한국산학기술학회논문지
Vol. 7, No. 3, pp. 314-318, 2006

점용접된 판에서의 동적 파괴 거동

조재웅[1*]

Dynamic Fracture Behavior at the Spot Welding Plate

Jae-Ung Cho[1*]

요 약 본 연구에서는 점 용접된 박판이 파괴되어 가는 동적 과정을 시뮬레이션 함으로서 그 점용접부의 강도를 해석하는데 있다. 위판이 아래의 판에 대하여 늘어난 후 0.64 ms가 경과된 시점에서 서로 점 용접된 위판 및 아래 판이 떨어져 나감을 알 수 있다. 비교적 위판 및 아래 판 가운데의 용접 부위에서 최대의 von Mises 응력을 나타내고 있다. 용접이 깨어지는 시점인 0.64 ms 부근에서는 그 내부에너지가 상당히 감소되고 운동에너지는 급격히 증가됨을 알 수 있다. 미끄럼 에너지는 시간이 경과됨에 따라 계단형으로 감소되어 경과 시간이 0.2 ms 부근에서 0이 되다가 그 후로는 미끄럼 에너지가 음수의 값이 되어 두 판들은 오히려 고착이 되는 것을 알 수 있다.

Abstract This study is to analyze the intensity of welding part by simulating the dynamic procedure during the fracture of plates with spot welding. The upper and lower plates attached with spot welding can be seen to fall apart at the elapsed time of 0.64 ms after the upper plate is stretched from the lower plate. The maximum von Mises stress is shown at the welding part in the mid of upper and lower plates. The internal energy decreases largely and the kinetic energy increases suddenly near the elapsed time of 0.64 ms when welding part breaks down. The sliding energy decreases with step-by-step style as the time elapses. The value of this energy becomes 0 at the elapsed time of 0.2 ms and on the contrary, two plates stick each other as this value becomes a minus after this time.

Key Words : spot welding, maximum von Mises stress, internal energy, kinetic energy, sliding, energy

1. 서론

점용접은 작업이 간단하며 매우 짧은 시간 내에 이루어지므로 자동화가 용이하고 대량생산에도 적합하므로 자동차 차체를 비롯한 철도 차량, 항공기 구조, 가전제품 등 높은 내구성과 신뢰성이 요구되는 박판구조의 접합에 널리 사용되고 있다[1]. 점용접은 박판 접합부 주변의 열영향부가 작을 뿐 아니라 잔류 응력과 변형의 관점에서 다른 용접공정보다 월등히 양호하다. 최근 점용접에 관한 공학적 및 공업적인 관심이 증가하게 된 것은 구조의 경량화가 중요한 의미를 갖기 때문이다. 특히 자동차의 경량화는 자동차의 성능과 연관되는 가속성, 주행 성능 및 연비 등과 직결되므로 효율적으로 차체의 중량을 줄이는 것이 자동차 구조 설계에 있어서 중요한 과제이다[2-3]. 점용접은 구조물을 경량화하는데 큰 역할을 하고 있어 그 활용도는 점점 증가하는 추세이며, 이와 같은 추세에 맞추어 점용접 구조물의 안전 설계를 위하여 점용접부의 강도 및 내구성 향상과 전반적이고 정확한 수명 평가를 위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다[4-5]. 그러나 점용접부는 응력 상태가 복잡하고, 파단이 3차원적으로 성장하므로 파단의 해석 및 예측이 어렵다. 따라서 기존의 많은 연구가 박판의 용접성 향상이나 점용접부의 정적 강도 평가에 국한되어 극히 미미한 실정이다. 따라서 점용접부의 파괴 거동에 대하여 좀 더 체계적이고 깊이 있는 연구가 필요하다고 생각된다. 이상의 결과를 감안하여 본 연구에서는 자동차 차체로 많이 사용되고 있는 점용접된 강으로 된 박판이 파단되어 가는 과정을 시뮬레이션 해석함으로써, 그 점용접부의 응력 해석 및 강도 평가를 하였다.

