

아크릴계 점착제와 초박형 웨이퍼소재와의 점착특성 - 아크릴 중합체의 측쇄의 영향 -

유종민 · 남영희 · 이승현 · 김형일[†] · 임동혁¹ · 김현중¹ · 김경만²

충남대학교 공업화학부 유기재료응용화학 연구실, ¹서울대학교 환경재료과학전공 바이오복합재료 및 접착과학 연구실, 농업생명과학연구원, ²화학연구원 에너지소재연구센터
(2009년 9월 7일 접수, 2009년 9월 11일 수정, 2009년 9월 14일 채택)

Adhesion Characteristics of Acrylic Pressure Sensitive Adhesives on Thin Wafer Materials - Effect of Acrylic Copolymer Side Chain -

Chong-Min Ryu, Young-Hee Nam, Seung-Hyun Lee, and Hyung-Il Kim[†], Dong-Hyuk Lim¹, Hyun-Joong Kim¹, and Kyung Man Kim²

Lab. of Applied Chemistry of Organic Materials, Department of Industrial Chemistry, Chungnam National University, Korea

¹Lab. of Adhesion & Bio-Composites, Program in Environmental Materials, Research Institute and for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Korea

²Center of Energy Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology

(Received September 7, 2009; Revised September 11, 2009; Accepted 2009)

요약: 분자설계를 통하여 측쇄를 변화시킨 아크릴공중합체를 합성하여 아크릴공중합체 점착제와 초박형웨이퍼와의 젖음성 및 점착물성을 조사하였다. 선형 아크릴공중합체를 에폭시계 Tetra-DX 가교제와 반응시켜 3차원 망상구조를 형성하고 가교의 영향을 조사하였다. 계면상호작용보다는 아크릴공중합체의 측쇄변화가 젖음성에 더 큰 영향을 미쳤다. 가교도가 증가할수록 probe tack, peel strength가 감소하는 경향을 나타냈다. 가교에 의해 SAFT 내열성이 증가하였지만 가교제의 함량이 증가하면 오히려 SAFT 내열성이 감소하였다.

Abstract: The acrylic copolymers with variation in side chain were synthesized based on molecular design. Wettability and adhesion properties on the wafer surface were investigated for these acrylic copolymer pressure sensitive adhesives. Three-dimensional networks of linear acrylic copolymers were produced with epoxy-type Tetra-DX cross-linking agent. The effect of cross-linking on adhesion characteristics was investigated. The side chain of acrylic copolymer played more important role in wettability than the interfacial interaction. As the degree of cross-linking increased, both probe tack and peel strength decreased. Also, heat resistance measured by SAFT increased with cross-linking; however, it showed the deterioration when excess cross-linking agent was added.

Keywords: side chain, acrylic copolymer, pressure sensitive adhesive, wettability, adhesion

1. 서 론

점착제(pressure sensitive adhesive, PSA)는 물리적 힘 또는 분자, 원자, 이온의 인력, 흡착 등에 의해 두 표면을 붙이는 역할을 하는 물질이며, 고분자, 금속, 무기재료 등 다양한 피착제 사이에 적용된다. 점착제는 전기·

전자 산업에서 절연성 테이프, 자동차용 테이프, 의료용 테이프, 라벨용 테이프, 방수용 테이프, 마스킹 테이프 등 다양한 용도로 사용되고 있으며, 점착성 이외에도 난연성, 도전성, 내열성, 대전방지성 및 절연성 등의 특성을 지니는 기능성 점착제에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 전기·전자 산업의 발달로 전자 재료 분야에서 고기능성 점착제 및 접착제에 대한 요구가 증가하고 있다. Conducting adhesive[2,3], anti-static adhesive 및

[†]Corresponding author: Hyung-Il Kim (hikim@cnu.ac.kr)

color-PSA 등이 사용되고 있으며 반도체 칩의 제조공정 중 백그라인딩(back grinding)공정과 다이싱(dicing)공정에서 이의 용도에 필요한 기능성 점착제들이 사용되고 있다[4-6]. 아크릴 단량체들을 공중합하여 제조되는 아크릴계 점착제는 단량체의 조성, 단량체의 유리전이온도(T_g), 분자량과 분자량 분포 등의 변화를 통하여 첨가제의 추가 없이도 점착성능을 발현하므로 여러 분야에 사용되고 있다[7,8].

