<연구논문>

APR1400 원자로 용기 스터드 홀의 표면거칠기 거동에 관한 연구

김동일[†]·김창훈^{*}·문영준^{*}

A Study on the Surface Roughness Behavior of Reactor Vessel Stud Holes in APR1400 Nuclear Power Plants

Dong Il Kim[†], Chang Hun Kim^{*} and Young Jun Moon^{*}

(Received 30 April 2019, Revised 13 June 2019, Accepted 18 June 2019)

ABSTRACT

The APR1400 reactor may be operated for a long time under high temperature and pressure conditions, causing damage to the stud holes and causing stud bolts and holes to stick. The present practice is to manually remove the anti-sticking agent and foreign matter remaining in the APR1400 reactor stud hole and to visually check the surface condition of the thread to check the damage status of the threads. In the case of the APR1400 reactor stud holes, manually cleaning the threads increases the risk of radiation exposure and operator's fatigue. To avoid this, the autonomous mobile robot is used to automatically clean the reactor stud holes. The purpose of this study is to optimize the cleaning performance of the mobile robot by looking at the behavior of the surface roughness of wire, and rotation speed. A microscopic approach to the surface roughness of the flank is needed to investigate the effects of the newly proposed brush of the autonomous mobile robot on the thread holes. According to this experiment, it is reasonable to use STS brush rather than Carbon one. Optimal operating conditions are derived and the safety of APR1400 reactor stud holes maintenance can be improved.

Key Words: Reactor stud hole (원자로 스터드 홀), STS brush (스테인리스강 브러시), Flank (플랭크), Surface roughness (표면거칠기)

1.서 론

원자력 발전은 안전측면에서 기술적으로 신중히 고려해야 하므로 적용된 모든 부품의 경우, 유지측면 에서 주기적으로 적절한 검토가 이루어져야 한다. 원 자력발전에서 중요한 압력경계부로서 원자로의 압력 을 지지하는 부품인 원자로 스터드 볼트와 홀은 매주 기 점검되어야한다. 원자로는 고온,고압의 상황에서 장시간 운전하여 스터드 홀의 나사산 손상을 유발하 여 스터드 볼트와 흘이 고착되는 사례가 발생할 수 있다. 스터드 홀의 경우 손상 발생 시 개별교체가 불 가하여 설비 안전에 막대한 영향을 미치게 된다.

이를 방지하기 위해 매 주기마다 스터드와 홀 사이 고착방지제를 도포하고 계획예방정비시 고착방지제 를 제거하고 나사산 표면을 점검한다. 현재 수동으로 APR1400 원자로 스터드 홀에 잔존한 고착방지제 및 이물질을 제거하고 나사산의 표면 상태를 육안 점검 하여 나사산의 손상상태를 확인한다.

고방사선 구역인 Upper Cavity에서 수동으로 청소 하여 방사선 쬐임량이 증가하고 있다. 연료 손상시에 는 쬐임량이 상당히 증가하여 작업자 안전에 영향을 미친다. 나사산의 손상이 발생하게 되면 정비시간 및

 ^{*} 책임저자, 정회원, 전남대 기계공학과
E-mail: pontoon@naver.com
TEL: (061)345-0562 FAX: (061)345-0309

^{*} 한전KPS 주식회사



Fig. 1 APR1400 reactor stud hole



Fig. 2 Stud repair damaged

비용이 증가하며 그에 따른 전력공급 및 안전성에 위 험요소가 된다.

작업절차는 원자로 스터드 홀에 윤활제를 제거하 기위한 세척액을 주입하고 전동 브러쉬를 삽입하고 상하이동하여 표면에 잔존하는 이물질 및 윤활제를 제거한다. 이후 이물질, 세척제 및 윤활제를 진공청소 기로 흡입하고 육안 검사한 다음 Go gage를 활용하여 건전성을 확인한다.