[1]공주대학교 기계 · 자동차공학부
*교신저자: 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

2. 본론

2.1 점용접부의 시뮬레이션 모델

중량이 없는 점용접으로 가정하여 두 개의 겹쳐진 강판들이 하나의 용접으로 서로 연결이 되어 있다고 가정한다. 하나의 판은 그 바닥에 고정되고 다른 판이 그 판으로부터 떨어져 나가면서 인장력이 발생한다. 작용되는 하중하에서 그 판들이 늘려지고 구부러짐에 따라서 전단력과 수직력들이 발생한다. 취성의 파괴 조건들이 될 때, 점용접은 깨어진다. 사용한 적분요소는 디폴트로서 일점 적분요소[6]를 사용하며 이 요소는 재료의 과도변형 해석에 있어서 그 CPU 시간을 범용 소프트웨어보다도 4배의 시간을 절약할 수가 있는 장점이 있는 반면에 해석시, 모델에서 zero에너지 변형을 일으킨다. zero 에너지 변형은 판의 전체적인 반응보다 지그재그 변형을 일으키게 되어 실제적인 모양과는 차이가 있다. 이러한 변형을 hourglass라고 하며 이를 방지하기 위하여는 판의 재료에 강성을 추가하거나 점성 감쇄의 변화에 따라서 hourglass조절을 해야 한다. 본 연구에서는 하나의 점용접된 접착점에 관하여는 완전 적분 요소인 SHELL163요소[7]가 사용되어짐으로서 부가적인 hourglass조절은 필요하지 않다. 또한 본 연구에서는 서로 점용접된 두 판들에 대해서는 BKIN 요소[7]의 재료 모델로 정의된다. 판의 재질은 이중 선형 운동 경화 모델(bilinear kinematic hardening model)로서 강이고 그 물성치는 표 1과 같다. 또한 이 모델의 모양 및 치수는 그림 1과 같다.

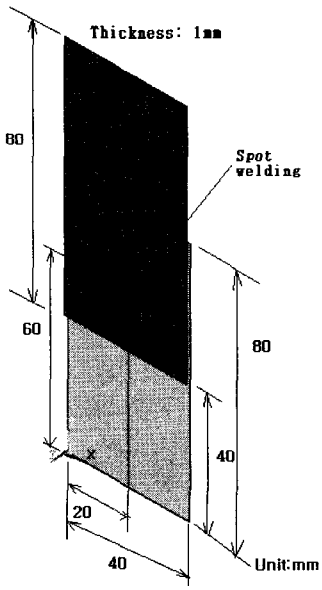

그림 1. 모델의 모양 및 치수

표 1. 강판 재료의 물성치

Density (ρ)	7850 Kg/m^3
Elastic modulus (E)	210 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.29
Tangent modulus(E_t)	21 GPa
Yield point(σ_y)	0.8 GPa
Mass-weighted damping coefficient(α)	0.01
Stiffness-weighted damping coefficient(β)	0.05

본 연구에 적용된 프로그램은 점용접에 대한 동적 파괴 해석의 전용인 ANSYS LS-DYNA를 사용하여 수행하였다[6]. 그림 2와 같이 각각의 판은 45개의 절점들, 30개의 요소들로 분할하였다. 구속 조건으로서는 아래의 판은 그 바닥에 완전히 고정되어 있고, 판의 위쪽 복판에 점용접된 위치가 표시되어 있다.

