

과산화수소에 의한 크라프트 펄프 표백에 관한 연구

김세중¹⁾, 윤병호²⁾,

1)한국제지주식회사, 2)강원대학교 제지공학과

1. 서론

표백제로서의 과산화수소는 1940년대 처음으로 기계 펄프 표백에 상업적으로 사용되었으며, 이후 차아염소산염(NaOCl)과 더불어 대표적인 표백제로 사용되어왔다. 또한 1970년대부터 제지 분야에서 과산화수소는 기계펄프의 표백(bleaching)뿐 아니라 화학펄프의 표백(delignification), 즉 리그닌을 제거할 목적으로 사용되기 시작하였다. 그러나 최근까지 과산화수소를 화학 펄프에 사용할 경우 백색도 개선에 한계가 있는 것으로 알려지면서, 펄프 표백시 최종 표백단에 사용하여 2~3point의 백색도 개선과 백색도 안정성에 기여하는 역할로 한정되어 왔다. 이러한 알칼리 과산화수소의 한계를 극복하기 위하여 화학펄프의 과산화수소 표백 효율 개선을 위한 많은 연구들이 진행되어왔으나, 산소나 이산화염소와 같은 다른 표백제에 비하여 과산화수소에 의한 탈리그닌화에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 TCF 표백에 초점을 맞추어 과산화수소와 리그닌의 반응 메커니즘, 과산화수소의 분해 메커니즘 및 화학펄프의 과산화수소 표백 효율 개선 방안에 대하여 조사하였다.

3.1에서는 알칼리 과산화수소에 의한 리그닌 모델화합물의 탈메틸화 정도와 더불어 페놀성 수산기 함량을 정량적으로 조사함으로써 리그닌의 분해 정도를 예측하였으며 그에 따른 리그닌 모델화합물과의 반응 메커니즘을 고찰하였다. 또한 주요 작용기의 변화를 ECF 표백의 대표적인 표백제인 이산화염소와 비교 평가하였다.

3.2에서는 금속이온에 의한 과산화수소의 분해 정도를 조사하였다. 과산화수소는 알칼리 조건에서 매우 불안정하며, 미표백 펄프 중에 포함되어 있는 전이금속들은 과산화수소를 촉매 분해함으로써 과산화수소의 표백 효율을 저하시킴과 동시에 라디칼 반응종의 생성을 통해 셀룰로오스를 분해하여 펄프 강도를 저하시키는 원인이 되는 것으로

알려져 있다. 본 연구에서는 알칼리 조건에서 금속이온(Mn, Cu, Fe, Mg 및 Ca)이 과산화수소의 분해에 미치는 영향을 인자별로 조사한 후 과산화수소의 분해 메커니즘을 고찰하였다. 또한 알칼리 과산화수소 표백시 사용되는 첨가제(MgSO₄, Na₂SiO₃와 킬레이트제)가 금속이온에 의한 과산화수소 분해에 미치는 영향을 조사하였다.

3.3에서는 니트릴아민계 활성제가 미표백 크라프트 펄프의 표백에 미치는 영향을 조사하였다. 최근 과산화수소를 알칼리 또는 산소 표백단과 복합사용하는 표백단(Ep 또는 Eop)은 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 미표백 펄프의 초기 표백단으로서의 과산화수소 표백에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 TCF 표백에 초점을 두고 미표백 크라프트 펄프의 첫 단계에 과산화수소 표백단을 사용할 경우 표백 효율을 평가하였으며, 니트릴아민계 활성제인 cyanamide와 dicyandiamide를 첨가하여 화학 펄프의 알칼리 과산화수소 표백 효율을 비교 평가하였다. 또한 알칼리 과산화수소를 다단(QPP) 처리할 경우 효율적인 활성제 운용 방안을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료

2.1.1 리그닌 모델화합물

과산화수소에 의한 리그닌의 분해를 조사하기 위한 모델화합물로는 apocynol과 veratryl carbinol을 합성하여 사용하였으며, 침엽수 마쇄리그닌은 강원대학교 연습림에서 채취한 30년산 소나무를 사용하여 Björkman 개량법으로 제조하였다.

2.1.2 펄프

동해펄프에서 생산된 침엽수 미표백 크라프트 펄프를 사용하였으며 산세척 및 킬레이트 전처리하여 사용하였으며, Kappa no.는 21.9, Brightness는 28.4%, 그리고 점도는 21.8cPs였다.

