잔류응력을 고려한 점용접이음재의 피로설계

손일선*· 배동호**· 홍정균***· 이범노****

(1999년 4월 17일 접수)

Fatigue Design of Spot Welded Lap Joint Considered Residual Stress

Ilseon Sohn, Dongho Bae, Jungkyun Hong and Bumno Lee

Key Words: Spot Welding(점용접), IB(In-plane Bending) Type Specimen(면내굽힘형 시편), Fatigue Strength(피로강도), Welding Residual Stress(용접잔류응력), Nonlinear Finite Element Analysis(비선형해석), X-ray Diffraction Method(X선 회절법), Maximum Principal Stress(최대주응력), Fatigue Limit(피로한도)

Abstract

Because welding residual stress is formidable result in electric resistance spot welding process, and it detrimentally affect to fatigue crack initiation and growth at nugget edge of spot welded lap joints, it should be considered in fatigue analysis. Thus, accurate prediction of residual stress is very important. In this study, nonlinear finite element analysis on welding residual stress generated in process of the spot welding was conducted, and their results were compared with experimental data measured by X-ray diffraction method. By using their results, the maximum principal stress considered welding residual stress at nugget edge of the spot welded lap joint subjected to tension-shear load was calculated by superposition method. And, the $\Delta P - N_f$ relations obtained through fatigue tests on the IB-type spot welded lap joints was systematically rearranged with the maximum principal stress considered welding residual stress. From the results, it was found th2at fatigue strength of the IB-type spot welded lap joints could be systematically and more reasonably rearranged by the maximum principal stress ($\sigma_{1\max-res.}$) considered welding residual stress at nugget edge of the spot welding point.

1. 서 론

점용접이음재에 대한 응력분포 상황을 해석하고, 피로강도를 평가하는 것은 차체와 그 밖의 점용접된 구조물의 강성과 내구성 향상을 위한 설계정보를 획득하는데 매우 중요하고도 필요한 사항이 되고있다. 이와 관련하여, 지금까지 많은 연구자들이 여러 가지 형태의 점용접이음재와 골조부재(structural member)들에 관한 응력해석과 피로강도 평가를 이론과 수치해석 및 실험해석으로 수행해 왔고, 그 실적도 상당히 축적 되어있기도 하다.[1~6] 그런데, 점용접에 의해서 제작 및 조립되는 자동차 등과 같은 박판 구조물의 강도설계에, 지금까지의 연구결과들을 합리적으로 적용하기 위해서는 점용접부 이음재에 대한 응력분포 해석과 강도 평가시 용접입열량에 의한 점용접부의 용접잔류응력(welding residual stress)이 고려된 합리적인 피로해석이 이루어져야 함에도 불구하

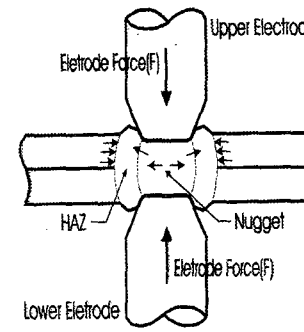
* 회원, 대우자동차 부평기술연구소
** 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : dhba@me.skku.ac.kr
TEL : (0331)290-7443 FAX : (0331)290-5849
*** 바텔연구소
**** 오하이오 주립대학교

고, 이것이 무시되어왔다. 그래서, 최근에는 점용접에 의한 용접잔류응력을 정량적으로 해석하고자 하는 연구가 시도되고 있는데 예를 들면 다음과 같다. C. L. Tsai[7] 등은 저항 점용접 과정에서 용접부 너깃(nugget) 생성과정을 모의(simulation)한 유한요소 해석모델을 제안하여 용접잔류응력의 수치해석을 위한 너깃형상 재현기법을 제공하였다. M. Anastassiou[8] 등은 점용접부의 용접잔류응력과 미세조직 분포에 대한 실험해석을 통하여 점용접부의 용접잔류 응력분포 상황에 관한 정보를 제공하였다. 특히, 피로균열의 성장위치인 용접 너깃중앙부에서는 인장 잔류응력이 노치 근처에서는 압축 잔류응력이 분포하고 있음을 제시하였다. Nied[9]는 유한요소법을 이용한 점용접부의 응력해석시 용접 너깃재현을 위하여 고려되어야 할 물성치와 전극에 대한 모델링 기법을 제시하였다.

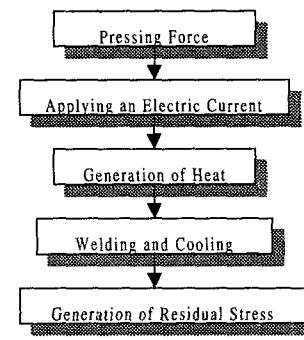
이상과 같은 지금까지의 연구결과를 통하여 점용접부의 너깃생성과 용접잔류응력 분포상황을 이해하게 되고, 강도평가에 있어서 용접잔류응력을 고려해야할 필요성과 타당성을 인식하게 되었으나, 점용접부의 피로균열 발생과 성장 기점이 되는 이음재 내표면의 용접 너깃단과 그 주변에 대한 용접잔류응력 해석은 이렇다할 진전이 없는 실정이다.

