

미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터

□ 이병윤 / 한국전기연구원 선임연구원

머리말

환경과 에너지는 식량과 더불어 인류의 생존과 직결되어 있는 것들로서, 재론의 여지없이 현재를 살아가는 인류에게 있어 가장 시급히 대책을 수립해야 할 난제중의 난제들이다. 환경과 에너지를 동시에 위협하고 있는 대표적인 요소 중 하나는 석유류를 사용하고 있는 자동차이다. 중국과 인도 등 거대인구 보유 국가들의 경제 발전이 급속도로 진행됨에 따라 이미 산업 분야에서 소비하고 있는 에너지량은 세계의 에너지 위기를 초래할 만큼 위험 수준을 넘어선 상태이고, 아울러 생활수준이 급격히 향상됨에 따라 자동차 보유 대수가 눈에 띄게 증가하고 있어 에너지 위기를 가속화시키고 있을 뿐만 아니라 자동차의 배출가스로 인해 대기 환경 또한 급속도로 악화되어갈 것은 분명하다.

이에 따라, 미국, 일본 및 유럽 등 선진국들은 악화일로에 있는 대기환경을 개선시키기 위해 대기오염을 유발하는 자동차의 배출가스량 규제를 강화하고 나섰으며 한편으로는 친환경 에너지 절약형 자동차의 개발에 막대한 연구비를 투자하여 미래형자동차 시장을 선점하기 위해 치열한 생존경쟁을 펼치고 있다. 그 결과로 이미 내연연소기관 Battery를 동력원으로 하는 하이브리드 전기자동차는 일본의 도요다사에서 상용화되어 독점적으로 세계 시장에 판매되고 있고 세계적인 자동차 메이커들도 중장기적인 대책으로는 석유류를 소비하지 않는 전기자동차 또는

연료전지자동차에 대한 개발에 더욱 박차를 가하고 있다.

한편 국내에서도 인구 밀집 지역인 수도권을 중심으로 대기환경이 악화됨에 따라 2003년 12월에 수도권 대기환경개선에 관한 특별법이 제정·공포되었고 2005년 1월 1일부터 시행에 들어갔다. 이 법은 환경부가 수도권 대기질을 10년 내 OECD 선진국 수준으로 개선한다는 목표아래 제정하여 시행 중인 것으로 2005년 2월에는 이 법에 근거하여 2005년도 수도권 저공해자동차 보급기준이 환경부에서 고시되어 있는 상태이다. 미래형자동차에 대한 국내연구는 자동차메이커를 중심으로 1990년대 초부터 전기자동차를 시작으로 1990년대 중반에는 하이브리드 전기자동차 그리고 2000년대 초에는 연료전지자동차에 대한 연구가 본격적으로 시작되었으며 2006년도 말에는 상업화에 가장 근접해 있는 하이브리드 전기자동차의 양산을 목표로 개발에 박차를 가하고 있다.

따라서 하이브리드 전기자동차를 포함한 미래형 자동차와 관련된 핵심 부품산업 분야에서도 이를 뒷받침하기 위한 노력을 기울이고 있으며, 특히 필름커패시터와 관련해서는 국내의 대표적인 커패시터 제조 기업인 삼화콘덴서공업주식회사, 필코전자, 보안성 패턴 증착 필름 생산 업체인 성문전자, 에폭시 소재 업체인 켐텍과 성문통신 그리고 한국전기연구원을 중심으로 컨소시엄이 구성되어 개발을 위해 기술교류 및 상호 협력을 진행하고 있는 중이다. 본 고에서는 이와 관련하여, 미래형자동차 전력변환시스

템용 필름커패시터에 대하여 소개하고 관련 기술 개발동향, 핵심기술, 시장규모 및 응용 분야에 대하여 기술하고자 한다.

미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터

대표적인 친환경·에너지절약형 미래형자동차인 전기자동차, 하이브리드 전기자동차 및 연료전지자동차의 구동 원리를 요약하면 다음과 같다.

