

## 차체 점용접 접합부 피로강도의 실험해석\*

김정한, 유희, 염영진, 주영우, 주석재  
기계공학과

### <요 약>

다양한 외부 동하중에 의한 피로파단이 발생하고 있는 승용차 차체 점용접 접합부에 대해 피로시험을 수행함으로써 전반적인 피로거동을 파악하고자 하였다. 실제 파단 발생 부재를 구성하는 차체재료중 SPCC, SPRC35, SAPH38P를 선택하여 용접조건, 동종 및 이종재료간의 접합, 두께 조합을 가급적 실차와 동일하게 적용하여 다양한 인장-전단 및 십자-인장 점용접 시편을 제작하였다. 그리고 정적시험 및 피로시험을 수행하여 강도 데이터베이스를 구축하였다.

## Experimental Analysis of Fatigue Strength in Spot-Welded Joints of Car Body

Jung-Han Kim, Hee You, Young-Jin Yum, Young-Woo Chu, and Seok-Jae Chu  
Dept. of Mechanical Engineering

### <Abstract>

The fatigue behaviour of spot-welded joints of a car body, in which fatigue fracture occurs by various external dynamic loads, is characterized by performing fatigue tests. SPCC, SPRC35, and SAPH38P steels are selected which constitute the car body. Welding conditions and combinations of steels and thicknesses are chosen to reproduce those of a real car body and various tensile-shear and cross-tension spot-welded specimens are manufactured. Both static tests and fatigue tests are carried out, and the database of spot-weld strength is constructed.

\* 본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재특성평가연구센터의 지원에 의한 것입니다.

## 1. 서론

승용차 구조 설계에서는 가속성 및 주행 성능의 향상은 물론 특히 연비 경감을 위하여 차체의 중량을 효율적으로 줄이는 것이 중요한 과제가 되고 있다. 이러한 경량화 목적에 따라 차체의 골조부재 및 외판은 여러 종류의 고장력 박판을 프레스 성형하여 제작하고, 접합수단으로도 구조물을 경량화하는데 큰 역할을 하는 점용접(Spot Welding) 방법을 사용한다. 점용접은 자동화가 용이하고 대량 생산공정에 적합하므로 자동차 차체, 철도 차량, 항공기 구조 등 높은 내구성과 신뢰성이 요구되는 박판 구조의 접합에 널리 사용되고 있다. 자동차의 경우 지속운행과 급회전, 급제동, 강한 충격 등과 이들의 복합적인 요인이 작용하기 때문에 차체를 지지하기 위해서는 승용차 1대당 총 3,000~4,000의 점용접 타점이 필요하다.<sup>[1,2]</sup>

점용접은 복잡한 요소들의 조립을 비교적 간단화시키고 경제적이 되도록 하는 잇점이 있는 반면, 점용접 이음부의 강도는 소재인 강판의 강도보다 상당히 떨어진다. 특히 차체 재료의 박판화, 고장력화에 따라 차체 각부는 한층 가혹한 응력상태에 놓이는 경향이 있을 뿐만 아니라, 용접시 야기되는 조직 변화와 잔류응력 및 너겟단(nugget edge)의 응력집중으로 인하여 피로강도가 모재에 비해 현저히 떨어지고 피로균열의 발달이 되기 때문에 차체의 구조적 강성과 강도가 점용접부의 피로강도에 의해 결정되는 예가 적지 않다.<sup>[3]</sup> 또한 용접열에 의한 변형, 손상을 방지하기 위하여 용접조건이 더욱 제한되어 너겟(nugget) 형상이 작아지는 추세에 있기 때문에 직경이 수 mm의 작은 점상으로 접합되는 점용접부는 응력집중의 발생원이 되어 피로 강도면에서는 더욱 불리하다.<sup>[4,5]</sup> 실제 승용차의 차체에서 발생하는 내구력상의 문제점중 일반적으로 70 % 이상이 점용접부에서 발생하게 된다. 승용차의 기대수명이 다하기 전에 점용접 접합부가 파손되면 소음과 진동이 발생하여 승차감이 떨어지며 파손이 더 진행되면 운행의 안전성까지도 침해할 것이 예상된다. 따라서 점용접에 의한 차체의 구조적 건실성은 승용차의 품질에 직접적인 영향을 끼치는 만큼, 차체의 점용접부에 대한 피로강도를 평가하는 것은 매우 중요하다.

승용차 차체에는 다양한 동하중이 작용하는데, 특히 현가장치 지지부(Suspension Mounting)는 외부의 동하중이 직접 작용하는 부분으로 점용접 접합부에 피로에 의한 균열이 많이 발생하고 있다. 이러한 점용접부에 대해서는 초기 설계단계에서부터 피로강도 해석을 하여야 한다. 그러나 차체 점용접부의 거동은 부분적인 접합, 박판 특유의 변형과 응력분포, 용접 너겟부의 복잡한 구조 등의 특수한 요인 때문에 일반적인 구조물과 크게 다르다. 따라서 이에 대한 연구는 다소 미미한 실정이다.

점용접부에 대한 피로수명 평가에 대한 연구는 1960년도 말부터 최근까지 꾸준히 진행되어 오고 있다. 초기에는 박판에 대한 용접성의 향상<sup>[6]</sup>이나 용접모재의 두께, 너겟직경, 용접점수 등의 역학적 인자와 재료의 기계적 성질, 재질, 화학성분, 표면상태 등의 재료적 인자 및 용접조건 등에 따른 정적강도나 피로강도의 측정 또는 향상 방안이 국한되었다.<sup>[7~9]</sup> 이후 Pollard<sup>[10]</sup>, Pook<sup>[11]</sup>, Davidson과 Imhof<sup>[12~14]</sup> 등은 파괴역학의 개념을 도입하여 점용접부 피로수명을 조사하였다. 그러나 균열 측정과 균열 성장 특성의 정확한 파악이 곤란하여 이상과 같은 파괴역학적인 개념을 도입한 연구 결과는 아직도 미흡한 상태라고 할 수 있다. 한편 일본 자동차 기술회<sup>[15]</sup> 등에서 수행한 점용접 시편에 대한 실험과 유한요소해석(FEM)을 병행한 연구도 실제 설계나 강도해석에 적용하기에는 용이한 결과를 제시하지 못하고 있다.

본 연구에서는 승용차 차체 점용접부에 대해 정적 및 피로시험을 수행하여 그 강도를 파악하려고 한다. 승용차의 차체는 구조적 강성을 유지하기 위하여 골조부재에 두께가 다른 보강판을 부착하거나, 서로 다른 두께의 판재를 성형하여 만들기 때문에 차체 구조중에는 이중두께 판재를 점용접한 접합부가 많은 비율을 차지하고 있다. 실제 파단이 많이 발생하는 현가장치 지지부도 마찬가지로 SPCC, SPRC35, SAPH38P 세 가지 박판이 0.8 mm, 1.4 mm, 2.0 mm 등의 여러 두께로서 성형되어 점용접되어 있다. 따라서 이들 강판으로 동종 및 이종재료 간의 접합, 두께 조합, 용접조건을 가급적 실차와 동일하게 적용하여 다양한 인장-전단 및 십자-인장 점용접 시편을 제작한다. 그리고 정적 및 피로시험을 수행하여 점용접부의 강도를 파악하고 그 결과를 고찰함으로써 전반적인 피로거동을 해석하려고 한다.

## 2. 시편제작 및 시험방법

### 2.1 인장시험

본 인장 시험의 목적은 승용차 차체 재료인 SPCC, SPRC35, SAPH38P의 기계적 성질을 구하는 것이다. 시편은 KS(Korean Standards) 5호 시험편 규격에 의거하여 제작되었다. 시험 장치로는 정적용량 10 ton 인 MTS 819 전기유압식 인장시험기를 사용하였고 하중과 변형율의 정확한 측정을 위해 신장계(Extensometer), X-Y plotter, 고속 A/D 입출력 보드와 이것을 지원하는 Global Lab 프로그램을 사용하였다. 초기 상태에서는 0.1 mm/min의 느린 속도로 하중을 가하면서 정확한 탄성계수와 항복강도를 구하였으며 항복강도이후에는 신장계를 제거하고 1 mm/min의 비교적 빠른 속도로 파단까지 시험하였다. 각 재료의 물성치들은 Table 1에 나타내었다. 시험결과로부터 SPCC, SPRC35, SAPH38P 재료는 연신율이 비교적 큰 것으로 보아 매우 연한 성질을 가지고 있는 연성 재료임을 알 수 있었다.

