

핵 연료봉 표면보호를 위한 수용성 건식 윤활제 개발

정근우^{1*} · 김영운¹ · 이상봉¹ · 홍종승² · 한상재² · 오명호²

¹한국화학연구원 융합화학연구본부, ²한전원자력연료

Development of a Water-soluble Dry Lubricant for Nuclear Fuel Rod Protection

Keunwoo Chung^{1*}, Young-Wun Kim¹, Sangbong Lee¹, Jongsung Hong²,
Sangjae Han² and Myoungho Oh²

¹Division of Convergence Chemistry, Korea Research Institute of Chemical Technology

²Dept. of PWR Production, KEPCO Nuclear Fuel Company (KEPCO NF)

(Received September 12, 2014; Revised October 24, 2014; Accepted October 31, 2014)

Abstract – Currently, in order to resist the scratching of the fuel rod surface while fabricating the fuel assembly of the light-water nuclear reactor, we use a solution of nitrocellulose, an explosive material, as a dry lubricant along with its solvent. However, the demand for developing safe and harmless aqueous alternative materials for environment-conservation and field-worker safety has increased. In this study, we demonstrate the preparation of a novel aqueous resin composite using a formulation of aqueous polymeric resin, alcoholic solvent, and water. Subsequently, we characterize this composite on the basis of hardness, adhesive property, and water solubility using plates similar to the fuel rod material. The insertion test of a fuel rod coated with the YS-3 composite shows load values of 18.8-20.5 kg/cm², which is comparable with 18.0-20.5 kg/cm² of the nitrocellulose coating agent. In addition, the depth and width of longitudinal scratches caused by the YS-3 composite test are 50% higher than those of the standard. We can develop a harmless and safe aqueous dry lubricant to replace the existing NC products through field testing of 264 pieces of fuel rods, after producing 350 kg of the YS-3 prototype. The scratch test for the rod surface showed that weight of chip of YS-3 prototype was smaller than that of NC before and after solvent treatment, indicating the properties of YS-3 prototype was comparable to the counterpart.

Keywords – nuclear fuel rod protection (핵연료봉 표면보호), nuclear fuel assembly (핵연료 집합체), dry lubricant (건식윤활제), nitrocellulose (니트로셀룰로스), water-soluble polymer resin (수용성 고분자 수지), surface scratch (표면 긁힘)

1. 서 론

경수로용 핵연료집합체는 연료봉이 격자 형태로 장입되어 있으며 원자력 발전소내에서 핵연료 수명기간 동안 경수의 흐름에 의한 유동에 연료봉 표면이 마모되지 않도록 격자사이에 꼭 조인 상태를 유지해야 한다. 핵연료 집합체를 제조하기 위하여 골격체에 핵연료

봉을 장입할 때 연료봉 표면에 발생하는 긁힘 현상을 최대한 억제하기 위해 단단한 코팅막을 형성하면서 윤활작용이 가능하도록 건식 윤활제로 표면을 코팅해준다.

현재 사용되고 있는 건식 윤활제는 니트로 셀룰로스(NC)를 주원료로 하여 약간의 첨가제로 가소제와 알키드 수지 등을 배합하고 사용하기에 적당한 유동성을 갖기 위해 유기용제에 용해시킨 상태의 제품이다.

주원료인 니트로셀룰로스(NC)는 천연고분자인 셀룰로스의 유도체로 백색의 분말상태이며 화학의 원료로 사용될 만큼 폭발적으로 연소하는 성질을 갖고 있다.

*Corresponding author : kwchung@kriect.re.kr
Tel: +82-42-860-7600, Fax: +82-42-860-7049

또 유기용제에 용해시킨 상태로 사용 되므로 현장 작업자의 안전성과 유기용제에 기인 하는 냄새와 독성 등의 문제로, 보다 안전하고 무해한 수용성의 건식윤활제 대체물질에 대한 개발 필요성이 요구되고 있다.

한편 연료봉 장입이 완료되면 연료봉 표면에 부착된 건식 윤활제는 표면에 잔류하지 않도록 유기용제로 다시 제거하고 건조시켜야 하며 이때에도 유기용제로 인한 냄새와 화재발생 등의 위험요소를 가지고 있다.

