

경화조건에 따른 실리콘 젤의 전기적 특성

홍능표* · 이수원 · 홍진웅*†

한국철도대학 철도전기제어과 · *광운대학교 공과대학 전기공학과
(1999. 10. 21. 접수 / 2000. 3. 11. 채택)

Electrical Properties of Silicone Gels due to the Curing Condition

Nung-Pyo Hong* · Soo-Won Lee · Jin-Woong Hong*†

Department of Railroad Electric Control, Korea National Railroad College

*Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

(Received October 21, 1999 / Accepted March 11, 2000)

Abstract : Recently, more advanced electronic elements become, they consume powerful and radiate more heat in devices. So the most suitable packaging technique is keenly needed. The most important purpose of packaging is to protect devices within a system for a long time and to prevent life of devices from external environments; floating ions such as humidity or sodium, and exposure from ultraviolet rays. In order to study the electrical properties of silicone gels often used as packing material due to the curing condition, volume resistivity and AC breakdown experiment are performed. Specimens are made up at several cured times and temperatures condition ; 0.5[H], 1[H] and 2[H] at 100[°C], 125[°C], 150[°C], 160[°C], 170[°C] and 180[°C]. It is confirmed that from volume resistivity experiment liquid silicone become get state at 90~100 [°C] and cured specimen for 1~2[H] at 170[°C] are superior in electrical properties.

1. 서 론

오늘날 전자소자들은 복잡한 3차원적인 구조에 여러 층의 요소들로 구성되고, 지난 20여 년 동안 단일 칩에서의 내부 구성요소들의 수는 매 18개월마다 배가 됐으며, 이는 ULSI의 스위칭 delay를 감소시켰다. 이를 바탕으로 더욱 진보된 디바이스들은 현재 50[MHz] 이상의 주파수에서 동작가능하며, 더욱 더 많은 전력소모와 열을 발산한다.^{1~3)}

따라서 어떠한 약조건에서도 소자의 장기적 신뢰성을 확보하기 위해서는 최적의 packaging기술이 더욱 필요하므로 미국의 AT&T는 1969년 이래로 MOS와 hybrid IC를 packaging하기 위해 실리콘에 기초를 둔 물질을 사용하고 있으나, 경화조건은 신뢰성측면에서 매우 중요하다^{2,4)}.

Packaging의 가장 큰 목적은 임의의 시스템 내

에서 장시간 소자를 보호하고 습기나 sodium같은 유동성 이온, 자외선 노출 등 여러 외적인 환경의 영향으로 인한 소자의 수명단축이나 오동작을 방지하기 위함이다. 에폭시는 지금까지 연구 보고된 바와 같이 우수한 packaging 신뢰성을 가지고 있으나^{5,6)}, 최근 소자의 발전과 더불어 모듈제품에서는 soft한 silicone gel의 사용을 가져왔는데⁷⁾, 이는 전력용 반도체의 고전압, 대전류화로 높은 절연성, 접착성이 우수하고 성형이 용이한 에폭시 수지가 가장 널리 사용되나, 디바이스 동작시 각 단자나 소자간의 열팽창계수 차이에 의해 모듈제품에서 소자의 신뢰성에 큰 영향을 주기 때문에 에폭시와 소자사이에 실리콘젤을 사용함으로써 에폭시 packaging 재료의 열특성과 반도체 디바이스의 열특성을 상호 완충해주는 역할을 해주기 위함이다^{4,7)}.

실리콘 젤은 절연성이 좋고 열 특성도 우수하고 다른 몰딩재료에 비하여 경화시간이 짧아 간단한 열처리로 경화시킬 수 있는 장점도 가지고

† To whom correspondence should be addressed.
ealab@daisy.gwu.ac.kr

있다. 젤 형태이므로 기계적 강도는 약하나 원하는 형태의 성형이 가능하다. 이러한 장점으로 현재 전력용 반도체 모듈의 몰딩 재료로써 실리콘 젤의 사용은 증가하고 있다⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 전력용 반도체의 몰딩용 전기절연과 완충재료로 사용되고 있는 실리콘 젤의 Curing 조건에 따른 전기적 신뢰성을 높이기 위해 시료의 물성과 전기절연특성을 연구 조사하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 시료

시료는 전력용 반도체의 몰딩 절연재료인 F사의 실리콘 젤을 사용하였으며, 액체상태에서 온도를 증가시켜 실험한 결과 상온에서는 액체상태를 유지하나 온도 약 100[°C]에서 1시간 이상 가열할 경우 젤형태로 변형되는 특성을 가지고 있으므로 따라서 본 실험은 1시간동안 경화한 시료와 30분, 2시간 경화한 시료를 비교 실험하였다.