Fig. 3 Reactor stud hole work procedure

원자로 스터드의 경우, 스터드의 수명을 확대하기 위해 이물질로 오염된 곳을 자동으로 세척하고 와전 류탐상검사로 건전성을 확보하는 기술이 제시되었 다.⁽¹⁾ 초음파 주사장치를 개발하여 스터드 볼트의 미 세결함을 검출하는 것을 제시하였다.⁽²⁾⁽³⁾ 이 외에도 발 전설비 고온부에서 사용되는 스터드 볼트의 교체기준 으로 육안검사에 의한 방법, 경도측정에 의한 방법, 기울기 측정에 의한 방법이 제시되고 있다.⁽⁴⁾ 실제 볼 트와 단순화한 볼트를 2D, 3D FEM 해석을 통해 볼트 연결부 해석평가 방법론을 검토하였다.⁽⁵⁾ ASME Code 적용을 받는 압력용기의 스터드 암나사의 해석을 통 해 스터드 손상에 따른 응력평가를 수행하였다.⁽⁶⁾

위에서 언급한 것처럼, 원자로 스터드의 경우 나사 산의 미세결함을 검출하기 위해 와전류나 초음파 탐 상기법을 활용하고 볼트의 세척을 위한 장비는 다양 한 방법으로 제작 및 활용되어 관리되고 있다. 그러나 원자로 스터드 홀의 경우 전반적으로 기준이 설정되 어 있지 않으며 ASME Code 상에도 이러한 사항들이 충분하게 고려되어 있지 않다.

조임과 풀림이 반복됨에 따라 나사마찰계수가 증 가한다. 이것은 조임과 풀림이 반복됨에 따라서 나사 표면의 코팅부분이 박리되어 표면거칠기가 증가함에 따른 것으로 사료된다.⁽⁷⁾ 마모와 관련된 마찰은 보통 한 표면의 단단한 돌기의 끝이 다른 표면을 파고들어 마찰력에 기여하는 부분을 증가시킬 수 있기 때문에 높은 마찰 계수를 유발한다.⁽⁸⁾ 마찰계수가 증가함에 따라 스터드 볼트와 흘과의 체결 저항이 발생하여 응착마모에 의한 galling이 발생할 가능성이 높다. 국 부적으로 고온 고압 하에서 용착된 부분에서 한쪽 면에서 미세하게 떼어내어지고 이에 따라 면에서 미 소 공동에 의해 응착이 차츰 진척해 나아간다. 그러므 로 나사산 표면의 거칠기의 거동을 살펴보는 것이 필 요하다.

APR1400 원자로 스터드 홀의 경우, 수동으로 나사 산을 청소함에 따라 방사선 쬐임량 및 작업자의 피로 도 증가된다. 이를 피하기 위해 원자로 스터드 홀 상 부로 자율 주행 모바일 로봇을 활용하여 자동으로 원 자로 스터드 홀을 세척하고자 한다. 모바일 로봇에 장 착된 브러쉬에 의해 세척하는 스터드 표면의 표면 거 칠기의 거동을 살펴보아 모바일로봇의 세척 성능을 최적화하고자 하였다. 자율주행 모바일 로봇의 새롭 게 제안된 브러쉬에 의한 스터드 홀의 나사산의 세척 의 영향을 살펴보고자 프랭크의 표면거칠기에 대한 미시적 접근이 필요하여 브러쉬의 재질, 소선의 두께 그리고 회전속도 변화에 의한 거칠기의 거동을 확인 하고자 하였다.

2. 세척 장비

2.1 세척장비 Design

본 시스템은 청소를 담당하는 로봇과 장비운영 및 제어를 담당하는 제어시스템, 세척액 공급 및 회수 탱 크, 공압 제어기로 구성된 보조설비 시스템으로 구성 되었다. 전체 설비를 폴라 크레인으로 원자로위에 설 치된 Protection Cover 위에 앉힌다. 제어시스템과 보 조설비 시스템은 Protection Cover에 배치하고 로봇만 원자로 스터드 홀위에 설치하고 Air 및 Power Line만 연결하면 작업준비가 완료된다.

시스템은 원자로 플랜지면(원자로 스터드 홀 상부) 을 주행하면 원자로 용기 중심을 기준으로 360도 회 전하도록 설계되었다. 로봇의 주행이 원활하게 되도 록 원자로 주위에 설치되어있는 Pool seal을 활용하여 경로 추종한다. 로봇에 설치된 센서에 의해 path following하지만 일부 구간에서 슬립에 의해 Shifting 되었으나 보정 제어 알고리즘에 의해 제자리로 이동 한다.

