

# 광경화형 사이클로포스파젠 유도체를 이용한 양모섬유의 친환경 내구성 방염가공

## Eco-friendly Durable Flame-Retardant Finish of Wool Fabrics Using a UV-curable Cyclophosphazene Derivative

### \*Corresponding author

Jinho Jang

(jh.jang@kumoh.ac.kr)

백지윤, 장진호\*

금오공과대학교 화학소재공학부 소재디자인공학전공

Ji-Yun Baek and Jinho Jang\*

Department of Materials Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea

Received\_October 20, 2021

Revised\_November 08, 2021

Accepted\_November 10, 2021

### Textile Coloration and Finishing

TCF 33-4/2021-12/230-237

© 2021 The Korean Society of

Dyers and Finishers

**Abstract** The flame-retardant (FR) treatments of wool fibers using Hexafluorozirconate/titanate salts and tetrabromophthalic anhydride can cause skin irritation and gas toxicity due to Zr and Br compounds respectively. A water-soluble polyfunctional cyclophosphazene derivative, synthesized through substitution reaction of Hexachloro cyclophosphazene and N-[3-(Dimethylamino)propyl] methacrylamide, was applied as a durable flame-retardant for wool fabrics. Also, a crosslinked structure was introduced to improve washing durability of the FR-wool, up to 10 laundering cycles, using Acrylamide(AAm) and Triacryloylhexahydrotriazine (TAHT) as a comonomer and a crosslinker respectively. The mole ratios of the TAHT and AAm concentrations compared to the Dichloro tetrakis{N-[3-(Dimethylamino)propyl]methacrylamido} cyclophosphazene (DCTDCP) were optimized to 1.33 and 7.5 respectively. In addition, the pyrolysis and combustion properties of the FR wool were assessed using LOI, TGA and microcalorimetry suggesting a solid-phase FR mechanism.

**Keywords** durable, flame retardant, wool, crosslink, formaldehyde-free

## 1. 서 론

양모섬유는 우수한 보온성, 흡습성, 촉감, 착용쾌적성 등을 지니고 있다. 이러한 장점으로 의류, 인테리어 직물 및 산업용 의류에 널리 사용된다<sup>1)</sup>. 양모는 질소(10~14wt%)와 황(3~4wt%)을 포함한 나선형 구조의 가교된 폴리펩티드로서, 약 25의 LOI를 가져 약한 방염성을 갖는다<sup>2,3)</sup>. 하지만, 화재전파를 방지하고 충분한 도피시간을 확보하여 화재로 인한 인체 위험을 감소시키기 위해서는 여전히 방염성의 향상이 필요하다. 세계적으로 섬유가공에 사용되는 방염제와 방염가공에 관한 규제는 엄격해지고 있으며, 방염제 중 일부는 사용이 제한되거나 금지되고 있다<sup>1)</sup>.

양모섬유에 대한 내구성 방염가공인 Zirpro법은 Hexafluoro

zirconate와 titanate가 방염제로 사용되었는 데<sup>1,4)</sup>, 산성조건에서 음전하를 띤 지르코늄 또는 티타늄 염을 처리함으로써 내구성을 갖게 할 수 있으나, 일광 조사나 알칼리 조건에서 황변하고 방염성을 잃는 단점을 갖는다. 또한 Tetrabromophthalic anhydride를 섬유 표면에 처리함으로써 방염가공할 수 있지만 연소시 독성 브롬산과 다이옥신이 발생하기 때문에 사용되지 않는다. 또한 N-Methylol dimethyl phosphonopropionamide를 이용한 양모의 방염가공도 시도되었지만 가공 중 또는 가공 후 포름알데히드를 유리하는 단점을 가지고 있다.

따라서 인체유해 물질을 배출하지 않는 친환경 방염제 개발이 요구되고 있다<sup>5)</sup>. SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 용액의 졸겔반응을 이용하거나 비닐포스페이트의 그래프트에 의한 방염가공도 시도되었다<sup>6)</sup>. 또한 인체친화성 방염가공제로서 연어 DNA<sup>7)</sup>, 유장(Whey) 단백질<sup>8)</sup>, 피트산(Phytic acid)<sup>9)</sup>, 카제인<sup>10)</sup>, 바나나줄기 수액<sup>11)</sup> 등 인을 함

유한 천연물질들을 이용한 방염가공도 연구되었지만 대부분 세탁내구성이 부족하였다<sup>12)</sup>.

인계 방염제는 면섬유의 내구성 방염가공에 사용되어 왔으며, 고온에서 인산을 유리하여 섬유고분자의 탈수와 가교 작용에 의해 방염성을 부여한다<sup>1,13)</sup>. 면섬유에 가장 많이 사용되는 내구성 인계 방염제는 “N-Methylol dimethyl phosphonopropionamide(Pyrovatex)”와 “Tetrakis(hydroxymethyl) phosphonium salt/urea condensates(Proban)”가 대표적이거나<sup>14,15)</sup>, 모두 포름알데히드 유리하는 등의 단점을 가지고 있다<sup>16)</sup>.

