

자동차용 대전류 단자 압착 최적화 기법 개발

김성우, 오신중, 정원욱

현대자동차

Development of optimizing method to crimp high current
terminal for wiring harness in vehicle

Kim Seong Woo, Oh Shin Jong, Jung Won Wook

HYUNDAI KIA MOTORS Corporate Research & Development Division Reliability TFT

Abstract

차량 전장품 중 와이어링 하네스에서 큰 전류가 흐르는 회로의 연결 단자가 가지는 전기적 내구 성능 및 기계적 성능을 확보하기 위하여 단자 압착부의 압축을 최적화 기법을 개발 하였다. 우선 단자 제작 과정을 표준화한 후 압착부의 주요 인자인 기계적 인장강도와 내부 부식 정도에 의한 전기적 저항 증대로 화재가 발생 가능성 관점에서 접근하였다. 여러 가지 실험을 통하여 얻어진 DATA를 분석한 결과 회귀 2차 모형을 사용하여 대전류 단자 압착부의 전기적/기계적 내구 성능 최적화 구간을 설정 하였으며, 이의 과정을 제시 하였다.

KEY WORD : 대전류 단자, 압착(Crimp), 압착저항, 압축율, 복합환경 부식, 회귀분석

1. 서 론

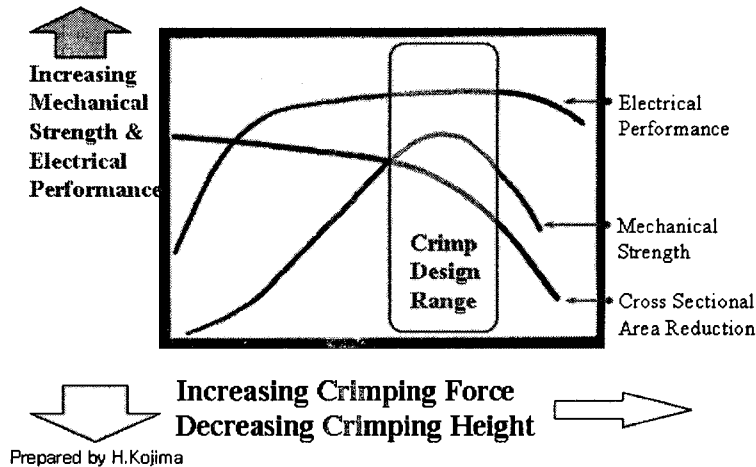
자동차 전장품 중 와이어링 하네스(Wiring Harness)는 말과 마차를 이어주는 마구와 같은 역할을 하는 것으로서 회로는 주로 전선과 단자로 구성 되어 있는데, 전선의 도체와 단자는 서로 다른 종류의 재료를 물리적인 힘을 이용하여 프레스에서 압착(Crimp)이라는 공정으로 연결되어 이 부위를 와이어 바렐(Wire Barrel) 또는 압착부라고 한다. 21세기에 들어서면서 차량에서 전장품의 비중이 점차 늘어남에 따라 알터네이터(Alternater)에서 발전되는 전류량 또한 늘어나게 되었고, 큰 전류를 흘려주는 회로의 허용치 및 전기적 안정성이 더욱 중요하게 되었다.

과거에는 큰 전류가 흐르는 대전류 단자의 압착부에는 안정적인 전기적 내구 성능을 확보하기 위해 납을 이용하여 추가적인 솔더링을 했으나, 2003년 이후 납 사용에 대한 중금속 규제에 의해 솔더링이 삭제 되거나 고가의 주석을 이용한 솔더링으로 대체되어 생산되고 있어 이에 따른 내구력 확보가 중요하게 되었다. 또한 자동차 보증 기간도 점차 늘어나는 추세로 신뢰성 향상을 위해서는 대전류 단자의 압착부 내구 품질 확보가 중요하게 되었다.

대전류 단자의 압착부 내부의 공극을 없앨 수 있도록 전선의 도체를 충분히 압축시켜 안정적인 전기적 내구성능을 확보하지 못하면, 큰 전류가 흐르는 대전류 단자의 압착부는 수분유입이나 진동 등으로 내구 열화가 쉽게 발생하고 이로 인한 압착부 내부 틈새부식으로 저항 증가 및 과도한 전압강하 발생으로 전장품의 작동 불량, 성능 저하를 일으키고, 심할 경우에는 전기적 에너지가 열 에너지로 나타나 소손, 화재 등의 심각한 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제를 근본적으로 개선코자 대전류 단자 와이어 바렐 설계에서부터 압착 기준 설정 및 필드를 보증할 수 있는 실험 조건과 최적 압착 구간을 설정하는 방법을 개발하는 것이 필요하게 되었다.