청소할 홀에 위치되면 Air cylinder로 동작하는 Gripper를 양쪽으로 벌리고 스터드 홀 방향으로 내려 Gripper를 동작시켜 스터드 홀 내면 방향으로 Gripper 를 수축한다. Gripper를 유지한 채 양쪽에 위치한 구 동휠을 교대로 미세하게 구동시키면 휠 슬립에 의 해 시스템의 위치를 정확하게 센터링할 수 있도록 하였다.



Fig. 4 Overview of system



Fig. 5 Sequence of gripping

본 시스템의 세척에 쓰이는 브러쉬 모듈의 동작 특 성은 중심축의 회전에 의해 90도 각도로 배치된 개별 와이어 브러쉬가 돌출되는 형태이다. 회전축이 회전 하면서 브러쉬 모듈은 원심력에 의해 외부로 연장되 어 스터드 홀의 나사산을 세척한다. 회전과 동시에 회전축이 하부로 이동하면 브러쉬도 나사산에 의해 회전하므로 브러쉬 모든 외경을 활용하여 세척해 나 간다.

일반적으로 브러쉬를 이용한 세척에서는 스터드 홀보다 큰 회전반경으로 인해 브러쉬와 스터드 홀 벽 면과의 마찰로 큰 회전 저항이 발생한다. 이런 문제점 을 해결하기 위해 회전시에 개별 브러쉬가 나사산의 접촉에 의해 회전하고 미세한 힘이 작용하여도 안쪽 으로 이동하도록 하였다.

또한, 브러쉬는 원형의 형태로 만들어 개별적으로 자 유회전이 가능하도록 하였다. 이에 따라 인입저항이 최 소화되면서 나사산 세척이 이루어지도록 하였다.



Fig. 6 Brush module



Fig. 7 Cleaning zone



Fig. 8 Brushing stud hole

와이어 브러싱과 함께 내부에 구성된 유로를 통해 세척제가 나사산 방향으로 직접 분사 되어 습식세척 을 할 수 있도록 구성되었으며, 필요에 따라 동일라인 을 통해 에어 브로잉도 수행 가능하여 나사산 표면에 있는 이물질 제거와 함께 세척제 제거도 함께 수행 할 수 있도록 하였다.

또한, 교체가 가능한 노즐을 통해 하강시 세척제 분 사와 함께 나사산의 이물질을 스터드 홀 바닥 면으로 이동시켜 이물질의 제거가 용이하도록 하였다. 내부 노즐을 이용하여 세척액 분사 후 스터드 홀 하부에 분포된 이물질을 세척액과 함께 제거 할 수 있는 기능 을 가지고 있다. 이물질 제거 방법은 브러쉬 모듈 하 부에 개패형 노즐을 구성하여 세척액 공급시 압의 소 실을 막고 스터드 홀 하부에 위치 시 노즐이 기구적으 로 열리도록 하여 하부에 분포하고 있는 세척액 및 이물질을 제거하도록 구성되었다.

2.2 Control System

제어시스템은 제어부와 구동부로 구성되어 있다. 로컬제어부의 경우 Main 제어를 담당하는 PLC, 모터 제어를 담당하는 서브 앰프 그리고 로컬조작 패널로 구성되어있다. 구동부는 주행 및 브러쉬 동작을 담당 하는 모터, 센터링을 담당하는 Air Cylinder, 흘 감지 를 담당하는 근접센서 등으로 구성되어 있다.

사용자 Interface의 경우 누구나 쉽게 장비를 사용할 수 있는 환경조성을 목적으로 구성하였으며 주요 구 성은 장비의 주요한 조작을 담당하는 Main 화면과 세 부적인 설정을 담당하는 Setting 화면, 각종 이벤트의 저장 및 상황을 알려주는 IO 및 History 화면으로 구 성되어 있다.

Auto 모드의 경우 홀을 중심으로 장비 설치와 함께 진행 방향으로 스터드 홀을 감지하여 진행 할 수 있도 록 구성하였으며 홀 감지와 함께 세척 및 이물질 제거 등 일련의 절차대로 작업이 진행된다.

