

304 스테인리스 박강판 IB형 용접이음재의 피로강도 평가 Part 2 : 변형에너지밀도에 의한 평가

손일선* · 오세빈** · 배동호***

* 대우자동차(주) 부평기술연구소

** 성균관대학교 기계공학부 대학원

*** 성균관대학교 기계공학부

Fatigue Strength Evaluation on the IB-Type Spot Welded Lap Joint of 304 Stainless Steel Part 2 : Strain Energy Density

I.S. Sohn*, S.B. Oh** and D.H Bae***

* Dept. of Chassis Design, R&D Center, Daewoo Motor CO. Incheon 403-714, Korea

** Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

*** Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

Abstract

Since stainless steel plates have good mechanical properties, weldability, appearance and resistance of corrosion, these are traditionally used for vehicles such as the bus and the train. And they are mainly fabricated by spot welding. But fatigue strength of their spot welded joint is considerably influenced by welding conditions as well as geometrical factors. Thus a reasonable and systematic criterion for long life design of spot welded body structure must be established.

In this report, strain energy density was analyzed by using 3-dimensional finite element model about the IB-type spot welded lap joint under tension-shear load. Fatigue tests were conducted on them having various thickness, joint angle, lapped length and width. From their results, it was found that fatigue strength of the IB-type spot welded lap joints could be effectively and systematically rearranged by strain energy density at the edge of nugget.

(Received January 7, 1999)

Key Words : 304 Stainless steel, IB-type spot welded lap joint, In-plane bending, Fatigue strength, Dissimilar thickness, Strain energy density

1. 서 론

일반적으로 철도차량과 상용차의 차체구조는 냉간 압연 고장력강이나 스테인레스강 등의 박판재료를 프레스 성형하여 점용접에 의해 제작 및 조립되고 있다. 그런데, 점용접에 의한 재료접합 기술은 육안으로 용접의 품질을 검사할 수 없다는 점이 단점으로

지적되고 있으며, 또한, 이들 점용접 이음부는 용접 시 야기되는 조직변화와 잔류응력 및 너깃단의 응력 집중으로 인하여 피로강도가 모재에 비해 현저히 떨어지고 피로균열의 발달이 되기때문에, 차체의 구조적 강성과 강도가 점용접점의 피로강도에 의해 결정된다고 해도 과언이 아니다. 하지만, 복잡한 실차 구조에 대한 구조해석과 피로강도를 직접 평가하는 것은 매우 어렵기 때문에, 차체구조 중에서 대표적인

부재를 분류하여 시뮬레이터(simulator) 시험편을 고안하고, 그것으로부터 점용접 구조의 강성과 피로 강도를 평가하여 안전설계에 적용하고 있는 것이 일반적이다^{1,2)}.

한편, 자동차의 차체는 구조적 강성을 유지하기 위하여 골조부재에 두께가 다른 보강판을 부착하거나, 각 부위에 요구되는 강도에 따라 다종다양한 강판을 불연속적으로 접합한다. 그리고, 차체구조 중에는 서로 다른 재료 또는 이종 두께 판재를 점용접한 이음부가 적지 않고, 또 이들에 대한 응력분포 상황과 피로 강도 평가로부터 장수명 설계를 위한 기준설정이 중요한 과제임에도 불구하고, 이에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 스테인레스강 점용접이음재를 대상으로 하여 변형에너지밀도를 해석하고 이와 병행하여 피로강도를 평가하였다. 그리고 피로실험을 통하여 얻은 $\Delta P - N_f$ 관계를 유한요소법 해석결과인 용접부 너깃단 최대변형에너지밀도로 피로강도를 재 정리하여 이음재의 기하학적 인자와 역학적 인자를 동시에 고려한 장수명 설계기준을 제시하고자 하였다.