단자의 압착부에서 고려할 사항은 압착부의 기계적 강도(Crimping Force), 단면(Cross Sectional Area), 전기적 성능(Electrical Performance) 등이 있으며, 일반적으로 단면적이 감소함에 따라 압착강도가 커지고 압착고가 작아짐에 따라 단면적은 감소한다. 또한 이때 전기적 성능은 <그림1>과 같은 모양을 가진다고 알려져 있다.

차량 엔진룸에서 와이어링 하네스의 대전류 단자 압착부의 소손 발생 관련하여 고장 메커니즘은 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 압착부의 기계적 강도 부족으로 차량에서 진동과 같은 반복적인 힘에 의해서 도체가 단자 압착부에서 이탈되는 현상이고, 둘째는 압착부 내부의 틈새 부식으로 인한 도체의 산화피막 형성이 주 원인이며 이는 도체와 단자간에 전기적 저항을 증가시키고 결과적으로 전압강하로 인한 전장품의 성능저하, 작동불량 유발 또는 단자부 과열로써 화재 발생 등의 문제를 일으키게 된다.



<그림 1> 압착부 설계시 고려할 인자

따라서 이번 시험에는 펄드 조건과 유사하게 틈새부식을 가속시키는 복합환경 부식촉진 시험 모드 두 가지를 채택하여 도체 압축율에 따른 압착부 저항을 일정 사이클 마다 측정하여 미니탭의 회귀 2차 모형으로 분석한 결과를 토대로 단자 압착부의 안정적인 내구품질을 확보할 수 있는 최적 압착조건과 펄드를 재현할 수 있는 방법을 구현 하였다.

단자 와이어 바렐 설계에서부터 단면 검증 및 신뢰성 시험, 회귀분석을 통하여 전기적 내구 성능을 확보 할 수 있는 최적 압착구간을 찾는 기법을 개발하여 대전류 단자 표준화 프로세스로 제시 하겠다.

2. 본 론

2.1 실험 시료 및 방법

2.1.1 시료 제작 및 압축율 계산

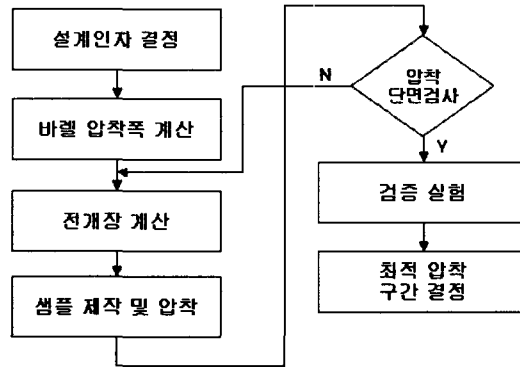
대전류 단자의 내구신뢰성 확보를 위한 압착 최적화를 위해서는 단자 바렐 설계의 이론적 근거와 압착에 사용되는 금형인 치구 제작이 매우 중요하다. 단자의 주요부위 명칭 및 형상을 <그림 2>에 나타내었다.



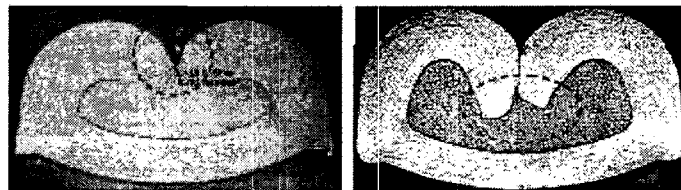
<그림 2> 단자 바렐부의 명칭 및 형상

압착 최적화를 위한 시료 제작 절차 및 검증 순서도를 <그림 3>에 나타내었다. 바렐 설계인자인 와이어 선종, 단자재질 및 단자두께를 정하게 되면 기존 사용중인 일반화된 식에 따라 바렐 압착폭이 결정되고 바렐 전개장을 계산할 수 있다.

예로써 전개장은 일반적으로 사용되고 있는 “ $m \cdot (n \cdot \text{도체외경} + \text{단자두께})$ (m, n : 최적 상수)”에 따라 추정할 수 있으나, 여러 가지 설계 및 제작 인자들의 영향으로 이 식이 항상 적용될 수 있다고 할 수 없기 때문에 시료 제작 후 <그림 3>과 같이 단면을 확인하고 적정성을 검토해야 한다.



