

점 용접의 연구 동향

Research Trends in the Field of Spot Welding

이 강 용*
Kang Yong Lee

1. 서 론

전기저항을 이용하여 두께가 1~7mm (0.03~0.27in)의 얇은 구조물을 국부적으로 용착시켜 접합하는 점 용접은 자동차 및 항공기 부품산업에 활용도가 높아지고 있다. 구조물 접합시 점 용접은 너깃 주위의 열영향부에 잔류응력이 발생하므로 정적강도와 피로강도를 저하시키려는 원인이 되고 있다. 따라서 강도의 저하를 방지하기 위하여 용접시간, 용접전류량, 용접 가압력 등에 대한 최적 용접조건을 설정하기 위한 연구가 많이 진행중에 있다.¹⁻³⁾

2. 연구동향

2.1 너깃형태와 잔류응력 평가

Blankenship와 Spreccace⁴⁾는 두께 1.3mm (0.05in) 및 1.6mm(0.064in)의 도금된 탄소강(ASTM A-527)과 두께 1.2mm (0.048in) 및 1.5mm(0.06in) 고강도 저합금(COR-TEN A)에 관한 gas metal arc (GMA)점 용접의 최적 용접조건을 얻기 위하여 점 용접 과정중에 발생하는 열영향부의 용접 균열 및 용착부의 언더컷 등의 결함을 방지하는 너깃 형성을 실험적으로 연구하였다.

Cohen과 West^{5,6)}는 두께 1.6mm (0.063in) 알루미늄 판의 점 용접부에 관한 용접성 평가방법으로 전압측정방법을 제안하였으며 이 방법을 스테인레스강(SAE 1010, 304)에도 적용하여 그 유용성을 보고한 바 있다. Adams⁷⁾는 두께 1.3mm (0.05in) 연강의 점 용접부를 초음파 방법을 적용하여 용접조건에 따라 너깃의 크기와 형상이 변화되는 것을 측정하고 시험편 파단후 측정된 너깃과 비교하여 잘 일치됨을 규명하였다. Roklin과 Adler⁸⁻⁹⁾는 두께 0.9mm(0.035in) 스테인레스강 재료를 이용하여 용접시간, 용접전류량, 용접가압력을 변화시켜 서로 다른 너깃 지름으로 점 용접을 한 다음 점 용접부에 관한 전단 강도를 비교 피적으로 예측하기 위하여 초음파 방법을 적용하였다. 파괴역학적 모델로서는 Kassir와 Shi¹⁰⁾가 제안한 응력세기계수를 적용하였으며 실험결과로부터 전단파괴하중이 너깃지름의 제곱에 비례한다고 보고하였다. Lane등¹¹⁾은 두께 1.3mm(0.05in)인 도금된 강의 너깃 형성에 관한 연구로부터 용접전류를 감소하고 용접시간을 증가하는 방법이 너깃 형성에 적합함을 밝혔다.

Bolton¹²⁾은 스테인레스강(FV 520)을 점 용접한 후 홀-드릴 방법에 의해 잔류응력을 측정하였다. 실험에서 너깃의 깊이에 따라 원

* 정회원, 연세대학교 기계공학과,교수

주 방향의 인장 잔류응력과 너깃의 접선 방향에 따라 압축 잔류응력이 얻어졌으며 너깃의 표면 잔류응력은 미세하고, 최대 잔류응력은 열 영향부에서 얻어졌으며, 열처리의 방법에 따라 잔류응력을 50% 감소시킬 수 있음을 보였다. Lindh와 Tohher¹³⁾는 유한요소법을 이용하여 두께 6.35mm(0.25in) 티타늄합금(Ti-Al-1Mo-1V) 판의 점 용접부에서 잔류응력을 계산하고 용접조건에 따른 영향으로서 용접시간이나 용접 가압력은 잔류응력의 크기와 분포변화에 거의 영향을 미치지 못한다고 지적하였다. Mizui 등¹⁴⁾은 두께 2.8mm(0.11in) C-Si-Mn-P강의 점 용접부에 X-선을 투과하여 잔류응력을 측정하고 잔류응력이 피로강도를 저하시킴을 보고하였다.

2.2 점적강도와 피로강도

Pollard¹⁵⁾는 점 용접이 잘 되지않는 고강도 저합금강 재료(SAE 1008)를 이용하여 정적하중 및 반복하중하에서 용접전류와 전단강도의 관계, 너깃지름과 전단강도의 관계, 용접가압력과 너깃지름과의 관계에 관하여 실험적 연구를 하였다. 이 결과에 따르면 용접전류와 전단강도의 관계에서 전단강도는 용접전류의 증가에 따라 최대 전단강도를 가지는 최적조건이 나타나고 있으며, 너깃지름과 전단강도의 관계에서는 두께가 증가할수록 전단강도가 증가하며, 동일한 두께에 대하여 최대전단강도를 나타내는 최적너깃 직경이 얻어지고, 용접 가압력과 너깃지름과의 관계는 최대 너깃지름을 형성하는 용접가압력이 얻어짐을 보고하였다.

