

차체구조물에서 면내 굽힘모우멘트 및 과하중이 피로특성과 균열전파 거동에 미치는 영향에 관한 연구

성기찬* · 장경복* · 정진우** · 강성수*

*부산대학교 기계기술연구소

**부산대학교 정밀기계공학과

A Study on the Fatigue Characteristics and the Behavior of Crack Propagation by Overload and Bending Moment in Car Body Structure

Ki-Chan Sung*, Gyoung-Bok Jang*, Jin-Woo Jung** and Sung-Soo Kang*

*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract

To analyze and predict crack initiation position and propagation directions on the spot welded area are very important for strength design of the automobile body structure. It is necessary to test by method considering random loads with variable amplitude for strength design of vehicle body structure, because driving cars are actually subjected to random loads with variable amplitude in the road. Although this condition, nearly all tests have been performed under constant load conditions in the laboratory because it is impossible to replay like an actual conditions. In this study, using in-plane bending type specimens, the overload factor affecting on the fatigue strength, crack initiation and propagation directions of spot-welded specimens have been studied.

(Received July 31, 2001)

Key Word : Crack initiation position, Crack propagation directions, Tensile-shear type specimens, In-plane bending specimens

1. 서 론

자동차 메이커에서 개발한 새로운 차량은 고객에 인도된 후 보통 여러 가지 도로조건에서 수년에서 수십 년 까지 사용되며 그 주행거리도 수십만 킬로에 달한다. 그런데, 차량의 사용조건은 자동차의 형상, 도로 주행 조건, 기후 조건 등에 따라 매우 다양하며 이런 사용조건에 부합되는 내구 신뢰성을 갖도록 차량을 개발하기 위해서 여러 가지 내구시험을 수행하게 되고 이때 여러 불만족스러운 문제점이 발생될 경우 가장 경제적이며 효과적인 보강방안의 마련이 필요하며 이 보강방안을 재확인하여 내구성에 문제가 없다는 판정이 내려지고 난 후 신차 개발 프로젝트는 완료되며 양산단계를 거쳐 고객에게 인도된다¹⁾.

승용차 한 대의 조립에는 차종에 따라 차이는 있지만 보통 3500~4000점 정도의 점용접이 적용되며 두께 1mm전후의 얇은 철판을 점용접 하여 강도를 유지하기 때문에 안전성을 매우 중요시하는 자동차의 조립에서는 점용접부의 신뢰성확보가 가장 큰 문제이다²⁾. 실질적으로, 실제 승용차 차체에서 발생하는 내구력상의 문제점 중 일반적으로 70%이상이 점용접 주위에서 발생하고 있다. 이처럼 점용접 부위에서 문제점이 발생하는 것은 설계의 오류로 인한 응력집중이나 용접 시공시 용접불량에 의한 균열요인 제공 등에 주로 기인한다. 따라서, 내구성이 우수한 승용차를 제작하기 위해서는 점 용접부의 특성이해나 피로거동 연구 및 분석이 필요하다.

그런데, 여러 가지 재료에 대한 점용접부의 용접성³⁻⁵⁾ 및 피로특성에 대한 연구⁵⁻¹⁵⁾는 여러 연구자들에 의해

서 그 자료가 축적되어 왔지만 자동차나 철도차량 등에서와 같이 복합 하중을 동적으로 받는 점용접부의 피로균열 발생 및 균열성장 거동에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그리고, 대부분의 이런 많은 연구들도 진폭이 일정한 하중 하에서 피로시험을 하였기 때문에 실제 자동차와 같이 진폭이 변동하는 하중을 고려하기가 어려웠던 것이 사실이었다. 따라서, 본 연구에서는 자동차 내구성능 테스트시 발생하는 차체구조물의 피로균열발생 및 성장의 원인을 파악하기 위한 일환으로서 다양한 하중을 받는 점용접 시험편을 제작하여 진폭이 일정한 하중에 주기적으로 과하중을 가하였을 때의 피로거동을 피로균열의 발생 및 성장거동에 주목하여 고찰하였다.

2. 시험 방법

2.1 시험편의 종류

본 연구에서는 자동차 차체 및 각종 차량내부 판형 부품에 사용되는 고장력강판 SPRC35를 사용하였다. Table 1과 2는 각각 SPRC35의 화학성분과 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical properties of base metal(wt%)

C	Mn	P	S	Al	Fe
0.004	0.43	0.072	0.007	0.029	Bal.