2.2 시약

메톡실기 정량에 펜탄, 요오드메탄과 요오드에탄을 사용하였고, 페놀성수산화기 측정에는 F-C 시약을 사용하였다.

금속이온으로 망간, 구리, 철, 마그네슘 및 칼슘 이온 용액을 제조하기 위하여 각각 $MnSO_4 \cdot H_2O$, $CuSO_4(Anhydrous)$, $FeSO_4 \cdot H_2O$, $FeCl_2 \cdot nH_2O$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 및 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 를 사용하였다.

과산화수소 표백효율 개선을 위한 활성제로는 cyanamide와 dicyandiamide를 사용하였으며, 첨가제로는 규산소다, 황산마그네슘을 사용하였으며 전처리 및 표백 중 첨가되는 킬레이트제로 EDTA와 DTPA를 사용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 메톡실기 측정용 모델화합물 표백처리

리그닌 모델화합물(apocynol과 veratryl carbinol)과 과산화수소는 1:1 (molar ratio) 처리하였고 이산화염소는 과산화수소와 동일한 활성 염소량으로 처리하였으며 침엽수 마쇄리그닌의 경우는 apocynol과 동일한 양의 표백제로 처리하였다.

2.3.2 가스 크로마토그래피 분석용(메톡실기 측정용) 샘플 제조

리그닌 샘플 20~25mg을 HI 5ml에 용해시킨 혼합물을 130℃에서 20분간 냉각시킨 후 펜탄 10ml를 첨가하여 15분간 교반하면서 메틸 요오드를 추출하였다. 그 추출액을 취하여 무수 황산나트륨으로 건조시킨 후 가스크로마토그래피에 주입하였다.

가스 크로마토그래피는 Hewlett-Packard 6890 모델을 사용하였다. Agilent社 HP-INNOWAX 칼럼, FID Detector, Carrier gas Helium, Injector temp. 110℃, Detector temp. 150℃, split ratio 1/120, run time 6min

2.3.3 UV 측정용(폐놀성수산기 측정용) 샘플 제조

리그닌 샘플 10~20mg을 취하여 100ml 증류수에 용해시켰다. 100ml 중 3ml를 취하여 50ml 메스플라스크에 옮긴 후 F-C 시약 3ml와 20% $Na_2S_2O_3$ 10ml를 첨가한 후 증류수로 50ml 표선에 맞추었다. 수시로 잘 흔들어주면서 2시간 정도 방치한 후 UV-분광광도계에서 760nm 파장대의 흡수도를 측정하였다.

2.3.4 금속이온 함량 측정

강원대학교 공동실험실습관에 비치된 유도결합플라즈마분광기(ICP, Inductively coupled plasma emission spectroscopy)를 사용하였다.

2.3.5 과산화수소 표백

표백은 비닐 백에서 실시하였으며 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Bleaching conditions for first P stage (no activator)

Variables	range
Hydrogen peroxide, % on pulp	1~4
NaOH, % on pulp	1~6
Sodium silicate, % on pulp	1~4
Magnesium sulfate, % on pulp	0.05~2
DTPA, % on pulp	0~0.2
Retention time, min	30~240
Temperature, °C	20~95
Pulp concentration, %	5~15

2.3.6 펄프 특성 평가

백색도(brightness), 카파값 및 펄프의 점도를 측정은 각각 Tappi Standard T452 om-87, Tappi Standard T236 cm-85, 및 Tappi Standard T230 om-89에 따라 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 과산화수소에 의한 리그닌 모델화합물의 분해

3.1.1 모델화합물의 탈메틸화

탈메틸화 반응은 비페놀성 구조보다는 페놀성 구조에서 활발하였으며, 과산화수소로 처리할 경우 알려진 바와 달리 상당량의 탈메틸화가 일어남을 확인하였다.

전체적으로 과산화수소에 의한 탈메틸화 정도는 이산화염소에 의한 탈메틸화의 약 30~40%에 해당하였다.