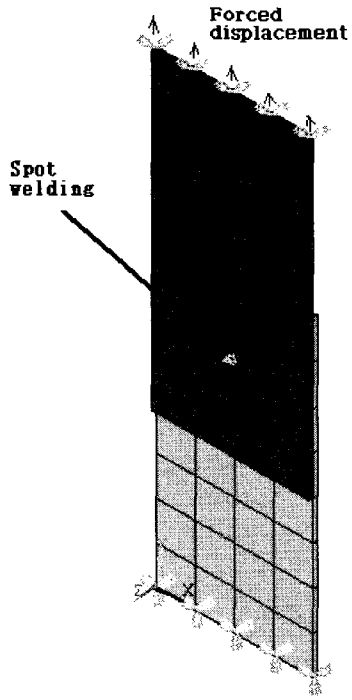

그림 2. 강판의 요소 분할 및 구속조건

그리고 위판의 꼭대기 가장자리에서 Y축의 위쪽 방향으로 1 ms동안 일정하게 40 mm로 강제 변위가 그림 3과 같이 작용되고 있다. 또한 두 개의 판들에서 중앙 부위의 용접 위치에 해당하는 위판과 아래 판의 점들을 취하게 된다. 따라서 위판과 아래 판에서의 각각의 절점 번호는

78번과 37번으로서 본 연구에서는 ①번 및 ②번으로 표기한다.

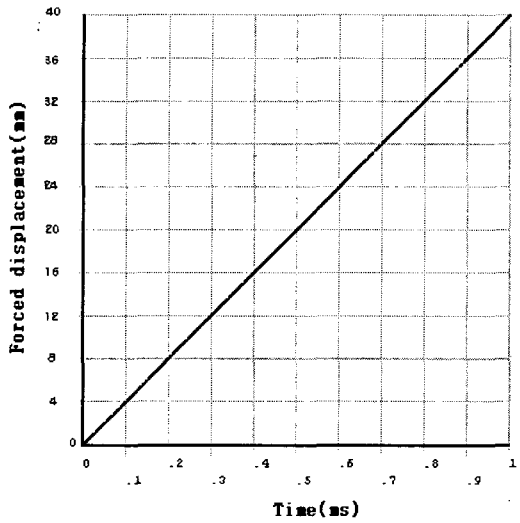

그림 3. 시간에 따른 판의 강제 변위

점용접 조건으로서는 다음의 (1)과 같은 수식을 만들 수 있는데. 허용할 수 있는 법선력(S_n)과 접선력의 힘(S_s)을 각각 100 kN으로 하고 법선력과 접선력의 지수들(exp_n 및 exp_s)은 2로 가정한다. 해석시에 점용접에서의 구한 법선력(f_n) 및 접선력(f_s)의 값이 (1)의 수식[7]을 만족하면 이 용접은 깨어진다. 단, 한쪽 방향으로만 인장력이 법선 방향으로 작용할 때 고려되어지고 있다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 위쪽 방향으로 인장력이 작용되고 있다.

$$\left(\frac{|f_n|}{s_n}\right)^{\exp_n} + \left(\frac{|f_s|}{s_s}\right)^{\exp_s} \geq 1 \qquad (1)$$

2.2 해석 및 고찰

그림 4에서와 같이 점용접한 위치인 ①번 및 ②번 절점에서의 Y축방향 변위를 시간에 대하여 본 것인데 ①번 절점은 위판에서의 78번 절점을 나타내고 ②번 절점은 아래 판에서의 37번 절점을 나타낸다. 위쪽에서 당겨지고 있으므로 ① 및 ②번 절점에서의 변위는 계속 증가되다가 0.64ms에서, ①번 절점의 변위는 13.79 mm에서 상당히 증가됨을 알 수 있었고 ②번 절점의 변위는 오히려 10.76mm에서 상당히 감소되면서 두 판이 떨어져 나가는 시점으로 관찰되고 있다.