Chandel과 Garber¹⁶⁾는 저합금 연강의 점 용접부에 대한 기계적성질, 미세조직 및 너깃 주위의 열영향부에 대한 경도측정 실험으로부터 최대전단강도가 얻어지는 최적 용접전류를 얻고 너깃 주변의 열영향부의 경도는 모재보다 30%~60% 범위에서 감소하며, 전단-인장형 피로파괴의 경우 열영향부의 경계에서 하중방향과 수직으로 균열이 발생되고 전파함을 보고하였다. Kaiser 등¹⁷⁾은 점 용접이 잘

되지 않는 두께 1.2mm(0.049in) 고강도 저합금강 재료를 이용하여 용접조건에 따른 너깃의 형성에 관하여 실험적 연구를 하였다. 이 연구에서 고전류 단시간 용접은 점 용접을 위한 두 부재의 접촉부에서 초기용접이 일어나는 반면, 저 전류에 의한 용접은 용착이 너깃의 외부 반경방향으로 일정하게 형성되므로 용접이 양호해지며, 용착부의 표면 전기저항이 적은 재료에 대하여는 전기가압력이 증가되는 경우 용접조건이 최적화됨을 밝혔다. 또한 전기 가압단을 표면처리하여 전기저항을 높이는 방법이 용접가압력을 감소시킬 수 있으며 용접조건이 향상되고 있음을 보고하였다. Oh¹⁸⁾는 점 용접시험편의 모델을 단순화하여 해석적인 방법으로 응력집중계수를 구하고 잔류응력을 모재의 항복응력 값으로 가정하여 Neuber식¹⁹⁾을 이용하여 점 용접부위의 극부응력을 구하고 평균응력의 영향이 고려된 Morrow식을 이용하여 피로수명을 예측한 결과와 기존의 실험결과와 비교 검토하였다. Gould²⁰⁾는 두께 0.5~1.5mm(0.02~0.06in) 고강도 저합금강(AISI 1008)을 이용하여 일정한 용접전류 및 용접 가압력하에서 너깃의 두께가 최대가 되는 용접시간을 얻고 1차원 모델에 의한 유한차분해석 결과와 비교하여 잘 일치함을 보였다.

2.3 피로수명

Kan²¹⁾은 두께 1.42~2.64mm(0.055~0.10in)인 고강도 저합금강판의 점 용접부에 대한 피로강도가 모재의 주기적 응력-변형을 선도 및 평균응력을 고려한 Morrow의 피로 수명식을 이용하여 설명될 수 있음을 제시하였다.

Overbeeke²²⁾는 56KF강의 점 용접부에 불규칙 피로하중을 작용하여 하중과 수명간의 실험식을 제안하였다. Lawrence, Wang과 Corren²³⁾은 점 용접부에 평균응력을 고려한 Basquin 수명식과 Peterson²⁴⁾의 피로 노치계수식을 이용하고 피로노치계수를 최대값으로 가정하여 잔류응력 및 응력비를 고려한 피로 수명과 공칭응력과의 관계를 실험적으로 얻었

다. 피로수명 모델은 균열발생, 전파의 2 단계 모델을 적용하고 균열 발생까지의 수명은 Basquin의 수명식을 적용하였으며, 균열전파에 관한 수명은 Pook²⁵⁾가 제안한 점 용접부에 대한 응력세기계수를 적용하여 피로균열의 성장에 관한 실험식을 제안하였다.

Davidson과 Imhof, Jr.²⁶⁾은 두께 2.06mm (0.081 in)인 고강도 저합금강 SAE 950 재료의 점 용접부의 피로수명을 응력세기계수의 관계로 제안하였으며, 응력세기계수는 점 용접부의 축방향 회전각에 관계됨을 보고하였다.

또한 Davidson과 Imhof, Jr.²⁷⁾는 두께 3.2 mm (0.126 in) 및 4.62mm (0.182 in)의 고강도 저합금강 재료에 대해 점 용접부의 축 방향회전각, 하중범위 변수와 두께로 이루어진 매개 변수와 피로수명과의 관계를 실험식으로 제안하였다.

Kitagawa 등²⁸⁾은 두께 0.8~1.6 mm (0.03~0.06 in)의 고강도 저탄소강에 대해 크로스-인장 피로하중이 작용하는 경우가 인장-전단형 피로하중이 작용하는 경우보다 피로강도가 저하함을 보였다.