그래서, 본 연구에서는 점용접 구조물의 강도설계상 요구되는 점용접부의 응력분포 상황과 피로강도 평가를 내표면의 용접잔류응력을 고려해서 보다 합리적인 방법으로 평가하고자, 점용접 과정의 열 사이클에 의해 발생되는 용접잔류응력을 비선형 유한요소해석과 X-ray 회절법(x-ray diffraction method)을 이용한 실험해석을 통하여 구하고, 이와 병행하여, 인장-전단력에 의한 면내 굽힘하중(in-plane bending load)을 받는 일점 점용접이음재(이하, IB형 점용접이음재)의 용접부 너깃주위에 대한 응력분포를 유한요소법으로 해석하였다.

그리고, 이들의 결과를 중첩함으로써, 잔류응력을 고려한 용접부 내표면 너깃단 최대주응력을 계산하고 그 결과를 가지고 IB형 점용접이음재의 피로강도를 재평가하였다.



(a) Illustration of spot welding



(b) Process by resistance spot welding

Fig. 1 Illustration of spot welding principal and process of welding residual stress generation

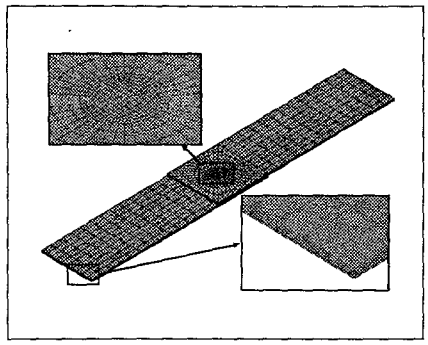
2. 잔류응력 해석

2.1 해석모델

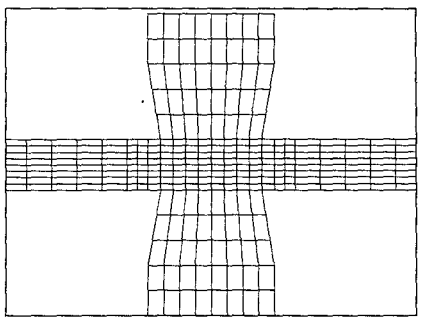
본 연구에서는 전기저항 용접의 하나인 점용접 과정에서 발생되는 용접잔류응력을 용접부 내·외표면에 대하여 수치해석과 실험해석을 하였다.

재료의 전기저항특성을 이용한 점용접은 발열기구(heating mechanism)에 의한 접촉저항열과 금속내부의 고유저항열 및 가압력을 이용하여 접합하는 방법이다. 이와 같은 원리에 의하여 냉간압연 강판을 Fig. 1 (a)과 같이 상·하 전극으로 가압 후 통전하게 되면, 가압된 모재는 전기저항열(electric resistance heat)에 의해서 Fig. 4와 같이 상변태온도 이상으로 가열되었다가, 자연 방열과 열전달에 의해서 다시 냉각된다.

이러한 전기저항 용접과정 중에 야기되는, 가열과 냉각의 용접 열싸이클로부터 팽창과 수축이

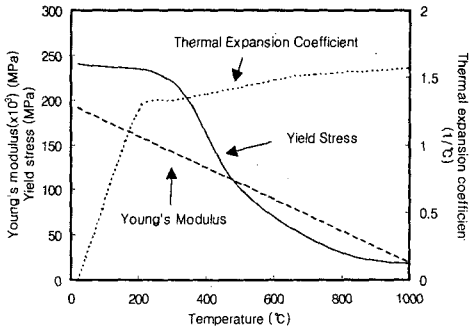


(a) Axial view without electrode

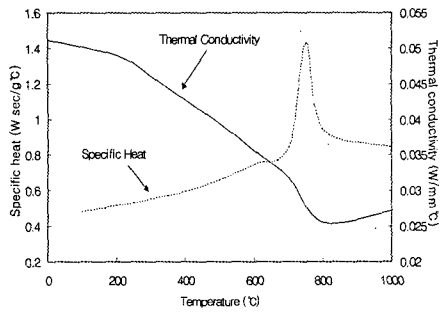


(b) Cross section view at nugget area

Fig. 2 Non-linear analysis model for spot welding residual stress



(a) Mechanical properties



(b) Thermal properties

Fig. 3 Temperature dependent material properties of SPCC[10]

발생하게 되어, 용접후 용접부에는 전극가압력에 의한 압상흔과 용접잔류응력이 남게 된다. 이상의 점용접에 의한 용접잔류응력 발생과정을 도시하면 Fig. 1 (b)과 같다.

