



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

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

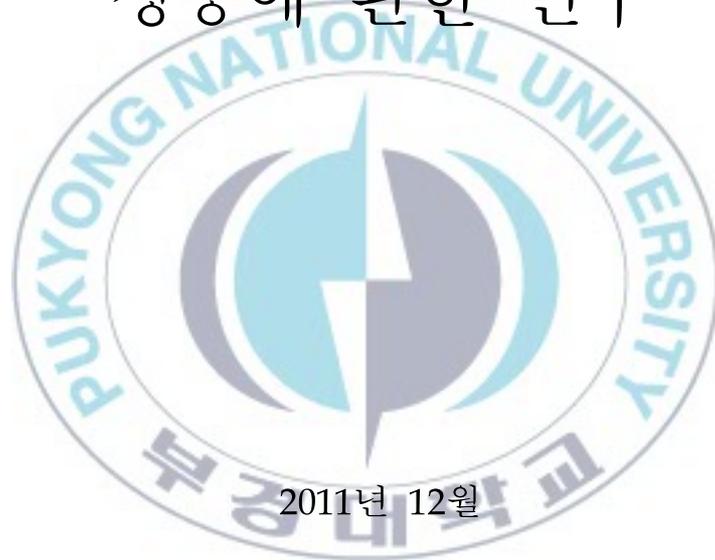
저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

진동점접합에 의해 점접합된  
알루미늄 판재의 점접  
성능에 관한 연구



2011년 12월

부경대학교 대학원

생산자동화공학과

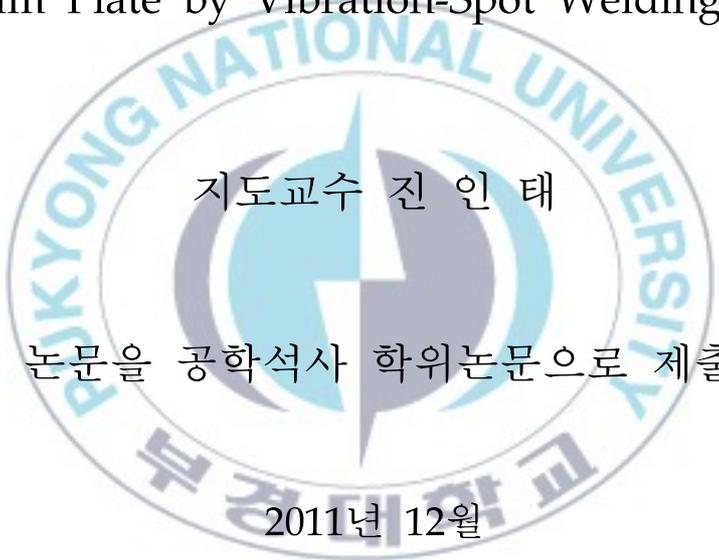
김태현

공 학 석 사 학 위 논 문

진동점접합에 의해 점접합된 알루미늄 판재의

접합 성능에 관한 연구

A Study on Welding Performance of Spot Welded  
Aluminum Plate by Vibration-Spot Welding Process



지도교수 진 인 태

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2011년 12월

부 경 대 학 교 대 학 원

생 산 자 동 화 공 학 과

김 태 현

이 논문을 김태현의 공학석사  
학위논문으로 인준함.

2011년 12월 16일



주	심	공학박사	한 규 택	(인)
위	원	공학박사	박 영 환	(인)
위	원	공학박사	진 인 태	(인)

# 목 차

List of tables

List of figures

제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경.....	1
1.2 연구 목적 및 내용.....	3
1.3 논문의 구성.....	12
제 2 장 진동점접합에 관한 연구.....	13
2.1 진동점접합의 원리와 특징.....	13
2.2 관련 이론.....	17
2.3 컴퓨터 시뮬레이션.....	19
2.3.1 시뮬레이션의 조건.....	19
2.3.2 시뮬레이션 유동 형태의 결과 및 고찰.....	22
2.3.3 압력 시뮬레이션의 결과 및 고찰.....	24
2.4 전극 소재 결정을 위한 간이 실험.....	29
2.5 진동점접합장비 설계.....	31
2.5.1 진동점접합 장비의 개념 설계.....	31
2.5.2 진동점접합 장비의 상세 설계.....	32
2.5.3 PLC제어 회로 및 공압 회로 설계.....	35

제 3 장 알루미늄 판재의 진동점접합 실험.....	37
3.1 실험 장치 및 시편.....	37
3.1.1 진동점접합 실험 장치.....	37
3.1.2 알루미늄5052.....	42
3.2 선행 실험.....	43
3.3 진동점접합 실험 방법 및 조건.....	45
3.4 진동점접합 실험 결과 및 고찰 .....	47
3.5 진동점접합의 접합 성능 평가.....	49
3.5.1 인장 전단 시험 결과 및 고찰.....	49
3.5.2 단면촬영 결과 및 고찰.....	55
제 4 장 결 론.....	60
참 고 문 헌.....	61
Abstract.....	65

## List of tables

Table 2-1 Condition of Simulation

Table 3-1 Data of aluminum5052

Table 3-2 Properties of aluminum5052

Table 3-3 The results of the preceding experiment

Table 3-4 Experimental conditions

Table 3-5 Results of the tensile test



## List of figures

- Fig. 1-1 Aluminum spot joining methods (Spot)
- Fig. 1-2 Self-piercing riveting process
- Fig. 1-3 Clinching process
- Fig. 1-4 Two kinds of spot welding
- Fig. 1-5 Laser spot welding process
- Fig. 1-6 Friction spot stir welding process
- Fig. 1-7 Ultrasonic spot welding process
- Fig. 1-8 Extrusion spot welding process
- Fig. 2-1 Principle of vibration-spot welding
- Fig. 2-2 Section of vibration-spot welding
- Fig. 2-3 Vibration-spot welding process
- Fig. 2-4 Principle of solid state welding
- Fig. 2-5 The structure of the simulation
- Fig. 2-6 Step-by-step shape of the simulation
- Fig. 2-7 Distribution of Pressure at welding zone (C.C.D. : 3mm)
- Fig. 2-8 Distribution of Pressure at welding zone (C.C.D. : 5mm)
- Fig. 2-9 Distribution of Pressure at welding zone (C.C.D. : 7mm)
- Fig. 2-10 Results of peel test
- Fig. 2-11 3D designed vibration-spot welding equipment
- Fig. 2-12 Drawings of the cylinder parts
- Fig. 2-13 Drawings of the electrode parts
- Fig. 2-14 Concept of operating circuit
- Fig. 3-1 Welding equipment

Fig. 3-2 Vibration-spot welding equipment

Fig. 3-3 Assembled vibration-spot welding equipment

Fig. 3-4 Vibration-spot welding equipment (Control box)

Fig. 3-5 Vibration-spot welded aluminum plate

Fig. 3-6 Shape of interfacial on welding zone (8mm)

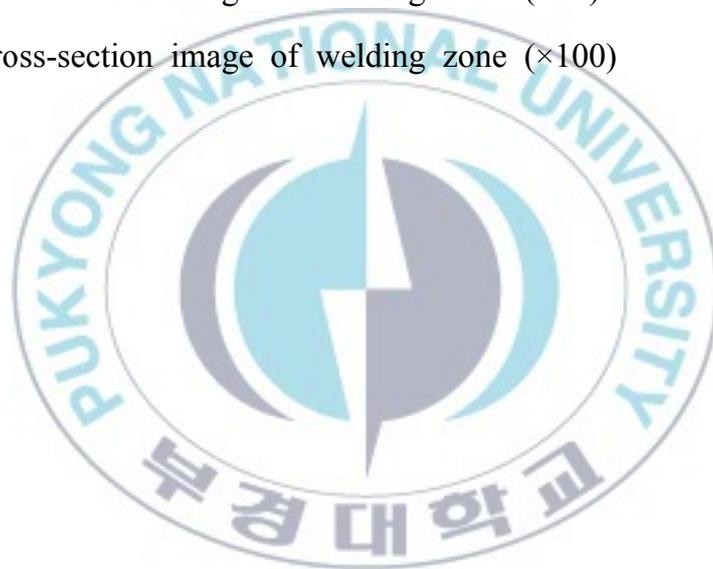
Fig. 3-7 Shape of interfacial on welding zone (10mm)

Fig. 3-8 Tensile test results and a comparison of the raw material

Fig. 3-9 Cross-section image of welding zone ( $\times 12.5$ )

Fig. 3-10 Cross-section image of welding zone ( $\times 25$ )

Fig. 3-11 Cross-section image of welding zone ( $\times 100$ )



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

점차 강화되어가는 환경규제와 고갈되어가는 화석연료로 인해 자동차 및 철도차량 분야의 기술자들은 차체 경량화를 목표로 많은 노력을 기울이고 있다. 실제 차량의 중량을 10% 감소시키면 10%의 운동에너지가 감소하여 안정성이 향상되고, 7% 정도의 에너지 손실을 줄일 수 있다. 그리고 연비의 향상은 물론 가속성과 제동(braking)성의 향상을 통하여 자동차의 운전 성능을 향상시킬 수가 있다. 중량이 100kg 감소할 경우 9~10g/km의 온실가스 배출량을 감축할 수 있다는 연구 결과도 보고되어 있다. 그래서 현재 차체 경량화의 일환으로 알루미늄합금(aluminum alloy)이나 마그네슘합금(magnesium alloy)과 같은 경금속의 사용이 늘고 있는데 그중에서도 알루미늄합금은 그 장점을 널리 인정받아 자동차 산업에서 매우 주목 받고 있는 소재 중 하나이다. 특히 판재 형상의 알루미늄합금은 자동차의 내 외장재로 수요가 많이 증가하고 있는 실정이다[1~6].

알루미늄은 철에 비하여 비중이 3분의 1밖에 되지 않지만 약간의 두께를 보강함으로써 철과 같은 강성을 가진 구조를 설계할 수 있기 때문에 알루미늄을 사용할 경우 차체 경량화에 큰 도움이 된다. 그 밖에도 가공성 및 주조성이 뛰어나고, 공기 중의 산소와 혼합하여 산화피막( $Al_2O_3$ )이 생성되어 내식성이 강할 뿐만 아니라 전기 및 열의 전도성이 좋다는 특성을 가진다 [7~9].

하지만 이렇게 우수한 특성을 가졌음에도 불구하고 수송기계 산업에서 문제시되는 이유 중 하나는 알루미늄의 낮은 용접성 때문이다. 이는 용융온도가 낮지만 열전도도와 전기전도도가 매우 크고, 알루미늄 고유의 산화피막이 용접성을 악화시키기 때문이다. 또한 열에 의한 팽창 및 수축이 크기

때문에 용접 후 균열이 심하게 발생하기 때문이다. 이러한 이유로 여러 연구자들은 알루미늄합금의 접합과 관련하여 여러 가지 연구 결과 및 새로운 접합방법을 제시 하였고, 앞으로도 기존에 제시된 접합 방법들의 장점 및 단점을 적절히 보완한 새로운 접합방법에 대한 연구가 필요하다[10~15].



## 1.2 연구 목적 및 내용

자동차 산업에서는 다소 얇은 두께를 가지는 두 장의 알루미늄 판재를 접합할 때 공정 시간의 단축 및 접합된 부품의 피로 수명을 늘리기 위하여 선접합(line welding)보다는 점접합(spot welding)을 선호하고 있다. 실제로 알루미늄을 효율적으로 접합할 수 있는 마찰교반용접(FSW : Friction Stir Welding)의 경우 긴 접합 시간으로 인하여 대량 생산의 자동차 산업에는 적용이 힘든 것이 사실이다. 또한 레이저용접(laser welding)의 경우 용접 부재의 평행선 정렬이 이루어지지 않을 경우 용접이 힘들기 때문에 복잡한 형상의 차체 프레임(frame)을 용접하기에는 다소 힘든 점이 많다[16~18].

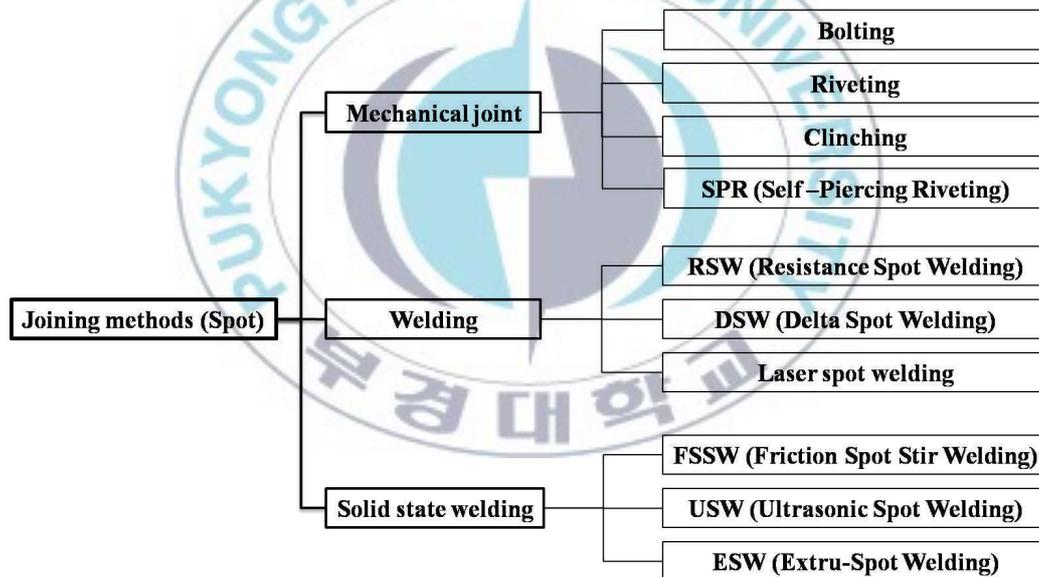
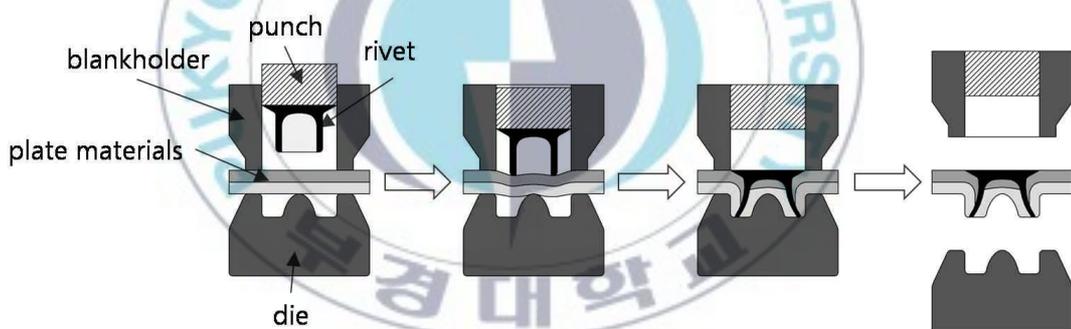


Fig. 1-1 Aluminum spot joining methods

다소 얇은 두 장의 판재를 접합하는데 사용되는 점접합 방법은 여러 가지 종류가 있으며 각각의 접합 방법에는 저마다의 특징을 가지고 있다. 두 장의 알루미늄 판재를 겹쳐서 부분적으로 일체화할 수 있는 방법을 크게 분류해보면 Fig. 1-1에서 보는 바와 같이 기계적 체결(mechanical joint)영역과 소

재를 녹여서 접합하는 용융접합(welding)영역 및 재결정온도와 용융점 사이에서 접합을 하는 고상접합(solid state welding)영역으로 나눌 수 있다.

볼팅(bolting)과 리벳팅(riveting)은 가장 기본적인 기계적 체결방법으로서 결합하고자 하는 두 판재의 재질이 다르더라도 쉽게 접합 할 수 있으며 안정된 결합강도를 가진다. 또한 두 판재의 두께와 상관없이 손쉽게 결합이 가능할 뿐만 아니라 열적 변형에 의한 균열이 발생하지 않기 때문에 여러 가지 기계적 구조물에 많이 사용되어지고 있는 결합 방법이다. 하지만 이 두 가지 방법은 결합 하고자하는 두 판재에 드릴링(drilling)공정이 필요하고, 리벳팅의 경우 헤딩(heading)공정이 추가적으로 필요하기 때문에 빠른 생산 공정을 필요로 하는 오늘날의 자동차 산업 분야에서는 그 사용량이 많이 줄어든 상태이다[19,20].

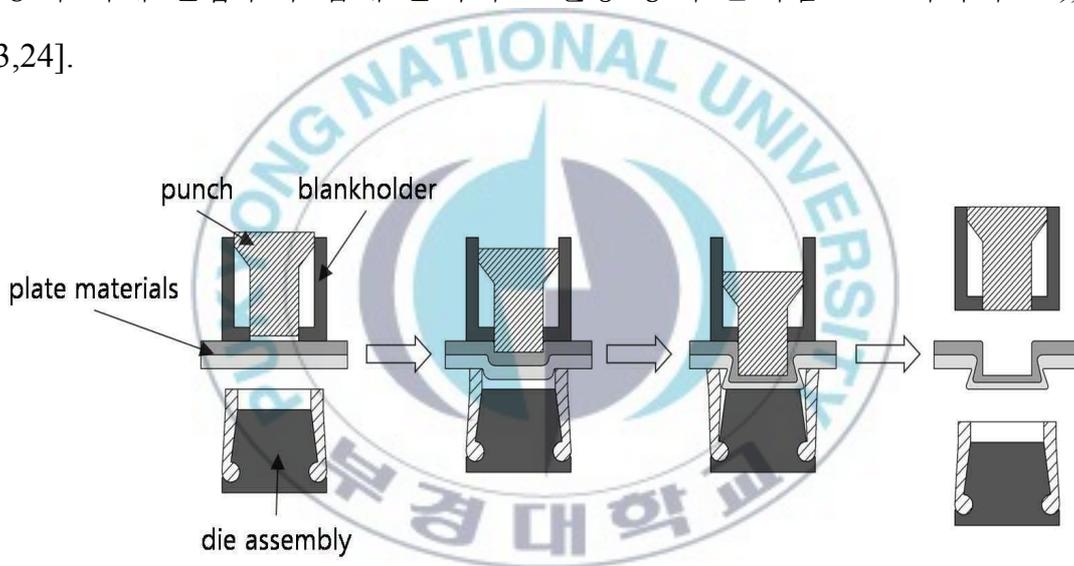


**Fig. 1-2 Self-piercing riveting process**

이러한 생산성 저하의 원인을 해결하기 위하여 개발 된 것이 기존의 리벳팅공정을 개량한 셀프피어싱리벳팅(SCR : Self Piercing Riveting)공정이다. 셀프피어싱리벳팅공정은 Fig. 1-2에서 보는 바와 같이 기존의 리벳과는 다른 특수한 리벳(rivet)을 사용하여 선행적으로 필요하던 드릴링공정과 헤딩공정을 개선하였다. 결과적으로 결합에 필요한 두 가지의 공정을 줄임으로서 생산성을 향상 시켰을 뿐만 아니라 선행공정에 들어가는 경제적 비용도

절감할 수 있다. 하지만 셀프피어싱리벳팅에 사용되는 특수한 리벳의 가격이 비싸고, 볼팅 및 리벳팅과 더불어 결합을 위한 부가재의 사용은 차체 무게를 증가시킨다는 단점을 가진다[21,22].

