

치수안정화를 위한 목질재료의 고분자 하이브리드화에 관한 연구*1

임기표*2 · 조종수*3 · 김익주*4 · 나은선*2

Study on the Hybridization of Polymer-macromers for the Dimensional Stabilization of Woody Materials*1

Kie-Pyo Lim*2 · Chong-Su Cho*3 · Ik-Joo Kim*4 · Eun-Sun Na*2

ABSTRACT

This study was carried out to experiment the dimensional stabilization of woods of red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) and sugi(*Cryptomeria japonica* D. Don) by vacuum impregnation of polyethylene glycols(PEG) with mo. wt. 200, 400, 600, 1000; polypropylene glycols (PPG) with mo. wt. 425, 725; PEG-acryloylates, and PPG-acryloylates synthesized, and then by water soaking.

The results obtained are as follows:

1. The density of sapwood and heartwood was different from each other in both species.
2. The PEG and PEG-macromers with lower molecular weight by impregnation has increased the density of wood specimens more higher, thereby caused their higher volume expansion, and those with higher molecular weight than 600 has tended to down their density increment.
3. Before and after water soaking, the density decrease of specimen impregnated was high in woods impregnated with simple PEG and PPG, while lower in specimens impregnated with PEG-macromers and PPG-macromers.
4. So PEG-macromer was expected to hold the original dimension of decayed wood for antiques, but it was necessary to develop another penetration method as well as aqueous solvent.

Keywords : PEG, PPG, PEG-macromer, PPG-macromer, dimensional stability, pine, sugi, vacuum treatment, impregnation, density

*1 접수 1995년 2월 21일 Received February 21, 1995

본 연구는 한국학술진흥재단의 '94자유공모과제 학술연구조성비 (No. KRA427-01G0171)에 의해 수행되었음

*2 전남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*3 전남대학교 공과대학 College of Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*4 목포 국립해양박물관 National Maritime Museum, Mokpo 530-380, Korea

1. 서 론

18세기의 산업 혁명 이후 모든 산업용 재료였던 목재가 과학 기술의 발달로 입산연료 분야가 석탄과 석유로 대체되면서 운송 분야가 강철 금속으로 대체되고, 건설 분야는 철근 콘크리트로 대체되었으며, 화학섬유는 합성 섬유로 대체되고, 합성수지에 의한 플라스틱이 출현하여 석유가 모든 산업의 근간을 이루었다.

그러나 석유 자원에 근간을 둔 경제 발전은 환경오염을 야기한다는 것이 인식되면서 환경 보존을 위하여 석유를 대체할 수 있는 방법으로 태양광을 이용하는 산림자원이 다시 등장하게 되었다. 따라서 석유 대체를 위한 연구로서 목질 폐기물을 가스화하여 석유 성분을 합성하는 공정이 개발되고, 목질 셀룰로오스를 효소 가수분해하여 에틸렌을 제조하는 공정이 개발되었으며, 목재를 직접 액화하여 플라스틱을 대체하는 공정도 개발되었다. 반면 자연계에서 주어진 재료는 무한히 존재하는 것이 아니므로 이를 보존 처리하여 수명을 연장하고 화학적으로 개질하여 용도를 다양화하는 방향도 자연자원을 절약하는 중요한 방법이다.

특히 자연계에서 식물의 광합성으로 만들어지는 목재는 인공적으로 합성된 다른 공업용 재료인 금속이나 세라믹 재료 또는 합성 플라스틱 고분자 재료와는 달리 공기 중의 수분 함량이 높으면 공기 중의 수분을 흡수하고, 목재내에 함유율이 증가하면 그에 따라 팽창하여 강도가 저하하고, 부패하는 반면 목재가 건조되면 수축하여 표면이 뒤틀리면서 활렬하여 구조재로 이용할 수 없게 되는 단점이 있다. 따라서 목재의 흡습성을 인위적으로 개선하여 석유제품인 합성 고분자 재료에게 점령 당한 각종 고분자 재료용으로 목재를 사용할 수 있도록 하기 위해 목재의 화학가공 분야도 크게 발전하였다. 즉 스너 등(1983)에 따르면 목재의 재색을 개선하려는 표백과 착색, 목재의 변형을 방지하기 위한 치수 안정화 및 목재 플라스틱화 연구 등으로 구분되고, Paika(1970)에 따르면 목재의 치수 안정화에 대한 연구는 주로 목재 자체가 가지고 있는 친수성기의 활성수소를 친유성기로 치환시키거나 그래프트중합(graft polymerization)하여 치수 안정화를 유도하는 화학적 방법과 목재에 어떤 약품을 코팅하거나 침투시켜 치수 안정화를 유도하는 물리적 방법으로 구분된다. 그러나 화학적 방법은 화학반응시 또 다른 약품을 사용하여야 하고 목재자체의 수축이 심하여 영구적인 변화를 초래하는 경우가 많으나 물리적 방법은 약품처리가 간단하여 주변 환경보존에 쉽게 적용할 수 있다.

