

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 제조연구^{*1}
II. 한지슬러지-목재섬유 복합보드의 기계적 성질

이 필 우^{*2} · 이 학 래^{*2}

**Study on Manufacture of Korean Paper(Hanji)
Sludge-Wood Fiber Composite Boards^{*1}**
**II. Mechanical Properties of Korean Paper(Hanji)
Sludge-Wood Fiber Composite Boards**

Phil-Woo Lee^{*2} · Hak-Lae Lee^{*2}

ABSTRACT

This study was carried out to develop the Korean paper(Hanji) sludge-wood fiber composite boards utilizing the relinquished sludges occurring from the making process of Korean classic paper Hanji. The bark of paper mulberry(*Broussonetia kazinoki* Sieb.) has been used as a raw material since past hundreds and thousands years.

Korean paper(Hanji) sludge was divided into two kinds, the one was the white sludge from the first stage and the other was the black sludge occurring from the final stage of Korean paper(Hanji) making. Four levels of the mixed ratio of each white or black sludge to wood fiber(10:90, 20:80, 30:70 and 40:60), three levels of the resin adhesives(PMDI, urea and phenol resin) and three levels of the density(0.60, 0.75 and 0.90) were designed to investigate the mechanical properties of Korean paper(Hanji) sludge-wood fiber composite boards.

From the results and discussion, it could be concluded as follows :

1. In the white and black sludge-wood fiber composite boards, bending modulus of rupture showed the clear decreasing tendency according to the increase of sludge additive, but it was clearly increased with the increase of specific gravity. Modulus of elasticity showed the same tendency as in the modulus of rupture, and also tensile and internal bonding strength had the same tendencies as in these bending properties.

2. Among the resin adhesives, PMDI or urea resin showed great values in MOR of white sludge-wood fiber composite board, but urea resin was greater than PMDI in MOR and MOE of black sludge-wood fiber composite board. Tensile and internal bonding strength showed the same tendencies as in white sludge-wood fiber composite board.

*1 접수 1999년 5월 31일. Received May. 31, 1999

이 논문은 통산산업부 기술개발사업 97-1085의 연구보고임.

*2 서울대학교 임산공학과, Department of Forest Products, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

3. It is suggested that the white sludge-wood fiber composite boards bonded with PMDI or black sludge-wood fiber composite boards bonded with urea resin were able to made similar boards to general fiberboard by the mixed ratio 20:80 of sludge to wood fiber.

Keywords : white sludge, black sludge, Korean paper(Hanji), composite board, wood fiber, paper mulberry, mechanical property.

- 요약 -

한지제지 공정 중에서 발생하는 백색슬러지와 흑색슬러지를 각각 일정비율(10:90, 20:80, 30:70, 40:60)로 목재 섬유와 혼합하고 PMDI, 요소 및 페놀수지를 이용하여 목표비중 0.60, 0.75, 0.90 별로 복합보드를 제조한 결과 전반적으로 볼 때 PMDI수지를 적용한 백색슬러지-목재섬유 복합보드나 요소수지를 적용한 흑색슬러지-목재섬유 복합보드의 경우 20% 정도까지의 슬러지 첨가는 거의 통상적인 보드에 대응하는 기계적 성질을 지닌다고 믿어진다

1. 서 론

본 연구는 폐기물질인 한지 슬러지를 복합재에 혼합 활용하기 위한 연구로 “한지 슬러지-목재섬유 복합보드의 제조연구”라는 제목으로 그 제 1 보인 한지 슬러지-목재섬유 복합보드의 물리적 성질을 취급한 바 있으며 후속의 제 2 보로서 한지 슬러지-목재섬유 복합보드의 기계적 성질을 취급하였다.

