



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](#)

2016년 8월

석사학위논문

자동차용 고강도 강판의 저항 점용접 시
다단통전이 너깃 형성에 미치는 영향

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

고 은 형

자동차용 고강도 강판의 저항 점용접 시 다단통전이 너깃 형성에 미치는 영향

The Influence of Multi Pulse Currents on Nugget
Formation of Automotive High Strength Steel in RSW

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

고 은 형

자동차용 고강도 강판의 저항 점용접 시
다단통전이 너깃 형성에 미치는 영향

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

고 은 형

고은형의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방한서 (인)

위원 조선대학교 교수 방희선 (인)

위원 조선대학교 교수 주성민 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

| | |
|--------------------------------------|-----|
| List of Figures | III |
| List of Tables | IV |
| Abstract | V |
| | |
| 제 1 장. 서 론 | 1 |
| 1 . 1 연구배경 및 목적 | 1 |
| 1 . 2 연구현황 및 내용 | 5 |
| | |
| 제 2 장. 용접이론 | 6 |
| 2 . 1 저항 점용접의 원리 및 특징 | 6 |
| 2.1.1 저항 점용접의 원리 | 6 |
| 2.1.2 저항 점용접의 주요인자 | 8 |
| 2.1.3 저항 점용접의 용접공정 | 11 |
| 2.1.4 다단통전 & 적응제어 모드 | 12 |
| 2 . 2 용접성 평가 방법 | 14 |
| 2.2.1 파괴 및 비파괴 검사, 인장시험 | 14 |
| 2.2.2 너깃절단 및 광학현미경 분석 | 16 |
| | |
| 제 3 장. 초고장력강의 용접특성 | 18 |
| 3 . 1 초고장력강의 성부에 따른 용접 특성(문제점) | 18 |
| 3.1.1 화학적 성질 | 18 |
| 3.1.2 물리적 성질 | 18 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 3.1.3 용접 특성 | 19 |
| 3 . 2 저항 점용접 적용방안 | 20 |
| 제 4 장. 실험 및 결과 | 21 |
| 4 . 1 실험 조건 및 구성 | 21 |
| 4 . 2 1차 실험 세부내용 및 결과 | 22 |
| 4.2.1 1차 실험 목적 및 세부사항 | 22 |
| 4.2.2 시편의 구성 및 용접 조건 | 23 |
| 4.2.3 1차 실험결과 | 24 |
| 4 . 3 2차 실험 세부내용 및 결과 | 26 |
| 4.3.1 2차 실험 배경 | 26 |
| 4.3.2 2차 실험 목적 및 세부사항 | 27 |
| 4.3.3 2차 실험 결과 / 분석 | 29 |
| 4 . 4 2차 실험 종합 | 31 |
| 4.4.1 2차 실험(3매 용접부) 결과 / 분석 | 31 |
| 4.4.2 2차 실험(4매 용접부) 결과 / 분석 | 34 |
| 4 . 5 3차 실험 세부내용 및 결과 | 36 |
| 4.5.1 실험 목적 및 세부사항 | 36 |
| 4.5.2 3차 실험 결과 / 분석 | 38 |
| 4 . 6 3차 실험 종합 | 40 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 4.6.1 3차 실험(3매 용접부) 결과 / 분석 | 40 |
| 4.6.2 3차 실험(4매 용접부) 결과 / 분석 | 46 |
| 제 5 장. 결론 | 48 |
| Reference | 50 |

List of Figures

| | | |
|-----------|---------------------------------|----|
| Fig. 1.1 | 차체의 초고장력강 적용 부위 | 2 |
| Fig. 1.2 | 초고장력 강판의 사용부위 | 3 |
| Fig. 2.1 | 저항 점용접 모식도 | 6 |
| Fig. 2.2 | 저항의 분포 | 7 |
| Fig. 2.3 | 용접부 모식도(미시적 관점) | 8 |
| Fig. 2.4 | 압흔에 의한 용접불량 | 9 |
| Fig. 2.5 | 용접부의 거동특성 | 9 |
| Fig. 2.6 | 온도와 저항의 관계 | 10 |
| Fig. 2.7 | 서보형 용접기 | 10 |
| Fig. 2.8 | 저항 점용접의 용접공정 | 11 |
| Fig. 2.9 | 너깃 성장의 진행 방식 | 12 |
| Fig. 2.10 | 적응제어 모드 개념도 | 13 |
| Fig. 2.11 | 비대칭 너깃 | 13 |
| Fig. 2.12 | 스몰 너깃 / 비용접 | 13 |
| Fig. 2.13 | 반파괴 검사 및 전파괴 검사 | 14 |
| Fig. 2.14 | 비파괴 검사 장비 및 측정결과 | 14 |
| Fig. 2.15 | 인장시험 장비 | 15 |
| Fig. 2.16 | 너깃 직경에 따른 인장강도의 비례곡선 | 16 |
| Fig. 2.17 | 너깃절단 및 광학현미경 분석법 | 17 |
| Fig. 3.1 | 너깃의 생성 및 성장에 따른 위치별 저항의 변화(상댓값) | 19 |
| Fig. 3.2 | 초고장력강판 용접을 위한 용접조건의 개선 | 20 |
| Fig. 4.1 | 스포티지R QTR-INR_LH | 26 |
| Fig. 4.2 | 강판 재질별, 매수별 대표타점 | 26 |

List of Table

| | | |
|------------|--------------------------------------|----|
| Table 3.1 | 강판의 강도에 따른 구분 | 18 |
| Table 4.1 | 초고장력강 포함, 3매 및 4매 용접 시편 구성 | 22 |
| Table 4.2 | 초고장력강 포함, 3매 용접부 단면 분석 | 24 |
| Table 4.3 | 초고장력강 포함, 4매 용접부 단면 분석 | 25 |
| Table 4.4 | 고장력강 포함, 3매 및 4매 용접 시편의 구성 종합 | 27 |
| Table 4.5 | 고장력강 포함, 3매 및 4매 용접 시편의 용접조건 | 28 |
| Table 4.6 | 고장력강 포함, 3매 용접부(NO.136) 단면분석 | 29 |
| Table 4.7 | 고장력강 포함, 4매 용접부(NO.110) 단면분석 | 30 |
| Table 4.8 | 고장력강 미포함, 3매 및 4매 용접 시편의 구성 종합 | 36 |
| Table 4.9 | 3매 및 4매 용접 시편의 용접조건 | 37 |
| Table 4.10 | 고장력강 미포함, 3매 용접부(NO.62) 단면분석 | 38 |
| Table 4.11 | 고장력강 미포함, 4매 용접부(NO.37) 단면분석 | 39 |

ABSTRACT

The Influence of Multi Pulse Currents on Nugget Formation of Automotive High Strength Steel in RSW

Eun-hyung Ko

Advisor : Prof. Bang, hee-seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining
Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

With the fast advanced auto industry, prompt and reliable welding processes are required. In more than 90 percent, resistance spot welding process is applied to car body manufacturers.

According to the international environment regulations, in the automobile industry, improvement of fuel efficiency became a hot topic and the introduction of high strength steel is accelerated.

Based on 2014 developmet of car body, the rate of high strength steel is about 53 percent of total panels of car body.

In the high strength steel, increasing alloying elements makes interfacial resistance high and it makes differences of the resistance in between multi layers(more than 3 layers). Because of this reason, imperfect nuggets are builded and bond strengths are lowered.

For this reason, there are needs for derivation of optimum welding process different from existing methods. In this paper, observe and examine the short-intensive pre-pulse welding mechanism through the providing existing car body parts.

The method of observing the cross section of the nugget is that cut the center of the nugget, treat the acid and analyze with the optical

microscope.

The result of applying short-intensive pre-pulse shows that the nugget size of 3 layers welding sheets is about 18% bigger than before and 4 layers welding sheets is about 57% larger than before in contact surface with high-strength steel sheet.

Targeting the QTR INR_LH part of the car body in production, after sorting the all spot welding points of 3 and 4 layers welding sheets, research the growth of the nugget size which are applied with the short-intensive pre-pulse 120~140% of the main pulse. As the result, Nugget size looks like bigger than before and 4 layer welding sheets are more efficient than 3 layer welding sheets.

In many cases, the car body is composed of thin iron plate and there are cooling effects and radiation effects when spot welding is going hence there are difficulty building the nugget size. But in these cases, applying of the short-intensive pre-pulse make sure that the nugget size grewed.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지구 온난화의 심각성이 연일 화제가 되면서 산업 전반에 걸쳐 문제의 근원인 CO₂ 가스 배출의 감소를 위해 노력하고 있다. 자동차 업계에서는 이와 더불어 유가(油價)의 상승에 따라 소비자들의 고연비 차량 선호도가 상승하면서 연비를 높이기 위한 여러 가지 방법을 동원하고 있다.

가솔린 엔진은 직분사를 이용하여 고효율 엔진을 출시하고 있으며 디젤 엔진은 커먼레일 방식의 발전으로 효율은 높이고 소음/진동이 개선되어 소형 승용차량에도 탑재되고 있다. 또한 전기모터와 엔진을 결합시킨 하이브리드 차량도 우수한 연비를 강점으로 개발이 한창이다.

변속기는 여러 단계의 변속이 가능하게 하여 엔진의 저속RPM에서도 충분한 구동력을 발휘할 수 있게 되었으며 따라서 주행 중 엔진의 회전수가 줄어들게 되고 연비가 좋아진다. 자동변속기의 도입으로 병행 사용된 토크컨버터의 작동원리상 효율이 100%가 될 수 없는데 이를 해결하고자 무단변속기와 듀얼클러치가 개발되고 있다.

이러한 노력에 발맞추어 자동차 차체는 다양한 신소재를 활용한 경량화를 추진하고 있다. 차량의 중량을 100kg 감소시키면 그만큼 에너지 효율이 높아짐에 따라 연비가 좋아짐은 물론이고 온실가스 배출량 또한 9~10g/km 줄일 수 있다는 연구 결과도 보고되어있다.[1]

차량 경량화를 위한 방법으로 핫스탬핑을 이용한 초고장력강, 비중이 작은 금속인 마그네슘과 알루미늄합금 그리고 비금속인 CFRP의 도입이 진행되고 있다.

현재 가장 일반화된 자동차 차체의 구조는 모노코크 방식으로써 외판, 보강재 그리고 내판 등 역할이 구분된 철판을 여러 겹 부착하여 제작되고 있다. 단순히 외판과 내판의 구성품을 경량금속이나 CFRP로 대체하는 방식이 있으며 Fig. 1.1 과 같이 비교적 재질이 두껍고 중량이 많이 나가는 보강용 강판을 비교적 얇고 가볍지만 강도는 동등하거나 그 이상인 초고장력강으로 대체하는 방식이 있다.

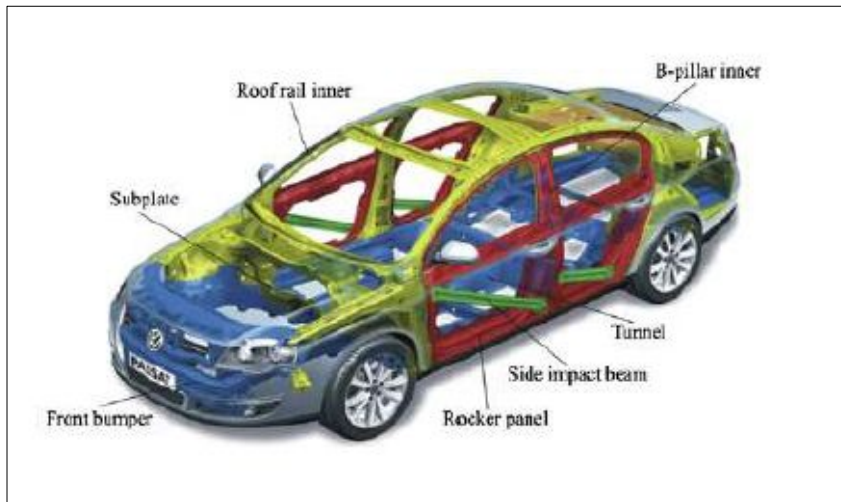


Fig. 1.1 차체의 초고장력강 적용 부위 (Volkswagen Passat)

경량금속인 마그네슘과 알루미늄은 차체의 기본 재료인 철의 녹는점 보다 훨씬 낮아 기존의 방식으로 용접이 잘 되지 않은 문제점이 있고, CFRP는 부도체이기 때문에 소재의 특성상 용접 할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 리벳을 이용한 접합방식인 SPR(Self Piercing Rivet), 소재에 압력을 가하여 맞물리게 만드는 방식인 클린칭 방법, 소재끼리 물리적인 혼합을 일으켜 붙이는 마찰교반용접 그리고 레이저 광선을 열원으로 이용한 레이저용접 등 수많은 방법이 개발되고 있다.[2]

이러한 노력에도 불구하고 현재 출시되고 있는 대부분의 차량에 신기술이 적용되고 있지 않으며 최고급차량에 일부만 적용되고 있는 실정이다. 그 이유는 기존의

용접공정 및 차체생산 공법과 혼용이 어려울 뿐만 아니라 초기 투자비용이 너무 많이 들어 차량의 원가가 상승하는 문제점이 내재되어 있기 때문이다. 또한 효과적인 조립을 위해서는 설계단계에서부터 신기술 적용을 위한 새로운 방식의 디자인이 필요하기 때문에 생산현장에 도입이 늦어지고 있다.

하지만 기존 제품과 비슷한 금속학적 특성(녹는점)을 갖고, 형상 또한 동일하며 두께는 얇아 가벼우면서도 기계적 특성(인장강도)은 동일하거나 그 이상인 제품으로의 대체가 가능해졌는데, 이는 기존 실온에서의 프레스 소성가공을 950℃의 고온으로 가열된 철강소재를 내부에 냉각수가 흐르는 금형에 넣고 프레스로 성형한 뒤 금형 내부에서 급속 냉각시키는 공법인 핫스탬핑 기술의 개발에 의해 가능해졌다.[3]

2014년도 개발차량 기준, 고장력강의 비율이 전체 철판의 약 53%를 차지하고 있으며 아래의 Fig. 1.2 와 같이 여러 부위에 대체 적용되고 있다.

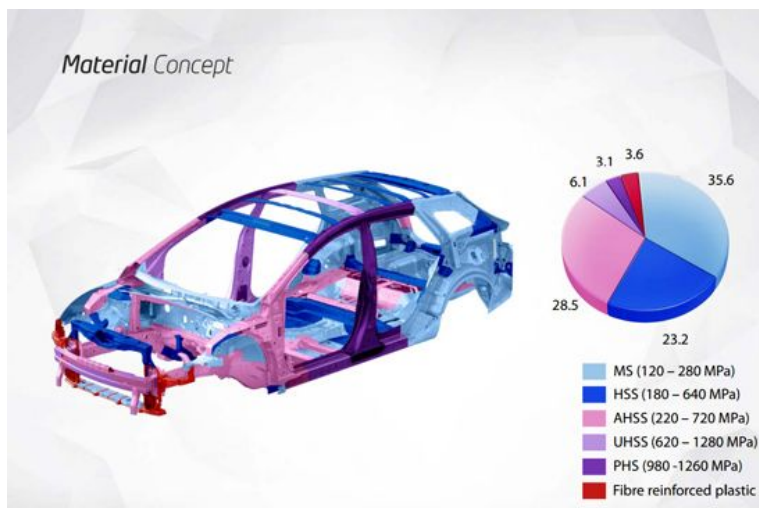


Fig. 1.2 초고장력 강판의 사용부위

자동차 차체 제조사에서는 생산효율이 좋고 신뢰도가 높은 용접방법을 선호한다. 따라서 90% 이상 저항 점용접방식을 사용하고 있는데 초고장력강의 도입으로 판넬의 조합이 새롭게 바뀌고 있으며 이에 따라 새로운 용접조건의 도출이 필요한 상태이다. 새로운 조건에서의 용접을 위해 저항 점용접의 방식도 진화하고 있으며 여러 가지 새로운 방법들이 보고되고 있다.