### 2.2 점용접 시편의 강도시험

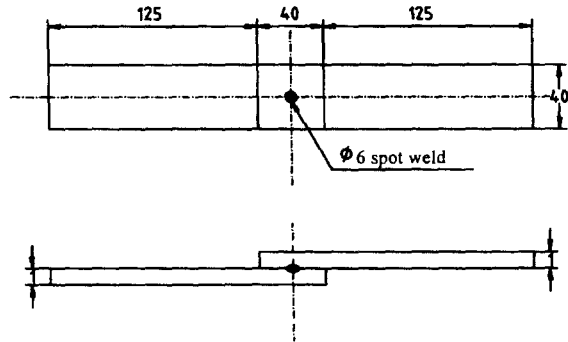
본 시험에 사용된 점용접 시편은 점용접부의 기본적인 강도를 측정하는데 가장 일반적으로 사용되고 있는 인장-전단(Tensile-Shear) 시편과 십자-인장(Cross-Tension) 시편이다. 각 시편의 제작 형태는 Fig. 1에 나타내었다. 시험에 사용된 점용접 시편의 종류는 Table 2와 같다.

용접조건으로는 실차가 생산될 때의 용접조건을 가급적 그대로 적용하기 위해 시편 제작시 직접 용접을 수행하였는데, 용접기로는 정격용량 100 kVA인 공압식 점용접기를 사용하였고, 전극팁은 직경 6 mm의 CF형을 사용하였다. 용접방법은 보통 가압력과 통전시간을 먼저 고정시킨 후에 용접전류를 조절하는 방식이 권장되어진다. 본 연구에서도 마찬가지로 초기에는 주어진 용접전류 범위의 하한에서부터 500 A 씩 전류를 증가시키면서 용접하다가, 너겟 생성시 비산(expulsion)이 발생하는 전류의 바로 전의 용접전류로부터 최적용접조건을 찾아내었다. 일반적으로 비산이 발생한 후의 용접전류에 의한 용접부는 강도가 다소 떨어질 수 있다고 알려져 있다.<sup>[9]</sup> 각 점용접 시편에 실제로 적용된 용접조건은 Table 3과 같다.

정적시험에 사용된 하중장치는 MTS 819 전기유압식 인장시험기를 사용하였고, 하중과

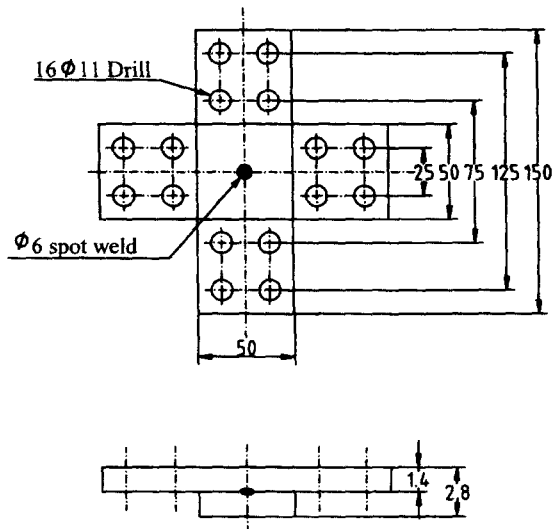
변위와의 관계는 PC와 Global Lab 프로그램으로 처리하였다. 시험 방법으로는 ASTM 규정에 의거하여 변위제어 방식을 적용하였는데, 인장-전단 시험의 경우는 2 mm/min, 십자-인장 시험은 4 mm/min으로 시험하였다. 피로시험에서도 역시 시험장치는 MTS 819 전기유압식 시험기를 사용하였다. 시험방법으로는 하중제어 방식을 적용하였고, 하중비=0(0/인장), 하중진동수=30 Hz의 완전 편진 정현파(Haver sine)로 반복적인 하중을 가하였다. 피로수명은 시편의 너겟 주위에서 균열이 발생, 성장하여 시편을 이루고 있는 두 강판이 서로 완전히 분리될 때까지의 사이클로 하였으며, 피로한도는 대략  $5 \times 10^6$  사이클까지 피로 균열이 발생하지 않을 때의 하중으로 간주하였다.

그림1.테이블123



Unit : mm

(a) Tensile-shear specimen



Unit : mm

(b) Cross-tension specimen

Fig. 1 Configuration of the spot-welded specimens

Table 1 Material properties of SPCC, SPRC35 and SAPH38P

Material	Material properties			
	Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Ultimate strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)
SPCC	16.6	27.9	193	53.6
SPRC35	23.8	34.2	204	40.1
SAPH38P	28.3	38.4	198	44.1

Table 2 The kinds of spot-welded specimens for sheet steels

Material (Thickness)	Spot-welded specimen (Tensile-shear, Cross-tension)	
SPCC (1 mm) SPRC35 (1 mm)	1	SPCC 1.0/SPCC 1.0
	2	SPRC 1.0/SPRC 1.0
	3	SPCC 1.0/SPRC 1.0
SPCC (1.4 mm) SPRC35 (1.4 mm)	4	SPCC 1.4/SPCC 1.4
	5	SPRC 1.4/SPRC 1.4
SAPH38P (2.0 mm) SPCC (1.0 mm) SPRC35 (1.0 mm)	6	SAPH 2.0/SAPH 2.0
	7	SPCC 1.0/SAPH 2.0
	8	SPRC 1.0/SAPH 2.0

Table 3. Welding conditions for various spot-welded joints

	Spot-welded joint	Electrode diameter (mm)	Weld current (kA)	Weld time (cycles)	Weld force (kgf)
1	SPCC 1.0/SPCC 1.0	6	10.0	10	210
2	SPRC 1.0/SPRC 1.0	6	9.0	12	230
3	SPCC 1.0/SPRC 1.0	6	9.0	11	210
4	SPCC 1.4/SPCC 1.4	6	10.8	14	270
5	SPRC 1.4/SPRC 1.4	6	9.8	16	300
6	SAPH 2.0/SAPH 2.0	6	12.5	20	340
7	SPCC 1.0/SAPH 2.0	6	10.5	15	250
8	SPRC 1.0/SAPH 2.0	6	10.0	16	250

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 정적 인장-전단 시험

Table 2의 여러가지 점용접 시편들에 대해 정적인 인장-전단 시험과 십자-인장 시험을 수행하였다. 시험으로부터 각 점용접 시편의 정적강도를 측정하고 파단모드를 관찰함으로써 용접부재의 기계적 성질과 용접조건에 따른 점용접부 성능을 비교, 검토해 보았다.

TS 시편들의 하중-변위 그래프들은 Fig. 2에 정적강도는 Table 4에 나타내었는데, \* 표가 되어 있는 값은 Table 3에 나와 있는 용접조건과 상이한 조건이 적용된 시편임을 밝혀 둔다. 시편의 파단하중은 그래프에서 최고점으로 용접부에서 최초로 균열이 생성되었을 때의 하중을 나타낸다. 정적강도의 크기를 비교해본 결과, 시편을 이루고 있는 용접부재의 인장강도순과 동일한 순서로 나타나는 것을 알 수 있었다. 이로부터 점용접 시편의 정적강도는 용접부재의 인장강도나 항복강도에 비례한다는 연구 보고의 결과를 확인할 수 있었다.<sup>[6~9]</sup> 그리고 점용접 시편의 정적강도는 용접부재의 두께가 증가함에 따라 향상된다는 사실도 확인할 수 있었다.<sup>[6,10]</sup> 한편, SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편의 정적강도는 SPCC 1.0, SPRC 1.0 동종재료 시편의 정적강도보다 더 낮은 값을 보였고, 파단은 SPCC 1.0 강판에서 발생하였다. 그리고 SPCC 1.0, SPRC 1.0 강판이 이보다 강도가 큰 SAPH 2.0과 접합되었을때의 강도는 SPCC, SPRC 1.0 동종재료 시편의 강도보다 다소 향상되었지만 큰 폭은 아니었다. 강도의 향상은 큰 강도를 가진 후판의 영향에 의한 것으로 쉽게 짐작할 수 있고, 파단 역시 예상대로 박판쪽에서 발생하였다.