Table 2. Demethylation of model compounds by H₂O₂ and ClO₂

	time	Apocynol	Veratryl Carbinol	MWLsw
Hydrogen peroxide	1	17.45	6.04	1.33
	5	19.64	10.51	2.61
	30	21.35	12.71	6.64
	60	21.29	14.64	8.55
	180	20.46	13.71	7.51
Chlorine dioxide	1	39.55	30.58	17.48
	5	40.66	31.42	24.49
	30	50.23	38.16	24.53
	60	53.45	39.25	24.98
	180	52.69	39.04	25.01

* Hydrogen peroxide pH 10.5, chlorine dioxide pH 4.0, 45 °C

3.1.2 pH가 탈메틸화에 미치는 영향

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 과산화수소로 처리할 경우 산성 조건에서의 탈메틸화는 알칼리 조건에서의 탈메틸화의 약 2배 정도 일어났다. 또한 이산화염소로 처리하였을 경우, 페놀성 구조의 경우는 pH 4에서 최대의 탈메틸화가 나타났으나, 비페놀성 구조와 마쇄리그닌의 경우는 pH가 낮을수록 많은 탈메틸화가 일어났다.

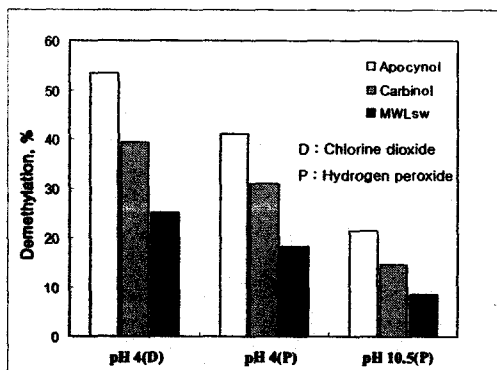


Fig. 1. Effect of pH on the demethylation of models by hydrogen peroxide at 45 °C for 1 hour.

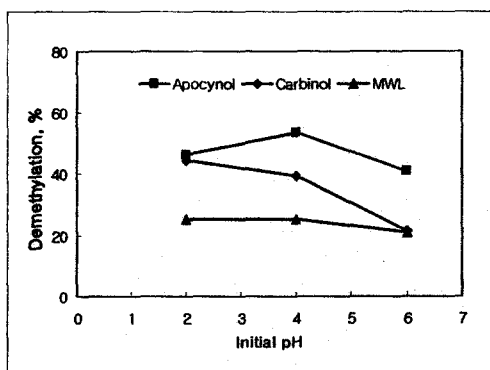


Fig. 2. Effect of reaction pH on the demethylation of models by chlorine dioxide at 45 °C for 1 hour.

3.1.3 약품 첨가량이 탈메틸화에 미치는 영향

이산화염소의 첨가량을 증가함에 따라 탈메틸화 정도는 거의 직선상으로 증가하였으며, 이러한 경향은 페놀성·비페놀성 모델화합물 및 마쇄리그닌의 경우에서 동일하게 나타났다. 반면, 과산화수소의 경우에는 첨가량이 증가함에 따라 탈메틸화는 다소 완만하게 증가하였다(Table 3). 이는 과산화수소에 의한 탈메틸화 속도가 비교적 느리며, 그에 의한 탈메틸화 정도에 한계가 있기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3. Effect of chemicals dosage on the demethylation of models

		Methoxyl group, wt % (± 0.05)		
		Apocynol	Carbinol	MWLsw
Untreated		18.45	34.06	13.72
H ₂ O ₂ : Model (molar ratio)	0.5:1	16.53	32.46	13.02
	1:1	14.52	29.07	28.31
	2:1	13.89	12.55	12.35
ClO ₂ : Model (molar ratio)	0.5:1	13.84	27.25	12.07
	1:1	8.59	20.69	10.29
	2:1	2.77	11.92	8.23

* Hydrogen peroxide pH 10.5, chlorine dioxide pH 4.0, 45°C, 1hr

3.1.4 반응 선택성에 대한 고찰

Table 4. Consideration of reaction selectivity

Model compounds	Demethylation, %	
	Hydrogen peroxide	Chlorine dioxide
Apocynol	21.29	53.45
Carbinol	14.64	39.25
Apo. + Car. (Theoretical)	17.96	46.35
Apo. + Car. (Experimental)	11.82	30.65

* Apocynol : carbinol = 1:1 (molar ratio), 45°C, 1 hr

반응선택성을 알아보기 위하여 두 가지 모델을 혼합하여 처리한 결과 이론적인 값보다 상대적으로 적은 탈메틸화가 일어남을 확인하였다. 이러한 결과는 표백제가 페놀성 구조인 apocynol과 선택적으로 먼저 반응하기 때문이며 비페놀성 구조인 veratryl carbinol은 오히려 장애효과(hindering effect)를 나타내는 것으로 생각되어진다.