Auto 모드의 주행 경우 작업자가 없이도 원자로 원 주 방향으로 로봇이 주행할 수 있도록 하며 진행 방향 으로 센서가 있어 전방감지를 수행하여 불특정한 상 황에 대응하도록 구성되어 있다.

Manual 모드의 경우 작업자가 로봇 부위별 별도 조 작이 가능하게 하였으며 Setting 화면에서 운영조건 또한 변경 가능 하도록 하였다. 주요기능으로 Gripper 별도 동작 및 브러쉬 유닛 상하 이송, 세척 분사, 흡입, 등의 기능을 수행 가능하도록 하였다.



Fig. 9 GUI Environment

3. 표면거칠기와 측정

3.1 Surface roughness

표면 거칠기를 측정하는 방법으로는 대상물의 표 면으로부터 임의로 채취한 각 부분에서 표면 거칠기 를 나타내는 파라미터인 산술 평균 거칠기(Ra), 최대 높이(Ry), 10점 평균 거칠기(Rz), 요철의 평균 간격 (Sm), 국부 산봉우리의 평균 간격(S)등이 있다. 산술 평균 거칠기(Ra)는 평균 선의 방향에 기준 길이만큼 뽑아내어, 그 표본 부분의 평균 선 방향에 X축을, 세 로배율 방향에 Y축을 잡고 거칠기 곡선을 y=f(x)로 나타내었을 때 다음 식에 따라 구한다.



Fig. 10 Arithmetic mean roughness

10점 평균거칠기(Rz)는 거칠기 곡선에서 표본 평균 선에서 가장 높은 산봉우리의 5번째까지의 평균 거칠 기 값과 골 바닥에서 5번째까지의 평균값의 합으로 구한다.⁽⁹⁾



Fig. 11 Ten point average roughness

3.2 Roughness Measurement

거칠기 측정 장비는 레이져 마이크로스코프로(그 림 12)하였으며 사양은 Table 1과 같다. 그림 13과 같

이 제작된 샘플의 재질은 원자로 용기 재질인 SA 508이 고 제작된 샘플을 스터드 홀에 삽입하여 설치하였다.

Table 1 Specifications of laser microscope

레이져 마이크로스코프 VX-X200			
Magnification	200x -2400x		
Resolution	0.5nm(height), 1nm(width)		
Accuracy	1.2nm(height), 20nm(width)		



Fig. 12 VX-X200



Fig. 13 Sample & installation point



샘플을 각각의 시험 조건별로 다른 시편을 사용하였 다. 예를 들면 Ø0.15의 브러쉬를 200rpm으로 실험한 샘 플과 Ø0.20의 브러쉬를 200rpm으로 실험한 샘플을 각 각 제작하였다. 브러쉬의 재질은 carbon steel과 304 stainless steel로 제작되었다. 그리고 소선의 두께별(Ø 0.15, Ø0.2, Ø0.25, Ø0.3)로 각각 제작하여 실험하였다. 장비에 각각의 브러쉬를 장착하고 속도를 변화 (200rpm, 400rpm, 600rpm, 800rpm)시켜 브러쉬 전후 에 거칠기 측정 장비로 산술 평균 거칠기(Ra), 10점 평균 거칠기(Rz)를 측정하여 브러쉬에 의한 프랭크면 의 영향을 각각 확인하였다.



Fig. 15 Measurement point



Fig. 16 Measurement data

4. 실험결과

4.1 브러쉬 두께별 거칠기 비교

세척을 위한 brushing 실험을 통해 산술평균거칠기 와 10점 평균거칠기 값을 비교하였다. Carbon 및 Stainless Steel로 제작된 브러쉬의 두께별 거칠기를 측정하였다. 먼저 브러쉬의 재질을 Carbon으로 했을 때, 속도변화(200~800RPM)를 하면서 브러쉬 소선의 두 께를 바꿔서 브러쉬 전후의 나사산 프랭크면의 Ra값 의 변화를 비교하였다.