그러나 세포내강에 고분자를 충전하여 목재의 치수 안

정성을 유도하는 물리적 방법은 주로 목재와의 친화성이 높은 폴리에틸렌 글리콜에 대한 연구가 대부분이다. 즉 佐道(1990)에 따르면 치수 안정화를 위한 PEG 처리는 주로 분자량 200~300,000 범위가 연구되고, 실제에는 분자량 1,000~4,000 정도가 사용되고, 일본과 같이 고습지대에 사용하는 2,000 이상의 고분자량이 효과적이라고 한다. 그러나 눈비에 용탈되는 단점이 있다. 따라서 변성 PEG로서 PEG-macromer인 polyethylene glycol methacrylate(PEGMA)를 처리하여 외장용 목재로 사용할 수 있다고 보고하기도 하였다.

PEG는 또한 해수 중에서 발굴된 옛날 목재 선박을 보존하는데도 효과적이라고 한다. 즉 스웨덴의 WASA호 보존 처리에 1953년 Moren과 Centerwal의 특허에 따라 PEG4000를 사용하면 점성이 높아 침투가 어려우므로 분무가 가능하도록 점성이 낮고, 흡습성이 높도록 분자량을 낮추어 PEG1500, PEG600 등을 처리하였으나 온도나 수분에 삼출되는 단점이 있다고 한다(Hoffmann, 1984).

한편 의약 분야에서는 PEG가 생분해성(biodegradable)이어서 Cho 등(1994)은 PEG를 메크로결합하여 의약성분과 함께 중합하여 interpenetrating polymer network(IPN)를 만들므로서 서방성 의약품(controlled release drug) 제조용 hydrogel을 합성하기도 했다.

따라서 본 연구는 목재의 치수가 수분함량에 따라 변하여 치수 안정화에 효과적이고 고 목재 보존 처리에도 효과적으로 알려진 PEG의 용탈성 방지를 위하여 PEG-macromer를 만든 다음 우리나라에서 전통적으로 목재 선박 구조재로 사용해 온 소나무와 삼나무에 침투처리하여 그의 침투 방법과 용탈 예방성을 검토코자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

2.1.1 목재

역사적으로 우리나라의 토목 건축에 주로 사용해온 소나무(*Pinus densiflora* S.et Z.)와 삼나무(*Cryptomeria japonica* D.Don)를 제재소에서 구하여 Table 1과 같이 변재와 심재로 나누고, 가로 1cm×폭 1cm×길이 1.5cm의 블록이 되도록 절삭하고, X-Y-Z축이 서로 직각이 되도록 연삭하여 실험에 사용하였다.

2.1.2 약 품

폴리에틸렌 글리콜(PEG: polyethylene glycol)은 日本 純正化學(Junsei Chemical)이 제조한 분자량 PEG200, PEG400, PEG600, PEG1000을 구입하여

Table 1. Specimen size and sample species

Species	Scientific name	Sapwood Heartwood	Annual ring	Growth place
Red pine	<i>P. densiflora</i>	Sapwood	28	Kangwon-do
		Heartwood	10	
		Total	38	
Sugi	<i>C. japonica</i>	Sapwood	11	Japan
		Heartwood	19	
		Total	30	

사용하고, 폴리프로필렌 글리콜(polypropylene glycol: PPG)은 분자량 425와 725, 염화아크로일(Acryloyl chloride: ACCL), 과산화 벤조일(benzoyl peroxide: BPO)은 미국 알드리치사

(Aldrich Co)가 제조한 것을 사용하였으며, 트리에틸 아민(Triethylamin: TEA)과 벤젠(benzene)은 덕산 화학이 제조한 국산을 사용하고, 벤젠은 스위스의 엔센(Jenssen)사가 제조한 molecular sieve 3A로 탈수정제하여 사용하였다

2.2 실험 방법

2.2.1 공시편의 처리 과정

2.2.1.1 PEG 및 PPG-macromer 제조

Sawhney와 Pathak(1993)의 방법에 따라 500ml 플라스크에 PEG 또는 PPG를 20g 넣고, 정제된 벤젠 200ml를 가하여 80℃에서 6시간 이상 환류한 다음, 용매를 수분과 공비점 종류하여 분리한 다음 새로이 정제된 벤젠을 200ml를 가하였다. 여기에 원료에 대한 몰비로 2.1배의 TEA를 가한 다음, 80℃로 가열하고 2.1배의 ACCL를 서서히 가한 후 3시간 가열 환류한 다음 냉각시키고, 이를 IG3 글라스 필터로 여과하여 TEA염을 분리한 다음 여과액을 진공 증발하여 용매를 안전 분리하여 목재 침투에 사용하였다.

2.2.1.2 목재의 수침 처리와 팽윤율 측정

크기와 무게를 측정된 기건 시편에 방사 방향과 접선 방향을 표시하고 이를 증류수에 48시간 침지하여 팽윤시킨 다음 크기와 무게를 측정하고, 105℃ 건조기에서 48시간 건조하여 크기와 무게를 측정하였다.

2.2.1.3 목재 침투와 중합 처리

크기와 무게를 측정된 전건 시편을 개시제로 BPO를 혼합한 매크로머나 원료 PEG, PPG를 각각 20% 용해한 벤젠 용액에 침지시켜 40~60 torr의 진공으로 30분 처리 후, 해압 30분하는 처리를 6회 이상 반복 처리한 다음 크기와 무게를 측정하고, 80℃의 건조기에서 3~4시

간 중합한 후 다시 105℃로 24시간 건조하여 크기와 무게를 측정하였다.

