경량 차체용 고장력 강판의 Spot 용접과 피로설계에 관한 연구

허정범* · 배동호** · 윤치상*** · 권순용***

A Study on the Spot Welding and Fatigue Design of High Strength Steel Sheets for Light Weight Vehicle Body

Jeongbeom Heo, Dongho Bae, Chisang Yoon and Soonyong Kwon

Key Words : Spot welded joint(이음재), Spot welding(점용접), Nugget(너깃) , Stress concentration(응력집중), Fatigue strength(피로강도), Maximum stress(최대응력), Fatigue limit(피로한도)

Abstract

The recent tendency in the automobile industries is toward light weighting vehicle body to improve the problems by environmental pollution as well as improving fuel cost. The effective way to reduce the weight of vehicle body seems to be application of new materials for body structure and such trend is remarkable. Among the various materials for vehicle body, stainless steel sheet (for example, 301L and 304L), TRIP steel and cold rolled steel sheets are under the interests. However, in order to guarantee reliability of new material and to establish the long life design criteria of body structure, it is important and require condition to assess spot weldability of them and fatigue strength of spot welded lap joints which were fabricated under optimized spot welding condition. And, recently, a new issue in the design of the spot welded structure is to predict economically fatigue design criterion without additional fatigue tests. In general, for fatigue design of the spot-welded thin sheet structure, additional fatigue tests according to the welding condition, material, joint type, and fatigue loading condition are generally required. This indicates that much cost and time for it should be consumed. Therefore, in this paper, the maximum stresses at nugget edge of spot weld were calculated through nonlinear finite element analysis first. And next, obtained the $\Delta P - N_f$ relation through the actual fatigue tests on spot welded lap joints of similar and dissimilar high strength steel sheets. And then, the $\Delta P - N_f$ relation was rearranged in the $\Delta\sigma - N_f$ relation. From this $\Delta\sigma - N_f$ relation, developed the fatigue design technology for spot welded lap joints of them welded using the optimized welding conditions.

1. 서 론

최근의 자동차 산업은 공해에 의한 환경문제 개선과 에너지 절감을 위하여 차체를 경량화 하려는 추세이고, 차체 경량화를 실현하기 위한 방법으로서 새로운 재료를 사용하려는 경향이 두드러지고 있다. 그래서, 근래에 와서 차체 재료로 스테인리스강(stainless steel)과 같은 고강도 강판(high strength steel sheet)을 적용하고자 노력하고 있다. 왜냐하면, 고 강도 스테인리스 차량은 경량화로 연비절감 등의 유지비 절감이 가능하고, 높은 충돌성능, 미려한 외관, 피로내구성능 등이 기존의 차체재료에 비해 우수할 뿐만 아니라, 내식성(corrosion resistance)이 우수하여, 점용접(spot welding)에 의한 조립식 연결구조 실현으로 고 생산성을 이룰 수 있기 때문이다.

* 성균관대학교 대학원 기계공학부
** 성균관대학교 기계공학부
E-mail : bae@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7443 FAX : (031)290-5849
*** 현대・기아자동차 연구개발본부

그러나, 스테인리스강과 같은 고강도 강판을 경량차체(light weighted vehicle body) 재료로 적용하기 위해서는 대체재료로서의 가능성과 효율성에 대한 신뢰성이 우선적으로 확보되어야 한다.

그리고 최근에는 점용접 박판 구조물의 설계 개념이 종전의 안전수명 설계(safe life design) 개념에서 파손수명 설계(fail life design) 개념으로 바뀌고 있기 때문에, 장 수명(long life)이 요구되는 차체는 적절한 구조적 강성(structural rigidity)을 지니도록 설계되어야 한다.

그런데, 구조적 강성만을 고려하여 설계를 하게 되면, 충돌성능(impact efficiency)과 내구성(durability)은 충족될 수 있으나, 충돌 시 변형에너지의 흡수능력(absorption ability)이 부족하여 충돌에너지(impact energy)에 의한 탑승자(passenger)의 손상(damage)이 커지고, 반대로 구조적 강성이 약해지면, 이와 반대현상이 발생되기 때문에, 양자를 동시에 고려한 최적의 설계가 이루어져야 할 것은 물론, 장기간의 사용으로 인한 강성과 내구성 저하에 대한 보증도 고려되어야 한다 [1,2].

