

시뮬레이션 및 너겟 성장 곡선을 이용한 자동차 차체용 3겹 강판의 저항점 용접성 분석

박영환*

¹국립부경대학교 기계공학과

Analysis of Weldability on Resistance Spot Weld for 3 Steel Sheets of Automotive Car Body Using Simulation Method and Nugget Growth Curve

Young Whan Park^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

요약 최근 자동차 산업은 고효율 자동차의 개발에 박차를 가하고 있으며 이에 따라 차체 경량화 및 내식성 방지를 위한 고강도강 및 도금강의 사용이 증가하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 자동차 차체에 쓰이는 3종의 다른 강판에 대하여, 겹침 순서에 따른 용접 특성을 시뮬레이션 기법을 이용하여 분석하였다. 자동차 차체에 많이 사용되는 EDDQ 급의 도금강판 0.7t와 인장강도 440 MPa급의 440R 1.2t, 그리고 AHSS (Advanced High Strength Steel)인 DP 590 0.2t 판재에 대하여 겹치기 순서에 따른 용접 특성을 시뮬레이션 하였고, 너겟 성장 곡선 및 전류에 따른 너겟의 크기로 그 용접성을 분석하였다. 또한 용접 시 발생하는 각 접촉부의 접촉저항을 이용하여 겹침순서에 따른 너겟의 크기를 분석하였으며, 이를 통해 최적의 겹치기 순서를 제안할 수 있었다.

Abstract Nowadays, most car manufactures have tried to improve fuel efficiency and corrosion resistance of car body. Therefore, use of high strength steels and coated steel becomes more and more increased. In this study, spot weld characteristics according to lap sequence of sheets were analyzed using simulation method for three different steel sheet of car body which were EDDQ class coated steel with 0.7t, high strength steel 440R with 1.2t and advanced high strength steel DP 590 with 1.0t. Using simulation, weldability was evaluated by nugget size of welded zone according to nugget growth curve and welding current with respect to lap sequence of sheets. Contact resistance of each sheets contact point was used to analyze formation of nugget and optimal lap sequence was suggested.

Key Words : Resistance spot welding, Numerical Simulation, Lap sequence, Nugget growth curve

1. 서론

전 세계적으로 환경오염에 대한 관심이 급증하고 있으며, 지구 온난화와 같은 문제는 전 인류가 공조하여 극복해야 할 문제로 대두되고 있다. 특히 온실가스에 대하여 선진국을 비롯한 각 나라는 자동차 배기가스를 주요 원인으로 판단하였고, 배기가스 규제를 강화하고 있다. 그러므로 자동차 회사는 고효율의 자동차 개발에 힘쓰고

있으며, 대표적인 방법 중에 하나가 차체를 경량화하여 연비를 향상시키는 것이다. 이를 위해 고강도 강과 같은 소재를 이용하여 기존보다 얇은 두께를 차체에 적용하여 경량화하고, 연비를 향상시키고 있다.

이에 따라, 차체에 투입되는 소재의 종류가 다양해지고 있다. 자동차 차체에 새로운 소재, 새로운 강판이 적용이 되고 있으며, 자동차 조립에 필요한 저항 점 용접의 최적 용접 조건설정에 많은 시간과 비용이 투입되고 있

*교신저자 : 박영환 (parkyw@pknu.ac.kr)

접수일 10년 07월 17일

수정일 (1차 10년 08월 30일, 2차 10년 09월 02일)

게재확정일 10년 09월 08일

다. 이를 극복하기 위하여 시물레이션 기법을 이용한 저항 점 용접의 용접성 평가에 대한 연구들이 수행되었다 [1].

이를 위한 기본 연구로 저항 점 용접에서 발생하는 기계적 동특성 및 접촉저항에 대한 모델링, 그리고 시물레이션 해석을 위한 수치적, 실험적 연구[2-4]가 수행되었으며, 이를 기반으로 전극 가압력에 대한 영향력 평가[5], 아연 코팅된 강판의 용접 특성과 스페터 특성 분석 및 전극의 마모 특성 분석[6], 스테인레스 강의 저항 점 용접 특성에 대한 연구[7]가 수행되었다. 그리고 자동차용 차체에 대한 용접성 평가[8] 및 용접부의 역학적 거동 특성에 대한 연구[9]가 수행되었다.