실험에 사용된 시료는 2시간 진공탈기 과정을 거치고, 오븐내 온도 100[°C], 125[°C], 150[°C], 160[°C], 170[°C], 180[°C]에서 1시간과 2시간 그리고 온도 150[°C], 160[°C], 170[°C], 180[°C]에서 30분 동안 열처리 후 공기중에서 서냉하여 시료를 제작하였고, 열처리 온도에 따라 각각의 시료를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. The classification of specimen

경화온도	No.	경화시간	No.	경화시간	No.	경화시간
100[°C]			#5	1[H]	#11	2[H]
125[°C]			#6	1[H]	#12	2[H]
150[°C]	#1	30[Min]	#7	1[H]	#13	2[H]
160[°C]	#2	30[Min]	#8	1[H]	#14	2[H]
170[°C]	#3	30[Min]	#9	1[H]	#15	2[H]
180[°C]	#4	30[Min]	#10	1[H]	#16	2[H]

2.2. 실험 방법

2.2.1. 체적고유저항 측정

실리콘 젤의 온도변화에 따른 체적고유저항 특성을 연구하기 위하여 자동온도 조절장치가 부착된 Ando TO-9B형 오븐을 이용하였으며, 실험

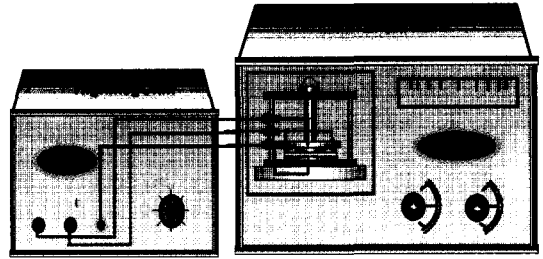


Fig. 1. Schematic diagram of volume resistivity measurement

함에 사용된 액체전극의 기하학적 정전용량은 2[pF]이며, 상부전극과 하부전극사이의 간격은 1[mm]이고, 정해진 전압을 인가한 후 전도전류를 VMG-1000 Highmegohm meter를 사용하여 측정하였으며, 측정회로의 개요는 Fig. 1과 같다.

2.2.2. 절연파괴 측정

전력용 반도체에 사용되는 실리콘 젤의 전기절연특성을 조사하기 위하여 절연파괴 시험을 실시하였다. 본 시험에서는 실제 전력용 반도체에서 사용되는 전극의 형태와 간격을 모델링 하였으며, 특히 연면 절연파괴특성 시험을 실시하였다.

전극은 두께 0.2[mm], 전극의 폭이 3[mm]이고 길이가 8[mm]인 구리를 slide glass에 접촉시켰으며, 전극간 간격 L은 전력용 반도체 생산 시 적용되는 실제 규격인 0.5~3[mm]이내로 정하여 시험하였으며, 또한 실리콘 고무로 액상인 실리콘 젤이 외부로 흐르는 것을 방지하였다.

그리고 절연파괴 실험은 양단 출력전압 50 [kV]까지 가능하고, 모터가 내장되어 있어 승압속도가 일정한 ramp 교류전압을 인가할 수 있는 절연내력 시험장치인 내전압 시험기(MUSASI Co. Ltd. IP-5005S)를 이용하였으며, 시료의 온도 분포를 일정하게 하기 위하여 실리콘유 내에서 십 수회 반복하여 측정하고, 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 얻었다.

3. 실험결과 및 검토

3.1. 적외선 흡수 스펙트럼(FTIR)

경화조건에 따른 실리콘 젤의 물성을 연구하기 위하여 TA Instrument co. FTS-6000S를 이용하여 적외선 흡수 스펙트럼을 조사하였다.

Fig. 2는 100[°C], 160[°C], 170[°C], 180[°C]에서 경화한 시료의 FTIR spectrum을 나타낸 것이다.

