



안동규 | 조선대학교 기계공학과, 교수 | e-mail : smart@Chosun.ac.kr

이 글에서는 수송기계의 에너지효율·환경영향성·승객안정성 향상을 위하여 전 세계적으로 연구를 시작하고 있는 초경량 PCM 샌드위치 판재의 개발 및 적용 동향을 소개하고자 한다.

## 에너지원 고갈 및 환경 규제 강화에 따른 경량화 연구 확대

최근 자동차, 선박, 항공기 등 수송기계들의 에너지원인 석유와 천연가스의 경우 가체 연수가 각각 약 42.1년과 60.4년이며 수송기계 동력원으로 90% 이상 사용되고 있는 석유의 경우 2010~2012년 사이에 최대 생산지점인 오일 피크를 통하여 지속적인 감산이 예상되고 있어, 수송기계들의 고연비/고에너지 효율성을 구현하기 위한 경량 구조재/내외장 부품 개발에 대한 국내외 산업적 요구가 매우 높아지고 있다. 1997년에 제정된 교토의정에 따라 선진 38국은 2008~2012년까지 대기가스 배출량을 1990년 배출기준보다 평균 5.2% 이상 감축해야 하는 상황이어서 자동차, 선박, 항공기 등 주요 대기가스 배출 관련 산업군에서는 대처방안으로 부품/구조 초경량화에 의한 연료 소비/대기가스 배출 최소화를 서두르고 있는 상황이다. 경량 구조재/부품의 적용에 대한 연구가 가장 활발히 이루어지고 있는 분야는 자동차, 항공, 전략수송기기 분야로

서 알루미늄, 마그네슘 등의 경량 원소재를 사용한 차체 경량화에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 알루미늄과 마그네슘의 경우 매장량, 가체연수, 재활용률 등이 철광석에 비하여 현저히 낮으며, 제품 제작성이 강판에 비하여 떨어져 철강재료를 활용한 경량화에 대한 연구가 확대되고 있다.

## 초경량 PCM 샌드위치 판재 개발 동향

1990년대 후반부터 독일, 미국, 영국 등 기술 선진국에서는 수송기계의 연비, 에너지효율, 환경영향성 향상 및 승객 안정성 증대를 위하여 초경량, 고강성, 고내충격성 첨단 기능성 판재의 필요성을 인지하고, 1996년 독일의 Mercedes-Benz사와 아헨공대 중심으로 추진된 '2 Brite-EuRam 프로젝트'를 시작으로 초경량 PCM 샌드위치 판재(Lightweight sandwich plate with periodically repeated metallic cores) 설계, 제작, 시험평가 및 적용 기술을 계속적으로 개발하고 있다. 초경량 PCM 샌드위치 판재의 성능과 특성은 PCM 심재의