◆ 전기자동차

배터리에 저장된 전기를 사용하여 모터 구동

◆ 하이브리드 전기자동차

내연기관 자동차와 전기자동차를 상호 보완함으로써 유해 배기가스 배출량을 감소시키는 동시에 탁월한 연비 및 동력성능 향상을 이룬 자동차

◆ 연료전지자동차

전기자동차와 달리 배터리에 저장된 전기를 사용하는 것이 아니라 연료전지로부터 생산되는 전기로 모터 구동

구동 원리로부터 알 수 있는 바와 같이 미래형자동차들의 경우 모터를 구동하기 위해 교류전력이 필요한데 Battery나 연료전지와 같은 직류전원을 동력원의 일부 또는 전부로 사용하고 있기 때문에 전력을 효과적으로 변환해줄 수 있는 전력변환시스템이 반드시 필요하다. 미래형자동차들의 동력전달 과정을 보다 구체적으로 살펴보기 위해 그림 1에 하이브리드 전기자동차와 순수전기자동차의 주요 구성요소 배치도를 순수내연기관과 비교하여 도시하였다. 하이브리드 전기자동차의 경우는 병렬형 하이브리드 전기자동차와 직렬형 하이브리드 전기자동차로 분류되는데, 전자는 화학적 에너지로부터 변환된 기계적 에너지와 배터리로부터 공급되는 전기적 에너지가 나란히 자동차의 구동축에 전달되어 바퀴에 동력이 전달되는 방식이고, 후자는 화학적 에너지로부터 발전기를 거쳐 변환된 전기적 에너지와 배터리로부터의 전기적 에너지가 모두 전기모터에 전달되고 이것이 통일적으로 자동차의 바퀴에 전달되는 방식

이다. 한편, 순수 전기자동차는 배터리로부터의 전기적 에너지가 전기모터를 구동시켜 발생된 기계적 에너지로 바퀴를 구동시키는 방식이다.

그림 2는 하이브리드 전기자동차용 전력변환시스템의 개략적인 회로도를 도시한 것으로 배터리와 모터 및 발전기 사이에서 전력을 제어하기 위해, 전력용 반도체 스위칭 소자, 발전기용 인버터, 모터용 인버터, 인덕터 및 커패시터 등의 핵심부품들로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 본 고에서 기술하고자 하는 커패시터는 그림 2에 표시되어 있는 바와 같이 크게 세 가지 용도로 사용되고 있으며 각각에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

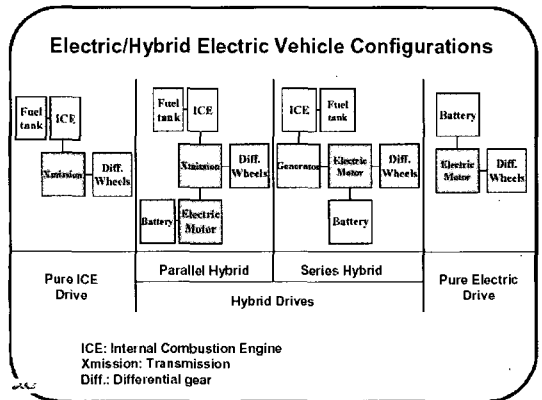
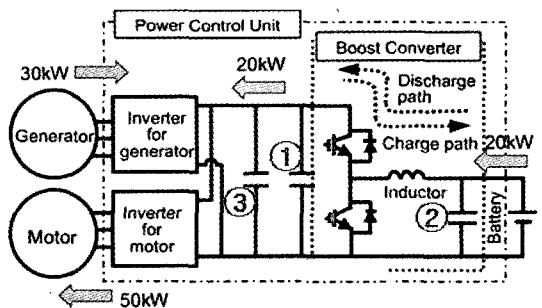


그림 1 전기자동차 및 하이브리드 전기자동차의 주요 구성요소 배치도



① Main 커패시터
② 필터 커패시터
③ Surge 흡수 커패시터

그림 2 하이브리드 전기자동차용 전력변환시스템의 개략적인 회로도

초기의 하이브리드 전기자동차는 그림 3(a)에 보인 것처럼 Battery 전압과 시스템전압이 동일하였다. 그러나 Battery의 용량이나 Battery의 전압을 높이지 않고 더 높은 전압으로 모터를 구동시키기 위해 최근에는 Battery 전압과 시스템전압을 달리하는 대신 Voltage Booster를 이용하여 저압의 Battery 전압을 고압으로 상승시키는 구조가 채용되고 있는데, 이렇게 함으로써 모터 크기를 동일하게 유지하면서도 그 출력을 1.5배로 향상시킬 수 있게 되었다. 그림 3(b)는 이와 같은 구조를 도시한 것이다. Main 커패시터는 이 시스템에서 저압의 Battery 전압을 Voltage Booster를 이용하여 고압의 시스템전압으로 상승시킨 후, 이 전압을 유지시켜 Inverter에 공급하기 위한 용도로 사용되고 있다. 그림 4에 Main 커패시터의 설치위치와 용도를 요약 정리하여 제시하였다.