본 연구에서는 위와 같은 연구 결과를 바탕으로 시물레이션 기반하여 자동차 차체에 많이 쓰이는 도금강과 고강도강의 3겹 겹치기 용접에서 겹침 순서에 따른 점용접 특성을 너겟의 크기와 너겟 성장 곡선을 이용하여 분석하였다. 또한 너겟의 형성 메커니즘을 접촉저항을 이용하여 분석하였고, 이를 통해 3겹 겹치기 용접의 겹침 순서를 제안하였다. 이것은 자동차 차체 조립에 있어서 강재의 용접성을 고려하여 안정적이고, 강건한 용접 품질을 얻을 수 있도록 강판으로 이루어진 단품의 어셈블리 순서의 결정에 있어서 적용이 가능하다.

2. 저항 점 용접 시물레이션

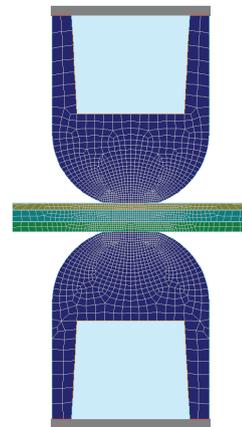
저항 점 용접 시물레이션을 위해 사용된 CAE 프로그램은 SORPAS라는 점용접 전용 해석 소프트웨어를 사용하였다. 본 프로그램은 기존 연구[2-4]를 바탕으로 하여 제작되었으며, 시물레이션의 결과와 실제 실험결과에 대한 신뢰성 검증이 다양한 논문 및 연구를 통하여 수행되었다[5-8, 10]. 그러므로 본 연구에서는 시물레이션을 이용한 연구 결과를 분석하였다.

시물레이션에 사용된 강종은 아래와 같다. 먼저 연강재인 EDDQ (Extra-Deep Drawing Quality)급 도금강 0.7t 로, 인장강도 270 MPa 이상, 연신율44% 이상의 기계적 성질을 갖고 도금량은 60 g/m²의 GA(Galvaanneal) 강판을 이용하였다. 다음은 rephosphorized된 고강도인 440R 급 1.2t의 비도금강을 이용하였고, 이것은 인장강도 440 MPa이상, 연신율은 15%이상의 기계적 성질을 가지고 있다. 또한 AHSS (Advanced High Strength Steel)인 DP강은 페라이트 기지에 마르텐 사이트로 구성된 2상 (Dual Phase)로 구성된 강으로 인장강도 590 MPa 이상, 연신율 24%이상의 기계적 성질을 갖는 DP 590 1.0t를 사용하였다.

시물레이션에 사용될 3개의 판재에 대하여 겹침 순서는 표 1과 같이 3가지의 경우로 나눌 수 있다. 표 1에서 겹침 순서에 따라 계면의 표시는 첫째 판과 둘째 판재사이의 계면은 A-BC 로 둘째 판과 세째 판의 계면은 AB-C 로 표기하였다.

【표 1】 판재 조합에 따른 겹침 순서

경우	겹침 순서
Case I	A - BC
	AB - C
Case II	A - BC
	AB - C
Case III	A - BC
	AB - C



【그림 1】 시물레이션을 위한 판재 및 전극의 메쉬

시물레이션에 사용된 용접 조건으로는 사용된 용접기는 50 Hz AC 용접기였고, 사용된 전극은 일반적인 저항 점 용접에 가장 많이 쓰이는 돔(dome)형 전극으로 직경 16 mm, 선단경 6 mm인 CuCrZr소재의 전극을 이용하였다. 냉각수 조건으로는 20℃의 냉각수가 4 l/min의 유량으로 전극에 흐르는 것으로 설정하였다. 시물레이션에 사용된 전극 및 판재의 메쉬 (mesh)의 형상은 그림 1과 같다. 그림 1의 경우 표 1의 Case II에 해당하는 메쉬이다.

3. 계면에 따른 접촉 저항 변화

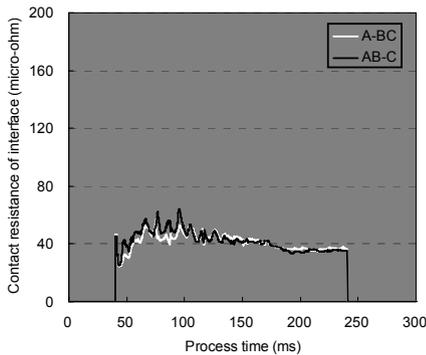
저항 점 용접에 있어서 용접부의 발열은 두 판재사이 에 발생하는 접촉 저항에 비례한다. 그러므로 접촉 저항 은 저항 점 용접에 있어서 매우 중요한 역할을 한다.