2.2.1.4 고분자 처리재의 침수 용탈시험

중합이 완료된 시편을 상온의 증류수중에 24시간 침지 용출시킨 다음 크기와 무게를 측정하고, 다시 105℃ 건조기에서 2일간 건조후 크기와 무게를 측정하였다.

2.2.2 침투도 관찰

PEG-macromer와 PPG-macromer의 침투 정도를 확인하기 위하여 주사 전자현미경(일본제 Jeol JSM 5400)으로 시편의 방사 방향을 절단하여 목구면에서부터 내부 중심부로 관찰하였다.

2.2.3 치수 측정과 변화율 계산

시편의 크기는 광학 마이크로메타(일본제 PIKA 2XY)로 1μm 단위까지 크기를 측정하고, 시편의 무게는 전자저울(미국제 A&D FX-320)로 1mg 단위까지 측정하여 체적 팽윤율, 무게증가율, 향팽윤율, 향흡수능 등을 다음과 같이 계산하였다.

(1) 팽윤율(ER: rate of expansion)

$$= \{(Sw - So) / So\} \times 100$$

Sw: 수침후의 크기, So: 전건후의 크기

(2) 체적 팽윤율(Rv: rate of expansion: %)

$$= \{(Vt - Vc) / Vc\} \times 100$$

Vt: 함침처리재의 전건 체적, Vc: 무처리재의 체적

(3) 무게 증가율(Rw: rate of weight increment: %)

$$= \{(Wt - Wc) / Wc\} \times 100 = \{(Dt - Dc) / Dc\} \times 100$$

Wt: 처리재의 전건무게, Wc: 무처리재의 전건무게,

Dt: 처리재의 전건 밀도, Dc: 무처리재의 전건밀도

3. 결과 및 고찰

3.1 공시편의 물에 대한 수축 팽창

PEG PPEG, PEG나 PPG-macromer 처리의 효과를 알기 위해서는 우선 목재의 단점인 흡수성에 따른 치수 변화율을 확인해야 한다. 따라서 시편의 X-Y-Z축 크기와 무게를 측정된 다음 냉수 중에 2~3일간 침지하여 포화시켜 크기와 무게를 측정하고 당시 105℃ 건조기에서 1일간 건조하여 크기와 무게를 측정하여 건조전후의 크기와 무게 차이를 건조후의 크기와 무게로 나누어 백분율로 나타낸 결과 Table 2와 같았다. 이때 부피는 건조전후의 X-Y-Z축 크기를 곱하여 계산하고, 밀도는 전건시의 무게를 전건시의 부피로 나누어 계산하였다.

함수율에 따른 목재의 수축-팽창율은 접선 방향에서 가

장 크고, 방사 방향이 다음이나 목재의 수간이 되는 섬유 축방향은 거의 변화가 없었다. 수종별 접선 방향/방사 방향(T/R)율은 심재량이 적은 소나무는 변재와 심재의 변화가 작으나 심재량이 많은 삼나무는 2~3에 이르러 차이가 컸다. 따라서 부피 변화율은 소나무의 경우 변재와 심재 모두 12~13%로 큰 차이가 없으나 삼나무는 접선 방향의 경우 변재와 심재가 6~7%로 비슷하나 방사 방향의 변화율이 달라 변재의 부피 팽창율이 13%이나 심재는 9% 정도로 차이가 있었다.

그러나 전건 밀도는 소나무의 경우 변재와 심재 사이에 차이가 크나 삼나무는 변재와 심재 사이에 차이 적고, 오히려 소나무와는 반대로 심재 비중이 낮았다.

이러한 결과는 수축 팽창의 경우 정(1988)의 자료와 유사하였다. 그러나 변재와 심재의 밀도 차이는 자료가 적어 비교하기 어려우나 냉수 침지시 일어나는 추출물의 영향으로 생각된다. 즉 소나무 심재는 내수성의 수지 성분이 많은데 비하여 삼나무 심재는 수용성의 페놀성 물질이 많아 용출된 결과라고 생각된다.

Table 2. Total expansion by water and density of sample woods.

Species	Red pine		Sugi		
	Sapwood	Heartwood	Sapwood	Heartwood	
Direction	Longitudinal	0.28	0.96	1.88	0.61
	Radial	5.04	4.57	3.59	2.29
	Tangential	6.41	6.74	6.89	6.09
	Volume	12.06	12.74	12.78	9.14
Density(g/cm ³)	0.478	0.545	0.347	0.335	

3.2 PEG, PPG 및 macromer 처리 공정과 치수 변화

무작위로 변재와 심재 시편을 택하여 이들 시료를 2일간 105℃의 건조기에서 건조시켜 크기와 무게를 측정한다. 다음, 평균 분자량이 밝혀진 PEG와 PPG를 정제된 벤젠에 용해하거나 분자량별로 합성된 PEG-macromer와 PPG-macromer에 개시제로 BPO를 첨가한 벤젠 용액에서 진공 침투를 반복하여 40~60mmHg 진공에서 기포가 발생하지 않을 때까지 침투시킨 다음, 80℃에서 중합후 105℃에서 건조한 후 냉수에 수침하여 팽윤 치수와 용탈된 무게를 측정하고, 다시 건조시켜 치수를 측정하는 과정을 3반복하여 평균하여 전건재를 기준으로 팽윤율과 밀도를 계산한 결과 다음과 같았다.

