

KSLV-1 Kick Motor 노즐 수압시험

유재석*, 김병훈**, 조인현***, 장영순****

KSLV-1 Kick Motor Nozzle Hydro-Pressure Test

Jae-Suk Yoo*, Byung-Hun Kim**, In-Hyun Cho***, Young-Soon Jang****

Abstract

KSLV-1 2nd stage Kick Motor Nozzle was exposed to high temperature and pressure during the firing. Under the high pressure environment, Kick Motor Nozzle hydro-pressure test was done for verifying the structural safety of the nozzle. The differences with the KM hydro-pressure test [1] are that the real immersed heat resistance material is assembled and the throat heat resistance material is similar with the real one. The hydro-pressure tests were done for the two times of the 125 % of MEOP (975 psi) and the 153 % of the MEOP.

초 록

KSLV-1 2단 Kick Motor 노즐은 연소 동안 고온·고압의 환경에 노출된다. 이러한 고압 환경에서 노즐부의 안전성검토를 위하여 KM 노즐 수압시험을 수행하였다. KM 수압시험 [1]과 다른 점은 실물형 잠입부 내열재가 사용되었으며 목부 내열재도 실물형과 유사하게 제작되어 조립되었다. 수압시험은 MEOP (975 psi, GT#2 기준)의 40% 예비시험, 120% 수압시험 2회 반복 및 153% 수압시험을 수행하였다.

키워드 : Kick Motor(킵모타), Solid Motor Nozzle(고체모타 노즐), Hydro-Pressure test(수압시험), Strain(변형률), displacement(변위), flexible seal(플렉시블 씬)

1. 서 론

그림 1은 2단 KSLV-1 2단의 킵모타의 단면도를 나타낸다. 플렉시블 씬과 노즐 연결부는 연소 압력을 받는 주 구조물이다. 플렉시블 씬 및 노즐 연결부의 구조 안전성 검증을 위해서 KM 수압시험 [1]을 수행한 바 있다. KM 수압시험은

실제 연소관이 부착되어 있어 노즐 연결부 후방 거동이 실제 연소시험과 유사하다. 그러나 KM 수압시험에서는 잠입부 내열재 및 목부 내열재가 금속재 마개로 덮여 있어, 실제 노즐 잠입부와 비교하여 형태와 크기가 다르다. 플렉시블 씬과 노즐 연결부 전방거동을 실제 연소관과 유사하게 모사하기 위해서 그림 2와 같이 실물형 노즐과 유사하게 노즐부 수압 시험시편을 제작하였다.

접수일(2007년 12월 14일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

* 구조팀/jsyoo@kari.re.kr

** 구조팀/bhk@kari.re.kr

*** 구조팀/ihcho@kari.re.kr

**** 구조팀/ysjang@kari.re.kr

지상연소시험을 수행하여 노즐부의 거동 및 안전성을 이미 파악했다. 그러나 좀 더 높은 압력에서 플렉시블 쉘 및 노즐 연결부의 구조 마진을 파악하기 위해서 본 수압시험을 수행하였다.

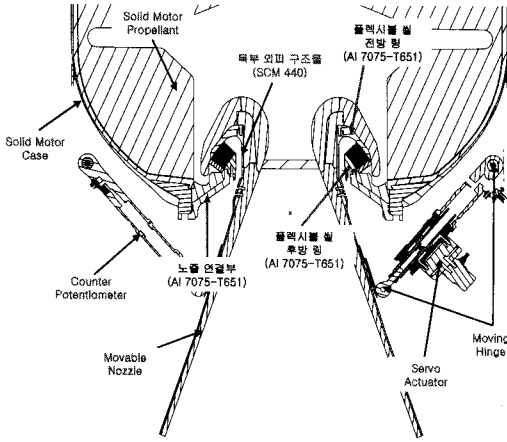


그림 1. KSLV-I 2단 킥모터 단면도

2. 노즐부 수압시험 구성

2.1 노즐부 수압시험 시편 및 시험장치

그림 2는 노즐부 수압시험 시편을 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 압력하중이 거의 작용하지 않는 노즐 확장부가 없으며, 목부 내열재 또한 수압 기밀을 위해 그림 2와 같이 제작하였다.