Table	2	Measurement	data	of	Carbon	Ra(µm)
-------	---	-------------	------	----	--------	--------

RPM 소선	Φ 0.15	Φ 0.20	Φ 0.25	Φ 0.30
200	3.480	2.892	2.146	3.051
200	8.859	3.847	5.497	5.109
400	2.184	2.179	2.397	2.575
	5.821	3.552	6.224	5.788
600	2.340	2.494	1.920	1.817
	1.730	3.668	6.136	5.387
800	2.632	3.287	2.076	1.950
	4.040	5.096	5.557	6.765



Fig. 17 Ra of carbon on thickness (µm)

Table 3 Measurement data of Carbon Rz (µm)

소선 RPM	Φ 0.15	Φ 0.20	Φ 0.25	Φ 0.30
200	76.233	79.882	55.378	55.393
200	55.689	37.006	98.101	112.67
400	29.239	35.085	65.453	48.221
	67.056	48.264	128.89	79.479
600	55.943	46.645	53.355	28.951
	24.223	70.277	78.128	86.172
800	52.972	62.379	28.704	62.857
	45.254	69.086	94.080	108.72





Carbon 재질로 제작된 다양한 직경의 브러쉬 테스 트에서 Ø0.15, Ø0.2, Ø0.25, Ø0.3의 경우 산술평균 거칠기와 10점 평균거칠기 값을 비교해 보았다. Fig. 17과 Fig. 18에서처럼 브러싱 전보다 후에 수치가 증 가함을 보였고 특히 Ø0.25, Ø0.3의 경우 가장 크게 증가하였다. 그리고 Ra와 Rz의 값에서 비슷한 경향을 보였다.

			4 /	
소선 RPM	Φ 0.15	Φ 0.20	Φ 0.25	Φ 0.30
200	8.599	1.897	3.180	1.754
200	2.415	1.940	5.716	10.499
400	6.047	1.780	2.061	3.100
400	9.782	2.933	4.802	2.847
600	2.286	2.165	4.886	2.200
	1.937	2.690	6.821	2.963
800	1.782	2.577	3.679	2.077
800	5.370	1.774	5.560	3.233

Table 4 Measurement data of STS Ra (µm)



Table 5	5	Measurement	data	of	STS	Rz(µm))
---------	---	-------------	------	----	-----	--------	---

소선 RPM	Φ 0.15	Φ 0.20	Φ 0.25	Φ 0.30
200	55.671	32.417	43.310	41.842
200	40.744	70.001	49.618	76.471
400	63.282	44.097	51.737	149.41
	61.673	57.762	50.118	32.774
600	26.695	31.859	54.199	45.655
	32.330	27.304	120.20	33.602
800	52.385	60.241	44.113	53.917
	44.520	23.248	70.586	39.233

STS 재질로 제작된 다양한 직경(Ø0.15, Ø0.2, Ø 0.25, Ø0.3)의 브러쉬 테스트에서 Ra와 Rz 값을 비교 해 보았다. Fig. 19과 Fig. 20에서처럼 Ø0.2에서 전속 도 구간(200~800rpm)에서 안정적인 수치를 확인하였 고 Ø0.25, Ø0.3에서는 거칠기가 증가하였지만 Carbon 과는 다른 경향을 보였다.



4.2 브러쉬 속도별 거칠기 비교

Carbon 및 Stainless Steel 브러쉬의 속도별 거칠기를 측정하였다. 먼저 브러쉬의 재질을 Carbon으로 했을 때, 소선의 두께(Ø0.15~Ø0.3)변화에 따라 속도변화 별 프랭크면의 Ra값의 변화를 비교하였다.