<그림3> 검증 순서도



(a)

(b)

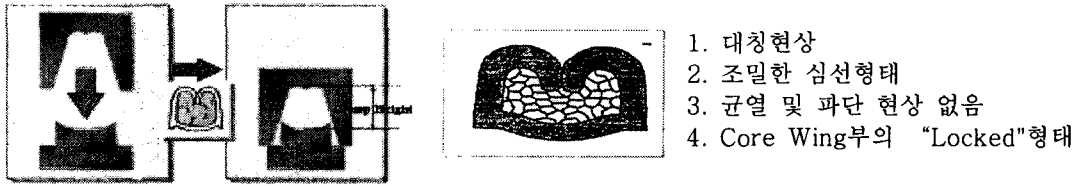
(a)전개장이 짧아서 와이어가 벌어져 도체가 밖으로 나옴

(b)전개장이 길어서 와이어가 과도하게 도체 내부로 들어옴

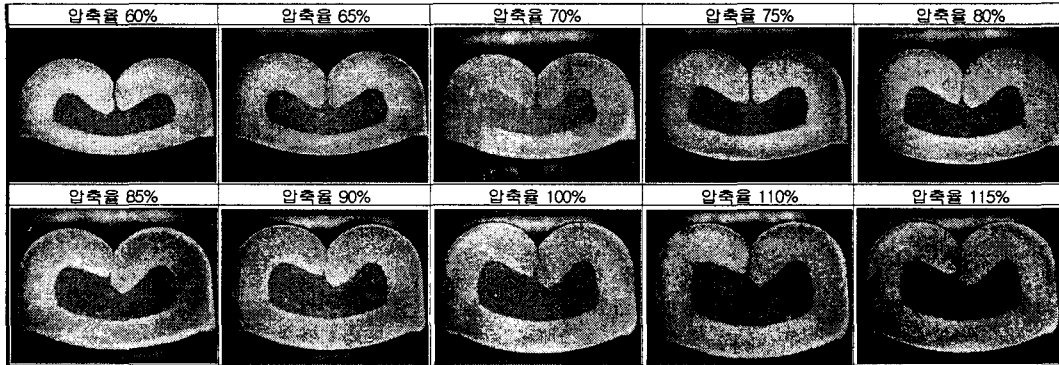
<그림3> 압착 단면 검증 예

<그림 2, 3>에 따라 단자 바렐부의 전개장이 결정되면 캐드를 이용하여 압축률에 따른 압착높이를 추정할 수 있게 되며, 이를 근거로 <그림 4>와 같이 압착 치구를 제작하고 시료를 제작 후 단면을 재차 확인하여 추정한 압축률이 얻어지는가를 검증하게 되며, 적정 단면 형상이 얻어지게 되면 내구검증을 실시한다. 압축율은 압착 전 도체의 계산 단면적 대비 압착 후 도체의 단면적을 백분율로 나타낸 것으로 내구 및 성능 결정하는 주요 인자이다. 압축율에 따른 단면을 <그림 5>와 같이 나타낸 것으로 도체의 압축이 덜 될수록(압축율이 높을수록) 도체 내부에 공극 발생이 증가하고 압착고는 커짐을 알 수 있다.

$$\text{압축율(\%)} = \frac{\text{압착 후 도체 단면적}}{\text{압착 전 도체의 계산 단면적}} \times 100$$