최근 반도체 칩의 제조에서 작은 부피 내에 시스템의 기능들을 효율적으로 집적화하는 시스템 모듈 패키징(system on packaging, SOP)공정의 개념이 고려되고 있다. 시스템의 기능들을 역할별로 분류하여 로직, 메모리 등의 디지털 기능, RF 기능, 센서 기능, 광통신 기능 등의 시스템 모듈로 분류하거나, 능동소자 및 수동소자 등 소자의 기능별로 분류한다[9]. MCP (multi-chip packaging)기술은 프로세서와 메모리 등의 반도체 칩과 수동 소자를 하나의 패키지에 구현하여 모듈 또는 시스템을 구성하는 것인데, 기존의 각각 패키징된 개별 부품을 사용한 경우보다 빠른 작동, 저전력 소모, 소요 면적 최소화가 소형 제품이나 휴대폰, 플래쉬 메모리의 고용량화의 분야에 채택되고 있다. 이러한 MCP 기술은 주로 스택킹(stack)공정을 기본으로 하며, bare 칩이나 패키지를 스택하거나, bare 칩 위에 개별 수동부품들을 스택하는 방법들이 있다[10]. 고집적화가 이루어지면서 반도체 칩의 면적과 두께가 얇아지는 추세이므로 칩을 핸들링 하기 위해서는 기존의 점착제를 적용하기 어렵고 따라서 다양한 분자설계와 기능성을 겸비한 새로운 점착제 제조가 필요한 실정이다.

MCP를 위해서는 얇은 칩의 스택킹 공정을 거쳐야 한다. 초박형웨이퍼는 실리콘 또는 갈륨아스나이드(GaAs) 등을 원료로 하여 원반형태로 제작되며, 포토리소그래피 공정과 메탈라이징 공정을 거쳐 작은 칩으로 절단/분리된 후 리드프레임에 마운트되는 공정을 거쳐 완성된다[11]. 이러한 MCP공정에서 초박형웨이퍼는 다이싱테이프에 점착된 상태에서 절단, 세척, 건조, 픽업되어 마운팅공정으로 이송된다. 이때 사용되는 다이싱테이프는 반도체를 절단하는 공정에서 반도체 칩이 튀어나가거나 흔들림을 방지하고, 이송 과정 중 크랙(crack)에 의한 불량을 방지하기 위해 뒷면에 부착하는 테이프로서 1) 이송 중에 칩의 깨짐을 방지하고, 2) 다이싱 공정 중에 칩이 흔들리지 않도록 일정한 점착력을 유지하여야 하고, 3) 테이프의 이물질에 의해 청정도가 감소되지 않으며, 4) 테이프의 재작업성이 용이하고, 5) 박리 후 칩에 테이프의 잔사가 남지 않아야 한다[12-14]. 또한 다이싱 필름으로의 라미네이션 공정시 불량이 생길 경우 베이스 필름의 재생을 위하

