



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

자동차용 초고장력강의 너트프로젝션
용접에서 용착강도 향상에 대한 연구



2016년 2월

부경대학교 대학원

기계공학과

김재완

자동차용 초고장력강의 너트프로젝션
용접에서 용착강도 향상에 대한 연구

지도교수 박 영 환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2016년 2월

부경대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 재 완

이 논문을 김재완의 공학석사
학위논문으로 인준함.

2015년 12월 17일



주	심	공학박사	강 대 민	(인)
위	원	공학박사	곽 재 섭	(인)
위	원	공학박사	박 영 환	(인)

목 차

List of tables

List of figures

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 프로젝션 용접 연구 현황	2
1.3 연구 내용	4
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 프로젝션 용접	5
2.1.1 프로젝션 용접 이론	5
2.1.2 프로젝션 용접의 주요 공정변수	8
2.2 초고장력강	13
2.2.1 핫스탬핑 보론강의 특성	15
2.2.2 핫스탬핑 보론강의 Al-Si 코팅층 특성	16
제 3 장 실험 및 결과	17
3.1 실험장치 및 재료	17
3.2 용접 실험 조건	20
3.3 실험 결과	21
3.3.1 너트 소재에 따른 용접성	21
3.3.2 너트 형상에 따른 용접성	26
3.3.3 너트의 용접성 실험에 대한 고찰	31

제 4 장 용접 공정 최적화	32
4.1 용접 공정변수의 제어	32
4.2 너트프로젝션 용접 공정 최적화	33
4.3 통전방법에 따른 용접결과 비교	42
제 5 장 결론	46
Reference	48
Abstract	51



List of tables

Table 3-1 Chemical composition of SABC1470 (wt.%)	18
Table 3-2 Chemical composition of SWCH10A (wt.%)	19
Table 3-3 Chemical composition of S1021B (wt.%)	19
Table 3-4 Fixed conditions of experiments	20
Table 4-1 Experiment result of multi-pulse projection welding(1)	36
Table 4-2 Experiment result of multi-pulse projection welding(2)	41
Table 4-3 Heat input of pulse conditions	46



List of figures

Fig. 2-1 Temperature distribution of projection welding	7
Fig. 2-2 Process of projection welding	8
Fig. 2-3 Weld strength of current	9
Fig. 2-4 Weld strength of electrode force	10
Fig. 2-5 Weld strength of weld time	12
Fig. 2-6 Effect on reducing emission and body weight using AHSS	14
Fig. 2-7 Status of development of steel and application of the body ..	14
Fig. 3-1 Design and specifications of weld nuts	18
Fig. 3-2 Weld strength lobe curves of Type A	21
Fig. 3-3 Weld growth graphs of Type A	22
Fig. 3-4 Macro section analysis of Type A	24
Fig. 3-5 Micro section analysis of Type A	24
Fig. 3-6 EPMA analysis of Type A	26
Fig. 3-7 Weld strength lobe curves of weld nuts	28
Fig. 3-8 Weld growth graph of weld nuts	29
Fig. 3-9 Macro section analysis of weld nuts	31
Fig. 3-10 Micro section analysis of weld nuts	31
Fig. 4-1 Experiment conditions of multi-pulse projection welding	35
Fig. 4-2 Strength analysis of cooling time at main-current 14kA	38
Fig. 4-3 Strength analysis of cooling time at main-current 15kA	39
Fig. 4-4 Experiment conditions of multi-pulse projection welding	40
Fig. 4-5 Weld strength of cooling time	41
Fig. 4-6 Nugget analysis of multi-pulse projection welding	42
Fig. 4-7 Compare nugget diameter with weld strength of conditions ..	43
Fig. 4-8 Average strength of pulse conditions	44
Fig. 4-9 Fracture surface of pulse conditions	46

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 자동차업계는 경량화의 열풍이 거세다. 차량 무게를 줄이기 위한 기술 혁신이 화두로 된 것이다. 이 같은 추세는 미국, 유럽 등 선진국이 기업 평균연비(CAFE)와 이산화탄소 배출 기준을 강화하면서 연비 향상이 시급한 과제로 떠올랐기 때문이다. 우리나라도 2020년까지 기업평균연비는 24.3km/L, 이산화탄소 배출 기준은 97g/km로 강화될 예정이다. 연비 향상 및 배기가스 저감을 위해서는 엔진, 변속기 등 파워트레인 기술 혁신도 필요하지만, 차량 경량화도 반드시 이루어져야 한다. 통계적으로 차량 무게를 10% 줄이면 연비는 3.8% 높아지고 가속 성능은 8% 향상된다.^[1] 이러한 결과를 얻기 위하여 자동차 업계는 차량 경량화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있고, 특히 가벼우면서도 강도는 더 높게 제작된 AHSS(Advanced High Strength Steel), UHSS(Ultra High Strength Steel) 같은 고장력강을 이용한 자동차생산 연구에 몰두하고 있다.

자동차 차체는 다양한 체결 이음을 위해 볼트와 너트가 사용된다. 볼트의 경우 일반적으로 스테드 용접을 이용하여 차체에 부착하며, 너트를 부착하기 위하여 프로젝션 용접을 사용한다. 체결부 이음은 자동차 차체의 건전성을 유지하는 가장 기본적이면서도 중요한 역할을 하며, 너트가 정확한 위치에 부착되어야 조립 오차를 줄일 수 있고, 높은 강도로 부착되어야 신뢰성 있는 제품을 생산할 수 있다. 만약 너트가 차체에 약하게 붙어있으면 결합한 다른 부품이 본체에서 떨어지게 되고, 그로 인해 완성품에 큰 손상을 입히거나 운전자의 안전성이 떨어진다. 그러므로 너트를 차체에 부착시키는 프로젝션 용접은 중요하다.

1.2 프로젝션 용접 연구 현황

현재 자동차 산업의 발전으로 제품 수요가 많아지고, 그에 따라 자연스럽게 생산속도 향상을 이루었다. 이러한 수요가 늘어남에 따라 자동차 차체 체결 이음도 많아지게 되고, 다른 용접공정보다 상대적으로 짧은 시간 내에 접합할 수 있는 저항 용접이 주요 용접방법으로 사용된다.

하지만 시간이 지날수록 환경문제 및 연비향상을 위하여 차체 경량화가 요구되고, 새로운 자동차용 강재가 많이 사용되지만 저항 용접 공정에 대한 데이터가 부족한 실정이다. 실제 사용되는 AHSS(Advanced High Strength Steel)와 UHSS(Ultra High Strength Steel) 강재는 기존에 자동차 차체용으로 사용되었던 HSS(High Strength Steel) 강재보다 비저항이 큰 원소들을 함유하고 있기 때문에 모재 자체의 고유저항이 상대적으로 높다.^[2] 높은 고유저항으로 자체 발열이 크므로 적정 용접구간이 저 전류대로 이동하는 경향이 있고, 강도가 크기 때문에 스파터(splatter) 발생 억제를 위하여 기존 대비 낮은 용접전류와 높은 가압력이 요구된다.^[3]

프로젝션 용접 공정에는 통전전류, 통전시간, 가압력 등 많은 공정변수가 존재하고, 적정 용접구간을 모색하기 위하여 많은 연구가 진행되었다. Adams^[4] 등은 돌기의 형상에 따른 용접품질과 강도에 대하여 연구하였고, Weiss^[5] 등은 상부 전극의 이동거리에 따른 용접품질에 대하여 연구하였다. 또한 Cunningham^[6] 등은 돌기의 높이에 따른 용접품질과 강도에 대하여 연구하였다. Geiermann^[7] 등은 프로젝션 용접 공정의 변화를 통하여 용접품질 향상에 대한 연구를 하였다. 용접전원의 선택에 있어서, Michaud^[8] 등은 전원형태가 교류(AC)와 직류(DC) 중 프로젝션 용접 품질에는 직류(DC)전원을 이용하는 것이 유리하다는 연구결과를 보여준다. 현재 사용되는 고장력강에 대하여 Kuntz^[9] 등은 AHSS 강재 중 하나인 DP780 소재에 대하여 유한요소법을 적용하여 프로젝션 용접을 시뮬레이션을 통하여 해석하였다. 최근

에는 $Tol f^{d10}$ 등이 현재 관심사인 UHSS 강재에 대한 너트프로젝션 용접성과 접합효율에 대하여 연구하였다.

이와 같이 프로젝션 용접에서 너트의 형상을 개선하고자하는 많은 연구들이 이루어졌지만, 차체 경량화를 위하여 개발된 핫스탬핑 보론강에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.



1.3 연구 내용

본 논문에서는 두 가지 형상과 두 가지 강종의 사각너트에 대하여 너트프로젝션 용접을 이용하여 두께 1.2mm 의 핫스탬핑 보론강에 용접하였다.

① 두께 1.2mm 핫스탬핑 보론강에서 두 가지 너트 강종(SWCH10A, S1021B)을 적용하여 너트프로젝션 용접을 실시하였다. 이는 너트의 성분때 따른 용접성과 매커니즘을 확인하였고 용접성에 유리한 강종을 명확하게 구분하였다.

② 두께 1.2mm 핫스탬핑 보론강에서 두 가지 너트 형상을 적용하여 너트프로젝션 용접을 실시하였다. 이는 너트의 형상에 따른 용접성과 매커니즘을 확인하였고 용접성에 유리한 형상을 명확하게 구분하였다.

많은 연구들 중 아직 연구되지 않은 너트프로젝션 용접성 향상을 위한 첫 번째 단계는 용접 매커니즘을 규명해야하며, 용접성에 영향을 미치는 공정 변수들을 파악하여야 한다. 또한 자동차 업계는 공정 변수들의 제어하기 위하여 너트프로젝션 용접의 기초자료를 확보해야한다. 연구 자료를 바탕으로 핫스탬핑 보론강의 최적의 너트프로젝션 용접 조건을 제안함으로써 안정적인 용접부 품질을 확보하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 프로젝션 용접^{[11][12]}

프로젝션 용접은 저항에 의한 발열을 통해 용접을 하는 방법으로, 점 용접의 변형된 한 가지 형태라고 말할 수 있다. 프로젝션 용접은 두꺼운 판과 얇은 판의 조합, 성질이 다른 금속의 조합에 있어서도 열평형을 유지하기에 용이하다. 또한 프로젝션의 크기로서 전류의 통로를 제한할 수 있기 때문에 전류밀도를 높일 수 있어 작은 전류를 이용하여 용접이 가능하다. 그리고 상하 전극을 평탄한 것을 사용하기 때문에 압흔이 거의 없다는 장점이 있다.

2.1.1 프로젝션 용접 이론

프로젝션 용접은 저항 용접의 한 가지 공법으로, 전극을 이용하여 너트와 판재를 고정시키고, 전류를 통전시켜 너트와 판재 내부에서 발생한 저항열에 의해 접합면을 용융시키고 가압력을 통하여 접합부를 형성하는 공정이다. 이러한 저항 용접의 공정은 통전시간이 매우 짧아 생산성을 향상시킬 수 있기 때문에 차체 이음 등 많은 생산 현장에서 사용되고 있다.

프로젝션 용접에서는 돌기(projection)와 판재에서 발생하는 저항열이 중요한 역할을 하며, 이 저항열은 전류의 제곱에 비례한다.

$$Q = I^2 R t \quad (2.1)$$

여기에서, Q는 발열량, R은 전기 저항, I는 용접전류, t는 통전시간을 나타낸다.

위의 식에서 전기 저항 R은 용접재료의 저항뿐만 아니라 전극까지의 모든 저항을 포함한 값이다. 따라서 용접부에서의 발열효율을 높이기 위하여 저항 용접에서는 전기전도도가 높은 전극을 사용한다. 허나 전극의 전기전도도가 높으면 상대적으로 강도가 낮기 때문에 둘 다 만족시킬 수 있는 Cu 합금을 전극의 주 재료로 많이 사용한다.

식(2.1)의 저항은 재료의 길이, 단면적, 비저항(resistivity)에 영향을 받고 이를 식(2.2)와 같이 표기할 수 있다.

$$Q = I^2 \left(\frac{\rho L}{A} \right) t \quad (2.2)$$

여기에서, ρ 는 도체의 비저항, L은 도체의 길이, A는 도체의 단면적, t는 통전시간을 나타낸다.

식(2.2)에서 저항열 Q는 전류의 제곱에 비례하고, 통전시간과 저항에 비례함을 확인할 수 있다. 세부적으로 도체의 단면적 A가 작을수록 발열량은 반비례적으로 증가하기 때문에 동일한 전류로 용접하는 경우에도 단면적이 감소하면 전류 밀도가 증가하는 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 2-1은 저항 용접에서의 구간별 저항에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 모재 자체의 저항에 의한 발열보다 전극과 모재, 모재와 모재 같은 접촉부위에서의 발열이 큰 것을 확인할 수 있다. 특히 돌기부와 모재 사이의 온도가 가장 높은 것을 알 수 있다. 이는 접촉면에 존재하는 각종 오염물질, 표면의 거칠기, 산화 피막 때문에 접촉저항이 가장 높아 저항열이 가장 크게 발생하기 때문이다.