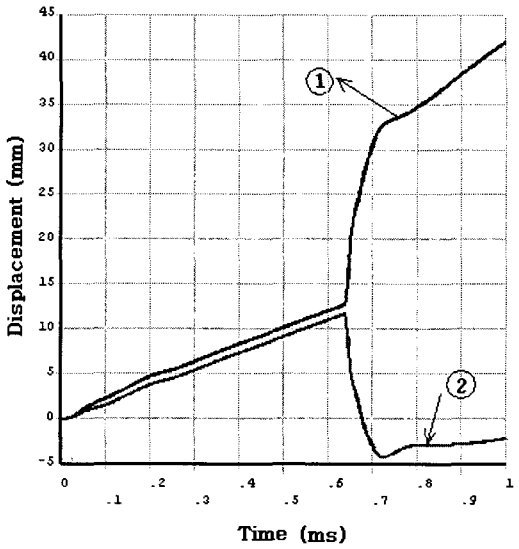

그림 4. 시간에 따른 ①번 및 ②번 절점에서의 Y축 방향 변위

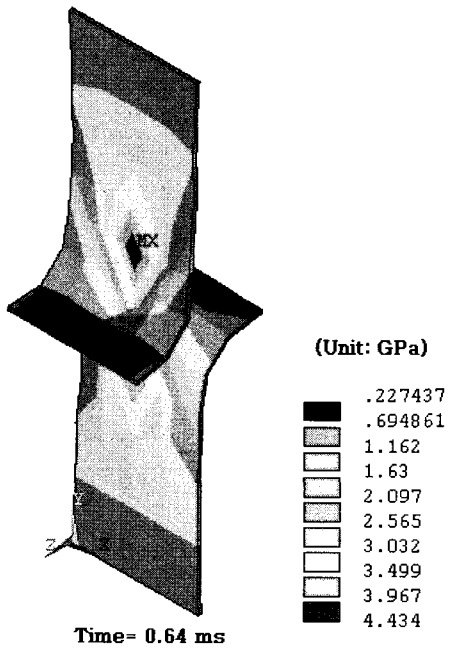

그림 5. 0.64 ms 경과된 시점에서의 von Mises 응력 분포

그림 5는 위판이 늘어난 후 0.64 ms가 경과된 시점에서의 von Mises 응력을 나타낸다. 위판 및 아래 판의 가운데 용접 부위에서 최대의 응력을 나타내고 있고 그 값은 4.434 GPa이었다. 그러나 위판에서의 아래 부분의 가장자리 및 아래 판에서의 위 부분의 가장자리에서는 최

소의 응력을 나타내고 있고 그 값은 0.227 GPa이 되었다.

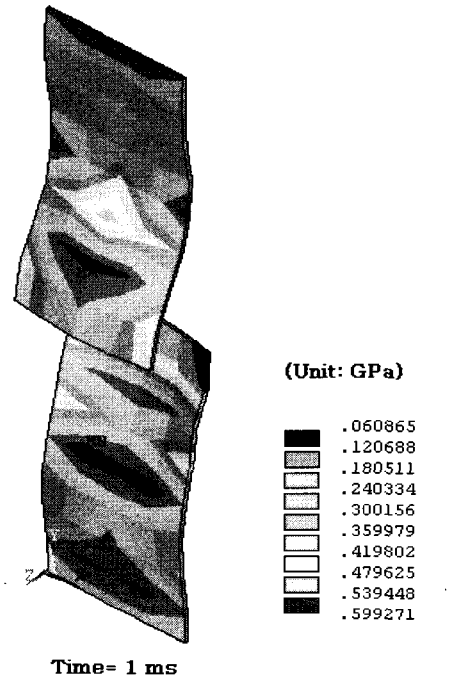

그림 6. 1 ms 경과된 시점에서의 von Mises 응력 분포

그림 6은 해석의 최종 시점인 1 ms가 경과된 시점에서의 von Mises 응력을 나타낸다. 아래 판에서의 위 부분 및 위판 가운데 부분의 용접부위에서 최대의 응력을 나타내고 있고 그 값은 0.599 GPa이었다.