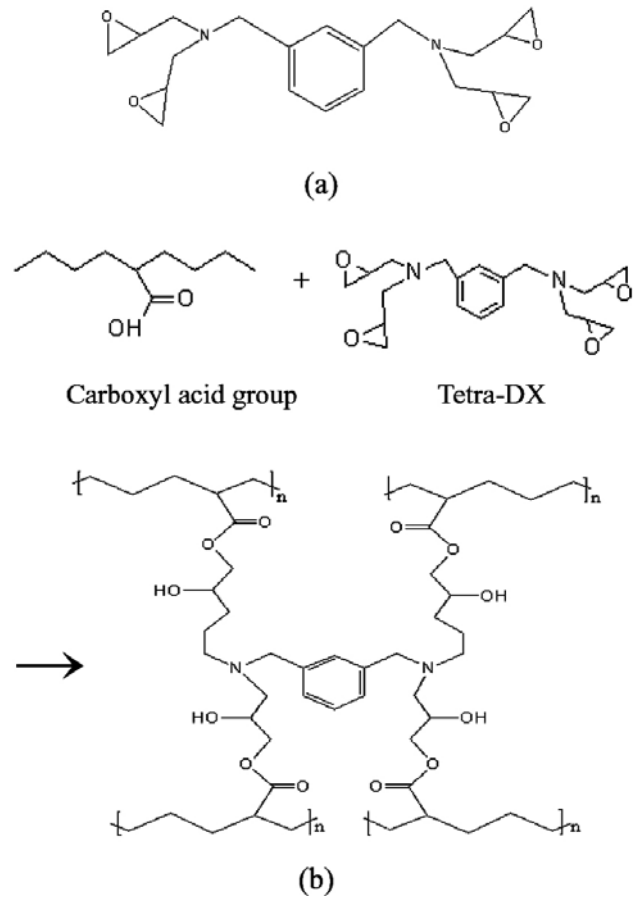


Figure 1. (a) Chemical structure of Tetra-DX cross-linking agent and (b) cross-linking reaction between Tetra-DX and carboxyl acid moiety of acrylic copolymer.

여 깨끗이 재박리가 되는 특성도 매우 중요한 요구사항이다[15-17]. 초박형웨이퍼는 두께가 100 μm 이하로 매우 얇기 때문에 웨이퍼의 굽힘으로 인한 칩의 크랙과 불량발생 등 칩의 핸들링이 어려워지며 다이싱 테이프의 점착력으로 인해 박리시 칩의 크랙이 발생하여 수율이 감소하는 문제를 초래한다[18]. 따라서 낮은 점착력으로도 충분한 고정효과를 나타내도록 하기 위해서는 표면 wetting 특성을 평가하는 것이 필요한데 접촉각 측정은 표면에너지와 젖음성(wettability)을 측정하여 점착제와 피착제간의 상호친화성을 파악하는데 유용한 방법이다[19-21].

본 연구에서는 분자설계 기법을 활용하여 측쇄길이 변화로 주쇄의 유연성을 조절한 아크릴공중합체를 합성하였다. 아크릴점착제 제조에 사용되고 있는 단량체 중 측쇄길이에 큰 차이가 있는 2-EHA와 EA를 선정하여 측쇄의 영향을 살펴보고 예폭시기와 개환반응이 가능한 -COOH기를 갖는 AA를 사용하여 아크릴공중합체의 가교반응이 가능하도록 하였다. 이러한 아크릴

Table 1. Monomer compositions and characteristics of copolymerization

	2-EHA (wt%)	EA (wt%)	AA (phr)	Mw (g/mol)	Viscosity (cps)	Solid content (%)	T _g (°C)	Conversion (%)
AP-1	100	0	20	279,000	730	30.0	-53	93.0
AP-2	50	50	20	468,000	5,530	31.0	-27	96.0
AP-3	0	100	20	303,000	13,000	29.0	-7	89.0

공중합체를 바탕으로 한 점착제를 제조하고 이를 초박형웨이퍼용 다이싱 테이프에 적용하였을 때 필요한 특성발현에 대해 조사하였다. 이를 위해 접착각을 통한 점착제의 젖음성을 평가하고 에폭시계 가교제 함량에 따른 점착물성의 변화를 살펴보았다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

아크릴공중합체 합성을 위해 사용된 단량체는 2-ethylhexyl acrylate (2-EHA, Samchun Pure Chemical), ethyl acrylate (EA, Samchun Pure Chemical), acrylic acid (AA, LG화학)이고, 용제로는 ethyl acetate (EAc, Samchun Pure Chemical)가 사용되었고, 개시제로는 2,2'-azobisisobutyronitrile (AIBN, Junsei Chemical, Japan)이 사용되었다. 에폭시계 가교제는 Tetra-DX (N,N,N,N-tetra glycidyl m-xylene diamine, Nippon Polyurethane, Japan)가 사용되었다.

2.2. 점착제 제조

점착제는 아크릴 단량체의 용액중합을 통해 고형분 32.5 wt%로 제조되었다. 2-EHA : EA의 조성을 100 : 0, 50 : 50, 0 : 100 세가지 비율로 변화시켰고 AA의 조성은 2-EHA와 EA 단량체 전체량에 대해 20 phr로 고정하였다. 이들 단량체 80 g과 AIBN 0.053 g을 EAc 110 g에 혼합하고, 90°C로 가열하여 2 h 동안 반응시킨 후 EAc 16.67 g, AIBN 0.33 g을 추가로 넣고, 3 h 30 min 동안 반응을 지속시켰다. 이렇게 제조된 공중합체에 가교제인 Tetra-DX를 다양한 비율로 블렌드하여 점착제를 제조하였다. 공중합체 합성에 사용된 단량체의 조성비는 Table 1에 나타내었다.