미국의 Westinghouse Electric Company 에서도 연료봉 장입 시 굽힘현상을 최소화 하기 위해 수용성 코팅제로 고분자량의 폴리알킬렌 그리콜을 물과 섞어 60°C로 가열한 상태로 연료 봉 표면에 스프레이하는 방법을 사용하기도 하며[1], 미국의 General Electric Company에서는 물유리 라고 불리는 Sodium silicate 나 천연 수용성 고분자인 gelatin과 같은 고분자 물질을 사용하기도 한다[2]. 또 다른 예로 Atlantic Richfield Company에서는 연료봉 자체를 차갑게 식혀 표면에 서리를 발생시킨 상태에서 장입시키는 예도 발표한 바 있다[3].

미국의 Combustion Engineering, Inc.에서는 수용성 코팅제로 메타아크릴과 아크릴의 공중합체에 각종 계면활성제와 내마모제 등을 물과 혼합 하여 수용성윤활제로 사용하여 스프레이하는 예를 발표하였다[4].

지금까지 외국의 개발 예를 보면 대개 수용성 윤활제를 스프레이 방식으로 뿌리면서 습식 윤활 하는 방식을 채용하고 있다. 이에 본 연구에서는 핵연료봉 윤활제 코팅현장의 작업 환경을 개선 하고 화재나 폭발 등의 위험 요소를 제거하고자 유기용제 대신에 물을 용제로 사용하면서 일정 시간 건조시켜 단단한 윤활피막을 형성할 수 있는 수용성 건식윤활제를 개발하였다.

먼저 적절한 수용성 고분자 수지를 선정하고 물에 녹인 후 저분자량의 알코올 등 수용성 휘발 성 물질들과 배합하여 실제 연료봉에 코팅한 후 증발속도와 코팅막의 두께, 접착강도, 코팅막의 형성과 제거의 용이성 및 연료봉 표면에 발생한 스크래치의 깊이와 폭 등을 측정하여 기존에 사용하는 니트로셀룰로스의 대체 가능성을 평가하였다.

2. 실험

2-1. 시약

실험에 사용한 시약은 모두 공업적으로 생산이 가능한 공업용 제품으로 물에 대한 용해성이 좋은 고분자

수지를 선정 하였다. 사용한 수지는 메타아크릴산(MAA), 2-히드록시에틸메타아크릴 레이트(2-HEMA)를 주성분으로 하여 여기에 메틸 메타아크릴레이트(MMA), 스티렌(St)과 2-아크릴 아미도-2-메틸프로판술폰산 수지(AMPS)등을 소량 첨가하여 조성물을 제조하였다.

고형의 수지 조성물은 이소프로판올과 에탄올, 물의 혼합용매에 녹여 1 L용량의 수용액으로 제조하였다.

2-2. 실험 방법

먼저 핵연료봉 표면에 고분자 조성물 수용액을 코팅하기 위해 별도로 제작한 용기에 수용성 건식 윤활제를 채우고 여기에 연료봉을 넣어 잠기게 한 다음 다시 꺼내어 공기 중에서 또는 열풍을 가해 일정시간 동안 표면을 건조시켰다. 건조된 연료봉 을 골격체에 장입시키면서 이때 걸리는 부하를 측정하였다.

2-3. 실험 장치

장입시험용 장치의 골격체는 실제 사용하는 골격체



Fig. 1. Fuel rod insertion load test equipment.

1	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	1
2	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	2
3	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	3
4	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	4
5	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	5
6	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	6
7	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	7
8	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	8
9	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	9
10	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	10
11	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	11
12	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	12
13	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	13
14	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	14
15	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	15
16	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	16
17	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	17
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	

Fig. 2. Fuel rod assembly structure.

Table 1. Classification of load for fuel assembly structure

No	Classification of cell position	Magnitude of load
1	Outermost cornered cells	Low load
2	Cells in contact with outside spacer rod	Low load
3	Cells in contact with center rod guide tube	High load
4	Cells around center rod guide tube	Low load
5	Cells in contact with outer rod guide tube	High load
6	Cells around outer rod guide tube	Low load
7	Outer cells	Low load

의 축소형으로 길이 1.5 m의 핵연료봉을 장입할 수 있는 3개의 지지격자(spacer grid) 와 가로, 세로 17개씩 총 289개의 격자 셀 중 안내 관(24개) 및 계측관(1개)을 제외한 264개의 연료봉을 장입할 수 있는 구조로 제작되었다.