한편 인버터 시스템에는 IGBT와 같은 반도체 스위칭 소자가 사용되고 있으며 이것들의 스위칭에 의해 전력을 변환하고 있다. 그런데 반도체 소자의 스위칭 시에 펄스형의 리플전류가 발생하게 된다. 이 리플전류는 배터리와 연료전지의 효율을 감소시켜 결국 자동차의 연비를 저감시키는 원인이 되며, 전기동력장치를 구성하는 부품의 내구성을 떨어뜨린다. 또한 전자파 문제도 발생시키므로 이에 대한 대책이 요구된다. Filter 커패시터는 발생한 리플전류가 Battery에 침입할 수 없도록 교류성분을 제거하기 위해 Battery와 병렬로 접속하여 사용하고 있다. 그림 5는 Filter 커패시터의 설치위치 및 용도를 요약하여 제시한 것이다.

또한 Snubber회로의 배선 인덕턴스에 의해 Surge 전압이 발생되어 인버터회로의 절연과 피사고를 유발할 수 있기 때문에 발생한 Surge 전압을 흡수할 Surge 흡수용 커패시터가 요구된다. 그림 7에 Surge 흡수 커패시터의 설치 위치 및 용도를 요약하여 제시한다.

이와 같은 미래형자동차 전력변환시스템용 커패시터로는 알루미늄 전해커패시터와 필름커패시터를 고려해 볼 수 있다. 초기에는 시스템 전압이 낮고 정전용량이 크며 크기가 작아 상대적으로 유리한 알루

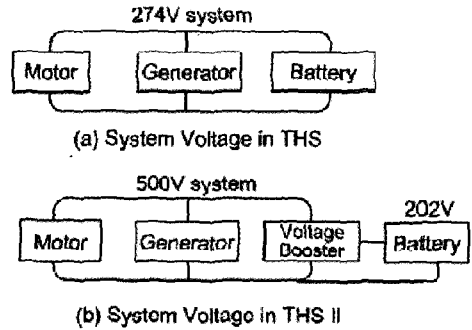


그림 3 모터 및 발전기용 Voltage Booster

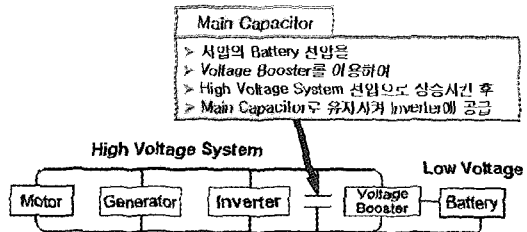


그림 4 Main 커패시터

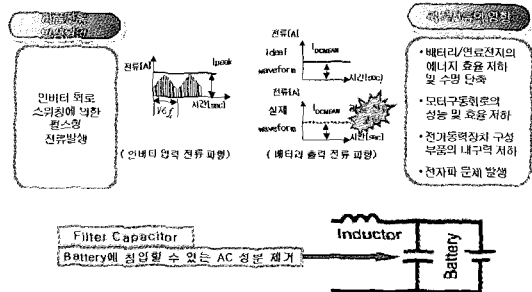


그림 5 Filter 커패시터

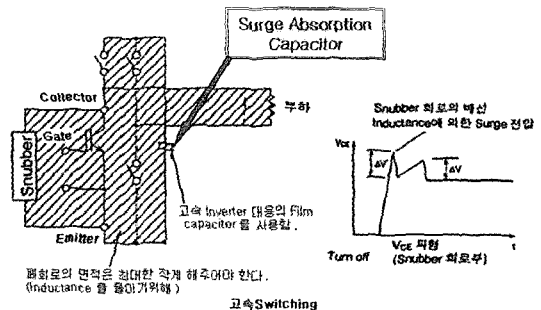


그림 7 Surge 흡수 커패시터

미늄 전해커패시터가 사용되었다. 국내에서 개발된 미래형자동차용 알루미늄 전해커패시터의 사양 및 특성을 살펴보면 내열온도는 105°C, 최대전압은 450V, 최대정전용량은 6800μF, 정격사용조건하에서 수명은 5000시간을 보증하고 있다. 그렇지만 무엇보다도 손실이 높기 때문에 자체적으로 발생하는 열이 많아, 자동차와 같이 고온 환경에서 동작해야 하는 경우 심각한 성능 결함을 보이는 것으로 알려져 있다.

