

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 제조연구^{*1}

I. 한지슬러지-목재섬유 복합보드의 물리적 성질

이 필 우^{*2} · 이 학 래^{*2}

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

I. Physical 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 physical 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 sludge-wood fiber composite board, the thickness swelling was not affected by the specific gravity and sludge additive of composite boards, but among the resin adhesives PMDI resin showed the best dimensional stability. Water absorption was superior in urea resin, secondly PMDI resin and very poor in phenol resin.

2. In the black sludge-wood fiber composite board, thickness swelling was superior in PMDI resin but very poor in phenol resin. In water absorption, PMDI and urea resin showed good results, regardless of specific gravity or sludge additive, but phenol resin showed poor results.

*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. From the results and discussion of physical properties 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 made possibly with similar or better properties, compared with general fiberboard until the addition of 20% sludge into wood fiber.

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

- 요약 -

한지제조 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 백색슬러지를 20% 정도까지 혼합하고 PMDI수지를 적용하면 통상적인 보드와 유사하거나 오히려 더 좋은 치수안정성을 가지는 것으로 판단된다. 또한 흑색슬러지의 경우는 요소수지를 사용하거나 PMDI수지의 첨가량을 증가시켜 조절한다면 20%의 슬러지 첨가량까지는 치수안정성 면에서 통상적인 보드와 큰 차이가 없는 보드를 제조할 수 있다고 믿어진다.

1. 서론

우리 나라의 전통 한지는 뽕나무과의 닥나무 (*Broussonetia kazinoki* Sieb.) 껍질을 이용하여 종이를 만들게 되는데 닥나무 껍질은 섬유의 길이가 길고 질긴 것으로 알려진 특수한 우리 나라의 한지 원료이다. 일반 종이류의 제지과정에서 발생하는 슬러지와 같이 닥나무 껍질을 원료로 이용한 한지의 제지과정에서도 슬러지가 발생한다. 이들 물질은 환경오염원으로 심각한 폐기물질로서 처리문제가 중요한 연구과제^{5,6,11,12)}로 취급되어 왔다.

슬러지 문제를 해결하고자 수년 전부터 서울대 농생대 목질재료연구실에서는 슬러지를 목질 복합재 제조에 이용하기 위한 많은 노력을 기울여 온 바 있고 몇몇 연구^{7,8,9,10,11)}를 통해 그 가능성을 입증한 바 있다. 슬러지를 목질 복합재 제조에 이용하는 것은 목질자원을 대체한다는 경제적인 측면에서 뿐만 아니라 폐기물의 이용이라는 환경적인 측면에서도 매우 의미 있는 일이라 할 수 있다. 다만 한지 제조 공정에서 발생하는 한지슬러지의 경우는 그것을 목질 복합재 제조에 이용하는 연구가 국내외를 막론하고 전연 수행된 바가 없다. 따라서 한지슬러지의 경우 그 성상이 일반 제지 슬러지와는 달라 보드제조를 위한 기초 연구가 절대적으로 요구된다고 생각한다.

한지제조 공정 중에서 발생하는 슬러지는 초기생산 공정에서의 백색슬러지(white sludge)와 최종처

리 후에 발생하는 흑색슬러지(black sludge)의 두 종류가 발생하는데, 본 연구에서는 백색과 흑색슬러지를 각각 일정비율(10:90, 20:80, 30:70, 40:60)로 목재 섬유와 혼합하고, PMDI 수지, 요소 수지, 페놀 수지를 이용하여 복합보드를 비중 0.60, 0.75, 0.90 별로 제조한 다음, 이들 인자가 복합보드의 물리적 성질에 미치는 영향을 시험·고찰하고자 이 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

2.1.1 한지슬러지

본 연구에서 사용한 한지슬러지는 닥나무 껍질을 원료로 이용하고 있는 국내 한지제조 공장으로부터 분양 받아 사용하였다. 한지슬러지는 슬러지 발생 공정에 따라 초기 생산공정에서 발생하는 섬유상의 백색슬러지와 최종처리 후 발생하는 분말상의 흑색슬러지를 구분하여 모두 복합보드의 제조에 이용하였다.

