

• 문화체육관광부 선정 우수콘텐츠 잡지 •

지금 바로 웹 사이트(digikey.kr)에서

신제품을 만나세요!

# 반도체네트워크

## SEMICONDUCTOR NETWORK



Special Report

### 전원 공급 장치의 EMI 절감을 위한 시간 및 비용 효율적 혁신

# 2023.06

• 통권 : 338호 • 전화 : 02-792-9830 • <https://www.semnet.co.kr>



## Making green energy happen

기후 변화는 현시대의 가장 큰 과제입니다.

우리는 에너지를 생산하고 소비하는 방법에 대해 새로 생각해야 합니다.

인피니언의 반도체는 발전 및 송전, 저장과 소비까지 전체 전기 에너지 사슬의 필수 요소입니다.

탈탄소화를 위한 인피니언의 에너지 효율 기술은 살기 좋은 미래를 만들어갑니다.

Visit today [www.infineon.com/green-energy](http://www.infineon.com/green-energy)



# 로보틱스 및 드론을 위한 eGaN® FET 및 IC



	애플리케이션	eGaN® 기술	GaN 애플리케이션 및 장점
<p>웨어하우스 로보틱스</p>		<p>ePower™ Stage: EPC2152</p>	<p><b>DC-DC 전력변환</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율</li> <li>- 더 작고 가벼운 무게</li> <li>- 더 낮은 비용</li> </ul> <p>최신 세대의 GaN 디바이스는 로봇 시스템에 사용되는 DC 전력 시스템의 효율을 높이고, 크기와 시스템 비용을 줄일 수 있다.</p>
<p>드론</p>		<p>100 V eGaN® FET: EPC2218</p> <p>80 V eGaN® FET: EPC2103</p>	<p><b>라이다/ToF(Time of Flight)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 더 높은 분해능</li> <li>- 향상된 범위</li> <li>- 더 작고 가벼운 무게</li> </ul>
<p>서비스 로보틱스</p>		<p>200 V eGaN® FET: EPC2215</p>	<p>eGaN FET 및 IC는 ToF 시스템의 탁월한 분해능을 위해 매우 빠른 펄스(2ns 미만)로 매우 높은 스위칭 주파수(최대 200MHz)를 지원한다.</p>
<p>가정용 애플리케이션</p>		<p>eToF™ 레이저 드라이버 IC: EPC21601</p>	<p><b>BLDC 모터</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 더 작고 가벼운 무게</li> <li>- 더 높은 정밀도</li> <li>- EMI 감소</li> </ul>
<p>수술 및 의료용</p>		<p>80 V eGaN® FET: EPC2039</p>	<p>eGaN FET 및 IC는 로보틱스에 사용되는 48 ~ 100 V<sub>IN</sub> @10A ~ 40 A(500 W ~ 2 kW)의 통합 모터에 이상적이다.</p>

로보틱스를 위한 추천 디바이스

부품 번호	구성	V <sub>DS</sub> (V)	Max R <sub>DS(on)</sub> (mΩ) @ 5V <sub>GS</sub>	Q <sub>G</sub> typ (nC)	Q <sub>GS</sub> typ (nC)	Q <sub>GD</sub> typ (nC)	Q <sub>oss</sub> typ (nC)	Q <sub>RR</sub> (nC)	C <sub>ISS</sub> (pF)	C <sub>OSS</sub> (pF)	C <sub>RSS</sub> (pF)	I <sub>D</sub> (A)	Pulsed I <sub>D</sub> (A)	Max T <sub>J</sub> (°C)	패키지 (mm)	개발 보드
EPC2040	단일	15	30	0.745	0.23	0.14	0.42	0	86	67	20	3.4	28	150	BGA 0.85 x 1.2	n/a
EPC2023	단일	30	1.45	19	5.7	3.2	30	0	2150	1530	100	90	590	150	LGA 6.05 x 2.3	EPC9031
EPC2216	단일 - AEC-Q101	15	26	0.87	0.21	0.13	0.53	0	98	66	20	3.4	28	150	BGA 0.85 x 1.2	n/a
EPC2014C	단일	40	16	2	0.7	0.3	4	0	220	150	6.5	10	60	150	LGA 1.7 x 1.1	EPC9005C
EPC2015C	단일	40	4	8.7	2.7	1.2	19	0	980	710	18	53	235	150	LGA 4.1 x 1.6	EPC9001C
EPC2030	단일	40	2.4	17	5.8	3.4	32	0	1960	1120	62	48	490	150	BGA 4.6 x 2.6	EPC9060
EPC2024	단일	40	1.5	18	5.1	2.4	45	0	1920	1620	29	90	560	150	LGA 6.05 x 2.3	EPC9032
EPC2035	단일	60	45	0.88	0.25	0.16	2.6	0	95	60	2	1.7	24	150	BGA 0.9 x 0.9	EPC9049
EPC2102	하프 브리지	60	4.9	8	2.5	1.5	26, 31	0	850	500, 610	11	30	220	150	BGA 6.05 x 2.3	EPC9038
EPC2031	단일	60	2.6	16	5	3.2	48	0	1640	980	35	48	450	150	BGA 4.6 x 2.6	EPC9061
EPC2020	단일	60	2.2	16	3.9	2.3	50	0	1780	1020	24	90	470	150	LGA 6.05 x 2.3	EPC9033
EPC2203	단일 - AEC-Q101	80	80	0.67	0.22	0.12	3.6	0	73	47	0.5	1.7	17	150	BGA 0.9 x 0.9	n/a
EPC2039	단일	80	25	1.91	0.76	0.42	7.64	0	210	115	2	6.8	50	150	BGA 1.35 x 1.35	EPC9057
EPC2214	단일 - AEC-Q101	80	20	1.8	0.5	0.3	8	0	198	129	1.8	10	47	150	BGA 1.35 x 1.35	n/a
EPC2103	하프 브리지	80	5.5	6.5	2.2	1.1	30, 34	0	730	445, 525	7	30	195	150	BGA 6.05 x 2.3	EPC9039
EPC2029	단일	80	3.2	13	3.4	1.9	53	0	1410	820	17	48	360	150	BGA 4.6 x 2.6	EPC9046
EPC2021	단일	80	2.2	15	4.1	3	72	0	1610	1100	15	90	390	150	LGA 6.05 x 2.3	EPC9034
EPC2206	단일 - AEC-Q101	80	2.2	15	4.1	3	72	0	1610	1100	15	90	390	150	LGA 6.05 x 2.3	EPC90122
EPC2038	게이트 다이오드가 있는 단일	100	3300	0.044	0.02	0.004	0.134	0	7	1.6	0.02	0.5	0.5	150	BGA 0.9 x 0.9	EPC9507
EPC2037	단일	100	550	0.115	0.032	0.025	0.6	0	14	6.5	0.1	1.7	2.4	150	BGA 0.9 x 0.9	EPC9087
EPC2036	단일	100	73	0.7	0.17	0.14	3.9	0	75	50	0.7	1.7	18	150	BGA 0.9 x 0.9	EPC9050
EPC2106	하프 브리지	100	70	0.73	0.24	0.140	3.96, 4.68	0	79	52, 61	0.5	1.7	18	150	BGA 1.35 x 1.35	EPC9055
EPC2007C	단일	100	30	1.6	0.6	0.3	8.3	0	170	110	1.9	6	40	150	LGA 1.7 x 1.1	EPC9006C
EPC2051	단일	100	25	1.8	0.6	0.3	7.3	0	224	86	1	1.7	37	150	BGA 1.3 x 0.85	EPC9091
EPC2016C	단일	100	16	3.4	1.1	0.55	16	0	360	210	3.2	18	75	150	LGA 2.1 x 1.6	EPC9010C
EPC2212	단일 - AEC-Q101	100	13.5	3.2	0.9	0.6	18	0	339	238	3	18	75	150	LGA 2.1 x 1.6	n/a
EPC2052	단일	100	13.5	3.5	1.5	0.5	13	0	441	195	3.2	8.2	74	150	BGA 1.5 x 1.5	EPC9092
EPC2045	단일	100	7	6	1.9	0.8	25	0	767	295	3	16	130	150	BGA 2.5 x 1.5	EPC9078
EPC2001C	단일	100	7	7.5	2.4	1.2	31	0	770	430	10	36	150	150	LGA 4.1 x 1.6	EPC9002C
EPC2104	하프 브리지	100	6.8	6.8	2.3	1.4	35, 41	0	730	430, 500	5	30	180	150	BGA 6.05 x 2.3	EPC9040
EPC2032	단일	100	4	12	3	2	66	0	1270	800	12	48	340	150	BGA 4.6 x 2.6	EPC9062
EPC2204	단일	100	6	5.7	1.8	0.8	25	0	644	304	2.3	29	125	150	LGA 2.5 x 1.5	EPC9097
EPC2053	단일	100	3.8	11.4	4.1	1.5	45	0	1453	642	10.4	48	246	150	BGA 3.5 x 2	EPC9093
EPC2218	단일	100	3.2	10.5	3.2	1.5	46	0	1189	562	4.3	60	231	150	LGA 3.5 x 1.95	EPC90123
EPC2022	단일	100	3.2	13.2	3.4	2.4	71	0	1400	840	7	90	390	150	LGA 6.05 x 2.3	EPC9035
EPC2302	단일	100	1.8	23	8	2.3	85	0	3200	1000	7	101	408	150	QFN 3 x 5	EPC90142
EPC2033	단일	150	7	12	3.8	3.2	90	0	1160	480	6	48	260	150	BGA 4.6 x 2.6	EPC9047
EPC2059	단일	170	9	5.7	1.3	0.9	35	0	633	267	1.6	24	102	150	LGA 2.8 x 1.4	EPC9098
EPC2012C	단일	200	100	1	0.3	0.2	10	0	100	64	0.4	5	22	150	LGA 1.7 x 0.9	EPC9004C
EPC2019	단일	200	50	1.8	0.6	0.35	18	0	200	110	0.7	8.5	42	150	LGA 2.7 x 0.95	EPC9014
EPC2010C	단일	200	25	3.7	1.3	0.7	40	0	380	240	1.8	22	90	150	LGA 3.6 x 1.6	EPC9003C
EPC2207	단일	200	22	4.5	1.3	0.7	23	0	454	130	0.7	14	54	150	LGA 2.9 x 0.9	EPC90124
EPC2215	단일	200	8	13.6	3.3	2.1	69	0	1356	390	2	32	162	150	LGA 4.6 x 1.6	EPC9099
EPC2034C	단일	200	8	11.4	3.8	2.1	95	0	1166	630	2.8	48	213	150	BGA 4.6 x 2.6	EPC9048C