시뮬레이션 상에 있어서 접촉 저항은 식 (1)을 통하여 도출된다[8,10].

$$\rho_{contact} = 3 \left(\frac{\sigma_{s_soft}}{\sigma_n} \right) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \rho_{contaminant} \right) \quad (1)$$

여기서 $\rho_{contact}$ 는 접촉 저항을, ρ_1 와 ρ_2 는 접촉하 는 두 재료의 고유 저항을, $\rho_{contaminant}$ 는 접촉부 표면 의 오염에 의한 저항을 나타낸다. 또한 σ_{s_soft} 는 접촉 된 두 금속 중, 경도가 약한 금속의 응력 (flow stress)를 σ_n 은 계면의 접촉 수직 압력을 나타낸다.

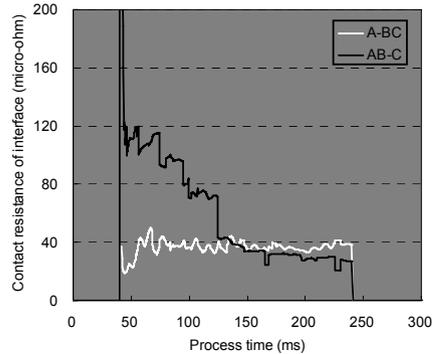
그림 2는 표 1에 나타난 Case I에 대한 두 계면사이의 계산된 접촉저항으로 용접전류 8 kA, 용접 시간 10 cycle, 가압력 3 kN인 경우이다. 그림에서 보는 바와 같 이 두 접촉저항의 차이가 크게 나지 않는 것을 알 수 있다.



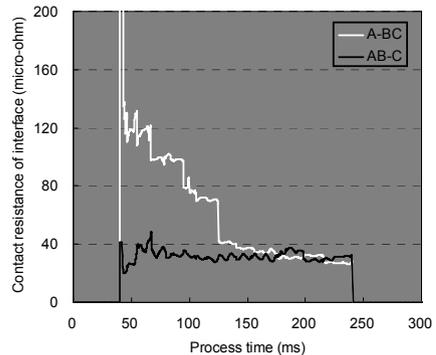
[그림 2] Case I의 계면에서의 접촉저항

그림 3과 4는 표 1에 나타난 Case II와 Case III에 의한 접촉저항을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 비 도금 강판끼리 맞닿는 부분인 Case II의 AB-C 계면과 Case III의 A-BC 계면인 경우 접촉저항이 매우 높으며 최 대값은 각각 1,168 $\mu\Omega$ 와 1,119 $\mu\Omega$ 이었다. 접촉하고 있 는 두 강도의 경우, 강도가 높은 고강도강이므로, 초기 가압 시 고 강성에 의한 접촉 면적이 거의 늘어나지 않기 때문 에 접촉 저항이 크다. 그러나 비도금강과 도금강 의 계면

인 Case II의 A-BC 계면과 Case III의 AB-C 계면은 중간 에 존재하는 아연 코팅 층에 의해 가압 초기의 접촉 면적 이 넓어지고 이로 인해 접촉 저항이 줄어들기 때문에 상 대적으로 접촉 저항이 작게 된다. 그리고 이것은 두 계면 상의 발열량에 크게 영향을 주며 이것은 너겟의 형성에 큰 영향을 미치게 된다.