백색슬러지는 어느 정도 건조시킨 다음 1차 분쇄를 통하여 영킨섬유를 풀어준 후 다시 2차 분쇄를 통하여 단섬유화 하였다. 그 후 체진동기를 이용하여 4~25mesh로 선별하였으며, 함수율 10% 정도로 건조하여 사용하였다.

또, 흑색슬러지도 어느 정도 건조시킨 다음, 분쇄

하고 체진동기를 이용하여 18~40mesh로 선별하였으며, 역시 함수율 10% 정도로 건조하여 보드 원료로 사용하였다.

2.1.2 목재섬유

목재섬유는 국내 모 기업에서 분양 받은 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 해섬하였으며 함수율을 10%로 조정된 상태의 섬유를 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) 수지를 구입하여 이용하였다.

2.2 방법

2.2.1 제조변수

본 연구에서는 다음과 같은 한지슬러지 대 목재섬유 혼합비율(10:90, 20:80, 30:70, 40:60), 보드비중(0.6, 0.75, 0.9), 그리고 접착제(요소수지, 페놀수지, PMDI 수지)를 제조 변수로 하여 시험하였다. 또한 목재섬유만을 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 먼저 한지슬러지와 목재섬유를 공기혼합기를 사용하여 균일하게 혼합한 후, 동일한 조건에서 드럼형 혼합기를 이용하여 요소수지는 슬러지와 섬유의 전건무게에 대하여 10%, 페놀수지는 5%, 그리고 PMDI수지는 2.5%를 첨가·도포하였다.

열압온도는 요소수지 140℃, 페놀수지 160℃,

Table 1. Specific gravities and moisture contents of Korean paper(Hanji) white sludge-wood fiber composite boards

Resin Type		PMDI		Urea		Phenol	
Target Sp Gr	Mixed ratio ^a (%)	Sp Gr ^b	Moisture Content (%)	Sp Gr	Moisture Content (%)	Sp Gr	Moisture Content (%)
0.60	10	0.60 ^c ±0.03 ^d	5.21±0.76	0.64±0.04	5.64±0.69	0.65±0.04	5.90±0.53
	20	0.63±0.05	5.94±0.61	0.64±0.01	5.86±0.68	0.64±0.03	6.02±0.34
	30	0.62±0.04	5.87±0.73	0.62±0.03	5.77±0.60	0.61±0.03	5.44±0.36
	40	0.68±0.06	5.59±0.53	0.63±0.02	5.85±0.43	0.62±0.04	5.54±0.38
0.75	10	0.77±0.01	5.98±0.65	0.77±0.33	6.03±0.58	0.78±0.02	5.30±0.28
	20	0.76±0.08	6.31±0.47	0.77±0.03	6.30±0.59	0.79±0.04	5.64±0.24
	30	0.76±0.03	6.41±0.71	0.78±0.03	5.32±0.22	0.78±0.09	5.73±0.26
	40	0.76±0.05	6.13±0.37	0.78±0.05	5.35±0.33	0.77±0.03	6.06±0.45
0.90	10	0.91±0.06	6.76±0.33	0.88±0.03	6.16±0.47	0.92±0.07	5.63±0.31
	20	0.93±0.04	6.27±0.30	0.93±0.04	6.17±0.69	0.93±0.02	5.34±0.43
	30	0.94±0.03	6.11±0.24	0.94±0.06	6.22±0.21	0.92±0.05	5.29±0.32
	40	0.90±0.07	5.99±0.42	0.92±0.03	5.95±0.35	0.92±0.08	5.20±0.51
0.75	0	0.74±0.02	7.82±0.51	0.76±0.04	7.73±0.57	0.71±0.03	7.15±0.13

a: Sludge weight to fiber weight (based on oven-dry weight), b: based on oven-dry volume, c: Each mean value of specimens from 8 replications, d: the standard deviation of specimens from 8 replications.