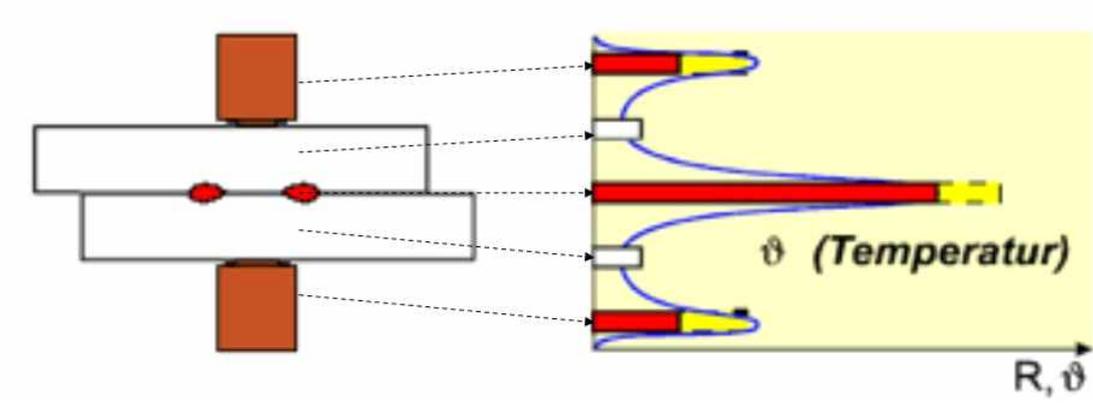


Fig. 2-1 Temperature distribution of projection welding



2.1.2 프로젝션 용접의 주요 공정변수

저항용접은 통전하는 시간이 매우 짧고 단시간 내에 용접을 끝내야 한다. 또한, 금속이 접촉한 상태에서 내부의 융합이 생기므로 용접 매커니즘 관측과 변수 제어가 매우 어렵다. 실제 현장에서 사용하는 용접공정은 영향을 미치는 요인을 사전에 검토하여 실험, 고찰을 통하여 용접조건을 도출하여 사용하고 있다. 여기에서 용접전류, 가압력, 통전시간을 저항용접의 3대 요소라고 한다.

Fig. 2-2은 프로젝션 용접에서의 용접부가 형성되는 과정을 개략적으로 나타내었다. 돌기가 결합될 모재와 접촉하면, 전류가 통전되어 돌기의 선단부가 가열되기 시작한다. 이때 전극의 가압력은 용융된 돌기 부분을 빠르게 소성변형 시켜 압착 과정에 의해 너겟(nugget)을 생성한다.

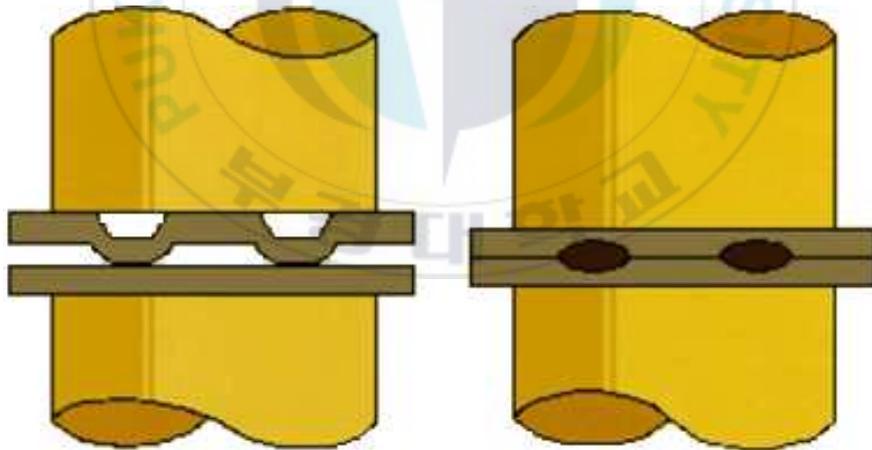


Fig. 2-2 Process of projection welding

1) 용접전류

전기저항에 의해 생성된 발열량은 전류의 제곱에 비례하므로 용접전류가 가장 중요한 인자이다. 용접전류는 단순히 전류의 크기가 중요한 것이 아니라 용접부의 전류밀도가 높은 것이 중요하다. 전류밀도가 너무 작을 때에는 용융되는 양이 적어지고, 그에 따라 완전한 접합이 되지 않는다. 더 큰 양을 용융시키기 위하여 높은 전류를 흘리면 용융속도는 증가하지만, 전류밀도가 상대적으로 높아지므로 과열이 되어 용접부의 변형을 초래하고 과열로 인한 스패터가 발생하여 용융부에 기공이 발생하고 자연스럽게 용접부의 강도가 저하된다.

용착강도를 향상시키는 방법은 너겟을 성장시키는 방법이다. 용접부의 너겟의 크기가 클수록 용접부의 강도는 증가하게 된다. Fig. 2-3은 저항 용접에서 용접전류와 인장강도의 관계를 나타낸 선도로, 용접전류가 증가하면 너겟 크기가 증가하여 용접부의 강도가 증가하지만, 전류가 과도하면 스패터가 발생하여 강도가 감소하는 것을 나타낸다. 그러므로 적정 범위의 용접 전류를 사용해야 한다.

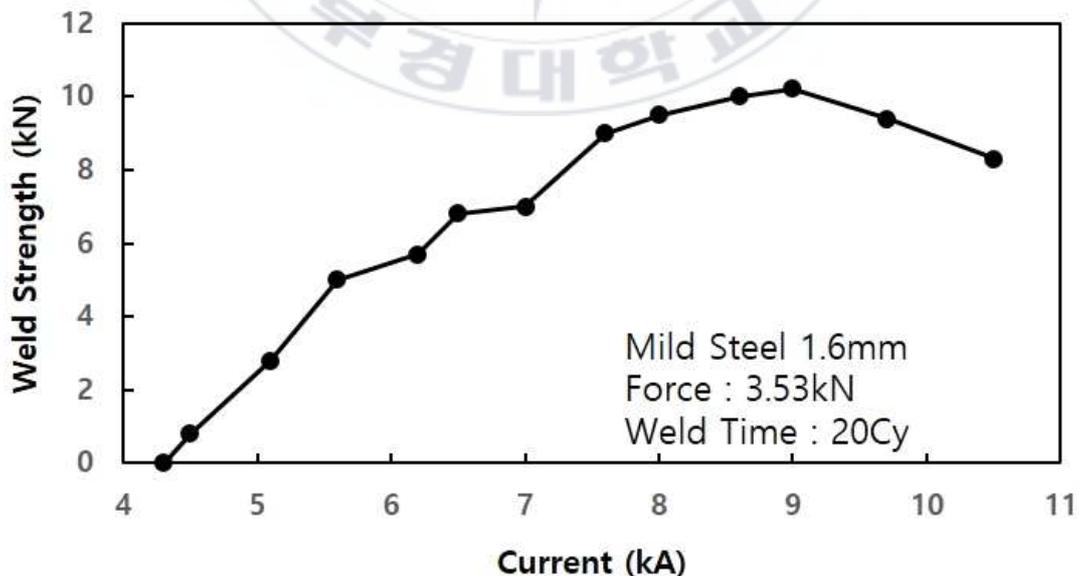


Fig. 2-3 Weld strength of current

2) 가압력

가압력은 열 발생에 중요한 인자이다. 가압력은 용접부에 가해지는 물리적인 힘이고, 가압력의 크기에 따라 접촉부의 저항이 변하게 된다. 그 저항을 일정하게 유지하여 용접 중에 국부적인 과열을 방지하고 용접결과를 균일하게 하는 작용을 한다. 또, 용접부에 단압효과를 주며 기공이나 내부 균열을 방지하는 작용도 한다.

Fig. 2-4는 용접전류와 통전시간이 일정한 조건에서 전극의 가압력을 변화시켜 얻은 용착강도 변화를 나타낸다. 가압력이 필요 이상으로 증가하면 용접부의 접촉면적이 증가하여 저항열과 너겟의 크기가 감소하기 때문에 용착강도가 감소한다. 그러나 낮은 가압력을 사용하면 용융된 너겟을 충분히 구속시키지 못하기 때문에 스파터가 발생한다.

따라서 소재의 강도에 맞는, 가압에 의한 접촉저항의 양을 선정하여 적절한 가압력을 사용하는 것이 중요하다.

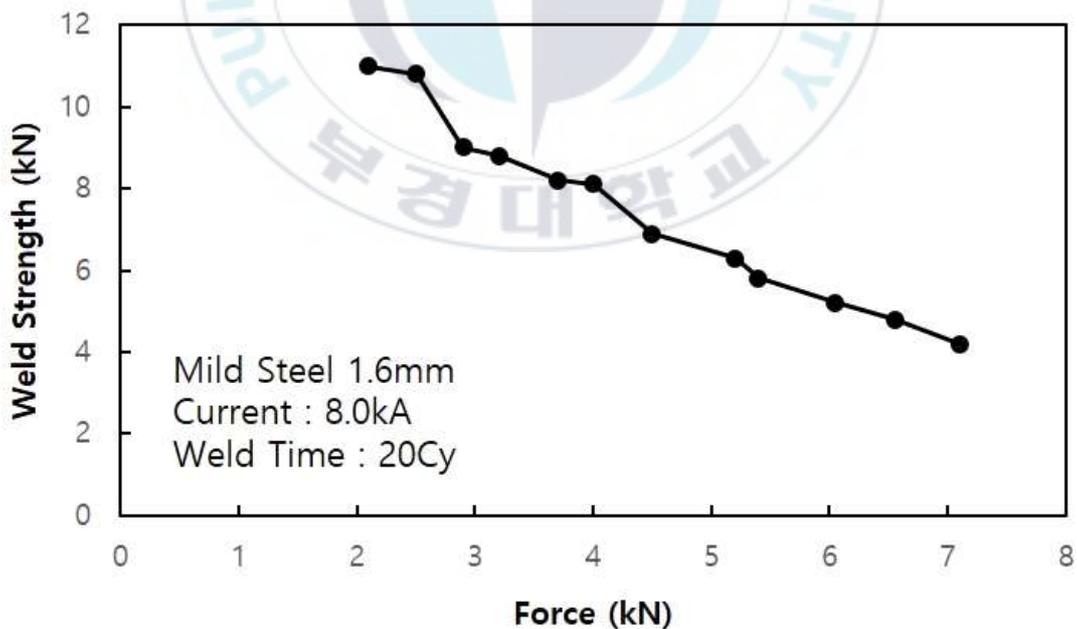


Fig. 2-4 Weld strength of electrode force

3) 통전시간

통전시간은 발열에 있어서 중요한 인자가 된다. 전기저항에 의해서 발생한 열은 전도(傳導)에 의해 발산되므로 열의 총 발생량은 일정해도 통전시간이 변화하면 용접부의 온도가 달라지므로 용접결과는 달라진다. 일반적으로 통전시간을 너무 길게 설정하면 열의 손실도 많을 뿐만 아니라 용접부 외의 불필요한 부분에도 영향을 미쳐 소재 재질의 변화를 초래한다. 반대로 통전시간이 짧으면 가열부가 작아지며 국부에 한하여 용융되므로 충분한 용접이 이루어지지 못한다. Fig. 2-5는 통전시간이 용착강도에 미치는 영향을 보여주며, 통전시간이 증가하면 저항열에 의해 너겟 크기가 증가하여 강도가 증가한다. 그러나 통전시간을 계속 증가시키면 정상 상태에 도달하여 너겟 크기는 일정하게 되어 강도는 증가하지 않는다. 따라서 적절한 발열량을 사전에 고려하여 통전시간을 설정하여야 한다.

프로젝션 용접에서의 통전시간은 같은 형태의 돌기를 가진 조건에서는 돌기의 개수와 통전시간은 무관하다. 생산성을 고려한다면 짧은 통전시간을 사용하는 것이 바람직하지만, 짧은 시간 내의 용융량을 고려한다면 높은 용접전류를 필요로 한다. 이는 과열에 의한 스패터가 발생할 가능성이 높다. 통상적으로 하나의 용접부를 기준으로 할 때 점 용접 보다 긴 통전시간과 낮은 용접전류를 사용한다. 다단통전 용접 방법은 용접의 입열량 제어가 용이하고 낮은 열전도도, 두꺼운 소재의 용접에 유리하다.

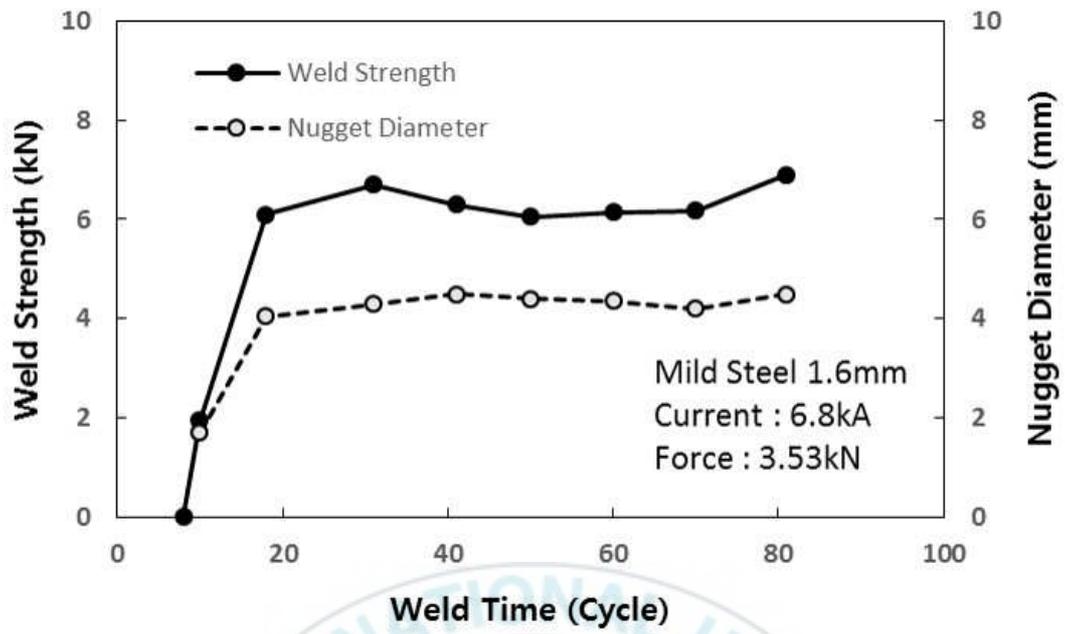


Fig. 2-5 Weld strength of weld time



2.2 초 고장력강

지구 온난화 문제로 인하여 전 세계적으로 환경규제가 강화되었고, 온실가스 배출의 19%를 차지하는 수송 분야에서 환경문제를 개선시키기 위해 연비향상을 목표로 하고 있다. 연비향상을 위한 방안 중 직접적으로 영향을 미치는 차체 경량화 방안이 대두되었고 경량화를 위하여 자동차 차체를 고장력강 또는 알루미늄 강재와 같은 상대적으로 가벼우면서도 단단한 소재를 차체에 적용하고 있다. 차체 무게의 약 10%를 감소시키면 그에 따른 저항 감소 효과로 약 3.8% 연비 향상효과가 있다.^[1] Fig. 2-6은 AHSS(Advanced High Strength Steel) 강재 적용에 따른 차량 경량화 효과와 온실가스 감소 효과에 대하여 나타내고 있다.

