

최 종
연구보고서

이용 가치가 낮은 산림 폐재 및 간벌재를 활용한
팽연 완충 소재 개발

Development of Cushioning Materials
Using Waste Logs

연구기관
경 상 대 학 교

농림자료실



0013484

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “이용 가치가 낮은 산림 폐재 및 간벌재를 활용한 팽연 완충 소재 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2007년 5월 24일

주관연구기관명 : 경상대학교

총괄연구책임자 : 김 철 환

세부연구책임자 : 송 대 빈

연 구 원 : 정 효 석

연 구 원 : 이 영 민

연 구 원 : 김 경 윤

연 구 원 : 신 태 기

연 구 원 : 백 경 길

연 구 원 : 정 대 홍

요 약 문

I. 제 목

이용 가치가 낮은 산림 폐재 및 간벌재를 활용한 팽연 완충 소재 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 이용 가치가 낮은 산림 폐재 및 간벌재를 활용한 팽연 완충 소재 개발에 관한 연구는 난분해성 재료인 포장완충용 발포스티로폼(EPS)을 대체하고 펄프 몰드와 같이 별도의 고온압착금형이 없이 소재 자체만으로도 EPS와 같은 완충성능을 발휘할 수 있는 새로운 포장 완충소재의 개발을 목적으로 하고 있다. 이를 위해서는 석유계 원료 대신에 셀룰로오스 주성분으로 하는 식물성 원료를 사용하여야 하고, 완충소재 자체에 EPS와 같이 외부 충격을 흡수할 수 있는 무수한 공극들이 만들어지도록 제조하여야 한다. 셀룰로오스를 주성분으로는 식물성 섬유, 특히 목질계 섬유는 토양에 유기되었을 때 토양 미생물에 의해 완전히 분해되는데 2-5개월 정도가 소요되므로 환경에 대한 부담이 매우 적다. 특히 포장용 완충재의 대부분을 차지하는 EPS 완충재의 경우 재활용의 어려움으로 인해 사용금지, 사용제한, 과징금 부과 등 규제가 더욱 엄격해지고 있다.

따라서 목질계 섬유를 주원료로 하여 환경친화적 완충소재(cushioning material)를 제조할 필요가 있다. 식물성 섬유를 원료를 이용하여 완충소재를 제조하기 위하여 고온고압 하에서 목질계 섬유를 압출기를 통과시켜 압출팽연시키는 팽연(expansion) 방식과, 압착 방식 없이 감압 하에서 펄프 현탁액을 탈수·성형시켜 평판형 완충소재를 제조하는 방식을 이용하여 친환경 완충소재를 제조하고자 하였다.

앞으로 난분해성 소재 사용에 대한 규제가 더욱 강화될 것으로 전망되기 때문에 플라스틱이나 폴리스틸렌과 같은 석유계 원료로 만들어진 완충소재는 사용이 더욱 어려워 질 것이다. 따라서 생분해가 가능한 완충소재의 개발이 무엇보다 필요한 시점이며, 본 연구에서 개발한 펄프 완충소재가 난분해성 완충재를 대체할 수 있는 대체 소재로서의 역할을 충분히 할 것으로 사료된다.

III. 연구개발 내용 및 범위

산지 폐잔재의 펄프화를 통하여 친환경 포장 완충소재를 제조하는 기술은 두 가지로 접근하고자 한다. 먼저 수집된 산지 폐잔재를 펄프화하기 위하여 기계펄프 방식을 적용하였고, 이들 폐잔재를 목분 제조 장치를 이용하여 목분으로 만들었다. 이들 각각의 원료에 결합보조제인 전분을 첨가한 후 단축식 스크루 (single screw extruder)의 성형 다이(forming die)를 통하여 압출 및 팽연시켜 충격흡수능력을 갖는 원형 팽연완충소재(circular expanded cushioning materials)를 제조하였고, 이들 완충소재의 물성을 평가하기 위하여 밀도, 탄성계수, 공극률 등을 측정하였다.

또한 산지 폐잔재로 만들어진 펄프에 전분과 같은 결합보조제를 첨가한 후 감압성형방식(suction-forming method)을 적용하여 평판형 완충소재(plate-like cushioning materials)를 제조하는 기술을 개발하였다. 제조된 완충소재들은 EPS와 펄프 몰드의 물성과 비교하여 포장용 완충소재로서 사용할 수 있는 물성을 지니고 있는지를 비교분석하였다. 펄프 완충소재가 재활용되는 경우 완충물성이 어떻게 변하는지를 분석하였고, 완충성능을 시험하기 위하여 표준 시험법에 근거하여 낙하 시험을 실시하여 펄프 완충재의 효능을 평가하였다. 또한 폐잔재로부터 만들어진 완충소재의 경제성을 분석하여 EPS와 펄프 몰드에 비하여 가격 경쟁력이 있는지를 환경편익적 관점에서 조사하여 폐잔재로부터 만들어진 포장용 완충소재가 경제적으로 유용한 포장소재임을 보여주고자 하였다.

팽연압출방식을 이용하여 제조한 원형 완충소재는 결합보조제인 전분을 펄프 혹은 목분의 전건 중량에 대하여 20% 미만 첨가하였을 때 가장 우수한 완충성능을 나타내었고, 대기 중의 함수율 상태에서는 EPS에 근접한 완충 성능을 발휘하였다. 감압성형 방식을 이용하여 제조한 평판형 완충소재는 전분 첨가량이 10% 수준에서 가장 뛰어난 완충성능을 발휘하였고, 재활용이 반복될수록 섬유 결합력이 감소되면서 완충소재의 충격흡수능력을 향상시켰다. 낙하시험에서도 펄프 완충소재는 EPS에 준하는 충격흡수성능을 발휘하였다. 최종적으로 EPS 완충재 사용으로 인해 발생하는 환경오염 비용을 고려한다면 폐잔재를 이용한 포장용 완충재가 사회적 측면에서 보다 경제적인 것으로 나타났다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

폐잔재 및 소경재를 열기계펄프화한 후 압출팽연 방식과 감압성형 방식을 적용하여 포장용 완충소재를 제조하는 기술을 개발하였다. 이러한 연구 개발 결과에 대한 지적 재산권 보호를 위하여 특허를 출원할 예정이며, 포장용 완충소재 제조 기술에

대한 홍보를 위하여 환경관련 전시회에 관련 기술 및 제품을 전시하고, 여러 국내외 세미나에 참석하여 연구 관련 핵심 기술 및 제품 성능에 대하여 소개할 예정이다. 또한 국내외 학회지 연구 결과를 발표하여 친환경 완충소재에 대한 홍보를 적극적으로 진행할 예정이다.

또한 펄프 완충소재 제조 기술의 실용화를 위하여 본 연구 결과물의 실용화에 관심을 갖는 회사와 산학협력연구 체제를 구축하여 실용화를 위한 추가 연구를 진행할 예정이다.

SUMMARY

I. Title

Development of Cushioning Materials Using Waste Logs

II. Research Backgrounds

It has been reported that waste wood (logging residues) generated in Korea constituted about 40 per cent of the total amount of wood used in 2000. It is interesting to note that waste wood in Korea has been generated at a ratio of about 23% every year since 1999. However, since the practical use of waste wood has been dropping year after year, fresh applications should be developed for it. Pulping of waste wood may be able to break a road to generation of new application such as cushioning materials.

Expanded polystyrene (EPS) is a strong plastic created from ethylene and benzene that can be injected, extruded or blow molded, making it a very useful and versatile manufacturing material. EPS has been widely used in various ways worldwide, but the waste after use has come to be regarded as a nuisance due to its non-degradable characteristics in nature: furthermore, CFCs are used in its production. Consequently, many countries have introduced laws to prohibit the extended use of EPS. These laws mean that non-degradable materials used as packing cushions during goods distribution will be entirely prohibited in the near future. From the environmental point of view, new alternatives able to replace EPS must be developed for coping effectively with the tightened demands for earth-friendly packaging by the governments.

For provision against the foreseen prohibition of EPS, biodegradable shock-absorbing materials must be developed. The best alternative raw materials to EPS may be plant fibers from woods, which are easily exposed to microbes and thereafter decomposed in a soil. This implies that the cushions from wood pulp will be regarded as environment-friendly materials, differently from EPS. The fibers produced from mature woods are too expensive to be used as a raw material for making cushioning materials. Therefore, waste wood, which has little economic efficiency in Korea, can be treated as an optimum raw material for making the cushioning materials.

In this study, a cushioning material was developed by a suction forming of virgin pulp fibers originated from waste wood. Cushioning materials from waste wood would contribute to the increase of the economic value of waste wood as well as being a substitute for EPS. The new cushioning materials made of waste wood would be a direct replacement for and a good alternative to EPS cushions in this new era of environmental awareness.

For making cushioning materials from a pulp suspension, the suction forming method without wet press was applied, which left lots of voids in the inner structure of the cushioning materials. Finally the physical properties of the cushioning materials were compared with those of EPS, which would lead to the confirmation that the biodegradable cushioning materials had similar or better properties than EPS.

III. Experimental results

Environment-friendly cushioning materials were made using an expansion method as well as a suction-forming method from waste wood collected from local mountains in Korea. The waste wood was pulped by thermomechanical pulping. The cushioning materials manufactured by expansion and suction forming were a circular type and a plate type, respectively. The TMP cushions showed superior shock-absorbing performance with lower elastic moduli compared to EPS and pulp mold. The circular-type displayed the best performance of shock absorption when cationic starch was added in 20% based on the oven-dried pulp weight. The shock-absorption ability of the circular-type cushions was extremely increased under atmospheric moisture content, 8-10%.

Even though the plate-type cushions made using different suction times had many free voids in their inner fiber structure, their apparent densities were a little higher than EPS and much lower than pulp mold. The addition of cationic starch increased the elastic modulus of the TMP cushions without increasing the apparent density, which was different from the effect of surface sizing with starch. The porosity of the TMP cushion was a little less than EPS and much greater than pulp mold. As the TMP cushions were recycled, their cushioning performance was improved with less bonding ability of recycled pulp fibers due to fiber hornification. The thermal conductivity of TMP cushions are a little less

than EPS, but it was clearly confirmed that they could be used as insulating materials. Finally, it was confirmed that the TMP cushions had great potential to endure external impacts occurring during goods distribution when used for packing.

IV. Practical use of research results

The technology for manufacturing cushioning materials made of TMP from waste logs was successfully developed, and thereafter the patent for protecting the intellectual property right on this technology are applied for protection of intellectual property rights. After taking out a patent for the technology, the technical know-how will be transferred to any company having a capacity able to produce environment-friendly cushioning materials with further study. For public information of the research results on the technology of manufacturing cushioning materials with TMP, some of the results will be presented in domestic/international symposiums and technical exhibitions.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	17
1. Research objectives	17
2. Research needs and ranges	18
Chapter 2. Present situation of the research in the inside and outside country ...	27
1. Present situation of the related research development of the inside and outside country	27
2. The status of the research results in the inside and outside country	31
Chapter 3. Results and discussion	33
1. Physico-chemical properties of pulp fibers	33
1.1 Preparation of raw materials and analysis of their properties	33
1.2 Results and discussion	35
2. Manufacture of expanded cushioning materials	42
2.1 Manufacture of a single screw expander	42
2.2 Extruding characteristics of raw materials	44
2.3 Expanding characteristics of raw materials	47
3. Manufacture of plate-type cushioning materials	67
3.1 Introduction	67
3.2 Suction former for making plate-type cushioning materials	68
3.3 Waste residual logs and small round logs for making cushioning materials	77
3.4 Results and discussion	85
4. Design of manufacturing process of cushioning materials for practical use	125
4.1 Manufacturing process of suction forming	125
4.2 Manufacturing process of expanding	126
5. Economic evaluation of cushioning materials	127
5.1 Policy and trading regulation of packaging wastes	127
5.2 Manufacturing cost analysis of packaging cushions	131
Chapter 4. Goal achievement and contribution to related research fields	137
1. Goal achievement	137
1.1 Optimum pulping technology using waste residual logs	137

1.2 Development of cushioning materials using pulp suspension	138
2. Contribution of related research fields	138
Chapter 5. Plans for practical use of the research results	141
1. Practical use of the research results	141
2. Necessity of a further research	141
Chapter 6. Overseas information collected during the research	143
Chapter 7. References	145

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	17
제 1 절	연구개발의 목적	17
제 2 절	연구개발의 필요성 및 범위	18
1.	산지 폐잔재의 경제적 이용	18
2.	산지 폐목재 재활용 현황	20
3.	산지폐잔재의 수집을 통한 경제적 이용	21
4.	산지폐잔재의 경제적 가치	22
5.	산지폐잔재를 활용한 팽연 완충 포장재 개발·활용의 경제적 효과	23
6.	연구개발의 범위	24
제 2 장	국내외 기술개발 현황	27
제 1 절	국내외 관련기술개발현황	27
1.	포장 완충재 관련 국내 연구	27
2.	포장 완충재 관련 국외 연구	29
제 2 절	연구결과의 국내외적 위치	31
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	33
제 1 절	원료 섬유의 물리·화학적 성질 분석	33
1.	원료 섬유의 제조 및 물성 분석	33
1.1	폐잔재를 이용한 열기계펄프 및 목분 제조	33
1.2	원료 섬유의 결정화도 측정	33
1.3	원료 섬유의 열분해 성질	34
1.4	원료 섬유의 보수도 측정	34
1.5	원료 섬유의 원소 분석	35
2.	결과 및 고찰	35
2.1	원료 섬유의 조직 관찰	35
2.2	원료 섬유의 열분해 특성 분석	39
2.3	원료의 결정화도 분석	39
2.4	원료 섬유의 성분 분석	40
제 2 절	폐잔재 및 소경재를 이용한 팽연완충소재 제작	42
1.	압출기 제작	42
2.	압출 특성 분석	44

2.1 열기계필프 섬유 압출 특성	44
2.2 목분의 압출 특성	45
2.3 팽연보조제 혼합에 따른 압출 특성 분석	45
2.4 함수율에 따른 압출 특성 분석	46
2.5 팽연완충소재의 물리적 성질 분석	46
3. 열기계필프 섬유와 목분의 팽연 특성	47
3.1 열기계필프 섬유의 압출 특성	47
3.2 목분의 압출 특성	52
3.3 팽연보조제 혼합에 따른 압출 특성 분석	56
3.4 함수율에 따른 압출 특성 분석	59
제 3 절 폐잔재 및 소경재를 이용한 평판형 완충소재 제작	67
1. 서론	67
2. 평판형 감압성형장치 설계	68
2.1 감압성형장치의 구성	68
2.2 감압성형의 원리(principal theory of vacuum forming)	71
3. 완충소재 제조용 폐잔재 및 소경목 시료	77
3.1 원료 펄프화	77
3.2 완충소재 제조 과정	78
3.3 완충소재의 제조 조건	79
3.4 감압성형된 완충소재의 물성 측정	81
3.5 완충소재의 공극률 계산	82
3.6 완충소재의 단열 실험	84
4. 결과 및 고찰	85
4.1 완충소재의 단면 형상	85
4.2 완충소재의 물성	88
4.2.1 감압탈수 시간에 따른 완충소재의 물성 변화	88
4.2.2 전분첨가량에 따른 폐잔재 TMP, BTMP 및 MDF 완충소재의 물성 변화	93
4.2.3 원료의 투입량 변화 따른 완충소재의 물성 변화	99
4.2.4 완충소재에 대한 표면사이징 처리 후 물성 변화	103
4.2.5 감압성형 공정에 의한 완충소재의 공극률 변화	109
4.2.6 내첨 사이징 처리에 따른 TMP 완충소재의 내수성 변화	110
4.2.7 완충소재의 재활용 횟수에 따른 물성 변화	112
4.2.8 표백 전·후 완충소재의 백색도 변화	117
4.2.9 완충소재의 단열성 평가	119
4.2.10 완충소재의 낙하시험	122

제 4 절 실용화를 위한 완충소재 제조 공정 설계	125
1. 감압성형 완충소재 제조공정	125
2. 팽연압출형 완충소재 제조공정	126
제 5 절 완충소재의 경제성 분석	127
1. 포장 폐기물에 대한 국내외 정책 및 무역규제	127
2. 포장용 완충재 제조비용 비교	131
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	137
제 1 절 목표 달성도	137
1. 폐재/간벌재의 최적 펄프화를 위한 탐색 - 100% 달성	137
2. 펄프 현탁액을 이용한 완충소재 제조 기술 개발 - 100% 달성	138
제 2 절 관련분야에의 기여도	138
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	141
제 1 절 연구개발결과의 활용계획	141
제 2 절 추가연구의 필요성	141
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	143
제 7 장 참고문헌	145

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

물류 유통 과정 중에 발생하는 외부 충격으로부터 포장된 제품을 보호하기 위해서 가장 많이 사용되는 재료들로는 발포 폴리스티렌(expanded polystyrene, EPS)과 펄프 몰드가 대표적이다. 발포 폴리스티렌은 폴리스티렌을 발포제(發泡劑)의 작용으로 팽창시킨 것으로 거품폴리스티렌·스티로폼(styrofoam)·발포스티렌·스티로폴 등 여러 이름으로 불리며, 영문 머리글자를 따서 EPS로 약칭하기도 한다. 스티로폼은 독일의 종합화학회사인 바스프(BASF AG)의 상표명이고, 스티로폼은 미국 다우 케미컬사(社)의 단열재 상표명으로, 국내에서는 스티로폴로 널리 알려져 있다. EPS의 특징은 희고 가벼우며, 내수성(耐水性)·단열성·방음성·완충성 등이 우수하여 널리 사용된다. 그리고 펄프 몰드는 포장되는 제품의 모양에 따라 금형(몰드)을 제작하고, 펄프 몰드의 원료인 재생 펄프를 물에 대해 2% 정도로 해리시킨 후 펄프 현탁액을 감압 탈수성형하여 요철 금형으로 고온압착 건조시켜 각종 포장재 및 완충재로 사용하는 성형품이다. 펄프 몰드용으로 널리 사용되는 원료로는 제품의 용도에 따라 폐신문지, 폐글판지, 폐잡지, 각종 폐기서류 및 문서 등이 있으며, 지력증강용 첨가제 및 천연색소 등을 첨가하기도 한다.

EPS는 석유계 원료로 제조되는 난분해성 소재이기 때문에 고유 용도로 사용된 후 자연계에 방치될 경우 분해에만 약 500년이 걸리게 된다. 더군다나 스티로폼을 수거 후 소각할 때에도 다이옥신과 같은 환경 호르몬이 방출되어 인체에 치명적인 영향을 미치게 된다. 펄프 몰드는 고온압착하여 제조되기 때문에 펄프 몰드 자체만으로는 EPS와 같은 완충 성능을 발현할 수 없고, 포장되는 제품의 형상에 맞게 금형을 제작하여 충격 흡수 공간을 부여하여야만 한다. 따라서 대형 제품의 포장에는 펄프 몰드를 사용하기 어렵지만 셀룰로오스를 주원료로 하고 있기 때문에 환경친화적 완충 소재로 인식되고 있다.

산업혁명 이후 지난 수세기에 걸친 산업화 및 도시화 등의 영향으로 지구 온난화가 심화됨에 따라 국제사회에서는 92년 6월 브라질의 리우환경회의에서 유엔기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)을 채택하여 '94년 3월 21일 공식 발효하였다. 또한 2005년 2월 16일 교토의정서가 발효됨으로써 환경보호 및 자원 재활용에 대한 관심이 고조되고 있는 상황에서 국내외적으로 포장 폐기물에 대한 규제가 강화되고 있다. 특히 포장용 완충재의 대부분을 차지하는 EPS 완충재의 경우 재활용의 어려움으로 인해 사용금지, 사용제한, 과징금 부과 등 규제가 더욱 엄격해지고 있다.

따라서 본 연구에서는 난분해성 재료인 EPS를 대체하고 펄프 몰드와 같이 별도의

고온압착금형이 없이 소재 자체만으로도 EPS와 같은 완충성능을 발휘할 수 있는 새로운 포장 완충소재의 개발을 목적으로 하고 있다. 이를 위해서는 석유계 원료 대신에 셀룰로오스 주성분으로 하는 식물성 원료를 사용하여야 하고, 완충소재 자체에 EPS와 같이 외부 충격을 흡수할 수 있는 무수한 공극들이 만들어지도록 제조하여야 한다. 셀룰로오스를 주성분으로는 식물성 섬유, 특히 목질계 섬유는 토양에 유기되었을 때 토양 미생물에 의해 완전히 분해되는데 2-5개월 정도가 소요되므로 환경에 대한 부담이 매우 적다. 따라서 이러한 목질계 섬유를 주원료로 하여 환경친화적 완충소재(cushioning material)를 제조하였다. 여기에 완충성능을 부여하기 위해서는 고온고압 하에서 목질계 섬유를 압출기를 통하여 압출팽연시키는 팽연(expansion) 방식과, 압착 방식 없이 감압 하에서 펄프 현탁액을 탈수·성형시켜 평판형 완충소재를 제조하는 방식을 이용하여 친환경적 완충소재를 제조하고자 하였다.

제 2 절 연구개발의 필요성 및 범위

1. 산지 폐잔재의 경제적 이용

우리나라의 국토 면적은 993만ha로 그 가운데 645만ha가 산림으로 이루어져 있다. 이는 우리나라 국토의 약 65%를 차지하는 것으로 국토의 대부분이 산림으로 이루어져 있다고 할 수 있다. 그래서 우리나라를 '산림국' 이라고도 하지만 우리나라의 숲은 20년도 못된 어린 나무들로 구성된 숲이 361만ha로 전체 숲의 56%를 차지하고, 20-40년된 소년기의 숲이 247만ha(38%)를 차지하고 있어 연간 목재 수요량의 90% 이상을 외국에서 수입하고 있는 실정이다. 따라서 산지의 효과적 개발과 함께, 총 목재 사용량의 40%를 차지하는 폐잔재에 대한 효과적인 이용은 우리에게 직면한 큰 과제라 할 수 있다. 특히 폐잔재는 충분히 유용한 자원으로 재활용 할 수 있음에도 불구하고 그대로 방치되어 있는 경우가 많은 실정이다. 또한 국제적으로도 2005년 2월 16일 교토의정서가 발효됨으로써 환경보호 및 자원 재활용에 대한 관심이 고조되고 있다. 사회적으로도 웰빙시대에 이어 로하스운동이 붐을 일으키고 있는 현재 폐잔재의 재활용은 환경적, 경제적, 국제적으로 매우 중요한 의미를 가진다 하겠다.

우리나라 총 폐잔재 발생량(97년)은 11,011천m³로 총 목재 사용량의 40% 수준이다(임업연구원 2000). 전체 폐잔재 발생량 중 건설폐잔재가 5,752천m³로 거의 절반을 차지하고 있으며, 산업가공폐잔재(3,533천 m³), 산지폐잔재(911천 m³), 물류유통폐잔재(624천m³)의 순이다.

폐잔재란 광의적으로 원목 또는 목제품을 가공 처리하는 과정에서 발생하는 폐잔재(산지폐잔재, 산업가공폐잔재) 또는 잔재, 목제품 사용 후 용도폐기시 발생하는 폐잔재(생활폐잔재, 유통폐잔재, 건설폐잔재) 또는 고재로 정의할 수 있다. 산지폐잔재

는 주벌이나 육림 등 산림작업 후 반출되지 않고 산림지역내에 방치된 폐잔재로 정의할 수 있다. 이러한 임지폐잔재의 재활용 현황은 발생량의 약 60%정도가 톱밥용(22%), 조경수, 해태목, 인삼경작용 등의 지주목(27%), 장작 등의 연료(12%)로 재활용되고 있다. 산업가공폐잔재는 제재, 합판, 칩, 보드류, 펄프 등을 생산하는 과정에서 발생하는 일차 가공폐잔재와 가구, 악기, 건구재 등을 생산하는 과정에서 발생하는 이차 가공폐잔재로 구분할 수 있으며, 100% 재활용되고 있다.

현재 폐잔재의 발생량 중 약 50%가량을 건설폐잔재가 차지하고 있으며 그 뒤를 이어 산업가공폐잔재, 산지폐잔재의 순이다. 재활용 측면에서 보면 건설폐잔재의 경우 단지 4%정도만이 재활용 되고 있으며, 산업가공폐잔재는 100%, 산지폐잔재의 경우 60%정도 재활용되고 있다. 폐잔재 발생량과 재활용률 측면에서 볼 때 건설폐잔재를 재활용하는 것이 가장 바람직하나 수집의 어려움, 폐잔재의 낮은 품질 등의 이유로 다른 폐잔재에 비해 경제적 효율성은 떨어진다. 산업가공폐잔재는 수집의 용이, 상대적으로 높은 폐잔재 품질 등 경제적 효율성이 가장 높아 현재 100% 재활용되고 있다. 따라서 이 보고서에서는 폐잔재 발생량의 상당 부분을 차지하고 상대적으로 품질도 좋으나 재활용률이 비교적 낮은 산지폐잔재를 중심으로 폐잔재의 경제성을 분석하고자 한다.

산지폐잔재란 일반적으로 산지에서 생산되는 여러 종류의 임목중 임지에 방치 또는 수집되어 이용되지 못하는 목재를 뜻하는데, 무육간벌재, 소경재, 표고자목, 피해목 등이 이에 해당한다. 우리나라에서 발생하는 폐잔재 및 소경재는 숲 가꾸기 사업 즉 간벌, 천연림 보육과 같은 산림의 성장촉진을 위한 산림작업을 포함해 일반 목재벌채허가사업에 속하는 주벌, 간벌, 수종갱신 등의 산림사업을 통하여 꾸준히 발생하고 있다. 소경재는 주로 간벌작업에서 생산되는데 원목의 말구직경 15 cm 이하를 소경재라 하고, 현재 생산되고 있는 간벌재의 크기는 직경 6-20 cm 범위이며 평균 직경 10 cm 정도가 90%를 넘는다. 수종별 벌채 비율을 보면 침엽수 79%(소나무 65%, 낙엽송 8%, 리기다소나무 4%, 기타 2%), 활엽수 21%(참나무 14%, 포플러류 1%, 기타 6%)로써 침엽수가 대부분이다.

산지폐잔재가 발생하는 산림사업을 주요 유형별로 나타낸 것으로 목재벌채허가사업의 주벌, 간벌, 수종갱신의 경우 연도별로 차이는 있으나 증가 추세를 알 수 있다. 그리고 숲 가꾸기 공공근로사업으로 행해진 간벌 및 천연림보육사업은 2002년도에 사업이 종료되고 일반육림사업으로 전환이 되었다. 이에 따라 2003년도 일반 육림사업은 2002년에 비해 간벌은 62%, 천연림보육사업은 112% 증가하였다.

숲 가꾸기 공공근로 사업장의 현지 조사결과 산출된 직경급별 본수를 보면, 총 ha 당 2,360본 가운데 6 cm이하가 1,776본, 8-12 cm가 429본, 14-18 cm가 117본, 20 cm 이상이 38본인 것으로 나타났다. 이들 직경급별 본수와 표준목 재적을 적용하여 산출한 재적을 적용할 경우 숲 가꾸기 공공근로사업을 통해 생산되는 ha당 간재적량은 44.6 m³/ha에 달하는 것으로 파악되며, 이 가운데 직경 6 cm이하의 소경폐잔재와 20

cm이상의 중경재를 제외하면 이용 가능한 산지폐잔재는 24.7m³/ha인 것으로 분석되었다.

목재별채허가사업의 임지폐잔재 발생량 추정은 산출된 벌채량에 아래와 같이 조재율을 적용하여 산출하였으며, 조재율의 경우 이용 가능한 재적의 비율을 의미하며, 여기에서는 주요 수종의 평균 조재율을 적용하였다(표 1 참조).

표 1. 수종별 조재율

수종	소나무	낙엽송	잣나무	리기다	활엽수	평균
조재율(%)	83	87	81	83	68	80

산지폐잔재 추정량을 살펴보면 1999년에 2,064천 m³에서 2003년도에 4,447천 m³으로 연간 23%씩 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 산지 폐잔재는 2001년 까지 숲 가꾸기 공공근로사업에서 가장 많은 양이 발생한 것으로 추정되었다. 이는 숲가꾸기 공공근로사업이 IMF이후 실업대책의 일환으로 추진된 결과이며, 숲가꾸기 공공근로사업의 사업량이 감소하면서 임지폐잔재의 양도 1999년 1,874천 m³에서 2001년 1,346천m³, 2002년에는 675천 m³으로 줄어든 것으로 나타났다¹⁾. 주벌, 간벌, 수종갱신 등 목재별채허가사업의 경우 주벌은 2003년도에 다소 주춤하였으나 간벌 및 수종갱신사업의 물량은 계속 증가 추세에 있는 것으로 나타나 산지폐잔재의 발생량은 꾸준히 증가하고 있다. 향후 우리나라의 영급구조와 수집비용을 고려하면 전체적으로는 일반 육림사업물량이 늘어나고 수집비용이 증가하기 때문에 산지폐잔재의 발생량은 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.

2. 산지 폐목재 재활용 현황

산지폐잔재 가운데 현재 수집되어 이용되고 있는 것은 수집비용의 문제로 인해 수집비용이 지원되고 있는 숲 가꾸기 공공근로사업에 국한되고 있다. 2002년 산지폐잔재의 수집량은 67천 m³으로 파악되었으며, 수집된 산지폐잔재는 대부분 톱밥(20%), 원목매각(31%), 임산연료(42%)로 활용되고 있다. 최근 4년간의 숲 가꾸기 공공사업을 통해 발생한 총 임지폐목재 추정 발생량은 10,352천 m³으로서 이 가운데 수집된 양은 총 426천 m³이며, 이는 전체 발생량의 4.1% 정도에 불과한 실정이다.²⁾

- 1) 임업연구원(2000)은 산림내에 방치되는 폐목재가 연간 823천m³에 달하는 것으로 파악한 바 있다. 이 경우 폐목재는((1-조재율)/조재율)×원목량의 산술식에 의하여 단순하게 추정한 것으로서 주벌, 수종갱신의 조재율은 0.85, 간벌(20년생 기준)은 0.6을 각각 적용하였다. 이처럼 임업연구원의 폐목재 추정량이 위의 결과와 다른 이유는 산림유기자원 보다 좁은 개념에서 산림내 방치된 폐목재를 추정하였기 때문이다.
- 2) 임업연구원(2000)은 임지에 방치되는 폐목재 가운데 약 57.5%가 재활용되는 것으로 파악하였는데 이는 폐목재 산출과 재활용기준이 다르기 때문이다.

특히 일반 육림사업이나 목재벌채허가사업의 경우 전적으로 인력에 의한 벌채에 의존하고 있어 산지폐잔재가 거의 수집되지 않고 있는 상태이다. 산지폐잔재의 이용실태조사결과 말구직경이 7-15 cm이하의 폐잔재는 톱밥·칩 등으로 일부 활용되고 있으나 직경 6 cm이하의 작은 나무, 간벌재와 주벌재의 초두목, 가지목은 거의 전량 폐기되고 있다. 전체적으로 우리나라의 산지폐잔의 발생량과 재활용률은 산지폐잔재 발생량은 매년 증가 추세에 있으나, 재활용률은 감소 추세에 있다.

또한 기존 연구에 의하면 각종 육림작업으로 발생한 총 임목 생산량 중 49.1%만이 수집되었을 뿐 51%에 해당하는 산지폐잔재가 산림속에 쌓아 놓거나 그냥 방치되고 있다(김기원 2004). 이 연구에 의해 추정된 국내 산지폐잔재 방치량은 540,000m³에 달하고 있다.

3. 산지폐잔재의 수집을 통한 경제적 이용

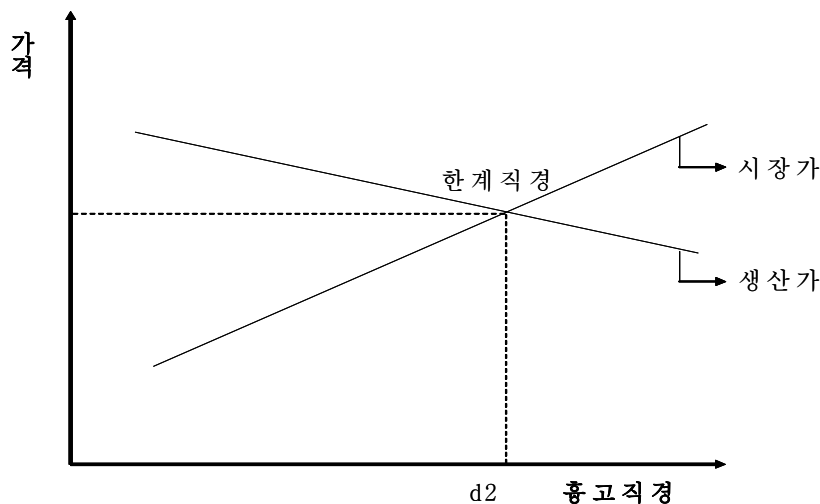
국내의 산지폐잔재 수집시스템은 간벌, 주벌 등 벌채형태 및 인력, 기계 등 작업형태와 밀접한 관계를 가지고 있다. 우리나라의 경우 영림작업이 분산화되어있고 영세하다는 특징이 있으며, 지속적인 사업량 확보도 어려운 실정이다. 그리고 숲 가꾸기사업 이라든가 간벌작업에서 발생하는 소경재를 이용한 산업이 거의 없어 소경재 시장이 개발되어 있지 않으며, 원료의 지속적 공급체계 또한 구축되어 있지 않다. 이러한 이유로 국내의 산지폐잔재 수집시스템은 매우 낙후된 상태이며, 기계화 작업보다는 주로 인력에 의존하고 있다.

앞에서도 언급했지만, 국내 산지폐잔재의 재활용률은 51%에 그치고 있다. 재활용률이 절반에 가까운 50%대에 머무는 가장 근본적인 원인은 산지폐잔재시장이 형성되어 있지 않다. 즉 산지폐잔재를 수집·가공하는 비용이 폐잔재 자체가격보다 높아 경제적 효율성이 떨어지기 때문이다. 그리고 사유림 중심의 산림구조, 산림작업의 분산화 등의 이유로 산지폐잔재의 재활용률이 50%대에 그치고 있다. 현재 우리나라의 산지폐잔재 시장은 수집비용의 과다문제로 인해 시장가격보다 생산가격이 높은 기형적인 시장구조를 보이고 있다(그림 1 참조). 즉, d2의 왼쪽 부분으로 폐잔재를 수집·생산할 때 1인당 하루 평균 노임이 5만원정도인데 반해, 폐잔재의 시장가가 m³당 25,000~30,000원에 불과하므로 사실상 산림작업 현장에서 폐잔재는 그대로 폐기처분되고 있는 실정이다.

우리나라의 산림구조를 보면 사유림(70%), 국유림(22%), 그리고 공유림(8%)의 순으로 사유림 중심의 산림구조를 띄고 있다. 그러나 국고보조의 경우 현재 숲 가꾸기 공공근로사업에 따라 국유림에 한해 지원되고, 민유림(사유림+공유림)의 경우 현실적인 지원이 미비한 상태이다. 따라서 현재 수집되고 있는 폐잔재는 숲 가꾸기 공공근로사업에 국한되어 이루어지고 있으며, 최근 숲 가꾸기 공공근로사업이 민유림을 중심으로 용도개발이 되지 않아 수집량이 매년 줄어들고 있는 추세이다.

그나마 국유림에 한해 지원되는 국고보조도 숲 가꾸기 사업 후 재해가 우려되는

지역 즉 임도, 마을 등을 중심으로 30m이내 지역에 한정되어 산물을 수집·활용할 수 있도록 ha당 인공림은 710,571원, 천연림은 556,030원을 국고 50%, 지방비 40%, 자부담 10%로 보조하고 있다. 결국 산지폐잔재의 수집은 숲 가꾸기 사업 후 재해우려지역을 중심으로 30m이내에만 가능하여 산지폐잔재의 수집이 어려운 실정이다. 반면 일본의 경우 임도로부터 200m이상 떨어진 임지에서 발생한 산물을 반출할 수 있도록 보조금을 지원함으로써 반출율을 높여 산지정화, 산사태 방지, 산림작업의 효율성을 높이고 있다.



(주: d2는 흉고직경 17-18cm, 말구직경 15-16cm를 말한다)

그림 1.흉고직경에 따른 생산비와 시장가격.

산지폐잔재는 충분히 경제적 자원으로 활용될 수 있음에도 불구하고 앞서 말한 문제 등으로 인해 재활용률이 50%에 그치고 있다. 산지폐잔재의 재활용률을 높이는 것은 산지에 방치되어 있는 산지폐잔재를 효과적으로 수집하는 것과 같은 맥락을 가지고 있다. 산지폐잔재의 수집을 크게 늘리기 위해서는 산지폐잔재 시장의 활성화와 더불어 산지폐잔재 수집에 대한 재정적 지원 등을 확대해야 한다.

4. 산지폐잔재의 경제적 가치

현재 미활용 되고 있는 산지 폐잔재를 단순히 에너지 자원으로 사용하였을 경우 국내 석탄 소비로 인해 얻는 에너지 보다 높은 에너지를 얻을 수 있다는 연구결과가

있다. 이에 따르면, 국내 에너지 소비량 중 22.3%를 차지하고 있는 석탄의 소비량을 에너지로 환산했을 경우, 그 발열량은 무연탄이 4,500 kcal/kg이고 유연탄의 경우 6,600 kcal/kg일때 각각 39,903,510.63 kWh와 515,223,888.7 kWh이다. 이러한 에너지 수치는 국내 임지 폐목재 방치량 540,000m³을 에너지로 전환하였을 경우(침엽수와 활엽수의 구성비는 7:3으로 계산하였고, 목재의 에너지량은 침엽수의 경우 1.8 MWh, 활엽수의 경우 2.4 MWh로 산정) 10억 6천 9백만 kWh의 에너지 량을 얻을 수 있다.³⁾ 이는 산지폐잔재를 재활용하는 것만으로도 석탄 소비로 인해 얻는 에너지 보다 높은 경제적 효과를 보인다. 더구나 산지폐잔재의 재활용을 통한 사회공익적 비용을 감안한다면 산지폐잔재의 경제적 가치는 더욱 높다고 하겠다.

5. 산지폐잔재를 활용한 팽연 완충 포장재 개발·활용의 경제적 효과

현재 우리나라에서 생산되는 포장재의 경우 대부분 스티로폼을 원료로 하여 생산하고 있다. 스티로폼을 이용한 포장재의 경우 1-2회 사용 후 버려지는 소모품의 성격을 지니지만, 산지폐잔재를 활용하여 팽연 완충 포장재를 만들 경우 영구적으로 재생이 가능하다고 한다. 이런 특성으로 인하여 **단기적으로는 폐잔재를 활용하여 포장재를 만드는 것이 스티로폼을 이용하여 포장재를 만드는 것보다 높은 비용이 들 수 있지만, 하지만 장기적으로는 폐잔재를 이용하여 포장재를 만드는 것이 더욱 경제적 효율성이 높다고 하겠다.** 또한 **자원의 재활용 측면과 환경적 측면에서도 산지폐잔재를 활용하여 포장재를 만드는 것이 더욱 바람직하다.** 산지폐잔재를 활용하여 팽연 완충 포장재를 만들 경우의 직·간접적 경제효과는 아래와 같다.

(1) 대체재(스티로폼) 사용 감소로 인한 직·간접 경제효과

폐잔재를 이용하여 팽연 완충 포장재를 만들 경우 앞에서 말한 폐잔재활용의 경제적 효과 이외에도 대체재인 스티로폼의 사용 감소로 인하여 직·간접적 경제효과를 얻을 수 있다. 특히 대체재인 스티로폼의 사용 감소로 인한 간접적 경제효과가 크다고 할 수 있다.

먼저 직접적 경제효과를 살펴보면 국내 스티로폼 포장재 시장 규모는 2002년 225억 원 수준으로 폐잔재를 활용하여 포장재를 만들 경우 직접적으로 225억 원을 절약할 수 있다.⁴⁾

간접적 경제효과를 살펴보면 스티로폼은 폐잔재보다 재활용이 어려운 제품으로 이를 처리하는데 엄청난 비용이 소요되고 있다. 2002년 기준으로 국내에서 발생한 스티로폼 포장재 쓰레기(페스티로폼)은 5만 9,698톤 수준이었으며, 그 중 55.7%에 해당하는 3만 3,222톤이 재활용되고 나머지 44.3%에 해당하는 2만 6,476톤이 폐기처분됨으로써 막대한 쓰레기 처리비용화 함께 환경에 부정적 영향을 끼치고 있다. 국내에

3) 농림부, 1999, 폐목재의 발생실태 및 재활용 촉진방안.

4) 국내 스티로폼 포장재 시장 규모(255억원)=연간소비량(85,000톤)×가격(300천원/톤)

서 발생한 페스티로폼 포장재 쓰레기 처리비용을 국가환경기술정보센터 게시자료를 참조해서 추정해 보면 매립비용의 경우 약 7,149억 원이⁵⁾ 소요되고 소각비용의 경우 약 1조 4,827억 원이 소요되는 것으로 나타났다.⁶⁾ 따라서 **폐잔재를 활용한 팽연 완충 포장재를 사용할 경우 스티로폼 포장재를 사용할 때보다 수천억 원의 경제적 비용을 절약할 수 있고 환경보호 측면에서도 효과가 크다고 하겠다.**

(2) 교토의정서 협약과 향후 온실가스 감축의무 이행국으로의 전환효과

2005년 2월부터 지구 온난화를 막기 위한 교토의정서가 발효됨으로써 우리나라는 2013년부터 온실가스⁷⁾ 감축을 이행할 수밖에 없는 상황에 처해 있다. 2002년 11월 동 의정서를 비준한 우리나라는 현재 CO₂ 배출량 세계 9위(단위 GNP당 배출량 세계 2위)수준으로 온실가스 감축을 이행할 경우 산업 전반에 걸쳐 엄청난 영향을 미칠 것으로 전망된다. 에너지경제연구원 추정에 의하면 2차 이행기간(2013-2018)중 우리나라 기업들은 최선의 시나리오를 상정하더라도 CO₂ 배출권 구매 비용이 약 2,900억 원에 달할 것으로 예상하고 있다.⁸⁾ 현재 포장재의 주재료인 스티로폼은 대표적인 CO₂ 발생의 주범으로써 교토 의정서가 발휘되는 2013년부터는 사용감축이 불가피하게 보인다. 따라서 **CO₂ 감축 의무가 없는 산지 폐잔재를 팽연화 포장재로 활용할 경우 막대한 CO₂ 배출권 구매 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 환경편익 측면에서 일석이조의 경제적 효과를 발생시킬 수 있다.**

대표적 생물재활용(bio-mass) 가능 물체인 산지폐잔재의 완충 포장재로의 활용은 세계 9위의 이산화탄소 배출국이나 세계 11위의 경제규모 및 OECD 가입국인 우리나라의 입장에서 향후 온실가스 감축 이행국으로 전환 시 산업경쟁력 약화 방지와 지속적인 경제발전을 위한 하나의 적극적 대응 노력의 일환으로써 매우 중요한 의미를 지니고 있다고 판단된다.