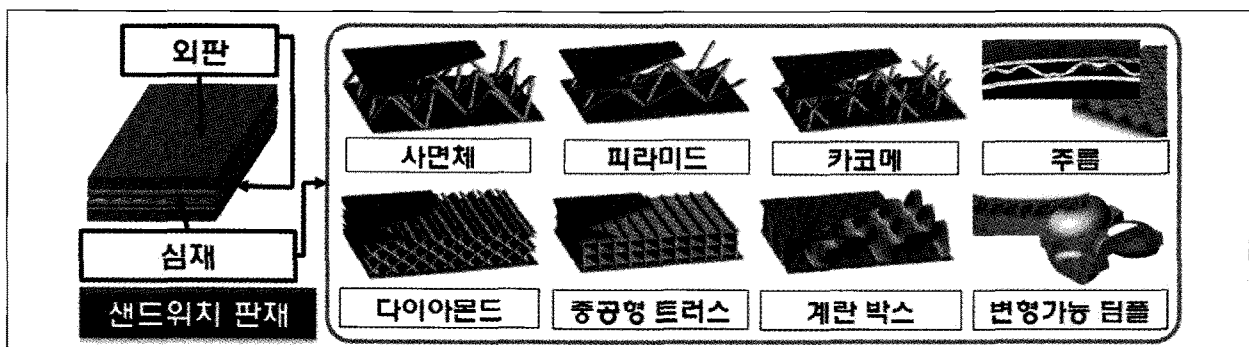


그림 1 초경량 PCM 샌드위치 판재 개념 및 심재 예

표 1 초경량 PCM 샌드위치 판재 개발 동향

국가	기관/기업	소재 종류	협력기관/기업	구분	적용 대상
독일	TU Aachen	망형금속, 천공 판재	Mercedes-Benz	두꺼운 판재	자동차
	Metawell Ltd.	접힘 판재	—	(미성형)	자동차/철도차량
미국	Univ. of California at Santa Babara (UCSB),	피라미드형 트러스, 사면체 트러스, 허니콤, 주름 심재, 망형 금속, 카코메 등	Center for Multifunctional Materials and Structures,	두꺼운 판재 (미성형)	항공기/전략
	Harvard Univ.,		Intelligent materials		수송기기/
	Univ. of Virginia, Princeton Univ.		processing of materials, Cellular Materials		우주왕복선/ 자동차
영국	Univ. of Cambridge		International Ltd.		
한국	KAIST, 조선대, 서울과기대, POSCO, 나라엠엔디, 성우하이텍	트러스, 덤플 및 변형 가능한 덤플, 이방향 주름 심재	교육과학기술부, 지식경제부	얇은 판재 (성형가능)	자동차/선박/건축
	전남대	카코메	교육과학기술부	두꺼운 판재 (미성형)	—

형상 및 배치에 따라 현저히 달라질 수 있어, 그림 1과 같이 허니콤, 트러스, 망형직조금속 등 다양한 종류의 심재의 형상이 제안되고 있다.

초경량 PCM 샌드위치 판재 개발에 대한 연구는 표 1과 같이 독일, 미국 및 영국 등에서 활발히 수행되었으며, 국내에서도 2003년도부터 KAIST를 중심으로 연구를 시작하고 있다.

독일에서는 아헨공대와 Mercedes-Benz의 공동연구로 망형 금속을 심재로 가진 경량 샌드위치 판재를 개발하여, Benz S-class 자동차의 후면 판넬(back panel)에 적용한 바 있다. 또한 Metawell 사에서는 주름 심재를 가진 경량 샌드위치 판재를 양산하는 시스템을 갖추었으며, 이 판재를 그림 2와 같이 자동차, 철도차량

의 구조재 또는 부품에 적용하고 있다. 미국의 산타바바라 소재 캘리포니아 대학, 하버드 대학, 버지니아 대학, 프린스턴 대학과 영국의 캠브리지 대학이 연합하여 MURI 프로젝트의 일환으로 다양한 형태의 초경량 PCM 샌드위치 판재를 개발하고, 이 판재를 항공기, 전략수송기기, 우주왕복선, 자동차 등에 적용하기 위한 여러 가지 기초 연구를 수행하고 있다. 이들 연합 연구에서는 산타바바라 소재 캘리포니아 대학 내 CeMMaS (Center for multifunctional materials and structures)를 중심으로 전략수송기기와 우주왕복선등 다양한 차세대 수송기기에 적용하기 위한 다기능성, 고충격 흡수 판재 개발과 특성 평가에 대한 연구를 수행하고 있다. 미국의 Cellular Materials International 사는 버지니아



그림 2 Metawell 사의 주름 심재를 가진 경량 금속 샌드위치 판재의 적용 예

대학의 IPM(Intelligent materials processing of materials) 연구실과의 공동 연구 결과 중 트러스형 초경량 PCM 샌드위치 판재 제작 기술을 상용화하여 제품을 주문 생산하고 있다.

국내에서는 과학기술부와 지식경제부의 지원으로 KAIST에서 2003년도부터 추진된 '마이크로 첨단 복제 생산시스템 개발' 사업을 시작으로 초경량 PCM 샌드위치 판재 개발되기 시작하였다. 이 사업에서는 조선대, 서울과학기술대, (주)POSCO, (주)나라엠앤디 및 (주)성우하이텍이 참여하여 공동 연구를 수행하였다. 이 사업에서는 두께 3mm 이하의 PCM을 가진 성형 가능한 얇은 경량 금속 샌드위치 판재의 설계, 시험평가 개발, 외판과 심재의 용접 기술개발, PCM 심재 제작용 정밀 금형/성형 기술개발 및 제작된 판재를 자동차 범퍼 백빔에 적용하기 위한 경량 판재 다단 성형 기술 개발의 네 가지 핵심 기술이 개발되었다. 그림 3은 마이크로 첨단 복제 생산시스템 개발 사업의 주요 기술개발 내용을 나타내고 있다.