노즐연결부와 플렉시블 쉘의 변위를 측정하기 위해 KM 수압시험 [1]과 동일하게 변위 게이지를 그림 2와 같이 장착하였다. 또한 구조안전성을 파악하기 위해서 노즐 연결부와 플렉시블 쉘 전·후방 링에 변형률 게이지를 부착하고 변형률 값을 측정하였다. 데이터는 100 Hz로 측정하고, 데이터 취득장비는 NI사의 SCXI-1520 모듈을 사용하였다.

2.2 변위 게이지 및 변형률 게이지 장착 위치

변위게이지 장착은 그림 2와 같이 노즐 연결부 후방에 3개, 노즐 연결부 전방에 4개, 노즐목 마개에 4개, 총 11개를 장착하여 측정하였다.

그림 3과 4는 플렉시블 쉘 및 노즐 연결부에 부착한 변형률 게이지 위치 및 번호를 나타낸다. 본 시험에서 부착한 변형률 게이지 위치는 지상연소시험과 동일한 위치이다. KM 수압시험과도 대부분 동일하나 노즐 연결부 후방에 부착한 게이지가 10 mm 반경안쪽으로 부착되어있다.

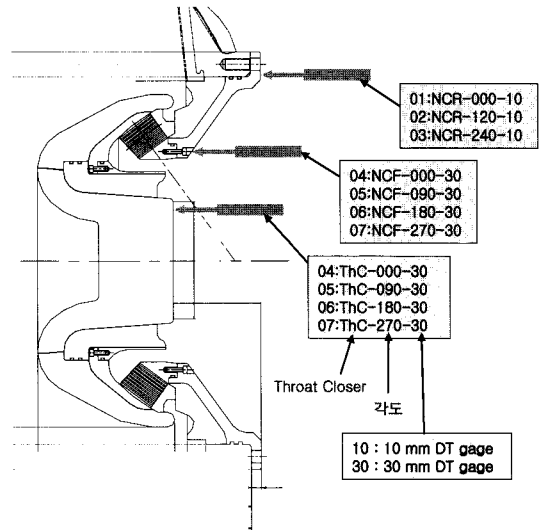


그림 2. 노즐부 시험 시편 및 변위 게이지 장착 위치

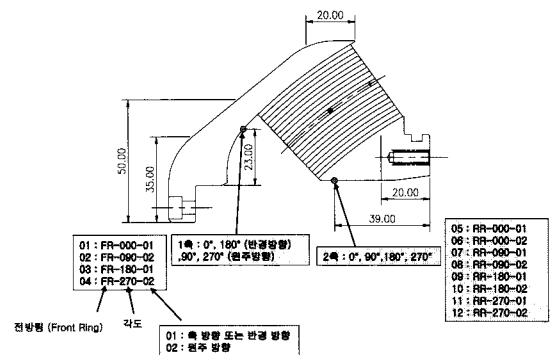


그림 3. 플렉시블 쉘 변형률 게이지 번호 및 위치

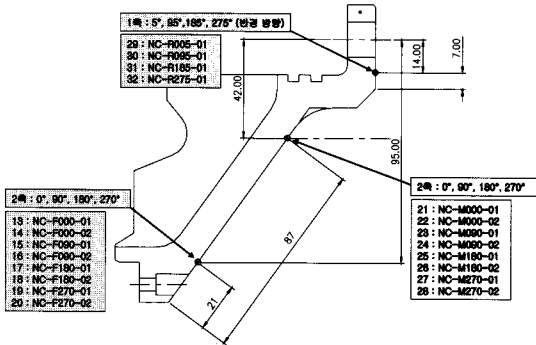


그림 4. 노즐 연결부 변형률 게이지 번호 및 위치

2.3 하중 조건

노즐부 수압시험 하중 조건 및 시험 순서는 표 1에 나타나 있다. 표 1에서 나타난 퍼센트는 MEOP (975 psi, GT#2 최대압력)를 기준한 값이다. 아래 표에서 보듯이 40% 예비 시험, 120% 수압시험 2회 반복 및 153% 수압시험으로 순으로 시험을 진행하였다. 153% 수압시험은 장비가 허용하는 최대 압력이다. 대표적으로 153% 수압시험에 대한 하중 프로파일을 그림 5에 나타내었다.

표 1. 노즐부 수압시험 하중 조건 및 시험 순서

Order	Test Case	Pressure (psi)	Remark
1	40 % 예비시험	390	
2	120% 수압시험	1170	2회 반복
3	153% 수압시험	1500	

3. 시험결과

120% 수압 1차, 2차 및 153% 3차 수압시험을 수행하고 변형률과 변위를 측정하였다. 153% 3차 수압시험에서는 시편의 파손위험으로 인해 변위게이지를 제거하고, 변형률만 측정하였다.