아래 Fig. 1에 제작한 연료봉 장입시험 장치를 나타내었다.

각각의 장입위치에 따라 장입되는 연료봉에 가해지는 부하가 다르며 이를 다음 Fig. 2에 나타내었다.

한편 Table 1에는 연료봉 장입 시 부하의 정도를 위치에 따라 분류하여 나타내었다. Table 1의 장입위치에 따른 부하는 ⑤ = ③ > ⑥ > ④ > ① > ② > ⑦의 순서로 부하가 많이 걸리는 격자 셀로 판단하여 이를 바탕으로 고부하, 저부하 등 위치를 선정하여 연료봉 장입시험을 수행하였다.

한편 장입 시의 부하 측정은 Fig. 1의 장입시험 장치에 부착한 load cell을 이용하여 CAS사에서 제작한 NT-501A indicator로 측정하였다.

2.4. 물성 평가방법

코팅된 도막의 두께는 광반사형 도막두께 측정기를 사용하였다[5]. 본 측정기는 측정할 도막을 광원 아래에 두고 근적외선을 쬐어 반사되는 빛의 양을 측정하여 두께를 측정하는 시험장비로 μm 단위의 두께를 측정할 수 있다. 또한 접착강도는 $10 \times 10 \text{ cm}$ 크기의 평판에 코팅한 후 칼로 도막을 끊어내고 접착테이프도막을 떼어내 탈착되는 도막 개수로부터 비교 평가하였다[6]. 또한 도막의 단단하기를 연필경도 측정법을

Table 2. Compositions of polymer resin and solvent for dry lubricants (unit : %)

Component	A	YS-1	YS-2	YS-3	YS-4
MAA	3.60	6.00	5.60	5.40	5.40
2-HEMA	5.40	3.20	2.80	2.70	2.70
Other resin	-	-	0.90 (St)	0.90 (MMA)	0.90 (AMPS)
Resin, sum	9.00	9.20	9.30	9.00	9.00
IPA	6.3	27.7	24.0	28.0	27.8
EtOH	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Water	34.7	13.1	16.7	13.1	13.1
Total	100	100	100	100	100

Table 3. Results of thickness determination

Sample	NC	YS-1	YS-2	YS-3	YS-4
Thickness, μm	1.32	1.62	1.92	1.72	1.72

이용하여 평가하였다[7].

3. 결과 및 고찰

3-1. 고분자 수지 조성물의 제조 및 도막물성 평가

아래 Table 2에 고분자 수지의 배합비를 나타 내었다.

A시료는MAA 3.60 wt%와 2-HEMA 5.40 wt%를 주성분으로 한 고분자 수지 9%에 IPA 6.30%를 넣고 에탄올 50.0%와 물 34.7%를 가해 수지 조성물을 제조 하였다. A시료를 기준으로 하여 YS-1~YS-4는 MAA와 2-HEMA의 배합비를 조절하면서 기타 수지를 소량 첨가하고 물과 이소프로판올의 농도를 변화시켜가면서 고분자 수지 종류에 따른 물성변화를 측정하였다.

먼저 연료봉과 동일한 재질의 평판 시편에 각각의 코팅제를 이용하여 도막을 형성하고 상온에서 1시간 동안 방치하여 건조한 후 도막의 두께와 접착력을 비교하였다. 그 결과 아래 Table 3에서 보는 바와 같이 기존에 니트로셀룰로스를 사용한 NC제품이 1.32 μm 이었으며 YS-1~4는 각각 1.62~1.92 μm 으로 측정되어 기존 NC제품에 비해서는 두께가 약간 두꺼운 것으로 나타났다.

한편 동일한 평판 시편을 이용하여 접착력과 물에 대한 세척용이성을 평가하여 Fig. 3에 나타내었다.