최근의 추세는 AHSS 강재를 넘어서 UHSS(Ultra High Strength Steel) 강재가 새롭게 개발되어 많은 자동차업계에서 연구 중에 있다. UHSS 강재의 장점으로서는 강재의 강도가 증가하면, 그만큼 사용되는 강판의 두께를 얇게 할 수 있고 이에 따라 차체의 무게를 줄일 수 있다는 것이다. 또한 높은 강도에 의해 차량의 강성이 높아짐으로 편안한 주행을 돕고, 사고 시 운전자를 비롯한 승객을 안전하게 보호해 줄 수 있다. Fig. 2-7은 AHSS 및 UHSS 강재의 개발 현황 및 차체 적용 현황을 나타낸 것이다. 기존의 연강 및 고장력강의 사용에서 벗어나 점점 더 고장력강의 사용이 증가되고 있으며 앞으로 그 사용은 더욱 많아질 것으로 예상된다.

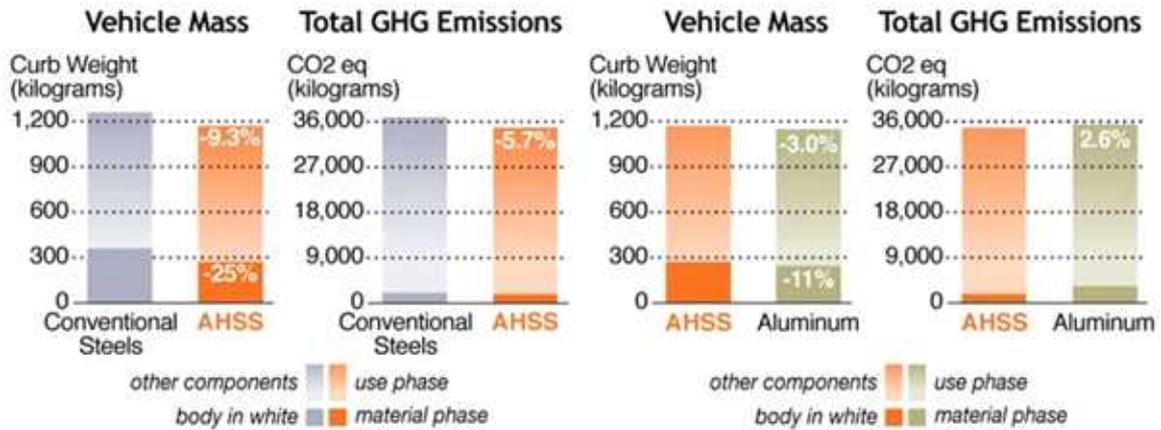


Fig. 2-6 Effect on reducing emission and body weight using AHSS

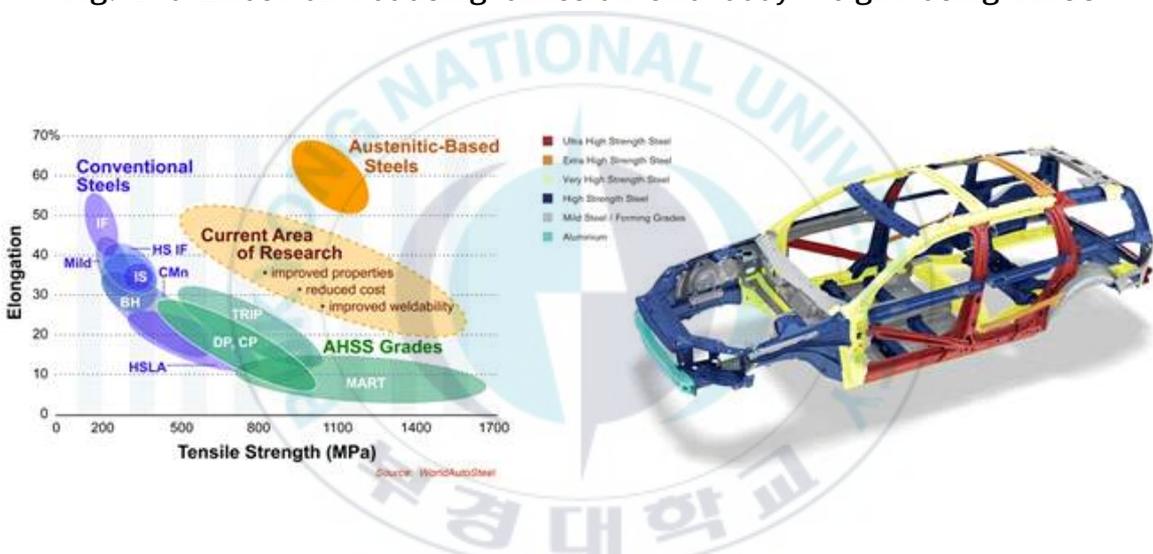


Fig. 2-7 Status of development of steel and application of the body

2.2.1 핫스탬핑 보론강의 특성

초고장력강이란 강판의 강도가 1GPa 이상 급의 강재를 말하며, 그 중 핫스탬핑 보론강은 열처리성을 향상시킨 보론 첨가강판을 말한다. 여기서 핫스탬핑이란 강판을 오스테나이트(Austenite)화 온도로 가열하여 프레스로 성형을 한 뒤 성형 금형 내에서 급속냉각 함으로써 금속의 상을 마르텐사이트(Martensite)로 변태시켜 1500MPa 이상의 초고장력을 얻는 공법이다.^[13]

핫스탬핑 공정을 통해 얻어진 자동차 강판의 조립 시, 작업 환경 및 접합 강도가 우수한 저항 용접이 적용되고 있다. 저항 용접을 적용할 때 내식성 및 도장성을 위해 사용되는 용융아연도금강판은 저항 용접 시 코팅층의 용융을 별도로 고려해야하며 너겟 생성 매커니즘이 용접조건에 민감하다고 연구된 바 있다.^[14]

핫스탬핑 보론강은 1500MPa 급의 강도를 가지지만, 높은 강도로 인해 상대적으로 낮은 연신율을 얻을 수 밖에 없다. 그렇기 때문에 복잡한 형상에 대한 성형성이 낮으며, 프레스 가공 시 금형에 발생하는 하중이 높아져 금형 자체의 수명이 낮아진다.^[15] 핫스탬핑 보론강은 Fig. 2-7에서 보듯, 자동차 차체에서 운전자와 동승자의 안전에 고려하는 A 필러(Pillar)와 B 필러 등 측면부에 많이 사용되고 있다.

2.2.2 핫스탬핑 보론강의 Al-Si 코팅층 특성¹⁶⁾

핫스탬핑용 보론강판은 이송 및 가열 시 산소와의 반응에 의한 스케일 (scale) 생성을 억제하기 위하여 약 30 μm 의 Al-Si 코팅처리를 하고 있다. 그러나 Al-Si 코팅층은 핫스탬핑 공정 시 가열하는 시간에 따라 모재의 Fe 성분과 반응하여 Fe-Al-Si 로 구성된 금속간 화합물을 만들고, 이는 용접 시 코팅층이 용융되어 용융부에 남게 되고 불순물로 간주되어 접합강도를 약화시킨다.¹³⁾

Al-Si 코팅된 핫스탬핑 보론강의 경우, 초기의 낮은 접촉저항과 합금화층의 높은 용융온도로 인해 용접 중 전류밀도 감소 및 접촉면적을 개선시키는 역할을 하고 이에 따라 높은 전류를 사용하여 용접 시 스파터가 빠르게 발생하는 특성이 있다. 이러한 Al-Si 코팅층은 용접 시 합금화층으로 이루어져 옆으로 밀려나가는 현상을 관찰할 수 있으며, 이것은 전류의 통전을 방해하는 요소로 파악되고 있다.

Al-Si 코팅된 핫스탬핑 보론강의 용접성 향상에 직접적으로 영향을 미치는 요인은 용접 시 Al-Si 코팅층의 제거에 있다. 높은 전류를 사용하면 스파터가 다량 발생하고 코팅층 또한 원활히 제거되지 못한다. 따라서 용접성 향상은 공정조건을 통해 용융부에서 Al-Si 코팅층이 빠르게 밀려나가 제거하는 것이 중요하다.

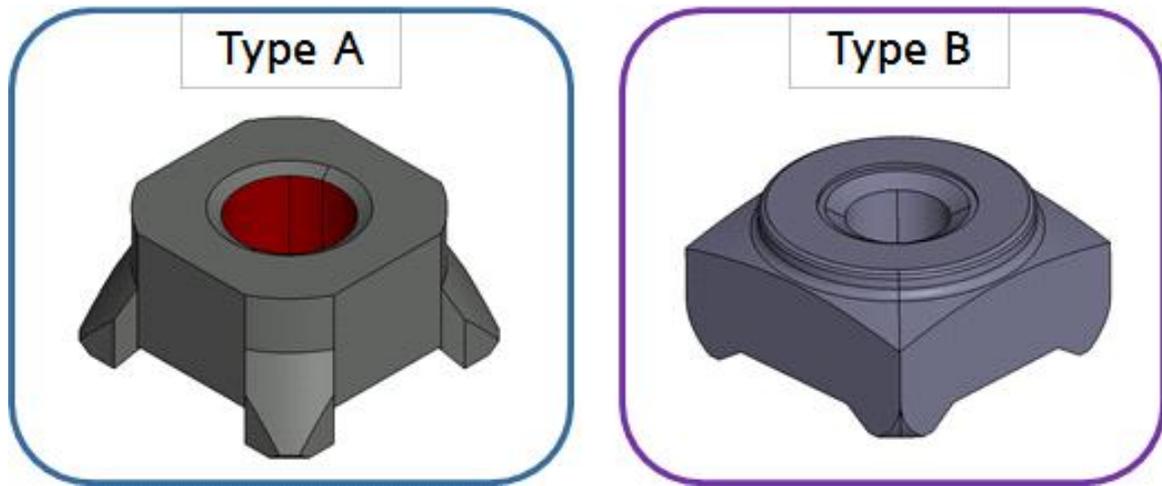
제 3 장 실험 장치 및 결과

3.1 실험장치 및 재료

너트프로젝션 용접은 저항 점 용접과 유사한 매커니즘을 가지며, 다른 용접법과는 다르게 빠른 시간 내에 용접이 가능한 큰 특징이 있다. 본 장비는 전극과 가이드 팁을 중심으로 구성되어 있다. 전극과 모재 사이의 발열을 억제하기 위해 수냉식 전극을 사용하였으며, 전극의 가압은 공압식 가압계를 사용하였다.

실험에 사용된 용접전원은 DC inverter를 사용하였으며 정격전압은 400 V, 전원주파수는 60 Hz 이다. 제어가능 전류는 2.0 ~ 25.0 kA까지이며, 가압력은 4.5 kN으로 설정하였다. 전극의 냉각에 사용된 냉각수는 유입온도 30 °C, 냉각수량은 5 l/min 이며 냉각수 압력은 300 kPa 이다.

실험에 사용된 모재는 Al-Si 코팅된 핫스탬핑 보론강(SABC1470)으로 시편의 치수는 30 mm x 30 mm x 1.2 mm 이다. 모재에 대한 화학적 조성은 Table 3-1 와 같다. 용접에 사용된 너트는 2종을 사용하였다. 두 가지 너트 중 사각 - 외돌기 형태를 Type A, 사각 - 내돌기 형태를 Type B 로 설정하였고, Type A 의 경우 너트의 소재를 탄소강(SWCH10A)과 보론강(S1021B) 두 가지로 설정하였고 Type B 의 소재는 탄소강(SWCH10A)을 사용하였다. 너트의 외형과 주요인자들은 Fig. 3-1와 같으며, 탄소강(SWCH10A)과 보론강(S1021B)의 화학적 조성은 Table 3-2, Table 3-3 와 같다.



Parameters	Type A	Type B
Weld nut Total Volume(mm ³)	400.8	1056.0
Projection Unit Volume(mm ³)	3.919	3.656
Projection Total Volume(mm ³)	15.676	14.624
Projection Unit Contact Area(mm ²)	2.105	1.209
Projection Total Contact Area(mm ²)	8.420	4.836
Projection Height(mm)	1.000	1.000

Fig. 3-1 Design and specifications of weld nuts

Table 3-1 Chemical composition of SABC1470 (wt.%)

Element	Minimum	Maximum
C	0.20	0.25
Mn	1.10	1.35
P	-	0.025
S	-	0.008
Si	0.15	0.35
Al	0.02	0.06
Ti	0.02	0.05
N	-	0.009
Cr	0.15	0.30
B	0.002	0.004

Table 3-2 Chemical composition of SWCH10A (wt.%)

Element	C	Si	Mn	P	S	B	Sol-Al
(%)	0.10	0.04	0.46	0.01	0.09	-	0.046

Table 3-3 Chemical composition of S1021B (wt.%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
(%)	0.21	0.41	0.65	0.01	0.04	0.16	0.0016

또한, 각 용접시편의 결과를 정량적인 데이터로 측정하기 위하여 용착강도를 측정하였다. 용착강도의 단위는 kgf 로, 사용되어진 너트의 MS181-04 용착강도 기준은 500 kgf 이상이다. 그리고 용접부의 너겟 형성 매커니즘을 확인하기 위하여 광학 현미경을 사용하였다. Al-Si 코팅층의 거동과 용접돌기 붕괴, 전체적인 단면을 확인하기 위하여 광학현미경을 사용하였다. 용접시편의 폴리싱(polishing)은 미세조직까지 확인 가능한 1 μ m단위까지 시행하였고, 식각(etching)공정은 코팅층의 유무를 확인할 수 있는 Nital 2% 용액을 사용하였다.^[10]

3.2 용접 실험 조건

본 연구에서는 두 가지 종류의 실험을 수행하였다.

