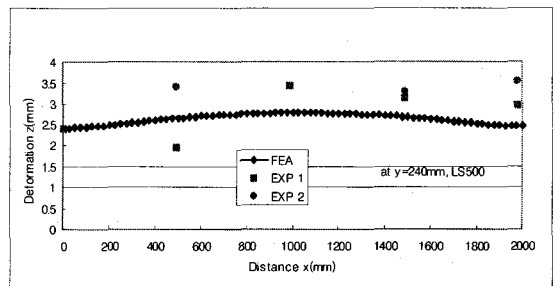


그림 8. 종굽힘변형(실험/ 해석) (폭 500mm 시험편, y=240mm)

3. 단위 모멘트법에 의한 용접순서

강구조물에 용접프로세스가 적용된 이래 용접변형에 의해 구조물의 치수변화와 역학적 강도의 저하 등과 같은 많은 문제점이 발생하였다. 용접변형에 영향을 미치는 인자는 다양하나, 여기서는 용접순서가 용접변형에 미치는 영향에 대해 초점을 맞추었다.

강구조물에 많은 용접부가 존재 할 때 용접순서를 결

정하는 방법으로는 용접부의 강성을 구하고 이로부터 용접순서를 결정하는 단위모멘트법의 적용이 가능하다. 본 연구에서는 단위모멘트법에 의해 용접부의 강성을 구하고 이로부터 용접순서를 결정하여 용접순서가 용접변형에 미치는 영향과 단위모멘트법의 타당성을 검토하고자 한다.

3.1 용접순서 및 변형예측을 위한 수치 모델링

용접순서를 결정하기 위해 그림 9와 같이 용접부를 수치 모델링하고 중앙부에 단위모멘트를 재하하여 용접부의 강성을 계산하였다. 가용접의 효과를 고려하기 위해 용접부에는 6절점 Solid 요소를 사용하여 용접 전에는 가용접 부분만 Solid요소를 생성시킨 후, 용접이 완료되면 용접부 전체 길이에 대해 Solid 요소를 생성시켰다. 그 밖의 요소는 모두 shell요소를 사용하였다. 이때 요소의 크기는 모두 3.5mm인 경우 각장이 5mm이므로 요소의 길이도 5mm로 하였다. 또한 용접 전에는 하부 플랜지와 stiffener 사이의 용접되어 있지 않으므로 0.5mm 이격시켜 모델링했다.

단위모멘트법에 의한 최소용접변형 용접순서는 그림 9의 3번에 작용하는 단위모멘트에 의해 발생하는 각변형량을 단위모멘트로 나누어 그 부분의 강성을 구하고, 일반적으로 강성이 크면 변형도 작게 발생하므로 단위모멘트법에 의해 구한 용접부 강성 중에서 강성이 큰 순서로 용접을 실시하도록 한다.