환경오염원으로 심각하게 취급하고 있는 각종 제지 슬러지는 제 1 보에서 밝힌 바와 같이 제지 과정 중에서 필연적으로 발생하는 폐기물질로서 이의 처리문제가 중요한 연구과제^{5,6,12,13)}로 취급되어 왔다. 마찬가지로 한지 슬러지 역시 환경오염원으로 취급하는 폐기물질로서 그 처리 문제가 중요하다고 생각한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 여러 연구^{8,9,10,11,12)}가 서울대 농생대 목질재료연구실에서 다년간에 걸쳐 실시된 바 있으며 국외에서도 이와 같은 연구가 실시된 바 있으나^{2,3)} 한지슬러지의 활용 연구는 한지가 다향나무 껍질을 원료로 이용한 우리나라의 전통종이로 그 슬러지의 연구는 국내의를 막론하고 취급된 연구가 전혀 없다. 한지슬러지는 이미 본 연구의 첫 번째 보고에서 한지 제지 과정에서 백색과 흑색 슬러지의 두 종류가 발생함을 기술한 바 있다. 이 연구에서는 백색과 흑색슬러지별로 목재섬유에 일정비율(10:90, 20:80, 30:70, 40:60)로 혼합한 다음 비중

(0.6, 0.75, 0.90)과 접착제(PMDI수지, 요소수지, 페놀수지)별로 복합보드를 제조하고 휨강도의 파괴계수(MOR)와 탄성계수(MOE), 그리고 인장강도(TS)와 박리강도(IB) 등 기계적 강도를 측정하였다.

이들 기계적 강도의 자료를 이용하여 제 1보에서 한지슬러지-목재섬유 복합보드의 물리적 성질에 미치는 영향을 고찰 분석한 바와 같이 본 연구에서도 복합보드의 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰·분석하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

2.1.1 한지슬러지

본 연구에서 사용한 한지슬러지는 국내 모 한지제조 공장으로부터 분양 받아 사용하였다. 슬러지 발생 공정에 따라 초기 생산공정에서 발생하는 섬유상의 백색슬러지와 최종처리 후 발생하는 분말상의 흑색슬러지를 구분하여 연구에 이용하였다.

백색슬러지는 어느 정도 건조한 것을 1차 분쇄를 통하여 영킨 섬유를 풀어준 후 다시 2차 분쇄를 통하여 단섬유화 하였다. 그 후 체진동기를 이용하여 4~25mesh로 선별하였으며 함수율 10% 정도로 건조하여 사용하였다.

흑색슬러지 역시 어느 정도 건조한 것을 분쇄한 다음 체진동기를 이용하여 18~40mesh로 선별하고 함수율 10% 정도로 건조 조정하여 사용하였다.

2.1.2 목재섬유

목재섬유는 MDF용 섬유로서 수종은 미국산 솔송나무(western hemlock, *Tsuga heterophylla*)이며, 목재 섬유화 공정은 증해 온도 160℃, 증해 압력 7~10kgf/cm², 증해 시간 2~3분으로 처리한 후 디스크 리파이너로 해섬하였다. 그후 건조기를 거치지 않은 상태의 함수율 50~60%인 섬유를 2~3개월 동안 실 내에서 천연 건조시킨 다음 함수율을 10%로 조정하여 폴리에틸렌 백에 담아 보관한 것을 사용하였다.

2.1.3 접착제

본 연구에서 사용한 접착제는 고형분 53%의 요소수지(Urea-formaldehyde resin)와 고형분 63%의 페놀수지(Phenol formaldehyde resin), 그리고 고형분 90%의 PMDI(Polymeric Methylene Diphenyl Diisocyanate)수지였다.

2.2 방법

2.2.1 제조변수

본 연구에서는 한지슬러지 대 목재섬유 혼합비율(10:90, 20:80, 30:70, 40:60), 보드비중(0.6, 0.75, 0.9), 그리고 접착제(요소, 페놀, PMDI수지)를 제조 변수로 하여 시험하였다. 또한 목재섬유만을 이용하여, 요소, 페놀, PMDI수지를 도포한 비중 0.75의 섬유판을 제조하여 대조보드로 하였다.