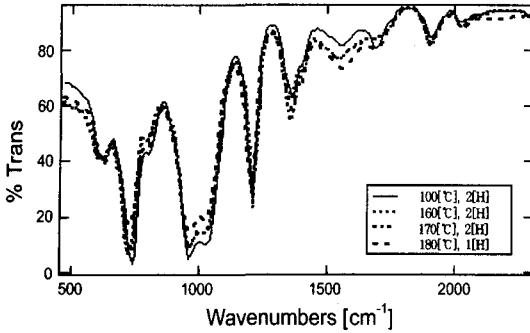


Fig. 2. FTIR spectrum of specimen

분석결과 파수 2127[cm⁻¹]는 비닐기와 결합하지 못하고 잔류하는 Si-H기에 의한 피크이며, 파수 1450 [cm⁻¹]는 CH₂기의 피크로 비닐기와 수소가 결합하여 나타나는 것으로 경화온도가 증가함에 따라 피크가 다소 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 파수 1340~1200[cm⁻¹]에서의 피크는 Si-CH₃기에 의해 나타나는 피크이다. 또한 파수 1200~920[cm⁻¹]에서의 흡수피크는 실록산기 인 Si-O-Si에 의한 피크로 경화가 증가함에 따라 결합력이 약해져 160[°C]인 경우 100[°C]와 비교하여 미소하게 감소하였으나, 180[°C]인 경우 상당히 감소해 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 파수 850~645[cm⁻¹]밴드에서 CH₃에 의한 피크를 확인할 수 있다.

3.2. 체적고유저항

전력용 반도체에서 사용되고 있는 실리콘 젤의 전기적 특성을 연구하기 위하여 체적고유저항을 경화시간과 경화온도별로 분석하였다.

Fig. 3은 액체상태에서 시료의 경화에 따른 전기적 특성을 조사하기 위하여 30[°C]부터 오븐의 온도를 10[°C]씩 160[°C]까지 증가시켰으며, 10[°C] 증가시 시료의 체적고유저항 값을 전압 인가후 5분, 10분, 20분, 30분이 경과되었을 때 기록한 것으로 시간경과에 따라 경화가 진행되어 체적 고유저항값이 증가한 것을 확인할 수 있다. 온도 약 80[°C]~100[°C]부근에서 체적고유저항이 급격히 변화하는 것을 확인했는데, 이것은 액체인 실리콘이 고체로 경화되면서 젤 형태로 변화하여 나타나는 체적고유저항의 급격한 증가라 생각된다^{1,7)}.

하지만 온도 100[°C] 이상부터는 열에너지 증가에 따라 이온이나 쌍극자가 다시 활성화되면

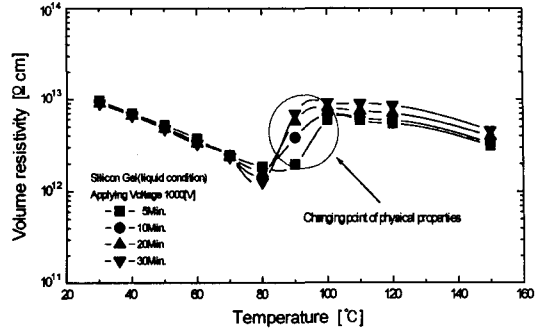


Fig. 3. Change of volume resistivity due to the temperature in liquid condition

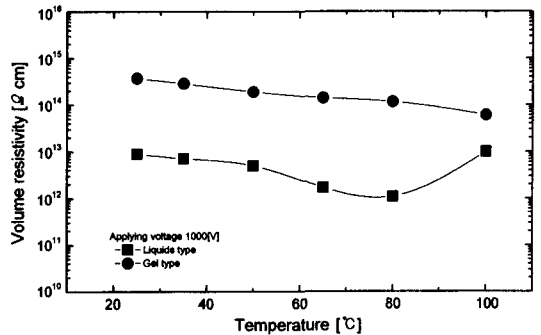


Fig. 4. Temperature dependence of volume resistivity in the liquid and gel of silicone

서 체적고유저항 값이 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 결과로부터 시료의 경화온도는 100[°C] 이상임을 확인할 수 있으므로 시료의 경화온도를 100[°C] 이상으로 하여 시험하였다.