2. 변형에너지밀도 해석

2.1 해석모델

IB형 점용접이음재에 인장-전단하중이 작용하면, 점용접점에 작용하는 다양한 분담 하중들에 의해 박판 특유의 복잡한 변형형태를 보이게 된다. 따라서, 지금까지 점용접이음재에 대한 피로강도를 통일적으로 평가하고자 하는 시도가 여러 가지 방법에 의해 이루어져 왔고, 그 중에서 응력집중을 고려한 너깃단 최대 응력법과 점용접부를 날카로운 환상균열로 보고 파괴역학 파라미터인 응력확대계수에 의한 통일적인 피로강도 평가법 등이 실용적이고 합리적인 것으로 받아들여지고 있다^{3,4)}. 그러나, IB형 점용접이음재와 같이 복잡한 하중이 작용하는 경우에는 최대응력에 의한 방법이나 파괴역학적 방법은 그 한계가 있음이 지적되고 있고⁵⁾, 특히 모드(Mode) I, 모드 II, 모드 III를 동시에 고려한 혼합모드에 대한 파괴역학 매개변수가 이론적으로 정립되어 있지 않기 때문에, 본 연구에서는 점용접점을 중심으로한 박판의 대변형을 종합적으로 고려할 수 있는 변형에너지밀도로서 접근하는 것이 합리적이라 판단하여, 변형에너지밀도에 의한 피로강도 평가를 시도하고자 유한요소법으로 이에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 1의 IB형 일점 점용접이음재에 인장-전단하중

이 가해지면, Fig. 2와 같이 박판특유의 복잡한 변형 형태를 나타낸다. 그리고, 피로균열은 부하측 내표면 너깃단에서 발생 및 성장하여 외표면으로 나타나기 때문에, 내표면 너깃단 주위의 응력분포와 변형상태를 해석하는 것은 피로균열 발생기구를 파악하는데 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 모델을 사용하였으며, 해석부위인 용접부 너깃단에서의 거동을 정확히 관찰하기 위해 실제 피로시험과 동일하게 하중단에서의 폭 방향만을 구속하고, 면내회전변형 등이 발생하는 너깃단 주위는 구속을 피하였다. 또한 Fig. 3과 같이 너깃단에서의 최대변형에너지밀도의 발생 위치를 면밀히 관찰 할 수 있도록 너깃단 주위의 요소를 좀더 세밀하게 분할하였고, 상·하 평판의 요소분할은 공통적이다. 직경 6mm의 너깃부는 사각형 요소를 적용하여 두께 2mm의 단일요소로 분할하여 상·하 평판을 일체화하고, 종탄성계수 E를 해석 편의상 모재보다 80% 크게 하였다. 해석모델은 3차원 solid 요소로써, 기본형상은 판 폭(W)이 30.0mm, 겹침길이(2L)가 30.0mm, 두께(t)가 1.0mm이며, 이음각(θ)의 크기를 각각 1.25°, 2.5°, 5.0° 및 7.5°로 변화시켜 이음각의 영향을 검토 과 동시에, 판폭, 겹침길이 및 두께 등의 기하학적 영향도 조사하였다. 해석은 EMRC/NISA II Ver 7.0을 사용하여 전 모델에 294.3N의 하중을 축 방향으로 가하여 수행하였다.

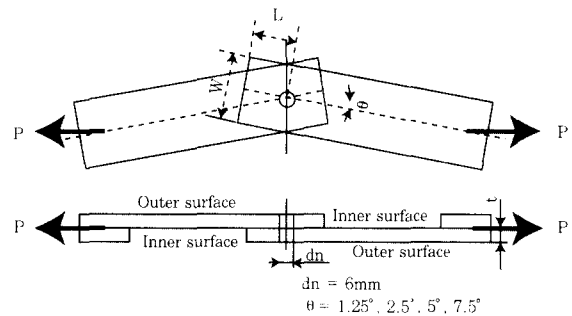


Fig. 1 IB type specimen under tension-shear load

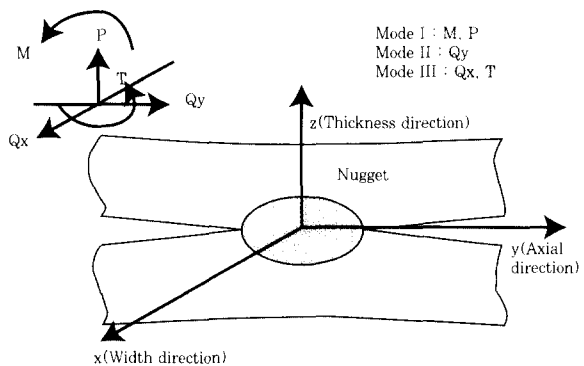


Fig. 2 Applied forces on the nugget.

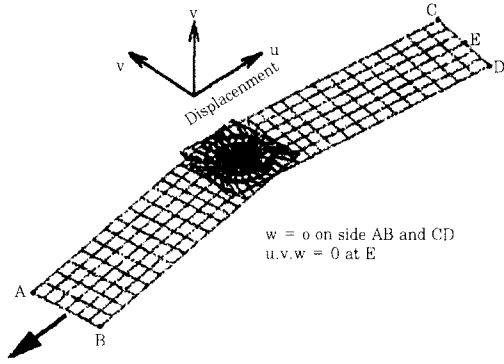


Fig. 3 3-dimensional FEM analysis model.