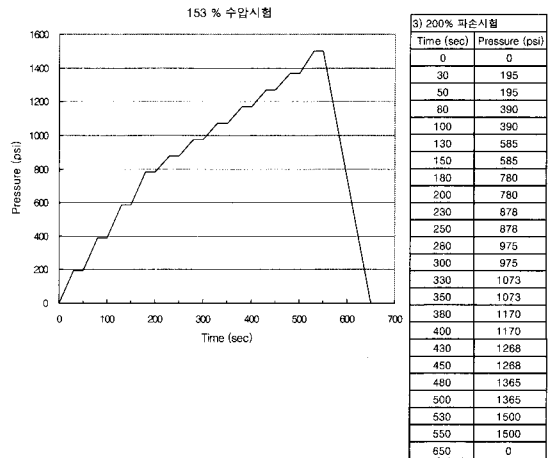


그림 5. 153% 수압시험 프로파일

3.1 변형률 결과

그림 6은 플렉시블 쉘 전방에서 측정된 변형률 이력이다. 고무층 및 복합재 씬층과 접촉한 전방링 후방이 씬층을 타고 수압에 의해 팽창하면서 원주방향으로는 인장변형을 한다. 또한 수압에 의해서 전방링 앞쪽이 노즐 출구 쪽으로 굽어지는 현상으로 인해서 반경방향으로는 압축을 받는다. 이와 같은 현상은 KM 수압시험 [1]에서도 측정되었다. 그러나 GT#2 [2]의 결과를 보면 반경 및 원주방향 모두 인장변형을 한다. 실제 연소시험에서는 ① 추력이 노즐 출구에서 노즐 입구쪽으로 작용하고, ② 노즐 목이 뚫려 있고, ③ 압력이 노즐 입구에서 노즐 목을 따라 감소하는 영향으로 FS 전방링이 입구쪽으로 굽힘을 받는다. 절대적인 변형률 크기는 같은 압력에서 노즐부 수압시험이 가장 크게 나타났다. 975 psi 기준으로 약 2000 $\mu\epsilon$ 으로 안전한 것을 알 수 있다. 연소시험에서는 1000 $\mu\epsilon$ 정도로 노즐부 수압시험에서 2배 정도 크게 측정되었다.