Barsom, Davidson과 Imhof, Jr.²⁹⁾는 두께 1.47 mm (0.058 in) HR 80 × F 90 강판의 점 용접부에 변동 주기적 인장-전단형 하중이 작용하는 경우에 대해서 너깃의 회전각 범위, 하중범위 및 재료의 두께를 함수로 하는 손상매개변수와 피로수명과의 실험관계식을 제안하였다.

Cooper와 Smith³⁰⁻³¹⁾는 두께 1.48 mm (0.05 in) CR4 연강의 점 용접부에 전위차 방법을 이용한 균열길이 측정방법을 제안하였으며, 피로거동을 균열발생, 균열성장의 2 단계로 모델화하여 Pook²⁵⁾가 제안한 응력세기계수를 이용하여 균열 성장율을 Paris 실험식³²⁾ 형태로 표시하였다.

Satoh와 Abe³³⁻³⁴⁾는 두께 0.8~3.2 mm (0.03~0.12 in)인 SPCC, HT 45 R, HT 50 D, HT 50 및 고강도 강판의 점 용접부에 인장-전단형 반복하중이 작용하는 경우에 스트레인 게이지를 이용하여 균열길이를 측정하고,

피로수명을 하중범위의 함수로 표현하였다. 이 연구에서 모재의 기계적 특성은 균열발생시간과 피로한도에 밀접한 영향을 미치고 균열성장 수명에는 시험편 두께, 너깃 직경이 지배적인 변수로 작용함을 보고하였다.

Matsoukas, Steven과 Mai³⁵⁾는 너깃에서 전단파괴가 일어나지 않는 한 점 용접부의 피로수명은 너깃의 직경과 무관하며 최대하중과 피로수명과의 관계는 응력비가 영인 경우 그 값은 일정하다고 보고하였다. 또한 단일 점 용접 및 2, 3점의 점 용접부재에 대한 피로수명 및 피로균열성장율을 실험적으로 얻었다.

Wang, Corten과 Lawrence³⁶⁾는 점 용접부재의 피로수명에 관하여 해석적인 3 단계 모델을 제안하였다. 전단-인장 반복하중의 경우 1 단계의 피로수명은 점 용접부에 대한 균열발생에 관한 수명으로서 모재에 관한 Basquin의 실험식과 Neuber식³⁷⁾을 이용하여 균열발생 수명을 예측하였으며, 2 단계 수명은 균열이 두께방향으로 성장하는 과정으로 응력세기계수의 함수로 얻었으며, 3 단계 수명은 폭 방향으로 균열이 성장하는 수명으로서 응력세기계수의 함수로 얻었다.

Wang^{1, 36)}의 연구에서 재료의 두께길이를 균열발생길이로 정의하였다.

3. 결 론

최근까지 용접시간, 용접전류, 용접 가압력이 용접재료의 용착성과 두께에 따라 가지는 상호관계의 이해와 너깃 주위에 형성된 용접 잔류응력의 평가 및 강도에 관한 해석, 잔류응력의 영향을 고려한 피로수명의 예측에 관한 연구가 행해져 왔다.