3.1.5 표백제 처리가 페놀성수산기 함량에 미치는 영향

반응 중 페놀성수산기의 함량은 탈메틸화의 영향을 받으나, 벤젠핵의 개열에 의하여 이차적으로 영향을 받기 때문에 반응 후의 페놀성수산기의 함량 변화는 탈메틸화 또는 탈리그닌화와 직접적인 상관관계가 있다고 할 수 없다.

Table 5. Effect of chemicals treatment on the content of phenolic hydroxyl groups

	Apocynol	Carbinol	MWLsw
	PhOH / 100 C ₉	PhOH / 100 C ₉	PhOH / 100 C ₉
Untreated	100.0	0.0	9.3
Hydrogen peroxide	72.5	24.2	8.7
Chlorine dioxide	51.0	12.0	9.1

* Hydrogen peroxide pH 10.5, chlorine dioxide pH 4.0, 45°C, 1hr

* PhOH : phenolic hydroxyl group

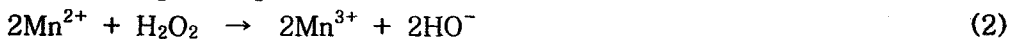
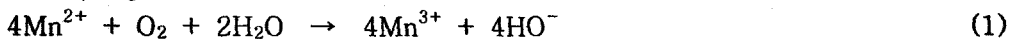
3.2 금속이온에 의한 과산화수소의 분해

3.2.1 금속이온 농도와 반응 시간의 영향

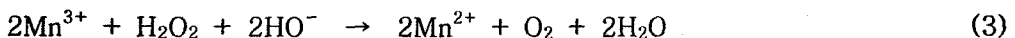
Fig. 3에서 볼 수 있듯이 $Mn^{2+} > Cu^{2+} > Fe^{3+} > Fe^{2+}$ 순으로 과산화수소의 촉매 분해 능력이 뛰어난 것으로 나타났으며 과산화수소의 분해력을 비교하면 망간은 구리의 약 30~60배, 철보다는 약 100~200배 높은 분해력의 활성을 갖고 있음을 확인하였다. 또한 알칼리 토금속인 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 이온은 과산화수소 분해에 전혀 또는 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

시간의 경과에 따른 망간에 의한 과산화수소의 분해는 반응 중의 pH 변화를 통해서도 확인할 수 있었다. Mn^{2+} 는 반응식 (1)과 (2)와 같이 과산화수소와 산소에 의해 산화되며 Mn^{3+} 는 다시 반응식 (3)와 같이 과산화수소에 의해 Mn^{2+} 로 환원된다.

* 산화반응



* 환원반응



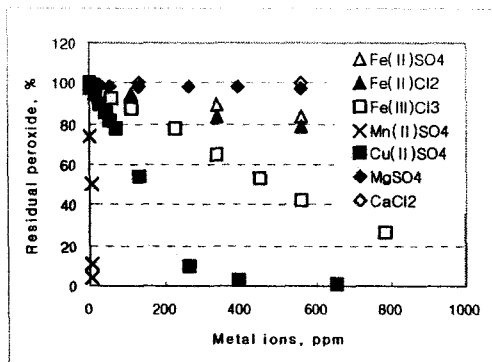


Fig. 3. Decomposition of hydrogen peroxide by metal ions.

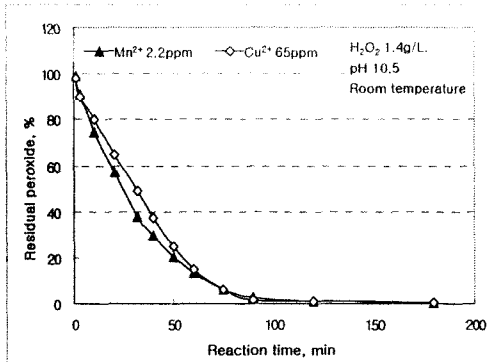


Fig. 4. Effect of reaction time on the decomposition of hydrogen peroxide by Mn^{2+} and Cu^{2+} .