### 초경량 PCM 샌드위치 판재 제작

초경량 PCM 샌드위치 판재의 제작 공정은 일반적으로 심재 제작공정과 심재와 외판의 결합공정으로 구성된다. 피라미드/사면체 트러스형 심재와, 주름 심재, 계란 통형 심재, 뎀플형 심재, 구멍을 가진 판재형 심재 등은 정밀성형공정으로 제작된다. 특히 정밀 금형을

이용하여 연속적으로 심재의 구조를 대면적으로 성형하는 기술과 이를 위한 정밀 다중 단면/다단 금형개발은 이 분야의 중요 연구 주제로 부각되고 있다. 망형 금속은 금속선의 직조에 의하여 제작된다. 허니콤 계열의 심재들은 기본 단위 형상을 성형한 후, 이 기본 단위 형상들을 접합하여 제작한다. 심재와 외판의 결합 방법은 접착제를 활용한 접합, 브레이징, 레이저 점용접 및 다점전기저항용접 등의 네 가지 방법이 많이 활용되고 있다. 특히, 레이저 점 용접과 다점전기저항용접 방법은 연속적으로 판재를 용접하여 판재의 대량 생산이 가능하므로 이에 대한 연구가 시작되고 있다. 접합 방법의 경우 표면제 도장 작업 시 접착제가 녹을 수 있어, 초경량 PCM 샌드위치 판재를 자동차, 항공기, 전락수송기기 등에 적용하기 위해서는 결합 방법으로 브레이징, 레이저 점용접 및 다점전기저항용접 등을 사용하여야 한다. 초경량 PCM 샌드위치 판재의 제작은 심재 제작과 외판/심재 결합 공정이 독립적으로 이루어지는 경우가 대부분이나 심재 제작에서 결합 공정까지 모든 단계를 연속적으로 수행하는 공정 개발에 대한 연구도 시작되고 있다. 그림 4는 초경량 PCM 샌드위치 판재의 제작 공정 예를 나타낸다.

### 현재 개발된 초경량 PCM 샌드위치 판재

현재 개발되고 있는 초경량 PCM 샌드위치 판재의 경우 두께가 8mm 이상인 두꺼운 경량 금속 샌드위치

판재와 두께가 3mm 이하인 얇은 경량 금속 샌드위치 판재로 분류할 수 있다.