6. 연구개발의 범위

산지 폐잔재의 펄프화를 통하여 포장 완충소재를 제조하는 기술은 두 가지로 접근하고자 한다. 먼저 수집된 산지 폐잔재를 펄프화하기 위하여 기계펄프 방식을 적용하였고, 이들 펄프에 결합보조제인 전분을 첨가한 후 단축식 스크류(single screw extruder)의 성형 다이(forming die)를 통하여 압출 및 팽연시켜 충격흡수능력을 갖는 원형 팽연완충소재(circular expanded cushioning materials)를 제조하는 기술을 개발하였다. 또한 산지 폐잔재로 만들어진 펄프에 전분과 같은 결합보조제를 첨가한

5) 매립비용(7,149억 원)=폐기량(26,476톤)×가격(2만7천 원/톤)

6) 소각비용(1조 4,827억 원)=폐기량(26,476톤)×가격(5만6천 원/톤)

7) 대상가스는 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆의 6종류

8) 우리나라 온실가스 총배출 예상량의 3.3%를 자체 감축, 4.3%를 교토 메커니즘을 통해 감축할 경우

후 감압성형방식(suction-forming method)을 적용하여 평판형 완충소재(plate-like cushioning materials)를 제조하는 기술을 개발하였다. 제조된 완충소재들은 EPS와 펄프 몰드의 물성과 비교하여 포장용 완충소재로서 사용할 수 있는 물성을 지니고 있는지를 비교분석하였다. 또한 폐잔재로부터 만들어진 완충소재의 경제성을 분석하여 EPS와 펄프 몰드에 비하여 가격 경쟁력이 있는지를 환경편익적 관점에서 조사하여 폐잔재로부터 만들어진 포장용 완충소재가 경제적으로 유용한 포장 소재임을 보여주고자 하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내외 관련기술개발현황

1. 포장 완충재 관련 국내 연구

물류 유통 과정에서 제품의 최초 가치를 보존하기 위하여 반드시 취하는 기술 및 행위인 포장은 포장 소재 및 포장 기술의 첨단화·과학화와 함께 지속적으로 발전되고 있다. 특히 최근에는 환경문제에 관심이 고조되면서 친환경 포장 소재에 대한 관심이 매우 증가하고 있어 이를 보완하기 위한 생분해성 포장재 개발에 관한 연구가 매우 활발히 진행되었다. 그러나 포장재의 내부에 들어가는 포장 완충재와 관련된 연구는 거의 이루어지지 않아 이에 대한 대책에 시급한 실정이다.

난분해성 원료로 만들어진 포장 소재의 사용에 대한 규제가 점차 강화되면서 미생물 분해가 가능한 플라스틱이 포장재와 같이 생분해성 플라스틱 소재의 개발이 활발히 진행되고 있다(표 2 참조). 전기전자 제품의 포장재는 안전성, 완충성은 기본이고 최근에는 생분해가 되는 환경 배려형 포장재를 개발하는 추세다. 국내 포장재 업체에서 개발한 생분해성 포장재는 땅 속에서 미생물의 작용에 의해 생분해되는 신소재로서 단열성과 보온성이 좋으며 친환경 제품의 문제점인 약한 강도를 강화시켰다. 또 소각 처리를 해도 유해가스나 부산물이 발생하지 않는다는 특징이 있다.

생분해성 플라스틱이란 성형품, 포장재, 위생용품, 농업용품 등으로 사용한 플라스틱을 폐기 시에 소각처리하지 않고 단순히 매립함으로써 미생물의 작용에 의해 수개월, 또는 1-2년(일반 플라스틱의 경우 50년-수백 년)만에 물, 이산화탄소, 메탄가스 등으로 완전 분해되는 플라스틱을 말한다. 표 2에 나타나 있는 바와 같이 현재 이미 개발된 생분해성 플라스틱 수지는 무독성 천연물질인 전분 등을 범용 플라스틱 또는 개발된 생분해성 플라스틱에 혼합하여 제조하는 전분계 생분해성 플라스틱과 젯산 또는 락타이드로부터 화학적 축매 또는 효소에 의한 고리열림반응(ring opening reaction)을 통하여 합성한 폴리락타이드, 입실론-카프로락톤 및 기타 디올, 디엑시드 계열의 지방족 폴리에스테르계 생분해성으로 나뉜다. 생분해성 수지는 품질은 우수하지만 가격이 높은 것과 가격은 저렴하지만 품질이 우수하지 못한 것의 두 가지 중 하나에 속하며 폴리에스테르계 생분해성 수지는 전자에, 전분계 생분해성 수지는 후자에 속한다(표 3 참조).

표 2. 국내 생분해성 플라스틱 포장재 제조 현황

업 체 명	상 품 명	소 재	용 도
대 상	Bionyl Regreen-Form	전분+폴리카프로락톤 (PCL), 전분	필름, Sheet, 완충재, 용기
SK(주)	Greenpol	전분+폴리카프로락톤 (PCL)	필름
호남석유화학	BD7030	전분+지방족 폴리에 스테르(AP)	필름
한 화	ECO-PLAST	전분+폴리카프로락톤 (PCL)	필름
새 한	ESLON GREEN	전분+지방족 폴리에 스테르, AP	필름, 몰드, Sheet, 용기
SK케미칼	SKYGREEN	전분+지방족 폴리에 스테르, AP	필름, 몰드, Sheet
이래화학	ENPOL	지방족 폴리에스테르, Copolyester	필름, 몰드, 용기, 의 료용
기타 신한케미칼, 진웅화학			

이외에도 전분이나 한천을 압출·팽연시켜 포장 완충재를 개발하는 연구가 있었지만 실용화는 되지 못하고 연구에만 그친 경우가 있다.

표 3. 생분해성 수지의 종류 및 특징

구 분	전 분 계	지방족 폴리에스테르계
제조방법	옥수수, 감자 등에 첨가제를 넣고 압출기로 가공	화학적합성 또는 미생물 발효
특 성	가격이 저렴하고 분해성이 우수하나 인장강도 투명강도가 취약	인장강도, 내습성, 가공성이 우수하 나 가격이 고가

2. 포장 완충재 관련 국외 연구

프랑스 몽펠리에 연구팀에 의해 수행된 연구에 따르면, 밀 글루텐을 혼합한 종이로 만든 생분해성 포장재가 버섯의 유통기한을 연장하는데 효과가 있다고 밝혔다. 프랑스 국립농학연구소에 따르면, 경작된 버섯을 생분해 포장재를 이용하여 20℃에서 저장하였을 때 기존의 합성 필름이 1일인데 비해, 4일간의 유통기한을 갖는 것으로 나타났다. 이 포장재는 생분해이며, 가스선택성, 투과성을 갖는다. 기질로서 종이를 이용하는 것은 밀글루텐의 물리적 특성을 상당히 향상시키면서 그것의 생분해성을 유지할 수 있게 한다. 이 혼합물질로 버섯을 포장하는 것은 변색을 예방하고 산소와 이산화탄소를 낮게 유지시키는 공기조절포장(MA 포장)과 일치하는 것이다. 또한 듀폰은 기존의 폴리락틱산(polylactic acid, PLA) 포장재의 단점을 보완한 새로운 생분해성 포장재를 개발하였다.

일본의 JSP사는 완전 생분해성 플라스틱 발포 완충재 「그린블록」을 개발하여 시장을 넓혀 가고 있다. 이 제품은 지방족계 생분해성 플라스틱을 원료로 세계에서 최초로 60-100배의 고배율 발포를 실현한 완충재로서 완전 생분해성이라는 점과 물건 포장 완충재로서의 고기능성이 평가되어, 폭넓은 분야의 소비자들로부터 주목을 받고 있다. 그러나 범용 수지에 비해서 값이 비싼 원료를 사용하는 생분해성 플라스틱의 비용 측면으로 말미암아 종래의 EPS나 EPP 등의 완충재 보다 좀 높은 제품 가격으로 인하여 양산 제품용 완충재로 채용되기에는 어려움이 따른다.

표 4와 표 5는 미국과 유럽 국가에서 개발되어 시판되고 있는 생분해성 플라스틱 포장재 및 포장완충재의 현황을 보여주고 있다. 미국이나 유럽에 소재한 대부분의 회사들은 주로 생분해성 포장재 개발에 초점을 맞추고 있고 포장 완충재와 관련한 제품 개발은 불과 몇 개의 회사를 제외하고는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 스티로폼과 같은 난분해성 완충소재를 대체하기 위한 생분해성 완충소재와 개발과 관련된 연구가 매우 필요한 것으로 판단된다.

표 4. 생분해성 플라스틱 포장재 및 완충재 개발업체(미국)⁹⁾

분 야	회사명
Polylactic acid	Cargil, Chrnpol, ADM
Polycaprolactone	Union Carbide, Novon International, Bio Plastics
Diol/Diacid계 PET	Eastman Chemical
PHA	Monsanto
생분해성 수용성 고분자	Rhom & Hass
전분계 고분자	Em Pac, Novon International, Evercon Inc., Natureworks

표 5. 생분해성 플라스틱 포장재 및 완충재 개발업체(유럽)¹⁰⁾

회사	국가	상품명	소재	용도
Novamount	이태리	Mater-bi	전분+PCL외	필름, 몰드, 완충재, 종이코팅재
Biotech	독일	Bio-plast Bio-pur	전분+PCL	필름, 몰드, 완충재, 전분용기
Solvay	벨기에	CAPA	PCL	필름, 몰드
Zeneca	프랑스	Biopol	PHB	필름, 병
Bayer	스위스	BAK1095	Polyester amide	필름, 병

9) Biocycle, "Industry Overview, Moving Towards Consensus on Biodegradable Plastics", March, 1998.

10) Biocycle, "Industry Overview, Moving Towards Consensus on Biodegradable Plastics", March, 1998.

제 2 절 연구결과의 국내외적 위치

공장에서 제조된 모든 제품은 일차 생산자에서 중간 판매상을 거쳐 최종 소비자에게 전달될 때까지 제품의 최초 상태 및 가치를 보존하기 위하여 포장이라는 행위 및 기술을 적용한다. 일반적으로 그러한 행위 및 기술을 “포장”으로 정의하고, 물류 유통 과정을 거치는 모든 제품은 포장이 적용된다. 이 때 물류 유통 과정 중에서 발생할 수 있는 외부의 물리적 충격(physical impact)으로부터 물품의 최초 가치 및 상태를 보존하기 위하여 그 충격을 흡수할 수 있는 완충소재(cushioning materials)를 이용한다. 현재 가장 널리 사용되는 완충소재로는 대용량 포장에 스티로폼(expanded polystyrene, EPS), 저용량 포장에 polyethylene, polypropylene 등과 같은 플라스틱류가 많이 사용되고 있다. 그러나 난분해성 포장소재에 대한 규제가 점차 심해지면서 이를 대체하기 위한 소재 개발과 관련된 연구가 수행되었지만 상용화시킬 만큼 좋은 완충 성능을 갖는 소재가 아직까지 개발되지 않고 있다. 그 중에서 가장 널리 사용되는 완충소재는 고지 섬유를 이용하여 제조한 펄프 몰드(pulp mold)이다. 펄프 몰드는 스티로폼과 달리 구조적으로 대용량 물품을 포장하는데 완충의 한계가 있기 때문에 소포장 위주의 제품 포장에 주로 사용되고 있다. 따라서 펄프 몰드만으로는 스티로폼이나 기타 난분해성 소재로 만들어진 완충소재를 대체하기는 어려울 것으로 예상된다.

본 연구에서는 완충소재로서의 기능을 끝낸 후 폐기되었을 때 쉽게 분해될 수 있는 원료를 이용하는 것이 바람직하므로 국내 임야에서 쉽게 얻을 수 있는 폐잔재를 이용하였다. 폐잔재를 펄프화한 후 완충성능을 부여하기 위하여 팽연압출(expansion) 및 감압성형(suction forming) 방식으로 원형(circular) 및 평판(plate) 완충소재(cushioning materials, shock-absorbing materials)를 제조하였다. 팽연압출 및 감압성형 방식으로 성형된 완충소재는 그 구조 내부에 무수히 많은 공극들을 만들기 때문에 이 공극들로 인하여 완충소재는 외부 충격을 흡수할 수 있는 완충성능(cushioning capacity)을 발현하게 되는 것이다. 이러한 완충소재는 천연 셀룰로오스를 주성분으로 한 펄프 섬유로부터 만들어지기 때문에 자연계에 버려질 지라도 미생물에 의한 **완전 분해까지 2-5개월 정도 밖에 소요되지 않는 환경친화형 완충소재**라 할 수 있다. 이에 반해 스티로폼은 분해에만 약 500년 정도가 걸리고 회수 후 소각되더라도 다이옥신과 같은 환경호르몬이 발생되기 때문에 전 세계적으로 이와 같은 난분해성 포장소재에 대한 사용규제가 더욱 강화될 전망이다. 폐잔재를 기계펄프

화한 후 팽연압출 및 감압성형방식을 통해 제조한 펄프 완충소재는 난분해성 소재로 만들어진 스티로폼을 대체할 수 있는 미래형 친환경 완충소재가 될 수 있을 것이다.

현재 전 세계적으로 펄프 섬유를 원료로 한 완충소재는 펄프 물드를 제외하고는 거의 생산되지 않고 있고, 대부분의 완충소재 관련 제품은 경량 물품을 포장하는데 사용하는 생분해성 플라스틱 완충소재이다. 따라서 본 연구에서 개발된 펄프 완충소재는 국내에서만 아니라 전 세계적으로도 널리 이용될 수 있는 친환경 포장완충소재가 될 수 있을 것이다. 특히 1999년 OECD 국가를 중심으로 도입된 생산자 책임 재활용 제도(Extended Producer Responsibility, EPR)를 시행하여 재활용이 가능한 폐기물의 일정량 이상을 재활용하도록 생산자에게 의무를 부여하는 제도가 시행되어 난분해성 완충소재에 대한 사용이 더욱 어려워질 전망이다. 또한 플라스틱 포장재나 스티로폼과 같은 난분해성 소재에 대한 폐기물 부담금제가 시행되어 사용량이 급격히 줄어들 전망이다.¹¹⁾¹²⁾ 결국 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 환경에 대한 규제가 심해지면서 난분해성 포장 완충재에 대한 사용 금지 조치가 이루어지면서 대체 소재에 대한 관심이 더욱 증폭될 것이 자명하다. 결국 난분해성 포장 완충소재에 대한 사용조치에 따른 대체 소재의 개발이 절실히 필요하게 되며 펄프 완충소재가 이를 대신할 수 있는 친환경 포장 완충소재 중의 하나가 될 수 있을 것으로 사료된다.

11) Hanisch, C. (2000). Is Extended Producer Responsibility Effective?. *Environ Sci Technol*, 34 (7): pp.170 A-175 A.

12) Castell, A., R. Clift, and C. Francae. (2004). Extended Producer Responsibility Policy in the European Union: A Horse or a Camel? *Jr. of Industrial Ecology*, 8 (1-2): pp.4-7.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 원료 섬유의 물리·화학적 성질 분석

1. 원료 섬유의 제조 및 물성 분석

1.1 폐잔재를 이용한 열기계펄프 및 목분 제조

산지폐잔재의 펄프화는 경상대학교 덕산(지리산) 학술림에서 직경이 15 cm 미만의 침엽수류(*Pinus rigida*, *Pinus densiflora*), 참나무류(*Fagus multinervis*, *Quercus acutissima*, *Quercus variabilis*) 등을 약 2.5×2.5×10 mm 크기로 칩핑한 후 다이제스터(대일기공)에서 120–140°C, 3–4 kg/cm²로 2분간 예열한 후 싱글디스크 리파이너(대일기공)에서 2분간 해섬하였다. 해섬된 섬유의 여수도는 약 650–700 mL CSF였다. 또한 목분 제조기(세립기계)를 이용하여 수집된 폐잔재 혹은 소경재를 분쇄하여 목분을 제조하였다. 특히 목분을 이용한 팽연 처리 과정에서 팽연 효과를 높이기 위하여 목분에 Na₂SO₃ 8%(목분 전건중량 기준)를 처리한 후 다이제스터에서 30분간 증해하였다.

해섬 혹은 분쇄된 섬유의 크기와 형상을 측정 및 관찰하기 위하여 핀란드 Metso사의 Kajaani FiberLab Analyzer, 독일 Carl Zeiss Vision사의 AxioVision (ver.4), Olympus BX51 광학현미경, JEOL JSM-6400 전자현미경(일본)을 이용하였다.

1.2. 원료 섬유의 결정화도 측정

열처리 전후 열기계펄프 섬유의 결정화도 변화를 알아보기 위하여 목재 섬유의 결정화도를 분석하였다. 결정화도 분석에는 X-ray diffractometer (Bruker, GADDS)를 사용하였고 결정화도 계산을 위해서 GADDS의 EVA 프로그램을 이용하였다. 결정 및 비결정 영역을 결정하기 위한 기준점은 2θ=18°이었고, 상대 결정화도를 결정하는 방법은 그림 2에서 보는 바와 같이 XRD를 통하여 얻어진 셀룰로오스의 결정화도 그래프에서 결정 영역에 해당하는 곡선 밑의 면적 C1과 C2 면적의 합을 비결정 영역에 해당하는 A의 면적으로 나누어 백분율(%)로 나타내었다.¹³⁾

$$Relative\ crystallinity(\%) = \frac{C1 + C2}{A} \times 100 \quad (\text{식 } 1)$$

여기서 C1과 C2는 셀룰로오스의 결정화도 곡선에서 셀룰로오스만의 결정화도 피크

13) Sarko, A., Recent X-ray Crystallographic Studies of Celluloses, Cellulose, Structure, Modification and Hydrolysis edited by Young, R. A. & Rowel, R. M., John Wiley & Sons, 1986.

(peak) 두 개가 형성되기 시작하는 각 시점(starting point) 세 점을 연결하여 이들 연결선들과 결정화도 곡선 사이에 형성된 영역들의 면적을 구하면 이들 면적이 셀룰로오스 섬유가 갖는 결정 영역의 면적이다. 반면에 A는 연결선의 시점과 종점을 연결하여 만들어진 삼각형이 갖는 면적을 의미하고 이것은 셀룰로오스의 비결정 영역으로 간주된다.

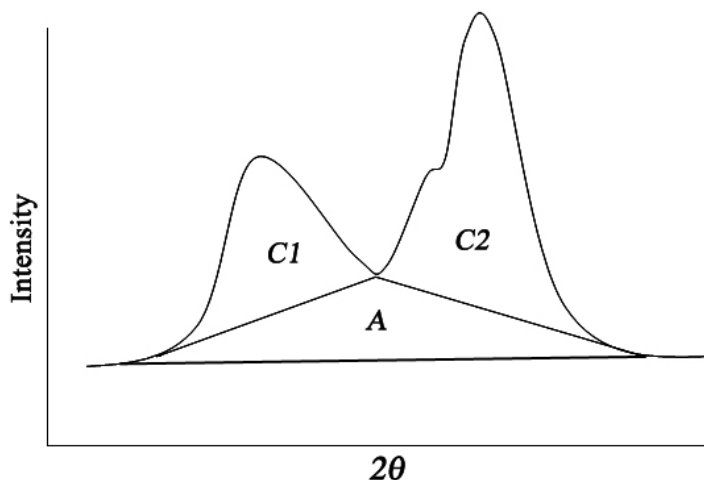


그림 2. 셀룰로오스 섬유의 결정화도 측정 방법: $C1+C2$ =crystalline area, A =amorphous area.

1.3 원료 섬유의 열분해 성질

목재 섬유의 열처리에 대한 물리적 성질 변화를 측정하기 위하여 Thermal Analyser (Labsys/DSC141, France)를 이용하였다. 목재 섬유가 고온에서 열처리 과정을 반복적으로 거치면서 섬유 구조가 변화되어 섬유의 열분해 특성이 달라질 것으로 예상되는데, 이를 열분석기를 통하여 정량적으로 분석하였다.

1.4 원료 섬유의 보수도 측정

열기계펠프 섬유의 수분보유능력을 알아보기 위하여 보수도(water retention value, WRV)를 측정하였다. WRV는 펄프 섬유 약 4.0 g를 해리한 후 과량의 물을 제거하여 1 g씩 나누어 원심분리기에 넣고 3,000 rpm에서 20분간 원심분리 하였다. 각각의 원료 섬유로부터 분리된 수분을 제거한 후 다시 3,000 rpm에서 10분간 더 원심분리하고 각각의 무게(W_1)를 측정한 후 $105\pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도에서 완전건조시킨 후 무

계(W_2)를 측정하였다. 펄프 섬유율의 WRV는 건조 전후의 무게 변화를 백분율($\%=(W_1-W_2)\times 100/W_2$)로 계산하여 WRV를 계산하였다.

1.5 원료 섬유의 원소 분석

팽연 및 감압성형에 이용할 원료(열기계펄프 섬유와 목분)에 토양을 오염시킬 수 있는 유해 성분이 존재하는 지를 알아보기 위하여 ICP spectrometer (Atomscan25, TJA)를 이용하여 원소 성분을 분석하였다.¹⁴⁾ 전처리 과정을 거치기 위하여 원료 시료 약 0.2 g을 습식분해액($HNO_3:H_2SO_4:HClO_4 = 10:1:4$) 25 mL로 분해시킨 후 No.2 여과지를 이용하여 잔사를 분리하고 여액은 최종적으로 100mL가 되게 희석하여 ICP spectrometer를 이용하여 함유된 원소의 함량을 정량하였다. 측정된 원소의 함량(mg/L)은 전건중량의 시료 무게를 감안하여 아래의 식을 통해 원소의 농도(mg/kg)를 계산하였다.

$$\text{시료의 성분농도 (mg/kg)} = \frac{C \times V}{Ms} \quad (\text{식 2})$$

C = 측정된 원소의 농도(mg/L)

V = 분해된 용액의 최종 부피(ml)

Ms = 시료의 전건 중량(g)

2. 결과 및 고찰

2.1 원료 섬유의 조직 관찰

그림 3은 열기계펄프화법으로 제조된 국내산 소나무 섬유들의 현미경 영상을 보여주고, 그림 4는 목분 형태로 제조된 국내산 참나무 조직의 현미경 영상을 보여준다.

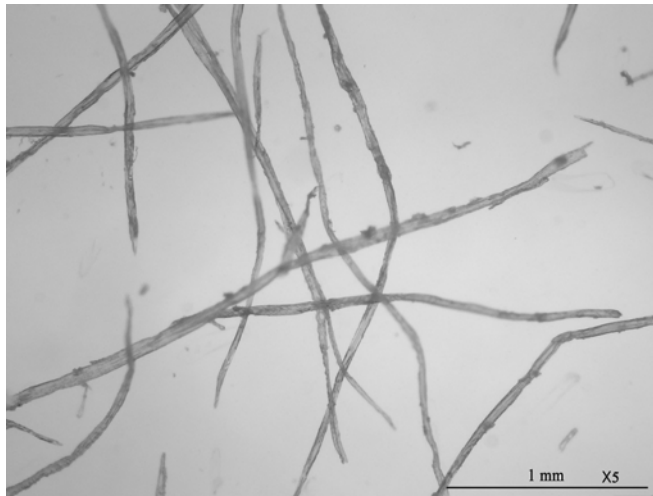
그림 3에서 보는 바와 같이 섬유들이 리파이닝 처리와 같은 기계적 처리를 받기는 했지만 목재 칩들에 대한 예열 처리 후에 리파이너로 해섬하였기 때문에 섬유 손상이 거의 발견되지 않았다. 섬유장 자동측정기로 측정한 열기계펄프 섬유의 길이가중치 평균 섬유장(length-weighted mean fiber length)은 2.01 mm였다. 완충소재 제조용 원료로 사용될 원료 섬유들은 비교적 장섬유들로 구성되어 있고, 또한 그 섬유들

14) Soil and plant analysis council, Inc., Soil analysis handbook of reference methods, CRC Press, pp. 219-214, 1999.

이 손상을 거의 입지 않은 상태로 이용된다. 더군다나 리그닌이 그대로 잔류하고 있는 상태이기 때문에 섬유들 자체만으로 큰 결합력을 기대하기가 어렵다. 그러나 이러한 섬유들이 갖는 약한 결합력은 완충소재의 성형시 섬유 조직의 치밀성을 감소시켜 완충소재의 조직 내부에 많은 공극들을 남기게 된다. 이러한 공극들로 인하여 완충소재는 외부에서 가해진 충격을 흡수할 수 있는 능력을 갖게 되는 것이다. 또 다른 한편으로는 리그닌을 다량 함유한 열기계필프 섬유들이 갖는 결합력은 완충소재의 형상을 유지하기에는 너무 약하기 때문에 이를 보완하기 위해 결합보조제를 첨가할 필요성이 있음을 보여주는 것이다.

그림 4의 (가)는 목분 제조기에서 얻은 목분 조직을 확대한 영상이고, (나)는 팽연 처리에 앞서 증해처리된 목분 조직을 보여주는 영상이다. 목분 조직 자체는 리그닌 성분이 그대로 보존되어 있는 상태이기 때문에 섬유들이 상당히 많이 결속된 상태로 관찰되었다. 따라서 이 상태로 팽연·압출 및 감압 성형 처리를 한다면 팽연 및 완충 효과가 매우 떨어질 것으로 예측되기 때문에 팽연 및 감압 감압 처리에 앞서서 참나무류 목분을 Na_2SO_3 와 같은 증해액을 첨가하여 다이제스터에서 1시간 정도 증해(cooking)하여 한 후 팽연 및 감압 성형에 이용하였고, 증해된 목분 조직을 촬영한 사진이 그림 4의 (나)이다.

증해 후의 목분 조직들은 증해 전의 것에 비하여 크기가 매우 작아 졌을 뿐만 아니라 결속된 섬유들이 양도 매우 적어진 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 증해 약액이 섬유 내에 포함되어 있던 리그닌의 일부를 제거하여 섬유의 유연화를 촉진시킨 것으로 보인다. 그러나 목분 조직 자체가 목분 제조 단계에서 매우 강한 기계적 처리를 받은 상태이기 때문에 섬유장이 매우 짧아지고 섬유 손상이 많이 가해진 상태로 존재함을 알 수 있었다. 화상분석법으로 측정된 목분의 평균 크기는 약 1.01 mm였다.

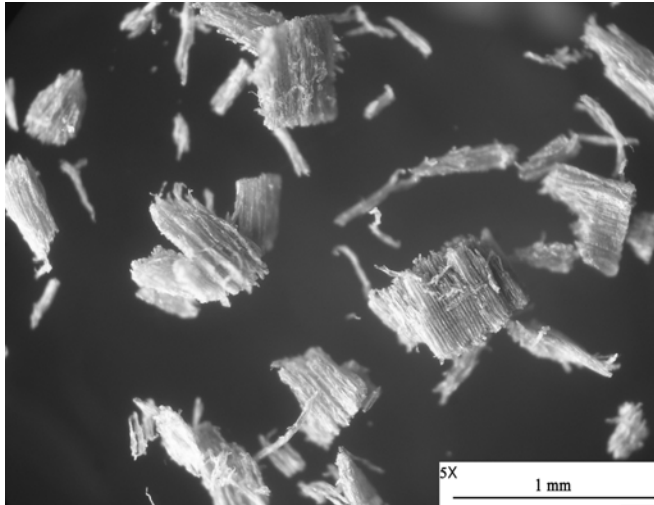


(가) ×5

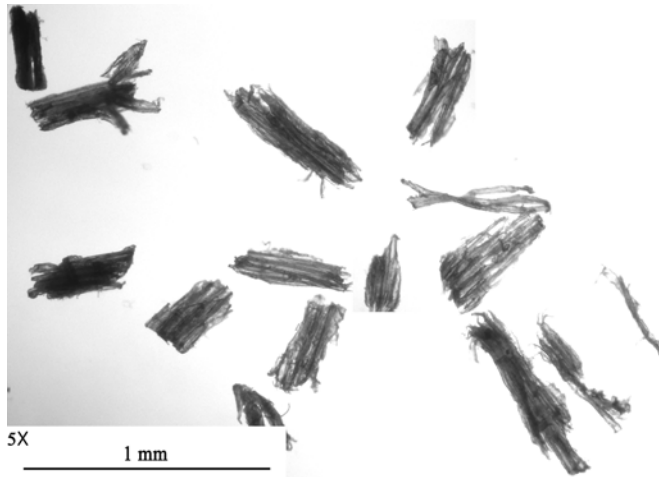


(나) ×40

그림 3. 소나무류 열기계펄프 섬유현미경 사진(대물렌즈 배율).



(가) 증해 전의 목분



(나) 증해처리된 목분

그림 4. 참나무류 폐잔재의 목분 조직과 증해 처리된 목분 조직(×5).

2.2 원료 섬유의 열분해 특성 분석

팽연 및 감압 성형에 사용될 열기계필프 섬유와 목분의 열분해 특성을 알아본 결과가 그림 5에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 원료 개질 과정에서 상대적으로 섬유 손상이 적은 열기계필프 섬유가 목분에 비하여 열분해 속도가 더 느리게 나타났다. 이는 TMP 섬유의 결정화도가 목분 섬유의 결정화도에 비하여 더 큼을 의미하는 것이다. 물론 이러한 열분해 특성의 차이는 침엽수 섬유와 활엽수 섬유의 물리적 성질 차이에서도 비롯될 수 있지만, 원료 섬유들이 제조 과정 차이에서 비롯된 결정화도의 변화가 열분해 특성의 변화에 더 큰 영향을 미친 것으로 보인다. 이러한 열분해 특성의 차이는 팽연 및 감압 성형 과정에도 영향을 미쳐 상이한 완충 성능을 보일 것으로 추정되었다.

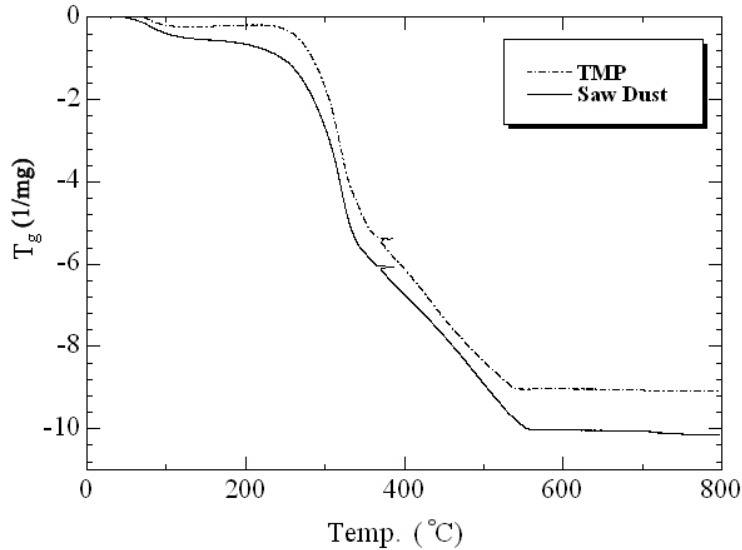


그림 5. TMP 섬유와 목분 조직의 열분해 특성.

2.3 원료의 결정화도 분석

그림 6은 TMP 섬유와 목분에 대한 XRD 곡선을 보여주고 있고, 이러한 XRD 곡선을 바탕으로 TMP 섬유와 목분에 대한 상대 결정화도를 계산하였다. TMP 섬유의 상대 결정화도는 0.73, 그리고 목분 섬유의 결정화도는 0.60으로 열분해 곡선에 예측한 바와 같이 섬유 손상을 적게 받은 TMP 섬유가 더 높은 결정화도를 나타내었다. 특히 TMP 섬유의 보수도(WRV)를 측정된 결과 0.84 g/g 정도였지만, 팽연 및

감압 성형시킨 후의 보수도는 0.68로 낮게 나타나 팽연 및 감압 성형 동안 가해진 열처리가 섬유와 강직화 혹은 각질화(hornification)에 기여하는 것으로 사료되었다.

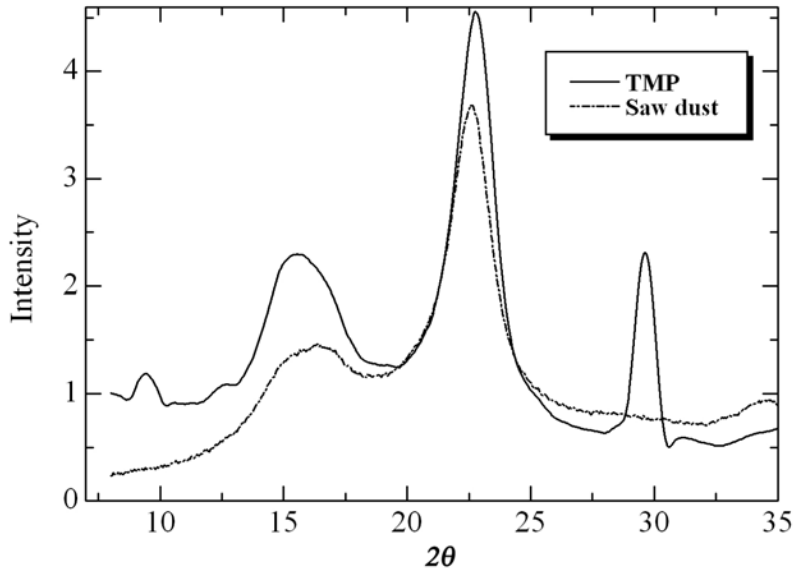


그림 6. TMP 섬유와 목분의 XRD 곡선.

2.4 원료 섬유의 성분 분석

팽연 및 감압 성형에 이용될 열기계펄프와 목분에 함유되어 있는 원소들의 함량을 표 6- 표 9에 나타내었다. 완충소재가 최종 사용자에게 의해 토양 중에 유기되었을 때 이들 완충소재에 의하여 토양오염이 가속화된다면 환경친화형 완충소재라고 하기 어려울 것이다. 따라서 완충소재에 사용될 원료에 들어 있는 중금속과 같은 유해 원소의 존재 유무 및 그 함량을 분석하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다. 표 6과 7에서 볼 수 있는 바와 같이 열기계펄프 섬유로 제조된 완충소재가 식물의 성장에 필요한 칼륨(K), 칼슘(Ca) 등과 같은 필수 원소들을 함유하고 있어 토양 중에 유기되더라도 오히려 도움이 되는 것으로 나타났다. 또한 표 7과 표 8에서 보는 바와 같이 열기계펄프 섬유와 목분 내에 들어 있는 중금속 함량의 경우에는 토양오염 우려 기준치 이하(카드뮴 1.5 ppm, 구리 50 ppm, 납 100 ppm, 비소 6 ppm)로 나타났기 때문에 토양 오염에 대한 우려도 전혀 없는 친환경 소재가 될 수 있음을 확인하였다.

표 6. 열기계펠프 섬유 내에 함유되어 있는 원소의 종류 및 함량

	K	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
	(mg/kg)									
	490	1068	192	2691	86.65	28.53	N.D.	182	149	64511

표 7. 목분 내에 함유되어 있는 원소의 종류 및 함량

		K	Ca	Mg	P	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
		(mg/kg)									
톱 밥	제재소	491	1156	166	1006	78.63	38.75	N.D.	109.75	11.31	4332
	리기다 소나무	186	1007	193	733	68.11	N.D.	N.D.	116.50	31.03	8784
	굴참 나무	912	4790	400	2843	291.57	7.50	N.D.	148.86	70.41	27231

표 8. 열기계펠프 섬유 내에 함유되어 있는 중금속 함량

시료	Ni	Co	Se	Cd	As	Hg	Pb	Cr
	(mg/kg)							
리기다 소나무	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
굴참나무	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
제재소	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

표 9. 목분 및 TMP에 함유되어 있는 중금속 함량

시료	Ni	Co	Se	Cd	As	Hg	Pb	Cr
	(mg/kg)							
리기다 소나무	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
굴참나무	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
제재소	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

제 2 절 폐잔재 및 소경재를 이용한 팽연완충소재 제작

1. 압출기 제작

열기계펠프 섬유 및 목분을 이용하여 팽연완충소재를 제조하기 위하여 그림 7과 같이 단축식 압출기(single screw extruder)를 설계하여 제작하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 단축식 압출기는 제어부(control box), 원료공급부(feeder), 가온 배럴(heating barrel), 다이(die), 그리고 절단부(cutter)로 구성되어 있다. 제어부는 압출기의 원료 배출 속도, 배럴의 온도 등을 제어하고, 원료 공급부는 원료 공급량 및 원료 공급 속도를 조절하고, 가온 배럴은 벽면에 가열 장치가 장착되어 있고 내부에는 단축식 스크루가 들어있다. 압출기의 다이는 팽연완충소재의 형상, 크기(지름) 등을 조절하고 절단부는 다이에서 배출되는 팽연된 완충소재를 균일한 크기로 재단하는 기능을 한다. 이러한 단축식 압출기를 사용하여 열기계펠프 섬유 및 목분의 압출 팽연 특성을 분석하였다.

단축식 압출기의 세부 제원은 표 10에 나타낸 것과 같다.

표 10. 단축식 압출기의 제원

항목	규격	비고
스크루 직경(mm)	40	
스크루 길이/스크루 직경(L/D)	5	
스크루 회전수(rpm)	150(최대)	조절 가능
압출량(kg/hr)	50	조절 가능
배럴 온도(℃)	0 - 150	조절 가능
원료 투입량(kg/hr)	100(최대)	조절 가능

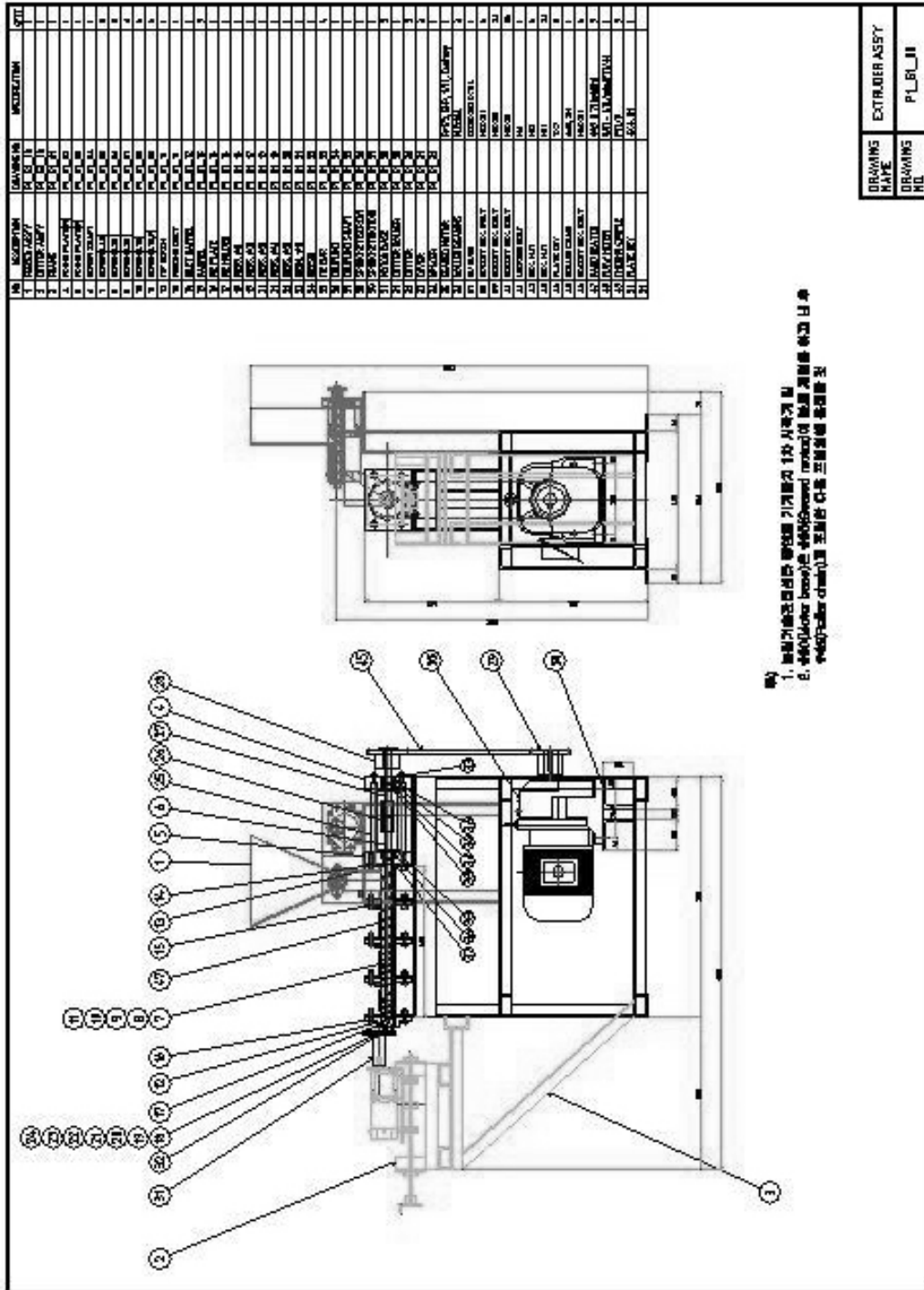


그림 7. 실험실용 압출기의 설계도면.

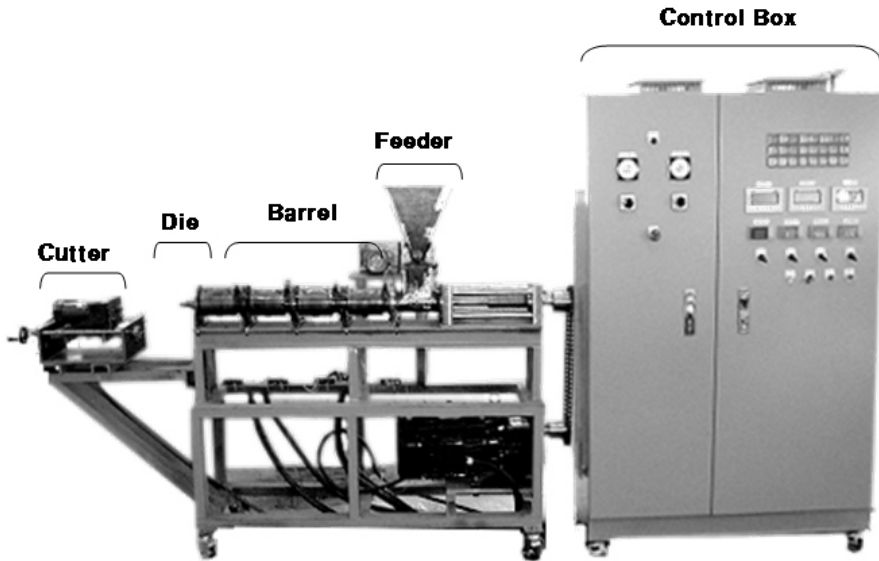


그림 8. 압출 및 팽연에 사용된 실험실용 단축식 압출기.

2. 압출 특성 분석

열기계펄프 섬유와 목분을 압출 팽연용 원료로 사용하였으며, 팽연보조제로서 밀 전분(wheat starch), 용해용 전분(soluble starch), 그리고 polyvinyl alcohol (PVA)을 팽연보조제로 사용하였다. 밀 전분이나 용해용 전분은 열기계펄프나 목분이 갖지 못하는 섬유간 결합력을 보완하는 결합보조제의 역할을 하며, PVA는 팽연 후 다소 단단해 지기 쉬운 전분에 유연성을 부여하기 위한 목적으로 첨가하였다. 압출 팽연용 원료와 결합 보조제의 조성을 달리하여 팽연 완충소재를 제조한 후 함수율에 따른 팽연 완충소재의 탄성계수 및 팽연율을 측정하여 완충소재의 물성 및 완충효능을 분석하였다.