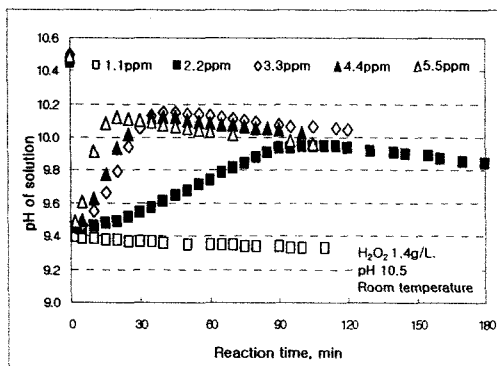


Fig. 5. The pH change during the decomposition of hydrogen peroxide by Mn^{2+} .

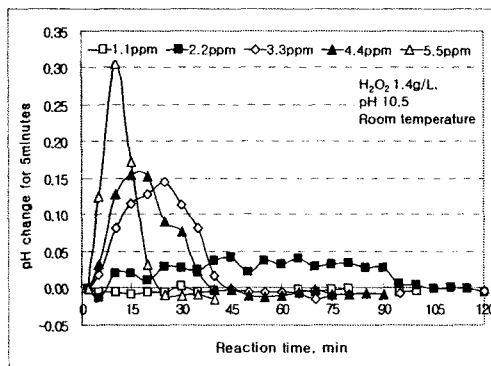


Fig. 6. The pH change of solutions as a function of reaction time during Mn -induced peroxide decomposition.

3.2.2 반응 pH의 영향

Mn^{2+} 의 경우 pH 변화에 따른 과산화수소의 분해량을 Fig. 7에 나타내었다. 망간의 경우 초기 pH 9.0까지는 거의 분해가 일어나지 않았으며 pH 9.5~10.5에서 과산화수소의 분해량이 가장 많았고 그 범위 내에서 pH가 증가할수록 과산화수소의 분해도 증가하였다. 그러나 pH 11 이상에서는 과산화수소의 분해가 급격하게 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 구리 이온의 경우 pH에 따른 과산화수소의 분해량은 망간과 유사하게 나타났으나, pH 9.0~10.0에서 다소 완만한 증가를 나타내었다(Fig. 8). 반면, Fe^{3+} 의 경우는 다

큰 금속이온들과 달리 비교적 낮은 pH에서도 과산화수소는 상당량 분해되었으며 분해량은 pH 11.5 수준까지 상대적으로 적지만 꾸준히 증가하였다. 그러나 보다 높은 알칼리 조건인 pH 12.0 이상에서는 다른 이온들과 마찬가지로 과산화수소 분해가 감소함을 확인하였다.

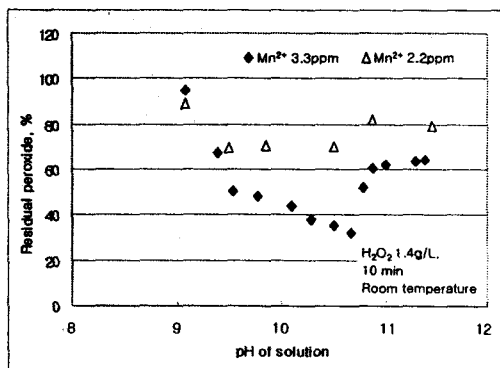


Fig. 7. Effect of initial pH on the decomposition of peroxide by Mn^{2+} .

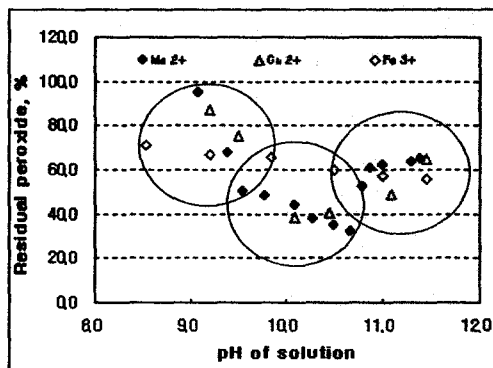


Fig. 8. Effect of initial pH on the decomposition of peroxide by Metal ions.