2.2 변형에너지밀도(u)의 해석 결과

Fig. 4, 5는 인장-전단하중을 받는 일점 IB형 접용 접이음재의 이음각에 따른 내표면 변형에너지밀도 분포상황을 나타낸 것이다. 면내전단변형과 면내굽힘변형 및 면외굽힘변형에 의하여 시편 내표면 부하축 너짓 주위에는 높은 변형에너지밀도가 분포하고 있다. 그 범위는 역대칭성에 의해 시편 길이 방향의 중심선

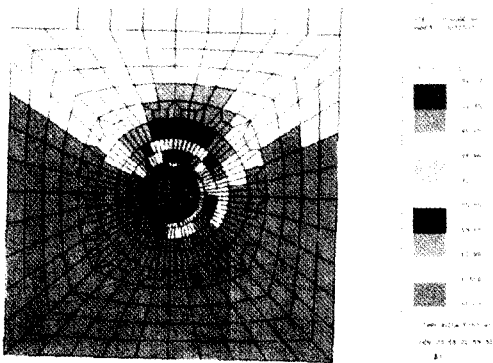


Fig. 4 Strain energy density distribution on the inner surface of the upper plate. (3-D model, $\theta = 1.25^\circ$)

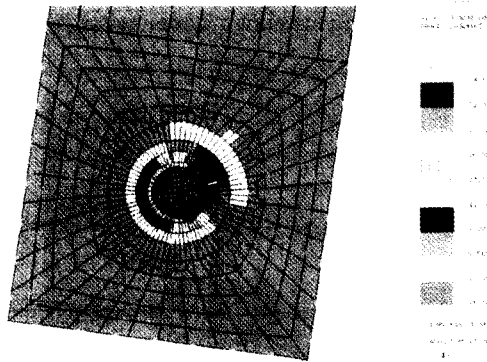


Fig. 5 Strain energy density distribution on the inner surface of the upper plate. (3-D model, $\theta = 7.5^\circ$)

으로부터 인장-전단력에 의한 회전변형(면내굽힘변형) 방향과 반대방향으로 발생하였으나, 이음각이 증가함에 따라 최대변형에너지밀도의 분포범위가 시편의 회전방향으로 이동함과 동시에 그 확대된다. 이것은 이음각이 증가함에 따라 면내비틀림모멘트가 커지면서 응력과 면내회전변형이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 변형에너지밀도에 대한 판 두께의 영향을 나타낸 것이다. 판 두께가 증가함에 따라 변형에너지밀도가 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그 주된 이유는 판 두께의 증가에 따라 면외굽힘변형이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 이종두께로 접합된 경우, 1+2mm는 1+1mm보다 약 38% 그리고 1+3mm인 시편은 약 50.4%정도 하는데, 이 변형에너지밀도가 감소는 후판과 박판의 강성차이로 인해 후판의 면외굽힘변형이 억제되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 변형에너지밀도에 대한 판 폭의 영향을 나타낸 것으로, 판 폭이 증가할수록 변형에너지밀도가 점차 감소하는 경향을 보이는데, 판 폭이 60mm 이상 되면 거의 변화가 없음을 보이고 있다.

Fig. 8은 겹침길이의 영향으로서, 겹침길이가 증가하여도 변형에너지밀도는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

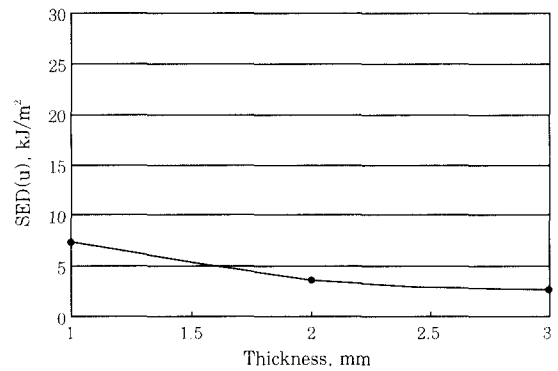


Fig. 6 Relation between strain energy density and plate thickness.