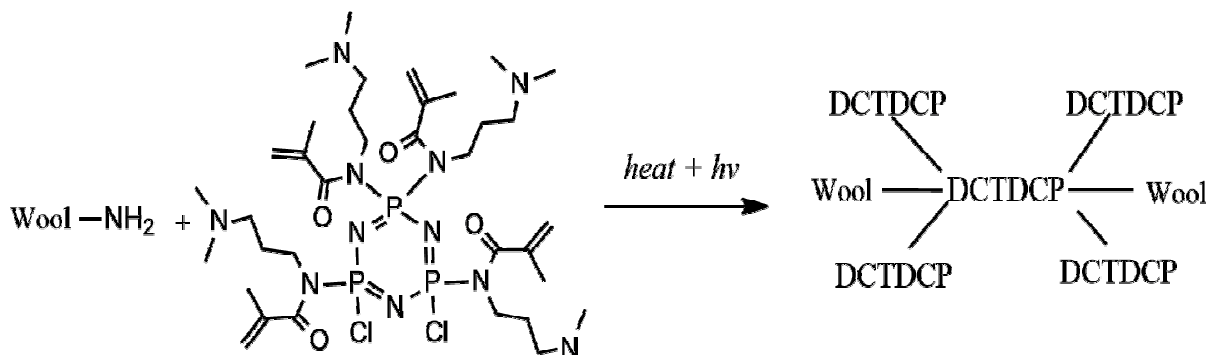
본 연구에서는 포름알데히드가 유리하지 않는 방염제로써 다관능성 인계 방염제인 사이클로 포스파젠 유도체를 합성하고 양모 섬유에 친환경 방염가공제로 적용하였다<sup>17,18)</sup>. 인체와 환경에 유해한 물질을 유리하지 않는 UV 경화형 방염가공제인 DCTDCP는 Hexachloro-cylotriphosphazene(HCCP)와 N-[3-(Dimethylamino)propyl] metacrylamid(DMAPMA)를 반응시켜 합성하였다<sup>18)</sup>. 또한 세탁내구성을 향상시키기 위해 관능성도가 높고 질소를 함유한 1,3,5-Triacryloylhexahydro-1,3,5-triazine(TAHT)와 Acrylamind(AAm)를 각각 가공용 가교제와 단량체로 사용하였다. 질소와 인의 상승작용으로 인해 방염성이 향상되었으며, 라디칼 반응을 통해 가교된 네트워크로 인해 세탁내구성 또한 향상되었다.

고착률(add-on)과 한계산소지수(LOI)를 측정하여 가공된 섬유의 방염효율도와 상승효과를 평가하였다. 또한 열분해 온도, 잔류탄화물 양, Nr(residue number)을 열중량 분석(TGA)으로 분석하였다. ICP와 EA를 통해 방염가공한 양모섬유를 세탁 전후 원소조성비를 비교하여 가공제의 내구성을 확인할 수 있었다. 마이크로 열량계(MCC)를 통해 최대 발열 속도(peak HRR)와 총 발열량 THR)을 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료 및 시약

사용된 섬유는 평직의 정련, 표백된 양모섬유(101g/m<sup>2</sup>)이고



Scheme 1. Crosslinked wool fiber treated with DCTDCP.

Hexachloro cyclophosphazene와 함께 N-[3-(Dimethylamino)propyl] metacrylamide, 1,3,5-Triacryloylhexahydro-1,3,5-triazine(TAHT)와 Acrylamide(AAm)는 TCI(Tokyo Chemical Industry, Japan)에서 구매하여 사용하였다. 그리고 광개시제 API-180은 Shenzhen UV-ChemTech(China)에서 공급되었다.

### 2.2 DCTDCP 합성

THF에 HCCP를 녹인 후 DMAPMA와 Triethanol amine을 녹여 혼합하여 상온에서 10시간 이상 교반하였다. 필터로 침전을 여과하고 용제를 증발시켜 제거한 후 수용해성 Dichloro Tetrakis{N-[3-(Dimethylamino)propyl]-N-methacryloyl} cyclophosphazene(DCTDCP)을 제조하였다<sup>18)</sup>.