(1) 너트 소재에 따른 실험

첫 번째 실험(이하 실험A)은 Type A 너트에서, 탄소강(SWCH10A)과 보론강(S1021B)의 용접성을 검토하였고 용접에 유리한 소재를 선별하였다. 세부적으로 MS181-04 용착강도 기준에 만족하는 용접구간을 확인하기 위하여 용착강도에 따른 로브곡선(lobe curve)을 확보하였고, 용착강도가 만족되는 시험편의 Al-Si 코팅층의 거동을 확인하기 위하여 EPMA(electron probe micro-analysis) 분석을 수행하였다.

(2) 너트 형상에 따른 실험

두 번째 실험(이하 실험B)은 Type A 너트에서 결정된 소재에 대하여 너트 형상에 대한 용접성을 검토하였다. 세부적으로 MS181-04 용착강도 기준에 만족하는 용접구간을 확인하기 위하여 용착강도에 따른 로브곡선을 확보하였고, 용착강도가 만족되는 시험편의 Al-Si 코팅층의 거동과 용접돌기 붕괴를 광학현미경을 통하여 분석을 수행하였다.

실험A와 실험B에서 사용된 설계인자로는 용접전류(welding current : WC), 용접시간(welding time : WT)을 사용하였고, 고정인자로는 가압력(force : F), 초기 가압 시간(squeeze time : ST), 유지 시간(holding time : HT)이 있다. 고정인자는 Table 3-4 와 같이 설정하여 실험을 진행하였다.

Table 3-4 Fixed conditions of experiments

Force (kN)	Squeeze Time (Cycle)	Holding Time (Cycle)
4.5	60	10

3.3 실험 결과

본 연구에서는 두 가지 종류의 실험을 진행하였다. 실험A는 너트 소재에 대하여, 실험B는 너트 형상에 대하여 분석을 진행하였고, Al-Si 코팅된 핫스탬핑 보론강의 용접에 유리한 소재와 형상에 대하여 분석하였다.

3.3.1 너트 소재에 따른 용접성

Type A 너트의 두 가지 소재에 대하여 적정전류구간과 적정용접시간을 파악하기 위하여 반복실험을 통한 용착강도 로브곡선(lobe curve)을 확보하였고 결과 값은 Fig. 3-2, Fig 3-3 와 같다.

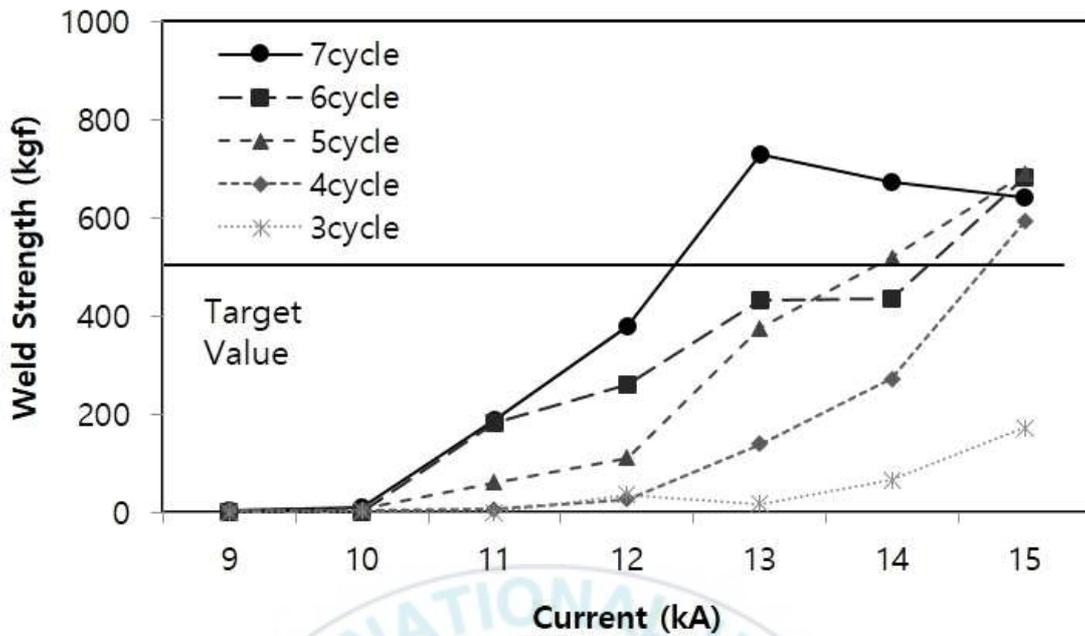
7	3	10	189	380	728	671	642	0
6	0	0	182	260	432	434	682	0
5	2	6	60	110	375	518	689	0
4	5	5	6	26	139	272	592	0
3	0	1	0	35	16	65	172	0
Time(Cycle)								
Current(kA)	9	10	11	12	13	14	15	16

(a) Carbon Steel weld nut(SWCH10A)

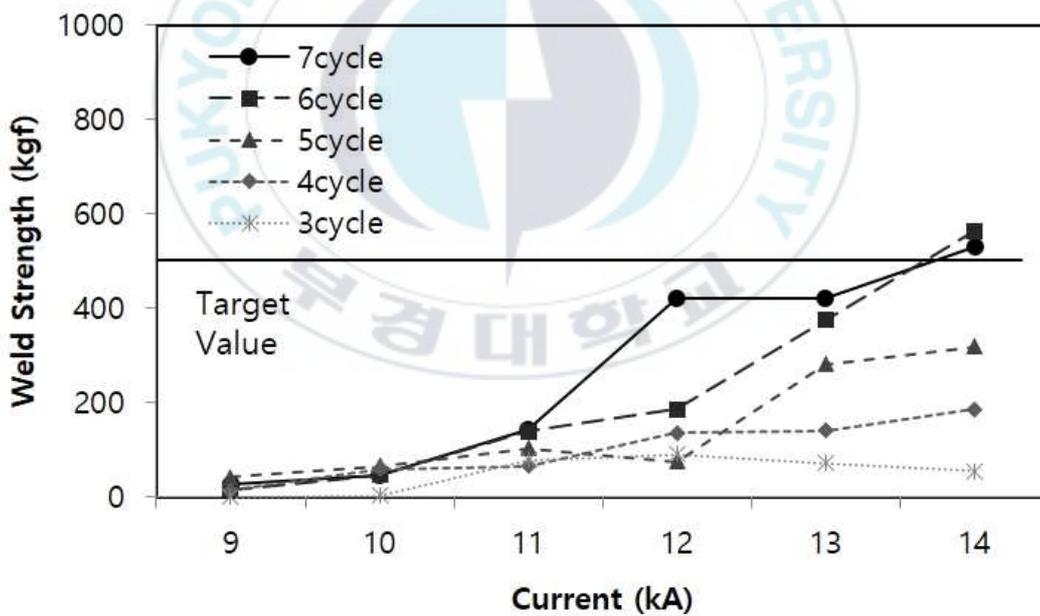
7	27	45	142	421	421	530	0
6	15	47	139	185	374	563	0
5	41	65	103	74	280	318	0
4	14	58	65	135	140	186	0
3	0	3	78	90	72	54	0
Time(Cycle)							
Current(kA)	9	10	11	12	13	14	15

(b) Boron Steel weld nut(S1021B)

Fig. 3-2 Weld strength lobe curves of Type A



(a) Carbon Steel weld nut(SWCH10A)



(b) Boron Steel weld nut(S1021B)

Fig. 3-3 Weld growth graphs of Type A

두 가지 소재 모두 적정 용접구간을 확보할 수 있으나, 용착강도의 산포가 크고 적정 용접구간이 작다는 것을 확인하였다. 특히 보론강(S1021B)의 구간이 탄소강(SWCH10A)보다 작고, 스페터 역시 보론강이 먼저 발생하는 것을 확인하였다. 이는 소재의 탄소함유량에 따른 너트 자체의 발열 때문에 발생한 것으로, 보론강 소재가 상대적으로 발열이 높기 때문에 용융금속이 스페터로 빠져나가기 때문이다.

소재에 따른 로브곡선에서 한 가지 전류구간(12kA)을 선정하여 광학현미경을 통한 단면분석을 수행하였고 결과값은 Fig. 3-4, Fig. 3-5와 같다.

Fig. 3-4에서, 용접돌기와 모재 사이의 발열보다 모재 자체의 발열이 더 크게 발생하는 것을 확인하였다. 이는 모재의 성분에 의한 발열의 차이로, 너트와 모재의 원활한 발열균형(heat balance)을 이루어야 용착강도가 상승하는 것을 알 수 있다.^[17] 보론강 너트의 경우, 탄소함유량에 따른 너트의 발열로 인하여 용접돌기의 붕괴가 상대적으로 많이 진행됨에 따라 불필요한 용접돌기의 변형을 초래하는 것을 확인하였다.

Fig. 3-5에서, 보론강 소재는 5cycle까지 코팅층이 잔존하며 7cycle에서 용융부에 코팅층이 제거되는 것을 확인하였고 탄소강 소재는 1cycle부터 용융부의 코팅층이 줄어들고, 7cycle에서 코팅층이 용융부에서 외곽으로 밀려나는 것을 확인하였다. 이로 인해 코팅층의 거동은 용융부로부터 가압에 의하여 외곽으로 밀려나 제거되는 것이라고 판단하였다.

핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접 시 발열과 모재의 Al-Si 코팅층은 용착강도에 밀접한 영향을 미친다. 너트의 발열은 소재 성분에 따라 같은 전류를 통전함에도 발열량은 다르다. 너트의 발열량이 크게 되면 돌기의 붕괴가 빠르게 발생되고, 돌기의 접촉 면적이 넓어져 전류밀도를 낮추게 된다. 이로 인해 통전을 방해하는 Al-Si 코팅층을 밀어내기 위한 돌기의 적절한 형상을 유지할 수 없고, 너트와 모재 사이의 너겟 성장을 방해한다.