따라서, 설계·제작과정에서 가장 고려되고, 중요시되고 있는 사항 중의 하나가 spot 용접부의 정적·동적 내구성에 대한 신뢰성(reliability)이다. 왜냐하면, 박판 구조물의 중요한 생산수단이 되고 있는 spot 용접은 용접부의 형상이 직경 수 mm 의 점상이므로 외력에 의한 응력집중원(stress concentrating source)이 되고 있고, 반복하중에 대한 피로강도가 모재(base metal)의 그것에 비해 훨씬 떨어져서 피로균열의 발단이 되고 있기 때문이다.

따라서, 경량차체의 대체재료로 고려되고 있는 스테인리스강과 같은 고 강도 재료들에 대한 spot 용접성을 평가하고, 최적 용접조건 하에서 제작된 이음재(spot-welded joint)에 대한 피로강도를 평가하는 것은, 대체재료에 대한 신뢰성과 차체의 장수명 설계기준을 확보하기 위한 매우 중요하고 필요한 사항이다.

그래서, 본 연구에서는 고강도 강판의 동종재(similar material) 및 이종재(dissimilar material)간 전기저항 점 용접을 위한 최적 용접조건 하에서 제작된 시편에 대해 피로시험을 수행함으로써, 동종재 및 이종재간 접합된 점용접 이음부의 피로신뢰성을 평가하였다.

그리고 이를 바탕으로 경량 차체용 고장력 강판 점 용접 이음재의 피로설계 기술을 개발하고자 하였다.

2. 유한요소법에 의한 점 용접 이음재의 변형과 응력분포해석

2.1 해석모델

Fig.1 과 같은 TS형(tensile shear type) 점 용접 이음재에 인장 전단하중이 작용하면, 점 용접 부위에는 면내 전단력과 면외 굽힘모멘트가 분담하중으로 작용하게 되어, 박판 특유의 변형을 야기한다. 그리고 피로균열은 일반적으로 부하측 내 표면 너깃단(nugget edge)에서 발생 및 성장하여 외 표면으로 나타나기 때문에, 내 표면 너깃단 주위의 응력분포와 변형상태를 해석하는 것은 피로균열 발생기구를 파악하는데 매우 중요하다[3,4].

따라서, 본 연구에서는 Tables 1, 2 의 화학적 성분과 기계적 성질을 갖는 STS301L, STS304L, SPCC, SPCD 판재를 점 용접하여 제작된 이음재를 해석대상으로 하였다. 그리고 피로강도를 평가할 목적으로, 대표적인 점 용접 이음 형태인 2L 형(two sheets lapped type)을 기본모델로 하고, Fig.1 과 같은 시뮬레이션 시편(simulation specimen)을 모델링(modeling) 하였으며, 용접부 너깃 주위의 응력분포와 변형상태를 해석하였다. 판의 중첩으로 인한 offset 의 영향을 고려하여 실제적인 3 차원 FEM 해석 모델을 작성하였으며, 각 모델 상·하 평판의 요소분할은 동일하게 하였다.

Table 1 Chemical composition(wt. %) of materials

a) STS301L

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.03	1.0	2.0	0.045	0.03	6.0 ~8.0	16.0 ~18.0	0.2

b) STS304L

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.03	1.00	2.00	0.045	0.03	9.0 ~13.0	18.0 ~20.0

c) SPCC

C	Mn	P	S
0.12	0.50	0.040	0.045

d) SPCD

C	Mn	P	S
0.12	0.45	0.035	0.035

Table 2 Mechanical properties of materials

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
STS301L	215	550	45
STS304L	175	480	40
SPCC	205	270	37
SPCD	205	270	39