PMDI수지 130℃를 적용하였고 열압시간은 요소수지 4분, 페놀수지 6분, PMDI수지 3분을 적용하였다. 열압압력은 35kgf/cm²로 각각 적용했다. 제조된 보드는 온도20±1℃, 상대습도 65±3%의 항온항습실에서 수주간 조습처리하였다.

2.2.3 복합보드의 물리적 성질 평가

복합보드의 물리적 성질은 ASTM D 1037-87²⁾에 의거하여 밀도, 함수율, 선팽창률, 두께팽창률과 물흡수량을 측정·분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비중(밀도), 함수율

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 비중과 함수율 측정결과를 표시하면 Table 1, 2와 같다. 먼저 복합보드의 비중은 목표비중(0.6, 0.75, 0.9)에 따라 백색

슬러지-목재섬유 복합보드는 0.60~0.68, 0.76~0.79, 0.88~0.94, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 0.63~0.65, 0.71~0.80, 0.91~0.98을 나타냈다. 목표비중 0.75인 대조보드의 비중은 각각 PMDI수지 0.74, 요소수지 0.76, 페놀수지 0.71이었다. Table 1, 2에서 알 수 있듯이 각 구성형태에 따른 목표비중과 실제 제조한 보드 비중과의 차이는 크게 나타나지 않았다.

복합보드의 함수율은 백색슬러지-목재섬유 복합보드는 5.2~6.8%, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 7.7~10.5%였고, 대조보드의 함수율은 7.2~7.8%였다. 다만 흑색슬러지-목재섬유 복합보드가 백색슬러지-목재섬유 복합보드보다 더 높은 함수율을 보였는데, 이것은 일반 제지슬러지를 이용했던 *李 등*¹⁾의 보고에서와 같이 동일한 열압조건을 적용하였지만 초기처리만을 거친 원료 슬러지 보다 높은 최종처리까지 거친 회분 함량 등 슬러지 성분의 흡수성 차이로 인한 결과라고 추정된다.

Table 2. Specific gravities and moisture contents of Korean paper(Hanji) black sludge-wood fiber composite boards

Resin Type		PMDI		Urea		Phenol	
Target Sp Gr	Mixed ratio ^a (%)	Sp Gr ^b	Moisture Content (%)	Sp Gr	Moisture Content (%)	Sp Gr	Moisture Content (%)
0.60	10	0.63 ^c ±0.02 ^d	8.22±0.38	0.65±0.03	8.12±0.15	0.63±0.05	6.98±0.34
	20	0.64±0.04	9.22±0.37	0.63±0.01	9.33±0.38	0.65±0.04	7.95±0.42
	30	0.65±0.04	9.87±0.51	0.64±0.05	9.18±0.14	0.63±0.02	8.77±0.56
	40	0.64±0.06	10.49±0.31	0.65±0.04	8.97±0.36	0.64±0.10	9.70±0.53
0.75	10	0.75±0.04	8.44±0.16	0.80±0.03	8.14±0.21	0.79±0.03	9.48±2.59
	20	0.71±0.02	9.67±0.39	0.77±0.04	8.76±0.63	0.79±0.05	8.38±0.53
	30	0.78±0.06	9.52±0.86	0.76±0.03	9.34±0.33	0.75±0.05	8.14±0.11
	40	0.76±0.05	9.16±0.39	0.76±0.03	9.13±0.36	0.74±0.08	8.80±0.37
0.90	10	0.91±0.20	8.60±0.58	0.94±0.03	8.52±0.84	0.98±0.03	6.98±0.19
	20	0.91±0.02	8.34±0.23	0.91±0.04	7.88±0.12	0.97±0.04	7.97±0.13
	30	0.93±0.04	9.02±0.07	0.93±0.06	9.09±0.55	0.91±0.06	7.74±0.50
	40	0.95±0.05	9.40±0.32	0.94±0.03	9.36±0.26	0.94±0.05	8.72±0.53
0.75	0	0.74±0.02	7.82±0.51	0.76±0.04	7.73±0.57	0.71±0.03	7.15±0.13

a: Sludge weight to fiber weight (based on oven-dry weight), b: based on oven-dry volume, c: Each mean value of specimens from 8 replications, d: the standard deviation of specimens from 8 replications.