2.2.2 복합보드 제조

복합보드의 크기는 25×20×0.5cm(길이×폭×두께)로 제조하였다. 복합보드 제조를 위하여 한지슬러지와 목재섬유를 공기혼합기를 사용하여 균일하게 혼합한 후, 혼합된 원료를 동일한 조건에서 드럼형혼합기를 이용하여 요소수지는 슬러지와 섬유의 전건무게에 대하여 10%, 페놀수지는 5%, 그리고 PMDI수지는 2.5%를 첨가하였다.

열압온도는 요소수지 140℃, 페놀수지 160℃, PMDI수지 130℃를 적용하였고 열압시간은 요소수지4분, 페놀수지 6분, PMDI수지 3분을 적용하였다. 열압압력은 35kgf/cm²로 하였다. 제조된 보드는 온도 20±1℃, 상대습도 65±3%의 항온항습실에서 수주간 조습처리하였다.

2.2.3 복합재의 기계적 성질 평가

복합재의 기계적 성질은 ASTM D 1037-87¹⁾에 의거하여 휨강도(MOR, MOE), 인장강도, 박리강도를 측정·분석했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 휨파괴계수와 휨탄성계수

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 휨파괴계수와 휨탄성계수의 측정결과를 그림으로 표시하면 Fig. 1, 2, 3, 4와 같다. 먼저 백색슬러지-목재섬유 복합보드의 휨파괴계수는 PMDI수지, 요소수지, 페놀수지의 적용에 따라 각각 95~327kgf/cm², 61~258kgf/cm², 46~158kgf/cm²를 나타냈고, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 각각 59~217kgf/cm², 74~240kgf/cm², 32~117kgf/cm²를 나타냈다. 대조보드의 휨파괴계수는 112~212kgf/cm²였다.

휨탄성계수의 경우는 백색슬러지-목재섬유 복합보드가 PMDI수지, 요소수지, 페놀수지의 적용에 따라 각각 20227~32511kgf/cm², 16954~34896kgf/cm², 13391~26022kgf/cm²를 나타냈고, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 각각 17813~28004kgf/cm², 19195~30485kgf/cm², 8968~24830kgf/cm²를 나타냈다. 대조보드의 휨탄성계수는 24353~28904kgf/cm²를 나타냈다.

Fig. 1, 2, 3 및 4를 비교하여 보면, 보드 비중의 증가에 따라 휨파괴계수와 휨탄성계수가 뚜렷하게 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 또 슬러지의 첨가량의 증가에 따라서는 뚜렷하지는 않았으나 대체로 감소의 경향을 나타냈다. 또, 모든 수지의 경우에서 일반적으로 백색슬러지를 적용한 복합보드가 흑색슬러지를 적용한 복합보드보다 높은 휨탄성계수를 나타냈다. 구성형태 별로는 PMDI와 요소수지를 적용한 백색슬러지-목재섬유 복합보드가 대조보드와 유사한 값을 나타내는 등 우수한 결과를 나타냈다.

Fig. 1과 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 첨가수지 접착제 중에서 요소수지를 적용한 경우를 제외하고는 일반적으로 백색슬러지를 적용한 복합보드가 흑색슬러지를 적용한 복합보드보다 높은 휨파괴계수를 나타냈다. 구성형태 중에서는 PMDI를 적용한 백색슬러지-목재섬유 복합보드와 요소수지를 적용한 흑색슬러지-목재섬유 복합보드가 우수한 결과를 나

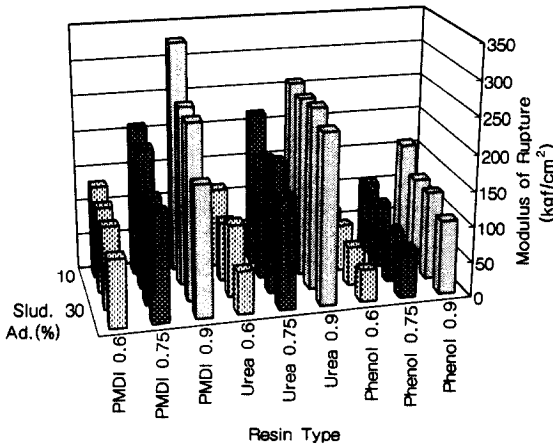


Fig. 1. Modulus of rupture of Korean paper(Hanji) white sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