초고장력강은 합금원소의 첨가량 증가로 인해 비교적 높은 비저항을 보유하고 있다. 이는 다겹 용접부(3겹 이상)에서 계면 간 저항차이로 인해 불완전한 너깃이 형성되고 접합강도가 저하되는 현상으로 나타나고 있다.[3] 이러한 현상은 차량 충돌 시 불완전한 너깃 형성부에서 용접분리가 발생할 수 있음을 의미하고 이는 차량충돌안전성에 큰 문제점이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 초고장력강의 균일한 너깃 형성을 위한 방법인 단기간 고전류의 pre-pulse 적용에 대해 검증하고, 나아가 현재 생산중인 제품의 용접점을 분류하여 고장력강이 속해있는 그룹과 속해있지 않은 그룹에 확대 적용해 보고 너깃의 크기 변화를 분석 및 고찰하여 결론을 도출하고자 한다.

1.2 연구현황 및 내용

전기저항 점용접기는 1877년 미국의 Elihu Thomson에 의해 발명된 용접공정으로 두 금속판을 전극 사이에 놓고 압력을 가하면서 0.3초 내외의 짧은 시간에 수천 암페어의 대전류를 흘려서 금속판 사이의 접촉저항으로 모재의 용융점 보다 높은 열을 발생시키는 장비를 말한다. 우선 용접기에 공급되는 전류를 제어하기 위해 Time controller라는 장비가 있으며 용접부의 너깃 성장을 위해 용접시간을 변화시키는 수많은 방식이 개발되고 있다.[4]

용접 특성을 제어하기 위해 용접기에서는 홀딩시간, 업 슬로프 시간/전류, 냉각 시간, 통전시간, 다운 슬로프 시간 그리고 2통전, 3통전 등 수많은 인자 값을 자유롭게 조정 가능하도록 개발되고 있으며 현재는 2차 전압(또는 전류)을 측정하고 피드백 하여 용접 전력(열량)을 일정하게 보상해주는 방식의 적응제어 모드까지 개발된 상태이다.[5]

초고장력강은 합금원소의 첨가량 증가로 인해 비교적 높은 비저항을 보유하고 있는데 이는 다겹 용접부(3겹 이상)에서 계면 간 저항차이로 인해 불완전한 너깃이 형성되고 접합강도가 저하되는 현상으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 차량 충돌 시 불완전한 너깃 형성부에서 용접분리가 발생할 수 있음을 의미하고 이는 차량충돌안전성에 큰 문제점이 될 수 있다. 따라서 기존의 방식을 개선 및 보완한 최적의 새로운 용접공정이 필요한 상황이다.[6]

이 논문에서는 가장 최신 용접공정인 지능형 용접기의 단기간 높은 초기전류(pre-pulse)를 흘려주었을 때 너깃의 성장 메커니즘 변화에 대하여 연구하였으며 실제 생산하고 있는 차체 부품에 기존과 다른 pre-pulse조건으로 적응제어 모드를 적용하여 용접하였을 때 너깃이 증대되는 현상을 관찰 및 검증하였으며 실제 제품에 사용 중인 시편 조합에 따라 최적의 용접조건을 도출하고 그 적합성을 검증하고자 하였다.

제 2 장 용접이론

2.1 저항 점용접의 원리 및 특징

2.1.1 저항 점용접의 원리

Fig. 2.1 은 저항 점용접의 모식도를 나타낸 것으로서 여러 장의 철판을 서로 겹치기 해놓고 용접기의 전극으로 가압한 뒤 용접트랜스에 의해 형성된 고압 전류를 흘려주어 그때 발생하는 열을 이용하는 용접방법이다. 이 열로 인하여 철판의 국소 부위가 용융점 이상으로 가열되고 겹쳐진 부분의 철판이 녹아 섞이면서 혼합물인 너깃이 형성된다.[5]

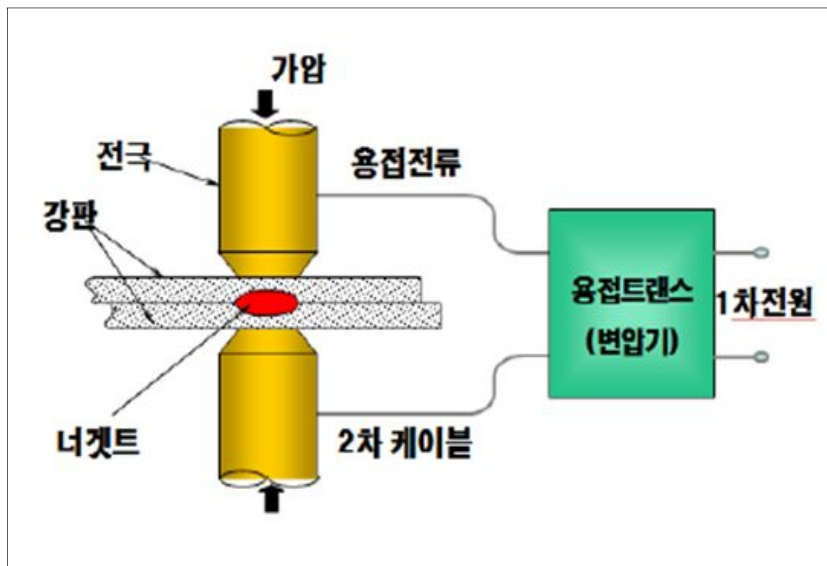


Fig. 2.1 저항 점용접 모식도

이때 발생하는 열량은 아래의 식(2-1)와 같은 공식에 의해 산출된다.

$$Q = I^2 R t \quad \text{식(2-1)}$$

식(2-1)에서 Q 는 발열량, I 는 전류, R 은 저항, t 는 통전시간이다.

이중 가장 중요한 인자는 저항인데, 저항 점용접에서 저항의 분포는 Fig. 2.2와 같으며 각각 접촉저항과 고유저항으로 이루어져 있다.

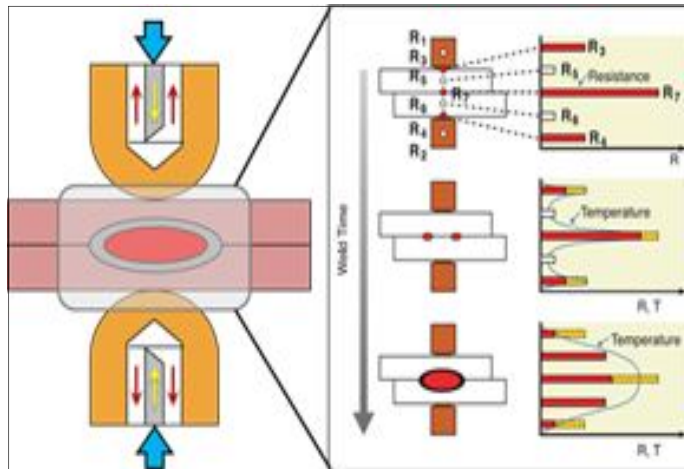


Fig. 2.2 저항의 분포

R_1 , R_2 는 전극의 고유저항이며 상대적으로 매우 작으므로 무시한다. R_3 , R_4 는 전극과 철판사이의 접촉저항이고 R_5 , R_6 는 철판 고유저항이며 마지막으로 두 철판사이의 접촉저항이 R_7 으로 가장 큰 값을 갖는다. 용접이 진행되는 과정에서 저항이 가장 큰 R_7 부위 즉, 철판끼리 접촉된 부분에서 가장 큰 열이 발생되고 용융이 시작된다. 용융이 시작되면 가장 큰 접촉 저항이 작아지고 모재의 고유저항이 커지면서 열의 이동이 발생하며 용융혼합물인 너깃이 성장한다.

2.1.2 저항 점용접의 주요인자

저항 점용접에 영향을 미치는 중요한 인자는 열량산출에 사용되는 값인 전류(I), 저항(R), 통전시간(t)이며 이중 전류는 제곱 값으로 열량에 반영되는 인자로서 그 기여도가 가장 크다. 저항은 용접건(GUN)에서 용접대상물에 압력을 가해주는 힘 즉, 가압력과 관련이 있는데 Fig. 2.3 과 같이 용접부를 미시적으로 들여다보면 가압력이 커질수록 철판 사이의 접촉된 부분이 많아지게 되고 접촉 면적이 늘어날수록 전류가 보다 쉽게 지나갈 수 있게 되는데 이는 접촉저항이 줄어드는 것과 같다.

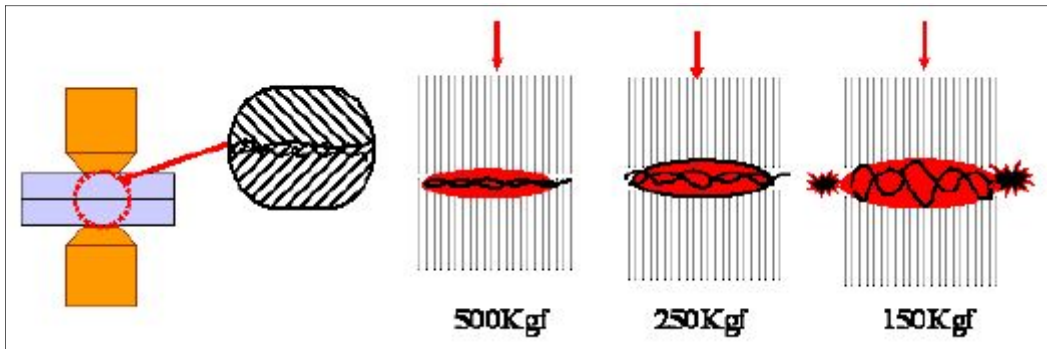


Fig. 2.3 용접부 모식도(미시적 관점)

가압력이 너무 약할 경우 너깃 형성부의 접촉저항이 매우 커져 너깃의 성장속도가 빨라지며 또한 약한 가압력으로 인해 용융혼합물이 옆으로 빠져나가는 현상이 발생할 수 있다. 그 결과 너깃의 크기는 작아지고 기공이 생기는 등 용접불량이 발생할 수 있다. 반면 가압력이 너무 클 경우 접촉저항이 작아지면서 상대적으로 모재의 고유저항에 의한 열 발생이 많아지게 되면서 Fig. 2.4 와 같이 전극에 의해 모재가 눌리는 압흔 현상이 나타날 수 있으며 이 또한 용접부의 강도를 약화시킬 수 있는 요인이 된다. 이와 같이 전류와 가압력(저항)은 상호작용이 있으므로 최적 용접조건 도출시 동시에 고려해 주어야 한다. 통전시간은 열량공식에 의하면 열량과 정비례 관계에 있지만 저항 점용접의 원리에 기술한바와 같이 용접이 진행되고

너깃이 형성되면서 접촉저항은 줄어들고 모재의 고유저항이 커지는 현상 때문에 적정시간 이상의 통전시간은 너깃경의 성장에 전혀 도움이 되지 못하고 오히려 모재의 과열로 인한 압흔이 형성될 수 있다.

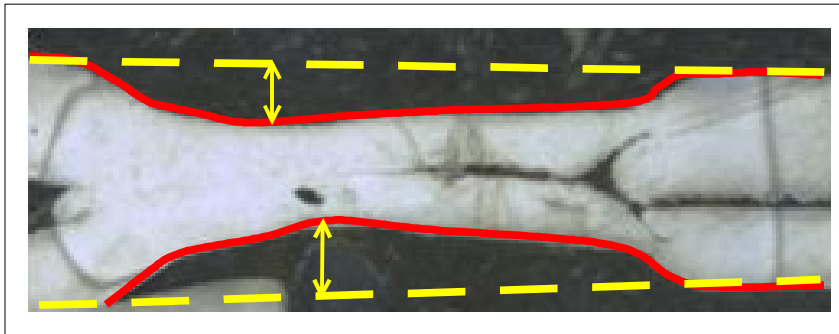


Fig. 2.4 압흔에 의한 용접불량

또 전류를 흘려주는 통로를 만들어주기 위해 전극에 특정한 크기의 가압력이 필요하다. Fig. 2.5 와 같이 용접이 진행되면서 전류가 흐르는 공간의 길이는 짧아지고 면적은 커지기 때문에 전류가 흐르기 쉬운 조건으로 바뀌게 되고 이는 저항이 작아지는 것과 같다. 이에 반해 Fig. 2.6 에 나타난 바와 같이 온도와 저항의 관계를 보면 온도가 상승하면 재료의 고유저항이 커지는 특징이 있다.[7]

용접부의 단면적에 따른 저항과 전류와의 관계

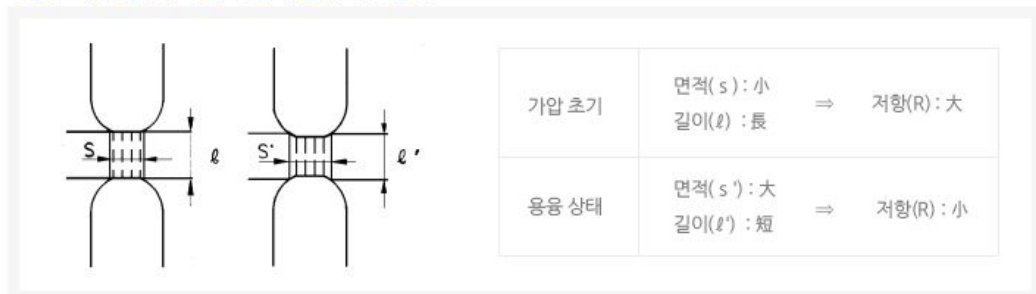


Fig. 2.5 용접부의 거동특성

온도에 따른 저항의 변화

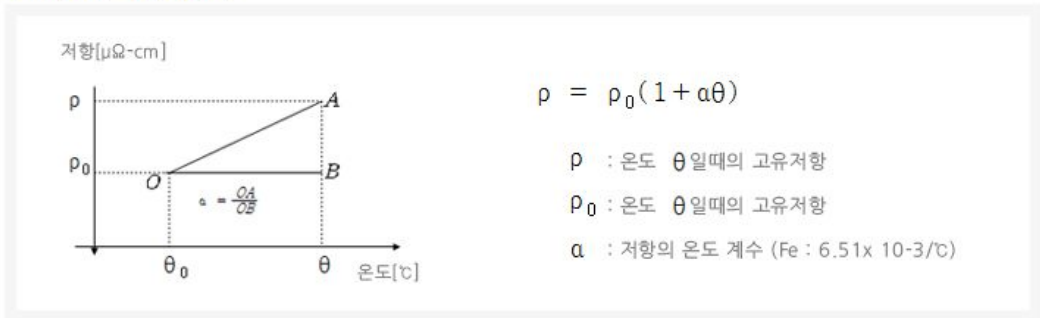


Fig. 2.6 온도와 저항의 관계

가압력 형성의 유리함 때문에 Fig. 2.7 과 같은 서보모터를 이용한 서보건의 도입이 진행되었고 이는 서보모터의 미세한 조절로 가압력 조절이 자유롭기 때문에 접촉저항의 크기를 기존의 공압건에 비해 정확하게 조절할 수 있다. 또한 용접 진행 시 발생하는 전극의 마모량 감소를 감지 및 보상하는 기능으로 항상 일정한 조건에서 용접이 가능하다.