표의 데이터는 변경될 수 있습니다. 최신 정보 보기: [www.epc-co.com/epc/Products/eGaNfetsandICs.aspx](http://www.epc-co.com/epc/Products/eGaNfetsandICs.aspx)

eGaN® IC

ePower™ 스테이지

부품 번호	구성	기능	VPwr	I <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT,Peak</sub>	V <sub>DD</sub>	입력 로직	F (Max)	UVLO	패키지 (mm)	개발 보드
EPC2152	하프 브리지 ePower™ 스테이지	ePower™ 스테이지	80	12.5	90	12	3.3V	3 MHz	7.5	LGA 3.65 x 2.59	EPC90120
EPC23101	HS FET + 드라이버 + 레벨 시프트	ePower™ 스테이지	100	65	240	6	5.5V	3 MHz	0.5 - 4V	QFN 3.5 x 5	EPC90142

eToF™ 레이저 드라이버 IC

부품 번호	구성	기능	VPwr	I <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT,Peak</sub>	V <sub>DD</sub>	입력 로직	F (Max)	UVLO	패키지 (mm)	개발 보드
EPC21601	단일	eToF™ 레이저 드라이버	40	3.7	10	5	3.3V	200	0	BGA 1 x 1.5	EPC9154
EPC21603	단일	eToF™ 레이저 드라이버	40	3.7	10	5	LVDS	200	0	BGA 1 x 1.5	EPC9156

자세한 정보는 웹사이트 로보틱스 페이지에서 확인할 수 있습니다:



추가 자료요청 및 문의: 문의사항은 [winnie.wong@epc-co.com](mailto:winnie.wong@epc-co.com) 또는 [info@epc-co.com](mailto:info@epc-co.com)으로 보내주세요.

EPC 웹사이트: [www.epc-co.com](http://www.epc-co.com) EPC 최신 정보 구독신청은 [bit.ly/EPCupdates](http://bit.ly/EPCupdates) 에 등록하거나 22828로 "EPC" 텍스트를 보내주세요.



eGaN is Efficient Power Conversion Corporation의 등록 상표입니다.

## GaN 신뢰성 및 수명 예측: 15단계(2)

많은 다양한 응용 분야에서 GaN 디바이스의 신속한 채택은 신뢰성 통계의 지속적인 축적과 집적 회로(IC)를 포함한 GaN 디바이스의 기본 물리학에 대한 연구를 필요로 한다. 또한 실험실에서 얻어진 데이터를 확인하거나 임무 확실성에 대한 새로운 질문들도 실제 경험에서 정보를 찾아야 한다. 이 15단계 신뢰성 보고서는 테스트-투-실패 방법론을 사용하여 지속적인 작업을 문서화하였고, 태양광 최적화기, 라이더 센서 및 DC-DC 컨버터에 대한 구체적인 신뢰성 메트릭과 예측을 추가하였다.