3.2.3 반응온도가 과산화수소 분해에 미치는 영향

Table 6. Effects of reaction temperature on the decomposition of hydrogen peroxide by Mn

Exp. No.	Mn^{2+} , ppm	Initial pH	Temperature, $^{\circ}C$	Residual peroxide, %
1	—	7.0	70	96.3
2	—	10.5	25	97.3
3	—	10.5	50	76.5
4	—	10.5	70	51.3
5	0.1	10.5	70	37.3
6	0.3	10.5	25	91.5
7	0.3	10.5	50	69.3
8	0.3	10.5	70	11.8
9	0.5	10.5	70	3.8

* Hydrogen peroxide 1.4g/l, 1 hour, room temperature

3.2.4 첨가제가 과산화수소 분해에 미치는 영향

과산화수소 분해에 활성인 망간, 구리 및 철 이온에 대하여 조사하였으며, 활성 정도에 차이를 고려하여 Fe^{3+} 는 400ppm, Cu^{2+} 는 130ppm, Mn^{2+} 는 3.3ppm을 기준으로 하였다. 사용된 모든 첨가제들은 Mn^{2+} 에 의한 과산화수소의 분해는 억제하였으며 $DTPA > 규산소다 > EDTA > 황산마그네슘$ 순으로 효과적이었다. 그러나 과산화수소 용액 중에서 이러한 첨가제들 모두 Cu^{2+} 나 Fe^{3+} 에 의한 과산화수소의 분해억제에는 효과적이지 못한 것으로 나타났다(Fig. 9~11).

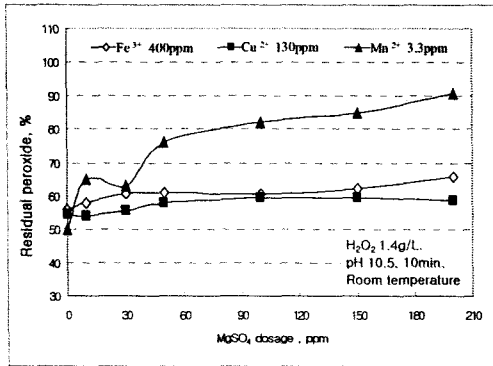


Fig. 9. Effect of magnesium sulfate dosage on the decomposition of hydrogen peroxide by metals.

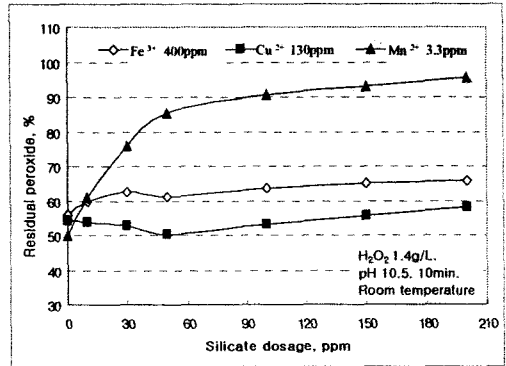


Fig. 10. Effect of sodium silicate dosage on the decomposition of hydrogen peroxide by metals.

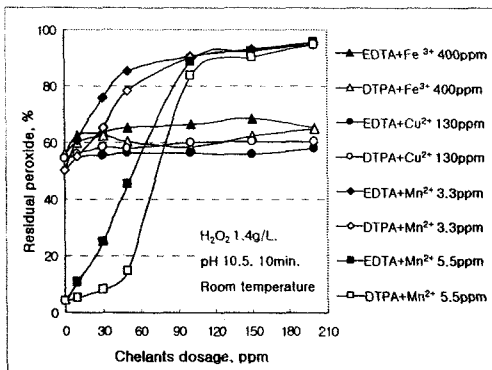


Fig. 11. Effect of chelants dosage on the decomposition of hydrogen peroxide by metals.

3.3 활성제 처리가 과산화수소 표백에 미치는 영향

3.3.1 첫 단 과산화수소 표백조건의 설정

펄프를 산세척 및 킬레이트 전처리 한 후, 간단한 모델링에 의하여 크라프트 펄프의 첫 표백단에 과산화수소를 적용할 경우 최적 표백 조건 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Bleaching conditions for activated P stage.