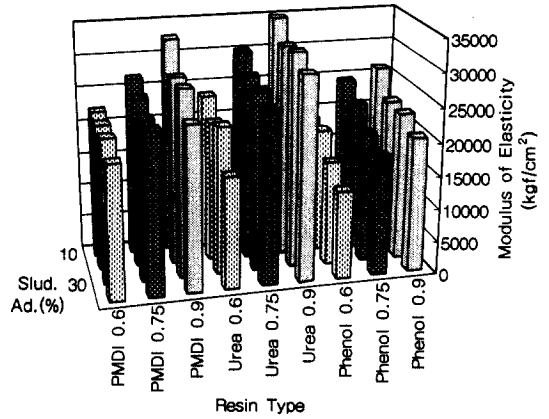


Fig. 2. Modulus of rupture of Korean paper(Hanji) black sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

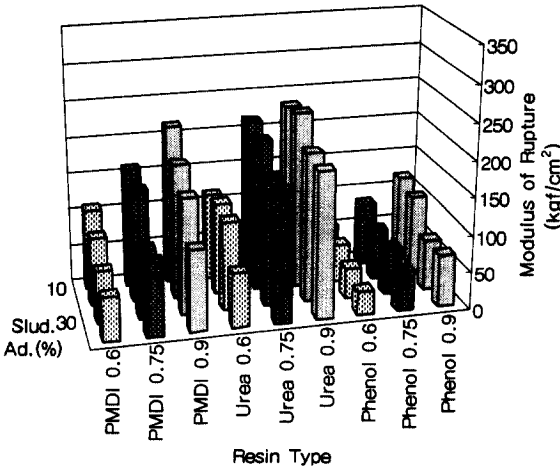


Fig. 3. Modulus of elasticity of Korean paper(Hanji) white sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

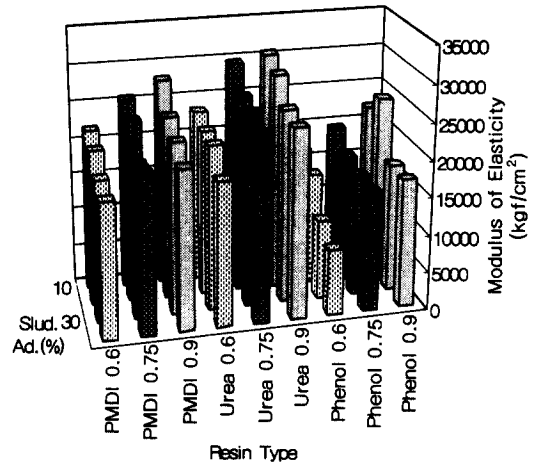


Fig. 4. Modulus of elasticity of Korean paper(Hanji) black sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

타냈으며 20% 혼합까지는 대조보드와 유사한 값을 나타냈다.

이전의 연구^{12,13,14,15)} 등에서와 같이 슬러지를 첨가하여도 휨파괴계수와 휨탄성계수에는 큰 영향 없이 보드를 제조할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 PMDI

와 요소수지를 각 재료에 맞게 적용한다면 더 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

Rowell 등³⁾, Krzysik 등²⁾, Stewart 등⁴⁾ 및 Vital 등⁷⁾의 보드에 관한 기계적 성질 보고에 의하면 밀도가 증가하면 파괴강도와 탄성계수가 증가함을 보고

한 바 있는데 본 연구에서도 일치된 경향을 나타냈다. 또 Rowell 등³⁾과 Krzysik 등²⁾이 고지섬유를 혼용한 섬유판 연구에서 고지의 첨가량 증가는 휨강도를 저하시킨다고 보고한 바, 본 연구에서도 같은 경향을 나타냈으나 그 경향은 인장과 박리강도만큼 뚜렷하지 않았다.