글 | Ricardo Garcia, Siddhesh Gajare, Ph.D., Angel Espinoza, Max Zafrani, Alejandro Pozo, Ph.D., Shengke Zhang, Ph.D., EPC

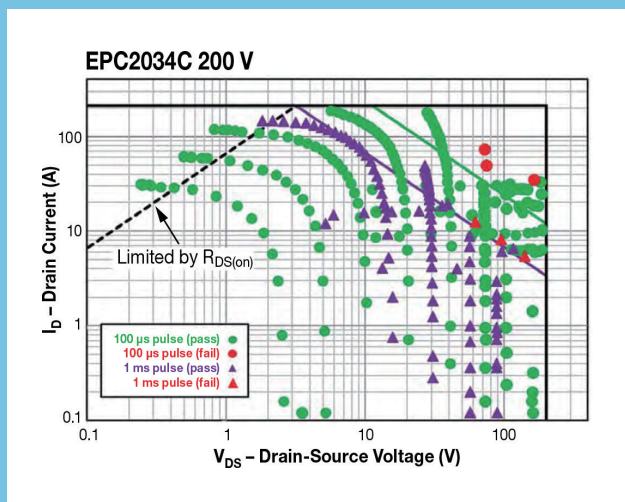
SOA(safe operating area) 테스트는 GaN 트랜지스터를 특정한 펄스 지속시간으로 높은 전류( $I_D$ )와 높은 전압( $V_{DS}$ )에 노출시킨다. 이 테스트의 목적은, 트랜지스터가 데이터시트에서 표기하고 있는 SOA 이내의 모든 지점들( $I_D$ ,  $V_{DS}$ )로 결함을 일으키지 않고 동작하는지 확인하는 것이다. 안전 영역 바깥에서 결함을 일으키는 것을 테스트해서 안전 마진을 확인할 수도 있다. SOA 테스트를 실시할 때 다이 상으로 높은 전력 소산으로 인해서 접합부 온도가 급격하게 상승하고 가파른 열 구배(thermal gradient)가 형성된다. 충분히 높은 전력 또는 펄스 지속시간이 가해지면 디바이스가 빠르게 과열되고 심각한 결함을 나타낸다.

이것을 열 과부하 결함이라고 한다. Si MOSFET으로는 SOA 테스트 시에 이차 항복(Spirito 효과라고도 함[2])이라고 하는 또 다른 결함 메커니즘이 관찰된다. 이 결함 모드는 높은  $V_D$ 에다 낮은  $I_D$ 일 때 발생하는 것으로서, 접합부 온도와 임계값  $V_{TH}$  사이의 불안정한 피드백으로 인해서 발생된다. 펄스 동안에 접합부 온도가 상승함에 따라서  $V_{TH}$ 가 낮아지는데, 이것은 펄스 전류를 상승하게 만든다. 이렇게 상승하는 전류는 온도가 더 빠르게 상승하도록 만들고, 그럼으로써 양의 피드백 루프를 형성함으로써 열 폭

주를 일으키고 결국에 결함으로 이어진다. 이 시험의 목적은 GaN 트랜지스터로 Spirito 효과가 존재하는지 알아보는 것이다.

DC나 지속시간이 긴 펄스로 트랜지스터의 SOA 능력은

그림 8. EPC2034C의 SOA 플롯. 'Limited by  $R_{DS(on)}$ ' 라인은  $150^\circ\text{C}$ 로  $R_{DS(on)}$ 의 데이터시트 최대 사양을 기준으로 한 것이다. 1ms 펄스(보라색 삼각형)와  $100\mu\text{s}$  펄스(녹색 동그라미)로 측정된 결과들을 볼 수 있다. 빨간색 삼각형(1ms)과 빨간색 동그라미( $100\mu\text{s}$ )는 결함을 나타낸다. 모든 결함들은 데이터시트 SOA 바깥에서 발생된다는 것을 알 수 있다.



디바이스 히트싱크를 어떻게 하느냐에 따라서 크게 좌우된다. 진정한 SOA 능력을 평가하기란 기술적으로 매우 까다로운 일이며, 흔히 특수한 수냉각 히트싱크를 필요로 한다. 하지만 짧은 펄스(1ms 미만)로는 히트싱크가 SOA 성능에 영향을 미치지 않는다. 이처럼 짧은 시간에는 접합부로 발생된 열이 어떠한 외부적 히트싱크로 확산될 수 있는 시간이 충분하지 않기 때문이다. 다만 모든 전기 전력이 변환되면서 GaN 박막과 인접 실리콘 서브스트레이트의 온도(열 커패시턴스)를 상승시킨다. 이러한 점들을 고려해서 이 시험에서는 1ms와 100 $\mu$ s의 두 가지 펄스 지속시간으로 SOA 테스트를 실시했다.

그림 8은 200V EPC2034C의 SOA 데이터를 보여준다. 이 플롯으로 개별 펄스 테스트들을 공간( $I_D$ ,  $V_{DS}$ ) 상의 점들로 나타내고 있다. 이 점들을 데이터시트 SOA 그래프와 겹쳐서 보여주고 있다. 100 $\mu$ s 펄스와 1ms 펄스 데이터를 함께 볼 수 있다. 녹색 동그라미는 100 $\mu$ s 펄스로 테스트를 통과한 것이고, 빨간색 동그라미는 테스트에 실패한 것이다. 낮은  $V_{DS}$ 에서부터  $V_{DSmax}$ (200V)에 이르기까지 넓은 SOA 영역에 걸쳐서 어떠한 결함을 나타내지 않는다는 것을 알 수 있다(이 영역에 걸쳐서 모두 녹색 동그라미). 모든 결함(빨간색 동그라미)은 데이터시트 그래프 상의 녹색 선으로 표시된 SOA 영역 바깥에서 발생되고 있다. 1ms 펄스 데이터도 마찬가지로(보라색 및 빨간색 삼각형). 모든 결함은 데이터시트 SOA 영역 바깥에서 발생되고 있다.