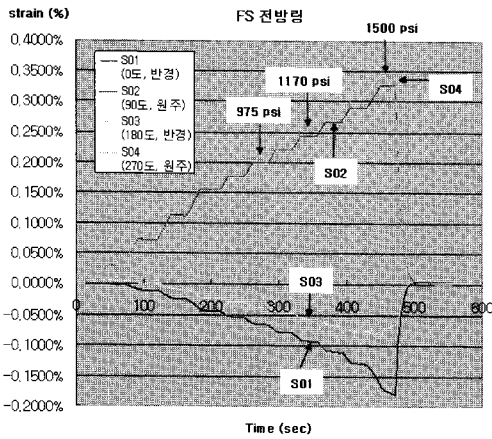


그림 6. FS 전방링 변형률 이력

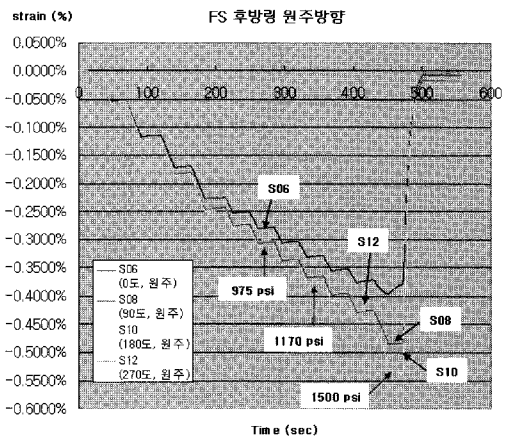


그림 8. FS 후방링 원주방향 변형률 이력

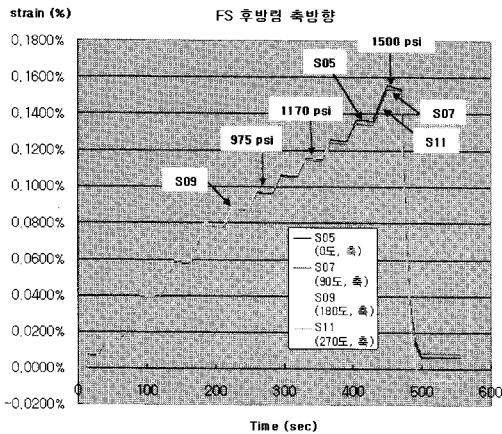


그림 7. FS 후방링 축방향 변형률 이력

그림 7은 플렉시블 셸 후방링의 축방향 변형률로, 경향은 KM 수압시험 [1] 및 GT#2 연소 시험 [2]과 같은 경향을 나타낸다. 후방링은 복합재 씌고 고무층이 노즐 출구쪽으로 밀리면서 반경 안쪽으로 변형한다. 즉 원주방향은 압축을 보이고, 축방향은 프야송 효과로 인장 변형을 보인다. MEOP (975 psi)에서 GT#2 결과와 비교하면 노즐 수압시험이 200 $\mu\epsilon$ 정도 높게 측정되었다.

그림 8은 플렉시블 셸 후방링 원주방향 변형률로 노즐부에서 가장 큰 변형률이 발생한다. MEOP (975 psi)에서 최대 3100 $\mu\epsilon$ 정도이다. GT#2에서는 2500 $\mu\epsilon$ 정도로 노즐부 수압시험이 약 600 $\mu\epsilon$ 정도 높았다.

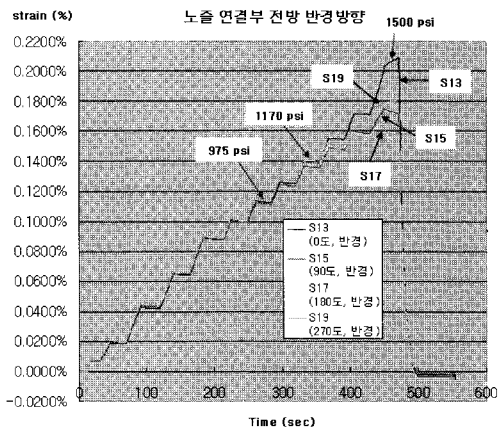


그림 9. 노즐 연결부 전방 반경방향 변형률 이력

그림 9는 노즐 연결부 전방 반경방향 변형률로, FS 후방링이 반경중심으로 변형하기 때문에 FS 후방링 거동에 영향을 받는 노즐 연결부 전

방 반경방향은 인장 변형을 한다. KM 수압시험 및 GT#2와 같은 경향을 보인다. MEOP (975 psi)에서 최대 1150 $\mu\epsilon$ 정도로 GT#2와 비교하면 약 400 $\mu\epsilon$ 정도 작게 측정되었다. 이것은 GT#2에서는 노즐 연결부 후방이 연소관 후방보스의 반경방향 팽창으로 인하여 노즐연결부 후방을 반경 바깥으로 팽창시키는데 반해, 노즐부 수압시험에서는 시험치구의 강성이 커서 이와 같은 노즐 연결부 후방의 반경 방향 팽창 상대적으로 작기 때문에 노즐 연결부 바깥면 반경방향 변형률이 작게 나타났기 때문이다.

노즐 연결부 전방 원주방향 변형을 역시 FS 후방링의 거동을 따라가기 때문에 압축변형을 한다. 그림 10에서 보듯이 MEOP 기준으로 최대 2000 $\mu\epsilon$ 으로 GT#2와 비교하면 250 $\mu\epsilon$ 정도 작은 값이다.

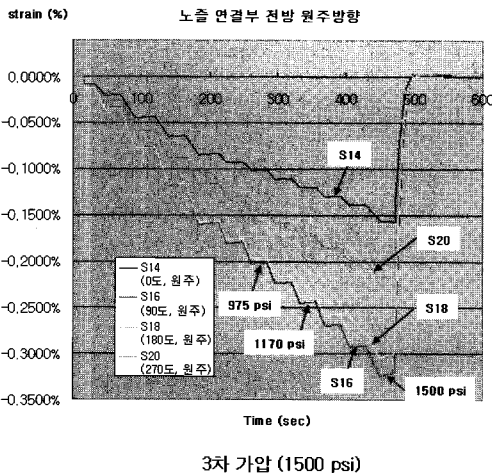


그림 10. 노즐 연결부 전방 원주방향 변형을 이력

그림 11은 노즐 연결부 후방 반경방향 변형률로 GT#2와 비교하면 전혀 다른 거동이 나타난다. 이것은 노즐 수압시험에서는 노즐 연결부 후방이 고정 치구와 연결되어 있는 반면에 지상연소시험에서는 후방보스와 연결되어 후방보스의 거동을 따라간다. 노즐 연결부 후방거동은 노즐부 수압시험보다는 KM 수압시험 [1]이 좀 더 연소시험과 유사한 결과를 나타낸다. 그러나 KM

수압시험과 노즐부 수압시험 모두 압축 변형을 나타내는 반면, GT#2 결과 [2]에서는 후방보스 반경방향 팽창과 노즐 추력에 영향으로 인장 변형을 나타낸다.