2.1 열기계펄프 섬유의 압출 특성

열기계펄프 섬유 600 g에 밀 전분, 용해용 전분, PVA를 중량 기준으로 일정량씩 배합하여 압출 특성을 분석하였다. 압출 특성 분석을 위한 실험 조건은 표 11과 같다.

표 11. TMP 섬유용 팽연 조건

항목	첨가 수준	비고
원료	TMP 섬유	600 g
팽연보조제	밀 전분, 용해용 전분, PVA	
팽연보조제 첨가량	10, 20, 30, 40%	원료중량기준
수분 첨가량	100%	600 mL

2.2 목분의 압출 특성

목분 600 g에 밀 전분, 용해용 전분, 그리고 PVA를 중량 기준으로 일정량씩 배합하여 압출 특성을 분석하였다. 압출 특성 분석을 위한 실험 조건은 표 12와 같다.

표 12. 목분의 압출 조건

항목	첨가 수준	비고
원료	목분	600 g
팽연보조제	밀 전분, 용해용 전분, PVA	
팽연보조제 첨가량	10, 20, 30, 40%	원료중량기준
수분 첨가량	100%	600 mL

2.3 팽연보조제 혼합에 따른 압출 특성 분석

열기계필프 섬유용 목분에 팽연보조제(밀 전분, 용해용 전분, PVA)를 서로 혼합하여 압출 특성을 분석하였다. 압출 특성 분석을 위한 실험 조건은 표 13과 같다. 팽연 원료의 중량에 대하여 밀 전분을 10, 20, 그리고 30%를 첨가하였고, 용해용 전분

과 PVA는 밀 전분과 함께 0% 및 10% 첨가하였다.

표 13. 팽연 원료(열기계펄프, 목분)의 실험 조건

항목	첨가 원료	첨가량
원료	열기계펄프, 목분	각 600 g
팽연보조제 (원료 중량 기준)	밀 전분+용해용 전분, 밀 전분+PVA, 용해용 전분+PVA	밀 전분: 10, 20, 30% 용해용 전분: 0, 10% PVA: 0, 10%
수분 첨가량	100%	600 mL

2.4 함수율에 따른 압출 특성 분석

압출물의 함수율을 0%, 10%, 20%, 그리고 30%로 조절하여 함수율 변화에 따른 팽연 완충소재의 물성을 분석하였다.

2.5 팽연완충소재의 물리적 성질 분석

열기계펄프 섬유와 목분을 이용하여 각각 압출 팽연시킨 후 원형 압출물의 물성을 측정하기 위하여 물성 분석기(TA-XT2i, Stable Micro Systems)를 사용하였다. 압출된 팽연 완충소재가 외부 충격을 흡수하여 적절한 완충 효과를 발현하기 위해서는 매우 낮은 압축강도를 가져야 한다. 또한 충격 흡수 후 완충재의 완충 효능을 유지하기 위해서는 자체 복원력도 우수해야 하기 때문에 적절한 탄성계수도 가져야 할 것으로 보인다. 따라서 팽연 완충소재의 물성 분석에 사용된 항목들은 압축강도(kg_f)와 탄성계수(kPa)였다. 압축강도 측정은 평판 압축실험으로 수행하였으며, 하중 재하속도(loading speed)는 ASAES368.3에서 규정하고 있는 2.530 mm/min의 범위 내인 30 mm/min으로 하였다. 탄성계수를 산출하기 위하여 적용된 공식은 아래와 같다.

$$Elastic\ Modulus\ (kPa) = \frac{\frac{P}{A}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (식\ 3)$$

여기서 P = 압축강도(N),
 A = 면적(m²),
 Δl = 변위(m),
 l = 직경(m).

팽연율(expanding efficiency)은 다음의 공식으로 산출하였다.

$$Expanding\ Efficiency(\%) = \frac{\text{압출 후 시료 직경}(mm)}{\text{다이 직경}(mm)} \times 100 \quad (식\ 4)$$

팽연된 소재의 직경(mm)은 버니어캘리퍼스로 팽연소재의 외경을 측정하였다. 팽연화기로부터 압출된 시료들은 팽연화기 다이(die)의 최초 직경보다 훨씬 큰 직경으로 팽연(expansion)된다. 결국 폐지 시료의 팽연화율(%)은 항상 100보다 큰 값을 가지게 될 것이다.

3. 열기계펄프 섬유와 목분의 팽연 특성

3.1 열기계펄프 섬유의 압출 특성

열기계펄프(TMP) 섬유에 팽연보조제를 첨가한 압출물의 압출특성은 표 14와 같다. 밀 전분의 경우 TMP 섬유 중량의 20% 이하에서는 팽연 압출기 내 흐름 유지에 필요한 점성 확보가 어려워 압출 작업이 불가능하였다. 용해용 전분과 PVA의 경우는 표에서 알 수 있듯이 첨가량에 관계없이 압출 작업이 불가능하였다. 밀 전분의 경우 수분과 함께 TMP 섬유와 혼합되었을 때 완전하게 결합되어 압출기 다이부에서 압력을 받았을 때 마치 점성 유체와 같은 거동을 나타냈으나, 용해용 전분과 PVA은 밀 전분과는 달리 다이부에서 압력을 받았을 때 TMP 섬유와 분리되어 액상의 형태로 배출되었다. 따라서 용해용 전분과 PVA은 완충 효과에 직접적인 영향을 미치는 팽연보조제로서의 사용은 불가능한 것으로 판단되었다.

표 15는 압출 작업이 가능한 밀 전분을 팽연보조제로 사용한 TMP 섬유 압출물을 건조 오븐에서 건조하여 수분을 완전히 제거시킨 팽연 완충소재의 탄성계수와 팽연율을 나타낸 것이다. 첨가량 20, 30, 40%에서 탄성계수는 각각 742.14, 1353.01, 그리고 2730.93 kPa로 나타났으며, 팽연율은 131.87, 111.60, 112.13%로 나타났다. 팽연된 시료의 탄성계수가 갖는 표준편차가 평균값에 비해 비교적 크게 나타났는데, 이는 압출 작업시 고압으로 인해 압출물의 상태가 균일하지 않았기 때문인 것으로 판단된

다.

그림 9는 밀 전분 첨가량에 따른 탄성계수와 팽연율의 변화를 나타내는 것으로 밀 전분 첨가량이 증가함에 따라 탄성계수는 증가하는 반면 팽연율은 감소하는 것을 알 수 있다. 전분 첨가량이 증가할수록 압출 공정 동안 TMP 섬유들을 더욱 강하게 결합시켜 주기 때문에 팽연 다이를 통과하여 대기 중으로 방출되는 순간 압출물의 팽연 효율이 과도한 양의 전분으로 인하여 감소되는 것으로 생각된다. 팽연화기의 배럴 내부에서 스크루를 따라 이동하는 섬유들이 다이의 입구 쪽으로 압착이 가해질 때 전분의 양이 많아질수록 섬유들과 전분들 사이의 결합이 과도하게 형성되면서 다이 통과 후 압출물의 내부 조직이 팽연되는 정도가 감소하게 된다. 따라서 팽연 효율을 높이면서 보다 나은 완충 효과를 발현시키기 위해서는 전분 첨가량을 감소시키는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

표 14. 팽연보조제 첨가에 따른 TMP섬유의 팽연 특성 분석

팽연보조제	첨가량(%)				비고
	10	20	30	40	
밀 전분	불가	가능	가능	가능	불가 : 압출유지불가 가능 : 압출유지가능
용해용 전분	불가	불가	불가	불가	
PVA	불가	불가	불가	불가	

표 15. TMP 섬유의 팽연 특성

팽연보조제 첨가량(%)	20	30	40
탄성계수(kPa)	742.14±165.56	1353.01±254.52	2730.93±190.31
팽연율(%)	131.87±15.43	111.60±5.11	112.13±4.91

그림 10은 열기계펠프 섬유에 밀전분, 용해용 전분, 혹은 PVA를 첨가하여 압출 팽연시킨 뒤 촬영한 팽연 완충소재 시료들을 보여주고 있다. 본 연구에서 개발하고자 하는 팽연 완충소재는 그림 11에서 보는 바와 같은 원형의 완충소재이다. 유리화

같이 깨지기 쉬운 제품을 포장할 때 운송 혹은 이동 중에 포장 상자 안에 놓인 유리 제품의 과도한 움직임으로 인해 제품이 파손될 우려가 크기 때문에 이를 방지하기 위해 원형 혹은 파배기형 완충소재를 제품의 주위에 넣어 포장하고 있다. 본 연구에서도 이러한 용도의 팽연 완충소재를 개발하는 것을 목표로 하였으며, 이를 위해 압출 팽연된 완충소재를 적절한 크기로 절단하여 포장용 완충소재로 사용하고자 하였다.

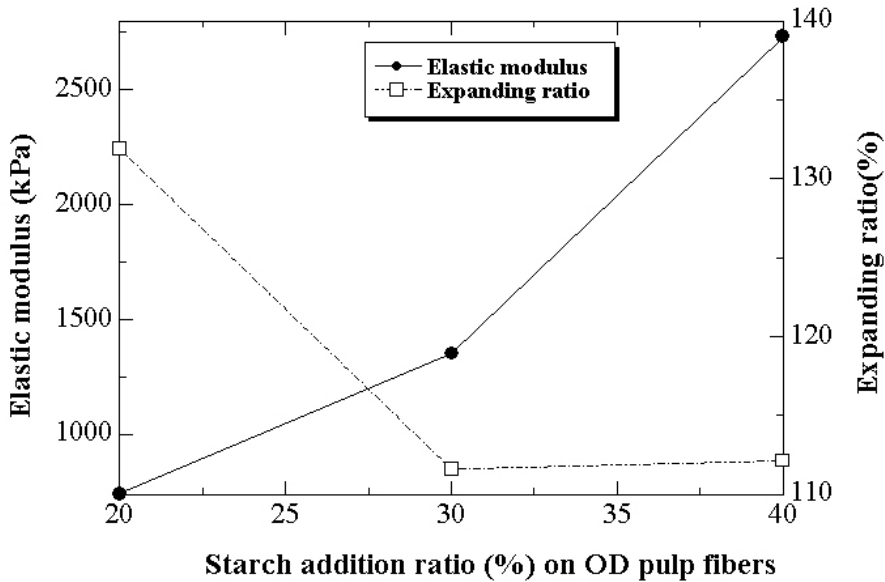


그림 9. TMP 섬유에 팽연 특성의 특성.



(가) 밀 전분 20%

(나) 밀 전분 30%

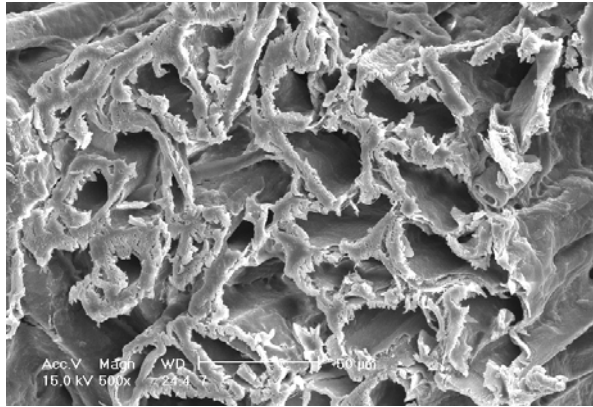
(다) 밀 전분 40%

그림 10. 압출·팽연 처리된 TMP 섬유.

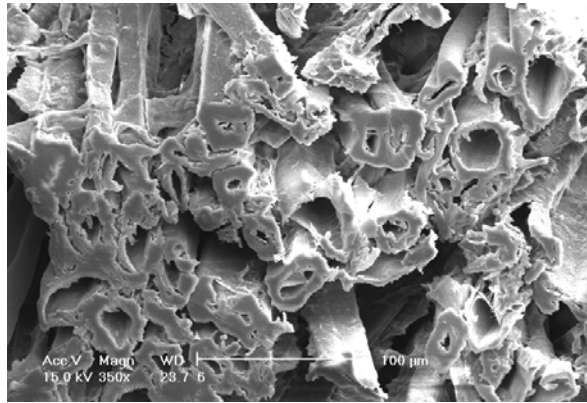


그림 11. 난분해성 완충소재.

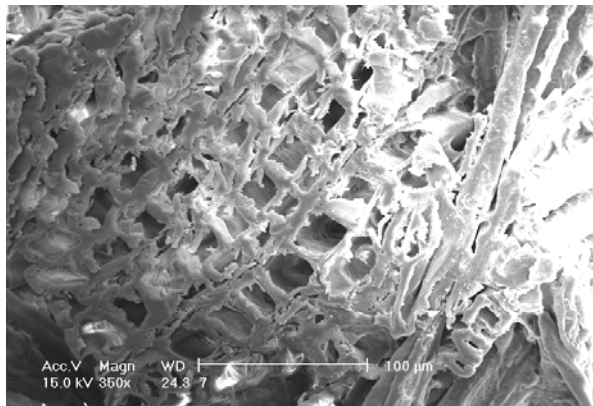
그림 12는 그림 10과 같이 팽연된 완충소재의 횡단면 구조를 전자현미경으로 촬영한 사진을 보여주고 있다. 열기계펠프 섬유에 밀 전분 20%를 첨가한 후 팽연시킨 완충소재의 횡단면 구조를 촬영한 사진(그림 12의 가)에서는 압출 팽연 과정을 거친 개개 섬유들의 내강(lumen)이 붕괴되지 않고 열려 있는 상태로 보존되어 있어서 이러한 섬유 구조를 통해 외부 충격을 흡수할 수 있는 능력을 갖게 되는 것으로 쉽게 짐작할 수 있다. 전분 첨가량이 30%일 경우(그림 12의 나)에는 섬유들이 갖는 섬유 내강의 구조가 짓눌려져 있거나 최초 크기보다 상당히 줄어든 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 섬유들 사이의 빈 틈(gap)들이 일부 형성되기는 했지만 전분 20%가 첨가된 것 보다는 더 치밀한 구조를 띠고 있다. 따라서 충격을 흡수할 수 있는 완충 성능도 매우 감소할 것으로 쉽게 짐작할 수 있다. 전분 40%가 첨가되어 팽연된 완충소재의 단면 사진(그림 12의 다)은 20% 및 30% 첨가된 단면 사진과는 많은 차이를 보인다. 과량의 전분이 첨가되면서 섬유의 내강이 거의 붕괴되어 있고 섬유들 사이의 빈 공간들도 거의 사라져서 치밀한 구조를 띠고 있다. 완충소재가 외부로부터 받은 충격을 흡수하기 위해서는 압출 팽연 공정을 거치는 동안 개개 섬유들의 내강이 그대로 보존되어 있어야 하고 섬유들 사이의 결합도 느슨하게 되어 빈 공간들이 다수 형성되어야 한다. 하지만 전분이 과량 첨가된 완충소재의 내부 조직은 섬유들 사이의 결합뿐만 아니라 전분들 사이의 결합이 이루어지면서 완충력이 거의 사라진 물리적 구조가 만들어졌다. 따라서 최적의 완충효율을 갖는 팽연 완충소재를 제조하기 위해서는 결합 혹은 팽연 보조제의 적정 첨가량이 20% 미만이 되어야 할 것으로 사료되었다.



(가) 밀 전분 20%



(나) 밀 전분 30%



(다) 밀 전분 40%

그림 12. 팽연된 TMP 섬유들의 단면.

3.2 목분의 압출 특성

목분에 팽연보조제를 첨가한 압출물의 압출특성은 표 16과 같다. TMP 섬유유의 경우와 동일하게 밀 전분 20% 이상에서만 압출 작업이 가능하였으며, 용해용 전분과 PVA를 첨가하는 것만으로는 압출 작업이 불가능하였다. 따라서 사용 원료에 관계없이 용해용 전분과 PVA는 압력을 받았을 때 목분 원료와 분리되어 원료에 포함된 수분과 함께 다이의 홀(die hole)을 통해 배출되기 때문에 팽연보조제로서의 기능은 불가능하였다. 또 밀 전분의 경우도 첨가량 10% 이하에서는 팽연 원료들이 다이를 통과하여 대기 중으로 팽연될 때 목분 입자들 사이의 결합력을 보완해 주지 못하기 때문에 목분 입자들의 형상 유지가 불가능 하였다. 따라서 목분 입자를 팽연 원료로 이용할 때에는 결합보조제인 전분의 첨가량을 목분 원료에 대하여 10% 이상 첨가하여야만 팽연 효율을 높일 수 있는 것으로 확인되었다.

표 17은 압출 작업이 가능한 밀 전분만을 팽연보조제로 사용하여 목분 압출물을 제조한 후 이들 시료들을 $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 건조 오븐에서 수분이 완전히 제거될 때까지 건조시킨 후 이들 시료의 탄성계수와 팽연율을 측정된 결과 값을 나타낸 것이다. 첨가량 20, 30, 40%에서 탄성계수는 각각 1870.68, 2731.28, 그리고 3675.97 kPa로 나타났으며, 팽연율은 189.93, 162.33, 그리고 145.60%로 나타났다. 탄성계수는 TMP 섬유유와 비교하였을 때 약 2배 정도 크게 나타났으며, 팽연율은 TMP 섬유유에 비해서 약 33-58% 정도 더 크게 나타났다. 이는 목분의 경우 TMP 섬유유와 달리 결속 섬유들로 구성되어 있어 입도가 크고 산물밀도가 무거워 목분 조직 내부로 수분의 침투가 제대로 이루어지지 않아 압출 작업 시 물 분자의 운동에 의한 수분 팽창이 일어나지 않아 팽연 현상이 적절하게 일어나지 않았기 때문이다. 즉, 팽연율이 TMP 섬유유보다 크게 나타난 것은 목분의 팽연 현상에 의한 것이 아니고 다이 통과 시 압축되었던 전분이 팽창되어 나타난 현상으로 완충 성능에 영향을 미치는 수분의 급격한 분자운동(증발)에 의한 팽연 현상은 나타나지 않았음을 의미한다. 시료의 탄성계수가 갖는 표준편차 역시 TMP 섬유유의 경우와 같이 평균 값에 비하여 비교적 크게 나타났는데, 이는 압출물의 상태가 균일하지 않았기 때문에 측정되는 지점마다 탄성계수의 값이 매우 다르게 측정되는 것이 원인으로 되었을 것으로 판단된다.

그림 13은 밀 전분 첨가량에 따른 탄성계수와 팽연율의 경향을 그래프로 나타낸 것으로 밀 전분 첨가량이 증가함에 따라 탄성계수는 증가하는 반면 팽연율은 TMP 섬유유와 달리 뚜렷하게 감소되는 것을 쉽게 알 수 있다. 목분 중량에 대하여 밀 전분이 30% 이상 첨가되면 전분 자체의 결합력이 강화되면서 팽연 효율이 급격히 감소하고 반대로 탄성계수는 빠르게 상승한다. 따라서 팽연 완충소재를 제조할 때에는 결합보조제로 첨가되는 전분의 양을 적절히 조절하는 것이 매우 필요한 것으로 사료되었다.

그림 14는 압출 시료의 형상을 나타낸 사진이다. TMP 섬유유와는 달리 밀 전분의 첨가량과는 관계없이 비교적 일정한 형상을 유지한 상태로 제조되었다. 압출된 목분

완충소재를 통해 알 수 있는 것은 목분 자체가 TMP 섬유와 같이 해섬된 상태로 다이를 통과하지 않기 때문에 목분 입자들이 팽연화기의 다이를 통과하여 대기 중으로 압출될 때에는 TMP 섬유들에 비하여 압출물의 형상 유지가 훨씬 더 잘되는 것으로 판단할 수 있다.

표 16. 목분의 압출특성

팽연보조제	첨가량(%)				비고
	10	20	30	40	
밀 전분	불가	가능	가능	가능	불가 : 압출유지불가 가능 : 압출유지가능
용해용 전분	불가	불가	불가	불가	
PVA	불가	불가	불가	불가	

그림 15는 목분으로 제조된 팽연 완충소재의 횡단면 구조를 전자현미경으로 촬영한 사진이다. TMP 섬유와 마찬가지로 전분의 첨가량이 증가할수록 조직이 치밀해지면서 팽연효율이 떨어지는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 목분 원료의 중량에 대해서 밀 전분 20%를 첨가하여 팽연시킨 압출물의 횡단면 조직(그림 15의 가)은 대부분의 섬유내강이 붕괴되지 않고 열려 있는 상태로 있고, 섬유들간 빈 공간(voids)들이 존재하고 있다. 그러나 밀 전분이 30% 첨가되면 목분 입자들을 결합시켜 주는 전분의 역할이 커지면서 목분 입자들이 규칙적으로 배열되고 일부 섬유들의 내강들만이 붕괴되지 않은 상태로 관찰되었다(그림 15의 나 참조). 밀 전분이 40% 첨가되었을 경우에는 30%가 첨가되었을 때와 마찬가지로 매우 치밀한 조직을 형성하고 팽연화기의 다이를 통과한 섬유들의 내강이 상당히 붕괴되어 있는 것을 쉽게 관찰할 수 있다(그림 15의 다 참조). 따라서 목분의 중량에 대하여 결합보조제를 30% 이상 첨가하는 것은 압출물의 조직만 치밀하게 만들어 완충 효능을 발현하기 어렵게 하기 때문에 목분을 이용한 팽연 처리 시에도 전분 첨가량 20% 이하에서 최적의 팽연효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 TMP 섬유를 이용하여 제조한 팽연 완충소재에 비해서는 섬유나 압출물의 내부 조직이 상당히 짓눌려 있는 상태로 제조되기 때문에 TMP 섬유들에 비해서는 완충효능이 매우 감소할 것으로 쉽게 짐작할 수 있다.

표 17. 목분의 팽연 특성

팽연보조제 첨가량(%)	20	30	40
탄성계수(kPa)	1870.68±105.19	2731.28±259.02	3675.97±361.69
팽연율(%)	189.93±25.01	162.33±26.10	145.60±23.27

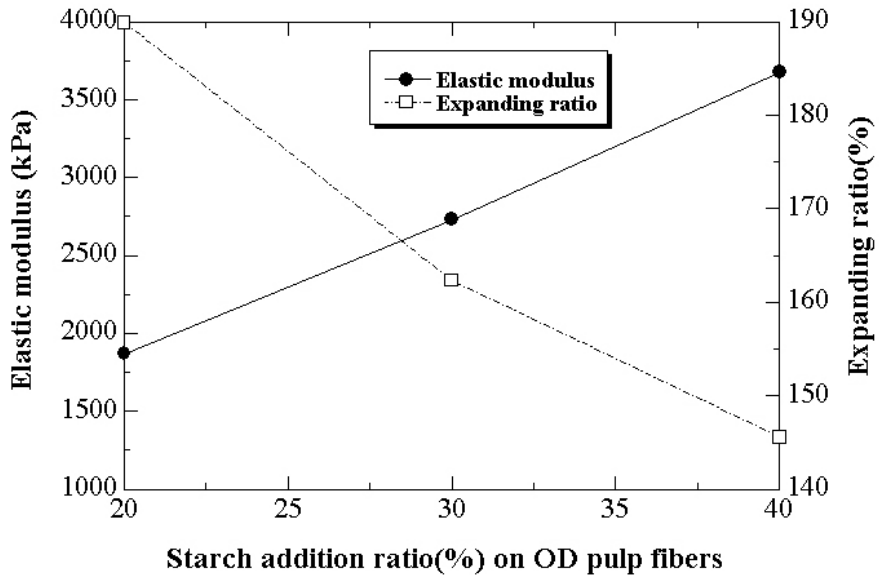


그림 13. 목분의 팽연 특성.

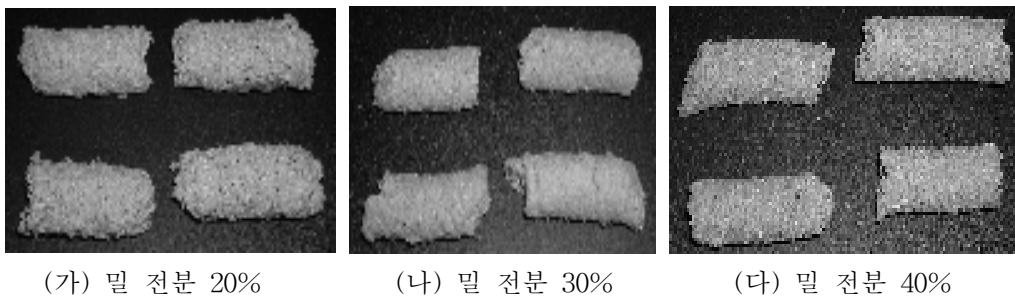
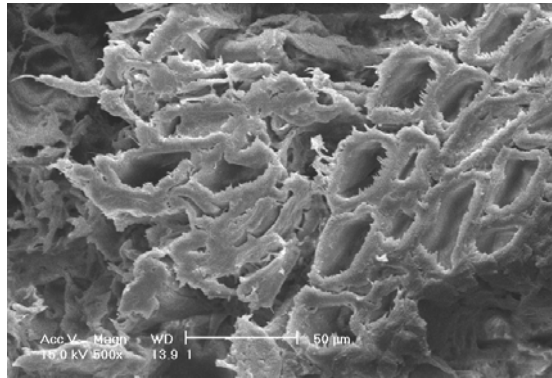
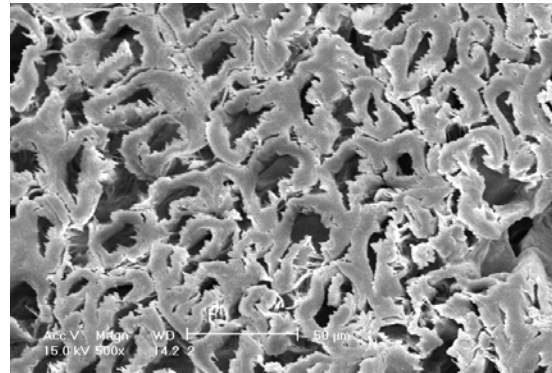


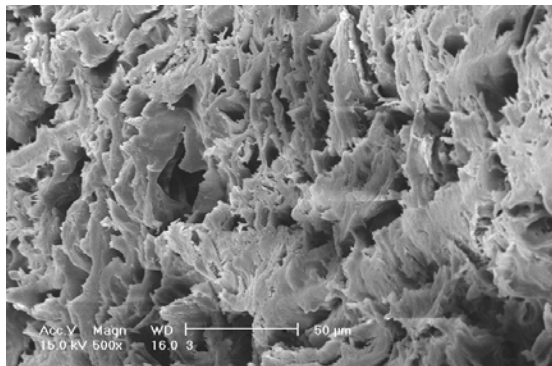
그림 14. 압출·팽연 처리된 목분.



(가) 밀 전분 20%



(나) 밀 전분 30%



(다) 밀 전분 40%

그림 15. 팽연된 목분 조직의 단면.

3.3 팽연보조제 혼합에 따른 압출 특성 분석

TMP 섬유와 목분에 팽연보조제를 서로 혼합하여 첨가한 압출물의 압출특성은 표 18과 같다. 표에서 보는 바와 같이 밀 전분과 혼합된 경우는 압출 작업이 가능한 것으로 나타났고, 용해용 전분과 PVA만을 혼합한 경우에는 압출 작업이 불가능한 것으로 나타났다. 특히 밀 전분과 용해용 전분, 그리고 밀전분과 PVA를 혼합하는 경우 밀 전분의 중량에 10%에 해당하는 PVA를 혼합할 때에만 압출 작업이 가능하였고, 이보다 높거나 낮은 경우에는 압출 작업이 불가능하였다. 따라서 팽연보조제를 서로 혼합하는 경우에는 혼합 비율이 매우 중요한 요소가 되는 것을 알 수 있었다.

압출 작업이 가능한 밀 전분과 용해용 전분, 그리고 밀 전분과 PVA의 압출 특성을 표 19 및 표 20에 나타내었다. 앞의 실험 결과와 동일하게 밀 전분의 첨가량이 증가함에 따라 탄성계수는 증가하고, 팽연율은 감소하는 것을 알 수 있다. 목분의 경우 탄성계수는 TMP 섬유에 비해 약 2배 정도, 팽연율은 약간 크게 나타나 전체적으로 팽연보조제 한 종류만을 각각 첨가한 실험 결과와 동일한 경향을 나타내었다. 다만 완충 성능을 확보하기 위해서는 탄성계수가 가능한 작아야 한다는 관점에서, TMP 섬유에 밀 전분 20%, 밀 전분 중량의 10%에 해당하는 용해용 전분을 첨가한 경우의 탄성계수는 754.10 kPa로 밀 전분만 첨가했을 때의 742.14 kPa와 비슷하게 나타났으나 성형성은 다소 증가한 것으로 나타났다. 따라서 밀 전분에 용해용 전분을 사용하는 것이 완충 능력과 성형성을 높이는데 효과적임을 알 수 있었다. 밀 전분에 PVA를 혼합한 경우에도 실험 결과는 용해용 전분을 혼합한 경우와 동일한 경향을 나타냈으나, 탄성계수는 크게, 그리고 팽연율은 다소 적게 나타나 PVA가 용해용 전분보다 큰 결합력을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 16 및 그림 17은 각 조건에서 제조된 압출 시료를 나타낸 사진이다.

표 17. 팽연보조제의 조합에 따른 팽연 특성

원료	혼합 팽연보조제		
	밀 전분+용해용 전분	밀 전분+PVA	용해용 전분+PVA
TMP 섬유	가능	가능	불가
목분	가능	가능	불가

표 18. 밀 전분과 용해용 전분의 조합에 따른 팽연 효율 분석

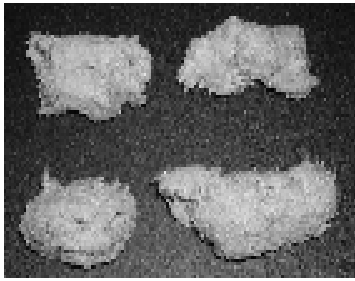
밀 전분 첨가량(%)		20		30		40	
용해용 전분 첨가량(%)*		0	10	0	10	0	10
TMP	탄성 계수(kPa)	742.14±165.56	754.10±61.40	1353.01±254.52	1243.41±103.50	2730.93±190.31	2201.15±112.95
	팽연율(%)	131.87±15.43	165.00±27.71	111.60±5.11	162.13±28.96	112.13±4.91	144.67±24.60
목분	탄성 계수(kPa)	1870.68±105.19	1204.39±60.12	2731.28±259.02	2231.19±76.51	3675.97±361.69	3411.27±214.75
	팽연율(%)	189.93±25.01	197.13±30.56	162.33±26.10	188.87±32.58	145.60±23.27	151.13±24.88

* Addition ratio based on wheat flour weight.

표 19. 밀 전분과 PVA의 조합에 따른 팽연 효율 분석

밀 전분 첨가량(%)		20		30		40	
PVA 첨가량(%)*		0	10	0	10	0	10
TMP	탄성 계수(kPa)	742.14±165.56	1118.60±116.28	1353.01±254.52	2477.61±140.9	2730.93±190.31	2949.43±176.64
	팽연율(%)	131.87±15.43	151.00±26.08	111.60±5.11	155.87±29.60	112.13±4.91	105.87±2.56
목분	탄성 계수(kPa)	1870.68±105.19	1155.19±117.54	2731.28±259.02	2302.62±185.87	3675.97±361.69	4126.24±32.36
	팽연율(%)	189.93±25.01	181.40±26.22	162.33±26.10	169.20±33.12	145.60±23.27	159.07±26.99

* Addition ratio based on wheat flour weight.



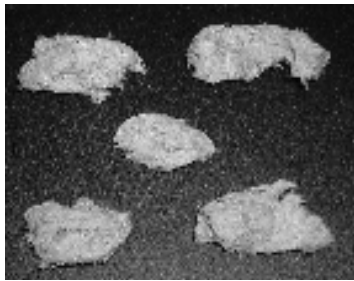
(가)



(나)



(다)



(라)



(마)



(바)

그림 16. 팽연보조제의 조합에 따라 압출·팽연처리된 TMP 섬유: (가) 밀 전분 20%+용해용 전분 10%, (나) 밀 전분 30%+용해용 전분 10%, (다) 밀 전분 40%+ 용해용 전분 10%, (라) 밀 전분 20%+PVA 10%, (마) 밀 전분 30%+PVA 10%, (바) 밀 전분 40%+PVA 10%.

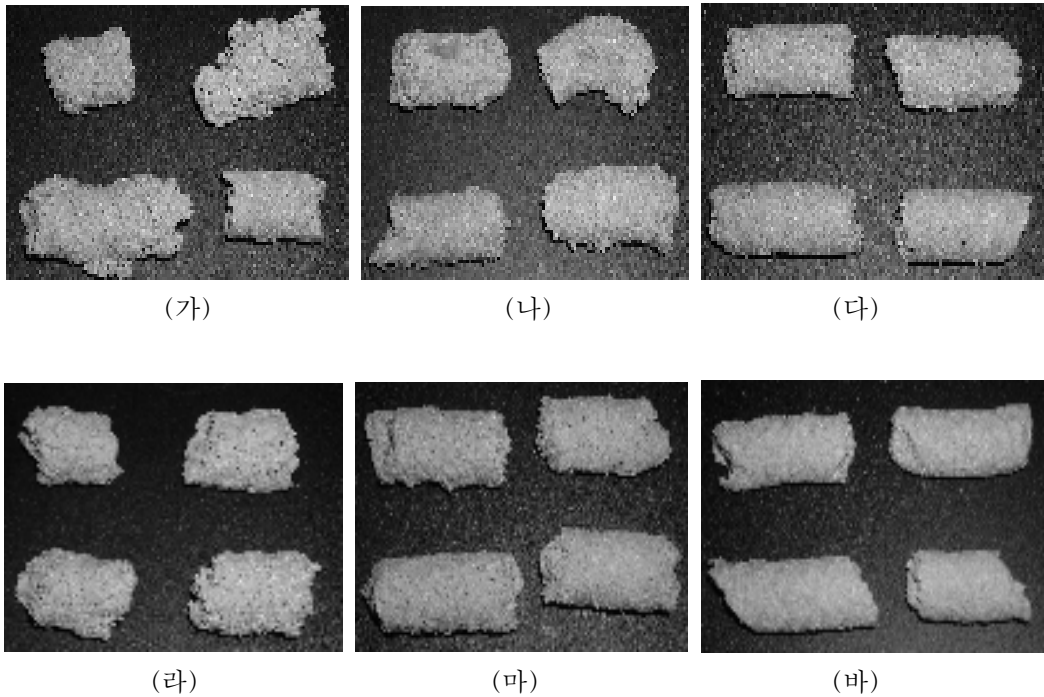


그림 17. 팽연보조제의 조합에 따라 압출·팽연처리된 목분 원료: (가) 밀 전분 20%+용해용 전분 10%, (나) 밀 전분 30%+용해용 전분 10%, (다) 밀 전분 40%+ 용해용 전분 10%, (라) 밀 전분 20%+PVA 10%, (마) 밀 전분 30%+PVA 10%, (바) 밀 전분 40%+PVA 10%.

3.4 함수율에 따른 압출 특성 분석

앞에서 제시된 탄성계수는 각 실험 조건에서 압출된 시료를 건조 오븐에서 3시간 건조시킨 것으로 함수율 0%(wt)에서 측정된 값이다. 과량의 전분을 수분과 혼합한 후 가열하여 수분을 제거시키면 전분 분자들 사이의 수소결합으로 인하여 단단하게 굳어진다. 이로 인해 대부분의 시료가 팽연보조제의 첨가량에 상관없이 손으로 눌렀을 때 충격을 흡수할 수 있는 완충 성능을 나타내지 못하였다. 따라서 완충재로서의 기능을 부여하기 위해 압출 시료가 대기 중에 노출되었을 때 대기 중에 노출되었을 때의 함수율 상태에서 탄성계수를 측정할 필요가 있을 것으로 판단되었고, 이를 바탕으로 상이한 함수율 하에서 팽연 완충소재를 24시간 이상 노출시킨 후 측정된 탄성계수의 값들을 표 20, 표 21, 그리고 표 22에 나타내었다.

표 20-21에서 나타난 결과 값들을 바탕으로 하여 그림 18, 그림 19, 그리고 그림

20은 TMP 섬유에 밀 전분 20, 30, 그리고 40%를 첨가하고 밀 전분 첨가량의 10%에 해당하는 용해용 전분과 PVA를 각각 팽연보조제로 사용하였을 경우 압출 시료의 함수율에 따른 탄성계수 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 함수율이 증가함에 따라 탄성계수가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있으며, 함수율 30%에서는 팽연보조제의 첨가량에 관계없이 탄성계수가 비슷하게 나타났다. 보통 EPS로 제조된 발포 완충소재의 탄성계수는 400-600 kPa 범위에 해당되는데, 대기 함수율이 8-14%로 가정한다면 함수율이 약 10%인 상태에서 팽연 완충소재의 탄성계수를 EPS의 탄성계수와 비교해 볼 필요가 있을 것으로 판단하였다. 함수율이 10%인 지점에서 밀 전분의 첨가량이 작을수록 탄성계수의 값은 낮아지고 밀 전분의 첨가량이 20%로 감소되었을 때 가장 낮은 탄성계수를 보였다. 이것은 용해용 전분이나 PVA가 함께 첨가되어 제조된 완충소재에서도 유사한 경향을 나타내었다. 이들 팽연 완충소재의 탄성계수는 약 800 kPa 정도로 EPS로 만들어진 발포 완충소재의 탄성계수에 비하여 다소 높게 측정되었다. 이것은 TMP 섬유와 함께 첨가되는 결합보조제인 밀 전분의 양을 20% 수준으로 많이 첨가한 것에서 비롯된 것으로 보인다. 따라서 앞으로 첨가되는 결합보조제의 양을 줄이면서 팽연 효과를 극대화시킬 수 있는 방법을 연구해 볼 필요가 있다. 그러나 약 800 kPa 수준의 탄성계수를 갖는 팽연 완충소재도 EPS 보다는 다소 떨어지기는 하지만 충분한 완충효과를 발휘할 수 있기 때문에 이상적인 친환경 완충소재가 될 수 있을 것이다.

표 20. 함수율 변화에 따른 밀 전분이 첨가된 TMP 팽연 완충소재의 탄성계수

함수율 밀 전분	0%	10%	20%	30%
20%	742.14	467.92	244.9	174.99
30%	1353.01	793.56	389.04	216.08
40%	2730.93	1604.38	788.82	232.54

표 21. 함수율 변화에 따른 밀 전분과 용해용 전분이 첨가된 TMP 팽연 완충소재의 탄성계수

함수율 밀 전분+ 용해용 전분 10%	0%	10%	20%	30%
20%	754.1	439.55	254.41	181.3
30%	1243.41	788.14	469.63	255.3
40%	2201.16	1247.77	763.05	462.26

표 22. 함수율 변화에 따른 밀 전분과 PVA가 첨가된 TMP 팽연 완충소재의 탄성계수

함수율 밀 전분+ PVA 10%	0%	10%	20%	30%
20%	754.1	439.55	254.41	181.3
30%	1243.41	788.14	469.63	255.3
40%	2201.16	1247.77	763.05	462.26

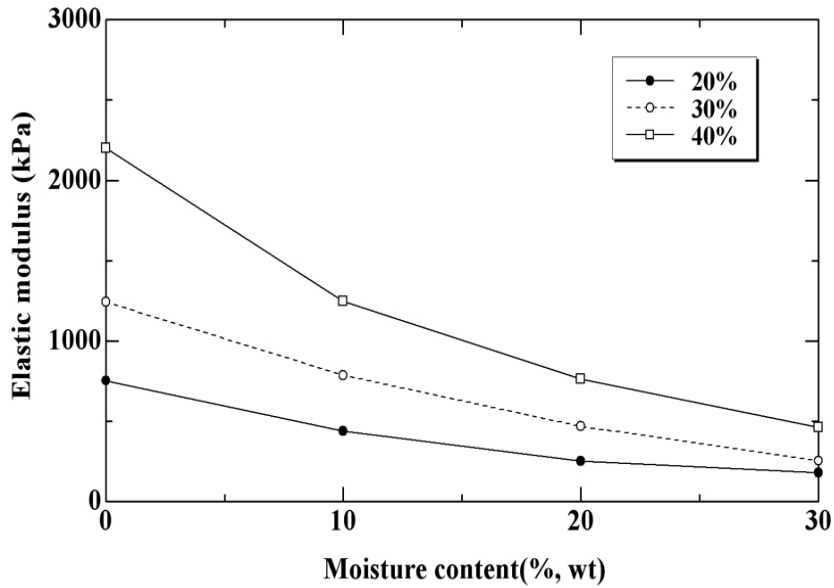


그림 18. 함수율에 따른 TMP 팽연 완충소재의 탄성계수 변화: 밀 전분(20, 30, 40%)만 첨가된 경우.

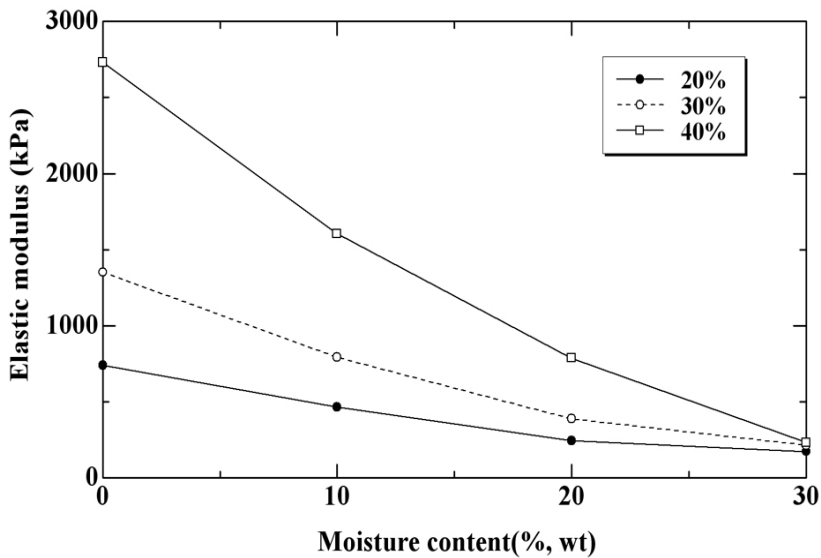


그림 19. 함수율에 따른 TMP 팽연 완충소재의 탄성계수 변화: 밀 전분(20, 30, 40%)에 용해용 전분 10%(밀 전분의 중량 기준)가 첨가된 경우.