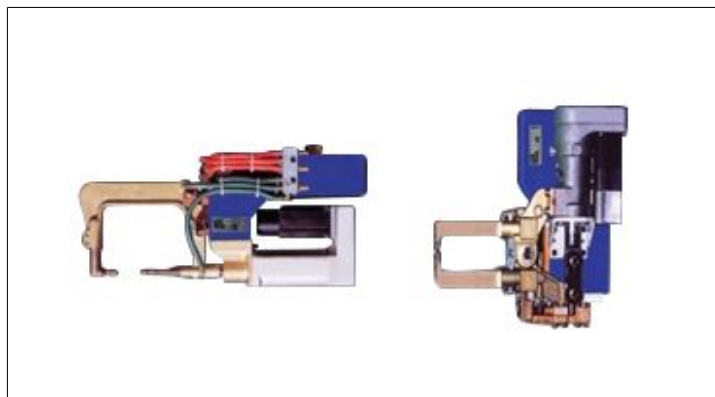


Fig. 2.7 서보형 용접기

2.1.3 저항 점용접의 용접공정

Fig. 2.8 은 저항 점용접의 기본적인 용접공정을 나타낸 그래프이며 가압력 (electrode force)이 용접건의 설정 값까지 도달하는데 필요한 안정화 시간 (squeeze time), 설정 전류로 용접하는 시간(weld time) 그리고 너깃을 안정화 시키는 시간(hold time)으로 구성되어 있다.[8]

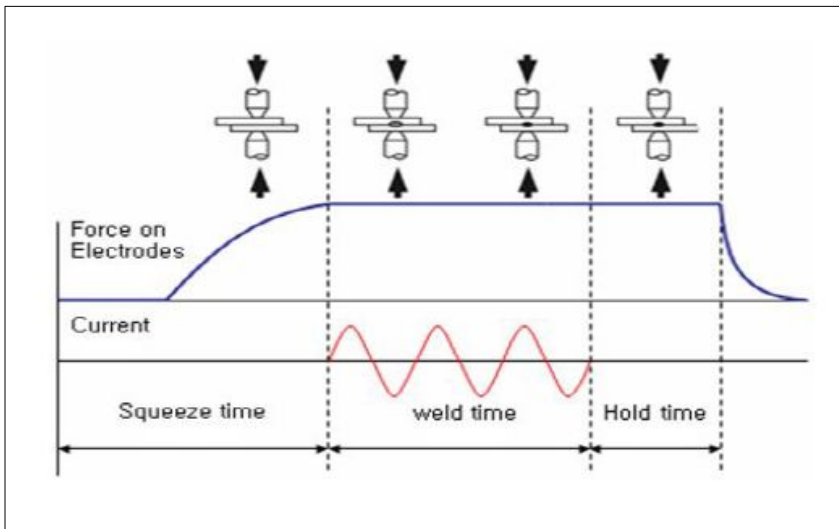


Fig. 2.8 저항 점용접의 용접공정

이 공정에서 용접부의 재질 및 두께 조합에 따라 각각의 공정변수 최적 값이 모두 다르며, 특히 3매 이상의 타점에 (초)고장력 강판이 속해있고 외(外)판이 0.7mm 이하의 박판으로 구성된 경우 박판 쪽 너깃경 사이즈 확보를 위한 공정변수의 최적 값 도출에 어려움을 겪고 있다.

2.1.4 다단통전 & 적응제어 모드

고장력강 등 신소재의 개발과 함께 판넬의 조합은 더욱 다양해졌으며 한 번의 통전으로 용접이 불가능한 조합이 발생함에 따라 수많은 용접 방법이 개발 되었다.

그 중 3겹 이상의 판재를 용접하는 상황에서 용융물의 날림현상 없이 각각의 접촉저항에 알맞은 열량을 발생하기 위해 여러 번 통전을 하는 방법이 진행되었으며 적으면 2번에서 많이는 4번까지 통전하는 다단통전 방법이 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. 이 방법은 Fig. 2.9 와 같이 판넬의 접촉부에서 너깃을 형성한 다음 그 크기를 늘리는 방식으로 여러 번의 통전을 진행하는 중에 각각의 조합에 맞게 전류의 세기와 통전 시간을 조절하는 방식이다.

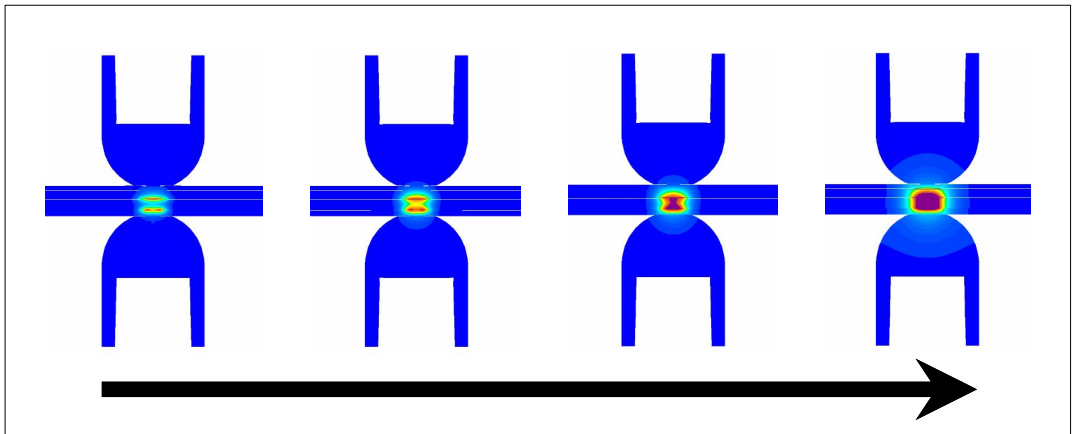


Fig. 2.9 너깃 성장의 진행 방식

Fig. 2.10 은 최근 개발된 적응제어 모드의 모식도이며 작동방식은 다음과 같다. 용접하는 순간 전극의 2차 전압을 측정하고 피드백 하여 해당 용접부에 설정된 입 열량이 나올 수 있도록 전류와 시간을 제어하는 방식이다. 이 방법은 외부적 영향에 의한 용접품질의 편차를 줄여 최적의 용접결과를 도출할 수 있는 장점이 있다.

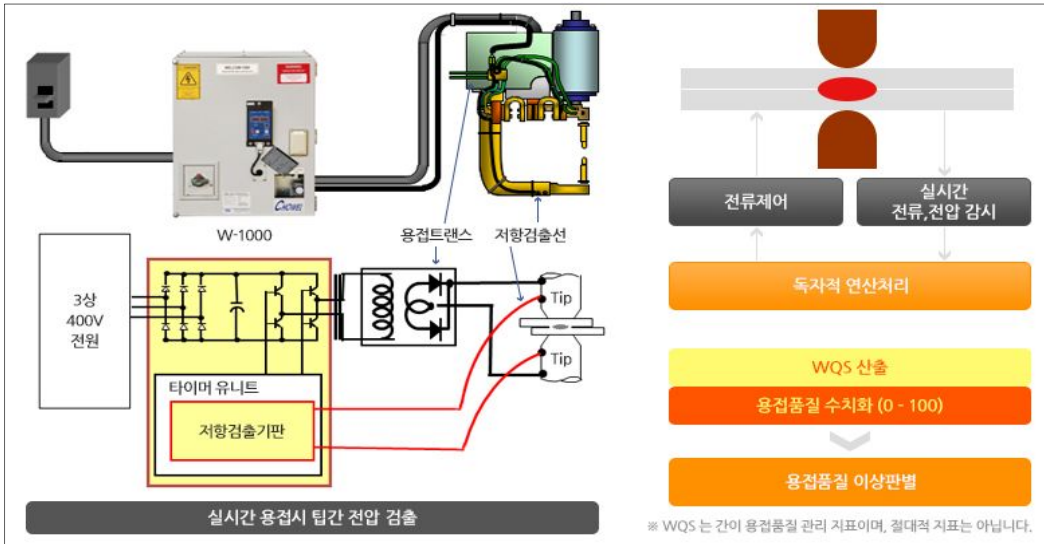


Fig. 2.10 적응제어 모드 개념도

하지만 최근 초고장력강의 도입 및 확산이 급속도로 진행되면서 적응제어 모드를 사용하여도 용접분리, 비대칭 너깃 형성 그리고 쇠파시 발생 등 용접품질 문제가 발생하고 있다. 이는 초고장력강의 고강도화를 위해 합금원소 첨가량이 늘어 비저항의 증가에 기인한 결과이며 계면 간 저항차이의 발생으로 Fig. 2.11 과 같이 초고장력강 부위의 너깃이 비정상적으로 커지는 현상으로 나타난다. 또한 3겹 이상의 판재 조합에서 Fig. 2.12 와 같이 고장력강과 접촉하지 않은 판재의 너깃이 비정상적으로 작게 형성되는 현상도 발생하고 있다.



Fig. 2.11 비대칭 너깃



Fig. 2.12 스몰 너깃 / 비용접

2.2 용접성 평가 방법

2.2.1 파괴 및 비파괴 검사, 인장시험

저항 점용접의 용접성은 다양한 방법으로 평가가 가능하지만 정확도 및 신뢰도에 따라 사용하는 방법이 달라진다. 자동차의 경우 일상점검을 위해 비교적 간단한 반파괴 테스트를 주로 사용하며 주기적으로 전파괴 테스트(Fig. 2.13)를 진행한다. 이 방법은 특별한 비용은 들지 않지만 노동력이 많이 소요되므로 초음파를 이용한 비파괴 검사방법(Fig. 2.14)이 도입되었고 신차 개발 시 용접조건에 적합성을 판단할 때 주로 사용한다.

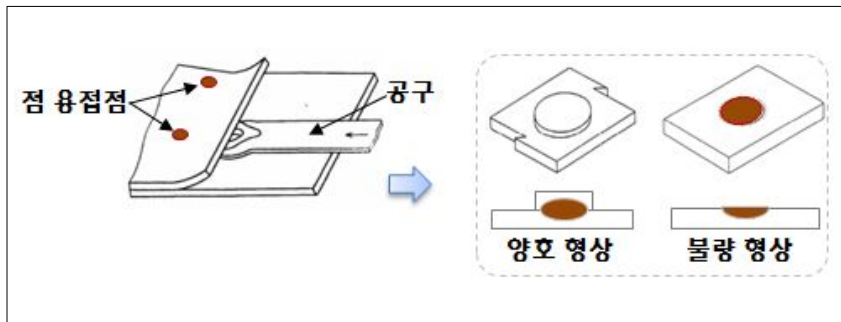


Fig. 2.13 반파괴 검사 및 전파괴 검사

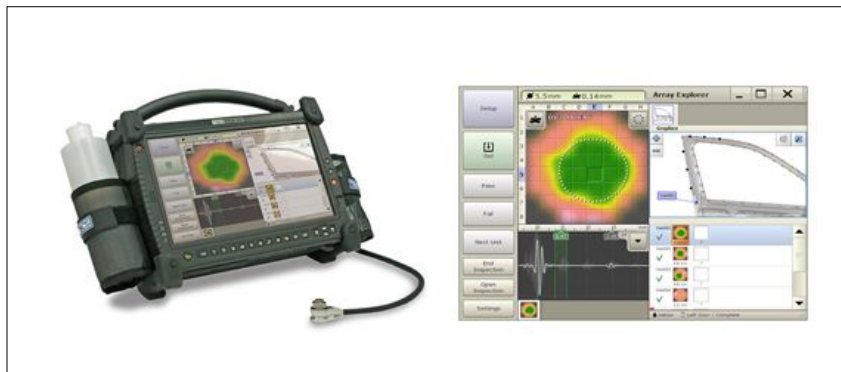


Fig. 2.14 비파괴 검사 장비 및 측정결과

앞의 두 가지 방법 모두 용접 부위의 인장강도를 알 수 없기 때문에 Fig. 2.15와 같은 인장시험 장비를 이용한 인장강도 실험을 따로 진행하여야 하지만 인장강도 실험은 시편을 제작하여 진행해야한다. 이 때문에, 새로운 철판 조합의 등장 등 개발단계에서 주로 진행하며 자동차 차체 제작규정인 MS-ES SPEC에 제시된 값을 기준으로 합격여부를 판단한다.



Fig. 2.15 인장시험 장비

2.2.2 너깃절단 및 광학현미경 분석

최근 자동차 제조사에서는 가장 신뢰도 높은 용접성 평가 방법으로, 측정하고자 하는 부분의 샘플을 채취하여 너깃의 중앙을 고속 절단기로 자른 후 연마 및 산처리를 하고 광학현미경으로 너깃의 사이즈를 측정하는 방법을 사용하고 있다.

Fig. 2.16 은 용접부의 너깃이 크기와 용접부의 인장강도의 비례곡선이다. 제대로 용접된 경우 인장시험 결과 주로 버튼(BUTTON)파단이 일어나며, 동일재질의 경우 너깃의 크기가 커질수록 용접된 부위의 넓이가 커지기 때문에 인장강도와 비례하는 경향이 있다.[9]

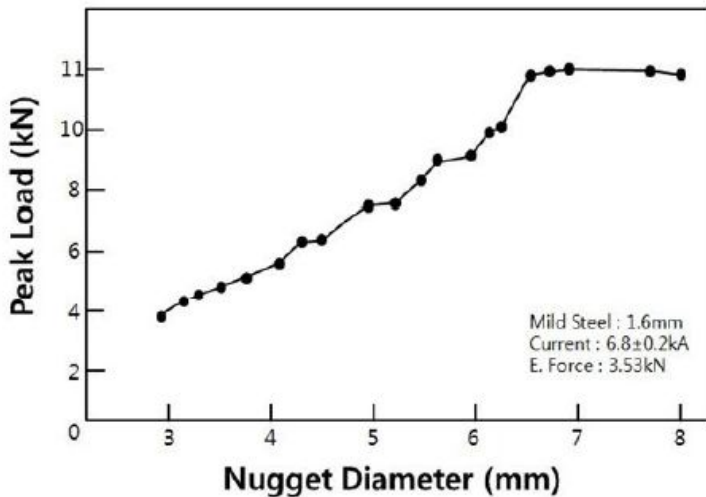


Fig. 2.16 너깃 크기와 인장강도의 비례곡선

따라서 최근 자동차 제조사에서는 이 방법을 가장 신뢰도 높은 용접성 평가방법으로 판단하여 적용하는 추세이다. 무엇보다 이 방법의 장점은 생산중인 제품에서 검사가 필요한 용접부의 샘플을 채취해 분석이 가능하다는 점이다. 또한 비파괴 테스트방법인 초음파 분석법은 3매 이상의 용접부위의 일부 너깃을 관찰할 수 없다

는 단점이 있는데 너깃을 직접 절단하여 관찰 할 경우 모든 너깃의 크기를 확인 할 수 있고 너깃의 형상을 통해 용접특성을 분석할 수도 있다. 하지만 이 방법은 너깃의 중심을 정확히 자르기 어렵고 질산과 에탄올의 혼합물(2:8)에 산처리 후 관찰이 가능하기 때문에 비교적 절차가 복잡하고 어려운 검사방법이다.

Fig. 2.17 은 단면절단 및 광학현미경을 통한 너깃 사이즈 분석법의 절차를 나타 낸 사진이다.