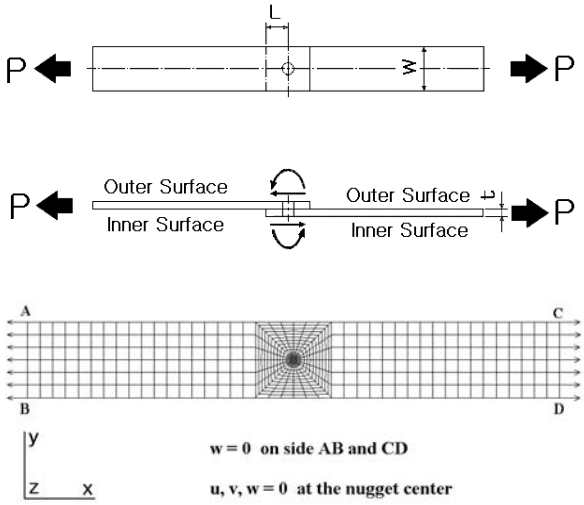

Fig. 1 FEA model of TS type spot welded lap joint

특히, 너깃단에서의 최대응력(maximum stress)의 발생위치를 면밀히 관찰할 수 있도록 너깃단 주위의 요소(element)를 좀더 세밀하게 분할하였다. 용접 너깃부는 사각형 요소를 적용하였으며, 너깃부에 해당하는 상·하 평판의 내 표면 절점을 동일 절점으로 하여 너깃을 작성하고, 너깃부 두께는 이음재 전체 두께가 되도록 하였다.

그리고 용접부 너깃은 점 용접 과정에서 야기되는 발열(heat generation)에 의한 열변형(thermal strain)과 전극 가압력에 의한 소성변형(plastic strain)으로 모재와는 상이한 기계적 성질을 지닌다. 때문에, 유한요소해석 시 너깃부에 대한 종탄성계수(Young's modulus) 등의 기계적 성질을 모재와 달리해야 타당하지만, 너깃부의 기계적 성질을 정량적으로 직접 측정하기가 매우 어렵다. 그리고 너깃 직경이 수 mm의 점상이기 때문에 실제로 FEM 해석 시 너깃부의 종탄성계수를 모재와 동일시해서 해석하더라도 너깃 주위의 전체적인 응력분포에는 큰 영향이 없으므로, 본 연구에서도 너깃부의 기계적 성질을 나타내는 종탄성계수 값을 모재와 동일하게 하여 해석하였다[5,6].

모델링과 탄·소성해석에 사용된 프로그램은 I-DEAS 와 ABAQUS 6.2-1 이고, 해석에 사용된 요소는 solid element(8-node)로 FEA 모델의 요소 수는 864 개, 절점 수(node number)는 1755 개이다.

2.2 해석결과

Fig. 2 는 겹침 길이(2L)=30 mm, 판 폭(W)= 30 mm, 너깃 직경(Φ)= 6mm 로 하고, TS 형 점 용접 시편에 인장-전단력을 가했을 때 나타나는 시편의 응력분포 상황과 변형상태를 나타낸 것이다. 판재의 두께에 관계없이 인장-전단하중에 의해 발생되는 최대응력은 시편 내 표면의 부하측 너깃단 주변에서 분포됨을 확인할 수 있었다.

응력집중 발생위치는 재질과 판 두께에 관계없이 시편 내 표면의 부하측 너깃단으로 일치하나, 각각의 변형형태와 최대응력 값은 상이함을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 1 의 점 용접 시편은 인장전단력으로부터 유도된 면 외 굽힘모멘트에 의해 너깃을 중심으로 점 용접 이음재의 전형적인 변형 형태인 굽힘변형이 일어나고, 대체로 판 두께가 두꺼워지면 판의 굽힘강성이 증가하여 굽힘변형과 최대응력 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 두께가 다른 판재를 접합한 경우에는 판 두께가 얇은 쪽에 변형과 너깃단 응력 집중이 크게 발생하였고, 피로균열의 발생도 동일한 경향을 나타내었다.