3.2 선팽창률

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 선팽창률의 측정 결과를 그림으로 표시하면 Fig. 1, 2와 같다. 먼저 백색슬러지-목재섬유 복합보드의 선팽창률은 PMDI 수지, 요소수지, 페놀수지의 적용에 따라 각각 0.43~0.67%, 0.41~0.60%, 0.60~0.91%를 나타냈고, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 각각 0.53~0.86%, 0.45~0.63%, 0.62~1.46%를 나타냈다. 대조보드의

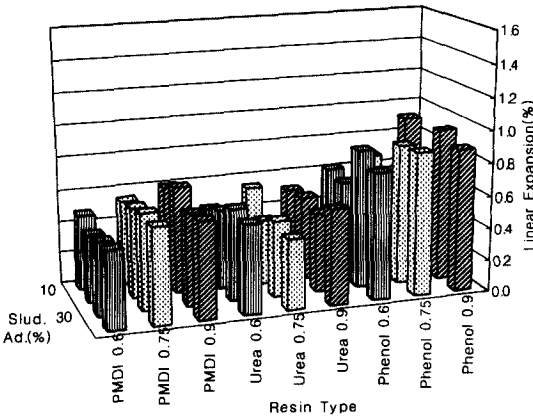


Fig. 1. Linear expansion of Korean paper(Hanji) white sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

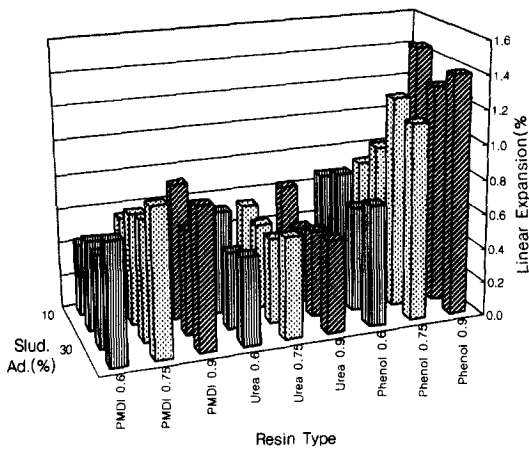


Fig. 2. Linear expansion of Korean paper(Hanji) black sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

선팽창률은 0.44~0.65%였다. Fig. 1과 2에서 알 수 있듯이, 선팽창률에 대한 영향은 슬러지 종류나 첨가량보다는 수지종류가 더 크게 영향을 미쳤다. 또, 이들 그림에 나타난 바와 같이 각 비중조건에서 PMDI와 요소수지로 제조된 복합보드가 페놀수지로 제조된 보드에 비해 낮은 선팽창률을 나타냈다. 그러나 백색슬러지의 선팽창률이 흑색슬러지의 선팽창률보다 훨씬 낮다는 것을 Fig. 1과 Fig. 2를 비교함으로써 알 수 있었다. *李* 등¹¹⁾과 *李*와 *尹*¹²⁾의 보고에서와 같이 슬러지의 혼합량을 증가시킴에 따라 대조보드보다는 선팽창률이 증가하였다. 그러나 그 차이는 크지 않았으며, 비중이나 수지 및 혼합비율에 따른 선팽창률에 대한 특정한 경향을 찾기는 어려웠다.

3.3 두께팽창률

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 두께팽창률 측정 결과를 그림으로 표시하면 Fig. 3, 4와 같다. 먼저 백색슬러지-목재섬유 복합보드의 두께팽창률은 PMDI 수지, 요소수지, 페놀수지 접착제의 적용에 따라 각각 18.4~25.5%, 20.1~37.3%, 53.9~80.6%를 나타냈고, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 각각 25.0~47.8%, 17.2~26.3%, 56.0~81.0%를 나타냈다. 대조보드의 두께팽창률은 19.6~52.1%였다. 대조보드를 포함한 모든 구성형태 중에서 PMDI를 적용한 백색슬러지-목재섬유 복합보드가 가장 낮은 두께팽창률