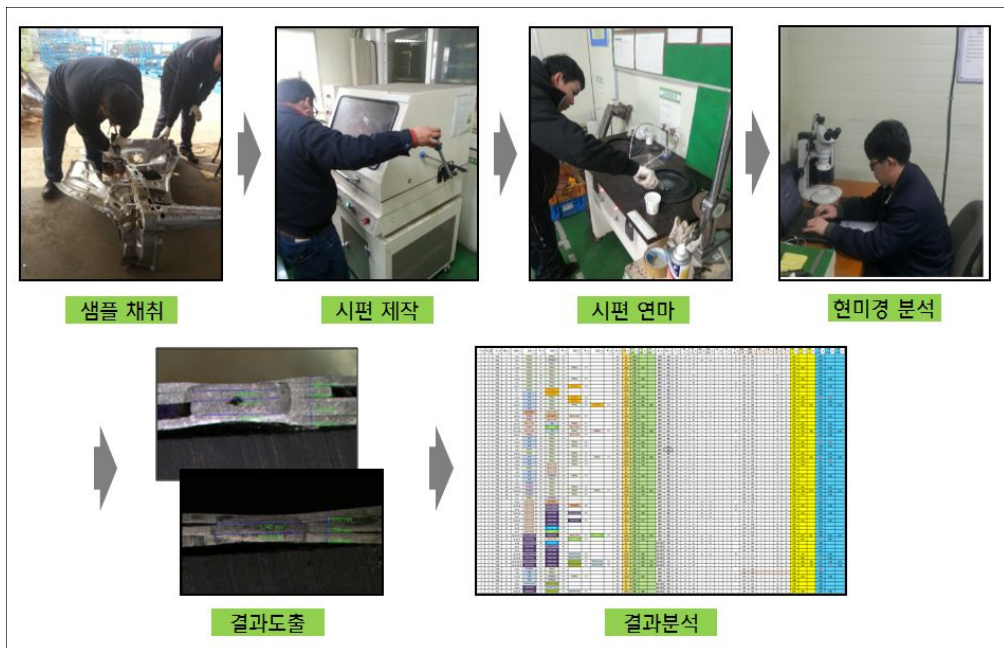


Fig. 2.17 너깃절단 및 광학현미경 분석법

제 3 장 초고장력강의 용접특성

3.1 초고장력강의 성분에 따른 용접특성(문제점)

3.1.1 화학적 성질

초고장력강의 구성성분은 Table 3.1 과 같으며, 소재의 기계적, 화학적 특성에 미치는 합금원소의 영향은 대단히 중요하다. 특히 탄소(C)의 경우 기계적 특성 변화에 가장 큰 역할을 하며, 함량이 증가할수록 인장강도와 경도가 증가하게 되므로 일반적인 강판에 비해 첨가물이 많아 비저항이 매우 높은 특성이 있다. 높은 비저항으로 인해 3매 이상의 저항 점용접 시 초고장력 강과 그 경계면에서 높은 열이 발생하게 되며 이로 인해 용접불량(비대칭 너깃, 스몰 너깃 등)이 발생한다.[10]

Table 3.1 초고장력강의 구성성분

단위 : %

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Co | Cu | Nb | Ti | V | B |
|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 0.21 | 0.09 | 1.43 | 0.016 | 0.002 | 0.48 | 0.010 | 0.01 | 0.03 | 0.002 | 0.007 | 0.004 | 0.02 | 0.003 | 0.002 |

3.1.2 물리적 성질

세계철강협회 자동차분과위원회에 따르면 초고장력강판은 1mm²의 넓이에 80kgf 이상의 힘을 가했을 때도 견디는 강판을 말한다. 기존 강판보다 무게는 10%가량 줄고 강도는 30% 높다. 경량화와 안전성을 동시에 충족할 수 있어 최근 완성차 업체들이 탑재 비율을 늘리는 추세다.

3.1.3 용접특성

높은 비저항으로 인해 저항 점용접 시 저항열이 더욱 많이 발생하게 되어 유리한 조건이라 생각 할 수 있지만 3매, 4매 용접의 경우에 초고장력강과 접촉하지 않는 부분의 경계면은 상대적으로 저항이 작아 용접 초기의 발열량이 작다. 따라서 상대적으로 발열량이 큰 초고장력 강판이 속한 경계면에서 용접초기 너깃의 성장이 두드러지게 되고 너깃의 성장과 동시에 저항은 더욱 커져 열의 집중현상이 더욱 커지게 된다. Fig. 3.1 에 이 현상을 저항 그래프 나타내었다.[6]

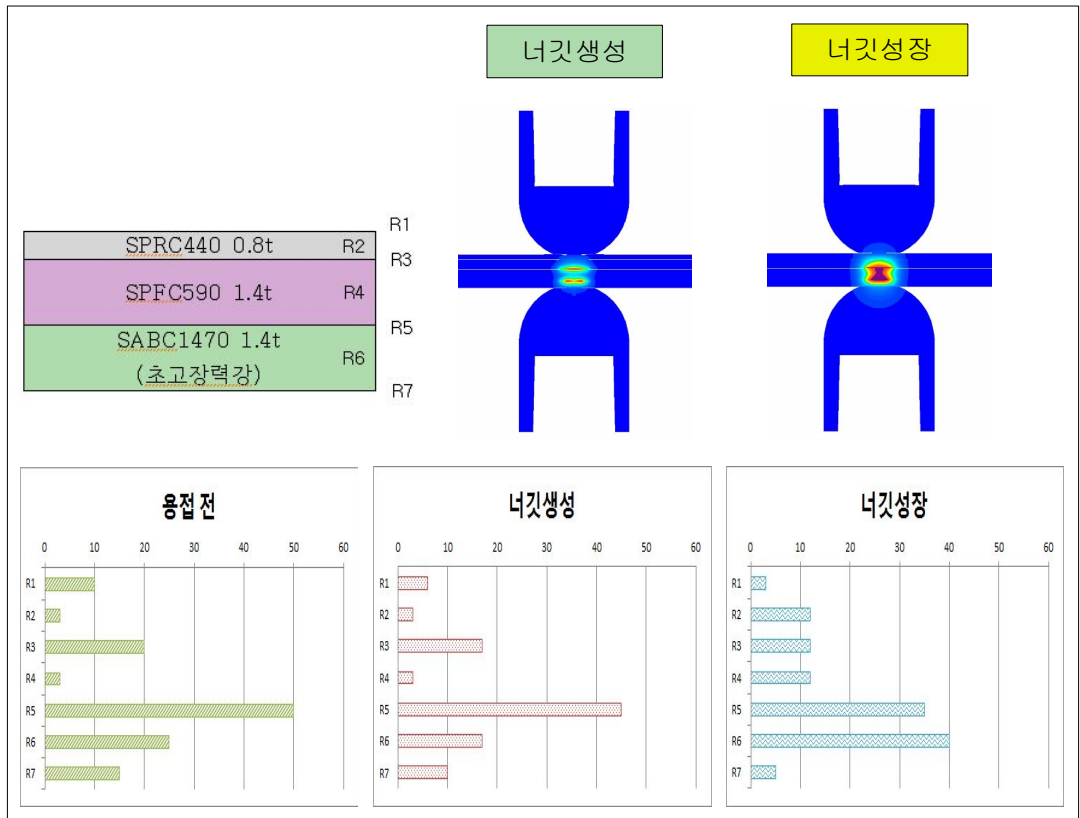


Fig. 3.1 너깃의 생성 및 성장에 따른 위치별 저항의 변화(상댓값)

3.2 저항 점용접 적용방안

초고장력강판의 너깃생성 문제점을 해결하고자 최근 자동차 제조업체에서는 적응제어 모드를 적용한 다단통전 실험을 다음과 같이 진행하고 있다. 우선 초고장력강판의 비저항이 커서 발생하는 문제인 비대칭 너깃 형성 또는 너깃 미형성을 해결하고자 확실한 초기 너깃 형성 방법인 고전류(main-pulse의 120~140%)의 pre-pulse를 단기간(3cycle) 주입하고 스파터 발생 방지를 위해 냉각기간(2cycle)을 두고 기존과 동일한 크기의 main-pulse를 주입해 너깃의 형성을 유도하는 방식이며 그래프로 나타내면 Fig. 3.2 와 같다.

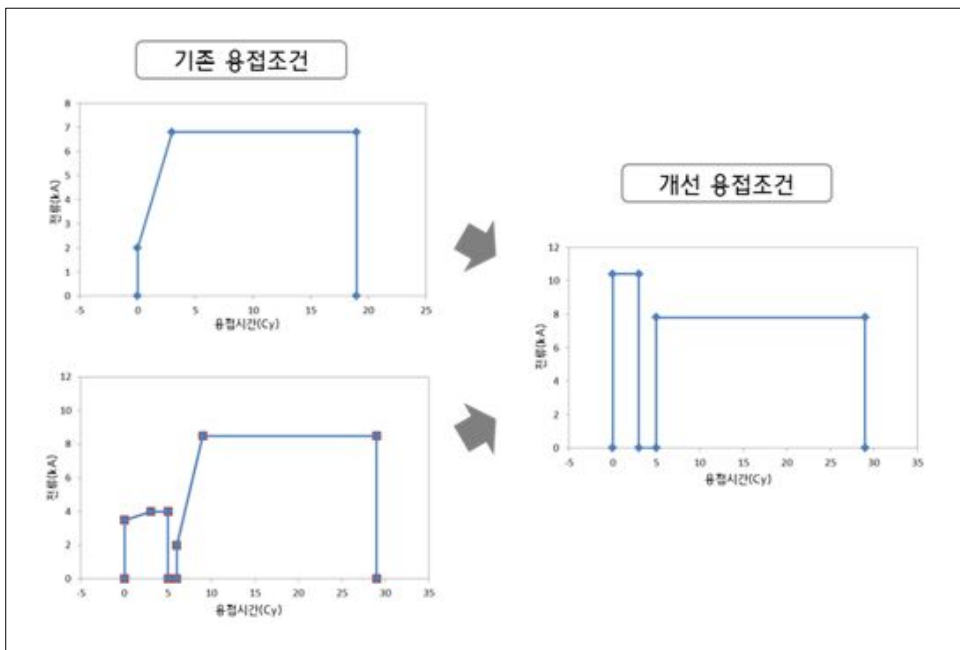


Fig. 3.2 초고장력강판 용접을 위한 용접조건의 개선

제 4 장 실험 및 결과

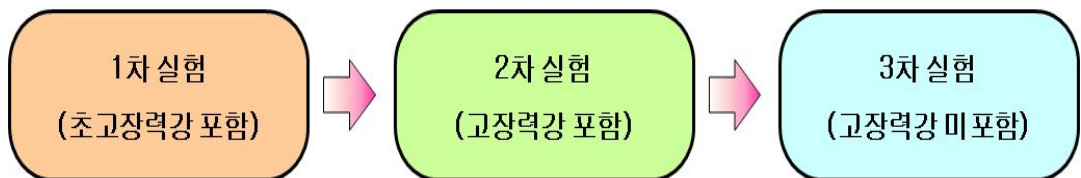
4.1 실험조건 및 구성

우선 초고장력강판(1,400MPa급)이 포함된 판재에 적응제어 용접기의 단기간 고전류 pre-pulse 적용 효과를 살펴보기 위해 기존 발표되어있는 자료(남양연구소)의 판재구성과 용접조건을 동일하게 하여 실험 하였다.[6]

초고장력강판이 포함된 판재의 pre-pulse 적용방안에서 착안, 590MPa급 고장력 강판이 적용된 용접부에 효과가 있을 것으로 판단되어 현재 생산되고 있는 자동차 부품(스포티지R의 QTR) 중 고장력 강판이 적용된 재질 조합을 분류하여 단기간 고전류의 pre-pulse를 적용한 적응제어 모드의 효과를 검증하였으며 최적의 pre-pulse조건 찾기 위해 전류값을 조정하며 실험 하였다.

더 나아가 고장력 강판이 속해있지 않은 조합에서도 3매/4매 용접부에 효과가 있는지 검토하기 위해 pre-pulse를 적용하여 실험하였다.

위의 3가지 실험 모두 용접부 특성을 파악하기 위하여 단면분석법을 사용하였고 광학현미경으로 너깃의 크기를 측정 및 고찰하였다.

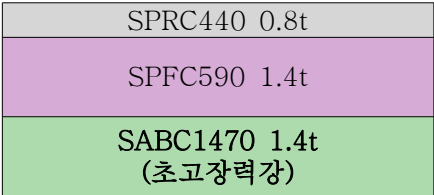
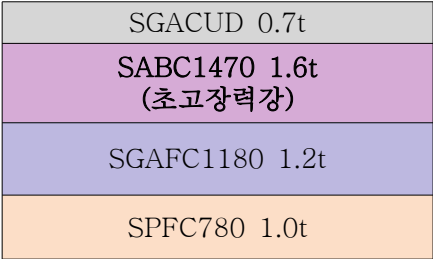
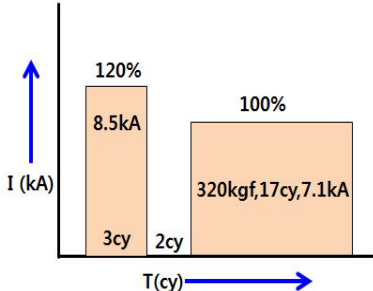
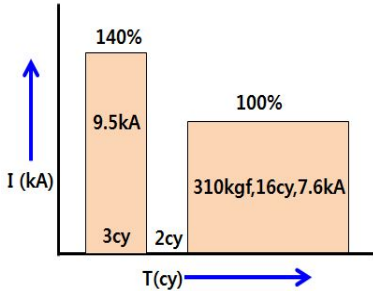


4.2 1차 실험 세부내용 및 결과

4.2.1 1차 실험 목적 및 세부사항

첫 번째 실험은 기존 연구결과를 현장에서 재검증하는데 그 목적이 있으며 초고장력 강판 포함, 3매 및 4매의 용접부 너깃의 특성 분석을 위해 Table 4.1 과 같이 시편을 구성하였다.

Table 4.1 초고장력강 포함, 3매 및 4매 용접 시편 구성

| 구분 | 3매 용접 | 4매 용접 |
|-------|---|---|
| 구성 |  |  |
| 용접 조건 | <ul style="list-style-type: none"> • 가압력 : 320kgf • pre-pulse : 8.5kA(120%) • 1차 통전 시간 : 3cycle • cooling time : 2cycle • main-pulse : 7.1kA • 2차 통전 시간 : 17cycle | <ul style="list-style-type: none"> • 가압력 : 310kgf • pre-pulse : 9.5kA(140%) • 1차 통전 시간 : 3cycle • cooling time : 2cycle • main-pulse : 7.6kA • 2차 통전 시간 : 16cycle |
| 비교 |  |  |

4.2.2 시편의 구성 및 용접조건

초고장력강을 포함한 3매 용접은 초고장력강과 접촉하는 부분과 접촉하지 않는 부분의 너깃 성장특성을 살펴보기 위하여 연강판-고장력강-초고장력강 순서로 시편을 구성하였으며 기존 용접조건인 가압력 320kgf, pre-pulse 3.5kA(3cycle), 냉각시간 2cycle, main-pulse 7.1kA(17cycle)로 용접 한 후 pre-pulse만 8.5kA로 높여서 용접하였다.

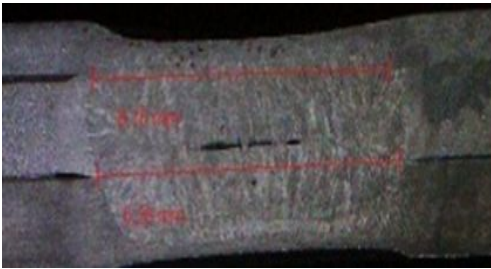
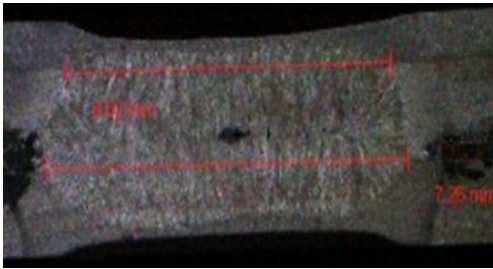
초고장력강을 포함한 4매 용접은 자동차 부품 중 B필러의 강판 조합인 연강판-초고장력강-초고장력강-고장력강 순서로 구성하였으며 기존 용접조건인 가압력 310kgf, pre-pulse 4.5kA(3cycle), 냉각시간 2cycle, main-pulse 7.6kA(17cycle)로 용접 한 후 pre-pulse만 9.5kA로 높여서 용접하였다.

각각 pre-pulse만 조정하여 1타점씩 용접하였으며 너깃의 크기를 비교하기 위하여 단면분석을 실행하였다.

4.2.3 1차 실험결과

3매 용접의 결과는 Table 4.2 에서와 같이 초고장력강과 접촉하는 부분인 너깃 #1은 6.18mm에서 7.25mm로 18% 증가하였으며, 접촉하지 않는 부분인 너깃#2는 6.26mm에서 6.52mm로 4% 증가함을 알 수 있다. 두 가지 조건 모두 너깃 가운데 기공이 발생하였는데 이는 가압력 조건이 적당하지 않아 발생한 결과로 보인다.