코팅도막의 접착력을 평가하기 위해 도막 위에 접착테이프를 붙인 후 다시 떼어내자 Fig. 3에서 보는

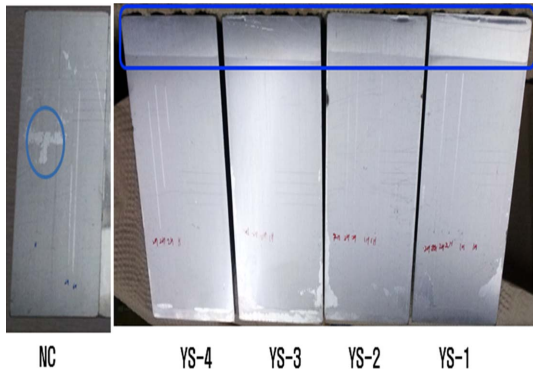


Fig. 3. Photography of water wash-out performance and tackiness for coating surface.

바와 같이 NC제품의 경우 중간부분(파란색 원으로 표시)에 도막이 떨어진 자국이 보였으나 YS-1~4까지는 이러한 현상이 발생하지 않았으며 따라서 기존의 NC제품에 비해 접착력이 더 강한 것을 알 수 있었다.

또한 수용성 고분자 수지를 사용함에 따라 코팅 후 물에 쉽게 세척되어 제거 되는지를 확인한 결과 상단 부분에 표시한 것처럼 용이하게 물에 의해 코팅도막이 제거되는 것을 알 수 있었다. 한편 연필경도 측정법으로 평가한 도막의 경도를 비교한 결과 YS-1과 YS-2, YS-4의 경우는 모두 연필에 의한 굽힘 현상이 나타났으나 YS-3은 표면에 굽힘이 전혀 없었다. 이는 기타 수지로 배합한 MMA수지의 첨가 효과로 판단되며

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6
7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	7
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8
9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	9
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10
11	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	11
12	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12
13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13
14	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
16	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	16
17	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	17
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		

Fig. 4. Insert position of fuel rod.

YS-3을 건식윤활제의 기본조성물로 선정하고 실제 연료봉을 사용하여 장입시험을 통해 기존 제품과의 성능을 비교하였다.

3-2. 연료봉 장입시험 및 부하측정

먼저 YS-3 건식윤활제 조성물에 축소 제작한 연료봉(1.5 m) 표면에 윤활제를 코팅하고 꺼내어 상온에서 자연 건조시킨 후 앞의 2.3절에서와 같이 제작한 실험 장비의 골격체에 장입시켰다.

기존 제품인 니트로셀룰로스(NC)를 코팅한 연료봉은 고부하 위치인C4와 E4 위치에 장입하고 YS-3을 코팅한 연료봉은 대칭되는 위치인 C14와 E14에 장입하였다. 또 저부하 위치에는 NC 제품은 A1과 B2, YS-3은 A17과B16위치에 장입하면서 각각에 대해 장입 시 부하를 측정하였다. 한편 코팅처리를 하지않은 버진 연료봉 실험으로 P2위치에서 장입시험을 수행 하였다. 아래 Fig. 4에 장입위치를 빨간색 원으로 나타내었다.

장입시험 시 연료봉에 걸리는 부하를 측정하여 Fig. 5의 그래프에 비교하였다. 그래프의 가로축은 측정시간이며 세로축은 측정된 부하를 나타내었다.

먼저 고부하가 걸리는 영역에서의 측정결과를 보면 버진 연료봉 실험으로 윤활제를 코팅하지 않고 장입한

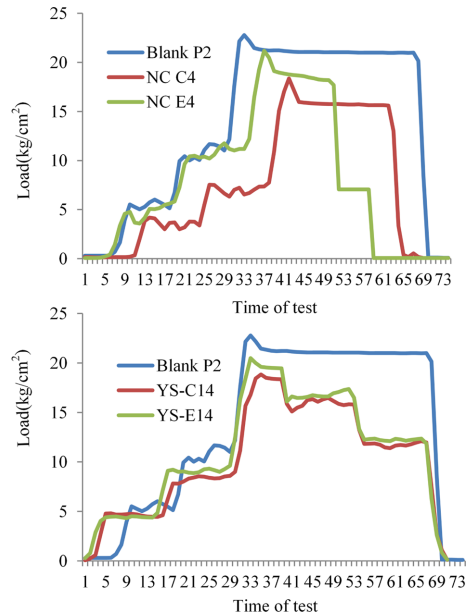


Fig. 5. Graph of load test at high load position.