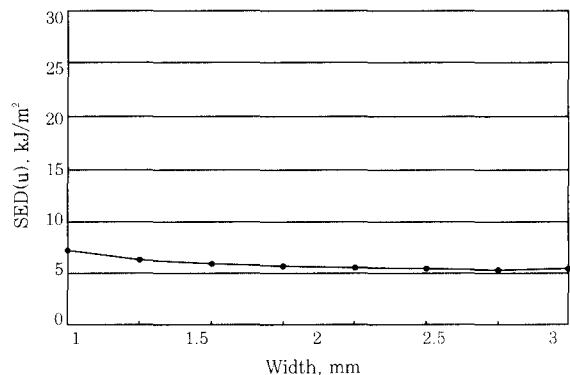


Fig. 7 Relation between strain energy density and plate width.

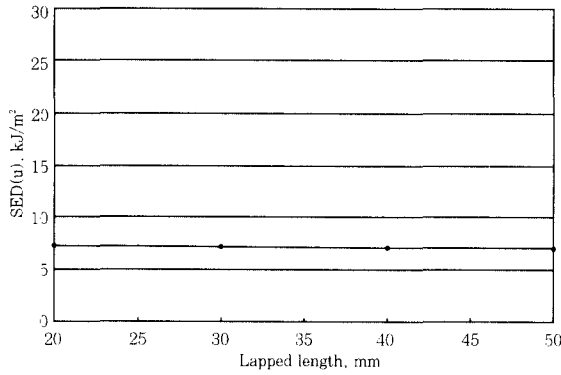


Fig. 8 Relation between strain energy density and lapped length of plate.

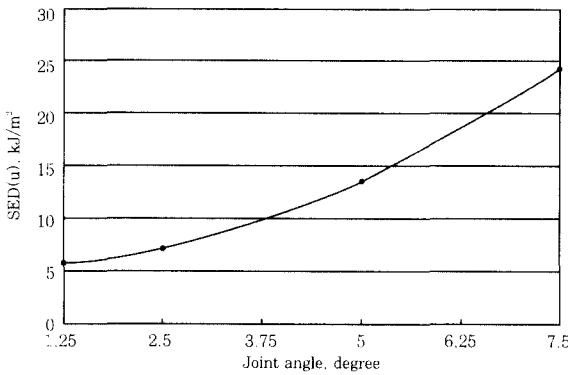


Fig. 9 Relation between strain energy density and joint angle of plate.

Fig. 9는 이음각의 영향이며, 이음각이 증가함에 따라 변형에너지밀도는 급격히 증가함을 나타내고 있다. 그 이유는 IB형 일점 점용접이음재에 작용하는 인장-전단력에 의한 면내회전변형이 회전각에 비례하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서, IB형 일점 점용접이음재에서 이음각은 영향은 매우 크다.

결과적으로 변형에너지밀도에 대한 이음재의 기하학적 인자의 영향 가운데, 이음각과 판 두께에 대해서 매우 민감함을 알 수 있다.

3. 실험

3.1 시험편 및 시험장치

본 연구에 사용된 재료는 철도차량과 상용차의 차체 용으로 많이 사용되고 있는 304 스테인레스강 판재이며, 시험편상은 Fig. 1로써 FEM 해석모델과 동일하다. 시험편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같고, 시험제작을 위한 점용접 조건은 Table 3의 RWMA⁶⁾ C-class에서 권장하고 있는 스테인레스 강판의 용접조건을 기준으로 용접하였다. 사용된 점용접기의 전극직경은 차체 제작 과정에 실제로 적용되고

있는 6mm를 택하였고, 두 판재 사이의 이음각도는 1.25°, 2.5°, 5.0°이다. 그리고, 판 폭은 30, 50mm이며, 판 두께는 1+1, 1+2, 1+3mm로 3종류이다. 그리고, 시험편 그림은 인장-전단력에 의한 IB형 점용접 시험편의 면내회전변형을 유도하기 위해서, Photo 1과 같이 시험편을 면압식으로 고정된 후, 그림의 상·하를 핀(pin)으로 연결하였다.

피로시험장치는 서보 유압식 피로시험기(MTS, 용량 : ±10 Ton)를 사용하였고, 시험편 내표면의 점용접 너깃단에서 발생 및 성장하여 외표면에 나타나는 피로 균열을 관찰하고 측정하기 위해서는 이동식 현미경(x 50)을 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of specimen. (Wt. %)

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
0.08	18.0	8.0	2.0	1.0	0.045	0.03

Table 2 Mechanical properties of specimen.