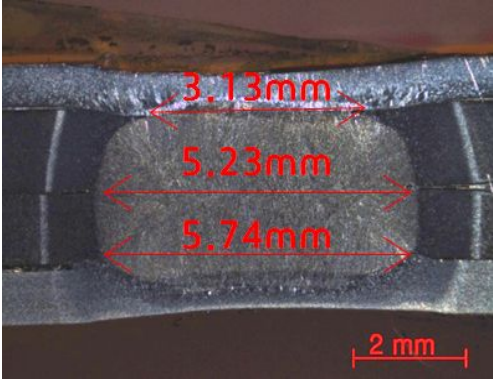
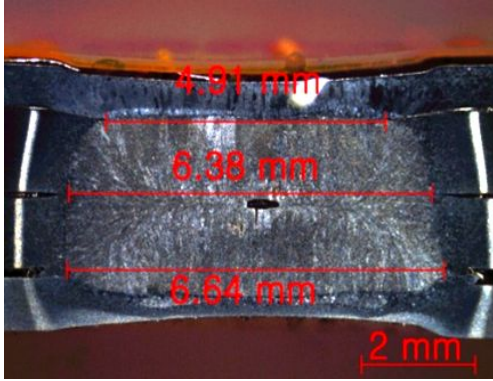
Table 4.2 초고장력강 포함, 3매 용접부 단면분석

| 적용 전 | 적용 후 |
|---|--|
|  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 3.5kA • 너깃 #1 : 6.18mm • 너깃 #2 : 6.26mm | <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 8.5kA(120%) • 너깃 #1 : 7.25mm(18%증가) • 너깃 #2 : 6.52mm(4%증가) |

4매 용접의 결과는 Table 4.3 에서와 같이 전체적인 증가추세를 보였으며 연강 판과 초고장력강 사이의 너깃이 3.13mm에서 4.91mm로 57%의 가장 큰 증가를 보였다. 그외의 경계면에서도 각각 22%, 16%의 너깃 증가를 보였다.

하지만 pre-pulse를 main-pulse의 140%로 적용한 조건에서 너깃 가운데 기공이 발생하였고 이는 용접후 holding time이 적당하지 않아 생기는 현상으로 판단되며 5cycle 정도 holding time을 추가하면 해결할 수 있을 것으로 보인다.

Table 4.3 초고장력강 포함, 4매 용접부 단면분석

| 적용 전 | 적용 후 |
|---|--|
|  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 4.5kA • 너깃 #1 : 3.13mm • 너깃 #2 : 5.23mm • 너깃 #3 : 5.74mm | <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 9.5kA(140%) • 너깃 #1 : 4.91mm(57%증가) • 너깃 #2 : 6.38mm(22%증가) • 너깃 #3 : 6.64mm(16%증가) |

두 가지 조합의 용접결과 단기간 고전류의 pre-pulse가 초기 너깃생성에 효과적이라는 이론과 같음을 알 수 있었으며 초고장력과 접촉하고 있지 않은 경계면에서도 너깃 성장에 두드러진 효과가 있음을 알 수 있었다.

4.3 2차 실험 세부내용 및 결과

4.3.1 2차 실험 배경

두 번째 실험은 현재 생산중인 스포티지R 차체 구성품인 QTR-INR_LH(Fig. 4.1)를 실험 대상으로 선정하였으며 Fig. 4.2 와 같이 총 259타점을 분류, 64개의 대표 타점으로 구분하였고 그 중 고장력 강판이 포함된 용접점을 집중적으로 분석하였다.



Fig. 4.1 스포티지R QTR-INR_LH

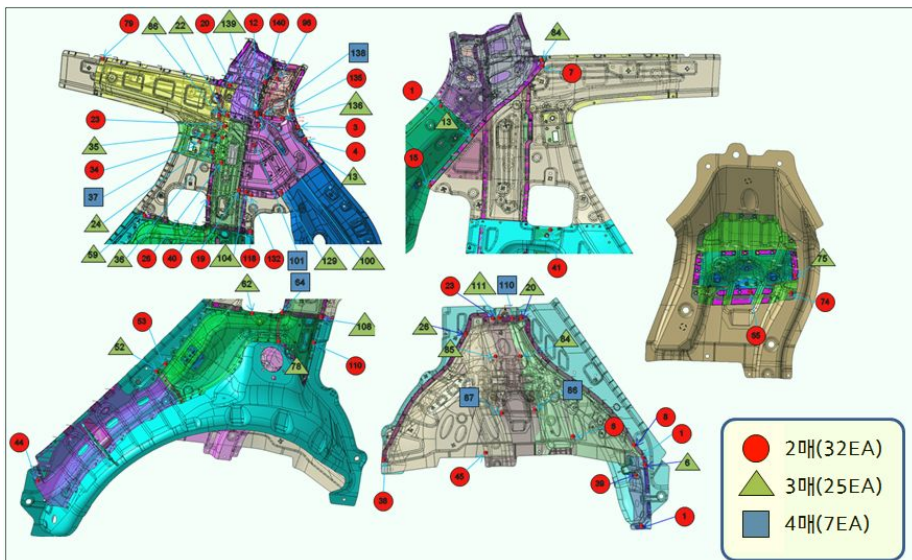


Fig. 4.2 강판 재질별, 매수별 대표타점

4.3.2 2차 실험 목적 및 세부사항

두 번째 실험은 기존 연구결과를 현장에 확대적용하고 검증하는데 그 목적이 있으며 현재 생산중인 제품 중 590MPa급 고장력 강판을 포함한 3매 및 4매의 용접부 너짓의 특성 분석을 위해 Table 4.4와 같이 분류 후 실험을 진행하였다.

Table 4.4 고장력강 포함, 3매 및 4매 용접 시편의 구성 종합

| 타점번호 | 판넬조합 | 판넬1 | 두께1 | 판넬2 | 두께2 | 판넬3 | 두께3 | 판넬4 | 두께4 | 총두께 |
|------|-------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|----------------|------|------|
| 52 | 8+9+10 | SPRC340 | 0.70 | SGAFC590DP | 0.70 | SGACUD 60/60 | 0.70 | | | 2.10 |
| 129 | 1+11+5 | SPCC | 0.65 | SPFC590DP | 0.80 | SPRC440 | 0.70 | | | 2.15 |
| 136 | 4+5+12 | SPFC590DP | 0.90 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 1.20 | | | 2.80 |
| 139 | 4+5+3 | SPFC590DP | 0.90 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.90 | | | 2.50 |
| 6 | 10+15+16 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SGAFC590DP 60/60 | 0.65 | SGAFC590DP | 0.65 | | | 2.00 |
| 20 | 10+14+15 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGAFC590DP 60/60 | 0.65 | | | 2.55 |
| 84 | 15+14+19 | SGAFC590DP 60/60 | 0.65 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGAPH370 60/60 | 2.00 | | | 3.85 |
| 13 | 1+11+12 | SPCC | 0.65 | SPFC590DP | 0.80 | SPRC440 | 1.20 | | | 2.65 |
| 138 | 4+5+3+12 | SPFC590DP | 0.90 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.90 | SPRC440 | 1.20 | 3.70 |
| 110 | 15+14+10+17 | SGAFC590DP 60/60 | 0.65 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SAPH370-P | 1.40 | 3.95 |
| 86 | 15+14+20+19 | SGAFC590DP 60/60 | 0.65 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGAPH440 60/60 | 1.40 | SGAPH370 60/60 | 2.00 | 5.25 |

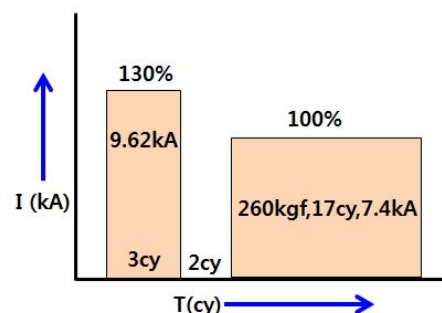
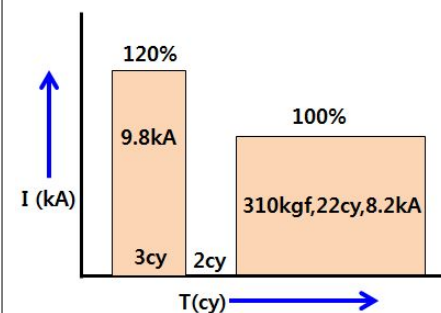
총 11가지의 판넬 조합이 도출되었으며 그 중 주요 관심 사항인 고장력강 포함 경계면과 미포함 경계면의 너짓 성장 특성을 살펴보기 위해 Table 4.5와 같이 3매 용접의 경우 136번 조합을 선정하였으며, 4매 용접의 경우 110번 조합을 선정하였다.

136번 조합은 고장력강-연강판-연강판 순서로 구성되어 있으며 기존 용접조건인 가압력 260kgf, pre-pulse 4.0kA(4cycle), 냉각시간 2cycle 그리고 main-pulse 7.4kA(17cycle)로 용접 한 후 pre-pulse만 9.62kA로 높여서 용접하였다.

110번 조합은 고장력강-연강판-연강판-연강판 순서로 구성되어 있으며 기존 용접조건인 가압력 310kgf, pre-pulse 5.5kA(4cycle), 냉각시간 2cycle, main-pulse 8.2kA(22cycle)로 용접 한 후 pre-pulse만 main-pulse의 120%인 9.84kA로 높여서 용접하였다.

각각 pre-pulse만 조정하여 1타점씩 용접하였으며 너트의 크기를 비교하기 위하여 단면분석을 실행하였다.

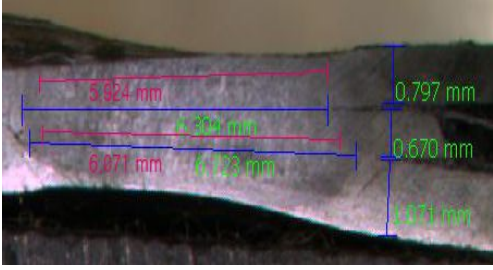
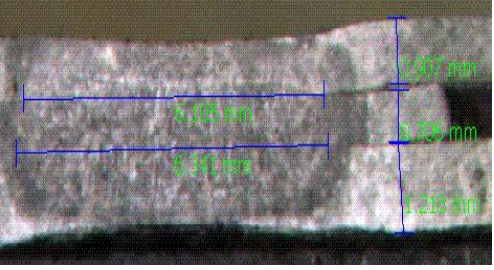
Table 4.5 고장력강 포함, 3매 및 4매 용접 시편의 용접조건

| 구분 | 3매 용접 (NO.136) | 4매 용접 (NO.110) |
|-------|--|---|
| 구성 | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #f8d7da;">SPFC590 0.9t (고장력강)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #d1ecf1;">SPRC440 0.7t</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #fff3cd;">SPRC440 1.2t</div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #d4edda;">SPFC590 0.65t (고장력강)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #d1ecf1;">SGACD 1.2t</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; background-color: #d1ecf1;">SGACUD 0.7t</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #fff3cd;">SGAPH370-P 1.4t</div> |
| 용접 조건 | <ul style="list-style-type: none"> • 가압력 : 260kgf • pre-pulse : 9.62kA(130%) • 1차 통전 시간 : 3cycle • cooling time : 2cycle • main-pulse : 7.4kA • 2차 통전 시간 : 17cycle | <ul style="list-style-type: none"> • 가압력 : 310kgf • pre-pulse : 9.84kA(120%) • 1차 통전 시간 : 3cycle • cooling time : 2cycle • main-pulse : 8.2kA • 2차 통전 시간 : 22cycle |
| 비교 |  |  |

4.3.3 2차 실험 결과 / 분석

3매 용접의 결과는 Table 4.6에서와 같이 고장력강과 접촉하는 부분인 너깃#1은 5.92mm에서 6.10mm로 3.1% 증가하였으며, 접촉하지 않는 부분인 너깃#2는 6.07mm에서 6.34mm로 4.4% 증가함을 알 수 있다.

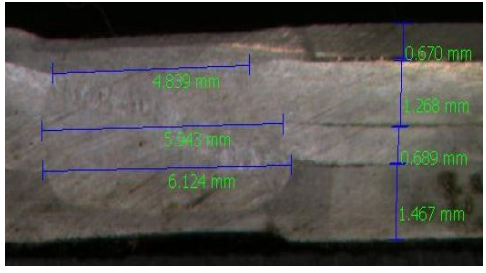
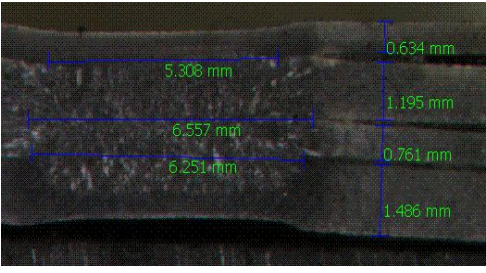
Table 4.6 고장력강 포함, 3매 용접부(NO.136) 단면분석

| 적용 전 | 적용 후 |
|---|--|
|  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 4.0kA • 너깃 #1 : 5.92mm • 너깃 #2 : 6.07mm | <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 9.62kA(130%) • 너깃 #1 : 6.10mm(3.1% 증가) • 너깃 #2 : 6.34mm(4.4% 증가) |

136번 용접부의 경우 너깃의 전체적인 증가를 보였으며 고장력강과 접촉한 부분보다 접촉하지 않은 부분에서의 너깃이 조금 더 커졌음을 알 수 있었다.

4매 용접의 결과는 Table 4.7에서와 같이 전체적인 증가추세를 보였으며 고장력강과 연강판 사이의 너깃이 4.83mm에서 5.30mm로 9.7%의 큰 증가를 보였다. 관심있는 부위인 연강판-연강판 사이의 너깃은 5.94mm에서 6.55mm로 10.3% 증가를 보였다.

Table 4.7 고장력강 포함, 4매 용접부(NO.110) 단면분석

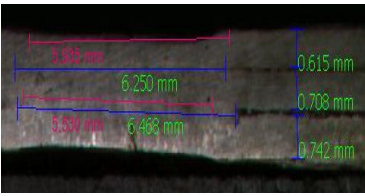
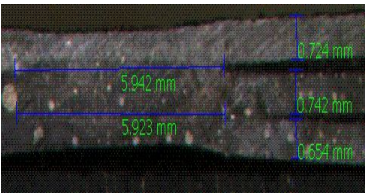
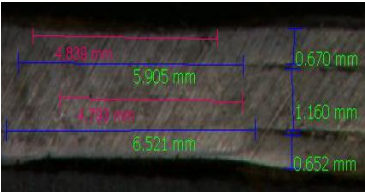
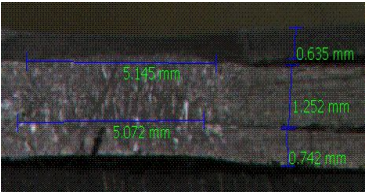
| 적용 전 | 적용 후 |
|---|--|
|  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 5.5kA • 너깃 #1 : 4.83mm • 너깃 #2 : 5.94mm • 너깃 #3 : 6.12mm | <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 9.84kA(130%) • 너깃 #1 : 5.30mm(9.7% 증가) • 너깃 #2 : 6.55mm(10.3% 증가) • 너깃 #3 : 6.25mm(2.1% 증가) |

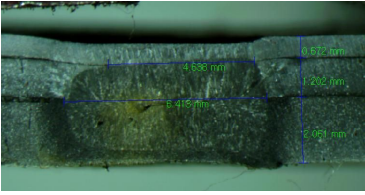
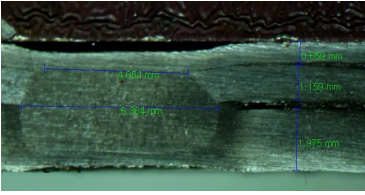
고장력강이 속해있는 용접부의 너깃 특성을 보다 정확하게 파악하기 위하여 추가적인 실험을 진행하였으며 4.4절에 종합하였다.