다음으로 Fig. 1-3에서 보는 바와 같이 기계적 소성 변형을 이용하여 기하학적으로 두 판재를 구속시키는 클린칭(clinching)의 경우에는 앞서 소개된 결합 방법과는 달리 추가적인 결합 소재를 필요로 하지 않고, 이종 재질에 대한 결합이 우수하며 결합 공정에 소요되는 시간 또한 짧은 편이다. 하지만 클린칭은 이음매부분의 면적 변화에 따른 결합강도의 저하가 발생하고, 진동에 의해 결합부가 쉽게 분리되는 현상 등이 문제점으로 지적되고 있다 [23,24].



**Fig. 1-3 Clinching process**

소재를 녹여서 금속학적으로 접합을 하는 저항점용접(RSW : Resistance Spot Welding)과 델타스팟용접(DSW : Delta Spot Welding)은 크롬동(Cu-Cr)과 같은 전극을 사용하여 접합하고자 하는 판재에 전류를 흘려줌과 동시에 압력을 가하여 접합하는 방법이다. 이 두 가지 방법은 접합 시간이 매우 짧고, 자동화가 쉬우며 접합을 위한 추가적인 소재가 필요 없기 때문에 부가재에 의한 무게 증가로부터 자유롭다. 하지만 차량 경량화 소재인 알루미늄은 전기전도도가 크고 열전도성이 좋기 때문에 Fig. 1-4의 a)와 같은 전기저

항용접으로 용접을 할 경우 철을 용접하는 경우보다도 높은 전류를 필요로 한다는 문제점이 있다. 또한 대전류 통전으로 용접용 전극 표면의 소모가 심하기 때문에 잦은 표면 연마와 전극 교체가 필요하다. 이러한 단점들을 보완하기 위하여 Fig. 1-4의 b)와 같은 델타스폿용접이 개발되었다. 델타스폿용접은 기존의 전기저항용접에 사용되는 전극을 사용하지만 소재와 전극이 맞닿는 부분에 얇은 철재 테이프(process tape)를 연속적으로 공급해 줌으로써 전극의 오염을 방지하고 철과 전극의 계면(interface)에서 높은 저항열의 발생을 유도하여 용접에 필요한 전류를 낮추는데 성공하였다. 하지만 델타스폿용접 또한 소모성 철재 테이프의 사용이 필요하고, 궁극적으로 접합 후의 접합흔적에 의한 접합부 단면 감소를 완벽하게 해결 하지 못했다 [25~27].

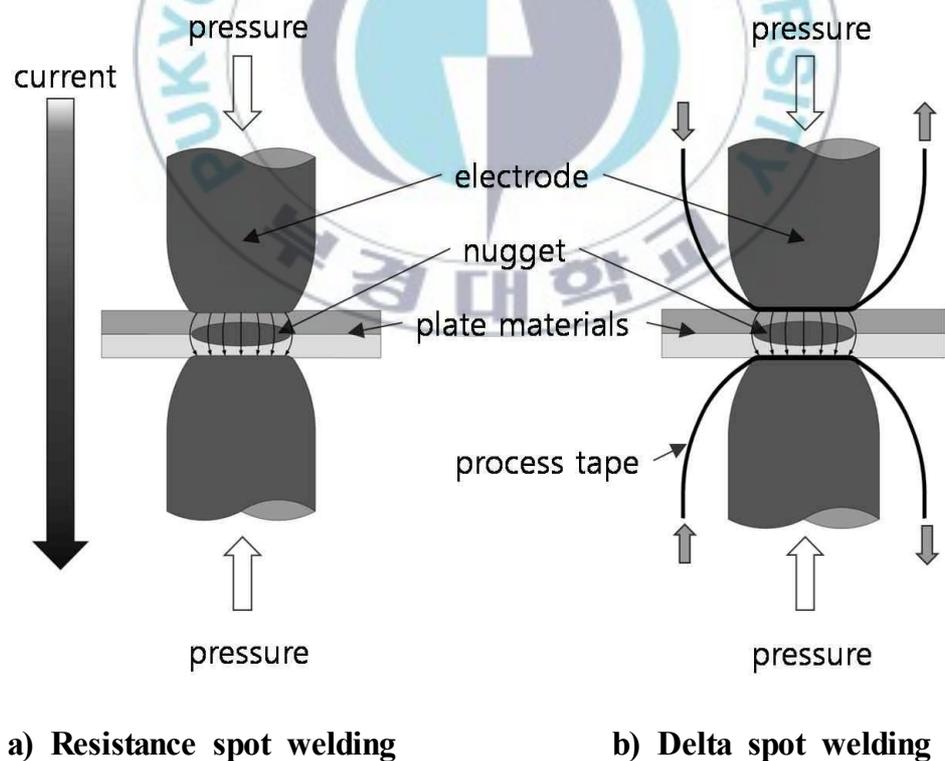
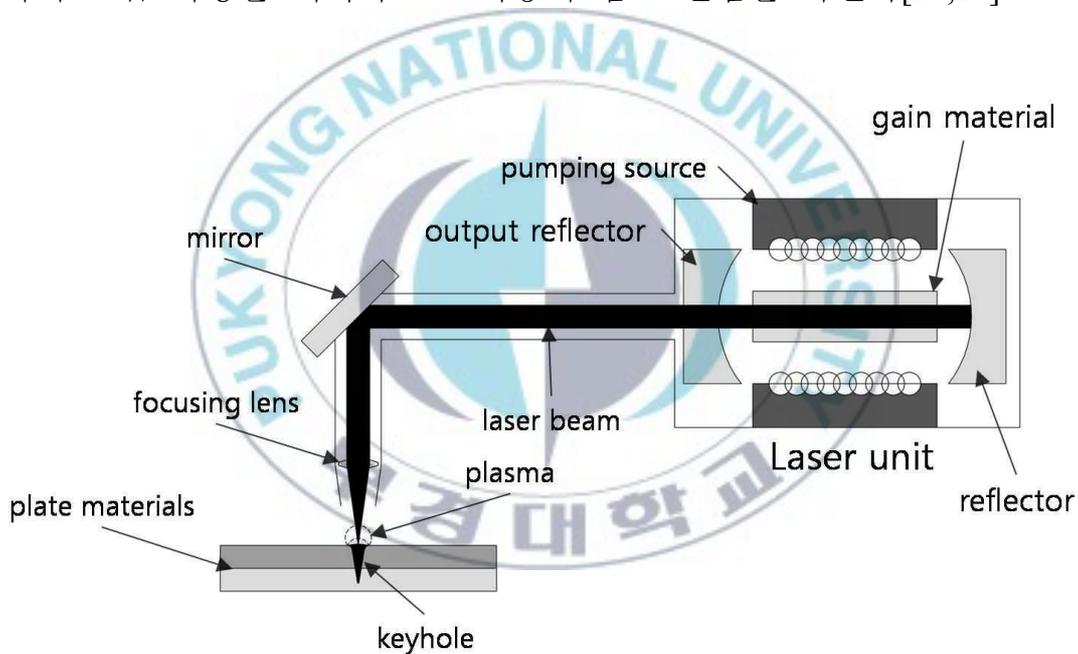


Fig. 1-4 Two kinds of spot welding

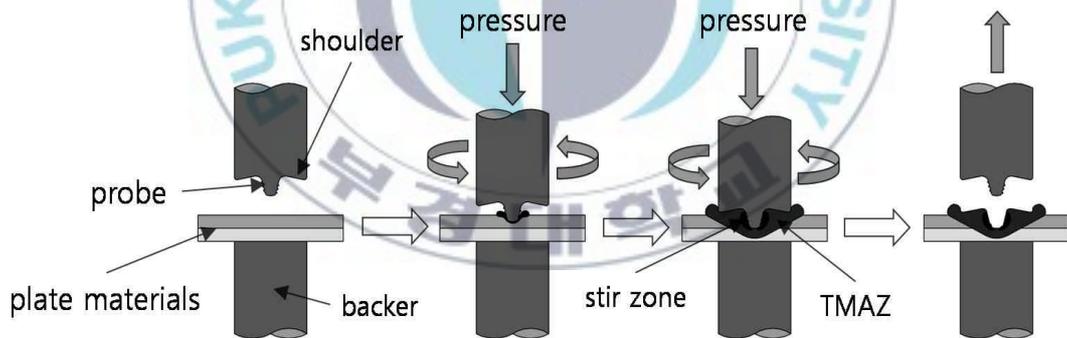
비슷한 양상으로 소재를 녹여서 점접합 하는 방법으로는 레이저점용접 (laser spot welding)이 있다. 레이저점용접은 Fig. 1-5와 같이 레이저 발생장치(laser unit)에서 생성된 빛에너지를 집중렌즈(focusing lens)를 통해 좁은 영역에 집중시킴으로써 발생하는 높은 열에너지를 이용하여 소재를 접합하는 방법이다. 특징으로는 용접속도가 다른 어떤 용접보다 빠르고 키홀(keyhole)의 생성으로 인해 용입 깊이가 깊다. 또한 입열량이 적기 때문에 열에 의한 변형이 작고 열영향부가 매우 좁다는 등의 장점을 가진다. 하지만 접합에 사용되는 장비가 고가이고 숙련된 기술자를 요구한다는 점에서 고가의 고급 차량을 제외하고는 적용이 힘든 단점을 가진다[28,29].



**Fig. 1-5 Laser spot welding process**

다음으로 소재를 녹이지 않고 접합을 하는 고상 접합은 소재를 용융점 이하의 온도로 가열하여 접합하기 때문에 접합 후의 열변형이 적고, 용접의 문제점으로 지적되는 주조조직이 발생하지 않는다. 그리고 접합이 힘든 이종 금속간의 접합이 용이하다는 장점을 가지고 있기 때문에 오늘날 경량화

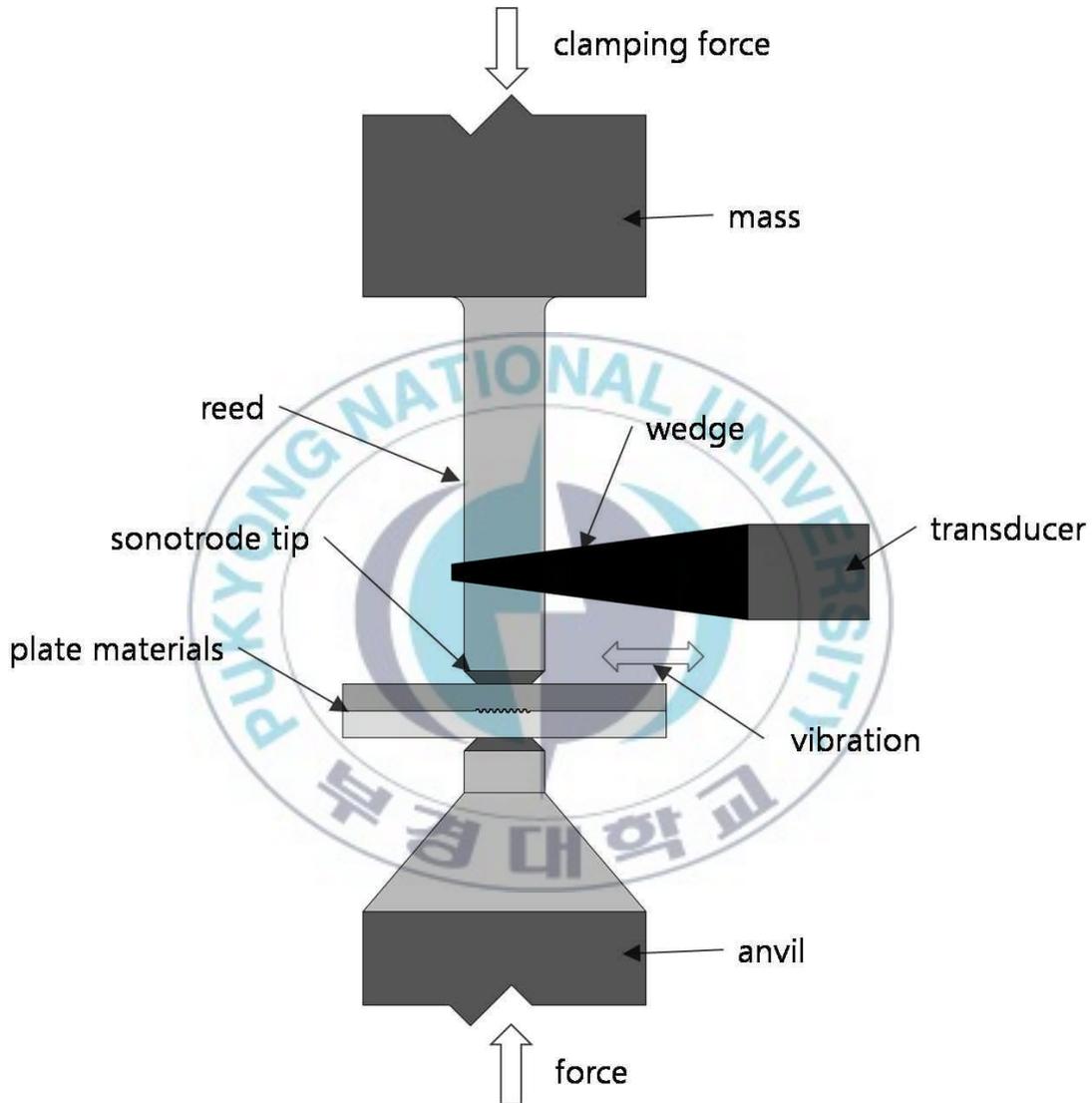
금속의 접합 분야에서 많이 주목 받고 있는 접합 방법이다. 고상 접합을 이용한 점접합 방법의 대표적인 예로는 마찰교반접합(FSW : Friction Stir Welding)을 응용한 마찰점접합(FSSW : Friction Spot Stir Welding)이 있다. 마찰점접합은 Fig. 1-6와 같이 공구의 회전에 의한 온도 상승과 공구의 가압력을 이용하여 접합하는 점접합 방법이다. 이 접합 방법은 고상 접합방법이 가지는 장점 이외에도 공구 수명이 매우 길고, 접합 공정이 단순하며 접합을 위한 부자재가 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 그리고 냉각이 필요하지 않고, 온도 상승을 위한 소비전력이 저항용접보다 매우 낮기 때문에 접합을 할 때 소모되는 비용이 크게 절감되며 접합 강도 또한 여러 점접합 방법과 비교하였을 때 결코 뒤쳐지지 않는다. 하지만 접합부에 발생하는 깊은 구멍 형상의 접합 흔적 및 외부로 돌출 되는 잔여 금속으로 인하여 깨끗한 접합면을 얻기 힘들다는 단점을 가진다[30].



**Fig. 1-6 Friction spot stir welding process**

고상 접합을 기초로 하는 또 다른 용접법인 초음파점용접(USW : Ultrasonic Spot Welding)은 Fig. 1-7에서 보는바와 같이 변환기(transducer)를 통해 발생된 고주파(ultrasonic)가 피 접합소재의 일정 부분에 미세 진동을 가해 줌으로써 발생하는 마찰열과 수직으로 가해지는 압력을 이용하여 접합하는 방법이다. 기본적으로 고상접합이 가지는 장점을 모두 가지면서도

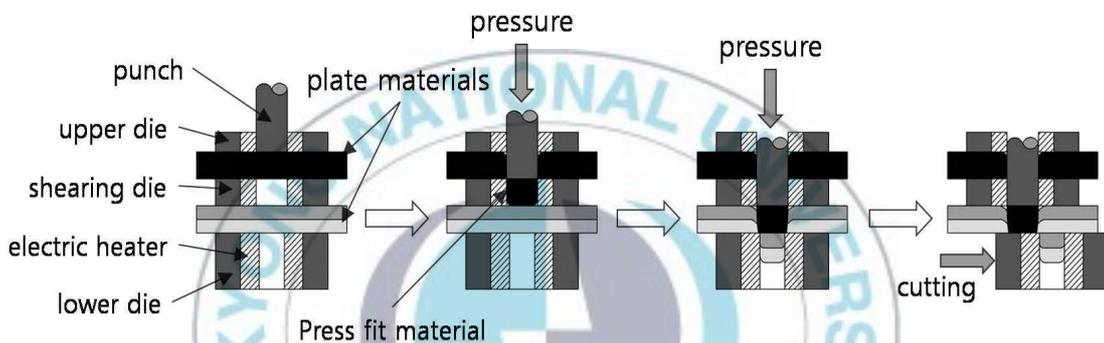
마찰 교반접합과는 다르게 접합부의 소재 손실이 없다는 장점을 추가로 가진다. 하지만 용접기의 출력에 제한이 따르기 때문에 효과적으로 초음파 용접을 할 수 있는 금속의 두께에는 제한이 있다[31,32].



**Fig. 1-7 Ultrasonic spot welding process**

마찬가지로 고상 접합을 기초로 한 점접합 방법인 압출점접합(ESW : Extrusion Spot Welding)은 Fig. 1-8에서 보는 바와 같이 고상 접합이 가능한 온도에서 상부의 판재로부터 압입 소재(press fit material)를 만들며 동시에 압

입 소재를 두 장의 피 접합 소재에 삽입하게 된다. 압입 소재가 피 접합 소재에 삽입 되면서 발생하는 압력에 의해 두 장의 피 접합 소재가 접합되게 되고 최종적으로 발생한 잔여 금속은 가변 금형에 의해 제거 되어지는 방식의 접합 방법이다. 이로서 리벳팅의 단점인 복잡한 공정을 보완하고, 여러 점접합 방법에서 문제점으로 지적이 되는 접합부 단면의 감소를 최소로 한 접합 방법이다. 하지만 접합을 위한 부가재의 사용으로 한 장의 추가적인 판재가 필요한 것이 문제점으로 지적된다[33,34].