### 2.3 DCTDCP와 TAHT, AAm를 이용한 방염가공

양모섬유는 액비 40:1로 TritonX-100을 포함한 수용액에 50°C에 30min 침지하여 정련하였다. 정련한 양모섬유를 35% DCTDCP용액에 침지 후 WPU 95%로 패드한 후 120°C에서 10분 동안 Steam-curing한 후 건조하였다. 그리고 TAHT과 AAm 용액에 침지 후 WPU 95%로 압착하였다(몰비 DCTDCP : TAHT : AAm = 1 : 1.3 : 7.5). 자외선 조사기를 사용하여 UV curing한 후 수세 및 건조하였다. 다음 식(1)에 따라 고착율을 계산하였다.

$$A(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

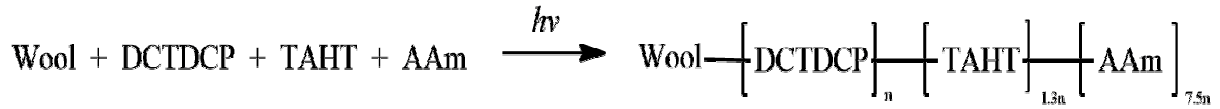
where,

W<sub>0</sub> : The weight of the untreated fabric

W<sub>1</sub> : The weight of the finished fabric after rinsing

### 2.4 원소 분석

가공 직물의 질소 및 인의 함량은 각각 원소분석기(Flash



Scheme 2. Crosslinked wool fiber treated with DCTDCP, TAHT and AAm.

2000, Thermo Fisher, USA)와 유도결합플라즈마분광계 (Optima 7300DV, Varian, USA)로 분석하였다.

### 2.5 FT-IR 및 FE-SEM 분석

FT-IR 분석은 적외선분광분석기(FT-IR 300E, JASCO, Japan)으로 KBr pellet법으로 작용기 변화를 조사하였다. 또한 주사전자현미경(JSM 6500F, JEOL, Japan)을 사용하여 FR 섬유 표면의 미세구조를 관찰하였다.

### 2.6 열중량 분석

가공된 직물의 열적 거동은 열중량분석기(TGA Q500, TA Instruments, USA)로 20°C/min 승온속도로 600°C까지의 중량 변화를 측정하였다. 또한 방염제가 양모 섬유의 탄화물 형성에 미치는 영향을 평가하기 위해, 잔류탄화물 수(Nr)를 다음 식(2)에 계산하였다.

$$\text{Residue number } (N_r) = \left( \frac{R_1}{F} \right) / R_0 \quad (2)$$

where,

$R_1, R_0$  : The percent weight of the residual carbonaceous char of the finished and untreated fabrics after pyrolysis respectively  
 $F$  : The weight fraction of the fiber in the finished fabrics

### 2.7 연소열량 분석

가공된 직물의 연소성은 미세연소열량분석기(PCFC, Fire Testing Technology Ltd, UK)를 이용해 승온속도는 1°C/sec 이고, 75°C에서 750°C까지 측정하였다. 가스 유량은 20/80의 O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 혼합 가스를 100cm<sup>3</sup>/min으로 주입하였고, 시료 무게는 6±0.5mg이다. 연소열량 곡선을 통해 최대 발열온도, 최대 발열속도(Peak HRR) 및 총 발열량(THR)이 측정되었다.

### 2.8 방염성 분석

방염성은 한계산소지수측정기(Ysuda Seiki Sesakusho Ltd.,

Japan)를 이용하여 연소가 지속되기 위한 최소 산소부피함량비인 한계산소지수(LOI)를 측정하였다(ISO 4589:2000). 방염효율도(EFF)는 가공직물의 인(P) 함량 1% 당 LOI 증가량이다. 상승효과(SE)는 다음 식(3)과 같이 각 성분 (FR 또는 A)으로 처리된 양모섬유의 LOI 합에 대한 FR 혼합물 (FR+A)를 갖는 처리된 직물의 측정된 LOI의 비이다.

$$SE = \frac{[LOI(\text{Fiber} + \text{FR} + \text{A}) - LOI(\text{Fiber})]}{[LOI(\text{Fiber} + \text{FR}) - LOI(\text{Fiber})] + [LOI(\text{Fiber} + \text{A}) - LOI(\text{Fiber})]} \quad (3)$$

where,

LOI(Fiber) : Indicates the LOI of the fiber alone  
 LOI(Fiber+FR), LOI(Fiber+A), LOI(Fiber+FR+A) : Show the LOIs of the fibers treated with FR, the additive (A), and both the FR and additive, respectively

### 2.9 세탁내구성 시험

방염가공된 섬유의 세탁 전·후의 내구성은 Launder-O-meter (Daelim, Korea)를 사용하여 AATCC TM 61-2006 2A 법에 따라 평가하였다.