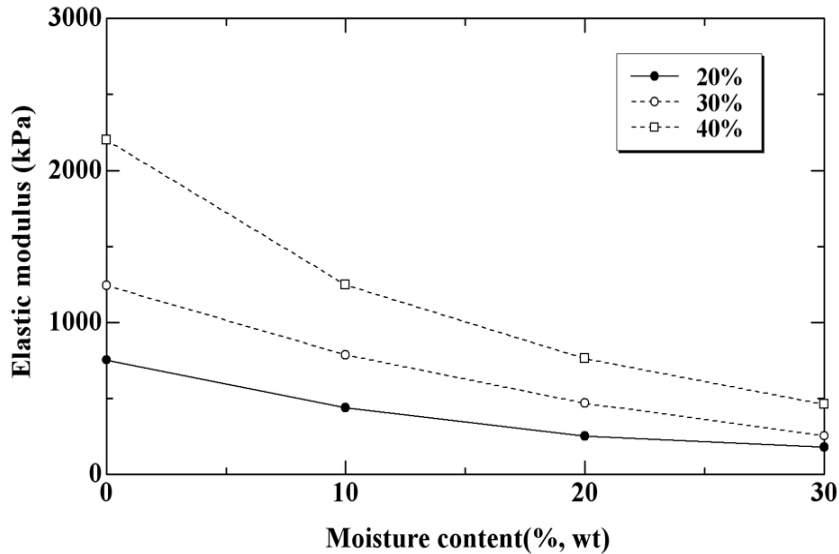


그림 20. 함수율에 따른 TMP 팽연 완충소재의 탄성계수 변화: 밀 전분(20, 30, 40%)에 PVA 10%(밀 전분의 중량 기준)가 첨가된 경우.

표 23, 표 24, 그리고 표 25는 목분에 밀 전분, 용해용 전분 및 PVA와 같은 팽연 보조제를 혼합하여 첨가하여 제조한 팽연 완충소재를 상이한 함수율 상태 하에서 24 시간 이상 노출시킨 후 탄성계수를 측정된 값을 나타낸 것이다.

표 23-25에 나타난 결과 값들을 바탕으로 하여 그림 20 및 그림 21은 목분에 밀 전분 20, 30, 그리고 40%를 첨가하고 밀 전분 첨가량의 10%에 해당하는 용해용 전분, PVA를 팽연보조제로 사용한 경우 압출 시료의 함수율에 따른 탄성계수를 그래프로 나타낸 것이다. TMP 섬유에서와 마찬가지로 팽연 완충소재의 함수율이 증가함에 따라 탄성계수가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있으며, 함수율 30%에서는 TMP 섬유에서 살펴본 것과 마찬가지로 팽연보조제의 첨가량에 관계없이 비슷한 탄성계수를 나타냈다.

앞의 표 20과 표 21에서 함수율 10%에서 TMP 섬유에 밀 전분 20%를 첨가한 경우 탄성계수는 467.92 kPa이었고, 용해용 전분을 혼합하여 사용한 경우 탄성계수는 439.55 kPa로 가장 작게 나타났다. 목분의 경우는 동일 조건에서 1232.09 kPa, 844.64 kPa로 TMP 섬유 보다 매우 크게 나타났다. 따라서 이상적인 완충재 개발을 위한 팽연보조제 첨가 조건은 TMP 섬유에 20% 정도의 밀 전분을 첨가하는 경우와 여기에 밀 전분 첨가량의 10% 정도의 용해용 전분을 혼합하는 경우로 판단되었다.

표 23. 함수율 변화에 따른 밀 전분이 첨가된 목분 팽연 완충소재의 탄성계수

함수율 밀 전분	0%	10%	20%	30%
20%	1118.64	784.82	475.26	301.37
30%	2477.61	1706.79	586.57	423.87
40%	2849.43	1924.86	842.18	680.98

표 24. 함수율 변화에 따른 밀 전분과 용해용 전분이 첨가된 목분 팽연 완충소재의 탄성계수

함수율 밀 전분+ 용해용 전분 10%	0%	10%	20%	30%
20%	1204.39	844.64	651.54	426.27
30%	2231.19	1243.28	786.6	575.65
40%	3411.27	2093.13	1128.32	672.33

표 25. 함수율 변화에 따른 밀 전분과 PVA이 첨가된 목분 팽연 완충소재의 탄성계수

함수율 밀 전분+ PVA 10%	0%	10%	20%	30%
20%	1155.19	815.92	629.27	460.48
30%	2302.62	1454.52	1042.64	624.19
40%	4126.24	2272.74	1524.27	832.79

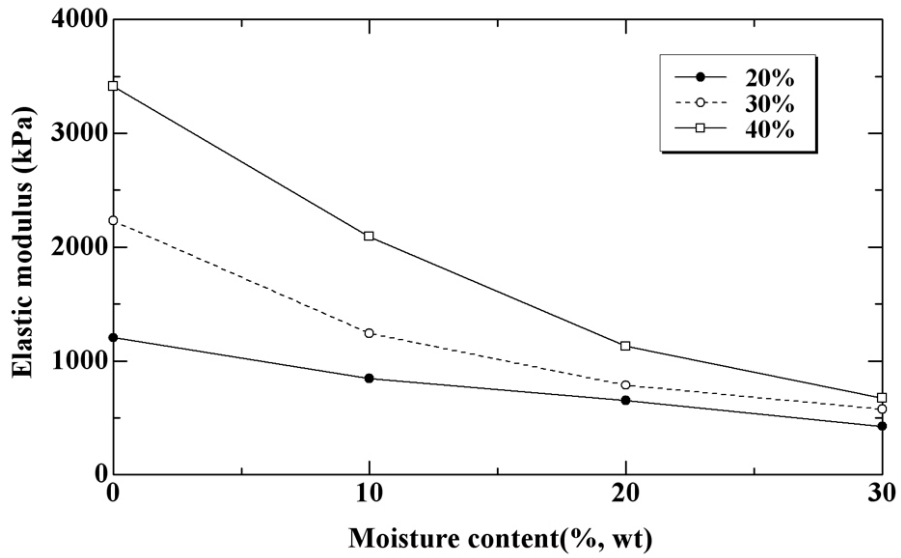


그림 21. 함수율에 따른 목분 완충소재의 탄성계수 변화: 밀 전분(20, 30, 40%)만 첨가된 경우.

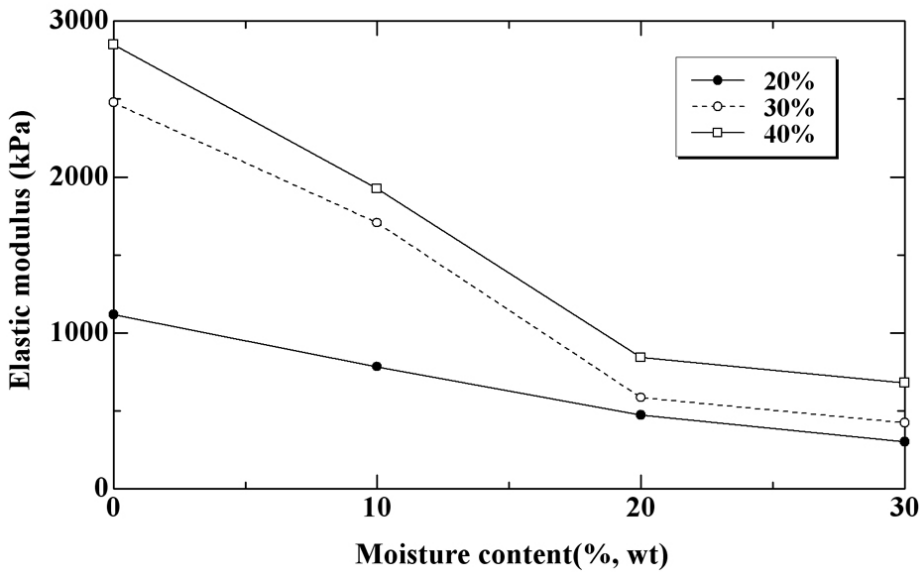


그림 22. 함수율에 따른 목분 완충소재의 탄성계수 변화: 밀 전분(20, 30, 40%)에 용해용 전분 10%(밀 전분의 중량 기준)가 첨가된 경우.

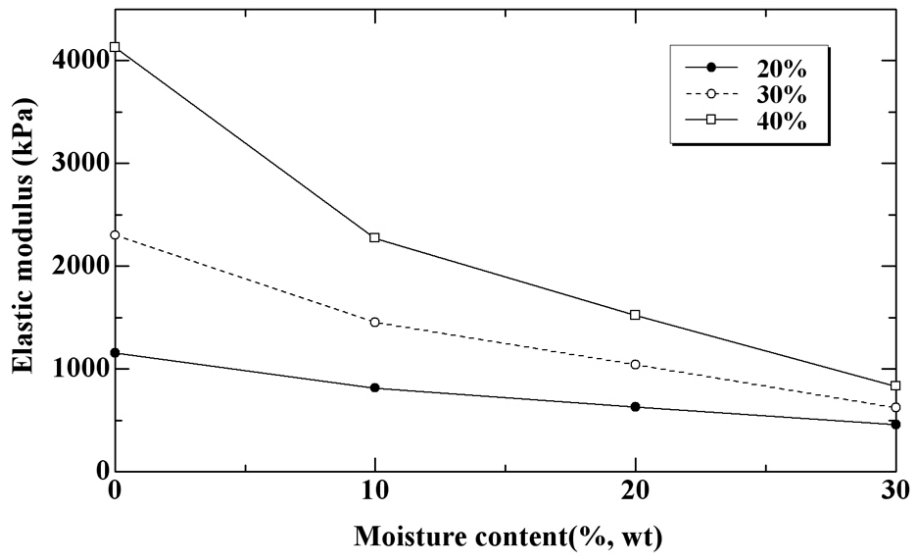


그림 23. 함수율에 따른 목분 완충소재의 탄성계수 변화: 밀 전분(20, 30, 40%)에 PVA 10%(밀 전분의 중량 기준)가 첨가된 경우.

제 3 절 폐잔재 및 소경재를 이용한 평판형 완충소재 제작

1. 서론

산림이나 기타 목재 가공공장에서 발생하는 폐재(waste log)는 수집되어 목분(saw dust)이나 칩(chip)으로 처리되어 사료나 삭편판 등의 원료로 이용된다. 그러나 다발적으로 발생하는 폐재를 수집할 때 소요되는 비용에 덧붙여 이를 가공하여 이차산물로 만들어 판매할 때의 가격이 지나치게 높게 책정되기 때문에 폐재의 경제적 활용이 매우 어려운 것으로 여겨지고 있다. 따라서 소경재나 폐재의 경제적 활용법에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있지만 뚜렷한 해결책을 제시하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서도 소경재나 폐재에 대한 경제적 활용법을 탐색하기 위한 연구의 일환으로 소경재나 폐재를 기계펄프화한 후 완충소재 제조용 원료로 사용하고자 하였다. 일차년도 연구에서 폐재 섬유를 단축 스크류형 팽연압출기(single-screw expander)를 통하여 팽연압출시켜 완충소재를 제조하였다. 폐재 섬유의 펄프화를 위해서는 섬유 손상을 가급적 피하기 위하여 열기계펄프화법(thermomechanical pulping)을 사용하였다.

폐재 섬유들을 팽연시킬 때 섬유들 사이의 결합을 보조하기 위하여 사용된 전분이 수분 손실과 함께 급격히 노화(retrogradation)가 진행되면서 완충소재의 압축강도를 급격히 증가시키는 역할을 하였다. 완충소재의 압축강도가 증가하면 탄성계수도 함께 증가시켜 완충성능의 손실을 초래하게 한다. 완충소재의 탄성계수가 높으면 외부 충격을 그대로 포장 물품에 전달하는 매체 역할을 하기 때문에 포장 물품의 안정성에 매우 큰 해를 입히게 된다. 따라서 완충소재의 탄성계수는 가급적이면 낮게 유지되는 것이 매우 중요하다. 전분이 첨가된 폐재 완충소재의 함수율을 9-12% 수준으로 유지하지 않는다면 완충소재의 내충격성을 유지하기가 매우 어려웠다.

이러한 단점을 극복하기 위해서는 완충소재의 제조 방식을 팽연압출 방식에서 감압성형 방식(vacuum-forming process)으로 전환할 필요가 있었다. 감압성형 방식은 전분의 사용으로 인하여 압축강도가 과도하게 증가하는 것을 방지하기 위하여 섬유 현탁액을 일정한 형상으로 성형한 후 5-10초 정도 감압을 가하여 섬유 현탁액에 포함된 과량의 수분을 제거한다. 탈수와 함께 성형된 완충소재는 건조단계를 거친 후 평판형 완충소재(plate-like shock-absorbing materials)로 만들어진다. 팽연완충소재와 마찬가지로 평판형 완충소재를 제조할 때에도 완충소재를 구성하는 섬유들의 결합력을 향상시키기 위하여 성형 보조제로서 전분(starch)을 사용하지만 이러한 전분은 단순한 성형 보조제 및 결합 향상제의 역할만 할 수 있는 적은 양이 첨가되기 때문에 과도한 압축강도의 상승을 초래하지 않는다. 앞서 지적한 바와 같이 압축강도

의 상승은 완충소재의 고밀화를 촉진시키므로 압축강도 및 탄성계수의 상승을 유도하여 소재의 내충격성을 감소시키는 원인을 제공한다. 이러한 점은 펄프 몰드(pulp mold)의 구조로부터 쉽게 이해될 수 있다. 펄프 몰드의 제조 시에는 감압압착 및 탈수 방식이 적용되기 때문에 펄프 몰드를 구성하는 섬유들의 고밀화가 매우 크게 진행되어 매우 큰 압축강도를 가지게 된다. 결국 펄프 몰드 자체는 내충격성이 전혀 발현되지 못하기 때문에 포장되는 물품의 형상대로 성형되어 공간이 만들어져야 한다. 바로 이러한 빈 공간을 통하여 외부충격을 흡수하는 역할이 주어지게 된다. 그러나 평판형 완충소재는 압착방식이 생략되기 때문에 발포 스티로폼과 같이 완충소재의 내부 구조에 매우 많은 공극이 남아 있게 되고, 이러한 공극들이 충격을 흡수하는 역할을 하게 된다.

아래의 절에서는 감압성형 방식을 이용한 평판 완충소재의 제작 원리 및 제작 장치에 대한 세부적인 설명에 대해서 설명할 것이다.

2. 평판형 감압성형장치 설계

2.1 감압성형장치의 구성

그림 24는 본 연구에서 사용된 평판형 완충소재 제조용 감압성형장치(vacuum former for making plate-like cushioning materials)를 보여주고 있다. 평판형 완충소재 제조용 감압성형장치는 양방향 사각 완충소재 감압 성형부(two-way forming box), 단방향 완충소재 감압 성형부(single-way suction forming box), 감압탈수용 감압 펌프(vacuum pump for drainage), 제어박스(control box), 배수장치(drainage equipments), 송풍장치(ventilating fan) 등으로 이루어져 있다.

완충소재의 성형부 형상은 그림 25에 나타낸 것과 같이 사각으로 이루어져 있다. 양방향 사각 성형부의 상·하부에는 40 mesh 크기의 탈수용 와이어가 배치되어 있어 감압이 가해졌을 때 탈수가 빠르게 이루어지도록 하였고, 송풍장치에서 가해지는 바람이 쉽게 통과하여 수분 증발이 빠르게 일어나도록 설계하였다. 완충소재 성형부 하부에는 300℃까지 가열할 수 있는 열선과, 이들 열선에서 가열된 뜨거운 공기를 성형부로 이동시켜 수분 증발을 가속화시킬 수 있는 송풍장치가 내장되어 있다. 즉, 열선을 통해 가열된 공기가 송풍장치를 통하여 탈수 성형된 완충소재 쪽으로 이동함으로써 수분의 증발을 가속화시켜 완충소재를 건조시키는데 소요되는 시간을 줄일 수 있게 한다. 이러한 과정은 완충소재의 건조 시간 감소를 유도함으로써 완충소재 제조단가를 줄이는데 기여할 것이다.

감압성형장치의 각 부위 명칭과 제원, 그리고 각 부위의 용도를 표26에 자세하게 기술하였다.

표 26. 평판형 완충소재 제조용 감압성형장치의 구성 장치 및 세부 제원

각부 명칭	규격	용도
양방향 감압 성형부 (Two-way suction former)	20×20×5 cm. 40 mesh (+20 mesh)	평판형 완충소재의 제조
단방향 감압 성형부 (Single-way suction former)	20×20×5 cm. 40 mesh (+20 mesh)	평판형 완충소재의 제조
제어 박스 (Control box)	Heater: 0-300℃ Electric voltage: 220/380V	감압성형장치의 전원(ON/OFF) 사각형 성형부의 온도 조절 원형 성형부의 온도 조절 송풍장치의 전원(ON/OFF)
탈수용 감압 펌프 (Vacuum pump for drainage)	Pump: 0-760 mmHg RPM: 1730 rpm Frequency: 60 Hz Flow rate: 3 m ³ /min	성형부의 지료 현탁액으로부터 과량 수분 제거를 위한 감압 적용
배수관 (drainage pipe)	∅49.9 mm	성형부에서 탈수된 백수의 이 동 통로
송풍 장치 (Ventilating fan)	Electric voltage: 200V Airflow rate: 4.3, 9.0 cm ³ /min	탈수된 완충소재의 수분제거

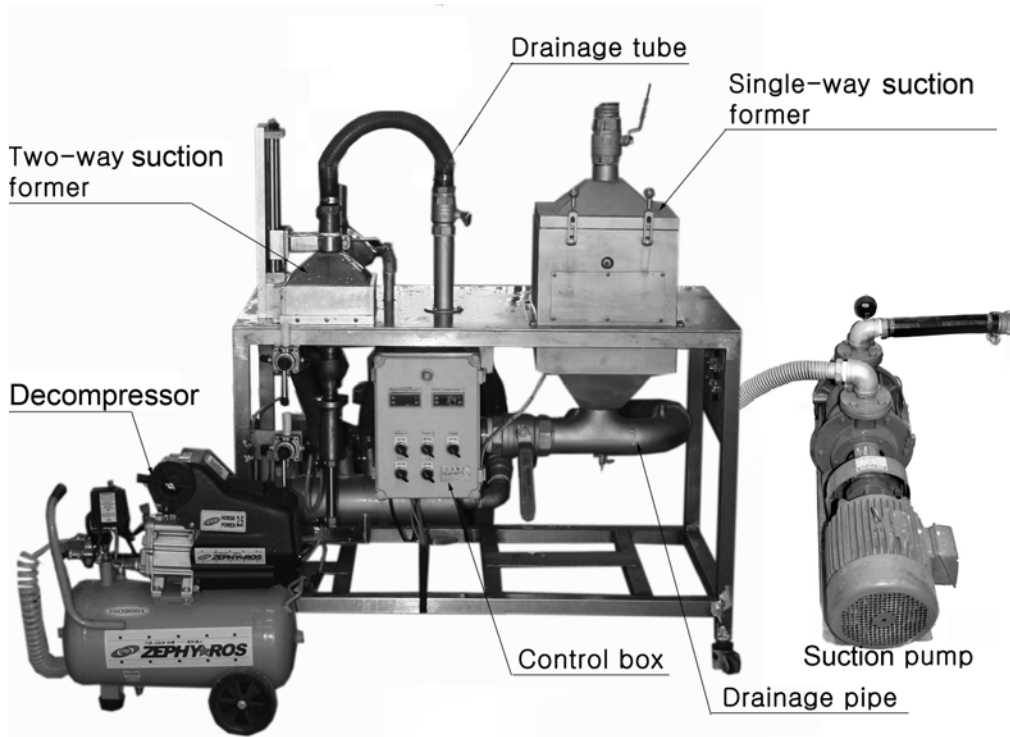


그림 24. 감압성형장치의 구조 및 각부 명칭.

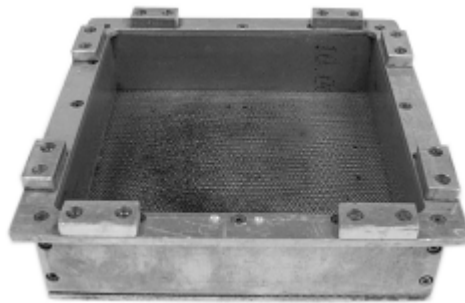


그림 25. 사각 성형 상자(plate-like forming box)의 형상: 40 mesh 와이어가 부착되어 있고, 그 밑에 다시 20 mesh 크기의 와이어가 부착되어 있다.

완충소재 제조에 있어서 양이온성 전분에 첨가에 따른 고흡분의 보류도에 대한 조사가 필요하다. 평판형 완충소재 제조용 성형상자의 경우 완충소재의 형태를 결정하는 40 mesh 와이어 밑에 적정 크기의 메시 크기(20 mesh)를 갖는 금망(wire)이 씌워져 있는 형태를 갖는다. 과도한 감압 작용으로 섬유들이 와이어 홀(hole) 사이로 빠져나가는 것을 최소화시키기 위하여 40 mesh와 20 mesh 와이어를 동시에 사용하였다. 이러한 와이어가 세척 없이 연속적으로 사용되면 섬유 고흡분이 침착되어 와이어의 구멍을 막게 되고, 결국 감압 탈수 동안에 탈수 효율이 급격히 떨어진다. 따라서 금망, 금형 등의 오염을 방지하기 위해 각각의 성형단계 후 강한 샤워로 금망을 세척하는 것이 필수적이다.

탈수 효율 및 세척 효율은 와이어의 메시 크기에 따라 큰 영향을 받는데, 그림 26은 와이어의 메시 크기에 따른 섬유 보류도의 영향을 나타낸 그래프이다. 와이어의 메시 사이즈가 커지면 섬유의 보류도가 증가하였지만 증가폭은 눈에 띌 만큼 크지는 않았다. 따라서 본 연구에서 사용된 감압성형장치에서 성형상자의 와이어에 따른 섬유 보류도의 차이는 크지는 않았지만 탈수 속도에 있어서는 큰 차이를 나타내었다. 즉, 와이어의 메시 크기가 20 mesh일 때 탈수가 가장 양호하게 진행되어 완충소재의 제조 시간 단축이 가능해 졌다. 따라서 실제 공정에서 금망의 크기가 금망의 오염, 탈수시간, 세척 등에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 와이어의 메시 수가 작은 것을 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단되었다.

2.2 감압성형의 원리(principal theory of vacuum forming)

현재 난분해성 재료인 포장용 스티로폼의 대용으로 가장 널리 사용되고 있는 친환경 소재는 펄프 몰드(pulp mold)이다. 그림 27의 (가)에 나타나 있는 바와 같이 펄프 몰드가 가장 처음 사용된 용도는 계란 트레이를 통해서였고, 이후 용도가 다양화되면서 그림 27의 (나)와 같이 산업용품 및 기타 소비재 제품 포장에 널리 사용되고 있다. 그림 27에 나타나 있는 바와 같이 펄프 몰드는 포장 물품 혹은 용도에 따라 금형을 제작한 뒤 해리된 일정량의 폐지 현탁액을 성형상자(forming box)에 부은 후 펄프 현탁액에 함유되어 있는 과량의 물을 감압(suction press)과 함께 감압 탈수 및 건조시켜 만든 성형품을 말한다. 펄프 몰드 자체는 매우 치밀한 섬유 조직(dense structure)으로 되어 있어 완충력이 없고, 금형을 통하여 펄프 몰드에 일정한 크기의 유리 공간(free space)을 형성하도록 만들어야만 외부 충격이나 진동이 포장 물품에 직접 전달되는 것을 방지할 수 있는 완충능력을 발현시킬 수 있다.

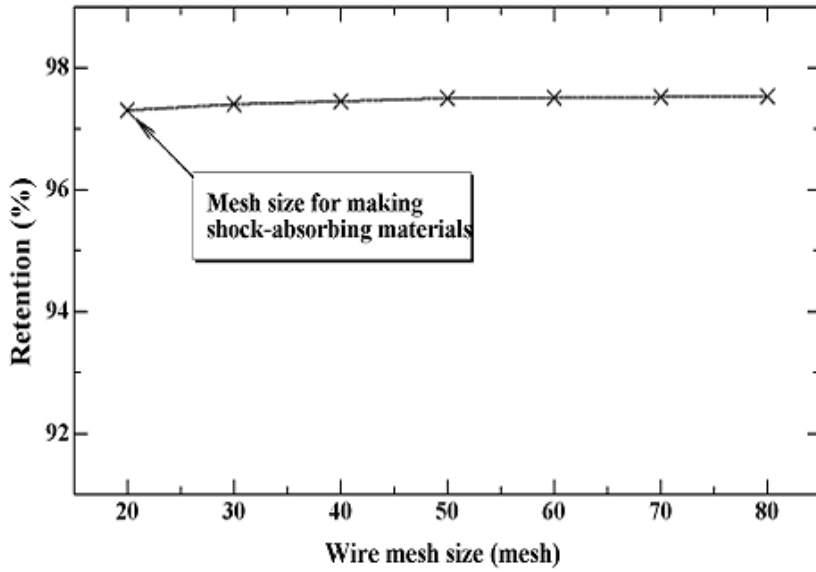
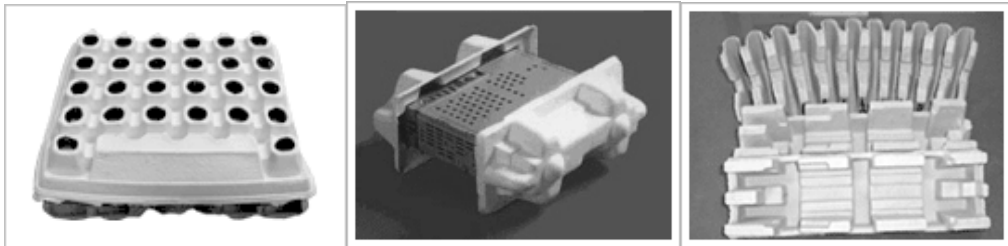


그림 26. 와이어의 메시(mesh) 크기에 따른 완충소재의 보류도 변화: 섬유 보류가 와이어의 크기에 따라 큰 차이가 없기 때문에 완충소재 제조 동안 탈수가 빨리 이루어지는 20 mesh 크기의 와이어를 40 mesh 밑의 하부 와이어로 사용하였다.



(가) 계란판 트레이

(나) 산업용품 포장재

그림 27. 펄프 몰드로 제조된 포장 완충소재의 일례.

펄프 몰드 제조 공정과는 달리 감압완충소재 제조 원리는 성형단계에서 압착과정을 생략하고 감압을 이용하여 펄프 현탁액에 포함된 과량의 물만을 제거하는 과정을 포함한다. 그림 28과 같이 3% 농도의 펄프 섬유 현탁액에 결합보조제로 사용된 전

분을 혼합하고, 이것을 성형상자에 넣고 감압탈수시켰다. 감압탈수 및 성형된 완충소재는 성형상자의 하부에서 강제 송풍되는 고온(약 200℃)의 열풍을 이용하여 완충소재 조직 내부에 남아있는 수분을 제거하고, 이것을 다시 건조기를 통과시켜 대기 중의 함수율까지 건조시켜 완충소재를 완성하였다.

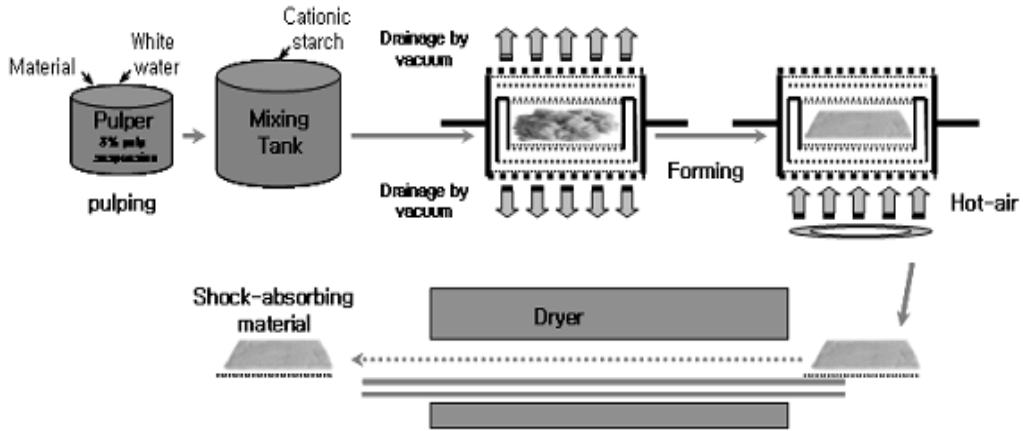
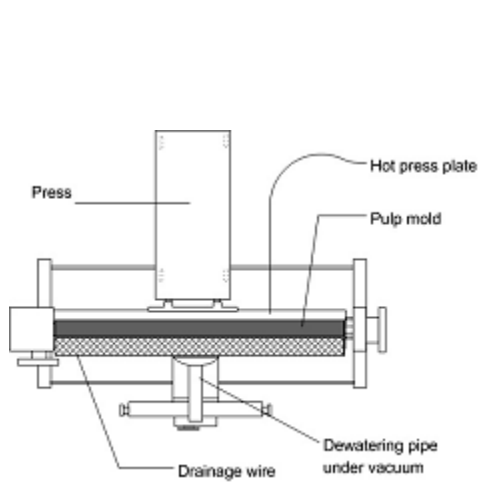
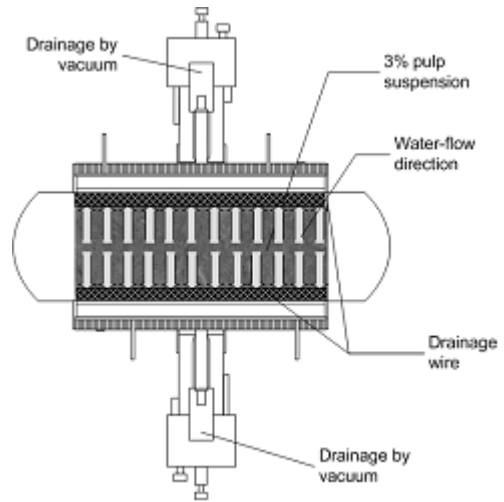


그림 28. 포장 완충소재의 제조방법 모식도.

본 연구에서 적용된 완충소재의 제조 원리는 펄프 몰드의 제조 원리와 유사하지만 한 가지 점에서 차이가 있다. 성형박스에 펄프 현탁액을 투입한 후 그림 29의 (가)와 같이 상단 압착 플레이트(hot press plate)에 의한 압착 과정을 생략하고, 그림 29의 (나)에서 보는 것과 같이 상하 양방향으로 감압 탈수시켜 완충소재의 구조가 비용적(bulk)이 큰 상태(즉, 밀도가 낮은 상태)가 되도록 성형하는 방법이다. 양방향으로 감압 성형된 완충소재의 조직에서는 펄프 몰드와는 달리 양방향 감압처리(dual vacuuming)를 통하여 완충소재의 내부 조직으로부터 물이 제거되면 이곳에서 섬유간 수소결합(interfiber bonding)이 일어나는 것을 최대한 억제시켜 많은 수의 유리 공간이 존재하게 한다. 완충소재의 내부구조에서 섬유간 수소결합이 억제된 곳들은 그림 30의 (가)와 (나) 같이 느슨한 섬유 네트워크를 형성하기 때문에 완충소재의 조직 내부에 많은 작은 공간들(voids)로 남게 되고 이것이 외부 충격, 진동, 혹은 소음 등을 흡수하는 기능을 하게 된다.

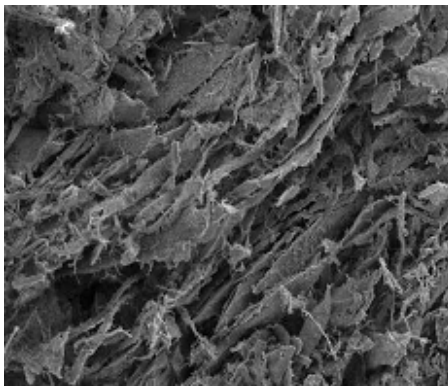


(가) 펄프 몰드 제조 원리

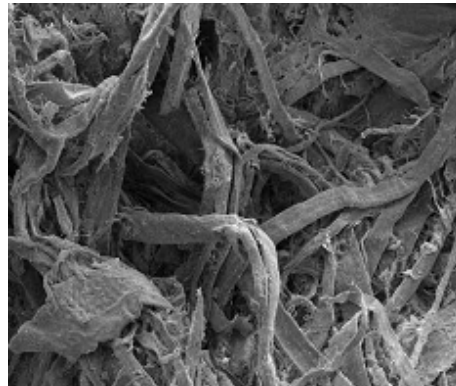


(나) 감압성형 원리

그림 29. 펄프 몰드 제조 원리와 양방향 감압 성형 원리.



(가) 완충소재의 표면 단면



(나) 완충소재의 중앙 단면

그림 30. 양방향 감압 성형된 완충소재의 내부 구조: 완충소재의 단면에 분포하고 있는 섬유들이 느슨하게 결합되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

성형상자에서 3% 폐재 펄프 현탁액을 넣은 후 탈수 및 건조시켰을 때 평판형 완충소재는 체적이 감소된다. 전체적인 크기(가로×세로)는 감소하지 않고 전체적으로 두께 감소가 일어나면서 체적이 줄어들게 된다. 이러한 상태에서 과도한 감압 혹은 압착(press) 과정이 적용되면 큰 고밀화(densification) 현상이 일어나 완충소재의 조직 내부로부터 공극들이 폐쇄됨으로써 완충 능력(shock-absorbing ability) 혹은 내충격성이 사라지게 된다. 탈수 및 건조 동안에 불가피한 두께 감소로 인한 체적 변화를 피할 수는 없지만 감압 적용 시간의 적절한 조절을 통하여 완충소재의 조직 내부에서 공극이 사라지게 않게 하는 것, 즉 밀도를 최소한으로 유지하는 것이 완충소재의 핵심 제조 원리가 된다. 만약 두께가 작은 완충소재를 제조할 때에는 성형박스에 투입되는 펄프 지료 현탁액의 투입량을 줄여서 제조할 수 있다.

그림 31은 완충소재 제조에 사용된 감압성형장치의 설계도면을 나타낸다.

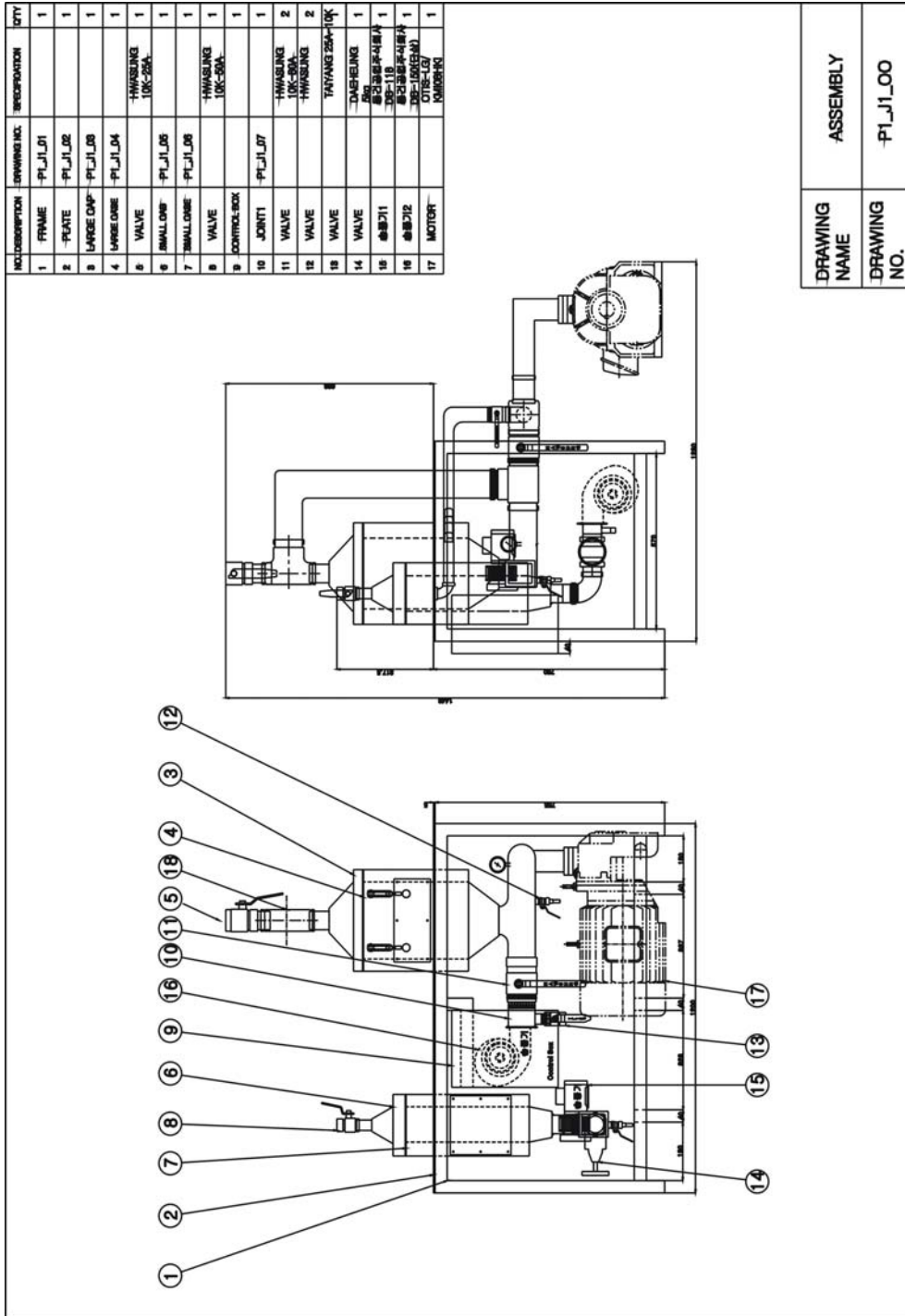


그림 31. 완충소재 제조용 감압성형장치의 설계도면.

3. 완충소재 제조용 폐잔재 및 소경목 시료

3.1 원료 펄프화

감압성형방식을 이용한 완충소재 제조를 위한 폐잔재는 경상대학교 덕산(지리산) 학술림의 직경이 15 cm 미만의 침엽수류(*Pinus rigida*, *Pinus densiflora*), 참나무류(*Fagus multinervis*, *Quercus acutissima*, *Quercus variabilis*) 등을 이용하였다. 이들 침엽수류, 참나무류 폐잔재를 펄프화하기 위하여 약 2.5×2.5×10 mm 크기로 칩핑한 후 다이제스터(대일기공)에서 120-140℃, 3-4 kg/cm²로 2분간 예열한 후 싱글 디스크 리파이너(대일기공)에서 2분간 해섬하여 열기계펄프(Thermomechanical Pulp, TMP)를 제조하였다. 폐잔재의 해섬시 해섬의 정도에 따라 섬유형상에 큰 영향을 주기 때문에 섬유의 여수도가 약 650-700 mL CSF 되도록 해섬하였다.

현재 가장 널리 사용되는 완충소재인 발포 스티로폼은 흰색을 띠고 있어 소비자들에게 시각적으로 각인되어 있는 상태이다. TMP 펄프도 완충소재의 원료로 투입되기 전에 표백 처리를 한 후 완충소재를 제조하여 표백 전후의 물성을 비교하였다. 폐잔재 TMP의 표백 조건은 표 27과 같은데, 환경적 및 경제적 영향을 최소화하기 위하여 알칼리 및 과산화수소 표백만을 실시하였다.

표 27. 폐잔재의 표백 조건

	표백 약품	약품 첨가량 (%) [*]
표백	NaOH	2.0
	H ₂ O ₂	2.0
처리 조건	표백 온도: 80℃,	
	pH 7.5	
	표백 시간: 60 min	
	표백 농도: 1%(v/v)	

* 첨가량은 펄프 섬유의 전건 중량(g) 기준.

또 건물 내부의 리모델링이나 인테리어 작업이 진행될 때 상당한 양의 폐MDF가 발생한다. 이러한 폐MDF의 재활용 차원에서 이를 Wonder Blender를 이용하여 건식해섬한 후 완충소재를 제조하여 성형성, 완충효능 등을 분석하였다. 그림 32의 (가)는 폐재 및 소경재로부터 만들어진 TMP 펄프 섬유와, (나)는 TMP 펄프 섬유를 표백한 섬유, 그리고 (다)는 폐MDF가 건식해섬된 섬유를 보여준다.



(가) 폐재 TMP



(나) 폐재 BTMP



(다) 폐MDF

그림 32. 완충소재 제조에 이용된 폐재 섬유 원료들.

3.2 완충소재 제조 과정

완충소재 제조를 위한 실험 과정은 그림 33에 기술된 순서에 따라 진행되었다. 먼저 폐잔재 및 소경재를 다이제스터와 싱글디스크 리파이너를 이용하여 펄프화한 후 이를 3%농도로 희석하였다. 폐잔재를 이용하여 제조된 TMP의 경우 리그닌이 다량 함유된 열기계펄프 자체의 강직함 때문에 수소결합만으로는 섬유간 결합이 매우 약하기 때문에 성형이 매우 어렵다. TMP 섬유의 결합 성능을 보조하기 위하여 치환도(DS) 0.06인 양이온성 전분(삼양제넥스)을 섬유의 전건중량에 대하여 0%, 10%, 20% 그리고 30% 첨가하였다. 전분은 완충소재 성형상자에 투입하기에 앞서서 약 80-85℃ 온도에서 20-25분간 호화(gelatinization)시킨 후 1%로 희석하여 사용하였다. 전분이 혼합된 펄프 현탁액은 감압성형장치의 성형상자에 투입되기에 앞서서 교반기를 이용하여 800 rpm에서 1분간 해리시켜 이용하였다. 전분이 배합된 3% 지료는 전건중량 약 50 g, 75 g, 그리고 100 g이 되도록 약 1,670 mL, 2100mL, 그리고 3,330 mL를 취하여 감압성형장치에 넣은 후 평판(사각) 완충소재를 제작하였다. 감압 시간에 따른 완충소재의 물성 변화를 알아보기 위하여 감압 시간을 10-60 초 범위(10초 간격)에서 변화시켜 완충소재를 제조하였다.

성형된 완충소재는 약 150℃의 온도로 가열된 공기를 송풍기를 통하여 완충소재 쪽으로 10분간 강제 송풍시켜 완충소재에 잔류되어 있는 과량의 수분을 제거한 후 건조 오븐(drying oven)에서 대기상태의 함수율(5-8%)까지 건조시켰다.

건조된 완충소재의 표면은 약한 수소결합에 의하여 결합된 미세섬유들로 구성되어 있기 때문에 사용 중 접촉 혹은 마찰로 인하여 지분의 형태로 쉽게 탈리되는 경향이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 호화된 1% 전분용액으로 완충소재의 표면을 3회 반복 표면사이징(surface sizing) 처리를 한 후 완충소재의 물성을 측정하였다.

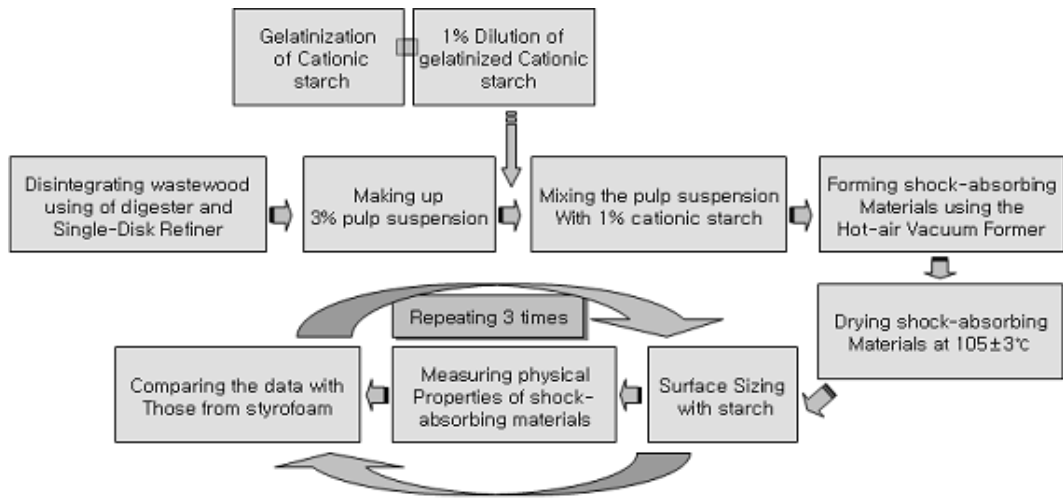


그림 33. 폐잔재를 이용한 완충소재 제조 과정.