Fig. 4는 인가전압 1000[V]에서 액상인 실리콘과 경화온도 100[°C]에서 1시간동안 경화된 실리콘 젤의 체적고유저항의 온도 의존성을 비교한 것이다. 액상인 경우보다 경화된 시료의 체적 고유저항값이 수십배 정도가 크게 나타남을 확인할 수 있는데, 이는 액상 실리콘이 경화온도 100[°C]에서 비닐기와 수소가 서로 가교 되므로 캐리어의 이동을 어렵게 하기 때문이다³⁾. 따라서 시료의 상변화가 전기절연성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 경화시간에 따른 체적고유저항을 조사하였다.

3.2.1. 경화시간 1시간

실험에 사용된 실리콘은 초기 액상인 상태에서 경화온도를 증가시키며 실험한 결과 100[°C]에서 1시간 이상 가열할 경우에 일정한 형태를

유지하는 젤형태로 됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 최저 경화조건을 경화온도 100[°C], 경화시간 1[H]를 기준으로 하여 실험을 실시하였다³⁾.

Fig. 5와 Fig. 6은 1시간 경화된 시료의 결과로 Fig. 5는 인가전압 100[V]에서 경화온도에 따른 실리콘 젤의 체적고유저항의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 온도증가에 따라 활성화 에너지의 증가로 인해 모든 시료는 측정온도 증가에 따라 체적고유저항 값이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 경화온도 150[°C] 이상인 시료는 125[°C] 이하의 시료보다 비닐기와 수소기의 결합에 의한 CH₂기가 FTIR에서 증가한 것으로 보아 가교밀도가 높아져 체적고유저항값이 온도변화에 영향을 받지 않는 것이라 생각된다. 경화온도 160[°C], 170[°C], 180[°C]인 경우 큰 체적고유저항값을 나타내면서 비슷한 특성을 나타내고 있다.

Fig. 6은 전압 1000[V]에서 경화온도에 따른 실리콘 젤에 체적고유저항의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 인가전압이 10배 증가하여도 체적고유저항특성의 변화는 매우 적다. 특히 경화온도 180[°C]인 시료의 체적고유저항값은 170[°C]에서 제작한 시료의 체적고유저항보다 약간 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 FTIR 결과에서 나타난 실록산기(Si-O-Si)가 고온으로 인해서 분해되어 캐리어로 작용하면서 나타나는 절연성의 감소라 생각된다⁹⁾.

또한 경화온도 160[°C]인 시료는 시료내의 분자간 가교밀도가 낮아 체적고유저항이 감소하므로 경화온도 1시간의 경우는 최적경화 온도가 170[°C]임을 확인할 수 있다.

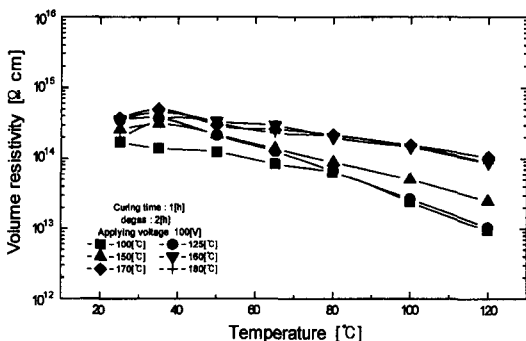


Fig. 5. Temperature dependence of volume resistivity at curing time 1[H](100[V])

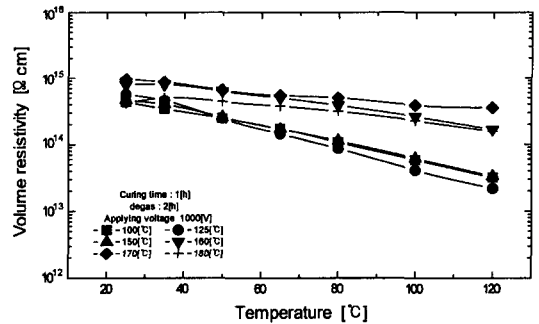


Fig. 6. Temperature dependence of volume resistivity at curing time 1[H](1000[V])