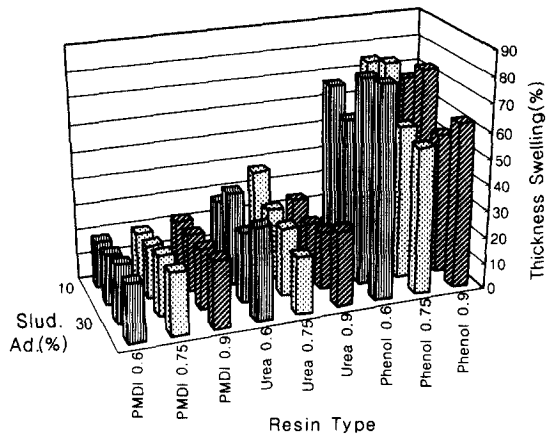


Fig. 3. Thickness swelling of Korean paper(Hanji) white sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

을 보였다(Fig. 3 및 Fig. 4 참조). 이것은 PMDI수지의 우수한 접착력으로 인한 결과로 생각되며, 이와 같은 접착특성은 분말상의 흑색슬러지를 이용한 경우보다는, 목재섬유와 성상이 비슷한 백색슬러지를 이용한 경우에 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 요소수지를 사용한 복합보드에서는 흑색슬러지-목재섬유 복합보드가 백색슬러지-목재섬유 복합보드보다 낮은 두께팽창률을 나타냈는데, 이것은 이전의 연구^{11,12,13,14}) 등에서 보고된 슬러지 성분 중의 회분성분의 영향 때문인 것으로 생각된다. PMDI수지를 적용한 경우에는 접착제의 특성과 적은 첨가량으로 인하여 목재섬유에 분말상의 흑색슬러지를 균등히 접착시키지 못하고 성형시에 비중이 무거운 흑색슬러지가 분산되기보다는 한 부분에 집중된 것을 볼 수 있었다. 반면에 요소수지의 경우에는 목재섬유를 충분히 적셔주어 분말상의 흑색슬러지를 균등히 접착시킬 수가 있어 성형시에 흑색슬러지의 집중된 부분은 나타나지 않았다. 따라서 요소수지를 적용하였을 경우 흑색슬러지-목재섬유 복합보드의 두께팽창률이 보다 낮게 나타난 것으로 생각된다. 또 Laundrie와 McNatt³⁾ 및 Stokke와 Liang⁴⁾에 의하면 대조보드보다 페지-목재섬유 복합보드의 치수안정성이 불량함을 보고하였는데 본 연구에서도 접착성이 우수한 PMDI 수지를 제외하면 요소와 페놀 수지를 적용한 보드 모두가 대조보드보다 두께팽창률이 불량함을

나타내고 있어서 일치하는 결과를 나타냈다. 그러나 본 연구에서 한지슬러지-목재섬유 복합보드의 비중이 중밀도 섬유판의 비중에 해당하는데도 불구하고 PMDI를 적용한 백색슬러지-목재섬유 복합보드가 미국 경질섬유판 협회(American Hardboard Association)¹⁾의 ANSI-AHA 두께팽창 최소치 25%를 만족시키고 있을 뿐만 아니라 요소수지를 적용한 흑색슬러지-목재섬유 복합보드도 이 수치를 거의 만족시키고 있는 것으로 보아 슬러지-목재섬유 복합보드에서는 슬러지 첨가가 두께팽창률을 뚜렷하게 줄일 수 있는 효과가 있음을 알 수 있었다.

이러한 결과로 볼 때 백색슬러지는 PMDI수지를 적용하고, 흑색슬러지는 요소수지를 적용하거나 PMDI수지의 첨가량을 증가시킴으로써 통상의 보드와 유사하거나 보다 우수한 두께팽창률을 지니는 보드를 제조할 수 있다고 판단된다.