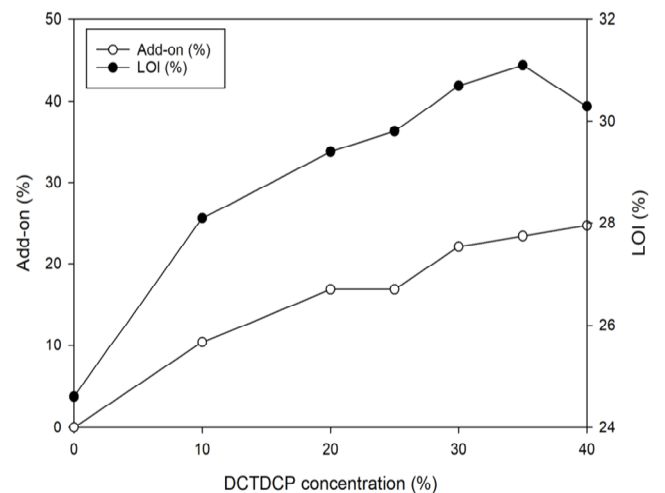


Figure 1. Effect of DCTDCP concentration on add-on and LOI.

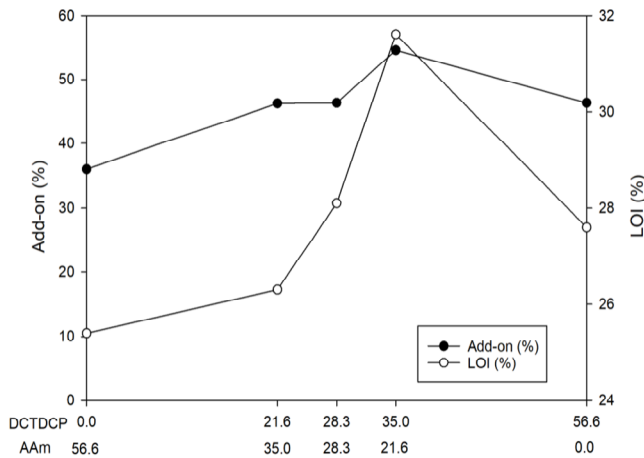


Figure 2. Synergistic effectiveness of DCTDCP and AAm treatment.

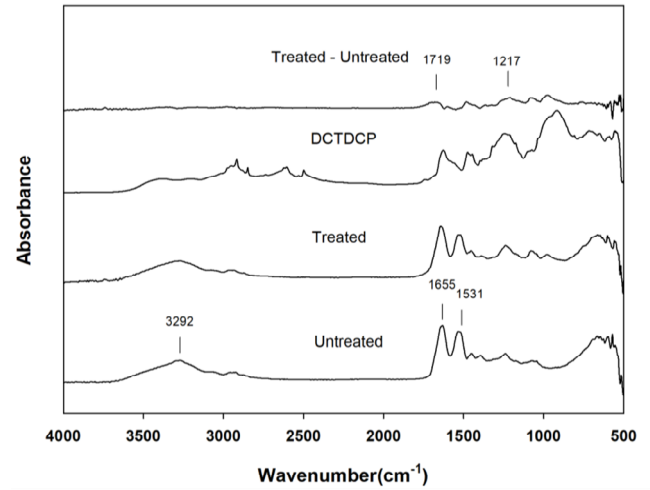


Figure 3. Infrared spectra of FR-finished wool fabrics.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 TAHT와 AAm첨가가 DCTDCP 방염가공에 미치는 영향

분자구조당 4개의 methacrylamide기와 2개의 P-Cl결합을 갖는 DCTDCP는 UV조사시 라디칼 중합 및 NH<sub>2</sub>기와 고온 치환반응도 할 수 있다. 또한 DCTDCP는 양모 표면에서 라디칼 반응이 많이 일어나지만 DMAPMA의 수용성으로 인해 내구성이 낮을 것으로 판단된다(Scheme 1). TAHT와 AAm를 첨가한 가공제액을 처리하면 가교가 도입되어 세탁내구성을 향상시킬 수 있다.

TAHT와 AAm의 한 분자 당 각각 3개와 1개의 acryl기를

가지고 있어 Scheme 2와 같이 라디칼 반응에 의해 DCTDCP 한 분자와 반응할 수 있다. AAm은 DCTDCP의 공단량체로서 공중합하여 중합도를 향상시키고, TAHT는 성장하는 고분자 라디칼의 분지화를 촉진시켜 가교구조를 도입할 것으로 판단된다. 즉, DCTDCP에 TAHT와 AAm를 첨가하여 3차원적 가교 구조를 형성하고 질소와 인의 상승작용으로 인한 방염성 및 세탁 내구성을 향상시킬 수 있다.

양모를 DCTDCP만으로 가공하였을 때 DCTDCP를 35% 농도까지 증가시킨 경우 LOI 31.1이고 고착률은 23.4%로 가장 효과적인 것으로 보인다. 그 이상으로 DCTDCP를 증가시키면 고착률은 증가하지만 LOI는 감소하였는데, 이는 치환반응에 필요한 양모섬유 표면의 아미노기가 상대적으로 부족해지기 때문으로 판단된다(Figure 1).