Fig. 2 (a)는 점용접부의 용접잔류응력을 해석하기 위해 작성된 비선형 유한요소 해석모델이다. 모델의 요소(element)는 8 절점 평면변형 요소(plane strain element)이며, 너깃부는 정확하고 상세한 해석결과를 얻기 위하여 세분화하였다. 그리고 두께 1㎜의 모재는 너깃의 생성과정 및 변형상태를 면밀히 관찰하기 위하여 4개 층으로 분할하였고 특히, 너깃부 상·하 평판의 내표면 요소들은 절점을 동일하게 함으로써 두께 2㎜의 너깃요소를 생성하였다.

점용접의 특징인 용접전극(electrode)에 의한 가압력을 재현하기 위하여 너깃 상·하에 각각 Fig. 2(b)와 같이 강체요소(rigid element)로서 용접전극을 모델링하여 가압하고, Table 3의 용접조건으로 용접하였다.

온도의존성을 고려해야하는 재료의 물성(material property)은 Fig. 3으로부터 온도변화에 대응할 수 있도록 각 온도구간마다 적정 값을 적용하였다.

Fig. 3은 자동차용 냉간압연강판인 SPCC의 온도변화에 따른 재료물성치 변화를 나타내고 있다. 항복강도는 300℃ 이상에서 감소 폭이 크고, 비열(specific heat)은 800℃ 근방에서 비정상적인 변화를 나타낸다.

종탄성계수는 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하고, 열전도도(thermal conductivity)는 800℃까지 거의 선형적으로 감소하다가 그 이상의 온도에서 약간 상승하는 경향을 나타내었다. 그리고, 열팽창계수는 200℃까지는 급격하게 선형적으로 증가하다가, 200℃ 이상에서는 온도에 대한 민감도가 감소함을 알 수 있다. 그리고, 점용접시 전기저항열에 의한 용접부 온도분포는 RWMA에서 제안한 Fig. 4의 온도분포곡선[11]을 이용하여 재현하였다.

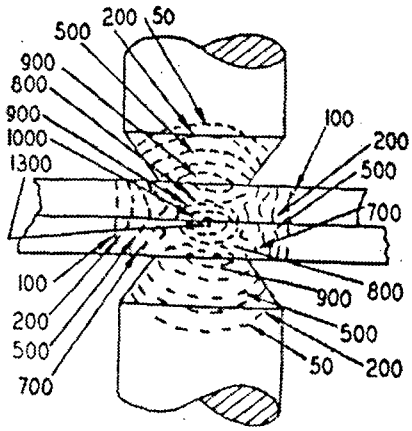


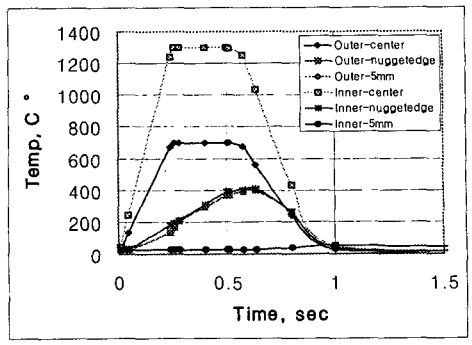
Fig. 4 Estimated instantaneous spot welding temperature at the complete of weld[11]

비선형해석 프로그램은 ABAQUS를 사용하였으며, 용접시간 동안 가열과 가압을 동시에 재현하고, 용접 후 냉각과정을 통하여 용접부 온도가 상온까지 냉각되었을 때의 용접잔류응력을 계산하였다. 그리고, 해석 중 용접입열에 의한 재료의 상변태와 이로 인한 체적변화 및 Fig. 3 이외의 열역학적, 금속학적 미소성질들은 무시되었다. 사용된 해석모델의 요소수는 4300개이고, 절점수는 6151개이다.

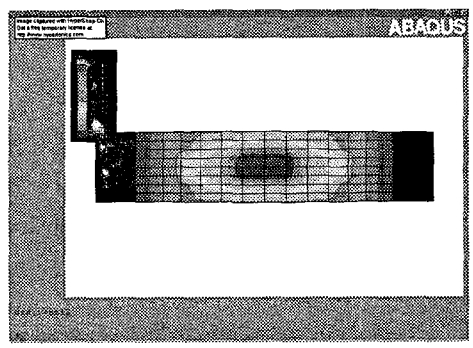
본 연구에서는 이상의 수치해석 결과를 검증하기 위해 실험적 해석을 병행하였다. 점용접이음재의 용접부에 대한 용접잔류응력을 해석하기 위한 실험장치는 RIGAKU 사의 X선 응력 측정장치(model : MSF-2M)를 사용하였으며, 실험조건은 시편표면에 X선 입사각(ϕ_0)을 각각 0° , 15° , 30° 및 45° 로 설정하고, 전압은 30 kV, 전류는 6 ㎃로 하였다.[12]

점용접부 외표면의 용접잔류응력은 용접부 중심에서 너깃단방향으로 시편 중심을 따라서 측정하였고, 내표면의 용접잔류응력은 상 · 하 평판의 한 쪽을 습식마모법으로 제거한 후 외표면과 동일한 방법으로 측정하였다. 이상의 용접부 내 · 외표면에 대한 잔류응력 측정은 각각 3회씩 반복수행하여 그 평균값을 구하였다.