**Fig. 1-8 Extrusion spot welding process**

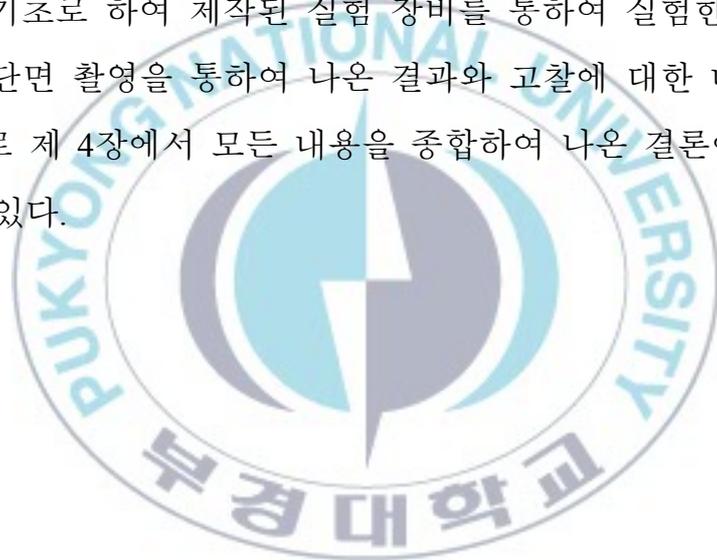
이상 알루미늄 판재를 점접합 할 수 있는 몇 가지 점접합 방법에 대하여 알아보았다. 각각의 접합 방법에는 저마다의 장점과 단점을 내포하고 있으며 본 논문에서 다루고 있는 진동점접합(vibration-spot welding)은 앞에서 설명한 몇 가지 점접합 방법들의 장점과 단점을 적절히 활용하여 고안된 새로운 점접합 방법이다. 진동점접합은 고상접합을 기초로 하여 아크(arc) 발생이 없고, 접합을 하기위한 부가재를 필요로 하지 않는다. 또한 접합부 표면상의 단면 변화가 발생하지 않기 때문에 차세대 경량 금속 합금의 점접합에 적극 활용될 가능성이 높다. 따라서 진동점접합이 실용화 될 수 있도록 접합 성능의 평가 및 접합 성능에 영향을 미치는 접합 인자에 대한 여러 가지 연구가 필요하다.

이에 본 논문의 목적은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 진동 전극의 삼각형 단면적과 전극의 단면적이 접합형상에 주는 영향에 대하여 살펴보고, 다소 얇은 두 장의 알루미늄 판재를 진동점접합할 수 있도록 설계 및 제작된 진동점접합기를 이용한 접합 실험을 통하여 접합이 가능한 통전 시간 및 전류의 세기를 결정한 다음 정해진 접합조건으로 접합된 시편에 대한 접합 성능 평가를 실시하여 실제 산업에 적용될 수 있는 충분한 접합 강도를 가지는지에 대해 알아보는 것이다.



### 1.3 논문의 구성

본 논문은 제 1장에서 전반적인 연구의 목적 및 배경을 설명 하였다. 제 2장에서는 진동점접합의 원리 및 이론적 배경을 설명 하였고, 전극 끝단의 직경과 진동 전극에 해당하는 삼각형 외접원의 직경이 접합 형상에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 조사하기 위해 수행한 시뮬레이션(simulation)에 관한 내용을 다루었다. 그리고 전극의 소재를 결정하기 위한 선행 실험 및 진동점접합기의 설계에 대한 내용을 다루고 있다. 제 2장을 요약 하자면 실험 기기의 설계를 위한 기초 연구에 대해 중점적으로 다루고 있다. 제 3장에서는 제 2장을 기초로 하여 제작된 실험 장비를 통하여 실험한 내용 및 인장 전단 시험과 단면 촬영을 통하여 나온 결과와 고찰에 대한 내용이 담겨 있다. 마지막으로 제 4장에서 모든 내용을 종합하여 나온 결론에 대한 내용으로 구성되어 있다.



## 제 2 장 진동점접합에 관한 연구

### 2.1 진동점접합의 원리와 특징

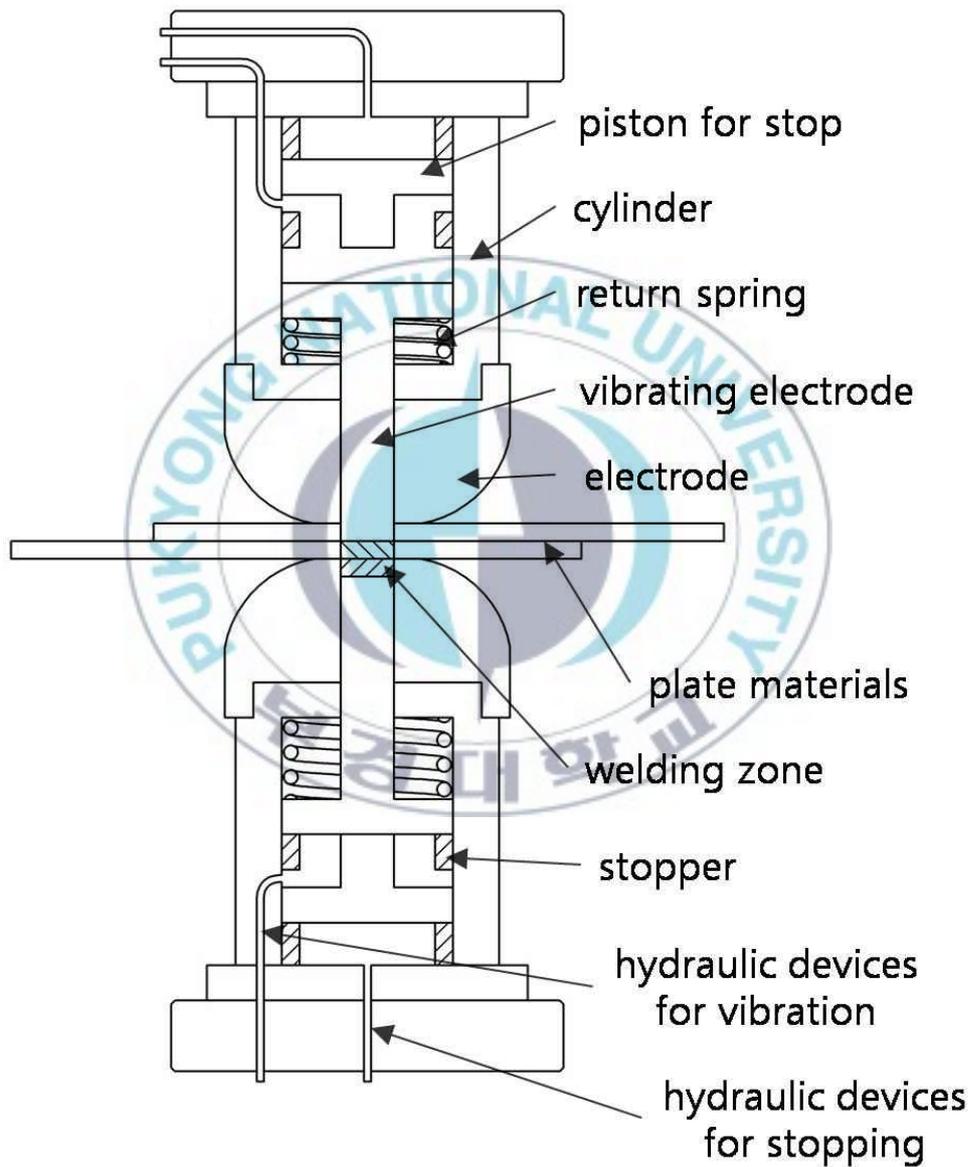


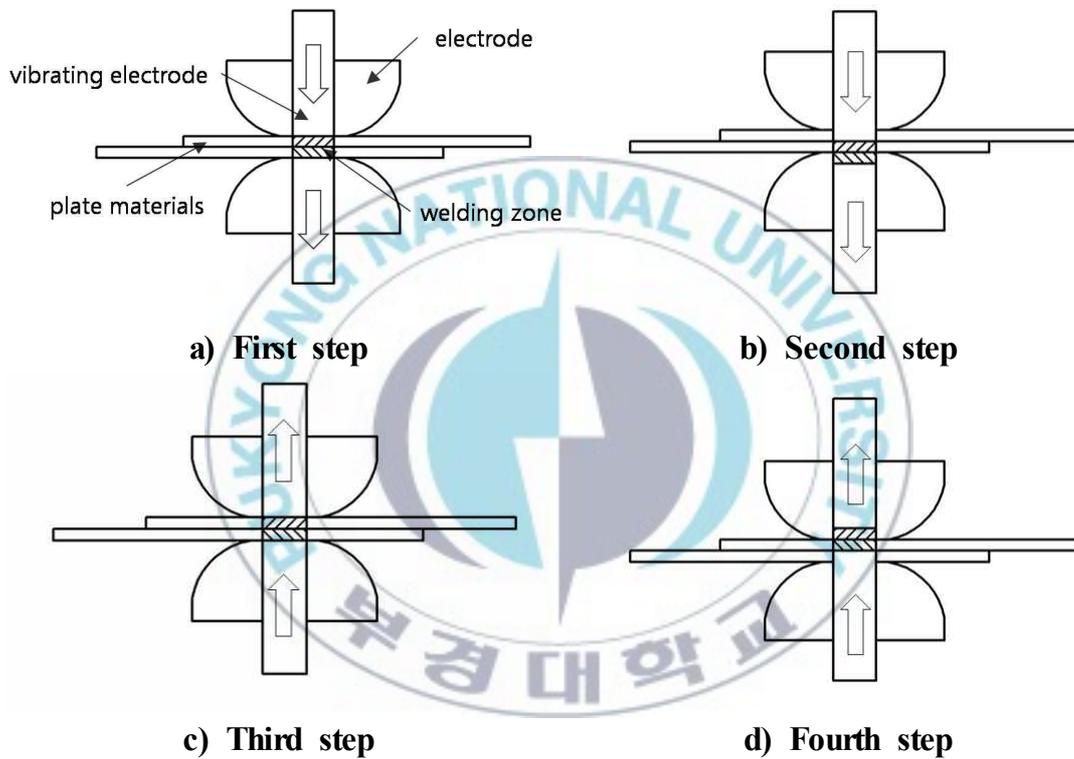
Fig. 2-1 Principle of vibration-spot welding

진동점접합은 두 장의 중첩된 금속 판재를 저항에 의한 발열과 진동에 의한 소성유동으로 접합하는 고상접합 방법이다. Fig. 2-1에서 보는바와 같이 접합하고자 하는 두 장의 금속 판재를 겹치고 전류를 가해주게 되면 저항이 발생하고 그로 인해 발생하는 열을 이용하여 고상접합이 쉽게 일어날 수 있는 온도 분위기를 만든다. 그와 동시에 진동 전극(vibrating electrode)을 유압 또는 공압을 이용하여 진동시키게 되면 편치에 해당하는 진동 전극과 금형에 해당하는 전극(electrode)이 매번 바뀌면서 위아래로 압출과 유사한 소성유동이 발생하여 겹쳐진 두 소재사이에 접합이 이루어진다. 진동이 끝난 이후에는 정지 피스톤(piston for stop)을 이용하여 진동 전극의 끝부분과 전극의 끝부분이 평행하도록 해줌으로써 깨끗한 접합부를 얻을 수 있다.



**Fig. 2-2 Section of vibration-spot welding**

두 개의 진동 전극 및 전극의 구멍 형상은 Fig. 2-2에서 보는 바와 같이 삼각형 형상의 단면을 가지고 있으며 두 삼각형은 서로 교차 되도록 구성 되어 있다. 서로 교차된 삼각형 형상의 진동 전극에 연속 적인 진동을 가해줌으로써 소재에 반복적인 압출(extrusion) 효과가 발생하고 겹쳐진 두 소재에 부분적으로 고상접합이 발생 된다.



**Fig. 2-3 Vibration-spot welding process**

접합 공정으로는 Fig. 2-3에서 보는 바와 같이 총 4단계의 움직임이 반복적으로 일어나면서 접합이 이루어진다. 모든 진동이 끝난 이후에는 Fig. 2-3의 a)와 c)의 형태로 정지함으로서 모든 접합 과정이 완료된다.

진동점접합의 특징으로는 고상 접합 방법을 기반으로 하기 때문에 아크의 발생이 없고 저항점용접의 순간가열 방법을 이용하기 때문에 접합 시간

이 짧다. 그리고 기존의 용융접합으로 접합이 힘든 경량 금속 또한 쉽게 접합이 가능하다. 추가적으로 진동 전극이 소재를 파고 들 때 소재의 단면적이 감소함으로 순간적으로 높은 저항을 얻을 수 있다. 결과적으로 다소 낮은 전류에서도 높은 온도를 얻는 것이 가능하다. 마지막으로 장비의 단순화가 용이하기 때문에 현재 사용되고 있는 접합 로봇 등과 같은 접합 장비에 쉽게 적용을 할 수 있다는 등의 특징을 가지고 있다[35].



## 2.2 관련 이론

일반적인 접합(welding)의 정의는 같은 종류 또는 다른 종류의 두 가지 고체 재료사이에 직접적인 원자간 결합이 되도록 접합시키는 방법을 말한다. 즉, 두 고체 사이의 원자(atom)들을 평균 원자간 거리에 놓이게 하여, 그 원자들을 연결하는 방법을 말한다. 고상 접합은 이러한 원리를 바탕으로 하여 소재를 녹이지 않고 접합하는 방법을 가리킨다.

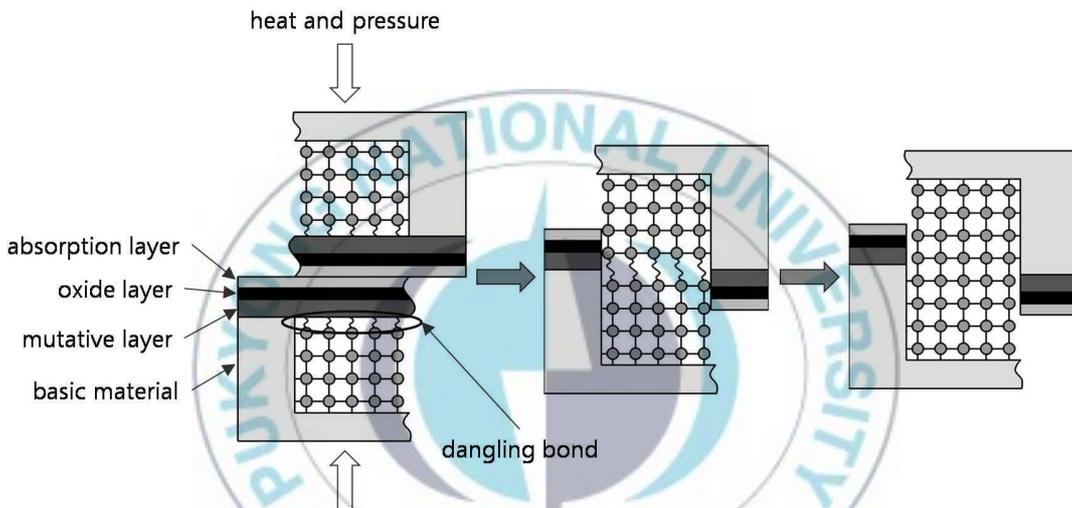


Fig. 2-4 Principle of solid state welding

기계분야에 사용되는 금속은 주로 Fig. 2-4에서 보는 바와 같이 규칙적인 원자 배열을 가지고 있으며, 원자 상호간의 인력(attractive force)과 척력(repulsive force)이 동등한 크기로 작용하여 가장 안정된 상태를 유지하고 있다. 이러한 금속의 순수한 표면에는 한 쪽에 원자가 없는 상태의 불안정한 요소인 결합손(dangling bond)이 존재하게 되는데 이러한 결합손을 다른 결합손과 접촉시키면 쉽게 접합이 이루어진다. 하지만 공업용 소재는 대부분 흡착층(absorption layer), 산화물층(oxide layer), 변형층(mutative layer)과 같은 순수한 금속과는 거리가 먼 표면층이 존재하므로 쉽게 순수한 금속이 들어

나지 않는다. 결국 금속을 쉽게 접합하기 위해서는 순수한 금속 표면을 얻는 것이 중요하다. 용융 용접의 경우 순수한 금속 표면을 얻기 위하여 소재를 녹이는 방법을 채택한다. 반면 고상 접합의 경우 소재를 녹이지 않는 대신에 압력 또는 용융점 이하의 열을 가하여 접합을 한다.

고상 접합은 크게 확산 접합(diffusion welding), 마찰 접합, 폭발 용접(explosion welding), 초음파 용접 등으로 분류가 가능하다. 확산 접합은 가열, 가압 수단을 이용하여 두 금속 사이의 상호 확산(diffusion)을 이용해 접합하는 방법이다. 마찰 접합은 두 금속 사이에 발생하는 마찰열을 열원으로 하고 기계적 가압력에 의해 발생하는 소성 변형을 이용하여 접합하는 방법이다. 다음으로 폭발 용접은 화약이 폭발할 때 발생하는 열과 압력을 이용하여 두 금속을 단시간에 접합하는 방법이다. 마지막으로 초음파 용접은 고주파에 의해 진동하는 음향 전극이 만들어 내는 마찰열과 가압력을 이용하여 접합하는 방법이다. 마찰열을 발생하는 방법으로 고주파를 이용하고 있기 때문에 마찰 접합과는 별개의 접합 방법으로 분류 된다. 진동점접합은 이러한 고상접합 이론을 바탕으로 저항에 의한 열원과 진동에 의한 압력을 이용하여 접합을 한다.

## 2.3 컴퓨터 시뮬레이션

### 2.3.1 시뮬레이션의 조건

실험 장비의 설계에 앞서서 진동점접합을 할 때 발생하는 소재의 유동 및 압력을 알아보기 위하여 DEFORM-3D 소프트웨어를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행 하였다. 접합이 이루어질 때 중요한 부분인 접합부에 대하여 연속적인 진동이 아닌 단일 압출 효과에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, Fig. 2-5와 같이 중요 부분만을 설계하여 불필요한 요소에 대한 계산 시간을 단축시켰다. 실제 진동 접합은 이러한 단일 압출의 연속이고, 접합 소재의 체적은 일정하다고 가정 한다.