따라서, 고내열성과 아울러 시스템 전압의 고전압화, 안전성, 신뢰성, 장수명 및 형상의 자유도가 높은 대체 커패시터가 요구되면서 필름커패시터가 대안으로 떠올랐다. 표 1에는 전해커패시터와 필름커패시터의 자동차 요구 특성에 대한 비교를 요약 정리하여 제시하였다.

미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터에 대하여 국내의 기술 개발 동향을 살펴보면 다음과 같다. 일본에서는 초기에 약 400V급의 전해커패시터를 하이브리드 전기자동차 모델 Prius에 적용하였으나 낮은 내열성으로 인한 문제점이 드러났고, 점차 많은 파워를 요구하는 추세에 따라 커패시터도 고전압화하면서 전해커패시터로는 더 이상 커패시터에 대한 요구특성을 만족시킬 수 없게 되었다. 따라서 하이브리드 전기자동차 모델 Prius II에는 600V급의 필름커패시터를, Lexus Rx400h 모델에는 750V급의 필름커패시터를 각각 적용하고 있는 것으로 추정되고 있다. 한편, 미국의 GM은 수소연료전지자동

차인 모델명 Freedom Car를 개발하고 있다. 이 자동차는 수소 연료전지 기술과 순수 전기 구동 기술을 결합, 완전히 새로운 자동차 개념을 제시하여 스케이트보드처럼 생긴 15cm 두께의 새시 안에다 연료전지, 배기관, 수소저장 시스템, 구동장치 등을 모두 집어넣은 것으로 600V급의 필름커패시터를 적용할 것으로 알려지고 있다. 그리고, 유럽의 E사에서 하이브리드 전기자동차용 적층형 필름커패시터를 개발한 사례가 보고 되고 있다.

한편, 국내에서는 현재까지 미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터 개발 실적이 전무한 실정이다. 다만, 삼화콘덴서공업주식회사에서 서울 지하철 2호선 Chopper 차량용 DC Link 필름 커패시터 및 서울 지하철 4호선 VVVF 차량용 DC Link 필름 커패시터 개발에 성공하여 실장시험을 거쳐 양산화 단계에 이르고 있다. 지하철 차량용 필름 커패시터의 사용 환경은 상당히 열악하여 약 60°C 정도의 높은 내열성이 요구되지만 미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터에 요구되고 있는 125°C에 비하면 매우 낮은 편이다.

필름커패시터 관련 핵심 기술

미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터와 관련된 핵심기술들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 소재 측면에서는, 두께 약 3μm 정도의 초박막 내열성 베이스필름(폴리프로필렌 필름 등의 플라스틱 필름) 생산 기술, 내산화성 보안성 초박막 패턴 증착 필름 생산 기술, 고내열성 Hard/Soft 에폭시 소재 개발 기술들을 들 수 있다. 또한, 필름커패시터와 관련하여서는 제작 기술, 모듈화 기술, 내열성 향상 기술, 장수명화 기술 그리고 마지막으로 열해석과 회로해석 등의 해석기술과 신뢰성평가 기술 등을 들 수 있다. 그림 8은 앞서 기술한 핵심 기술 간의 상호 연계도를 도시한 것이다.