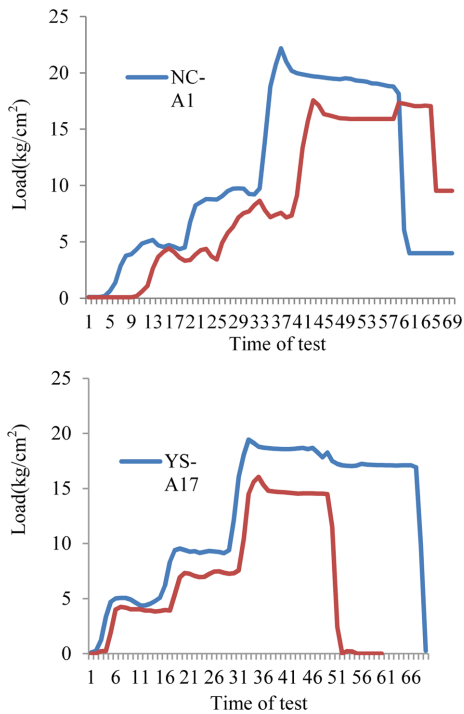


Fig. 6. Graph of load test at low load position.

P2의 경우 최대 부하가 22.8 kg/cm²로 높은 값을 나타내었다. 기존 제품인 NC윤활제를 코팅한 경우 C4위치에서는 18.0 kg/cm² 이었으며, E4 위치에서는 20.5 kg/cm²로 측정되어 버진 연료봉에 비해 10~30% 정도 낮은 최대 부하값을 보였다.

한편 YS-3 건식윤활제를 코팅한 경우 C14위치는 18.8 kg/cm², E14 위치는 20.5 kg/cm²로 역시 blank인 P2에 비해 작은 최대 부하값을 나타내고 NC 제품과 유사한 측정치를 나타내었다.

또한 저부하 영역에서의 측정 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

저부하 위치에서의 부하측정 결과 역시 NC 윤활제품의 A1위치에서는 22.2 kg/cm², B2 위치는 17.6 kg/cm²의 최대부하값을 나타내어 앞에서 비교한 고부하 위치에서 측정된 값과 유사한 부하값이 측정되었다. 한편 NC윤활제품의 대체 품인 YS-3의 경우 A17위치에서 19.4 kg/cm², B16 위치에서는 16.0 kg/cm²으로 NC윤활제품에 비해 낮은 최대 부하값을 나타내었다. 이와 같은 결과로 부터 수용성 대체품으로 제조한 YS-3가 기존의 NC윤활제품보다 건식윤활제로의 효과가 더 우수한 것으로 평가되었다.

Table 4. Analysis of nuclear fuel rod surface scratch of relative depth and width for NC lubricant values

Sample	Load	Position	Relative depth	Relative width,
YS-3	low	A17	1.07	1.07
		B16	1.01	1.03
	high	C14	0.77	0.66
		E14	0.92	0.81
Av.			0.92	0.88

3-3. 연료봉 표면의 스크래치 측정

연료봉 장입 및 인출 시험 후 굽힘현상에 의해 연료봉 표면에 발생하는 스크래치의 폭과 깊이를 측정하면 건식 윤활제의 성능을 보다 객관적으로 평가할 수 있다. 이에 NC윤활제품과 YS-3가 코팅된 연료봉으로 장입 및 인출 후에 연료봉 표면 스크래치를 측정하였다. 스크래치 측정에 사용한 기기는 올림푸사에서 제작한 광학현미경(Model STM6)이며 측정방법은 연료봉을 길이로 상부, 중간, 하부 등 크게 3부분으로 나누고 각 측정부위에서 90°씩 돌려가면서 0, 90, 180, 270°의 위치에서 표면에 발생한 스크래치의 넓이와 깊이를 측정하였다. 한편, 측정치의 평균값을 취해 NC 윤활제품의 측정치를 1로 했을 때 YS-3의 측정치를 상대 비교하여 그 결과를 아래 Table 4에 나타내었다.