Tensile Strength	Yield Strength
568MPa	275MPa

Table 3 Welding condition of specimen. (RWMA Class-C)

Welding Conditions	Value
electrode force (F)	6.25 kN
current (I)	7 kA
welding time (cycles)	6 Cycles

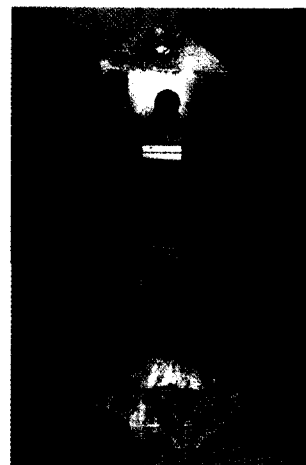


Photo 1 IB-type specimen and grip.

3.2 실험조건 및 방법

본 실험을 위한 하중 반복속도는 30Hz이며, 피로하중의 형태는 하중비($R = P_{min} / P_{max}$) 0인 완전 편진 정

현과이다. 피로수명은 시편 내표면 부하측 너깃단에서 발생 및 성장된 균열이 시편 외표면에 나타나서 너깃 직경과 같아졌을 때까지의 cycle수로 결정하였으며, 피로한도(fatigue limit)는 10^7 cycle까지 피로균열이 발생하지 않은 하중으로 하였다.

3.3 피로실험 결과

Fig. 10은 여러 가지 기하학적 형상을 갖는 IB형 일점 점용접 시험편의 피로실험 결과를 $\Delta P - N_f$ 의 관계로 나타낸 것이다. IB형 일점 점용접이음재의 피로강도에 대한 이음각의 영향은 반복하중의 범위가 큰 영역에서는 박판의 대변형 현상 때문에 크고, 반복하중의 범위가 낮은 영역에서는 이음각의 영향이 점차 감소함을 알 수 있다. 그러나, 전체적으로 반복하중의 대·소에 관계없이 점용접 너깃단의 변형에너지 밀도에 대한 이음각의 영향으로 이음각이 작을수록 피로수명은 길어지고, 피로한도도 커진다. 또한, 판 폭과 두께가 증가할수록 동일 하중범위에서 피로수명이 길어짐을 보이고 있는데, 이러한 결과로부터 이중두께로 접합된 경우 동종두께보다 피로한도가 증가하며, 이중두께의 후판이 두꺼워지면 피로수명은 더욱 증가함을 보인다.

이상과 같이, IB형 점용접이음재의 피로강도에 대한 기하학적 인자들의 영향은 변형에너지밀도에 미치는 영향에서와 마찬가지로 이음각과 판 두께에 대해서 매우 큼을 알 수 있다. 그러나, 시편의 피로강도를 Fig. 10과 같이 하중범위로 나타내게 되면, 여러 가지 기하학적인 형상을 갖는 IB형 점용접이음재의 피로강도 데이터들의 분산폭이 너무 크기 때문에, 이것으로는 합리적이고 통일적인 설계기준을 설정하기가 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 IB형 점용접이음재의 부하측 너깃단의 최대변형에너지밀도로서 Fig. 10의 $\Delta P - N_f$ 데이터들을 재정리하여 통일된 피로설계 기준을 도출하고자 하였다.