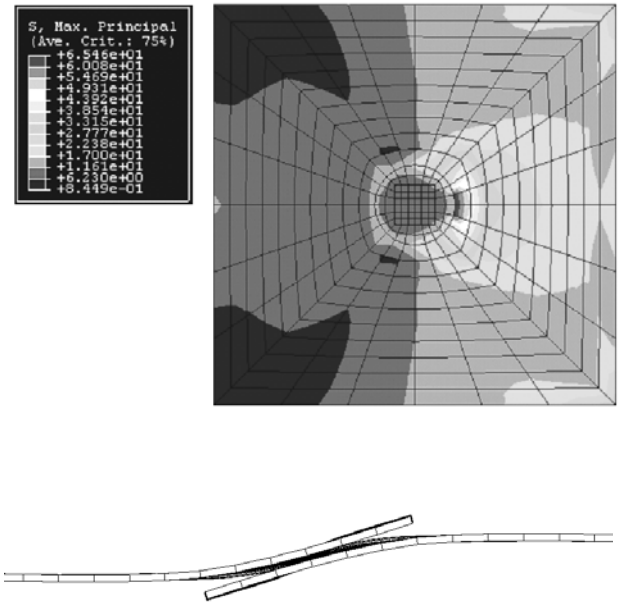

Fig. 2 Stress distribution and deformation of spot welded lap joint subjected to tensile shear load

3. 고강도강판 점용접 이음재의 피로강도 평가

3.1 시험편 및 실험장치

본 실험에 사용된 재료는 연비개선과 배기가스에 의한 공해문제 개선을 위해 최근 자동차 경량차체 재료로서 관심이 높아지고 있는 STS301L, STS304L, SPCC, SPCD 이다. 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2 와 같다.

피로 시험편은 폭(W)= 30mm, 겹침길이= 30mm, 두께(t)= 1mm, 1.2mm, 너깃직경(Φ)= 6mm 의 형상을 갖는 두 개의 판재에 일점 spot 용접한 이음재이고, 시험편 제작을 위한 spot 용접조건(welding

Table 3 Spot welding condition

Material	Compression force (kgf)	Current (A)	Weld time (cycle)
Stainless steel	410	7,800	6.0
SPCC, SPCD	200	8,800	10.0

condition)은 스테인리스강(stainless steel)의 경우, RWMA Group A, Class 3 을 기준으로, 냉간압연 고장력 강판인 SPCC, SPCD 는 RWMA Class A 를 기준으로 하였다. 구체적인 정량적 용접조건은 Table 3 과 같으며, 점 용접 후 너깃의 단면형상은 Fig. 3 에 나타낸 바와 같다.

시험에 사용된 피로시험장비는 서보(survo) 유압식 피로시험기(MTS, 용량: 20ton)이며, 시험편의 내 표면 spot 용접 너깃단에서 발생 및 성장하여 외 표면에 나타난 피로균열(fatigue crack)은 이동식 현미경으로 관찰하였다.

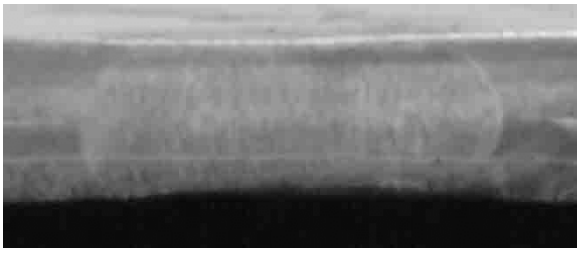

Fig. 3 Sectional conditions of the nugget

3.2 시험조건 및 시험방법

공기 중에서 피로시험을 수행하는 경우, 피로균열의 발생 및 성장특성에 대한 하중반복속도(frequency)의 영향은 미소하기 때문에, 하중반복속도를 대개 20～30Hz 에서 실험을 수행하는 것이 일반적이다.

본 연구에 있어서도 하중반복속도를 30Hz로 설정하였으며, 부하 파형은 정현파형(sine wave form)으로 하여 실험을 수행하였다. 하중비(R= P_{min} / $\mathbf{P}_{max}$)는 0 (P_{min} = 0)으로 하고, 하중진폭(load amplitude)의 최대하중은 시편 종류별로 항복강도의 80% 에서 시작하여 하중감소법으로 점차 하중을 감소시켜 가면서 JIS Z 3138 에 의거 무한수명에 이를 때까지 실험하였다.