3.2 인장강도

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 인장강도의 측정 결과를 그림으로 표시하면 Fig. 5 및 6과 같다. 백색슬러지-목재섬유 복합보드의 인장강도는 PMDI수지, 요소수지, 페놀수지의 적용에 따라 각각 78.3~236.6 kgf/cm², 60.9~219.0kgf/cm², 45.7~142.5kgf/cm²를 나타내었고, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 각각 56.4~211.4kgf/cm², 67.8~227.0 kgf/cm², 38.6~118.3kgf/cm²를 나타냈다. 대조보드의 인장강도는 86.5~186.6kgf/cm²를 나타냈다.

Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 바와 같이 슬러지 첨가량이 증가함에 따라 인장강도가 감소하였으나 비중이 증가함에 따라 인장강도가 증가하는 현상을 뚜렷하게 보여주고 있다. 또 이들 인장강도에서 휨과파계수의 경우와 같이 요소수지를 적용한 경우를 제외하고는 일반적으로 백색슬러지를 적용한 복합보드가 흑색슬러지를 적용한 복합보드보다 높은 값을 나타냈다. 구성형태 중에서는 PMDI수지를 적용한 백색

슬러지-목재섬유 복합보드와 요소수지를 적용한 흑색슬러지-목재섬유 복합보드가 우수한 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과로 볼 때 흑색슬러지를 적용한 경우에는 PMDI수지보다는 요소수지가 약간 더 효과적으로 접착한 것으로 보여진다.

3.3 박리강도

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 박리강도의 측정 결과를 그림으로 표시하면 Fig. 7 및 8과 같다. 백색슬러지-목재섬유 복합보드의 박리강도는 PMDI수지, 요소수지, 페놀수지의 적용에 따라 각각 1.21~4.11 kgf/cm², 0.65~4.04kgf/cm², 0.26~1.78kgf/cm²를 나타내었고, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 각각 0.79~3.90kgf/cm², 0.98~4.09kgf/cm², 0.46~1.83 kgf/cm²를 나타냈다. 대조보드의 박리강도는 1.66~3.79kgf/cm²를 나타냈다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 슬러지 첨가량이 증가함에 따라 박리강도는 감소하였으나 비중이 증가함에 따라 박리강도가 증가하는 현상이 접착제 모두에서 뚜렷하게 나타났다. 또 박리강도에 있어서도 다른 강도의 결과와 유사하게 PMDI수지를 적용한 백색슬러지-목재섬유 복합보드와 요소수지를 적용한 흑색슬러지-목재섬유 복합보드가 우수한 결과를 나타냈다. 그러나 PMDI를 적용한 흑색슬러지-목재섬유 복합보드의 경우에는 그 첨가량이 30% 이

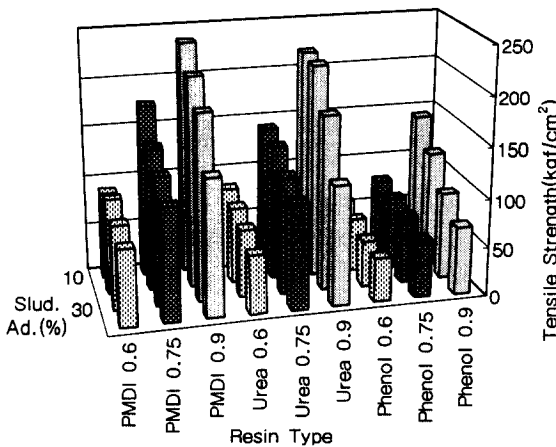


Fig. 5. Tensile strength of Korean paper(Hanji) white sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

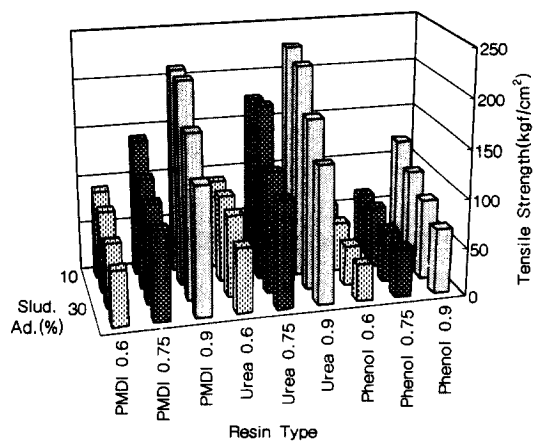


Fig. 6. Tensile strength of Korean paper(Hanji) black sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