Figure 2는 TAHT 13.1%로 고정하고, DCTDCP와 AAm의

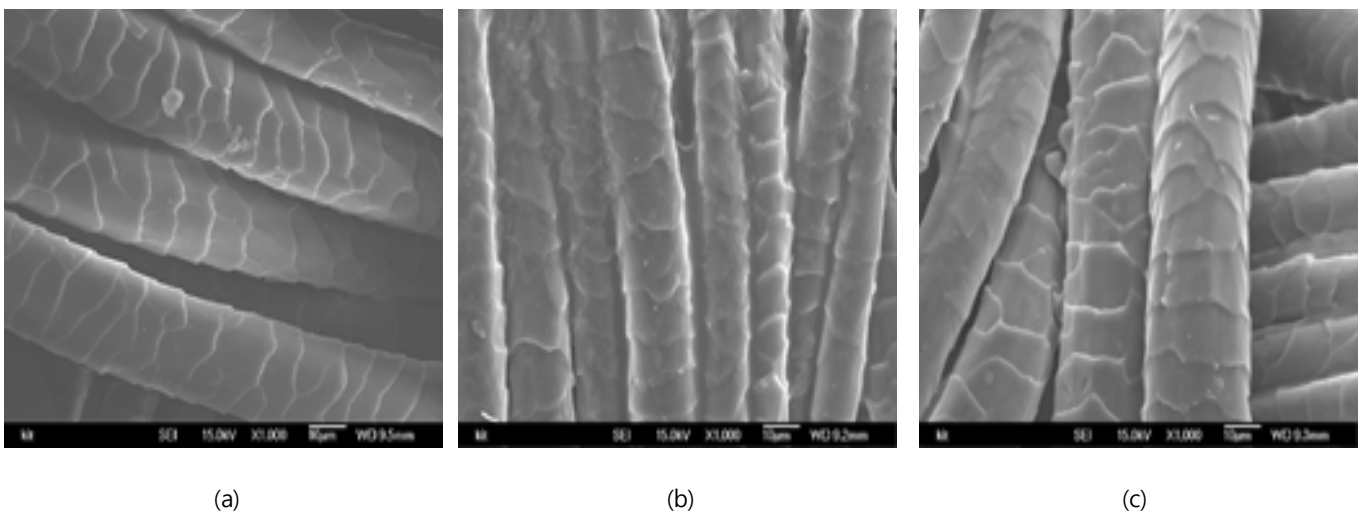


Figure 4. SEM images of FR-wool; (a) Untreated, (b) 35% DCTDCP, and (c) 35% DCTDCP+13.1% TAHT+21.6% AAm.

**Table 1.** EA and ICP data of FR-finished wool fabrics

Fabric	P (%)	N (%)	N+P (%)	Add-on (%)	LOI	EFF	SE
Wool	-	-	-	-	24.6	-	-
D 35.0	1.9	15.1	17.0	22.2	29.8	2.7	-
D 35.0 + T 13.13	1.8	15.5	17.3	40.3	29.4	2.7	0.9
D 35.0 + T 13.13 + A 21.60	1.9	16.3	18.2	56.2	31.1	3.4	1.1
After 10 laundering cycles							
D 35.0	0.7	15.1	15.8	13.3	24.6	-	-
D 35.0 + T 13.13	1.0	15.0	16.0	20.1	24.6	-	-
D 35.0 + T 13.13 + A 21.60	1.1	15.6	16.7	43.2	26.3	1.5	4.3

상승작용을 살펴보았다. DCTDCP의 경우 56.6%로 처리한 경우 고착율은 46.9%이고 LOI 27.6이었고, AAm 단독 처리한 경우 동일 농도에서 고착율은 36.0%이고 LOI 25.4로서 방염성이 부여되지 않았다. 동일한 농도에서 35%의 DCTDCP와 21.6%의 AAm를 혼합하여 처리한 경우 최대 고착율과 LOI를 보여 상승효과가 있음을 알 수 있다. 이 때 가공된 양모직물의 방염효율도는 3.08이고, 상승효과(SE) 지수가 1.8을 보여 DCTDCP와 AAm 두 물질간에 방염가공에 있어 상승효과가 작용함을 확인하였다. 이는 공단량체인 AAm가 DCTDCP의 아크릴 아미드기와 공중합에 참여하기 때문에 별다른 구조의 DCTDCP의 단독 중합보다 용이한 공중합체를 형성하기 때문으로 판단된다.