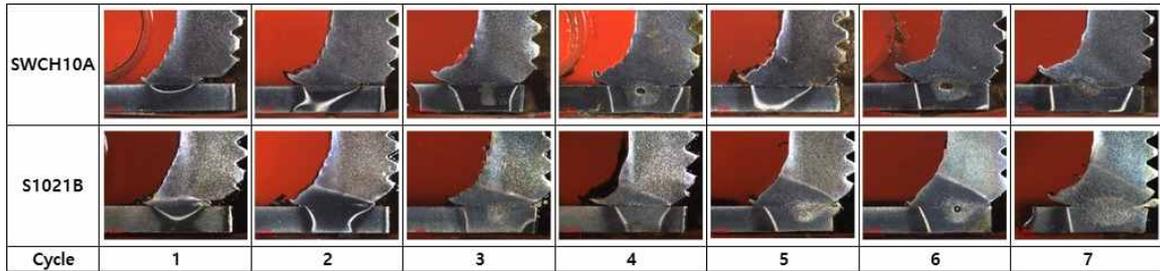


Fig. 3-4 Macro section analysis of Type A

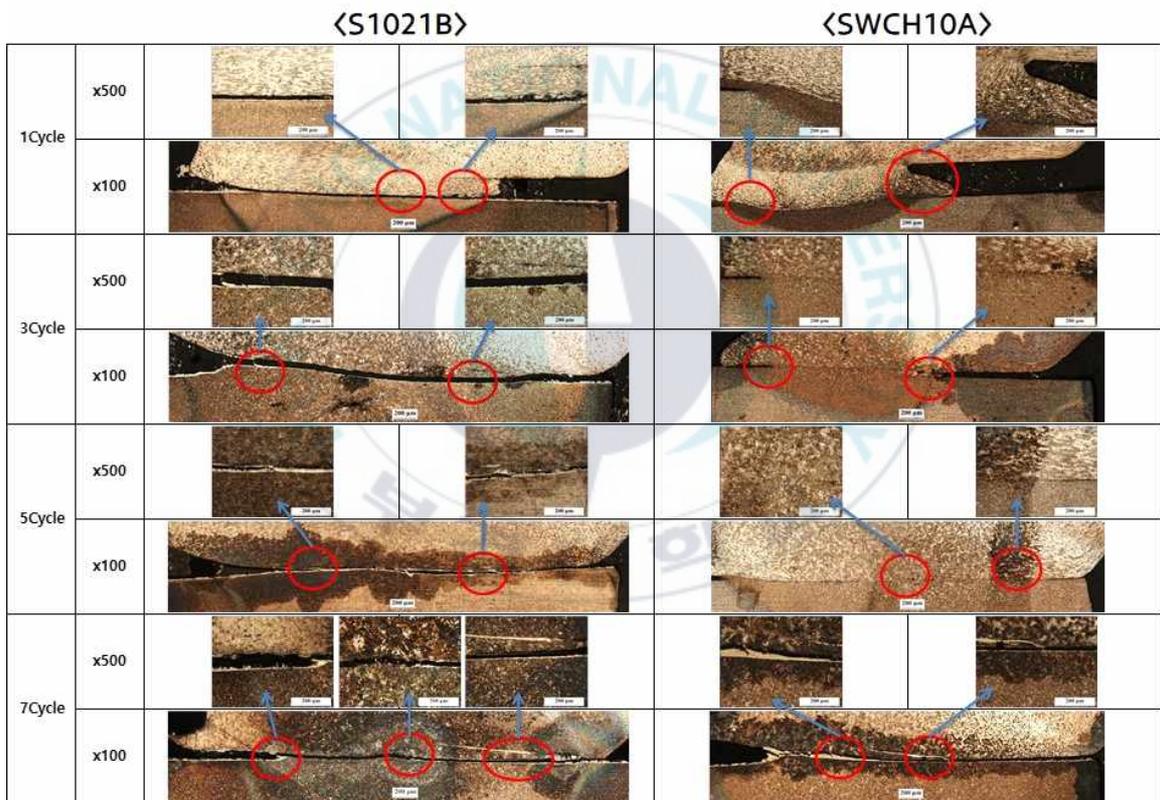
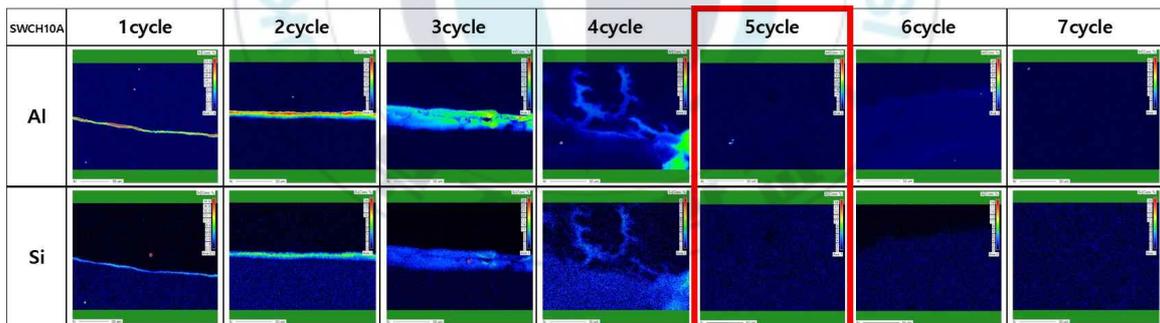


Fig. 3-5 Micro section analysis of Type A

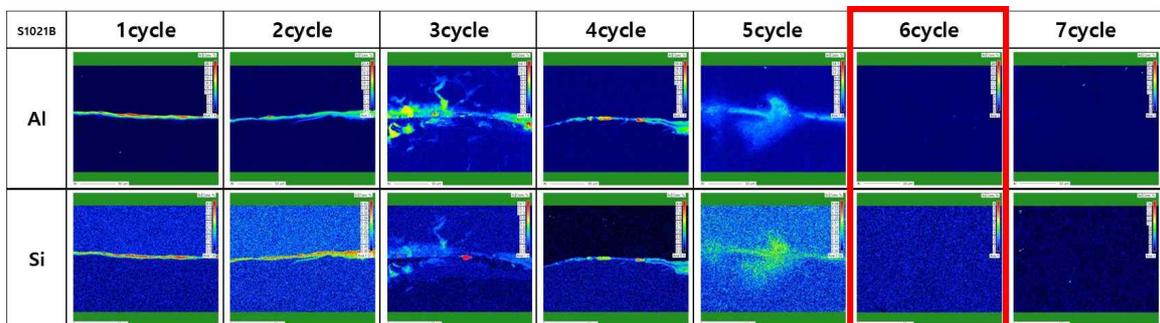
Al-Si 코팅층의 거동을 보다 정밀하게 파악하기 위하여 각 사이클별 용융부에 EPMA 분석을 수행하였고 결과는 Fig. 3-6와 같다.

탄소강과 보론강 소재 모두 2cycle까지는 코팅층의 용융이 일어나지 않고 알루미늄과 실리콘 각 성분의 층으로 구성되어있고, 3cycle부터 코팅층이 용융되기 시작하였다. 또한 탄소강은 12kA - 5cycle, 보론강은 12kA - 6cycle에서 코팅층이 용융부에서 완전히 제거되는 것을 확인하였다.

모재의 Al-Si 코팅층 제거는 돌기가 완전히 붕괴되기 전의 짧은 시간 내에 이루어져야 한다. 또한 너트 자체의 발열이 돌기 붕괴에 미치는 영향을 고려하였을 때 보론강 소재가 탄소강보다 발열량이 크고, 돌기 붕괴가 빠르게 진행된다. 모재의 Al-Si 코팅층 제거 측면에서도 보론강이 상대적으로 늦게 제거됨을 확인하였다. 용착강도 로브곡선, 단면분석, EPMA분석 결과들로 인하여 Al-Si 코팅층 제거와 돌기붕괴 측면에서 탄소강 소재가 보론강 소재보다 유리함을 확인하였다.



(a) Carbon Steel weld nut(SWCH10A)



(b) Boron Steel weld nut(S1021B)

Fig. 3-6 EPMA analysis of Type A

3.3.2 너트 형상에 따른 용접성

너트 형상과 체적에 대한 용접성을 분석하기 위하여 적정전류구간과 적정용접시간을 고려하여 반복실험을 통한 로브곡선을 확보하였고 결과 값은 Fig. 3-7, Fig. 3-8와 같다.

Type B 너트의 경우, 체적이 상대적으로 증가하였기 때문에 입열량을 고려하여 전류를 증가시켰다. MS181-04 용착강도 기준에 만족되는 결과 대부분은 스파터가 대량 발생하였지만, Type A 의 용착강도에 비해 상대적으로 증가한 결과 값을 확보하였다. 이는 고전류를 사용함으로써 입열량이 증가하고, 그에 따른 용융체적이 증가하였기 때문이라고 사료된다. 스파터가 대량 발생한 원인은, Type B 의 용접발 접촉 면적이 1.209mm^3 , Type A 의 용접발 접촉 면적이 2.105mm^3 으로 접촉 면적이 상대적으로 작아 초기 접촉 저항이 낮고, 그에 따른 전류밀도가 상승하여 발생한 것으로 판단된다.

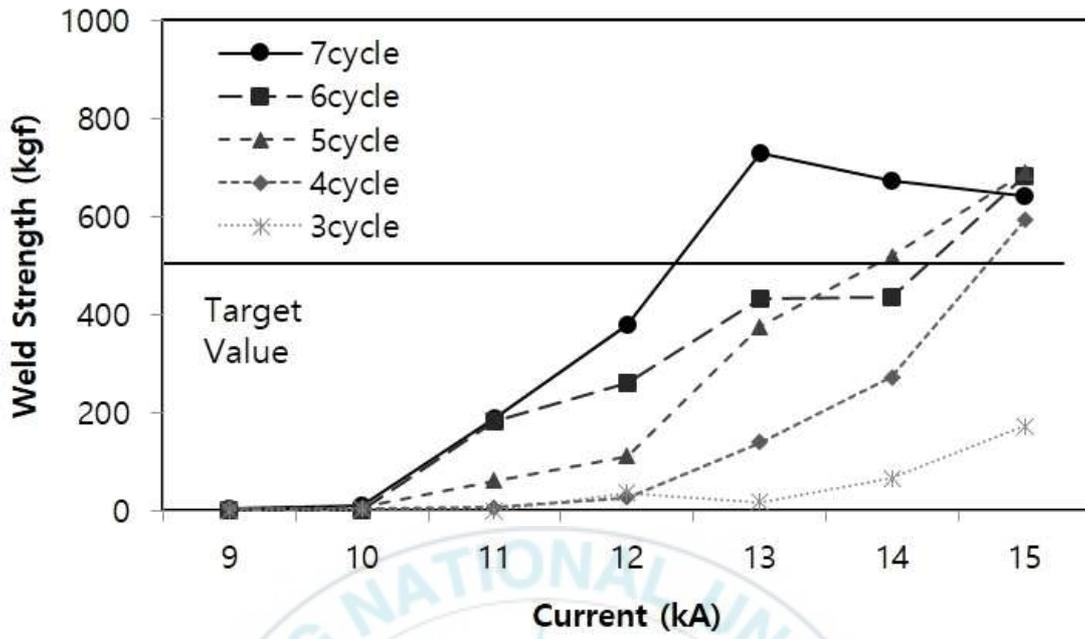
7	3	10	189	380	728	671	642	0
6	0	0	182	260	432	434	682	0
5	2	6	60	110	375	518	689	0
4	5	5	6	26	139	272	592	0
3	0	1	0	35	16	65	172	0
Time(Cycle)								
Current(kA)	9	10	11	12	13	14	15	16

(a) Type A

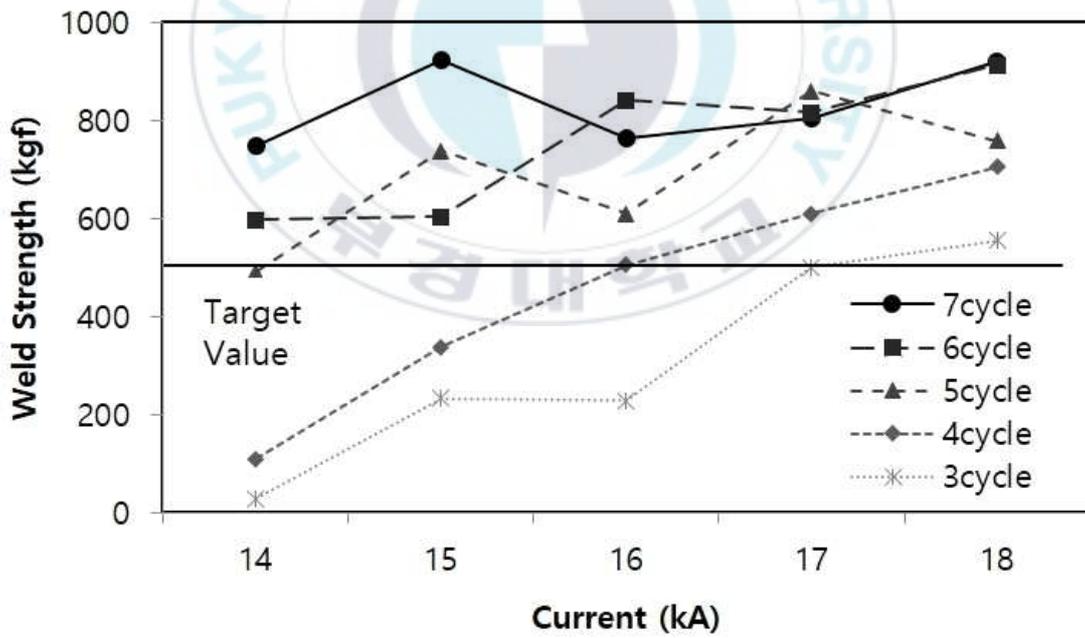
7	748	921	762	805	919
6	596	603	841	816	913
5	491	737	609	859	757
4	109	337	504	609	704
3	27	232	227	500	554
Time(Cycle)					
Current(kA)	14	15	16	17	18

(b) Type B

Fig. 3-7 Weld strength lobe curves of weld nuts



(a) Type A



(b) Type B

Fig. 3-8 Weld growth graph of weld nuts

형상에 따른 로브곡선에서 각 한 가지 전류구간(12kA/16kA)을 선정하여 광학현미경을 통한 단면분석을 수행하였고 결과 값은 Fig. 3-9, Fig. 3-10와 같다.

Fig. 3-9의 너트 돌기 붕괴 부분에서, 체적이 작은 Type A 의 돌기 형상이 바깥쪽으로 기울어져 있기 때문에 발열이 시작됨과 동시에 돌기의 붕괴가 바깥쪽으로 무너지는 것을 확인할 수 있다. 이는 너트가 통전되면서 모재로의 입열을 방해하는 요인으로써, 불필요한 돌기붕괴가 발생한다고 판단된다. 그에 비해 Type B 의 모재로의 입열은 원활하며 약 3cycle부터 모재에서 너겟이 형성되는 것을 확인하였다. 따라서 모재로의 용입은 내돌기 형상인 Type B 가 유리하다고 판단하였다.

Fig. 3-10에서 Al-Si 코팅층 제거 측면으로 분석한 결과, Type A 너트는 용융부의 코팅층이 7cycle 까지 잔존하는 것을 확인하였고, Type B 너트는 1cycle부터 코팅층이 용접부에서 밀려 빠져나가는 것을 확인하였다. 이는 너트의 돌기 형상에 대한 차이로, 돌기 붕괴 시 불필요한 변형이 발생하는 외돌기 형상에 비해 내돌기 형상이 코팅층의 제거에 유리하다는 것을 확인하였다.