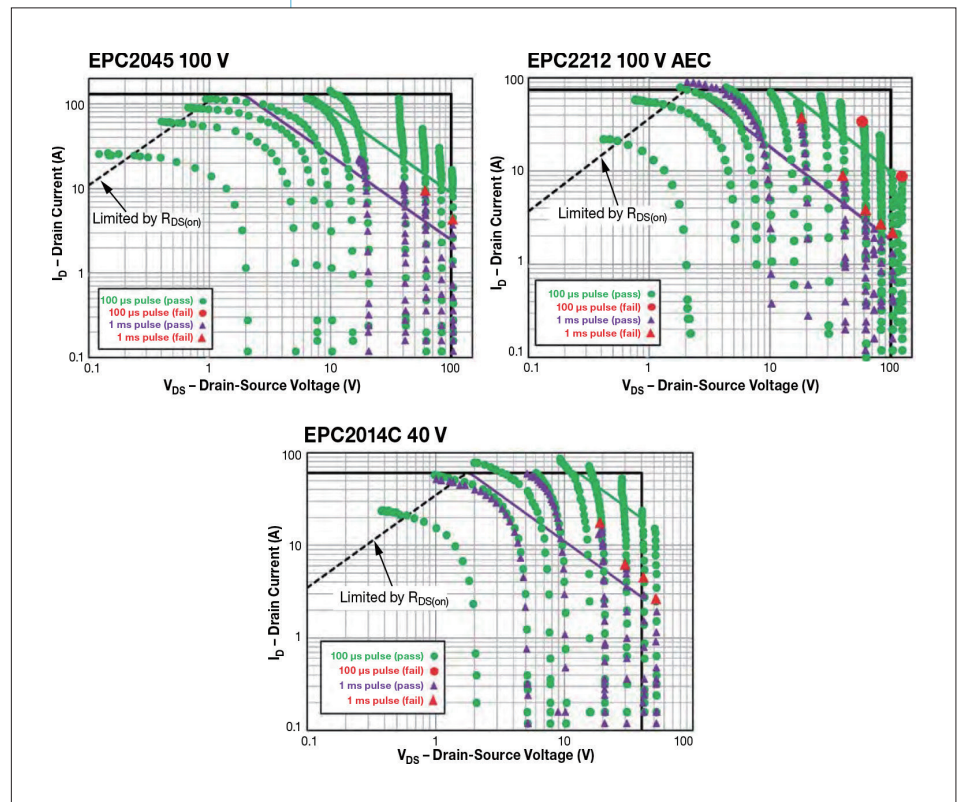
그림 9에서는 또 다른 3개 제품으로서 AEC EPC2212(4세대 차량용 100V), EPC2045(5세대 100V), EPC2014C(4세대 40V)의 SOA 데이터를 보여준다. 세

경우 모두로 데이터시트 SOA 영역으로는 결함이 발생되지 않고, 모든 결함은 SOA 한계선 바깥에서 발생되고 있으며 대개가 한계선 훨씬 바깥에서 발생되고 있다는 것을 알 수 있다.

이 데이터시트 SOA 그래프는 디바이스 열 모델(모든 관련 레이어들과 각기 레이어의 열 전도도 및 열 용량 포함)을 사용해서 유한 요소 분석을 통해서 생성된 것이다. 트랜션트 시뮬레이션을 바탕으로 다음과 같은 간단한 기준에 따라서 SOA 한계선을 계산한다. 즉, 주어진 펄스 지속시간으로 펄스가 끝날 때까지 접합부 온도가 150 $^{\circ}$ C를 넘지 않도록 하는 전력 소산이다. 이 기준에 따라서 일정한 전력으로 제한된다. SOA 그래프 상으로 45 $^{\circ}$  녹색(100 $\mu$ s) 및 보라색(1ms) 선들이 여기에 해당된다.

이 접근법으로 얻어지는 데이터시트 그래프는 안전 동작 영역을 보수적으로 정의한다. 이것은 이 글에서 제시

그림 9. EPC2045(위 왼쪽), EPC2212(위 오른쪽), EPC2014C(아래)의 SOA 플롯. 'Limited by  $R_{DS(on)}$ ' 라인은 150 $^{\circ}$ C로  $R_{DS(on)}$ 의 데이터시트 최대 사양을 기준으로 한 것이다. 1ms 펄스(보라색 삼각형)와 100 $\mu$ s 펄스(녹색 동그라미)로 측정 결과들을 보여준다. 빨간색 삼각형(1ms)과 빨간색 동그라미(100 $\mu$ s)는 결함을 나타낸다. 모든 결함은 데이터시트 SOA 영역 바깥에서 발생되고 있다.



하는 포괄적인 테스트 데이터로도 확인할 수 있다. 전력 MOSFET으로 이와 같은 일정 전력 접근법은 고전압 구간에서 능력을 과대평가하게 된다. 이 구간에서는 열 불안정성으로 인해서 성급하게 결함이 발생된다(Spirito 효과).

결함의 정확한 물리적 성격에 대해서는 좀더 규명할 필요가 있을 것인데, 이 시험에서 확실히 알 수 있는 것은 GaN 트랜지스터가 자신의 데이터시트 SOA 이내로 동작했을 때 결함을 발생시키지 않는다는 것이다.

### 단락 회로 견고성 테스트

단락 회로 견고성은 FET이 ON(전도) 상태에서 전원 컨버터로 발생하는 예기치 않은 결함 조건을 견디는 능력을 말한다. 이러한 이벤트 시에 디바이스는 최대 버스 전압에 다 트랜지스터 고유의 포화 전류와 회로 기생 저항에 의해서만 제한되는 전류를 겪는다. 이 회로 기생 저항은 애플리케이션에 따라서 그리고 결함의 위치에 따라서 달라진다. 보호 회로가 작동해서 이 단락 회로 상태를 진압하지 않는다면 과도한 전력 소산이 결국에 트랜지스터의 열 결함으로 이어질 것이다. 단락 회로 테스트의 목적은 이러한 조건이 발생되었을 때 디바이스가 견디는 시간을 수치화하는 것이다.

통상적인 보호 회로(예를 들어서 IGBT 게이트 드라이버의 탈포화 보호)는 2~3 $\mu$ s에 과전류 조건을 감지하고 대응할 수 있다. 그러므로 GaN 트랜지스터가 억제되지 않은 단락 회로 조건을 약 5 $\mu$ s 혹은 그 이상 동안 견딜 수 있으면 바람직할 것이다.

참고문헌 [8]에서는 단락 회로 견고성 평가에 주로 사용되는 두 가지 테스트 회로에 대해서 설명하고 있다. 이들 테스트 회로는 다음과 같다:

- **HSF(hard-switched fault):** 드레인 전압을 인가하고서 게이트를 온으로 (및 오프로) 스위칭한다.
- **FUL(fault under load):** 게이트가 온인 상태에서 드레인 전압을 온으로 스위칭한다.

이 시험은 디바이스들을 이 두 가지 결함 모드 모두로 테스트했는데, 견딜 시간에 있어서 큰 차이를 발견하지 못했다. 그러므로 이 글에서는 FUL 결과를 위주로 설명하겠다.

다만 HSF 테스트와 관련해서 한 가지 언급하자면, GaN 트랜지스터는 실리콘 기반 IGBT[9]로 발생할 수 있는 것과 같은 어떠한 래칭이나 게이트 제어 소실을 나타내지 않았다. 이것은 GaN 디바이스로 기생 바이폴라 구조를 사용하지 않기 때문인 것으로 짐작된다. 트랜지스터가 심각한 결함을 나타내기 전에 게이트를 로우(low)로 스위칭해서 단락 회로를 완전히 진압할 수 있다. 이것은 보호 회로 디자인을 위해서 이로운 점이다.