3.2.2. 경화시간 2시간

경화시간이 2시간인 경우 체적고유저항의 변화는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같은데, Fig. 7은 인가전압 100[V]에서 실리콘 젤의 경화온도에 따른 체적고유저항의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 100 [°C]에서 170[°C]까지는 경화온도의 증가에 따라 각 시료의 체적고유저항이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있으나, 경화 온도 180[°C]인 시료의 경우 고온경화로 인해 분자간의 분해가 발생하고 이들이 전기전도에 기여하여 체적고유저항특성의 감소를 확인할 수 있다. 온도 180[°C]에서 경화한 시료를 제외한 모든 시료의 체적고유저항값도 1시간동안 경화한 시료와 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 실험결과로써 경화시간 2시간, 경화온도 170[°C]인 시료의 체적고유저항값이 가장 우수하게 나타났으며, 경화온도 160 [°C]인 시료는 170[°C]인 시료와 비교하여 다소 체적고유저항값이 낮지만 다른 시료와 비교하여 우수한 체적고유저항 특성을 나타내는데, 이것은 경화온도 170[°C]인 경우가 160[°C]인 경우보

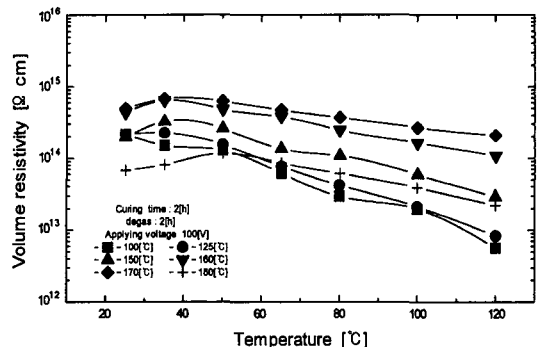


Fig. 7. Temperature dependence of volume at curing time 2[H](100[V])

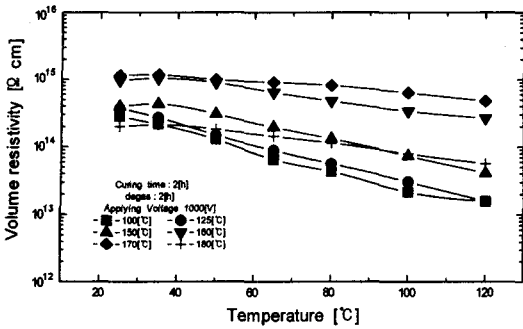


Fig. 8. Temperature dependence of volume resistivity at curing time 2H(1000[V])

다 상변화시 가교밀도가 높아졌기 때문으로 사료된다⁹⁾.

Fig. 8은 인가전압 1000[V]경우 실리콘 젤의 경화온도에 따른 체적고유저항의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 시료의 온도가 증가함에 따라 이온이나 쌍극자 등 캐리어가 활성화되면서 체적고유저항의 감소가 나타나지만, 인가전압이 증가하여도 경화온도 160[°C]와 170[°C]인 시료의 체적고유저항값은 다른 시료에 비해 전기절연성이 우수하게 나타남을 확인할 수 있다. 160[°C]에서 2시간 경화된 시료가 1시간 경화된 시료보다 절연성이 개선된 이유는 경화시간이 길어짐에 따라 가교가 진행되었기 때문으로 사료된다.

3.2.3. 경화시간 30분

Fig. 9는 30분 경화된 시료로 인가전압 100[V]에서 경화온도에 따른 실리콘 젤에 체적고유저항의 온도의존성을 나타낸 것으로 경화시간이 짧은 시료의 체적고유저항값이 1시간 및 2시간 동안 경화된 시료보다 1/10배 이상으로 감소하

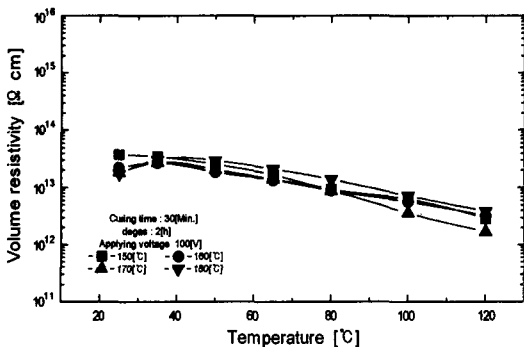


Fig. 9. Temperature dependence of volume resistivity at curing time 30[min](100[V])

는 것을 확인할 수 있는데, 이는 경화온도와 관계없이 액상에서 젤상으로 변화시 분자간 결합에 필요한 외부 열에너지와 시간을 요하는데, 경화시간이 짧아서 가교가 되지 않으므로 체적고유저항값이 낮게 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 경화시간 30분은 부적절한 경화조건이라 생각된다.