3.3 완충소재의 제조 조건

완충소재 제조를 위한 폐잔재 제조 조건을 표 28에 정리하였다. 감압 지속 시간 (suctioning time)에 따른 완충소재의 물성 변화를 알아보기 위하여 각각 양이온성 전분의 첨가량을 10%로 고정하고, 폐잔재 TMP 현탁액에 대하여 10-60초의 범위(10초 간격)에서 감압 시간을 달리하여 완충소재를 제조하였다.

폐잔재 TMP에 대한 양이온성 전분의 적정 혼합비율과 양이온성 전분의 첨가에 따른 완충소재의 물성 변화를 알아보기 위하여 양이온성 전분 첨가량을 0% 부터 30%까지 2% 간격으로 증가시켜 첨가하였다. 양이온성 전분이 첨가될 때 일정한 조건 하에서 완충소재를 제조하기 위하여 감압탈수 시간(suction time)은 10초로 고정하였다.

폐잔재 TMP로 제조되어진 완충소재의 표면은 약한 수소결합에 의하여 결합된 미세섬유들로 이루어져 있으므로 건조 오븐을 이용하여 대기상태의 함수율(5-8%)까지 건조 후 호화된 1% 전분용액으로 완충소재의 표면을 1회, 2회, 그리고 3회씩 물을 이용하여 표면사이징 처리를 한 후 각각의 물성변화를 측정·비교하였다.

폐잔재를 이용하여 완충소재를 제조 후 제품화 하였을 경우 표백공정이 완충소재의 물성에 미치는 영향을 고려하여 NaOH 와 H₂O₂를 각각 2% 첨가 후 pH(7.5)에서 1 hour 동안 반응시켜 표백 TMP (BTMP)로 제조 되어진 완충소재와 미표백 TMP로 제조 되어진 완충소재의 백색도와 탄성계수를 비교 분석 하였다. 각각의 완충소재에 대한 물성 비교를 위하여 양이온성 전분을 10%, 20%, 그리고 30% 첨가하였다.

폐MDF를 원료로 하여 완충소재를 제조하기 위해서는 감압탈수 시간을 10초로 고

정하여 양이온성 전분을 10%, 20%, 그리고 30% 첨가하여 물성을 비교·비교 분석하였다.

표 28. 사각완충소재 제조를 위한 운전조건

		감압시간 (sec)	양이온성 전분 (%)	표면사이징 횟수 ²⁾	NaOH, H ₂ O ₂ (%) ³⁾
원료 ¹⁾	TMP	10, 20, 30, 40, 50, 60	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30	0, 1, 2, 3	
	BTMP	10	10, 20, 30		NaOH 2% H ₂ O ₂ 2%
	MDF	10	10, 20, 30		

※ 모든 첨가량(%)은 원료의 전건 중량을 기준으로 하였다.

¹⁾ 원료는 TMP, BTMP, 그리고 MDF를 사용하였다.

²⁾ 표면사이징 처리는 TMP에만 적용되었다.

³⁾ 표백은 TMP에만 적용되었다.

그림 34는 완충소재의 표면사이징 처리에 대해 간단히 모식화한 그림이다.



그림 34. 완충소재의 표면사이징 처리 과정.

완충소재의 재활용에 따른 물성 변화를 알아보기 위하여 TMP 원료 중량의 10%에 해당하는 양이온성 전분을 첨가하여 제조한 완충소재를 2회까지 리사이클링 처리를 한 후 각 처리 횟수마다 완충소재의 겉보기밀도 및 탄성계수를 측정하여 물성 변화를 알아보았다.

완충소재에 내수성을 부여하기 위한 발수 처리를 위하여 반응성 사이즈제인

Alkenyl Succinic Anhydride (AKD)를 TMP 섬유에 전건 중량에 대하여 0-1.0%까지 첨가하여 완충소재를 제조하였고, 발수성을 측정하기 위하여 접촉각 측정기(AMS-2001, 미래로시스템)를 이용하여 접촉각을 측정하였다.

3.4 감압성형된 완충소재의 물성 측정

완충소재의 물성을 측정하기 위하여 수분증발율(drying rate), 백색도(brightness), 겉보기밀도(apparent density), 압축강도(compressive strength), 복원율(restoring ratio), 탄성계수, 그리고 공극률(porosity)을 측정하였다.

수분 증발율은 스위스 Ohaus사의 자동함수율 측정기(MB45)를 RS232 케이블을 통하여 PC의 하이퍼터미널에 연결하여 감압성형장치에 제조된 완충소재의 수분 제거속도를 측정하였다. 완충소재의 백색도는 미국 Technidyne사의 Brighterimeter Micro S-5/BOC를 이용하였다.

완충소재의 겉보기밀도를 계산하기 위해서 버니어캘리퍼스를 이용하여 완충소재의 두께를 측정한 후 완충소재의 상하 면적의 평균값을 계산하였다. 그 후 아래의 계산식 (5)에 의하여 겉보기밀도를 계산하였다.

$$Apparent\ Density(g/m^3) = \frac{W}{T \times \frac{(A_t + A_b)}{2}} \quad (식\ 5)$$

W = Weight (g) of a shock-absorbing material

T = Thickness(m) of a shock-absorbing material

A_t = Area(m²) of a top side of a shock-absorbing material

A_b =Area(m²) of a bottom side of a shock-absorbing material.

폐잔재 섬유를 이용하여 제조되어진 완충소재의 물성을 측정하기 위하여 물성 분석기(TA-XT2i, Stable Micro Systems Ltd.)를 사용하였다. 만약 완충소재가 포장 물품을 보호하기 위해서는 외부 충격을 흡수하는 뛰어난 완충력을 가져야 하므로 매우 낮은 압축강도를 지녀야 한다. 또한 충격 흡수 후 완충소재의 완충 효능을 어느 정도 유지하기 위해서는 자체 복원력도 우수해야 하기 때문에 적정 범위의 탄성계수도 가져야 할 것으로 보인다. 따라서 팽연소재의 물성 분석에 사용된 항목들은 복원율, 압축강도(kgf), 탄성계수(kPa)였다. 압축강도 측정은 평판 압축실험으로 수행하였으며, 하중 재하속도(loading speed)는 ASAES368.3에서 규정하고 있는 2.530 mm/min의 범위 내인 30 mm/min으로 하였다. 탄성계수를 산출하기 위하여 적용된

공식은 식 (3)을 이용하였다.

3.5 완충소재의 공극률 계산

완충소재의 공극률을 계산하기 위해서 완충소재를 다음과 같은 방법으로 먼저 완충소재를 포매(embedding)시켰다. 에폭시의 일종인 에폰 812 (Epon 812, Polysciences, Inc.)의 경우 경화제는 무수도데세닐숙신산(DDSA, Dodeceny Succinic Anhydride, Polysciences, Inc)과 무수메틸나딕(MNA, Methyl Nadic Anhydride, Polysciences, Inc.)이 사용 되고 경화가속제로는 DMP-30 (*bis*-Dimethyl aminomethyl phenol, Polysciences, Inc.)을 사용하였다. 에폰 812 100 g에 무수도데세닐숙신산 112 g을 혼합한 A액과 에폰 812 100 g에 무수메틸나딕 75 g을 혼합한 B액을 만들어 서로 혼합하여 사용하였다. A액이 많이 들어가면 경화에폭시가 부드럽게 되고 B액이 많이 들어가면 에폭시가 단단히 경화한다. 두 액을 그 혼합비대로 조절한 후 경화반응(중합반응)을 촉진시키기 위하여 두 혼합액의 1.5-2%에 해당하는 가속화제 DMP-30을 첨가하여 균일하게 혼합하였다. 가속화제를 첨가한 후 감압오븐을 사용하여 차례로 35℃에서 12시간, 45℃에서 12시간, 마지막으로 60℃에서 48시간동안 각각 중합이 일어나도록 방치하였다(UV광을 조사하여 중합시켜도 된다). 포매된 완충소재는 미국 Reichert사에서 제조한 회전형 마이크로톰(HistoSTAT-820)을 이용하여 약 20 μm 두께의 미세 박편을 만든 후 1% Toludine Blue 용액에서 염색시켰고, 염색된 박편을 Olympus의 광학현미경을 이용하여 단면 사진을 촬영하였다(그림 35의 가, 다). 완충소재의 단면 사진 영상은 Carl Zeiss사(Germany)의 Axiovision 4.4 화상분석프로그램에 의하여 이진화 영상(그림 34의 나, 라)으로 전환된 후 검은색 영역에 해당하는 면적이 공극(voids)에 해당되므로 화상분석 프로그램에 의하여 이들 면적을 구한 후 완충소재의 공극률을 계산하였다. 그림 35의 (나)와 (라) 같이 섬유(흰색 부분) 외의 공간을 섬유가 채워지지 않은 공극으로 간주할 때 완충소재의 공극률(porosity)은 전체 면적으로부터 섬유가 채워지지 않은 공간(공극)의 면적으로 나누어 아래의 식 (6)과 같이 계산할 수 있다:

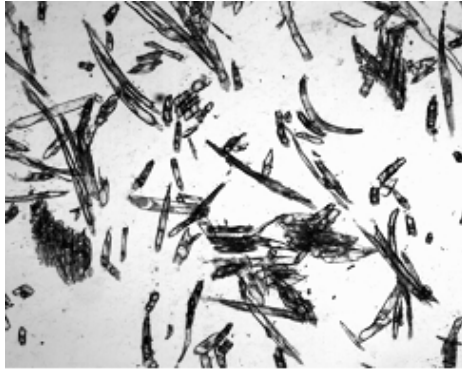
$$Porosity(\%) = \frac{A_t - A_s}{A_t} \times 100 \quad (\text{식 } 6)$$

$A_t - A_s$ = Area occupied by voids.

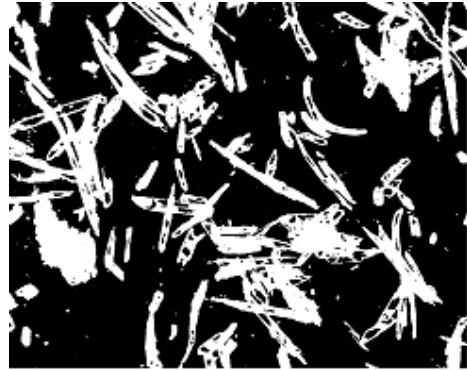
A_t = Total area.

실제의 공극률은 부피 개념이지만, 20 μm 두께의 단면은 화상분석시 영상이 평면

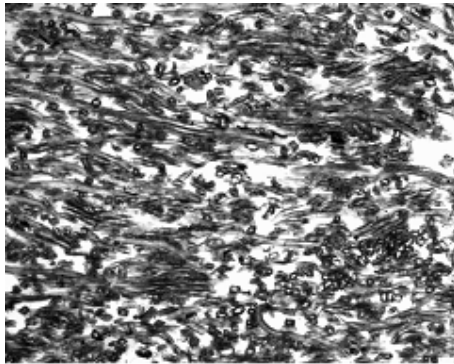
으로 인식되기에 공간(공극)에 대한 면적으로 계산되어진다.



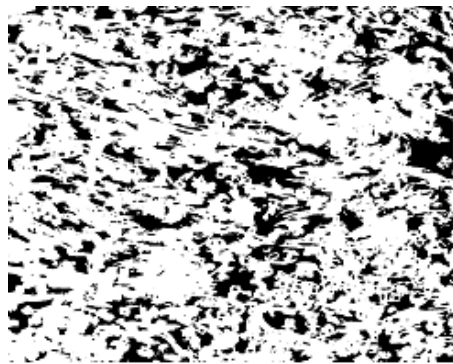
(가) 염색된 완충소재의 박편 시편(TMP)



(나) 이진화 처리된 박편 시편(TMP)



(다) 염색된 완충소재의 박편 시편(MDF)



(라) 이진화 처리된 박편 시편(MDF)

그림 35. 이진화 처리(binary processing)된 완충소재의 박편 영상($\times 40$).

3.6 완충소재의 단열 실험

열기계펄프 섬유로 만든 완충소재의 열전도도를 측정하기 위해 본 연구에서는 ISO 8894-1,2에 근거하여 쾌속 열전도도 측정기(QTM-500, Kyoto Electronics)와 열선이 부착된 표준 Probe (PD-13, Kyoto Electronics)를 사용 하여 열전도도를 측정하였다. 열전도 측정기는 0.013-12 W/m℃의 측정범위 및 ±3%의 재현성을 갖는다. 프로브의 크기는 가로 95 mm, 세로 40 mm이며 시료 표면과 직접 접촉하는 프로브의 표면은 재질은 유리섬유(glass fiber)이고 표면의 폭이 1 mm인 콘스탄탄(constantan) 열선이 부착되어 있다. 열전도도 시험을 위해 10%의 양이온성 전분이 첨가된 TMP 완충소재를 제조하여 시편을 담는 몰드에 빈공간이 생기지 않도록 100×50×20 mm의 크기로 정확히 완충 소재를 절단하여 열전도도를 측정하였다. 또한 측정 시스템 주변의 온도변화에 의한 측정 결과의 오차를 최소화하기 위해서 실내 온도를 20-23℃로 일정하게 유지 하였으며 아래의 식 (7)에 근거하여 전용 프로그램(SOFT-QTM5EW)으로 열전도도를 산정하였다.

$$\lambda = K \cdot R \cdot \ln(t_2/t_1) / (T_2 - T_1) - H \quad (\text{식 7})$$

λ : 열전도율(W/m · K)

K, H : Probe 정수

R : Probe 히터의 단위 길이당 전기저항(Ω /m)

I : 가열전류(A)

t_1, t_2 : 전류를 인가한 후부터의 시간(s) ($t_1 = 30, t_2 = 60$)

T_1, T_2 : t_1, t_2 에서의 온도(℃).

3.7 완충소재의 낙하 시험

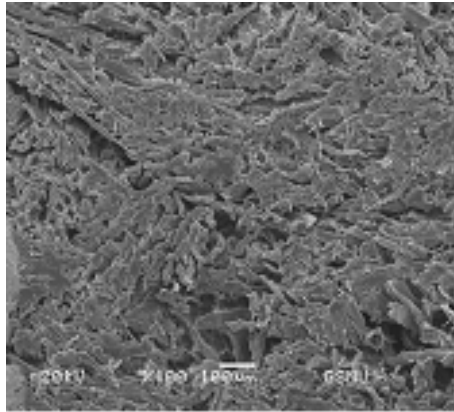
완충 소재의 가장 큰 목적은 외부 충격으로부터 제품을 보호하는 것이다. 이러한 충격은 주로 낙하 충격 시 발생되고, 이러한 충격력에 의해 제품의 파손 및 성능 저하가 초래된다. 완충재를 포장재로 사용하였을 경우 낙하 시 충격에 견딜 수 있는 정도를 측정하기 위해 완충소재의 내부에 유리잔을 넣은 후 KS A 1011 포장 화물의 낙하시험 중 자유낙하 시험을 통해 완충재와 EPS (Expanded Polystyrene, 발포 스티로폼)의 성능을 비교 분석하였다. 자유낙하 시험 때는 모서리 낙하, 측면 낙하, 그리고 평면 낙하방식을 적용하여 완충소재의 파손 유무 및 유리잔의 상태 등을 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

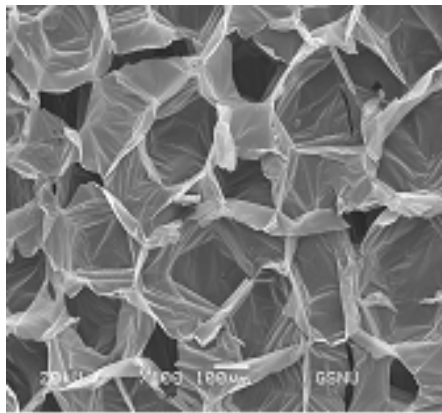
4.1 완충소재의 단면 형상

완충소재는 외부로부터 충격이 가해졌을 때 그 충격을 흡수하여 포장된 물품에 손상이 가해지지 않도록 해야 한다. 충격 흡수를 위해서는 완충소재의 내부 구조가 매우 큰 다공성 구조(porous structure)를 지녀야 하고, 결국 밀도가 낮은 구조(bulky structure)가 되어야 한다. 현재 유통되어지고 있는 몰드 형태로 만들어진 완충소재의 경우 그 조직이 매우 규칙적이면서도 치밀하여 외부 충격을 흡수하는 것이 매우 어렵다(그림 36의 가 참조). 즉, 펄프 몰드는 외부 충격이 그대로 포장물품에 전달되는 중간 매개체 역할을 하게 된다. 이에 반해 스티로폼은 그림 36의 (나)와 같이 외부 충격을 흡수하기 위해 98%이상의 공극을 가지고 있음을 확인 할 수 있다. 폐장재 섬유를 원료로 하여 제조되어진 완충소재의 경우 그림 36의 (다)에서 보는 바와 같이 펄프 몰드의 단면 조직과는 달리 내부 구조가 무질서하면서도 느슨하게 형성되어 수많은 공극(voids)들이 존재하므로 발포 스티로폼과 같이 유사하다.

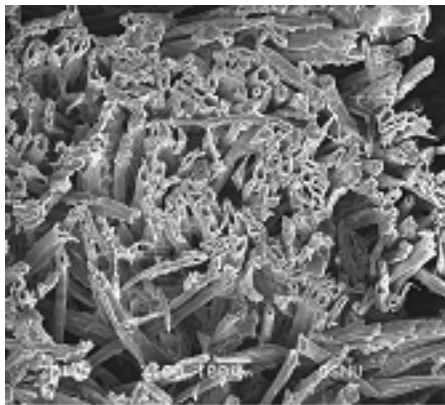
펄프 몰드와 매우 치밀한 내부 구조를 갖는 완충소재는 그림 37의 (가)에서 보는 바와 같이 외부 충격이 펄프 몰드에 가해지게 되면 펄프 몰드 자체가 그 충격을 흡수할 수 있는 구조를 가지고 있지 않기 때문에 외부에서 가해진 충격(F)과 동일한 힘(F')을 그대로 포장 물품에 전달하게 된다. 결국 포장 물품의 손상을 가져와 포장 물품의 최초 가치를 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 그러나 감압 성형된 완충소재에는 외부로부터 완충소재에 충격이 가해지더라도 그 충격을 흡수할 수 있는 여유 공간들이 형성되어 있기 때문에 그림 37의 (나)와 같이 외부충격의 대부분이 완충소재 내부에서 흡수·제거되어 최초에 가해진 힘(F)보다 훨씬 작은 힘(F')이 포장 물품에 전달되기 때문에 포장 물품에는 아무런 손상이 일어나지 않게 된다. 따라서 완충소재가 외부 충격으로부터 포장 물품을 보호하는 역할을 하게 된다.



(가) 펄프 몰드



(나) 스티로폼



(다) TMP 완충소재

그림 36. 펄프 몰드와 완충재의 단면 사진.

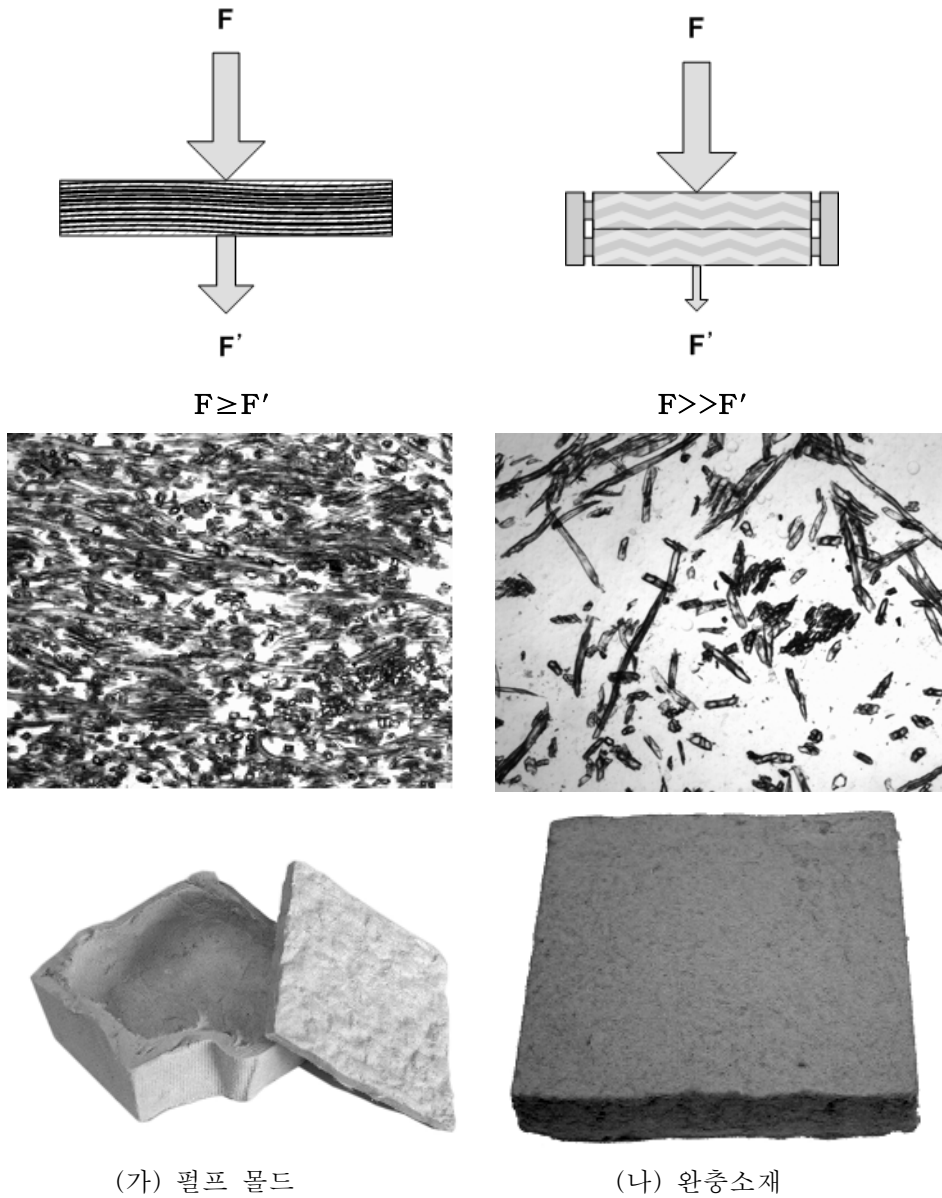


그림 37. 펄프 몰드와 완충소재에 가해진 외부 힘이 흡수 제거되는 기작. (가) 외부 힘 F 가 매우 치밀하게 형성된 펄프 몰드를 통과하면서 힘 F 가 조금 줄어들거나 그대로 전이된다. (나) 외부 힘 F 가 매우 느슨하게 형성된 완충소재를 통과하면서 힘 F 의 대부분이 완충소재의 내부에서 흡수되어 매우 작은 힘(F')만이 완충소재를 통과하게 되어 외부충격으로부터 포장 물품을 보호할 수 있다.

4.2 완충소재의 물성

4.2.1 감압탈수 시간에 따른 완충소재의 물성 변화

평판형 완충소재의 제조시 3% 농도의 펄프 현탁액을 성형상자(forming box)에 넣은 후 감압을 가하면 탈수(drainage)가 이루어진다. 감압을 통하여 펄프 현탁액에 포함된 수분이 많이 제거될수록 성형 후 건조시간을 줄일 수 있게 되고, 결국은 완충소재의 제조단가를 낮추는데 기여한다. 폐잔재로 제조한 TMP의 경우 감압탈수 시간이 증가하여도 일정 시간 이상이 되면 완충소재의 물성에는 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 감압 시간과 제조단가와 밀접한 관련이 있는 매우 중요한 공정의 일부이므로 세심한 주의가 요구된다.

완충소재가 효과적인 내충격성을 가지기 위해서는 일정 체적 내에 존재하는 섬유 양이 가능한 적어야 한다. 적절한 내충격성을 가지기 위해 완충소재의 밀도를 낮추게 되면 완충소재의 조직을 구성하는 폐지 섬유의 양도 적어지게 되고, 결국 제조단가의 감소에도 기여하게 되는 것이다. 그러므로 완충소재의 건조시간과 밀도는 완충소재의 경제성을 평가하는데 있어서 매우 중요한 요인으로 이용된다.

물리적 측면에서 완충소재로서의 기능을 평가하는데 있어서 가장 중요한 요소는 완충소재의 탄성계수(kPa)와 밀도(g/cm^3)이다. 표 29는 폐잔재로 만든 TMP를 성형할 때 완충소재의 형상유지에 필요한 양이온성 전분의 양을 10% 첨가하여 감압시간(suction time)에 따른 탄성계수(Elastic modulus)와 겉보기 밀도(apparent density)의 변화를 스티로폼(styrofoam)과 펄프 몰드(pulp mold)의 값들과 비교한 결과를 나타낸 것이다.

그림 38은 감압성형기의 감압시간 변화에 따른 완충소재의 겉보기밀도 변화를 표 29에 나타낸 결과에 근거하여 펄프 몰드와 스티로폼의 값과 비교하여 나타낸 것이다.

표 29. 감압 시간에 따른 완충소재의 물성 변화

Wastewood ¹⁾		Suction time (sec.)						
		0	10	20	30	40	50	60
TMP	Elastic modulus(kPa)		245.50	560.08	635.03	718.20	787.81	767.84
	S.D. ²⁾		22.34	15.75	12.98	5.75	3.15	17.34
	Apparent density (g/cm ³)		0.078	0.091	0.109	0.112	0.112	0.118
	S.D.		0.005	0.007	0.008	0.009	0.009	0.009
Styrofoam	Elastic modulus(kPa)	941.28	N/A					
	S.D.	26.90						
	Apparent density (g/cm ³)	0.028						
	S.D.	0.001						
Mold	Elastic modulus(kPa)	1767.79	N/A					
	S.D.	40.40						
	Apparent density (g/cm ³)	0.292						
	S.D.	0.012						

¹⁾ Wastewood means TMP, BTMP and MDF respectively.

²⁾ S.D. means standard deviation.

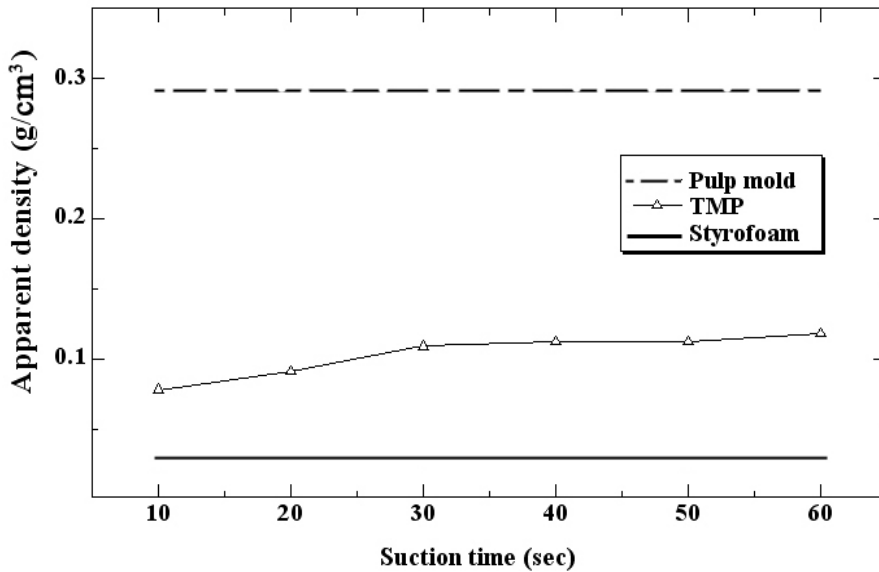


그림 38. 감압성형장치의 감압시간에 따른 완충소재의 밀도 변화(스티로폼과 펄프 몰드의 겉보기 밀도는 비교를 위한 단순 표기이므로 감압 시간과는 무관함).

완충소재를 제조할 때에는 경제적 측면을 고려하여 짧은 감압 탈수 시간 하에서 폐잔재 함유를 적게 사용하여 완충소재의 비용적이 큰 상태(bulky state)를 유지하는 것이 무엇보다 중요하다. 그림 37에서 볼 수 있듯이 감압 시간이 길어지면서 완충소재의 겉보기 밀도가 증가하지만 30초 이후부터 큰 증가폭을 나타내지 않았다. 이것은 완충소재를 구성하는 TMP 함유들은 표면에 많은 양의 리그닌을 함유하고 있기 때문에 이들 함유들 자체가 갖는 강직성으로 인하여 임계 수준 이상의 밀도에서는 함유들의 조직이 치밀해지는 경향이 거의 없는 것에서 그 원인을 찾을 수 있을 것 같다. 즉, 저진공 탈수(low vacuum) 하에서는 리그닌을 다량 함유한 함유들 사이에 Campbell력(Campbell's force)이 작용하지 않아 완충소재의 내부 조직이 치밀해지는 경향이 거의 없어지는 것으로 판단된다.¹⁵⁾ 따라서 TMP 함유로 완충소재를 제조할 때에는 30초 이하의 감압시간이 적절한 것으로 판단되었다.

또한 발포 스티로폼의 밀도는 약 0.03 g/cm^3 정도로 펄프 몰드의 0.3 g/cm^3 에 비하여 10배 정도 작은 값을 보이고 있다. 반면에 폐잔재 TMP로 만든 완충소재는 감압 시간의 변화에 따라 $0.08\text{-}0.12 \text{ g/cm}^3$ 의 밀도를 가짐으로써 스티로폼의 밀도에 비하여 2-4배 정도 더 크지만 펄프 몰드에 비해서는 훨씬 더 작은 상태로 제조된다.

15) Adamson, A and Gast, A.P., Physical Chemistry of Surfaces, 6th ed., John Wiley&Sons, NewYork (1997).

TMP 완충소재를 제조하는 방식이 발포 스티로폼이 갖는 제조 원리와는 차이가 있다는 점을 고려한다면 TMP 완충소재의 겉보기 밀도는 상당히 낮게 형성되어 있다는 것을 쉽게 유추할 수 있다. 펄프 몰드의 경우에는 제조 과정 중에서 감압압착 공정 동안에 섬유들의 고밀화가 진행되어 펄프 몰드의 밀도를 상당히 증가시켰다. 반면에 TMP 완충소재는 감압 단계에서 압착 과정이 생략되기 때문에 섬유들의 고밀화가 거의 진행되지 않은 상태로 성형이 이루어진다. 또한 원료로 사용되는 TMP 섬유들은 리그닌이 거의 제거되지 않은 상태로 사용되기 때문에 표백된 섬유들에 비하여 유연성이 매우 떨어진다. 섬유가 강직 할수록 섬유간 결합력은 느슨하게 되며 이러한 강직한 섬유를 원료로 제조되어진 완충소재는 외부로부터 충격이 가해졌을 때 그 충격을 흡수할 수 있는 다공성의 내부 구조(bulky structure)를 가지게 된다.

그림 39는 폐잔재 TMP로 제조된 완충소재의 탄성계수를 스티로폼의 탄성계수와 비교하여 나타낸 그래프이다. 완충성능을 평가하는데 있어서 탄성계수가 지나치게 높게 나타나면 외부 충격을 포장 물품 쪽으로 전이하는 힘이 커지는 것을 의미하기 때문에 포장 물품의 파손을 초래할 수 있다. 따라서 완충소재로 사용되기 위해서는 가능하면 탄성계수가 낮은 것이 유리하다. 겉보기 밀도의 결과와는 달리 감압탈수 시간이 증가하면서 완충소재의 탄성계수도가 지속적으로 증가하였다. 감압탈수 시간의 증가가 완충소재의 밀도 상승에는 큰 영향을 미치지 않지만 결합보조제로 첨가된 전분과 섬유들 사이의 결합력을 상승시켜 탄성계수를 상승시키는데 기여한 것으로 보인다.

또한 스티로폼(computer case)의 탄성계수가 약 941 kPa로 감압탈수시간에 관계 없이 TMP로 제조된 완충소재에 비하여 더 높은 값을 보였다. 펄프 몰드의 탄성계수(약 1768 kPa)에 비해서도 TMP 완충소재는 훨씬 작은 값을 나타내었다. 이는 폐잔재 TMP로 제조 되어진 완충소재가 펄프 몰드나 스티로폼보다 더 우수한 완충성능을 보유하고 있음을 의미하는 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 폐잔재 TMP로 제조 되어진 완충소재의 경우 TMP 자체가 리그닌을 다량 함유한 강직한 섬유로 이루어져 있기 때문에 저감압(Rough Vacuum)의 짧은 감압탈수 시간 동안에는 섬유간 결합에 필요한 Campbell력(Campbell force)이 강하게 작용하지 못하였을 것으로 판단된다.¹⁶⁾ 따라서 느슨한 결합 조직을 갖는 완충소재가 만들어져서 스티로폼보다 낮은 탄성계수를 갖는 완충소재가 만들어진 것으로 보인다. 그러나 완충소재의 탄성계수가 너무 낮게 되면 외부 충격에 의하여 완충소재의 구조 자체가 파괴되는 현상이 발생하여 포장물품에 손상을 초래할 가능성이 매우 높아진다. 따라서 최소한의 탄성계수를 유지하는 내부 구조가 되도록 성형이 이루어져야 하기 때문에 밀도에 큰 변화가 없다면 약 30초 정도의 감압탈수 시간을 적용할 필요가 있다.

감압시간에 따른 완충소재의 탄성계수 변화를 보면 감압탈수 시간은 10초가 가장

16) Adamson, A. and Gast, A.P. Physical Chemistry of Surfaces, 6th ed., John Wiley&Sons, New York, 1997.

이상적인 탄성계수를 나타내었다. 하지만 감압탈수에 의한 건조비용 절감 측면에서 경제적인 탈수 시간을 고려한다면 감압탈수 시간은 30초가 가장 적합할 것으로 사료되었다. 그러므로 감압탈수 시간을 늘려도 일정 시간 이후 결보기밀도의 증가나 탄성계수의 증가를 유발하지 않는 다하여 감압 시간을 늘리는 것은 탈수에 의한 완충소재의 건조비용 측면에서 동력소비만 늘어날 뿐 실질적인 건조비용의 감소는 얻을 수 없다.

폐잔재 TMP로 제조 되어진 완충소재는 원료 자체의 강직성으로 인해 적정 시간의 감압탈수와 함께 형상유지를 위한 결합보조제의 첨가량의 결정이 가장 중요한 부분이라 사료된다.

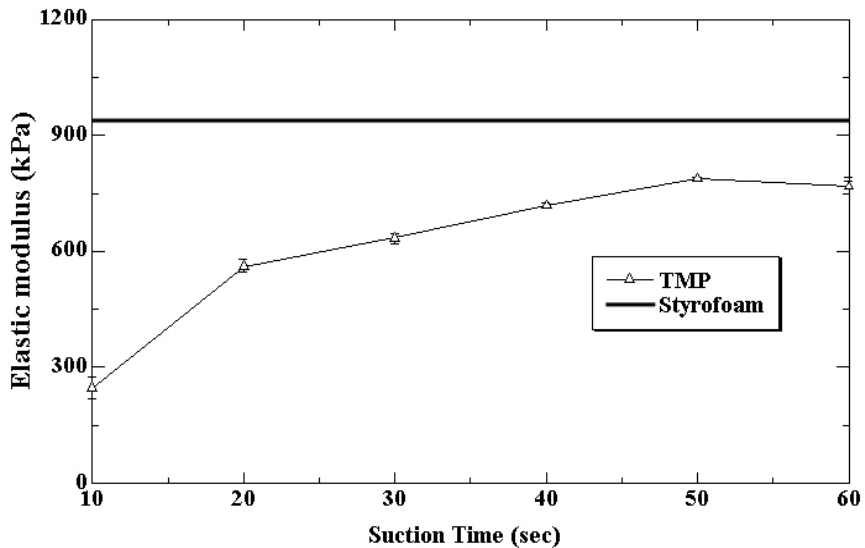


그림 39. 감압성형기의 감압시간에 따른 완충소재의 탄성계수 변화(스티로폼의 탄성계수는 비교를 위한 단순 표기이므로 감압시간과는 무관함).

4.2.2 전분첨가량에 따른 폐잔재 TMP, BTMP 및 MDF 완충소재의 물성 변화

전분(starch)은 제지 분야에서 가장 오랫동안, 그리고 가장 광범위하게 사용되어 온 건조지력증강제들(dry-strength additives) 중의 하나이다. 천연 전분은 섬유와 마찬가지로 음이온을 띠고 있기 때문에 보류 효율이 매우 떨어지기 때문에 사용이 빠르게 격감하였다. 따라서 전분에 양이온기가 도입된 새로운 변성전분의 필요성이 강하게 대두되었고, 그 대안으로 개발된 것이 양이온성 전분(cationic starch)이다. 양이온성 전분은 4가 암모늄기(quaternary ammonium group)를 갖는 에폭시 계통 약품을 사용하여 pH와 온도를 높여가면서 에테르화 반응을 일으켜 제조한다.¹⁷⁾ 이러한 양이온성 전분이 지료 현탁액(fiber suspension)에 투입되면 양이온성 전분 분자들이 섬유들 사이에 정착하여 섬유간 수소결합(interfiber bonding)을 증진시켜 종이의 강도를 향상시켜 주는 역할을 한다.

완충소재는 일반 종이류와는 달리 비용적(bulk)이 큰 상태로 제조되기 때문에 이웃한 섬유들 사이의 결합이 매우 약하게 이루어진다. 만약 이러한 상태로 완충소재가 제조된다면 완충성능은 상당히 개선될 것으로 기대할 수 있지만 완충소재의 형상이 쉽게 파괴되는 현상이 일어날 개연성이 매우 높다. 따라서 이러한 부분을 개선하기 위해서는 섬유간 수소결합을 향상시킬 수 있도록 건조지력증가제의 첨가가 필요하다. 그러나 적정 수준 이상의 건조지력증강제를 첨가하게 된다면 완충소재 조직의 과도한 고밀화(excessive consolidation)를 촉진시켜 완충성능의 손실을 초래하게 된다. 따라서 적정 첨가 수준을 결정하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단되어 양이온성 전분 첨가량에 따른 완충소재의 물성 변화를 알아보려고 하였다.

폐잔재 TMP를 원료로 하여 제조되어진 완충소재는 리그닌 발색단에 의해 백색도가 현저히 낮은 경향이 있어 백색도 향상을 목적으로 TMP 섬유들을 NaOH와 H₂O₂를 사용하여 표백 처리 하였다. 백색도 증진을 목적으로 표백 처리한 BTMP(Bleached Thermomechanical Pulp)로 만들어진 완충소재와 기존의 미표백 TMP를 원료로 하여 제조되어진 완충소재의 물성을 비교하기 위해 각각의 완충소재 대해 10%, 20%, 그리고 30% 양이온성 전분을 첨가하여 물성 변화를 알아보았다.

또한 현재 국내에서 생산되는 섬유판(fiberboard)의 대부분을 차지하는 중밀도 섬유판(Medium Density Fiberboard)을 재활용 하는 방안을 모색하고자 MDF를 이용하였다. 국내에서 생산되는 MDF는 그 원료가 목재를 비롯한 식물성 섬유상의 물질로서 이들을 해섬하여 열경화성수지 접착제를 첨가하거나, 그 밖의 접착성 소재를 혼합해서 열압, 경화시킨 목재 판상 제품을 말한다. 따라서 폐잔재를 해섬하여 제조되어진 TMP와 원료조성이 유사하므로 충분히 완충소재의 원료로 이용가능하다고 판단하여 폐MDF를 원료로 하여 완충소재를 제조하였다. 폐MDF를 재활용하기 위하여 건식해섬기(Blender)를 이용하여 TMP와 유사한 섬유상 원료를 제조하였다. 또한

17) Neimo, L., Papermaking Science and Technology Vol.4 "Papermaking Chemistry, PI and TAPPI Press, pp269-288 (1999).

폐 MDF와 폐잔재 TMP를 원료로 하여 완충소재를 제조할 때 각각의 완충소재 대하여 섬유유의 전건중량에 대하여 10%, 20%, 그리고 30%의 양이온성 전분을 첨가하여 물성 변화를 알아보았다.

표 30에는 스티로폼과 비교하여 결합보조제인 양이온성 전분을 사용함에 따른 폐잔재 TMP, BTMP, 그리고 폐MDF를 원료로 하여 제조되어진 완충소재의 겉보기밀도와 탄성계수 값을 나타내었다

표 30. 전분 첨가량에 따른 완충소재의 물성 변화

Wastewood ¹⁾		Cationic starch (%) [*]			
		0	10	20	30
TMP	Elastic modulus (kPa)		245.50	439.20	546.52
	S.D. ²⁾		22.34	14.29	17.69
	Apparent density (g/cm ³)		0.078	0.082	0.086
	S.D.		0.005	0.005	0.006
BTMP	Elastic modulus (kPa)		51.40	335.43	387.06
	S.D.		4.91	14.27	7.72
	Apparent density (g/cm ³)		0.084	0.089	0.093
	S.D.		0.005	0.006	0.007
MDF	Elastic modulus (kPa)		353.82	527.14	1142.7 ₂
	S.D.		7.99	34.33	58.67
	Apparent density (g/cm ³)		0.167	0.174	0.183
	S.D.		0.010	0.011	0.013
Styrofoam	Elastic modulus (kPa)	941.28	N/A		
	S.D.	26.90			
	Apparent density (g/cm ³)	0.028			
	S.D.	0.001			

¹⁾ Wastewood: TMP, BTMP and MDF

²⁾ S.D.: standard deviation.

^{*} Based on OD pulp weight

그림 40은 표 30에 나타나 있는 값들에 근거하여 양이온성 전분의 첨가량에 따른 완충소재들의 겔보기밀도 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 원료 종류에 관계없이 양이온성 전분의 첨가량이 증가하면서 겔보기밀도가 조금씩 증가하였다. 양이온성 전분이 섬유간 수소결합을 증가시켜 밀도 상승에 기여한 것으로 판단된다. MDF, TMP 및 BTMP 중에서는 MDF로 만들어진 완충소재가 가장 높은 밀도 값을 나타내었고, TMP로 제조된 완충소재가 가장 낮은 밀도 값을 나타내었다. MDF 섬유들은 건식 해섬 단계에서 만들어지는 미세 섬유들과 원료 중에 함유되어 있는 열경화성 수지와 이들 수지의 접착력 발현을 위하여 행해지는 열압 처리의 영향으로 건식 해리된 섬유들 중에서 미해리된 결속섬유가 다량 존재하게 되고, 이러한 결속 섬유들이 섬유 네트워크 내부에 보류되어 완충소재의 겔보기밀도를 상승시킨 것으로 보인다. 따라서 MDF를 재활용하여 완충소재를 제조하기 위해서는 접착제로 첨가된 요소수지나 페놀수지 등과 같은 합성수지를 일차적으로 제거하는 공정이 추가되어야 하기 때문에 제조단가의 상승을 유발할 수 있다. 따라서 완충소재를 제조할 때 폐 MDF를 재활용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단되었다.