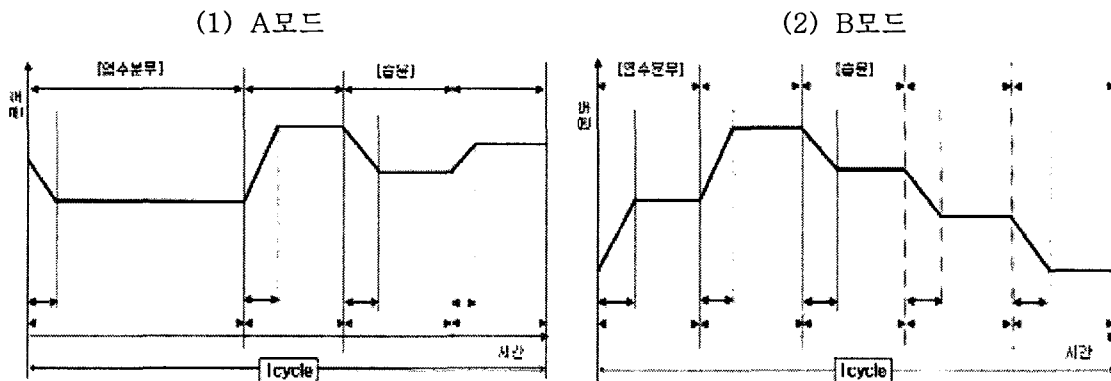
<그림4> 압착 공정 및 이상적인 압착 상태



<그림5> 압축율에 따른 단면 변화 예

2.1.2 신뢰성 시험

복합환경 부식촉진 시험은 차량 엔진룸 부식환경을 재현할 수 있도록 염수, 고온, 건조, 저온, 습윤 등의 환경 조건을 조합한 복합환경 부식 촉진 챔버에 넣고, <그림6>과 같은 A/B 두 가지 모드로 시험을 진행하며 고객 조건 1년에 해당하는 일정 사이클마다 시료의 압착부에 대한 저항을 측정한다.



<그림6> 복합환경 부식 모드



<그림 7> 저항 측정

2.2 시험 결과

필드 부식 환경 1년에 해당하는 일정 사이클 경과시 각 모드에 대한 단자 압착부 저항 측정 값이 기준을 초과 하면 숫자를 진하게 표기하고 시험을 중단하여 다음부터는 빈칸으로 표기하여 <그림 8>에 나타내었으며, 두 모드의 시험시 환경조건에 차이를 두어 어느 환경이 어떤 영향을 미치는지를 나타내었다. 압착저항 기준 이상을 고장이라 정의하고, 이의 기준은 차량에 미치는 성능 등을 고려하여 결정 하였다.

(1) A모드

압축률	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	110%	115%	
4회	#1	0.10	0.09	0.09	0.07	0.08	0.10	0.09	0.09	0.10	
	#2	0.08	0.07	0.13	0.13	0.07	0.08	0.12	0.14	0.08	0.28
	#3	0.09	0.06	0.11	0.07	0.11	0.10	0.12	0.11	0.12	0.07
	#4	0.11	0.09	0.10	0.00	0.07	0.09	0.09	0.13	0.09	0.10
	#5	0.13	0.05	0.08	0.09	0.05	0.13	0.12	0.09	0.07	0.10
	#6	0.10	0.06	0.09	0.12	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.12
5회	#1	0.07	0.09	0.09	0.07	0.08	0.08	0.11	0.14	0.14	0.39
	#2	0.12	0.08	0.09	0.10	0.07	0.07	0.09	0.09	0.15	0.63
	#3	0.09	0.15	0.11	0.08	0.12	0.07	0.07	0.20	0.12	0.10
	#4	0.09	0.09	0.09	0.09	0.05	0.11	0.07	0.12	0.09	0.20
	#5	0.11	0.08	0.09	0.09	0.13	0.07	0.08	0.09	0.05	0.09
	#6	0.08	0.09	0.09	0.21	0.09	0.11	0.09	0.14	0.11	0.14
6회	#1	0.15	0.09	0.10	0.09	0.08	0.14	0.12	0.12	0.17	
	#2	0.12	0.08	0.09	0.15	0.15	0.10	0.12	0.14	0.20	
	#3	0.13	0.01	0.13	0.12	0.23	0.19	0.12	0.47	0.19	0.11
	#4	0.14	0.10	0.13	0.25	0.14	0.12	0.14	0.11	0.09	0.27
	#5	0.08	0.14	0.14	0.14	0.03	0.14	0.10	0.10	0.11	0.07
	#6	0.12	0.12	0.12	0.29	0.05	0.14	0.15	0.14	0.22	0.33
7회	#1	0.17	0.23	0.21	0.19	0.41	0.15	0.21	0.15	0.24	
	#2	0.08	0.19	0.26	0.24	0.11	0.21	0.40	0.21	0.16	
	#3	0.26	0.54	0.30	0.15	0.24	0.19	0.15		0.74	0.80
	#4	0.20	0.45	0.22	0.25	0.28	0.15	0.15	0.15	0.20	0.55
	#5	0.07	0.14	0.23	0.19	0.05	0.09	0.14	0.19	0.07	0.16
	#6	0.15	0.03	0.15	1.01	0.16	0.25	0.78	0.14	0.15	0.16
8회	#1	0.21	0.29	0.27	0.27	0.27	0.24	0.22	0.22	1.00	
	#2	0.21	0.24		0.40	0.05	0.09	0.09	0.09	0.21	
	#3	0.08	0.04	0.09	0.21	0.45	0.31	0.09	0.09	0.97	0.97
	#4	0.07	0.14	0.09	0.58	0.27	0.24	0.05	0.07	0.20	0.20
	#5	0.24	0.07	0.07	0.06	0.07	0.70	0.07	0.07	0.07	0.16
	#6	0.24	0.07	0.07	0.25	0.05	0.05	0.21	0.20		
9회	#1	0.33	0.43	0.42	0.55	0.04	0.07	0.07	0.40		
	#2		0.53		0.50	0.06					
	#3			0.30		0.44					
	#4	0.42		0.52	0.07	0.05	0.54		0.07		
	#5	0.37	0.26	0.56	0.72	0.04		0.50	0.07	0.54	
	#6	0.39	0.04	0.51		0.08		0.03	0.08		