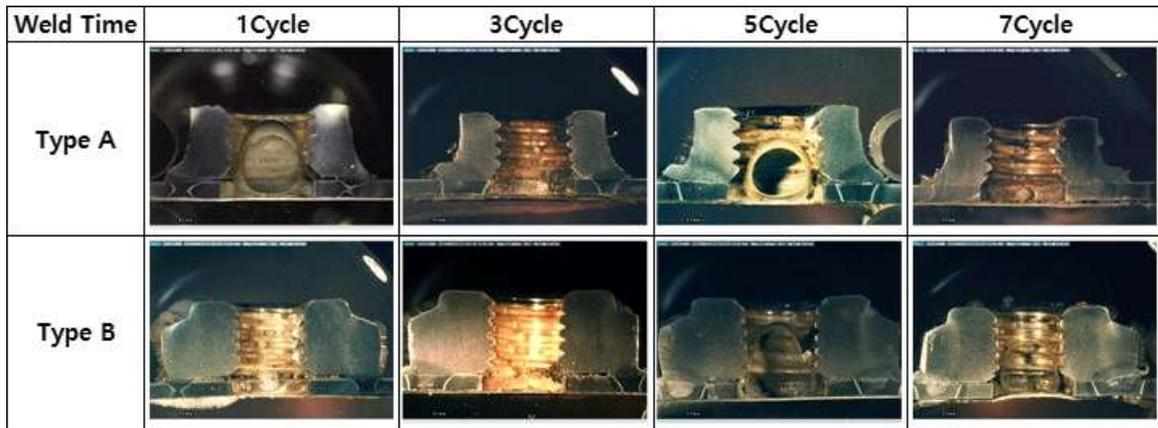


Fig. 3-9 Macro section analysis of weld nuts

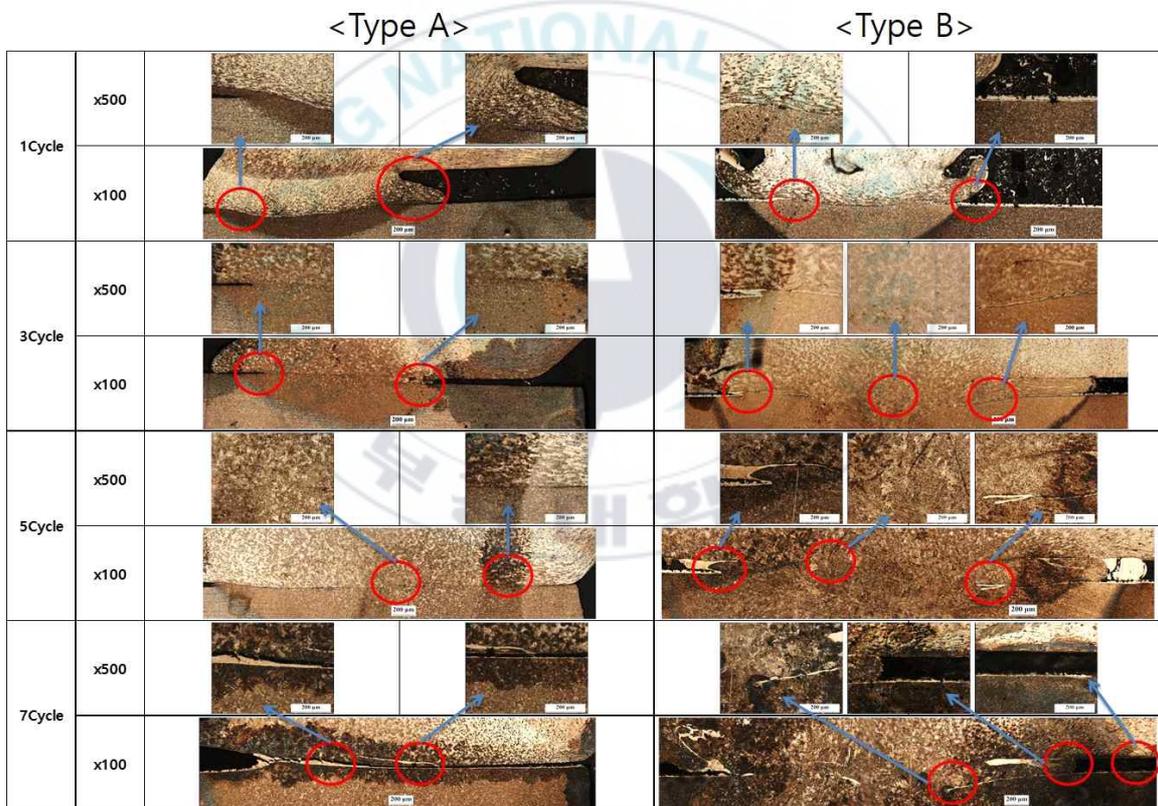


Fig. 3-10 Micro section analysis of weld nuts

3.3.3 너트의 용접성 실험에 대한 고찰

상기 실험결과들로 인하여 Al-Si 코팅층의 제거, 돌기 붕괴, 발열이 짧은 시간 내에 이루어지는 것을 확인할 수 있었고, 세 가지 인자조절이 통전 초기에 복합적으로 이루어져야 한다는 것을 확인하였다. 또한 세 가지 인자를 조절하기 위한 필요충분조건은 너트의 적절한 체적과 용접돌기의 형상인 것을 확인하였다. 체적이 상대적으로 작은 너트에 고전류를 사용하게 되면, 발열과 가압력에 의하여 나사산의 손실을 도래하기 때문이다. 용접돌기의 경우에는, 불필요한 용융거동을 보이는 외돌기 형상보다 내돌기 형상이 세 가지 인자의 조절에 유리한 조건이라는 것을 확인하였다.

따라서 Al-Si 코팅된 핫스탬핑 보론강에 대한 너트프로젝션 용접에 유리한 너트는 Type B 라는 것을 확인하였고, 용접공정을 최적화하여 다량의 스팟 발생을 억제하는 것이 필요하다.

제 4 장 용접 공정 최적화

4.1 용접 공정변수의 제어

앞서 진행된 실험의 결과로 미루어 볼 때, 너트프로젝션 용접에 유리한 형상은 Type B 너트임을 확인하였다. 이것은 세 가지 공정변수(Al-Si 코팅층, 돌기 붕괴, 발열)의 조절이 유리한 것으로, 공정변수를 제어함으로써 더 높은 용착강도 확보는 물론이며 과도한 스파터 발생을 억제하여 작업자의 안전과 불량률을 줄일 수 있다. 세 가지 공정변수는 약 3cycle 이내에 복합적으로 이루어지는 것을 확인하였다. 너트프로젝션 용접에 최대한 유리한 방향으로 이끌기 위하여 세 가지 공정변수를 초기에 제어하는 것이 필수적이다.

Al-Si 코팅층의 경우, Fig. 3-10에서 확인하였듯, 약 1cycle부터 용융부에서 외곽으로 빠져나가는 것을 확인하였다. 용접돌기 붕괴는 Fig. 3-9에서 약 3cycle에서 완전히 붕괴되어 입열이 넓은 면적으로 진행되는 것을 확인하였다. 넓은 면적으로 입열이 진행되면 초기의 용접돌기의 면적보다 넓어지게 되고, 그에 따른 접촉저항이 감소하여 발열이 줄어들게 된다. 너트와 모재 사이의 발열이 줄어들면 모재의 발열이 상대적으로 커지면서 발열의 균형을 제어하기가 어렵다.

따라서 보다 효율적인 용접 공정변수 제어를 위하여 용접조건을 다단통전으로 적용시켰다. 다단통전을 적용한 목적은 1차 통전조건에서 세 가지 용접 공정변수를 단시간에 제어하고, 그 후 2차 통전조건에서 너갯을 성장시켜 용착강도를 상승시키고 스파터를 감소시키는 것이다.

4.2 너트프로젝션 용접 공정 최적화

너트프로젝션 용접 공정 중 다단통전 매커니즘은 1차 통전, 냉각 시간 (cooling time), 2차 통전의 순서로 진행된다. 매커니즘의 각 공정에서의 역할은 다음과 같다.

(1) 1차 통전(pre pulse)

너트프로젝션 용접에서 공정변수의 제어는 단시간에 이루어지기 때문에 다단통전의 1차 통전시간 내에 조절하여야 한다. 1차 통전의 목적은 세 가지 공정 변수(Al-Si 코팅층, 돌기 붕괴, 발열)를 효과적으로 제어하는 것이고, 최소한의 입열량을 이용하여 모재와 너트의 발열 균형을 1차적으로 통제하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 1차 통전시간을 3cycle 이내로 고정시켰다. Type B 너트의 단일통전 용접실험 결과 스파터가 발생하지 않은 구간 중, 용착강도가 상대적으로 높은 조건(16kA - 3cycle, 17kA - 2cycle)을 선택하였다.

(2) 냉각 시간(cooling time)

다단통전을 적용한 너트프로젝션 용접 시, 1차 통전과 2차 통전 사이에 냉각 시간(cooling time)이 존재한다. 냉각되는 시간이 길어지면 열 손실이 커지며, 그에 따른 발열의 불균형이 발생한다. 반대로 냉각되는 시간이 짧으면 단일통전의 용접 매커니즘과 유사해지며 과입열에 의한 스파터가 발생한다. 또한 핫스탬핑 보론강 모재의 경우, 모재 자체의 고유저항이 크기 때문에 발열량이 상대적으로 크다. 따라서 본 연구에서는 모재의 발열을 줄여 모재와 너트의 발열 균형을 맞추기 위하여 1차 통전 후 2cycle, 4cycle, 6cycle의 냉각 시간을 사용하였다.

(3) 2차 통전(main pulse)

2차 통전의 목적은 스패터 발생 억제와 용착강도 향상이다. 1차 통전과 냉각 시간은 세 가지 공정변수를 조절하기 위한 공정단계이며, 2차 통전에서는 용착강도 향상을 위한 너겟의 크기를 성장시키고, 스패터 발생을 억제하여 작업자의 안전과 제품의 불량률을 최소화한다.

다단통전의 용접조건에 대한 도식도는 Fig. 4-1 이며, 용착강도결과는 Table 4-1 와 같다.

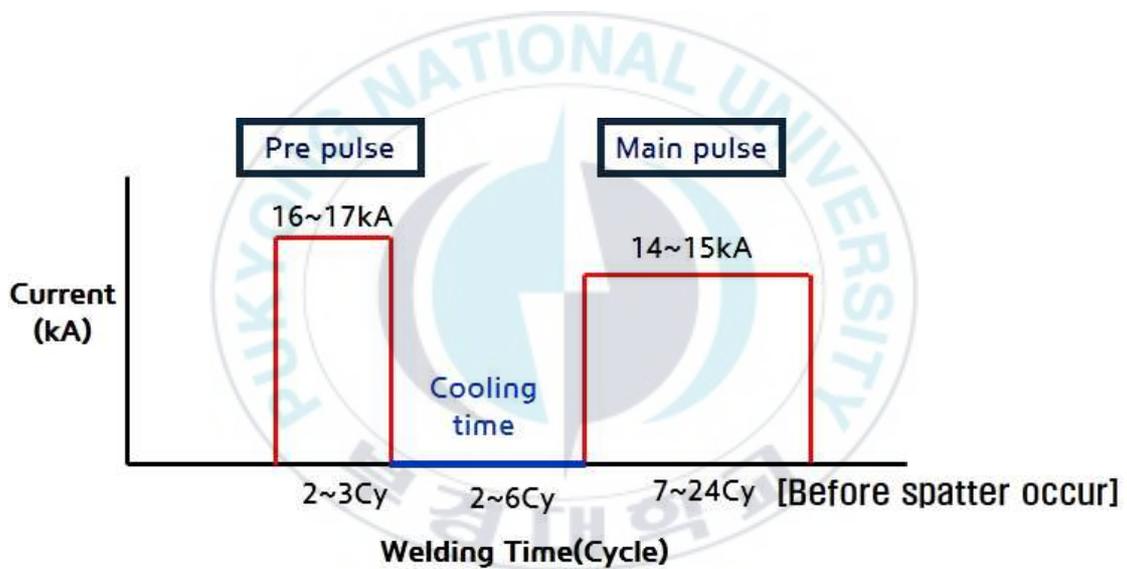


Fig. 4-1 Experiment conditions of multi-pulse projection welding

Table 4-1 Experiment result of multi-pulse projection welding(1)

Pre Current (kA)	Pre Time (Cycle)	Cooling Time (Cycle)	Main Current (kA)	Main Time (Cycle)	Weld Strength (kgf)
16	3	2	15	15	930
		4		14	978
		6		14	869
		2	14	13	541
		4		16	721
		6		18	826
17	2	2	15	7	886
		4		7	883
		6		8	605
		2	14	12	734
		4		14	703
		6		24	705

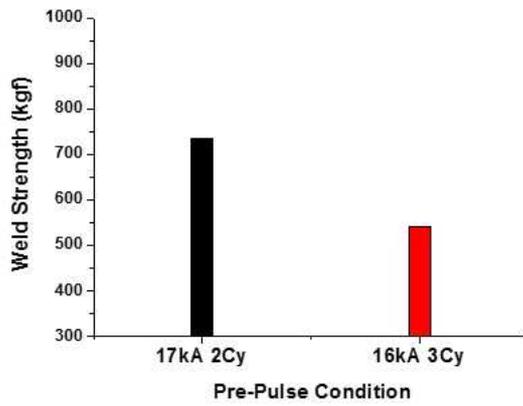


다단통전 너트프로젝션 용접 실험 결과 단일통전에 비해 용착강도의 표준편차가 약 50% 감소하고 용착강도의 평균값이 약 1.3배 증가된 것을 확인하였고, 스파터가 전혀 발생되지 않음을 확인하였다. 이는 너트프로젝션 용접 공정변수의 제어가 원활이 되었다고 판단할 수 있다.

두 가지의 1차 통전조건을 비교를 위하여, 1차 통전조건이 다르고 냉각시간(cooling Time)과 2차 통전전류가 같은 조건에서의 용착강도를 비교하였고, 그 결과는 Fig. 4-2, Fig. 4-3 와 같다.

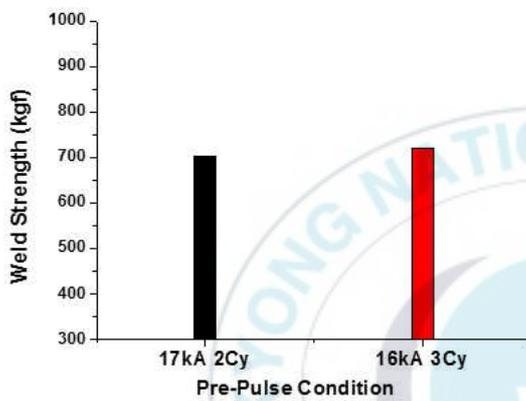
2차 통전조건 중 전류가 14kA 인 Fig. 4-2 의 경우, 1차 통전전류 17kA 일 때 용착강도의 변화는 적고 16kA 일 때 용착강도가 냉각시간이 증가함에 따라 용착강도가 상승하는 것을 확인하였다.