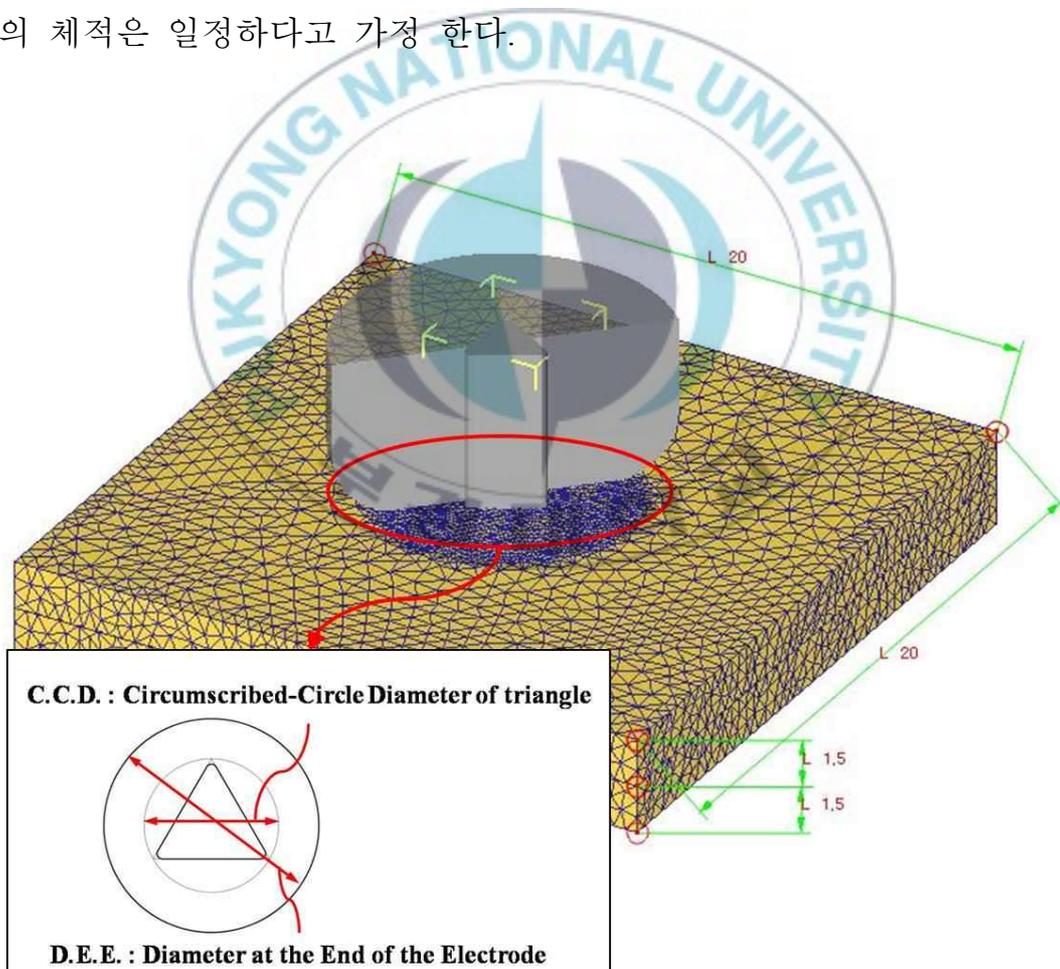


Fig. 2-5 The structure of the simulation

알루미늄에 비하여 진동 전극 및 전극은 항복 강도가 매우 큰 편이기 때문에 강체(rigid)로 해석을 하였다. 알루미늄 소재의 경우 공정상 스프링 백(spring back)에 대한 변형을 고려할 필요가 없고 탄성 영역에 대한 해석이 불필요하기 때문에 강소성체(super plastic)로 해석을 수행하였다. 격자 구조(mesh)는 접합이 이루어지는 중요한 부분에 조밀한 격자 구조를 형성하여 해석의 정확도를 높였고 접합부를 제외한 부분에는 다소 큰 격자 구조를 형성하여 해석의 시간을 단축시켰다.

**Table 2-1 Condition of Simulation**

<b>Material temperature</b>	<i>480 °C</i>
<b>Material</b>	<i>Aluminum 5052</i>
<b>Mesh</b>	<i>Number of Elements : 23604 Max Element Size : 0.8mm Min Element Size : 0.4mm Mesh Window Elements Size : 0.2mm</i>
<b>Solver</b>	<i>Sparse</i>
<b>Iteration method</b>	<i>Newton-Raphson</i>
<b>Punch stroke</b>	<i>1.5mm</i>
<b>Interface friction</b>	<i>Electrode : Aluminum 0.7 Aluminum : Aluminum 0.4</i>

시뮬레이션에 적용한 접합 인자로는 Fig. 2-5에서 보는 바와 같이 진동 전극에 해당하는 삼각형 외접원의 직경(C.C.D. : Circumscribed-Circle Diameter of triangle)과 전극 끝단에서의 직경(D.E.E. : Diameter at the End of the

Electrode)을 주요 접합 인자로 두고 시뮬레이션을 진행하였다. 삼각형 외접원의 직경은 3mm, 5mm, 7mm의 세 가지에 대하여 시뮬레이션하였고 세 가지의 삼각형 단면적은 각각  $2.841\text{mm}^2$ ,  $8.037\text{mm}^2$ ,  $15.831\text{mm}^2$ 에 해당한다. 전극 끝단에서의 직경은 6mm, 8mm, 10mm, 12mm에 대해서 시뮬레이션하였다. 단, 삼각형 외접원의 직경이 7mm이고 전극 끝단에서의 직경이 6mm일 때에 대한 시뮬레이션은 삼각형이 전극을 벗어나기 때문에 시뮬레이션을 진행하지 않았다. 세부적인 시뮬레이션 조건은 Table 2-1과 같다.



### 2.3.2 시뮬레이션 유동 형태의 결과 및 고찰

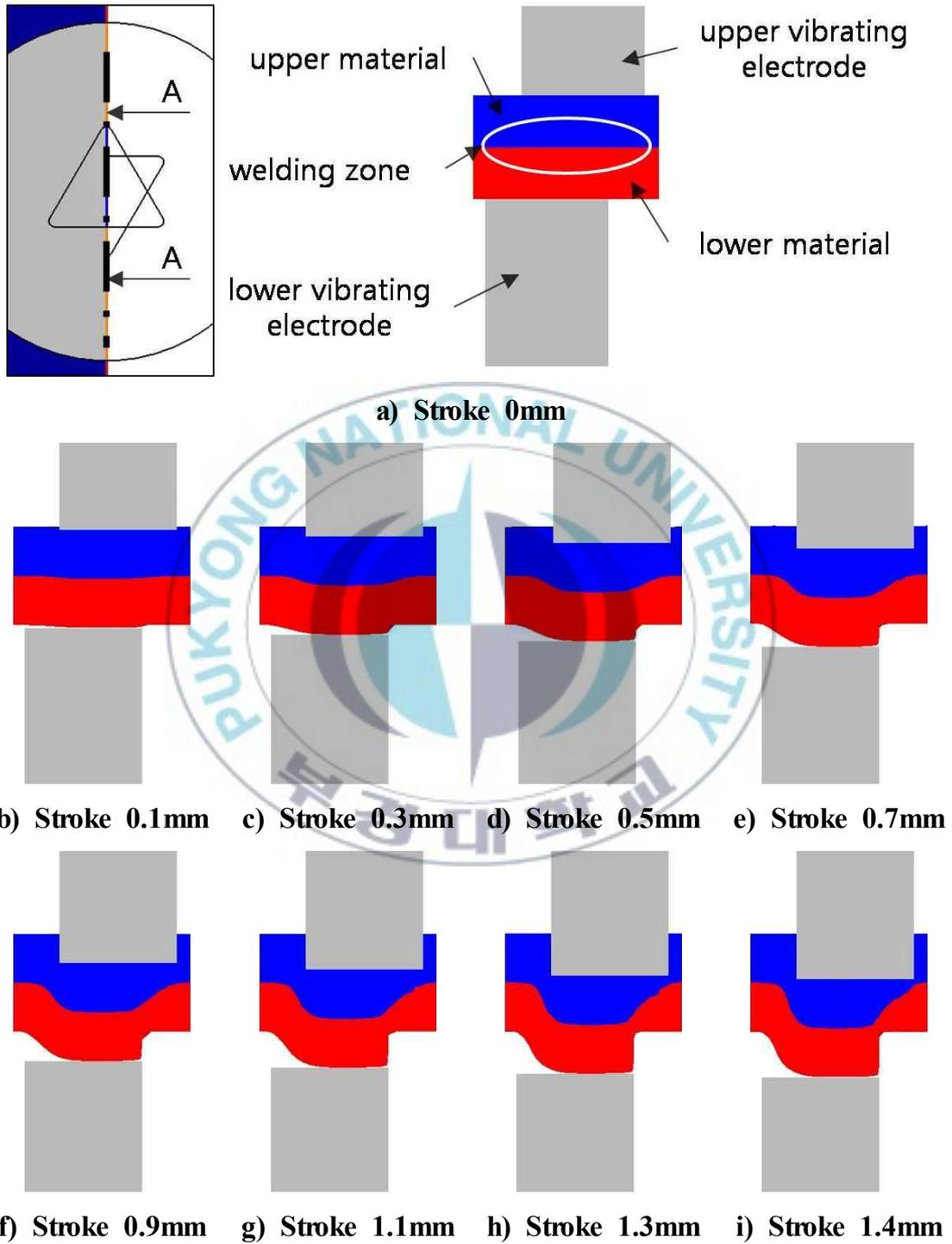


Fig. 2-6 Step-by-step shape of the simulation

Fig. 2-6은 진동 전극의 삼각형 외접원 직경이 5mm이고 전극 끝단의 직경이 8mm일 때의 단계별 유동 형상을 나타내고 있다. 전반적으로 전극의 빈공간(cavity) 형태로 소재가 압출되었음을 알 수 있다. 상부 판재와 하부 판재의 유동 형태가 서로 엇갈리는 것을 파악할 수 있으며 삼각형의 꼭지점 부분에서 소재의 유동이 다소 더딤을 짐작할 수 있다. 이러한 결과가 나오는 것은 교차되는 삼각형의 꼭지점 영역에 해당하는 비 중첩 구간에서 수직 방향으로 같은 형태의 빈공간이 없기 때문에 발생하는 결과라 사료된다. 결국 같은 형태의 빈공간이 없기 때문에 소재는 중첩구간에 해당하는 빈공간을 따라 소성 유동이 발생된다. 유동 형태로 보았을 때 삼각형이 중첩된 구간 보다 비 중첩된 각각의 꼭지점 영역에서 더 높은 압력이 발생할 것임을 추측할 수 있다.



### 2.3.3 압력 시뮬레이션의 결과 및 고찰



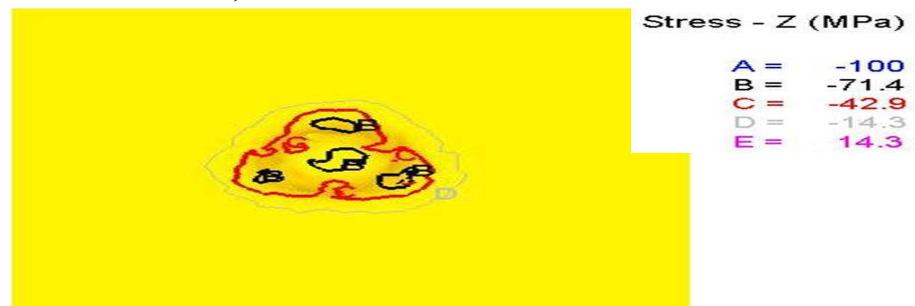
a) D.E.E. : 6mm



b) D.E.E. : 8mm



c) D.E.E. : 10mm



d) D.E.E. : 12mm

Fig. 2-7 Distribution of Pressure at welding zone (C.C.D. : 3mm)

압력에 대한 시뮬레이션은 접합에 있어서 중요하게 작용하는 응력인 수직 축에 대한 응력 분포를 조사 하였다. 유한요소법(finite element method)을 활용한 시뮬레이션에 있어서 자주 발생하는 격자구조의 한 꼭지점에서 과도한 응력 집중으로 결과 값과 거리가 먼 과도한 응력을 제외하고 중요한 영역 대의 응력을 조사하기 위하여 모든 결과에 대하여 최대 응력과 최소 응력을 각각 100MPa과 -100MPa로 고정 하고 관찰 하였다. 알루미늄5052가 480℃에서 약 21MPa의 항복 강도를 가지는 것을 감안 한다면 항복 강도를 넘어서는 응력인 B와 C가 접합에 필요한 소성 유동 및 접합 압력을 발생시키는 주요 압력으로 볼 수 있다. 그리고 진동 전극이 마지막 까지 내려온 시점에서는 전극의 이동 방향 변경이 일어나기 때문에 응력이 0에 가깝다. 그렇기 때문에 소성 유동의 중간 과정에 해당되는 지점인 진동 전극의 이동 거리가 1mm일 때의 압력을 조사하였다.

Fig. 2-7은 진동 전극의 삼각형 외접원의 직경이 3mm일 때 접합부의 압력 분포를 조사한 결과이다. 전반적으로 -42.9MPa에 해당하는 압력인 C에 대한 압력 분포가 지배적임을 알 수 있다. 그리고 부분적으로 삼각형 형상의 중앙과 3개의 꼭지점에 -71.4MPa에 해당하는 압력도 눈에 띄게 발생하였음을 알 수 있다. 시뮬레이션 초기에 전극 끝단의 직경이 접합 소재의 접합부에서 X, Y방향으로의 소재 유동을 억제시켜주는 역할을 하고 직경이 클수록 그 억제력이 커져서 소재의 퍼짐을 막아 Z축으로의 압력을 더욱 증대 시켜 줄 것이라고 추측 하였으나 삼각형 외접원의 직경이 3mm일 때 전체적인 압력 분포를 살펴보게 되면 전극 끝단의 직경 변화에 따른 압력 분포의 변화가 크게 차이가 없으므로 보아 전극 끝단의 직경은 고상 접합에 필요한 압력에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다. 하지만 전극 끝단의 직경은 전류에 의해 발생하는 저항의 크기에 큰 영향을 주는 인자로서 실험에 의해 그 영향을 판단하는 것이 필요할 것으로 사료 된다.



a) D.E.E. : 6mm



b) D.E.E. : 8mm



c) D.E.E. : 10mm



d) D.E.E. : 12mm

Fig. 2-8 Distribution of Pressure at welding zone (C.C.D. : 5mm)

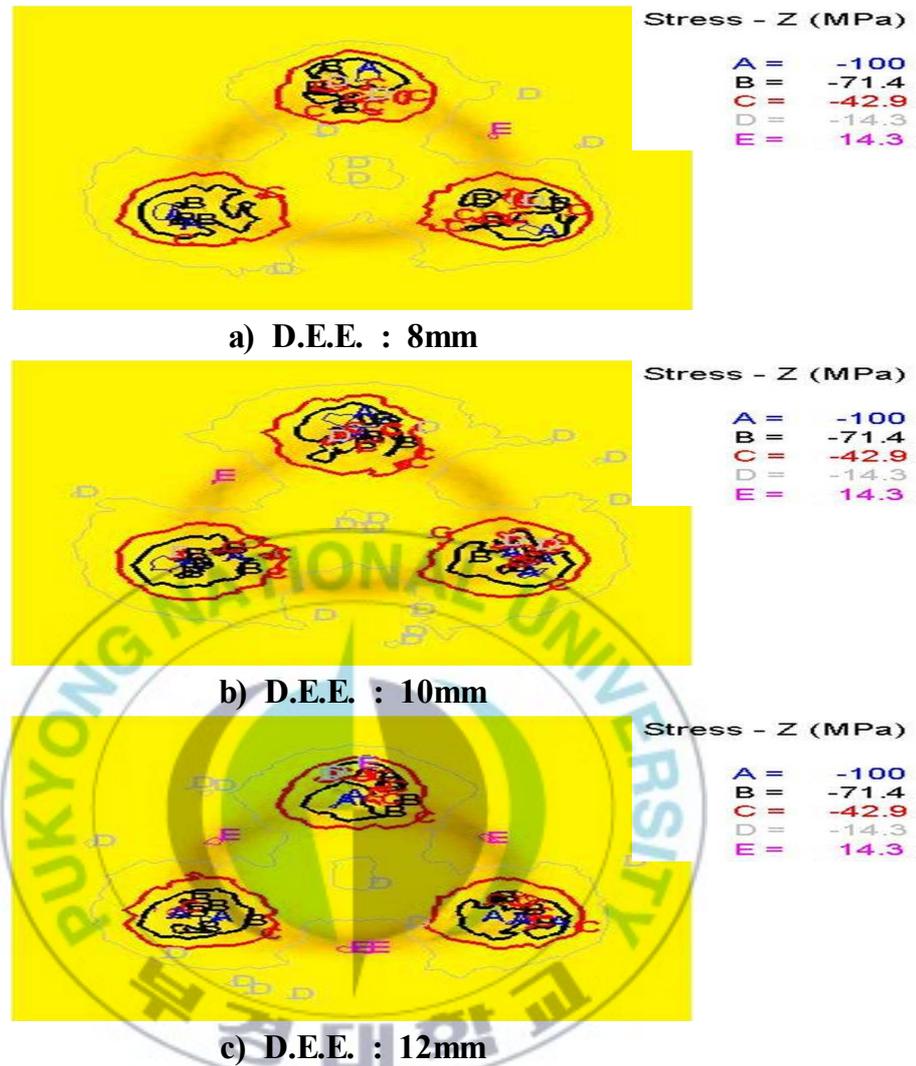


Fig. 2-9 Distribution of Pressure at welding zone (C.C.D. : 7mm)

Fig. 2-8은 진동 전극의 삼각형 외접원의 직경이 5mm일 때 접합부의 압력 분포를 조사한 결과로써 삼각형 형상의 압력 분포를 가지던 Fig. 2-7과는 달리 부분적으로 응력이 퍼져 있음을 관찰할 수 있다. 퍼져있는 주요 압력은 삼각형의 꼭지점 부분과 중앙 부위에 지배적으로 발생 하는 것을 알 수 있으며 주요 압력을 제외 한 나머지 압력인 D도 일정 면적을 차지하고 있다. 삼각형 외접원의 직경이 5mm일 때도 마찬가지로 전극 끝단의 직경이 주요

압력 분포에 대해 주는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 2-9는 삼각형 외접원의 직경이 7mm일 때 접합부의 압력 분포를 조사한 결과로서 주요 압력은 삼각형의 꼭지점에 모두 작용하고 중심부에는 접합에 필요한 압력이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 삼각형 외접원의 직경이 7mm일 때도 전극 끝단의 직경이 주요 압력에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

모든 압력 분포에 대한 시뮬레이션을 종합해 보면 전극 끝단의 직경 변화가 소성 유동에 있어서 필요한 주요 압력에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되어 진다. 그리고 삼각형의 단면적이 커질수록 주요 압력이 차지하는 면적 또한 커지지만 주요 압력이 삼각형의 꼭지점에 집중되는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 삼각형 외접원의 직경이 7mm일 때는 삼각형의 중심부에 주요 압력이 발생하지 않는 것으로 보아 실제 접합 과정에서 접합 강도에 큰 영향을 끼치는 삼각형의 중심부에 비 접합부가 발생할 확률이 높을 것으로 사료된다. 삼각형 외접원의 직경이 7mm일 때를 제외하고는 접합을 하는데 있어 충분한 압력 분포를 가지고 있을 것이라 판단되지만 실제 진동 전극의 설계상 3mm의 외접원은 매우 작은 면적을 가지기 때문에 접합 강도의 저하를 가져올 가능성이 있다. 결과적으로 삼각형 외접원의 직경이 5mm가 될 때 일정한 강도를 가질 수 있으면서 주요 압력의 분포가 중심부를 포함하여 골고루 작용하는 것을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다.