(2) B모드

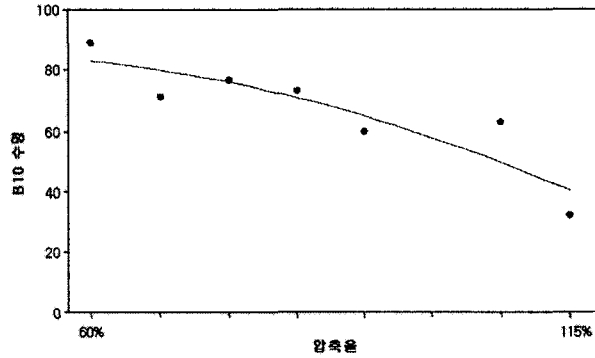
압축률	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%	110%	115%	
4회	#1	0.15	0.11	0.15	0.09	0.11	0.15	0.17	0.10	0.13	0.11
	#2	0.07	0.15	0.11	0.10	0.10	0.08	0.08	0.10	0.12	0.12
	#3	0.18	0.11	0.11	0.11	0.11	0.14	0.10	0.14	0.09	0.53
	#4	0.13	0.10	0.14	0.11	0.10	0.14	0.07	0.15	0.10	0.70
	#5	0.13	0.15	0.14	0.09	0.10	0.13	0.12	0.11	0.10	0.39
	#6	0.14	0.10	0.10	0.13	0.13	0.14	0.13	0.09	0.10	0.16
5회	#1	0.16	0.09	0.14	0.10	0.12	0.15	0.13	0.22	0.36	0.32
	#2	0.15	0.15	0.14	0.09	0.11	0.10	0.15	0.15	0.14	0.10
	#3	0.12	0.08	0.09	0.08	0.09	0.15	0.12	0.21	0.16	
	#4	0.13	0.16	0.10	0.13	0.09	0.23	0.16	0.13	0.16	
	#5	0.08	0.19	0.11	0.12	0.10	0.15	0.17	0.13	0.17	
	#6	0.08	0.15	0.11	0.25	0.08	0.16	0.09	0.09	0.09	0.02
6회	#1	0.14	0.17	0.20	0.17	0.30	0.14	0.16	0.20		
	#2	0.23	0.20	0.18	0.14	0.08	0.14	0.23	0.17	0.28	0.29
	#3	0.14	0.20	0.16	0.15	0.15	0.14	0.22	0.24	0.74	
	#4	0.17	0.16	0.15	0.09	0.10	0.51	0.16	0.18	0.24	
	#5	0.16	0.25	0.15	0.17	0.14	0.22	0.27	0.23	0.26	
	#6	0.10	0.16	0.15	0.16	0.12	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
7회	#1	0.25	0.21	0.62	0.19		0.20	0.54	0.21		
	#2	0.26	0.22	0.18	0.09	0.03	0.22	1.12	0.20	0.76	0.30
	#3	0.18	0.25	0.25	0.24	0.24	0.40	0.22	0.16		
	#4	0.16	0.42	0.20	1.04	0.14		0.15	0.22	0.23	
	#5	0.23	0.25	0.25	0.22	0.15	0.25	0.25	0.25	0.27	
	#6	0.03	0.00	0.03	0.45	0.20	0.53	0.25	0.25	0.25	0.06
8회	#1	0.04	0.00		0.22		1.40		0.73		
	#2	0.25	0.25	0.22		1.32	1.09		1.09		
	#3	0.16	0.00	1.32	0.20	0.27	0.40	0.27	0.27	0.27	
	#4	0.40		0.05	0.21		0.25	0.25	0.25	0.25	1.33
	#5	0.27	0.27	0.01	0.07	0.05	0.20	0.76	0.50	0.70	
	#6	0.03	0.00	0.70		0.05		0.05			
9회	#1				0.07						
	#2	0.40	0.54	1.01		0.56	0.56				
	#3	0.43	0.37			0.56	0.56				
	#4			0.51		0.53	0.53	0.00	0.42		
	#5	0.31	0.45			0.00	0.73	0.00			
	#6	0.52	0.52								