다음의 두 가지 GaN 트랜지스터들을 대표로 테스트했다:

- 1) EPC2203(80V): 4세대 차량용(AEC) 디바이스
- 2) EPC2051(100V): 5세대 디바이스

이들 디바이스를 선택한 것은 각자 제품군으로 크기가 가장 작은 제품들이기 때문이다. 이들 디바이스는 단락 회로 평가에 필요로 하는 높은 전류가 가능하므로 테스트를 간소화할 수 있다. 그런데 간단한 열 스케일링 인자(thermal scaling argument)에 기반해서, 견딜 시간은 같은 제품군 내의 다른 디바이스들과 동일할 것으로 짐작된다. 그러므로 EPC2203의 결과는 EPC2202, EPC2206, EPC2201, EPC2212에도 해당되며, EPC2051의 결과는 EPC2045와 EPC2053에도 해당된다.

**그림 10**에서는 일련의 증가하는 드레인 전압으로 EPC2203의 FUL 데이터를 보여준다.  $V_{GS}$  6V와 10 $\mu$ s 드레인 펄스로 60V  $V_{DS}$ 에 이르기까지는 결함이 발생되지 않는다. 이 조건으로 0.9mm x 0.9mm 다이로 1.5kW 이상을 소산한다. 더 높은  $V_{DS}$ 로는 펄스 동안에 시간이 경과하면서 전류가 감소하는 것으로 나타난다. 이것은 디바이스 내에서 접합부 온도가 상승한 결과로서 어떠한 영구적인 저하를 나타내는 것은 아니다.

더 긴 펄스 지속시간(25 $\mu$ s)을 사용하면 열 과부하로 인해서 결국에 결함이 발생된다. **그림 11**은 이 파형들을 보여준다. 드레인 전류가 갑자기 급격하게 상승하는 것이 결함이 발생하는 때이다. 이 이벤트가 발생되고 나서는 디바이스가 영구적으로 손상된다. 펄스가 시작된 시점부터 결함이 발생된 시점까지가 견딜 시간이다.

견딜 시간에 관한 통계를 얻기 위해서 이 접근법을 사용해서 이들 제품을 8개씩 결함이 발생될 때까지 테스트했다. **표 2**는 이 결과를 요약해서 보여준다. EPC2203

그림 10. 일련의 증가하는 드레인 전압으로 EPC2203의 FUL(fault under load) 테스트 파형. 드레인 펄스는  $10\mu\text{s}$ 이고,  $V_{GS} = 6\text{V}$ 이다. 이 펄스 폭으로는 결함이 발생되지 않았다. 시간 대비  $V_{DS}$ , 곧바로 디바이스 단자들에서  $V_{DS}$ 를 켈빈 검출했다(위). 시간 대비  $I_{DS}$ , 자체 발열로 인해서  $I_{DS}$ 가 시간에 따라서 감소한다는 것을 알 수 있다(가운데). 이 테스트 시퀀스로 결과적인 출력 곡선(아래). 드레인 전류는 펄스가 가해지는 동안의 평균 전류이다. 높은  $V_{DS}$ 에서는 디바이스 발열로 인해서 드레인 전류가 포화 구간에서 다시 감소한다.

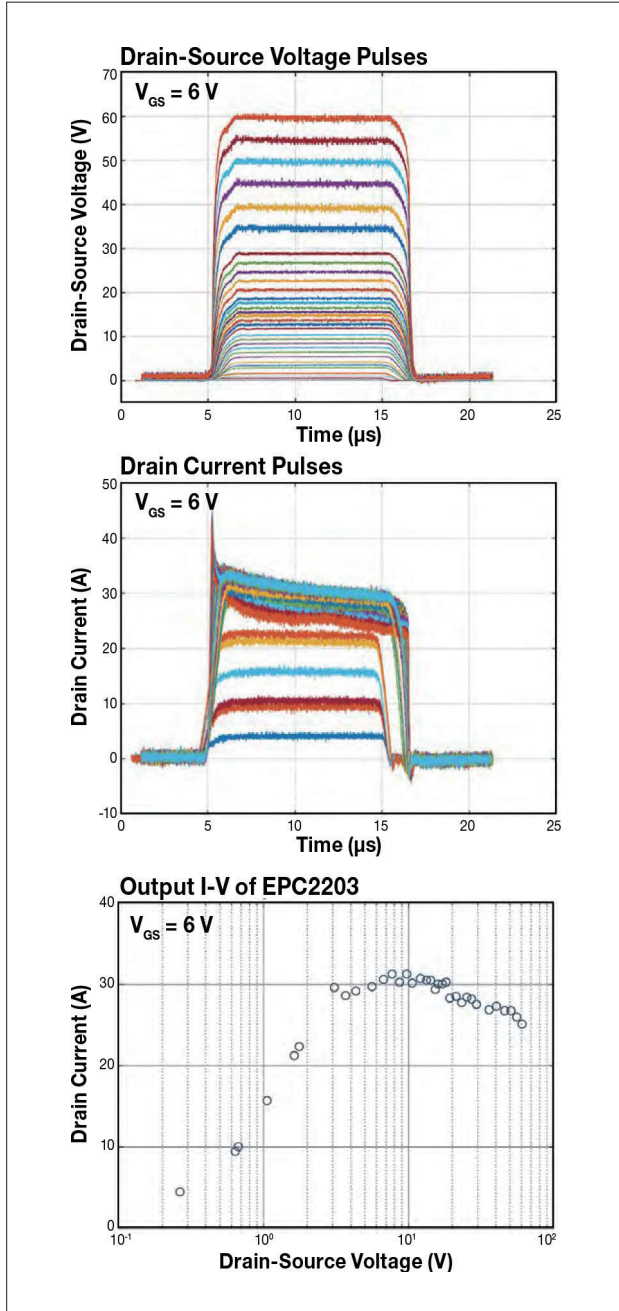
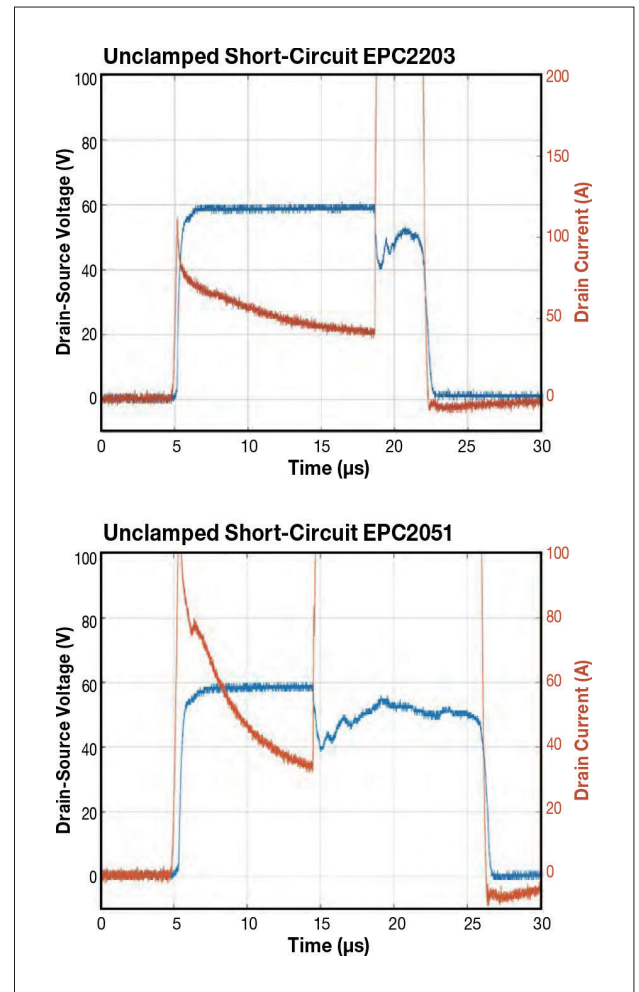