3.2.1 PEG와 PEG-macromer 합침재의 치수와 밀도 변화

PEG를 분자량별로 acyloyl chloride와 반응시켜 합성한 PEG-macromer를 진공침투중합시켜 합침재의 체적 팽윤율과 밀도 변화를 측정할 결과는 Fig.1 및 Fig.2와 같이 대체적으로 PEG와 PEG-macromer가 모두 유사한 침투량을 보이거나 PEG의 분자량이 낮은 200~400 사이에서 침투량이 많은 반면 분자량이 높은 600 이상에서는 약간 낮고, 수종별로는 비중이 높은 소나무보다 비중이 낮은 삼나무가 더 많은 양을 흡수하였다.

그러나 목재의 부피 팽윤율은 PEG가 PEG-macromer보다 높았다. 특히 분자량이 작을 수록 침투량이 증가하는 경향이었으나 PEG분자량이 600 이상에서는 하강 곡선이 완만해지거나 유사한 경향을 보였으며, 원료 목재의 비중이 낮은 삼나무가 비중이 높은 소나무보다 컸으나 침투 양상은 달랐다. 즉 일반적으로 밀도 증가율이 높을 수록 체적 증가율도 높은 경향을 나타냈다.

이를 무처리재의 밀도를 기준으로 계산한 증가율에 대하여 체적 증가율을 표시한 결과 Fig.3과 같이 함침량 증가에 따라 체적 증가율도 증가하는 경향을 보였지만 수종과 부위에 따라 약간 달랐다.

3.2.2 PPG 및 PPG-macromer 합침재의 체적 팽윤율과 밀도 변화

한편 PPG와 PPG-macromer 합침재는 PEG 또는 PEG-macromer와는 전혀 달랐다. 즉 합침재의 밀도는 PEG나 PEG-macromer와 유사하게 증가하였으나 체적 팽윤율 증가는 미미하거나 오히려 수축하는 경우도 발생하였다.

3.3 PEG, PPG 및 macromer 처리재의 침수 용탈성

3.3.1 PEG와 PEG-macromer 처리재의 침수 용탈성

PEG와 PEG-macromer 그리고 PPG와 PPG-macromer에 함침된 처리재를 냉수에 2일간 침지한 후 건조하여 치수와 무게를 측정하여 (침전의 치수-침지후 치수)/침지후 치수로 계산하여 수침에 의한 용탈성을 나타낸 결과 PEG와 PEG-macromer, PPG, PPG-macromer 모두 밀도가 증가하여 함침량이 증가하여도 수침에 의한 체적팽윤율을 크게 억제하지 못하고 수축팽창하였으나, 수침에 의한 밀도 변화는 Fig.4에 나타난 바와 같이 분자량에 따라 일정한 경향을 나타냈다.

즉 PEG처리재는 Fig.4에 나타난 바와 같이 분자량이 200에서 밀도 감소가 가장 크고, 다음으로 1,000이었으나 400과 600에서는 적었으며, 체적 감소율은 대체로 밀도 감소율에 비례하였다. 한편 수종별로는 삼나무의 경우 심재와 변재 모두 1/4 이상이 감소하였으나 소나무재