이러한 연구들은 주로 실험에 의존하고 있으며 통일되고 체계적인 이론연구는 뚜렷한 진전을 보지 못하고 있어 이 분야에서 이론연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. P.C. Wang, and F.V. Lawrence, Jr., "A Fatigue Life Prediction Method for Tensile - Shear Spot Welds," Materials Engineering -- Mechanical Behavior Report 113, University of Illinois, 1984.
2. J.C. McMahon, and F.V. Lawrence, Jr., "Fatigue Crack Initiation and Early Growth in Tensile - Shear Spot Weldments," Material Engineering -- Mechanical Behavior Report 131, University of Illinois, 1985.
3. J.A. Davidson, "A Review of the Fatigue Properties of Welded Sheet Steel," SAE paper 830033.
4. W.P. Blankenship, and R.P. Spreccase, "Evaluation of GMA Spot Welding for Assembly of High performance Sheet structures," Welding Journal, pp.27-34, 1983.
5. R.L. Cohen, and K.W. West, "Flaw in Aluminum Spot Welds observed by Electrical Measurements," Welding Journal, pp.21-23, 1983.
6. R.L. Cohen, and K.W. West, "Spot Weld Strength Determined from simple Electrical Measurements," Welding Journal, pp. 17-23, 1984.
7. T. Adams, "Nondestructive Evaluation of Resistance Spot Welding Variables Using Ultrasound," Welding Journal, pp.27-28, 1985.
8. S.I. Rokhlin, and Laszlo Adler, "Ultrasonic method for Shear Strength prediction of Spot Welds," Journal of Applied Physics, Vol.56, No.3, pp.726-731, 1984.
9. S.I. Rokhlin, and L. Adler, "Ultrasonic Evaluation of Spot Weld Quality," Welding Research Supplement, pp.191s-200s, 1985.
10. M.K. Kassir, and G.C. Shi, in Mechanics of Fracture, edited by G.C. Shi, Noordhoff Leyden, Vol.2, 1975.
11. C.T. Lane, C.D. Sorensen, G.B. Hunter, S.A. Gedeon, and T.W. Eagar, "Cinematography of Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheet," Welding Research Supplement pp.260s-265s., 1987.
12. W. Bolton, "Residual Stress Distribution In and Around Spotwelds," British Welding Journal, pp.57-60, 1961.
13. D.V. Lindh, and J.L. Tohher, "Heat Generation and Residual Stress Development in Resistance Spot Welding," Welding Research Supplement, pp.351s-360s, 1967.
14. M. Mizui, O. Matsumura, and T. Sekine, "Effect of Residual Stress on Cross Tension Fatigue Strength," Transaction ISIJ, Vol.26, p.B114, 1986.
15. B. Pollard, "Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive Applications," Welding Research Supplement, pp.343s-350s, 1974.
16. R.S. Chandel, and S. Garber, "Mechanical and Metallurgical aspects of Spot-Weld Joints in heat-treated low-carbon mild Steel Sheet," Metal Technology, pp.418-424, 1974.
17. J.G. Kaiser, G.J. Dunn, and T.W. Eagar, "The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding," Welding Research Supplement, pp. 167s-174s, 1982.
18. H.L. Oh, "Fatigue - Life Prediction for Spotwelded Using Neuber's Rule," ASTM STP 761, pp.296-309, 1982.
19. H. Neuber, "Theory of stress concentration for Shear strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress - Strain Laws," Journal of Applied Mechanics, pp.544-550, 1961.

20. J.E. Gould, "An Examination of Nugget Development During Spot Welding, Using both Experimental and Analytical Techniques," *Welding Research Supplement*, pp.1s-10s, 1987.
21. Yih-Renn Kan, "Fatigue Resistance of Spotwelds - An Analytical Study," *Materials Engineering Quarterly*, pp.26-36, 1976.
22. J.L. Overbeeke, "Random fatigue of spot welds lap joints," *Metal Construction*, pp.81-83, 1979.
23. F.V. Lawrence, Jr. P.W. Wang, and H.T. Corten, "An Empirical method for estimating the Fatigue Resistance of Tensile-Shear Spot-Welds," SAE 830035.
24. R.E. Peterson, "Analytical Approach to Stress concentration Effect in Fatigue of Aircraft Structures," WADC Technical Report 59-507.
25. L.P. Pook, "Approximate Stress Intensity Factor for Spot Welds and Similar Welds," National Engineering Laboratory Report No.588, April, 1975.
26. J.A. Davidson, and E.J. Imhof, Jr., "A Fracture - Mechanics and System-Stiffness Approach to Fatigue Performance of Spot-Welded Sheet Steels," SAE 830034.
27. J.A. Davidson, and E.J. Imhof, Jr., "The Effect of Tensile Strength on the Fatigue Life of Spot-Welded Sheet Steel," SAE 840110.
28. H. Kitagawa, T. Satoh, and M. Fujimoto, "Fatigue Strength of Single Spot-Welded Joints of Rephosphorized High-Strength and Low-Carbon Steel Sheets," SAE 850371.
29. J.M. Barsom, J.A. Davidson, and E.J. Imhof, Jr., "Fatigue Behavior of Spot Welds under Variable - Amplitude Loading," SAE paper 850369.
30. J.F. Copper, and R.A. Smith, "The measurement of fatigue cracks at spot-welds," *International Journal of Fatigue*, Vol.7, No.3, pp.137-140, 1985.
31. J.P. Cooper, and R.A. Smith, "Fatigue crack propagation at spot welds," *Metal Construction*, pp.383R-386R 1986.
32. P.C. Paris, and F. Erdogan, "A critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Journal of Basic Engineering*, Vol.85, No.4, pp.528-535, 1963.
33. T. Satoh, and H. Abe, "Non - Destructive Detection Method of Fatigue Crack in Spot-Welded Joint Specimens," SAE 860601.
34. H. Abe, S. Kataoka, and T. Satoh, "Empirical Formula for Fatigue Strength of Single-Spot - Welded Joint Specimens under Tensile-Shear Repeated Load," SAE 860606.
35. G. Matsoukas, G.P. Steven, and Y.W. Mai, "Fatigue of spot-welded lap joints," *International Journal of Fatigue* Vol.6, No.1, pp.55-57, 1984.
36. P.C. Wang, H.T. Corten, and F.V. Lawrence, "A Fatigue Life Prediction Method for Tensile-Shear Spot Welds," SAE 850307.