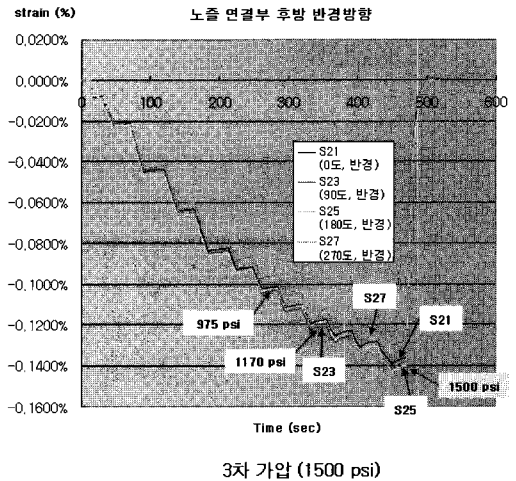


그림 11. 노즐 연결부 후방 반경방향 변형을 이력

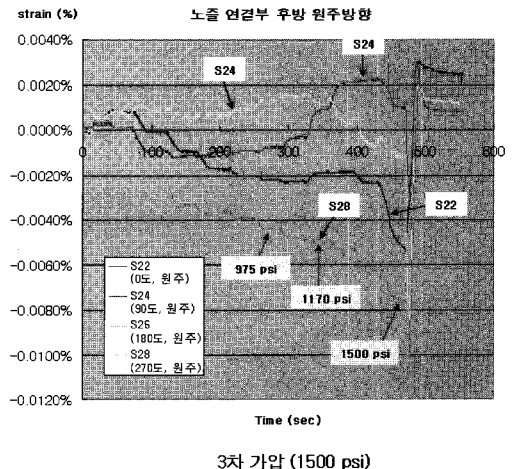
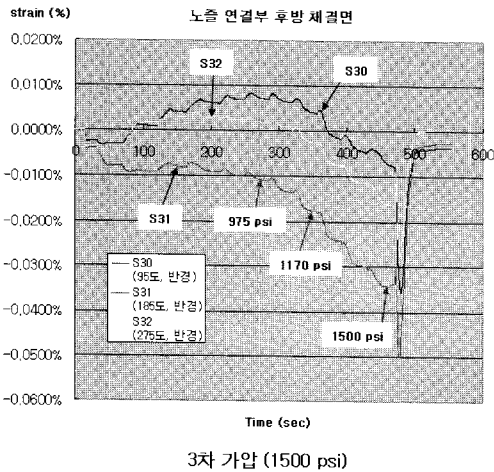


그림 12. 노즐 연결부 후방 원주방향 변형을 이력

그림 12는 노즐 연결부 후방 원주방향 변형률이다. 1차 가압시에 인장 팽창을 한 후 해압시 약 150 $\mu\epsilon$ 정도의 잔류 인장 변형률이 남아 있다. 이후 2차 가압시 $\pm 40 \mu\epsilon$ 이내로 아주 작은 변형

을 하는 것을 알 수 있다. 이것은 노즐 연결부 후방과 체결되는 시험치구의 강성이 크기 때문에 수압이 증가해도 거의 변형하지 않기 때문이다.



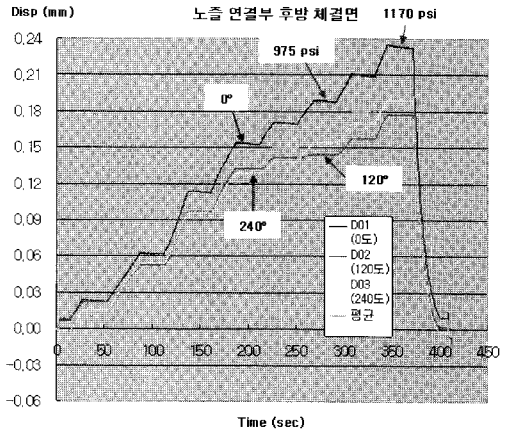
3차 가압 (1500 psi)