3.3. 절연파괴강도

체적고유저항 시험결과를 토대로 실제 사용되고 있는 전력용 반도체물질을 모델링하여 1시간 경화한 시료와 2시간 경화한 시료의 절연파괴특성을 시험하였다.

Fig. 10은 경화를 1시간 처리한 시료의 전극간격에 따른 연면 절연파괴강도의 경화온도의존성을 나타낸 것이다^{1,10)}.

경화온도 150[°C]인 시료의 경우 전극간격 1[mm]와 1.5[mm]인 시료의 절연파괴강도는 약 6.6[kV/mm]로 거의 유사한 값을 나타내고 있으나, 전극간격이 2[mm]와 3[mm]로 증가함에 따라 절연파괴강도가 6.3에서 5.4 [kV/mm]로 낮아지는데, 이것은 미결합된 -CH=CH₂와 -H 등이 캐리어로 작용하기 때문으로 생각된다.

경화온도 160[°C]인 시료는 전극간격 1[mm]인 시료보다 1.5[mm]인 시료의 절연파괴강도가 다소 높으며, 경화온도 150[°C]인 시료보다 절연파괴강도는 약 1[kV/mm]정도 증가된 것을 확인할 수 있다. 이것은 150[°C] 보다 160[°C]에서 경화하면 분자간 미결합 부분이 감소하기 때문에 절연파괴강도가 다소 증가한 것이라 생각된다. 그러나 전극간격 2[mm] 이상으로 증가할 경우 150

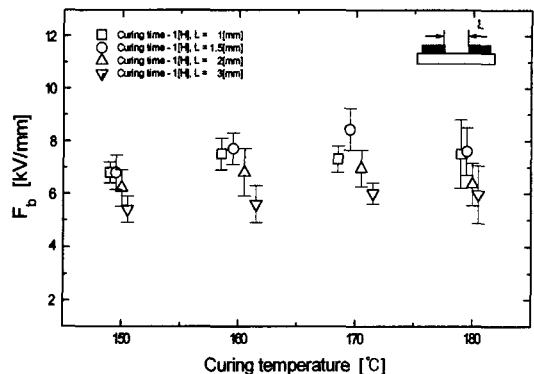


Fig. 10. Curing temperature dependence of AC surface breakdown strength

[°C]에서 나타난 절연파괴강도의 급격한 감소가 나타남을 확인할 수 있다. 경화온도 170[°C]인 시료의 경우 전극간격 1.5[mm]에서 미결합된 분자들의 상당한 감소로 인해 절연파괴강도가 8.43 [kV/mm]로 급증해 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전극간격이 1, 2, 3[mm]인 시료는 160[°C]와 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다.

경화온도 180[°C]인 시료도 다른 시료와 같이 전극간격 1.5[mm]일 때, 절연파괴강도가 다소 높게 나타나지만, 경화온도 170[°C]인 시료와 비교하면 절연파괴강도가 감소함을 알 수 있다. 따라서 최적 경화온도는 170[°C]로 경제성과 신뢰성을 갖는다.

Fig. 11은 시료를 2시간 경화하고 전극간격에 변화에 따른 절연파괴강도의 경화온도 의존성을 나타낸 그림이다. 경화온도가 125[°C]인 시료의 경우 절연파괴강도가 다소 낮은 값을 나타내고 있으며, 경화시간 1시간일 경우와 마찬가지로 전극간격이 증가함에 따라 절연파괴강도는 감소하는 것을 확인할 수 있다.

경화온도 150[°C]인 시료의 경우도 125[°C]인 시료와 거의 차이가 없이 유사한 경향을 나타내지만, 긴시간 경화로 인해 다소 안정된 특성을 나타내고 있다. 경화온도 160[°C]인 시료의 경우 절연파괴강도가 전극간격 1[mm]인 경우는 8.2 [kV/mm], 1.5[mm]는 8.27[kV/mm]로 150[°C]인 경우보다 상당히 높은 절연파괴 강도를 나타내고 있다.