Table 4에 나타낸 바와 같이 YS-3의 스크래치 깊이와 넓이를 NC윤활제품의 스크래치 측정치를 1로 했을 때의 상대비교치로 환산한 결과 저하중 영역에서는 NC에 비해 1.01~1.07의 유사한 값을 나타내었으나 고하중 영역에서는 0.66~0.92로 NC윤활제품에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과로부터 YS-3 수용성 건식 윤활제 개발품이 기존 NC윤활제품에 비해 동등 이상의 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

3-4. 현장 실증시험

앞의 실험결과를 바탕으로 실제 현장에서의 실증실험을 수행하여 YS-3 수용성 건식윤활제의 성능을 재 검증하였다. 먼저 350 kg의 YS-3 수용성 건식윤활제를 제조하고 기존 양산조건과 동일 한 연료봉(길이; 약 4 m)으로 모의 연료(Dummy Fuel)를 제작하여 장입부와 하 소음을 평가하였으며 결과를 기존 양산제품과 비교하였다.

YS-3의 실증실험에서 측정된 부하율과 소음의 측정

Table 5. Results of relative load and noise for NC lubricant values of field demonstration test

Cell No.	YS-3	
	load(max.)	noise(dB)
1	0.89	1.06
2	1.28	1.03
3	1.00	1.02
4	0.96	0.97
5	1.04	0.99
6	1.32	1.01
7	0.96	1.03
8	1.00	1.02
9	0.95	1.01
10	0.96	1.04
11	1.00	1.05
12	1.00	1.00
13	0.91	0.99
14	1.14	0.99
15	0.95	1.00
16	0.82	1.00
17	0.97	1.04
Av.	1.00	1.01

결과를 양산품인 NC 윤활제품의 측정치를 1로 했을 때의 상대치로 비교하여 Table 5에 나타 내었다.

17×17개의 셀에서 총 264개의 연료봉에 대해 YS-3건식윤활제를 사용하여 실증 실험을 하면서 부하와 소음을 측정하고 결과를 양산품과 비교하였다. 그 결과 Table 5에서 보는 바와 같이 YS-3 건식윤활제를 사용하는 경우 KNF 양산품인 NC 윤활제품을 사용할 때와 동등한 수준의 부하율이 측정되었으며 평균값이 동일한 결과를 얻었다. 한편 단단하게 고정된 지지 격자체 안으로 연료봉을 장입할 때 연료봉과 지지 격자체 사이의 마찰에 의해 소음이 발생하게 된다. 따라서 소음을 측정한 결과 격자의 위치에 따라 약간의 차이는 있으나 NC제품 대비 0.99~1.06 정도의 거의 동등한 수준의 소음이 측정되었다.

한편 264개의 연료봉 중 고부하와 저부하 영역별로 구분하여 12개를 선별하고 연료봉 표면 스크래치 검사를 통해 손상 깊이와 손상폭을 측정하고 측정결과를 양산 관리기준치와 비교하여 Table 6에 비교치를 나타

Table 6. YS-3 analyses results of nuclear fuel rod surface scratch of relative depth and width for commercial product thresholds

No.	Position	Relative scratch depth			Relative Scartch width,
		Upper	Medium	Lower	
1	High load	0.52	0.55	0.53	0.15
2		0.54	0.52	0.54	0.17
3		0.48	0.42	0.50	0.13
4		0.47	0.44	0.43	0.14
5		0.47	0.44	0.50	0.16
6	Low load	0.47	0.46	0.48	0.14
7		0.52	0.51	0.51	0.17
8		0.49	0.46	0.48	0.14
9		0.48	0.44	0.49	0.15
10		0.51	0.49	0.52	0.17
11		0.49	0.47	0.50	0.13
12		0.52	0.51	0.54	0.11
Av.		0.50	0.48	0.50	0.15

Table 7. Determination of chip weight

Sample	Weight of chip(g)	
	Before solvent treatment	After solvent treatment
NC	2.03	1.76
YS-3	1.24	1.19

내었다.

Table 6에는 실증시험 후 연료봉의 상부, 중간, 하부의 위치에서 스크래치 손상깊이를 측정하여 양산 관리기준치와 비교한 결과를 나타내었다.