[그림 3] Case II의 계면에서의 접촉저항

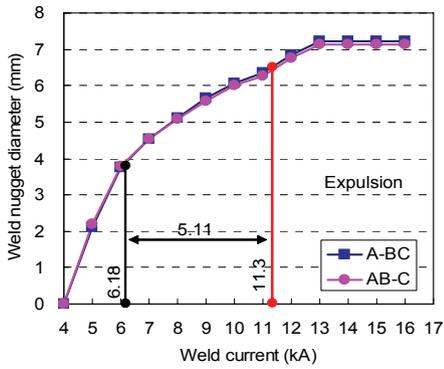


[그림 4] Case III의 계면에서의 접촉저항

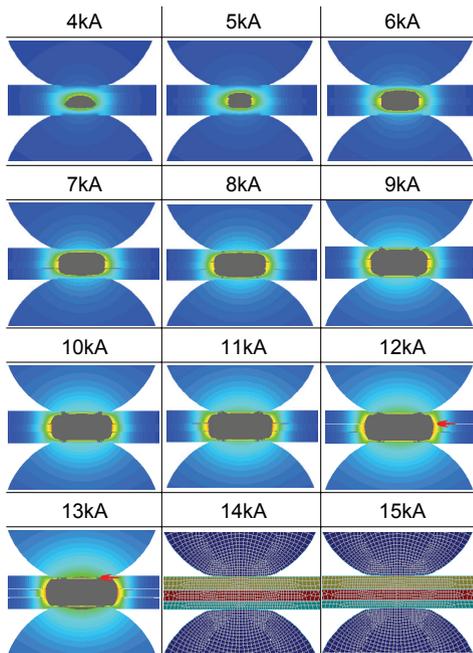
4. 너겟 성장 곡선 및 용접 시뮬레이션 단면 형상

자동차용 판재의 3겹 겹치기 용접에서 용접 시뮬레이 션 결과로 용접부 너겟 성장 곡선을 이용하여 용접성을 평가하였다. 너겟 성장 곡선은 같은 용접 시간 및 가압력 에서 전류가 증가함에 따라 너겟의 크기가 성장되는 것 을 나타낸 그림이다.

표 1에 나타난 Case I의 겹침 순서에 대하여 용접 시간 10 cycle과 가압력 3 kN에 대한 두 계면사이의 너겟 성장 곡선은 그림 5와 같다. 그리고 각 전류에 대한 용접부 시 뮬레이션 결과는 그림 6과 같다.



[그림 5] Case I 겹침에 대한 너겟 성장 곡선

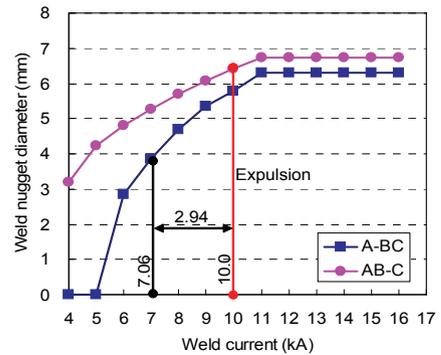


[그림 6] Case I의 너겟 성장 곡선의 각 전류별 시뮬레이션 단면

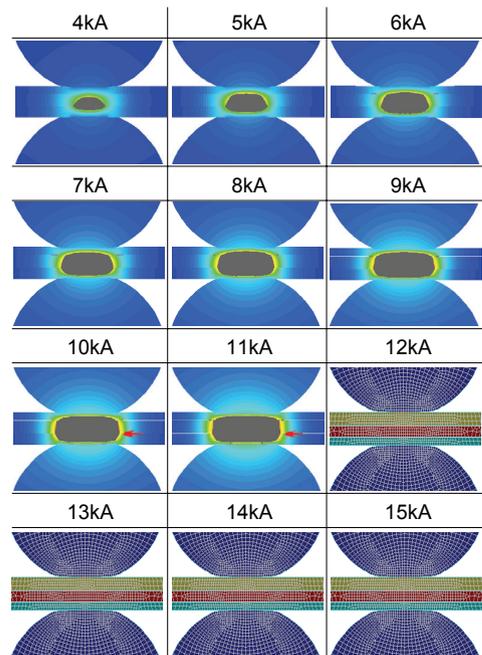
그림 5에서 보는 바와 같이 각 계면에서의 너겟의 크기는 거의 비슷하다. 이것은 그림 2에서 보는 바와 같이 용접 중 두 계면에서의 접촉저항이 비슷하며, 이에 따라 계면 중에 발생하는 열량이 거의 같기 때문이다. 이와 같은 결과는 그림 6의 너겟의 형상에도 나타나며, 보는 바와 같이 두 계면에서의 너겟의 단면 크기가 거의 비슷함을 알 수 있다. 그림 6의 12 kA에서 첫째 계면에서 불꽃 표시와 함께 스패터가 발생하였음을 알 수 있고, 13 kA에서는 전극과 440R 1.2t 사이에서 표면에서 스패터가 발생함을 알 수 있다. SORPAS 프로그램 상에서 스패터가 두 번 발생한 경우, 그 이후에는 계속 스패터가 발생하는

것으로 간주하여, 시뮬레이션을 구동하지 않도록 설정되어 있어, 14와 15 kA에서는 시뮬레이션의 결과가 없다.