그림 13. 노즐 연결부 후방 체결면 변형을 이력

그림 13은 노즐 연결부 후방 체결면 반경방향 변형률로 1차 가압 시 MEOP에서 최대 500 $\mu\epsilon$ 발생 후 해압 시 약 500 $\mu\epsilon$ 정도의 잔류 압축 변형률이 발생한다. 이후 2차, 3차 가압 시 MEOP 기준으로 $\pm 100 \mu\epsilon$ 이내로 작은 변형을 보인다. 이후 수압이 계속 증가하면 추가로 압축 변형이 발생하는 것을 3차 가압 그래프에서 볼 수 있다. 1차 가압 초기에 발생하는 압축 변형은 GT#2와 같은 경향을 보이나 GT#2가 초기 빠른 압력 상승시 약 1000 $\mu\epsilon$ 정도로 2배 정도 크게 나타난다.

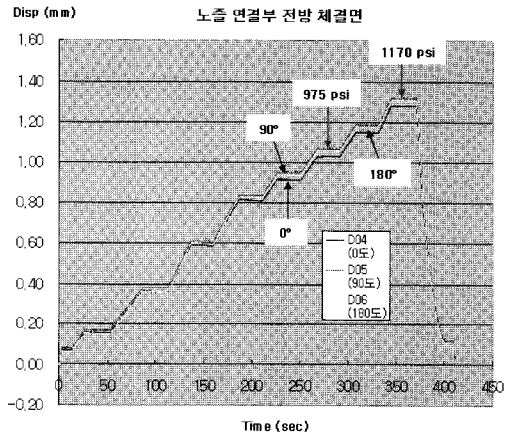
3.2 변위 측정 결과

그림 14는 노즐 연결부 후방 체결면의 변위로 시험 치구의 변위를 나타낸다. 그림에서 보듯이 MEOP (975 psi)에서 0.2 mm 정도로 아주 작은 변위를 보인다. 0° 쪽이 상대적으로 다른 방향에 비해서 좀더 노즐 출구 쪽으로 변형한 것을 알 수 있다.



2차 가압 (1170 psi)

그림 14. 노즐 연결부 후방 체결면 변위 이력



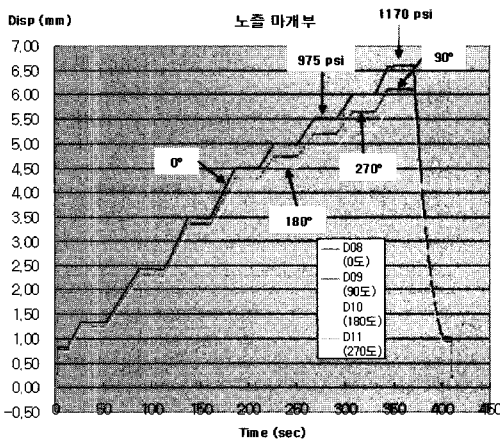
2차 가압 (1170 psi)

그림 15. 노즐 연결부 전방 체결면 변위 이력

그림 15는 노즐 연결부 전방 체결면에서 측정 한 노즐 축방향 변위이다. 270° 에 장착한 변위 게이지 고장으로 0°, 90°, 180° 세 방향에서 측정 하였다. 90° 쪽이 약간 크게 나왔으며 MEOP 기준으로 약 1.05 mm 정도 측정되었다.

그림 16은 노즐 마감부 변위로 시험치구, 노즐 연결부 및 플렉시블 쉴 변위가 더해진 값이다. 전체적으로 0°와 180° 가 돌아간 형태로 측정되

었다. 상대적으로 90°와 270° 측은 거의 돌아가지 않고 노즐 출구 방향으로만 변형한 것을 알 수 있다.



2차 가압 (1170 psi)

그림 16. 노즐 마개부 변위 이력

노즐 연결부 변위는 '노즐 연결부 전방 체결면 변위 - 노즐 연결부 후방 체결면 평균 변위'로 구한다. 노즐 연결부 후방 체결면 변위가 다른 지점의 측정 변위보다 작고, 측정 위치가 3점으로 다른 측정위치와 다르므로 평균값을 적용하여 노즐 연결부 변위를 구하였다. MEOP 기준으로 90°에서 최대 0.91 mm 측정되었다. GT#2의 -0.45 mm와 비교하면 절대 값으로 약 1.36 mm 정도의 차이를 보인다. 이것은 노즐 연결부 변형 거동이 추력과 노즐 내벽의 다른 압력 분포로 인하여 연소시험과 차이를 보인다. 그러나 KM 수압시험 (1.77 mm, [1])보다는 노즐부 수압시험이 좀 더 연소시험과 유사하다.