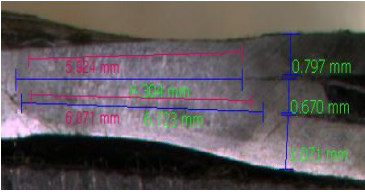
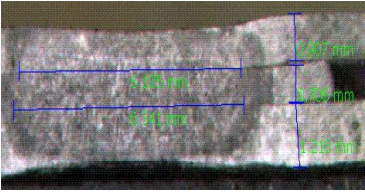
4.4 2차 실험 종합

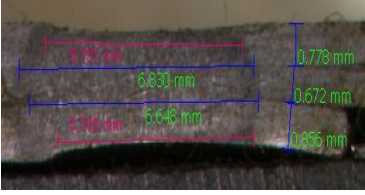
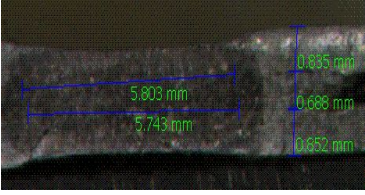
4.4.1 2차 실험(3매 용접부) 결과 / 분석

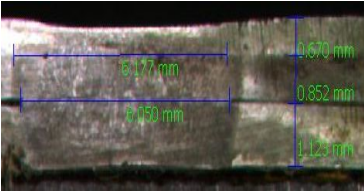
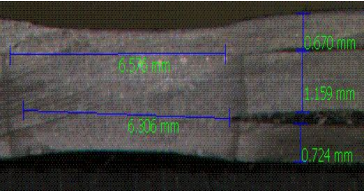
고장력강을 포함한 3매 타점(8개)을 분석/요약하였으며 전체적으로 3%내외의 증가 추세를 보였다. 초고장력 강판의 단면분석 결과와는 다르게 모든 경계면에서 비슷한 증가 추세를 보였으며 SGACUD와 접촉하는 부분의 경계면에서는 너깃의 증가가 상대적으로 작았다. 이는 연신율이 뛰어나 성형성이 좋은 SGACUD의 소재 특성상 건 가압시 접촉부분의 면 밀착 정도가 매우 뛰어나 전류밀도 형성이 우수하여 단기간 고전류의 pre-pulse 적용 효과가 상쇄되는 것으로 보인다.

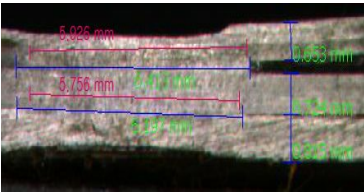
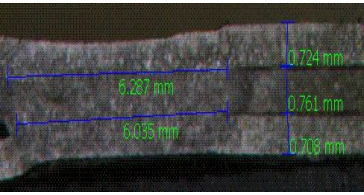
| NO.6 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|--|--------------|--------------------|-----------------|---|--|
| <table border="1"> <tr><td>SGACUD(0.7t)</td></tr> <tr><td>SGAFC590(0.65t)</td></tr> <tr><td>SGAFC590(0.65t)</td></tr> </table> | SGACUD(0.7t) | SGAFC590(0.65t) | SGAFC590(0.65t) |  |  |
| SGACUD(0.7t) | | | | | |
| SGAFC590(0.65t) | | | | | |
| SGAFC590(0.65t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 5.5kA | 9.6kA (메인전류의 120%) | | | |
| 너깃 #1 | 5.93mm | 5.94mm (0.1%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 5.53mm | 5.92mm (7.1%증가) | | | |
| NO.20 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
| <table border="1"> <tr><td>SGACUD(0.7t)</td></tr> <tr><td>SGACD(1.2t)</td></tr> <tr><td>SGAFC590(0.65t)</td></tr> </table> | SGACUD(0.7t) | SGACD(1.2t) | SGAFC590(0.65t) |  |  |
| SGACUD(0.7t) | | | | | |
| SGACD(1.2t) | | | | | |
| SGAFC590(0.65t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 5.5kA | 9.6kA (메인전류의 120%) | | | |
| 너깃 #1 | 4.83mm | 5.14mm (5.8%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 4.79mm | 5.07mm (6.3%증가) | | | |

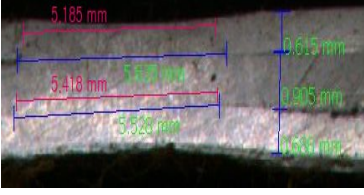
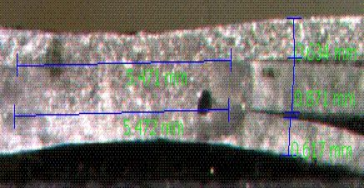
| NO.84 | 적용 전 | 적용 후 |
|--|---|--|
| <div style="background-color: #f08080; padding: 2px;">SGAFC590(0.65t)</div> <div style="background-color: #ffcc99; padding: 2px;">SGACD(1.2t)</div> <div style="background-color: #c6efce; padding: 2px;">SGAPH370(2.0t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 5.5kA | 10.78kA (메인전류의 110%) |
| 너깃 #1 | 4.63mm | 4.65mm (0.2%증가) |
| 너깃 #2 | 6.41mm | 6.38mm (0.4%감소) |

| NO.136 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|--|---|
| <div style="background-color: #f08080; padding: 2px;">SPFC590(0.9t)</div> <div style="background-color: #c6e2ff; padding: 2px;">SPRC440(0.7t)</div> <div style="background-color: #ffcc99; padding: 2px;">SPRC440(1.2t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4kA | 9.62kA (메인전류의 130%) |
| 너깃 #1 | 5.92mm | 6.10mm (3.1%증가) |
| 너깃 #2 | 6.07mm | 6.34mm (4.4%증가) |

| NO.139 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="background-color: #f08080; padding: 2px;">SPFC590(0.9t)</div> <div style="background-color: #c6e2ff; padding: 2px;">SPRC440(0.7t)</div> <div style="background-color: #ffcc99; padding: 2px;">SPRC440(0.9t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 3kA | 9.88kA (메인전류의 130%) |
| 너깃 #1 | 5.75mm | 5.80mm (0.9%증가) |
| 너깃 #2 | 5.70mm | 5.74mm (0.7%증가) |

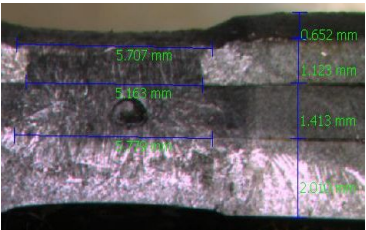
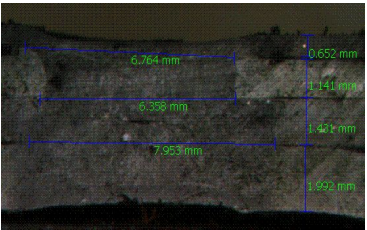
| NO.13 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|--|-------------|----------------------|---------------|---|--|
| <table border="1"> <tr><td>SPCC(0.65t)</td></tr> <tr><td>SPFC590(0.8t)</td></tr> <tr><td>SPRC440(1.2t)</td></tr> </table> | SPCC(0.65t) | SPFC590(0.8t) | SPRC440(1.2t) |  |  |
| SPCC(0.65t) | | | | | |
| SPFC590(0.8t) | | | | | |
| SPRC440(1.2t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 3.0kA | 9.3kA (메인전류의 130%) | | | |
| 너깃 #1 | 6.17mm | 6.57mm (6.5%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 6.05mm | 6.30mm (4.2%증가) | | | |

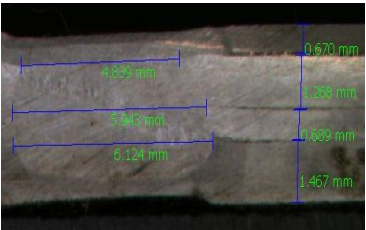
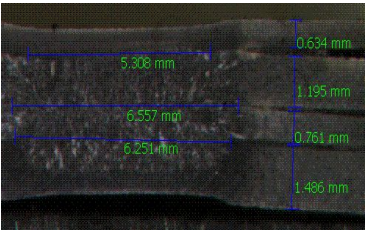
| NO.52 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|---|---------------|----------------------|--------------|--|---|
| <table border="1"> <tr><td>SPRC340(0.7t)</td></tr> <tr><td>SPFC590(0.7t)</td></tr> <tr><td>SGACUD(0.7t)</td></tr> </table> | SPRC340(0.7t) | SPFC590(0.7t) | SGACUD(0.7t) |  |  |
| SPRC340(0.7t) | | | | | |
| SPFC590(0.7t) | | | | | |
| SGACUD(0.7t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 5.5kA | 9.3kA (메인전류의 110%) | | | |
| 너깃 #1 | 5.75mm | 6.28mm (9.2%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 5.92mm | 6.03mm (1.8%증가) | | | |

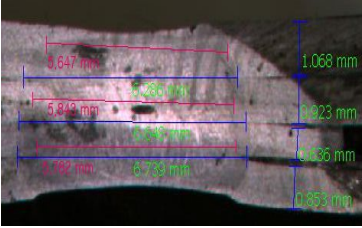
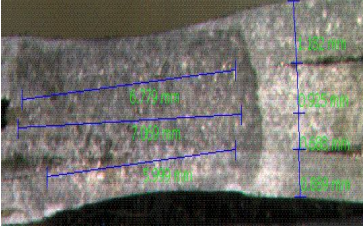
| NO.129 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|--|-------------|-----------------------|--------------|---|--|
| <table border="1"> <tr><td>SPCC(0.65t)</td></tr> <tr><td>SGAFC590(0.8t)</td></tr> <tr><td>SGACUD(0.7t)</td></tr> </table> | SPCC(0.65t) | SGAFC590(0.8t) | SGACUD(0.7t) |  |  |
| SPCC(0.65t) | | | | | |
| SGAFC590(0.8t) | | | | | |
| SGACUD(0.7t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 3.0kA | 9.3kA (메인전류의 130%) | | | |
| 너깃 #1 | 5.18mm | 5.47mm (9.2%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 5.41mm | 5.47mm (1.8%증가) | | | |

4.4.2 2차 실험(4매 용접부) 결과 / 분석

고장력강을 포함한 4매 타점(3개)을 분석/요약하였으며 전체적으로 15%내외의 증가 추세를 보였다. 4매 타점의 경우 3매 타점에 비하여 더 큰 증가율을 보였으며 이는 판넬의 경계면이 많은 4매 용접에서 단기간 고전류의 pre-pulse에 의한 너깃 성장 효과가 더 뛰어남을 보여준다.

| NO.86 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="background-color: #f08080; padding: 2px;">SPFC590(0.65t)</div> <div style="background-color: #add8e6; padding: 2px;">SGACD(1.2t)</div> <div style="background-color: #f0e6f0; padding: 2px;">SGAPH440(1.4t)</div> <div style="background-color: #c1e1c1; padding: 2px;">SAPH370(2.0t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.36kA (메인전류의 110%) |
| 너깃 #1 | 5.70mm | 6.76mm (18.5%증가) |
| 너깃 #2 | 5.16mm | 6.35mm (23.1%증가) |
| 너깃 #3 | 5.77mm | 7.95mm (37.6%증가) |

| NO.110 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="background-color: #f08080; padding: 2px;">SPFC590(0.65t)</div> <div style="background-color: #add8e6; padding: 2px;">SGACD(1.2t)</div> <div style="background-color: #f0e6f0; padding: 2px;">SGACUD(0.7t)</div> <div style="background-color: #c1e1c1; padding: 2px;">SAPH370(1.4t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 5.5kA | 9.84kA (메인전류의 120%) |
| 너깃 #1 | 4.83mm | 5.30mm (9.7%증가) |
| 너깃 #2 | 5.94mm | 6.55mm (10.3%증가) |
| 너깃 #3 | 6.12mm | 6.25mm (2.1%증가) |

| NO.138 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="background-color: #f8d7da; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">SPFC590(0.9t)</div> <div style="background-color: #d1ecf1; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">SPRC440(0.7t)</div> <div style="background-color: #d1ecf1; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">SPRC440(0.9t)</div> <div style="background-color: #d1ecf1; padding: 2px;">SPRC440(1.2t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.7kA (메인전류의 130%) |
| 너깃 #1 | 5.78mm | 6.77mm (3.8%증가) |
| 너깃 #2 | 5.84mm | 7.06mm (21.0%증가) |
| 너깃 #3 | 5.64mm | 5.99mm (20.0%증가) |

4.5 3차 실험 세부내용 및 결과

4.5.1 실험 목적 및 세부사항

세 번째 실험은 고장력강이 포함되지 않은 용접부에서 단기간 고전류의 pre pulse에 의한 너깃 성장효과 여부를 파악하는데 그 목적이 있으며 3매 및 4매의 용접부 너깃의 특성 분석을 위해 Table 4.8 과 같이 분류 후 실험을 진행하였다.

Table 4.8 고장력강 미포함, 3매 및 4매 용접 시편의 구성 종합

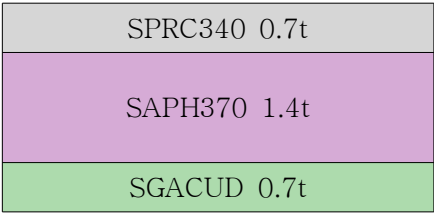
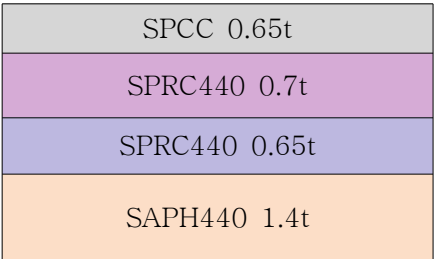
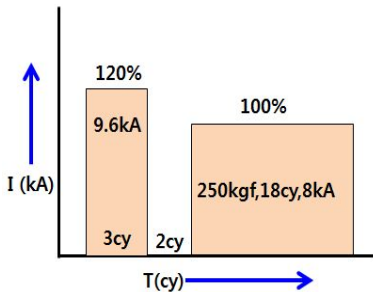
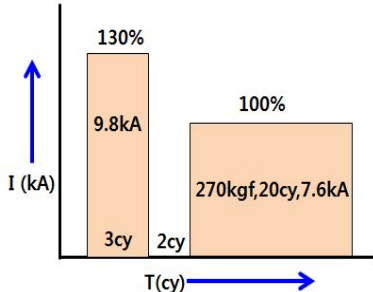
| 타점번호 | 판넬조합 | 판넬1 | 두께1 | 판넬2 | 두께2 | 판넬3 | 두께3 | 판넬4 | 두께4 | 총두께 |
|------|-------------|--------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|------|
| 13 | 5+3+6 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.90 | SPRC440 | 0.70 | | | 2.30 |
| 22 | 2+3+6 | SPRC440 | 0.65 | SPRC440 | 0.90 | SPRC440 | 0.70 | | | 2.25 |
| 24 | 6+2+7 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.65 | SAPH440-P | 1.40 | | | 2.75 |
| 35 | 1+2+7 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 0.65 | SAPH440-P | 1.40 | | | 2.70 |
| 36 | 1+6+7 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 0.70 | SAPH440-P | 1.40 | | | 2.75 |
| 59 | 10+1+8 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SPCC | 0.65 | SPRC340 | 0.70 | | | 2.05 |
| 62 | 8+17+10 | SPRC340 | 0.70 | SAPH370-P | 1.40 | SGACUD 60/60 | 0.70 | | | 2.80 |
| 78 | 8+6+10 | SPRC340 | 0.70 | SPRC440 | 0.70 | SGACUD 60/60 | 0.70 | | | 2.10 |
| 84 | 1+12+3 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 1.20 | SPRC440 | 0.90 | | | 2.75 |
| 86 | 1+6+3 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.90 | | | 2.25 |
| 100 | 3+6+12 | SPRC440 | 0.90 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 1.20 | | | 2.80 |
| 104 | 1+6+5 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.70 | | | 2.05 |
| 108 | 1+10+6 | SPCC | 0.65 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SPRC440 | 0.70 | | | 2.05 |
| 26 | 10+14+13 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGACD 60/60 | 0.70 | | | 2.60 |
| 111 | 14+10+17 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SAPH370-P | 1.40 | | | 3.30 |
| 85 | 13+14+19 | SGACD 60/60 | 0.70 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGAPH370 60/60 | 2.00 | | | 3.90 |
| 75 | 14+20+19 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGAPH440 60/60 | 1.40 | SGAPH370 60/60 | 2.00 | | | 4.60 |
| 37 | 1+6+2+7 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.65 | SAPH440-P | 1.40 | 3.40 |
| 64 | 10+1+6+8 | SGACUD 60/60 | 0.70 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 0.70 | SPRC340 | 0.70 | 2.75 |
| 101 | 1+12+6+5 | SPCC | 0.65 | SPRC440 | 1.20 | SPRC440 | 0.70 | SPRC440 | 0.70 | 3.25 |
| 87 | 13+14+20+19 | SGACD 60/60 | 0.70 | SGACD 60/60 | 1.20 | SGAPH440 60/60 | 1.40 | SGAPH370 60/60 | 2.00 | 5.30 |

총 21가지의 판넬 조합이 도출되었으며 그 중 가장 많이 사용하는 판넬 조합을 Table 4.9 와 같이 3매 용접의 경우 62번 조합을 선정하였으며, 4매 용접의 경우 37번 조합을 선정하였다.