2.3. 접착각 및 젖음성 측정

접착각은 Phoenix 300 (SEO)을 사용하여 증류수 25°C, 상대습도 50%로 항온항습 조건에서 측정하였다. 증류수 약 10 µl를 웨이퍼와 점착제 표면에 떨어뜨린 후 안정화시킨 후 접착각을 측정하였다. PET 필름(두께 30 µm) 위에 어플리케이션을 이용하여 점착제를 두께 20 µm로 균일하게 코팅하여 젖음성 시편을

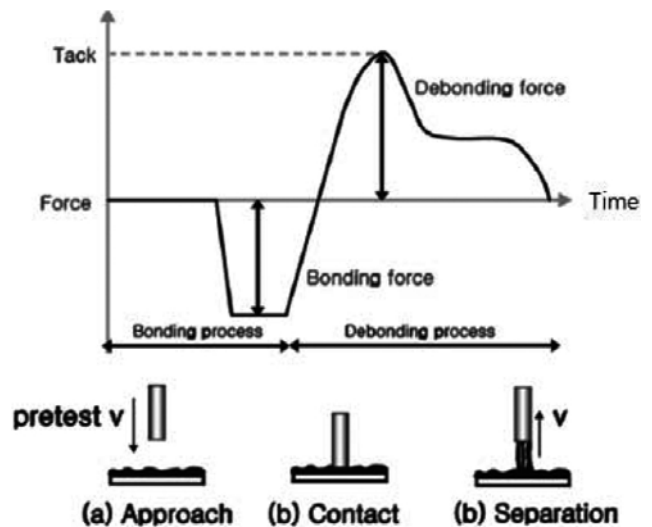


Figure 2. Schematic diagram of the force and displacement curves of probe tack test.

제조하였다. 코팅된 PET 필름을 가로 × 세로 (5 cm × 5 cm) 크기로 자른 뒤 웨이퍼 표면에 최대한 압력을 가하지 않을 상태에서 놓았을 때 필름 전체면적에 젖음이 완결되는 시간을 측정하였다.

2.4. 점착물성 측정

Probe tack은 Texture Analyzer (TA-XT2i, Micro Stable Systems, UK)를 이용하여 5 mm의 stainless steel cylindrical probe를 이용하여 측정하였다. Figure 2와 같이 초기 점착력은 probe가 점착제의 표면에 다가가 일정 시간의 접촉 후에 분리 되면서 점착제가 probe와 떨어지는 힘을 측정하였다. Peel strength는 점착필름을 stainless steel 기체에 부착한 후, 2 kg의 고무롤러를 두 번 통과시키고 상온에서 1 h 방치 후 측정하였다. 박리 속도는 상온에서 300 mm/min이었고, peel strength는 박리 기간 동안의 평균 힘으로 측정하였다. SAFT (shear adhesion failure temperature)는 온도를 상승시키면서 일정한 shear load를 가했을 때의 열 저항성을 나타낸다. SAFT는 점착필름을 stainless steel 기체에 2 kg 고무롤러를 두 번 통과시키고 2 kg의 무게를 가하여 0.4°C/min의 속도로 온도를 상승시키면서 점착제의

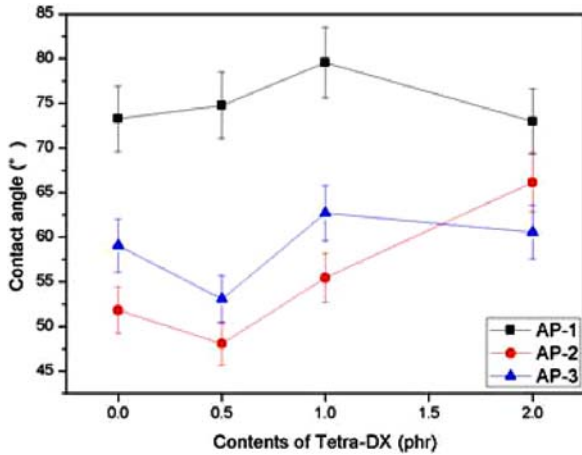


Figure 3. Contact angles at various different contents of cross-linking agent for the acrylic copolymer PSA.