2.2 잔류응력 해석결과



(a) Temperature profiles



(b) Nugget generation

Fig. 5 Temperature distribution analysis and nugget generation of spot welded lap joint

Fig. 5(a)는 점용접 영사이클에 의하여 야기되는 용접부 온도분포에 대한 유한요소 해석결과를 내 · 외표면의 너깃중심과 그 주위에 대해서 비교 도시한 것이며, Fig. 5(b)는 용접이 시작되고 0.5초(15 cycle) 경과된 후의 너깃생성 상황을 나타낸 것이다.

용접부 너깃중심의 최대온도는 외표면이 700℃, 내표면이 1300℃로 내표면이 높다. 이것은 너깃 외표면에서 접촉하는 전극이 냉각수에 의해 냉각되므로 전극의 온도를 700℃로 낮게 설정하였기 때문에 열전달에 의한 냉각효과에 의하여 내표면보다 온도가 낮은 것으로 판단된다. 그러나, 내 · 외표면의 너깃단의 온도는 최대 400℃로 너깃중심부 보다 낮고 전체적으로 동일한 분포를 나타내고 있으며, 너깃중심으로부터 5㎜ 떨어진 모재부의 온도는 내 · 외표면 공히 방열과 열전달에 의해 매우 낮은 분포형태를 보였다.

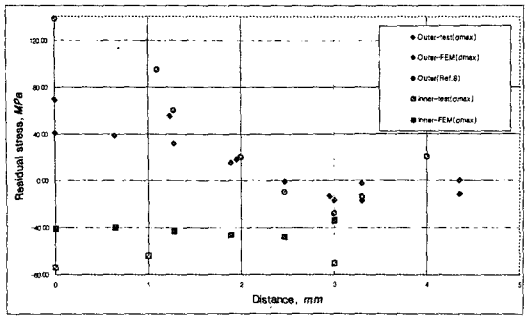


Fig. 6 Residual stress distribution at spot welding point

이상의 온도분포로부터 너깃은 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 너깃 내부로부터 외부로 열 확산에 의해 타원형의 너깃이 생성되고 있음을 알 수 있으며, 이것은 실제 용접된 너깃단면의 형상이 타원형인 것과 일치된 결과이다.

Fig. 6은 점용접부 내·외표면의 용접잔류응력 분포를 수치해석 결과와 실험해석 결과를 비교 도시한 것이다. M. Anastassiou[8] 등은 용접부 외표면에서 측정된 잔류응력의 분포형태는 용접부 너깃의 중심부에서 높은 인장 잔류응력이 존재하고, 너깃단으로 이동하면서 압축 잔류응력으로 변화되다가 너깃단으로부터 열영향부(heat affected zone)에 이르러 최대 압축응력이 존재한다고 밝혔다.

본 연구의 외표면에 대한 실험해석과 수치해석 결과 공히 이들의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 외표면 너깃 중심에서 최대 인장 잔류응력이 발생하고 있으며, 그 값은 실험치가 70MPa 이고, 수치해석 결과는 이보다 낮은 40MPa을 보였다. 두 결과 공히 너깃단으로 이동하면서 감소하다가 너깃단 주변에서는 압축 잔류응력을 나타내고 있으며, 최대 압축잔류응력은 실험치가 -14MPa, 수치해석 결과는 -17MPa로서 거의 동일한 값을 나타내었다. 너깃용접부에서 실험과 수치해석 결과가 차이를 보이는 것은 실제 용접과정에서 야기되는 상변태와 조직변화 등의 영향이 수치해석에서는 재현되지 못했기 때문으로 생각된다. 그러나, 피로균열 발생과 성장에 민감한 영향을 미치는 너깃단에서의 잔류응력 이론해석 및 실험해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

또한, 용접부 너깃 내표면에서의 잔류응력 분포는 실험해석과 이론해석 모두 거의 일정한 값을 가지는 경향을 나타내고 있다. 실험치는 -75 MPa이고, 수치해석 결과는 -38MPa이며, 너깃단에서는 너깃중심에 비해 약간 낮은 값을 나타내었다. 특히, 실험치가 큰 압축응력으로 분포하는 이유는 습식마모법으로 너깃상부를 제거할 때, 용접잔류응력의 이완과 기계가공에 의한 가공경화의 영향 때문으로 보여진다.