### 3.2 FT-IR과 SEM 분석

DCTDCP 35%를 함유한 방염가공된 양모직물의 특성을 적외선 분광법을 통해 분석하여 Figure 3에 나타내었다. 양모의 -NH 신축진동이 3292에 존재하고, 아미드 결합은 1665와 1531에서 나타났다. 처리 양모섬유에서 미처리 피크를 차감한 그래프에서 1719에서 C=O진동, 1217에서 P=N진동이 관찰되어 DCTDCP가 도입되었음을 알 수 있다.

미처리와 방염가공된 양모섬유의 표면 미세구조는 주사전자

현미경을 통해 관찰하였다(Figure 4). 미처리 양모(a)에 비해 방염가공 직물 (b)와 (c)는 가공제 양이 증가할수록 섬유 고착량이 증가하였는데, 이는 DCTDCP가 양모섬유 표면과 반응하여 방염제의 가교가 형성되고 첨가된 TAHT와 AAm양이 증가함에 따라 방염제의 가교 네트워크가 강화되어 전체 고착량이 증가하는 것을 알 수 있다. 면섬유와 비교하면 가공제가 표면보다는 섬유 내부에 다량 존재하는 것으로 판단된다<sup>18)</sup>.

### 3.3 방염가공된 양모섬유의 P와 N 함량 및 특성

방염가공 전후 양모섬유의 인과 질소 함량을 보면(Table 1), TAHT와 AAm를 첨가하면 가공된 양모섬유의 고착률이 점차 증가하였다. 하지만 DCTDCP 단독 처리한 양모섬유의 경우 고착률 22.2%에서 10회 세탁 후 13.3%로 감소하고 LOI 또한 29.8에서 24.6으로 감소하여 가공 효과를 상실하는 것을 확인할 수 있다.

이에 반해 TAHT와 AAm를 첨가한 양모섬유의 경우 고착률이 56%까지 증가하고 LOI가 31%이었다. 10회 세탁 후에도 고착률을 43%까지 유지하였고, LOI도 26.3까지 감소하여 세탁내구성이 있음을 확인하였다. 이는 TAHT와 AAm가 DCTDCP의 가교구조 형성을 촉진하여 세탁과정에서 탈락되지 않기 때문이다. 방염효율도는 DCTDCP만 처리한 경우 2.7이었지만, TAHT

**Table 2.** TGA data of FR-finished wool fabrics

Treatment	DTGA peak (°C)	Char yield at 600°C (%)	F	Nr
Wool	329	25	1.00	1.0
D+T+A	317	33	0.46	2.9

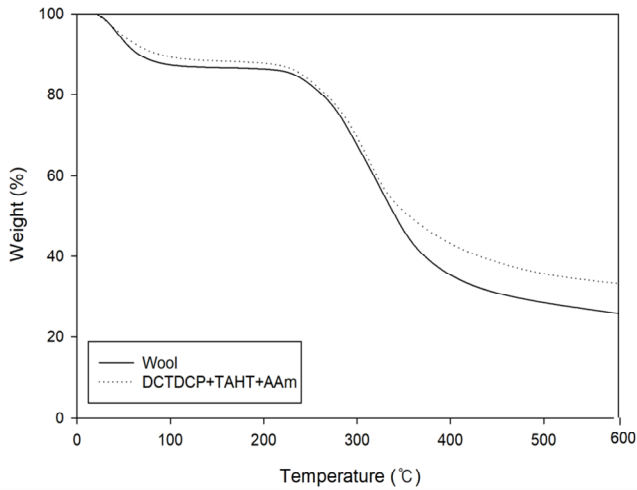


Figure 5. TGA thermograms of FR-finished wool fabrics.

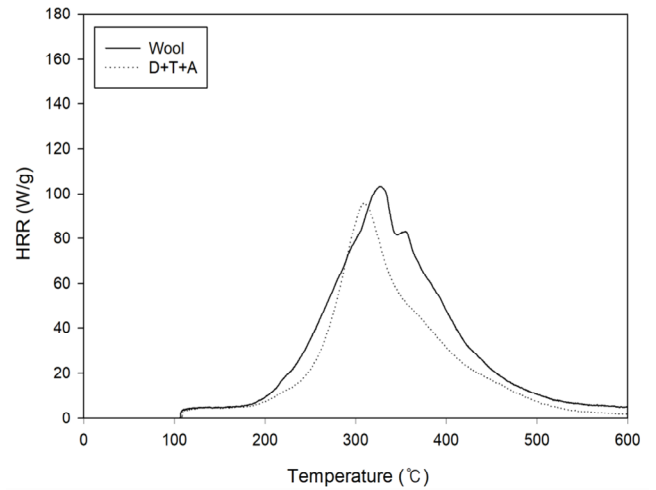


Figure 6. HRR curves of the FR-finished wool fabrics.

와 AAm를 첨가한 경우 3.4로 증가하였고 상승효과도 관찰되었다.