현재, 국내에서는 필름커패시터 제조업체로서 삼화콘덴서공업주식회사와 필코전자, 내산화성 보안성 초박막 패턴 증착 필름 생산업체로서 성문전자,

표 1 전해커패시터와 필름커패시터의 자동차 요구 특성에 대한 비교

자동차 요구 특성	전해커패시터	필름커패시터
내열성(110°C)	85°C	125°C
수명(15년, 15만마일)	5,000시간	7,500시간
고신뢰성	Case 파괴	자기회복
고전압화	450Vmax	고전압화 가능
안전성	2차사고 발생	보안성기능내장
내진성	구조적 취약	몰딩 구조
ESR/ESL	-	1mΩ/ 30nH
정상 자유도	낮음	높음
리플전류	수 Arms	수백 Arms

에폭시 소재 개발 업체로서 쉐택과 성문통신 그리고 해석기술과 신뢰성평가 기술 개발 연구기관으로서 한국전기연구원이 참여하여 필름커패시터 및 핵심 소재를 개발하기 위한 컨소시엄을 구성하고 2010년도에 상용화를 목표로 기술 교류 및 상호 협력을 강화해 나가고 있다. 그림 9는 미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터 및 핵심소재와 관련하여 기술개발 및 상업화 로드맵을 도시한 것이다.

필름커패시터 응용 분야

필름커패시터의 응용 분야로는 미래형 자동차를 필두로 하여 태양광 발전이나 풍력발전 분야, 산업용 인버터 분야, 가전기기 및 전력용 커패시터 분야 등을 들 수 있다. 표 2는 응용 가능한 분야를 보인 것이고 그림 10은 대표적인 적용 분야를 도시한 것이다.

예상 시장 규모

세계 자동차 시장은 2004년에 약 4,800만대이었던 것이 2010년에는 약 6,300만대로 예상되고 있으며 이에 대하여 미래형자동차 시장규모는 2004년에 약 12만대이었던 것이 2010년에는 전체 자동차 시장의 25%인 약 1,600만대에 달할 것으로 예상되고 있다. 그림 11은 미국 에너지부 교통기술국에서 예상한 미래형자동차의 시장점유율이다. 표 3 및 4는 미래형자동차의 세계 및 국내 예상시장규모를 정리한 것이다. 또한, 미래형자동차 시장규모를 토대로 필름커패시터와 관련된 국내 및 세계시장규모를 표 5 및 6과 같이 추정하여 보았다.

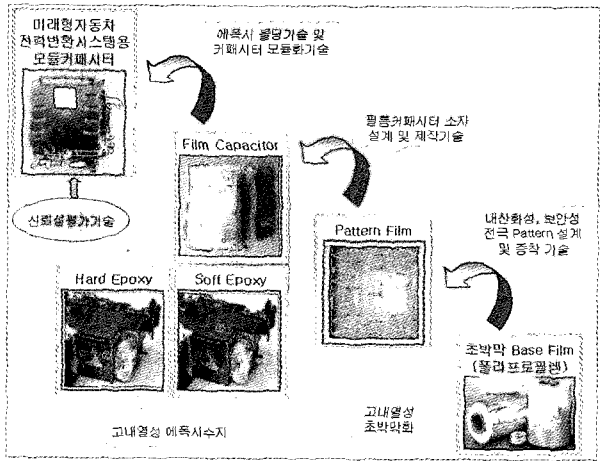


그림 8 핵심 기술 상호 연계도

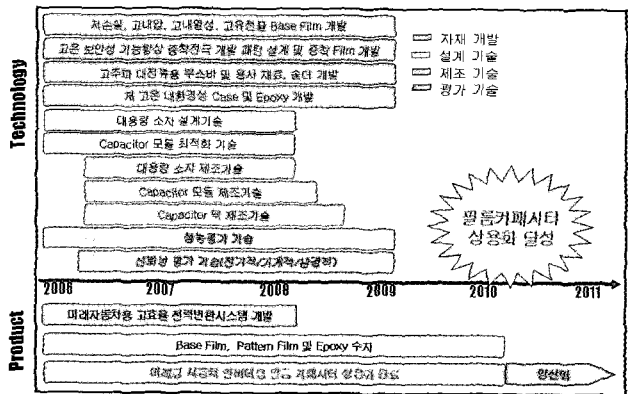


그림 9 미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터 및 핵심소재 기술개발 및 상업화 로드맵

표 2 응용 가능 분야

Automotive	Industrial	Power semiconductor
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Hybrid electric vehicles [HEV] ◆ Fuel cell vehicles [FCV] ◆ Electric buses 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Inverter system (SIV, SVG) ◆ Pump system ◆ Drive systems ◆ Frequency inverters ◆ DC transmission systems ◆ DC energy storage for power quality systems ◆ Power pulsed current (pulse magnetizer, laser, welding, etc.) ◆ High power inverter drive systems(ship, mining, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ IGBT ◆ GTO ◆ IPM ◆ GCT ◆ Etc.