3. IB형 점용접이음재의 응력해석

3.1 해석모델

IB형 일점 점용접이음재에 인장-전단력이 가해지면, 점용접부에는 면내굽힘력(In-plane bending force)이 작용하여 박판 특유의 복잡한 변형형태를 나타낼 뿐만 아니라, 이로 인하여 피로균열(fatigue crack)은 점용접부 부하측 너깃단에서 발생 및 성장하여 외표면으로 나타나는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 이러한 변형형태와 응력분포 상황을 해석하기 위해 Fig. 7의 3차원 유한요소법 해석모델(model)을 작성하였다. 상·하 평판의 요소분할은 대칭성을 고려하여 공통적으로 하였으며, 또한, IB형 점용접이음재의 기하학적 특성에 의해서 인장-전단력에 의한 너깃단 최대주응력 발생위치가 일정하지 않을 것으로 보고, 직경 6 ㎜의 너깃단 응력집중 범위를 쉽게 확인하기 위해서 원주를 각각 5도씩 분할하였다. 너깃내부는 원주방향의 요소분할에 따른 지나친 세분화와 요소수의 증대를 억제하기 의해서 사각형 요소를 적용하였으며, 두께는 상·하 평판 두께의 2배가 되도록 하여 일체화시키고, 종탄성계수(Young's Modulus)를 모재보다 80% 크게 설정하여 계산하였다. 점용접 해석시 너깃의 기계적 성질을 고려하는 것 중에서 너깃 종탄성계수의 실험적인 측정법은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 모재와 동일하게 취급하는 경우가 많다. 그 경우 너깃주위의 응력해석 결과는 모재와 E값을 달리한 경우와 큰 차이가 없기 때문이다. 하지만, 그럼에도 불구하고 본 논문에서는 점용접이 전극으로 가압 후, 통전이라는 과정을 거치므로 가압에 의한 압축변형과 통전에 의한 열변형이 복합적으로 발생하기 때문에 모재와 다른 기계적 성질을 나타내리라 가정하고, 모재와 구별하는 의미에서 80%

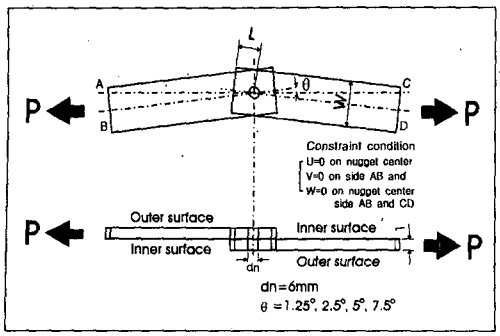


Fig. 7 3-dimensional FEM model of IB type spotwelded lap joint

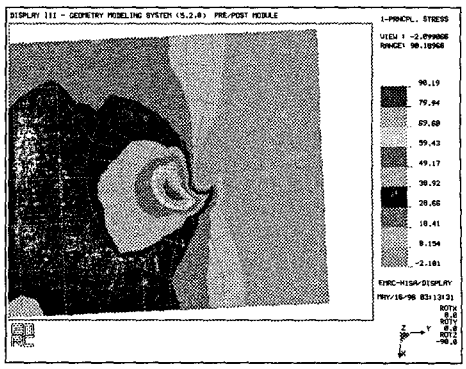


Fig. 8 Maximum principal stress distribution on the inner surface of the upper plate

큰 값을 사용하였다.

해석모델의 전체 요소수는 1164개, 절점수는 1992개이며, 해석프로그램은 MSC/NASTRAN을 사용하였다. 그리고, 인장-전단력의 부하방식은 해석의 편의상 9.81MPa이 되도록 Fig. 7에 표시된 방향으로 가하였으며, Fig. 10의 피로강도를 평가하기 위한 최대주응력 계산의 경우는 Fig. 9의 실 하중을 동일한 방법으로 가하여 수행하였다.

3.2 응력해석 결과

Fig. 8은 IB형 점용접이음재의 3차원 기본모델에 대한 점용접점 주위의 주응력분포를 나타낸 것이다. 시편에 인장-전단하중이 작용함으로써 응력분포에 실질적으로 관여하는 분담하중인 면내력과 면내굽힘력(in-plane bending force) 및 면외굽힘모우멘트(out of plane bending moment)의 조합에 의해 야기되는 최대주응력(σ_{1max})의 발생범위는 시편 길이방향의 중심선으로부터 인장-전단력에 의한 회전변형 방향과 반대방향으로 -20° ~ +40° 범위 내에서 발생하였으며, 너깃을 중심으로한 부하측 영역에서는 인장응력이 넓게 분포하고, 이음각도가 증가할수록 인장응력의 분포영역이 시편의 회전방향으로 이동함을 관찰 할 수 있었다.