경화온도 170[°C]에서 절연파괴 강도는 160 [°C]인 경우와 유사한 값을 나타내지만 전극간격

1.5[mm]인 경우 절연파괴강도가 8.9[kV/mm]로 시료 중 가장 우수하고, 그리고 절연파괴 강도는 전극 갭의 증가에 따라 선형적으로 감소한다.

그리고 절연파괴강도 계산식 $F_b = Ad^{n-1}$ 에서 두께 의존계수 n 는 0.65를 얻었다¹⁰⁾.

4. 결 론

반도체에서 절연 및 완충용 몰딩재료인 실리콘 젤의 경화조건에 따른 전기적 특성을 연구한 결과

1. FTIR에 의한 물성 분석에서 경화온도가 높아짐에 따라 파수 1170~920[cm⁻¹]에서 나타난 실록산기의 흡수피크가 감소하는 것을 확인하였다.
2. 전기절연성 평가로부터 경화온도 90~100 [°C]에서 실리콘의 상이 변화하는 것을 확인했다.
3. 경화온도와 시간 변화시 170[°C]에서 2시간 동안 경화한 시료가 가장 높은 체적고유저항을 나타내며, 160[°C]에서 2시간동안 경화한 시료와 경화온도 170[°C]에서 1시간 경화한 시료의 경우도 우수한 전기적 특성을 나타내었다.
4. 실리콘 젤의 절연파괴 실험결과 1시간 경화한 시료에서는 170[°C]인 시료의 절연파괴강도가 가장 우수함을 확인할 수 있었다.
5. 2시간 경화한 시료 중 경화온도 170[°C] 전극간격 1.5[mm]인 시료의 절연파괴강도가 가장 우수하고, 두께의존성 계수는 0.65를 얻었다.

감사의 글 : 이 논문은 1999년도 광운대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) Takahiko Maeda et al., Creepage Breakdown characteristics of Printed Wiring Board in Silicon Gel, CEIDP'96, pp. 734~737, 1996.
- 2) Ivana Deram et al. : Power MOSFET Packaged-Induced On-Resistance Reduction, IEEE '97, pp. 113~115, 1997.
- 3) John M. Zeigler and F. W. Gordon Fearon : Silicon-Based Polymer Science, Published by the American Chemical Society, pp. 505~513, 619-637, 1989.
- 4) L. A. Dissado, J. C. Fothergill : Electrical Degradation and Breakdown in Polymer, Peter Peregrinus,

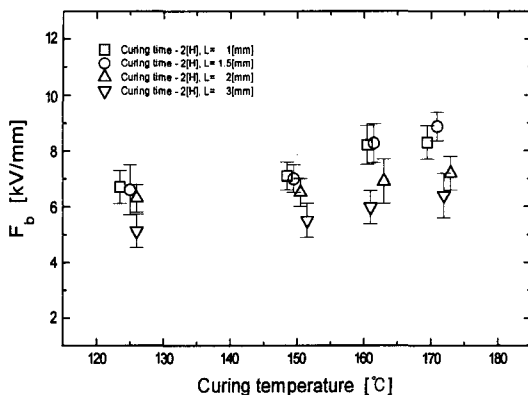


Fig. 11. Curing temperature dependence of AC surface breakdown strength

- London, pp. 49~74, 1992.
- 5) Seri Lee, Construction/spreading resistance model for electronics packaging, ASEM 1995, pp. 199~206, 1995.
 - 6) T. F. Lemczyk, FOPT-A thermal optimization factor microelectronic packages, Eighth IEEE SEMI-THERM Symposium, pp. 89~94, 1992.
 - 7) TOSHIBA SILICONE : Silicone and their uses, pp. 72~93, 1989.
 - 8) Juey H. Lay, Ph.d, Polymer for Electronic Application, CRC press, pp. 64~79, 1989.
 - 9) J. Mort and G. Pfister : Eletronic Properties of Polymer, John Wiley and Son, New York, pp. 59~96, 1982.
 - 10) 家田正之, 誘電體 現象論, 電氣學會, pp. 259~299, 1972.