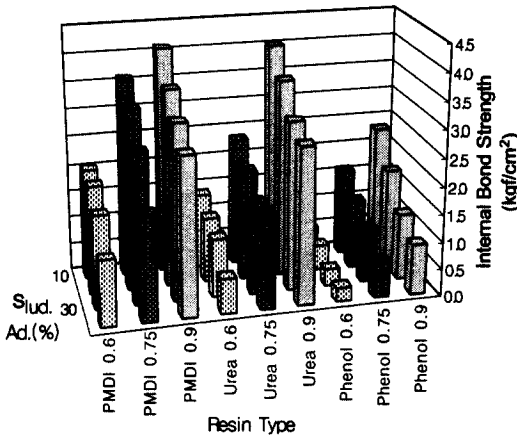


Fig. 7. Internal bond strength of Korean paper (Hanji) white sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

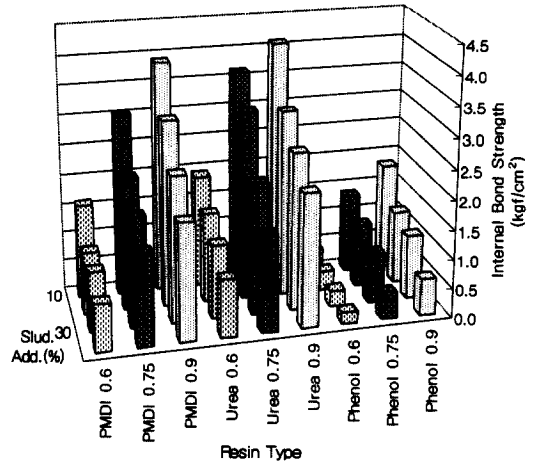


Fig. 8. Internal bond strength of Korean paper (Hanji) black sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

상으로 증가할수록 다른 수지를 적용한 경우에 비해 감소가 컸다. 이와 같은 결과는 이전의 연구 등^{12,13,14)}에서 보고된 바와 같이 슬러지 성분 중의 회분성분에 기인한 것으로 생각된다. 즉, 두께팽창율에서도 언급한 바와 같이 PMDI수지를 적용한 경우에는 접착제의 특성과 소량의 첨가량으로 인하여 목재섬유에 분말상의 흑색슬러지를 균등히 접착·도포시키지 못하고 성형시에 비중이 무거운 흑색슬러지가 분산되기보다는 한 부분에 집중되는 현상이 일어났다. 반면에 요소수지의 경우에는 목재섬유를 충분히 흡윤·도포하여 분말상의 흑색슬러지가 균등히 접착될 수 있는 성형의 결과가 일어났으며, PMDI수지 도포에서와 같은 흑색슬러지의 부분적인 집중 현상은 나타나지 않았다. 따라서 제조된 보드에서 슬러지의 회분에 의한 영향이 크게 관여되는 것으로 생각된다. 그리고 이 영향은 첨가량이 클수록 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결 론

한지슬러지를 이용한 한지슬러지-목재섬유 복합보드를 개발하기 위하여, 한지슬러지 대 목재섬유의 혼합비율, 수지의 종류, 비중 등을 달리하여 보드를 제

조하고, 그 기계적 성질을 측정하고 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 한지 백색슬러지-목재섬유 복합보드에 있어서 휨파괴계수는 슬러지 첨가량이 증가함에 따라 감소하였고 비중이 증가함에 따라 뚜렷하게 증가하였다. 접착제별로는 PMDI수지와 요소수지를 사용한 복합 보드는 우수하였으나 페놀수지는 불량하였다. 휨탄성계수는 휨파괴계수와 비슷한 경향을 나타냈으나 뚜렷하지 않았다.