그림 11. EPC2203(위)과 EPC2051(아래)의 FUL 테스트 파형.  $V_{DS} = 60\text{V}$ ,  $V_{GS} = 6\text{V}$ ,  $25\mu\text{s}$  드레인 펄스. 드레인 전류가 갑자기 급격히 상승하는 것이 심각한 열 결함이 발생되는 때이다.



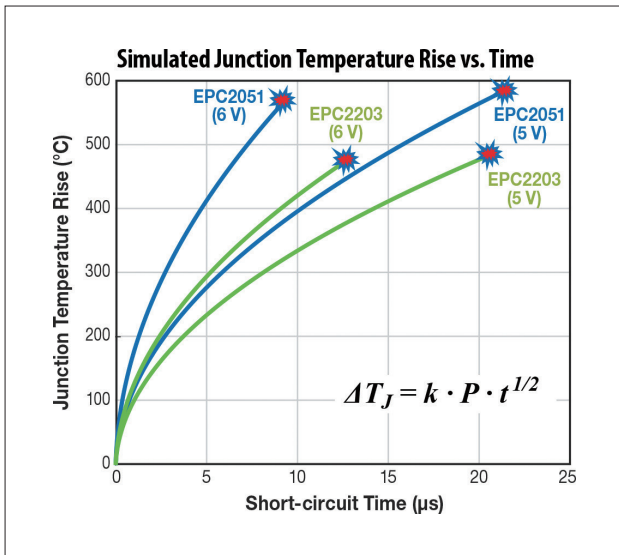
을  $5\text{V}$ (권장 게이트 구동)와  $6\text{V}$ ( $V_{GS(max)}$ )로 테스트했을 때 평균 견딜 시간은 각각  $20\mu\text{s}$ 와  $13\mu\text{s}$ 이었다.  $6\text{V}$ 로 견디는 시간이 더 짧은 것은 포화 전류가 더 높기 때문이다. EPC2051은  $6\text{V}$ 로 EPC2203과 비교해서 결함이 발생되기 까지 시간(time-to-fail)이 약간 더 짧다( $9.3\mu\text{s}$ ). 이것은 5세대 제품이 좀더 공격적으로 크기를 축소하고 전류 밀도가 높기 때문인 것으로 보인다. 그렇더라도 모든 경우로, 대부분의 단락 회로 보호 회로가 대응해서 디바이스 결함을 방지하기에 별 무리 없이 견딜 시간이 충분히 길다. 뿐만 아니라 견딜 시간이 부품-대-부품으로 차이가 그렇게 크지 않다. 표 2의 하단에서는 펄스 전력과 다이 크기와 관

표 2. EPC2203과 EPC2051의 단락 회로 견딜 시간 통계

Short-circuit pulse V <sub>DS</sub> = 60V	EPC2203 (Gen 4)		EPC2051 (Gen 5)	
	V <sub>GS</sub> = 6V	V <sub>GS</sub> = 5V	V <sub>GS</sub> = 6V	V <sub>GS</sub> = 5V
Mean TTF (μs)	13.1	20.0	9.33	21.87
Std. dev. (μs)	0.78	0.37	0.21	2.95
Min. TTF (μs)	12.1	19.6	9.08	18.53
Avg pulse power (kW)	1.764	1.4	3.03	2.03
Energy (mJ)	23.83	27.6	27.71	42.49
Die area (mm <sup>2</sup> )	0.9025		1.105	
Avg power/area (kW/mm <sup>2</sup> )	1.95	1.55	2.74	1.84
Energy/area (mJ/mm <sup>2</sup> )	26.4	30.59	25.08	38.46

비고: 이 통계는 각기 조건으로 8개 디바이스들로 포착된 것이다. 견딜 시간이 평균 값 가까이에 분포되는 것으로 나타난다. 평균 펄스 전력과 에너지는 이 집단 내의 전형적인 디바이스를 나타낸다.

그림 12. EPC2051과 EPC2203으로 5V<sub>GS</sub>와 6V<sub>GS</sub>로 단락 회로 펄스 동안에 시간 대비 접합부 온도 상승 시뮬레이션. 빨간색 마커로 표시된 것이 측정된 결함 시간이다. EPC2203은 대략 475°C의 ΔT<sub>J</sub>에 심각한 결함을 나타내고, EPC2051은 대략 575°C 부근에서 결함을 나타낸다. 시뮬레이션을 통해서 얻어진 이와 같은 ΔT<sub>J</sub>는 공식에서 보는 것과 같이 시간에 대한 제곱근 종속성(열 확산)과 잘 일치한다. P는 단위 면적당 평균 전력을 나타내고, k = 6.73 x 10<sup>-5</sup> K m<sup>2</sup>/W s<sup>1/2</sup>이다.



련한 면적당 에너지를 볼 수 있다. 이러한 수치들과 결함이 발생되기까지 시간 사이의 상관관계에 관한 통찰을 얻기 위해서, 시간 종속적 열 전달을 시뮬레이션해서 단락 회로 펄스 동안에 접합부 온도 ΔT<sub>J</sub>가 어떻게 상승하는지 알아보았다. 그림 12는 이 결과를 보여준다.