Table 2 Mechanical properties of base metal

Yield strength [kg/mm ²]	Tensile strength [kg/mm ²]	Young's modulus [kg/mm ²]	Elongation [%]	Strain hardening exponent
24.8	36.8	20000	38.3	0.24

2.2 최적의 용접조건 및 피로수명

점용접에서 최적용접조건이라 함은 용접부위가 최대의 인장전단강도를 가지면서 내부결함이 없는 조건이라 할 수 있다. 이를 결정하기 위한 인장전단시험을 수행하기 위해서 KS B 0851의 규격으로 인장전단시험편(Tensile-shear specimen)을 제작하여 실시하였으며, 그 결과 획득한 최적의 용접조건을 Table 3

Table 3 Optimal welding condition

Welding current [A]	Applied force [kgf]	Squeeze time [cycle]	Weld time [cycle]	Hold time [cycle]
9500	300	5cycle	10cycle	12cycle

에 나타내었다. 또한, 적용하중의 크기가 피로균열의 발생 및 성장, 즉 피로수명과 어떠한 관계를 가지는지 파악하기 위하여 인장전단형 시험편을 제작하여 피로시험을 수행하였다. 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 응력에 기초를 두어 최적용접조건 설정에 사용한 인장전단형 표준 시험편을 이용하여 피로시험을 수행하였으며 피로한도의 기준은 1×10^6 cycle로 하였는데 이는 Sawhill³⁾ 등이 점용접 구조물에서는 산업계의 실용상 1×10^6 cycle 정도의 강도가 적절하다고 보고하고 있으므로 이를 참조하였다. Fig. 2에 시험편의 하중범위와 과단수명과의 관계를 반대수 좌표상에 나타내었는데, 본 연구에서 사용된 고장력 강판은 1.2×10^6 cycle의 피로수명에서 약 1.7kN의 피로강도를 나타내었다.

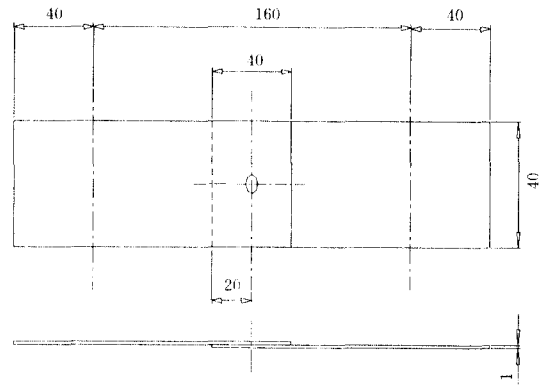


Fig. 1 Specimen geometry for TS type fatigue test

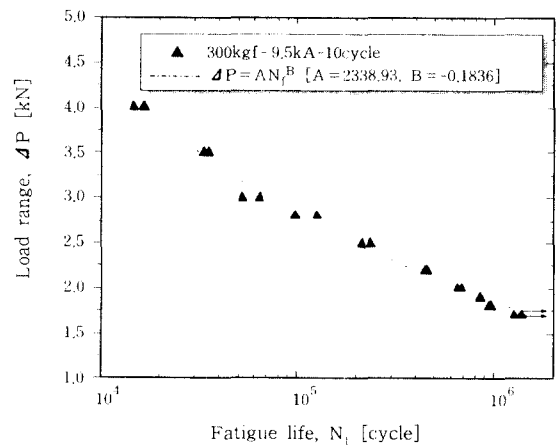


Fig. 2 Fatigue failure life on SPRC35

2.3 면내굽힘형 시험편제작 및 시험방법

실제 차체 구조물이 주행환경에 놓여 있는 경우 외 부로부터 받는 하중은 매우 복잡하며 2축 혹은 3축 하중을 동시에 받는 경우도 있다. 그래서, 이러한 하중을 실제처럼 재현하여 실험실에서 시험하기는 매우 어