상부에서는 관리기준치 대비 0.5, 중간부분은 0.48, 하부에서는 0.50 등 전체적으로 연료봉의 스크래치 깊이는 양산 관리기준치에 비해 50% 정도 수준에 머무르는 것을 확인하였다. 또한 스크래치 폭은 관리기준치 대비 평균 15% 정도 로서 기존의 NC 윤활제품과도 유사한 측정결과를 나타내었다. 따라서 정상 규격을 갖는 연료봉을 사용한 실증 실험에서도 YS-3 수용성 건식윤활제는 기존 NC 윤활제품과 비교해 손색없는 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

또 다른 평가방법으로 연료봉 장입 시에 표면의 굽힘현상에 의해 발생하는 칩의 무게를 측정함으로써

윤활성능의 우열을 판단하고자 하였다. 기존의 NC윤활제품을 사용하는 양산품 제조 시에 발생하는 칩과 YS-3 실증실험에서 발생한 칩을 수집하여 각각의 무게를 측정하고 칩 표면에 묻어있는 윤활제를 용제와 물에 녹여 제거하고 칩만을 여과하고 건조시킨 후 다시 무게를 측정하였다. 그 결과 아래 Table 7에서 보는 바와 같이 기존 양산품의 경우 초기 칩 무게가 YS-3 건식 윤활제 사용의 경우에 비해 훨씬 많은 양이 측정되었다. 이를 용제로 처리하여 윤활제를 제거한 결과인 처리 후 무게 역시 기존 양산품이 더 많은 것으로 나타났다.

이상과 같이 스크래치에 의해 발생하는 칩의 무게를 측정하는 방법으로 기존 양산품과 YS-3의 윤활성을 비교한 결과에서도 YS-3가 기존 NC 윤활제품을 충분히 대체할 수 있을 것으로 판단 되었다.

4. 결 론

경수로 연료봉 집합체 조립 시 연료봉 표면 굽힘 현상을 방지하기 위해 연료봉 표면에 건식윤활제로 폭약의 재료인 니트로셀룰로스(NC)와 이를 용해시켜주기 위한 유기용제를 사용하여 왔으나 현장 작업자의 안전과 환경보호를 위해 보다 안전하고 무해한 수용성 대체물질에 대한 개발 필요성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 수용성의 고분자 수지와 저분자량의 알코올계 용제를 조합하여 새로운 수용성 수지 조성물을 제조하고 연료봉과 동일 재질의 평판 시편을 이용하여 도막의 경도와 접착성, 물에 대한 용해성 등을 평가하여 가장 만족스러운 결과를 얻은 YS-3 조성물을 얻었다. 이 YS-3 조성물을 사용하여 실험실적으로 연료봉 장입시험을 통해 부하

를 평가하고 연료봉 표면의 스크래치를 검사한 결과, 기존 제품과 동등 이상의 성능을 확인할 수 있었다. 한편 YS-3조성물을 350 kg 규모로 제조하여 264개의 연료봉에 코팅하고 실제 연료봉 장입장치를 이용하여 실증시험을 수행한 결과에서도 기존의 NC윤활제품과 동등 수준의 부하와 소음이 측정되었고 연료봉 표면의 스크래치 손상도 양산 관리기준치에 비해 훨씬 낮은 수준에 있는 것으로 나타나 수용성 건식 윤활제 개발이 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

References

- [1] Micheal, O. B., David, C. C., Randal, K. L., *Process for Application of Lubricant to Fuel Rod during Fuel Assembly Loading Process*, Westinghouse Electric Company, US Patent No. 2011/0150163A1, 2011.
- [2] Harold, B. K., Jr., Tracy, S. H., Adul, G. D., *et al.*, *Scratch Preventing Method of Assembling Nuclear Fuel Bundles and the Assembly*, General Electric Company, US Patent No 5,028,382, 1991.
- [3] Melvin, L. B., *Method of Inserting Nuclear Fuel Rods in Grid Assembly*, Atlantic Richfield Company, US Patent No 3,757,403, 1973.
- [4] David, N. P., Stanley, H., *Coating Material and Method*, Combustion Engineering, Inc., US Patent No. 4,071,639, 1978.
- [5] Filmetrics, Inc., Retrieved December 30, 2014, from <http://www.filmetrics.com/thicknessmeasurement/f20>.
- [6] D3359-02, "Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [7] D3363-05, "Standard Test Methods for Film Hardness by Pencil Test", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.