플렉시블 쉘의 변위 이력은 '노즐 마개 변위 - 노즐 연결부 전방 체결면'으로 구한다. 270° 변위는 노즐 연결부 전방에서 측정한 값이 없으므로 노즐 연결부 전방 체결면 변위들의 평균값을 적용해서 구하였다. MEOP 기준으로 0°에서 최대 4.5 mm 정도 노즐 출구쪽으로 변형하였다.

4. 결 론

실물형 노즐 연결부 및 내열재, 플렉시블 쉘, 잠입부 내열재 및 모사 노즐 마개로 구성된 노즐 시험편에 대해서 수압시험을 수행하였다. 수압시험으로 측정한 변형률 및 변위를 KM 수압시험 및 GT#2 시험과 비교하였다. MEOP (975 psi, GT#2 최대압력 기준)에서 각각의 시험들의 변위 및 변형률을 비교하여 표 2와 3에 나타내었다.

전체적인 변형률 경향은 KM 수압시험 [1]과 유사하다. 지상 연소시험 #2와 비교하면 플렉시블 쉘의 변형은 실물형 잠입부 내열재를 조립한 노즐부 수압시험이 가깝고, 노즐연결부 후방의 변형은 실제 연소관 후방보스와 연결된 KM 수압시험이 GT#2와 유사하다. 그러나 지상연소시험은 노즐 수압시험과 다르게 추력이 발생하고, 노즐 목이 관통되어 있으며, 노즐 내면의 압력 프로파일이 다르기 때문에 경향과 값이 일부 측정 위치에서 차이가 난다. 그러나 수압시험 결과에 노즐 추력 성분을 고려하면 지상연소시험과 유사한 경향과 값을 유추할 수 있다.

변위 경향은 실제 잠입부 내열재를 장착한 노즐부 수압시험이 KM 수압시험보다 지상연소 시험과 유사하다. 그러나 변형률과 같은 이유로 지상연소시험과는 차이를 보인다.

변형률과 변위 결과를 정리하면 아래와 같다.

① FS 전방링의 반경방향 변형은 수압에 의한 노즐 출구쪽 변형에 의해 압축을 보이고, 원주방향 변형은 전방링의 안쪽면이 고무층과 복합재 썸층의 경계를 타고 팽창하므로 인장 변형을 보인다.

② FS 후방링의 원주방향 변형은 잠입부에서 노즐 중심쪽으로 작용하는 수압에 의해서 압축 변형이 나타나고, 노즐부에서 가장 큰 변형률 (3100 $\mu\epsilon$)이 측정되었다. GT#2와 비교하면 약 600 $\mu\epsilon$ 정도 큰 값이다. FS 후방링 축방향 변형은 프아송 효과에 의해 인장변형률이 측정되었다.

③ 노즐 연결부 전방의 변형은 FS 후방링의

거동을 따라간다. 반경방향 변형률은 GT#2의 후방보스가 반경 바깥으로 팽창하는 거동을 모사하지 못했기 때문에 GT#2보다 작게 측정되었다. 원주 방향은 GT#2가 좀 더 크게 측정되었다.

④ 노즐 연결부 후방 체결면 반경방향으로 부착한 변형률은 체결 효과로 인하여 1차 가압 후 약 500 $\mu\epsilon$ 잔류 압축 변형률이 나타났다.

⑤ 노즐 연결부 변위는 MEOP 기준으로 0.89 mm 노즐 출구쪽으로 변형하였다. KM 수압시험 보다는 지상연소 시험에 유사하다. 그러나 지상연소시험의 노즐 연결부 변위는 추력성분 때문에 노즐부 수압시험과 반대의 경향을 보인다.

⑥ 플렉시블 쉴의 변위는 4.16 mm로 GT#2 변위 (3.75 mm)와 비교하면 약 0.41 mm 더 출구쪽으로 변형하였다. 지상연소 시험에서는 추력이 노즐 출구쪽에 입구쪽으로 작용하고, 노즐목 관통 및 노즐 내면의 압력이 노즐부 수압시험 압력보다 작으므로 플렉시블 쉴의 변위가 노즐부 수압시험보다 작다. 금속으로 제작된 모사 잠입부 내열재를 적용한 KM 수압시험과는 큰 차이를 보인다.