렵다. 따라서, 본 연구에서는 여러 가지 외부하중 가운데 인장전단하중과 면내 굽힘 모우멘트가 점용접부에 작용할 수 있는 시험편을 제작하여 피로균열 발생과 성장을 고찰하였다. 이를 위해서 인장전단형 시험편 (Tensile-shear type specimen)과 면내굽힘형 시험편(In-plane bending type specimen)을 제작하여 동적 피로시험을 수행하였다. 면내굽힘형 시험편은 상판과 하판사이와의 각도를 30°, 60°로 제작하였고, 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다. 피로시험은 변동하중의 반복수는 5Hz, 응력비 $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0$ 인 편진인장 조건으로 실시하였다. 또한, 과하중의 형태는 피로한도 근방의 하중 1.5kN을 기본하중으로 하고 각각 3kN, 4.2kN의 과하중을 적용 횟수를 달리하여 시험하였는데, 구체적인 시험방법은 (a)1.5kN + 3kN + 1/55 (b)1.5kN + 3kN + 5/55 (c)1.5kN + 4.2kN + 1/55 (d)1.5kN + 4.2kN + 5/55와 같다. 여기서, 1/55의 의미는 1주기가 총 55cycle로 구성되어 있을 때, 그 중 54cycle은 1.5kN의 기본하중이고, 나머지 1cycle은 3kN 및 4kN의 과하중이 들어간다는 것을 의미한다. 마찬가지로 5/55의 의미는 50cycle은 기본하중 1.5kN이고 나머지 5cycle은 과하중이 들어가는 것이다. 자세한 하중의 형태와 적용횟수는 각각 Fig. 4에 나타내었다. 이러한 시험방법을 가지고, 인장전단형 시험편과 면내굽힘형 시험편에 각각 적용하여, 하중별, 과하중 적용횟수별의 피로수명결과를 나타내었다. 피로균열의 발생과 성장거동의 관찰을 위해서 광학현미경과 균열진전측정용 현미경을 이용하여 시험편 단면과 표면을 촬영하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 균열 발생 및 성장거동

Fig. 5는 인장전단형(TS)시험편의 경우 시험방법 (a), (b), (c), (d)에 대한 균열양상을 비교·검토한

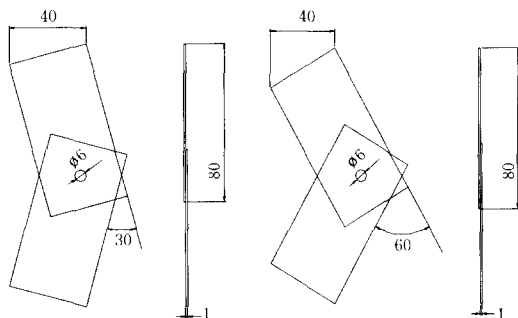


Fig. 3 Geometry and dimension on IB type specimens

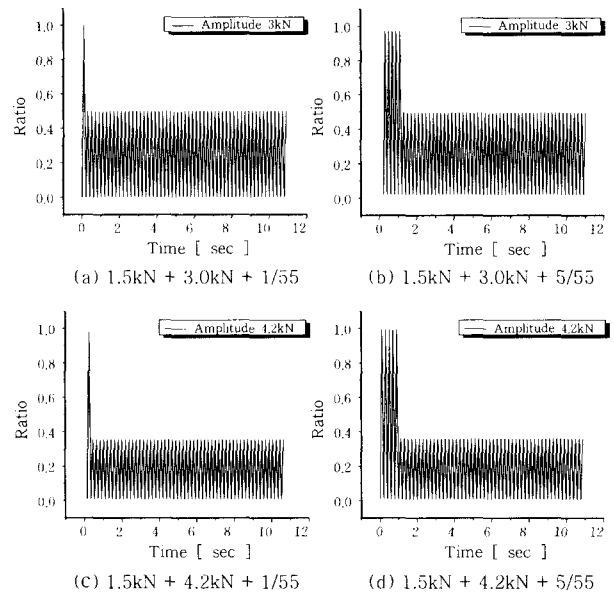


Fig. 4 Load type applied on specimens

것이다. 시험방법 (a)와 (c)의 균열양상을 비교해보면, (a)와 (c)둘다 초기균열은 열영향부에서 발생하였으며, 균열의 형태는 인장전단의 힘만 작용함으로 인해 하중 방향과 수직한 방향으로 발생하여 진전하였다. 그러나, 동일 사이클의 균열폭의 관점에서 보면, 시험방법 (a)보다는 (c)가 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 3kN보다 4.2kN의 힘이 더 크기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 그리고, (b)와 (d)의 균열양상을 비교해보면, (a), (c)와 동일한 곳에서 초기균열을 나타내었지만, 균열의 폭은 (a), (c)에 비해서 과하중의 적용횟수가 더 많은 (b)와 (d)가 더 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6, 7은 면내굽힘형 시험편의 경우 시험방법 (a), (b), (c), (d)에 대한 균열양상을 비교한 것이다. Fig. 6은 면내굽힘 각도를 30°로 제작한 시험편의 경우이고, Fig. 7은 면내굽힘 각도를 60°로 제작한 시험편의 경우이다.