3.4 물흡수량

한지슬러지-목재섬유 복합보드의 물흡수량 측정 결과를 그림으로 표시하면 Fig. 5, 6과 같다. 먼저 백색슬러지-목재섬유 복합보드의 물흡수량은 PMDI, 요소, 페놀수지의 적용에 따라 각각 32.0~59.4%, 43.6~62.6%, 81.5~126.4%를 나타냈고, 흑색슬러지-목재섬유 복합보드는 각각 48.1~60.5%, 50.6~61.2%, 104.1~147.6%를 나타냈다. 대조보드의 물흡

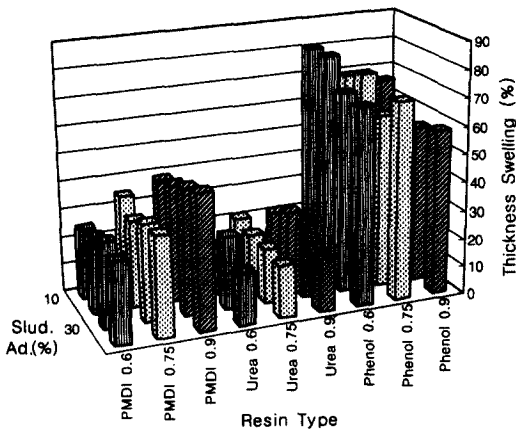


Fig. 4. Thickness swelling of Korean paper(Hanji) black sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

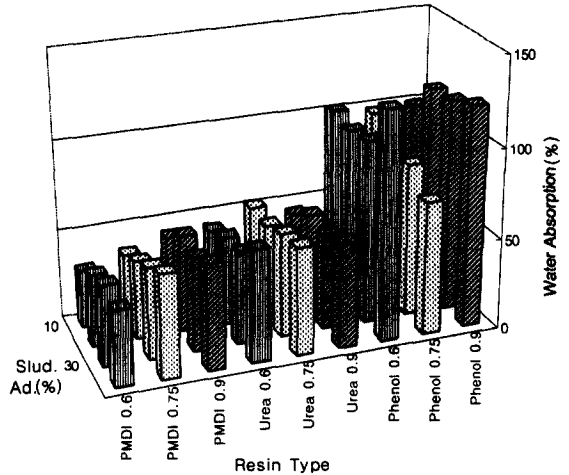


Fig. 5. Water absorption of Korean paper(Hanji) white sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

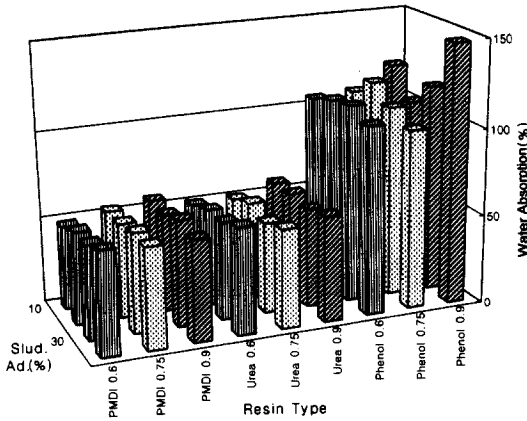


Fig. 6. Water absorption of Korean paper(Hanji) black sludge-wood fiber composite board by mixed levels of additive sludge, specific gravities and resin types.

요소, 페놀수지의 적용에 따라 각각 32.0~59.4%, 수량은 38.6~93.3%였다. 또 백색슬러지에서 요소수지를 적용한 보드가 PMDI 수지를 적용한 보드보다도 오히려 물흡수량이 약간 낮다는 것을 Fig. 5에서 알 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6에 나타난 바와 같이 일반적으로 흑색슬러지를 적용한 보드가 백색슬러지를 적용한 보드에 비해 큰 물흡수량을 나타냈다. 이것은 이전의 연구^{7,8,11,12,13)} 등에서 보고된 바와 같이 슬러지 중 회분의 영향으로 인한 결과라고 추정된다. 물흡수량에서도 백색슬러지에서는 PMDI수지의 적용이, 흑색슬러지에서는 요소수지의 적용이 좋은 결과를 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서 얻은 결과와 고찰을 토대로 하여 결론을 내리면 다음과 같다.