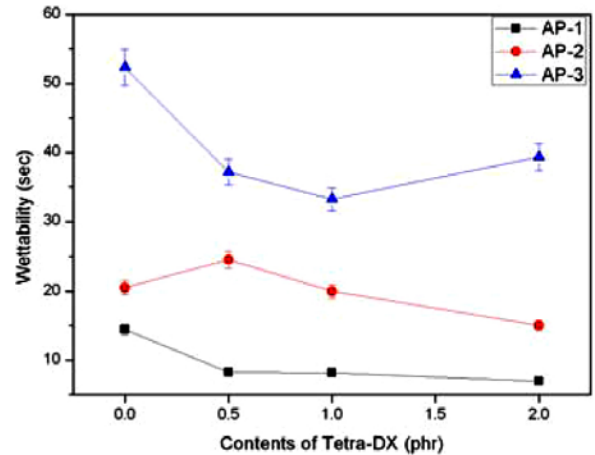


Figure 5. Wettability at various different contents of cross-linking agent for the acrylic copolymer PSA.

3. 결과 및 고찰

3.1. 접촉각 및 젖음성 측정

Figure 3에 가교제 함량변화에 따른 아크릴공중합체 점착제의 접촉각 변화를 나타내었다. 웨이퍼 표면의 접촉각은 12°로 점착제보다 낮은 특성을 보였다(Figure 4). 따라서 아크릴공중합체가 웨이퍼 표면보다 소수성이 훨씬 크기 때문에 웨이퍼에 대한 친화성이 전반적으로 낮다는 것을 의미한다. 아크릴공중합체의 조성 중 2-EHA의 함량이 증가할수록 접촉각이 높아지는 것으로 보아 2-EHA의 함량이 증가할수록 소수성이 증가함을 알 수 있다. 이것은 2-EHA의 측쇄길이가 EA보다 훨씬 길고 이러한 소수성 측쇄의 함량이 증가할수록 계면에서의 소수성 발현이 증가되기 때문이다. 또한 가교제를 사용하여 3차원 망상구조를 형성하였을 경우 접촉각이 증가하는 경향을 보였다. 가교밀도가 높을수록 화학적인 결합에 의해 고분자쇄의 유동성이 감소하고 3차원 망상구조를 형성하고 따라서 아크릴공중합체의 극성 에스테르기들이 소수성 측쇄에 의해 효과적으로 가려져서 소수성을 증가시킨 것으로 판단된다. 하지만 가교제 함량 0.5 phr에서는 가교도가 높지 않은 반면 가교제의 개환반응에 의해 형성된 친수성 -OH기들에 의해 접촉각이 감소된 것으로 판단된다.

가교제 함량변화에 따른 아크릴공중합체 점착제의 젖음성 변화를 Figure 5에 나타내었다. 아크릴공중합체 조성에서 2-EHA의 함량이 증가할수록 접촉각이 증가하고 소수성이 증가하여 웨이퍼에 대한 젖음성이 불량할 것으로 예측될 수 있지만 실제 젖음성은 훨씬 우수하게 나타났다. 이는 극성 에스테르기가 소수성 측쇄에 가려져 소수성이 증가함으로써 계면 상호작용은 불리하지만 낮은 유리전이온도에 의해 발현되는

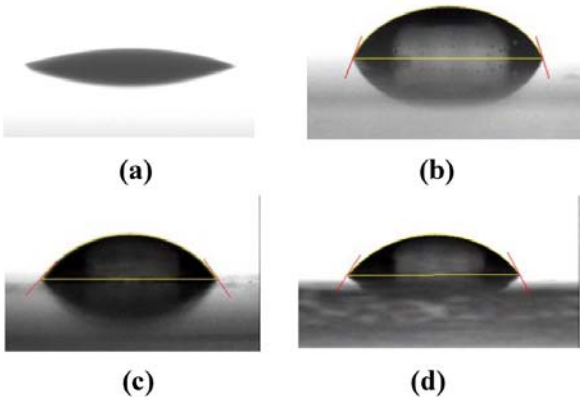


Figure 4. Photographs of water droplet on (a) wafer, (b) AP-1, (c) AP-2, and (d) AP-3.