우선, 면내 굽힘각도를 30°로 제작한 시험편에 시험방법 (a)와 (c)를 적용한 경우의 초기균열은 면내 굽힘모우멘트의 영향으로 인해 너깃 근처에서 하중에 수직한 방향으로 왼쪽으로 약간 치우쳐서 발생하였다. 그러나, 성장되어지는 균열은 정적하중만을 주었을 때보다 점용접부를 타고 내려가는 현상이 적게 나타나고 있는데, 이것은 과하중의 영향으로 인해 방해를 받은 것으로 판단되며, 균열의 폭은 정적하중만의 경우보다 비해 역시 크게 나타났다. 또한, 시험방법 (b)와 (d)를 적용한 경우의 초기균열은 시험방법 (a)와 (c)를 적용한 경우와 동일하지만, 균열폭은 (a), (c) 보다

의 경우가 더 많은 횡수의 과하중이 적용됨으로 인해서 더 큰 것을 알 수가 있다. 또한, 면내 굽힘 각도를 60°로 제작한 시험편에 시험방법 (a)와 (c)를 적용한 경우를 비교해보면, 초기균열은 하중에 수직한

방향에서 면내 굽힘각도를 30°를 준 경우보다 좀 더 왼쪽으로 치우쳐서 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이 현상은 시험방법 (b)와 (d)의 경우에도 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 역시 성장되어지는 균열은 시험방법 (a), (b), (c), (d) 모두 정적하중만을 주었을 때보다 용접부를 타고 내려가는 현상이 적는데, 이는 일정한 횡수로 들어가는 과하중의 영향이 충분히 큼으로 인한 현상으로 판단된다.