## 2.4 전극 소재 결정을 위한 간이 실험

저항을 이용한 발열에 있어서 전극의 소재가 차지하는 비중은 매우 크다. 실제 본 연구에 사용되는 용접장비는 기존에 사용하는 저항 점용접 장비와는 전혀 다른 용도로 사용되는 장비로서 이 장비에 맞추어 알맞은 전극 소재를 결정하는 것이 중요하다. 그래서 기존에 저항 용접에 사용되는 전극 소재인 크롬동(Cr-Cu)과 전기 전도도(conductivity)가 단계별로 낮은 인청동(phosphor bronze)과 탄소강(S45C)을 포함하여 총 3개의 봉재 소재를 용접 장비에 설치하고 알루미늄 판재를 접합해 보았다. 봉재 전극은 10mm의 직경을 가지고 전극 끝단의 직경은 5mm를 가진다. 용접 조건으로 전류의 세기를 30kA로 설정하고 통전시간을 60cycle로 설정한 다음 동일한 조건에서 접합 실험을 하였다. 그리고 접합된 소재를 Fig. 2-10과 같이 강제로 분해시킨 다음 접합부의 접합 흔적에 대한 발생 여부 및 크기를 관찰 하였다.

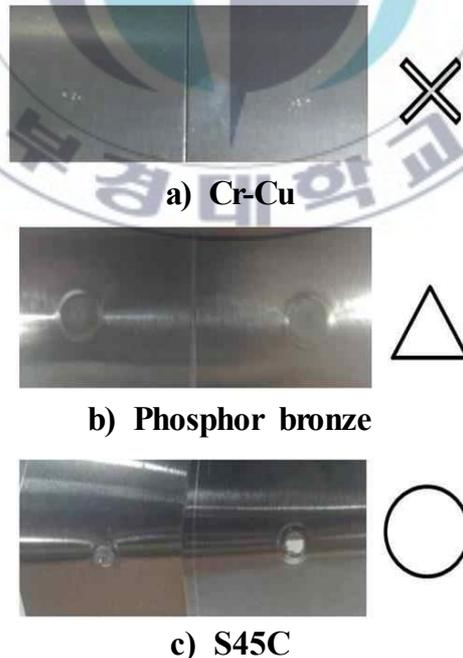


Fig. 2-10 Results of peel test

크롬동을 사용하였을 경우에는 전극에 의한 변형 흔적 및 접합 흔적을 찾아 볼 수 없었고 인칭동의 경우 약간의 접합 흔적과 전극에 의한 소성 변형이 발생하였음을 알 수 있었다. 그리고 탄소강을 사용하여 접합하였을 경우에는 둥근 형상의 접합 흔적을 발견할 수 있었으며, 접합된 소재를 강제로 분리할 때에도 일정한 접합 강도를 가지는 것을 알 수 있었다. 결과 적으로 본 연구에 사용되는 용접 장비에는 진동점접합을 하기위한 전극 소재로 탄소강이 적합함을 알 수 있었다. 그래서 본 연구의 진동점접합 장비에 사용될 전극 소재는 저항점용접에 사용되는 크롬동이 아닌 델타스폿용접의 원리와 유사한 탄소강을 사용하는 것이 좋다는 결론이 나왔다.



## 2.5 진동점접합장비 설계

### 2.5.1 진동점접합 장비의 개념 설계

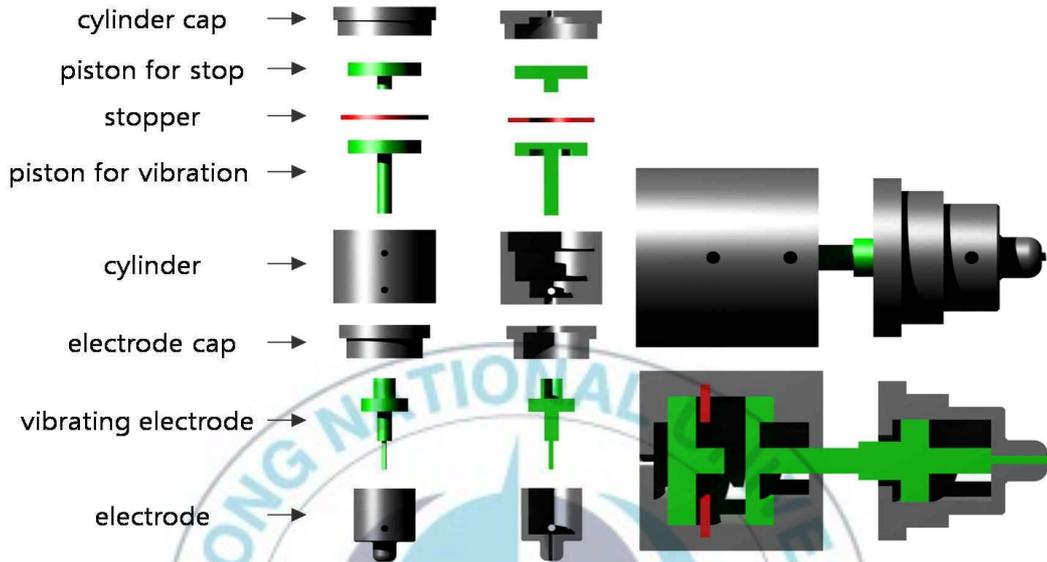


Fig. 2-11 3D designed vibration-spot welding equipment

진동점접합 장비의 설계는 CATIA V5에 의한 3D설계와 AutoCAD2008을 이용한 2D설계로 진행 하였다. Fig. 2-11은 CATIA V5로 개념 설계 되어진 진동점접합 장비의 구조를 나타내고 있다. 전극과 실린더가 일치된 타입에서 실린더부(cylinder parts)와 전극부(electrode parts)를 따로 분리하여 전극부의 교체가 쉽도록 하였다. 다음으로 피스톤의 전진과 후진에 대한 압력을 비슷하게 하기 위하여 복귀스프링(return spring)을 사용하지 않고 왕복동(reciprocating) 실린더의 형태로 설계하였다.

## 2.5.2 진동점접합 장비의 상세 설계

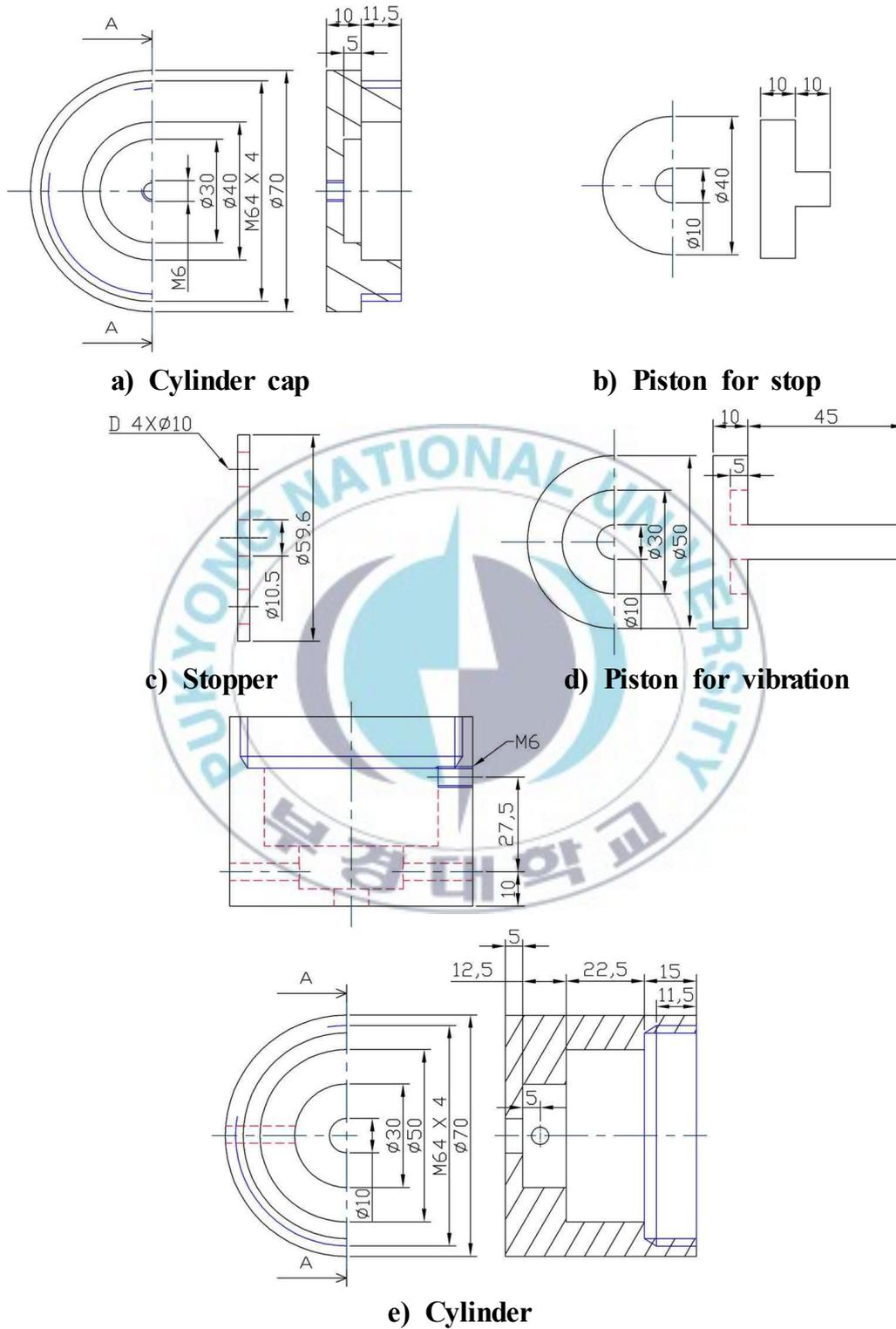


Fig. 2-12 Drawings of the cylinder parts

Fig. 2-12는 AutoCAD를 이용하여 실린더를 구성하는 요소를 상세 설계한 도면이다. 실린더부에 해당하는 부품은 총 5가지이고 기타 씰링(sealing)과 보정용 스프링은 생략 하였다. a)는 실린더 캡(cylinder cap)으로서 실린더를 밀봉하는 역할과 동시에 정지 피스톤의 가이드 역할을 병행하도록 설계 되어 있다. 즉, 복합 실린더 구조에 있어서 실린더 캡의 역할은 정지 피스톤과 한 세트가 되어 또 하나의 실린더 구조를 형성한다. 그리고 스토퍼(stopper)가 실린더 상의 한 지점에 고정이 될 수 있도록 스토퍼를 잡아주는 역할 또한 실린더 캡이 하는 역할이다. b)는 진동이 끝난 후에 전극의 끝단과 진동 전극의 끝을 일치 시켜주도록 하는 역할을 수행하며 행정거리는 약 1.4mm에 해당 하도록 설계 되어져 있다. c)는 진동용 피스톤과 정지용 피스톤의 사이에 존재 하면서 진동용 피스톤의 후방 정지와 정지용 피스톤의 전방 정지 위치를 결정해주는 역할을 한다. d)는 진동이 이루어질 수 있도록 진동을 공급해주는 역할을 수행하는 피스톤이다. 충분한 압력이 발생할 수 있도록 관련 공식을 이용하여 피스톤의 직경을 40mm로 설정하였고 뒤에서 미는 힘과 복귀하는 힘의 크기가 서로 비슷하게 작용하도록 하기위해서 앞부분에는 교정용 스프링이 장착 될 수 있는 홈을 파 놓았다. 실린더에 해당하는 e)는 에어 호스(air hose)가 연결 될 수 있도록 두 개의 니플 구멍(nipple hole)을 설계하였다.

Fig. 2-13은 전극 부분에 해당하는 상세 설계도로서 각각의 부분에 해당하는 부품이 서로 다른 재질을 가지고 있다. 먼저 a)에 해당하는 전극 캡은 용접기로부터 받은 전류가 전극에 잘 전달될 수 있도록 크롬동으로 설계되었다. 그리고 전극과 나사 결합을 하여 하나의 실린더 형상이 될 수 있도록 설계 되어져 있다. 다음으로 b)에 해당하는 진동 전극은 시뮬레이션을 바탕으로 하여 외접원이 5mm인 삼각형 형태로 설계 되어졌으며 단차를 두어 행정 거리가 총 2.8mm가 되도록 설계되어져 있다. 진동 전극의 경우 높은

압력과 열에 견뎌야 하기 때문에 열간금형강(SKD61)을 사용하였다. 마지막으로 전극에 해당하는 c)는 전극 결정을 위한 선행 실험을 바탕으로 하여 실험용 용접기에서 충분한 소성 유동 온도가 발생 할 수 있도록 기계구조용 탄소강(S45C)을 사용 하였다. 마찬가지로 전극 캡과 결합하여 진동 전극의 행정 거리가 2.8mm가 될 수 있도록 설계 되었다.

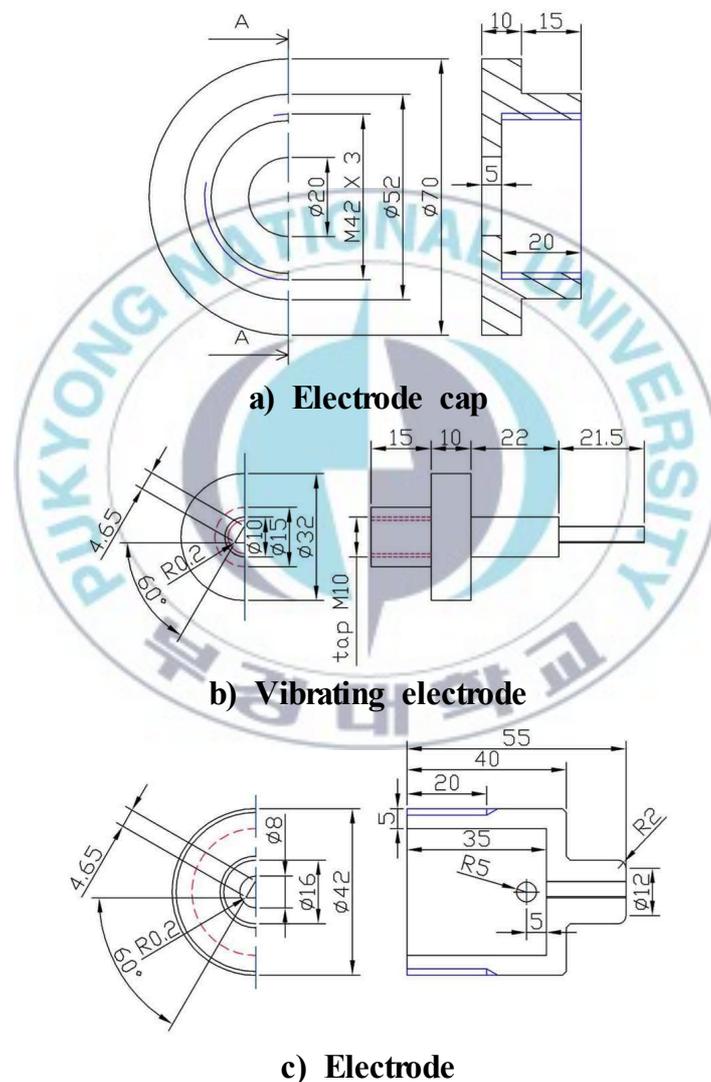


Fig. 2-13 Drawings of the electrode parts

### 2.5.3 PLC제어 회로 및 공압 회로 설계

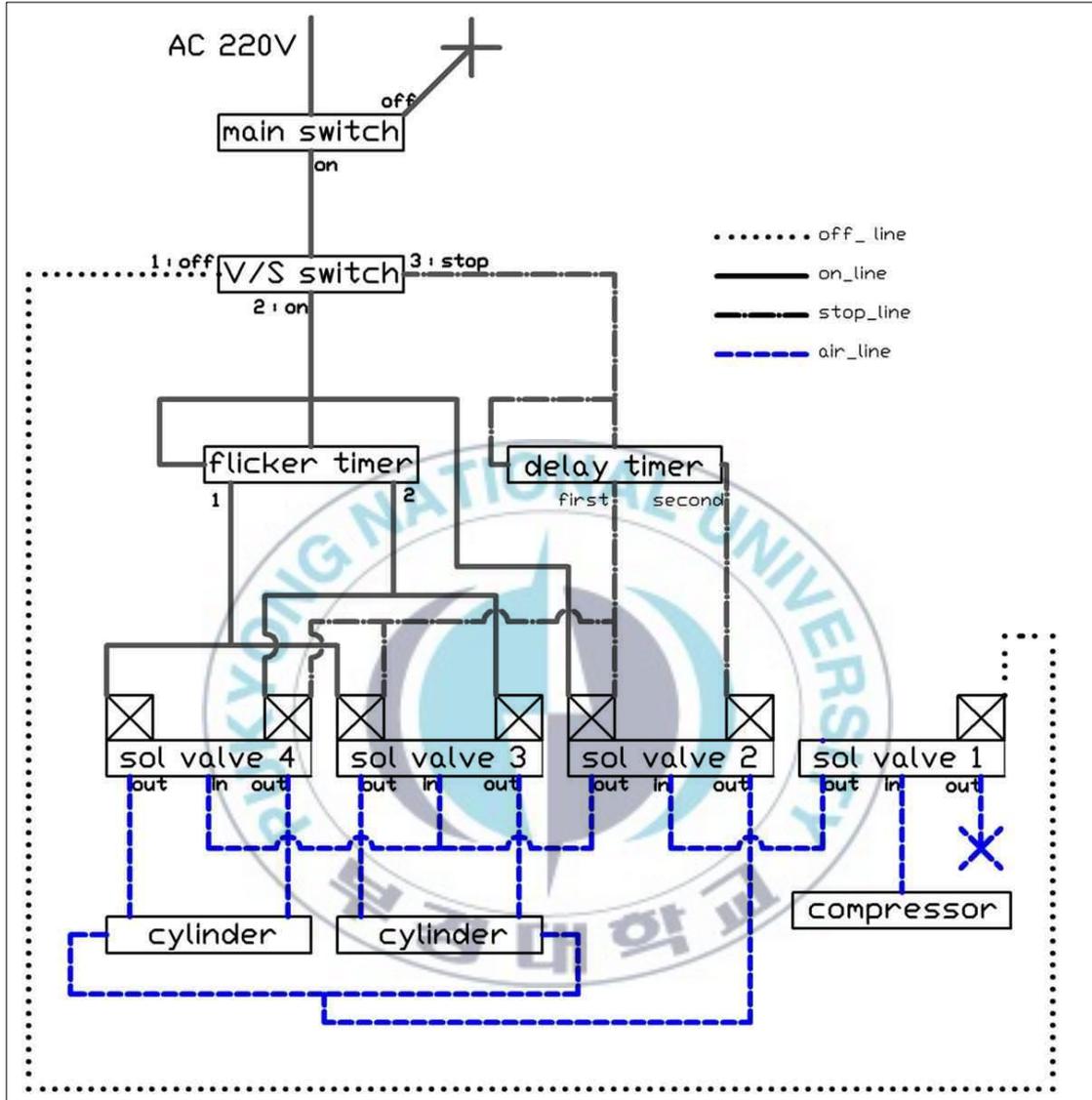


Fig. 2-14 Concept of operating circuit

Fig. 2-14는 작동 회로(operating circuit)에 대한 개념도이다. 기본적으로 220V에 교류를 사용하고 있으며 전기 회로부와 공압 회로부로 나눌 수 있다. 전기 회로부를 살펴보면 메인 전력의 공급과 차단을 담당하는 메인 스위치(main switch)를 지나서 진동과 정지의 상태를 결정시켜주는 진동/정지