Table 6 Measurement data of Carbon Ra (µm)

	200	400	600	800
Φ 0.15 전	3.480	2.184	2.340	2.632
Φ 0.15 후	8.859	5.821	1.730	4.040
Φ 0.20 전	7.059	2.179	2.494	3.287
Φ 0.20 후	3.847	3.552	3.668	5.096
Φ 0.25 전	2.146	2.397	1.920	2.076
Φ 0.25 후	5.497	6.224	6.136	5.557
Φ 0.30 전	3.051	2.575	1.817	1.950
Φ 0.30 후	5.109	5.788	5.387	6.765





	200	400	600	800
Φ 0.15 전	76.233	29.239	55.943	52.972
Φ 0.15 후	55.689	67.056	24.223	45.254
Φ 0.20 전	79.882	35.085	46.645	62.379
Φ 0.20 후	37.006	48.264	70.277	69.086
Φ 0.25 전	55.378	65.453	53.355	28.704
Φ 0.25 후	98.101	128.89	78.128	94.080
Φ 0.30 전	55.393	48.221	28.951	62.857
Φ 0.30 후	112.66	79.479	86.172	108.72

Table 7 Measurement data of Carbon Rz (µm)



Fig. 22 Rz of carbon on different velocity (µm)

Carbon 재질로 제작된 다양한 직경의 브러쉬 테스 트에서 Fig. 21과 Fig. 22에서처럼 브러싱 전보다 후에 수치가 증가함을 보였고 특히 Ø0.25, Ø0.3의 경우 속도에 상관없이 증가하였다. 그리고 Ra와 Rz의 값에 서 비슷한 경향을 보였다.

Table 8 Measurement data of STS Ra(µm)

	200	400	600	800
Φ 0.15 전	8.599	6.047	2.286	1.782
Φ 0.15 후	2.415	9.782	1.937	5.370
Φ 0.20 전	1.897	1.780	2.165	2.577
Φ 0.20 후	1.940	2.933	2.690	1.774
Φ 0.25 전	3.180	2.061	4.886	3.679
Φ 0.25 후	5.716	4.802	6.821	5.560
Φ 0.30 전	1.754	2.010	2.200	2.077
Φ 0.30 후	10.499	2.847	2.963	3.233



Fig. 23 Ra of STS on different velocity(µm)

Table 9 Measurement data of stainless steel Rz (µm)

	200	400	600	800
Φ 0.15 전	55.671	63.282	26.695	52.385
Φ 0.15 후	40.744	61.673	32.330	44.520
Φ 0.20 전	32.417	44.097	31.859	60.241
Φ 0.20 후	70.001	57.762	27.304	23.248
Φ 0.25 전	158.83	51.737	54.199	44.113
Φ 0.25 후	49.618	50.118	120.20	70.586
Φ 0.30 전	41.842	149.42	45.655	53.917
Φ 0.30 후	76.471	32.774	33.602	39.233

Stainless Steel 재질로 제작된 다양한 직경의 브러쉬 테스트에서 Ø0.2의 경우 전후가 비교적 안정적인 결 과를 얻었고 Ø0.25의 경우 속도가 600 rpm에서 과도 하게 증가하였다. Carbon의 경우 전체적으로 rpm에 따라 거칠기가 증가하였으나 STS는 다른 양상을 보 인다.



브러쉬 두께별/속도별 거칠기를 비교해 보면, Carbon 재질로 제작된 다양한 직경의 브러쉬 테스트 에서 브러싱 전보다 후에 표면 거칠기 값이 전체적으 로 증가함을 보였고 특히 Ø0.25, Ø0.3의 경우 가장 크게 증가하였다. 이는 Ra와 Rz의 값에서 비슷한 경 향을 보였다. 그러므로 Carbon으로 제작된 브러쉬에 서 Ø0.25, Ø0.3보다는 Ø0.20의 두께의 와이어 브러 쉬를 제작하여 200~400rpm에서 운전하는 것이 타당 하다.

브러쉬 두께별/속도 거칠기를 비교해 보면, STS 재 질로 제작된 다양한 직경의 브러쉬 테스트에서 Ø0.2 에서 전속도 구간(200~800rpm)에서 비슷한 수치를 보여 가장 적합한 두께로 확인되었다. 그러므로 STS 로 제작된 브러쉬에서 Ø0.25, Ø0.3보다는 Ø0.20의 소선두께의 브러쉬를 제작하여 200~800rpm에서 운 전하는 것이 타당하다. Carbon의 경우 전체적으로 rpm에 따라 거칠기가 증가하였으나 STS는 다른 양상 을 보여 속도에 영향이 덜 미치는 것으로 보인다. 이 는 SA508 재질과 브러쉬 재질측면의 영향이 미친 것 으로 보인다. 이 실험 결과를 볼 때 자율주행 시스템 의 브러쉬에 대한 최적의 운전 상태를 도출하였고 이 를 활용하여 APR1400 원자로 스터드 흘의 정비의 안 전성을 높일 수 있다.