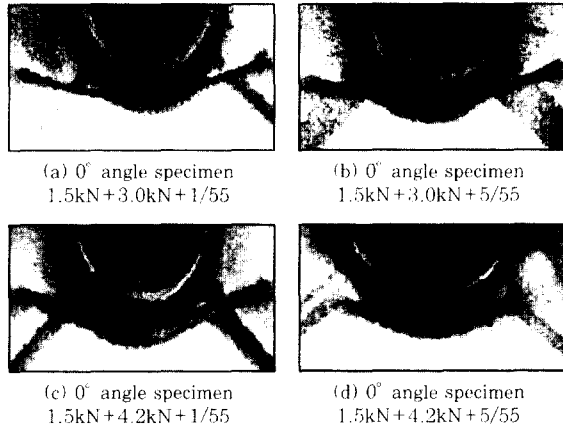


Fig. 5 Crack behavior of each experiment methods on 0° specimens

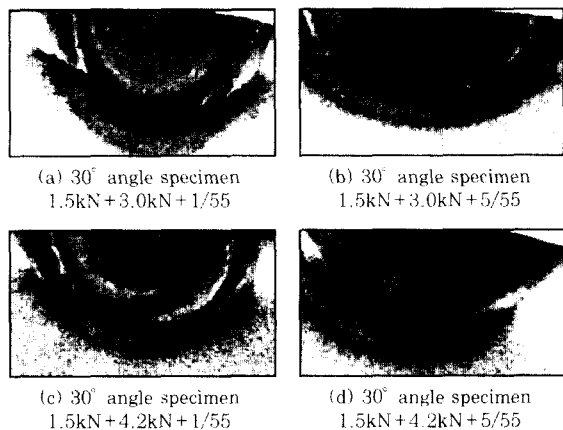


Fig. 6 Crack behavior of each experiment methods on 30° specimens

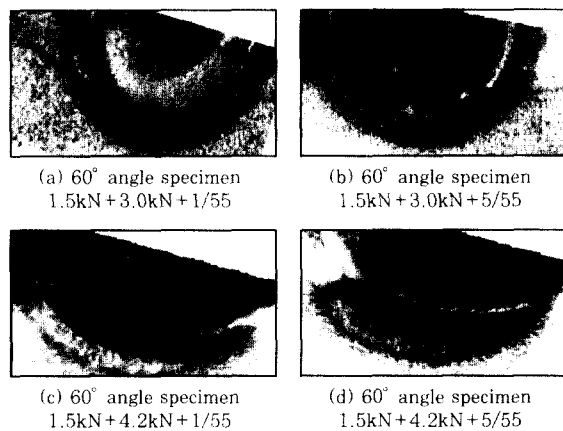


Fig. 7 Crack behavior of each experiment methods on 60° specimens

3.2 피로강도

과하중의 횡수에 따른 피로수명과 굽힘모멘트의 영향에 따른 피로수명의 결과를 Table 4와 5에 각각 나타내었다. Table 4에서 보듯이 과하중이 1/55의 비율로 들어간 경우보다 5/55로 들어간 경우가 수명이 현저하게 떨어지고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 과하중의 횡수가 증가한데서 비롯된 현상이다. 그러므로, 동일한 하중이지만 과하중의 횡수가 피로수명에 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있으며, 이러한 과하중의 횡수가 피로 특성에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하기 위해서 0, 30, 60° 시험편의 과하중횡수 1/55을 기

Table 4 Results of fatigue failure life [fatigue life unit:cycle]

Load type \ Bedding angle		0°	30°	60°
		1.5kN+3kN	1/55: 970,533	780,210
	5/55: 465,213	361,350	208,395	
Ratio		1	1	1
		0.4793	0.4631	0.4576
1.5kN+4.2kN	1/55: 265,650	218,130	113,520	
	5/55: 112,310	101,530	54,560	
Ratio		1	1	1
		0.4228	0.4655	0.4806

Table 5 Results of fatigue failure life [fatigue life unit:cycle]

Load type \ Bedding angle		0°	30°	60°
		1.5kN+3kN	1/55: 970,533	780,210
	Ratio: 1	0.8091	0.4692	
	1/55: 465,213	361,350	208,395	
	Ratio: 1	0.7767	0.4479	
1.5kN+4.2kN	1/55: 265,650	218,130	113,520	
	Ratio: 1	0.8211	0.4273	
	1/55: 112,310	101,530	54,560	
	Ratio: 1	0.9040	0.4858	

준으로 하여 그 비를 Table 4에 나타내었다.

또한, Table 5에서 피로수명은 판사이의 각도가 0° 일 때 가장 길고 60°로 커질수록 가장 짧게 나타나는데, 이것은 면내 굽힘 모우멘트의 크기가 시험편의 피로강도에 크게 영향을 미친다는 것을 나타내고 있다. 이러한 면내 굽힘 모우멘트가 피로 특성에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하기 위해 Table 5에 각 시험편에서의 면내 굽힘 모우멘트의 크기와 피로수명 사이의 관계를 0° 시험편을 기준으로 하여 비로 나타내었다.

위의 시험결과를 그래프로 나타내어 Fig. 8, 9에 나타내었다. Fig. 8은 과하중, 과하중횟수, 면내굽힘각도에 따른 피로수명의 변화이다. 여기에 과하중의 영향을 시험방법 (a), (b), (c), (d)의 형태로 적용해 보면, 과하중의 크기가 커질수록 그리고, 과하중의 횟수가 클수록 피로수명은 현저하게 감소함을 알 수가