62번 조합은 기존 용접조건인 가압력 250kgf, pre-pulse 4.0kA(3cycle), 냉각시간 2cycle 그리고 main-pulse 8.0kA(18cycle)로 용접 한 후 pre-pulse만 main pulse의 120%인 9.6kA로 높여서 용접하였다.

37번 조합은 기존 용접조건인 가압력 270kgf, pre-pulse 4.0kA(4cycle), 냉각시간 2cycle, main-pulse 7.6kA(20cycle)로 용접 한 후 pre-pulse만 main-pulse의 130%인 9.88kA로 높여서 용접하였다.

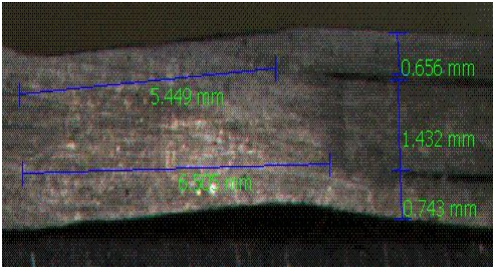
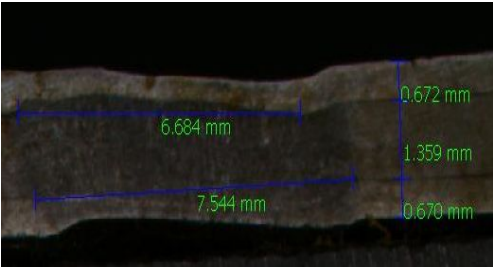
Table 4.9 3매 및 4매 용접 시편의 용접조건

| 구분 | 3매 용접 (NO.62) | 4매 용접 (NO.37) |
|-------|---|--|
| 구성 |  |  |
| 용접 조건 | <ul style="list-style-type: none"> • 가압력 : 250kgf • pre-pulse : 9.6kA(120%) • 1차 통전 시간 : 3cycle • cooling time : 2cycle • main-pulse : 8.0kA • 2차 통전 시간 : 18cycle | <ul style="list-style-type: none"> • 가압력 : 270kgf • pre-pulse : 9.88kA(130%) • 1차 통전 시간 : 3cycle • cooling time : 2cycle • main-pulse : 7.6kA • 2차 통전 시간 : 20cycle |
| 비교 |  |  |

4.5.2 3차 실험 결과 / 분석

3매 용접의 결과는 Table 4.10 와 같이 너깃#1는 5.45mm에서 6.68mm로 22.7% 증가하였으며, 너깃#2는 6.50mm에서 7.54mm로 16.0% 증가함을 알 수 있었다.

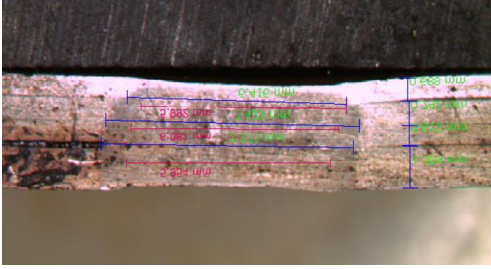
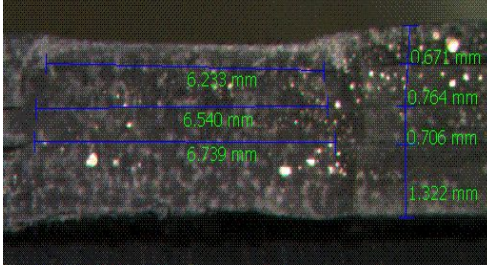
Table 4.10 고장력강 미포함, 3매 용접부(NO.62) 단면분석

| 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|
|  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 4.0kA • 너깃 #1 : 5.45mm • 너깃 #2 : 6.50mm | <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 9.6kA(120%) • 너깃 #1 : 6.68mm(22.7% 증가) • 너깃 #2 : 7.54mm(16.0% 증가) |

62번 용접부의 경우 양쪽에 박판이 있는 경우로써 용접 시 용접기 팁에 의한 냉각과 전도 및 복사로 인한 열손실로 너깃의 형성에 불리한 조건으로 알려져 있다. 하지만 단기간 고전류의 pre-pulse 주입으로 초기 너깃의 생성이 유리해 지면서 너깃이 전체적으로 증가하였다.

4매 용접의 결과 또한 Table 4.11 에서와 같이 4 ~ 13% 정도 전체적으로 증가하는 현상을 보였으며 외판(박판)쪽 너깃의 크기 또한 4%의 증가를 보였다.

Table 4.11 고장력강 미포함, 4매 용접부(NO.37) 단면분석

| 적용 전 | 적용 후 |
|---|--|
|  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 4.0kA • 너깃 #1 : 5.99mm • 너깃 #2 : 6.08mm • 너깃 #3 : 5.95mm | <ul style="list-style-type: none"> • pre-pulse : 9.88kA(130%) • 너깃 #1 : 6.23mm(4.0% 증가) • 너깃 #2 : 6.54mm(7.5% 증가) • 너깃 #3 : 6.73mm(13.2% 감소) |

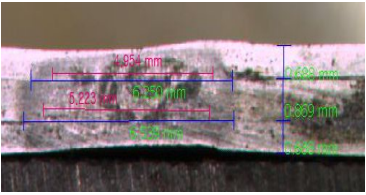
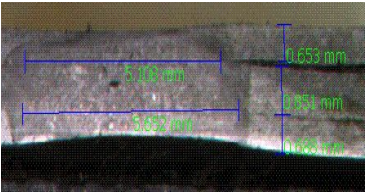
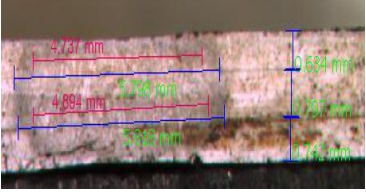
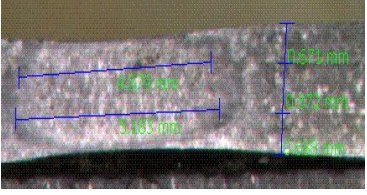
자동차 차체는 37번 용접부의 조합과 같이 가장 바깥쪽에 박판으로 구성된 경우가 가장 많으며 앞에서 언급한 내용과 같은 이유로 너깃의 형성이 잘 되지 않는 특성이 있다. 하지만 단기간 고전류의 pre-pulse에 의한 너깃 성장효과로 인해 외판(박판) 경계면의 너깃이 성장 할 수 있음을 보여준다.

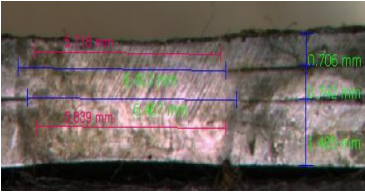
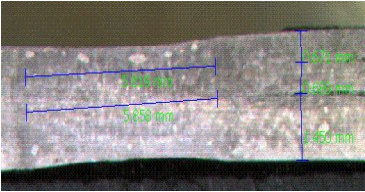
용접부의 너깃 특성을 보다 정확하게 파악하기 위하여 추가적인 실험을 진행하였으며 4.6절에 종합하였다.

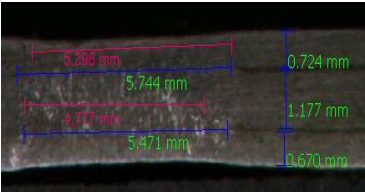
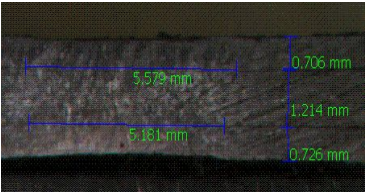
4.6 3차 실험 종합

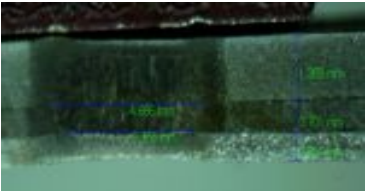
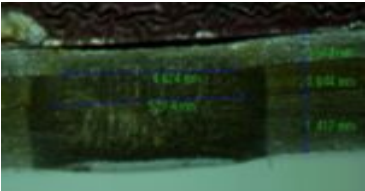
4.6.1 3차 실험(3매 용접부) 결과 / 분석

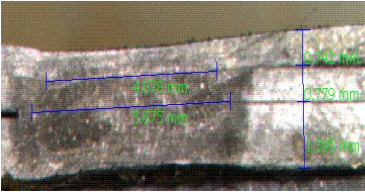
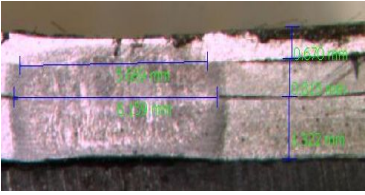
17개의 3매 타점을 추가적으로 분석/요약하였으며 전체적으로 8%내외의 증가 추세를 보였다. 일부 너깃의 크기가 감소한 경우도 발생하였는데 이는 너깃의 크기가 전체적으로 균일하게 바뀌는 경향으로 나타났다.

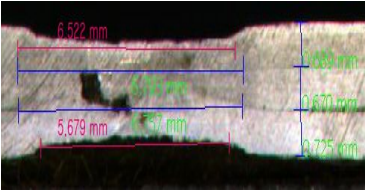
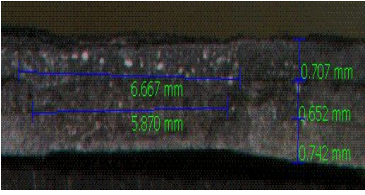
| NO.13 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|--|----------------|--------------------|---------------|---|--|
| <table border="1"> <tr> <td>SPRC440(0.7t)</td> </tr> <tr> <td>SPRC440(0.9t)</td> </tr> <tr> <td>SPRC440(0.7t)</td> </tr> </table> | SPRC440(0.7t) | SPRC440(0.9t) | SPRC440(0.7t) |  |  |
| SPRC440(0.7t) | | | | | |
| SPRC440(0.9t) | | | | | |
| SPRC440(0.7t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 2.0kA | 8.7kA (메인전류의 130%) | | | |
| 너깃 #1 | 4.95mm | 5.10mm (3.1%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 5.22mm | 5.65mm (8.2%증가) | | | |
| NO.22 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
| <table border="1"> <tr> <td>SPRC440(0.65t)</td> </tr> <tr> <td>SPRC440(0.9t)</td> </tr> <tr> <td>SPRC440(0.7t)</td> </tr> </table> | SPRC440(0.65t) | SPRC440(0.9t) | SPRC440(0.7t) |  |  |
| SPRC440(0.65t) | | | | | |
| SPRC440(0.9t) | | | | | |
| SPRC440(0.7t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 3.0kA | 8.7kA (메인전류의 130%) | | | |
| 너깃 #1 | 4.73mm | 4.87mm (3.0%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 4.89mm | 5.18mm (6.0%증가) | | | |

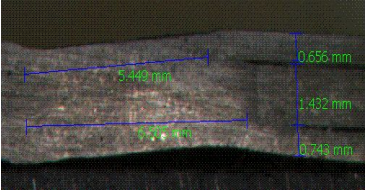
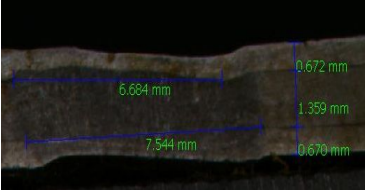
| NO.24 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px; background-color: #e0ffe0;">SPRC440(0.7t)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px; background-color: #ffe0e0;">SPRC440(0.65t)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0ffe0;">SAPH440(1.4t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.3kA (메인전류의 130%) |
| 너짓 #1 | 5.71mm | 5.81mm (1.8%증가) |
| 너짓 #2 | 5.83mm | 5.85mm (0.3%증가) |

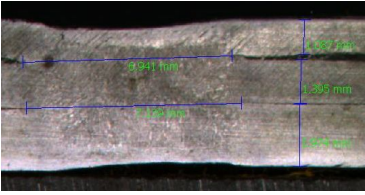
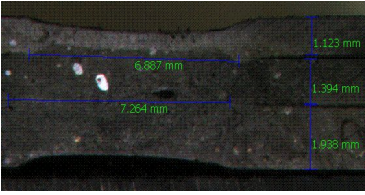
| NO.26 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px; background-color: #ffe0e0;">SGACUD(0.7t)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px; background-color: #e0e0e0;">SGACD(1.2t)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0ffe0;">SGACD(0.7t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.6kA (메인전류의 120%) |
| 너짓 #1 | 5.29mm | 5.57mm (5.3%증가) |
| 너짓 #2 | 4.77mm | 5.18mm (8.5%증가) |

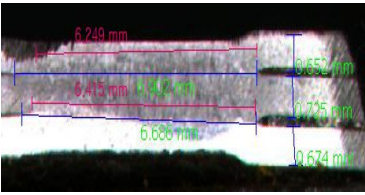
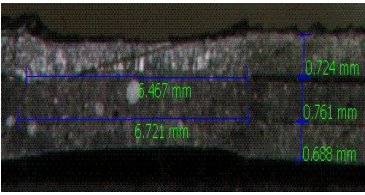
| NO.35 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px; background-color: #ffe0e0;">SPCC(0.65t)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px; background-color: #e0e0e0;">SPRC440(0.65t)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; background-color: #e0ffe0;">SAPH440-P(1.4t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.6kA (메인전류의 130%) |
| 너짓 #1 | 3.75mm | 4.62mm (23.3%증가) |
| 너짓 #2 | 4.66mm | 5.31mm (13.9%증가) |

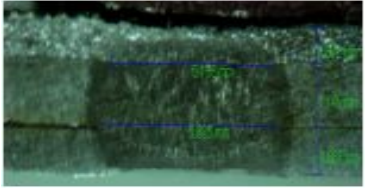
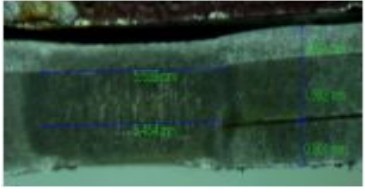
| NO.36 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| SPCC(0.65t) SPRC440(0.7t) SAPH440-P(1.4t) |  |  |
| Pre-Pulse | 3.0kA | 9.7kA (메인전류의 130%) |
| 너깃 #1 | 4.87mm | 5.64mm (15.8%증가) |
| 너깃 #2 | 5.67mm | 6.15mm (8.4%증가) |

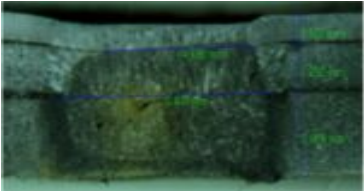
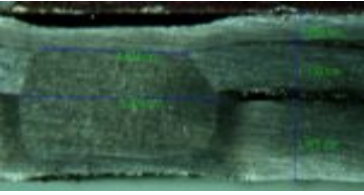
| NO.59 | 적용 전 | 적용 후 |
|--|--|---|
| SGACUD(0.7t) SPCC(0.65t) SPRC340(0.7t) |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.6kA (메인전류의 120%) |
| 너깃 #1 | 6.52mm | 6.67mm (3.4%증가) |
| 너깃 #2 | 5.67mm | 5.87mm (2.2%증가) |

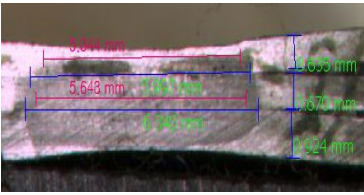
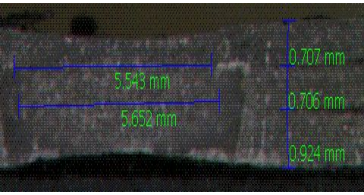
| NO.62 | 적용 전 | 적용 후 |
|--|---|--|
| SPRC340(0.7t) SAPH370-P(1.4t) SGACUD(0.7t) |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.6kA (메인전류의 120%) |
| 너깃 #1 | 5.45mm | 6.68mm (22.7%증가) |
| 너깃 #2 | 6.50mm | 7.54mm (16.0%증가) |