로브곡선의 작성 기준인 ISO-14327의 예에서는 시편의 두께를 t mm라 할 때, $3.5\sqrt{t}$ 부터 스패터가 발생하는 점까지의 영역을 적정 용접 영역으로 판단하고 있다. 이를 기준으로 하여 볼 때, 1.2 mm의 기준으로 $3.5\sqrt{t}$ 에 해당하는 3.9 mm의 전류인 6.18 kA 부터 스패터가 발생한 11.3 kA 까지의 영역을 적정 영역으로 판단할 때, 5.11 kA의 적정 용접 구간이 형성된다. 이 적정 용접 구간이 클수록 용접 가능영역이 크기 때문에 강건한 용접이 가능하고 용접성이 좋다고 판단할 수 있다.



[그림 7] Case II 겹침에 대한 너겟 성장 곡선



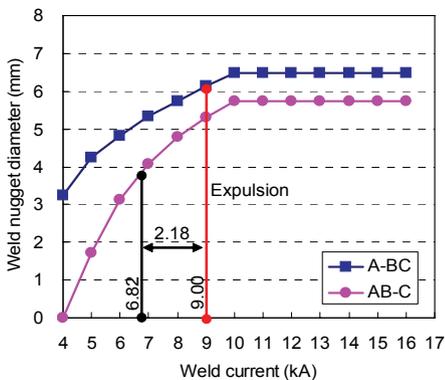
[그림 8] Case II의 너겟 성장 곡선의 각 전류별 시뮬레이션 단면

그림 7과 8은 표 2의 Case II에 대한 너겟 성장곡선과 이에 따른 시뮬레이션 단면 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 A-BC 계면에서의 너겟의 크기가 AB-C 계면의 너겟의 크기 보다 작음을 알 수 있다. 이것은 그림 3에서 보는 바와 같이 접촉 저항의 차이에 의한 것으로 사료된다. 그림 8에서 보는 바와 같이 저전류 영역에서는 AB-C 계면에서 너겟의 크기가 확연히 작음을 알 수 있다. 또한 10, 11 kA 에서 스페터가 발생하였고, 위치는 AB-C 계면이다. 이것은 초기 높은 접촉저항에 과용용된 금속이 팽창하여 발생한 것으로 판단된다. 그러므로 Case II에 대한 적정 용접 조건 영역은 그림에서 보는 바와 같이 2.94 kA 임을 알 수 있다.

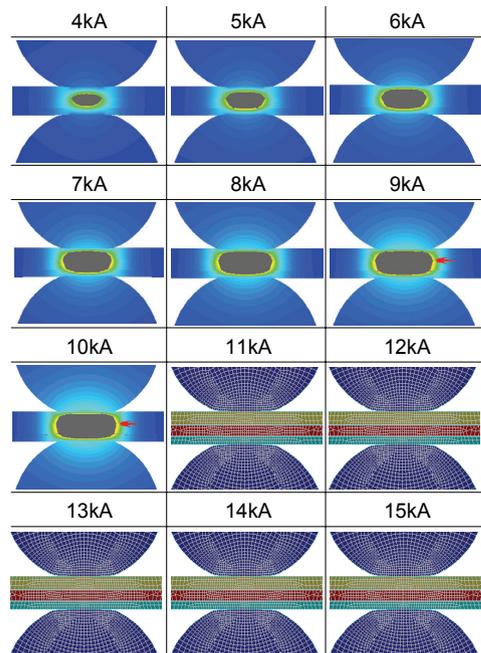
그림 9와 10은 표 3의 Case II에 대한 너겟 성장곡선과 이에 따른 시뮬레이션 단면 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 비도금 강끼리 맞닿은 A-BC 계면에서의 너겟의 크기가 도금강과 비도금강이 맞닿는 AB-C 계면보다 크을 알 수 있다. 그러므로 그림 10에서 A-BC 계면에서 스페터가 발생하고 있음을 알 수 있고, 적정 용접 영역은 2.18 kA 임을 알 수 있다.

일반적으로 적정 용접 조건의 설정시, 스페터가 발생하지 않은 최대 전류에서 용접 전류를 설정한다. 그러므로 각 케이스에 따른 적정 용접 전류 및 그 때 각 계면에서의 너겟의 크기를 정리하면 표 2와 같다. 표 2에서 보는 바와 같이 겹침의 순서가 Case I 인 경우가 적정 용접 영역도 크며, 적정 용접 전류에서 계면의 너겟의 크기가 다른 겹침의 순서에 비하여 크다는 것을 알 수 있다. 그러므로 다른 겹침의 순서에 비해 강도 측면에서 우수할 것으로 예측된다.