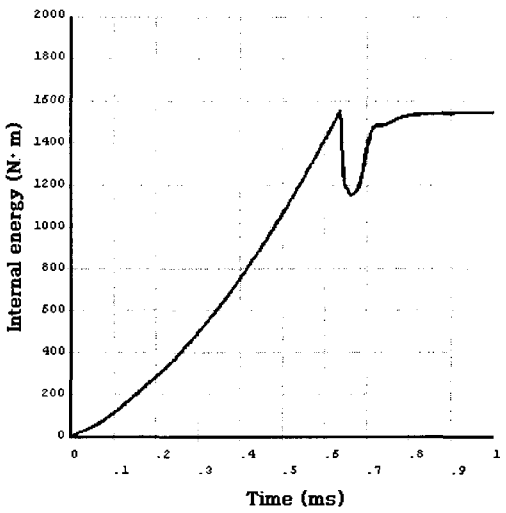

그림 7. 시간에 따른 내부에너지의 변화

그림 7은 시간에 따른 내부에너지의 변화를 본 것인데, 경과 시간이 0.64 ms로 1483 N · m이 될 때까지 증가되다가 다시 이 부근에서 1152 N · m로 상당히 떨어짐을 볼 수 있었다. 이 부근은 용접이 깨어지는 시점부근으로서 그 내부에너지가 급격히 감소됨을 보여 준다.

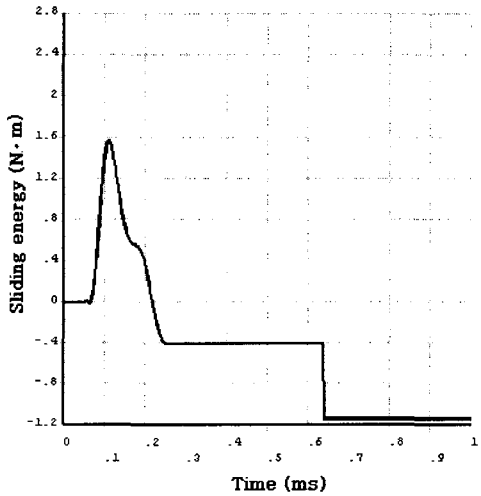

그림 8. 시간에 따른 미끄럼 에너지의 변화

그림 8은 시간에 따른 미끄럼 에너지의 변화를 본 것인데, 0.1 ms부근에서 1.56 N · m 까지 가장 크게 증가되다가 계단형으로 감소되어 경과 시간이 0.2 ms 부근에서 0이 되었다. 그 후로는 미끄럼 에너지가 음수의 값이 되어 오히려 고착이 되는 것을 알 수 있었다. 용접 부위가 떨어져 나가는 시점인 0.64ms의 경과시간 부근에서 -0.4 N · m에서 -1.14 N · m로 상당히 떨어짐을 알 수 있었다.

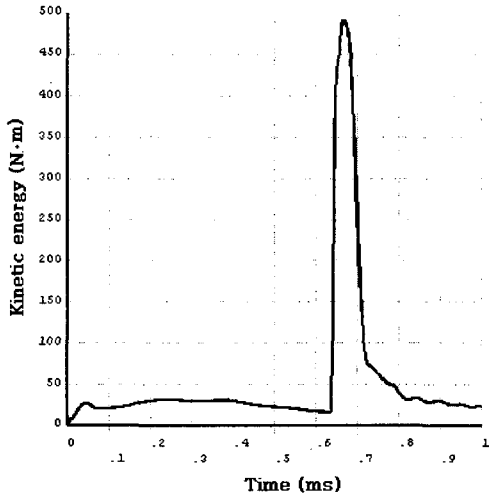

그림 9. 시간에 따른 운동 에너지의 변화

그림 9는 시간에 따른 운동 에너지의 변화를 본 것인데, 용접 부위가 떨어져 나가는 시점인 0.64ms의 경과시간 부근에서 급격히 높아져 490 N · m까지 올라가게 됨을 알 수 있었다.