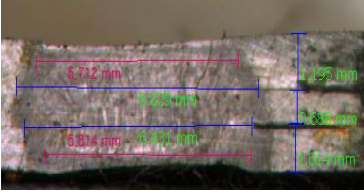
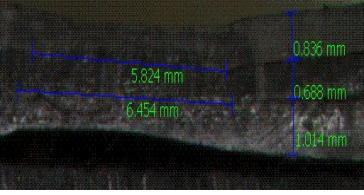
| NO.75 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| SGACD(1.2t) SGAPH440(1.4t) SGAPH370(2.0t) |  |  |
| Pre-Pulse | 3.0kA | 9.6kA (메인전류의 110%) |
| 너짓 #1 | 6.94mm | 6.88mm (0.8%감소) |
| 너짓 #2 | 7.12mm | 7.26mm (1.9%증가) |

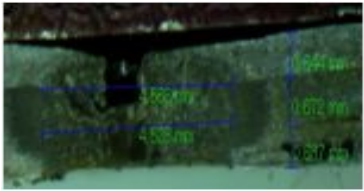
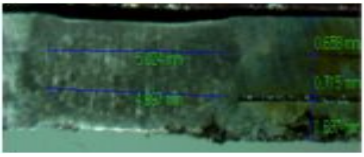
| NO.78 | 적용 전 | 적용 후 |
|--|--|---|
| SPRC340(0.7t) SPRC440(0.7t) SGACUD(0.7t) |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.3kA (메인전류의 120%) |
| 너짓 #1 | 6.24mm | 6.46mm (3.5%증가) |
| 너짓 #2 | 6.41mm | 6.72mm (4.8%증가) |

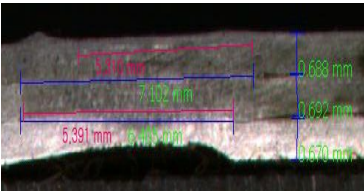
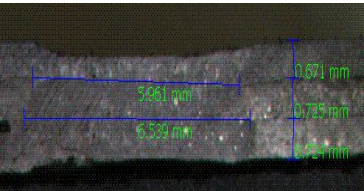
| NO.84 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| SPCC(0.65t) SPRC440(1.2t) SPRC440(0.9t) |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.3kA (메인전류의 130%) |
| 너짓 #1 | 5.13mm | 5.45mm (6.2%증가) |
| 너짓 #2 | 5.62mm | 5.53mm (1.5%감소) |

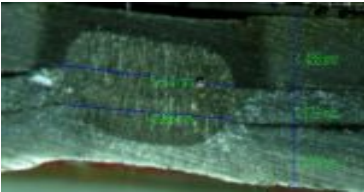
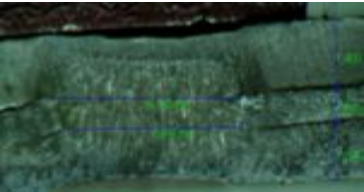
| NO.85 | 적용 전 | 적용 후 |
|--|---|--|
| <div style="background-color: #f8d7da; padding: 2px;">SGACD(0.7t)</div> <div style="background-color: #d6d8db; padding: 2px;">SGACD(1.2t)</div> <div style="background-color: #d4edda; padding: 2px;">SGAPH370(2.0t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 10.1kA (메인전류의 110%) |
| 너짓 #1 | 4.63mm | 4.65mm (0.3%증가) |
| 너짓 #2 | 6.41mm | 6.38mm (0.5%감소) |

| NO.86 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|--|---|
| <div style="background-color: #d1ecf1; padding: 2px;">SPCC(0.65t)</div> <div style="background-color: #f8d7da; padding: 2px;">SPRC440(0.7t)</div> <div style="background-color: #d4edda; padding: 2px;">SPRC440(0.9t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.8kA (메인전류의 130%) |
| 너짓 #1 | 5.34mm | 5.54mm (3.7%증가) |
| 너짓 #2 | 5.64mm | 5.65mm (0.1%증가) |

| NO.100 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| <div style="background-color: #d1ecf1; padding: 2px;">SPRC440(0.9t)</div> <div style="background-color: #fff3cd; padding: 2px;">SPRC440(0.7t)</div> <div style="background-color: #d4edda; padding: 2px;">SPRC440(1.2t)</div> |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.6kA (메인전류의 130%) |
| 너짓 #1 | 5.71mm | 5.82mm (0.2%증가) |
| 너짓 #2 | 5.81mm | 6.45mm (13%증가) |


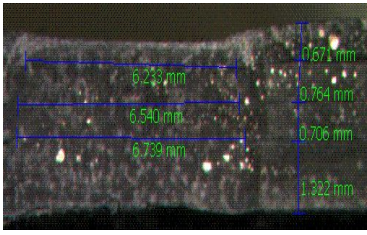
| NO.104 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|---|-------------|--------------------|---------------|---|--|
| <table border="1"> <tr><td>SPCC(0.65t)</td></tr> <tr><td>SPRC440(0.7t)</td></tr> <tr><td>SPRC440(0.7t)</td></tr> </table> | SPCC(0.65t) | SPRC440(0.7t) | SPRC440(0.7t) |  |  |
| SPCC(0.65t) | | | | | |
| SPRC440(0.7t) | | | | | |
| SPRC440(0.7t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 3.0kA | 9.5kA (메인전류의 130%) | | | |
| 너깃 #1 | 4.56mm | 5.02mm (10.0%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 4.52mm | 4.99mm (10.4%증가) | | | |

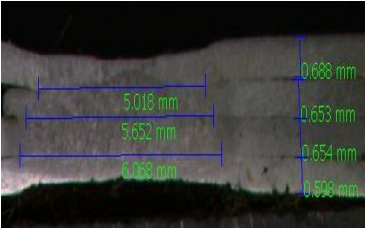
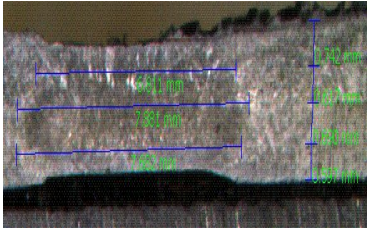
| NO.108 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|--|-------------|--------------------|---------------|--|---|
| <table border="1"> <tr><td>SPCC(0.65t)</td></tr> <tr><td>SGACUD(0.7t)</td></tr> <tr><td>SPRC440(0.7t)</td></tr> </table> | SPCC(0.65t) | SGACUD(0.7t) | SPRC440(0.7t) |  |  |
| SPCC(0.65t) | | | | | |
| SGACUD(0.7t) | | | | | |
| SPRC440(0.7t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.4kA (메인전류의 110%) | | | |
| 너깃 #1 | 5.31mm | 5.96mm (10.6%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 5.39mm | 6.53mm (23.1%증가) | | | |

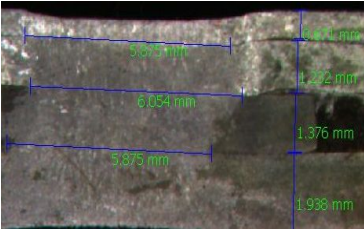
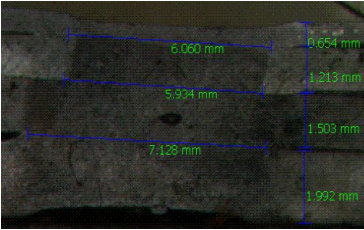
| NO.111 | 적용 전 | 적용 후 | | | |
|---|--------------|--------------------|-----------------|---|--|
| <table border="1"> <tr><td>SGACUD(1.2t)</td></tr> <tr><td>SGACUD(0.7t)</td></tr> <tr><td>SAPH370-P(1.4t)</td></tr> </table> | SGACUD(1.2t) | SGACUD(0.7t) | SAPH370-P(1.4t) |  |  |
| SGACUD(1.2t) | | | | | |
| SGACUD(0.7t) | | | | | |
| SAPH370-P(1.4t) | | | | | |
| Pre-Pulse | 5.5kA | 9.6kA (메인전류의 120%) | | | |
| 너깃 #1 | 4.96mm | 5.98mm (18.9%증가) | | | |
| 너깃 #2 | 5.31mm | 6.17mm (16.1%증가) | | | |

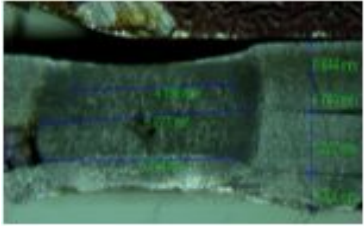
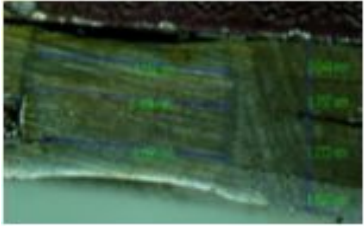
4.6.2 3차 실험(4매 용접부) 결과 / 분석

4개의 4매 타점을 추가적으로 분석/요약하였으며 전체적으로 19%내외의 증가 추세를 보였다. 고장력강 미포함 조합 역시 4매 타점의 경우 3매 타점에 비하여 더 큰 증가율을 보였으며 이는 판넬의 경계면이 많은 4매 용접에서 단기간 고전류의 pre-pulse에 의한 너깃 성장 효과가 더 뛰어남을 보여준다.

| NO.37 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| SPCC 0.65t SPRC440 0.7t SPRC440 0.65t SAPH440 1.4t |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.8kA (메인전류의 130%) |
| 너깃 #1 | 5.99mm | 6.23mm (4.0%증가) |
| 너깃 #2 | 6.08mm | 6.54mm (7.5%증가) |
| 너깃 #3 | 5.95mm | 6.73mm (13.2%감소) |

| NO.64 | 적용 전 | 적용 후 |
|---|---|--|
| SGACUD(0.7t) SPCC(0.65t) SPRC440(0.7t) SPRC340(0.7t) |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 9.4kA (메인전류의 110%) |
| 너깃 #1 | 5.01mm | 6.81mm (35.7%증가) |
| 너깃 #2 | 5.65mm | 7.88mm (39.4%증가) |
| 너깃 #3 | 6.06mm | 7.68mm (26.6%증가) |

| NO.87 | 적용 전 | 적용 후 |
|--|---|--|
| SGACD(0.7t) SGACD(1.2t) SGAPH440(1.4t) SGAPH370(2.0t) |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 10.1kA (메인전류의 110%) |
| 너깃 #1 | 4.26mm | 5.44mm (27.5%증가) |
| 너깃 #2 | 5.18mm | 5.76mm (11.3%감소) |
| 너깃 #3 | 4.45mm | 5.89mm (32.5%증가) |

| NO.101 | 적용 전 | 적용 후 |
|--|--|---|
| SPCC(0.65t) SPRC440(1.2t) SPRC440(0.7t) SPRC440(0.7t) |  |  |
| Pre-Pulse | 4.0kA | 10.1kA (메인전류의 130%) |
| 너깃 #1 | 4.79mm | 6.09mm (27.1%감소) |
| 너깃 #2 | 6.27mm | 6.43mm (2.6%증가) |
| 너깃 #3 | 5.75mm | 6.15mm (6.9%증가) |

제 5 장 결 론

환경문제의 대두로 인해 가속화 되고 있는 자동차 경량화의 방법 중 최근 기존의 부품을 초고장력강으로 전환하는 방법이 개발되면서 초고장력강의 용접방법이 화제가 되고 있다.

기존 강판의 용접 조건을 그대로 적용하면 초고장력강과 접촉하지 않은 철판의 경계면에서 너깃이 형성되지 않거나 작게 형성되는 문제가 있으며 이는 차량의 강성을 크게 저하시켜 충돌안전성을 감소시킨다.

용접기와 용접장비의 발달로 현재 2차 전압을 감지하여 열량 값을 보상하는 시스템인 지능형 용접기의 개발이 완료되어 사용되고 있으며 용접건 또한 서보건을 사용하여 가압력을 자유롭게 조정할 수 있게 되었다.

본 논문에서는 초고장력 강판의 저항 점용접을 위해 개발된 단기간 고전류의 pre-pulse 적용 방법을 검증하였으며 나아가 현재 생산중인 자동차 부품의 용접점을 분석하여 고장력강이 포함된 조합과 고장력강이 미포함된 조합으로 나누어 단기간 고전류의 pre-pulse 효과를 확대적용하고 그 효과를 분석하였다.

너깃의 성장을 살펴보기 위한 방법으로는 너깃의 중앙부를 절단하고 산처리하여 광학현미경으로 직접 관찰하는 단면분석법을 사용하였다.

1) 초고장력 강판에 단기간 고전류의 pre-pulse 적용을 검증한 결과 3매 용접의 경우 초고장력과 접촉하고 있는 너깃의 크기는 4% 증가하였으며 접촉하지 않는 너깃의 크기는 18%의 증가를 보였다. 4매 용접의 경우 초고장력강과 접촉하지 않는 부분에서 전형적인 초고장력강의 저항 점용접 문제인 스몰 너깃(3.13mm)이 관찰 되었는데 main-pulse의 140%의 pre-pulse를 가했을 경우 57%의 증가를 보였다.

2) 현재 생산중인 자동차 부품 중 QTR_INR_LH 를 대상으로 고장력강이 포함된

용접점과 고장력강이 포함되지 않은 용접점을 3매 / 4매 용접으로 각각 분류하여 단기간 고전류의 pre-pulse 적용에 의한 너깃 성장 효과를 살펴보았다. 전체적으로 너깃이 성장하는 경향을 보였으며 3매 보다는 4매 용접부에서 너깃의 성장이 두드러짐을 알 수 있었다.

- 3) 자동차 차체는 가장 바깥쪽에 박판으로 구성된 경우가 가장 많으며 용접 시 용접기 팁에 의한 냉각과 전도 및 복사로 인한 열손실로 너깃의 형성에 불리한 조건으로 알려져 있다. 이러한 조건의 용접에서도 단기간 고전류의 pre-pulse 주입으로 초기 너깃의 생성이 유리해 지면서 너깃이 증가함을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 단기간 고전류의 pre-pulse를 적용하는 방법은 초고장력 뿐만 아니라 고장력강을 포함, 기존 문제되고 있는 용접조합에 효과가 있음을 알 수 있었다. 무엇보다 기존의 저항 점용접 생산라인에 적용하는데 있어 별도의 투자비용이 들지 않는다는 점을 고려했을 때, 현재 자동차 생산공정에 도입해도 무방할 것으로 보인다.

Reference

- [1] 국제환경규제기업지원센터 분석 보고서 : EU, EURO6 자동차 배출가스 규제 시행, 359-13-003.
- [2] 김용 : 차체 소재 다변화에 따른 체결 및 접합기술, 2015 .
- [3] 한국과학기술정보연구원 : 고강도부품 제조를 위한 열간스탬핑 기술, 2013.09
- [4] 김용식 : SPOT용접 전원 장치, Journal of the Korean Welding Society v.14 no.3, 1996, pp.12-19.
- [5] 박태훈 : 지능형 스폿용접 시스템을 이용한 3겹의 고장력강판 / 아연도금강판의 용접성에 관한 연구, 2007.
- [6] 손성국 : 다단통전을 이용한 초고장력강의 너깃 형성, 남양연구소, 2015.12.
- [7] 조웰 기술자료 : <http://www.chowel.co.kr>.
- [8] 염중현 : 델타스폿용접기를 이용한 A1 6K32저항 스폿용접 특성 분석, 대한용접접합학회 2011년도 추계 학술발표대회 초록집 제56권,2011,161-161.
- [9] 공종판 : 자동차 차체용 냉연DP강 저항점용접부의 너깃경과 인장전단강도에 미치는 Si함유량의 영향, KWJS 2009.
- [10] 김훈동 : 핫스탬핑 공정조건에 따른 기계적 특성, 한국 소성가공학회 2008, 추계학술대회 논문집, pp317-320.