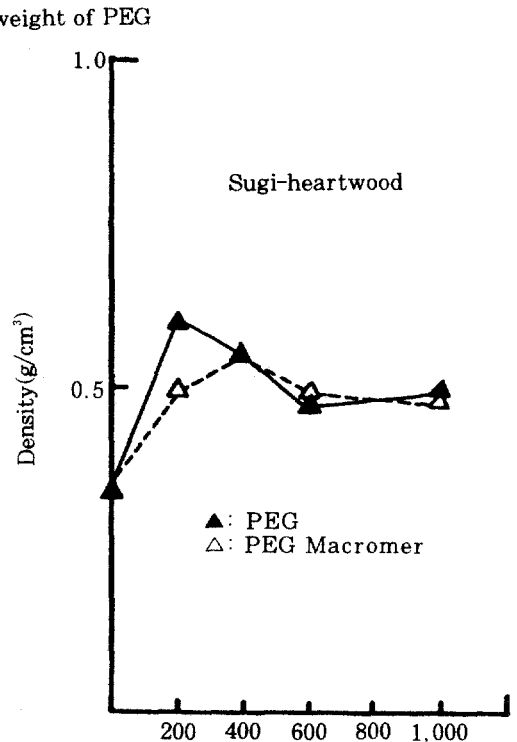
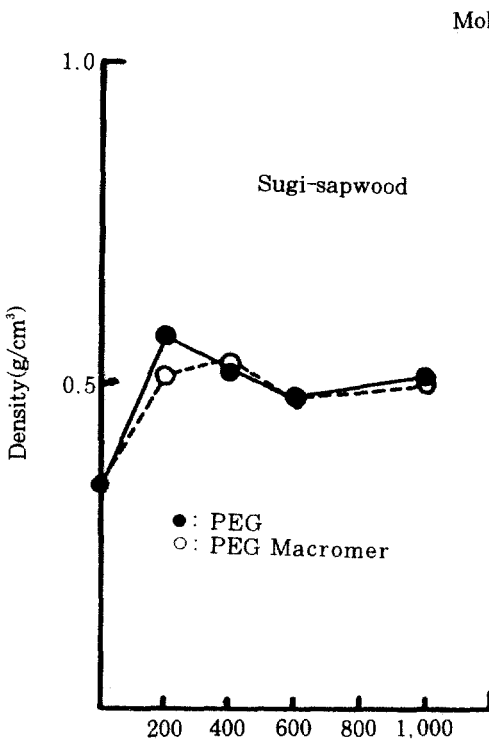
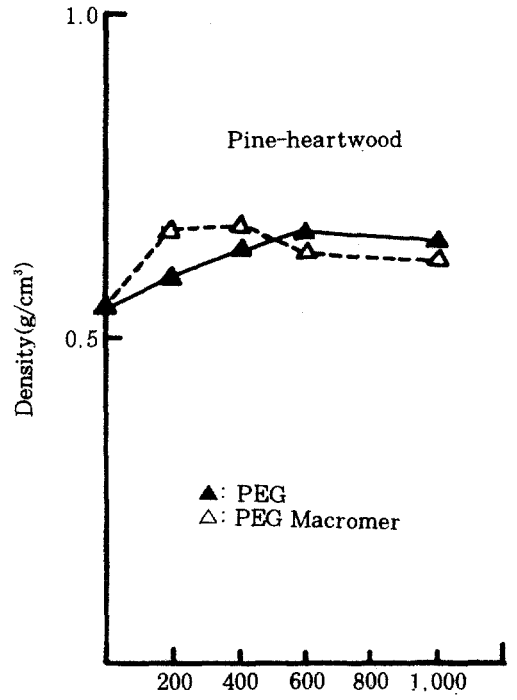
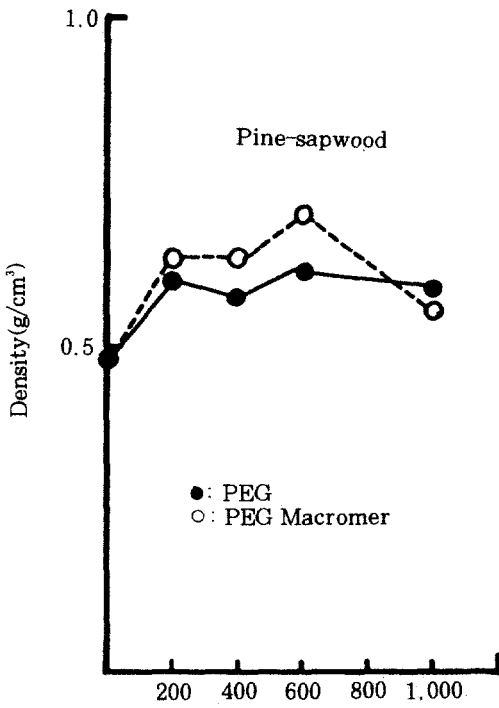


Fig. 1. Density change of specimens by impregnation of PEG and PEC-macromer.