파괴가 일어날 때의 온도로 측정하였다.

2.5. 겔 함량(gel contents) 측정

겔 함량은 점착제의 가교 정도를 알려주는 지표이다. 가교된 점착제 시료를 상온에서 EAc에 24 h 넣어 둔 후, 필터를 이용하여 용해되지 않고 잔류하는 고분자를 분리하였다. 분리된 고분자를 일정한 무게를 나타낼 때까지 80°C에서 건조하였다. 겔 함량은 다음의 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\text{Gel contents (\%)} = \frac{W_b}{W_a} \times 100 \quad (1)$$

W_a : EAc 용해 전의 고분자 무게

W_b : EAc 용해 후의 고분자 무게

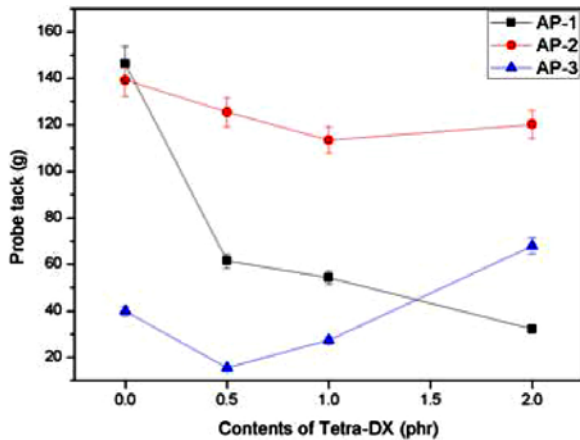


Figure 6. Probe tack at various different contents of cross-linking agent for the acrylic copolymer PSA.

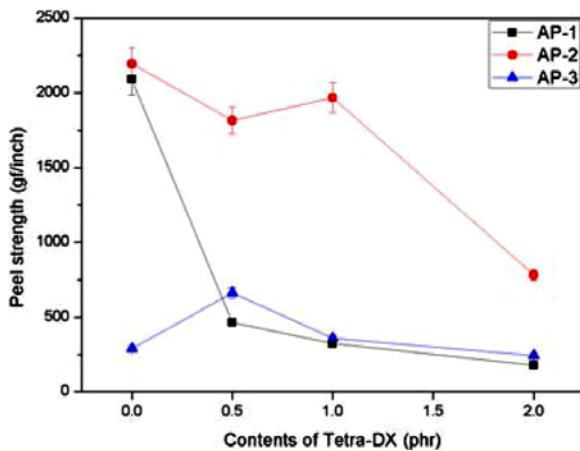


Figure 7. Peel strength at various different contents of cross-linking agent for the acrylic copolymer PSA.

고분자쇄의 물리적 유연성의 증가가 젖음성에 더 큰 효과를 미치기 때문이다.

3.2. 점착물성

3.2.1. 초기 점착력 (probe tack)

가교제 함량에 따른 아크릴공중합체 점착제의 probe tack 변화를 Figure 6에 나타내었다. 2-EHA를 포함하는 AP-1과 AP-2에서는 가교제 함량이 증가할수록 probe tack이 낮아지는 경향을 보였다. 이는 아크릴공중합체의 -COOH 관능기와 가교제의 epoxy 관능기가 서로 화학결합을 하여 3차원 망상구조를 형성함으로써 고분자쇄의 유동성이 감소하여 계면에서의 점착력이 감소했기 때문이다. 하지만 AP-3의 경우는 가교제 함량이 증가하면서 probe tack이 증가하는 현상을 나타내는데 이는 가교에 사용되지 못한 과잉의 Tetra-DX가 점착제의 tackifier로 작용하여 점착제의 fibrillation 현상을 유발

시킴으로써 tack이 증가한 것으로 해석할 수 있다[22,23]. 일반적으로 점착제는 probe에 maximum force가 전달된 점착제 안에서 deformation이 일어나는데, 이 때 점착제의 응집력이 클수록 probe에 대한 점착상태를 유지하는 fibrillation 현상이 줄어들게 된다. 그러므로 가교제 함량이 증가할수록 점착제의 응집력이 증가하여 fibrillation이 감소하게 된다. 따라서 가교제 함량이 증가하면서 점착제의 경화도가 증가함으로써 아크릴공중합체의 유연성도 크게 감소한 것을 알 수 있다.