		Value
H ₂ O ₂ , %		3.0
NaOH, %		2.5
Reaction time, hr		2.0
Reaction temperature, °C		95
Pulp consistency, %		10.0
Additives	MgSO ₄ , %	0.1
	Na ₂ SiO ₃ , %	3.0
	DTPA, %	0.05

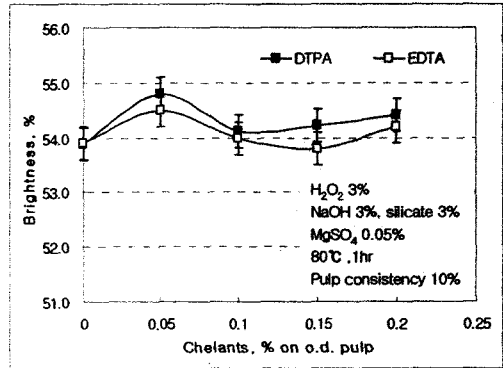


Fig. 12. Effect of chelants charge on the brightness of softwood kraft pulp after P stage.

3.3.2 활성제가 첫 단 과산화수소 표백에 미치는 영향

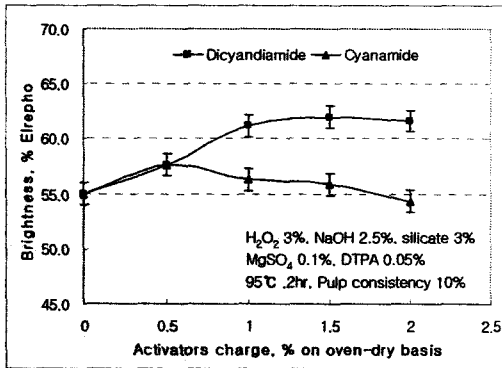


Fig. 13. Effect of activators charge on the brightness of pulp after P stage.

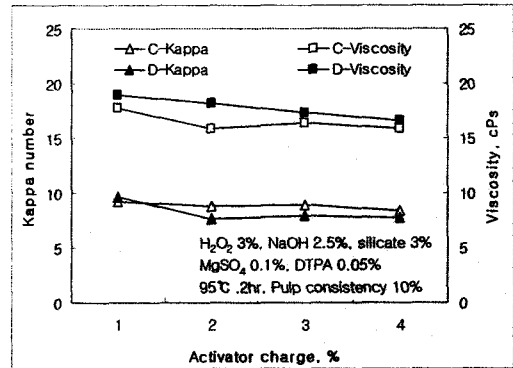


Fig. 14. Effect of activators charge on kappa number and viscosity of pulp after P stage.

Cyanamide를 처리할 경우 0.5% 첨가하였을 때 백색도가 최대값을 나타냈으며 이 후

첨가량이 증가할수록 백색도는 저하되었다. 반면, dicyandiamide의 첨가량이 증가할수록 백색도는 지속적으로 증가하였으며 첨가량 1.5%에서 최대값을 나타내었다. 또한 dicyandiamide는 cyanamide에 비하여 셀룰로오스 분해가 적으면서도 높은 탈리그닌도를 나타내었다. 이러한 결과로부터 dicyandiamide가 cyanamide에 비하여 과산화수소와 보다 활성이며 반응선택성 또한 높은 것으로 생각할 수 있다.

3.3.3 2단(two-stage) 과산화수소 표백시 활성제의 효율적인 운용방안

Table 8. Dicyandiamide as an activator in QPP sequences of UKP.

Sequence	QPP	QPmP	QPPm	QPmPm
P₁ stage				
(H ₂ N) ₂ CNCN, % on pulp	-	0.5 1.5	- -	0.5 1.0 1.5 1.5
H ₂ O ₂ consumed, %	88	86 85	88 88	86 86 85 85
End pH	11.3	10.7 9.6	11.3 11.3	10.7 10.3 9.6 9.6
Kappa number	11.28	9.71 7.94	11.28 11.28	9.71 7.69 7.94 7.94
Brightness, % Elrepho	54.8	57.0 59.1	54.8 54.8	57.0 58.0 59.1 59.1
Viscosity, cPs	20.1	18.8 17.3	20.1 20.1	18.8 18.2 17.3 16.6
P₂ stage				
(H ₂ N) ₂ CNCN, % on pulp	-	- -	0.5 1.5	1.5 1.0 0.5 1.5
H ₂ O ₂ consumed, %	79	79 77	78 72	80 80 82 86
End pH	11.1	10.9 10.8	10.5 9.5	9.4 9.6 10.2 9.3
Kappa number	8.12	6.31 4.76	5.52 4.10	4.87 5.14 5.55 5.31
Brightness(% Elrepho)	67.5	68.4 72.3	67.8 68.2	73.0 73.2 73.4 74.5
Viscosity, cPs	15.6	17.9 16.0	16.3 15.3	15.4 15.7 16.1 11.6