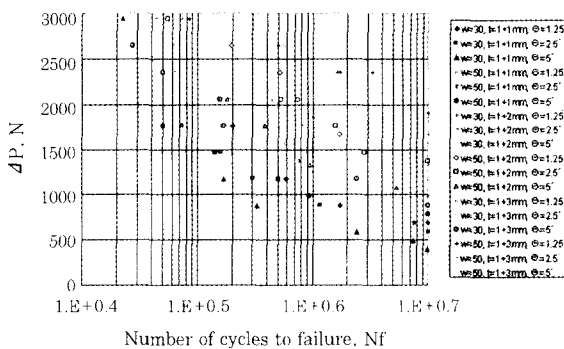


Fig. 10 Relation between $\Delta P - N_f$

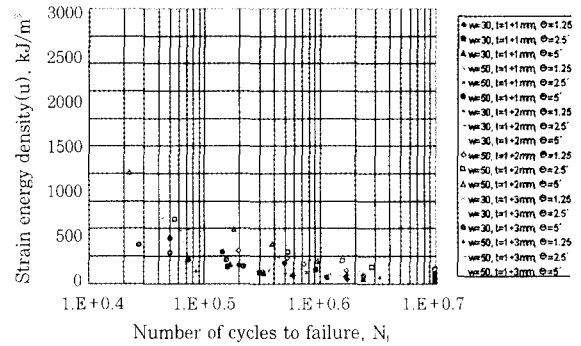


Fig. 11 Relation between $\Delta P - N_f$

4. 변형에너지밀도에 의한 피로강도 평가

점용접이음재에 대한 피로강도를 평가하고자 하는 시도는 많은 연구자들에 의해 각각적인 방법을 통해 이루어져 왔다. 그 중에서 실용적이고 합리적인 것으로 받아들여지고 있는 점용접부 너깃단 최대응력에 의한 방법이나 파괴역학적 방법은 점용접부의 복잡한 변형 및 하중 상황을 동시에 고려하기가 어렵다는 문제점도 지적되어 왔다^{7,8)}. 이러한 문제점을 개선하고자, 본 연구에서는 변형에너지밀도의 도입을 시도하였다. 변형에너지밀도는 최대주응력 또는 K_{III} 와 달리 단위 체적에 작용하는 모든 하중과 변형의 상황을 에너지 개념을 이용하여 해석되는 것이므로, 특정 하중과 변형 형태에 국한하지 않고 실제 상황을 종합적으로 해석할 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 11은 피로실험 결과를 변형에너지밀도(u)를 이용하여 재정리한 결과이다. 판 두께, 판 폭, 이음각 등 여러 가지 기하학적 형상이 다른 시편들의 피로강도가 시편의 내표면 너깃단의 변형에너지밀도에 의해 통일적으로 재정리됨을 알 수 있으며, 이 결과로부터 피로한도에 해당하는 하한계 변형에너지밀도 $u_L \cong 24.1 \text{ kJ/m}^3$ 로 상한은 $u_H \cong 190.2 \text{ kJ/m}^3$ 로 추정될 수 있고, 하한은 상한의 약 12.7 %로서 평가된다. 이상의 평가에서, 이 곡선에 의해 다른 임의의 크기를 갖는 점용접이음재의 피로수명을 추정할 수 있을 것으로 생각한다.

5. 결 론

스테인레스 강판 점용접 구조물의 장수명 설계기준을 확립하기 위한 기초연구로서, 자동차 차체의 점용접이음재에 인장-전단 하중이 작용하는 경우를 대상으로 피로강도를 평가하였다. 그리고, 점용접부의 피로균열은 일반적으로 용접부 너깃단에서 발생 및 성장함을 착안하여, 피로시험을 통하여 얻은 하중-피로 수명

관계를 유한요소법 해석결과인 너깃단 변형에너지밀도로 피로강도를 재정리한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인장-전단하중을 받는 IB형 점용접이음재와 같이 박판이고 불연속 용접부가 존재하며, 복잡한 동하중을 받는 경우는 변형에너지밀도로서 접근하는 것이 유용하다.
- 2) 변형에너지 밀도는 IB형 점용접이음재의 이음각과 판 두께에 대한 민감도가 크다.
- 3) 이중두께로 접합된 경우, 후판의 영향에 의해서 박판쪽의 변형에너지밀도가 38~50.4% 감소한다.
- 4) 여러 가지 기하학적 형상을 갖는 IB형 점용접이음재의 피로강도는 너깃단 변형에너지밀도로서 통일적으로 재정리 될 수 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. "スポット溶接 手疲労強度データ集", 日本自動車技術會(1987)
2. James A. Davidson, "A Review of the Fatigue Properties of Spot-Welded Sheet Steels", SAE paper 830033(1983)
3. 藤本正男, "薄鋼板スポット溶接構造の強度と剛性に関する基礎的研究", 博士學位論文, 京都大學(1975)
4. Pei-Chung Wang, Kon-Mei W. Ewing, "A J-integral Approach to Fatigue Resistance of a Tensile-Shear Spot Weld", SAE 880373(1970)
5. G. C. Sih, "Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems", International Journal of Fracture, Vol. 10, No. 3(1974), pp. 305-321
6. Resistance Welding Manual", RWMA, Volume 1(1981), pp.10-12
7. D. H. Bae, et al, "Stress Distribution and Fatigue Strength Evaluation of a Single Elliptical Spot-welded Lap Joint Under Tension-Shear Load, Transaction of JSAE, No. 39(1988), pp.98-104
8. 배 동호, "인장-전단하중을 받는 일점 spot 용접이음재의 파괴역학적 피로강도평가", 한국자동차공학회지 제 13권 5호(1991), pp. 42-50