스위치로 전력이 공급되게 된다. 우선 진동 상태에 스위치가 놓이게 되면 플리커 타이머(flicker timer)로 전력이 공급된다. 여기서 플리커 타이머는 전기가 공급된 시점으로부터 두 개의 출구로 정해진 시간 간격으로 전기를 번갈아 가며 공급하도록 되어 있다. 플리커 타이머의 1번과 2번 접점은 3번과 4번 솔레노이드 밸브(solenoid valve)와 연결 되어 있다. 3번과 4번의 솔레노이드 밸브는 플리커 타이머에 의해 서로 교차되면서 작동하며 서로 반대로 작동하는 솔레노이드 밸브에 의해 실린더의 피스톤 또한 서로 반대로 진동하게 된다. 다음으로 정지 위치에 스위치가 가있을 경우 딜레이 타이머(delay timer)에 전기가 공급 된다. 딜레이 타이머는 전기가 공급된 시점으로부터 일정 시간이 지남에 따라 첫 번째 접점에서 두 번째 접점으로 전기를 공급해 주는 역할을 한다. 첫 번째 접점의 경우 3번과 4번 솔레노이드 밸브를 통해 모든 진동 피스톤을 후방으로 복귀 시킨다. 그리고 일정 시간이 지나면 2번 솔레노이드 밸브의 한쪽에 전기를 공급하여 복합 실린더의 뒤쪽에 달린 정지 피스톤을 작동 시키게 된다. 플리커 타이머와 딜레이 타이머는 시간 조절이 가능하여 초당 진동 횟수 및 정지 지연(stop delay)시간을 조절할 수 있다.

## 제 3 장 알루미늄 판재의 진동점접합 실험

### 3.1 실험 장치 및 시편

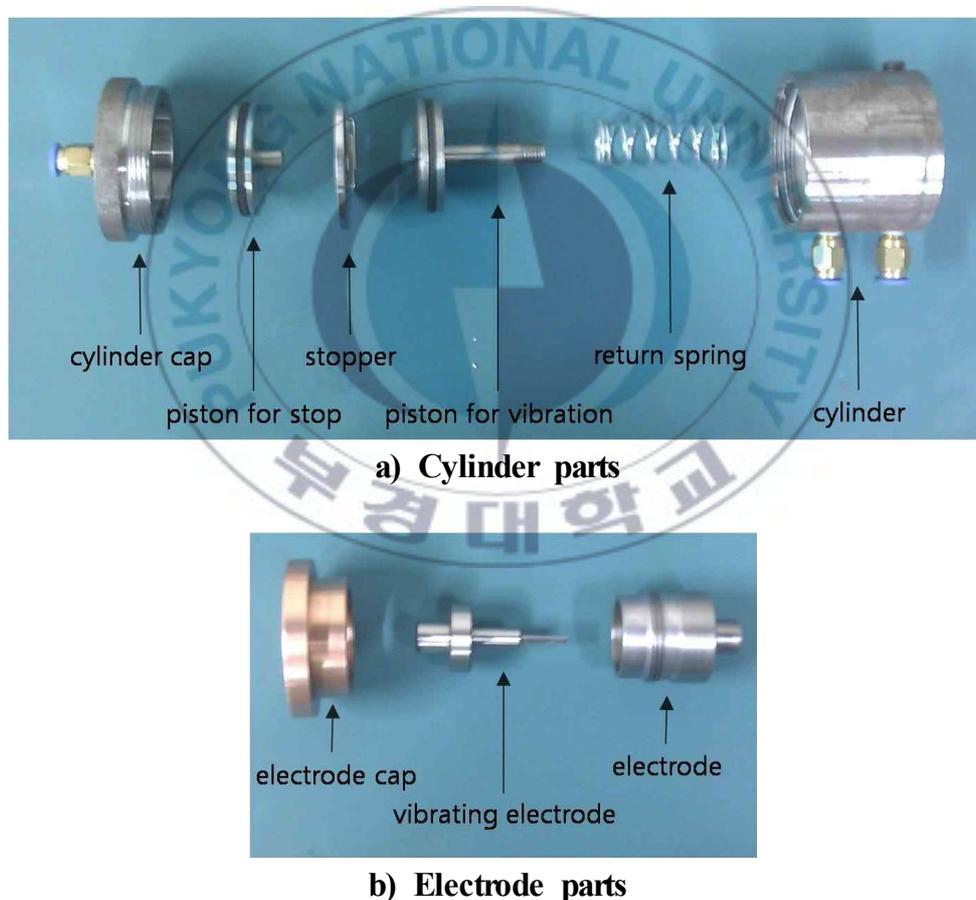
#### 3.1.1 진동점접합 실험 장치



Fig. 3-1 Welding equipment

실험은 Fig. 3-1에서 보는 바와 같이 특정 용접에 사용되는 용접 장비를 이용하여 실험을 진행 하였다. 이 용접 장치는 기본적으로 두 개의 봉재를 저항열과 압력으로 맞대기(butt) 용접하는 장비로서 저항을 이용한 실험을 할 때 다용도로 사용이 가능하다. 하지만 여러 가지 실험이 용이하나 단일 실험으로 제작된 특수 실험 장치와 비교 하였을 때 다소 오차가 발생할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 본 장비는 용접 타이머(welding timer)를 이용하여 전류의 세기(current)와 통전 시간(energization time) 및 가압 조건 등의 용

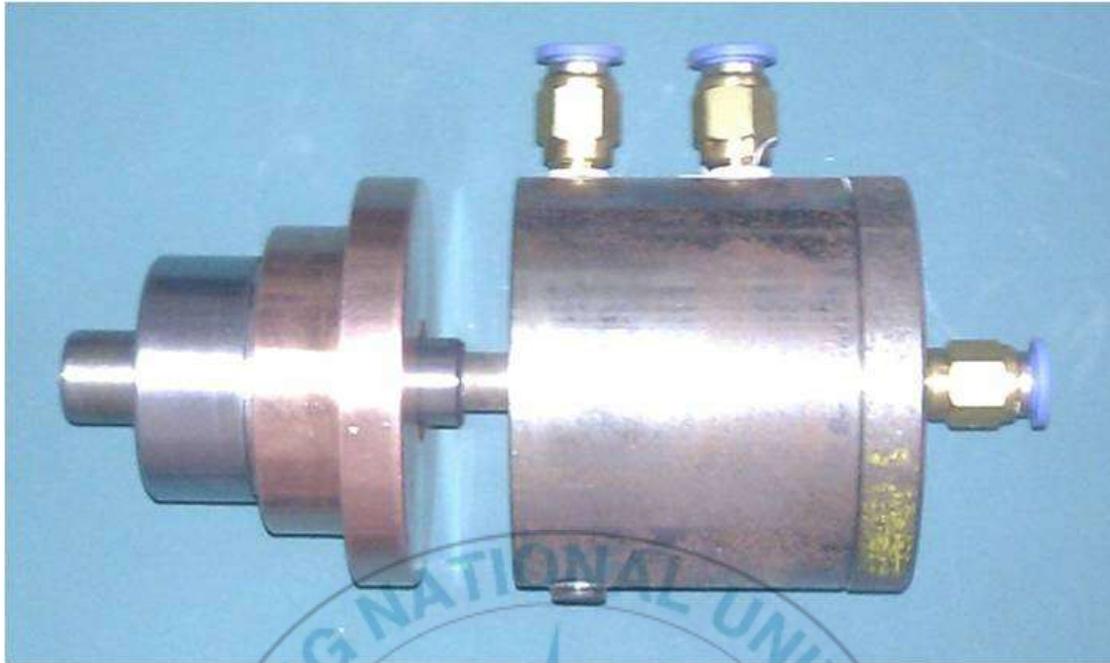
접 조건을 설정 할 수 있고 작동 장치(operation panel)를 이용하여 용접 실행 및 정지 그리고 유압과 관련된 작동 장치를 조정 할 수 있다. 통전에 사용되는 전류는 220V 교류를 사용하기 때문에 직류를 사용하는 용접기에 비하여 다소 높은 전류를 요구 한다. 용접에 사용할 수 있는 최대 전류의 세기는 50kA이고 가압력이 최대 145MPa까지 나올 수 있는 실린더를 사용하고 있다. 기타 자동화가 가능하도록 연속 작업 시스템을 구성할 수 있는 프로그램이 내장 되어 있다.



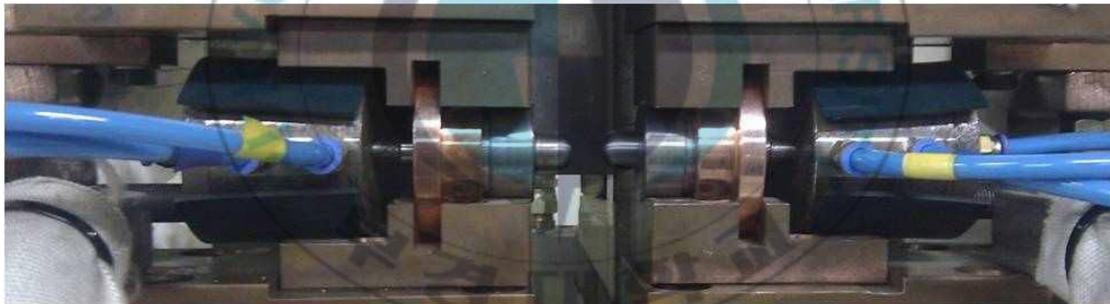
**Fig. 3-2 Vibration-spot welding equipment**

Fig. 3-2는 설계를 바탕으로 제작된 진동점접합 장비를 나타내고 있다. Fig. 3-2의 a)는 진동점접합 장비의 실린더부에 해당하는 부품을 나타내고 있다. 각각의 피스톤에는 공기의 유출을 막기 위한 씰링처리가 되어있고 에어 호스의 연결을 위한 2개의 니플이 장착되어 있다. 피스톤의 경우 앞에서 받는 압력과 뒤에서 받는 압력이 면적의 차이에 의해 틀려지게 되므로 보정용 스프링을 삽입하였으며 그 압력은 관련 공식을 토대로 피스톤 뒤쪽에서 받는 압력과 앞쪽에서 받는 압력의 차에 해당하는 값을 가진다. 기타 약간의 치수 오차에 의해 발생 할 수 있는 진동 피스톤과 진동 전극 사이의 중심축 불일치를 완화하기 위하여 두 개의 부품이 나사 체결되도록 제작되었다. Fig. 3-2의 b)는 진동점접합 장비의 전극부에 해당하는 부품을 나타내고 있다. 진동 전극과 전극의 삼각형 형상은 높은 정밀도를 가지도록 제작되어 진동 과정에서 알루미늄이 실린더 내부로 유입되는 현상을 줄였다. 전극 캡과 전극은 나사 결합되어 진동 전극이 움직일 수 있는 하나의 실린더가 되도록 제작 되었다.

실린더부와 전극부는 서로 나사 결합되어 Fig. 3-3의 a)와 같은 형태로 진동점접합 장비가 완성된다. 완성된 진동점접합 장비는 최종적으로 Fig. 3-3의 b)와 같은 형태로 용접 장비에 장착된다. 용접 장비에는 진동점접합 장비가 안착 될 수 있도록 특수 설계 되어진 전극이 장착되고 두 개의 진동점접합 장비는 특수 설계되어진 전극에 안착된다. 여기서 실린더부에 불필요한 전류가 공급되지 않도록 하기 위하여 실린더의 외벽에 절연체(Insulator)를 같이 덮어 준다. 그리고 각각 해당하는 에어 호스를 실린더에 장착 하고 장비의 평형을 맞춘다. 그리고 삼각형이 서로 엇갈리도록 전극을 회전시켜 조정 한다. 조정 과정이 끝나면 용접 장비의 유압 실린더를 작동 시켜 진동점접합 장비를 고정 시킨다. 이렇게 모든 과정이 끝나면 진동점접합을 할 수 있는 장비가 준비된다.



a) Before assembling at welding equipment

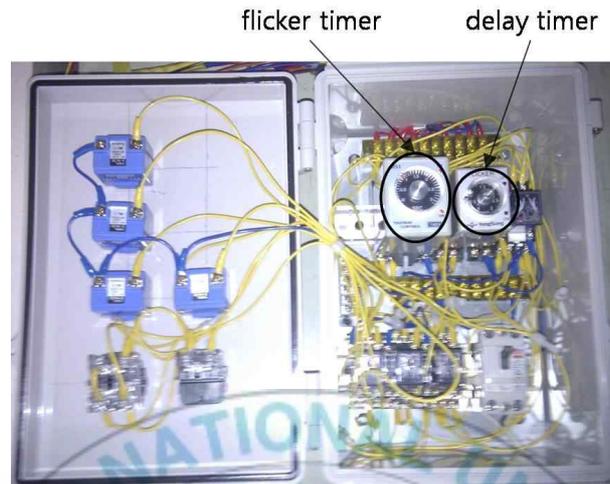


b) After assembling at welding equipment

**Fig. 3-3 Assembled vibration-spot welding equipment**

Fig. 3-4는 제작된 컨트롤 박스(control box)의 내부와 외부 형상을 보여 주고 있다. 내부에 장착된 플리커 타이머와 딜레이 타이머는 다이얼(dial) 방식으로 되어 있기 때문에 다이얼을 돌림으로써 플리커 타이머는 0.1초에서 12초 까지 0.1초 단위로 진동 시간을 조절할 수 있고 딜레이 타이머는 0.1초에서 6초 까지 0.1초 단위로 정지 지연 시간을 조절할 수 있다. 컨트롤 박스의 외부에는 접합 단계를 쉽게 알아 볼 수 있도록 정지 과정에 해당하는 적색

등과 진동 과정을 빛의 깜빡임으로 확인할 수 있는 황색등과 같은 표시 등이 설치되어있다.



a) Internal structure



b) Exterior structure

Fig. 3-4 Vibration-spot welding equipment (Control box)

### 3.1.2 알루미늄5052

판재의 점접합 성능을 판단하기 위해서는 주로 정적인장전단시험을 이용한다. 이 시험을 하기 위해서는 연속적으로 점접한 판재를 규격에 명시된 크기로 시편을 채취하여 접합 성능 시험을 하는 것이 일반적이지만 본 연구에 사용된 접합 장비의 공간적 한계로 인하여 미리 규격에 응시된 크기의 시료를 이용하여 실험을 하였다. 실험에 사용된 알루미늄 판재의 크기 및 함유 물질은 Table 3-1에서 보는 바와 같다. 그리고 실험에 사용된 알루미늄 5052의 주요 물성값은 Table 3-2에 응시 되어 있으며 특수한 열처리가 되지 않은 알루미늄5052-O의 판재를 사용 하였다.

**Table 3-1 Data of aluminum5052**

<b>Component</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>other</b>
<b>(%)</b>	<i>95.65</i>	<i>0.3</i>	<i>0.1</i>	<i>0.4</i>	<i>2.6</i>	<i>0.8</i>	<i>0.15</i>
<b>size (mm)</b>	<b>thickness</b>		<b>width</b>		<b>height length</b>		
	<i>1.5</i>		<i>150</i>		<i>50</i>		

**Table 3-2 Properties of aluminum5052**

<b>Tensile strength (Ultimate)</b>	<i>193 MPa</i>
<b>Tensile strength (Yield)</b>	<i>89.6 MPa</i>
<b>Modulus of elasticity</b>	<i>70.3 GPa</i>
<b>Melting point</b>	<i>607.2 ~ 649 °C</i>
<b>Annealing temperature</b>	<i>343 °C</i>

### 3.2 선행 실험

본 실험에 앞서서 접합이 가능한 전류의 세기와 통전 시간을 알아보기 위하여 15개의 조건을 기준으로 전극 끝단의 직경이 10mm일 때와 8mm일 때에 대해 진동점접합을 이용한 선행 실험을 진행 하였다. 점접합의 접합 성능을 간이적으로 판단할 수 있는 방법으로는 접합부를 강제로 뜯어서 용접부를 관찰하는 방법이 있다. 필 테스트(peel test)라고 불리는 이 시험 방법은 점접합부의 직경 또는 파괴 형태 등을 관찰 하는 방법으로서 쉽게 접합이 가능한 조건을 찾을 수 있는 방법이다. 15개의 조건으로 선행 실험한 결과 Table 3-3과 같은 결과가 나왔고 접합부의 상태에 따라 5가지의 결과로 분류할 수 있었다. 5가지의 결과는 접합 흔적 및 파괴 형태에 따라 분류를 한 것이고 접합 흔적이 전혀 존재하지 않는 한 가지 형태와 계면 파단이 발생 하였으나 접합 흔적의 크기가 서로 다른 세 가지 형태 및 계면 파단이 아닌 모재 금속으로 부터의 파단이 발생하는 한 가지 형태로 구성 되어 있다.