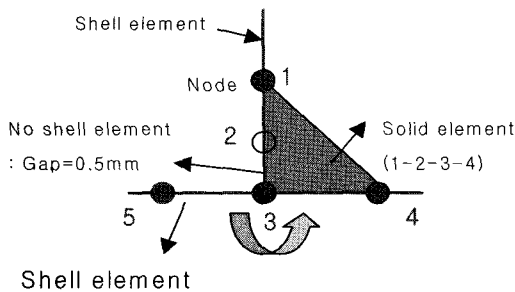


그림 9. 단위 모멘트적용을 위한 용접부 수치 모델링

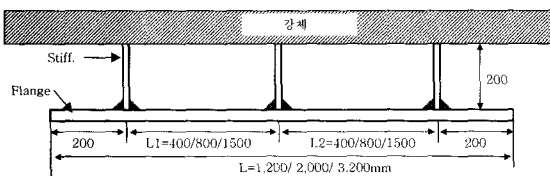


그림 10. 용접순서 시험편 형상 및 치수

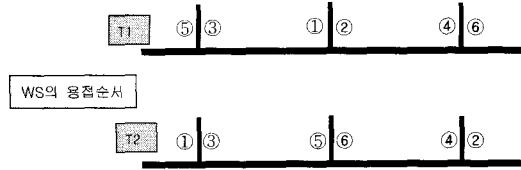


그림 11. 단위 모멘트 법에 의한 용접순서 결정

3.2 용접순서가 용접변형에 미치는 영향

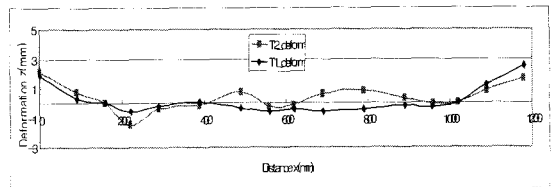
그림 10과 같이 stiffener 사이의 간격(L1과 L2)을 변화시켜 만든 3가지 type의 시험편,

- ① WS400, 총길이(L)= 1,200mm(200+400+400+200mm)
- ② WS800, 총길이(L)= 2,000mm(200+800+800+200mm)
- ③ WS1500, 총길이(L)= 3,200mm(200+1500+1500+200mm)

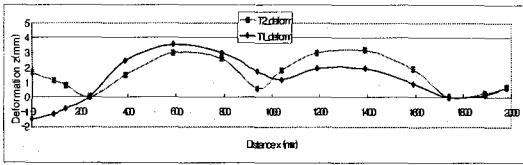
에 대해 단위 모멘트법을 적용하여 하나의 type에 대해 용접변형이 최소가 되는 용접순서(T1)와 최대가 되는 용접순서(T2)를 구하여 모두 6개의 시험편을 제작하였다. 이때 용접길이는 모두 500mm로 하였으며, 용접조건은 등가하중을 위한 실험과 동일한 조건으로 실시하였다.

단위모멘트법에 의해 구한 용접순서를 그림 11에 보여주고 있다. 이때 T1은 용접변형이 최소가 되도록 강성이 강한 용접부로부터 강성이 약한 순서로 용접하고, T2는 반대로 강성이 약한 용접부로부터 강한 용접부 순서로 용접순서를 결정하여 용접변형이 최대로 발생하도록 하였다.

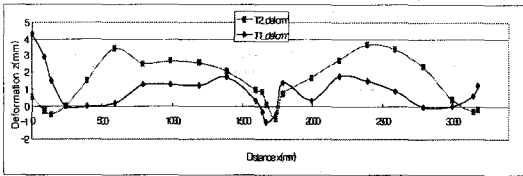
그림 12 (a)는 WS400, (b)는 WS800, (c)는 WS1500의 실험에 의해 측정된 최종 용접변형은 보여주고 있다. 결과에 의하면 WS400과 WS800의 경우 자체강성이 매우 큼으로 용접순서는 용접변형의 크기에 영향을 주지 않았으며, 용접변형량은 WS800의 자체강성이 WS400보다 작으므로 더 크게 발생하였다. 한편, WS1500의 경우 용접변형을 최소화하기 위한 용접순서, T1의 용접변형이 용접순서 T2에 비교하여 약 2배 작게 발생하여 용접순서가 용접변형에 영향을 주고 있는 것을 알 수 있었다.



(a) WS400의 용접변형(T1, T2)



(b) WS800의 용접변형(T1, T2)



(c) WS1500의 용접변형(T1, T2)

그림 12. 용접순서에 따른 용접변형의 영향

4. 자중이 용접변형에 미치는 영향

4.1 실험조건 및 실험결과

용접조건은 전류 280A, 전압 31.5V, 속도 10mm/s 이며, 필렛용접시 목두께는 3.5mm 이다. 이후 모든 실험에서는 동일한 용접조건에 따라 실험을 실시하였다. 또한 가용접길이와 가용접 간격은 각각 500mm, 50mm로 하였다.

그림 13은 Parallel weld path (P_Type) 시험편의 형상과 치수를 보여주고 있다. 실험에 사용한 모재의 두께는 15mm이고, stiffener의 두께는 12mm, 높이는 모두 150mm로 하였다. 실험에 앞서 초기변형을 측정하고, 용접 후 최종변형을 측정하여 초기변형에 의한 영향을 고려할 수 있도록 하였다. 그림 14는 용접순서를 보여주고 있으며, P_t1은 밖에서 안으로 용접하고, P_t2는 안에서 밖으로 용접했다. 이는 용접순서에 따른 과도변형의 형상과 최종변형이 용접순서에 미치는 영향을 검토하기 위함이다.