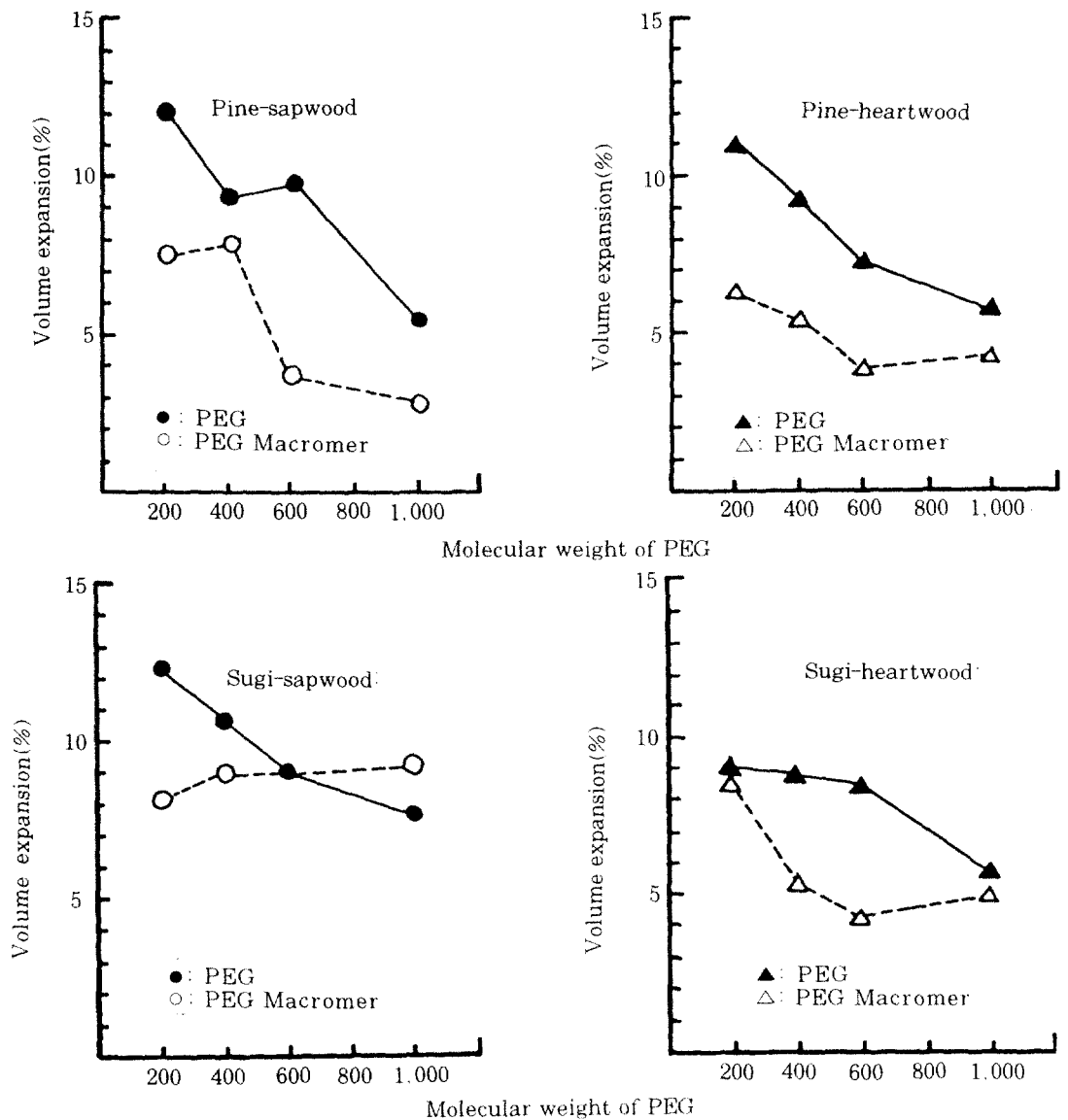


Fig. 2. Volume expansion of specimens by impregnation of PEG and PEG-macromer.

는 삼나무보다 밀도 감소율이 적고 체적 감소율도 적었다. 따라서 PEG 함침재의 침수 용탈성이 수종과 부위에 따라 차이를 나타냈다.

또한 PEG-macromer 처리재의 경우는 PEG 처리재보다 냉수 침지에 의한 밀도 감소율과 체적 감소율이 적었다. 또한 PEG 처리재와는 달리 고분자량의 경우 침수 후에 체적이 약간 팽창한 경우도 빈번하였다. 따라서 단순한 PEG 처리보다 PEG를 변성시킨 PEG-macromer 처리가 침수 안정성에 기여한 것으로 생각된다.

3.3.2 PPG와 PPG-macromer 처리재의 침수 용탈성

한편 PPG와 PPG-macromer 처리재의 침수 용탈성은 Table 3에 나타낸 바와 같이 PPG 단순 처리의 경우는 PEG보다는 밀도 감소가 적으나 PEG-macromer보다는 컸으며, PPG-macromer는 PEG-macromer보다도 밀도 감소가 적었다. 그러나 체적 감소율은 PPG 단순 처리라도 PEG-macromer보다도 적었으며, PPG-macromer 처리재는 PPG 처리재보다도 적고, 오히려

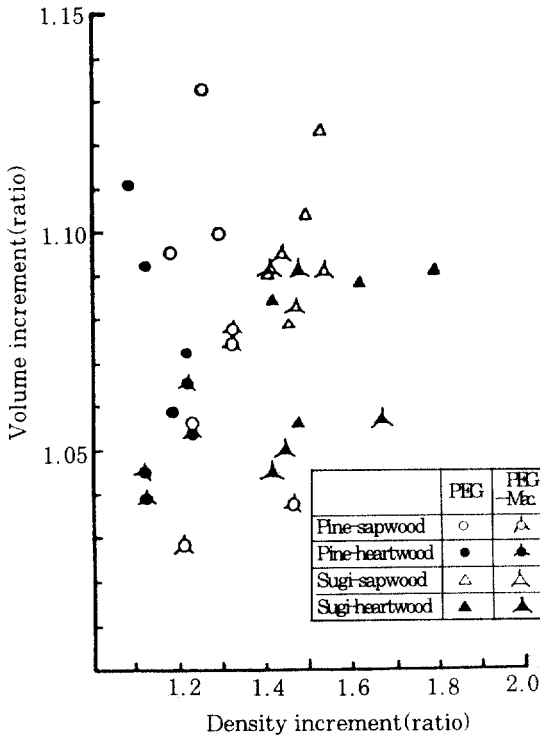


Fig. 3. Relation of volume expansion and density increment of specimens by impregnation of PEG and PEG-macromer.

팽윤하는 경우도 많았다.

따라서 물에 대한 치수 안정성은 PPG나 PPG-macromer 함침 처리가 PEG-macromer 처리보다 효과적으로 생각되며, PEG가 가장 낮은 것으로 사료된다.

더욱이 polymer 함침율은 전술한 PEG나 PEG-macromer와는 달리 체적 변화가 다양하여 일정한 경향을 보이지는 않으나 대체로 PPG와 PPG-macromer 처리가 PEG나 PEG-macromer 처리보다 낮았다.