시편의 파단 형상은 Fig. 3에 나타내었다. SAPH 2.0 시편의 경우만 너겟 접합면에서 파단이 일어나는 계면 파단모드이었고, 그외의 모든 시편에서는 열영향부(Heat Affected Zone)에서 균열이 최초로 발생되어 강판으로부터 너겟이 최소 직경을 가진 버튼 모양으로 완전히 떨어져 나가거나 또는 너겟에 찢어진 강판이 붙어있는 형태로 파단되는 열영향부 파단모드(HAZ failure mode)가 발생하였다.<sup>[6,10]</sup> SAPH 2.0 동종시편에서 계면 파단(interface failure mode)이 일어난 것은 두께 2.0 mm의 TS 시편에서 열영향부 파단이 발생하기 위한 임계 너겟직경<sup>[7]</sup>보다 작은 너겟(6 mm)을 갖고 있기 때문인 것으로 판단된다. SPCC 1.0 동종시편의 파단은 열영향부에서 균열이 처음 생성되어 너겟의 원주에 대해 임의의 각도를 가진 접선방향으로(강판쪽으로) 진전되다가 너겟이 한쪽 강판에서 버튼모양으로 완전히 떨어지면서 최종적으로 파단되는 현상을 나타내고 있다. SPRC 1.0 시편의 파단에서는 열영향부에서 균열이 처음 발생한 것은 SPCC와 동일하나, 너겟 원주를 따라 열영향부내에서 계속 진전하던 균열이 하중 작용선 방향으로 너겟의 직경보다 조금씩 작아지는 폭으로 길게 찢어지면서 파단되는 것과 전체적인 소성변형 정도가 작은 것이 SPCC의 경우와 상이하다. 이것은 마치 SPRC 재료의 강도가 SPCC보다 더 우수하다는 것을 증명하는 현상과도 같았다. SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편의 경우는 SPCC 1.0 강판에서 파단이 발생하였는데 찢어진 형상이 SPCC 1.0 동종시편의 경우와 유사하였지만 강판쪽으로 진전되는 균열각이 더 작았다. 그리고 앞에서도 언급했듯이 정적강도가 향상됨이 없이 SPCC 1.0 동종시편보다도 낮았다. 한편 SPCC 1.4 동종시편의 파단은 SPCC 1.0 동종시편의 양상과는 달리 너겟의 열영향부를 따라 균열이 거의 성장하였는데, 이것도 후판에 의한 강도향상 효과로 인해 균열이 강판쪽이 아닌 열영향부를 따라 힘의 작용방향으로 진전하기가 쉬웠던 것으로 생각할 수 있다. SPCC 1.0/SAPH 2.0, SPRC 1.0/SAPH 2.0 시편에서는 SAPH 2.0의 영향에 의해 박판쪽에서 모두 균열이 발생하였고 균열은 강판쪽으로 너겟원주에 대해 큰 각을 가지

고 진전하다가 최종적으로 너겟이 박판쪽의 열영향부에서 완전히 분리되면서 파단되었다.

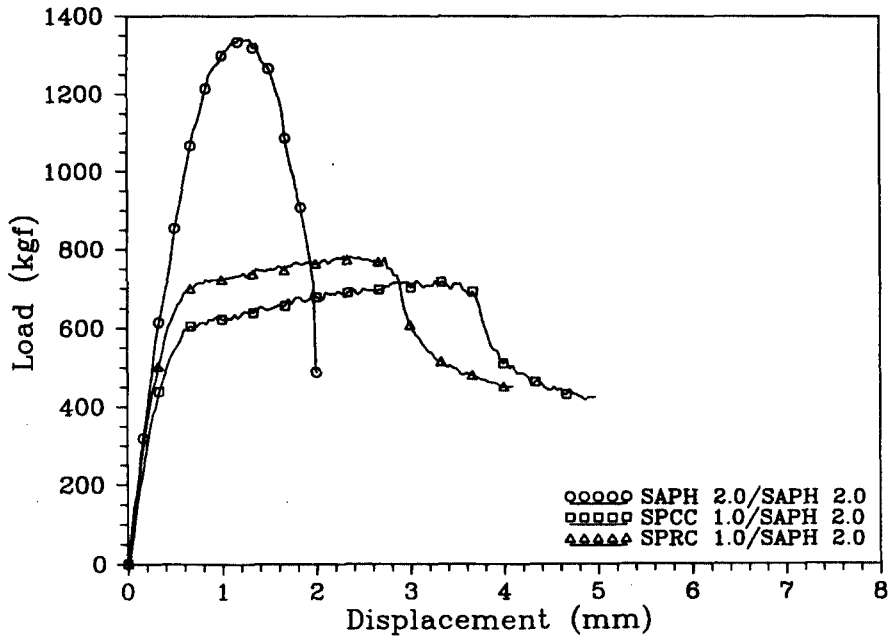
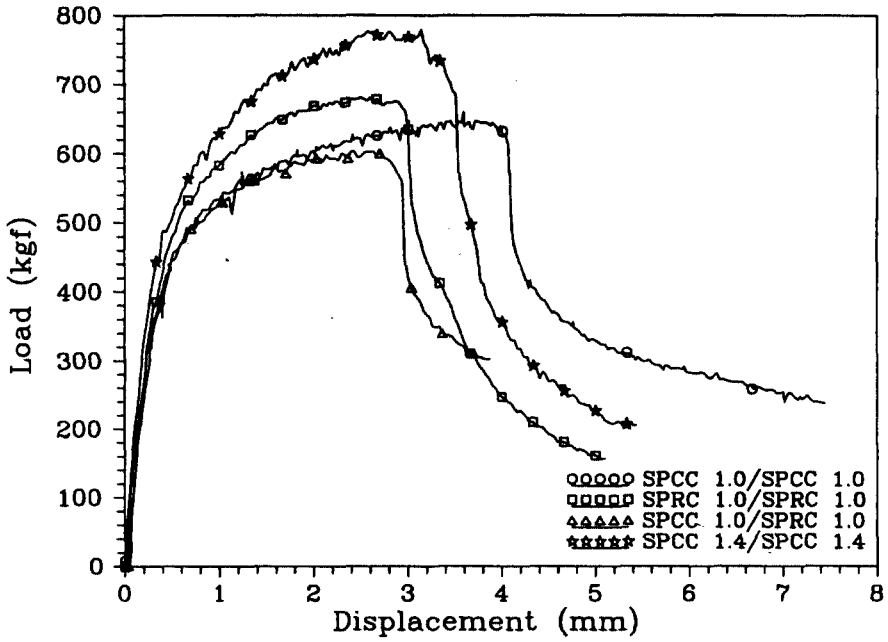