그림 15는 실험에 의해 측정된 P_Type의 최종변형을 보여 주고 있다. P_t1과 P_t2 모두 전체변형은 거의 비슷한 형상을 하고 있으며, 단부에서 변형이 크게 발생되었고, stiffener 사이는 각변형이 발생하였다. 전체변형은 아래로 볼록한 형태로 발생되었다.

4.2 등가하중법에 의한 용접변형 예측(실험/해석결과 비교)

모델의 밑판과 stiffener는 2차원 4절점 shell요소를 사용하고, 가용접 및 용접부는 8절점 3차원 solid 요소를 사용하였다. 처음 가용접시에는 가용접된 부분만 solid요소

를 생성시키고, 용접이 완료되면 가접된 부분을 포함한 용접부 전체를 solid 요소로 생성시킴으로써 용접순서에 따른 용접부의 강성변화를 고려하였다. 또한 자중을 고려하기 위해 밑판에 접하도록 강제 Surface를 생성시켜 자중에 의해 중력방향으로 발생하는 변형을 비선형 Contact 문제로 해석하였다.

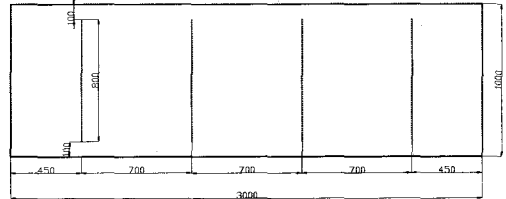
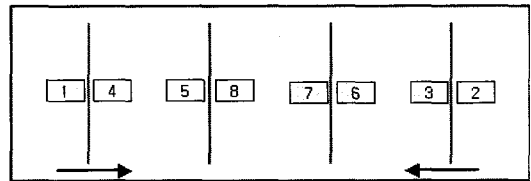
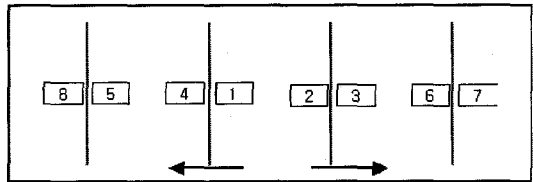


그림 13. 부재의 형상과 치수(P-Type)

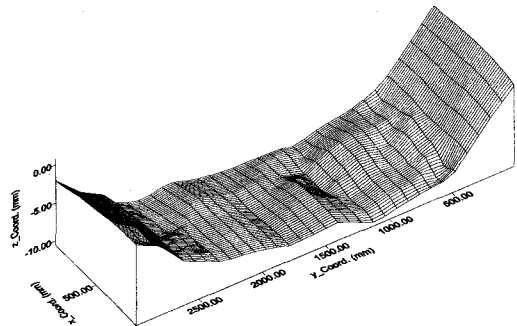


(a) 용접순서 P_t1



(b) 용접순서 P_t2

그림 14. P-Type의 용접순서



(a) P_t1의 실험에 의한 용접변형

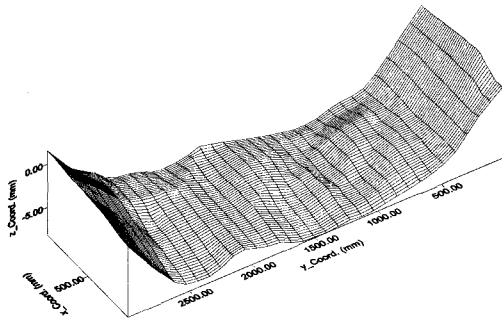
5. 결론

등가하중법을 이용하여 대형 강구조물 제작시 발생하는 용접변형 예측을 위해 용접부 수치모델링 기법을 정립하고, 이를 적용하여 용접순서와 자중이 용접변형에 미치는 영향을 검토했다.