UKP : brightness 28.4%, Kappa number 21.9, viscosity 21.8cPs

Pm : dicyandiamide-activated P stage.

P stage : H₂O₂ 3%, NaOH 2.5%, silicate 3%, MgSO₄ 0.1%, DTPA 0.05%, 95°C, 2hr.
10% consistency

화학펄프의 알칼리 과산화수소 표백시 활성제 처리의 필요성은 경제적 이점 및 효율성에 따라 달라질 수 있다. 활성제 종류에 따라 적정 투입량에는 차이가 있으며 일정량 이상을 투입할 경우 백색도 저하, 강도 저하 및 약품 비용 상승과 같은 문제들이 발생할 수 있다.

4. 결론

4.1 탈메틸화 반응은 페놀성 리그닌 구조에서 더욱 활발히 진행되었으며, 상대적으로 적은 양이긴 하지만 비페놀성 구조를 과산화수소로 처리할 경우에도 탈메틸화 반응이 관찰되었다. 또한 모델화합물을 혼합 처리하였을 경우, 표백제에 의한 탈메틸화 반응은 주로 페놀성 리그닌 구조에서 선택적으로 일어남을 확인하였다. 과산화수소에 의한 리그닌 모델화합물의 탈메틸화는 알칼리 조건보다는 산성 조건에서 더욱 활발하였다. 모델의 탈메틸화 반응은 표백제 첨가량에 비례하여 증가하였으나, 과산화수소로 처리할 경우는 이산화염소에 비하여 완만한 증가를 나타내었다. 전체적으로 알칼리 과산화수소에 의한 리그닌 모델화합물의 탈메틸화는 이산화염소에 의한 탈메틸화의 30~40% 수준이었다.

4.2 알칼리 조건에서 금속이온에 의한 과산화수소의 촉매분해는 $Mn^{2+} > Cu^{2+} > Fe^{3+} > Fe^{2+}$ 순으로 나타났으며, Mg^{2+} 및 Ca^{2+} 의 영향은 거의 없었다. 금속이온에 의한 과산화수소의 분해는 반응 pH의 변화를 통하여 분해 정도를 예측할 수 있었으며 이를 통하여 분해 반응 메커니즘을 예측할 수 있었다. 망간과 구리의 경우 pH 9.5에서 10.5 사이에서 가장 많은 분해를 일으켰으며 더 높은 pH(>11) 영역에서 과산화수소의 분해는 감소하였다. 반면 철에 의한 과산화수소의 분해는 안정적이긴 하지만 높은 pH 영역에서는 유사한 결과를 나타내었다. 첨가제들은 모두 망간에 의한 과산화수소의 분해는 억제하였으나 구리와 철에 의한 분해에는 효과적이지 못하였다.

4.3 Dicyandiamide는 cyanamide에 비하여 셀룰로오스 분해가 적으면서도 높은 탈리그닌화를 나타냈다. 알칼리 과산화수소를 2단으로 처리할 경우, 활성제 첨가로 인한 탈리그닌 효과는 더욱 개선되었으며 동일한 양의 활성제를 사용할 경우 과산화수소 첫 단계에 첨가하는 것이 두 번째 단계에 첨가하는 것보다 백색도 개선 및 펄프의 점도 면에서 효과적이었다. 두 단계 모두 활성제를 첨가할 경우도 이와 유사하게 첫 단계 다량(1.5%)을 두 번째 단계 소량(0.5%)을 첨가하는 것이 백색도 개선 및 펄프의 점도 면에서 효과적이었다. 과산화수소 표백 효율 개선을 위해서는 활성제의 올바른 선택도 중요하지만 적정 투입량 및 투입 위치 선정 또한 중요한 인자가 될 수 있다.