Fig. 2 Load-displacement curve for various tensile-shear specimens

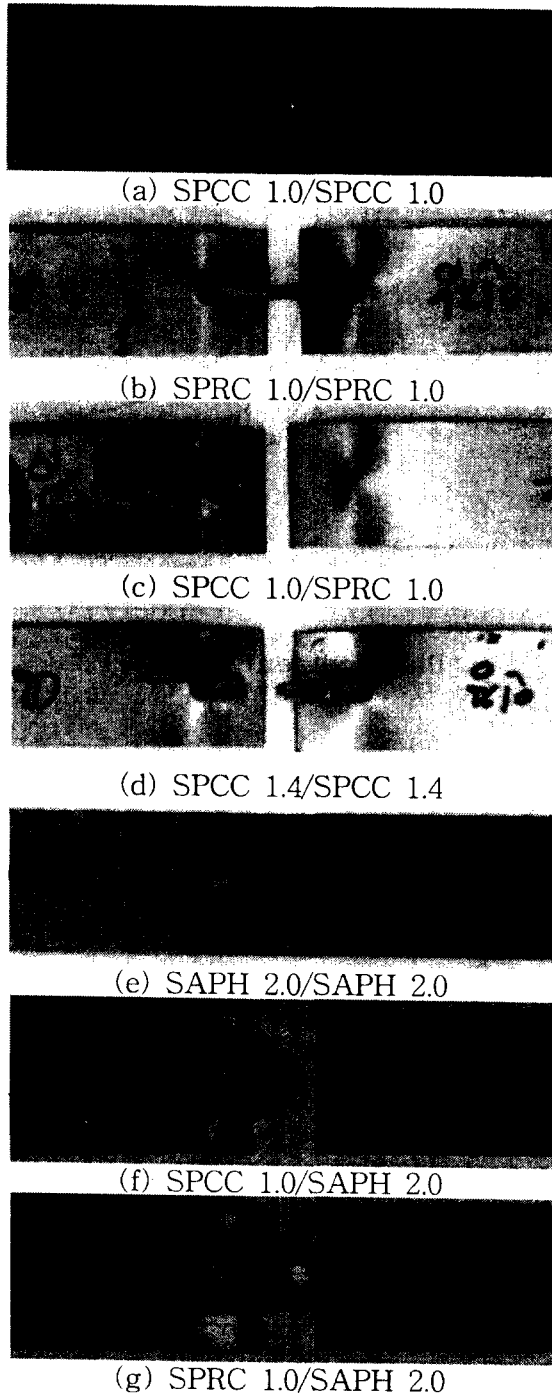


Fig. 3 Fracture appearance for the static tensile-shear test



Table 4. The static test results of the spot-welded specimens

Spot-welded joint		Fracture load (kgf)	
		Tensile-shear specimen	Cross-tension specimen
1	SPCC 1.0/SPCC 1.0	638*	527
2	SPRC 1.0/SPRC 1.0	681	574
3	SPCC 1.0/SPRC 1.0	603	520
4	SPCC 1.4/SPCC 1.4	779	780*
5	SPRC 1.4/SPRC 1.4		632*
6	SAPH 2.0/SAPH 2.0	1350	1520
7	SPCC 1.0/SAPH 2.0	720	625
8	SPRC 1.0/SAPH 2.0	784	676

### 3.2 정적 십자-인장 시험

CT 시편들의 하중-변위 그래프들은 Fig. 4에 정적강도는 Table 4에 나타내었다. 정적강도의 크기를 비교해본 결과, TS 시험과 같이 용접부재의 인장강도순과 동일한 순서로 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편도 TS 시험과 같은 양상으로 SPCC 1.0, SPRC 1.0 동종재료 시편보다 강도가 더 낮았고 파단 역시 SPCC 1.0에서 발생하였다. 그 외의 모든 시편에서도 TS 시험의 경우에 상응하는 결과를 나타내었다.

시편의 파단형상은 Fig. 5에 나타내었다. 거의 모든 시편들에서 열영향부에서만 균열이 발생, 및 성장하여 최종적으로 한쪽 강판에서 너겟이 버튼모양으로 완전히 떨어져 나가면서 파단되는 열영향부 파단모드가 공통적으로 발생하였다. 한편 SPRC 1.0 시편은 한쪽 강판에서만 열영향부에 균열이 발생하였는데, SPCC 1.0 시편의 경우에는는 두 강판이 분리될 때 SPRC 1.0 시편의 양상과는 달리 최초 균열 발생 강판이 아닌 반대쪽 강판에서도 너겟 주위의 열영향부가 찢어지는 현상이 관찰되었다. 그리고 파단이 발생하기 전에 작용하중의 영향으로 너겟부분은 마치 산봉우리처럼 솟아오르고 시편폭이 굽힘현상에 의해 줄어들어 가는 등 CT 시편 특유의 소성변형이 발생하였는데, 이 현상은 SPRC 시편보다 SPCC 시편에서 더 두드러지게 나타났다.

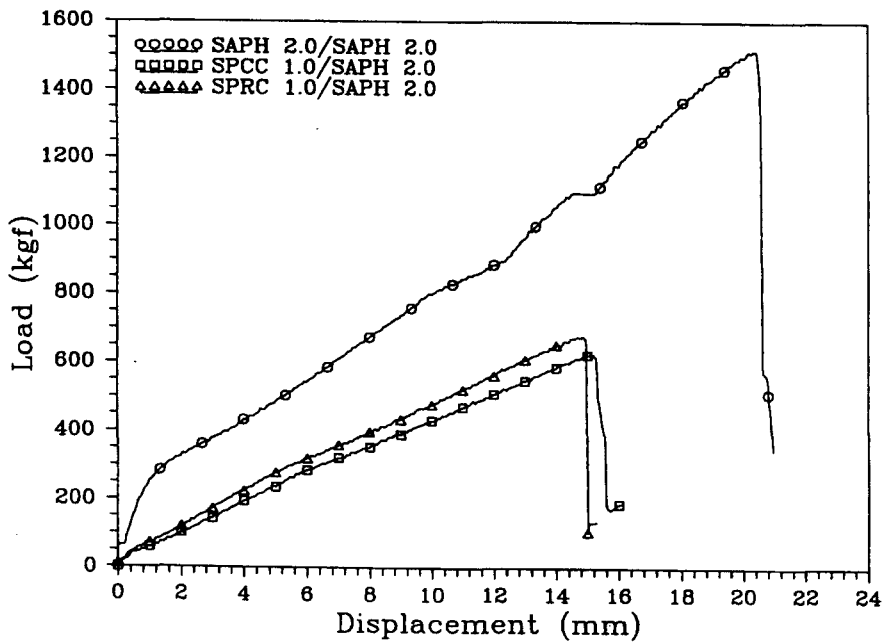
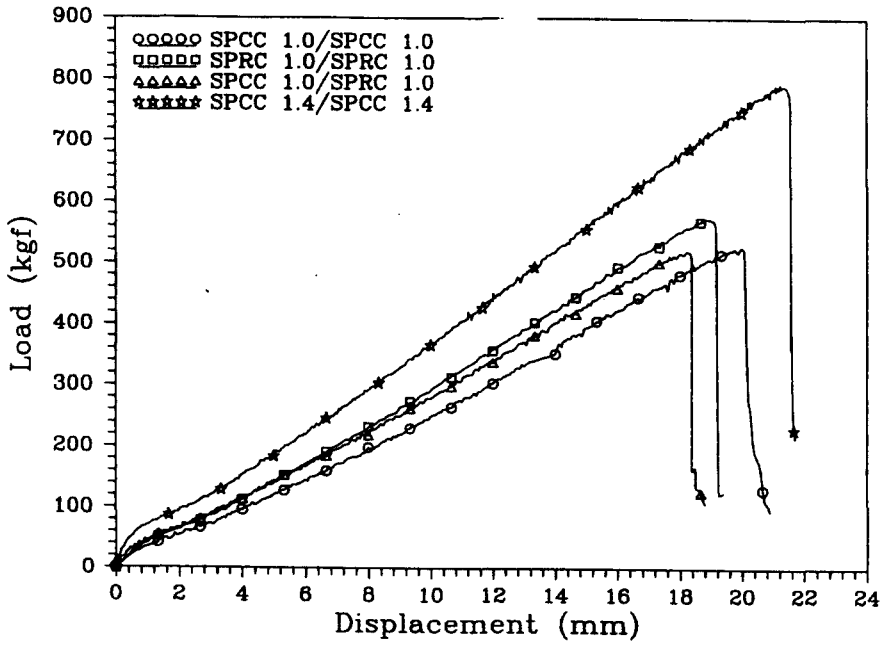
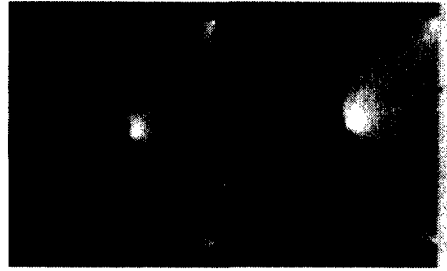