1. 한지 백색슬러지-목재섬유 복합보드에 있어서 두께 팽창은 비중과 슬러지 첨가량의 영향은 없었으나 수지 사이에서는 PMDI수지를 사용한 복합보드가 가장 우수하였고 다음으로는 요소수지였으며 페놀수지는 매우 불량하였다. 수분흡수율은 요소수지를 사용한 복합보드가 가장 우수하였고 다음으로는 PMDI 수지가 우수하였으며 페놀수지는 매우 불량하였다. 또 슬러지 첨가 수준에는 따른 큰 영향은 없었으나

PMDI수지와 요소수지는 비중이 클수록 수분흡수율이 증가하는 경향을 나타냈으며 페놀수지는 그 반대의 경향을 나타냈다.

2. 한지 흑색슬러지-목재섬유 복합보드에 있어서 두께팽창률은 PMDI수지를 사용한 복합보드가 가장 우수하였다. 그러나 페놀수지를 사용한 복합보드는 매우 불량하였다. 비중과 슬러지 첨가량의 증가는 특성 변화에 큰 영향이 없었다. 수분흡수율에 있어서 PMDI수지와 요소수지를 사용한 복합보드는 비중과 슬러지 첨가량에 관계없이 우수하였으나 페놀수지를 사용한 복합보드는 불량하였다.

3. 결과와 고찰을 통하여 전반적으로 판단할 때 한지슬러지를 이용한 복합보드의 물리적 성질은 백색슬러지를 20% 정도까지 혼합하고 PMDI수지를 적용하면 통상적인 보드와 유사하거나 오히려 더 좋은 치수안정성을 지는 것으로 믿어진다. 또한 흑색슬러지의 경우는 요소수지를 사용하거나 PMDI수지의 첨가량을 증가시켜 조절한다면 20%의 슬러지 첨가량까지는 치수안정성 면에서는 통상적인 목질보드와 큰 차이가 없는 성질의 보드를 제조할 수 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. American Hardboard Association. 1982. American National Standard Institute, Basic Hardboard, ANSI-AHA A 135.4 (Reaffirmed Jan. 11. 1988), Palatine, Ill.
2. American Society for Testing Materials(ASTM). 1995. Standard Test Methods for evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Materials. ASTM D1037-87
3. Laundrie, J. F. and J. D. McNatt. 1975. Dry formed medium density fiber boards from urban forest materials, USDA Forest Res. Pap. FPL-254.
4. Stokke, D. D. and B. H. Liang. 1991. Potential for recycling mixed grade waste paper into wood composite, Proceeding of Adhesives and Bonded Wood Products, Fore. Prod. Res. Society, 2801 Marshall Court, Madison, WI, pp. 593-607.
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. 金大俊, 李弼宇. 1994. 제지 슬러지의 첨가가 요소수지 파티클 보드의 포름알데히드 방산 및 물리적, 기계적 성질에 미치는 영향. *목재공학* 22(3): 44~53.
8. 孫廷一, 李弼宇. 1994. 슬러지-파티클 보드의 난연성과 기계적 성질. *목재공학* 22(3) : 54~65.
9. 孫廷一, 李弼宇. 1994. 내화처리 구성형태에 따른 삼층 및 혼합 슬러지-파티클 보드의 내화성. *한국목재공학회 학술논문 발표 요지집(추계)*. 67~71.
10. 李弼宇, 孫廷一. 1993. 제지 슬러지-목재 파티클 혼합 보드의 산소지수. *서울대 농학연구* 18(1) : 7~12.
11. 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.
12. 李弼宇, 尹炯雲. 1993. 삼층 슬러지-파티클 보드의 제조와 물성. *한국가구학회지* 5(2) : 50~61.
13. 李弼宇, 尹炯雲. 1996. 구성형태와 구성비율별로 제조한 슬러지-파티클 보드의 물리적 및 기계적 성질. *목재공학* 24(1) : 17~26.
14. 李弼宇, 李喆周. 1996. PMDI(Polymeric Methylene Diphenyl Diisocyanate)수지를 이용한 혼합 하드 보드의 물리적 및 기계적 성질. *서울대농학연구* 21(2) : 95~103.