<그림 8> 복합환경 부식 모드별 측정값

A, B모드 모두 압축율이 높은 샘플에서 저항 증가를 보이며, 압축율 115%에서부터 먼저 압착저항 기준을 넘어서고, 압축율이 낮을 수록 저항 증가는 천천히 나타났다. 또한 A모드 보다 B모드에서 압착저항 초과로 인한 빈칸의 수가 많이 나타나고, 전체적으로는 더 빠른 양상

을 보임을 알 수 있다.

복합환경 부식 B모드의 압착부 저항값을 가지고 B10 수명을 분석하면 <그림 9>처럼 압축율이 높을수록 수명이 짧아지는 것을 볼 수 있다.



<그림 9> 복합환경 부식 B모드의 B10 수명

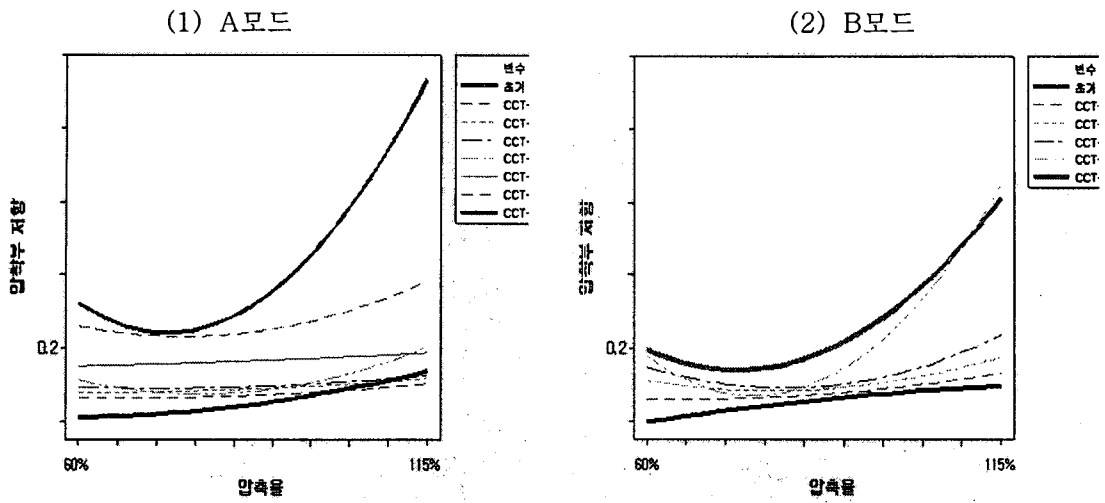
2.2.1 측정값 회귀분석

복합환경 부식 모드의 사이클(시간)에 대한 압착부 저항값의 변화 관계를 회귀분석을 이용하여 R 제곱 값이 높은 2차 모형을 선택하여 <그림 10>에 그래프로 나타내었다. A모드에서는 100사이클 경과 후에 압축율별로 저항값의 차이가 뚜렷한 커브를 나타내었고, B모드에서는 70사이클 이전에 나타났으나 커브의 꼭지점이 이전 사이클 커브보다 아래로 내려와서 70 사이클 경과 후의 커브를 선택하였다.