그리고, 이음각이 5° 이상인 경우에는 부하측과 부하측 반대쪽 너깃단에서도 인장응력이 발생함을 관찰 할 수 있었는데, 이것은 동일한 인장-전단 하중하에서 시편의 이음각도가 클수록 굽힘과 면내비틀림변형이 커지기 때문인 것으로 간주

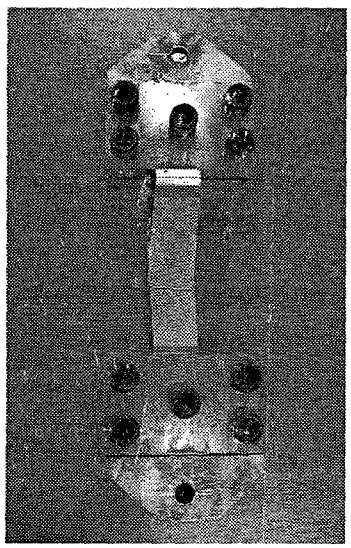


Fig. 9 Configuration of a grip for IB type spotwelded lap joint

된다. 또 점용접 너깃내부에 있어서는 이음각이 클수록 면내 비틀림변형이 커서 응력이 증가되는 경향을 보였다.

4. 피로실험

4.1 시편 및 실험방법

이상과 같은 응력해석 결과를 실제 구조물의 피로설계에 반영하기 위해서는 피로강도 평가가 필수적이므로, 본 연구에서는 다음과 같이 피로실험을 수행하였다.

본 실험에 사용된 재료는 자동차 차체구조용으

Table 1 Chemical composition of specimen (Wt, %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Fe
SPCC	0.12	0.01	0.012	0.015	0.007	0.025	0.045	Rem.

Table 2 Mechanical Properties of Specimen

	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
SPCC	307.0	168.4	47

Table 3 Welding Condition of Specimen

	Electrode Force (F)	Welding Current (I)	Welding Time (Cycle)
Welding Condition	1962 *N*	8.3 *kA*	15 Cycles

로 많이 사용되고 있는 냉간압연강판(SPCC)이며, 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다. 점용접 조건은 Table 3의 RWMA Class-C를 기준으로 하였고, 전극의 직경은 6㎜이다. 그리고, 피로시험 장치는 서보-유압식 피로시험기(미국 MTS사, 용량: ±10 ton)를 사용하였다.

일반적으로 TS(tension shear)형 시험편의 피로실험은 단순평판 그립을 이용하여 실험을 수행하고 있으나, IB형 시험편의 경우에는 인장-전단하중이 시험편에 적용하면 내표면 굽힘변형(in-plane bending deformation)이 발생하기 때문에 단순 평판그립(grip)을 사용할 수 없다.

따라서, 본 실험에서는 인장-전단하중에 의한 면내굽힘변형의 효과가 충분히 반영될 수 있도록 그립(grip)을 Fig. 9와 같이 제작하여 사용하였다.

공기 중에서 피로실험은 피로균열의 성장특성에 대한 하중반복속도의 영향이 미소하기 때문에 20~130Hz에서 실험을 수행하는 것이 일반적이므로,[13] 본 연구에서는 하중반복 속도를 25Hz로 하여 피로실험을 수행하였고, 시편에 가해준 피로하중의 형태는 하중비($R = P_{min}/P_{max}$) 0인 완전편진 정현파이다. 피로수명은 시편 부하측 너깃단에서 발생 및 성장된 균열이 시편 부하측 외표면에 나타나서 균열이 너깃직경과 동일한 길이로 진전되었을 때까지의 하중반복수(cycles)로 결정하였으며, 피로한도(fatigue limit)는 10^7cycles까지

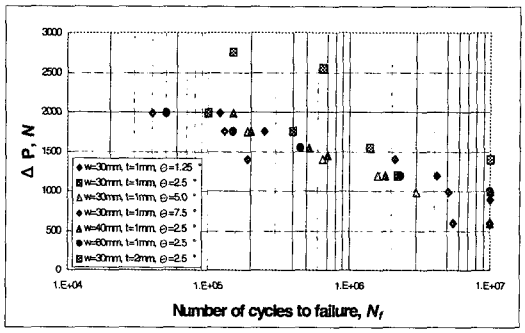


Fig. 10 $\Delta P - N_f$ Relation for IB type single spot welded lap joint

피로균열이 발생하지 않은 하중으로 하였다.

4.2 실험결과

Fig. 10은 여러 가지 기하학적 형상을 갖는 IB형 일점 점용접이음재에 대한 피로실험 결과를 나타낸 것으로서, 그림에서 종축은 하중범위(ΔP), 횡축은 피로수명(Fatigue life, N_f)을 나타내고 있다.