전극 끝단의 직경이 8mm일 때를 살펴보면 대부분의 조건에서 두 모재 사이에 순수 금속 표면이 발생하지 않아 접합이 일어나지 않았다. 하지만 전류의 세기가 점차 강해지고 통전시간이 늘어남에 따라 약간의 접합 흔적이 발생하게 되고 조건이 일정 크기 이상으로 가게 되면 원형의 형상을 가지는 접합 흔적이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 전류의 세기가 40kA이고 통전시간이 90cycle일 때 계면 파단이 아닌 모재 금속으로 부터의 파단이 발생 하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과가 나온 것은 실험에 사용된 용접 장비가 교류를 사용하기 때문에 다소 높은 전류를 필요로 하고 알루미늄 전용 용접장비가 아닌 철계 금속을 용접할 때 주로 사용하는 용접장비이기 때문에 비교적 낮은 전류 및 통전 시간에서 충분한 온도가 발생되지 않았기 때문이라고 판단된다. 전극 끝단의 직경이 10mm일 때를 살펴보면 8mm일 때와 유사한 결과가 나오는 것을 알 수 있다. 보통 저항은 단면적이

작을수록 높게 나타나는 것으로 알려져 있으나 이번 실험의 경우 큰 차이가 나지 않았다. 이러한 현상으로 보아 두 전극 끝단의 표면 조도가 급격히 차이가 나서 저항 값이 달라졌거나 편심이나 가공상의 오차나 진동점접합 장비의 설치도중에 발생한 오인으로 인하여 일부 면적만이 소재에 접촉했을 가능성이 있다. 하지만 두 전극모두 전류의 세기가 40kA이고 통전시간이 90cycle일 때 모재로부터의 파단이 발생하였으므로 동일 조건으로 진동점접합이 가능함에는 변함이 없다.

**Table 3-3 The results of the preceding experiment**

Diameter	Energization time	30cycle	60cycle	90cycle
	Current			
8mm	20kA	×	×	×
	25kA	×	×	×
	30kA	×	×	△
	35kA	×	△	☆
	40kA	△	▲	○
10mm	20kA	×	×	×
	25kA	×	×	×
	30kA	×	×	△
	35kA	×	△	▲
	40kA	×	▲	○



### 3.3 진동점접합 실험 방법 및 조건

실험 방법은 조정이 완료된 점접합장비에 두 장의 알루미늄 판재를 규격에 맞게 겹친 다음 고정 장비를 이용하여 고정 시킨다. 그리고 진동점접합 전극을 판재가 고정될 수 있을 만큼 가압한 뒤 접합 과정 중에 더 이상 가압이 되지 않도록 유압을 차단시킨다. 용접 타이머를 이용하여 조건을 설정하고 접합 스위치를 누른다. 전류의 공급이 시작됨과 동시에 진동 장비를 작동 시키고 2회의 진동이 끝남과 동시에 진동 장비를 정지 시킨다. 접합이 끝난 뒤에는 유압을 재가동시켜 전극과 전극 사이를 후퇴시킨 다음 시편을 뺀다.

**Table 3-4 Experimental conditions**

<b>Squeeze time</b>	<i>30 cycle</i>
<b>Energization time</b>	<i>90 cycle</i>
<b>Current</b>	<i>40 kA</i>
<b>Vibration frequency</b>	<i>Twice (0.6sec × 2)</i>
<b>Stop delay</b>	<i>0.3 sec</i>

진동점접합 실험의 조건은 선행 실험에 의해 결정된 전류의 세기 40kA와 통전 시간 90cycle을 바탕으로 Table 3-4와 같이 결정 되었으며 접합시 진동 횟수는 1회 진동에 소요되는 시간 0.6초를 기준으로 총 2회 반복을 하였다. 그리고 정지에 지연되는 시간 0.3초를 포함하여 총 1.5초의 접합 시간이 소

요 된다. 이는 60Hz교류를 사용하는 접합 장비의 통전 시간인 90 cycle과 동일한 시간이다. 전극에 의한 가압은 고정 하여서 진동 전극에 의한 가압을 제외한 가압력은 존재 하지 않지만 초기 가압시간(squeeze time)을 30초로 지정 해줌으로써 통전과 동시에 전극이 소재에 접촉하는 것을 방지하였다.



### 3.4 진동점접합 실험 결과 및 고찰

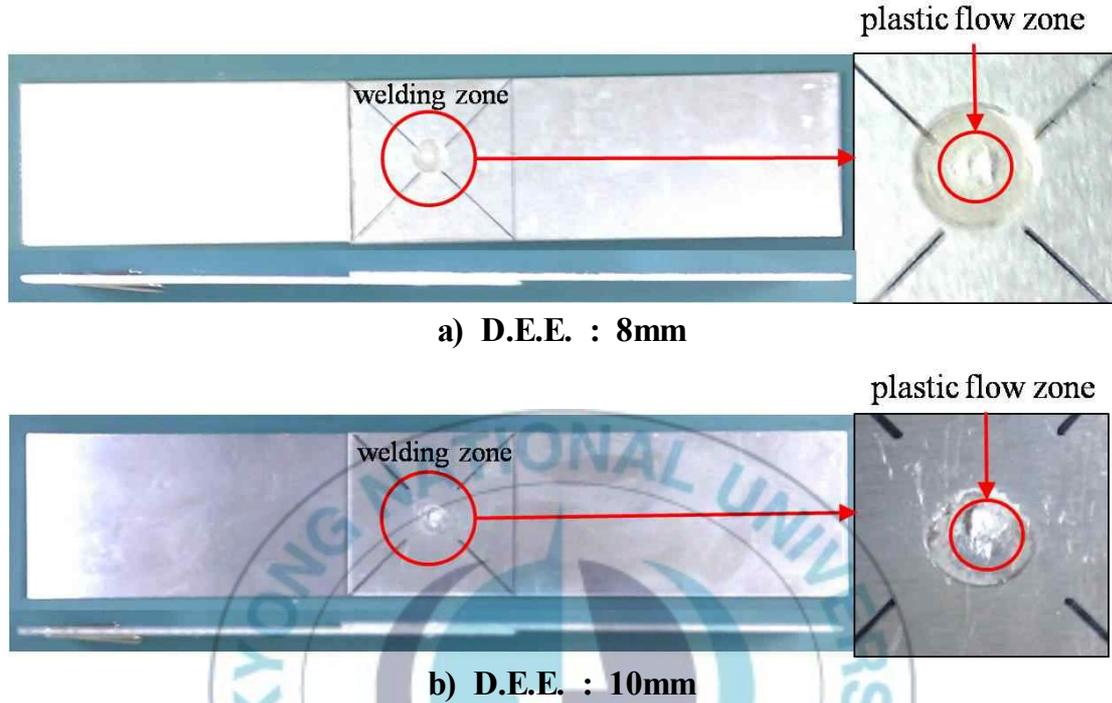


Fig. 3-5 Vibration-spot welded aluminum plate

Fig. 3-5는 전극 끝단의 직경이 8mm일 때와 10mm일 때의 진동점접합된 알루미늄 판재를 보여 주고 있다. 두 판재사이에 전극이 접촉된 흔적과 진동 전극이 접촉된 형상으로 접합된 지역을 확인 할 수 있다. 외관상으로 과도한 저항으로 인한 표면의 날림현상(surface flash)이 발견 되지 않았고 소성 유동 지역(plastic flow zone)이 선명 하게 나타남을 알 수 있다. 하지만 전극 끝단의 직경이 10mm일 때는 전극의 모든 표면이 알루미늄 판재에 접촉하지 못하고 다소 편심이 발생하였고 소성 유동 지역에서의 삼각형 형상이 모재 표면으로 부터 다소 돌출된 형상이 발견 되었다. 우선 편심이 발생한 것으로 보아 선행 실험에서 전류 세기와 통전 시간이 비슷한 시점에서 접합이 이루어졌던 것은 편심에 의한 영향이 큰 것으로 짐작 된다. 이를 역

으로 생각해 볼 때 전극 끝단의 직경이 10mm일 때 필요한 전류의 세기 및 통전 시간은 전극 끝단의 직경이 8mm일 때 필요한 전류의 세기 및 통전 시간과 비교 했을 때 더 클 것으로 추측할 수 있다. 편심의 발생 원인은 진동 점접합 장비의 조정 과정에서 정확한 중심선을 맞추지 못한 것과 전극의 가공상 미세한 오차에 의한 것이라 생각된다. 그리고 소성 유동 지역에서의 돌출된 삼각형은 편심에 의해 발생하는 불균일한 온도 분포로 인해 소재가 식기 시작하는 시점의 정지 과정이 제대로 이루어지지 않았기 때문이라 사료된다.



## 3.5 진동점접합의 접합 성능 평가

### 3.5.1 인장 전단 시험 결과 및 고찰

진동점접합의 접합 성능을 평가하기 위하여 KS B 0801규격을 기초한 인장 전단 시험을 수행 하였다. 시험편은 전극 끝단의 직경당 5개씩 총 10회 반복 시험 하였으며 각각의 시험에 해당 하는 최대 인장 하중을 측정 하였다. 그리고 Fig. 3-6과 Fig.3-7과 같이 시험 후의 접합부 계면 형상을 관찰 하였으며 접합 지름을 KS B 0851에 나와 있는 대로 용접 계면에 대한 반경의 최대값과 최소값을 측정한 뒤 산술 평균한 값으로 접합부의 접합 면적을 구 하였다. 이렇게 구해진 면적과 최대 인장 전단 하중을 Table 3-5와 같이 정리 하였다.

우선 접합부의 면적과 최대 인장 하중을 비교해 보면 대체적으로 접합부의 면적이 클수록 최대 인장 하중이 높아지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 점용접 시험편을 인장 전단 시험했을 경우 시험편이 맞물려 힘이 작용하는 선상과 접합부의 위치가 중심선에서 벗어나 있으므로 접합부는 시험 중에 인장과 굽힘에 의하여 인장응력과 수직응력을 동시에 받게 된다. 하지만 본 시험에서는 Fig. 3-6과 Fig.3-7에서 보는 바와 같이 모두 계면에서 파단이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 접합부에 순수한 전단 응력만이 걸렸음을 짐작 할 수 있다. 실제 인장 전단 시험에서의 접합부에 걸리는 인장력은 지그에 물린 점과 접합부 사이의 거리에 영향을 받게 된다. 이렇게 모든 시험편에서 계면 파단이 일어난 것은 인장 시험기에 시험편을 설치 할 때 시험편의 반 이상을 지그(jig)에 물렸기 때문이라 생각 된다.

Table 3-5 Results of the tensile test

Electrode diameter	No.	Ultimate load (N)	Diameter welded (mm)	Welding area (mm <sup>2</sup> )
8mm	1	2728.62	4.65	16.97
	2	3363.73	5.31	22.13
	3	2942.22	4.93	19.08
	4	3016.54	5.02	19.78
	5	3928.13	5.43	23.15
	<b>Average</b>	<b>3195.85</b>	<b>5.07</b>	<b>20.22</b>
10mm	1	2069.2	5.35	22.48
	2	2598.76	6.12	29.42
	3	2147.66	5.06	20.07
	4	2588.96	5.41	22.99
	5	2677.22	5.43	23.12
	<b>Average</b>	<b>2416.36</b>	<b>5.47</b>	<b>23.62</b>

다음으로 전극끝단의 직경에 따라 비교를 해보면 전극 끝단의 직경이 8mm일 때가 10mm일 때보다 평균 단면적이 작음에도 불구하고 높은 최대 인장 전단 하중을 버티는 것을 알 수 있다. 보통 면적이 클수록 높은 하중을 지탱해야 하지만 이와 같은 결과가 나오는 것은 압력의 차이로 설명이 가능하다. 열영향에 의한 순수 금속 표면이 넓게 발생 되었으나 순수 금속 간의 강한 접합을 유도할 수 있는 압력이 넓게 분포되지 못해서 강한접합

지역이 작게 발생하는 경우를 생각 할 수 있다. 전극 끝단의 직경이 10mm 일 때 편심의 영향으로 진동 전극이 다소 기울어진 형태로 압력을 가해 주었기 때문에 실제 정확히 압력이 발생한지역이 한정될 가능성이 있다. 이러한 이유로 열에 의해 순수 금속층이 들어나서 상호 확산에 의해 접합된 지역이 넓고 진동 전극에 의해 강하게 접합된 지역이 작기 때문에 발생하는 결과라 사료 된다. 이러한 고찰은 Fig. 3-7로도 확인이 가능하다 Fig. 3-6에서 둥근 형상의 고른 접합 계면과 달리 Fig. 3-7에서는 두 부분의 접합 계면이 확연히 들어나는 것을 알 수 있다. 또한 소성 유동 접합부에 해당하는 지역도 부분적으로 작게 나타나는 것을 관찰 할 수 있다.

두 개의 전극 직경에 대한 접합부 직경을 살펴보게 되면 규격에서 요구하고 있는 안전한 용접부 직경인  $5\sqrt{\text{판재의 두께}}$  에는 미치지 못하였으나 저항용접에 있어서 전극의 교체를 요구하는  $4\sqrt{\text{판재의 두께}}$  보다는 큰 것을 알 수 있다. 즉, 적정 접합부 직경을 얻을 수 없었지만 공구의 교체가 필요한 최소 접합부 직경은 넘고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 3-8은 Table 3-5를 바탕으로 그려진 그래프로서 KA B ISO 18595규격에서 권장하고 있는 점 용접된 알루미늄 판재의 평균 용접 전단강도와 진동 점접합된 시험편의 최대인장전단하중을 비교해 놓았다. 본 실험에 사용된 알루미늄 5052소재의 경우 평균 용접 전단강도로 2779.2N을 요구하고 있고, 그래프에서도 확인 할 수 있듯이 전극 끝단의 직경이 8mm일 때 접합 강도가 규격에서 요구하는 평균 용접 전단강도에 근접함을 알 수 있고, 평균적으로 웃돌고 있음을 확인 할 수 있다.



a) No. 1



b) No. 2



c) No. 3



d) No. 4

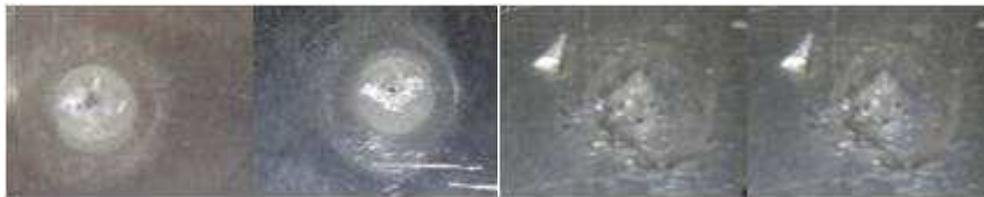


e) No. 5

**Fig. 3-6 Shape of interfacial on welding zone (8mm)**



a) No. 1



b) No. 2



c) No. 3



d) No. 4



e) No. 5

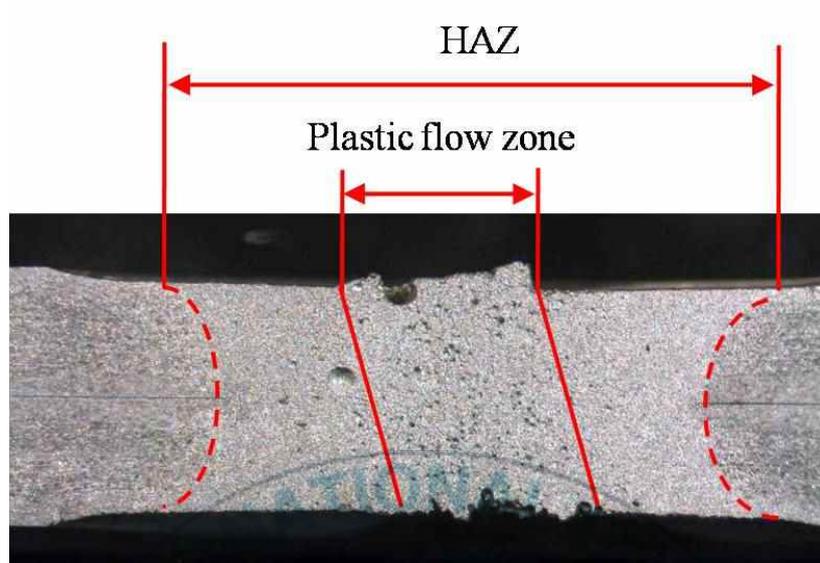
**Fig. 3-7 Shape of interfacial on welding zone (10mm)**



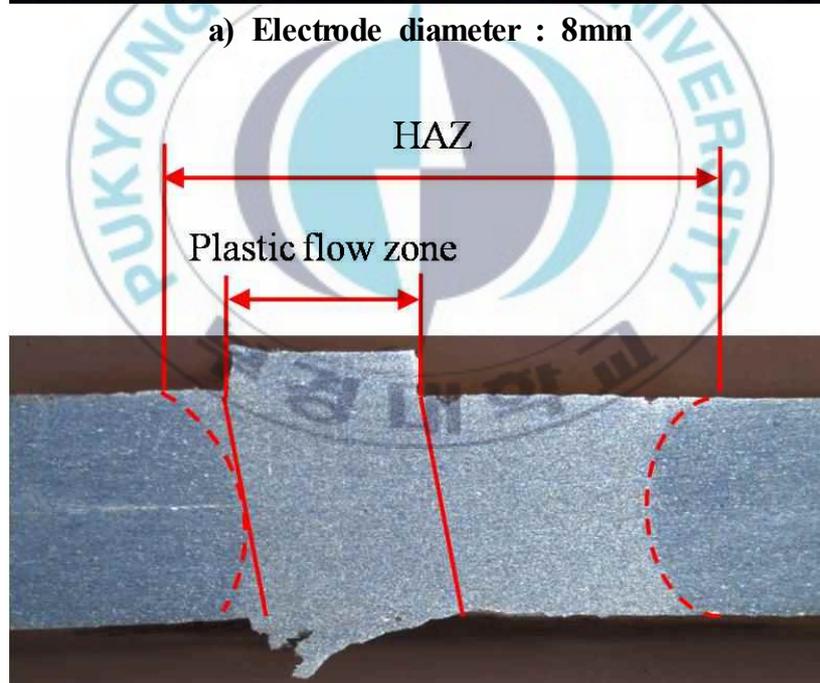
Fig. 3-8 Tensile test results and a comparison of the raw material