펄스 동안에 강한 전력 밀도는 GaN 레이어와 인근 실리콘 서브스트레이트로 급격하게 열을 발생시킨다. 그런

데 펄스는 짧고 열 전달은 상대적으로 느리므로 반도체의 적은 두께(깊이에 있어서 100μm 이내)만이 에너지를 흡수한다. 온도는 시간의 제곱근으로 상승하고(열 확산의 특성) 펄스 전력에 따라서 선형적으로 상승한다. 그림 12에서 보듯이, EPC2203으로 5V와 6V 조건 모두 ~475°C의 동일한 접합부 온도 상승에 결함을 일으킨다. EPC2051도 마찬가지로, 두 조건 모두 ~575°C의 동일한 ΔT<sub>J</sub>에 결함을 일으킨다. 이러한 결과로부터 다음과 같은 세 가지 결론을 도출할 수 있다:

- 1) 특정 디바이스로 결함이 발생되기까지 시간은 전력 소산의 제곱에 반비례한다(P<sup>-2</sup>). 이것은 1ms 미만의 단락 회로 및 SOA 펄스일 때 그렇다.
- 2) 고전력 펄스로 인한 내인성 결함 모드는 접합부 온도가 특정한 임계 값을 초과하는 것과 직접적으로 연관이 있다.
- 3) 와이드 밴드갭 eGaN 디바이스는, 실리콘 디바이스로는 자유 캐리어 열 폭주 때문에 절대로 불가능한 접합부 온도(400°C 이상)를 견딜 수 있다.

디바이스들이 반복적으로 이와 같은 극단적인 조건을 견딜 수 있는지 알아보기 위해서, 다수의 부품들로 디바이스 전류가 데이터시트 상에 표기된 최대 정격 펄스 전류의 두 배가 되도록 하는 단락 회로 조건으로 500,000회 이상의 사이클을 가했다. 이 테스트 셋업으로 테스트 대상 디바이스(DUT)의 게이트로 5VDC 또는 6VDC 게이트 바이어스를 인가했다. 드레인 바이어스는 10VDC로 설정하고, 드레인 전원으로 60mF 커패시터를 연결했다. DUT와 직렬로 R<sub>DS(on)</sub>이 낮은 상측 트랜지스터를 사용해서(그러지 않는다면 제한되지 않을) 전류 플로우를 제어했다. 그런 다음 이 제어 트랜지스터를 1Hz로 5μs 펄스를 사용해서 펄싱해서 채널이 다시 평형을 이룰 수 있는 시간을 주었다. 표 3은 이렇게 테스트한 디바이스들과 이들 디바이스의 데이터시트 최대 펄스 전류 정격과 각기 사이클 동안에 디바이스를 통해서 펄싱한 단락 회로 전류 양을 보여준다.

표 4에서는 표 3과 그림 12에서 사용했던 것과 같은 디바이스로서 EPC2051의 주요 파라미터들을 보여준다. 500,000 사이클로 데이터시트 최대 정격의 두 배가 넘는 85A 펄스의 극단적인 조건으로도 모든 전기적 특성이 테



표 3. 이들 디바이스를 데이터시트 최대 사양의 두 배로 극한적인 펄스형 단락 회로 전류로 테스트했다.

Device	Type	Datasheet pulsed (A)	$V_{GS}$	Mean (A)	Sigma (A)
EPC2203	80 V AEC Gen4	17	5	35	2.4
			6	43	2.5
EPC2212	100 V AEC Gen4	75	5	124	2.1
			6	160	3.5
EPC2051	100 V Gen5	37	5	68	1.0
			6	87	1.3
EPC2052	100 V Gen5	74	5	147	1.6
			6	163	2.2
EPC2207	200 V Gen5	54	5	99	4.7
			6	132	5.0

표 4. 펄스 테스트를 시작할 때, 100k 펄스 후에, 500k 펄스 후에, 175°C로 10분 동안 식힌 후에 EPC2051의 주요 파라미터, 디바이스 파라미터들이 모든 시간에 데이터시트 한계 이내로 유지되는 것으로 나타난다.

EPC2051	t = 0	100 k pulses	500 k pulses	Post 10 min. 175°C Anneal
$V_{TH}$ (V)	1.8	2	2.1	1.8
$I_{GSS}$ ( $\mu$ A)	11	33	55	23
$I_{DSS}$ ( $\mu$ A)	7	5.5	5.1	5.6
$R_{DS(on)}$ (m $\Omega$ )	22	22.3	22.3	22
$I_{short\ circuit}$	84	77	74	82

이터시트 사양 이내로 유지되는 것을 볼 수 있다. 다만 시간이 경과하면서 DUT가 '소모'하는 단락 회로 전류 양이 약간 감소하는데, 이것은  $V_{TH}$ 가 약간 상승하는 것과 일치한다. 이 500k 펄스 시퀀스 후에 바이어스를 하지 않고서 175°C로 10분 동안 식히는 시간을 가졌다. 표 4의 맨 오른쪽 칸에서 보듯이, 전기적 파라미터들과 단락 회로 전류가 반복적 펄스 스트레스를 가하기 전의 값으로 거의 회복하고 있다. 이것은 반복적 고전류 펄스로 인해서 어떠한 영구적 손상이 발생되지 않았다는 것을 나타낸다.

## 기계적 스트레스

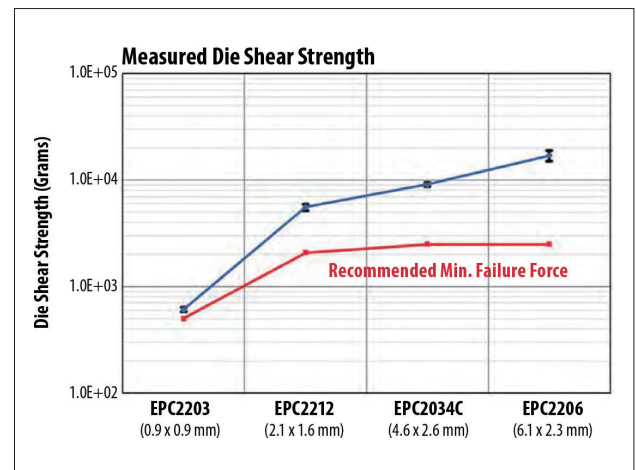
어떤 제품의 최종 수명이나 특정 애플리케이션으로 적합성은 얼마만큼의 스트레스를 겪느냐에 따라서 제한될 수 있다. 이 장에서는 대표적인 기계적 스트레스 요인으로서 다이 전단, 후면 압력, 굽힘 힘에 대해서 알아보고,

WLCSP 패키지가 통상의 어셈블리 또는 탑재 조건으로 견고하다는 것을 설명한다.