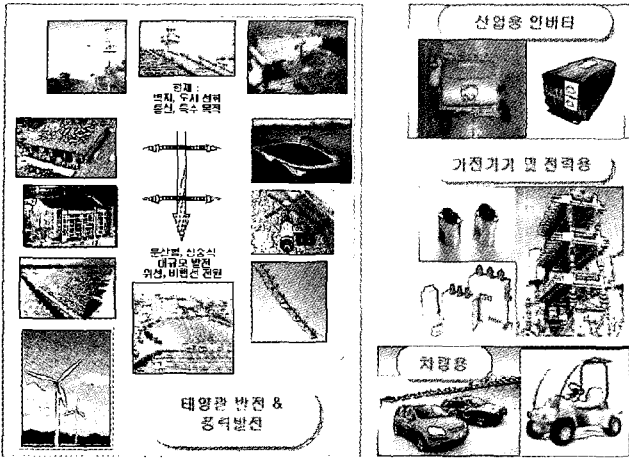


그림 10 대표적인 적용 분야

맺는말

본고에서는 친환경 에너지절약형 미래형자동차 전력변환시스템의 핵심부품 가운데 하나인 필름커패시터의 기술개발동향, 핵심기술, 시장규모 및 응용분야 등에 관하여 두서없이 기술해 보았다. 현재 세계 각국은 에너지, 환경 및 식량 문제와 같이 자국의 생존과 직결되는 난제들을 해결하기 위해 한편으로는 규제를 강화하고 다른 한편으로는 기술개발을 위해 총성 없는 전쟁을 벌이고 있다. 친환경 에너지절약형 미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터도 이미 기술개발 전쟁에 돌입했으며 2010년에는 약 7조 원, 2015년에는 약 10조원에 달하는 세계 시장을 놓고 치열하게 경쟁하고 있다. 다행스러운 것은 국내 연구소와 기업을 중심으로 기술의 중요성을 인식하고 미래형자동차 전력변환시스템용 필름커패시터 개발을 위한 컨소시엄을 구성하였으며, 핵심기술개발 및 상품화를 위한 장기적인 로드맵을 세우는 등 연구 활동이 활발히 진행되고 있다는 점이며, 이것을 보다 가속화시키기 위해서는 정부의 적극적인 지원이 기대되는 시점이라 하겠다. 국산 필름커패시터가 장착된 미래형자동차가 세계 시장을 누비고 다니는 즐거운 상상을 해본다.

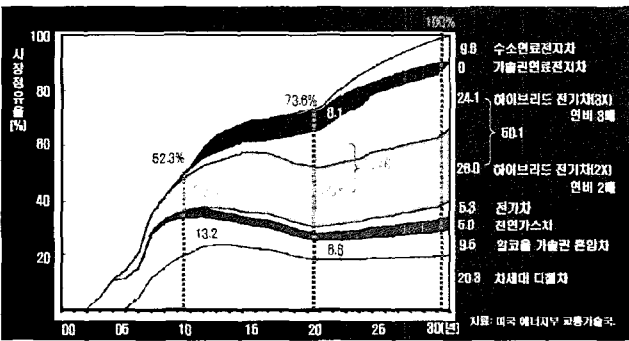


그림 11 미래형자동차의 예상시장점유율(미국 에너지부 교통기술)

표 3 미래형자동차 국내 예상시장 규모

연도	2006	2010	2015
자동차(만대)	0.5	50	135

표 4 미래형자동차 세계 예상시장 규모

연도	2004	2010	2015
자동차(만대)	12	1,600	1,950

표 5 국내 시장 (단위: 억원)

연도	2006	2010	2015
필름커패시터	15	1,500	4,050
패턴 필름	6	600	1,620
Base 필름	3	300	810
에폭시 수지	1	100	270
계	25	2,500	6,750

표 6 세계 시장 (단위: 억원)

연도	2004	2010	2015
필름커패시터	360	48,000	58,500
패턴 필름	144	19,200	23,400
Base 필름	72	9,600	11,700
에폭시 수지	24	3,200	3,900
계	600	71,500	97,500