3.2.2. 박리 강도(peel strength)

가교제 함량에 따른 아크릴공중합체 점착제의 peel strength 변화를 Figure 7에 나타내었다. 2-EHA를 포함하는 AP-1과 AP-2에서는 가교제 함량이 증가함에 따라 peel strength가 감소하는 경향을 보였다. 이는 가교도가 증가하여 점착제의 응집력이 높아짐으로써 계면에서의 점착력이 감소한 결과이다. 반면 2-EHA를 포함하지 않는 AP-3에서는 측쇄의 길이가 짧아 가교에 의해 유리전이 온도의 변화가 크지 않고 따라서 가교에 따른 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있었다.

3.2.3. Shear adhesion failure temperature (SAFT)

가교제 함량에 따른 아크릴공중합체 점착제의 SAFT 내열성 변화를 Figure 8에 나타내었다. 가교되지 않은 아크릴공중합체의 경우 AP-2가 AP-1 및 AP-3에 비해 분자량이 크기 때문에 SAFT 내열성이 더 높은 것으로 판단된다. 가교제를 0.5 phr 포함하는 경우는 아크릴공중합체의 -COOH기와 가교제의 epoxy기가 반응하여 가교구조가 형성됨으로써 점착제의 응집력이 증가되고 따라서 내열성이 크게 향상되었다. 하지만 가교제의 함량을 1.0 phr 이상으로 증가시키면 오히려 내열성이 저하하는 현상을 나타내었다. 이는 아크릴공중합체의 -COOH기와 반응하지 않은 잔류 가교제가 오히려 가소제 역할을 하여 가교구조체의 유연화 온도를 낮추기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 경화 거동

가교제 함량에 따른 아크릴공중합체 점착제의 gel content 변화를 Figure 9에 나타내었다. Gel content는 용제에 용해되지 않고 남는 부분의 함량으로 고분자의 가교정도를 나타낸다. 가교제의 epoxy 관능기가 아크릴공중합체 점착제의 -COOH와 개환반응을 통해 2차 알코올을 생성하면서 화학적 결합을 하게 된다. 본 연구에 사용한 가교제 한 분자에는 4개의 epoxy 관능기가 결합되어 있기 때문에 다수의 아크릴공중합체와의 결합이 가능하다. 이런 일련의 가교반응을 통해 아크릴공중합체의 3차원 망상구조를 형성하게 된다. 가

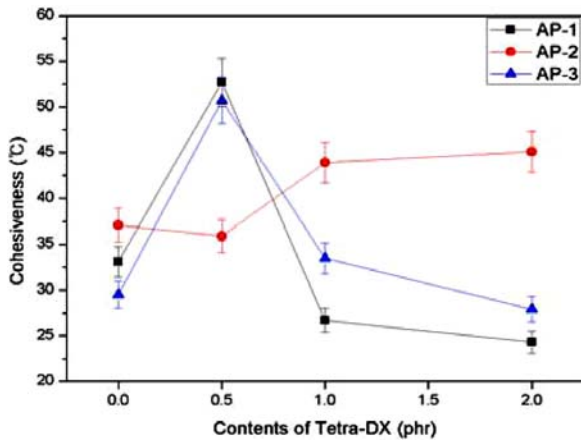


Figure 8. Cohesiveness at various different contents of cross-linking agent for the acrylic copolymer PSA.

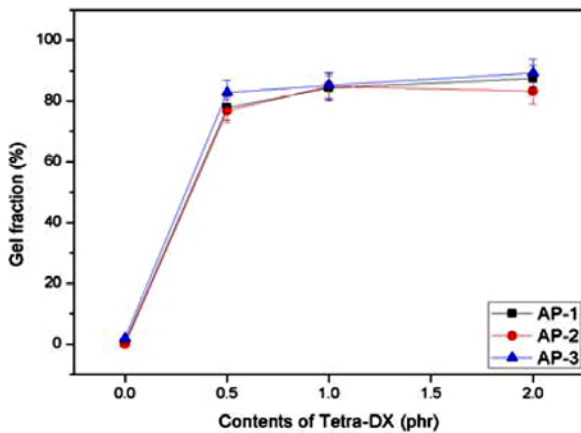


Figure 9. Gel contents at various different contents of cross-linking agent for the acrylic copolymer.