본 논문에서 사용된 강판에 대한 3겹의 저항용접의 최적 겹침 순서는 표 1에서의 Case I과 같은 440R 1.2t, EDDQ 0.7t 도금강, 그리고 DP 590 1.0t로 제한할 수 있다.



[그림 9] Case III 겹침에 대한 너겟 성장 곡선



[그림 10] Case III의 너겟 성장 곡선의 각 전류별 시뮬레이션 단면

[표 2] 적정 용접 영역의 크기와 너겟의 크기

겹침 순서	적정용접 영역 (kA)	스페터 전 전류 (kA)	계면	너겟 크기 (mm)
Case I	5.11	11	A-BC	6.35
			AB-C	6.26
Case II	2.94	9	A-BC	5.35
			AB-C	6.08
Case III	2.18	8	A-BC	5.74
			AB-C	4.78

5. 결론

본 논문은 자동차 차체용 강판의 3겹 겹침의 저항 점 용접에서 겹침 순서에 따른 용접 특성을 시뮬레이션 및 너겟 성장곡선을 이용하여 분석하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 겹침 조건에서 용접 시간에 따른 접촉 저항의 변화를 살펴보고, 비도금강 끼리의 접촉 저항이 비도금강과 도금강 간의 접촉 저항에 비하여 상대적으로 크고, 이것은 너겟의 형성에 큰 영향을 줄을 알

수 있었다.

- 2) 각 겹침 조건에 대한 너겟 성장 곡선을 통해 적정 용접 영역의 크기를 알 수 있었고, 이를 통해 최적의 용접 겹침의 순서가 440R 1.2t, EDDQ 0.7t 도금강, 그리고 DP 590 1.0t로 제안할 수 있었다.
- 3) 최적 겹침 순서에 대한 적정 용접 조건은 전류 11 kA, 용접시간 10 cycle, 가압력 3 kN이며 이때 예측되는 너겟의 크기는 A-BC 계면에서는 6.35 mm, AB-C 계면에서는 6.26 mm이 됨을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다.

참고문헌

[1] N. Scotchmer, "Simulation software helps automakers," *Welding Journal*, Vol. 85, No. 8, pp. 47-49, 2006.

[2] P. Wu, W. Zhang, and N. Bay, "Characterization of dynamic mechanical properties of resistance welding machines". *Welding Journal*, Vol. 84, No.1, pp. 17s-21s, 2005.

[3] Q. Song, W. Zhang, and N. Bay, "Contact modelling in resistance welding. Part 1: Algorithms and numerical verification," *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 5, pp. 599-606, 2006.

[4] Q. Song, W. Zhang, and N. Bay, "Contact modelling in resistance welding. Part 2: Experimental validation", *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 5, pp. 607-613, 2006.

[5] B. H. Chang and Y. Zhou, "Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 139, No.1/3, pp. 635-641, 2003.

[6] N. Athi, J. D. Cullen, M. Al-Jader, S. R. Wylie, A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw, and M. Hyde, "Experimental and theoretical investigations to the effects of zinc coatings and splash on electrode cap wear", *Measurement*, Vol. 42, No. 6, pp. 944-953, 2009.

[7] I. O. Santos, W. Zhang, V. M. Goncalves, N. Bay, and P. A. F. Martins, "Weld bonding of stainless steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 14, pp. 1431-1439, 2004.

[8] 이상영, 고태호, 기왕호, 장용훈, "CAE 기법을 활용한 저항점용접 용접성 평가", 한국자동차공학회 창립 30주년 기념학술대회 논문집, 제3권, pp. 1135-1356, 4월, 2008.

[9] 방한서, 주성민, "수치 Simulation에 의한 저항점용접 부의 역학적 거동에 관한 연구", 대한용접학회 특별

강연 및 학술발표대회 개요집", pp. 91-95, 1998.

[10] W. Zhang, "Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations", *SAE 2003 Transactions: Journal of Materials and Manufacturing*, Vol. 112, No. 5, pp. 556-564, 2003.

박영환(Young Whan Park)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 한양대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2007년 8월 : 한양대학교 BK21 혁신설계인력양성사업단 박사후 과정
- 2007년 7월 ~ 2008년 8월 : 포스코 기술연구소 (선임 연구원)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 국립부경대학교 기계공학부 (조교수)

<관심분야>

레이저 가공, 저항 점 용접, 생산자동화, 신호처리, 지능형 알고리즘 (퍼지이론, 신경망 모델, 유전알고리즘)