Fig. 4 Load-displacement curve for various cross-tension specimens



(a) SPCC 1.0/SPCC 1.0



(e) SPRC 1.4/SPRC 1.4



(b) SPRC 1.0/SPRC 1.0



(f) SAPH 2.0/SAPH 2.0



(c) SPCC 1.0/SPRC 1.0



(g) SPCC 1.0/SAPH 2.0



(d) SPCC 1.4/SPCC 1.4



(h) SPRC 1.0/SAPH 2.0

Fig. 5 Fracture appearance for the static cross-tension test

### 3.3 인장-전단 피로 시험

피로시험에서는 용접부재의 항복강도, 두께, 너겟직경, 하중비들이 피로강도에 영향을 끼치는 주요인자라고 할 수 있지만, 특히 용접조건은 직접적인 영향을 끼친다고 할 수 있다.<sup>[3]</sup> 따라서 각 시편들의 피로성능을 용접조건에 의한 정적강도의 경향과 비교, 검토하였다.

TS 시편들에 대한 하중범위( $\Delta P$ )-파단사이클( $N_f$ ) 그래프는 Fig. 6에 나타내었다. 정적시험에서 SPRC 1.0 동종시편의 정적강도가 SPCC1.0 동종시편보다 더 높았는데, 피로시험에서는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 SPCC 1.0 시편의 피로하중이 저수명 고하중 구간에서 오히려 더 높은 경향을 나타내고 있다. 그리고 SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편도 정적강도는 SPCC 1.0, SPRC 1.0 동종시편들보다 더 낮았는데 피로시험 결과 저수명 고하중 구간에서의 피로하중은 두 시편의 피로하중의 중간치를 나타내었다. SPCC 1.0/SAPH 2.0, SPRC 1.0/SAPH 2.0 시편들도 모두 위에서 언급한 SPCC, SPRC 동종시편의 정적강도, 피로강도의 경향과 동일하게, SPRC 1.0/SAPH 2.0 시편의 정적강도가 SPCC 1.0/SAPH 2.0 시편보다 더 우수한 반면 저수명 피로하중은 더 낮았다. 이로부터 강도가 SPRC에 비해 낮은 SPCC는 피로성능이 SPRC보다 향상된 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 낮은 항복강도 및 우수한 연성은 파단에 앞서 변형에너지를 흡수하기에 유리하므로 더 큰 소성변형을 하였고, 이러한 소성변형이 점용접부의 열영향부와 같은 균열생성장소에 응력집중을 완화시킴으로써 피로성능이 향상된 것이라고 할 수 있다. 또한 용접조건에 의해 SPCC 점용접부의 성질 변화에 의한 영향도 배제할 수 없을 것이다. 한편, SPCC 1.4 시편의 피로성능은 SPCC 1.0에 비해 저수명 구간에 대해서 오히려 더 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 각 시편들의 전반적인 피로거동을 살펴보면 고수명 저하중구간에서의 피로한도는 시편 재료에 구분없이 모든 시편들에 대해 큰 차이가 없는 유사한 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. SAPH 2.0 시편의 경우만 다른 시편들에 비해 다소 큰 피로한도를 나타내었다. 이러한 사실로부터 열영향부와 같은 점용접부는 용접부재의 성질과는 다른 제 3의 성질을 갖는다는 것을 유추할 수 있는데, 용접조건, 기하학적 형상 등과 같이 용접부에 영향을 끼치는 인자들에 의한 현상으로서 그 양상이 상당히 복잡하다는 것은 여러 연구에서 확인할 수 있다.<sup>[6,10]</sup>

시편의 파단형상은 Fig. 7에 나타나 있는데, SPCC 1.0/SPCC 1.0, SPRC 1.0/SPRC 1.0, SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편들은 파단형상이 유사하였다. 즉 저하중에서는 열영향부에서 균열이 발생하여 시편폭 방향을 따라 강판속으로 계속 진전한 뒤 강판이 좌굴되면서 하중작용방향으로 길게 찢어지면서 최종적으로 파단되는 형태를 보여주고 고하중으로 갈수록 폭방향 균열길이가 짧아지고 찢어진 강판폭이 좁아지는 경향을 나타내고 있다. SPRC 시편의 파단형상 특징은 폭방향을 따라 강판쪽으로 진전한 균열면이 매우 예리하다는 것과 하중작용방향으로 강판이 얼마 찢어지지 않았다는 점이다. 이것도 또한 SPRC의 높은 강도에 기인한 것이라고 할 수 있다. 또한 SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편에서도 역시 SPRC의 높은 강도를 입증하는 양상을 볼 수 있었는데, 저하중에서는 주로 SPCC 강판에서의 폭방향 균열길이가 더 길었다는 점이다. 그러나 최종적으로 파단될 때 완전히 찢어진 강판은 SPCC인 경우도 있었고 SPRC인 경우도 있었다. 한편 SPCC 1.4 시편은 후판의 강도보강 효과에 따라 저하중으로 갈수록 강판의 최종적인 찢어짐 형상이 복잡해지는 것을 확인할

수 있었고 심지어 강판의 비틀림 현상도 발생하였다. 그리고 SAPH 2.0 시편에서는 고하중에서는 계면 파단이 발생하다가 저하중 구간에 들어서면서 열영향부 파단 현상이 나타났는데, 피로한도가 정적강도에 비해 상당히 낮은 결과를 보였다. 용접조건이 부적절하였거나 재료의 기계적 성질이나 두께 때문에 용접이 불가능한 경우였을 수도 있다고 추측된다. 사진에 보이지는 않지만 SPCC 1.0/SAPH 2.0, SPRC 1.0/SAPH 2.0 시편들도 역시 비슷한 파단형상을 나타내었는데, 특징적인 것은 박판쪽에서의 균열이 저하중 구간에서는 시편폭 끝단까지 진전한다는 것이다. 또한 하중이 더 낮아졌을 때 박판이 아닌 후판인 SAPH 강판에서 균열이 성장, 파단까지 이르는 경우도 있었다.