Fig. 10의 하중범위-피로수명의 관계를 나타낸 $\Delta P - N_f$ 선도는 기하학적 영향에 의한 피로강도 데이터의 분산폭이 커서 IB형으로 점용접된 실구조물의 장수명 설계를 위한 통일적이고 체계적인 설계기준을 설정하기가 곤란하다.

이러한 문제를 개선하기 위해서 점용접부 너깃단의 최대주응력으로 여러 가지 형상을 갖는 점용접이음재의 피로강도를 통일적으로 평가하는 방법을 제시한 연구결과도 있지만,[14] 이 경우 점용접부 너깃단 최대주응력(σ_{1max})은 용접잔류응력이 고려되지 않은 결과이기 때문에, 용접잔류응력의 영향이 고려된 새로운 파라미터(parameter)에 의해서 피로강도가 평가될 필요가 있다.

5. 잔류응력을 고려한 피로강도 평가

점용접 구조물의 장수명 설계를 위해서는 통일적이고 체계적인 피로강도 평가가 요구된다. 지금까지 여러 연구자들이 이와 관련해서 수치해석과 실험해석을 통하여 여러 가지 형상을 갖는 점

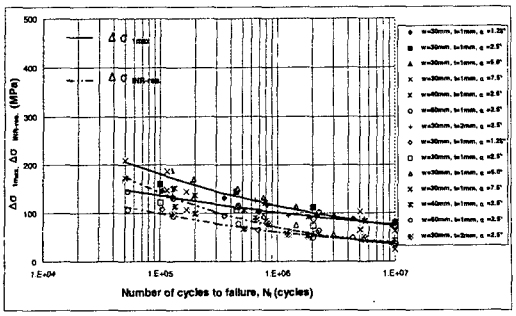


Fig. 11 Comparison of $\Delta\sigma_{1\max} - N_f$ and $\Delta\sigma_{INR-res.} - N_f$ for IB type single spot-welded lap joint

용접이음재의 피로강도 평가에 관하여 연구를 수행하고 있으나,[15] 잔류응력을 고려한 피로강도 평가결과는 아직 보고된바가 없는 듯하다. 그러나, 박판 구조물 제작을 위한 점용접 과정에서 용접잔류응력 발생은 불가피하고, 그 크기 또한 Fig. 6의 결과에서 알 수 있는바와 같이 무시할 수 없을 정도이기 때문에 점용접에 의한 박판구조물의 합리적인 장수명 설계기준을 확립하기 위해서는 용접잔류응력이 고려된 새로운 피로강도 평가가 이루어져야 한다.[16]

따라서, 본 연구에서는 인장-전단하중을 받는 IB형 점용접이음재의 응력해석 결과로부터 얻어진 잔류응력을 고려하지 않은 너깃단 최대주응력(σ_{1max})과, 잔류응력 해석결과로부터 얻어진 너깃단 용접잔류응력($\sigma_{res.}$)을 식(1)과 같이 중첩함으로써, 잔류응력을 고려한 너깃단 최대주응력 $(\sigma_{1max})_{res.}$을 계산하여 피로강도를 재평가하고자 하였다.

Fig. 11은 Fig. 10의 IB형 일점 점용접이음재에 대한 하중범위-피로수명($\Delta P - N_f$) 관계를 점용접부 너깃단 내표면에서의 잔류응력을 고려한 최대주응력범위($\Delta\sigma_{INR-res.}$)로 재정리한 $\Delta\sigma_{INR-res.} - N_f$ 결과를 잔류응력이 고려되지 않은 최대주응력범위($\Delta\sigma_{1\max}$)로 정리한 $\Delta\sigma_{1\max} - N_f$ 결과와 비교 도시한 것이다.

$$(\sigma_{1\max})_{res.} = (\sigma_{1\max}) + (\sigma_{res.}) \quad \text{----------(1)}$$

$(\sigma_{1max})_{res.}$: Maximum principal stress considered the residual stress

$(\sigma_{1\max})$: Maximum principal stress not considered residual stress

$(\sigma_{res.})$: Residual stress

Fig. 10과 같이 피로강도 데이터를 $\Delta P - N_f$로 나타내게 되면, 일반적으로 시편의 기하학적 형상, 재료성질 등에 따라 상당히 분산되기 때문에, 제 인자를 종합적으로 고려한 강도평가가 불가능하다. 따라서, 이 문제를 개선하기 위하여 새로운 파라메터를 이용하여 Fig. 10을 재정리하였다. Fig. 11에서 나타난 것과 같이 고하중 단수명 영역에서 약간의 분산이 발생하는 것은 박판 특유의 대변형에 의한 영향이고, 제 하중 장수명 영역(실제 관심영역)에서는 피로강도가 통일적으로 재정리됨을 알 수 있고, 용접잔류응력을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우의 피로한도(fatigue limit)비는 0.52 정도로서, 용접잔류응력(welding residual stress)을 고려하지 않은 피로한도는 용접잔류응력을 고려한 경우에 비해 약 48% 과대 평가되고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