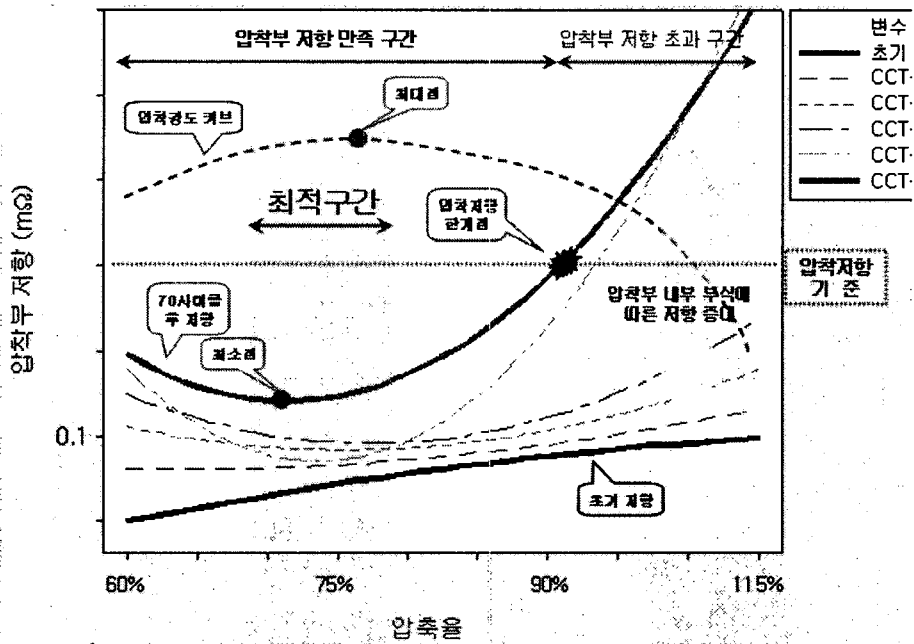
이는 A모드의 경우 시험조건에 따라 틈새부식 재현이 어렵고 B 모드에 비해 상대적으로 많은 시간이 소요되었기 때문이다. 저항 증대의 측면에서 B모드가 A모드에 비해 대전류 단자 압착부 틈새 부식 가속도가 30% 높은 것을 알 수 있다.

복합환경 부식 B모드의 회귀분석 그래프에 압착저항 기준선을 넣으면, 70사이클 경과 후 측정된 커브와 만나는 점이 생기는데, 이 점을 “압착저항 한계점” 이라고 한다. 이 한계점을 초과하는 압축율 90% 이상에서는 초기 저항기준을 만족하나 내구가 진행되면서 압착부 내부 틈새부식에 따른 저항 증대가 급격히 발생함을 <그림 11>을 보면 알 수 있다. 압축율 65% 이하에서는 압착저항 기준은 만족하나 내진동성을 고려하여 기계적 특성이 떨어지는 구간을 제외한다.

기계적 특성인 압착강도 커브를 고려하여 압착강도 최대점과 압착부 저항 만족구간에서 최소점의 가운데 교차되는 점을 찾아보면 압축율 73%에서 찾을 수 있는데, 대전류 단자 압착공정 제조공차를 고려하여 68~78% 최적구간으로 정할 수 있다.



<그림 10> 복합환경 부식 모드별 회귀모형



<그림 11> 복합환경 부식 B모드 회귀모형

3. 결 론

대전류 단자 설계는 각 협력사의 설계적 경험을 통한 단자 개발이 되어 품질 및 내구 문제가 지속적으로 발생되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 대전류 단자 압착부 압축율 최적화를 통해 해결하였다. 압착부의 최적화를 위해서 압축율을 비롯하여 여러 가지 인자를 조합하여 내구 성능을 확보 할 수 있는 최적압착(압축율) 구간을 찾는 기법을 개발 하였고, 실제에서

신뢰성시험 검증까지 확인 할 수 있는 프로세스를 확립하였다.

신뢰성 시험은 필드 엔진룸 조건과 유사한 복합환경 부식촉진 시험을 진행하면서 일정 사이클마다 압착부 저항을 측정하여 시간이 지남에 따라 압축율이 90% 이상에서 압착부 내부부식에 의한 급격한 저항 증가함을 찾았다.

차량에서 여러 부위에 사용되고 있는 대전류 단자를 와이어 선종, 선경별로 구분하고 이 기법을 사용하여 각각의 선종/선경에 대한 표준 와이어 바렐 및 최적 압착구간 개발함으로써 향후 개발기간 단축 및 안정적인 내구성능 확보가 가능할 것이다.

참고문헌

- 1) 현대자동차, 대전류 단자 표준화 개발 보고서, 2007
- 2) TYCO AMP, 압착 이론 보고서, 2004
- 3) USCAR 21, Performance Specification for Cable To Terminal Electrical Crimps, 2002