BTMP로 만들어진 완충소재의 경우에는 BTMP 섬유들이 표백 단계에서 리그닌이 제거되어 섬유의 유연성과 함께 결합력을 증가시켜 겔보기밀도의 상승을 유도하였고, 결국 BTMP로 만들어진 완충소재의 겔보기밀도가 TMP로 만들어진 완충소재의 겔보기밀도에 비해서 전분 첨가량에 관계없이 다소 증가하였다. 그러나 상승의 폭이 매우 작고, 환경친화적 관점에서 표백 약품을 사용하여 환경친화적 완충소재를 제작하는 것은 이윤배반적인 논리가 적용되기 때문에 미표백 펄프의 상태로 사용하는 것이 더 바람직한 것으로 사료되었다.

BTMP, TMP 및 폐MDF로 제조된 완충소재의 겔보기밀도는 발포 스티로폼의 겔보기밀도 보다 모두 높게 나타났다. 폐MDF로 만들어진 완충소재의 겔보기밀도는 스티로폼에 비해서 약 6배 이상 높게 나타났고, 높은 밀도를 갖는 상태에서 포장 완충재로 사용되면 포장상자의 전체 중량을 상승시켜 물류비용의 상승을 유발할 우려가 매우 높다. 이에 반해 TMP로 제조된 완충소재는 스티로폼에 비하여 약 3배 정도 높은 밀도를 나타내었지만 밀도가 0.1 g/cm^3 미만이기 때문에 포장 중량의 상승에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 사료되었다. 따라서 미표백 TMP 섬유로 제조한 완충소재는 밀도가 스티로폼에 비해서 약 2-3배 정도 크기는 하지만 난분해성 포장 완충재인 발포 스티로폼을 대체할 수 있는 환경친화적 완충소재로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

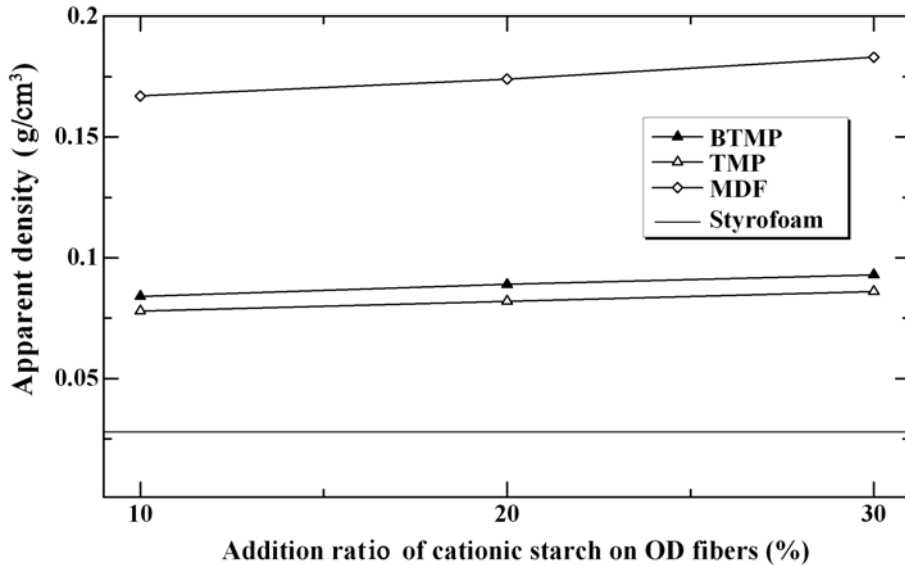


그림 40. 전분 첨가량에 따른 완충소재의 밀도 변화(스티로폼의 탄성계수는 비교를 위한 단순 표기이므로 전분 첨가량과는 무관함).

그림 41은 표 30에 나타나 있는 값들에 근거하여 양이온성 전분의 첨가량에 따른 완충소재들의 탄성계수 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 양이온성 전분 첨가 시에 완충소재에 대한 탈수 시간은 최적의 비용적을 위해 10초로 고정하였다. BTMP로 제조한 완충소재의 경우 양이온성 전분 10% 첨가 시에 탄성계수 값이 가장 작게 나타났으며, 전분 첨가량이 증가할 지라도 MDF나 TMP 보다는 낮은 탄성계수를 가졌다. 페MDF로 제조한 완충소재의 경우 양이온성 전분 첨가량에 관계없이 가장 높은 탄성계수를 보였고, 특히 30% 첨가시 발포 스티로폼보다도 높은 탄성계수를 나타내었다. 여기서 한 가지 주목할 점은 미표백 TMP에 양이온성 전분을 10% 첨가하였을 때 탄성계수가 스티로폼에 비해서 3배 정도 낮게 나왔다는 점이다. 탄성계수가 지나치게 낮으면 외부로부터 충격을 받았을 때 완충소재가 파괴되어 포장 물품에 손상을 초래할 가능성이 있다. 따라서 양이온성 전분을 일정량 이상 첨가하여 적정 수준 이상의 탄성계수를 유지할 필요가 있다. 그림 42의 결과를 통해서 보면 양이온성 전분의 구입가격(약 3000원/kg)이 그렇게 높지 않다고 본다면 양이온성 전분의 첨가를 통하여 완충소재 자체의 탄성계수를 유지하는 것이 바람직할 것으로 사료되었다.

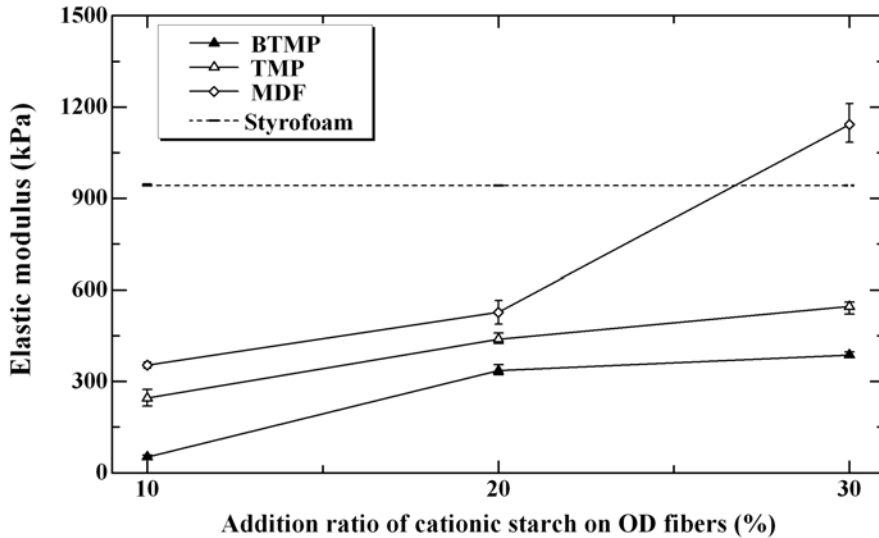


그림 41. 전분 첨가량에 따른 완충소재의 탄성계수 변화(스티로폼의 탄성계수는 비교를 위한 단순 표기이므로 전분 첨가량과는 무관함) .

TMP 섬유 현탁액을 성형상자(forming box)에 넣고 감압탈수를 행하면 섬유 현탁액에 들어있던 과량의 물(자유수)이 진공에 의하여 배수관 쪽으로 배출된다. 감압 탈수 후 두터운 판상형으로 성형된 완충소재에 잔류하고 있는 수분의 양은 완충소재의 건조속도에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 가능하다면 감압탈수 후 완충소재 내부에 잔류하고 있는 수분의 양은 적어야 한다. 표 31과 그림 42는 전분 첨가량을 달리 하였을 때 건조 직전의 완충소재에 잔류하고 있는 수분의 양을 자동함수율측정기(MS45 Moisture Analyzer)로 측정한 그래프이다. 잔류 함수율 측정 실험의 반복 횟수에 관계없이 전분 첨가량이 증가할수록 완충소재에 잔류하고 있는 수분의 양이 감소하였다. 전분 첨가량이 섬유의 전건중량에 대하여 20% 이상 과량 첨가하면 펄프 섬유의 셀룰로오스 분자가 가지고 있는 수산기(-OH)가 물과 결합하기에 앞서서 전분 분자의 수산기와 결합하여 섬유 분자들이 물과 결합할 수 있는 기회를 감소시킨다. 또한 전분 분자들이 물과 결합능력이 우수한(비표면적이 큰) 미세 섬유들을 응집시켜 물 분자와의 결합면적을 감소시키고, 동시에 완충소재의 내부 구조에 형성되는 공극의 수를 감소시켜 자유수가 잔류할 수 있는 공간이 줄어들게 된다. 이러한 원인으로 인해 전분 분자가 많이 첨가될수록 완충소재에 잔류하고 있는 수분의 양이 감소하는 것으로 사료되었다.

표 31. 전분 첨가량에 따른 완충소재의 함수율 변화

(단위: %)

전분 첨가량	반복 횟수	No.1	No.2	No.3
10%		83.26	84.26	82.51
20%		81.12	81.87	79.76
30%		78.66	80.80	76.91

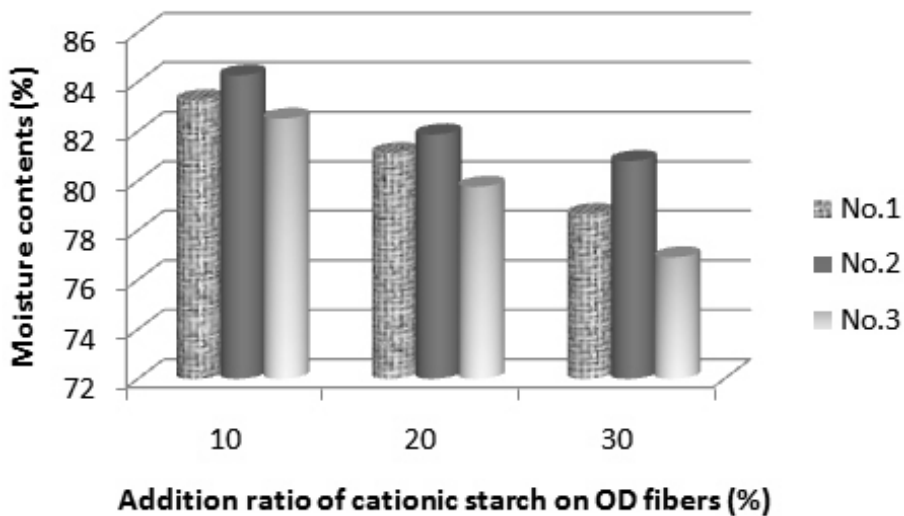


그림 42. 전분 첨가량에 따른 완충소재의 함수율 변화.

4.2.3 원료의 투입량 변화 따른 완충소재의 물성 변화

완충소재 제조시 경제적인 측면을 고려한다면 가장 우선시 되는 부분이 원료 투입량을 최소화 하면서 완충소재의 비용적용을 극대화 하는 것이다. 따라서 우선적으로 겔보기 밀도와 탄성계수 측정 결과를 바탕으로 결합보조제인 양이온성 전분은 10%, 감압탈수 시간은 10초로 고정하여 원료의 투입량을 변화시켜 완충소재를 제조한 후 탄성계수의 물성변화를 분석하였다.

표 32는 TMP 원료의 투입량을 50 g, 75 g, 그리고 100 g으로 조절하여 완충소재를 제조한 후 물성을 측정된 결과 값이다. 그림 43은 표 32에 나타나 있는 값들에

근거하여 원료의 투입량에 따른 완충소재들의 겉보기밀도 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

표 32. 원료의 투입량 변화 따른 완충소재의 물성 변화

Raw materials ¹⁾			Cationic starch (%) [*]		
			10	20	30
TMP	50 g	Elastic modulus (kPa)	98.07	160.84	222.29
		S.D. ²⁾	3.45	12.92	12.85
		Apparent density (g/cm ³)	0.079	0.080	0.081
		S.D.	0.005	0.005	0.005
	75 g	Elastic modulus (kPa)	207.70	263.05	334.71
		S.D.	5.40	20.43	3.34
		Apparent density (g/cm ³)	0.079	0.080	0.082
		S.D.	0.005	0.005	0.005
	100 g	Elastic modulus (kPa)	245.50	439.20	546.52
		S.D.	22.34	14.29	17.69
		Apparent density (g/cm ³)	0.078	0.082	0.086
		S.D.	0.005	0.005	0.006

¹⁾ Raw materials: TMP.

²⁾ S.D.: standard deviation.

* Based on OD pulp weight

그림 43에서 보는 바와 같이 TMP 섬유 함량의 첨가량을 달리하여 제조한 완충소재의 겉보기밀도는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 전분 첨가량이 증가하면서 TMP 100 g으로 만들어진 완충소재의 겉보기밀도가 완만하게 증가하는 것으로 나타났다. 섬유 고형분 함량이 많아지면서 전분과 섬유들이 서로 결합할 수 있는 확률도 높아지고, 이로 인해 섬유간 결합이 증가하면서 밀도 상승을 초래한 것으로 보인다. 결론적으로 완충소재를 구성하는 고형분 함량이 일정 수준(100 g) 미만이면 섬유 및 전분 첨가량에 따른 밀도 차이는 크게 나타나지 않는 것으로 확인되었다.

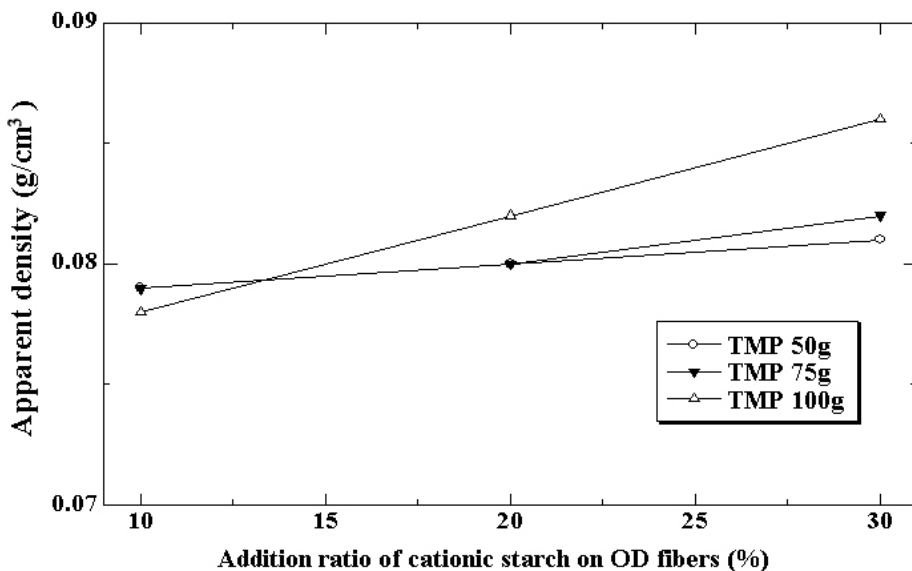


그림 43. 원료의 투입량 변화 따른 겉보기밀도 변화.

그림 44는 완충소재 제조시 투입되는 섬유의 중량을 변화시켰을 때 완충소재의 탄성계수 변화를 나타낸 것이다. 겉보기밀도의 결과와는 달리 투입된 섬유 중량 변화에 따른 탄성계수의 차이는 확연하게 나타났다. 섬유 투입량과 전분 첨가량이 증가할수록 탄성계수가 더 크게 나타났다. 일정 면적 및 두께를 갖는 완충소재를 만들기 위하여 고형분이 투입될 때 투입되는 고형분의 양이 많아지면 외부 충격(힘)으로 인한 변형에 저항하는 힘(즉, 탄성계수)도 커지게 된다. 따라서 100 g의 섬유를 이용하여 만든 완충소재가 가장 큰 탄성계수를 나타낸 것이다. 그러나 스티로폼의 탄성계수에 비해서는 여전히 낮은 값을 나타내어 전분과 같은 결합보조제를 첨가하여 완충소재의 물리적 성질을 증가시키는 방법은 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 부

원료의 첨가에 의한 탄성계수 증가 방법보다는 섬유 자체에 리파이닝과 같은 물리적 처리를 가하여 섬유 자체의 결합력을 향상시키는 방법이 유리할 것으로 판단되었다.

그러나 고휘분의 중량에 무관하게 전분 첨가량을 증가시키기에 따라 완충소재의 탄성계수가 증가하였지만, 100 g의 섬유로 제조한 완충소재를 제외하고는 그 증가폭이 크지 않았다. 전분 첨가에 따른 탄성계수 증가 효과를 보다 더 크기 위해서는 섬유 고휘분 중량도 더 많을 필요가 있음을 확인하였다.

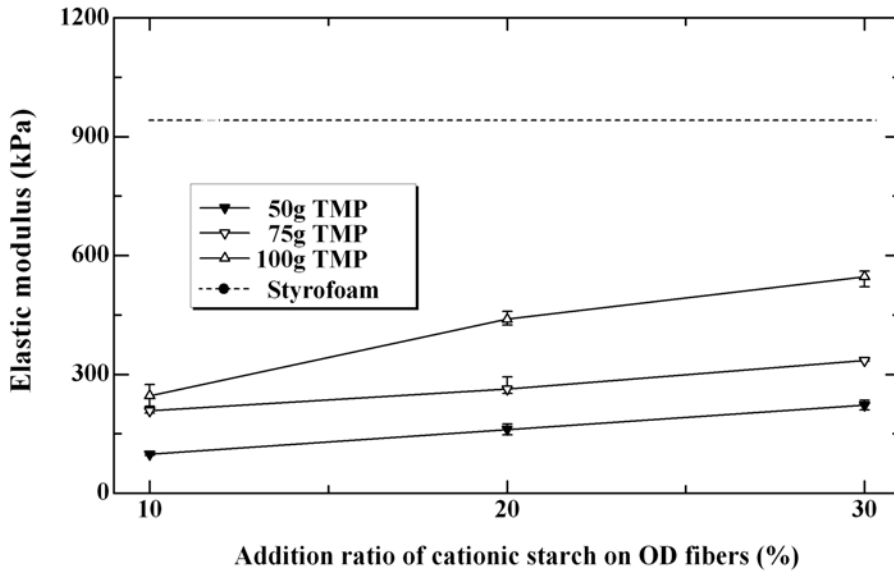


그림 44. 원료의 투입량 변화 따른 탄성계수 변화 (스티로폼의 탄성계수는 비교를 위한 단순 표기이므로 전분 첨가량과는 무관함) .

그림 43의 겉보기밀도 그래프와 그림 44의 탄성계수 그래프에서 주목할 점은 원료의 투입량이 감소할수록 양이온성 전분 첨가량에 따른 겉보기밀도 및 탄성계수의 변화 폭이 줄어든다는 사실이다. 이러한 결과를 놓고 판단해 볼 때 원료 투입량을 줄이는 것이 경제적 측면이나 완충소재의 물성 측면에서 매우 유리하겠지만, 원료의 투입이 75 g 이하일 경우에는 TMP 섬유가 갖는 고유 특성으로 인하여 완충소재의 형상을 유지하기가 매우 어렵다는 심각한 문제점을 나타내었다. 이는 미표백 TMP 섬유들은 리그닌이 다량 함유되어 있어 섬유 결합력이 매우 약하기 때문으로 적은 양의 TMP 섬유만으로 완충소재를 성형하기가 매우 어렵다. 따라서 완충소재를 구성하는 고휘분의 양을 줄이는 방안으로 리파이닝(refining)과 같은 기계적 전처리가 필

요할 것으로 판단되었다.

4.2.4 완충소재에 대한 표면사이징 처리 후 물성 변화

완충소재는 외부로부터 충격이 가해졌을 때 그 충격을 흡수하여 포장된 물품에 손상이 가해지지 않도록 해야 한다. 충격 흡수를 위해서는 완충소재의 내부 구조가 다공성 구조를 지녀야 하고, 결국 밀도가 낮은 구조가 되어야 한다. 하지만 다공성 구조에 의해 밀도가 낮아질 경우 완충소재의 형상 유지가 어려워질 가능성이 커진다. 이는 앞서 완충소재 원료 투입량을 줄일 경우에 발생하는 문제인 결합 면적의 감소가 원인이 될 수도 있지만, 가장 큰 문제는 외부의 충격이 완충소재가 가지고 있는 내부 결합력을 뛰어 넘을 경우 형상의 변형을 초래할 수도 있다는 것이다. 따라서 완충소재를 제조할 때 완충소재의 품질 향상 및 외부충격에 의한 변형을 최소화하기 위하여 건조공정 후 완충소재의 표면에 표면사이징 처리를 하는 것이 필요하다. 또한 건조된 완충소재의 표면은 약한 수소결합에 의하여 결합된 미세섬유들로 구성되어 있기 때문에 사용 중 접촉 혹은 마찰로 인하여 탈리되는 경향이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 호화된 1% 전분용액으로 완충소재의 표면을 사이징 처리하였다.

완충소재의 제조에 있어서 최종 완충소재의 품질은 표면사이즈제의 특성과 완충소재의 표면특성에 따라 크게 좌우된다. 완충소재 표면 특성과 흡수 특성에 따라 완충소재로 표면사이즈제의 수분이 침투하는 정도와 부동화 정도가 크게 달라지며 결과적으로는 완충소재 품질과 직결된다. 완충소재의 표면 특성은 감압탈수 정도 및 건조과정에 따라 표면의 상태가 변할 수 있기 때문에 이러한 표면 변이를 최소화하기 위해서는 표면사이징 처리가 필요하다. 실제 종이의 경우에도 표면구조 및 흡수 특성은 각종 표면 사이즈제를 사용하여 효과적으로 변화시킬 수 있으며, 표면 사이즈제 가운데 표면 잔류성이 큰 경우 종이 표면의 광택도, 표면 피복성 등을 향상시킨다고 보고된 바 있다.¹⁸⁾

이전까지는 표면 사이징을 위한 도공약품으로 취급이 용이하고 우수한 호화 안정성을 지닌 산화전분을 많이 이용하였으나 전분액이 표면에 내부까지 깊이 침투하는 단점 때문에 현재 양이온성 전분을 이용하여 표면 사이징하는 기술에 관심이 모이고 있다. 양이온성 전분을 이용하여 표면사이징을 할 경우 전분의 침투가 적게 일어나며 표면 잔류성이 대단히 높기 때문에 불투명도는 물론 여러 가지 광학적 성질의 향상을 기대 할 수 있게 된다.¹⁹⁾ 하지만 이러한 양이온성 전분도 활용 조건에 따라서 그 효과가 달라지며 특히 소재의 표면에 잔류하는 음이온과 양이온성 전분의 양이온

18) Adams, A. A., Effect of size press treatment on coating holdout, Tappi J., 66(5) : 87~91(1983).

19) Hak Lae Lee, Jae Young Shin, Chang-Heon Koh, Hoon Ryu, Dong-Ju Lee, and Changman Sohn, Surface sizing with cationic starch: its effect on paper quality and the papermaking process, TATTI Journal, 1(1):34~40 (2002). p.87, January (2002).

성질에 의해서 발견되는 완충소재의 표면 구조가 다르게 형성될 수도 있다.²⁰⁾²¹⁾

완충소재의 표면사이징처리는 폐잔재 TMP를 원료로 제조된 완충소재(전건 기준 100 g)에 대해서 완충소재의 이면을 롤러(roller)를 이용하여 1회, 2회, 그리고 3회 처리하여 그 물성을 비교하였다. 양이온성 전분의 표면 도포량은 양면에 대하여 약 3.6 g/m²가 되도록 하였다.

표 33은 표면사이징 처리 후 완충소재의 물성을 측정한 결과 값이다. 그림 45는 표 33에 나타나 있는 값들에 근거하여 겉보기밀도 변화를 그래프로 나타낸 것이며, 그림 46은 탄성계수 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

그림 45에 나타난 바와 같이 표면사이징 처리 횟수에 관계없이 겉보기밀도의 차이가 뚜렷하게 나타났고, 또한 표면사이징 처리를 하면 양이온성 전분의 첨가량 변화에 따른 겉보기밀도가 증가하였지만 증가폭은 크지 않았다. 이는 완충소재 표면에 대한 일차 표면사이징 처리 후 양이온성 전분이 표면 공극에 대해서 표면막(coated layer)을 형성하여 2차 표면사이징 이후부터는 표면 공극을 통한 전분의 표면침투가 어렵게 되어 얇은 필름막(thin film)을 형성함으로써 겉보기밀도의 변화 폭을 줄인 것으로 판단된다. 또한 섬유 현탁액에 양이온성 전분이 첨가된 완충소재 표면에 전분으로 표면사이징 처리를 했을 때 전분 분자들 사이의 친화력이 향상되면서 겉보기 밀도를 향상시킨 것으로 보인다. 그러나 섬유 현탁액에 첨가된 전분의 양이 많아지더라도 표면사이징 처리에 따른 겉보기밀도 상승효과는 일회(No.1 coating)를 제외하고는 그다지 크게 나타나지 않았다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 일차 표면사이징으로 형성된 표면막이 이후에 처리된 전분 분자들의 침투를 방해하였기 때문으로 사료된다.

20) Jaärnström, L., Lason, L. and Rigdahl, M., Modified starches in coating colours, Nor. Pulp & Paper Res. J., 10(3) : 183-189(1995).

21) Raven, A. and Strittmatter, G., Cationic coating colors - a new coating system, Tappi J., 71(12) : 141-148(1988).

표 33. 표면사이징 처리 횟수에 따른 완충소재의 물성 변화

Raw Materials			Cationic starch (%) [*]		
			10	20	30
TMP	No Coating	Elastic modulus (kPa)	245.50	439.20	546.52
		S.D. ¹⁾	22.34	14.29	17.69
		Apparent density (g/cm ³)	0.078	0.082	0.086
		S.D.	0.005	0.005	0.006
	Once coated	Elastic modulus (kPa)	260.07	466.91	562.59
		S.D.	14.89	11.78	12.98
		Apparent density (g/cm ³)	0.084	0.087	0.090
		S.D.	0.005	0.006	0.007
	Coated twice	Elastic modulus (kPa)	271.65	481.57	571.13
		S.D.	4.45	10.53	26.98
		Apparent density (g/cm ³)	0.085	0.090	0.091
		S.D.	0.005	0.007	0.007
	Coated three times	Elastic modulus (kPa)	276.78	491.53	580.78
		S.D.	4.34	19.84	23.20
		Apparent density (g/cm ³)	0.087	0.091	0.092
		S.D.	0.006	0.007	0.007

¹⁾ S.D.: standard deviation.

^{*} Based on OD pulp weight

그림 46에 나타난 바와 같이 표면사이징 처리와 양이온성 전분의 첨가량 변화에 따른 완충소재의 탄성계수 변화를 나타낸 것이다. 표면사이징 처리를 반복함에 따라 탄성계수가 증가하였지만, 그림 45의 겔보기밀도 결과에서 본 것만큼 뚜렷한 차이를 나타내지는 않았다. 그러나 표면사이징 처리 횟수에 관계없이 양이온성 전분 첨가량을 증가시킴에 따라 완충소재의 탄성계수가 가파르게 증가함으로써 전분 첨가에 따른 효과 발현이 매우 우수한 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 내침된 전분 분자들과 표면사이징에 이용된 전분들 사이의 결합이 증가하면서 완충소재의 탄성계

수 증가에 기여한 것으로 사료된다. 일반적으로 표면사이징 처리를 가하면 재료의 강성(stiffness)을 향상시키고, 액체 흡수성은 감소시키는 것으로 알려져 있다.²²⁾²³⁾²⁴⁾ 완충소재에 대한 표면사이징을 통하여 외부 충격으로부터 완충소재가 쉽게 파괴되어 포장 물품의 변형을 초래하는 것을 방지하게 하고, 대기 중의 습기를 흡수하여 완충소재의 물성이 열화되는 것을 막아주는 역할을 한다. 또한 완충소재에 첨가된 전분의 효과가 효율적으로 발현될 수 있도록 긍정적 영향을 미치는 것으로 나타났다.

결론적으로 포장 완충재의 경우 충격을 흡수할 수 있는 능력이 가장 우선시 되는 부분이기는 하나 외부 충격에 의해 완충소재가 변형되어 내부의 물품에 손상을 준다면 포장용 완충소재로서의 가치는 전무하다 하겠다. 따라서 완충소재의 탄성계수 변화를 최소화 하면서 완충소재 자체의 물성을 증진시키기 위해서는 표면사이징이 매우 유리한 것으로 확인하였다. 특히 섬유 원료의 전건중량에 대하여 양이온성 전분 첨가량이 10%인 완충소재의 경우 일회 표면사이징 처리시 탄성계수는 물론 겉보기 밀도 변화 또한 최소화 할 수 있으므로 가장 유용한 첨가 비율인 것으로 밝혀졌다.

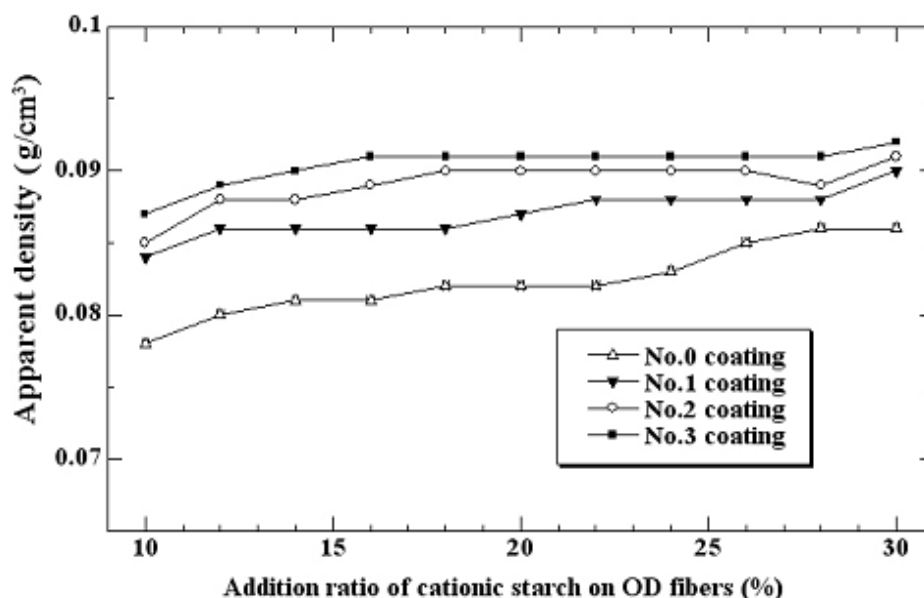


그림 45. 표면사이징 처리 횟수에 따른 완충소재의 겉보기밀도 변화.

22) Booth, G.L., in The Coating Processes (J.C. Walter, Ed.) TAPPI PRESS, Atlanta, 1993, Chap. 3 Sec. IV.

23) Hoyland, R., Howarth, P., Whitaker, C., Pycraft, C., Paper Tech. Ind. 18(8): 246 (1977).

24) Gess, J.M. and Rodriguez, J.M., The Sizing of Paper, Tappi Press (2005).

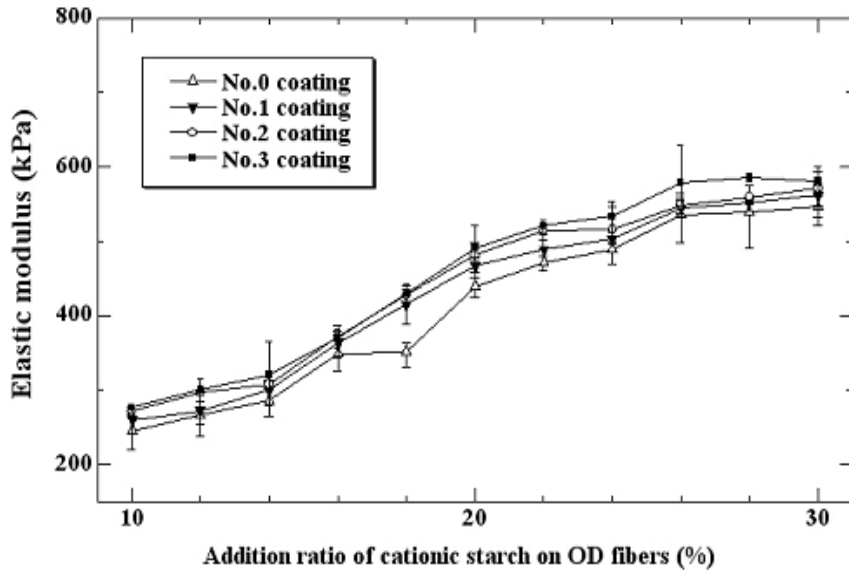
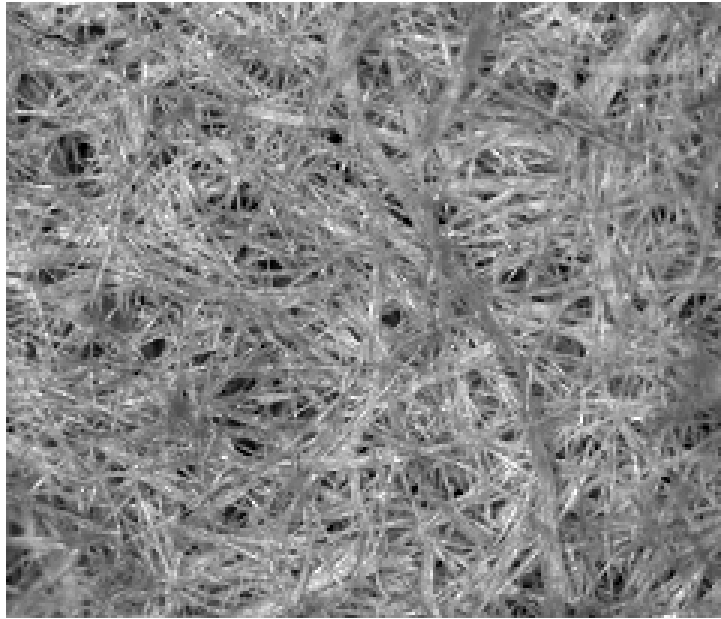
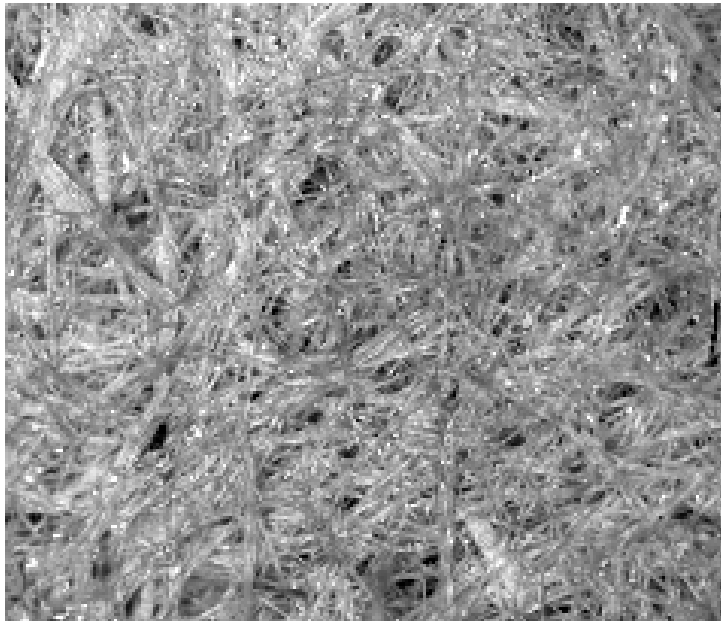


그림 46. 표면사이징 처리 횟수에 따른 완충소재의 탄성계수 변화.

그림 46은 표면사이징 처리 전·후 즉, 완충소재에 대해서 양이온성 전분이 필름막을 형성하기 전과 필름막 형성 후의 표면 구조를 Olympus (SZ61, Japan) 실체 현미경을 통해 촬영한 것이다. 현미경 사진에서 보는 바와 같이 표면사이징 처리 전후의 완충소재 표면 구조가 차이가 나타나는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 표면사이징 처리된 완충소재의 표면 구조가 전분 입자들이 피복되면서 표면에서 관찰되던 공극들이 많이 사라지면서 더욱 치밀해졌다. 표면사이징으로 인해 완충소재의 표면으로부터 섬유들이 탈리되어 나오는 것을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 외부 마찰 혹은 충격으로 완충소재의 형상이 파괴되는 것을 방지하는 효과를 기대할 수 있을 것이다.



(가) 표면사이징 전



(나) 표면사이징 후

그림 46. 표면사이징 전후의 완충소재의 표면 상태 변화.

4.2.5 감압성형 공정에 의한 완충소재의 공극률 변화

완충소재의 완충성능은 완충소재의 내부 조직이 갖는 구조와 밀접한 연관이 있다. 발포 스티로폼의 내부구조는 스티로폼을 구성하는 단위 비드(bead)들이 팽창하여 형성된 거대한 공극들이 외부 충격을 흡수하는 역할을 하게 된다. 따라서 폐잔재 혹은 소경목 등을 이용하여 만든 TMP 섬유들을 가공하여 완충소재를 만들 때에도 내부조직이 다공성의 구조를 형성하는 것이 바람직할 것이다.

표 34는 양이온성 전분 첨가량을 달리하여 TMP 완충소재와 시중에서 사용되는 펄프 몰드가 갖는 공극률을 계산한 후 그 결과를 나타낸 것이다. 그림 48은 양이온성 전분의 첨가량 변화에 따른 공극률 변화를 펄프 몰드와 스티로폼과 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 완충소재 제조시 첨가되는 양이온성 전분의 양을 달리하더라도 완충소재의 공극률에는 큰 차이를 나타내지 않음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 그림 40의 겔보기밀도 결과에서 본 바와 같이 양이온성 전분의 첨가량을 증가시키더라도 완충소재의 밀도는 크게 변하지 않은 것에서 원인을 찾을 수 있을 것이다. 이는 TMP 섬유로 이루어진 완충소재에 양이온성 전분을 첨가하면 섬유간 결합력의 향상에는 기여하지만 조직의 고밀화에는 큰 영향을 미치지 않음을 의미하는 것이다. 앞서 살펴본 바와 같이 양이온성 전분 첨가량이 증가할 때 탄성계수가 증가하는 것이 바로 결합력 향상과 관련이 있는 것이다(그림 41 참조).

표 34. 전분 첨가량에 따른 완충소재의 공극률 변화

Raw materials ¹⁾		Cationic starch (%) [*]					
		0	10	15	20	25	30
TMP	porosity (%)	71.54	75.56	77.86	76.05	77.67	79.31
	S.D. ²⁾	2.13	1.19	1.10	3.60	2.42	2.08
Pulp mold	porosity (%)	26.36	N/A				
	S.D.	5.02					

¹⁾ Wastewood: TMP, pulp mold.

²⁾ S.D.: standard deviation.

^{*} Based on OD pulp weight.

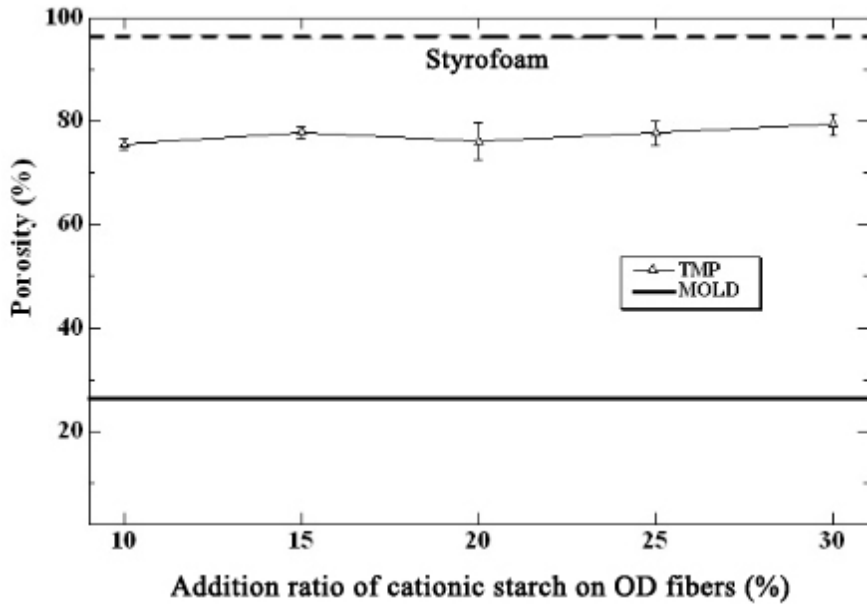


그림 49. 양이온성 전분 첨가량에 따른 완충소재의 공극률 변화.

한 가지 흥미로운 사실은 펄프 몰드와 TMP 완충소재의 공극률 차이이다. TMP 완충소재의 공극률은 스티로폼보다 작기는 하지만 펄프 몰드의 공극률에 비하여 약 3배 정도 더 크게 나타났다. 이러한 차이만을 놓고 볼 때에도 완충소재의 완충성능, 즉 내충격성이 펄프 몰드보다 훨씬 더 우수하다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 폐재 섬유로 만든 완충소재는 스티로폼을 대체할 수 있는 뛰어난 완충성능을 가졌음을 공극률 결과에서 검증되었다.

또 공극률이 높으면 감압 탈수할 때에도 탈수 속도가 커지게 되고 이는 건조비용의 감소에도 큰 기여를 하게 된다. 완충소재의 조직 내부에 공극이 많으면 감압 탈수시 수분의 이동 속도가 빠르게 되어 짧은 시간의 감압으로도 많은 양의 수분을 제거 할 수 있게 된다. 건조시간의 단축으로 완충소재의 제조단가도 낮출 수 있기 때문에 물리적 측면이나 경제적 측면에서 완충소재의 공극 형성은 완충소재의 제조 공정에서 매우 중요한 요소(key factor)라 할 수 있다.

4.2.6 내침 사이징 처리에 따른 TMP 완충소재의 내수성 변화

표 35와 그림 50은 내침 사이즈제인 AKD를 TMP 원료와 함께 첨가하여 완충

소재를 제조하였을 때 완충소재의 접촉각 변화를 나타낸 것이다. AKD가 첨가된 완충소재의 접촉각은 AKD 0.4% 첨가시 가장 큰 103.72°를 나타내었고 대체로 83-92°의 접촉각을 나타내었다. 완충소재가 80° 이상의 접촉각을 가지게 되면 완충소재에 어느 정도의 내수성을 갖게 되고 수분이 많은 포장 물품의 완충을 위해 사용될 때 수분에 의해 완충성능을 쉽게 잃지 않고 유통 과정 동안 포장 물품을 보호할 수 있게 된다. EPS의 접촉각은 84.2°로써 AKD 처리된 TMP 완충소재에 비해서 낮은 값을 나타내었다.

그러나 TMP 완충소재의 표면을 전분 용액으로 표면 사이징을 실시했을 때는 전분에 의한 물 흡수 능력이 더 커지면서 접촉각이 표면 사이징 처리되지 않은 완충소재에 비하여 급격히 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 크라프트지로 만들어진 라이너지의 접촉각(3.2°)에 비해서 표면 사이징된 TMP 완충소재가 훨씬 더 큰 접촉각을 갖는다. 즉, 상당히 많은 양의 리그닌을 함유하고 있는 TMP 섬유로 만든 완충소재는 그 자체만으로 어느 정도의 내수성을 보이지만 전분과 같은 친수성 수산기(-OH)를 갖는 고분자로 표면 사이징 처리를 하면 완충소재의 내수성을 떨어뜨리는 역할을 하게 된다. 따라서 고도의 발수성을 요하는 완충소재를 제조하고자 할 때에는 표면 사이징을 할 때 발수성을 나타내는 생분해성 고분자를 사용하여 처리할 필요가 있다.