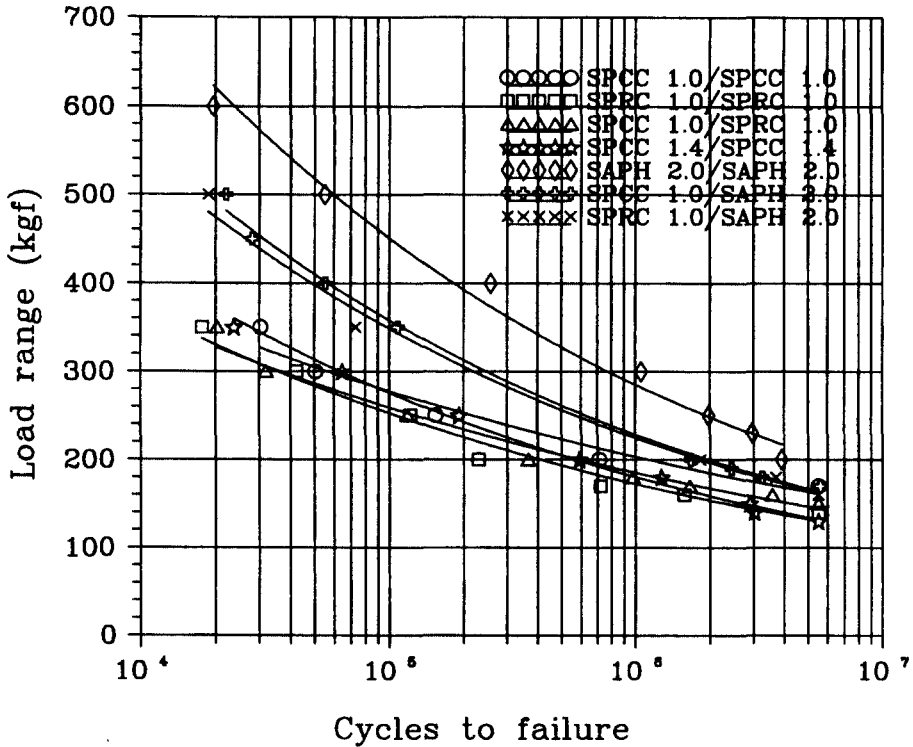
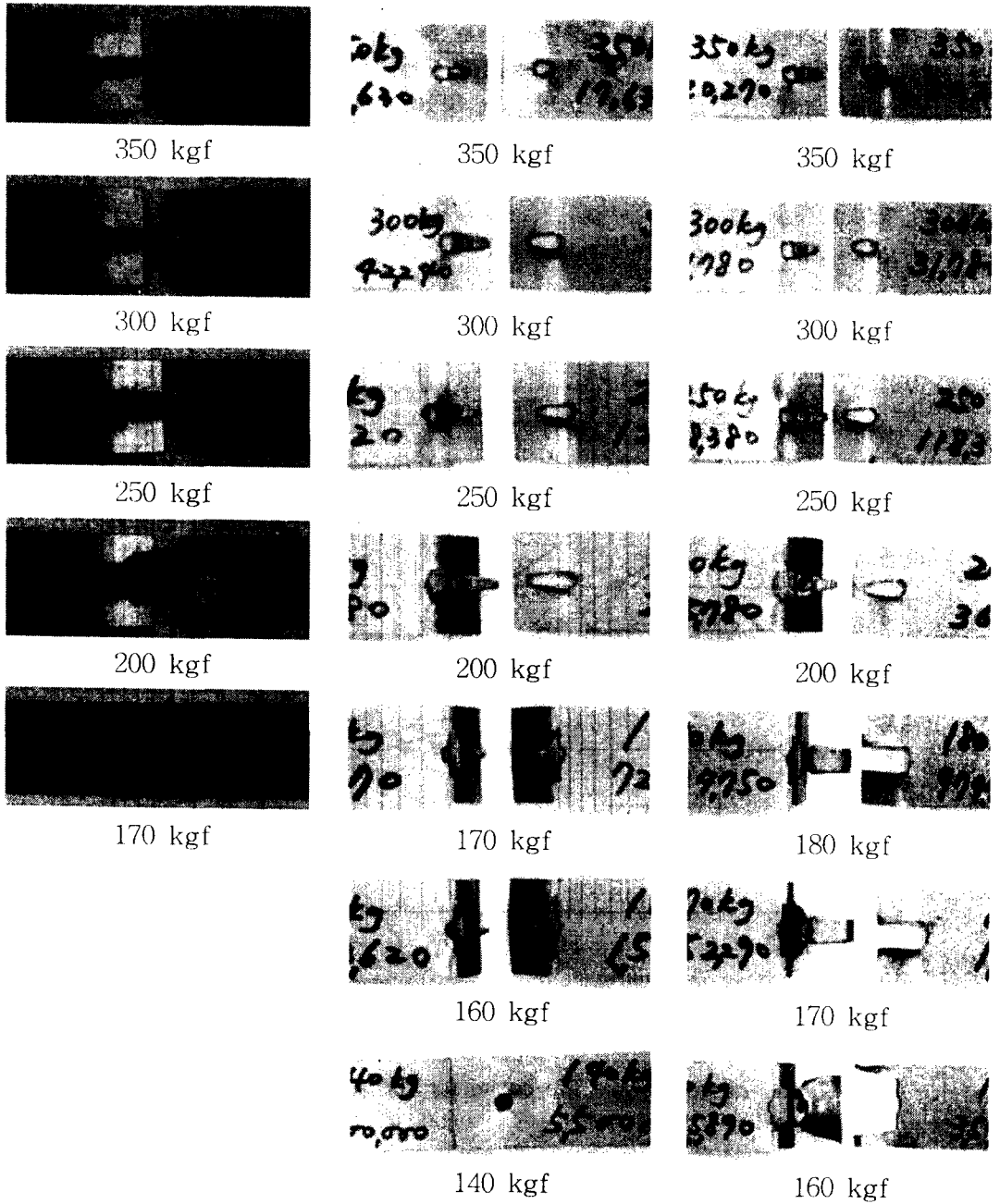


Fig. 6 Load range-fatigue life curve for the tensile-shear specimens



(a) SPCC 1.0/SPCC 1.0 (b) SPRC 1.0/SPRC 1.0 (c) SPCC 1.0/SPRC 1.0

Fig. 7 Fracture appearance of the tensile-shear fatigue test



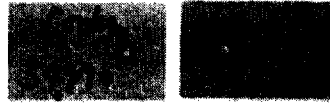
350 kgf



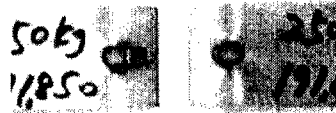
600 kgf



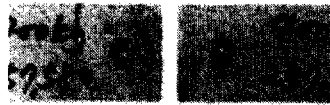
300 kgf



500 kgf



250 kgf



400 kgf



200 kgf



300 kgf



180 kgf



250 kgf



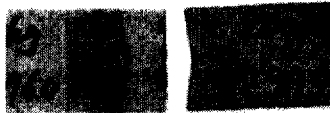
150 kgf



230 kgf



140 kgf



200 kgf

(d) SPCC 1.4/SPCC 1.4

(e) SAPH 2.0/SAPH 2.0

Fig. 7 Fracture appearance of the tensile-shear fatigue test(continued)

### 3.4 십자-인장 피로 시험

하중범위( $\Delta P$ )-파단사이클( $N_f$ ) 그래프는 Fig. 8에 나타내었다. CT 피로시험에서 각 시편들의 피로 강도는 TS 피로시험에서의 강도와 거의 유사한 양상을 나타냈다. SPCC 1.0, SPRC 1.0, SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편들은 정적강도와는 상관없이 고수명 구간에서 거의 동일한 피로한도를 나타내었다. 단 SPCC 1.4 시편과 SPRC 1.4 시편은 용접조건이 상이한 이유로 비교하기에 무리가 있지만 고수명 구간에서 1.0 mm 시편보다 향상된 피로성능을 보여주고 있다. 그리고 SPCC 1.0/SAPH 2.0, SPRC 1.0/SAPH 2.0 시편은 후판의 영향으로 피로성능이 향상되리라는 예상과는 달리 SPCC, SPRC 동종재료 시편과 거의 동일한 피로한도를 나타내었다. SAPH 2.0 시편은 역시 다른 시편보다 피로한도가 월등히 높았으나 정적강도에 비하면 그다지 우수하지 못하였다.

시편의 파단 형상은 Fig. 9에 나타나있다. SPCC 1.0 시편의 경우 저수명 고하중 구간에서는 너겟 주위의 열영향부내에서만 균열이 발생, 성장하여 너겟이 버튼모양으로 한쪽 강판에서 완전히 떨어져 나가면서 파단되었고, 고수명 저하중 구간에서는 열영향부에서 발생한 균열이 너겟 양쪽에서 강판의 길이방향과 수직방향으로 원호 모양을 띠며 강판속으로 진전하면서 파단되는 형상을 나타내었다. SPRC 1.0, SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편도 열영향부 파단인 것은 동일하나 균열이 강판속으로 진전하는 현상은 고하중이나 저하중의 특별한 구분없이 임의로 발생하는 것이 특징이었다. 그리고 SPCC 1.0/SPRC 1.0 시편에서는 주로 SPRC 강판에서 너겟이 완전히 떨어져 나가면서 파단되었으나 균열은 SPCC 강판에서 더 길게 성장하였다. 이러한 현상은 TS 피로시험에서도 확인되었다. SPCC 1.4, SPRC 1.4 시편의 파단형상도 앞에서 언급한 1.0 mm의 시편들과 거의 비슷한 경향이었다. 한편, 사진에는 보이지는 않지만 SAPH 2.0 시편에서는 TS 피로시험에서와 같은 계면 파단은 발생하지 않았다. 균열면이 상당히 거칠었고 한쪽 강판으로부터 떨어진 너겟부위의 형태가 불규칙하며 마치 깨진 유리조각과 같았다. 그리고 SPCC 1.0/SAPH 2.0 시편과 SPRC 1.0/SAPH 2.0 시편에서는 박판쪽에서의 너겟이 떨어져 나간 자리가 거의 원형에 가까울 만큼 깨끗하게 파단되는 전형적인 열영향부 파단이 발생하였다.