교제를 사용하지 않았을 경우는 gel이 전혀 남아있지 않았지만 가교제를 사용하여 가교구조를 형성하면 가교제 함량에 따라 큰 차이없이 gel content는 약 80% 정도를 나타내었다. 따라서 가교제의 함량이 0.5 phr 이상에서는 가교밀도에는 차이를 나타내더라도 gel content에는 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

4. 결 론

아크릴공중합체의 측쇄변화에 따른 점착특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 젖음성은 웨이퍼 표면에 대한 아크릴공중합체 점착제의 계면 상호작용보다는 고분자쇄의 측쇄길이에 따른 유연성에 의해 더 큰 영향을 받았다.

2) 가교제 함량이 증가함에 따라 아크릴공중합체 점착제의 probe tack과 peel strength가 감소하는 경향을

보였으며 점착제의 응집력이 향상되어 fibrillation이 감소하였다.

3) 가교에 의해 SAFT 내열성이 증가하지만 가교제 함량이 증가하게 되면 미반응 잔류 가교제에 의해 SAFT 내열성이 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부, 산업기술연구회의 협동연구 사업 일환인 “차세대 반도체 MCP 핵심기술 개발 사업”의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. H. S. Joo, D. H. Lim, Y. J. Park, and H. J. Kim, *Journal of Adhesion and Interface*, **6**, 19 (2005).
2. C. T. Murray, R. L. Rudman, M. B. Sabade, and A. V. Poicus, *MRS Bull.*, 449 (2003).
3. J. A. Pomposo, J. Rodriguez, and H. Grande, *Synthesis Metals*, **104**, 107 (1999).
4. K. Ebe, H. Seno, and K. Horigome, *J. Appl. Polym. Sci.*, **90**, 436 (2003).
5. K. Horigome, K. Ebe, and S. Kuroda, *J. Appl. Polym. Sci.*, **93**, 2889 (2004).
6. T. Ozawa, S. Ishiwata, and Y. Kano, *Furukawa Review*, **20**, 83 (2001).
7. I. Benedek and L. J. Heymans, “Pressure Sensitive Adhesives Technology”, Marcel Decker, USA (1997).
8. D. Satas, “Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology and Applications” edited by D. Satas, Satas & Associates, USA (2002).
9. 차세대 패키지용 SOP 기술개발에 관한 산업분석, 전자부품연구원 (2005).
10. High-Density Packaging (MCM, MCP, SIP): Market Analysis and Technology Trends, The Information Network (2005).
11. I. Kim and M. Lee, *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**, 76 (2008).
12. 박종진, 김재환, 대한민국특허 10-2000-0035727.
13. 세누히데오, 콘도다게시, 대한민국 특허 10-1999-0032549.
14. 도현성, 김현중, 대한민국 특허출원 10-2004-094902.
15. J. A. Pomposo, J. Rodriguez, and H. Grande, *Synthesis Metals*, **104**, 107 (1999).
16. H. Choi, S. Park, Y. Lee, I. Hwang, J. Kim, and H. Cho, US patent, 0186421 (2005).
17. L. Ma, X. Wang, B. Wang, J. Chen, J. Wang, K.

- Huang, B. Zhang, Y. Cao, Z. Han, S. Qian, and S. Yao, *Chem. Phys.*, **285**, 85 (2002).
18. S. Pargfrieder, P. Lindner, G. Mittendorfer, and J. Weixlberger, "Ultrathin wafer processing Temporary Bonding", *Semiconductor International* (2006).
19. C. M. Chan, "Polymer Surface Modification and Characterization", Hanser, Munchen, Germany (1993).
20. F. M. Fowkes, *J. Adhes. Sci. Technol.*, **1**, 7 (1987).
21. J. M. Park, D. S. Kim, and S. R. Kim, *Compos. Sci. Technol.*, **64**, 847 (2004).
22. A. E. O'Connor and N. Willenbacher, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **24**, 335 (2004).
23. N. J. Glassmaker, C. Y. Hui, T. Yamaguchi, and C. Creton, *The European Physical Journal E.*, **25**, 253 (2008).