- 1) 등가하중법을 이용하여 대형 강구조물의 용접변형을 예측하기 위해 용접부 및 가용접부를 solid요소로 모델링하여 용접순서에 따라 용접부 강성변화를 고려하였다.
- 2) 또한 강구조물의 자중의 영향을 고려하기 위해 플레이트 하면에 정반과 같은 Rigid body Geometry를 생성시켜 이를 Contact문제로 해석함으로써 자중효과를 고려한 용접변형해석 모델링기법을 제시하였으며, 그 타당성을 실험과 해석을 통해 검증하였다.
- 3) 단위모멘트법에 의해 용접부 강성을 계산하고 강성이 큰 순으로 용접순서를 정하여 용접변형을 최소화시킬 수 있어 단위모멘트에 의한 용접순서도출방법의 타당성을 검증하였다.
- 4) Parallel weld path 부재에 대해 용접변형 예측시 자중의 영향에 대해 검토한 결과, 자중을 고려하지 않은 경우 실제 용접변형량보다 약 3배 정도 크게 나타나 대형강구조물의 용접변형을 예측시 자중의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다.

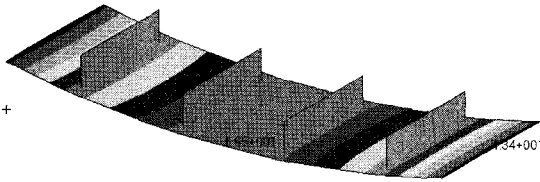
참고문헌

- [1] 寺奇侯夫 : 構造用材料の溶接残留応力溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響に関する研究, 大阪大学博士論文, pp. 53 - 54, 1976.
- [2] T. Nomoto, S. Takechi, and K. Aoyama, "Basic Studies on Accuracy Management System Based on Estimating of Weld Deformations", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 181, No.4, pp.249-260, 1997.
- [3] H. Murakawa, Y. Luo, and Y. Ueda, "Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (First Report) Mechanism of Inherent Strain Production", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 180, pp.739-751, 1996.
- [4] 박정웅, 한명수, "강구조물의 조립변형예측을 위한 용접부 모델링기법 개발", 한국강구조학회 학술대회발표, pp.291-296, 2005. 6
- [5] T. Terasaki, M. Nakatani and T. Ishimura, "Study of

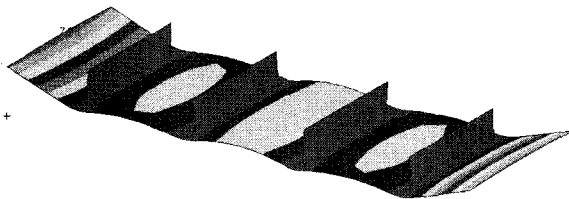


(b) P_12의 실험에 의한 용접변형

그림 15. Parallel weld path 부재의 용접변형(실험결과)



(a) 자중무시해석(최대변형량 23.9mm)



(b) 자중고려해석(최대변형량 4.01mm)

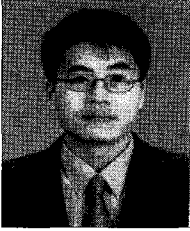
그림 16. 자중의 고려 유/무에 따른 용접변형형상

그림 16(a)는 자중을 고려하지 않고 탄성해석 결과로 중앙부와 단부의 변형의 차이는 약 23.9mm가 발생하여 실험에 의해 용접변형 8mm 보다 약 3배정도 크게 발생한 것을 알 수 있다. 그림 16(b)는 실제현상을 구현하기 위해 자중과 Contact를 고려한 해석결과로 stiffener 사이에 각변형이 잘 나타나고 있으며, 해석에 의한 변형량은 실험에 의한 값보다는 작으나 잘 일치하였다. 따라서 대형 강구조물의 해석시 자중에 대한 효과를 고려하지 않으면 실험결과와 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

Tendon Force Generating in Welded Joint", Journal of the Japan Welding Society, Vol.18, No.3, pp.479-486, 2000.

박 정 응(Jeong-Ung Park)

[정회원]



- 1992년 2월 : 조선대학교 조선공학과 (공학사)
- 1995년 3월 : 오사카대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 11월 : 오사카대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

강합성구조, 용접부강도, 수치해석