점용접 구조물의 장수명 설계기준을 확립하기 위한 기초연구로서, IB형 일점 점용접이음재의 피로수명에 영향을 미치는 용접부의 용접잔류응력을 비선형해석을 이용한 수치해석 방법과 X선 회절법을 이용한 실험적 방법으로 구하고, 이와 병행하여, 인장-전단하중을 받는 IB형 점용접이음재의 용접부 너깃단의 용접잔류응력이 고려되지 않은 최대주응력을 수치해석적 방법으로 구했다.

그리고, 이들 결과를 중첩함으로서, 잔류응력을 고려한 너깃단 최대주응력을 구하였다. 이를 실구조물의 장수명 설계에 적용하고자 하중범위로 표시된 $\Delta P - N_f$ 관계를 잔류응력을 고려한 용접부 너깃단 최대주응력으로 재정리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 점용접부 너깃 내표면에서의 용접잔류응력은 압축이고, 그 크기는 최대 38MPa 이다.

(2) IB형 점용접부 내표면 너깃단에서의 용접잔류응력을 고려한 최대주응력 $\sigma_{1max-res.}$과 용접잔류

응력을 고려하지 않은 최대주응력(σ_{1max})의 비(ratio)는 0.52이다. 이것은 용접잔류응력을 고려하지 않은 경우가 고려한 경우에 비하여 48%가 과대평가 되어 있음을 의미한다.

(3) 점용접 구조물의 합리적인 장수명 설계기준을 설정하기 위해서는 용접부의 용접잔류응력을 고려함이 타당하다. 따라서, 지금까지 축적된 피로강도 data는 잔류응력을 고려하여 재정리 할 필요가 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Fujimoto, 1979, "The Stress and Displacement of IB Type Spot-welded Lap Joint under Tension-Shear Load," *JSAE* Review, No. 17.

(2) ASTM, 1981, "Residual Stress Effect in Fatigue," *ASTM* STP 776.

(3) Bae, D. H., 1981, "The Fracture Mechanical Fatigue Strength Evaluation of IB Type Spot-Welded Lap Joint under Tension-Shear Load," KSAE Review, Vol. 13, No. 5, pp. 42～50.

(4) Radaj, D., Zhang, S., 1995, "Geometrically Nonlinear Behavior of Spot-welded Joint in Tensile and Compressive Shear Loading," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 2, pp. 281～294.

(5) Radaj, D., Zhaoyun, Z. and Mohrmann, W., 1990, "Local Stress Parameter at The Weld Spot of Various Specimen," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 37, No. 5, pp. 993～951.

(6) Huda, H., 1997, "Electro Thermal Analysis of Electric Resistance Spot-welding Process by 3-D FEM," *Journal of Materials Processing Technology*, No. 63, pp. 672～677.

(7) Tsai, C. L. and Dickinson, D., 1989, "Study of Nugget Formation in Resistance Spot-welding using Finite Element Method," *1989 Material Park conference, ASM International Materials*, pp. 43～53.

(8) Anastassiou, M., 1990, "Residual Stress and Micro Structure Distribution in Spot-welded Steel Sheet; Relation with Fatigue Behavior," *Material Science and Engineering*, A125, pp.141～156.

(9) Nied, H. A., 1984, "The Finite Element Modeling of the Resistance Spot Welding Process," *Welding Research Supplement*, pp. 123～132.

(10) Goldsmith, A., 1961, "Handbook of Thermo Physical Properties of Solid Materials," *Reversed Edition*, Vol. Ⅱ, The Macmillan Co, pp. 28～56.

(11) RWMA, 1981, "Residual Welding Manual," Vol. 1, pp. 119～143.

(12) Rigaku Co., 1987, "X-선 응력측정장치 manual," pp. 1～16.

(13) Shigley, J. E. and Mischke, C. R., 1989, *Mechanical Engineering Design*, 5th Edition, Mcgraw-Hill, pp. 286～288.

(14) Bae, D. H., 1988, "Stress Distribution and Fatigue Strength Evaluation of a Single Elliptical Spot Welded Lap Joint under Tension-Shear Load," *Transaction of JSAE*, No. 39, pp. 98～104.

(15) JSAE Committee, 1987, "The Data Book of Spot- welding Fatigue Strength," *JSAE*.

(16) Ilseon Sohn, 1989, "A study on the fatigue design methods and expert system development for thin steel sheet spot-welded lap joint," Ph.D thesis, Sungkyunkwan University.