피로수명은 시험편 부하측 내 표면 너깃단에서 발생 및 성장된 균열이 시험편의 부하측 외 표면에 나타나서 너깃 직경과 같은 길이가 될 때까지의 사이클 수로 결정하였다(Fig. 4). 그 이유는 점용접 이음재의 경우, 상・하 평판의 두 표면이 용접과정에서 저항열과 가압력에 의해 일체화되어 접해있는 면적이 곧 너깃의 면적이기 때문에 피로균열이 발생 및 성장하여 너깃 직경과 같아졌을 때는 이미 그 점용접 이음재가 완전히 파단 되었다고 간주될 수 있기 때문이다. 그리고 본 연구에서는 10^7 사이클(cycle)까지 시편 외 표면 너깃단에 피로균열이 나타나지 않은 하중을 피로한도(fatigue limit)로 정하였다.

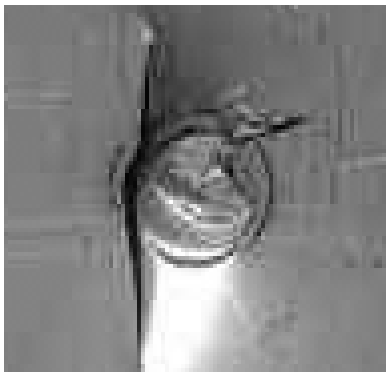

Fig. 4 Fatigue crack on the outer surface of spot welded lap joint

3.3 시험결과 및 고찰

점 용접 이음재에 인장전단형(tension shear type)의 피로하중이 작용하는 경우, 대체로 너깃단 주위의 HAZ 부에서 균열이 발생(지금까지 연구결과에 의하면, 피로균열 발생 점은 내 표면 너깃단)해서 외부 하중과 수직 방향으로 균열이 성장하면서 파단되는 경향을 나타내었다.

피로균열은 Fig. 4 와 같이 시편 외 표면 너깃단에서 발생하였으며, 이것은 FEM 해석 시 최대응력이 부하측 너깃단에서 발생하는 결과와 일치하고 있다.

시편의 변형 거동은 가해준 하중과, 시편의 형상에 따라 현저히 다른 양상을 나타내었으나, 균열의 발생 부위와 성장 양상은 거의 동일하였다.

Fig. 5 는 STS301L, STS304L 과 SPCC, SPCD 를 동종재 및 이종재간 점 용접하여 제작한 시편들에 가해준 피로하중 범위와 피로수명 관계를 $\Delta P - N_f$ 선도로 나타낸 것이다.

판재의 두께가 1.0mm 와 1.2mm 두 종류이고, 재료의 성질 또한 크게 두 종류로 분류될 정도로 스테인레스 강과 냉간압연 고장력 탄소강판으로서 Fig. 5 의 데이터분산이 크게 나타날 만한 정도의 차이가 크지 않기 때문에 데이터의 분산 폭이 피로설계인자를 결정하는데 지장을 줄만큼 크지않은 것처럼 보여진다.

그러나 지금까지 여러 연구의 연구 결과에 의하면, 점용접 이음재의 재질, 시편의 두께, 판폭, 너깃직경, 용접조건 등을 다양하게 고려했을 경우,

Fig. 5 와 같이 점 용접 이음재의 피로수명을 시편에 가한 피로하중 범위로 나타내면, $\Delta P - N_f$ 선도는 점 용접 이음재의 기하학적 인자(geometrical factor)와 재질 등의 영향을 민감하게 받기 때문에 전체적으로 데이터의 분산폭(scatter band)이 커서 피로강도(fatigue strength) 또는 피로수명(fatigue life)에 대한 인자들의 민감도(sensitivity)를 비교·평가할 수는 있으나, 실제 구조물 설계의 있어서 이상의 여러 인자들을 종합적으로 고려한 통일적이고 정량적인 설계기준을 설정하기가 곤란하다[5,7].