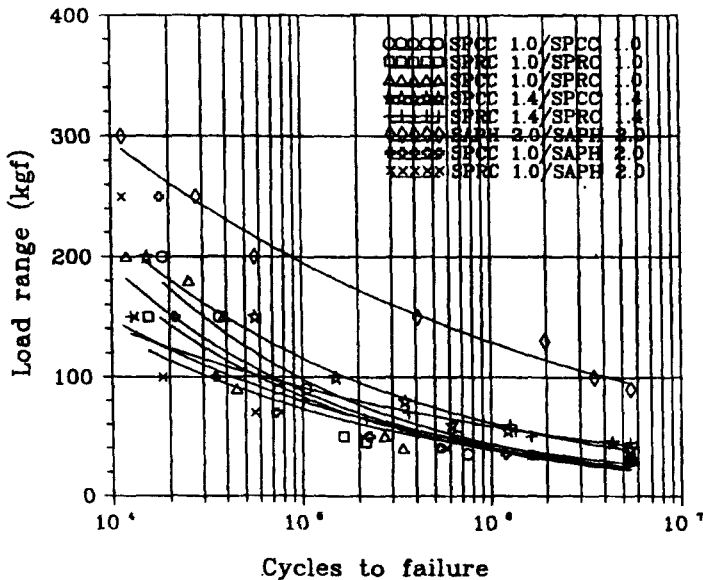
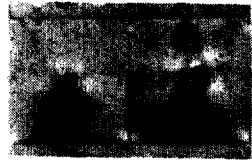
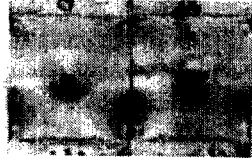


Fig. 8 Load range-fatigue life curve for the cross-tension specimens

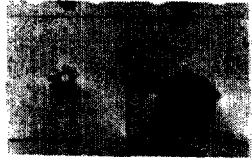




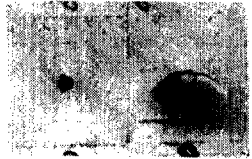
200 kgf



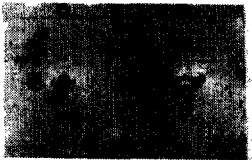
150 kgf



90 kgf



50 kgf



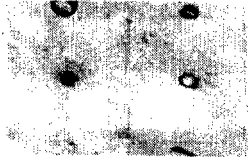
35 kgf



150 kgf



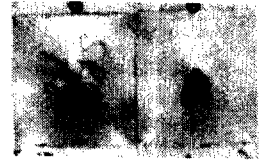
90 kgf



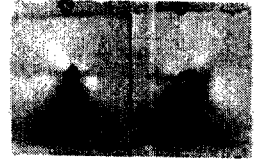
50 kgf



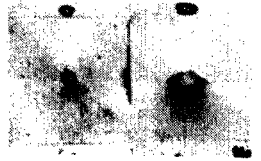
45 kgf



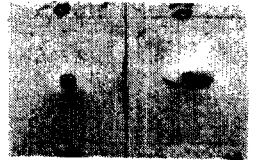
200 kgf



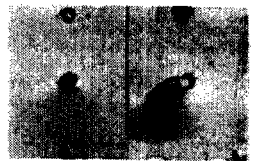
180 kgf



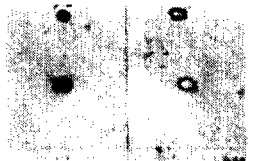
150 kgf



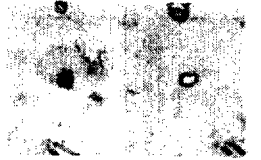
90 kgf



50 kgf



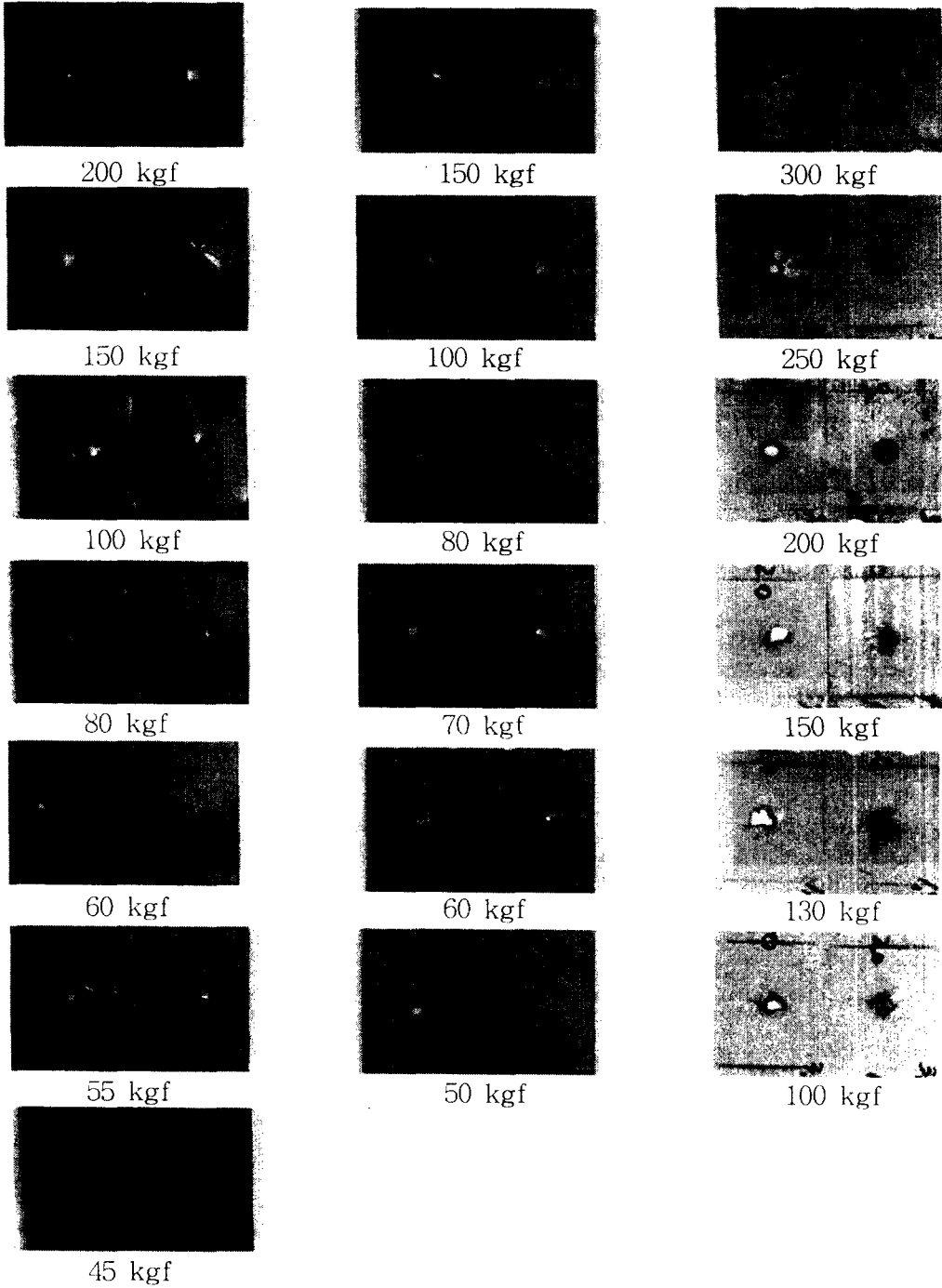
40 kgf



35 kgf

(a) SPCC 1.0/SPCC 1.0 (b) SPRC 1.0/SPRC 1.0 (c) SPCC 1.0/SPRC 1.0

Fig. 9 Fracture appearance of the cross-tension fatigue test



(d) SPCC 1.4/SPCC 1.4 (e) SPRC 1.4/SPRC 1.4 (f) SAPH 2.0/SAPH 2.0

Fig. 9 Fracture appearance of the cross-tension fatigue test(continued)