이러한 현상은 PEG와 PPG의 화학적 구조의 차이로 야기되는 소수성의 정도에 기인한 것으로서 소수성의 acryloyl기가 PEG와 PPG의 양 말단에 존재하는 수산기를 blocking한 PEG-macromer와 PPG-macromer가 치수안정화에 효과적으로 생각되며,

PPG에 존재하는 소수성의 메틸기 때문에 친수성의 PEG보다 함침재의 수축에 더 크게 관여하는 것으로 생각된다.

따라서 목재의 내수성을 향상시켜 치수안정화를 유도하는 데는 PPG와 PEG-macromer가 효과적이거나 함수율에 따른 목재의 원형 유지가 필요한 부후 고 목재의 원

형유지에는 친수성이 높은 PEG와 PEG-macromer가 효과적이라고 생각된다(Nicholas, 1973; 今村等, 1983; 佐道, 1991).

3.4 PEG, PPG 및 macromer 처리재의 전자 현미경 관찰

주사 전자현미경으로 시편 내부의 PEG 및 PEG-macromer 침투를 확인한 결과 표면의 관공이 큰 부분에는 침투하여 coating이 되어 있으나 벽공을 통과한 흔적을 확인하기 어려웠다.

이러한 현상은 전술한 세포벽내의 polymer 함량 계산에서도 미량으로 계산된 점으로 보아 비교적 짧은 시간에서의 진공 침투는 polymer의 벽공 침투가 어려운 것으로 생각된다. 따라서 치수 안정화를 위하여 목재 세포벽에 미세 벽공을 세포강 내로 polymer를 침투시키려면 장시간 처리하거나 효과적인 침투방법을 별도로 개발할 필요가 있다고 생각된다(Nicholas, 1973; 大越等, 1982).

4. 결론

우리나라 소나무와 삼나무를 택하여 PEG와 PPG에 acryloyl chloride를 반응시켜 PEG-macromer와 PPG-macromer을 만들어 개시제로 BPO를 첨가하여 목재에 침투시킨다음 중합하고 이를 냉수 추출한 후 그의 치수와 무게변화를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소나무와 삼나무는 심재와 변재의 비중이 추출물의 영향으로 달랐다.
2. PEG와 PEG-macromer는 분자량이 낮을수록 침투량이 많아 밀도 증가가 높고, 그에 비례하여 체적 팽창율도 높아지나 분자량 600 이상에서는 그의 증가량이 완만하였다.
3. 냉수 처리에 의한 용탈은 PEG와 PPG의 단순 처리가 크고 PEG-macromer와 PPG-macromer 처리는 밀도 감소가 적었으며, 분자량이 클수록 용출량도 적었다.
4. 따라서 PEG-macromer가 부후된 고목재의 원형 유지에 효과가 있을 것으로 기대되나 새로운 침투 방법과 용매개발이 필요하였다.