### 3.4 방염가공된 양모섬유의 열분해 특성

방염가공된 양모섬유의 열분해 특성은 TGA로 측정하여 Table 2와 Figure 5에 나타내었다. 미처리 직물의 최대 열분해 온도는 329°C이었으나, 35% DCTDCP, 13.1% TAHT, 21.6% AAm를 처리한 경우 317°C로 감소하였고 열분해 속도도 감소하였다. 잔류 탄화물의 경우에도 미처리의 25%에서 33%까지 증가하였다. 또한 방염가공된 양모섬유의 잔류탄화물 수(Nr)도 1.0에서 2.9로 증가하였다.

따라서 고온에서 DCTDCP의 열분해로 생성된 인산이 양모섬유의 탈수 및 가교 반응을 촉진하여 양모의 열분해 경로를 변화시킴으로써 잔류 탄화물 양이 증가한다고 볼 수 있다. 방염가공 양모섬유는 인과 질소의 상승작용을 통한 고체상 방염기구를 따른다고 볼 수 있다.

### 3.5 연소열량 분석

마이크로 연소열량계로 측정한 FR가공된 양모섬유의 연소열량 곡선을 통해, 최대 연소 온도(Peak HR temperature), 최

대 발열 속도(peak HRR) 및 총 발열량(THR)을 계산하였다 (Figure 6, Table 3).

미처리 양모의 최대연소온도는 332°C이고 최대 발열속도는 104 W/g이고 총 발열량은 11.3kJ/g이었다. 35% DCTDCP와 13.1% TAHT 및 24.6% AAm으로 가공한 경우 각각 306°C, 95.0 W/g 및 8.8kJ/g로 현저하게 감소하였다. 연소한 후 잔류재의 경우 미처리 15.3%에서 25.9%로 증가하였다.

따라서 이 방염가공은 인산에 의한 탈수 및 가교 반응에 의해 최대 연소 온도와 발열속도를 감소시켜 총 연소열이 감소함을 알 수 있다. 따라서 방염가공된 양모는 탈수와 가교에 의해 비가연성 물질의 양을 증가시켜 전체 연소 발열량을 감소시키는 것을 알 수 있다.

### 3.6 세탁 내구성

세탁 내구성은 AATCC TM 61법의 반복 세탁 후 LOI 변화를 통해 평가하였다. DCTDCP만 처리한 양모 직물의 경우 5회 세탁 후 LOI가 25.0로 감소하여 반복 세탁에 내구하지 않았다. 하지만 13.1% TAHT와 24.6% AAm을 포함하여 가공한 경우 가교 네트워크 구조가 도입됨에 따라 내세탁성이 증가하였고, 10회 세탁 후에도 LOI 26.3을 보여 방염성이 유지되었다(Figure 7).

Table 3. The MCC data of the FR-finished wool fabrics

Treatment	Peak HR temperature (°C)	Peak HRR (W/g)	THR (kJ/g)	Char residue (%)
Wool	331.6	104.0	11.3	15.3
D+T+A	305.9	95.0	8.8	25.9

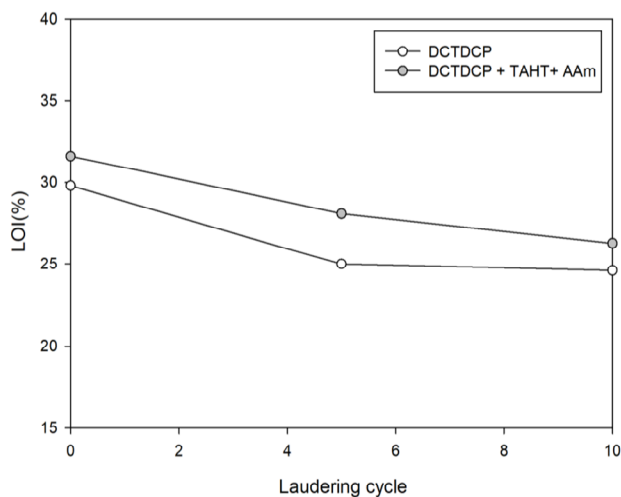


Figure 7. Effect of laundering cycles on the LOI of the FR-wool.

#### 4. 결 론

HCCP와 DMAPMA의 치환반응을 통해 합성한 UV경화능을 갖는 방염 가공제인 DCTDCP를 사용하였고, 가교제와 단량체인 TAHT와 AAm를 추가하여 가공함으로써, 방염제의 가교구조를 도입하여 양모 섬유의 내구성 방염 가공을 실현하였다. DCTDCP만 단독 가공하면 LOI 31.1으로 증가하지만 세탁 10회 후에는 LOI 25.4로 방염성이 유지되지 않았지만 13.1% TAHT와 21.6% AAm를 첨가함으로써 3차원 가교 네트워크 도입으로 인해 LOI가 31.6으로 상승될 뿐 아니라, 세탁 10회 후에도 LOI 26.3로 유지되어 우수한 세탁 내구성을 보였다.