그러나 배동호[5,7] 등은 여러 가지 기하학적 형상을 갖는 점 용접 이음재들의 $\Delta P - N_f$ 관계를 점 용접 이음재 내 표면 부하측 너깃단 최대 주응력으로 재정리하면, 기하학적 인자 및 재료의 역학적 인자를 종합적으로 고려할 수 있는 통일적인 피로강도 평가가 가능함을 제시한 바가 있다.

그래서, 본 연구에서는 경량 차체용 고장력 강판의 피로설계 기술을 개발하기 위한 기초적 연구로서 점 용접 이음재의 $\Delta P - N_f$ 관계를 앞서 수행된 FEM 해석 결과인 용접부 너깃단 최대 주응력으로 재정리함으로써, 통일적이고 합리적인 피로강도 평가 및 피로설계 기준 설정이 가능한가를 검토하였다.

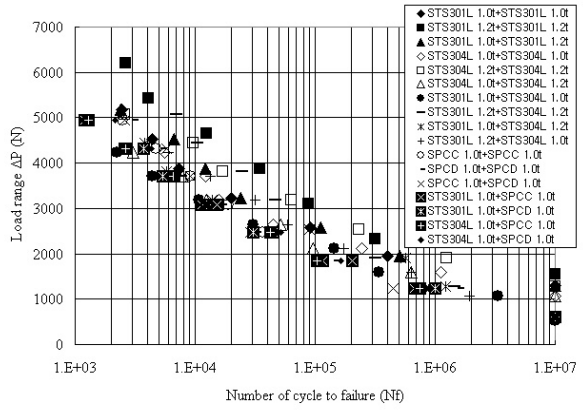

Fig. 5 ΔP-N_f relation of various specimens

3.4 최대 주응력(σ_{max})에 의한 피로강도 평가

앞에서 지적한 바와 같이, 점 용접 이음재들의 피로수명을 시편에 가해준 피로하중으로 정리한 Fig. 5 의 $\Delta P - N_f$ 선도는 판 두께, 판 폭, 용접부 너깃 직경 등의 기하학적 인자들과 열처리 및 압연방법에 따른 재료의 기계적 성질 변화에 따른 피로강도와 피로수명에 대한 비교평가는 가능하나, 데이터의 분산 폭이 너무 크기 때문에, 실 구조물 설계에 있어서 여러 가지 기하학적, 역학적 인자들을 통일적으로 고려한 설계기준을 설정하기가 곤란하다.

이러한 경우의 피로강도를, 점 용접부 너깃단(nugget edge)의 최대응력으로 정리하면, 이음재의 너깃단에서의 최대응력에 대한 이음재의 기하학적 인자와 재료의 기계적 성질들의 영향이 유한요소해석 결과에 의해 나타나고, 각종 크기를 갖는 시험편의 피로강도가 통일적으로 정리됨을 제시한 바 있다[3,4,8]. 따라서 인장－전단하중을 받는 TS형 점 용접 이음재의 피로강도도 유한요소해석 결과로부터 얻어진 너깃단에서의 최대응력(σ_{max})으로 재 정리해 보았다.

Fig. 6 은 각 시편에 실제로 가해진 피로하중에 대하여 유한요소해석을 수행해서 얻은 경량 차체용 고장력 강판 점용접 이음재의 내 표면 너깃단 최대 주응력으로 $\Delta P - N_f$ 를 $\Delta\sigma$ - N_f 관계로 재정리한 결과를 나타낸 것이다.

여러 가지 기하학적 형상을 갖는 TS 형 점 용접 이음재의 피로강도가 $\Delta P - N_f$ 관계에 비해 데이터의 분산 폭이 더 좁게 다시 재정리 될 수 있음을 알 수 있다. 즉, Fig. 6 의 결과를 이용하면, Fig. 5 에 비해서 다양한 기하학적 형상과 기계적 성질을 갖는 STS301L 판재로 제작된 다중 겹침 점 용접 이음재의 피로설계기준을 통일적으로 평가할 수 있음을 예상할 수 있다.