REFERENCES

1. Cho, C.S., J.H. Ha, S.H. Kim, Y.J. Jung, B.W. Jo & J.K. Kwon. 1994. Bioerodible Hy-

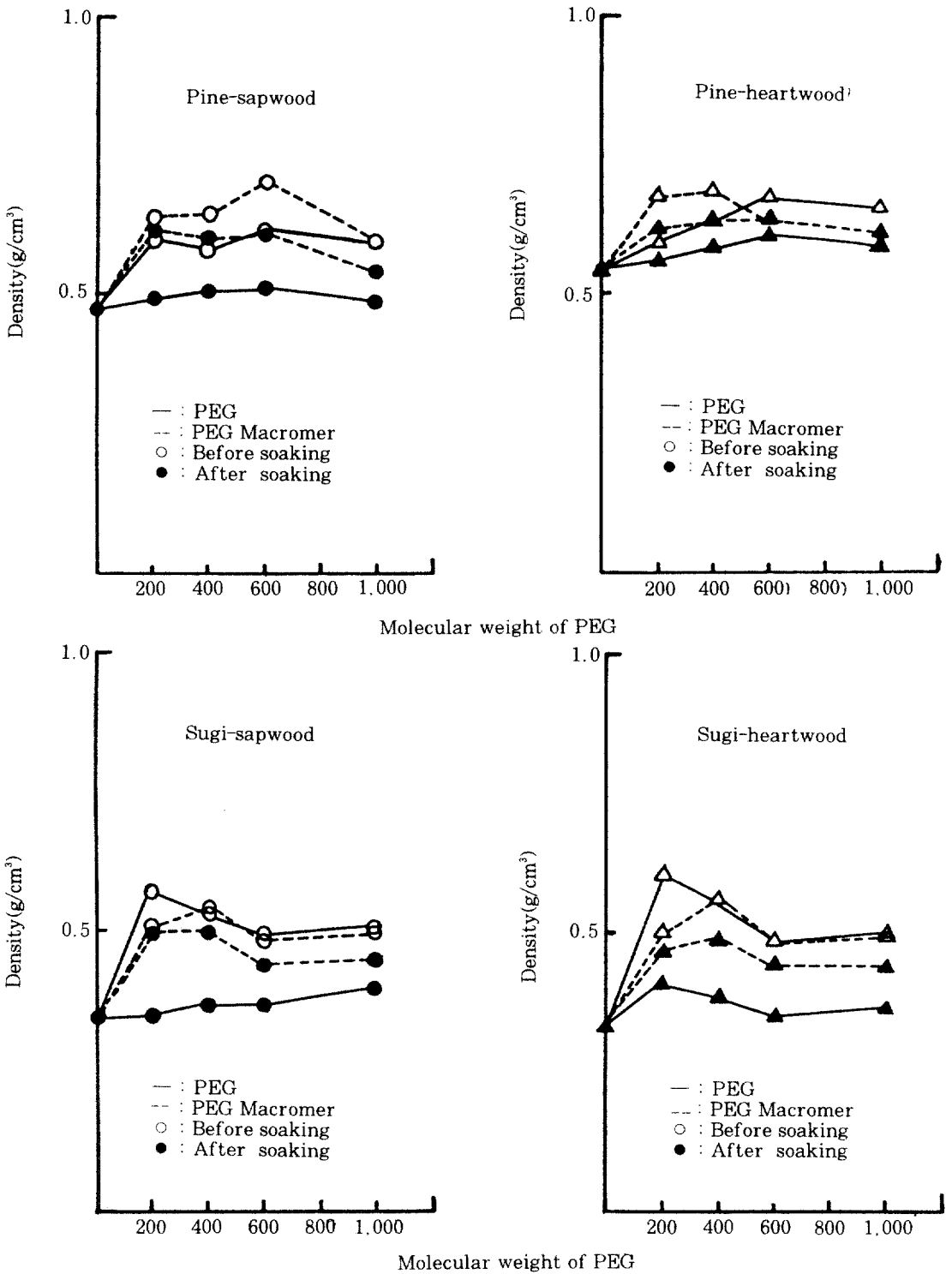


Fig. 4. Density change of specimens impregnated with PEG and PEG-macromers before and after water soaking.

Table 3. Total reduction of volume and density of PPG- and PPG-macromer-impregnated woods by water soaking.

(unit : %)

Species extract.	Part	Item	Water	Molecular weight of PPG and PPG-macromer			
				400	700	400+110	700+110
Pine	sapwood	volume	before	2.71	0.61	-0.48	-0.34
			after	2.99	0.17	-0.91	-0.15
			reduction	+10.33	-72.13	+89.58	-55.88
		density	before	0.55	0.53	0.56	0.56
			after	0.46	0.47	0.54	0.53
			reduction	-16.36	-11.32	-3.57	-5.36
	heartwood	volume	before	0.21	0.13	0.17	0.51
			after	3.84	1.56	1.00	0.78
			reduction	+1728.57	+1100.00	+488.24	+52.94
		density	before	0.57	0.61	0.58	0.58
			after	0.51	0.55	0.57	0.56
			reduction	-10.53	-9.84	-1.72	-3.45
Sugi	sapwood	volume	before	2.50	0.01	-0.04	-0.51
			after	3.09	0.07	0.07	-0.03
			reduction	+23.60	+600.00	+75.00	-94.11
		density	before	0.40	0.42	0.43	0.41
			after	0.31	0.34	0.42	0.40
			reduction	-22.50	-19.05	-2.33	-2.44
	heart	volume	before	0.08	0.57	0.85	0.26
			after	0.96	0.05	0.38	0.23
			reduction	+1100.00	-91.23	-55.29	-11.54
		density	before	0.42	0.42	0.45	0.47
			after	0.36	0.36	0.45	0.44
			reduction	-14.29	-14.29	0.00	-6.38

- drogel based on Interpenetrating Polymer Networks composed of Poly(D,L.lactic acid) and Poly(ethylene glycol) macromer. *Korea Polymer J.* 2(2): 91~95
- Hassainy, S.F.A. & J.A. Hubbell. 1993. Molecular Weight Dependence of Calcification of Polyethylene glycol Hydrogels. 19th Annual Meeting of the Society for Biomaterials: 69
 - Hoffmann, P. 1984. On the Stabilization of Waterlogged Oakwood with PEG. molecular Size versus Degree of Degradation. Proceeding of 2nd ICOM Waterlogged Wood Working Group Conference. Brenoble: 95~116
 - Nicholas, D.D. 1973. Wood Deterioration and its Prevention by Preservative Treatments, vol. II, Syracuse University Press: 279~343
 - Sawhney, A.S., C.P. Pathak and J.A. Hubbell. 1993. Bioerodible Hydrogels based on Photopolymerized Poly(ethylene glyco)-co-poly(α , hydroxy acid) Diacrylate Macromers. *Macromolecules* 26: 581~587
 - 今村博之, 岡本 一, 後藤輝男, 安江保民, 横田徳郎, 善本知孝. 1983. 木材利用の化学. 共立出版(株): 204~321
 - 今村祐嗣. 1991. 含浸技術. 木材の科学と利用技術 II, 2. 木材の化学処理 日本木材学会研究分科会編: 21~38
 - 大越 誠, 中戸莞二, 佐道 健. 1982. 針葉樹材中の流体流動における壁孔膜小孔の寄与. 木材学会誌 28(10): 590~595
 - 富永洋司, 佐道 健. 1990. ポリエチレングリコール含浸木材のねじり振動. 木材学会誌 36(4): 264~268
 - 佐道 健. 1991. ポリエチレングリコール処理. 日本木材の科学と利用技術 II, 2. 木材の化学処理. 日本木材学会 研究分科会編: 1~2
 - 정희석. 1988. 목재이학. 서울대학교 출판부. 서울: 117