인장강도는 슬러지 첨가량이 증가함에 따라 감소하였으나 비중이 증가함에 따라 증가하였다. 접착제별로는 페놀수지가 가장 불량하였다. 또 박리강도는 이와 같은 현상이 매우 뚜렷하게 나타났다.

2. 한지 흑색슬러지-목재섬유 복합보드에 있어서 휨파괴계수는 요소수지가 PMDI수지를 사용한 복합 보드보다 우수하였고, 페놀수지는 매우 불량하였다. 다른 경향은 1항의 백색슬러지-목재섬유 복합보드의 경우 비슷하였다.

휨탄성계수의 경향은 백색슬러지-목재섬유 복합보드와 비슷하였으나 PMDI수지보다 요소수지가 조금 더 우수하였다. 또 인장강도와 박리강도에 있어서도 1항의 백색슬러지-목재섬유 복합보드와 같은 경향을 나타냈다.

3. PMDI수지를 적용한 백색슬러지-목재섬유 복합 보드나 요소수지를 적용한 흑색슬러지-목재섬유 복

합보드의 경우 복합보드 무게에 대하여 20% 정도까지 슬러지를 첨가한 것은 거의 통상적인 목질보드에 대응하는 기계적 성질을 지닌다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. American Society for Testing Materials(ASTM). 1995. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Materials. ASTM D1037-87
2. Krzysik, A. M., J. M. Youngquist, R. M. Rowell, J. H. Muehl, P. Chow, and S. R. Shook, 1993. Feasibility of using recycled newspapers as a fiber source for dry-process hardboards, *Fore. Prod. J.*, 43(7/8): 53-58.
3. Rowell, R. M., and S. Harrison, 1992. Fiber based composites from recycled mixed paper and magazine stock, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 266: 65-72.
4. Stewart, H. A., and W. F. Lehman, 1973. High quality particle boards from cross grain and knife-planed hardwood flakes, *Fore. Prod. J.* 23(8): 52-60.
5. Tay, J. H. 1986. Potential use of sludge ash as construction material. *Resource & Conservation*. 13: 53~58.
6. Tay, J. H. 1989. Sludge ash as filler for portland cement concrete. *J. Environmental Engineering*. 113(2): 345~351.
7. Vital, B. R., W. F. Lehman, and R. S. Boone, 1974. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particle boards, *Fore. Prod. J.* 24(12): 37-45.
8. 金大俊, 李弼宇. 1994. 제지 슬러지의 첨가가 요소수지 파티클 보드의 폼알데히드 방산 및 물리적, 기계적 성질에 미치는 영향. *목재공학* 22(3): 44~53.
9. 孫廷一, 李弼宇. 1994. 슬러지-파티클 보드의 난연성과 기계적 성질. *목재공학* 22(3): 54~65.
10. 孫廷一, 李弼宇. 1994. 내화처리 구성형태에 따른 삼층 및 혼합 슬러지-파티클 보드의 내화성. *한국목재공학회 학술논문 발표 요지집(추계)*. 67~71.
11. 李弼宇, 孫廷一. 1993. 제지 슬러지-목재 파티클 혼합 보드의 산소지수. *서울대 농학연구* 18(1): 7~12.
12. 李弼宇, 尹炯雲, 金大俊, 孫廷一. 1993. 슬러지-파티클 보드의 제조 가능성 및 구성비율에 관한 기초연구. *목재공학* 21(2): 57~65.
13. 李弼宇, 尹炯雲. 1993. 삼층 슬러지-파티클 보드의 제조와 물성. *한국가구학회지* 5(2): 50~61.
14. 李弼宇, 尹炯雲. 1996. 구성형태와 구성비율별로 제조한 슬러지-파티클 보드의 물리적 및 기계적 성질. *목재공학* 24(1): 17~26.
15. 李弼宇, 李喆周. 1996. PMDI(Polymeric Methylenediphenyl Diisocyanate)수지를 이용한 신문고지섬유-목재섬유 혼합 하드보드의 물리적 및 기계적 성질. *서울대농학연구* 21(20): 95~103.