표 35. AKD 투입량에 따른 접촉각 변화

Raw materials		AKD (%)*					
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
TMP	Contact angle (°)	41.2	90.80	103.72	92.05	89.21	83.23
	S.D. ¹⁾	6.16	7.75	6.43	5.65	8.31	8.68
Surface sized-TMP	Contact angle (°)	29.73	N/A				
	S.D.	1.57	N/A				
EPS	Contact angle (°)	84.2	N/A				
	S.D.	0.63	N/A				

¹⁾S.D.: standard deviation.

* Based on OD pulp weight.

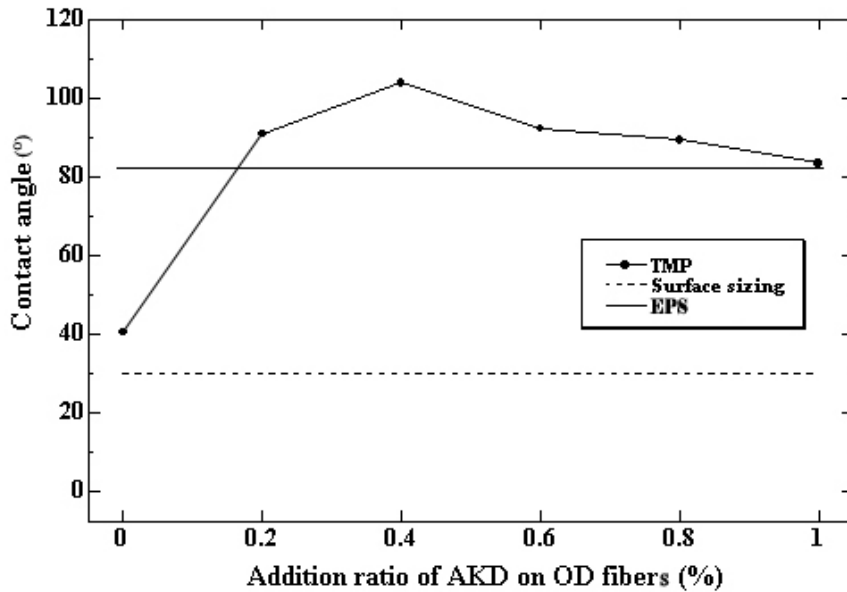


그림 50. AKD 첨가에 따른 완충소재의 접촉각 변화.

4.2.7 완충소재의 재활용 횟수에 따른 물성 변화

발포 스티로폼과 달리 TMP 완충소재가 갖는 장점 중의 하나는 사용 후 재활용이 가능하다는 것이다. 일반 지류를 구성하는 목재 섬유들은 재활용이 반복되면서 섬유의 각질화(hornification)가 반복되어 종이의 품질을 급격히 떨어뜨리게 된다. 또한 재활용에 따른 섬유의 컬화(curling)가 진행되면서 개개 섬유의 결합력을 급격히 감소시킨다. 섬유의 결합력이 감소되면 완충소재의 내부에 많은 공극들을 남기게 됨으로써 완충소재의 완충성능을 향상시키는 데 기여하게 될 것이다.

표 36과 그림 51은 완충소재를 재활용함에 따른 겉보기밀도 변화를 양이온성 전분 첨가량 변화와 함께 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 완충소재의 리사이클링을 반복함에 따라 완충소재의 겉보기밀도가 감소하는 것을 쉽게 관찰할 수 있고, 전분 첨가가 완충소재를 구성하는 섬유들의 결합력을 향상시켜 리사이클링 횟수와 상관없이 완충소재의 겉보기밀도 상승에 기여하였다. 그러나 반복된 리사이클링이 완충소재의 밀도를 감소시키고 이를 통해 완충소재 조직 내부에 많은 유리 공간(free space)을 만들게 된다. 이러한 유리 공간들은 포장 상자에 가해진 외부 충격을 완충소재가 쉽게 흡수하게 하여 포장 물품에 손상이 일어나지 않게 한다. 결론적으로 TMP 완충소재를 반복하여 재활용하게 되면 완충소재의 완충성능을 떨어뜨리는 것이 아니라 오히려 향상시킴으로써 TMP 완충소재가 친환경 소재로 인식되는데 큰 기여를 하게

된다.

표 36. 전분 투입량과 재활용 횟수에 따른 겉보기 밀도 변화

Raw materials ¹⁾		Cationic starch (%) [*]					
		10	15	20	25	30	
T M P	Control	Apparent density (g/cm ³)	0.093	0.093	0.096	0.098	0.100
		S.D. ²⁾	0.003	0.001	0.009	0.008	0.008
	1st recycling	Apparent density (g/cm ³)	0.089	0.088	0.088	0.091	0.093
		S.D.	0.005	0.006	0.009	0.005	0.004
	2nd recycling	Apparent density (g/cm ³)	0.082	0.084	0.087	0.088	0.091
		S.D.	0.005	0.004	0.002	0.010	0.006

¹⁾ Raw materials: TMP.

²⁾ S.D.: standard deviation.

* Based on OD pulp weight.

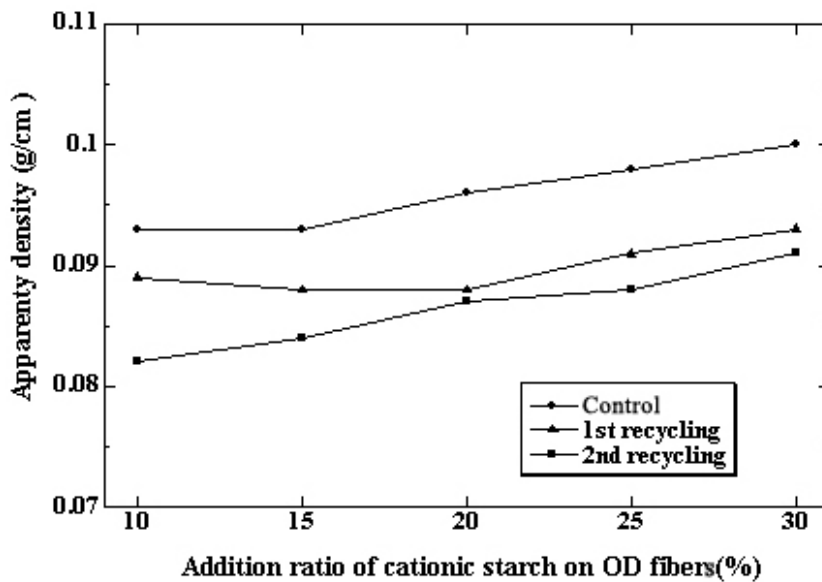


그림 51. 완충소재의 재활용 횟수에 따른 밀도 변화.

표 37과 그림 52는 한 번 만들어진 TMP 완충소재를 원료로 활용하여 완충소재로 다시 제조하였을 때 그 완충소재가 갖는 탄성계수의 변화를 양이온성 전분 첨가량 변화에 따라 알아본 결과이다. 재활용 횟수에 따른 겔보기밀도 변화에서 알아본 것과 같이 TMP 완충소재를 재활용함에 따라 완충소재가 갖는 탄성계수가 급격히 감소하고, 과량의 전분을 첨가하여도 탄성계수에는 큰 영향을 미치지 않았다. TMP 완충소재를 재활용하면 섬유들의 각질화와 컬화가 촉진되어 섬유들 사이의 결합(interfiber bonding)이 매우 감소하여 완충소재의 탄성계수를 감소시키게 된다. 특히 TMP 섬유들은 리그닌이 다량 함유되어 있는 화학적 특성 때문에 섬유 자체의 결합력은 매우 작을 수밖에 없다. 여기에 결합 보조제인 전분을 첨가하여도 재활용에 따른 섬유 결합력을 보완하는 수준에 머물고 완충소재 전체의 물성을 향상시키는 데는 큰 기여를 하지 못하였다. 따라서 재활용된 TMP 섬유로 완충소재를 다시 제조할 때에는 결합보조제인 전분을 과량 첨가할 필요가 없을 것으로 판단되었다.

표 37. 전분 투입량과 재생횟수에 따른 탄성계수 변화

Raw materials ¹⁾			Cationic starch (%) [*]				
			10	15	20	25	30
T M P	Control	Elastic modulus (kPa)	550.05	569.74	574.29	418.47	477.77
		S.D. ²⁾	11.64	22.08	3.95	36.85	18.78
	1st recycling	Elastic modulus (kPa)	221.21	155.69	112.09	185.59	160.22
		S.D.	6.23	9.22	11.6	10.22	9.49
	2nd recycling	Elastic modulus (kPa)	94.74	87.27	97.56	105.11	73
		S.D.	6	10.16	6.2	9.74	6.57

¹⁾ Raw materials: TMP.

²⁾ S.D.: standard deviation.

^{*} Based on OD pulp weight.

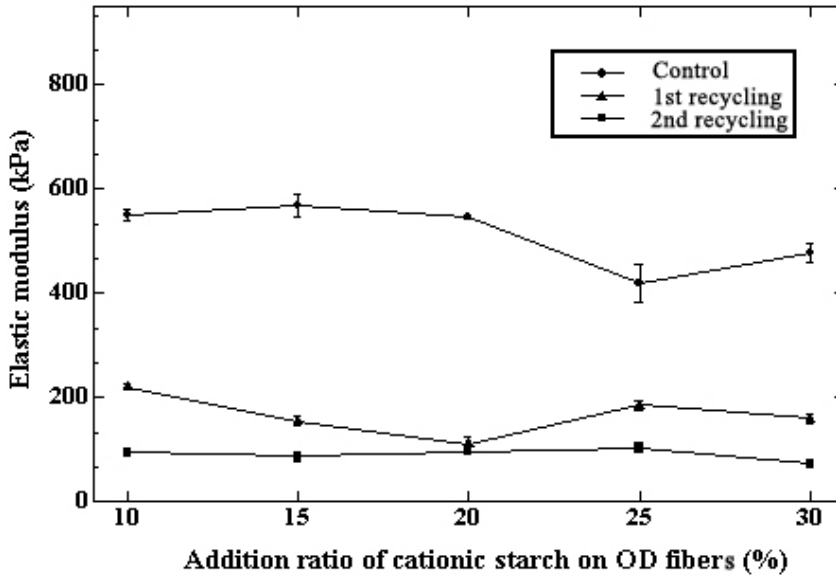


그림 52. 완충소재의 재활용 횟수에 따른 탄성계수 변화.

표 38과 그림 53은 TMP 완충소재를 재활용함에 따라 완충소재 내부의 공극률이 변하는 정도를 양이온성 전분 첨가량 변화와 함께 나타낸 것이다. 겉보기밀도의 결과에서 예측한 바와 같이 TMP 완충소재를 반복해서 재활용함에 따라 재활용을 한번도 하지 않은 것에 비해서 공극률이 증가한 것을 쉽게 알 수 있다. 섬유 결합력이 약해지면서 내부에 느슨한 구조를 형성하게 됨으로써 완충소재 내부 조직에 많은 공극을 남기게 된다. 이들 공극은 완충소재가 외부 충격을 흡수하는데 중요한 역할을 하게 될 것이다.

그림 53에서 볼 수 있듯이 완충소재의 공극률은 완충소재를 재활용하는 횟수만큼 증가하는 것이 아니다. 1회 재활용했을 때의 공극률과 2회 재활용했을 때의 공극률은 큰 차이를 보이지 않았다. 완충소재가 재활용되는 순간 섬유의 열화가 시작되어 섬유의 결합력에 영향을 주어 완충소재의 밀도 감소 및 공극률 감소를 초래하지만 재활용이 반복되더라도 계속된 섬유 열화에 의한 공극률 증가로는 이어지지 않는다. 즉, 반복된 재활용 처리는 완충소재의 내부 구조만 느슨하게 할 뿐 공극률에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 재활용 처리를 하지 않은 것에 비해서는 완충소재의 공극률이 향상되는 것은 완충 효능 발현이라는 면에서 매우 유리한 특성 중의 하나라 할 수 있다. 또 한 가지 흥미로운 사실은 양이온성 전분을 첨가하더라도 재활용 횟수에 관계없이 완충소재의 공극률에는 큰 영향을 끼치지 않았다. 따라서 양이온성 전분은 10% 내외로 첨가하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

표 38. 완충소재의 재활용에 따른 공극률의 변화

TMP		Cationic starch (%) [*]				
		10	15	20	25	30
Control	Porosity	75	77.91	76.36	78.52	78.32
	S.D. ¹⁾	1.44	1.01	3.03	2.01	2.67
1st recycling	Porosity	80.86	80.37	81.58	80.39	80.78
	S.D.	1.03	3.72	1.12	1.15	1.78
2nd recycling	Porosity	80.96	81.70	82.14	79.58	81.29
	S.D.	0.78	1.18	0.41	1.34	0.43

¹⁾ S.D.: standard deviation.

* Based on OD pulp weight.

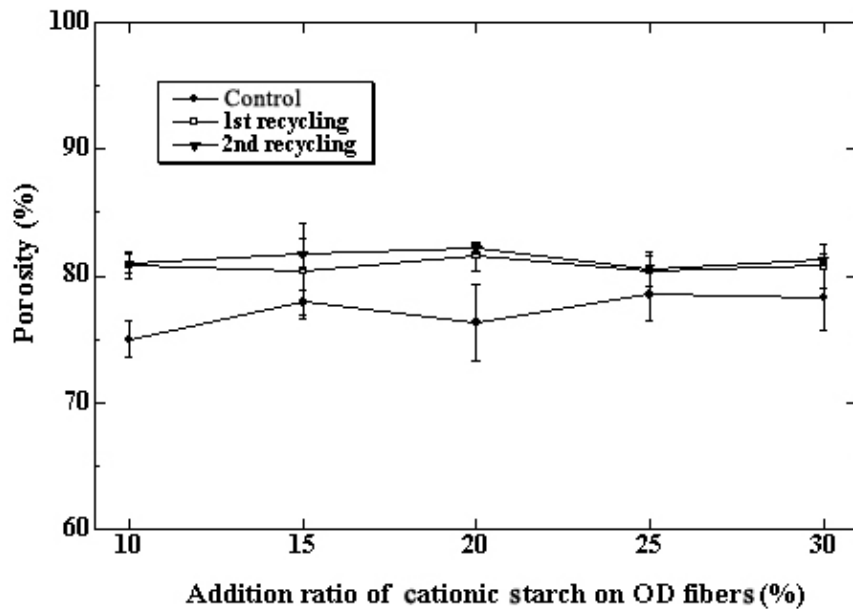


그림 53. 완충소재의 재활용 횟수에 따른 공극률 변화.

4.2.8 표백 전·후 완충소재의 백색도 변화

폐잔재 혹은 소경재의 펄프화 있어 TMP(Thermomechanical Pulp)를 사용하면 화학펄프화법에 비해 수율이 월등히 높고 공해가 적은 장점이 있으나 강도적인 문제를 안고 있다. TMP는 리파이너 기계펄프를 대표하는 개량된 기계펄프화법이라 할 수 있으며 이 방법은 원료를 해섬 전과 해섬 중에 증기 처리 하는 것이 특징이라 할 수 있다. 따라서 완충소재의 원료인 폐잔재의 펄프화는 증기 처리에 의해 칩을 연화시켜 일반 기계펄프보다 장섬유분이 많고 결속섬유가 적은 TMP를 도입하였다. 그러나 TMP는 리파이닝 전에 수행되는 높은 온도의 열처리에 의한 열화학 작용에 의해 펄프의 백색도(brightness)가 감소되고 표백 효율도 상당히 저하되는 단점을 가진다.

현재 가장 널리 사용되고 있는 포장 완충재인 발포 스티로폼은 흰색을 띠고 있고 있어서 완충소재를 사용하는 소비자들도 포장 완충재가 흰색이어야 된다는 각인된 인식을 하고 있다. 물론 신문이나 방송 등과 같은 미디어를 통하여 포장 완충소재가 흰색이어야 된다는 잘못된 인식을 개선할 필요가 있고, 여기에 덧붙여 환경적인 측면을 고려한다면 색상에 대한 고정관념도 바뀌어야 함을 홍보하여야 할 것이다.

TMP 섬유로 제조한 완충소재도 리그닌이 다량 함유하고 있기 때문에 갈색을 띠게 된다. 갈색을 소비자들이 선호하는 밝은 색 계통으로 바꾸기 위하여 표백을 하였을 때 완충소재의 완충성능이 어떻게 변하는지 알아보려고 하였다. 일반적으로 기계펄프의 표백은 표백 이후에도 고수율을 유지하기 위해서 리그닌 보존표백을 하는 것이 일반적이다. 표백제로는 과산화수소(H_2O_2)가 주로 사용되고 있다. 그러나 과산화수소 단독 표백은 표백 비용이 적게 들지만 백색도 상승폭 낮은 단점을 지닌다. 따라서 완충소재의 원료인 TMP는 과산화수소와 함께 수산화나트륨(NaOH)을 처리하는 2단 표백처리를 하였다. 표백약품의 농도는 각각 원료의 전건중량에 대하여 각각 2% 첨가하였으며, 반응시간은 1시간, pH는 7.5 의 조건으로 표백처리를 하였다.

표 39는 MDF를 원료로 제조된 완충소재와 표백 전·후의 TMP 완충소재의 백색도를 측정된 결과 값을 정리한 것이다. 완충소재의 백색도 측정은 미국 Technidyne사의 Brighterimeter Micro S-5/BOC를 이용하였다.

그림 54는 표 39에 나타나 있는 값들에 근거하여 완충소재의 백색도 변화를 그래프로 나타낸 것이다. TMP 섬유를 표백처리한 BTMP 섬유로 완충소재를 제조하였을 때 TMP 및 MDF 완충소재에 비하여 BTMP 완충소재가 훨씬 더 높은 백색도를 나타내었다. BTMP 완충소재는 전분 첨가량 증가에 따른 백색도 변이도 거의 나타나지 않았다. 그러나 MDF와 TMP 완충소재는 전분 첨가량이 증가할수록 백색도가 향상되었는데, 이는 백색 분말의 전분이 다량 첨가되어 백색도 증가에 영향을 미친 것으로 사료되었다.

결론적으로 폐잔재나 소경재를 펄프화하여 완충소재를 제조할 때 표백을 통하여 흰색 계통의 완충소재를 제조할 수 있지만, 표백 약품의 사용으로 인한 폐수 처리 비용과 추가적인 표백 비용의 발생으로 인한 제조단가의 상승을 초래할 수 있기 때

문에 표백 공정은 피하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다. 또한 환경적인 측면에서도 표백으로 인한 수질오염 문제도 발생할 우려가 있기 때문에 표백은 바람직하지 않은 것으로 사료되었다. 소비자들이 느끼는 미적인 감각보다는 환경을 생각하는 철학적 사고가 더 필요한 것으로 인지시킬 필요가 있다.

표 39. 원료의 표백처리에 의한 완충소재 백색도 변화

Raw Materials ¹⁾			Cationic starch (%) [*]		
			10	20	30
TMP	Top-side	Brightness(%)	11.67	12.49	15.22
		S.D. ²⁾	0.45	0.79	0.63
	Bottom-side	Brightness(%)	13.55	15.40	16.97
		S.D.	0.71	0.43	0.63
BTMP	Top-side	Brightness(%)	19.96	20.44	21.82
		S.D. ²⁾	1.15	0.80	0.92
	Bottom-side	Brightness(%)	22.49	21.90	22.85
		S.D.	0.83	1.10	1.76
MDF	Top-side	Brightness(%)	10.33	11.22	11.97
		S.D.	0.54	0.50	1.19
	Bottom-side	Brightness(%)	12.18	13.54	14.35
		S.D.	0.62	0.46	0.82

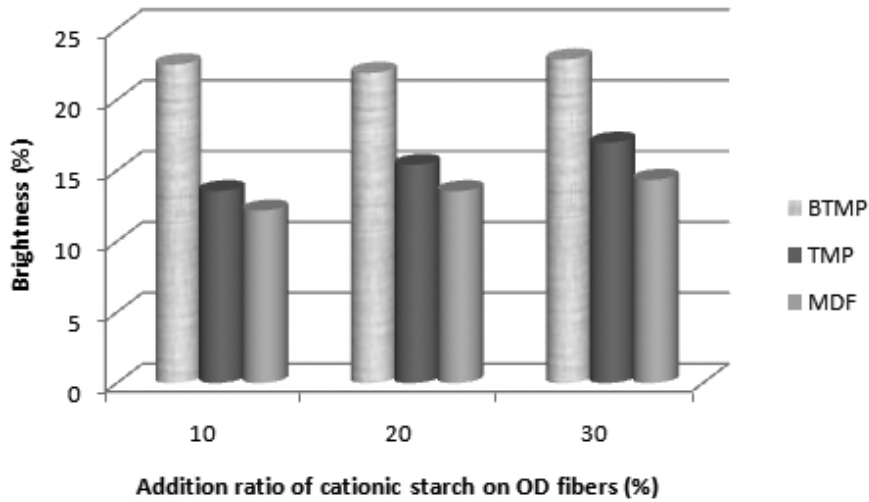


그림 54. 원료의 표백처리에 의한 완충소재 백색도 변화.

4.2.9 완충소재의 단열성 평가

포장 물품이 골판지 상자에 완충소재와 함께 포장된 후 유통될 때 외부 온도 변화에 노출된다. 포장 물품이 갖는 최초 가치를 보존하기 위해서는 가혹한 조건에 해당하는 온도에 노출되지 않는 것이 가장 바람직하겠지만 그렇지 않을 경우에는 완충소재에 의해 어느 정도 단열이 되도록 해야 한다. 그래서 TMP 섬유로 만든 완충소재가 갖는 단열성을 평가하여 완충소재가 외부 열을 어느 정도 차단할 수 있는가를 분석하였다.

일반적으로 단열재로 사용되기 위해서는 열전도도가 $0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이하가 되어야 한다. 따라서 열전도도 값이 작을수록 우수한 단열성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 발포성 단열재인 EPS는 열전도도가 약 $0.04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로써 펄프 몰드의 열전도도에 비해서 두 배 이상 높은 단열성을 나타내었다. 이에 반해 TMP 완충소재는 약 $0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 의 열전도도를 가졌는데 EPS의 열전도도와 비교해서 조금 높은 수치를 나타내었다. TMP 완충소재는 조직 내부에 수많은 공극들을 가지고 있는 다공성 구조를 형성하고 있고 또한 개개 섬유 자체의 세포내강이 붕괴되지 않고 개방된 상태로 되어 있기 때문에 뛰어난 단열성을 가지는 것으로 보인다. 이러한 완충소재에 결합보조제인 진분의 첨가량을 증가시키면 섬유들 사이의 결합력이 향상되면서 열전달(heat transfer) 속도가 빨라지게 되고 결국 단열 효과를 감소시키는 결과를 초래하였다(그림 55 참조).

결론적으로 TMP 펄프로 완충소재를 제조할 때 결합보조제의 첨가량을 조절한다

면 TMP 완충소재는 EPS 완충재와 마찬가지로 포장용 완충 효과뿐만 아니라 단열 효과를 함께 갖는 훌륭한 친환경 소재로 이용될 수 있을 것이다.

표 40. 전분투입량에 따른 열전도도의 변화와 다른 완충소재와의 비교

Materials		Cationic starch % [*]					
			10	15	20	25	30
TMP	Thermal conductivity (W/m · K)		0.0497	0.0517	0.0512	0.0522	0.0534
	S.D. ¹⁾		0.001	0.002	0.001	0.002	0.001
Pulp mold	Thermal conductivity (W/m · K)	0.0876					
	S.D.	0.005					
EPS	Thermal conductivity (W/m · K)	0.0374					
	S.D.	0.005					

¹⁾ S.D.: standard deviation.

^{*} Based on OD pulp weight.

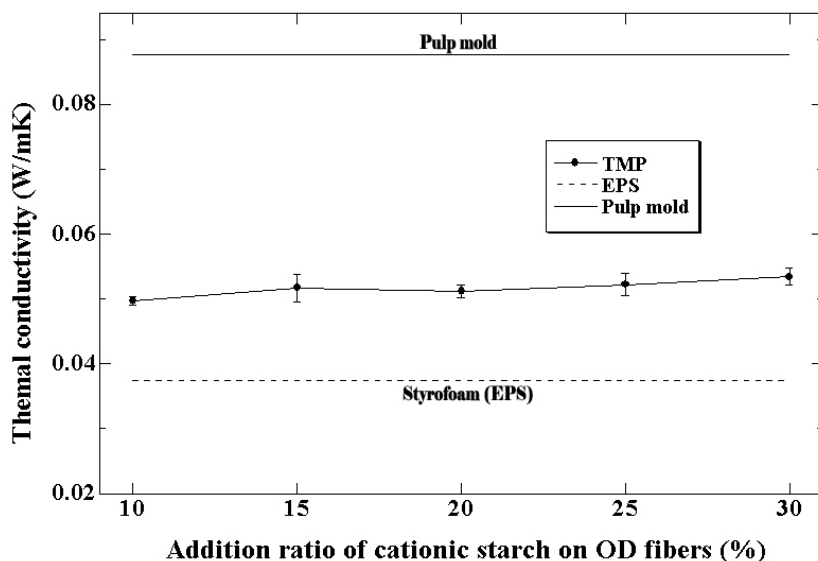


그림 55. 전분 첨가량에 따른 TMP 완충소재의 열전도도 변화.

표 41과 그림 56은 TMP 완충소재 표면을 전분으로 표면 사이징 처리를 했을 때 나타나는 열전도도의 변화를 보여준다. 완충소재의 표면을 사이징하게 되면 표면의 공극이 채워지고 밀도가 높아지기 때문에 열의 전달이 더욱 빨라진다. 그림 56에서 보는 바와 같이 표면 사이징된 완충소재가 무처리 완충소재에 비하여 더 낮은 열전도도를 갖는 것을 쉽게 알 수 있다. 내첨한 전분 첨가량이 증가할수록 표면 사이징된 완충소재의 열전도도를 조금씩 감소시켰지만 표면 사이징되지 않은 소재에 비하여 유의성 있는 차이를 보이지는 않았다.

표 41. 표면 사이징에 의한 TMP 완충소재의 열전도도 변화

TMP		Cationic starch (%) [*]		
		10	20	30
Coated	Thermal conductivity (W/m · K)	0.0472	0.0453	0.0445
	S.D. ¹⁾	0.003	0.002	0.005
Not coated	Thermal conductivity (W/m · K)	0.0497	0.0512	0.0534
	S.D.	0.001	0.001	0.001

¹⁾ S.D.: standard deviation.

^{*} Based on OD pulp weight.

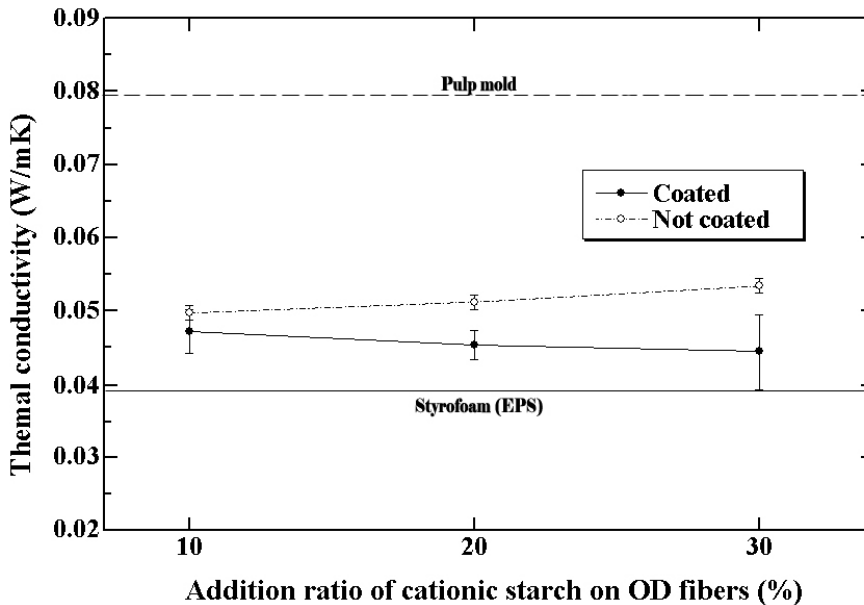


그림 56. 표면 사이징 유무에 따른 TMP 완충소재의 열전도도 변화.

4.2.10 완충소재의 낙하시험

완충소재의 내부에 깨지기 쉬운 유리잔을 넣고 KS A 1011에 준하여 모서리 낙하, 낙하시험, 그리고 평면 낙하시험을 실시하였다. 그림 55는 TMP와 EPS로 제조된 완충소재를 모서리 방향으로 낙하시킨 후 완충소재의 균열 상태와 내부 유리잔의 상태를 관찰한 결과를 나타내고 있다. TMP로 제조한 완충소재는 모서리로 낙하하였을 때 모서리로부터 약한 변형이 발생하기 시작하였고, 3차 이상의 낙하를 반복하였을 때 완충소재를 구성하는 조직의 일부가 유실되면서 10회 낙하 시에는 약 1.8 cm의 변형이 발생하였다. 그러나 충격을 받은 부위에서 발생한 완충소재의 조직 변형과는 무관하게 완충소재의 내부에 들어 있는 유리잔에는 손상이 전혀 일어나지 않았기 때문에 완충소재의 충격 흡수 능력(cushioning performance)이 우수함을 확인할 수 있었다. EPS의 경우에도 1차 낙하 시험 때부터 3 mm에 달하는 변형이 발생하였고, 10회 낙하 시험 후에는 변형 부위가 1.6 cm에 이르기까지 크게 확대되어 심한 조직 변형이 나타났다. 결론적으로 반복된 모서리 낙하 시험에서는 TMP 완충소재와 EPS 완충소재 모두 모서리 조직에 변형이 일어나 모서리 방향으로 충격이 전달될 때 약한 경향을 나타내었다.

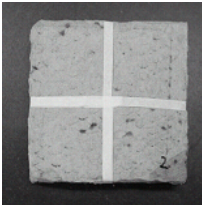
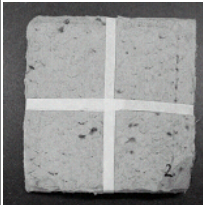
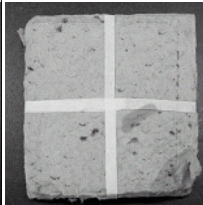
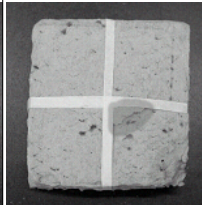
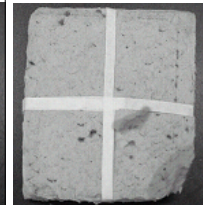
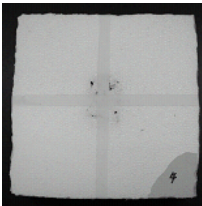
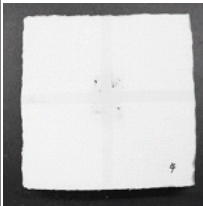
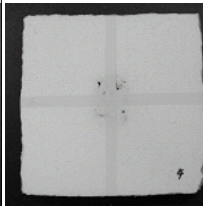
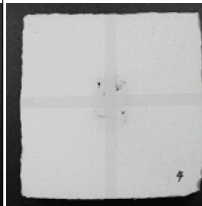
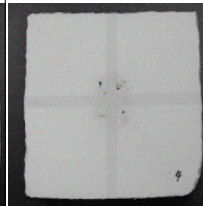
모서리 낙하	1차 낙하	3차 낙하	5차 낙하	10차 낙하
				
TMP	0.5 cm 변형 발생 내용물 이상 없음	1 cm 파손 발생 중심부 균열 발생 내용물 이상 없음	파손부위 유실 중심부 균열 커짐 내용물 이상 없음	1.8 cm 변형 발생 내용물 이상 없음
				
EPS	3 mm의 변형 발생	5 mm의 변형 발생	7 mm의 변형 발생	1.6 cm의 변형 발생

그림 55. 완충소재의 모서리 낙하 시험.

그림 56은 TMP와 EPS로 제조한 완충소재를 측면으로 낙하시켰을 때 완충소재와 유리잔의 상태를 관찰한 결과를 보여주고 있다. TMP 완충소재의 경우에는 낙하를 반복하였을 때 모서리 낙하보다는 작지만 미세한 변형이 발생하였고, 특히 완충소재의 표면 중심부에 미세한 균열이 발생하기 시작하였다. 그러나 10번 정도의 반복적인 낙하 충격에도 불구하고 중심부 균열은 완충소재의 내부 조직으로는 진행되지 않았고 결국 완충소재의 내부에 포장되어 있는 유리잔에도 충격이 전달되지 않아 유리잔이 원형 그대로 보존되어 있었다. 따라서 TMP로 제조한 완충소재의 측면 쪽으로 충격이 가해지더라도 외부 조직 부위와 표면에서 약한 변형이 발생하기는 하지만 충격이 내부까지 전달되기 전에 흡수 제거되어 유리잔을 보호할 수 있었다. EPS 완충소재의 경우에는 5차까지의 낙하시험 후에도 외부 조직에 전혀 변형이 일어나지 않았지만 10회 정도의 과도한 낙하 시험 후에는 5 mm 정도의 변형이 발생하였다. 이상의 결과로 보아 EPS 완충소재가 TMP 완충소재에 비해서 측면 부위로 전달되는 충격에 대해서는 변형에 대한 저항성이 더 큰 것으로 나타났다.

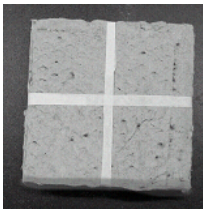
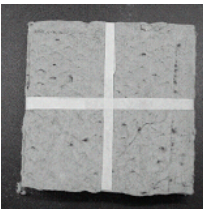
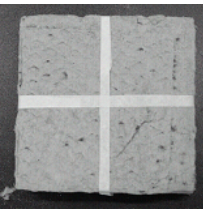
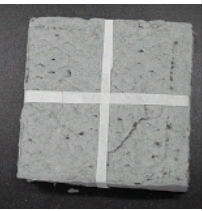

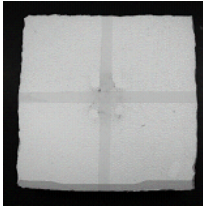
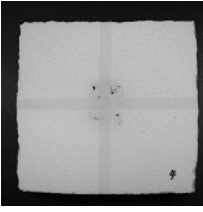
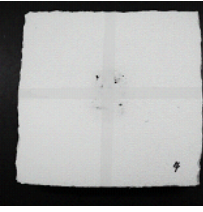
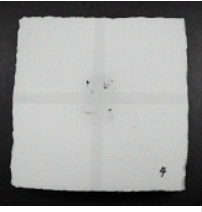

측면 낙하	1차 낙하	3차 낙하	5차 낙하	10차 낙하
				
TMP	0.2 cm 변형 발생 내용물 이상 없음	중심부 균열 발생 0.3 cm 변형 발생 내용물 이상 없음	0.6 cm 변형 발생 중심부 균열 커짐 내용물 이상 없음	1.1 cm의 변형 발생 내용물 이상 없음
				
EPS	이상 없음	이상 없음	이상 없음	5 mm 변형 발생

그림 56. 완충소재의 모서리 낙하 시험.

그림 57은 TMP와 EPS로 제조한 완충소재를 평면으로 낙하시켰을 때 완충소재와 유리잔의 손상 여부를 관찰한 결과를 보여준다. TMP 완충소재를 5차까지 낙하시켰을 때 완충소재 자체는 손상이 전혀 발생하지 않았고 내부에 포장되어 있는 유리잔도 원형 그대로 잘 보존되었다. 그러나 완충소재를 10번까지 낙하 충격을 주었을 경우에는 완충소재의 형상이 조금 뒤틀려지는 부위가 발생하였지만 전체적인 외관에는 아무런 변형이 일어나지 않았고 유리잔에도 손상이 전혀 일어나지 않았다. EPS로 제조된 완충소재의 경우에는 10회까지의 낙하시험에도 불구하고 완충소재의 외부 조직에 변형이 전혀 일어나지 않았다. 평면 낙하 시험의 경우에는 TMP 완충소재나 EPS 완충소재 모두 충격에 대한 저항성이 매우 우수하여 완충소재 조직 자체도 잘 보존할 수 있었을 뿐만 아니라 내부에 포장된 물품까지도 안전하게 보호할 수 있었다.




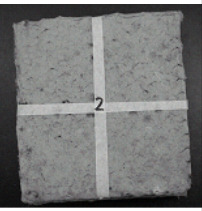
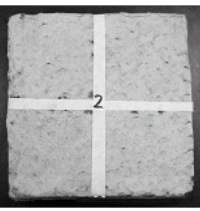
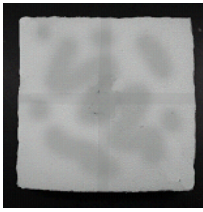

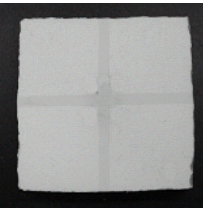


평면 낙하	1차 낙하	3차 낙하	5차 낙하	10차 낙하
				
TMP	이상 없음 내용물 이상 없음	이상 없음 내용물 이상 없음	이상 없음 내용물 이상 없음	1 mm 내 뒤틀림 내용물 이상 없음
				
EPS	이상 없음	이상 없음	이상 없음	이상 없음

그림 57. 완충소재의 평면 낙하 시험

제 4 절 실용화를 위한 완충소재 제조 공정 설계

1. 감압성형 완충소재 제조공정

감압성형 완충소재 제조공정 구성도는 그림 58과 같다. 수집된 폐잔재 및 소경재는 다이제스터에서 증해 처리한 후 싱글디스크 리파이너를 사용하여 펄프화한 후 3% 농도로 희석시킨다. 여기에 1% 전분 호화액을 혼합하여 혼합장치에서 해리시킨 후 감압성형장치로 공급된다. 감압성형장치에 투입된 혼합 펄프 현탁액은 히터에 의해 가열된 공기를 강제 송풍하는 송풍팬에 의해 수분의 일부가 제거되고 평판형 완충재로 제조된다. 제조된 평판형 소재는 열풍건조기를 통과하면서 완충소재 내부의 수분이 완전히 건조되어 완성된 TMP 완충소재가 된다. TMP 완충소재 제조공정이 실용화된다면 이러한 공정들은 연속적으로 이루어지게 된다.

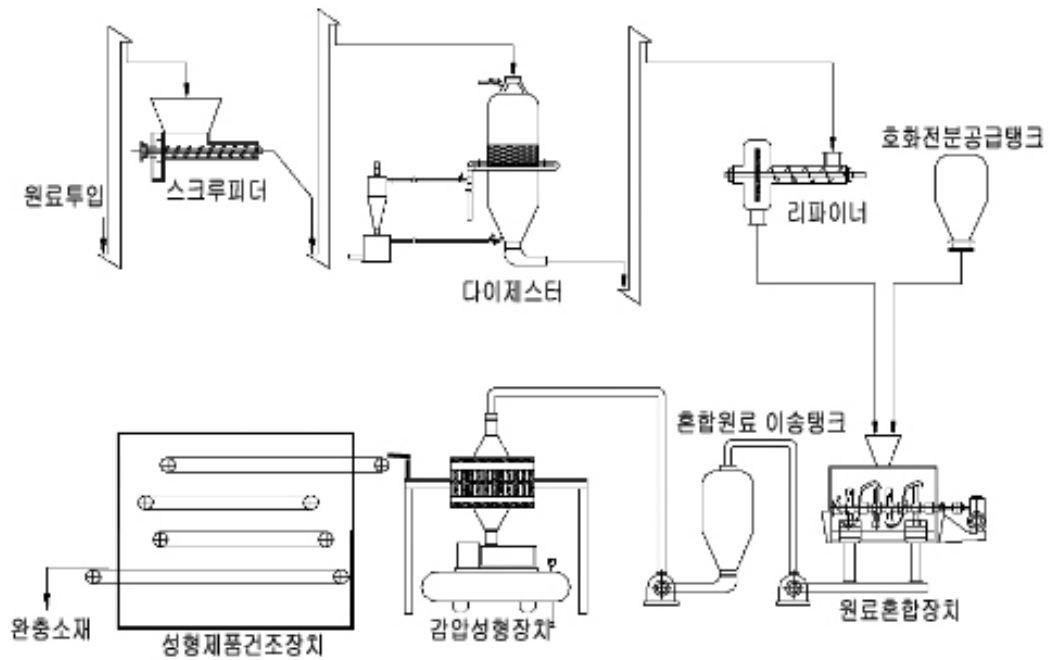


그림 58. 감압성형을 통한 완충소재 제조공정 구성도.

2. 팽연압출형 완충소재 제조공정

팽연압출 완충소재 제조공정 구성도는 그림 59와 같다. 수집된 폐잔재 및 소경목은 감압성형 공정과 마찬가지로 열기계펄프화 방법으로 해섬한 후 분쇄기 및 체 분리장치에서 일정 크기로 선별한다. 선별된 펄프 원료는 팽연보조제와 함께 혼합기에서 혼합된 후 정량공급장치를 통해 팽연압출장치로 투입된다. 팽연압출장치에서 가온·압축·혼련된 원료는 성형장치에서 팽창·성형·절단되어 열풍건조장치에서 건조되고, 최종 펠렛형 완충소재로 제조된다. 제조된 펠렛형 완충소재는 포장기에서 일정 용량으로 계량·포장되도록 설계되었다.

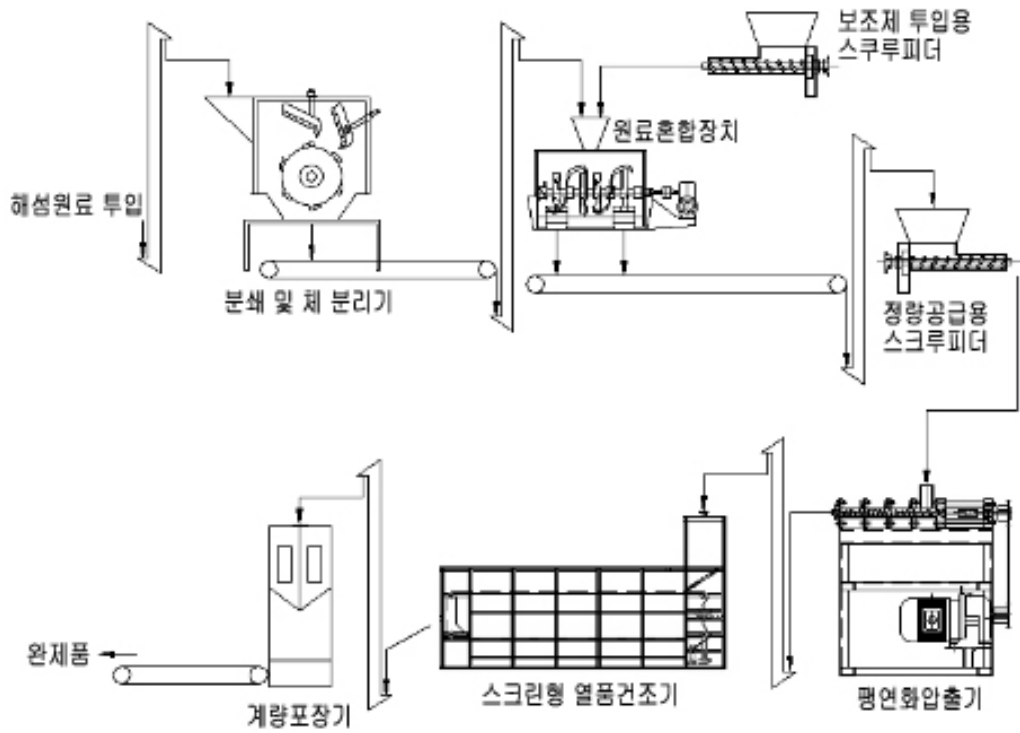


그림 59. 평면압출형 완충소재 제조공정 장치구성도.