### 3.5.2 단면촬영 결과 및 고찰



a) Electrode diameter : 8mm

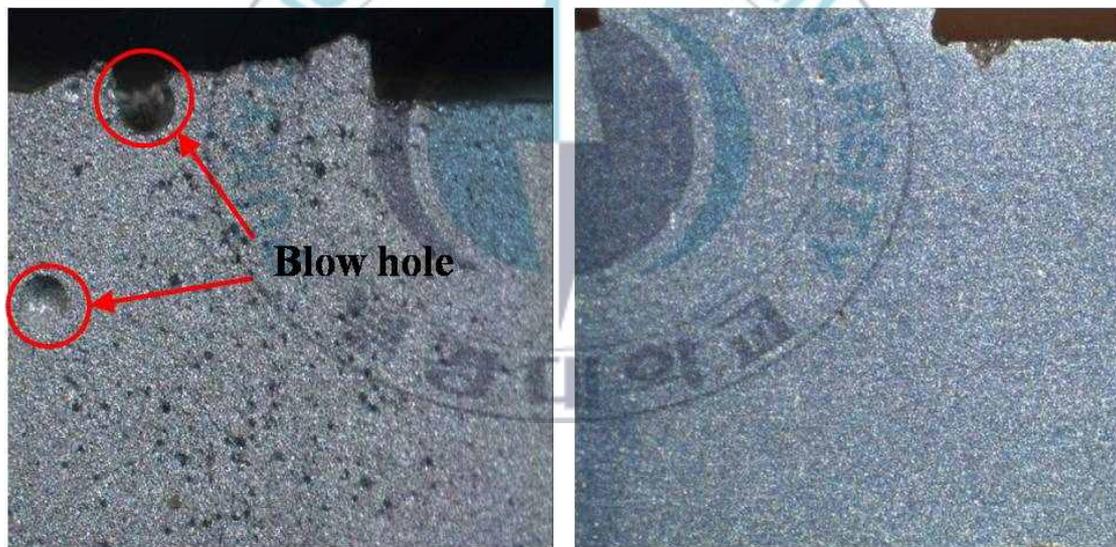


b) Electrode diameter : 10mm

**Fig. 3-9 Cross-section image of welding zone (×12.5)**

Fig. 3-9는 두 개의 서로 다른 전극 끝단의 직경에 대한 12.5배율로 확대된 단면 사진을 나타내고 있다. 접합부의 단면은 열에 의해 재결정화된 부분인

열영향부(HAZ : Heat affected zone)와 진동 전극의 진동에 의해 발생된 소성 유동부로 나눌 수 있다. 전극 끝단의 직경이 10mm일 때 두 개의 전극이 편심을 이루었음을 확연히 알 수 있고 정지 과정이 순조롭지 못하여 일부 삼각형 형상이 모재 금속의 표면보다 높게 돌출된 것을 확인 할 수 있다. 하지만 두 경우 모두에서 삼각형 부분의 돌출 형상이 발견된 것으로 보아 정지 과정이 정확하게 이루어지지 않았음을 짐작할 수 있다. 이러한 결과가 나온 것은 진동 피스톤과 정지 피스톤이 같은 크기의 직경을 가지지만 정지 피스톤의 경우 진동 피스톤에 걸리는 부하를 추가적으로 받기 때문이라 사료 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 피스톤의 직경을 키우거나 더 높은 압력을 사용할 필요성이 있다고 판단되어 진다.



a) Electrode diameter : 8mm

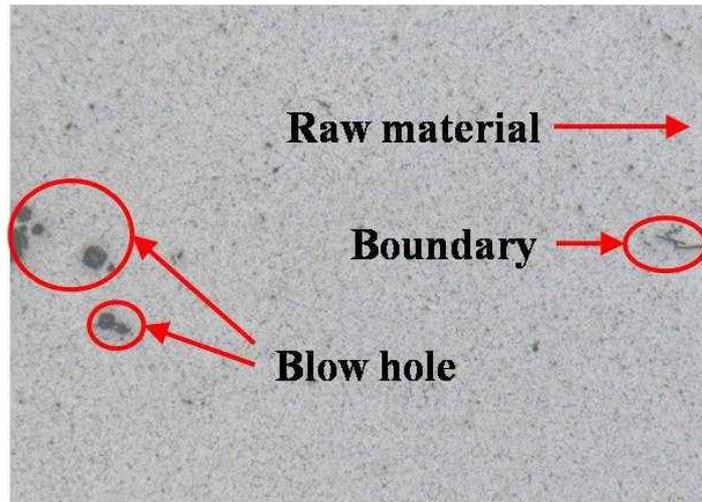
b) Electrode diameter : 10mm

**Fig. 3-10 Cross-section image of welding zone (×25)**

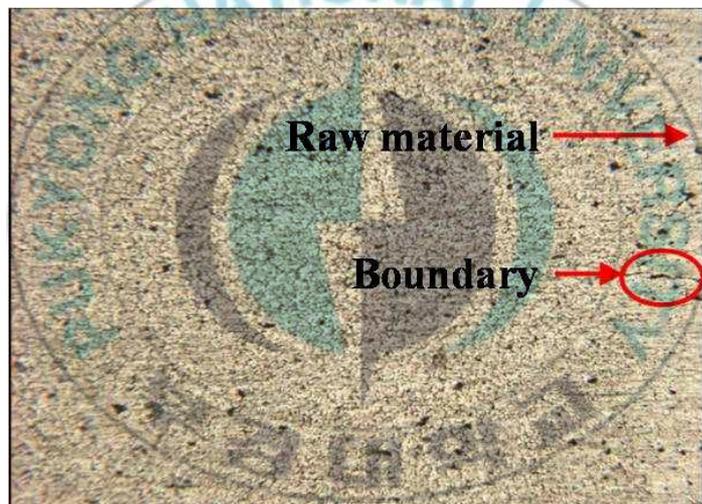
Fig. 3-10은 25배율로 확대하여 촬영한 접합부 단면 사진으로서 전극 끝단의 직경이 8mm일 때 소성 유동부에서 다수의 잔기공과 두 개의 큰 기공 (blow hole)이 발생하였음을 알 수 있다. 기공의 발생은 높은 온도로 인해

일부 소재가 녹았음을 짐작할 수 있다. 특히 소성 유동부에 해당하는 부분에서 다수의 기공이 검출된 것으로 보아 진동 과정 중에 발생하는 소재의 단면적 변화로 높은 저항이 발생하고 소성 유동부에서 발생한 높은 열로 인해 주위의 접합부 보다 소성 유동부에서 다수의 기공이 검출된 것으로 판단된다. 또한 정지 과정에서 가해주는 압력이 다소 약해서 충분히 접합부를 압착 시키지 못한 것도 하나의 요인으로 판단된다. 기공은 접합강도에 영향을 주지만 인장전단시험에서 나온 결과를 본다면 발생된 기공이 접합강도 저하에 크게 영향을 끼치지 않았음을 생각 할 수 있다.





a) Electrode diameter : 8mm



b) Electrode diameter : 10mm

**Fig. 3-11 Cross-section image of welding zone (×100)**

기공이 접합강도에 크게 영향을 주지 않는 것은 Fig. 3-11의 모재부와 접합부가 경계를 이루는 지역에 대해 100배율로 확대한 조직 사진으로도 판단이 가능하다. 사진에서 발견할 수 있는 노치로 모재부와 접합부를 확인할 수 있다. 모재부와 접합부를 비교해 보았을 때 열영향에 의한 소재의 결정 변형이 크지 않음을 알 수 있다. 전극 끝단의 직경이 8mm일 때는 10mm일 때보다 모재부와 접합부 사이에 조직상 큰 차이가 없음을 확인할 수 있

다. 이는 접합부의 결합 형태가 모재를 이루는 조직 구조와 거의 유사하다는 것을 알 수 있으며 접합부의 면적이 작음에도 불구하고 전극 끝단의 직경이 8mm일 때 더욱 우수한 접합 강도가 나오는 것에 대한 이유로 판단된다.



## 제 4 장 결 론

본 논문의 목적인 진동점접합을 이용한 알루미늄 판재의 점접합에 대한 접합 성능 및 특징들을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 접합 실험을 하였으며 접합된 소재를 인장 전단 시험 및 접합부 단면 촬영을 하였다. 모든 연구의 결과 및 고찰을 종합하여 내린 결론을 다음과 같이 기술하였다.

1. 진동점접합에 대한 컴퓨터 시뮬레이션으로 진동 전극의 삼각형 면적이  $8.037\text{mm}^2$ 를 가지는 외접원 직경이 5mm일 때 주요압력 분포가 가장 고르게 나타나는 것을 알 수 있었다.

2. 연구에 사용된 용접 장비에 설계되어진 진동점접합 장비와 탄소강 전극을 사용 하였을 때 전류의 세기가 40kA이고 통전시간 90cycle이며 전극 끝단의 직경이 8mm와 10mm인 조건에서 두께 1.5mm인 알루미늄 판재의 진동점접합이 가능함을 알 수 있었다.

3. 두께 1.5mm의 알루미늄 판재를 전극 끝단의 직경이 8mm이고 전류의 세기가 40kA이며 통전시간이 90cycle일 때의 조건에서 진동점접합 하였을 때의 접합강도는 규격 상의 평균 용접 전단강도에 근접함을 알 수 있었다.

4. 전극 끝단의 직경이 8mm일 때와 10mm일 때의 단면 촬영 결과를 비교 해본 결과 전극 끝단의 직경이 8mm일 때가 다수의 기공은 존재 하였으나 접합부에서의 조직이 모재의 조직에 가까움을 알 수 있었다.

진동점접합을 이용한 알루미늄 판재의 접합은 가능 하였고, 접합 강도 또한 규격상의 기준에 근접하는 것으로 보아 점접합 분야에 실용화 될 가능성이 충분히 있음을 확인 할 수 있었다. 향후 알루미늄 판재를 다양한 조건에서 진동점접합 할 수 있는 계기를 마련하게 되었다. 진동점접합에 대한 다양한 접합변수를 찾아 최적의 접합 조건 및 접합 장비를 개발 하는 것이 앞으로 남은 과제라 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. 유호천, 김환태, "경량 알루미늄합금의 최신 접합기술동향", 대한용접·접합학회지, Vol. 29 No. 3, pp. 4~13, 2011.
2. 한순우, 정현승, "알루미늄 압출재로 이루어진 철도차량 차체의 경량화를 위한 최적설계 방안 연구", 대한기계학회논문집, Vol. 35. No. 2, pp. 213~221, 2011.
3. 김익수, "자동차의 경량화를 위한 최근의 기술동향", 한국기술사회지, Vol. 30. No. 3, pp. 24~29, 1997.
4. K. K. Lee, "A Study on the Extrusion-welding Process of Aluminum Rods and Plates", Department of Mechanical Engineering, The graduate School, Pukyong National University, 2009.
5. International Aluminum Institute "Improving Sustainability in the Transport Sector Through Weight Reduction and the Application of Aluminum", International Aluminum Institute, 2006.
6. Europe Aluminium Association, "Sustainability of the European Aluminum Industry 2006", European Aluminium Association Report, 2006.
7. 이호인 [외] 공저, "알루미늄 응용기술의 이해와 활용", 한국철강신문, pp. 14~62, 2009.
8. 황창규, "알루미늄 재료기술( I )", 대한기계학회지, Vol. 29 No.1, pp. 23~28, 1989.
9. 황창규, "알루미늄 재료기술( II )", 대한기계학회지, Vol. 29 No.2, pp. 162~168, 1989.
10. 암기원, "알루미늄과 그 합금의 용접", 대한기계학회, Vol. 19 No. 4, pp. 299-306, 1979.

11. 김환태, 길상철, "알루미늄제 수송기기의 용접기술동향", 대한용접학회지, Vol. 22 No. 4, pp. 29~34, 2004.
12. 이경국, 이문용, 진인태, "알루미늄 판재의 압출전단접합에 관한 연구", 한국소성가공학회, Vol. 19. No. 8, pp. 452~459, 2010.
13. 이경국, 진인태, "알루미늄 봉재의 압출압접 강도에 관한 연구", 한국소성가공학회, Vol. 17. No. 4, pp. 284~291, 2008.
14. 이경국, 진인태, "알루미늄 봉재의 열간 압출접합 금형에 관한 연구", 한국금형공학회 2008년도 하계 학술대회 논문집, 2008 June 24, pp. 27~30, 2008.
15. 이경국, 진인태, "편심 경사 계단형 접합 다이를 사용한 알루미늄 봉재의 열간 압출압접", 한국소성가공학회 2005년도 추계학술대회 논문집, 2005 Oct. 01, pp. 206~209, 2005.
16. 백승엽, "CT형 점용접 이음재의 피로설계에 관한 연구", 대한용접·접합학회지, Vol. 28 No. 2, pp. 91~95, 2010.
17. 강기원, 장일주, 김정규, "동적응답의 변화를 고려한 점용접부의 진동피로해석", 대한기계학회논문집, Vol. 34 No. 9, pp. 1193~1199
18. 이영호, 이규천, "최신 접합공학", 도서출판 인터비전, pp.2~8, 2008.
19. 최원호, 장동화, 전시현, "모듈화를 위한 차체 볼팅 조립구조에 대한 고찰", 한국철도학회 2008년도 추계학술대회 논문집, 2008 Nov. 13, pp. 1661 ~1667, 2008.
20. Guo R., Duan R.C., Mesmacque G., "Fretting fatigue behavior of riveted Al 6XXX components", Materials science & engineering, Vol. 483/484, pp. 398~401, 2008.
21. Wood P. K. C., Schley C. A., Williams M. A., "A model to describe the high rate performance of self-piercing riveted joints in sheet aluminium", Materials & design, Vol. 32 No. 4, pp. 2246~2259, 2011.

22. Hoang N. H., Langseth M., Porcaro R., "The effect of the riveting process and aging on the mechanical behaviour of an aluminium self-piercing riveted connection", *European journal of mechanics A Solids*, Vol. 30 No. 5, pp.619~630, 2011.
23. 이찬주, 이상곤, 이선봉, "Al5052 합금소재와 고장력강관의 이종재료 클린칭 접합특성", *대한기계학회논문집*, Vol. 34 No. 8, pp. 997~1006, 2010.
24. 김재영, 이찬주, 이상곤, "클린칭 접합력 향상을 위한 금형 형상변수의 영향도 평가", *소성가공학회지*, Vol. 18 No. 5, pp. 392~400, 2009.
25. D. B. Yeom, "A study on the spot welding characteristics of Aluminum alloys", Department of Mechanical Engineering, The graduate School, Kong Ju National University, 2003.
26. D. B. Yum, J. B. Ko, B. K. Choi, S. G. Lee, A. K. Kim, "Evaluation of Resistance Spot Welding Weldability of Aluminum Alloy 5000 Series", *Transactions of the Korean society of machine tool engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 8~13, 2002.
27. J. H. Yeom, "A study on Resistance spot welding of Aluminum Alloys Based on the Current and Electrode Force Characteristics Analysis", Department of Mechanical Engineering, The graduate School, Hanyang University, 2009.
28. 이우람, 이정현, "자동차용 아연 도금 강관과 알루미늄 합금의 접합", *한국생산제조시스템학회지*, Vol. 20 No. 2, pp. 145~150, 2011.
29. 양영수, 정일, 서정, "레이저 점 용접의 응용", *한국정밀공학회지*, Vol. 14 No. 3, pp. 41~49, 1997.
30. Zhang Z., Yang X., Zhang J., "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy", *Materials & design*, Vol. 32 No. 8/9, pp. 4461~4470, 2011.

31. H. T. Kim, "Ultrasonic Spot Welding : A New Tool for Aluminum Joining", ReSEAT Report, 2005.
32. 정호신, "초음파 용접의 기초", 대한용접학회지, Vol. 15 No. 6, pp. 24~31, 1997.
33. 진인태, "금속판 소성유동 압출점접합장치 및 압출점접합방법", 대한민국 특허 제 10-0743857, 2007.
34. 이정훈, 김태현, 이문용, 진인태 "알루미늄 판재의 압출점접합공정에 있어서 접합강도에 관한 연구", 한국소성가공학회, Vol. 19. No. 8, pp. 460~467, 2010.
35. 진인태, "진동스폿용접기 및 진동스폿용접방법", 대한민국 특허 제10-2011-007595, 2011.



A Study on Welding Performance of Spot Welded Aluminum Plate by  
Vibration-Spot Welding Process

Tae-Hyun Kim

Department of Production Automation Engineering  
, The Graduate School, Pukyong National University

**Abstract**

Recently aluminum alloy material for the car as much light has been highlighted. But aluminum plate welding by resistance welding process is difficult. So in several research groups are trying to weld efficiently aluminum alloys. Among them, vibration-spot welding is one of the ways to weld efficiently two sheets aluminum plate.

This paper are covered basic research for the practical application of aluminum plates weld by vibration-spot welding. The main purpose of this paper is to evaluate the welding performance of aluminum plates that welded by vibration-spot welded. In this study, vibrating electrodes corresponding to the circumscribed-circle diameter of triangle and the diameter at the end of the electrode according to the simulations, simple test for determining the electrode material, vibration-spot welding equipment design, preceding experiment for finding energization time and current power, tensile shear test and cross-sectional shot to vibration-spot welded specimens was performed in sequence.

As a result, For the aluminum plate with a thickness of 1.5mm, It was found that vibration-spot welding is available when electric current power is 40kA and energization time is 90cycle. In addition, know that the welding strength of specimen could be more than 2779.2N.

## 감사의 글

대학원 생활을 마무리하며 지난 시간들을 돌이켜보니 많은 아쉬움과 후회가 남습니다. 대학원 생활을 하는 내내 학업의 성취를 위하여 노력하는 과정에서 알게 모르게 도움을 주신 모든 분들에게 감사의 마음을 제대로 전하지 못한 것이 그 이유입니다. 제가 이렇게 논문을 완성하기까지 직·간접적으로 힘이 되고 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 대학원 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 세심한 지도와 많은 격려로 이끌어 주신 진인태 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 논문심사 과정에서 아낌없는 지도로 많은 가르침을 주신 한규택 교수님과 박영환 교수님께도 감사드리며 매 학기마다 큰 열정으로 심도 있는 강의를 해주신 생산자동화공학과 의 모든 교수님들께도 감사드립니다.

연구과정에서 마치 자신의 일처럼 도와주고 학교생활에 추억과 보람을 함께 나누었던 소성유동접합실험실 학우들에게도 고마움을 전합니다. 특히 대학원 초기 아무 것도 모르고 막막한 시절에 큰 도움을 주신 이경국 박사님과 대학원을 졸업한 후에도 실험실로 자주 찾아오셔서 도움을 주신 이정훈 선배님과 구경만 선배님께도 감사드립니다. 그리고 실험실 생활에 빨리 적응할 수 있도록 도움을 준 최귀동 형님과 이준석 군을 포함하여 연구 내내 큰 도움을 주었던 실험실 후배들 에게도 감사드립니다.

항상 사랑으로 키워주시고 부족한 아들을 믿어주신 부모님께 감사의 말씀을 드립니다. 언제나 제 편이 되어 힘을 주시고 바르게 생각하고 행동할 수 있도록 가르쳐주신 부모님께 누가 되지 않는 아들이 되기 위해 더욱 노

력하겠습니다. 마지막으로 하나뿐인 여동생에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

감사의 마음을 전하며

2011년 12월

김 태 현