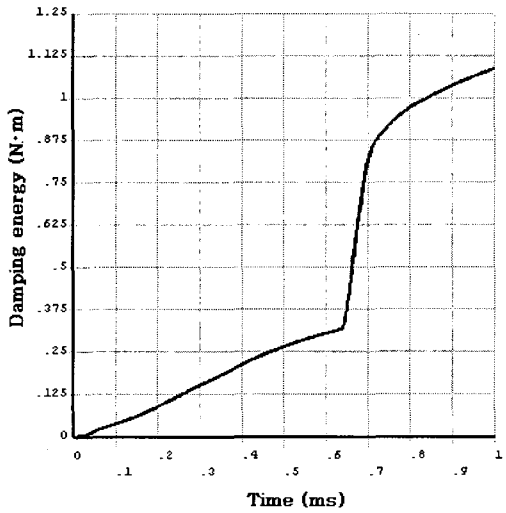

그림 10. 시간에 따른 감쇄에너지의 변화

그림 10은 시간에 따른 감쇄에너지의 변화를 본 것인데, 용접 부위가 떨어져 나가는 시점인 0.64ms의 경과시간 부근에서 0.7 ms까지 상당히 올라가게 됨을 알 수 있었고 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 점용접된 강으로 된 박판이 파단되어 가는 과정을 시뮬레이션 해석함으로써, 그 점용접부의 응력 해석 및 강도 평가를 하였는데 이 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 서로 점 용접된 두 개의 판들이 늘어난 후 0.64 ms가 경과된 시점에서, 점 용접된 위 판 및 아래 판이 떨어져 나감을 알 수 있었다. 위판 및 아래 판의 가운데 용접 부위에서 최대의 von Mises응력을 나타내고 있고 그 값은 4.434 GPa이 되었다.

(2) 시간에 따른 내부에너지의 변화는 용접이 떨어져 나가는 시점인 0.64 ms에서 1483 N · m이 될 때까지 증가되다가 다시 이 부근에서 1152 N · m로 상당히 내려감을 볼 수 있었다.

(3) 시간에 따른 미끄럼 에너지의 변화는 0.1 ms부근에서 1.56 N · m까지 가장 크게 증가되다가 계단형으로 감소되어 경과 시간이 0.2 ms 부근에서 0이 되었다. 그 후로는 미끄럼 에너지가 음수의 값이 되어 오히려 고착이 되는 것을 알 수 있었다.

(4) 운동 에너지의 변화는 용접 부위가 떨어져 나가는 시점인 0.64ms의 경과시간 부근에서 급격히 높아져 490 N · m까지 올라가게 됨을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 민준기, 오영근, 김광수, "자동차용 도금 강판의 점용접성에 관한 연구," 대한용접학회지, 제 14권, 제 3호, pp.41-47, 1996.

[2] I. S. Jang, D. B. Chae, "The Derivation of Simplified Vehicle Body Stiffness Equation Using Collision Analysis," Trans. KSAE, Vol. 8, No. 4, pp.177-185, 2000.

[3] 이종선, "쿨러 자켓의 유동해석," 한국산학기술학회논문지, Vol. 7, No. 1, pp.1-6, 2006.

[4] L. P., Pook, "Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of Spot Welds," Int, J. of Fracture, Vol. 11, pp.173-176, 1975.

[5] 신현일, 강성수, "고장력강판 및 2층아연도금된 고장력강판의 점용접성에 관한 연구," 대한용접학회지, 제 12권, 제 3호, pp.56-62, 1994.

[6] Training Manual Explicit Dynamics with LS- DYNA, ANSYS Version 10.0, pp. 4-7, 2003.

[7] LS-DYNA Theoretical Manual, ANSYS Version 10.0, 2003.

조 재 웅(Jae-Ung Cho) **[정회원]**

- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학석사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과(공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계·자동차공학부 교수

<관심분야>
기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가,
피로 또는 충돌시 동적 해석