이상의 결과는 점 용접 이음재의 피로강도를 나타내는 어떤 특정 크기를 갖는 TS형 점 용접 이음재에 대한 $\Delta\sigma$ - N_f 의 관계가 얻어지면, 이 곡선에 의해 다른 임의 크기를 갖는 점 용접 이음재의 피로수명, 피로강도 및 피로설계기준을 추정할 수 있음을 의미한다.

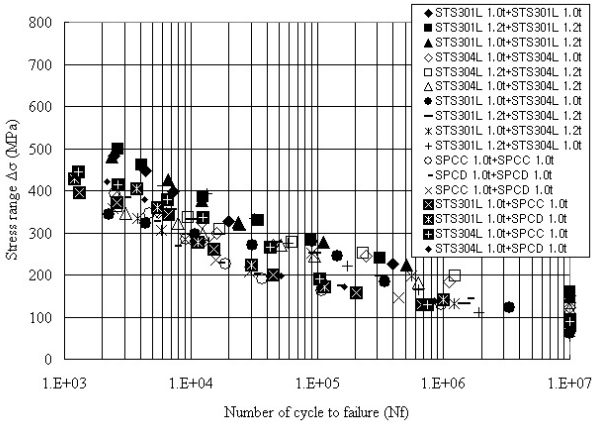

Fig. 6 $\Delta\sigma$ -N_f relation of various specimens

4. 결 론

고강도 강판 이음재를 대상으로 최적의 용접조건과 기하학적 인자와 재료성질을 고려한 통일적인 설계기준을 제시할 목적으로, 점용접 이음재에 대한 모사시편을 도출하여 유한요소법으로 용접부 너깃단의 변형상태와 응력분포 상황을 해석하고, 피로강도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) STS301L, STS304L, SPCC, SPCD 의 동종재 및 이종재간 용접성은 양호하며, 신뢰성 있는 정적 인장강도를 나타내었다.

2) 두께가 1.0, 1.2 mm 인 STS301L, STS304L 의 동종재 및 이종재간 점용접 구조물의 피로설계 기준은 60~160 MPa 로 평가되었다.

4) 두께가 1.0mm 인 SPCC, SPCD 의 동종재 및 이종재간 점용접 구조물의 피로설계 기준은 110 MPa 부근으로 평가되었다.

5) 두께가 1.0mm 인 STS301L, STS304L, SPCC, SPCD 의 이종재간 점용접 구조물의 피로설계 기준은 90 MPa 부근으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 (주)현대자동차와 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터의 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) 恩晶杓, 申昌善, 1989, "自動車 構造學", 東新 出版社, pp. 14～15

(2) 申東明, 1994, "自動車 材料", 螢雪 出版社, pp. 321～323

(3) D. H. Bae, J. E. Niisawa, and N.Tomidka, 1988, "Theoretical Analysis of Stress Distribution of Single Spot Welded Lap Joint under Tension Shear Load", 日本自動車技術會 論文集, No.39

(4) M. E. M. El-sayed, 1996, "Fatigue analysis of spot welded joints under variable amplitude load history", Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol. 55, No. 3, pp. 363~369

(5) 손일선, 정원석, 이휘광, 배동호, 1998, “인장-전단 하중을 받는 IB 형 일점 Spot 용접 이음재의 파괴역학적 피로강도 평가”, 자동차공학회 논문집 제 6 권 제 5 호, pp. 20～27

(6) 강정보, 2001, “STS301L 스테인리스 박강판 TS 형 점용접 이음재의 피로강도 평가”, 성균관대학교 석사학위논문

(7) 裵東鎬, 1991, "引張-剪斷荷重을 받는 一點 spot 熔接 이음재의 破壞力學的 疲勞强度評價", 自動車工學會 論文集 제 13 권 5 호, pp. 42～50

(8) 孫一善, 1999, "薄鋼板 點鎔接 이음재의 疲勞設計 技法과 專門家시스템 開發에 관한 硏究" 博士學位 論文, 成均館大學