표 3. 노즐부 수압시험 변형률 비교

		KM 2차 수압시험 2차 가압 433.2 초 974.6 psi	GT#2 Max. Pressure 974.6 psi	GT#2 비교	노즐부 수압시험 2차 가압 975 psi	노즐부 수압시험 비교
		변형률 ($\mu\epsilon$)	변형률 ($\mu\epsilon$)		변형률 ($\mu\epsilon$)	비교
FS 전방면	0도, 반경	-	441.0	-	-624	-
	90도, 반경	-623.8	-	-	-	-
	90도, 원주	746.8	957.3	-	1941	-
	180도, 반경	-740.5	324.2	-	-377	-
	270도, 원주	-	944.7	-	2049	-
FS 후방면 전방	0도, 축	928.9	893.3	-	960	-
	0도, 원주	-	-	-	-2783	-
	90도, 축	-	806.9	-	959	-
	90도, 원주	-3089.9	-1657.9	-	-3049	-
	180도, 축	-	838.7	-	976	-
FS 후방면 후방	180도, 원주	-	-2539.8	-	-3100	-
	270도, 축	-	-	-	955	-
	270도, 원주	-3025.4	-2495.3	-	-2995	-
	0도, 축	451.2	-	-	-	-
	0도, 원주	-2774.0	-	-	-	-
노즐 연결부 전방	0도, 반경	-	1320.5	-	1122	-
	0도, 원주	-2283.9	-	-	-1010	-
	90도, 반경	1797.4	1358.2	-	1116	-
	90도, 원주	-2306.1	-2241.0	-	-2014	-
	180도, 반경	-	-	-	1145	-
	180도, 원주	-2214.6	-2252.8	-	-1949	-
	270도, 반경	1842.8	1561.5	-	1140	-
	270도, 원주	-	-2239.6	-	-1432	-
	0도, 반경	-586.4	690.2	-	-1014	-
	0도, 원주	1789.7	712.2	-	-20	-
노즐 연결부 후방	90도, 반경	-	-	GT#2 게이지가 KM 2차 수압시험에 비해 시 방향 19mm 안쪽으로 불균	-1025	GT#2 게이지 위치와 동일
	90도, 원주	1481.3	505.0	-	-6	-
	180도, 반경	-443.3	-	-	-1027	-
	180도, 원주	1624.7	639.1	-	24	-
	270도, 반경	-573.5	609.8	-	-860	-
	270도, 원주	1831.8	732.2	-	-38	-
	0도, 반경	-2074.8	-685.7	-	-	-
노즐 연결부 후방 체결면	95도, 반경	-1672.8	-912.1	GT#2, 0.55초 인대 최대 변형률	53	-
	165도, 반경	-1962.7	-1010.8	-	-129	-
	275도, 반경	-1774.4	-915.2	-	5	-

표 2. 노즐부 수압시험 변위 비교

		KM 2차 수압시험 2차 가압 433.2 초 974.6 psi	GT#2 Max. Pressure 11.63 초 974.6 psi	GT#2 비교	노즐부 수압시험 2차 가압 975 psi	노즐부 수압시험 비교
		변위 (mm)	변위 (mm)	비교	변위 (mm)	비교
노즐부 체결면	0도	4.40	3.03	-	5.35	-
	90도	4.23	2.78	-	5.04	-
	180도	4.25	3.55	-	4.76	-
	270도	4.48	3.89	-	5.03	-
	평균	4.34	3.31	-	5.04	-
플렉시블 쉴 체결면	0도	2.67	3.49	-	4.48	-
	90도	2.51	3.22	-	4.14	-
	180도	2.48	3.95	-	3.86	-
	270도	2.62	4.34	-	4.14	-
	평균	2.57	3.75	-	4.16	-
노즐 연결부 체결면	0도	1.73	-0.44	40도 (GT#2)	0.87	-
	90도	1.72	-0.40	130도 (GT#2)	0.90	-
	180도	1.77	-0.45	220도 (GT#2)	0.88	-
	270도	1.86	-0.46	310도 (GT#2)	-	게이지 이상
	평균	1.77	-0.44	-	0.89	-

참고 문헌

1. TR14535PA10000-0001, Kick Motor 노즐부 수압 시험 결과, 2006.1.6
2. TR14535PA10000-0010, KSLV-1 킥 모터 GT#2 노즐부 시험 결과, 2006.4.20