초경량 PCM 샌드위치 판재의 경우 독일, 미국, 영국, 한국 등에서 많이 연구를 진행하고 있으며, 자동차, 철도차량, 항공기, 선박, 우주왕

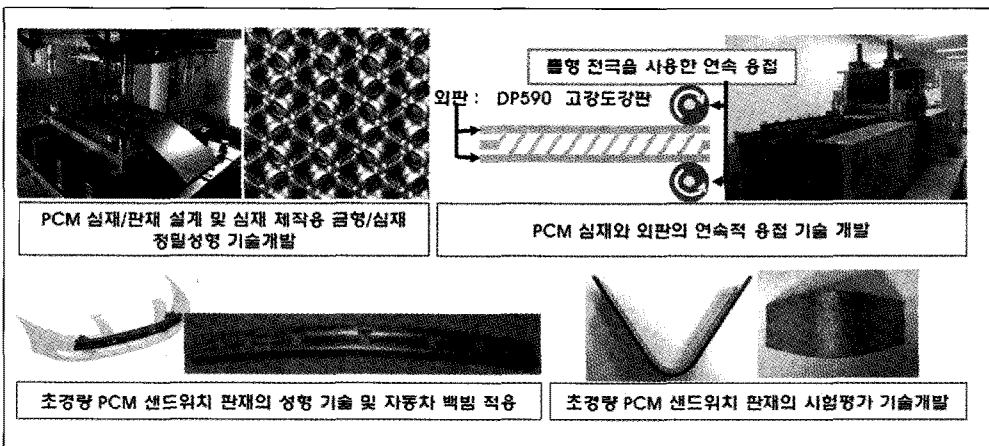


그림 3 마이크로 첨단 복제 생산시스템 개발 사업의 주요 연구 내용

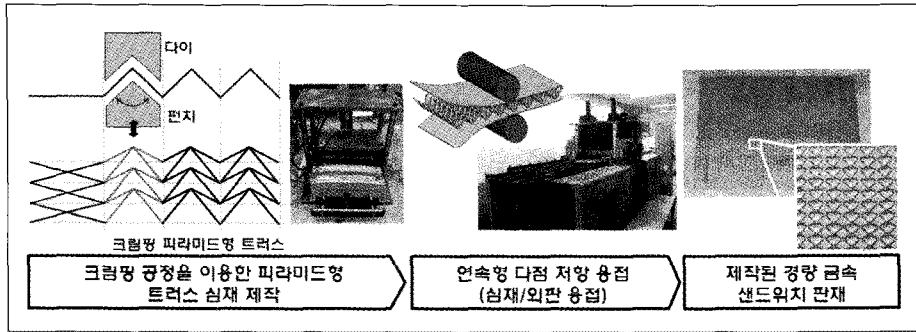


그림 4 초경량 PCM 샌드위치 판재의 제작 공정 예

복선, 전락수송기기 등의 내부격벽/구조, 수직형 외판, 폭파 방어 부재, 내충격 부재 등에 적용하고 있다. 두꺼운 판재의 경우 판재의 강성이 크고 전단 변형에 의하여 심재와 외판의 결합부 파손이 많이 발생하기 때문에 대부분 성형을 거의 하지 않고 판재 형상 자체로 제품에 적용되고 있다. 그래서 두꺼운 샌드위치 판재의 경우 다양한 형상이 요구되거나 성형으로 부품의 특성을 향상 시켜야하는 부품에 적용하기 어렵다. 두꺼운 경량 금속 샌드위치 판재가 성형이 요구되는 제품에 적용될 경우, 외판과 심재를 각 성형한 후 성형된 외판과 심재를 결합하여 제품을 제작한다. 두꺼운 경량 금속 샌드위치 판재의 경우 피라미드형 트러스, 사면체 트러스, 허니콤, 주름 심재, 망형 금속의 심재들이 적용되었다.

얇은 초경량 PCM 샌드위치 판재의 경우 국내에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 자동차 내충격 부품, 선박용 격벽 및 연료전지 등에 적용될 가능성이 매우 높다. 얇은 경량 금속 샌드위치 판재는 심재의 두께에 의하여 발생하는 전단변형을 감소시킬 수 있고 변형 가능한 구조의 심재 설계가 가능하여, 성형이 요구되는 부품에 경량 금속 샌드위치 판재를 적용할 수 있다. 얇은 경량 금속 샌드위치 판재의 경우 트러스, 덩플 및 변형 가능한 덩플, 이방향 주름 심재, 망형 금속 등의 심재들이 적용되었다.

### 초경량 PCM 샌드위치 판재의 특성

초경량 PCM 샌드위치 판재의 특성 분석/평가 또한

판재/심재의 설계/제작과 함께 연구되고 있다.

정적하중에 따른 초경량 PCM 샌드위치 판재의 특성 변화에 대한 연구는 굽힘/인장/압축/전단 하중에 대한 판재의 변형/파손/파단/강성 특성 변화를 실험 및 수치해석으로 분석하고 있

다. 특히 그림 5와 같이 3점 또는 4점 굽힘 하중에 대한 판재의 변형/파손/파단 특성 변화 및 강성 변화에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 변형/파손/파단 특성의 분석/고찰 내용은 심재와 판재 형상/설계에 따른 판재 바닥면의 처짐량, 심재/외판의 파손/파단 특성, 심재와 외판 결합부의 파단 특성 변화이다. 이 특성 변화 데이터를 이용하여 초경량 PCM 샌드위치 판재의 비강성(Specific stiffness) 계산하고 파손 지도(Failure map) 작성하여, 효율적인 심재 형상과 판재 설계를 도출한다. 하중부가 과정 중 심재의 변형 특성과 심재/외판 내부의 응력/변형을 분포 및 하중 전달 특성 변화는 3차원 유한요소해석을 통하여 분석/고찰되고 있다.

충격하중에 따른 초경량 PCM 샌드위치 판재의 특성 변화에 대한 연구는 저속, 고속 및 폭발 탄두 충격에 따른 판재의 변형/파손/파단 및 에너지 흡수 특성 변화를 실험/해석적으로 고찰하고 있다. 두꺼운 초경량 PCM 샌드위치 판재의 경우 고속/폭발 탄두 충격에 대한 심재의 파손/파단 및 에너지 흡수 메커니즘 변화를 분석한다. 고속 충격의 경우 단위 또는 2~3개의 심재를 가진 경량 샌드위치 판재에 대한 홉킨스 바(Hopkinson bar) 시험을 수행하여 판재의 파손/파단 모드 및 하중-처짐 특성 변화에 대한 연구가 집중적으로 수행되고 있다. 이 경우에 대해서는 3차원 충격 유한요소해석을 통한 심재의 변형 및 하중/에너지 전달 경로 변화에 대한 연구도 병행되고 있다. 폭발 탄두 충격의 경우 캠브리지 대학 중심으로 이루어지고 있다. 이 경우 초경량 PCM 샌드위치 판재에 금속 폼재료를 제작된 탄두로 임펄스를 부가하는 폭발 탄두 충격(Blast impact) 시험