2차 통전조건 전류가 15kA 인 Fig. 4-3 의 경우, 냉각시간이 증가함에 따라 용착강도가 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 각 용접조건에 따른 적절한 냉각시간이 필요하다고 판단되고, 모든 조건에서의 용착강도가 MS181-04의 용착강도 기준(500kgf)에 준하는 결과값 이므로 입열량과 용접시간 등을 고려하여 용접조건을 도출하였다.



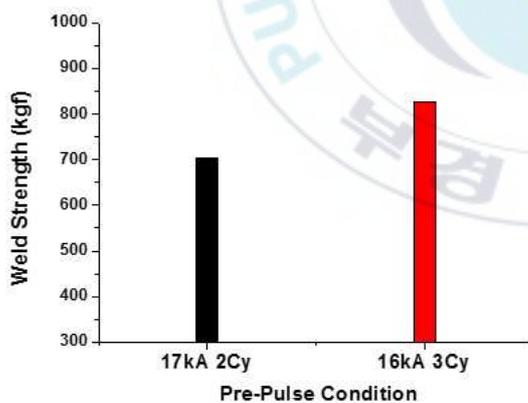
Pre-Pulse	Cooling Time	Main-Pulse
17kA / 2Cy	2Cy	14kA / 12Cy
16kA / 3Cy	2Cy	14kA / 13Cy

(a) Cooling Time 2Cycle



Pre-Pulse	Cooling Time	Main-Pulse
17kA / 2Cy	4Cy	14kA / 14Cy
16kA / 3Cy	4Cy	14kA / 16Cy

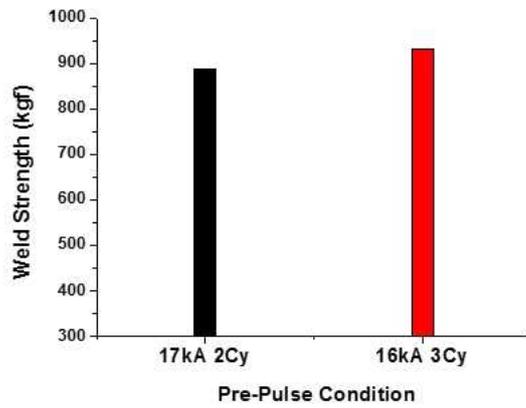
(b) Cooling Time 4Cycle



Pre-Pulse	Cooling Time	Main-Pulse
17kA / 2Cy	6Cy	14kA / 24Cy
16kA / 3Cy	6Cy	14kA / 18Cy

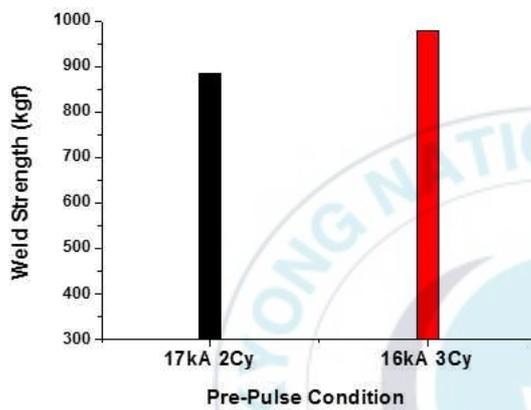
(c) Cooling Time 6Cycle

Fig. 4-2 Strength analysis of cooling time at main-current 14kA



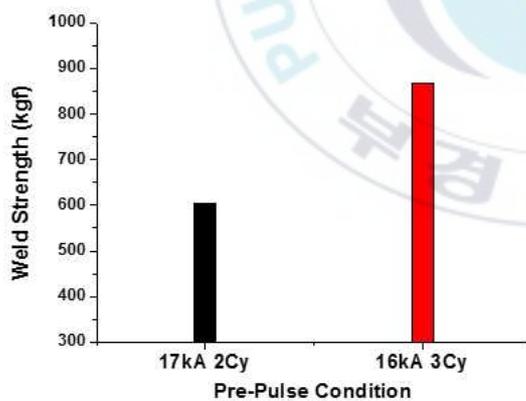
Pre-Pulse	Cooling Time	Main-Pulse
17kA / 2Cy	2Cy	15kA / 7Cy
16kA / 3Cy	2Cy	15kA / 15Cy

(a) Cooling Time 2Cycle



Pre-Pulse	Cooling Time	Main-Pulse
17kA / 2Cy	4Cy	15kA / 7Cy
16kA / 3Cy	4Cy	15kA / 14Cy

(b) Cooling Time 4Cycle



Pre-Pulse	Cooling Time	Main-Pulse
17kA / 2Cy	6Cy	15kA / 8Cy
16kA / 3Cy	6Cy	15kA / 14Cy

(c) Cooling Time 6Cycle

Fig. 4-3 Strength analysis of cooling time at main-current 15kA

도출된 통전조건으로는 1차 통전조건은 16kA - 3cycle, 2차 통전조건 중 통전전류를 15kA로 도출하였고, 세밀하게 분석하기 위하여 추가 실험을 진행하였다. 추가실험의 용접조건에 대한 도식도는 Fig. 4-4와 같고, 실험결과는 Table 4-2, Fig. 4-5 와 같다.

실험결과 냉각시간이 길어지면 용착강도가 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 냉각시간이 길어지면 용접하는 도중에 열손실이 발생하고 그에 따른 너겟 성장이 늦어진다는 것이다. 이를 판단하기 위하여 각 조건에 따른 단면 분석을 시행하였고 그 결과는 Fig. 4-6 와 같다.

분석 결과, 냉각시간이 2cycle과 4cycle일 때에는 입열에 대한 열 손실이 적어 너겟이 점점 커지는 것을 확인할 수 있지만, 6cycle일 때에는 열 손실이 크게 발생하여 너겟의 성장에 방해가 되는 것을 확인하였다. 이로써 다 단통전을 적용하여 너트프로젝션 용접 시 적절한 냉각시간이 필요하다는 것을 확인하였고, 그 결과 값은 2cycle과 4cycle 이라고 사료된다.

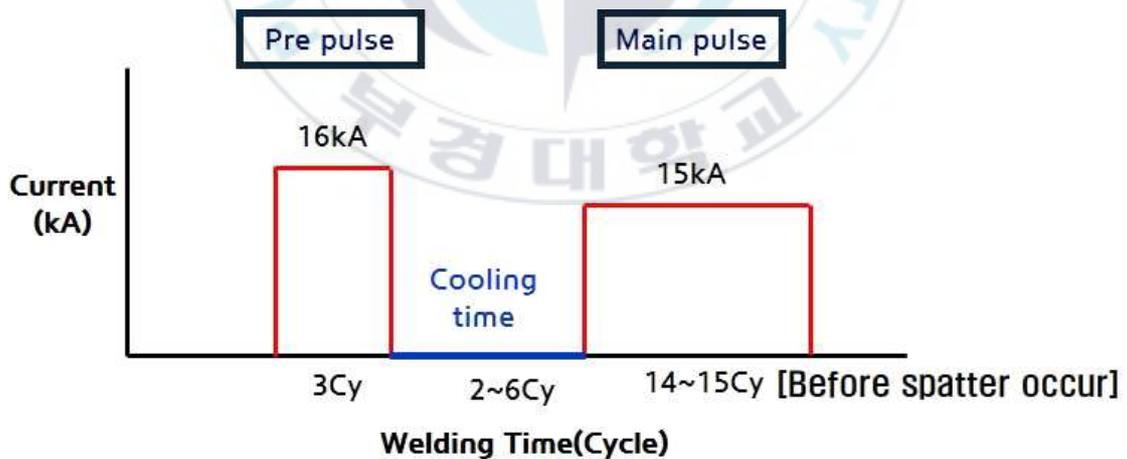


Fig. 4-4 Experiment conditions of multi-pulse projection welding

Table 4-2 Experiment result of multi-pulse projection welding(2)

Pre Current (kA)	Pre Time (Cycle)	Cooling Time (Cycle)	Main Current (kA)	Main Time (Cycle)	Tensile Strength (kgf)
16	3	2	15	15	839
					960
					930
		4		14	914
					824
					978
		6		14	885
					869
					869

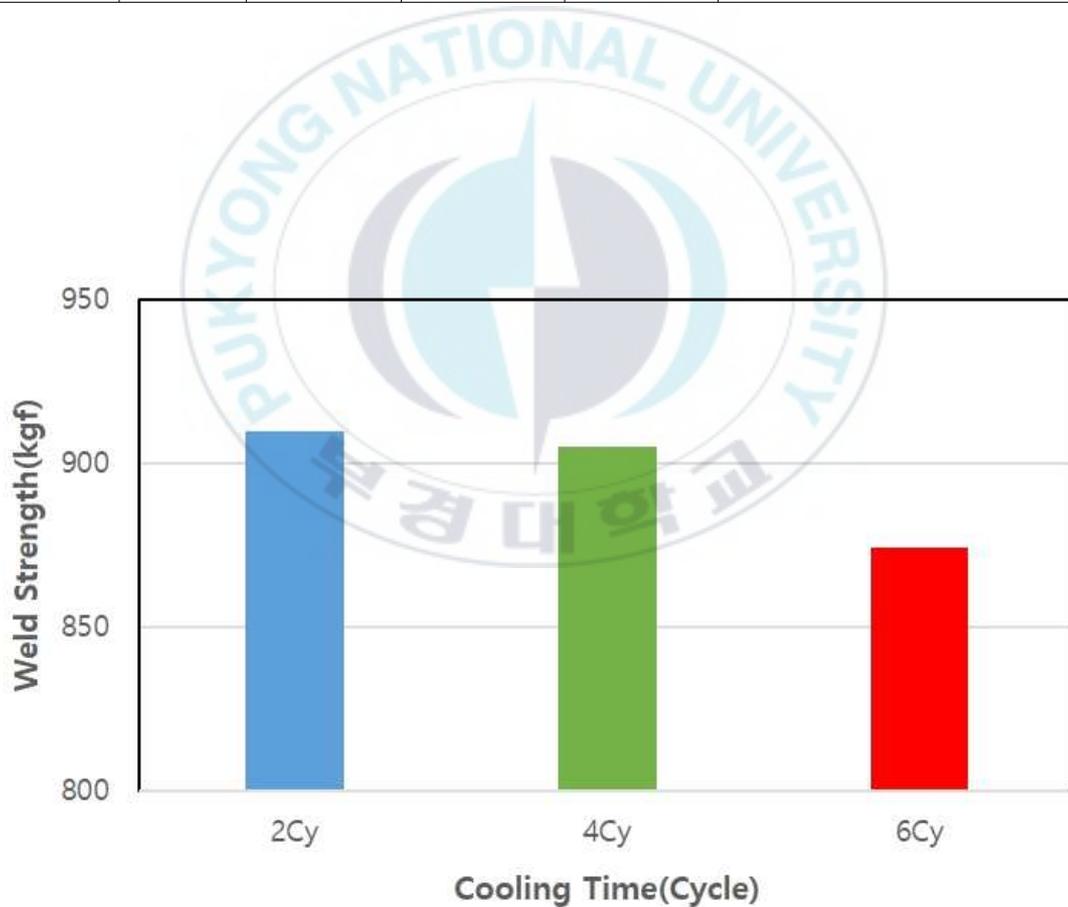


Fig. 4-5 Weld strength of cooling time

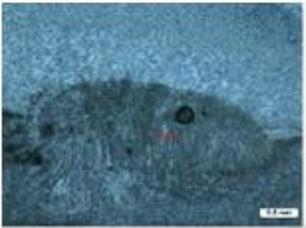
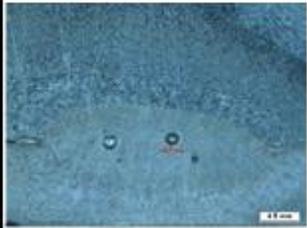
Pre-Pulse	16kA//3Cy		
CoolingTime	2Cy	4Cy	6Cy
Main-Pulse	15kA//15Cy	15kA//14Cy	15kA//14Cy
Micro Section			
Nugget Diameter	2.897mm	3.15mm	2.447mm

Fig. 4-6 Nugget analysis of multi-pulse projection welding

4.3 통전 방법에 따른 용접결과 비교

단일통전과 다단통전의 너겟 직경에 따른 용착강도를 비교하였고 그 결과는 Fig. 4-7 와 같다.

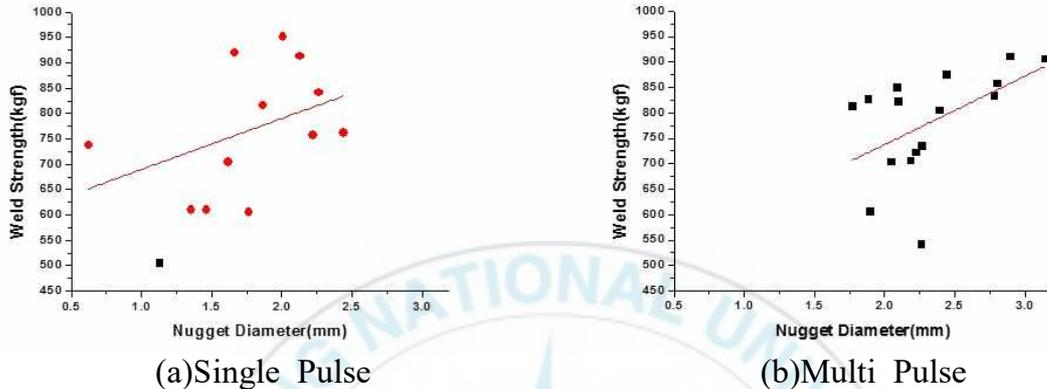


Fig. 4-7 Compare nugget diameter with weld strength of conditions

Fig. 4-7에서 (a)는 단일통전, (b)는 다단통전의 너겟 직경에 대한 용착강도로, 단일통전보다 다단통전을 적용 시 너겟의 직경이 상대적으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 단일통전에서는 다수의 조건에서 스파터가 발생하였지만, 다단통전을 적용함으로써 인해 문제를 해결할 수 있었다. 이는 너트 프로젝션 용접공정 변수의 제어가 원활히 이루어짐을 확인할 수 있었고 작업자의 안전과 불량률과 직결되는 스파터를 원활히 해결하였다고 판단할 수 있다.