#### 감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(202001300001).

#### References

1. K. L. Mittal and T. Bahners, "Textile Finishing: Recent Developments and Future Trends", Scrivener Publishing, USA, pp.69-127, 2017.
2. X. W. Cheng, J. P. Guan, G. Chen, X. H. Yang, and R. C. Tang, Adsorption and Flame Retardant Properties of Bio-based Phytic acid on Wool Fabric, *Polymers*, **8**(4), 122(2016).
3. X. W. Cheng, J. P. Guan, G. Chen, X. H. Yang, and R. C. Tang, Durable Flame Retardant Wool Fabric treated by Phytic Acid and TiO<sub>2</sub> Using an Exhaustion-assisted Pad-Dry-Cure Process, *Thermochimica Acta*, **665**, 28(2018).
4. S. Basak, K. K. Samanata, S. K. Chattopadhyay, P. Pandit, and S. Maiti, Green Fire Retardant Finishing and Combined Dyeing of Proteinous Wool Fabric, *Coloration Technology*, **132**, 135(2016).
5. H. J. Choi, D. J. Gong, C. Youn, and S. Y. Yeo, Preparation of Flammability Artificial Hair Based on Super Engineering Plastic, *Textile Coloration and Finishing*, **32**, 103(2020).
6. F. Zhang, J. Guan, and G. Chen, Performance of Flame Retardant Wool Fabric Grafted with Vinyl Phosphate, *J. Eng. Fibers Fabrics*, **9**, 32(2014).
7. J. Alongi, R. A. Carletto, A. D. Balsio, F. Cuttica, F. Carosio, F. Bosco, and G. Malucelli, Intrinsic Intumescent-like Flame Retardant Properties of DNA-treated Cotton Fabrics, *Carbohydr. Polym.*, **96**, 296(2013).
8. F. Bosco, R. A. Carletto, J. Alongi, L. Marmo, A. D. Blasio, and G. Malucelli, Thermal Stability and Flame Resistance of Cotton Fabrics Treated with Whey Proteins, *Carbohydr. Polym.*, **94**, 372(2012).
9. X. Zhang, X. Y. Zhou, X. W. Cheng, and R. C. Tang, Phytic Acid as an Eco-friendly Flame Retardant for Silk/Wool Blend: A Comparative Study with Fluorotitanate and Fluorozirconate, *Journal of Cleaner Production*, **198**, 1044(2018).
10. F. Carosio, A. D. Blasio, F. Cuttica, J. Alongi, and G. Malucelli, Flame Retardancy of Polyester and Polyester-Cotton Blends Treated with Caseins, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**, 3917(2014).
11. S. Basak, K. K. Samanta, S. K. Chattopadhyay, S. Saxena, and R. Narkar, Banana Pseudostem Sap and Boric Acid - A New Green Intumescent for Making Self-extinguishing Cotton Fabric, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, **43**, 36(2018).
12. G. Malucelli, F. Bosco, J. Alongi, F. Carosio, A. D. Blasio, C. Mollea, F. Cuttica, and A. Casale, Biomacromolecules as Novel Green Flame Retardant Systems for Textiles: An Overview, *RSC Adv.*, **4**, 46024(2014).
13. J. Alongi and G. Malucelli, Cotton Flame Retardancy: State of the Art and Future Perspectives, *RSC Adv.*, **5**, 24239 (2015).
14. A. Morgan, "Non-Halogenated Flame Retardant Handbook", Scrivener Publishing, USA, pp.50-55, 2014.
15. K. A. Salmeia, S. Gaan, and G. Malucelli, Recent Advances for Flame Retardancy of Textiles Based on Phosphorus Chemistry, *Polymers*, **8**, 319(2016).
16. O. A. Mohamed and F. A. Abdel-Mohdy, Preparation of

- Flame-Retardant Leather Pretreated with Pyrovatex CP, *J. Appl. Polym. Sci.*, **99**, 2039(2006).
17. J. H. Kim and J. Jang, Formaldehyde-Free Durable Flame-Retardant Finish of Cotton Using Hexachlorocyclophosphazene and Triethanolamine, *Textile Coloration and Finishing*, **32**, 150(2020).
18. J. H. Kim and J. Jang, Durable Flame-Retardant Finish of Cotton Fabrics Using a Water-soluble Cyclophosphazene Derivative, *Textile Coloration and Finishing*, **33**, 64(2021).

### Authors

- 백지윤** 금오공과대학교 화학소재공학부 소재디자인공학 전공 학사과정 학생
- 장진호** 금오공과대학교 화학소재공학부 소재디자인공학 전공 교수