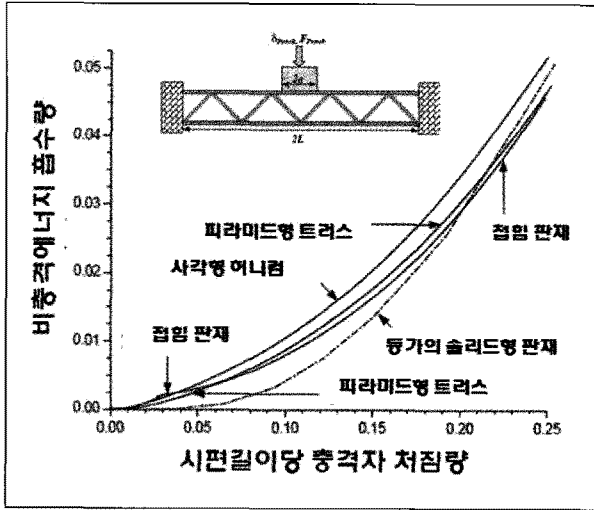


그림 5 심재 종류에 따른 두꺼운 PCM 샌드위치 판재의 비충격에너지 흡수량 변화

을 수행하여 판재의 파손/파단 및 에너지 흡수 특성 변화를 분석하고 있다. 그림 5는 폭발 탄두 충격에 대한 여러 가지 PCM을 가진 두꺼운 초경량 샌드위치 판재의 에너지 흡수 특성 변화의 예를 나타낸다.

얇은 초경량 PCM 샌드위치 판재의 충격 특성 변화 분석에 대한 연구는 낙하충격시험 기법을 이용한 저속 충격에 대한 판재의 변형거동/파손 및 에너지 흡수 특성 분석을 집중으로 수행하고 있다. 시험 방법은 스트레칭형, 드로잉형, 평면 변형형 및 범퍼 단면형상형으로서 다양한 경계조건에 대하여 개발되고 있다. 얇은 초경량 PCM 샌드위치 판재의 저속 충격 특성 연구에서는 판재의 변형과 심재 파손 및 심재/외판 분리에 의한 충격 에너지 흡수 특성을 분석/고찰하고 있다.

## 맺음말

최근 심각하게 나타나고 있는 자원 고갈과 지구온난화에 대한 수송기계 산업 관련 분야의 대처 방안으로 구조/부품의 경량화가 전 세계적인 주요 기술적 화두로 떠오르고 있다. 수송기계 구조/부품 경량화의 한 가지 방안으로 초경량 PCM 샌드위치 판재의 개발과 특성 변화에 대한 연구가 전 세계적으로 시작되고 있다. 이 연구 분야의 경우 자동차 산업뿐만 아니라 선박/항공기/우주왕복선/전략수송기기 등 주요 기간 산업의 제품과 연계된 주요 핵심 원천 기술 분야로 미래 국가 과학기술 경쟁력 평가의 주요 방향이 될 수 있을 것으로 판단된다. 초경량 PCM 샌드위치 판재의 경우 제품의 경량화와 비강성/내충격성을 현저히 향상과 동시에 이들 판재 특성량의 제어가 가능하여, 향후 수송기계 분야의 핵심 연구 주제로 부각될 가능성이 매우 높을 것으로 사료된다. 초경량 PCM 샌드위치 판재의 대량생산/신뢰성 확보 및 특성 향상을 위해서는 대면적 심재 연속 성형 공정 개발, 심재/외판 유연/연속 접합 기술개발, 접합 품질 실시간 모니터링 기술 개발, 다층 기능성 샌드위치 판재 유연/연속 제작 공정 개발, 판재 무결점 성형 공정 개발 및 제작 판재의 정적/충격하중에 대한 특성 평가 기술이 계속적으로 개발되어야 될 것으로 생각된다. 초경량 PCM 금속 샌드위치 판재의 경우 특수 기능성 판재 개발, 전략 수송기기용 전자파 방호 부재 개발, 우주선/우주왕복선/항공기용 열 변형 제어 표면 부재 개발에도 적용 가능할 것으로 사료된다.



## 기계 용어해설

### 점화지연(Ignition Delay)

디젤 기관에서 압축된 고온의 공기 속에 연료를 분사하면 즉시 점화되지 않고 폭발이 일어나기까지 약간 지연되는 것.

### IC 메모리(IC Memory)

소형화하기가 어렵고 고속동작에 부적합하며 주변회로

가 복잡한 자성 메모리의 결점을 IC 기술의 진보로 해결한 것.

### 함침(含浸: Impregnation)

수지를 직물, 목재, 종이 등의 구조 속의 틈새에 채워 넣은 것과 같이, 공동조직에 액상의 물질을 흠뻑 채워 넣을 때에 쓰이는 것.