단일통전 및 다단통전에서 스파터가 발생하지 않고 MS181-04의 용착강도 기준에 준하는 용착강도를 확보한 조건들의 평균값, 최대값, 최소값의 비교한 결과를 Fig. 4-8에 나타내었다.

단일통전의 조건은 14kA - 6cycle, 16kA - 4cycle 이며, 용착강도의 평균은 약 550kgf이다. 다단통전의 조건은 '1차 통전 // 냉각 시간 // 2차 통전' 의 순서로 하였을 때 16kA - 3cycle // 2, 4, 6cycle // 15kA - 14, 15cycle 이고, 용접 공정 최적화를 통한 용착강도의 평균은 약 896kgf로 기존 대비 약 63% 향상하였다.

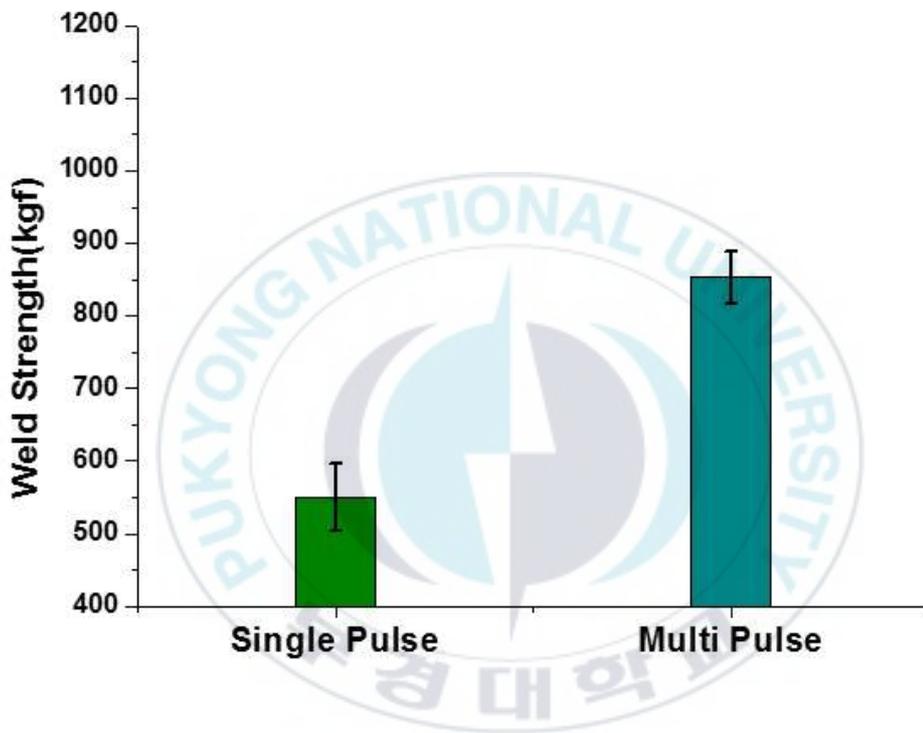


Fig. 4-8 Average strength of pulse conditions

단일통전과 다단통전의 너트프로젝션 용접에서 스파터발생 직전조건 of 입열량을 비교하였다. 단일통전은 16kA - 4cycle, 14kA - 6cycle이고 다단통전은 1차 통전은 16kA - 3cycle, 2차 통전은 15kA - 14, 15cycle으로 계산하였다. 단, 사용한 너트는 같은 종류이므로 저항(R)값을 1Ω 으로 설정하였고 결과는 Table 4-3 와 같다.

Table 4-3에서, 너트프로젝션 용접 시 통전 중간에 아주 짧은 냉각시간이 존재하면 약 $4.6\sim 4.7\times 10^3$ kJ 정도의 입열량을 추가로 사용할 수 있다. 입열

량이 많아지면 용융되는 금속의 양이 증가되고, 너겟성장 뿐만 아니라 용융부 주위에 코로나 본드(corona bond)의 면적이 넓어진다. 코로나 본드란 너겟 주위에 존재하는 링 형상의 부분으로 실제 용융하지는 않고 열과 압력을 받아 고상으로 압접된 부분을 말한다. Fig. 4-9는 단일통전과 다단통전의 파단면을 나타낸다. 단일통전에서는 너트와 모재의 계면파단(interfacial fracture) 현상이 발생하였고, 다단통전에서는 너트와 모재의 플러그파단(plug fracture)이 발생하였다. 이것은 다단통전에서 너트와 모재의 발열 균형이 잘 이루어져 용융부가 안정적으로 너겟을 형성한 것이다. 또한 단일통전의 파단면 평균크기는 약 4.5mm이고, 다단통전은 약 6.5mm으로 이는 입열에 대한 코로나 본드(corona bond)의 생성에 의한 것으로 판단된다. 이로 인해 너겟 주위의 압접된 부분이 증가하고 용착강도 역시 상승하는 것이다.

다단통전을 적용한 너트프로젝션 용접 공정 최적화는 용착강도 기준으로 보았을 때 MS181-04의 용착강도 기준의 79%, 단일통전의 63% 수준이 상승하였고, 플러그파단 형태를 통하여 다단통전 시 너트와 모재의 발열 균형을 이루었다고 판단된다.

Table 4-3 Heat Input of pulse conditions

Pulse Conditions	Heat Input (kJ)	
	Single Pulse	16,384
Multi Pulse	12,228	50,400
		54,000



Fig. 4-9 Fracture surface of pulse conditions

제 5 장 결 론

본 논문에서는 핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접에 대하여 소재와 형상에 대하여 연구하였다.

핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접에서 영향을 미치는 인자는 모재의 Al-Si 코팅층, 너트 돌기, 발열 균형이라는 것을 확인하였고 세 가지 인자들은 통전 시 짧은 시간 내에 복합적으로 제어되는 것을 확인하였다.

너트의 두 가지 강종(SWCH10A, S1021B)에 대한 실험은 핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접에 유리한 소재를 증명하기 위해 수행하였다. 두 가지 강종 중, 보론강이 탄소강보다 높은 강성을 가지고 있지만 통전 시 탄소함유량에 따른 발열의 불균형으로 돌기가 상대적으로 빠르게 붕괴되었다. 그로 인해 모재의 Al-Si 코팅층을 제거하기 위한 돌기 형상이 제대로 유지되지 않음을 확인하였다. Al-Si 코팅층의 제거를 명확하게 확인하기 위하여 EPMA(electron probe micro-analysis) 분석을 시행하였고, Al-Si 코팅층이 제거되는 시점은 탄소강(SWCH10A)은 12kA - 5cycle, 보론강은 12kA - 6cycle 인 것을 확인하였다. 이것은 탄소강이 보론강 소재보다 Al-Si 코팅층의 제어 측면에서 유리한 것을 규명하였다. 또한 용착강도 실험을 통한 로브곡선(lobe curve)에서도 탄소강 소재가 적정 용접구간의 범위가 넓은 것을 확인하였다. 이로 인해 너트의 강종에 대한 실험에서는 탄소강(SWCH10A) 소재가 핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접에 유리하다는 것을 규명하였다.

너트의 두 가지 형상(Type A, Type B)에 대한 실험은 핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접에 유리한 형상을 증명하기 위해 수행하였다. 두 가지 형상의 로브곡선에서 사각 - 내돌기 형태인 Type B의 형상은 스패터(spatter)가 대량 발생하였지만 사각 - 외돌기 형태인 Type A의 용착강도에 비해 상대적으로 증가한 결과 값을 확인하였다. 스패터의 발생 원인은 용접 돌기의

접촉면적에 따른 접촉저항의 차이와 Type B 의 체적 증가로 인한 고전류를 사용하였기 때문이라고 판단된다. 모재의 Al-Si 코팅층 제거는 불필요한 돌기 붕괴가 존재하는 Type A에 비해 모재로의 용입이 유리한 Type B가 적절한 것을 확인하였다. 따라서 핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접에 유리한 너트 형상은 Type B 형태인 것을 규명하였다.

선정된 Type B 너트는 너트프로젝션 용접 시 스패터가 대량 발생하는 것을 확인하였고, 이는 용접부 품질에 악영향을 미친다. 따라서 기존의 공정과는 다른 다단통전 공정을 적용하여 스패터 발생 억제와 세 가지 공정변수의 제어를 수행하였다. 실험 결과 단일통전에 비해 용착강도의 평균값이 약 1.3배 증가한 것을 확인하였고 스패터가 전혀 발생되지 않음을 확인하였다. 이는 1차 통전 조건에서 세 가지 공정변수의 제어가 원활히 이루어진 것이라고 판단하였고, 실험을 바탕으로 다단통전의 용접조건 가이드라인을 도출하였다. 도출된 가이드라인을 통해 너트프로젝션 용접실험 결과, MS181-04의 용착강도 기준보다 약 79%, 단일통전보다 약 63% 향상된 용착강도를 확보하였고 다단통전 시 플러그파단(plug fracture)이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 다단통전 시 너트와 모재의 발열 균형을 이루어 너트의 충분한 성장을 이루었다고 판단된다.

본 연구에서는 핫스탬핑 보론강의 너트프로젝션 용접에 유리한 강종은 탄소강(SWCH10A)소재, 형상은 사각 - 내돌기 형태인 Type B 라는 것을 증명하였다. 또한 스패터의 대량 발생 억제와 세 가지 공정변수 조절을 위해 다단통전을 적용하였고, Type B 너트에 대한 용접조건 가이드라인을 도출하였다.

Reference

1. 양종석, “ ‘무게를 줄여라’ 자동차 업계, 경량화 전쟁 ”, ETNews, 2015. 4.
2. 손창석, “ 780MPa급 강재의 저항 점 용접 시뮬레이션 및 공정 변수 최적화에 대한 연구 ”, 부경대학교 대학원 : 기계공학과, 2014. 2.
3. 최두열, 김영곤, “ 자동차용 강재의 접합기술 동향 ”, 대한용접접합학회지, 27-2, p. 125-130, 2009. 4.
4. J. V. Adams, G. N. Matthews AND M. L. Begeman, " Effect of Projection Geometry Upon Weld Quality and Strength ", Welding Research Supplement, p. 466 - 470, 1965. 10.
5. O. E. Weiss, L. F. Kreisle AND M. L. Begeman, " Projection Weld Quality Determination Based on Dynamic-Displacement of the Electrode ", Welding Research Supplement, p. 417 - 423, 1965. 9.
6. A. Cunningham, JR., AND M. L. Begeman, " Effect of Projection Height upon Weld Quality and Strength ", Welding Research Supplement, p. 26 - 30, 1966. 1.
7. J. Paul Thorne, Thomas J. Geiermann, " A New Approach for Projection Welding Coated Sheet Metal ", American Welding Society, p. 2 - 9, 1984. 11.

8. Eric J. Michaud, Dan P. Vanderzwet, " A Comparison of AC and Mid-Frequency DC Projection Weld Quality ", Sheet Metal Welding Conference VIII, p. 1 - 8, 1998. 10.

9. Michael L. Kuntz, John C. Bohr, " Modeling Projection Welding of Fasteners to AHSS Sheet using Finite-Element Method ", Sheet Metal Welding Conference XII, p. 1 - 12, 2006. 5.

10. E. Tolf, J. Hedegard, " Resistance weld nut Welding: Improving the Weldability and Joint Properties of Ultra High Strength Steels ", WELDING IN THE WORLD -LONDON-, Vol.51, No. 3 - 4, 2007.

11. 김명준, " 저항 용접 ", 기문사, 개정2판, 2009.

12. 용접 접합 편람Ⅲ, 대한용접접합학회, 2007.

13. 최홍석, 김병민, 박근환, " 열처리 된 보론강판 및 합금화용융아연도금 강판의 점용접 특성 평가 ", 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, Vol.2009, No.10, 2009.

14. 中村 孝 外, " 低抗鎔接 ", 62 - 64, 1979.

15. H. Karbasian, A. E. Tekkaya, J. Mater, " A Review on Hot Stamping ", Journal of Materials Processing Technology, p. 2103 -

2118, 2010.

16. 지창욱, “ 자동차 차체용 핫스탬핑 보론강의 점용접부 코팅층 용융거동 및 너겟 성장 ”, 부산대학교 대학원, 2015.

17. S. Agashe, " Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding ", Welding Journal, Vol.82, No.7, 2003.



A Study for Improving Weld Strength in
Nut Projection Welding on Ultra High Strength Steel

Kim, Jae Wan

Department of Mechanical Engineering
Graduate School of Pukyong National University

Abstract

Currently, an increasing number of products demand for the development of the automobile industry, we have made naturally increase the production rate accordingly. With the increase of these demands, resistance welding is used in the main welding method can be bonded in a relatively shorter time than other welding processes. Because of the environmental issues and improved fuel efficiency, weight reduction of the vehicle body is required. But data of the resistance welding process is not enough.

In this study, it was conducting research in order to improve the welding strength in the weld nut projection welding of hot stamping boron steel. First, I elucidated the welding mechanism, and understand the process variables that affect the weld-ability. And I compared the Al-Si coating layer behavior and nugget growth in accordance with the steel grade of the weld nut, and selected one of the steels. Second, I analyzed the effect of the weld nut configuration, and secured the lobe curves for each conditions. Then, the spatters that affect weld quality was improved through the optimization process. As a result, I presented the proper welding conditions for the weld nut.