5. 결 론

APR1400 원자로 스터드 홀 상부로 자율 주행 모바 일 로봇을 활용하여 자동으로 원자로 스터드 홀을 세 척하고자 한다. 모바일 로봇에 장착된 브러쉬에 의해 세척하는 스터드 홀 표면의 표면 거칠기의 미세 거동 을 살펴보아 모바일로봇의 세척 성능을 최적화하고 자 하였다. 새롭게 제안된 브러쉬에 의한 스터드 홀의 나사산의 세척의 영향을 살펴보고자 브러쉬의 재질, 소선의 두께 그리고 회전속도 변화시켜 실험하였다. 재질, 소선의 두께, 속도 변화시켜 브러쉬 전후에 Ra, Rz를 측정하여 브러쉬에 의한 프랭크면의 표면거칠 기를 비교하였다. Carbon 재질로 제작된 다양한 직경 의 브러쉬 테스트에서 브러싱 전보다 후에 표면 거칠 기 값이 전체적으로 증가함을 보였으나 Ø0.20의 소 선두께로 200~400rpm으로 운전하는 것이 우수하다. STS 재질로 제작된 다양한 직경의 브러쉬 테스트에 서 Ø0.20의 소선두께로 200~800rpm에서 운전하는 것이 우수하다.

이 실험 결과에 의하면 Carbon이 경우 RPM에 비례 해서 거칠기가 증가하는 것을 볼 때 Carbon 보다는 STS의 브러쉬를 활용하는 것이 타당하고 200-400 rpm으로 운전하는 것이 우수할 것이다. 이로서, 자율 주행 시스템의 브러쉬에 대한 최적의 운전상태를 도 출하였고 이를 활용하여 APR1400 원자로 스터드 흘 의 정비의 안전성을 높일 수 있다.

참고문헌

- Ann, H.K., Roh, B.T., Yun, C.J., Oh, S.H., 2015, "Eddy Current Test and Cleaning System for Stud-bolts," *Proc. of the KSMTE 2015 Spring Meeting*, Daejeon, April, pp. 284-284
- (2) Suh, D.M., Park, M.H., Hong, S.S., 1989, "Development of Automatic Ultrasonic Testing Equipment for Pressure-Retaining Studs and Bolts in Nuclear Power Plant," *J. of the KSNT*, Vol. 9, No. 1, pp. 106-110.
- (3) Suh, D.M., Park, D.Y., Kim, C.K., 1990, "Ultrasonic Detection of Small Crack in Studs[Bolts] by Time Difference of Thread Signals(TDTS)," *J. of the KSNT*, Vol. 10, No. 1, pp. 38-46.
- (4) Chung, N.Y., Kim, M.Y., 2000, "Establishment of Replacement Criteria for Stud Bolts using on High Temperature in the Power Plants," *Trans. of the KSAE*, Vol. 8, No. 6, pp. 279-286.
- (5) KEPCO KPS, 2015, "FEM Evaluation Method for Integrity on Stud Joint," KEPCO Plant Service & Engineering Co. LTD., Naju, KPS-TRI-2015-12
- (6) Chung, N.Y., Kim, M.Y., 2002, "FEM Evaluation for Integrity on Damaged Stud Female Threads with Pressure Vessel according to ASME Code," *Proc.* of the KSME 2002 Spring Meeting, Pyeongchang, May, pp. 428-435
- (7) Park, T.W., Shin, G.S., Yanyao Jiang, Ming Zhang. 2003 "The Friction Properties on the Loosening of Bolted Joints." J. of KSS, Vol. 18, No. 2, pp. 1-5
- (8) Blau, P. J., 2001, "The significance and use of the friction coefficient," *Tribol. Int.*, Vol. 34, No. 9, pp. 585-591.
- (9) KSB0161, 2009, "Surface roughness-Definitions and designation", Korean Standards Association, Seoul.