## (1) 다이 전단(die shear) 테스트

다이 전단 테스트의 목적은 eGaN 디바이스를 PCB로 접착하기 위해서 사용된 솔더 접합부의 무결성을 평가하기 위한 것이다. 이 평가는 탑재된 디바이스로 힘을 가해서 다이가 PCB로부터 전단될 때의 평면내 힘(in-plane force)을 기준으로 한다. 모든 테스트는 군용 테스트 표준인 MIL-STD-883E, Method 2019[12]에 따라서 실시했다. 그림 13은 선택한 4개 GaN 트랜지스터의 테스트 결과를 보여준다. 각기 제품을 10개씩 테스트했다. 다이 크기가 가장 작은 디바이스는 EPC2036/EPC2203으로서, 직경 200 $\mu$ m인 4개 솔더 볼만을 포함하며 다이 면적은 0.81mm<sup>2</sup>이다. 예상대로 이 제품이 전단 강도가 가장 낮은 것으로 드러났다(그림 13). 그렇더라도 MIL 표준에서 정한 최소 힘 요건을 상회해서 충족한다. 다이가 가장 큰 제품은 EPC2206으로서, LGA(land grid array) 제품이고 다이 면적은 13.94mm<sup>2</sup>이다. EPC2206은 최소 힘 요건을 10배 이상 상회해서 충족한다. 이 크기 스펙트럼 상에서 추가적인 두 제품도 테스트했다. EPC2212(100V LGA)와 EPC2034C(200V BGA)이다. 두 제품 모두 최소 힘 요건을 훨씬 상회했다. 그림 13의 결과를 보면, 모든 WLCSP GaN

그림 13. 다양한 다이 크기 및 솔더 구성의 GaN 트랜지스터들을 결함이 발생될 때까지 테스트하면서 전단 강도를 측정했다. 검은 점으로 표시한 것이 이 결과이다. 빨간 점은 MIL-STD 883E, Method 2019에 따른 최소 권장 다이 전단 강도를 나타낸다.



제품이 극히 엄격한 조건으로 환경적 전단 스트레스에 대해서 기계적으로 견고하다는 것을 알 수 있다.

### (2) 후면 압력(backside pressure) 테스트

GaN 디바이스의 기계적 견고성에 있어서 또 다른 중요한 측면은 후면 압력을 얼마나 잘 처리하느냐 하는 것이다. 이것은 다이로 후면 히트싱크를 필요로 하는 애플리케이션으로 특히 중요하다. 이 테스트는 어셈블리 시에 안전한 ‘픽 앤 플레이스’ 탑재 힘을 결정하기 위해서도 중요하다.

최대 400psi로 후면 압력 테스트를 실시했다. 여기서 압력은 가해진 힘을 다이 면적으로 나눈 것이다. 분당 0.6mm의 로딩 속도를 사용해서 다이 후면으로 곧바로 압력을 가했다. 압력 테스트 전과 후에 파라메트릭 테스트를 실시해서 합격 또는 불합격을 판단했다. 후속적으로 60V<sub>DS</sub>, 85°C, 85% 상대 습도로 300시간 동안 습도 바이어스 테스트(H3TRB)에 노출시켰다. H3TRB는 압력 테스트 시에 기계적 손상으로 인한 어떠한 잠재적 결함(내부적 균열)이 발생되었는지 확인하기 위해서 효과적이다.

EPC2212(100V LGA)와 EPC2034C(200V BGA)를 테스트했는데, 둘 다 400psi를 통과했다. 이 데이터는 표 5에 포함되어 있다. 이 결과를 보면, eGaN FET이 PCB 어셈블리 업체들에서 통상적으로 사용하는 후면 압력을 취급하기에 여유가 충분하다는 것을 알 수 있다. 이들 제품이 400psi를 충분히 취급하기는 하지만, EPC는 최대 후면 압력을 50psi 혹은 그 이하로 제한할 것을 권장한다.

### (3) 굽힘 힘(bending force) 테스트

굽힘 힘 테스트의 목적은 GaN 트랜지스터가 PCB 취급, 어셈블리, 가동 시에 발생할 수 있는 PCB 휘어짐을 견디는 능력을 평가하기 위한 것이다. 이 테스트 규격은 수동 표면 실장 부품들을 위해서 개발된 것인데(AEC-Q200)[13], 많은 고객들이 다음과 같은 두 가지 이유에서 GaN 트랜지스터의 굽힘 힘에 대해서 염려를 나타내고는 한다:

1. WLCSP 솔더 접합부의 견고성
  2. 트랜지스터 내의 압전 효과가 디바이스 파라메트릭 값을 변화시키고 회로 동작을 방해할 수 있다는 점
- 이러한 염려를 불식하기 위해서 AEC-Q200-005A 테

표 5. eGaN 디바이스의 압력 테스트 결과

Product	Sample Size	Die Area	Backside Pressure	Force Applied	Failures in Parametric Test after Pressure Test	Failures after 300 hours H3TRB test
EPC2212 (LGA)	16	2.1 x 1.6 mm	400 psi	9.3 N (2.1 lbs)	0/16	0/16
EPC2034C (BGA)	16	4.6 x 2.6 mm	400 psi	33.0 N (7.4 lbs)	0/16	0/16

비고: 작은 것과 비교적 큰 eGaN 디바이스들을 높은 후면 압력으로 테스트 했는데 기계적 결함을 나타내지 않았으며, 온도, 습도, 바이어스에 대한 스트레스 테스트로 결함이 발견되지 않았다.

표 6. 굽힘 힘 테스트 시에 4개 디바이스로 보드 휘어짐에 따른 정규화 R<sub>DS(on)</sub>

	0 mm	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm
DUT1	1.00	1.01	1.00	0.98	0.98
DUT2	1.00	1.02	1.01	Failed	-
DUT3	1.00	1.01	1.03	Failed	-
DUT4	1.00	0.99	0.99	1.03	1.04

비고: 휘어지지 않았을 때의 R<sub>DS(on)</sub>으로 값들을 정규화했다. 4개 디바이스 중에서 2개는 6mm 휘어짐으로 결함을 일으켰고, 나머지 2개는 8mm까지 살아남았다. 어느 파라미터로도 심각한 스트레스 반응이 관찰되지 않았다.

스트 표준[14]에 따라서 4개 EPC2206 디바이스에 대해서 굽힘 힘 테스트를 실시했다. FR4 PCB(100mm 가로 x 40mm 세로 x 1.6mm 두께)의 중심 부근으로 디바이스들을 탑재했다. 양쪽을 단단히 고정시키고 디바이스 반대편으로 힘을 가해서 PCB가 위를 향해서 휘어지도록 했다. 이렇게 휘어진 상태로 60초가 지난 후에 디바이스의 모든 전기적 파라미터들을 측정했다.

표 6은 이렇게 테스트한 4개 디바이스로 보드 휘어짐에 따른 정규화 R<sub>DS(on)</sub>을 보여준다. 모든 디바이스가 2mm 테스트 요건을 통과하고 있다. 두 디바이스는 6mm 휘어짐에서 결함을 일으키고, 나머지 둘은 8mm에 이르기까지 살아남는 것으로 나타난다. 사후 해부 검사에서 결함 모드는 솔더 접합부 균열이 발생되고 이것이 게이트 배선 개방으로 이어진 것으로 나타났다. 결함이 발생할 때까지는 R<sub>DS(on)</sub>이 보드 휘어짐에 대해서 어떠한 눈에 띄는 반응을 나타내지 않았다. V<sub>TH</sub>나 I<sub>DSS</sub> 같은 다른 전기적 특성들도 마찬가지로 관찰되었다. 