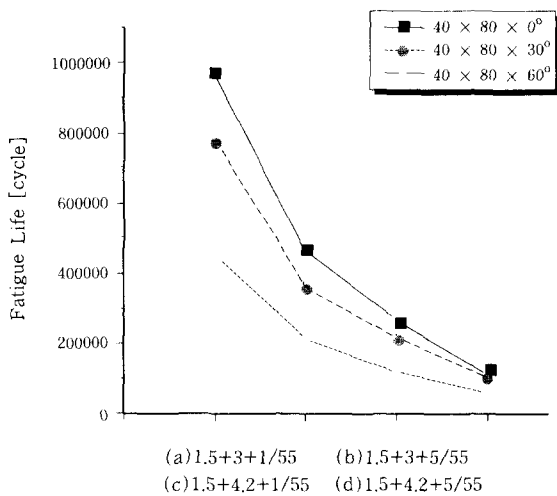


Fig. 8 Fatigue failure life results based on each experiment methods

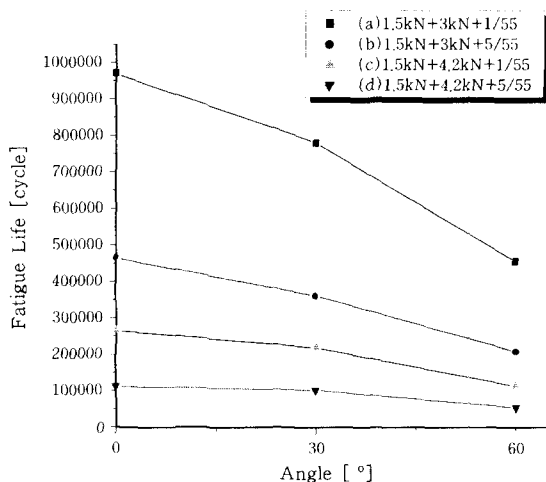


Fig. 9 Fatigue failure life results based on angle of specimens

있다. Fig. 9는 면내 굽힘각도의 변화에 따른 피로수명변화를 나타낸 것이다. Fig. 9를 통해서 면내 굽힘 모우멘트의 영향이 가장 크게 미치는 경우는 시험방법 (a)라는 것을 알 수가 있다. 즉, 과하중의 영향이 적을 때, 면내 굽힘모우멘트가 크게 작용하면, 피로수명이 크게 감소한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 과하중의 정도가 커지고, 과하중횟수가 증가할수록, 면내 굽힘모우멘트의 영향이 상대적으로 작게 된다는 것을 의미하는 것이다.

4. 결 론

차체구조물에 있어서 과하중의 작용과 면내 굽힘모우멘트가 점용접부의 피로특성 및 균열 성장거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 고장력 강판을 이용하여 인장 전단형 및 면내 굽힘형 점용접 시험편을 제작하여 피로 시험을 수행하여 피로 수명과 균열 발생과 성장 거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시험편에 있어서 면내 굽힘각도가 커질수록 초기 균열의 발생은 적용되는 하중의 수직된 방향에서 왼쪽으로 치우침 정도가 커진다.
- 2) 피로한도인 하중만을 적용할 때보다 과하중의 형태로 시험편에 적용되면, 과하중의 크기가 커질수록 과하중의 횟수가 증가할수록 피로수명은 현저하게 감소함을 알 수 있다.
- 3) 면내 굽힘각도가 점점 커질수록 용접부에 작용하는 굽힘 모우멘트의 증가로 피로수명은 점점 떨어진다.
- 4) 면내 굽힘모우멘트의 영향이 가장 크게 미치는 경우는 과하중이 적게 미치고 있을 때이며, 과하중의 정도가 커지고, 과하중횟수가 증가할수록, 면내굽힘모우멘트의 영향은 상대적으로 작게 된다.

참 고 문 헌

1. 정원욱 : 차체 박판 구조물의 점용접부 내구력 보강 및 평가에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문, (1998)
2. 박황호 : 자동차 분야에서의 용접기술 응용현황, 대한용접학회지, 제10권, 제4호, (1992), pp. 107-116
3. B. Pollard : Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive Applications, Welding Journal, 1974(8), pp. 343-350
4. 山一正 : 超高强度冷延鋼板의 스폿 용접繼手の 强度特性, 溶接學會論文集, 第17卷, 第4, (1999), pp. 553-560
5. 青山成恒, 藤本正男 : 스폿 용접시冷延鋼板의 疲勞强度, 材料, 第24卷, 第259, pp. 44-50
6. 態倉重典, 武田武信, 佐藤健夫 : 点溶接した低炭素鋼板의 疲勞舉動, 溶接學會誌, 第48卷, 第7, (1979) pp. 482-488
7. 日本自動車技術會 : 스폿 용접 手疲勞强度データ集,

- 1987
8. Tomioka, N. : Joint stiffness identification of body structure using neural network, Journal of JSME A, Vol. 62, No. 595, (1996), pp. 219-225
 9. 서창민, 강성수 : 고장력강판과 아연도금강판의 피로특성 II. 대한기계학회논문집, 제13권, 제2호, (1989), pp. 229-235
 10. Okuno, S. : Fatigue test of an actual car body structure investigation strength evaluation methods for spot welded joints, Journal of JSME A, Vol. 59, No. 562, (1993), pp. 1543-1549
 11. 송삼홍, 김부동 : 점용접재의 피로거동과 응력분포, 대한기계학회논문집, 제8권, 제3호, (1984), pp. 224-231
 12. 日本溶接學會 : スポット溶接技術資料, 1983, pp. 12-89
 13. Bosch : Automotive Handbook, 1993, pp. 320-350
 14. 日本自動車技術會 : 自動車技術ハンドブック-試験, 評價編, 1991, pp. 81-105
 15. Hideo Kitagawa : Fatigue strength of single spot-welded joints of rephosphorized high-strength and low carbon steel sheets, SAE, 850371, (1985), pp. 1-13