### 3.5 고찰

정적시험에 의한 각 시편들의 정적강도의 크기를 비교해본 결과, 시편을 이루고 있는 용접부재의 인장강도순과 동일한 순서로 나타나는 것을 알 수 있었다. 이로부터 점용접 시편의 정적강도는 용접부재의 인장강도에 비례한다는 것과 용접부재의 두께가 증가함에 따라 향상된다는 사실을 확인할 수 있었다. 한편, SPCC 1.0/SPRC 1.0 이중재료 시편은 SPCC, SPRC 동종재료 시편보다도 오히려 정적강도가 떨어지는 결과를 보였다. 이 현상은 TS, CT 시편 모두 동일하였다. 그리고 SPCC 1.0, SPRC 1.0 강판이 SAPH 2.0 강판과 점용접 되었을 때의 정적강도는 SPCC, SPRC 동종시편의 경우보다 월등하였다.

피로시험 결과로부터 시편들의 피로성능은 정적강도순과는 무관하게 고수명 저하중 구간에서 거의 유사한 피로한도를 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다. SPCC 1.0, SPRC 1.0 동종 및 이중시편은 물론 SAPH 2.0과의 이중시편의 경우도 마찬가지였고 TS, CT 시편 종류에도 역시 무관하게 일관된 크기를 나타내었다. 또한 SPCC가 SPRC에 비해 다소 향상된 피로성능을 나타내는 현상이 나타났는데, 이것은 높은 연성과 낮은 항복강도에 의한 상대적으로 큰 소성변형이 변형에너지를 흡수하기에 유리한 하중조건하에서는 점용접부의 응력집중을 완화시킬 수 있기 때문에 발생한 현상이라고 생각된다.

시험결과를 종합해본 결과 점용접 시편들의 피로성능은 용접부재의 항복강도나 인장강도의 크기와는 직접적인 관계가 없다는 것과 단지 정적강도만으로는 피로강도를 평가하기 어렵다는 것을 알 수 있었다. 점용접부의 정적 강도는 용접 전류에 의한 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있지만, 특히 피로강도는 다소 예외일 수 있다. 이러한 사실은 용접 전류의 증가에 의해 점용접부의 정적 강도는 증가하였으나 피로강도는 일정 한도의 용접 전류 내에서만 증가하고 그 이상에서는 오히려 감소하였다는 실험 보고의 결과로도 확인할 수 있다.<sup>[16]</sup>

## 4. 결론

차체 점용접 접합부에 대해 피로시험을 수행하여 전반적인 피로거동을 파악하고자 기본적인 인장-전단 시편과 십자-인장 시편을 제작하였다. 시편재료는 실제 파단 발생 부재를 구성하고 있는 재료 중 SPCC, SPRC35, SAPH38P를 선택하였고 용접조건, 이중 및 동종 재료간의 접합, 두께 조합을 가급적 실차와 동일하게 적용하였다. 시편에 대한 정적 및 피로시험을 수행하여 강도 데이터베이스를 구축하였고 이를 바탕으로 고찰한 연구결과 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. TS 및 CT 점용접 시편에 대해 정적시험을 수행한 결과 정적강도는 시편을 이루고 있는 용접부재의 인장강도의 순으로 나타났다. 그리고 두께 보강에 의해 정적 강도는 증가하였다. SPCC 1.0 동종시편보다 SPRC 1.0 동종시편의 강도가 더 컸고, 이들에 비해 SPCC 1.0/SPRC 1.0 이중시편의 강도는 더 작았다. SPCC 1.0, SPRC 1.0에 대한 SAPH 2.0과의 이중시편들은 동종시편일 때보다 강도가 향상되었고, SPRC 1.0/SAPH 2.0 시편이 SPCC 1.0/SAPH 2.0보다 더 컸다. 전체적으로 TS 시편의 정적강도는 CT 시편의 정적강도보다 높았다.

2. 피로시험 결과 저수명 구간에서의 피로하중은 용접부재의 강도순으로 나타나지 않았고, 고수명 구간에서도 대부분의 시편들은 이종재료 및 두께의 조합과 같은 기하학적 인 인자에 거의 무관하게 TS, CT 시편별로 유사한 피로한도를 나타내었다. CT 시편의 피로한도는 TS 시편 피로한도의 약 20 % 정도에 해당하였다.

## 5. 참고 문헌

- [1] Andreas Rupp, Klaus Storzel, and Vatroslav Grubisic, "Computer Aided Dimensioning of Spot-Welded Automotive Structures", *SAE Paper* 950711, 1995.
- [2] 배동호, "인장-전단하중을 받는 일점 Spot용접재의 파괴역학적 피로강도 평가" 자동차공학회지, Vol. 13, No. 5, pp. 42~50, 1991.
- [3] 오세빈, 손일선, 배동호, "스테인레스 박강판의 IB형 Spot 용접이음재에 대한 응력해석과 피로강도 평가", 한국자동차공학회 1998년도 춘계학술대회논문, pp. 762~767, 1998.
- [4] 박익근, "초음파계측에 의한 Spot용접품질의 비파괴평가", 대한용접학회지, 제 12 권, 제 3호, pp.109~117, 1994.
- [5] Oh, H. L., "Fatigue Life Prediction for Spot Weld Using Neuber's Rule", *ASTM STP* 761, pp. 296~309, 1981.
- [6] B. Pollard, R. H. Goodenow, "Spot Weldability of Dual-Phase Steel", *SAE Paper* 790006, 1979.
- [7] D. J. VandenBossche, "Ultimate Strength and Failure Mode of Spot Welds in High Strength Steels", *SAE Paper* 770214, 1977.
- [8] D. H. Orts, "Fatigue Strength of Spot Welded Joints in a HSLA Steel", *SAE Paper* 810035, 1981.
- [9] Masatoshi Shinozaki, Toshiyuki Kato, and Toshio Irie, "Fatigue of Automotive High Strength Steel Sheets and Their Welded Joints", *SAE Paper* 830032, 1983.
- [10] B. Pollard, "Fatigue Strength of Spot Welds in Titanium-Bearing HSLA Steels", *SAE Paper* 820284, 1982.
- [11] Pook, L. P., "Fracture Mechanics Analysis of the Fatigue Behavior of Spot Welds", *Int. Journal of Fracture*, Vol. 11, pp. 173~176, 1975.
- [12] James A. Davidson, "A Review of the Fatigue Properties of Spot-Welded Sheet Steels", *SAE Paper* 830033, 1983.
- [13] James A. Davidson and Edward J. Imhof, Jr., "A Fracture-Mechanics and System-Stiffness Approach to Fatigue Performance of Spot-Welded Sheet Steels", *SAE Paper* 830034, 1983.
- [14] James A. Davidson and Edward J. Imhof, Jr., "The Effect of Tensile Strength on the Fatigue Life of Spot-Welded Sheet Steels", *SAE Paper* 840110, 1984.
- [15] (社)自動車技術會, "自動車車体スポット溶接構造の疲労強度と壽命推定", 1986.
- [16] 김영동, "냉간압연강판 점용접부의 피로수명예측에 관한 연구", 홍익대학교 석사 학위논문, 1997.