제 5 절 완충소재의 경제성 분석

폐잔재를 활용한 포장용 완충재의 경제성 분석을 위해 먼저 포장용 완충재 사용에 대한 국내외 정책 및 무역규제를 살펴본 후, 폐잔재를 이용한 포장용 완충재가 발포 폴리스티렌 포장용 완충재의 대체재로서 경제성을 가지는지 비교하기 위해 두 포장재의 제조비용과 함께 사회적 비용을 비교분석하였다.

1. 포장 폐기물에 대한 국내외 정책 및 무역규제

산업혁명 이후 지난 수세기에 걸친 산업화 및 도시화 등의 영향으로 지구 온난화가 심화됨에 따라 국제사회에서는 92년 6월 브라질의 리우환경회의에서 유엔기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)을 채

택하여 '94년 3월 21일 공식 발효하였다. 또한 2005년 2월 16일 교토의정서가 발효됨으로써 환경보호 및 자원 재활용에 대한 관심이 고조되고 있는 상황에서 국내외적으로 포장 폐기물에 대한 규제가 강화되고 있다. 특히 포장용 완충재의 대부분을 차지하는 발포폴리스티렌 완충재의 경우 재활용상의 어려움으로 인해 사용금지, 사용제한, 과징금 부과 등 규제가 더욱 엄격해지고 있다.

국내에서의 발포폴리스티렌 포장용 완충재에 대한 규제는 크게 생산자에게 재활용 의무를 주는 생산자책임재활용제도(EPR)와 발포폴리스티렌 사용금지 등 직접규제를 가하는 발생억제 정책이 시행되고 있다.

먼저 생산자책임재활용제도(EPR)란 제품생산자나 포장재를 이용한 제품의 생산자에게 그 제품이나 포장재의 폐기물에 대하여 일정량의 재활용의무를 부여하여 재활용하게 하고, 이를 이행하지 않을 경우 재활용에 소요되는 비용 이상의 재활용 부과금을 생산자에게 부과하는 제도이다. 발포폴리스티렌 포장용 완충재의 경우 재활용 의무 대상 품목으로서 아래 표 42에 해당하는 생산자는 재활용 의무를 성실히 이행해야하며 미 이행시 재활용부과금을 납부하여야 한다. 현재 발포합성수지 포장재 재활용비용부담금은 kg당 317원 수준이다.

표 42. 재활용 의무생산자

구 분	내 용	대상자
포장재	<ul style="list-style-type: none"> - 대상포장재를 제품 포장에 사용하는 제조·판매업자 및 수입업자 - 대상포장재 제조업자 및 수입업자 	<ul style="list-style-type: none"> - 제조업자·판매업자 전년도 연간매출액 10억원 이상인 자 또는 당해연도 상반기매출액 5억원 이상인 자 - 수입업자 전년도 연가수입액 3억원 이상인 자 또는 당해연도 상반기수입액 1억5천만원 이상인자

자료 : 한국자원재생공사

한편 발포 폴리스틸렌 포장용 완충재 발생억제를 위해 우리 정부는 1995년 8월에 가전제품 포장용 완충재의 감량화를 위한 '가전제품포장용합성수지재질완충재감량화지침'을 고시하였으며, 1996년 7월에는 합성수지재질 포장재의 감량화를 위한 '합성수지재질 포장재의 연차별감량화지침'을 고시하여 운영해 왔다.

또한 정부는 포장폐기물 발생억제를 위해 포장재질 규제, 포장방법 규제, 합성수지

재질로 된 포장재의 연차별 줄이기 제도 등 3가지 정책을 추진하고 있다. 우선 포장재질 규제 정책은 재활용이 곤란한 재질의 사용을 규제하는 것으로 1993년 9월부터 완구인형 및 모든 종합제품에 발포폴리스티렌 재질 사용을 금지하고 있다.

둘째, 포장방법 규제 정책은 과대포장을 억제하기 위하여 제품을 포장하는 경우 상자안에 남은 공간(포장공간비율)을 일정 비율로 제한하고 여러 번 포장(포장횟수)하는 사례를 규제하는 제도이다. 현재 포장방법 규제대상 제품은 식품류, 화장품류, 세제류, 잡화류, 의약부외품, 의류, 종합제품 등 7개 제품 23개 품목이다. 아울러 포장공간비율을 적용함에 있어 재활용이 어려운 복합합성수지, PVC, 합성섬유 재질로 된 받침접시, 스티로폼 완충재를 사용한 경우 포장공간비율을 축소(-5%)하고 있는 반면에 펄프몰드 등 종이재질을 사용한 경우 포장공간비율을 확대(+5%) 적용함으로써 환경친화적인 재질로의 대체를 유도하고 있다.

마지막으로 합성수지재질로 된 포장재의 연차별 줄이기 정책은 합성수지로 된 포장재의 사용량을 줄이고 친환경적인 재질의 포장재로 대체하도록 연차별로 기준을 부여하고 이를 이행해 나가는 제도이다. 현재 계란받침·팩, 사과·배 받침접시, 면류용기, 농·축·수산물 받침접시, 전기용품 포장용 완충재 등 5개 합성수지 포장재를 대상으로 연차별 줄이기 기준을 부여하였다. 또한 합성수지재질로 된 포장용 완충재를 줄이기 위해 종전 컴퓨터, 냉장고, 세탁기, 에어컨, TV, 전자레인지 등 6개 대형 가전제품에서 최근 소형·경량제품인 안전인증대상전기용품 중 전기기기류, 오디오·비디오응용기기, 정보·사무기기 등 81개 품목으로 대상 품목을 확대하여 실질적으로 재질대체가 이루어지도록 하였다. 또한 연차별로 규정한 일정규모 미만의 제품에 대하여는 발포폴리스티렌(EPS) 재질의 사용을 금지하도록 변경하였다.

이에 따라 안전인증대상전기용품 중 전기기기류, 오디오·비디오 응용기기, 정보·사무기기로서 포장용적 2만 cm^3 이하 제품은 2004년도부터, 포장용적 3만 cm^3 이하 제품은 2006년도부터, 포장용적 4만 cm^3 이하의 제품은 2008년도 이후부터 발포폴리스티렌(EPS) 재질의 포장용 완충재 사용이 전면 금지되며, 아울러 전기용품을 제조·수입·판매하는 업체는 포장용적 10만 cm^3 이하의 제품에 대하여 자율적으로 발포폴리스티렌 재질 이외의 포장재를 사용하도록 규정하여 재질대체를 확대해 나가도록 하였다(표 43 참조).

한편 주요 선진국의 경우 환경보호 차원에서 환경부하적 포장재의 사용을 억제하는 정책을 강력히 시행하고 있다. 예를 들어 환경부하적 포장재를 사용한 품목의 수출입 금지 및 제한, 과징금 부과, 생산·판매·사용의 금지, 회수·재활용 요구, 포장·라벨링 요건, 인증·승인 요건, 환경마크, 성분규제 등을 시행하고 있다. 발포폴리스티렌 포장용 완충재의 경우, 사용금지과 같은 직접적인 규제 이외에 세금을 부과하는 간접규제방식(EPR) 등이 시행되고 있다. 국가별 합성수지재질 EPR 부담금을 살펴보면 표 42와 같다. 국가별 합성수지재질 EPR 부담금 효율을 살펴보면 독일, 벨기에, 프랑스, 일본 모두 합성수지 부담금이 종이/펄프에 비해 많게는 14.1배 작게는 1.7배 높은

것으로 나타났다(표 44 참조). 이러한 환경관련 규제조치의 대부분은 직접 및 간접적으로 무역제한 효과를 가지고 있으므로 무역의존도가 높고 특히 선진국시장을 주력 수출 시장으로 하는 우리나라에게는 매우 중요한 현안 문제이다.

표 43. 합성수지재질로 된 포장재의 연차별 줄이기 기준

제품의 종류	대상 포장재	연차별 줄이기 기준		
		2004년 · 2005년	2006년 · 2007년	2008년 이후
전기용품안전관리법시행규칙 제3조의 규정에 의한 안전인증대상전기용품 중 전기기기류, 오디오·비디오 응용기기, 정보·사무기기	포장용 완충재	포장용적 2만cm ³ 이하의 제품은 발포폴리스티렌 재질외의 포장용 완충재를 사용	포장용적 3만cm ³ 이하의 제품은 발포폴리스티렌 재질외의 포장용 완충재를 사용	포장용적 4만cm ³ 이하의 제품은 발포폴리스티렌 재질외의 포장용 완충재를 사용

자료 : 한국자원재생공사

표 44. 국가별 합성수지재질 EPR 부담금 요율 비교

국 가	부담금 요율(톤당)		
	합성수지(A)	종이/펄프(B)	비율(A/B)
독 일	2950 DM (1,917,000원)	400 DM (260,000원)	7.4
벨기에	13,290 BEF (419,000원)	940 BEF (30,000원)	14.1
프랑스	500 Franc (97,000원)	300 Franc (58,000원)	1.7
일 본	82,000 ¥ (820,000원)	43,000 ¥ (430,000원)	1.9

자료 : Corrugated Packaging & Logistics (2003/7)

위와 같이 국내외 포장용 완충재에 대한 정책을 살펴본 결과, 앞으로 발포폴리스티렌 포장용 완충재 사용에 대한 규제와 조세부담이 더욱 높아질 것이다. 따라서 향후 포장용 완충재는 발포폴리스티렌 포장용 완충재보다는 종이재질의 포장용 완충재가 사용되어 질 것으로 기대된다. 특히 외국의 경우 우리나라보다 발포폴리스티렌 포장용 완충재 사용의 규정이 엄격하고 조세부담금 역시 높은 수준이다. 이 점은 대외무역 의존도가 높고, 전자제품의 수출비중이 큰 우리나라에 시사하는 바가 크다. 현재 우리나라는 전자제품의 포장용 완충재로서 대부분 발포폴리스티렌을 사용하기 때문이다. 따라서 향후 국내의 환경친화적 포장재 사용 증진을 통한 환경보호라는 측면뿐만 아니라 대외수출경쟁력을 확보하기 위해서도 자연친화적이고 재활용이 가능한 폐잔재를 활용한 완충재 개발에 관심이 기울여져야 할 것이다.

2. 포장용 완충재 제조비용 비교

폐잔재를 이용한 완충재의 경제성 비교를 위해 우선 발포폴리스티렌 포장용 완충재 제조 과정을 살펴보자. 발포폴리스티렌 포장용 완충재는 폴리스티렌수지(EPS)에 펜탄이나 부탄과 같은 발포제를 첨가시켜 가열 경화시킴과 동시에 기포를 발생시켜 발포수지로 만든 것으로 스티렌모노머를 중합시켜 제조한다. 발포폴리스티렌 포장용 완충재 제조비용은 주원료인 EPS(현재 2,000천원/톤)가 대부분을 차지하며 제조과정상 추가적인 비용이 발생한다. 따라서 시설 및 장비에 따라서 약간의 차이가 있겠지만, 발포폴리스티렌 포장용 완충재의 제조비용은 1톤당 약 2,200천원 정도가 소요되는 것으로 추정된다.

다음으로 폐잔재를 활용한 포장용 완충재 개발의 가공 공정도(그림 60 참조)를 살펴보면 크게 폐잔재 수집, 해섬(TMP), 표백, 가공 및 건조 단계로 구분할 수 있다. 따라서 폐잔재를 이용한 완충재 제조비용은 크게 폐잔재 구입비 및 표백, 가공공정비로 구분 할 수 있다.

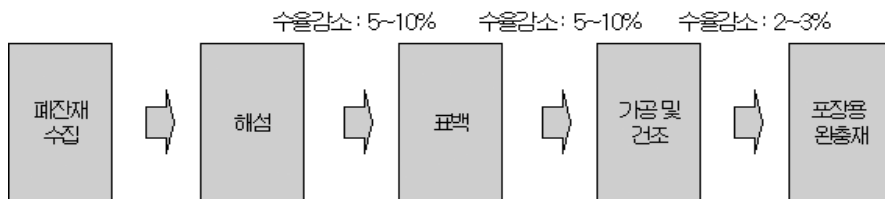


그림 60. 포장용 완충재 개발의 가공 공정도.

폐잔재를 이용하여 포장용 완충재 1톤을 생산하는 비용을 추정해보면 다음과 같다. 먼저 폐잔재 수집 및 해섬과정을 거친 TMP 구입비로 110천원²⁵⁾, 가공공정비로 약 3,878천원²⁶⁾(전력비 2,800원, 상수도비 57천원, 표백비 421천원, 약품비 600천원)으로 폐잔재를 이용한 포장용 완충재 1톤 생산비는 총 3,988천원으로 추정되었다(표 45 참조).

표 45. 포장용 완충재 1톤 생산을 위한 제조비용 비교

구 분	비 용	구 분
EPS 포장용 완충재	2,200천원	EPS : 2,000천원/톤
		가공비 : 200천원
폐잔재를 이용한 포장용 완충재	3,988천원	TMP구입비 : 110천원(100천원/톤)
		표백비 : 421천원/톤
		전력비 : 2,800천원(33원/1kw/h)
		상수도비 : 57천원(1430원/톤)
		약품비(양성전분) : 600천원

위와 같이 발포폴리스티렌 포장용 완충재와 폐잔재를 이용한 포장용 완충재의 제조비용을 추정해 본 결과, 폐잔재를 이용한 포장용 완충재가 발포폴리스티렌 포장용 완충재보다 톤당 1,788천원 정도 비용이 높은 것으로 나타났다. 하지만 폐잔재를 이용한 포장용 완충재의 경우 실험실에서 만들었을 때 비용이므로 상업화되어 공장에서 대량으로 생산된다면 규모의 경제로 인해 많은 비용을 절감 할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 사회적 비용분석

앞에서는 단순히 발포폴리스티렌 포장용 완충재와 폐잔재를 활용한 포장용 완충재의 제조비용을 비교해 보았다. 그 결과 제품 원료비 및 가공 과정상 비용이 싼 발포폴리스티렌 포장용 완충재가 폐잔재를 이용한 포장용 완충재보다 훨씬 경제성이

25) 이는 표백과정에서 수율감소가 5-10%, 가공과정에서 수율감소 2-3% 정도로 포장용 완충재 1톤을 생산하기 위해 필요한 TMP량은 1.1톤 정도임.

26) 이 비용은 실험과정상 발생한 비용으로 기계 및 인건비 등을 제외하였다.

있는 것으로 나타났다. 그러나 포장용 완충재 사용 후 발생하는 사회적 비용을 고려한다면 그 격차는 줄어들거나 혹은 발포폴리스티렌 포장용 완충재가 더 높은 비용이 들 것으로 예상된다. 즉 폐잔재를 이용한 포장용 완충재는 전량 재활용이 가능하고, 또한 수집이 용이하여 별도의 사회적 비용이 수반되지 않는데 반해, 발포폴리스티렌 포장용 완충재는 수집상의 어려움과 재활용상의 어려움으로 인해 많은 사회적 비용이 발생하기 때문이다.

포장용 완충재 사회적비용 추정에는 포장용 완충재를 재활용 할 경우의 회수 처리 비용과, 폐기처분 할 때의 비용으로 구분할 수 있다. 먼저 회수 처리비용의 경우를 살펴보자. 한국환경정책·평가연구원(2002년)의 연구결과에 따르면 발포폴리스티렌 완충재의 톤당 회수비용은 1,036천원으로, 종이재질(종이팩)²⁷⁾ 완충재의 회수비용 302천원보다, 734천원 가량 높게 나타났다(표 46 참조). 발포폴리스티렌 완충재가 종이재질의 완충재보다 회수비용이 높은 이유는 종이재질의 완충재는 전량 민간 재활용업자에 의해 수집·운반됨으로써 수집비 및 운반비를 절감 할 수 있었는데 반해, 발포폴리스티렌 포장용 완충재는 중량에 비해 부피가 크고 배출처가 다양하여 수거 비용이 많이 소모되었기 때문이다.

표 46. 재활용 비용 비교

(단위: 천원/톤)

품 목	수 집	운 반	처 리	재생가치	회수 처리비 ²⁸⁾
종이 재질 완충재	366	38	88	190	302
발포폴리스티렌 완충재	1,354	32	102	452	1,036

자료: 생산자 재활용의무제도에에서의 품목별 재활용비용 산정에 관한 연구(한국환경정책평가연구원, 2002년 수탁보고)

다음으로 포장용 완충재를 재활용 하지 않았을 경우의 사회적 비용(폐기비용)을 표 45와 같이 추정해보면 발포폴리스티렌 완충재를 소각할 경우 1,446천원, 매립할 경우 1,402천원으로 나타났다. 또한 비용으로 추정하기 어려운 환경비용까지 포함한다면 사회적 비용은 더욱 높아질 것이다. 반면 폐잔재를 활용한 완충재는 전량 재활용이 가능하므로 별도의 사회적 비용이 발생하지 않는다.

27) 폐잔재를 이용한 완충재의 재활용 처리비에 대한 자료가 없어, 성질이 비슷한 종이재질의 재활용 처리비를 이용하였음.

28) 회수처리비=수집비+운반비+처리비-재생가치

표 47. 발포폴리스티렌 포장용 완충재 폐기의 사회적 비용

구 분	비용(톤당)	비 고
소각시	1,446천원	소각비용(60천원/톤)+수집운반비용(1,386천원/톤)
매립시	1,402천원	매립비용(16천원/톤)수집운반비용(1,386천원/톤)
쓰레기 매립지 수명단축	10.1평	1 t×100(겉보기밀도) = 100m ³ 100m ³ ÷3 m÷3.3평/m ³ = 10.1평

주: 소각비용, 매립비용은 국립환경연구원 “페플라스틱의 환경친화적 관리방안에 관한 연구” 참조

한편 제조과정상의 제조비용과 사회적 비용을 포함하여 두 포장용 완충소재의 경제성을 분석할 경우, 폐잔재를 이용한 포장용 완충재는 제조비용 3,988천원, 사회적 비용 302천원으로 총 4,290천원이 소요되는 것으로 나타났다. 이에 반해 발포폴리스티렌 포장용 완충재의 경우 제조비용 2,200천원과 재활용율(64.1%, 2004년)을 감안한 사회적비용 1,183천원²⁹⁾으로 총 3,383천원이 소요되는 것으로 나타났다. 따라서 사회적 비용을 포함할 경우 두 완충재의 생산비용 격차는 1,788천원에서 907천원으로 약 880천원이 줄어든다. 또한 생산자책임재활용제도에 의해 발포합성수지 포장재에 1kg당 317원의 재활용비용이 부과되는 것을 감안하면 비용격차는 563천원으로 더욱 줄어들 것이다. 더욱이 비용으로 계량화하기 어렵지만 EPS 완충재 사용으로 인해 발생하는 환경오염 비용을 고려한다면 폐잔재를 이용한 포장용 완충재가 사회적 측면에서 보다 경제적인 수 있을 것이다.

더욱이 해외에서는 국내보다 발포폴리스티렌 완충재에 대한 생산자책임재활용제도가 더욱 엄격하게 시행되고 있어, 대외 수출의존도가 높은 우리나라로서는 수출 경쟁력 확보차원에서도 폐잔재를 이용한 포장용 완충재 개발과 사용이 필요하다. 물론 폐잔재를 활용한 완충재가 기존의 발포폴리스티렌 완충재와 같이 포장용 완충재로서 거의 유사한 기능이 발휘될 수 있도록 하는 데 보다 많은 연구개발 노력이 필요하다.

29) (1,036×0.641)+(1,446×0.359)=(재활용 시 비용×재활용률)+(폐기시 비용×(1-재활용률))=1,183

표 46. 사회적 비용을 고려할 경우의 경제성 분석

구 분	비용(톤당)	비 고
폐잔재를 이용한 포장용 완충재	4,290천원	제조비용(3,988천원)+회수처리비용(302천원)
발포폴리스티렌 포장용 완충재	1,036천원	회수처리비용
	1,446천원	폐기(소각)시 비용
	3,383천원	제조비용(2,200천원)+재활용율(64.1%,2004년)을 고려한 비용(1,183천원)

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표 달성도

1. 폐재/간벌재의 최적 펄프화를 위한 탐색 - 100% 달성

폐재 혹은 간벌재를 이용하여 완충소재를 제조하기 위해서 팽연·압출 방식 및 감압성형 방식을 적용하였다. 팽연이나 감압성형 방식을 이용하여 완충소재를 제조하기 위해서는 이에 맞는 원료 제조 방식이 필요하였고, 가장 적합한 원료 형상은 해섬된 형태의 펄프 섬유였다. 폐재 혹은 간벌재를 해섬하기 위해서는 기계적 방식과 화학적 처리 방식이 적용될 수 있는데 경제적 및 환경적인 측면에서 기계적 처리 방식이 적합하였다. 화학적 해섬 방법을 이용하면 펄프 섬유 내에 들어 있는 리그닌 제거를 위해 약품을 불가피하게 사용해야 하고, 이로 인해 흑액(black liquor)과 같이 폐액이 발생하게 된다. 결국 폐액 처리를 위해 별도의 처리 공정이 필요하기 때문에 추가적인 비용이 발생하게 된다. 그러나 기계적 처리 방식은 130-170℃의 물이나 증기로 증해(cooking)시킨 후 리파이너(refiner)로 해섬하는 방식이기 때문에 약품 사용에 따른 폐액 처리의 문제가 발생하지 않는다. 따라서 기계적 해섬 방식이 화학적 해섬 방식에 비하여 경제적 및 환경적 측면에서 훨씬 더 유리하다.

TMP로 제조한 완충소재는 과량의 리그닌을 함유하고 있기 때문에 갈색을 띤다. 이와는 달리 발포 스티로폼의 경우에는 하얀 색을 띠고 있기 때문에 소비자들은 포장 완충재로서 흰색을 선호하는 경향이 강하다. 따라서 TMP 완충소재의 경우에도 TMP 펄프 섬유를 표백한 후에 완충소재를 제조하여 완충소재의 물성을 비교하였다. 완충소재의 제조에 리그닌이 제거된 섬유들을 이용하기 때문에 섬유의 결합력이 향상되어 완충소재의 밀도 및 탄성계수를 증가시켰고, 결국 완충소재의 물성을 약간 감소시켰다. 표백은 리그닌 제거를 위한 약품을 사용하기 때문에 화학적 해섬법과 마찬가지로 표백에 따른 약품 사용과 폐액 처리로 인한 추가적인 비용 문제가 발생하여 바람직한 방법이 아닌 것으로 판단되었다. 환경친화적 완충소재 제조를 위해서는 약품 사용을 가능한 피하는 것이 좋다.

팽연 완충소재나 감압 성형 방식에 의한 관상형 완충소재는 펄프 몰드에 비하여 훨씬 더 유리한 물성을 나타내었고, 발포 스티로폼에 비해서는 조금 떨어지는 물성을 보였다. 또한 이들 완충소재를 재활용하였을 때 섬유 성질이 열화되면서 섬유의 결합력이 약해짐에 따른 충격을 흡수할 수 있는 완충성능이 더 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 폐재 및 간벌재를 이용한 최적 펄프화를 위한 탐색 연구는 화학약품을 사용하지 않는 열기계적 해섬법을 적용하여 펄프화가 가능하였고, TMP 펄프 섬유 내에 잔류하는 리그닌을 제거하기 위한 표백법은 환경적인 측면에서 바람직하지 않

은 것으로 나타났다.

2. 펄프 현탁액을 이용한 완충소재 제조 기술 개발 - 100% 달성

TMP 섬유를 이용하여 포장용 완충소재를 제조하기 위해서 두 가지 기술을 적용하였다. 첫 번째로는 해섬된 펄프 섬유에 전분이나 PVA와 같은 결합보조제를 첨가한 후 압출·팽연시키는 방식을 이용하여 원형의 팽연 완충소재를 제조하는 것이고, 두 번째로는 해섬된 펄프 섬유의 현탁액에 결합보조제인 전분을 첨가한 후 감압을 적용하여 원료 중에 포함된 과량의 물을 제거함으로써 판상형 완충소재를 제조하는 기술이었다.

팽연 완충소재는 팽연화기의 다이(die)를 통과한 펄프 압출물이 대기 중으로 압출되면서 팽연되기 때문에 개개 섬유의 세포내강(lumen)이 붕괴되지 않고 열려있는 상태로 제조되고, 또한 섬유들 사이에 수많은 공극들이 형성되면서 외부 충격을 흡수할 수 있는 능력을 갖게 된다. 특히 팽연 완충소재는 소재 자체의 흡수율이 8-10% 수준으로 조절이 되었을 때 발포 스티로폼 보다는 다소 떨어지기는 하지만 뛰어난 완충 효과를 발현하는 것으로 나타났다.

평판형 완충소재는 펄프 몰드의 제조 방식과는 달리 압착에 의한 탈수 방식을 사용하지 않고 감압에 의한 탈수 방식을 사용하기 때문에 완충소재의 내부에 많은 공극들을 남기게 된다. 완충소재의 내부에 형성된 공극들이 외부 충격을 흡수하여 포장 물품의 변성을 방지하는 역할을 한다. 이러한 평판형 완충소재는 펄프 몰드보다는 훨씬 우수하고 발포 스티로폼 보다는 다소 떨어지는 완충성능을 나타내었다.

결론적으로 압출·팽연 방식을 이용한 원형의 완충소재와, 감압성형방식을 이용한 평판형 완충소재를 제조할 수 있었고, 이들 완충소재들은 외부 충격을 흡수할 수 있는 다공성 구조를 띠고 있어서 물리적 충격이나 낙하 등과 같은 외부 인자에 의해서도 포장 물품을 보호할 수 있는 완충성능을 발현하였다.

제 2 절 관련분야에의 기여도

완제품의 물류 유통 과정에서 완제품의 최초 가치를 보존하기 위하여 포장이라는 수단을 사용한다. 제품 포장 시에는 단순히 완제품의 외부를 골판지나 기타 합성수지 포장재를 사용하여 덮는 것만으로는 제품의 최초 상태를 보존하기가 힘들고 완충소재를 적용하여 외부 충격으로부터 제품을 보호해야 한다. 이러한 목적으로 사용되는 포장 완충소재는 발포 스티로폼, 펄프 몰드, 플라스틱 등이 사용되는데 펄프 몰드를 제외하고는 모두 난분해성 소재로 만들어지기 때문에 사용 규제가 예상되고 있다.

따라서 난분해성 소재로 만들어진 포장 완충소재를 대체하기 위한 환경친화적 완충소재의 개발이 무엇보다 필요한 시점이고, 폐잔재 혹은 소경목으로 제조한 열기계 펄프를 이용하여 만든 완충소재는 뛰어난 완충성능과 함께 난분해성 완충소재를 대체할 수 있는 친환경 소재로 충분히 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

친환경 포장완충소재를 사용하면 제품 수출 시에도 난분해성 포장재의 사용으로 인한 부담금을 지불하지 않아도 되기 때문에 수출 비용 부담을 경감시킬 수 있고, 난분해성 완충재를 처리할 때 소요되는 비용도 지불할 필요가 없게 된다. 또한 난분해성 소재를 소각할 때 발생하는 다이옥신과 같은 유해 성분도 발생하지 않기 때문에 대기 환경을 청정하게 유지하는 데 크게 기여할 것이다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구개발결과의 활용계획

폐잔재 및 소경재를 열기계펄프화한 후 압출팽연 방식과 감압성형 방식을 적용하여 포장용 완충소재를 제조하는 기술을 개발하였다. 이러한 연구 개발 결과에 대한 지적 재산권 보호를 위하여 특허를 출원할 예정이며, 포장용 완충소재 제조 기술에 대한 홍보를 위하여 환경관련 전시회에 관련 기술 및 제품을 전시하고, 여러 국내의 세미나에 참석하여 연구 관련 핵심 기술 및 제품 성능에 대하여 소개할 예정이다. 또한 국내외 학회지 연구 결과를 발표하여 친환경 완충소재에 대한 홍보를 적극적으로 진행할 예정이다.

또한 펄프 완충소재 제조 기술의 실용화를 위하여 본 연구의 결과물에 관심을 갖는 회사를 선정하여 실용화를 위한 추가 연구를 진행할 예정이다.

제 2 절 추가연구의 필요성

폐잔재 및 소경목의 펄프화한 후 압출팽연 방식과 감압성형 방식을 통하여 제조한 포장 완충소재는 발포 스티로폼에 준하는 물성을 나타내었다. 하지만 발포 스티로폼에 비하여 큰 밀도로 인하여 포장 제품의 전체 하중을 증가시키는 원인이 된다. 이것은 물류 유통 과정에서 유통 비용을 증가시켜 제품의 경쟁력을 떨어뜨리는 요인이 된다.

따라서 포장 완충소재의 밀도를 발포 스티로폼 수준으로 감소시킬 수 있는 기술이 추가적으로 보완되어야 한다. 이를 위해 포장 완충소재를 제조에 필요한 펄프 섬유 양을 줄이고 내부 조직의 공극률을 더 높이는 방향으로 감압성형장치가 개발되어야 한다. 이러한 문제점이 해결되면 펄프 완충소재 생산에 적극적으로 관심을 표명하는 회사와 산학협력 체제를 구축하여 포장 완충소재의 실용화를 위한 응용연구를 진행할 예정이다. 응용 연구를 통하여 실용화를 위한 공정 설계 및 장치 제작이 완료되면 펄프 완충소재를 양산할 것이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

생분해성 플라스틱이란 성형품, 포장재, 위생용품, 농업용품 등으로 사용한 플라스틱을 폐기시에 소각처리하지 않고 단순히 매립함으로써 미생물의 작용에 의해 수개월-1, 2년(일반 플라스틱의 경우 50년-수백년)만에 물, 이산화탄소, 메탄가스 등으로 완전 분해되는 플라스틱을 말한다.

전분을 첨가하여 제조한 생분해성 수지 제품은 품질은 우수하지만 가격이 비싸고, polyester계 생분해성 수지는 가격이 저렴하지만 품질이 우수하지 못한 것이 있다(표 47 참조).

표 47. 생분해성 수지의 제조 방법 및 특성

구 분	전 분 계	지방족폴리에스테르계
제조방법	옥수수, 감자 등에 첨가제를 넣고 압출기로 가공	화학적합성 또는 미생물 발효
특 성	가격이 저렴하고 분해성이 우수하나 인장강도, 투명강도가 취약	인장강도, 내습성, 가공성이 우수하나 가격이 고가

생분해성 수지로 가장 많이 사용되는 고분자는 PCL (polycap lactone)를 비롯해 AP (aliphatic polymer), ALI/ARO (aliphatic/aromatic copolymer), PHB (polyhydroxy-butylate) 등으로 용해온도와 강도가 낮거나 투명성이 부족한 것이 단점이지만, PLA (polylactic acid)가 최근에 국내에 선보이면서 기존의 생분해성 플라스틱 제품의 단점을 보완할 것으로 예상된다. PLA는 미국의 Cargill Dow가 생산하고 있으며, Cargill Dow는 Cargill과 Dow 양사가 합작으로 설립하여 생물공정 젿산 유도제품을 개발하고 있다. Cargill Dow의 PLA는 최근 자동차부품과 전자제품의 하우징 용도로 사용되고 있다. 미국의 Metabolix는 최근 미국 상무부로부터 160만달러의 지원을 받아 옥수수 추출 설탕에서 PHA를 생산하는 생물공정의 효율성을 향상시키는 프로젝트에 참여하고 있다. 일본 Mitsubishi Chemical은 초기에는 PBS를 석유 화학 원료를 바탕으로 약 3000톤 생산해 왔으며 바이오계 succinic acid 플랜트를 3만톤 규모로 건설할 계획이다.

일본의 JSP는 완전 생분해성 플라스틱 발포 완충재를 개발하였다. “그린블록”으로 명명된 제품은 발포 기술을 구사한 것으로, 지방족계 생분해성 플라스틱을 원료로 60-100배의 고배율 발포를 실현한 완충재이다. 그러나 범용 수지에 비해서 값이 비싼 원료를 사용하는 생분해성 플라스틱의 코스트 측면 - 상대적으로 고발포율 때문에 낮다고는 하지만 - 으로 말미암아 종래의 EPS나 EPP 등의 완충재 보다 좀 높은 듯 한 가격 설정이 양산 제품용 완충재로 채용되기에는 병목으로 되고 있다.

이상과 같이 대부분의 포장완충소재 제품은 기존의 플라스틱과 같은 기재 (substrate)가 되는 소재를 그대로 사용하면서 그것에 생분해 특성을 부여하는 제품이 대부분이다. 즉, 완충소재를 제조하기 위한 원료 자체를 셀룰로오스와 같은 친환경 성분을 사용하는 것이 아니라 난분해성 기재에 생분해성 고분자를 첨가하는 방식을 사용하고 있다.

본 연구에서 개발한 완충소재는 난분해성 고분자로 제조된 완충소재와는 달리 기재가 셀룰로오스가 주성분인 목질계 섬유를 이용하고 여기에 결합보조제로써 전분을 첨가하였기 때문에 미생물에 의해 분해가 매우 빠르게 진행된다. 이러한 목질 섬유를 이용하여 완충소재를 제조하기 위한 연구 혹은 제품은 거의 이루어지지 않았다. 따라서 폐잔재 및 소경목을 열기계필프화시킨 후 압출팽연 및 감압성형방식으로 제조한 완충소재 개발 연구는 합성고분자로 제조된 플라스틱 계통의 완충재를 대체하는 데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

제 7 장 참고문헌

Adams, A. A., Effect of size press treatment on coating holdout, Tappi J., 66(5) : 87-91(1983).

Adamson, A. and Gast, A.P., Physical Chemistry of Surfaces 6th ed., John Wiley & Sons, New York(1997).

ASTM D4168-82 Transmitted shock characteristics of Foam-in Place cushioning materials.

ASTM standard D1596. Standard test method for dynamic shock cushioning characteristics of packaging material.

ASTM standard D2808. Standard test method for compressive strength of corrugated fiberboard(short column test).

ASTM standard D685. Standard method of conditioning paper and paper products for testing.

Asvanit P. 1988 On the effect of moisture content on the shock transmissibility properties of honeycomb cushioning. School of Packaging, Michigan State Univ, East Lansing, MI.

Biocycle, "Industry Overview, Moving Towards Consensus on Biodegradable Plastics", March, 1998.

Booth, G.L., in The Coating Processes (J.C. Walter, Ed.) TAPPI PRESS, Atlanta, 1993, Chap. 3 Sec. IV.

Burgess, G. 1990. Consolidation of cushion curves. Packaging Technology and Science 3: 189-194.

Castell, A., R. Clift, and C. Francae. (2004). Extended Producer Responsibility Policy in the European Union: A Horse or a Camel? Jr. of Industrial Ecology, 8 (1-2): pp.4-7.

Ciosek, B. M. and D. patterson Jr. 1971. Impact test for cushioning Modern Packaging(Oct): 1-4.

Crofts, B. W. 1989. The effect of simulated handling on the compression performance of corrugated fiberboard containers. M.S. thesis, School of Packaging, Michigan State University, East Lansing, MI.

DICER TECHINFO, 성장기에 들어선 그린 플라스틱 시장의 현상과 과제, Digital Information Center for Environment Research, Part III, Vol.3(11): 588-592(2004).

Eriksson, I., Lunabba, P., and Pettersson. A., "Recycling potential of printed thermomechanical fibers for newsprint", 1995 CPPA 3rd Research Forum on

Recycling, CPPA, Montreal, P.269.

Fritz, J., Link, U., and Braun, R., Environmental impacts of bio-based/biodegradable packaging, *Starch*, 53: 105-109(2001).

Gess, J.M. and Rodriguez, J.M., *The Sizing of Paper*, Tappi Press (2005).

Hak Lae Lee, Jae Young Shin, Chang-Heon Koh, Hoon Ryu, Dong-Ju Lee, and Changman Sohn, Surface sizing with cationic starch: its effect on paper quality and the papermaking process, *TATTI Journal*, 1(1):34-40 (2002). p.87, January (2002).

Hanisch, C. (2000). Is Extended Producer Responsibility Effective?. *Env. Sci Technol*, 34 (7): pp170A-175A.

Hanlon, J. F. 1984 *Handbook of packaging engineering*. New York: McGraw-Hill

Howard, R.C. and Bichard, W., The basic effects of recycling on paper properties. *J. Pulp Paper Sci.* 18(4):J151-J159(1992).

Howard, R.C., The Effects of recycling on Paper Quality, *Paper Technology*, 32(4): 20-25(1991).

Hoyland, R., Howarth, P., Whitaker, C., Pycraft, C., *Paper Tech. Ind.* 18(8): 246 (1977).

ISO 4651. Cellular rubbers and plastics-Determination of dynamic cushioning performance.

Jaärnström, L., Lason, L. and Rigdahl, M., Modified starches in coating colours, *Nor. Pulp & Paper Res. J.*, 10(3) : 183-189(1995).

Jonson, G. 1993. *Corrugated board packaging*. Ipswich Book company, Ipswich.

Jung-Ho Lee and Tae-Sic Kim, 교토의정서발효 등 환경규제 강화에 따른 중소기업의 대응과제, Korea Small Business Institute pp.13-18(2005).

Jung-Su Yoon, 2004년 폐기물 관리 정책방향, National Environmental Technology Information Center, pp.1-6(2004).

Kawazi, Y. 1969. Cushioning Factors estimated by displacement. *JPI* 7(3): 23-26.

Lee, H.L., Shin, J.Y., Koh, C.H., Ryu, H., Lee, D.J., and Sohn, C., Surface sizing with cationic starch: its effect on paper quality and the papermaking process *Tappi Journal*, 1(1):34-40(2002).

M. Mochizuki, T. Hayashi, K. Nakayama and T. Masuda, Studies on Biodegradable poly(Hexano-6-lactone) Fibers, Part2: Environmental degradation (Technical Report), *Pure Applied Chem.*, 71(11): pp.2177-2188(1999).

M., Mochizuki, Y., Wada, K., Kaku and T., Toshima, Use of Recyclable Packaging Materials, *Yokogawa Technical Report English Edition*, No.31: 20-21 (2001).

Marcondes, J. A. 1992. Cushioning properties of corrugated fiberboard and the effects of moisture content. *Trans. of the ASAE* 35(6): 1949-1953.

Marcondes, J. Waldeck, G. Burgess and S. P. Singh. 1990. Application of high-speed motion analysis to measure shock in cushioned drops. *Packaging Technology and Science* 3:51-55.

Mckinney, R.W.J., *Technology of paper Recycling*, Blackie Academic & Professional, pp.286-310(1995).

MIL-HDBK-304, Package cushioning design.

Miltz, J. and Gruenbaum. 1981. Cushioning properties of Urea-Formaldehyde Foam. *J. of Cellular Plastic*: 213-218.

Minor, J. L., *Recycling Bleach Technology*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 266.

Mochizuki Masahiko, Wada Yasushi, Kaku Kunio and Toshima Takeaki, Use of recyclable packing materials, *Yokokawa Technical Forum (English Edition)*:20-21 (2001).

N.H.park., Development of manufacturing system of degradable packaging materials using rice straw, *Korea Food Research Institute*(1996).

Neimo, L., *Papermaking Science and Technology Vol.4 "Papermaking Chemistry*, PI and TAPPI Press, pp269-288 (1999).

Park J. M., etc. 1994. Improvement and analysis of stacking durability of corrugated fiberboard boxes for agricultural products-moisture absorption properties and compressive strength reduction. *J. of the KSAM* 19(4): 358-368.

Park, J. M., etc 1997. Cushioning properties analysis for flute-type of corrugated fiberboard. '97 Korea Recycling Symposium and Exhibit.

Parker, M. L., Mauldon, R. G., and Chapman, D. R., *Bleaching and Environment*, Australian Government Publishing Service, Report No.1, May 21 (1990).

Peleg, K. 1981. Package product interaction in corrugated containders for flesh produce. *Trans. of the ASAE* 24(4): 794-800.

Raven, A. and Strittmatter, G., Cationic coating colors - a new coating system, *Tappi J.*, 71(12) : 141-148(1988).

Sarko, A., *Recent X-ray Crystallographic Studies of Celluloses*, Cellulose, Structure, Modification and Hydrolysis edited by Young, R. A. & Rowel, R. M., John Wiley & Sons, 1986.

Scallan, A. and Tigerstrom, A.C., Elasticity of the wet fiber wall: effects of pulping and recycling. *J. Pulp Paper Sci.* 18(5): J188-J193(1992).

Shuttleworth, R. W., V. O. Shestopal, and P. C. Goss. 1985. Open-cell flexible polyurethane foams: compression of static and dynamic compression properties. *J.*

of Applied Polymer Science, 30: 333-343.

Soil and plant analysis council, Inc., Soil analysis handbook of reference methods, CRC Press, pp. 219-214, 1999.

Soil and plant analysis council, Inc., Soil analysis handbook of reference methods, CRC Press, pp. 219-214, 1999.

Takahashi, T. 1969. Evaluation of cushioning characteristics of package cushioning materials by means of simultaneous measurement of deceleration-displacement and its appliance. JPI 7(5): 42-48.

Tappi T808. Flat crush test of corrugated board.

Toshihiro Hirotsu, Toshiyuki Tsujisaka, Takashi Masuda and Kazuo Nakayama, Plasma Surface Treatments and Biodegradation of poly (butylene succinate) Sheets. Jr. of Applied Polymer Science, vol.78: 1121-1129(2000).

W.J. Kim., Waste-wood collected system improvement & recycled promotion plan, Korea Forest Research Institute(2000).

농림부, 1999, 폐목재의 발생실태 및 재활용 촉진방안.

이영목, 환경친화형 포장재의 현황 및 개발, 한국생활환경학회지, 8(1): 50-57(2001).

이준우, 박창걸, 박영서, 고기능 포장재료 (High functional packaging materials), KISTI 2003 기술정보분석.

최미애, 기술표준동향-생분해성 플라스틱, 기술표준 11: 43-45(2003).

包裝用緩衝材料의 評價試驗方法 JIS Z0235-1997.

포장폐기물 발생억제를 위한 실무편람, Corrugated Packaging & Logistics, 7: 37-42 (2003).

豊田實 1981. 包裝用緩衝材料の緩衝特性試験と計測 CARTON 1.

한국디자인포장센터. 1990. 발포폴리우레탄완충재 분석. 연구보고서.

한국표준협회. KS A 1029. 포장용 완충재료의 동적압축시험방법.

한국표준협회. KS A1030. 포장용 완충재료의 정적 압축시험방법.

한국표준협회. KS A1220. 포장용 발포 폴리우레탄 완충재.

한국표준협회. KS A1224. 포장용 발포에틸렌 완충재.